เรื่องเต็มการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 57 ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

The Proceedings of

The 57th KU Annual Conference

SCIENCE TECHNOLOGY and ENVIRONMENT

"ชุมชนโลกาภิวัตน์ สู่สังคมไทยยุคดิจิทัล"

Glocalization to Digitized Thailand

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

เรื่องเต็มการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 57 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

The Proceedings of the 57th 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)

29 มกราคม - 1 กุมภาพันธ์ 2562 (January 29 – February 1, 2019)

ISBN (e-book) 978-616-278-512-2

คำนำ

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ร่วมกับสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กระทรวงดิจิทัลเพื่อเศรษฐกิจและสังคม สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ และสำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย ได้จัดให้มีการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ ๕๗ ระหว่างวันที่ ๒๙ มกราคม - ๑ กุมภาพันธ์ ๒๕๖๒ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเสริมสร้างและพัฒนาคุณภาพของงานวิจัย และเผยแพร่ความรู้ความก้าวหน้าทางด้านวิชาการและเทคโนโลยี ตลอดจนเป็นการแลกเปลี่ยนความรู้และระดมความคิดเห็นระหว่างนักวิชาการ อันจะนำไปสู่แนวทางการสร้างผลงานวิจัยเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมของประเทศชาติต่อไป

เอกสารฉบับนี้รวบรวมเรื่องเต็มผลงานวิจัยภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ทั้งภาคบรรยายและภาคโปสเตอร์ของ **สาขาวิทยาศาสตร์และพันธุวิศวกรรม สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ สาขาอุตสาหกรรมเกษตร และ สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม** ซึ่งได้ผ่านการคัดเลือกจากคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิประจำสาขา และนำเสนอในการประชุมทางวิชาการครั้งที่ ๕๗

ในนามของคณะกรรมการดำเนินงานจัดการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ ๕๗ ขอขอบคุณ นักวิจัย นักวิชาการ คณาจารย์ที่ได้นำผลงานมาเสนอ และผู้ที่สนใจเข้าร่วมการประชุมทางวิชาการในครั้งนี้ ขอขอบคุณคณะกรรมการทุกฝ่ายที่สละเวลา แรงกาย แรงใจและความคิด ร่วมมือกันจัดเตรียมการประชุม จนทำให้การประชุมทางวิชาการครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี



(รองศาสตราจารย์ ดร.ลดาวัลย์ พวงจิตร)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

ประธานคณะกรรมการดำเนินงานจัดการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ ๕๗

ความสมบูรณ์ของการเสนอผลงาน
ในการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 57
ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ประกอบด้วย หนังสือรับรองการมาเสนอผลงาน
และการได้ตีพิมพ์ลงในเรื่องเต็มฉบับสมบูรณ์

เอกสารทางวิชาการ 4/2562
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.12/O66 การบริหารพอร์ตการลงทุนโดยตัวแบบแบล็คโชร์ลและตัวแบบประเมินราคาสินทรัพย์ส่วนทุน..... 1

Portfolio Management by the Black-Scholes Model and Capital Asset Pricing Model

โดย นันทรัตน์ จรีรัตนชาติ และฉัตรชัย เปสี

ภาคโปสเตอร์ (Poster Presentation)

1. วท.พว.1/P17 Relationship between Color Parameters, Total Phenolic Content and Protein Content of Local Thai Rice Varieties.....11

By Wipada Siri-anusornsak Krittaya Petchpoung Siriwan Soiklom and Chanram Roopkham

2. วท.พว.2/P20 Classification of White vs. Brown Rice Using X-Ray Fluorescence Elemental Composition Measurements and Decision Tree Algorithm 18

By Piyanuch Orpong Kanokporn Boonsirichai Sasiphan Khaweerat Jatechan Channuie and Roppon Picha

3. วท.พว.3/P24 การวิเคราะห์ Indole-3-Acetic Acid เชิงปริมาณในสารสกัดจากอาหารเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียด้วยเทคนิค HPLC..... 27

Quantitative Analysis of Indole-3-Acetic Acid in Bacterial Culture Media Extract using HPLC

โดย ศิริวัลย์ สร้อยกล่อม กฤตยา เพชรผึ้ง วิภาดา ศิริอนุสรณ์ศักดิ์ และจันทร์แรม รูปขำ

4. วท.พว.4/P29 Synthesis, Cytotoxicity and *in vitro* Antimalarial Activity of 1-Ethyl-β-carboline; an Indole Alkaloid of *Picrasma javanica* Bl.... 35

By Chalerm Saiin Juggreewut Junwised Kiyosei Takasu and Masataka Ihara

5. วท.พว.5/P32 การกำจัดโครเมียมและสังกะสีในน้ำด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า..... 43
Removal of Chromium and Zinc in Water by Electrochemical Method
โดย สัมพันธ์ สร้อยกล่อม ชานน สกุลอินทร์
และณรงค์ ผังวิวัฒน์
6. วท.พว.6/P33 The Effect of *Plumbago indica* Linn. Root Extracts on Histological Changes of Malaria Infected-Mice Liver..... 51
By Suwimon Phongpakdee Aikkarach Kettawan
and Thanaporn Rungruang
7. วท.พว.7/P39 ฤทธิ์ต้านแบคทีเรียฉวยโอกาสและการเสริมฤทธิ์ยาปฏิชีวนะของส่วนสกัดจากใบผักหวานป่า..... 59
Antibacterial Activities and Synergistic Effect of *Melientha suavis* Pierre with Antibiotic Against Opportunistic Bacteria
โดย วิสาตรี คงเจริญสุนทร มุกดา วันเย็น
และณัฐวดี ฟูเจริญไพบูลย์
8. วท.พว.8/P40 Histological Changes in Liver on Malarial Mouse Model Treated with *Citrus hystrix* DC. Peels Extract..... 68
By Rossukon Renumat Aikkarach Kettawan
Aporn Chunjarunee and Thanaporn Rungruang
9. วท.พว.9/P49 Production of Protein Hydrolysates from Waste of Big-oui Using Papain and Bromelain.....75
By Sunisa Suwannaphan
10. วท.พว.10/P56 การผลิตไบโอเอทานอลจากฟางข้าวโดยปรับสภาพด้วยไมโครเวฟร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์..... 84
Bioethanol Production from Rice Straw by Microwave-Assisted Dilute Sodium Hydroxide Pretreatment
โดย ดวงใจ โอชัยกุล นภาพักตร์ ด้วงเงิน
และเชิดศักดิ์ มณีรัตนรุ่งโรจน์

11. วท.พว.11/P57 การยืนยันชนิดแบคทีเรียที่แยกได้จากลำไส้ส่วนต้นของปลานิลด้วยวิธีทางจุลชีววิทยาและชีววิทยาโมเลกุล.....94
Approval of Isolated Bacteria from the Proximal Intestine of Nile Tilapia Using Microbiological and Molecular Analysis
โดย สุชนิทธิ์ งามกาละ วุฒินันท์ รักษาจิตร์
และคมสัน สัจจะสถาพร

12. วท.พว.13/P60 การดูดซับทางชีวภาพของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมด้วยไซยาโนแบคทีเรียสไปรูลิน่า พลาเทนซิส..... 102
Biosorption of Chromium (VI) by Cyanobacteria *Spirulina platensis*
โดย วุฒินันท์ รักษาจิตร์ สุชนิทธิ์ งามกาละ
ชัยณรงค์ สกุลแถว คมสัน สัจจะสถาพร
ฉันท์ชนก ดวงศรี ธนู แซ่ว่าง และวนิดา ปานอุทัย

13. วท.พว.15/P85 การคัดเลือกและการศึกษาลักษณะจำเพาะของแบคทีเรียทนเค็มที่คัดแยกจากดินในการเป็นแบคทีเรียปฏิปักษ์ต่อราสาเหตุโรคพืชในดิน.....110
Screening and Characterization of Halotolerant Bacteria Isolated from Soils and Analysis of their Potential Against Soilborne Pathogenic Fungi
โดย สุกัญญา เทพธีร์ อัณณชญาน์ มงคลชัยพฤกษ์
เยาวภา อร่ามศิริรุจิเวทย์ และสาวิตร ตระกูลน่าเลื่อมใส

14. วท.พว.16/P86 การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตเห็ดฟาง ด้วยการใช้แบคทีเรียสร้างสปอร์..... 118
Increasing Efficiency of Straw Mushroom Production by Using Endospore Forming Bacteria
โดย พีรพัฒน์ ดวงสร้อยทอง สุรางค์ สุธิราวุธ
อัจฉรา พยัพพานนท์ และเยาวภา อร่ามศิริรุจิเวทย์

15. วท.พว.17/P94 การพัฒนาวิธีวิเคราะห์ปริมาณก๊าซเรดอน-222 ในตัวอย่างน้ำบาดาล.....126
Development Determination of Radionuclide Radon-222 in Groundwater
โดย เฉลิมขวัญ ปิติโสภณางกูร และทัศนีย์ สายเงิน

16. วท.พว.18/P99 การหาปริมาณเปอร์เซ็นต์เถ้าอาหารที่ประชาชนบริโภคในประเทศไทย กับค่าอ้างอิงมาตรฐาน..... 134
Measurement of Percent Ash of Food in Thailand Compared with Reference Standard
โดย เฉลิมขวัญ ปิติโสภณางกูร สุขใจ เกียรติศักดิ์วัฒนา และทัศนีย์ สายเงิน

สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ (Subject: Architecture and Engineering)

ภาคบรรยาย (Oral Presentation)

1. สถ.วศ.1/O18 กระเบื้องดินเผาที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมจากดินตะกอนน้ำประปา, เศษแก้วสีเขียว และดินขาวโคกไม้ลาย..... 143
Eco Friendly Clay Wall Tiles from Sediment Soil, Green Glass Cullet and Kok Mai Lai Clay
โดย อานุภาพ ฟักสังข์ และอุบลรัตน์ หวังรักษ์ดีสกุล
2. สถ.วศ.3/O29 การจำแนกชนิดของความผิดพร่องบนสายส่ง 115 กิโลโวลต์ โดยใช้ตรรกศาสตร์คลุมเครือ..... 151
Fault Classification on 115 kV Transmission Line Using Fuzzy Logic
โดย อดิเทพ จันทับ และประจวบ อินระวงค์
3. สถ.วศ.4/O30 การประเมินผลกระทบของก๊าซปิโตรเลียมเหลวรั่วไหลจากถังกักเก็บในพื้นที่กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมกลั่นน้ำมัน..... 159
Impact Assessment of Liquid Petroleum Gas Release in Petrochemical Refinery
โดย นิลวรรณ พลบุตร และศุภพัชรี รอดเดชา
4. สถ.วศ.5/O31 การศึกษาเครื่องมือตรวจสอบการสัมผัสของล้อคอนทัวร์วิทูร เพื่อตรวจสอบการสัมผัสที่ไม่เหมาะสมระหว่างล้อและราง บริเวณลิ้นประแจของการรถไฟแห่งประเทศไทย..... 167
The Study of Vidura Contour Wheel Contact Gauge to Address Improper Wheel Rail Contact at Switch Point of State Railway of Thailand
โดย ธนวัฒน์ ชาลีคาร กรรมมันต์ ชูประเสริฐ และวิชัย ศิวะโกศิษฐ์

5. สถ.วศ.6/O39 ปัจจัยต่ออุบัติเหตุในโรงงานขึ้นรูปโลหะด้วยเครื่องกด..... 175
Factors for Accidents in Metal Forming Factory by Pressing Machine
โดย มลฤดี โตประดิษฐ์ และดวงฤดี ฉายสุวรรณ
6. สถ.วศ.7/O59 การออกแบบระบบติดตามประสิทธิภาพของห้องเย็นประหยัดด้วยไอโอที.....184
Design of Performance Monitoring Affordable Cold Storage with IoTs
โดย พีรศุษม์ ไชยศรีมณีพรรณ และทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์
7. สถ.วศ.9/O63 องค์ประกอบโครงการบ้านจัดสรรในพื้นที่นิคมอุตสาหกรรมเพื่อรองรับสังคมสูงวัยกรณีศึกษาเขตเศรษฐกิจ อำเภอปลวกแดง จังหวัดระยอง.....192
The Configurations of Housing Estate in the Industrial Areas in Order to Support Aging Society: A Case Study in Pluakdaeng, Eastern Industrial District, Rayong
โดย ตามตะวัน ประยูรรัตน์ และอันธิกา สวัสดิ์ศรี
8. สถ.วศ.11/O70 การพิจารณาผลเบื้องต้นของความแตกต่างระดับหมอนคอนกรีตต่อการทำงานของประแจกลไฟฟ้าสำหรับประแจขนาด 1:6 ของบริษัทรถไฟฟ้า ร.ฟ.ท. จำกัด..... 200
Preliminary Considerations of Effect from Level Difference of Sleepers on Ballasted Track to a Point Machine Operation for a 1:6 Turnout of SRTET Company
โดย เอกชัย พัฒนะประยูรวงศ์ กรรมมันต์ ชูประเสริฐ์
วิชัย ศิวะโกศิษฐ และประพจน์ ขุนทอง
9. สถ.วศ.12/O77 อุปกรณ์สอบเทียบความชื้นในดินมาตรฐาน.....208
Standard Soil Moisture Calibration Chamber
โดย ปริยานุช ยวงใย และทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์
10. สถ.วศ.13/O83 การศึกษาและพัฒนาระบบหยอดปุ๋ยอัตโนมัติตามค่าวิเคราะห์ดินในไร่อ้อย..215
A Study and Development of an Automatic Fertilizer Applicator for Sugar Cane Based on Soil Analysis Result
โดย อานนท์ สายคำฟู และชัยยากร จันทร์สุวรรณ์

11. สถ.วศ.15/O89 ผลของสัดส่วนน้ำยางพาราต่อกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงของซีเมนต์เพสต์ โดยใช้กาวลาเทกซ์เป็นสารเชื่อมประสาน..... 223
Effect of Latex Mixed Ratio on Compressive Strength and Tensile Strength of Cement Paste which Use Latex Glue as Surfactant
โดย สรวิศ เรืองรุ่งชัยกุล และปิยนุช เวทย์วิวรณ์
12. สถ.วศ.16/O93 การศึกษารัศมีครอบคลุมการใช้บริการสถานีรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงินด้วยข้อมูลตำแหน่งมิเตอร์วัดค่าน้ำ.....231
Study of Coverage Area of Mass Transit Station by Water Metering Data
โดย กฤษณ์ กาญจนไวกูณฐ์ เอกชัย ศิริกิจพาณิชย์กูล วิโรจน์ รุโจปการ และอดิชัย พรพรหมินทร์
13. สถ.วศ.17/O94 Effect of Metal Oxides on Properties of Mica-based Glass-ceramics.. 239
By Sahadsaya Prasertwong Sukanda Angkulpipat Thapanee Srichumpong Chanchana Thanachayanont Cristina Leonelli Kallaya Suputtamongkol and Duangrudee Chaysuwan
14. สถ.วศ.18/O95 การศึกษาความเร็วของขบวนรถไฟฟ้า Airport Rail link ที่ใช้ในการเข้าโค้งบริเวณระหว่างสถานีลาดกระบังและสถานีสุวรรณภูมิ เพื่อป้องกันมิให้เกิดค่า Cant Excess ที่เกินกว่าค่ามาตราฐาน..... 247
The Study of Curving Speeds for an SRTET Train to Operate between Lat Krabang and Suvarnabhumi Airport Stations for Preventing Excessive Cant Excess Values
โดย ณศิษฎ์ จีระพันธุ ธัญญะ เกียรติวัฒน์ และวิชัย ศิวะโกศิษฐ
15. สถ.วศ.19/O99 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการดำเนินการก่อสร้างวางท่อจ่ายน้ำประปาบริเวณเขตพื้นที่ของการประปานครหลวง.....254
Factors Affecting Water Pipeline Construction in the Area of Metropolitan Waterworks Authority
โดย เพชร ศรีเพ็ชร์ ก่อโชค จันทวรางกูล และธิดารัตน์ จิระวัฒนาสมกุล

16. สถ.วศ.22/O105 การประยุกต์ใช้วิธีพื้นผิวผลตอบสนองแบบบ็อก-เบห์นเคนสำหรับการพยากรณ์ความขรุขระผิวในการกัดข้างอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง.....262
Application of Box–Behnken Design with Response Surface Methodology for Prediction of Surface Roughness in Side Milling of Aluminum Casting Semi-Solid
โดย สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์ ชาตรี หอมเขียว และวรพงศ์ บุญช่วยแทน

17. สถ.วศ.24/O107 การวิเคราะห์ค่าความเค้นซิงกุลาริตี้บนแผ่นเหล็กบางเจาะรูวงกลมหรือรอยเชื่อมภายใต้แรงดึงโดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์..... 271
Analysis of Stress Singularity on a Thin Steel Plate with a Circular Hole or a Welded Zone under Tension Loading by Using FEM
โดย อิทธิกร อาจหาญ และอรรถพร วิเศษสินธุ์

18. สถ.วศ.25/O108 การจำลองแบบความเค้นสัมผัสที่จมูกตะเฆ่ของประแจมุม 1:12 ของการรถไฟแห่งประเทศไทยโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบพลวัต.....279
Contact Stress Simulation at the Frog of the 1:12 Turnout of the State Railway of Thailand Using Dynamic Explicit Finite Element Method
โดย โอภาส ติรมาศเสถียร ประพจน์ ขุนทอง และวิชัย ศิวะโกศิษฐ

19. สถ.วศ.26/O109 การประเมินความรุนแรงและการจัดลำดับความสำคัญของโครงการด้านความปลอดภัยของการรถไฟแห่งประเทศไทย..... 287
Assessing the Severity and Prioritization of the State Railway of Thailand
โดย กรธัช คนกาญจน์ และฆนิศา รุ่งแจ้ง

20. สถ.วศ.28/O113 การศึกษาสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าร่วมระหว่างพลังงานแสงอาทิตย์และระบบไฟฟ้าพื้นฐานสำหรับเครื่องเติมอากาศในบ่อเลี้ยงปลา.....296
A Performance Study of Solar PV-Electrical Utility Hybrid for Aerator in Fish Pond
โดย เสฏฐวุฒิ แผลงศรี และอัครินทร์ อินทนิเวศน์

21. สถ.วศ.29/O110 Effects of Ceiling Characteristic of Anidolic Lighting System on Daylighting in Office Buildings in Thailand……304
By Bormey Long and Nuanwan Tuaycharoen
22. สถ.วศ.31/O118 การวิเคราะห์การกระจายความเค้นในโครงประธานของรถโบกี้บรรทุกตู้คอนเทรนเนอร์โดยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์..... 313
Analysis for Stress Distribution in Underframe of a Bogie Container Flat Wagon Using FEM
โดย วัชรากร พรหมเศษ และอรรถพร วิเศษสินธุ์
23. สถ.วศ.32/O119 Setting Inflight Service Level for Low Cost Airline Using Data Analytic Approach……320
By Pharita Tarom and Pornthep Anussornnitisarn
24. สถ.วศ.33/O120 การศึกษาการเสื่อมสภาพของโครงสร้างสะพานชนิดคานคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอ จากปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่น โดย FReET-D……..325
Study Degradation of Prestressed Concrete I-Girder Bridge in Term of Carbonation by Using FReET-D
โดย ศักดิพงศ์ สาครประสิทธิ์ วิชัย กิจวัทวรเวทย์
และ Drahomir Novak
25. สถ.วศ.34/O121 An Initial Study on a Source of Curving Noise of a SkyTrain on a Small Curvature Circular Track with Non-Flange Curving…….. 333
โดย Wichai Siwakosit Nutthapat Kooncumchoo
Rachit Rugsasat Niti Sujjawiso
and Sittipong Promla
26. สถ.วศ.35/O122 การปรับปรุงคุณภาพถ่านชาร์จากทะลายปาล์มน้ำมันเปล่าด้วยกระบวนการทอรีแฟคชัน โดยใช้เศษพลาสติกพอลิพรอพิลีน……...341
Upgrading of Char from Torrefaction of Oil Palm Empty Fruit Bunch by Waste Polypropylene
โดย จินต์จุฑานันท์ ฐิตินันท์เมือง เกวลี จอร์โอ
และอภิญญา ดวงจันทร์

27. สถ.วศ.36/O123 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเก็บค่าธรรมเนียมการจราจรคับคั่งในเขตพื้นที่ธุรกิจของกรุงเทพมหานคร.....349
Factors Influencing Congestion Charging in Bangkok Economic Area
โดย ภาวิณี ทูลทิพย์ เหมือนมาศ วิเชียรสินธุ์ และวิโรจน์ รุโจปการ
28. สถ.วศ.37/O124 การแพร่กระจายตัวของรอยแตกในพื้นสะพานคอนกรีตอัดแรงชนิดแผ่นพื้นตัน ด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้น..... 357
Crack Propagation in Prestressed Concrete Plank Girder Bridge by Using Nonlinear-Finite Element Analysis
โดย ภูเบศ เลิศนันทกุล และวิชัย กิจวัทวรเวทย์
29. สถ.วศ.39/O126 การประเมินการแตกร้าวและขนาดของรอยแตกร้าวในสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดแผ่นพื้นโดยใช้การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้น.....365
Evaluation of Crack and Crack Width in RC-Slab Bridge by Using Nonlinear Finite Element Analysis
โดย นฤภู นนทกุลวิวัฒน์ และวิชัย กิจวัทวรเวทย์
30. สถ.วศ.40/O127 การเปรียบเทียบแรงภายในของสะพานขึงระนาบเดี่ยวสามช่วง.....373
Comparison of the Internal Forces of the Three Span Single Plane Cable-Stayed Bridge
โดย สมโพธิ์ วิวิธเกยูรวงศ์ และกฤษฎา สุวรรณไตร
31. สถ.วศ.41/O128 ผลของการใช้สัญญาณอัตโนมัติที่ที่หยุดรถระหว่างสถานีสระแก้วและสถานีวัฒนานครต่อความจุทางสูงสุดของทางรถไฟทางเดี่ยว.....381
Effects of Utilizing Automatic Signals at Stops between Sa Kaeo and Watthana Nakhon Stations to Ultimate Capacities of a Single Track Railway
โดย วิชัย ศิวะโกศิษฐ สุรพล เอี่ยมสะอาด วิรุณศักดิ์ สันติเพ็ชร์ และเอกชัย ศิริกิจพาณิชย์กูล

32. สถ.วศ.42/O129 การพัฒนามือถ่างความละเอียดระดับไมครอนที่ขับเคลื่อนโดยเพียโซอิเล็กทริกสำหรับกระบวนการทดสอบหัวอ่านฮาร์ดดิสก์.....389
Development of a Piezoelectric Micro Gripper for Hard Disk Head Testing Process
โดย วรพงศ์ สุทธิศักดิ์ศรี และดอน อิศรากร
33. สถ.วศ.43/O131 การแครกกิ้งน้ำมันกลั่นหนักโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/ZrO_2 และ SO_4^{2-}/TiO_2/HZSM-5.....397
Catalytic Cracking of Heavy Distillate Oil Using TiO_2/ZrO_2 and SO_4^{2-}/TiO_2/HZSM-5 Catalyst
โดย ณปภัช ดลสิริฤทธิกุล วัชราพรรณ วัฒนสมบัติ และอภิญญา ดวงจันทร์
34. สถ.วศ.44/O132 การศึกษาการบ่งชี้ลักษณะ Fault ด้วยค่าพารามิเตอร์ที่มีนัยสำคัญ.....405
Study of Indication in Fault Characteristics with Significant Parameters
โดย ณัฏฐ์ศรณ์ โชติอัครรัตน์ และเกียรติยุทธ กวีญาณ
35. สถ.วศ.46/O135 การปรับปรุงคุณภาพน้ำมันชีวมวลจากต้นกระถินยักษ์สายพันธุ์ มก.5/7 ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา Ni_3P/HZSM-5 และ Cu-ZnO/$CeO_2/ZrO_2/Al_2O_3$.....413
Upgrading of Bio-oil Derived from Pyrolysis of Giant Leucaena by Ni_3P/HZSM-5 and Cu-ZnO/$CeO_2/ZrO_2/Al_2O_3$ Catalysts
โดย อาคเนย์ ประวัติยากูร และอภิญญา ดวงจันทร์
36. สถ.วศ.47/O133 ทัศนคติของผู้ประกอบการธุรกิจอาหารต่อการออกแบบ..... 419
An Attitude towards Design from Food Business Enterprises
โดย อรช กระแสอินทร์ และพรปวีร์ ดิษฐคำเริง
37. สถ.วศ.48/O138 การวิเคราะห์ฐานรองรับเครื่องประแจกลไฟฟ้า..... 426
Analysis of Base-Plate for Electro-Mechanical Point Machine
โดย สุริยันต์ กระเร็น และประพจน์ ขุนทอง
38. สถ.วศ.49/O139 การพยากรณ์เชิงปริมาณ กรณีศึกษา บริษัทนำเข้าฉนวนกันความร้อน.....433
Qualitative Forecasting: A Case Study of Thermal Insulation Imported Company
โดย พิชามญชุ์ อภิญญานันท์ และเชาวลิต หามนตรี

39. สถ.วศ.50/O140 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจเลือกใช้รถยนต์ไฟฟ้า.....441
Influencing Factor on Electric Vehicle (EV) Purchasing Decision
โดย เอกชัย ศิริกิจพาณิชย์กูล ณรงค์ชัย ศรีขวัญเจริญ
และสโรช บุญศิริพันธ์
40. สถ.วศ.51/O142 การเลือกชนิดสารไวแสง ระยะเวลาการผสมและชนิดหลอดไฟสำหรับเพิ่มค่าความหนาแน่นของการเชื่อมขวางของฟิล์มจากยางธรรมชาติที่ผ่านการพรีวัลคาไนซ์ด้วย UV.....448
Selection of Appropriate Photoinitiator Type, Mixing Time, and Lamp Type for Enhancing Crosslink Density of UV-Prevulcanized Natural Rubber Films
โดย ศุทธินี แก้วเมืองคำ ปณิธิ วิรุฬห์พอจิต
และนันทิยา หาญศุภลักษณ์
41. สถ.วศ.52/O143 การศึกษาปัจจัยของผู้ขับขี่รถยนต์ส่วนบุคคลที่ไม่ใช้บริการรถไฟฟ้า กรณีศึกษารถไฟฟ้ามหานครสายฉลองรัชธรรม.....456
Preferences of Mass Transit Non User : A Case Study of Drivers Decision Choices on MRT Chalong Ratchadhum Line
โดย เอกชัย ศิริกิจพาณิชย์กูล ณปภัช ชาตรูประชีวิน
และเหมือนมาศ วิเชียรสินธุ์
42. สถ.วศ.53/O158 อิทธิพลจากความชื้นในการบ่มต่อการพัฒนากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์..464
Effects of Curing Conditions on Strength Development of Soil Cement
โดย ศุภกิจ นนทนานันท์ ชยพล กิตติวิวัฒนพงศ์
และวสุ พิพัฒน์เจษฎากุล
43. สถ.วศ.54/O69 การศึกษาทดลองเปรียบเทียบของอุปกรณ์วัดอุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกส์.....472
A Study of Compare of Thermocouple in Ceramic Kiln
โดย สิทธิโชค สืบแต่ตระกูล และทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์

44. สถ.วศ.56/O136 การผลิตเกรย์วอเตอร์จากการบำบัดน้ำผิวดินปนเปื้อนน้ำเสียชุมชนด้วยการตกตะกอนเคมีและการกรองด้วยจีโอเทกซ์ไทล์ กรณีศึกษาน้ำคูมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์..... 480

Gray Water Production from Contaminated Surface Water Using Onsite Chemical Precipitation and Geotextile Filtration; Case Study of Canal Water, Kasetsart University

โดย จินต์จุฑา ไวทยวงศ์สกุล นัทกาญจน์ ประเสริฐสังข์ และจีมา ศรลัมพ์

45. สถ.วศ.57/O164 การพัฒนาแผนการปฏิบัติงานของรถเกี่ยวนวดข้าวด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม..... 488

Development of Harvesting Planning of Rice Combine Harvester by Using Genetics Algorithm

โดย สหชาติ เลิศศิริเภสัช เกรียงไกร แก้วตระกูลพงษ์ ถวัลย์ศักดิ์ เผ่าสังข์ สมพงษ์ เจษฎาธรรมสถิต รักศักดิ์ เสริมศักดิ์ และยุพดี ฟูประเสริฐ

46. สถ.วศ.58/O174 Effect of Multiple Curved Light Shelves on Daylighting in University Classrooms..... 497

By Trodet Sok and Nuanwan Tuaycharoen

47. สถ.วศ.59/O183 การให้ความรู้ด้านเทคนิคของโครงการที่ต้องประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมระหว่างการจัดทำการมีส่วนร่วมของประชาชนกรณีศึกษา โครงการด้านพลังงาน.....507

Technical Information Communication during Public Participation for Environmental Impact Assessment; the Case Study on Energy Related Project

โดย ชโลทร จันทร์เศษ และจีมา ศรลัมพ์

ภาคโปสเตอร์ (Poster Presentation)

1. สถ.วศ.2/P105 Preliminary Consideration of a Cause of Wheel Thread Damage for the SDA3 Locomotive Wheels of the State Railway of Thailand..... 521

By Wichai Siwakosit Supagon Rakvongbut Sittipong Promla and Thana Phupuekrat

2. สถ.วศ.10/P63 การศึกษาความเข้มข้นในบรรยากาศของเบนซีนบริเวณกลุ่มนิคมอุตสาหกรรมในพื้นที่มาบตาพุด.....529

Concentration of Benzene in Ambient Air of Map Ta Phut Industrial Complex Area

โดย เจนจิรา สันทาลุนัย และพิชญ์นรี ลลิตาภรณ์

3. สถ.วศ.20/P72 ข้อเสนอแนะการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำในสภาวะการใช้ประโยชน์ที่ดินที่เปลี่ยนแปลงของลุ่มน้ำคลองวังหีบ จังหวัดนครศรีธรรมราช.....537

Recommendations for Managing Water Resources in Changing Land Use Conditions of Khlong Wang Heep Basin, Nakhon Si Thammarat Province

โดย บริวัฒน์ ชัยงาม และสิตางศุ์ พิลัยหล้า

4. สถ.วศ.55/P76 การศึกษาวิธีการประเมินสภาพระบบเคเบิลใต้ดิน.....545

A Study of Condition Assessment Method for Underground Cable Systems

โดย นาตยา คล้ายเรือง อรอุไร หนูหอม และประภัสสรา คำวงค์ษา

สาขาอุตสาหกรรมเกษตร (Subject: Agro-Industry)

ภาคบรรยาย (Oral Presentation)

1. อก.3/O7 ลักษณะเฉพาะและสมบัติของโฟมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชผสมเส้นใยมะพร้าวดัดแปรพื้นผิว..... 555

Characteristics and Properties of Foam-Structured Thermoplastic Starch (TPS) and Surface Modified Coconut Fiber

โดย กัญญพัชร คล้ายรัศมี ปิยะวณี จริยะสกุลโรจน์ เลอพงศ์ จารุพันธ์ และวาณี ชนเห็นชอบ

2. อก.8/O10 Synthesis and Characterization of Poly(ethylene glycol) Methyl Ether-Grafted Chitosan..... 564

By Pawika Towongphaichayonte and Rangrong Yoksan

3. อก.9/O11 The Influence of Temperature on the Biofilm Formation of *Pseudomonas aeruginosa* and *Staphylococcus aureus* under Simulated Condition in the Poultry Processing Plant..... 572

By Pawarisa Boonkoy and Warapa Mahakarnchanakul

4. อก.12/O185 Charcoal Types Affected the Carcinogenic Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Grilled Meat 580

By Nattada Santisavekun Jak-anan Malarut and Kanithaporn Vangnai

5. อก.13/O12 Fabrication of Coir Microfibers by Acid Hydrolyses for Bio-Based Composites 588

By Patra Chotiprayon and Rangrong Yoksan

6. อก.17/O13 Determination of AFB1, AFB2, AFG1, AFG2, Citrinin, OTA and Zearalenone in Thai Glutinous Rice 596

By Thanapoom Maneeboon Chananya Chuaysrinule Chanram Roopkham and Warapa Mahakarnchanakul

7. อก.21/O20 การศึกษาการใช้ไรซ์บัตเตอร์ในการผลิตอิมัลชัน..... 604

Study of the Production of Emulsion Using Rice Butter

โดย ปุญยวีร์ รุ่งประเสริฐผล และโสภาค สอนไว

8. อก.27/O68 Solvent Extraction and Antioxidant Capacity of Crude Extracts from White Mugwort (*Artemisia lactiflora*)……..…… 612
By Nacha Udomwasinakun and Tantawan Pirak
9. อก.29/O71 การสกัดสารเพิ่มรสชาติและไลโคปีนจากมะเขือเทศ……620
Extraction of Flavor Enhancer and Lycopene from Tomato
โดย อภิชญา แซ่เต๋ง ณัฏฐา เลาหกุลจิตต์
และอรพิน เกิดชูชื่น

ภาคโปสเตอร์ (Poster Presentation)

1. อก.1/P4 การพัฒนาข้าวเกรียบปลาสำเร็จรูปทดแทนด้วยแป้งกล้วยบางส่วน……...629
Development of Instant Fish Cracker Partial Substituted with Banana Flour
โดย ศรันยา บุญมาเลิศ และเสาวณีย์ เลิศวรสิริกุล
2. อก.2/P5 การพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวที่มีส่วนผสมของเนื้อปลาด้วยแป้งกล้วย...637
Development of Fish Snack Product with Banana Flour
โดย อารียา ปอเจริญ และเสาวณีย์ เลิศวรสิริกุล
3. อก.4/P6 Control of *Alicyclobacillus acidoterrestris* Spores by Okra (*Abelmoschus esculentus*) Beverage……645
By Chatmanee Nampuak and Kullanart Tongkhao
4. อก.5/P7 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจซื้อผลิตภัณฑ์เปลี่ยนสีผมเพื่อปิดผมขาว ของผู้บริโภค.....653
Factors Affecting Consumers' Purchase Decisions on Gray Hair Coloring Products
โดย ณัฐนิช ดิษฐถาพร กรทิพย์ วัชรปัญญาวงศ์ เตชะเมธีกุล
และรังสิมา ชลคุป
5. อก.6/P8 ผลของการเติมหัวเชื้อซาวร์โดต่อสมบัติทางกายภาพของขนมปัง ที่มีแป้งข้าวเจ้าเป็นส่วนผสมหลัก……661
Effect of Sourdough Culture Addition on Physical Properties of Rice Flour-based Bread
โดย ปวีณ์สุดา ขีปนวัฒนา นันทวัน เทอดไทย
และวลัยรัตน์ จันทรปานนท์

6. อก.7/P9 ผลของการควบคุมสภาพบรรยากาศต่อคุณภาพของเมล่อนตัดแต่งพร้อมบริโภค.....670
The Effect of Controlled Atmosphere Storage on the Quality Changes of Fresh-Cut Melon
โดย ปฐมาวดี น่วมด้วง และภัทรินทร์ ลีลาภิวัฒน์
7. อก.10/P11 ผลของไขมันแข็งต่อโดขนมปังแช่แข็งที่ใช้ยีสต์ก่อนและหลังการอบ.....679
Effect of Hard Stock Fat on Frozen Yeast Dough Before and After Baking
โดย รัชชดา ลตวรรณ์ และปาริฉัตร หงสประภาส
8. อก.11/P13 A Study on Spore Hydrophobicity and Spore Survivability of *Clostridium sporogenes* at Various Temperatures on Model Food Contact Surfaces 687
By Anandu Chandra Khanashyam and Pathima Udompijitkul
9. อก.14/P18 การเปรียบเทียบผลของวิธีการทำให้เกิดการกลายพันธุ์ทางกายภาพและเคมีต่อการผลิตสารซิตรินินของเชื้อรา *Monascus purpureus* KUPM5..... 695
Comparison the Effect of Physical and Chemical Mutagenesis on Citrinin Production by *Monascus purpureus* KUPM5
โดย สิทธิโชค เกตุแก้ว วีระสิทธิ์ สรรพมงคลไชย มาซาโตชิ โกโต และสุมัลลิกา โมรากุล
10. อก.15/P19 การพัฒนาซองบริโภคได้ต้านออกซิเดชันสำหรับผลิตภัณฑ์น้ำมัน.....702
Development of Antioxidant Edible Pouch for Oil Product
โดย อัจฉราวรรณ ศรีษา กฤตภาส พฤกษ์ภานุกร สาธิตา หงษ์ลอย ภัทรานิษฐ์ กลิ่นมาลัย และณัฐดนัย หาญการสุจริต
11. อก.16/P21 Fabrication of Chitosan-Coated Ascorbyl Dipalmitate Nanoparticles by Rapid Expansion of Subcritical Solutions Coupled with Ionic Gelation 711
By Yuntia Astutisari Rangrong Yoksan and Amporn Sane

12. อก.18/P23 ผลของสารละลายเบสต่อคุณภาพทางกายภาพและทางเคมีของแป้งข้าวเจ้าและลักษณะเนื้อสัมผัสของตัวลอดช่องไทย..... 719
Effect of Alkaline Solutions on Physical and Chemical Properties of Rice Flour and Textural Property of Thai Lod-Chong
โดย กาญจนา เจริญพิริยะ กมลวรรณ แจ้งชัด อนุวัตร แจ้งชัด และศิวาพร โอเจริญ

13. อก.19/P25 อิทธิพลของการดึงยืดสองทิศทางและการเติมสารเสริมสภาพพลาสติกต่อสมบัติทางกายภาพของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมพอลิเอทิลีนไกลคอล.....728
Influences of Biaxial Stretching and Plasticizer Addition on Improved Physical Properties of Poly(Lactic Acid)/Poly(Ethylene Glycol) Film
โดย ณัฏฐพล โรจนตัณฑ์ นพดล เกิดดอนแฝก และปิยะวณี จริยะสกุลโรจน์

14. อก.23/P55 การประเมินปริมาณโปรตีนในแป้งฟลาวและสตาร์ชมันสำปะหลังด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี..... 738
Evaluation of Protein Content of Cassava Flour and Starch Using Near Infrared Spectroscopy
โดย อรวรรณ จิตต์ธรรม และจารุวรรณ บางแวก

15. อก.24/P103 การพัฒนาผลิตภัณฑ์กล้วยกวนโดยใช้สับปะรด สตรอว์เบอร์รี และโปรตีนถั่วเหลืองสกัด.....746
Development of Banana Paste Product Using Pineapple, Strawberry and Soy Protein Isolate
โดย นัฐวุฒิ วิเศษโสภา และปิ่นมณี ขวัญเมือง

16. อก.26/P59 การศึกษาสมบัติทางกลและกายภาพของกระดาษหัตถกรรมจากเยื่อทะลายปาล์มและเยื่อปอสาเคลือบด้วยกลูโคแมนแนน..... 754
Comparative Study on Mechanical and Physical Properties of Handmade Paper from Oil Palm Empty Fruit Bunches and Mulberry Coated with Glucomannan
โดย รังสิมา ชลคุป วุฒินันท์ คงทัด สุธีรา วิทยากาญจน์ และจิรชยา บุญญฤทธิ์

17. อก.28/P61 Effect of Emulsifiers on Pasting Properties of Rice Flour and Alkaline Rice Noodle Qualities 763
By Adisa Khachadpai and Masubon Thongngam
18. อก.30/P64 ผลของกระบวนการเปิดเจาะลูกมะพร้าว และสารโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของน้ำมะพร้าวในระหว่างการเก็บรักษา..... 771
Influence of Opening Coconut Fruit and Sodium Metabisulphite on Quality Changes of Coconut Water During Storage
โดย สุธาทิพย์ ชูศักดิ์ และพิสิฏฐ์ ธรรมวิถี
19. อก.31/P65 ผลของการเติมเนื้อตาลผงต่อคุณภาพของชูครีม..... 780
Effects of Adding Palmyra Palm (*Borassus abellifer* L.) Powder on Qualities of Choux Cream
โดย ลินจง สุขลำภู จุฑามาศ เพชรรอด
และปณิธาน มูฮัมหมัด
20. อก.33/P66 Volatile Compounds in Robusta Instant Coffee 788
By Yatip Puttatananun and Sasitorn Tongchitpakdee
21. อก.34/P67 ผลของสารละลายเบสต่อสมบัติทางเคมีเชิงกายภาพของแป้งข้าวเจ้า.....796
Effect of Alkaline Solutions on Physicochemical Properties of Rice Flour
โดย วาสนา นาราศรี กมลวรรณ แจ้งชัด อนุวัตร แจ้งชัด
และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ
22. อก.36/P70 Reduction of Diacetyl Content in Lager Beer Affected by Valine Supplementation 805
By Sreymom Tith Ulaiwan Withayagiat
Yaowapa Lorjaroenphon and Siree Chaiseri
23. อก.38/P73 Effect of Rice Bran Wax Oleogel as Fat Replacement on Cake Quality 815
By Thipsuda Suvannan and Masubon Thongngam

24. อก.42/P79 การทดแทนแป้งสาลีด้วยผงฟักทองญี่ปุ่นต่อสมบัติทางกายภาพและเคมีของขนมปัง..... 823
Substitution of Wheat Flour with Japanese Pumpkin Powder on Physical and Chemical Properties of Bread
โดย ธิดารัตน์ หน่อสุวรรณ จุรารัตน์ ธรรมศรี ธนพร แซ่ลิ้ว และกัญจน์พัชร์ อุปลศิลป์
25. อก.43/P80 ผลของสนามไฟฟ้าแบบปานกลางภายใต้ความดันต่อการสกัดสารฟีนอลิกทั้งหมด แอนโทไซยานินทั้งหมด และเปอร์เซ็นต์สีของพอลิเมอร์จากรำข้าวไรซ์เบอร์รี่..... 831
Effect of Moderate Electric Field with Overriding Pressure on Extraction of Total Phenolics, Total Anthocyanins and Percent Polymeric Color from Riceberry Bran
โดย ภัคจีรกร แย้มเกษร และปิติยา กมลพัฒนะ
26. อก.44/P104 การเพิ่มการรอดชีวิตของจุลินทรีย์โพรไบโอติกในน้ำสับปะรดโดยวิธีการห่อหุ้มด้วยแอลจิเนต.....839
The Enhancement of the Probiotic Viability in Pineapple Juice by Using Alginate Encapsulation
โดย ไกลกว่า วุฒิเสน ณัฏฐา เลาหกุลจิตต์ อรพิน เกิดชูชื่น และรัตติยา แววนุกูล

สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (Subject:Natural Resources and Environment)

ภาคบรรยาย (Oral Presentation)

1. ทส.7/O80 ปริมาณธาตุอาหารหลักของพืชในปุ๋ยหมักที่ผลิตจากตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปาร่วมกับขยะอินทรีย์.....849
Macronutrient Quantity of Plant in Compost from Waterworks Soil Sludge Combination with Organic Waste
โดย นนทพร ประเสริฐกุล วัชรพงษ์ วาระรัมย์ อรอนงค์ ผิวนิล และธนิศร์ ปัทมพิฑูร

2. ทส.8/O84 ความเป็นไปได้ของการใช้ตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปาร่วมกับขยะอินทรีย์ทดแทนดินนา ในการหมักปุ๋ยอินทรีย์ด้วยเทคโนโลยีกล่องคอนกรีต.....856
Possibility of Waterworks Plant Sludge Instead of Paddy Soil for Making Compost from Organic Waste by Concrete Box Technology
โดย พรภัสสร ศุขะพันธุ์ วัชรพงษ์ วาระรัมย์ อรอนงค์ ผิวนิล และธนิศร์ ปัฑมพิฑูร

3. ทส.9/O92 การประยุกต์ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์เพื่อประเมินความเปราะบางด้านกายภาพของโครงสร้างบ้านเรือนที่ได้รับผลกระทบจากอุทกภัย พื้นที่คาบสมุทรสทิงพระ จังหวัดสงขลา.....864
Using GIS to Estimate the Physical Vulnerability of Building Structures for Coastal Flood in Sating-Pra Peninsula, Songkhla
โดย มุทริกา บุญสิทธิ์ กาญจนา นาคะภากร อัจฉรา อัศวรุจิกุลชัย และสุเพชร จิรขจรกุล

4. ทส.10/O145 การวิเคราะห์ทางการเงินของการนำเข้าไม้แปรรูปจากประเทศมาเลเซียปี พ.ศ.2560.....873
Financial Analysis of Lumber Imported from Malaysia, 2017
โดย สุนิสา ลำคำ พสุธา สุนทรห้าว และสุรินทร์ อ้นพรม

5. ทส.15/O154 การประเมินหาปริมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดิน จากข้อมูลภาพดาวเทียม Landsat 8 ในพื้นที่วนอุทยานนครไชยบวร จังหวัดพิจิตร.....881
Estimation of Above Ground Biomass Using Landsat 8 Satellite Imagery in Nakhon Chai Boworn Forest Park, Phichit Province
โดย กฤติณ สุดโต วีระภาส คุณรัตนสิริ และวันชัย อรุณประภารัตน์

6. ทส.16/O156 การใช้ประโยชน์และการจัดการของป่าในป่าชุมชนป่าเขาอังคาร จังหวัดบุรีรัมย์.....890
Utilization and Management of Non-timber Forest Products at Pakhao Angkarn Community Forest, Buri Rum Province
โดย สุวิมล จันทร์น้อย วิพักตร์ จินตนา และนิตยา เมี้ยนมิตร

7. ทส.17/O161 การปลดปล่อยแก๊สมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์จากบ่อทิ้งซากไก่เนื้อโคราชในฟาร์ม..... 898
CH_4 and CO_2 Emissions from Korat's Chicken Carcass Pit in a Farm
โดย ธัชชัย เยี่ยมสูงเนิน และนเรศ เชื้อสุวรรณ
8. ทส.18/O162 ถิ่นอาศัยที่เหมาะสมของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมขนาดใหญ่ ในเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าภูเขียว จังหวัดชัยภูมิ..... 907
Suitable Habitat of Large Mammals at Phu Khieo Wildlife Sanctuary, Chaiyaphum Province
โดย คชกริช ผลานิสงค์ ยงยุทธ ไตรสุรัตน์ นริศ ภูมิภาคพันธ์ ดวงใจ ศุขเฉลิม และสุชาติ โภณชงค์
9. ทส.19/O172 การศึกษากระบวนการโอโซนเนชันร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษ..... 917
The Study of Catalytic Ozonation in Effluent Pulp and Paper Industry
โดย ธรณินทร์ ส้มเกิด และภัชราภรณ์ สุวรรณวิทยา
10. ทส.20/O173 ความหนาแน่นและโครงสร้างประชากรของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมขนาดเล็กอันดับสัตว์ฟันแทะ บริเวณพื้นที่ จังหวัดสมุทรสงคราม..... 925
Density and Population Structure of Small Mammals in Order Rodentia in Samut Songkhram Province, Thailand
โดย สมเกียรติ กล้าแข็ง เกรียงศักดิ์ หามะฤทธิ์ รองลาภ สุขมาสรวง และประทีป ด้วงแค

ภาคโปสเตอร์ (Poster Presentation)

1. ทส.2/P2 การใช้ประโยชน์พันธุ์ไม้ป่าชายเลน หมู่บ้านป่ายาง ตำบลกะไหล อำเภอตะกั่วทุ่ง จังหวัดพังงา..... 937
Utilization of Mangrove Tree Species in Pa Yang Village, Kalai Sub-district, Takua Thung District, Phang Nga Province
โดย นิติญา สังขนันท์ ธิดารัตน์ คำล้อม และกาญจนา วรรณจิตร์

2. ทส.4/P10 ศักยภาพของป่าต่อการเพิ่มพูนปริมาณการสะสมคาร์บอน: กรณีศึกษาป่าดิบชื้นโรงเรียนบ้านโหล๊ะท่อม อำเภอป่าพะยอม จังหวัดพัทลุง.....945
Potential of Forest for Increasing the Carbon Storge : A Case Study of Tropical Rain Forest at Ban Lo Thom School PhapayomDistric, Phatthalung Province
โดย อานุช คีรีรัฐนิคม และสุภฎา คีรีรัฐนิคม
3. ทส.5/P28 รูปแบบการปรับปรุงน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียให้สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำ954
Wastewater Improvement Model for Recycling Reusable Water
โดย นันทวัฒน์ เนติจรัสโรจน์ ณภัทร โพธิ์วัน
และกัญจน์ ศิลป์ประสิทธิ์
4. ทส.11/P88 ผลของสารต้านเชื้อราในกล่องกระดาษบรรจุภัณฑ์ ต่อเชื้อโรคเกสรดำของกล้วยไม้ตัดดอก เพื่อยืดอายุการเก็บรักษา.....962
Effect of Antifungal Agents in Packaging Container on Black Anther Disease of Orchid Cut Flowers for Storage Life Extension
โดย บังอร นกครุฑ บัวผัน พวงศิลป์
และ สาวิตรี พิสุทธิ์พิเชฏฐ์

สาขาวิทยาศาสตร์และพันธุวิศวกรรม

Subject: Science and Genetic Engineering

ภาคบรรยาย

Oral Presentation



KU
KASETSART
UNIVERSITY

การบริหารพอร์ตการลงทุนโดยตัวแบบแบล็คโชร์ลและตัวแบบประเมินราคาสินทรัพย์ส่วนทุน

Portfolio Management by the Black-Scholes Model and Capital Asset Pricing Model

นันทรัตน์ จรีรัตนชาติ[1*] และ ฉัตรชัย เปสี[1]

Nantarat Jareerattanachart[1*] and Chatchai Pesee[1]

บทคัดย่อ

ในการวิจัยครั้งนี้ต้องการศึกษาค่าผลตอบแทนและค่าโวลาติลิตี้ โดยใช้ตัวแบบแบล็คโชร์ลและตัวแบบประเมินราคาสินทรัพย์ส่วนทุน นอกจากนั้นยังได้ศึกษามูลค่าความเสี่ยงและค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของราคาหุ้นแต่ละตัวเพื่อช่วยในการตัดสินใจในการจัดพอร์ตการลงทุนซึ่งในงานวิจัยจะเลือกหุ้นที่ดีที่สุดจากกลุ่มการลงทุน 3 กลุ่ม คือ กลุ่มธนาคาร กลุ่มพลังงานและกลุ่มการสื่อสารของตลาดหลักทรัพย์แห่งประเทศไทย ตั้งแต่วันที่ 4 มกราคม ถึง 31 มีนาคม 2016 แต่ละกลุ่มการลงทุนของงานวิจัยซึ่งจะพิจารณามูลค่าความเสี่ยงและค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ เพราะมูลค่าความเสี่ยงจะหมายถึงความเสี่ยงในการลงทุนซึ่งจะเป็นค่าความเสียหายในการลงทุนที่เราจะยอมรับได้ภายใต้สภาวการณ์ที่ตลาดปกติ และในขณะเดียวกันจะพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของหุ้นแต่ละคู่ว่ามีความสัมพันธ์กันมากน้อยแค่ไหน ผลของงานวิจัยนี้ยังพบอีกว่าตัวแบบแบล็คโชร์ลนั้นดีกว่าตัวแบบประเมินราคาสินทรัพย์ส่วนทุนสำหรับการเลือกหุ้นในกลุ่มนี้ในตอนท้ายของบทความ

ABSTRACT

The purpose of this paper is to study the return and volatility of stock prices by the Black-Scholes model and the capital asset pricing model (CAPM). This study provides comparative analysis of the Value at Risk (VaR) and the correlation of stock prices. In order to examine the efficiency of the Black-Scholes model and the CAPM, several numerical experiments of three different types of stock such as Health(HELTH), Bank(BANK), and Energy(ENERG) groups of the Stock exchange of Thailand(SET) from 4 January to 31 March 2016 are also included for comparison purpose. Thus, the numerical experiments show that the return of stocks by the Black-Scholes model is higher than the CAPM. Furthermore, this study also provides the numerical experiments of the Value at Risk (VaR) which is a measure of the risk of investments. It also estimates how much a set of investments might lose, given normal market conditions, in a set time and the correlation is a statistical technique that can show whether and how strongly pairs of variables are related. Finally, it can be concluded that the Black-Scholes model is better than the CAPM for this case in the last section.

Key Words: Value at risk, correlation, Portfolio, CAPM

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

[1]ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

คำนำ

การศึกษาครั้งนี้ พิจารณาผลตอบแทนเป็นส่วนต่างของราคาที่เปลี่ยนแปลงไป และความเสี่ยงของราคาหุ้นที่เกิดขึ้นในตลาดหลักทรัพย์แห่งประเทศไทย ซึ่งมีการเก็บบันทึกในรูปของราคาปิดทุกวันที่เปิดทำการโดยจากใช้สองวิธีการ คือ ตัวแบบแบล็คโชร์ล ซึ่งพิจารณาค่าโวลาติลิตี้(Volatility)หรือความแปรปรวนของราคาหุ้นในรูปของลอการิทึม และค่าผลตอบแทน(Return)ในรูปของผลต่างของราคาหุ้นในรูปของลอการิทึม และตัวแบบประเมินราคาสินทรัพย์ส่วนทุน(CAPM) ซึ่งพิจารณาความเสี่ยงและอัตราผลตอบแทนที่คาดหวังบนความเสี่ยงมาเปรียบเทียบผลลัพธ์ในการจัดพอร์ตการลงทุนโดยใช้วิธีของตัวแบบแบล็คโชร์ล ตัวแบบประเมินราคาสินทรัพย์ส่วนทุน และแบบผสม เพื่อเลือกใช้วิธีการที่ดีที่สุดประกอบการตัดสินใจระหว่างความเสี่ยงและผลตอบแทน ซึ่งวัดจากมูลค่าความเสี่ยงและเปอร์เซ็นต์ผลตอบแทนที่ได้รับ

อุปกรณ์และวิธีการ

เลือกหุ้นที่นำมาใช้ในการศึกษา

เลือกหุ้นมา 3 กลุ่ม โดยเลือกจากหุ้นที่มั่นคงและเป็นที่รู้จัก คือ กลุ่มธนาคาร กลุ่มพลังงานและกลุ่มการสื่อสาร โดยเลือกกลุ่มละ 3 ตัว คือ กลุ่มธนาคาร ได้แก่ BAY KTB SCB กลุ่มพลังงาน ได้แก่ BCP CKP ESSO และกลุ่มการสื่อสาร ได้แก่ ADVANC DTAC TRUE โดยใช้ข้อมูลตั้งแต่วันที่ 4 มกราคม ถึง 31 มีนาคม 2016 เนื่องจากเป็นงานวิจัยที่ทำต่อเนื่องจากงานวิจัยเดิมที่เริ่มทำวิจัยและเก็บรวบรวมข้อมูลในปี 2016

การคำนวณโวลาติลิตี้และผลตอบแทนจากตัวแบบแบล็คโชร์ล

$$dS_t = \mu S_t dt + \sigma S_t dW_t$$

เมื่อ S_t คือ ราคาของหุ้น ณ เวลา t

σ คือ ค่าโวลาติลิตี้หรือค่าความผันผวนของราคา

μ คือ ค่าดริฟท์

และ W_t คือ การเคลื่อนที่แบบบราวน์ ณ เวลา t

ผลสรุปของสมการตัวแบบแบล็คโชร์ล คือ $S_t = S_0 e^{\sigma W_t + \left(\mu - \frac{\sigma^2}{2}\right)t}$

จากนั้น take ln จะได้ $ln\, S_t = ln\, S_0 + \sigma W_t + \left(\frac{\mu - \sigma^2}{2}\right)t$

$$ln\, \frac{S_t}{S_0} = \left(\mu - \frac{\sigma^2}{2}\right)t + \sigma W_t$$

จะได้สมการที่ใช้ในการคำนวณเพื่อหาค่าผลตอบแทน คือ

$$R_t = ln\left(\frac{S_t}{S_{t-q}}\right)$$

โดย S_t คือ ราคาปิดของหุ้น ณ วันที่ t

q คือ ระยะเวลาที่ต้องการให้ครอบคลุม เช่น $q = 1$ เป็นรายวัน

สมการที่ใช้ในการคำนวณเพื่อความแปรปรวนของตัวอย่าง คือ

$$S^2 = \sum_{t=1}^{N} \frac{(R_t - \bar{R})^2}{n-1}$$

สมการที่ใช้ในการคำนวณเพื่อ μ และ σ คือ

$$\mu = \frac{\bar{R} - \frac{S^2}{2}}{\Delta t} \quad \text{และ} \quad \sigma = \frac{S}{\sqrt{\Delta t}}$$

เมื่อ Δt คือ จำนวนวันที่ตลาดหลักทรัพย์เปิดทำการตลอดปี

การคำนวณความเสี่ยงและผลตอบแทนจากตัวแบบประเมินราคาสินทรัพย์ส่วนทุน(CAPM)

1 คำนวณอัตราผลตอบแทนรายวันของตลาดหลักทรัพย์(SET) จาก

$$R_m = \frac{P_{mt} - P_{mo}}{P_{mo}} \times 100$$

โดย R_m คือ อัตราผลตอบแทนรายวันของตลาดหลักทรัพย์

P_{mt} คือ ดัชนีตลาดหลักทรัพย์ ณ เวลาตลาดปิดของวันที่ t

P_{mo} คือ ดัชนีตลาดหลักทรัพย์ ณ เวลาตลาดปิดของวันที่ $t-1$

2 คำนวณอัตราผลตอบแทนรายวันของหุ้น จาก

$$R_j = \frac{P_{jt} - P_{jo}}{P_{jo}} \times 100$$

โดย R_j คือ อัตราผลตอบแทนรายวันของหุ้น

P_{jt} คือ ราคาปิดรายวันของหุ้น ณ วันที่ t

P_{jo} คือ ราคาปิดรายวันของหุ้น ณ วันที่ $t-1$

3 อัตราผลตอบแทนของหลักทรัพย์ที่ปราศจากจากความเสี่ยง

ในการคำนวณเลือกใช้พันธบัตรรัฐบาล โดยอัตราผลตอบแทน คือ 1.4033 ต่อสามเดือน เมื่อหาผลตอบแทนเฉลี่ยต่อวัน 1.4033/60 ดังนั้นผลตอบแทนเฉลี่ยต่อวัน คือ 0.0234

4 คำนวณค่าความแปรปรวนร่วม (Covariance)ของหุ้นใด ๆ และตลาดหลักทรัพย์ หรือค่าเบต้า จาก

$$\beta_j = \frac{Cov(R_j, R_m)}{Var(R_m)} = \frac{\sigma_{R_j R_m}}{\sigma^2_{R_m}}$$

โดย β_j คือ ค่าเบต้าหรือสัมประสิทธิ์แสดงความเสี่ยงที่เป็นระบบของหุ้น j

$Cov(R_j, R_m)$ คือ ความแปรปรวนร่วมของหุ้น j และตลาดหลักทรัพย์

$Var(R_m)$ คือ ความแปรปรวนของหุ้น j

5 สมการตัวแบบประเมินราคาสินทรัพย์ส่วนทุน(CAPM) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบแทนและความเสี่ยง คือ

$$E(R_j) = R_f + [E(R_m) - R_f]\beta_j$$

โดย $E(R_j)$ คือ อัตราผลตอบแทนที่คาดหวังบนความเสี่ยงของหุ้น j

R_f คือ อัตราผลตอบแทนของหลักทรัพย์ที่ปราศจากความเสี่ยงค่า $(\beta = 0)$

$E(R_m)$ คือ อัตราผลตอบแทนเฉลี่ยรายวันจากตลาดหลักทรัพย์

β_j คือ ค่าเบต้าหรือสัมประสิทธิ์แสดงความเสี่ยงที่เป็นระบบของหุ้น j

การคำนวณมูลค่าความเสี่ยง

$$VaR = Z_\alpha \sigma$$

โดย Z_α คือ ค่าคะแนนมาตรฐาน ณ ระดับความเชื่อมั่นที่กำหนด

σ คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราผลตอบแทน และหาจาก

$$\sigma_A = \sqrt{\sum_{t=1}^{N} \frac{(R_t - \bar{R})^2}{N-1}}$$

การคำนวณหาค่าความแปรปรวนร่วม

$$\sigma_{AB} = \sum_{t=1}^{N} \frac{(R_{A,t} - \bar{R}_A)(R_{B,t} - \bar{R}_B)}{N-1}$$

เมื่อ $R_{A,t}$ และ $R_{B,t}$ คือ อัตราผลตอบแทนในวันที่ t ของหุ้น A และหุ้น B

และ $\bar{R}_A$ และ $\bar{R}_B$ คือ อัตราผลตอบแทนเฉลี่ยในช่วง N วัน ของหุ้น A และหุ้น B

โดย $Cov(A,B)$ มีค่าเป็นบวก หุ้น A และหุ้น B มีความสัมพันธ์ทางเดียวกัน

$Cov(A,B)$ มีค่าเป็นลบ หุ้น A และหุ้น B มีความสัมพันธ์ทางตรงกันข้าม

$Cov(A,B)$ มีค่าเป็นศูนย์ หุ้น A และหุ้น B ไม่มีความสัมพันธ์กัน

การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

$$\rho_{AB} = \frac{\sigma_{AB}}{\sigma_A \sigma_B}$$

โดย $\rho = 1$ หุ้น A และหุ้น B จะไปทิศทางเดียวกันแบบสมบูรณ์แบบ

$\rho = 0$ หุ้น A และหุ้น B จะไม่มีความสัมพันธ์กัน

$\rho = -1$ หุ้น A และหุ้น B จะสวนทางกันอย่างสมบูรณ์แบบ

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลของการคำนวณหาค่าโวลาติลิตี้และผลตอบแทนจากตัวแบบแบล็คโชร์ล

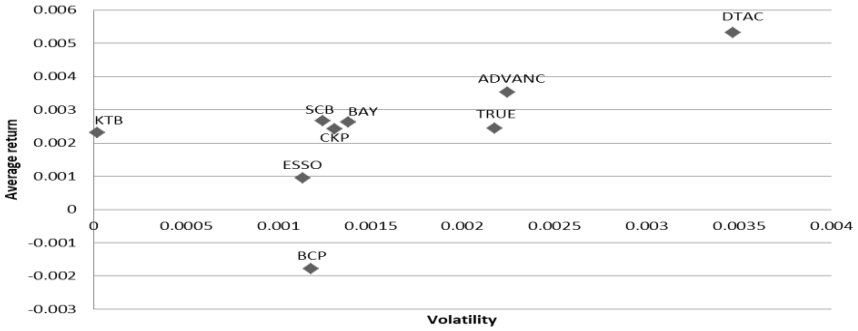


Figure 1 Show comparisons between Volatility and Average return

Table 1 Show calculations for Volatility and Average return

STOCK	Average σ	Average R_t
BAY	0.001377	0.002620313
KTB	0.000019	0.002304476
SCB	0.001243	0.002667232
BCP	0.001179	-0.00177964
CKP	0.001304	0.002423442
ESSO	0.001131	0.000943229
ADVANC	0.002242	0.00351975
DTAC	0.003464	0.005321
TRUE	0.002172	0.00244684

จากรูปที่ 1 และตารางที่ 1 พบว่าในกลุ่มธนาคาร KTB มีค่าโวลาติลิตี้ต่ำที่สุดในกลุ่มและมีค่าผลตอบแทนใกล้เคียงกับ BAY และ SCB ทำให้ KTB เป็นหุ้นที่ดีที่สุดในกลุ่มธนาคาร ในกลุ่มพลังงาน BCP มีค่าผลตอบแทนติดลบจึงยากแก่การทำกำไร CKP และ ESSO มีค่าโวลาติลิตี้ใกล้เคียงกันแต่หุ้น CKP มีค่าผลตอบแทนสูงกว่า ทำให้ CKP เป็นหุ้นที่ดีที่สุดในกลุ่มพลังงาน ในกลุ่มการสื่อสาร ADVANC มีค่าโวลาติลิตี้ใกล้เคียงกับ TRUE แต่มีค่าผลตอบแทนที่มากกว่า ทำให้ ADVANC เป็นหุ้นที่ดีที่สุดในกลุ่มธนาคาร ถ้ายอมรับความเสี่ยงได้มาก DTAC เป็นหุ้นที่ดีกว่าเนื่องจากมีค่าผลตอบแทนสูงที่สุด

ผลของการคำนวณหาความเสี่ยงและผลตอบแทนจากตัวแบบประเมินราคาสินทรัพย์ส่วนทุน

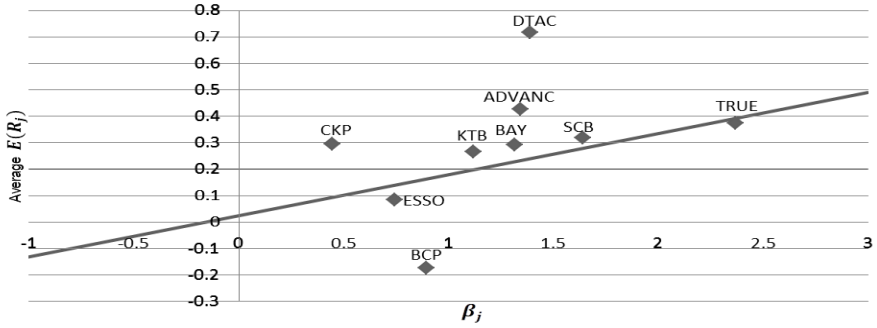


Figure 2 Show comparisons between risk and Average return for CAPM

จากรูปที่ 2 พบว่าหุ้นที่อยู่ใกล้เส้นตรงของตลาดหลักทรัพย์ ได้แก่ BAY KTB SCB ESSO และ TRUE แต่เนื่องจากวิธีการของตัวแบบแบล็คโชร์ลพิจารณาความเสี่ยงและผลตอบแทน จึงต้องพิจารณาตัวแบบประเมินราคาสินทรัพย์ส่วนทุนด้วยความเสี่ยงและผลตอบแทนเช่นเดียวกัน

Table 2 Show calculations for risk and Average return form CAPM

STOCK	R_f	$E(R_m)$	$E(R_m) - R_f$	β_j	$[E(R_m) - R_f]\beta_j$	CAPM $E(R_j) = R_f + [E(R_m) - R_f]\beta_j$	Average $E(R_j)$
BAY	0.0234	0.1793	0.1559	1.3181	0.2054	0.228833454	0.2883
KTB	0.0234	0.1793	0.1559	1.1255	0.1754	0.19881685	0.2642
SCB	0.0234	0.1793	0.1559	1.6466	0.2566	0.280031403	0.3153
BCP	0.0234	0.1793	0.1559	0.8993	0.1402	0.163560142	-0.1766
CKP	0.0234	0.1793	0.1559	0.4484	0.0699	0.093279066	0.2922
ESSO	0.0234	0.1793	0.1559	0.7468	0.1164	0.139781985	0.0804
ADVANC	0.0234	0.1793	0.1559	1.3489	0.2102	0.233632504	0.4240
DTAC	0.0234	0.1793	0.1559	1.3942	0.2173	0.240690524	0.7148
TRUE	0.0234	0.1793	0.1559	2.3747	0.3701	0.393527727	0.3713

จากตารางที่ 2 พบว่าในกลุ่มธนาคาร KTB มีค่าความเสี่ยงต่ำที่สุดและผลตอบแทนต่ำที่สุดในกลุ่ม รองลงมาคือ BAY และ SCB มีค่าความเสี่ยงมากที่สุดและผลตอบแทนมากที่สุดในกลุ่ม ทำให้หุ้นที่ดีที่สุดในกลุ่มธนาคารขึ้นอยู่กับการยอมรับความเสี่ยงว่ายอมรับได้ในระดับใด หากไม่ชอบความเสี่ยงหุ้นที่ดีที่สุดคือ KTB หากชอบความเสี่ยงหุ้นที่ดีที่สุดคือ SCB ในกลุ่มพลังงาน BCP มีอัตราผลตอบแทนติดลบจึงยากแก่การทำกำไร CKP มีค่าความเสี่ยงต่ำและมีอัตราผลตอบแทนสูงกว่า ESSO ทำให้ CKP เป็นหุ้นที่ดีที่สุดในกลุ่มพลังงาน ในกลุ่มการสื่อสาร TRUE มีค่าความเสี่ยงสูง แต่อัตราผลตอบแทนต่ำ ต่างจาก ADVANC และ DTAC ที่มีความเสี่ยงต่ำ แต่อัตราผลตอบแทนสูงกว่า ADVANC มีค่าความเสี่ยงใกล้เคียงกับ DTAC แต่ DTAC มีอัตราผลตอบแทนที่มากกว่า ทำให้ DTAC เป็นหุ้นที่ดีที่สุดในกลุ่มธนาคาร

ผลของการคำนวณหามูลค่าความเสี่ยง

Table 3 Show calculations for Value at Risk(VaR)

STOCK	VaR
BAY	0.034101
KTB	0.025984
SCB	0.033704
BCP	0.03126
CKP	0.041081
ESSO	0.029499
ADVANC	0.043276
DTAC	0.074836
TRUE	0.060872

จากตารางที่ 3 พบว่าหุ้น DTAC และ TRUE มีมูลค่าความเสี่ยงสูงสุดและรองลงมา แต่หุ้น KTB จะมีมูลค่าความเสี่ยงต่ำสุด

Table 4 Show Portfolio management from Table 1 and Table 2

Portfolio management	Black-Scholes	CAPM	Mix
risk flavors	KTB CKP และ DTAC	SCB CKP และ DTAC	CKP และ DTAC
non risk flavors	KTB CKP และ ADVANC	KTB CKP และ DTAC	KTB และ CKP

จากตารางที่4 เป็นการเลือกหุ้นแต่ละกลุ่มโดยใช้กลุ่มละ 1 ตัวลงพอร์ตการลงทุน โดยใช้ตัวที่ดีที่สุดของวิธีนั้น สามารถแบ่งประเภทนักลงทุนได้สองกลุ่มใหญ่ คือ กลุ่มชอบความเสี่ยงและกลุ่มไม่ชอบความเสี่ยง วิธีของตัวแบบแบล็คโชร์ล ในกลุ่มชอบความเสี่ยง มี KTB CKP และ DTAC ในกลุ่มไม่ชอบความเสี่ยง มี KTB CKP และ ADVANC วิธีของตัวแบบประเมินราคาสินทรัพย์ส่วนทุน ในกลุ่มชอบความเสี่ยง มี SCB CKP และ DTAC ในกลุ่มไม่ชอบความเสี่ยง มี KTB CKP และ DTAC วิธีแบบผสม ในกลุ่มชอบความเสี่ยง มี CKP และ DTAC ในกลุ่มไม่ชอบความเสี่ยง มี KTB และ CKP

Table 5 Show Risk from VaR and percent of Return of Portfolio management from Table 1 and Table 2

Portfolio management	Black-Scholes	CAPM	Mix
risk flavors	Risk = 0.0473 Return = 0.335 %	Risk = 0.0499 Return = 0.207 %	Risk = 0.0580 Return = 0.316 %
non risk flavors	Risk = 0.0368 Return = 0.275 %	Risk = 0.0473 Return = 0.183 %	Risk = 0.0335 Return = 0.204 %

จากตารางที่5 พบว่าในกลุ่มของคนชอบความเสี่ยง วิธีของตัวแบบแบล็คโชร์ลมีความเสี่ยงต่ำที่สุด แต่ให้ผลตอบแทนมากที่สุด รองลงมาคือวิธีแบบผสม และวิธีของตัวแบบประเมินราคาสินทรัพย์ส่วนทุน ในกลุ่มของคนไม่ชอบความเสี่ยง วิธีของตัวแบบแบล็คโชร์ลให้ผลตอบแทนมากที่สุด และความเสี่ยงสูงกว่าแบบไม่ผสมไม่มาก รองลงมาคือวิธีแบบผสม และวิธีของตัวแบบประเมินราคาสินทรัพย์ส่วนทุนมีความเสี่ยงสูงสุด แต่ได้ผลตอบแทนต่ำสุด

ผลของการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

Table 6 Show calculations for correlation

Correlation	BAY	KTB	SCB	BCP	CKP	ESSO	ADVANC	DTAC	TRUE
BAY	1	0.4597	0.5708	0.2662	0.1615	0.1477	0.2955	0.1937	0.3084
KTB	0.4597	1	0.6838	0.3864	0.2064	0.2386	0.1743	0.1174	0.4604
SCB	0.5708	0.6838	1	0.4610	0.0884	0.2762	0.3186	0.0968	0.5354
BCP	0.2662	0.3864	0.4610	1	0.1957	0.3644	0.1349	0.1424	0.2825
CKP	0.1615	0.2064	0.0884	0.1957	1	0.0785	0.1451	0.1852	0.2217
ESSO	0.1477	0.2386	0.2762	0.3644	0.0785	1	0.2538	0.2135	0.2182
ADVANC	0.2955	0.1743	0.3186	0.1349	0.1451	0.2538	1	0.4804	0.4304
DTAC	0.1937	0.1174	0.0968	0.1424	0.1852	0.2135	0.4804	1	0.1498
TRUE	0.3084	0.4604	0.5354	0.2825	0.2217	0.2182	0.4304	0.1498	1

จากตารางที่ 6 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของหลักทรัพย์ตัวเดียวกันที่มีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งจะทิศทางการวิ่งไปด้วยกันอย่างสมบูรณ์แบบแล้วนั้น สังเกตได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ทุกคู่จะเป็นบวกทำให้ไม่มีคู่ใดที่ไม่มีความสัมพันธ์กันหรือมีความสัมพันธ์ตรงกันข้าม ซึ่งได้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ KTB และ SCB มีค่ามากที่สุด และรองลงมาคือ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ BAY และ SCB ทั้งสองคู่มีทิศทางการวิ่งไปด้วยกันค่อนข้างมาก

สรุป

เมื่อพิจารณาค่าผลตอบแทนและค่าโวลาติลิตี้ของราคาหุ้นจากตัวแบบแบล็คโชร์ล ประกอบกับค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของหุ้นแต่ละตัวที่เลือกจากตลาดหลักทรัพย์แห่งประเทศไทย พบว่า กลุ่มธนาคารหุ้นที่ดีที่สุด คือ KTB กลุ่มพลังงานหุ้นที่ดีที่สุด คือ CKP กลุ่มการสื่อสารหุ้นที่ดีที่สุด คือ ADVANC แต่ถ้ายอมรับความเสี่ยงได้มาก DTAC เป็นหุ้นที่ดีที่สุด และจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ คู่ของ KTB และ SCB และคู่ของ BAY และ SCB มีทิศทางการวิ่งไปด้วยกันค่อนข้างมาก นอกจากนี้ไม่มีความสัมพันธ์กันเนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ต่ำ

เมื่อพิจารณาอัตราผลตอบแทนที่คาดหวังและความเสี่ยงของราคาหุ้นจากตัวแบบประเมินราคาสินทรัพย์ส่วนทุน พบว่า หุ้นที่ดีที่สุดในกลุ่มธนาคารขึ้นอยู่กับการยอมรับความเสี่ยงว่ายอมรับได้ในระดับใดหากไม่ชอบความเสี่ยง หุ้นที่ดีที่สุดคือ KTB แต่หากผู้ลงทุนชอบความเสี่ยงหุ้นที่ดีที่สุดคือ SCB กลุ่มพลังงานหุ้นที่ดีที่สุด คือ CKP กลุ่มการสื่อสารหุ้นที่ดีที่สุด คือ DTAC

เมื่อพิจารณาพอร์ตการลงทุน พบว่า วิธีของตัวแบบแบล็คโชร์ลเป็นวิธีที่ดีที่สุดของทั้งกลุ่มของคนชอบความเสี่ยงและกลุ่มของคนไม่ชอบความเสี่ยง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณตลาดหลักทรัพย์แห่งประเทศไทยที่ช่วยรวบรวมข้อมูลราคาหุ้นย้อนหลังที่ใช้ในการคำนวณ และขอขอบคุณผศ.ดร.ฉัตรชัย เปสี ที่ช่วยสนับสนุนและช่วยเหลือในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

Muhammad ,S. and Vasile, P. 2014. Implied volatility in black-scholes model with GARCH volatility. **Procedia Economics and Finance** 8: 658-663.

Xiu, D. 2010. Quasi-maximum likelihood estimation of volatility with high frequency data. **J. of Econometrics** 159: 235–250.

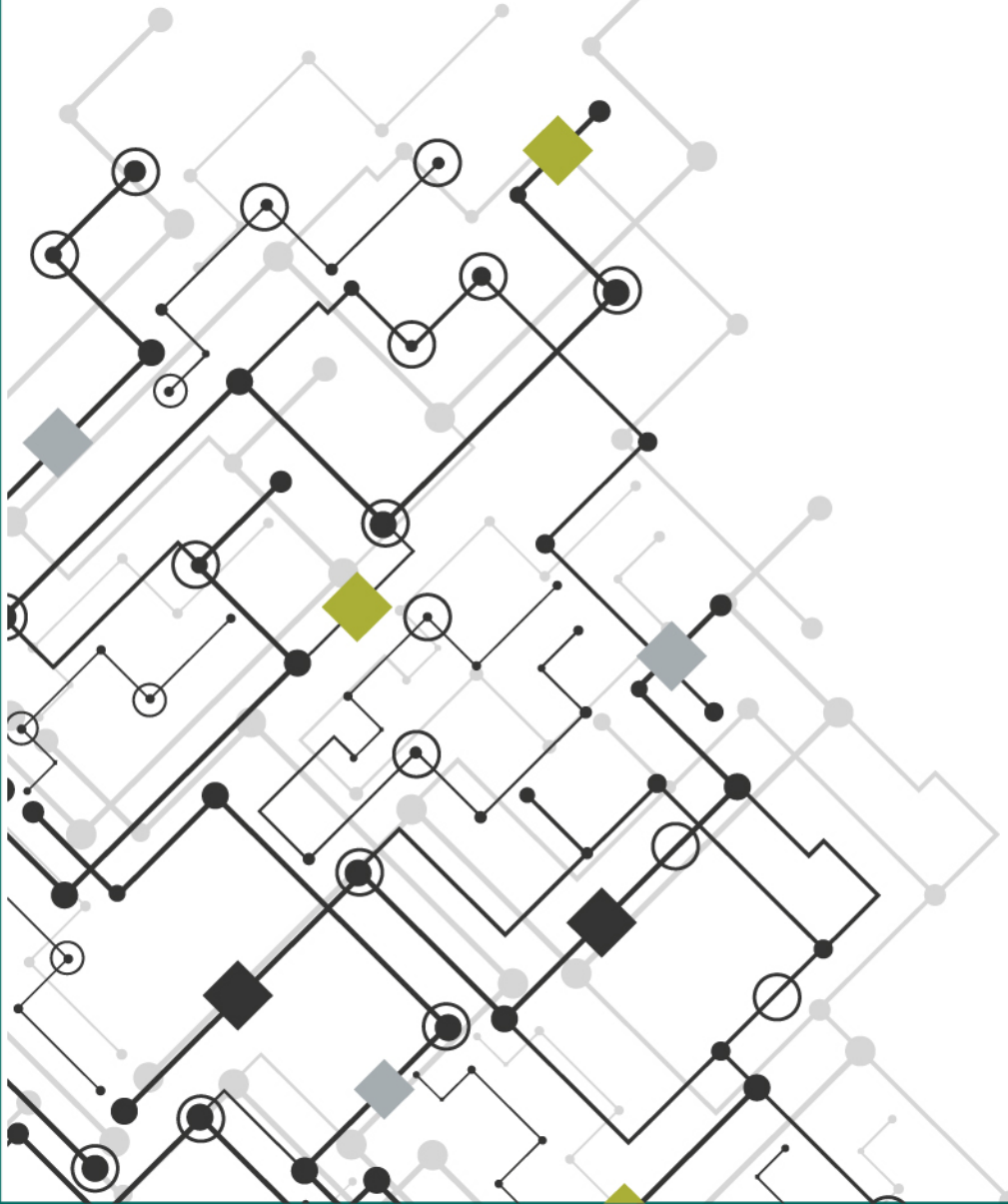
Yang Zu and H. Peter Boswijk. 2014. Estimating spot volatility with high-frequency financial data. **J. of Econometrics** 181: 117-135.

สาขาวิทยาศาสตร์และพันธุวิศวกรรม

Subject: Science and Genetic Engineering

ภาคโปสเตอร์

Poster Presentation



KU
KASETSART
UNIVERSITY

Relationship between Color Parameters, Total Phenolic Content and Protein Content of Local Thai Rice Varieties

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

ABSTRACT

The purpose of this study was to evaluate relationship between color parameter (L*, a* and b*) with total phenolic content and protein content in three rice varieties; Mali Gomain Surin, Mali Nil Surin and Pa Ka Am Puen. The findings indicated that Pa Ka Am Puen had highest lightness (L*) and yellow (positive b*), while Mali Nil Surin was the darkest (lowest L* value). The a* value of Mali Gomain Surin was higher than Mali Nil Surin and Pa Ka Am Puen. Total phenolic content from Folin-Ciocaltue Colorimetric method, ranged from 0.38-0.50 mg/g. Mali Nil Surin contained the highest phenolic content which was 0.50 mg/g. Protein content of these three rice varieties were in range of 7.53 - 10.78%. Protein content of Pa Ka Am Puen was the highest among studied sample which was 10.78 g/100 g sample, while that of Mali Gomain Surin was lowest. All three rice varieties showed protein bands with approximate size of 50 kDa. Amino acids content ranged from 3,988 – 4,391 mg/100 g sample. Highest essential amino acid was found in these three rice varieties that leucine. Correlation analysis suggested that color parameters (L*, a* and b*) revealed that inverse relation with total phenolic content. The a* value was positively correlated with phenolic content while the lightness (L*) and b* value were positively correlated with protein content. Nonetheless, protein content and phenolic content showed almost unrelatable for each other with r = -0.0011.

Key Words: color, total phenolic, protein, local Thai rice varieties

*Corresponding author, e-mail address : rdiwds@ku.ac.th

[1] Scientific Equipment and Research Division, Kasetsart University Research and Development Institute, Kasetsart University, Bangkok, 10900

INTRODUCTION

Rice is Thai staple and it has been connected to Thai life for long time. Rice cultivations in Thailand are 2 types, rice and glutinous rice. They are difference in starch. Rice contain 15-30% amylose. While glutinous contain more amylopectin and has amylose only 5-7%. Northeastern part of Thailand has highest area of paddy filed. Mostly of them are Thai Jasmin rice 105 which are considered the best Thai Jasmin rice. Apart from Thai Jasmin rice 105, farmer is encourage to cultivate others rice varieties for enhance trading and market sharing.

There are various rice nutrition data. Mostly they were emphasized on variety of rice and nutrition such as protein is an indicator of bioactivity or indicates the utilization of rice, e.g. rice with gluten is not suitable for some patients because it can cause allergic reactions to dangerous. Polyphenols are the secondary metabolites present in plants which are health benefit of human by reducing the risk of chronic diseases due to bioactivity. Polyphenols have interact with proteins by covalent bonding and non–covalent bonding including hydrogen bonding and hydrophobic bonding. The positive effect that helps to regulate the biochemical reactions in human that stimulation or inhibition of biochemical reactions associated with degenerative chronic diseases (Weerawatanakorn, 2013). The basic nutrition for instance phenolic content are key active molecules for antioxidative activities or protein content of rice can be used as an outstanding point for rice. There was study of 11 rice varities in Kanjanaburi that contain 0.68-7.86% protein and 39.35-219.35 GAE μg/g sample of phenolic compound (Phinthida *et al.,* 2017). In 2014, Manop studied on nitrogen and total protein in Thai Jasmin rice 105, Klong Luang 1, Pathum Thani 1 and Chai Nat 1 rice found that the highest nitrogen content in studied rice was 2.1% (12.50% protein) and the lowest was 1.4% (8.33% protein). There average protein was 10.41%. The other study on Riceberry reported that crude protein of Riceberry flour was 6.51–7.27% (Kraithong *et al.,* 2018). Protein content of brown upland rice from Luang Prabang Province, Lao PDR was found to be in the range of 7.4%–11.1% (Xiongsiyee *et al.,* 2018).

Usually, the conventional method of phenolic and protein analysis consume large amount of chemical. Moreover a number of sample have to be casted away. An interesting alternative for indirect phenolic analysis is the study of the relationship between color and phenolic content which an optional way to evaluate phenolic content without loss of sample. Color is one of the important influence for customer consideration due to higher nutrition and antioxidant activity and nowadays, there are increasing in unpolished and pigmented rice. Accordingly, this study aimed to evaluate the relationship between color parameter (L*, a* and b*) with total phenolic and protein of three local rice varieties. The information from this study may be the interesting, fast, convenient and non-invasive alternative method for evaluate total phenolic and protein. This method may help enhancing of value added to local rice varieties as well as preventing them from extinction.

MATERIALS AND METHODS

1. Thai local rice samples

Sample of this studies were 3 Thai local rice varieties; Mali Gomain Surin, Mali Nil Surin, Pa Ka Am Puen from Surin province (Figure 1)



Figure 1 Mali Gomain Surin (A), Mali Nil Surin (B), Pa Ka Am Puen (C)

2. Determination of color parameters

The Commission Internationale de l'Eclairage (CIE), the L* a* b* color space was modeled after a color-opponent theory stating that two colors cannot be red and green at the same time or yellow and blue at the same time. L* indicates lightness, a* is the red/green coordinate, and b* is the yellow/blue coordinate. Samples were determined by Benchtop Spectrophotometers: UltraScan PRO with D65 light source and white background.

3. Determination of total phenolic content (Modified from Singelton *et al.,* 1999)

Gallic acid standard and sample extract were reacted with Folin-Ciocaltue reagent and monitored at 760 nm with UV-vis spectrophotometer (Shimadzu UV1800). The concentration of sample phenolic content was analyzed from standard graph.

4. Analysis of protein

Protein content was determine by Kjeldahl method (AOAC, 2000). Rice samples were digested with conc. H_2SO_4 at high temperature. Then, digested solution was distillated to ammonia with sodium hydroxide. The ammonium solution products were further titrated with hydrochloric acid to determine nitrogen content. Protein content was calculated by using factor of 6.25 with nitrogen content.

Protein molecular weight of extracted samples were analyzed through sodium dodecyl sulfate polyacrylamide gel electrophoresis (SDS-PAGE) with 10% polyacrylamide gel. The extracted proteins (10 µL) were loaded along with a standard marker.

5. Determination of amino acid

Amino acid was analyzed by using Ultra High Performance Liquid Chromatography (UHPLC) (Shimadzu, Nexera II) with Accq. Tag amino acid analysis method of Cohen and Michaud (1993).

RESULTS AND DISCUSSION

1. Color parameters

CIE color system (L*, a* and b*) is one of the most popular system for evaluate feature of studied sample. L* indicates lightness (+ = lighter, - = darker), a* is the red/green coordinate (+ = redder, - = greener), and b* is the yellow/blue coordinate (+ = yellower, - = bluer). It was found that Pa Ka Am Puen had highest lightness (L*) and yellow (positive b*) value which were 58.43 and 23.88, respectively. While, Mali Nil Surin was darkest (lowest L* value). The a* value of Mali Gomain Surin was higher than Mali Nil Surin and Pa Ka Am Puen. Chroma value, C^{o} that represent the vivid of the color of sample. The more value of chroma is more vivid of color. The chroma value of Mali Gomain Surin, Mali Nil Surin and Pa Ka Am Puen were 17.02, 2.17 and 24.56, respectively. The coefficient analysis of color parameter suggested that L* showed very low positive relation with a* with r = 0.1789. However, L* showed high positive related with b* with r = 0.9706.

2. Total phenolic content

Total phenolic content ranged from 0.38-0.50 mg/g (dry weight) as shows in table 1. Mali Nil Surin contain highest phenolic content which was 0.50 mg/g (dry weight). This was in the range of phenolic content in 49 varieties of Thai rice that reported by Suttajit *et al.* (2006) which was 0.0707-3.636 mg/g.

Table 1 Total phenolic content, protein content and color parameter in various rice cultivars.

Rice	Total phenolic content (mg/g)	Protein content (% by dry weight)	Color parameter		
			L*	a*	b*
Mali Gomain Surin	0.38±0.02	7.53±0.04	34.55±0.51	11.40±0.37	12.64±0.40
Mali Nil Surin	0.50±0.01	8.35±0.13	24.09±0.11	2.06±0.03	0.67±0.18
Pa Ka Am Puen	0.42 0.01	10.78±0.23	58.43±0.17	5.75±0.17	23.88±0.27

3. Protein content

Protein content of these three rice varieties were in range of 7.53 - 10.78%. Pa Ka Am Puen was the highest among studied sample, while that of Mali Gomain Surin was lowest (Table 1).

All 3 rice varieties showed protein bands with approximate size of 50 kDa. The protein banding of each variety looked similar though the intensity of the appeared bands were not uniform (Figure 2). It's indicating the possible use of protein profile in analyzing relationship among all varieties. The quantitative SDS-PAGE method is capable for quantitative determination of known protein from crude protein extraction. This method decreased the purification step, time consuming and protein yield loss.

4. Amino acid

Amino acids content ranged from 3,988 – 4,391 mg/100 g sample. Highest essential amino acid found in these 3 rice was leucine which were 328.50, 362.58 and 358 mg/100 g for Mali Gomain Surin, Mali Nil Surin and Pa Ka Am Puen, respectively. While, lowest essential amino acid found in these 3 rice was methionine which were 76.95, 97.50 and 104.95 mg/100 g for Mali Gomain Surin, Mali Nil Surin and Pa Ka Am Puen, respectively. However, this study did not analyze tryptophan. Highest non-essential amino acid found in these 3 rice was glutamic acid which were 786.08, 858.60 and 819.30 mg/100 g for Mali Gomain Surin, Mali Nil Surin and Pa Ka Am Puen, respectively (Table 2).

Table 2 Amino acids content in various rice cultivars.

Amino Acids	Mali Gomain Surin	Mali Nil Surin	Pa Ka Am Puen
	mg per 100 g		
Aspartic acid	359.20	395.63	349.05
Glutamic acid	786.08	858.60	819.30
Serine	278.30	301.03	279.20
Histidine	103.80	115.65	133.10
Glycine	191.58	212.53	217.65
Arginine	348.83	384.93	458.65
Threonine	160.70	176.15	188.05
Alanine	247.63	269.95	240.80
Proline	188.55	209.93	204.40
Cystine	61.28	69.73	69.35
Tyrosine	155.40	176.58	192.00
Valine	213.43	232.75	237.15
Methionine	76.95	97.50	104.95
Leucine	328.50	362.58	358.00
Phenylalanine	216.73	240.80	288.45
Lysine	151.98	153.58	113.95
Isoleucine	119.33	133.45	133.10
Total	3,988.27	4,391.37	4,387.15

5. Relationship between color parameters and total phenolic content and protein content

Color parameters (L*, a* and b*) showed inverse relation with total phenolic content with in range of -0.5118 to -0.9121. The a* value resulted in inverse relation with both phenolic content

and protein content with -0.9121 and -0.3561. While, the L* and b* value resulted in positive relation with protein content with high degree of correlation (r = 0.8507 and 0.7015 for L* and b*, respectively). Nonetheless, protein content and phenolic content showed almost unrelatable for each other with r =-0.0011 (Table 3).

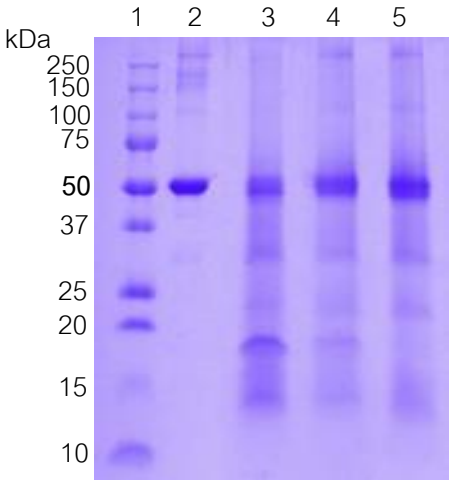


Figure 2 Protein patterns of milled three various rice cultivars from Thailand by using SDS-PAGE, standard markers (Lane 1), BSA (Lane 2), Mali Gomain Surin (Lane 3), Mali Nil Surin (Lane 4) and Pa Ka Am Puen (Lane 5).

Table 3 Correlation between color parameter, total phenolic content and protein content

	Color parameter			Total phenolic content
	L*	a*	b*	
Total phenolic content	-0.5118	-0.9121	-0.6972	
Protein content	0.8507	-0.3561	0.7015	-0.0011

CONCLUSIONS

Pa Ka Am Puen had highest lightness (L*) and yellow (positive b*) value. The a* value of Mali Gomain Surin was highest among the studied rice varieties. Total phenolic content ranged from 0.38-0.50 mg/g (dry weight) and Mali Nil Surin contain highest phenolic content. Protein content range from 7.53 - 10.78%. Pa Ka Am Puen was the highest among studied sample. All 3 rice varieties showed protein bands with approximate size of 50 kDa. Amino acids content ranged from 3,988 – 4,391 mg/100 g sample. Highest essential amino acid found in these 3 rice was leucine. Color parameters (L*, a* and b*) showed inverse relation with total phenolic content. The a* value has very high relation with phenolic, while lightness (L*) and b* value have high relation with protein content. Nonetheless, protein content and phenolic content showed almost unrelatable for each other with r =-0.0011.

ACKNOWLEDGEMENTS

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

REFERENCES

AOAC. 2000. Association of Official Analytical Chemists. **Official methods of analysis, 17th ed.** The Association of Official Analytical Chemists Arlington, Virginia.

Cohen, S. A and D. P. Michaud. 1993. Synthesis of a fluorescent derivatizing reagent, 6-Aminoquinolyl-N-Hydroxysuccinimidyl Carbamate, and its application for the analysis of hydrolysate amino acids via high-performance liquid chromatography. **Analytical Biochemistry.** 279: 279–287.

Kraithong, S., S. Lee and S. Rawdkuen. 2018. Physicochemical and functional properties of Thai organic rice flour. **Journal of Cereal Science**. 79: 259-266.

Manop Leesawatwong. 2014. **Determinants of rice milling quality and price**. (Abstract) Thesis for the degree of doctor of philosophy (Agronomy). Chiang Mai University. IV.

Na Thaisong, P., S. Katakul, J. Tokamolthom and N. Thaweeseang. 2017. Proximate composition and antioxidant activity of native rice virieties in Ban Thiphuye, Thong Pha Phum district, Kanchanaburi province. **Science and Technology Journal**. 25 (5): 805-812.

Singelton, V., R. Orthifer and R. M. Lamuela-Raventos. 1999. Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of Folin-Ciocalteu reagent. **Methods in Enzymology**. 299:152-178.

Suttajit, M., S. Immark, S. Teerajan, S. Suttajit and C. Chiyasut. 2006. Antioxidative activity and polyphenol content in different varieties of Thai rice grains. **Asia Pacific Journal of Clinical Nutrition**. 15(Supplement):78.

Weerawatanakorn, M. 2013. Chemical reactions between proteins and polyphenols and human biological consequences of reaction. **Burapha Science Journal**. 18(1): 210-218.

Xiongsiyee, V., B. Rerkasem, J. Veeradittakit, C. Saenchai, S. Lordkaew and C. T. Prom-u-thai. 2018. Variation in grain quality of upland rice from Luang Prabang Province, Lao PDR. **Rice Science**. 25(2): 94-102.

Classification of White vs. Brown Rice Using X-Ray Fluorescence Elemental Composition Measurements and Decision Tree Algorithm

Piyanuch Orpong[1], Kanokporn Boonsirichai[1], Sasiphan Khaweerat[1], Jatechan Channuie[2] and Roppon Picha[1*]

ABSTRACT

With the aim to develop a classification method for rice varieties, grains from four rice varieties were prepared as whole grains or ground samples and measured by X-ray fluorescence technique. Data from white and brown rice were also compared. The data were labelled for training purpose on the basis of supervised learning method. Decision tree algorithm was employed to analyze the measured elemental data, and the accuracy was assessed. The method can be used to classify white and brown rice, and potentially can be extended in the future to classify rice varieties. The handheld X-ray device and a laptop computer can be used in the field with unknown samples (unlabeled data), which makes it convenient for analyses performed outside the laboratory setting.

Key words: rice varieties, cultivars, identification, XRF, x-ray fluorescence, decision tree, machine learning

* Corresponding author; e-mail address: **aeroppon@tint.or.th**

[1]Research and Development Division, Thailand Institute of Nuclear Technology (Public Organization), Bangkok, 10900

[2]Research Reactor Center, Thailand Institute of Nuclear Technology (Public Organization), Bangkok, 10900

INTRODUCTION

Rice (*Oryza sativa* L.), which is a staple crop in many countries for almost half the world's population (Fairhurst and Dobermann, 2002), exists in many varieties. Nutrient profiles vary among different cultivars and types of rice. Between brown and white rice, white rice is more commonly consumed worldwide. There have been efforts to fortify rice to enhance its mineral and vitamin contents (Piccoli *et al*., 2012; Steiger *et al*., 2014). There are also concerns regarding contamination among rice grains being sold on shelf (Meharg and Rahman, 2003; Liu *et al*., 2011). Thus, developing a method which can be used for quick identification of rice varieties is useful. In this work, a method is initially developed for classifying brown and white rice. In the future, further development based on this method using a larger data set can be made to the model for multiclass identification, such as identifying rice based on locations, and more refined rice varieties.

Normally, after harvesting, rice grain has brown color (after the husk is removed). However, the color becomes white when the bran layer containing various nutrients is removed. Brown rice still contains the bran layer and germ. Brown rice generally has more nutrients and antioxidants than white rice. In contrast, for white rice, outer husk, bran layer and germ are all removed, resulting in the fact that white rice has lower nutrients and fiber content, compared with brown rice. The milling process is carried out by the industry in order to improve the physical and sensory properties of rice and increase the storage stability (Monks *et al*., 2013; Paiva *et al*., 2016).

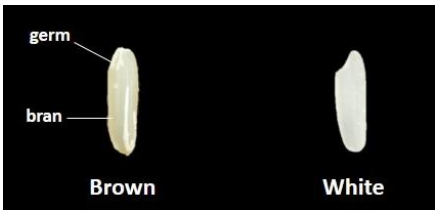


Figure 1 Brown and white rice characteristics.

X-ray is an electromagnetic wave that can excite and lead to de-excitation of atomic energy levels inside molecules, allowing identification of existing elements from the resulting X-ray spectra. X-ray fluorescence (XRF) technique is a non-destructive testing method for measuring elemental compositions of materials using the characteristic energies of the fluorescent (secondary) X-ray emitted from the de-excitation. While intense X-ray sources such as those in synchrotron facilities are very useful in investigating trace elements or micro samples, a portable XRF apparatus is necessary when samples to be analyzed cannot easily be transported to the laboratory.

At Thailand Institute of Nuclear Technology (TINT), XRF method has been used for many types of samples, such as cultural heritage (Khaweerat *et al*., 2017), gemstones (Maneewong *et al*., 2016), industrial (Nuamsrinuan *et al*., 2018), and shielding materials (Picha *et al*., 2015).

This work investigates the possibility of using the portable XRF device together with decision tree algorithm to classify rice varieties. In this report, the classification between white and brown rice is explored.

MATERIALS AND METHODS

1. Preparation of rice samples

The varieties of rice used in this study are labelled as KDML105 (white), KDML105 (brown), Riceberry, Sinlek, and Sangyod—one variety for white rice and four varieties of brown rice in total. For each variety, 2-4 repeats are conducted. For each repeat, the sample is measured in two matrix types: whole grain and ground (subsequently using the same whole-grain sample).

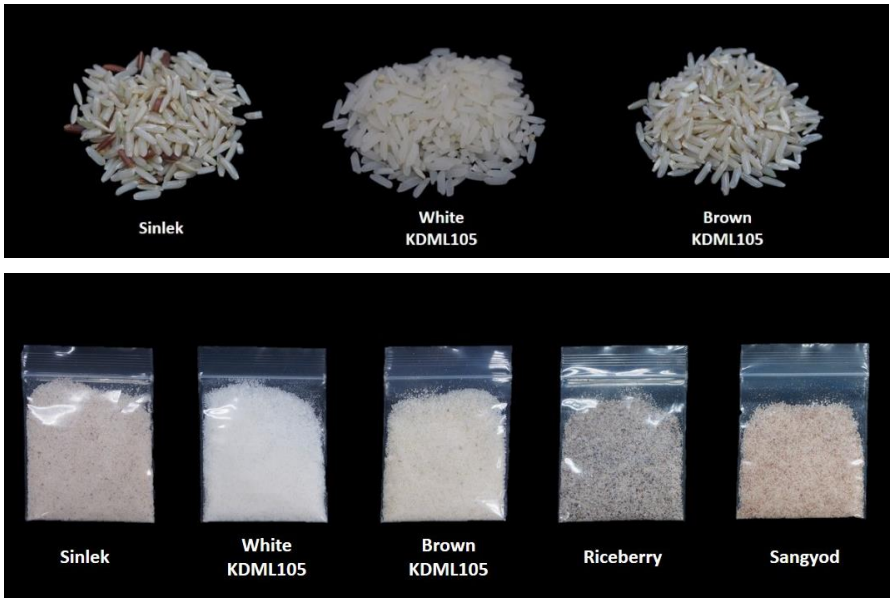


Figure 2 Rice samples in two forms: (A) whole grain (B) ground.

2. X-ray fluorescence measurement setup

There are two major types of XRF: wavelength-dispersive (WDXRF) and energy-dispersive (EDXRF). In this study, EDXRF is used with a handheld device (Thermo Scientific Niton XL3t analyzer) for measuring elemental concentration in the rice samples. The device consists of an X-ray tube (silver anode, 6-50 kV) and a silicon drift detector. For each measurement, the produced X-ray photons are pointed toward the sample, which sits on the holder at the top of the device. The electromagnetic energy is transferred to the shell electrons, which then moved to outer shells or ejected altogether. Consequently, to stabilize the atoms, outer-shell electrons take over the resulting vacancies. These transitions cause X-rays to be emitted (fluoresced) at characteristic energies ($E_X = E_{\text{outer}} - E_{\text{inner}}$). These fluorescent X-rays produce electronic pulses inside the detector and are processed into signals, which are then amplified by a preamplifier and an amplifier. The central processing unit of the device analyzes the received spectral data and the compositional (elemental and oxides) data are produced from the net areas under the peaks, and can be displayed and stored for further analysis. In this work, the

measurement time for each sample is 60s.

Two analytical modes are used: TestAll Geo and Soil. Different XRF modes are calibrated for different sample types. Soil mode identifies concentrations of elements known to be in soil samples. TestAll mode automatically determines the appropriate mode for rapid analysis. In this study, a major difference between these two modes is that TestAll Geo mode yields many more non-zero composition data than Soil mode, including the “Bal” value (balance) for unidentified elements. In this study, the rice samples are not expected to have only soil-like elements, therefore there are high Bal values reported.



Figure 3 Handheld XRF device (Thermo Scientific Niton XL3t analyzer).

3. Decision tree algorithm

A decision tree is a tree-like graph used for making decisions. The algorithm starts from a single decision node, whose outcomes then branch into successive nodes. At the end of the tree, leaf nodes represent the final decisions after the pathways are completed. The decisions are based on probabilities. For example, each node might be to decide whether a sample has at least a certain concentration of an element. The decision tree algorithm has advantages in being simple to interpret (as it is similar to human decision making), fast to compute even with large datasets, and able to work with both numerical and categorical data. However, it can be disadvantageous for being non-robust or overly sensitive to data changes. Additionally, overly complex trees do not generalize to the new data well (overfitting). The quality criterion of a split is measured by a measure of misclassification likelihood called the Gini impurity. This value has a lower bound of zero (if the data set contains only one class) and upper bound of one (the more classes there are, the higher the value). For a classification problem with *N* classes, the Gini impurity (I_G) is computed by summing the products between the probability of an item with label *i* being chosen (p_i) and the probability of incorrect categorization:

$$I_G(p) = \sum_{i=1}^{N} p_i \sum_{k \neq i} p_k = \sum_{i=1}^{N} p_i\,(1 - p_i) = \sum_{i=1}^{N} p_i - \sum_{i=1}^{N} p_i^2 = 1 - \sum_{i=1}^{N} p_i^2$$

For the classification approach, the target is the rice type (brown or white). Thus,

$$I_G(p) = 1 - p_{\text{white}}^2 - p_{\text{brown}}^2$$

The best split points are found via minimizing the impurity, and then are applied recursively to the

data set. On either side of the split point, the decision tree model predicts the most likely category.

The predictor variables are elemental composition, analysis mode, and matrix type. In this work, there are 84 total measurements. To build the model, 58 of those are used as training data and 26 (25%) as test data. Model quality metrics such as accuracy, precision, and recall are assessed.

The elemental compositions (and oxides composition in the case of TestAll Geo mode) are tabulated analyzed via the decision tree algorithm to classify the rice samples.

RESULTS AND DISCUSSION

As an overview of the data, the summary statistics (means and standard deviations) of elemental composition for all the samples are shown in Table 2. As mentioned above, TestAll Geo mode computed more identified elements and oxides than Soil mode. For the samples in this work, the available analyzed compositional data of Soil mode included Mo, Zr, Sr, Rb, Zn, Cu, Fe, Ti, Ca, K, and S. TestAll Geo mode data included every element from the Soil mode but additionally consisted of Nb, Al, P, Si, Cl, Mg, Al_2O_3, SiO_2, P_2O_5, SO_3, K2O, CaO, Fe_2O_3, and also Bal (balance or unidentified elements) calculation. The selected elemental compositions (Ca, K, and Zn) were plotted for different rice types, rice varieties, and analysis modes in Fig 4 for comparison.

Table 2 Means and standard deviations of elemental composition in the rice samples using two different analysis modes (n = 42 each). The measurement units are in part per million (ppm).

Soil mode			TestAll Geo mode					
	mean	std		mean	std		mean	std
Mo	9.37	0.79	Mo	9.46	1.37	Bal	970,775.39	11,212.92
Zr	6.52	1.06	Zr	6.47	0.95	Nb	7.68	1.06
Sr	0.59	0.91	Sr	0.29	0.71	Al	486.27	462.73
Rb	14.91	8.93	Rb	10.26	4.26	P	12,211.77	4,802.13
Zn	27.27	6.67	Zn	26.69	8.12	Si	3,006.31	2,639.03
Cu	0	0	Cu	1.47	5.39	Cl	464.27	110.95
Fe	1.09	7.09	Fe	1.1	7.13	Mg	1,350.95	1,908.63
Ti	9.72	30.54	Ti	10.53	33.86	Al_2O_3	1,106.86	743.11
Ca	676.93	429.63	Ca	716.89	479.9	SiO_2	6,433.51	5,647.53
K	18,659.09	11,407.42	K	12,319.68	5,165.48	P_2O_5	27,964.94	10,996.87
S	1,685.68	708.53	S	3,415.41	792.81	SO_3	8,538.51	1,982.04
						K_2O	14,906.82	6,250.23
						CaO	1,003.64	671.86
						Fe_2O_3	2.5	11.71

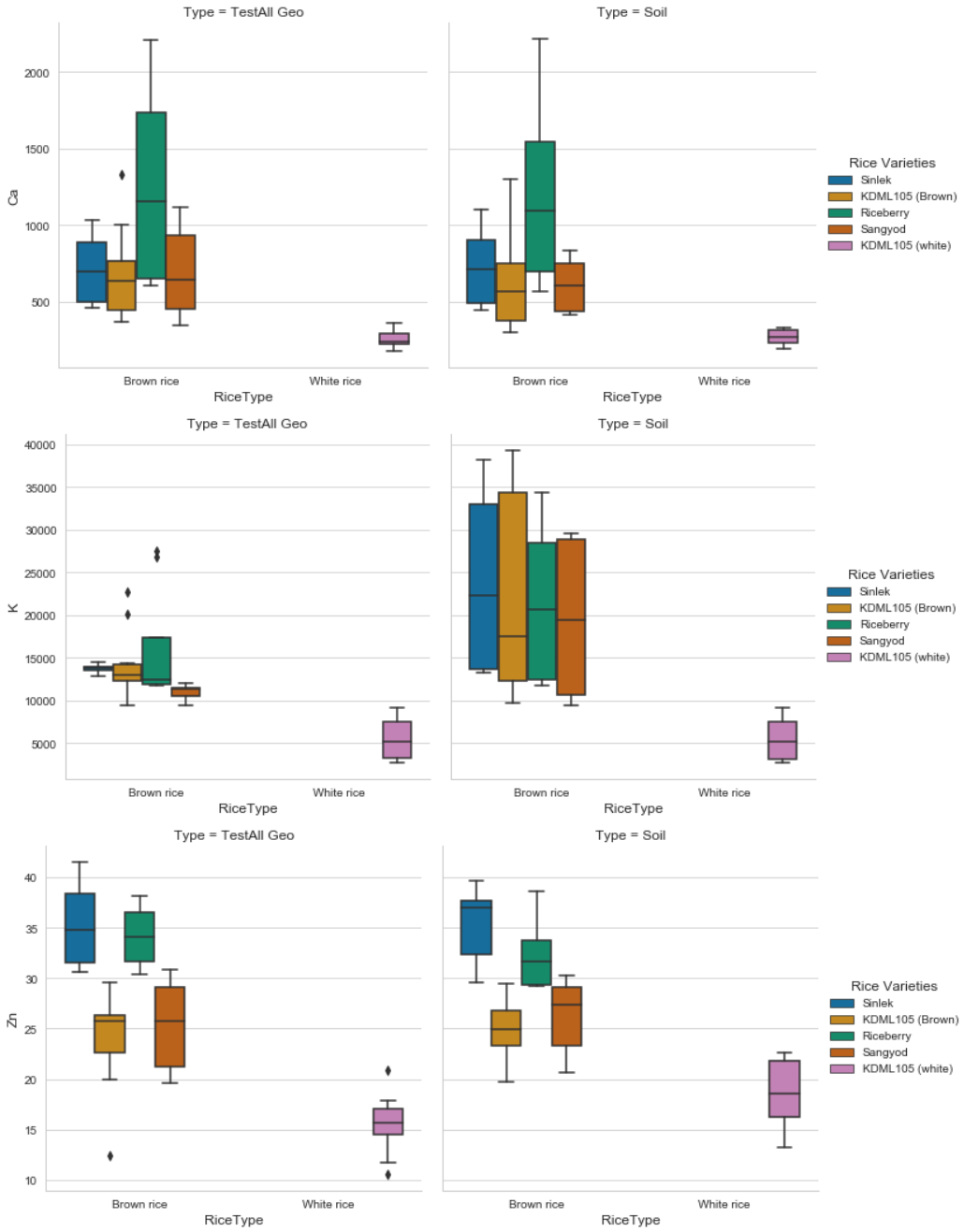


Figure 4 Composition of three elements: Ca, K and Zn (from top to bottom), separated by rice types and rice varieties.

Ca, K, Zn compositions are relatively higher in brown rice as compared to white rice. Within the brown rice group, the four varieties have different elemental compositions, which should be further investigated, but only if more samples can be acquired.

To evaluate whether the sample matrix had any effect on the measurement, the data were separated into two groups (whole grain and ground) for each analysis mode (TestAll Geo and Soil) and then the composition distributions of the elements with highest concentrations were compared (n = 21 each group). It was found that the matrix type impacted the elemental compositions in both modes (the differences are mostly significant). Therefore, the matrix type was kept as a categorical variable used

in the classification algorithm. X-ray penetration depth could be a factor in this difference between the two matrix types. Grinding rice would increase an exposure to X-ray for the inner parts of the rice grains, as compared to whole-grain rice.

TestAll Geo mode t-tests (whole grain vs. ground):

- K: t-statistic: 2.507, p-value: 1.636×10^{-2} (significant)
- P: t-statistic: 9.464, p-value: 9.217×10^{-12} (significant)
- S: t-statistic: 4.016, p-value: 2.531×10^{-4} (significant)
- Si: t-statistic: 4.110, p-value: 1.906×10^{-4} (significant)
- Mg: t-statistic: -1.252, p-value: 2.178×10^{-1} (not significant)

Soil mode t-tests (whole grain vs. ground):

- K: t-statistic: 6.573, p-value: 7.419×10^{-8} (significant)
- S: t-statistic: 5.627, p-value: 1.578×10^{-6} (significant)
- Ca: t-statistic: 3.952, p-value: 3.073×10^{-4} (significant)
- Zn: t-statistic: -0.507, p-value: 6.147×10^{-1} (not significant)
- Rb: t-statistic: 0.012, p-value: 9.905×10^{-1} (not significant)

The model obtained from 58 measurements was able to perfectly predict the rice type of the remaining 26 measurements. All the metrics (accuracy, precision, and recall) yield the value of 1.0.

CONCLUSION

A rice classification method using XRF data was developed. In this work, a handheld device together with a computer were used to analyze rice samples for classification purpose. Method was developed based on the decision tree algorithm applied on the elemental composition obtained from XRF spectra. Despite the low number of data (58 measurements for training and 26 for testing), the model based on decision tree algorithm was able to predict accurately the type of rice. Matrix effect was found to be present. There were a relatively low number of samples to be used as the training data. To improve the model, more measurements and samples are required. The model can be further adjusted to deal with more refined categories such as specific types of rice (multiclass problem as compared to binary problem of brown vs. white rice). However, larger sample size of different rice varieties could pose a challenge in having wider elemental ranges, which could make it more difficult to classify them.

REFERENCES

Fairhurst, T H, and A Dobermann. 2002. “Rice in the Global Food Supply.” **Better Crops International** 16: 4.

Khaweerat, S., W. Ratanatongchai, S. Wonglee, and B. Schillinger. 2017. “The Early Stage of Neutron Tomography for Cultural Heritage Study in Thailand.” **Physics Procedia**, Neutron Imaging for Applications in Industry and Science Proceedings of the 8th International Topical Meeting on Neutron Radiography (ITMNR-8) Beijing, China, September 4-8, 2016, 88 (January): 123–27. https://doi.org/10.1016/j.phpro.2017.06.016.

Liu, Jie, Xue-Hong Zhang, Henry Tran, Dun-Qiu Wang, and Yi-Nian Zhu. 2011. “Heavy Metal Contamination and Risk Assessment in Water, Paddy Soil, and Rice around an Electroplating Plant.” **Environmental Science and Pollution Research** 18 (9): 1623. https://doi.org/10.1007/s11356-011-0523-3.

Maneewong, Apichate, Kanwalee Pangza, Nongnuch Jangsawang, and Tasanee Charoennam. 2016. “Effect of Heat Treatment and Electron Beam Irradiation Tourmaline: UV-Visible, EPR, and Mid-IR Spectroscopic Analyses.” **Walailak Journal of Science and Technology (WJST)** 13 (12): 993–1003. https://doi.org/10.14456/vol13iss12pp%p.

Meharg, Andrew, and Md. Mazibur Rahman. 2003. “Arsenic Contamination of Bangladesh Paddy Field Soils: Implications for Rice Contribution to Arsenic Consumption - Environmental Science & Technology (ACS Publications).” **Environmental Science and Technology**. 37 (2): 229–34.

Monks, J.F., N.L. Vanier, J. Casaril, R.M. Berto, M. de Oliveira, C.B. Gomes, M.P. de Carvalho, A.R.G. Dias and M.C. Elias. 2013 Effects of milling on proximate composition, folic acid, fatty acids and technological properties of rice. **Journal of Food Composition and Analysis**. 30: 73–79.

Nuamsrinuan, Nisakorn, Weeranuch Kaewwiset, Pichet Limsuwan, and Kittisakchai Naemchanthara. 2018. “Analytical Processing Development of Tin Element Using Wavelength Dispersion X-Ray Fluorescence (WDXRF) Technique.” **Applied Mechanics and Materials**. 2018. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.879.201.

Paiva, F.F., N.L. Vanier, J.D.J. Berrios, V.Z. Pinto, D. Wood, T. Williams, J. Pan and M.C. Elias. 2016. Polishing and parboiling effect on the nutritional and technological properties of pigmented rice. **Food Chemistry**. 191: 105-112.

Piccoli, Nina Beretta, Nils Grede, Saskia de Pee, Anusara Singhkumarwong, Eveline Roks, Regina Moench-Pfanner, and W. Bloem Martin. 2012. “Rice Fortification: Its Potential for Improving Micronutrient Intake and Steps Required for Implementation at Scale.” **Food and Nutrition Bulletin** 33 (4_suppl3): S360–72. https://doi.org/10.1177/15648265120334S312.

Picha, R., J. Channuie, S. Khaweerat, T. Liamsuwan, J. Promping, W. Ratanatongchai, K. Silva, and S. Wonglee. 2015. “Gamma and Neutron Attenuation Properties of Barite-Cement Mixture.” **Journal of Physics: Conference Series** 611 (1): 012002. https://doi.org/10.1088/1742-6596/611/1/012002.

Steiger, Georg, Nadina Müller-Fischer, Hector Cori, and Béatrice Conde-Petit. 2014. “Fortification of Rice: Technologies and Nutrients.” **Annals of the New York Academy of Sciences** 1324 (1): 29–39. https://doi.org/10.1111/nyas.12418.

การวิเคราะห์ Indole-3-Acetic Acid เชิงปริมาณในสารสกัดจากอาหารเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียด้วยเทคนิค HPLC

Quantitative Analysis of Indole-3-Acetic Acid in Bacterial Culture Media Extract using HPLC

ศิริวัลย์ สร้อยกล่อม[1*] กฤตยา เพชรผึ้ง[1] วิภาดา ศิริอนุสรณ์ศักดิ์[1] และ จันทร์แรม รูปขำ[1]

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

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบความใช้ได้ของวิธีการวิเคราะห์ความเข้มข้นของ Indole-3-Acetic Acid (IAA) ในอาหารเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียกลุ่มที่ชอบเกลือและพีเอชเป็นด่างที่แยกได้จากดินด่างบริเวณสถานีวิจัยกาญจนบุรี ด้วยเทคนิค HPLC โดยสกัดอาหารเลี้ยงเชื้อแบคทีเรีย ด้วย ethyl acetate แยกด้วยคอลัมน์ C-18 ตรวจวัดด้วย Photodiode Array Detector ที่ 230 nm พบว่าช่วงความเข้มข้นของการวิเคราะห์ IAA คือ 15.625 – 500.000 µg mL^{-1} มีค่า R^2 เท่ากับ 1 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ยอมรับ ($R^2 \geq 0.995$) ค่าขีดจำกัดของการตรวจพบและขีดจำกัดของการวัดเชิงปริมาณของความเข้มข้นของ IAA เท่ากับ 0.20 µg mL^{-1} และ 0.61 µg mL^{-1} ตามลำดับ โดยมีความแม่นยำแสดงด้วยร้อยละของการกลับคืน (%recovery) ในช่วง 97.40 - 104.07 ความเที่ยงตรงในการวิเคราะห์วันเดียวกัน แสดงด้วย %RSD มีค่าน้อยกว่า 2 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์การยอมรับ เมื่อนำวิธีการนี้วิเคราะห์ปริมาณ IAA ในอาหารเลี้ยงแบคทีเรียมีค่าความเข้มข้นของ IAA ตั้งแต่ 4.96 ถึง 88.01 µg mL^{-1} การทดลองครั้งนี้จึงยืนยันถึงความสามารถในการวิเคราะห์ความเข้มข้นของ IAA ในอาหารเลี้ยงแบคทีเรียด้วยวิธีการดังกล่าว

ABSTRACT

The aim of this study was to validate the HPLC method for determination of Indole-3-Acetic Acid (IAA) concentration in culture media of the haloalkaliphilic bacteria isolated from alkaline soil in Kanchanaburi research station. The bacterial culture media was extracted with ethyl acetate. After extraction, IAA was separated on C18 column and then detected by Photodiode Array Detector at 230 nm. The validated quantitation range was 15.625 – 500.000 µg mL^{-1} with R^2 of 1. The method has produced a limit of detection and a limit of quantification of the IAA concentration of 0.20 µg mL^{-1} and 0.61 µg mL^{-1} respectively. The accuracy was indicated by the percentage of recover with recovery ranging from 97.40 to 104.07%. Intra-day precision was shown with% RSD which was lower than the criteria. The method was used for determination of the IAA concentration in bacterial culture media extract from 4.96 to 88.01 µg $mL.^{-1}$ The ability to quantify the IAA concentration in bacterial culture media by the study was confirmed.

Key words: Indole-3-Acetic Acid (IAA), Method Validation, Bacterial Culture Media, Bacterial Culture Media Extract, HPLC

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

[1]ฝ่ายเครื่องมือและวิจัยทางวิทยาศาสตร์ สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่ง มก. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

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

คำนำ

มีงานวิจัยหลายชิ้นที่บ่งชี้ว่า Indole-3-acetic acid (IAA) ซึ่งเป็นสารในกลุ่มออกซิน เป็นสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืช (Plant Growth Regulating Chemicals : PGRC) โดยที่ IAA ผลิตโดยพืชและจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช (Brown and Burlingham, 1968; Brown, 1972 and Barea and Brown, 1974) IAA มีคุณสมบัติเป็นสารเร่งการเจริญเติบโต มีผลกระตุ้นการขยายขนาดของเซลล์ การยืดตัวของเซลล์ และยังมีผลกระตุ้นการเกิดราก รวมถึงมีคุณสมบัติในการส่งเสริมการเจริญเติบโตในส่วนต่างๆของพืช และนอกจากนี้ IAA ยังสามารถถูกผลิตโดยแบคทีเรียหรือจุลินทรีย์ต่างๆที่อาศัยอยู่ในพืช หรือที่เรียกว่าแบคทีเรียส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช (Plant Growth Promoting Rhizobacteria, PGPR)

ปัจจุบันไม่มีวิธีมาตรฐานในการวิเคราะห์ IAA แต่ได้มีรายงานการพัฒนาวิธีการวิเคราะห์ IAA ซึ่งส่วนใหญ่การวัดปริมาณ IAA จะใช้วิธีทางเคมี (Chemical assay) คือการทำให้เกิดสี โดยให้ออกซินทำปฏิกิริยากับสารละลาย Salkowski's reagent (acidified ferric chloride) หรือใช้ Ehrllch's Reagent ซึ่งจะเกิดสีขึ้นมา จากนั้นวัดความเข้มของสีเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานแต่วิธีนี้ไม่ค่อยจำเพาะกับ IAA วิธีการดังกล่าวไม่เหมาะกับการวิเคราะห์ IAA ในอาหารเลี้ยงแบคทีเรีย *Azospirillum* ในช่วงความเข้มข้นเกิน 10 ug mL^{-1} (Crozier *et al*., 1998) นอกจากนี้ยังมีเทคนิคที่มีความจำเพาะและมีความแม่นยำในการตรวจวัดปริมาณสารในกลุ่มออกซิน เช่น แก๊สโครมาโตกราฟฟี (Gas chromatography) โครมาโตกราฟีของเหลวที่มีประสิทธิภาพสูง (high performance liquid chromatography, HPLC) (Kim, *et al*., 2006) ซึ่งในปัจจุบัน HPLC กลายเป็นวิธีที่ใช้ในการตรวจหา IAA มากขึ้น อย่างไรก็ตามการสกัดเป็นขั้นตอนสำคัญก่อนที่จะวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโครมาโตกราฟี หนึ่งในวิธีการสกัดที่ใช้กันแพร่หลายคือ การสกัดตัวอย่างด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น ethyl acetate,methanol,ethanol,diethyl ether (Kim *et al*., 2006; Sharma *et al.* 2014; Szkop and Bielawski, 2013) จากนั้นทำให้เข้มข้น แล้วจึงตรวจวัดออกซินโดยวิธี HPLC สำหรับในประเทศไทย ได้มีการนำวิธีวิเคราะห์ IAA ในอาหารเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียไปใช้กันอย่างแพร่หลายส่วนใหญ่จะเป็นวิธีทางเคมี (Chemical assay) ที่วัดความเข้มสี (Hanh and Wiyada, 2017) ส่วนเทคนิค HPLC ถึงแม้จะมีรายงานการวิเคราะห์ HPLC ในอาหารเลี้ยงเชื้อ (Jetiyanon, K. 2005) แต่ยังขาดข้อมูลการประเมินวิธีการตรวจสอบ ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จะตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีการวิเคราะห์ IAA เชิงปริมาณในสารสกัดจากอาหารเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียกลุ่มที่ชอบเกลือและพีเอชเป็นด่างที่แยกได้จากดินด่างบริเวณสถานีวิจัยกาญจนบุรี ด้วยเทคนิค HPLC โดยตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีตามแนวทางของ International Conference on Harmonisation (ICH) Q2(R1) เพื่อใช้เป็นวิธีมาตรฐานของหน่วยงานในการทดสอบและอ้างอิงได้ซึ่งการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีนั้นเป็นวิธีการยืนยันความสามารถของวิธีวิเคราะห์ว่ามีความถูกต้อง แม่นยำ และเป็นวิธีการหนึ่งในระบบควบคุมคุณภาพให้ได้มาตรฐานที่ถูกต้อง ก่อนที่จะวิเคราะห์ปริมาณ IAA ในตัวอย่างต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

เชื้อแบคทีเรีย

แบคทีเรียที่ใช้ทดสอบเป็นแบคทีเรียจากโครงการการประเมินศักยภาพของแบคทีเรียกลุ่มที่ชอบเกลือและพีเอชเป็นด่างซึ่งแยกได้จากดินด่างบริเวณสถานีวิจัยกาญจนบุรีในการเป็นเชื้อส่งเสริมการเจริญเติบโตของ

พืช (จันทร์แรม และคณะ, 2560) โดยได้มีการจำแนกเชื้อแล้วว่าเป็นแบคทีเรียกลุ่ม *Bacillus* ที่ชอบเกลือและพีเอชเป็นด่างซึ่งเป็นเชื้อ ในกลุ่ม Haloalkaliphilic bacteria เพื่อนำไปเป็นเชื้อแบคทีเรียที่ส่งเสริมการเจริญของพืช

การเลี้ยงเชื้อแบคทีเรีย

นำเชื้อแบคทีเรียที่แยกได้จากดินมาเลี้ยงในอาหาร Haloalkaliphile ซึ่งเป็นอาหารที่ใช้สำหรับเลี้ยงแบคทีเรียกลุ่มนี้ เพื่อใช้เป็นกล้าเชื้อ ย้ายกล้าเชื้อถ่ายลงในอาหารเหลว ที่มี tryptophan 1 g L^{-1} บ่มบนเครื่องเขย่าที่ 250 rpm ที่อุณหภูมิ 35 °C เป็นเวลา 48 hr จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 10,000 rpm นาน 15 min นำสารละลายส่วนใสไปสกัดต่อไป

การสกัด IAA

ใช้วิธีการสกัด ที่ปรับ จากวิธีการของ Rachev *et al.* (Rachev *et al*., 1993) โดยนำสารละลายส่วนใสที่ได้จากการเลี้ยงเชื้อปรับ pH ให้อยู่ระหว่าง 2.5-3.0 จากนั้นใส่ลงในกรวยแยก เติม ethyl acetate เขย่าและทิ้งให้แยกชั้น นำส่วนชั้น ethyl acetate (organic phase) แยกออก กรองผ่าน Na_2SO_4 ส่วนชั้นน้ำ (aqueous phase) สกัดซ้ำด้วย ethyl acetate อีก 2 ครั้ง นำส่วนชั้น ethyl acetate (organic phase) รวมกันแล้วระเหยแห้งด้วยเครื่องระเหยสุญญากาศแบบหมุน (rotary vaccuum evaporator) จนสารสกัดแห้งแล้วละลายกลับใน 60% acetonitrile (HPLC grade) นำสารละลายที่ได้กรองด้วย nylon membrane 0.45 µm ก่อนวิเคราะห์ปริมาณ IAA

วิธีวิเคราะห์ปริมาณ IAA

นำสารละลายที่สกัดได้วิเคราะห์ปริมาณ IAA ด้วยเครื่อง High Performance Liquid Chromatography (HPLC) โดยมีสภาวะคือ เครื่อง Liquid chromatography (Shimadzu LC-10A) คอมพิวเตอร์ควบคุมระบบและโปรแกรม Class VP สำหรับควบคุมและประมวลผล คอลัมน์ C18 ODS-3 (4.6 mm x 250 mm. I.D, 5 µm, GL Sciences) ที่ 30 °C สารละลายเฟสเคลื่อนที่ (mobile phase) ที่ตัวทำละลายเคลื่อนที่อัตราส่วนระหว่าง 0.8 % acetic acid/acetonitrile เท่ากับ 55:45 (v/v) อัตราการไหล 1 ml min^{-1} ใช้เครื่องตรวจวัดสารชนิด Photodiode Array Detector (DAD, Shimadzu, SPD-10Avp) ตรวจสอบค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 230 nm ปริมาตรการฉีดสาร 20 µL และมีระยะเวลาการฉีดแต่ละครั้ง (run time) เท่ากับ 15 min

การตรวจสอบความถูกต้องของวิธีวิเคราะห์ (Method validation)

ทดสอบเกณฑ์ต่างๆ ได้แก่ การทดสอบความจำเพาะเจาะจง (Specificity) ความเป็นเส้นตรงและช่วงของการวิเคราะห์ (Linearity and Range) ขีดจำกัดของการตรวจพบ (Limit of Detection, LOD) ขีดจำกัดของการวัดเชิงปริมาณ (Limit of Quantitation, LOQ) ความแม่นยำ (Accuracy) และความเที่ยงตรง (Precision)

1. การทดสอบความจำเพาะเจาะจง (Specificity)

เตรียมสารละลายมาตรฐานฮอร์โมนออกซินอื่นได้แก่ Indole-3-butyric acid (IBA), Indole propionic acid (IPA) และ Naphthalene acetic acid (NAA) ในตัวทำละลายให้มีความเข้มข้น 1 mg mL^{-1} จากนั้นเจือจางให้มีความเข้มข้น 250 µg mL^{-1} นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC ศึกษาช่วงเวลาที่พีคของ IAA ปรากฏ (retention time) และการแยกจากสารอื่น

2. การทดสอบความเป็นเส้นตรงและช่วงของการวิเคราะห์ (Linearity and Range)

ความเป็นเส้นตรงของวิธีการวิเคราะห์เป็นความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของสารที่วิเคราะห์กับสัญญาณ ทดสอบโดยเตรียมสารละลายมาตรฐาน IAA ในตัวทำละลายให้มีความเข้มข้น 1 mg mL^{-1}จากนั้นเจือจางสารละลายดังกล่าวให้มีความเข้มข้น 15.625 – 500.000 µg mL^{-1}นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและพื้นที่ใต้พีคโดยสร้างกราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นกับพื้นที่ใต้พีค คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การวิเคราะห์ (coefficient of determination, R^2) ซึ่งต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 0.995

3. การทดสอบขีดจำกัดของการตรวจพบ (Limit of Detection, LOD) ขีดจำกัดของการวัดเชิงปริมาณ (Limit of Quantitation, LOQ)

LOD และ LOQ คำนวณจากค่าสัญญาณและความชันของสมการถดถอย (regression equation) ของกราฟมาตรฐานจากสูตร LOD = 3.3xSD peak area/slope และ LOQ = 10xSD peak area/slope (Pérez-Lozano *et al*., 2004; International Conference on Harmonisation (ICH) Q2(R1), 2005; Singh, 2013)

4. การทดสอบความแม่นยำ (Accuracy)

ทดสอบความแม่นยำของวิธีวิเคราะห์โดยวิเคราะห์ตัวอย่างที่เติมสารมาตรฐาน IAA (Spiked IAA) ที่ 3 ระดับความเข้มข้น โดยเติมสารมาตรฐาน IAA 1 mg mL^{-1} ในตัวอย่างปริมาณ 50 , 100 และ 200 µL ต่อตัวอย่าง 5 mL คิดเป็น IAA ที่ความเข้มข้น 10, 20 และ 40 µg mL^{-1} ตัวอย่าง ทำการทดสอบความเข้มข้นละ 3 ซ้ำ วิเคราะห์ปริมาณ IAA เพื่อคำนวณค่าร้อยละของการคืนกลับ (% recovery) ของแต่ละระดับความเข้มข้น หาค่าเฉลี่ยร้อยละของการคืนกลับ (%mean recovery) และค่าร้อยละของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%Relative Standard Deviation, %RSD) โดยที่ค่าเฉลี่ยร้อยละของการคืนกลับของ IAA ต้องอยู่ในช่วง 90-110 และค่า %RSD ไม่เกิน 2.0

5. การทดสอบความเที่ยงตรง (Precision)

ความเที่ยงตรงของการวิเคราะห์ประเมินได้จากความทำซ้ำได้ (Repeatability) โดยทดสอบในวันและสภาวะเดียวกัน (intra-day precision)โดย วิเคราะห์ปริมาณ IAA ในตัวอย่างที่เติมสารมาตรฐาน IAA (Spiked IAA) ที่ 3 ระดับความเข้มข้น คือ 50, 100 และ 200 µg mL^{-1}โดยเติมสารมาตรฐาน IAA 1 mg mL^{-1} ในตัวอย่างปริมาณ 50 , 100 และ 200 µL ต่อตัวอย่าง 5 mL คิดเป็น IAA ที่ความเข้มข้น 10, 20 และ 40 µg mL^{-1} ตัวอย่าง ทำการทดสอบความเข้มข้นละ 3 ซ้ำ โดยทดสอบในวันและสภาวะเดียวกัน คำนวณความเข้มข้นเฉลี่ยของ IAA และ %RSD โดย %RSD ต้องไม่เกิน 2.0

การศึกษาปริมาณ IAA ในตัวอย่างอาหารเลี้ยงเชื้อแบคทีเรีย

วิเคราะห์ปริมาณ IAA ในตัวอย่างอาหารเลี้ยงเชื้อแบคทีเรีย โดยใช้วิธีวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้นและผ่านการตรวจสอบความถูกต้อง

ผลการทดลองและวิจารณ์

โครมาโตแกรมของ IAA ที่ได้จากวิธีการทดสอบนี้แสดงดังรูป 1 โดย IAA มีค่า retention time เท่ากับ 5.246 นาที ซึ่งใกล้เคียงกับของ Sharma *et al*. 2014 (RT= 2.620 นาที) และ Kim *et al*., 2006 (RT= 8.10 นาที) โดย RP-HPLC ที่ใช้ UV และ fluorescence detector (FLD) เป็นตัวตรวจวัดตามลำดับ

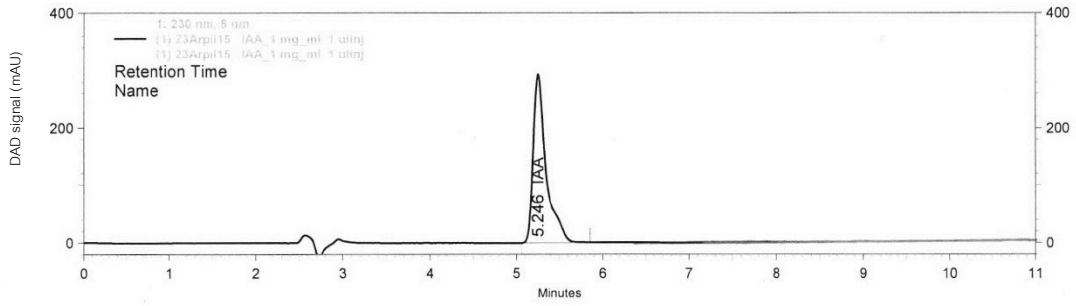


Figure 1: Representative chromatogram of IAA using a developed method

การทดสอบความจำเพาะเจาะจง (Specificity)

ความจำเพาะคือความสามารถของวิธีการวิเคราะห์เพื่อประเมินสารวิเคราะห์ในส่วนที่มีส่วนประกอบอื่น ๆ ที่มีอยู่ในตัวอย่างเมทริกซ์ จากการฉีดสารละลายผสมของฮอร์โมนออกซิน 4 ขนิด ภายใต้สภาวะที่วิเคราะห์พบว่าสาร IAA ให้ค่า retention time เท่ากับ 5.246 นาที (Figure 1) บ่งชี้ว่าสารไม่ได้แทรกแซงด้วยออกซินชนิดอื่นซึ่งได้แก่ IPA IBA NAA ซึ่งมีค่า retention time เท่ากับ 6.464, 7.861 และ 9.689 นาที ตามลำดับ (Figure 2) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความจำเพาะของวิธีการสำหรับ IAA โดยไม่มีสารอื่นรบกวน

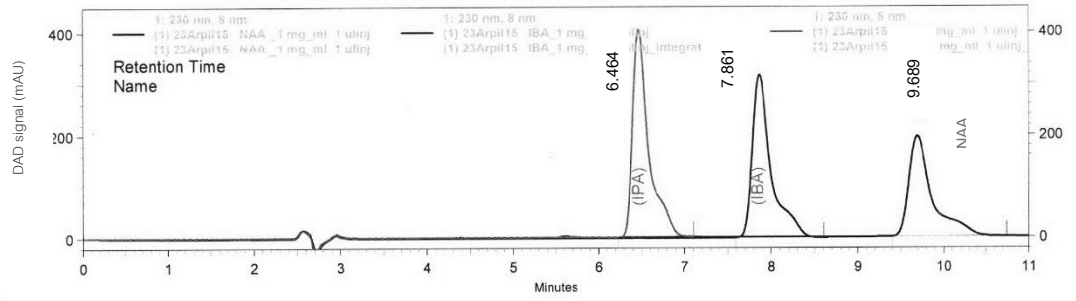


Figure 2: Chromatogram of IPA, IBA and NAA.

การทดสอบความเป็นเส้นตรงและช่วงของการวิเคราะห์ (Linearity and Range)

Table1 แสดงถึงสมการถดถอยในการทดสอบความเป็นเส้นตรงค่าดังกล่าวจะบ่งบอกถึงความสามารถของผลการทดสอบที่มีสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของ IAA ภายในช่วงที่กำหนด คือเมื่อฉีดสารละลายมาตรฐาน IAA 6 ความเข้มข้น ช่วง 15.625 – 500.000 µg mL^{-1} พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับพื้นที่ใต้พีคมีลักษณะเป็นเส้นตรงตลอดช่วงความเข้มข้นที่ทดสอบ โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 1 (Figure 3, Table 1) แสดงให้เห็นถึงความเหมาะสมในวิเคราะห์

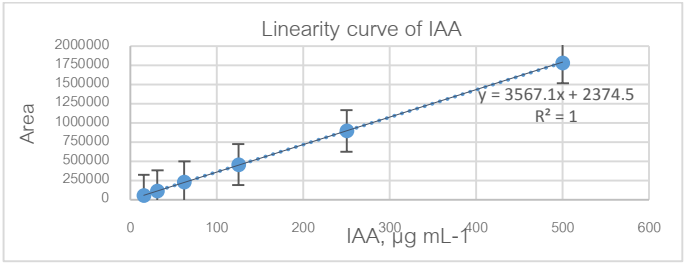


Figure3: Linearity plot for IAA

เป็นที่น่าสังเกตว่าช่วงการวิเคราะห์ที่ได้นี้มีค่าสูงกว่าของ Szkop *et al*., 2013 ที่หาปริมาณ indolic compounds ในตัวอย่างอาหารเลี้ยงเชื้อแบคทีเรีย *Pseudomonas putida* strain A, ด้วยวิธี RP-HPLC ซึ่งตัวตรวจวัดเป็น FLD ที่มีช่วงการวิเคราะห์เท่ากับ 0.0625 – 125.000 µg mL^{-1} ทั้งนี้เนื่องจากความไวของตัวตรวจวัด FLD ที่สูงกว่า DAD

Table 1: Regression statistics for IAA

Concentration (µg mL^{-1})	Area response (n = 3), Mean ± SD
15.625	54346 ± 1155
31.250	109337 ± 2069
62.500	227232 ± 1032
125.000	455597 ± 1114
250.000	895533 ± 6153
500.000	1783545 ± 3177
Coefficient of determination (R^2)	1
Slope	3567.1
y-intercept	2374.5

การทดสอบขีดจำกัดของการตรวจพบ (Limit of Detection,LOD) ขีดจำกัดของการวัดเชิงปริมาณ (Limit of Quantitation,LOQ)

ผลการทดสอบขีดจำกัดของการตรวจพบ (LOD) และขีดจำกัดของการวัดเชิงปริมาณ (LOQ) ของ IAA มีค่า 0.20 µg mL^{-1}และ 0.61 µg mL^{-1} ตามลำดับ ทั้งนี้ค่า LOD ของงานวิจัยนี้มีค่าสูงกว่าที่มีเคยรายงาน ที่ LOD เท่ากับ 0.0089 µg mL^{-1} (Szkop *et al*., 2013) เนื่องจากคุณลักษณะของตัวตรวจวัดของ FLD ที่มีค่าความไวมากกว่า DAD

การทดสอบความแม่นยำ (Accuracy)

ความแม่นยำของการวิเคราะห์ IAA ในตัวอย่างแสดงด้วยค่าร้อยละของการกลับคืน (%recovery) โดยผลจากการวิเคราะห์สารละลายอาหารเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียที่เติมสารมาตรฐาน IAA ที่ 3 ระดับความเข้มข้น คือ 10, 20 และ 40 µg mL^{-1} ตัวอย่าง พบว่าค่าเฉลี่ยของร้อยละของการคืนกลับของ IAA มีค่าอยู่ระหว่าง 97.40 - 104.07 (Table 2) ซึ่งสอดคล้องกับช่วงการยอมรับของการวิเคราะห์ที่ค่าร้อยละการกลับคืน ต้องมีค่าอยู่ระหว่าง 90-110 โดยการวิเคราะห์นี้จะเหมาะกับการวิเคราะห์ตัวอย่างที่มีสิ่งเจือปนมากถึง 1% (Épshtein, 2004)

Table 2 Recovery of IAA from bacterial culture media extract

Spike IAA level (µg mL^{-1} sample)	% Recovery (n=3) Mean ± SD	%RSD
10	97.40 ± 1.64	1.68
20	104.07 ± 2.06	1.98
40	103.75 ± 1.25	1.20

SD = standard deviation, RSD: Relative standard deviation

การทดสอบความเที่ยงตรง (Precision)

ความเที่ยงตรงของการวิเคราะห์ซึ่งประเมินจากความทำซ้ำได้ (Repeatability) โดยทดสอบในวันและสภาวะเดียวกัน พบว่าผลการทดสอบทำซ้ำได้มีค่า %RSD อยู่ในช่วง 1.20 -1.98 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 2 (Table 2)

การศึกษาปริมาณ IAA ในตัวอย่างอาหารเลี้ยงเชื้อแบคทีเรีย

เมื่อนำอาหารเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียมาวิเคราะห์ปริมาณ IAA พบว่า ความเข้มข้นของ IAA ในสารสกัดอาหารเลี้ยงแบคทีเรียมีค่าตั้งแต่ 5.34 ± 0.36 ถึง 85.03 ± 3.09 μg mL^{-1} (Table 3) ซึ่งมี IAA ปริมาณมากเมื่อเทียบกับที่เคยมีการศึกษาในสารสกัดอาหารเลี้ยงเชื้อแบคทีเรีย *Azospirillum* มีค่า IAA 0.01-2.6 μg mL^{-1} (Crozier *et al*., 1998)

Table 3 Determination of IAA in bacterial media extract

	IAA (μg mL^{-1}, n=3)
Sample	Mean ± SD
Sample1	5.34 ± 0.36
Sample2	6.72 ± 0.32
Sample3	6.06 ± 0.66
Sample4	78.52 ± 5.79
Sample5	88.11± 1.55
Sample6	85.03 ± 3.09

สรุป

การพัฒนาวิธีการตรวจวัดความเข้มข้นของ IAA ในอาหารเลี้ยงแบคทีเรียโดยใช้เทคนิค HPLC โดยสกัดตัวอย่างอาหารเลี้ยงแบคทีเรีย และนำไปแยกและตรวจโดย HPLC- DAD วิธีการนี้มีคุณลักษณะเฉพาะอยู่ในเกณฑ์ยอมรับมาตรฐานสากล วิธีการนี้เป็นที่น่าพอใจสามารถใช้วิเคราะห์ปริมาณได้สะดวก และเหมาะสำหรับในการหาปริมาณความเข้มข้นของ IAA ในอาหารเลี้ยงแบคทีเรียกลุ่มที่ชอบเกลือและพีเอชเป็นด่างที่แยกได้จากดินด่างบริเวณสถานีวิจัยกาญจนบุรี ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ในวิเคราะห์ในอาหารเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ที่สกัดได้จากดินต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่สนับสนุนทุนในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

จันทร์แรม รูปขำ, สาวิตร ตระกูลน่าเลื่อมใส, น้ำผึ้ง อนุกูล, ธนภูมิ มณีบุญ และศิริวัลย์ สร้อยกล่อม. 2560. การประเมินศักยภาพของแบคทีเรียกลุ่มที่ชอบเกลือและพีเอชเป็นด่างที่แยกได้จากดินด่างบริเวณสถานีวิจัยกาญจนบุรีในการเป็นเชื้อส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์. โครงการวิจัยทุนอุดหนุนวิจัย มก. ประจำปี 2557. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

Barea, J. M., and M. E. Brown. 1974. Effects on plant growth produced by *Azotobacter paspali* related to synthesis of plant growth regulating substances. **Journal of applied bacteriology** 40: 583-593.

Brown, M. E. 1972. Plant growth substances produced by microorganisms of soil and rhizosphere. **Jornal of applied bacteriogy** 43: 443-451.

Brown, M. E., and S. W. Burlingham. 1968. Production of plant growth substances by *Azotobacter chroococcum*. **Journal of General Microbiology** 53: 135-144.

Crozier, A., P., Arruda., R., Ruda, J.M., Jasmin, A., Maraa Monteitro and G., Sandberg. 1998. Analysis of Indole-3-Acetic Acid and Related Indoles in Culture Medium from *Azospirillum lipoferum* and *Azospirillum brasilense*. **Applied and Environmental Microbiology** 54(11): 2833-2837.

Épshtein, N. A. 2004. Structure of chemical compounds, methods of analysis and process control: Validation of HPLC techniques for pharmaceutical analysis. **Pharmaceutical Chemistry Journal** 38: 212–228.

Hanh, T.T. and, Wiyada, M. 2017. Correlation of growth and IAA production of Lysinibacillus Fusiformis UD 270 Huynh. **Journal of Applied and Physical Sciences** 3(3): 98-106.

International Conference on Harmonisation (ICH) Q2(R1). 2005. **Validation of Analytical Procedures Text and Methodology**, *ICH Harmonised Tripartite Guideline*, ICH.

Jetiyanon, K. 2015. Multiple Mechanisms of *Enterobacter asburiae* strain RS83for Plant Growth Enhancement. **Songklanakarin Journal of Science and Technology** 37 (1): 29-36, Jan. - Feb.

Kim, Y.J., Oh, Y.J. and Park, W.J. 2006. HPLC-Based Quantification of Indole 3-Acetic Acid in the Primary Root Tip of Maize. **Journal of Nanobiotechnology** 3: 40-45.

Pérez-Lozano, P., García-Montoya, E., Orriols, A., Miñarro, M., Ticó, JR., Suñé-Negre, JM. 2004. Development and validation of a new HPLC analytical method for the determination of alprazolam in tablets. **Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis** 34: 979-87.

Rachev, R.CH., R. Pavlova-Rouseva, S.V. Bojkova, and V.K. Gancheva.1993. Isolation of gibberellic acid produced by *Fusarium moniliforme*. J Nat Prod 56(7): 1168-1170.

Sharma, S., P., Prakash Verma and M., Kaur. 2014. Isolation, Purification and Estimation of IAA from Pseudomonas sp. using High-performance liquid Chromatography. **Journal of Pure and Applied Microbiology** 8(4): 1-6.

Szkop, M. and Bielawski, W. 2013. A Simple Method for Simultaneous RP-HPLC Determination of Indolic Compounds Related to Bacterial Biosynthesis of Indole-3-Acetic Acid. **Antonie van Leeuwenhoek** 103:683-691.

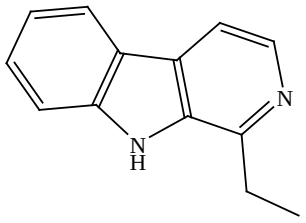
Singh R. 2013. HPLC method development and validation – An overview. **Journal of Pharmaceutical Education & Research** 4: 26-33.

Synthesis, Cytotoxicity and *in vitro* Antimalarial Activity of 1-Ethyl-β-carboline; an Indole Alkaloid of *Picrasma javanica* Bl.

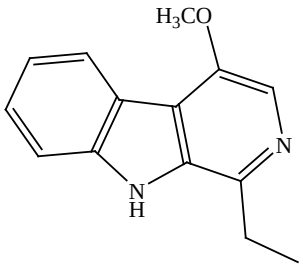
Juggreewut Junwised[1], Chalerm Saiin[1*], Kiyosei Takasu[2] and Masataka Ihara[3, 4]

ABSTRACT

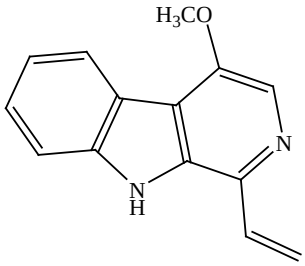
1-Ethyl-β-carboline was synthesized and evaluated for *in vitro* antimalarial activity against chloroquine sensitive *Plasmodium falciparum* FCR-3 strain, and cytotoxicity against mouse mammary tumor FM3A. Also, selective toxicity, defined by the ratio of EC_{50} for (FM3A) /EC_{50} for (*P. falciparum*), was determined. 1-Ethyl-β-carboline was synthesized by two routes. The first route using 1-ethyl-4-oxo-1,2,3,4-tetrahydro-β-carboline as starting material, gave very low yield (1.30%). The second route using L-tryptophan as starting material, gave a good yield (62.52%). 1-Ethyl-β-carboline showed antimalarial activity with EC_{50} $1.9x10^{-6}$ M. While it showed cytotoxicity with EC_{50} $>3.1x10^{-5}$ M. Thus, its selective toxicity was >25. Comparision with 1-ethyl-4-methoxy-β-carboline and 4-methoxy-1-vinyl-β-carboline, it showed highest selective toxicity. It could be concluded that lack of 4-methoxy moiety of 1-ethyl-β-carboline, increased both antimalarial activity and selective toxicity. Therefore, it was candidate as potential antimalarial agent.



1-ethyl-β-carboline



1-ethyl-4-methoxy-β-carboline



4-methoxy-1-vinyl-β-carboline

Key Words: 1-Ethyl-β-carboline, cytotoxicity, antimalarial activity, *Picrasma javanica* Bl.

*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]Graduate School of Pharmaceutical Sciences, Kyoto University, Kyoto, Japan

[3]Professer Emeritus of Tohoku University, Sendai, Japan

[4]Laboratory of Tropical Diseases, Drug Discovery Science Research Center, Hoshi University, Tokyo, Japan

INTRODUCTION

1-Ethyl-β-carboline was one of fourteen indole alkaloids isolated from the bark of *Picrasma javanica* Bl. growing in Indonesia (Ohmoto *et al*., 1987). Pavanand *et al*. (1988) demonstrated that the chloroform extract of the bark of Thai *P. javanica* possessed the high level of *in vitro* antimalarial activity against *P. falciparum* asexual stage. Further isolation and purification of the chloroform extract resulted in the identification of two pure alkaloids, 4-methoxy-1-vinyl-β-carboline and 6-hydroxy-4-methoxy-1-vinyl-β-carboline. The first compound was effective against *P. falciparum* isolates with mean IC_{50} of 2.4 μg/ml, while the second one showed mean IC_{50} of 3.2 μg/ml. Saiin *et al*. (2003 & 2016) studied the *in vitro* antimalarial activity against *Plasmodium falciparum* K1 of the four extracts from the stem bark of Thai *P. javanica*; *ie* water, methanol, chloroform and hexane by using a modification of the [^{3}H] hypoxanthine incorporation method. The chloroform extract showed *in vitro* antimalarial activity with IC_{50} of 20.0 μg/ml. The extract was further isolated, yielding alkaloidal and non-alkaloidal portion. The alkaloidal portion was effective against *P. falciparum* with *in vitro* IC_{50} of 15.0 μg/ml. The component of alkaloidal portion was determined using GC-MS technique. Mass spectrum of the major compound in alkaloidal portion corresponds to that of known antimalarial 4-methoxy-1-vinyl-β-carboline. Also, its derivative 1-ethyl-4-methoxy-β-carboline (crenatine) was isolated by using preparative thin layer chromatography (TLC).

According to literature review, it was found that fourteen indole alkaloids were isolated from *P. javanica*. In order to know well the antimalarial activity of *P. javanica*, the small molecule 1-ethyl-β-carboline was synthesized and evaluated for antimalarial activity and cytotoxicity. It was evaluated for *in vitro* antimalarial activity against chloroquine sensitive *Plasmodium falciparum* FCR-3 strain and, cytotoxicity against mouse mammary tumor FM3A. Also, selective toxicity, defined by the ratio of EC_{50} for (FM3A) /EC_{50} for (*P. falciparum*), was determined.

This research aimed to confirm the structure determination of 1-ethyl-β-carboline of our previous work. Importantly, it was interesting to investigate the effect of lack of methoxy group at 4-position of β-carboline.

MATERIALS AND METHODS

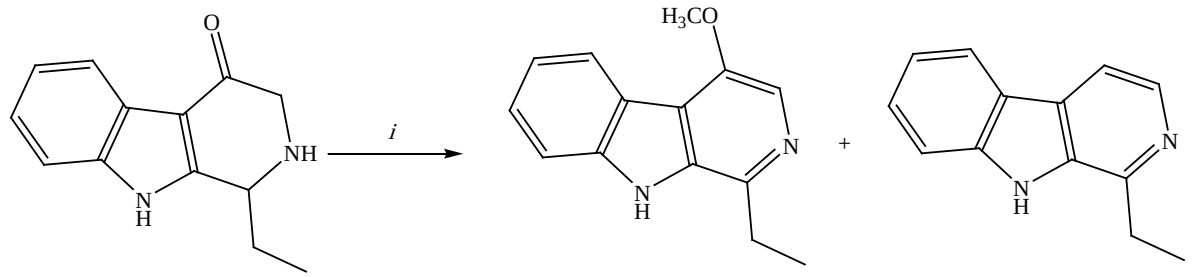
Chemicals

1-Ethyl-4-oxo-1,2,3,4-tetrahydro-β-carboline was synthesized at medicinal chemistry laboratory of Graduated School of Pharmaceutical Sciences, Tohoku University, Japan (Saiin *et al*., 2018). Trimethyl orthoformate was obtained from Wako, Japan. *p*-Toluenesulfonic acid monohydrate was obtained from TCI, Japan. L-Tryptophan was obtained from HIMEDIA. Propionaldehyde was obtained from Merck. Potassium dichromate was obtained from Ajax Finechem Pty Ltd. Silica 60 GF 254 aluminum sheet (Merck) was used in thin layer chromatography (TLC) performance. Methanol

used in the reaction of experiment 1 was dried with sodium hydride. All solvents for extractions and chromatography procedures were used without distillation.

Synthesis of 1-ethyl-β-carboline

Experiment 1; Synthesis of 1-ethyl-β-carboline from 1-ethyl-4-oxo-1,2,3,4-tetrahydro-β-carboline



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

Scheme 1: Reagents and conditions: (*i*) MeOH, *p*-TSA, $(CH_3O)_3CH$, reflux (24h) (1.30%)

Reaction

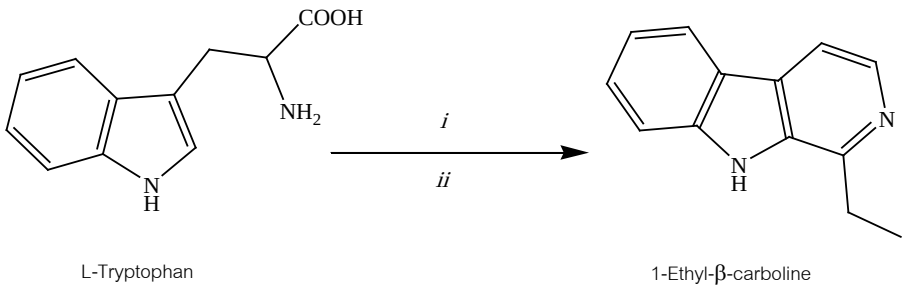
A solution composed of 1-ethyl-4-oxo-1,2,3,4-tetrahydro-β-carboline (0.1455 g, 0.68 mmol) in methanol (MeOH) (10.0 mL), trimethyl orthoformate ($(CH_3O)_3CH$) (2.0 mL) and *p*-toluenesulfonic acid (*p*-TSA)(0.250 g, 1.45 mmol) was refluxed for 24 h. Evaporation of the reaction solution gave a residue which was dissolved in ethyl acetate (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 crenatine and 2.0 mg (1.30 %) of 1-ethyl-β-carboline.

Structure elucidation

^{1}H-NMR spectra (300 MHz) were recorded on Varian Gemini 2000 FT-NMR spectrometer (Graduated School of Pharmaceutical Sciences, Tohoku University, Japan). Chemical shifts were relative to tetramethylsilane (TMS).

^{1}H NMR (δ in $CDCl_3$): 1.48 (3H, t, *J* =7.42, 7.69 Hz, -$\underline{CH_3}$), 3.15 (2H, q, *J* = 7.42, 7.69, 7.69 Hz, -$\underline{CH_2}$-), 7.28-7.32 (1H, m, 6-H), 7.52-7.58 (2H, m, 7-H, 8-H), 7.83 (1H, d, *J* = 5.49 Hz, 3-H), 8.12 (1H, d, *J* = 7.97 Hz, 5-H) 8.24 (1H, brs, NH), 8.40 (1H, d, *J* = 5.49 Hz, 4-H).

Experiment 2: Synthesis of 1-ethyl-β-carboline from L- tryptophan



L-Tryptophan 1-Ethyl-β-carboline

Scheme 2: Reagents and conditions: (*i*) C_2H_5CHO, H_2O/C_2H_5OH, reflux: (*ii*) KCr_2O_7, CH_3COOH, H_2O, ice bath (62.52%)

Reaction

The mixture of propionaldehyde (C_2H_5CHO) (6 ml) and water (40 ml) was added the solution of L-tryptophan (0.6 g, 0.0029 mole) in water (30 ml) and ethanol (10 ml). The solution was refluxed with the condenser top stopper for 3 hours by using water bath (60-70°C) and was left at room temperature for 2 days. The reaction was monitored by TLC (Silica 60 GF 254 aluminum sheet) using chloroform-methanol (6:4 and 7:3) as mobile phase, and detected in iodine vapor tank. TLC-chromatogram showed the spot of L-tryptophan, it indicated that the reaction was not completed. The solution was continued refluxed for 6 hours and left overnight at room temperature. The TLC-chromatogram did not show the spot of L-tryptophan, it indicated that the reaction completed. The solution was heated open air to evaporate the excess propionaldehyde. The solution was then diluted to 200 ml with water in open beaker and boiled for a few minutes, and then 10% potassium dichromate solution (KCr_2O_7) (40 ml) and glacial acetic acid (CH_3COOH) (9 ml) were added. After boiling for a further 2 minutes the brown mixture was allowed to cool for 10 minutes on the bench and further cool in a sodium chloride-ice bath. To decompose excess oxidant, 10% sodium sulphite solution was added to the brown mixture until it turned green. The mixture was basified with sodium carbonate and extracted with diethyl ether (80 ml x 3). The diethyl ether extract was dried with magnesium sulfate. Evaporation of the diethyl ether left 0.24 g crude 1-ethyl-β-carboline. The crude compound was identified by TLC using ethyl acetate and chloroform-methanol (7:3) as mobile phase. TLC-chromatogram indicated at least two compounds in the crude 1-ethyl-β-carboline. Isolation by column chromatography (Silica gel 60, ethyl acetate as eluting solvent) provided 84 mg (0.00042 mole, 14.24%) white crystal of 1-ethyl-β-carboline and yellow color liquid. So the reaction mixture was extracted again with ethyl acetate. The extraction provided 0.28 g (0.0014 mole, 48.28%) white crystal of 1-ethyl-β-carboline. Total yield was 62.52%.

Structure elucidation

The chemical structure of 1-ethyl-β-carboline was elucidated from ^{1}H-NMR spectrum. This spectrum was performed with a 400 MHz ^{1}H-NMR spectrometer Avance Bucker, Germany. The solvent for this spectrum was deuterated chloroform. The chemical shifts were reported in the ppm scale. The MS were taken with Agilent technologies; 6540 UHD Accurate mass QTOF LC/MS. Sample was taken directly and used positive charge electrospray ionization mode.

^{1}H-NMR (δ in $CDCl_3$): 1.48 (3H, t, *J*=7.6 Hz, -$\underline{CH_3}$), 3.15 (2H, q, *J*=7.6 Hz, -$\underline{CH_2}$-), 7.28 (1H, m, H-6), 7.53 (2H, t, *J*=5.2, 5.6 Hz, H-7, H-8), 7.82 (1H, d, *J*=5 Hz, H-3), 8.12 (1H, d, *J*=8 Hz, H-5), 8.34 (1H, brs, NH), 8.39 (1H, d, *J*=5 Hz, H-4). High resolution MS, Calcd for $[C_{13}H_{12}N_2 + H]^+$: *m/z* 197.1079. Found: *m/z* 197. 1094 $[M+H]^+$.

Cytotoxicity and *in vitro* antimalarial activity of 1-ethyl-β-carboline

The *in vitro* antimalarial activity against *P. faciparum* (Chloroquine sensitive FCR-3 strain) of 1-ethyl-β-carboline (from the experimental 1) and its cytotoxicity against mouse mammary tumor FM3A were evaluated by compare to 1-ethyl-4-methoxy-β-carboline and 4-methoxy-1-vinyl-β-carboline. The assay procedures were as described by Kim et al. (1999) and Takasu et al. (2005). Selective toxicity, defined by the ratio EC_{50} (FM3A)/EC_{50} (*P. falciparum*), were determined.

RESULTS AND DISCUSSION

1-Ethyl-β-carboline was synthesized by chance in the process to develop the convenient method for synthesis of crenatine in as reported by Saiin *et al*. (2018). Compound 1-Ethyl-4-oxo-1,2,3,4-tetrahydro-β-carboline was methylated with methanol in the presence of trimethyl orthoformate and *p*-toluensulfonic acid, the result provided crenatine and 1-ethyl-β-carboline in very low yield. Unfortunately, the chemical shift at 8.40 ppm of ^{1}H NMR spectrum was previously decided as hydroxyl proton at 4-position. Also, this compound was decided as 1-ethyl-4-hydroxy-β-carboline. In this study, more experiment has been done to confirm the structure; it was proved that the proton at chemical shift at 8.40 ppm should be aromatic hydrogen proton (H-4) of 1-ethyl-β-carboline. Experimentally, 1-ethyl-β-carboline was new synthesized by using L-tryptophan as starting material. The High resolution mass spectra of 1-ethyl-β-carboline showed the peak at *m/z* 197. 1094 $[M+H]^+$. Also, the ^{1}H NMR of new synthesized compound was identical in all respects with our previous synthesized 1-ethyl-β-carboline. In addition, the new ^{1}H NMR spectrum was identical with the spectra reported by Bamgbose *et al*. (1977) and Ohmoto *et al*. (1987).

1-Ethyl-β-carboline was synthesized by follow the methods reported by Bamgbose *et al.* (1977) and Ohmoto *et al.* (1987). This reaction was namely the Pictet-Spengler condensation (Cox et

al., 1995). The reaction of tryptophan with propionaldehyde in water provided 3-carboxylic-1,2,4-trihydrocarboline. Without isolation of the condensed product, the second reaction was follow by oxidation with potassium dichromate (Scheme 2). This experiment was performance at laboratory of Faculty of Pharmaceutical Sciences, Naresuan University. The reaction was refluxed by using water bath. Because of this medicinal chemistry laboratory was not reached high safety standard. The reaction was refluxed only in the office hours on the day and stopped reflux on the night. Although it consumed more time than the experiments of two previously reports, it was safety to reflux the reaction in the office hours on the day. In our opinion, Pictet-Spengler condensation was flexible. Changing refluxing time and temperature was possible.

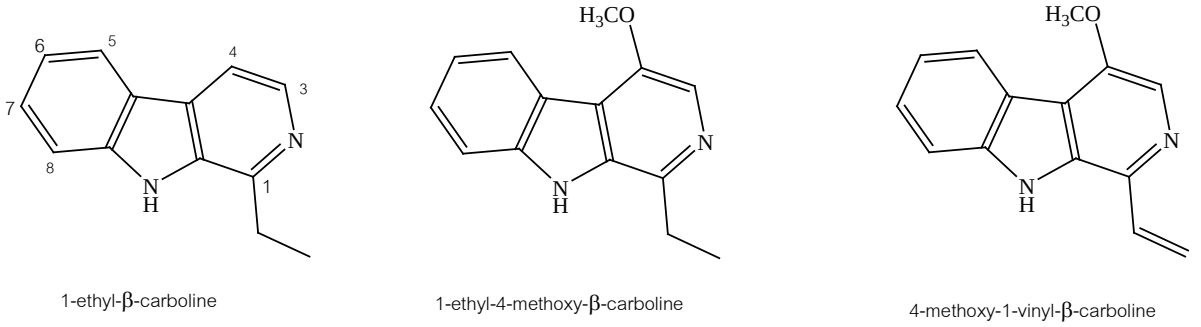
Cytotoxicity and *in vitro* antimalarial activity of 1-ethyl-β-carboline

The *in vitro* antimalarial activity against *P. falciparum* (Chloroquine sensitive FCR-3 strain) of 1-Ethyl-β-carboline and its cytotoxicity against mouse mammary tumor FM3A was evaluated (Table 1). Compound, 1-Ethyl-β-carboline that did not have methoxy group (OCH_3) at 4 position of β-carboline (Figure 1), increased antimalarial and decreased toxicity. Its selective toxicity, defined by the ratio of EC_{50} for (FM3A) /EC_{50} for (*P. falciparum*), was increased. While, 1-ethyl-4-methoxy-β-carboline and 4-methoxy-1-vinyl-β-carboline that had methoxy group at 4 position, were not selective toxicities.

Table 1. *In vitro* antimalarial activities and cytotoxicity of 1-ethyl-β-carboline and its derivatives

Compound	EC_{50} (M)		Selective toxicity [c]
	P. falciparum [a]	FM3A [b]	
1-ethyl-β-carboline	1.2×10^{-6}	$>3.1 \times 10^{-5}$ [d]	>25
1-ethyl-4-methoxy-β-carboline [e]	1.6×10^{-5}	1.8×10^{-5}	1.1
4-methoxy-1-vinyl-β-carboline [e]	5.0×10^{-6}	3.8×10^{-6}	0.8
Quinine [e]	1.1×10^{-7}	1.1×10^{-4}	910

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



1-ethyl-β-carboline 1-ethyl-4-methoxy-β-carboline 4-methoxy-1-vinyl-β-carboline

Figure 1 Chemical structures of 1-ethyl-β-carboline, 1-ethyl-4-methoxy-β-carboline and 4-methoxy-1-vinyl-β-carboline.

Literature review by Saiin and Sirithunyalug (2017) showed that there were fourteen indole alkaloids isolated from *P. Javanica*, including 1-ethyl-β-carboline, 1-ethyl-4-methoxy-β-carboline, and 4-methoxy-1-vinyl-β-carboline. Thus, it was interesting to synthesis these indole alkaloids and to study their structure activity relationship as potential antimalarial agents.

CONCLUSION

1-Ethyl-β-carboline could be synthesized in a good yield by one pot reaction of L-tryptophan with propionaldehyde in water, followed by oxidation with potassium dichromate. It was found that lack of 4-methoxy moiety both increased antimalarial activity and selective toxicity of β-carbolines.

ACKNOWLEDGEMENTS

We thanked Professor Yusuke Wataya and Associate professor Hye-Sook Kim of Faculty of Pharmaceutical Sciences, Okayama University, Japan for cytotoxicity and *in vitro* antimalarial activity of synthesized compounds. Saiin was financial supported by Japanese Governance Scholarship (MEXT) 2001. Also, he thanked Associated Professor Nantaka Khorana of Yayao University for writing suggestion.

REFERENCES

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

Cox, E.D. and J.M. Cook. 1995. The Pictet-Spengler condensation: A new direction for an old reaction. **Chemical Review**. 95:1797-1842.

Kim, H.S., Y. Shibata, Y. Wataya, K. Tsuchiya, A. Masuyama and M. Nojima. 1999. Synthesis and antimalarial activity of cyclic peroxides, 1,2,4,5,7-pentaxocanes and 1,2,4,5-tetroxanes. **J.Med.Chem.** 42(14):2604-2609.

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. and B. Sirithunyalug. 2017. Review of the chemical structures and antimalarial activities of indole alkaloids isolated from *Picrasma javanica* Bl stembark. **Adv med plant Res.** 5:29-36.

Saiin, C., B. Sirithunyalug, A. Baramee, K. Takasu and MIhara. 2018. The Convenient method for synthesis of crenatine; an antimalarial agent of *Picrasma spp.* **Proceeding of the 56th Kasetsart University Annual Conference; Agriculture science toward creative economy.** Bangkok; Kasetsart University, 152-159.

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

Saiin, C., R. Rattanajak, S. Kamchonwongpaisan, K. Ingkaninan, K. Sukontason, A. Baramee and B. Sirithunyalug. 2003. Isolation and *in vitro* antimalarial activity of hexane extract from Thai *Picrasma javanica* Bl stembark. **Southeast Asian J Trop Med Public Health.** 34 (Supp 2):51-55.

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

Takasu, K., T. Shimogama, C. Saiin, H.S. Kim, Y. Wataya, R. Brun and M. Ihara. 2005. Synthesis and evaluation of beta-carbolinium cations as new antimalarial agents based on π-delocalized lipophilic cation (DLC) hypothesis. **Chem Pharm Bull (Tokyo).** 53(6):653-61.

การกำจัดโครเมียมและสังกะสีในน้ำด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า

Removal of Chromium and Zinc in Water by Electrochemical Method

สัมพันธ์ สร้อยกล่อม[1*] ชานน สกุลอินทร์[1] และ ณรงค์ ผังวิวัฒน์[1]

Sumpan Soiklom[1*], Chanon Sakulin[1] and Narong Pungwiwat[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้เทคนิคทางเคมีไฟฟ้า ข้อดีคือ สะดวก รวดเร็ว และต้นทุนต่ำ ในการกำจัดโลหะหนัก 2 ชนิด คือ Zn^{2+}และ Cr^{6+} ที่ในรูปของ $Cr_2O_7^{2-}$ โดยใช้เซลล์อิเล็กโตรไลติกที่มีแท่งแกรไฟต์ไส้ดินสอเป็นขั้วอิเล็กโทรดทั้ง 2 ขั้ว แล้วจ่ายศักย์ไฟฟ้าค่าต่างๆ ตั้งแต่ 2-12 โวลต์ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำสารละลายที่เหลือไปตรวจวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักที่เหลือด้วย Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก Zn^{2+} และ Cr^{6+} เท่ากับ 37.90% และ 11.19% ตามลำดับ นอกจากนี้แท่งแกรไฟต์ไส้ดินสอที่เคลือบพอลิอะนิลีน(PANI)ด้วยวิธีไซคลิกโวลแทมเมตรีและโพเทนชิโอสแตติกไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักในน้ำได้ จึงเคลือบแท่งแกรไฟต์ไส้ดินสอด้วยพอลิเมอร์ของอะนิลีน และ 3,5-ไดไฮดรอกซีเบนโซอิกแอซิดด้วยวิธีโพเทนชิโอสแตติกที่ศักย์ไฟฟ้า +2 โวลต์ เป็นเวลา 20 นาที ซึ่งพบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัด Zn^{2+} และ Cr^{6+} เพิ่มขึ้น 10.67 % และ 74.82 % ตามลำดับ

ABSTRACT

This research is intended to applied electrochemical techniques with advantages of convenience, fast and low cost. Removal of 2 types of heavy metal in water included Zn^{2+} and Cr^{6+} in $Cr_2O_7^{2-}$ form by electrolytic cell using graphite pencil as electrode was conducted with varying potential of 2-12 volt. After 1 hour the solution was investigated for the remaining amount of heavy metals by AAS. It was found that the efficiency of Zn^{2+} and Cr^{6+}removal were 37.90% and 11.19%, respectively. In addition, it was found that graphite (used as electrode) was coated with polyaniline(PANI) by Cyclic Voltammetry and Potentiostatic method could not increase heavy metals removal in water. Thus, coated graphite with polymer of aniline and 3, 5-dihydroxybenzoic acid conducted by Potentiostatic method at +2 volt for 20 minutes was also observed. The results showed that the efficiency of Zn^{2+} and Cr^{6+} removal increased 10.67% and 74.82%, respectively.

Key words: Graphite, Electrode, Cyclic Voltammetry, Potentiostatic

*Corresponding author; e-mail address: **sumpan.s@sci.kmutnb.ac.th**

[1]ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

[1]Department of Industrial Chemistry, Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

คำนำ

น้ำสะอาดมีสำคัญในการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิต ปัญหาการขาดแคลนน้ำสะอาดเนื่องจากประชากรโลกที่เพิ่มขึ้น รวมถึงการเปลี่ยนแปลงภูมิภาค การปนเปื้อนของแหล่งน้ำสะอาด และนโยบายสาธารณะ มลพิษของน้ำอย่างหนึ่งคือ การปนเปื้อนของโลหะหนักซึ่งมีความเป็นพิษและอันตรายต่อชีวิตมนุษย์และสัตว์น้ำ (วาสนา, 2561) ทำให้นักวิทยาศาสตร์เกิดความสนใจที่จะขจัดโลหะหนักเหล่านี้ออกจากแหล่งน้ำ โลหะหนักเช่น ตะกั่ว ปรอท สังกะสี ทองแดง นิกเกิล มักพบอย่างกว้างขวางในกระบวนการอุตสาหกรรมต่างๆ ซึ่งโลหะหนักเหล่านี้สามารถสะสมตัวอยู่ในสิ่งมีชีวิต ได้รับผ่านสายโซ่อาหาร โลหะเหล่านี้ก่อให้เกิดโรคความดันโลหิตสูง การเสื่อมสมรรถภาพทางเพศ ตลอดจนปัญหาทางประสาทและกระบวนการเมตาบอลิซึมในร่างกาย ทั้งนี้จึงต้องมีการระบุมาตรฐานน้ำทิ้ง เพื่อป้องกันอันตรายต่อสุขภาพมนุษย์และสิ่งแวดล้อม

การกำจัดโลหะหนักในน้ำสามารถทำได้หลายวิธีเช่น การตกตะกอน การดูดซับ การใช้แผ่นเมเมบรน เป็นต้น กระนั้นในอดีตได้มีการประยุกต์ใช้เทคนิคทางเคมีไฟฟ้าด้วยไฟฟ้า (Argawal *et al*.,1984; Yassine *et al*., 2009; Khattab *et al*.,2013; Yehia *et al*., 2015; Mohammad *et al*., 2015; Francisco *et al*., 2017.) ที่มีข้อดี คือ สะดวก รวดเร็ว และประหยัด ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำโดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดที่แตกต่างกันออกไป หนึ่งในนั้นคือแกรไฟต์ (Koichi *et al*., 1989; Lulia *et al*., 2017) ที่เป็นวัสดุนำไฟฟ้าได้เป็นที่สนใจในการนำมาใช้เป็นอิเล็กโทรดเช่นกัน เนื่องจากใช้งานได้ง่าย สะดวก และไม่เสียเวลาในการทำความสะอาดพื้นผิว

ในงานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการกำจัดโลหะหนัก 2 ชนิดในน้ำคือ โครเมียม และสังกะสี โดยใช้วิธีทางเคมีไฟฟ้าโดยใช้แท่งแกรไฟต์ไส้ดินสอเป็นอิเล็กโทรด และทำการจ่ายศักย์ไฟฟ้าเพื่อให้เกิดจับไอออนโลหะหนักที่ขั้วแคโทด นอกจากนี้ยังนำพอลิอะนิลีนซึ่งเป็นพอลิเมอร์นำไฟฟ้ามาประยุกต์ใช้เพื่อศึกษาผลและประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมสารละลายมาตรฐานและการสร้างกราฟมาตรฐาน

เตรียมสารละลายมาตรฐานดังนี้

1) สารละลาย Zn^{2+} ความเข้มข้น 10 ppm จากนั้นเจือจางเป็น 1.25, 2.5 และ 5 ppm นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิค (Atomic absorption Spectrophotometer, AAS) ที่ความยาวคลื่น 213 nm สร้างกราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของสารละลาย Zn^{2+}กับค่าการดูดกลืนแสง

2) สารละลาย Cr^{6+} ในรูป $Cr_2O_7^{2-}$ ความเข้มข้น 1 ppm จากนั้นเจือจางเป็น 0.125, 0.25 และ 0.5 ppm นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิค AAS ที่ความยาวคลื่น 357 nm สร้างกราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของสารละลาย Cr^{6+}กับค่าการดูดกลืนแสง

3) สารละลายผสมระหว่าง Zn^{2+} 10 ppm และ Cr^{6+} 1 ppm

การเตรียมอิเล็กโทรด

อิเล็กโทรดที่ใช้ในงานวิจัยนี้มี 4 รูปแบบ

1) แท่งแกรไฟต์ไส้ดินสอที่ไม่ได้เคลือบ นำไปทำความสะอาดผิวด้วยการขัดกระดาษทราย แล้วเช็ดด้วยกระดาษทิชชู

2) แท่งแกรไฟต์ไส้ดินสอที่เคลือบพอลิอะนิลีน (PANI) ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic Voltammetry, CV) โดยใช้สารละลายอะนิลีนที่มีความเข้มข้น 0.3 M ในสารละลาย HCl ความเข้มข้น 1 M โดยใช้ศักย์ไฟฟ้า -0.15 ถึง 1 V/Scan rate 50 mV/s และกำหนดรอบในการเคลือบเป็น 25 และ 50 รอบตามลำดับ

3) แท่งแกรไฟต์ไส้ดินสอที่เคลือบพอลิอะนิลีนสังเคราะห์ด้วยวิธีโพเทนชิโอสแตกติกที่ศักย์ไฟฟ้า +2V โดยใช้สารละลายเช่นเดียวกับที่ใช้ในวิธีไซคลิกโวลแทมเมตรี

4) แท่งแกรไฟต์ไส้ดินสอที่เคลือบพอลิเมอร์ของอะนิลีนและ3,5-ไดไฮดรอกซีเบนโซอิกแอซิด ด้วยวิธีโพเทนชิโอสแตติกที่ศักย์ไฟฟ้า +2V โดยใช้สารละลายเช่นเดียวกับวิธีไซคลิกโวลแทมเมตรี แต่เติม 3,5-ไดไฮดรอกซีเบนโซอิกแอซิดและอะนิลีนในอัตราส่วน 1:1 (โดยโมล)

การทดสอบการกำจัดไอออนโลหะหนักด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า

การทดสอบการกำจัดไอออนโลหะหนักโดยใช้เวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้แท่งแกรไฟต์ไส้ดินสอที่ไม่ได้เคลือบเป็นแอโนด ส่วนแคโทดใช้แท่งแกรไฟต์ไส้ดินสอต่อไปนี้

1) ใช้แท่งแกรไฟต์ไส้ดินสอที่ไม่ได้เคลือบโดยให้ศักย์ไฟฟ้าที่ 2, 4, 6, 8, 10 และ 12 V ตามลำดับ

2) ใช้แท่งแกรไฟต์ไส้ดินสอที่เคลือบพอลิอะนิลีนด้วยวิธี ไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยให้ศักย์ไฟฟ้าที่ 12 V เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

3) ใช้แท่งแกรไฟต์ไส้ดินสอที่เคลือบพอลิอะนิลีน ด้วยวิธีโพเทนชิโอสแตติก ให้ศักย์ไฟฟ้าที่ 12 V เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

4) ใช้แท่งแกรไฟต์ไส้ดินสอที่เคลือบพอลิอะนิลีน และ 3,5-ไดไฮดรอกซีเบนโซอิกแอซิดด้วยวิธีโพเทนชิโอสแตกติก ให้ศักย์ไฟฟ้าที่ 12 V เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

การวิเคราะห์ไอออนโลหะหนักที่เหลืออยู่

นำสารละลายจากการทดลองการทดสอบการกำจัดไอออนโลหะหนักด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าวิเคราะห์ไอออนโลหะหนักที่เหลืออยู่ด้วยเครื่อง AAS

การตรวจดูพื้นผิวของแท่งแกรไฟต์ไส้ดินสอเทคนิคกล้องจุลทรรศน์ใช้แสงเชิงประกอบ (compound light microscope)

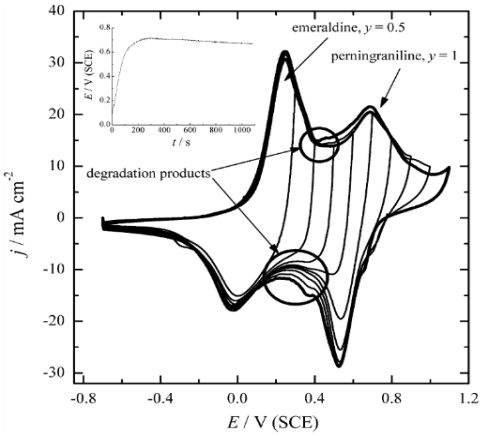
1) นำแท่งแกรไฟต์ไส้ดินสอที่เคลือบและไม่เคลือบ วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ใช้แสงเชิงประกอบแบบใช้แสงที่กำลังขยาย 10 เท่า ทั้งก่อนและหลังหลังให้ศักย์ไฟฟ้า

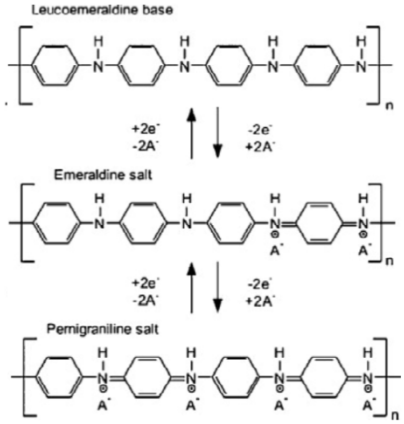
2) เปรียบเทียบพื้นผิวของแท่งแกรไฟต์ไส้ดินสอทั้งก่อนและหลังเคลือบ

ผลการทดลองและวิจารณ์

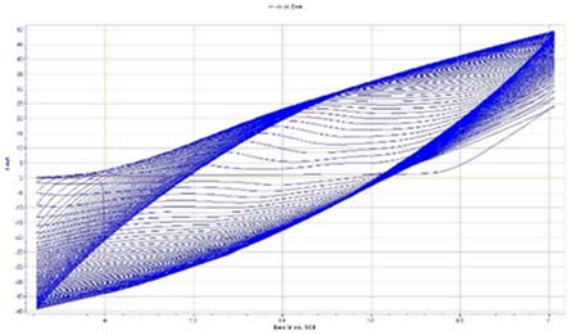
การเตรียมอิเล็กโทรด

หลังจากนำแท่งแกรไฟต์ไส้ดินสอที่ไม่เคลือบขัดด้วยกระดาษทรายแล้วจะได้แท่งแกรไฟต์ไส้ดินสอที่มีพื้นผิวเรียบและแวววาวขึ้น เมื่อนำไปจุ่มในสารละลายที่มีไอออนโลหะหนัก พบว่าความเข้มข้นของไอออนไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง สำหรับแท่งแกรไฟต์ไส้ดินสอที่เคลือบพอลิอะนิลีน ด้วยวิธีไซคลิกโวลแทมเมตรี นั้นจะเห็นว่ามีพีคแอโนดิกที่ 0.25 V (รูปที่ 1) ซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนจาก PANI ที่เคลือบเกาะบนแท่งแกรไฟต์ไส้ดินสอไส้ดินสอในรูป Leucoemeraldine เป็น Emeraldine salt ส่วนพีคแอโนดิกที่ 0.5 V แสดงถึงการเปลี่ยนสภาวะจาก Emeraldine เป็น Pernigraniline นอกจากนั้นการที่จำนวนรอบการสแกนที่เพิ่มขึ้นจะทำให้พีคแอโนดิกทั้งสองกว้างขึ้น โดยมีกระแสสูงขึ้นเมื่อจำนวนรอบการสแกนเพิ่มขึ้นด้วย และจากการสังเกตด้วยสายตาจะเห็นว่าฟิล์มที่เกิดขึ้นมีสีดำ





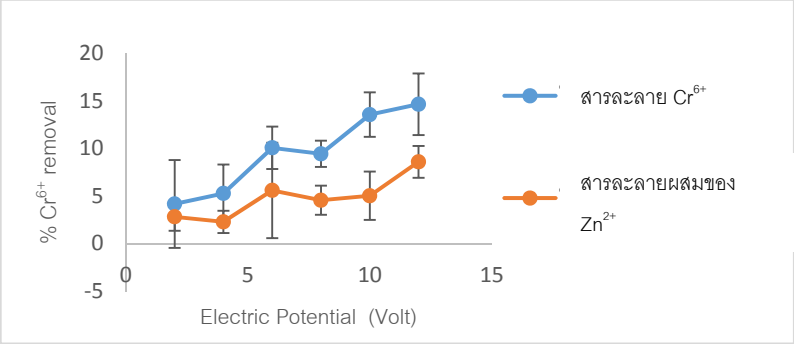
รูปที่1 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมและโครงสร้างแบบฟอร์มต่างๆของพอลิอะนิลีน



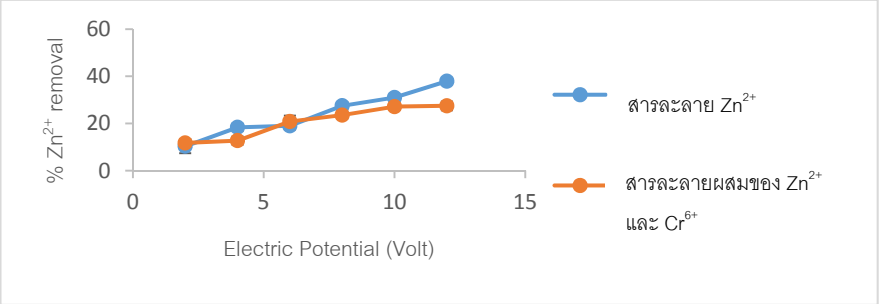
รูปที่2 ไซคลิกโวลแทมโมแกรม ของแกรไฟต์ไส้ดินสอเคลือบด้วย0.3 M aniline ใน 1M HCl

สำหรับแท่งแกรไฟต์ไส้ดินสอที่เคลือบพอลิอะนิลีนด้วยวิธีโพเทนชิโอสแตติกพบว่าฟิล์มที่เคลือบเกาะบนแท่งแกรไฟต์ไส้ดินสอมีลักษณะคล้ายกับฟิล์มที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี และแท่งแกรไฟต์ไส้ดินสอที่เคลือบพอลิเมอร์ของอะนิลีน และ 3,5-ไดไฮดรอกซีเบนโซอิกแอซิด ด้วยวิธีโพเทนชิโอสแตติกพบว่าฟิล์มที่เคลือบเกาะบนแท่งแกรไฟต์ไส้ดินสอมีความบางกว่าฟิล์มที่สังเคราะห์จากเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี และเทคนิคโพเทนชิโอสแตติกจากการตรวจสอบด้วยสายตา

การทดสอบการกำจัดไอออนโลหะหนักด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า



รูปที่3 ศักย์ไฟฟ้าและร้อยละการกำจัดโลหะหนัก Cr^{6+} ของแกรไฟต์ไส้ดินสอไม่เคลือบ



รูปที่4 ศักย์ไฟฟ้าและร้อยละการกำจัดโลหะหนัก Zn^{2+} ของแกรไฟต์ไส้ดินสอไม่เคลือบ

เมื่อนำแท่งแกรไฟต์ไส้ดินสอที่ไม่เคลือบทดสอบการกำจัด Zn^{2+} และ Cr^{6+} พบว่าการกำจัดโลหะหนักแปรผันตามค่าศักย์ไฟฟ้าทั้งไอออนเดี่ยวและผสม ส่วนประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนโลหะหนักในสารละลายผสมลดลงเมื่อเทียบกับการกำจัดไอออนในสารละลายที่มีไอออนเพียงชนิดเดียว (รูปที่3และ4) เนื่องจากมีการรบกวนกันระหว่างไอออนเกิดขึ้น

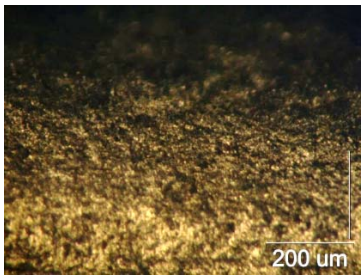
พบว่าศักย์ไฟฟ้า 12 V (ตารางที่ 1) สามารถกำจัดไอออนโลหะหนักได้มากที่สุด ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก Zn^{2+} และ Cr^{6+} เท่า 37.90% และ 11.19% ตามลำดับ

แท่งแกรไฟต์ไส้ดินสอที่เคลือบ PANI ด้วยวิธี ไซคลิกโวลแทมเมตรี ใช้เป็นแคโทด นั้น พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้แท่งแกรไฟต์ไส้ดินสอที่ไม่เคลือบ (ตารางที่2) แสดงว่า PANI ที่เคลือบไว้ทำหน้าที่เป็นเพียงตัวนำไฟฟ้า(conductor) ไม่เกิดการดูดซับ (adsorption) ถึงผิวเคลือบนั้นจะมีรูพรุน (รูปที่ 4, รูปที่ 5) รูพรุนดังกล่าวไม่ได้ช่วยส่งเสริมในการยึดเกาะไอออนต่างๆ แสดงว่ากลไกในการจับยึดไอออนนั้นเป็นการยึดจับด้วยแรงทางไฟฟ้าไม่ใช่การจับยึดด้วยวิธีการดูดซับ

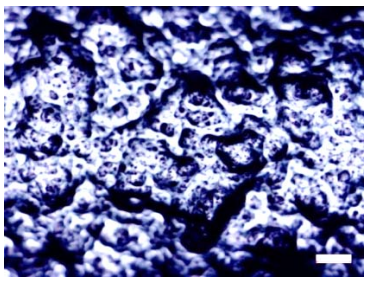
ตารางที่1 ร้อยละการกำจัดโลหะหนักในสารละลายของ Zn^{2+}และ Cr^{6+} ของแกรไฟต์ที่ไม่เคลือบ(n=3)

ศักย์ไฟฟ้า (V)	การกำจัดโลหะหนัก (%)	
	Zn^{2+}	Cr^{6+}
2.0	10.32 ± 2.92	4.16 ± 4.62
4.0	18.33 ± 1.55	5.26 ± 3.04
6.0	18.96 ± 1.53	7.82 ± 2.23
8.0	27.48 ± 1.63	8.04 ± 1.38
10.0	31.00 ± 1.27	11.19 ± 2.34
12.0	37.90 ± 1.32	11.39 ± 3.23

สารละลาย Zn^{2+} 10 ppm และ Cr^{6+} 1 ppm



รูปที่5 พื้นผิวของแท่งแกรไฟต์ไส้ดินสอที่ไม่เคลือบ กำลังขยาย 10 เท่า



รูปที่6 พื้นผิวของแท่งแกรไฟต์ไส้ดินสอที่เคลือบ PANI เทคนิค ไซคลิกโวลแทมเมตรี กำลังขยาย 10 เท่า

แท่งแกรไฟต์ไส้ดินสอที่เคลือบ PANI ด้วยวิธีโพเทนชิโอสแตติก ที่ใช้เป็นแคโทดพบว่าไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักได้เช่นกัน (ตารางที่2) ซึ่งจะเห็นว่าการเคลือบพอลิอะนิลีนไม่ว่าจะด้วยวิธีใดนั้น ไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักได้ จึงสังเคราะห์พอลิเมอร์ของอะนิลีน และ 3,5-ไดไฮดรอกซีเบนโซอิกแอซิด ด้วยวิธีโพเทนชิโอสแตติก โดยคาดหวังว่าหมู่ฟังก์ชันประจุลบนั้นจะสามารถช่วยในการดึงดูดไอออนโลหะหนักที่เป็นประจุบวกได้ ซึ่งพบว่าเมื่อใช้แท่งแกรไฟต์ไส้ดินสอที่เคลือบพอลิเมอร์ของอะนิลีนและ 3,5-ไดไฮดรอกซีเบนโซอิกแอซิดด้วยวิธีโพเทนชิโอสแตติกเป็นแคโทดนั้นจ พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักทั้งใน Zn^{2+} กับ Cr^{6+} เพิ่มขึ้น 10.67 % และ 74.82 % ตามลำดับ เมื่อเทียบกับการใช้แท่งแกรไฟต์ไส้ดินสอที่ไม่ได้เคลือบ (ตารางที่ 3) ซึ่งเป็นไปตามความคาดหวังที่ต้องการให้หมู่ฟังก์ชันประจุลบเป็นตัวช่วยในการดึงดูดไอออนโลหะหนักที่เป็นประจุบวก ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้มีการรายงานมา (Bojan *et al.*,2017)

ตารางที่2 ร้อยละการกำจัดโลหะหนักในสารละลายผสม Zn^{2+}และ Cr^{6+} ของแกรไฟต์ไส้ดินสอเคลือบด้วย PANI เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี และวิธีโพเทนชิโอสแตติก ที่ศักย์ไฟฟ้า 12 V ระยะเวลา 1 ชั่วโมง(n=3)

แกรไฟต์ไส้ดินสอ	การกำจัดโลหะหนักสารละลายผสม Zn^{2+}และ Cr^{6+} (%)	
	Zn^{2+}	Cr^{6+}
แกรไฟต์ไส้ดินสอเคลือบด้วย PANI เทคนิค CV	24.00 ± 1.42	5.55 ± 2.84
แกรไฟต์ไส้ดินสอเคลือบด้วย PANI เทคนิคโพเทนชิโอสแตติก	18.94 ± 2.17	14.96 ± 1.25
แกรไฟต์ไส้ดินสอไม่เคลือบ	27.45 ± 1.86	8.58 ± 1.63

สารละลายผสม Zn^{2+} 10 ppm และ Cr^{6+} 1 ppm

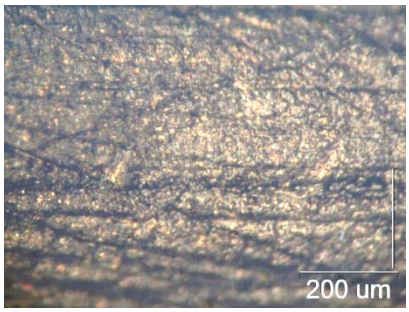
ตารางที่3 ร้อยละการกำจัดโลหะหนักในสารละลายผสม Zn^{2+}และ Cr^{6+} ของแกรไฟต์ไส้ดินสอเคลือบด้วย PANI และ 3, 5- dihydroxy benzoic acid เทคนิคโพเทนชิโอสแตติก ศักย์ไฟฟ้า 12 V ระยะเวลา 1 ชั่วโมง (n=3)

แกรไฟต์ไส้ดินสอ	การกำจัดโลหะหนักในสารละลายผสม $Zn^{2+}$and Cr^{6+} (%)	
	Zn^{2+}	Cr^{6+}
แกรไฟต์ไส้ดินสอเคลือบ aniline and 3,5-dihydroxybenzoic acid เทคนิคโพเทนชิโอสแตติก	30.38 ± 0.89	15.00 ± 2.58
แกรไฟต์ไส้ดินสอไม่เคลือบ	27.45 ± 1.86	8.58 ± 1.63

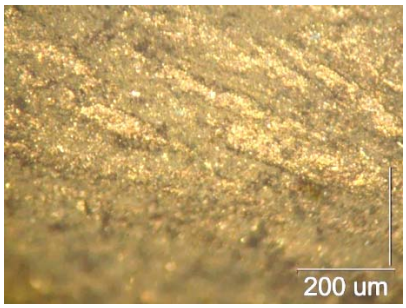
สารละลายผสม Zn^{2+} 10 ppm และ Cr^{6+}1 ppm

ผลของการตรวจดูพื้นผิวของแท่งแกรไฟต์ไส้ดินสอที่ใช้เป็นแคโทด

เมื่อเปรียบเทียบแท่งแกรไฟต์ไส้ดินสอที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์ของอะนิลีน และ 3,5-ไดไฮดรอกซีเบนโซอิกแอซิด (รูปที่7) กับแท่งแกรไฟต์ไส้ดินสอที่ไม่เคลือบ (รูปที่ 5) จะเห็นว่าสีของพื้นผิวแท่งแกรไฟต์ไส้ดินสอที่เคลือบนั้นจะเข้มกว่า ส่วนพื้นผิวของแท่งแกรไฟต์ไส้ดินสอที่เคลือบหลังทดลองกับสารละลายผสม Zn^{2+} และ Cr^{6+} (รูปที่ 8) นั้นที่พื้นผิวของพอลิเมอร์มีลักษณะเหมือนมีอนุภาคสีเทามาเกาะอยู่ ทำให้เห็นสภาพพื้นผิวเสมือนพื้นทรายที่มีความแวววาว ซึ่งคาดว่าเป็นอนุภาคของสังกะสี ส่วนอนุภาคของโครเมียม นั้นสังเกตเห็นได้ยากเนื่องจากมีปริมาณน้อย คำแนะนำหากต้องการพิสูจน์เอกลักษณ์ว่าเป็นอนุภาคของโลหะสังกะสีและโครเมียมควรใช้เทคนิคการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์(Energy Dispersive X-ray. Spectroscropy / EDS/EDX)



รูปที่7 พื้นผิวแท่งแกรไฟต์ไส้ดินสอเคลือบด้วยพอลิเมอร์อะนิลีน(PANI) และ 3,5-ไดไฮดรอกซีเบนโซอิกแอซิดกำลังขยาย 10เท่า



รูปที่8 พื้นผิวของแท่งแกรไฟต์ไส้ดินสอเคลือบพอลิเมอร์ของอะนิลีน และ 3,5-ไดไฮดรอกซีเบนโซอิกแอซิดกับสารละลายผสม Zn^{2+} และ Cr^{6+} กำลังขยาย10เท่า

สรุป

ผลจากการทดสอบการกำจัดโลหะหนักด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้านั้นพบว่า การใช้แท่งแกรไฟต์ไส้ดินสอที่ไม่เคลือบเป็นอิเล็กโทรดสามารถกำจัดไอออนโลหะหนักทั้งโครเมียมและสังกะสีได้ และประสิทธิภาพในการกำจัดจะลดลงถ้ามีการผสมไอออนอื่นๆเข้าไปด้วย เนื่องจากเกิดการรบกวนกันระหว่างไอออน และกระบวนการที่เกิดขึ้นเป็นการยึดเกาะด้วยแรงทางไฟฟ้า (Electrodeposition)

จากการทดลองเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักด้วยการเคลือบแท่งแกรไฟต์ไส้ดินสอที่ใช้เป็นขั้วแคโทดด้วยพอลิเมอร์นั้นพบว่า การเคลือบพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นประจุลบนั้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดได้ เนื่องจากประจุลบจะช่วยในการดึงดูดไอออนโลหะหนักที่เป็นประจุบวก

เอกสารอ้างอิง

วาสนา คงสุข. 2561. **คุณภาพน้ำทางโลหะหนักที่เป็นพิษ**. แหล่งที่มา http://rldc.anamai.moph.go//docstation/com_content.article/19/heavy_poisoning.pdf. 10 ตุลาคม 2561.

Argawal, I.C., A.M., Rochon, H.D., Gesser and A.B. Sparling. 1984. Electrodeposition of six heavy metals on reticulated vitreous carbon electrode. **Water Research** 18: 227-232.

Khattab, I.A., M.F., Shaffei, N.A., Shaaban and H.S., Hussein. 2013. Electrochemical removal of copper ions from dilute solutions using packed bed electrode. Part I. **Egyptian Journal of Petroleum** 22: 199-203.

Koichi, A., T. Okamoto, H. Kaneko and A. Negishi. 1989. Applicability of graphite reinforcement carbon used as the lead of mechanical pencil to voltammetric electrodes. **Journal of electroanalytical chemistry and interfacial electrochemistry** 263(2): 323-331.

Mohammad Al., S., Z., Al Qodah, K., Bani-Melhem, M.,Rasool Qtaishat and M., Alkasrawi. 2015. Heavy metals ions removal from metal plating wastewater using electrocoagulation: Kinetic study and process performance. **Chemical Engineering Journal** 260: 749-756.

Yassine, A., P., Duverneuil and A., Khouider. 2009. Electrodeposition of Heavy Metals (Cu; Ni; Zn and Cd) from Industrial Effluents. **The Electrochemical Society** 19: 63-67.

The Effect of *Plumbago indica* Linn. Root Extracts on Histological Changes of Malaria Infected-Mice Liver

Suwimon Phongpakdee[1], Aikkarach Kettawan[2] and Thanaporn Rungruang[1*]

ABSTRACT

Malaria is a mosquito-borne infectious disease affecting humans and other animals. It is caused by the protozoan parasite belonging to the *Plasmodium* and is typically transmitted through the bite of infected female *Anopheles* mosquitoes. Malaria infection induces the generation of free radicals in the liver, which is the first organ affected. For centuries, herbal plants have been used in traditional medicines for the treatment of various illness. Thailand has a diversity of herbal plants with *Plumbago indica* Linn. (PI) having many pharmacological activities such as anticancer, antioxidant, and anti-inflammatory properties. Therefore, the present study aimed to investigate the effect of PI on hepatic histopathological changes in *Plasmodium yoelii* 17XL-infected mice. Animals were divided into 6 groups: a negative control, a parasite control, PI low dose only, PI high dose only, PI low dose treatment and PI high dose treatment group and hepatic histopathological changes were examined. The results of this study suggest that low dose treatment group significantly reduced hepatic sinusoid changes. Further investigation of the effectiveness of the ethanolic extract of PI root is needed to determine.

Key words: malaria, *Plasmodium yoelii* 17XL, *Plumbago indica*, histopathological

[*] Corresponding author; e-mail address: Thanoporn.run@mahidol.ac.th

[1] Department of Anatomy, Faculty of Medicine, Siriraj Hospital, Mahidol University, Bangkok, 10700, Thailand

[2] Institute of Nutrition, Mahidol University, Salaya, Nakhon Pathom, 73000, Thailand

INTRODUCTION

Malaria is a potentially life-threatening disease and a global public health problem. In 2017, according to the World Health Organization report, there were 216 million cases of malaria and 445,000 deaths in 2016 occurred worldwide. Malaria is a mosquito-borne infectious disease caused by protozoa of the genus *Plasmodium* that are transmitted to people through the bites of infected female *Anopheles* mosquitoes (World Health Organization, 2017). There are five different species that threaten human life are *P. falciparum*, *P. ovale*, *P. vivax*, *P. malariae*, and *P. knowlesi* (White, 2008). Malaria infection can cause high oxidative stress, conducing to red blood cells rupture, which could lead to the development of respiratory problems, organs failure, and anaemia. The liver stage of the parasite is often referred to as a hypnozoite and it is the first target organ for malaria infection. The liver is the first target organ of malaria infectious and red blood cell is the major infection site of *Plasmodium* parasite (Viriyavejakul *et al*., 2014). The severity of the disease is mostly associated with oxidative changes caused during *Plasmodium* infection; the change occurs when reactive oxygen species (ROS) generated by infected red blood cell cause imbalance between the formation of oxidizing species and the activity of antioxidants in the host (Becker *et al*., 2004; Percário *et al*., 2012). This imbalance stimulates oxidative stress, which is an important mechanism of hosts in response to infections and, in the case of malaria, can influence the death of the parasites.

Nowadays, herbal plant derived compounds are of interest and a possible choice of preventing and treating many diseases due to its safe, less side effects, and more effectiveness (Maoz and Neeman, 1998). Plants are the source of antioxidants which play an important role in scavenging free radical products. Herbal plants have been used for a long time to treat some infectious diseases such as malaria (Schwikkard and Heerden, 2002; Saxena *et al*., 2003). Thailand is one area of the outbreak of malaria, and have a diversity of herbal plants which have been a good source for drug development.

Plumbago indica Linn. (PI) (Syn. *P. rosea* Linn.) or “Chettamuun-Phloeng-Daeng” in Thai, belonging to the family Plumbaginaceae, are widely distributed in tropical and subtropical regions of Africa, Australia, and Asia including Thailand (Saha and Paul, 2014). PI root has been used as an ingredient in ayurvedic remedies. Plumbagin (5-hydroxy-2-methyl-1, 4 naphthoquinone), is the major constituent that contributes to the medicinal properties of PI (Padhye *et al*., 2012; Lorsuwannarat *et al*., 2013). Plumbagin has been claimed for various biological activities, i.e., antibacterial (Kaewbumrung and Panichayupakaranant, 2014), anticancer (Wang *et al*., 2008; McKallip *et al*., 2010), anti-inflammatory (Checker *et al*., 2009), antioxidant (Tan *et al*., 2011), and anti-malarial activities (Thiengsusuk *et al*., 2013; Horata *et al*., 2017).

P. yoelii 17XL is widely used in as laboratory murine malaria parasite due to its similarities in chromosomes and base sequences to those of *P. falciparum* (Carlton *et al*., 2014) that is a human parasites. Therefore, this research aimed to investigate the effects of PI on *P. yoelii* 17 XL infected mice liver.

MATERIALS AND METHODS

1. Preparation of *Plumbago indica* Linn. root extracts

PI roots were washed with tap water to remove soil and other fractions and cut into small shreds, oven-dried at 50 °C until stability of dry weight observed and ground into powder with an electric grinder. PI roots powder (100 g) were extracted by macerating in stopper flasks containing 500 ml of 95 % ethanol at room temperature (25-30 °C) for 7 days. The ethanolic extracts were separated and filtered through Whatman no.1 filter paper. After filtration, the extracts were evaporated under reduced pressure by rotary evaporator at 40-45 °C. The crude extracts were weighed and stored at -20 °C until used in the experiment.

2. Experimental animals

Thirty female ICR mice (6-7 weeks of age, weighing 20-22 g) were used in this experiment. All obtained from National Laboratory Animal Center, Mahidol University, Nakorn Pathom, Thailand. The animals were kept in a plastic cage at room temperature and illuminated environment with a 12:12 hour dark/light cycle, fed with a standard diet and water ad libitum. The procedures will be approved by Ethical Committee on Animals experiments from Faculty of Medicine Siriraj Hospital, Mahidol University, Bangkok, Thailand.

3. Malaria parasite

Plasmodium yoelii 17XL strain infected blood stock obtained from Assist. Prof. Dr. Thanaporn Rungruang (generated from Prof. Dr. Motomi Torii from Ehime University School of Medicine and Prof. Dr. Osamu Kaneko from Institute of Tropical Medicine, Nagasaki University, Japan). The parasite blood stock was preserved as serial blood passage and kept in liquid nitrogen until used.

4. Experimental design

Thirty female ICR mice were randomly divided into six groups: a negative control group (NC), a parasite control group (PC) infected with 10^7 *P. yoelii* 17XL, PI low dose only group (100 mg/kg) (PI_L), PI high dose only group (200 mg/kg) (PI_H), PI low dose treatment group (100 mg/kg) (P+PI_L), PI high dose treatment group (200 mg/kg) (P+PI_H). Infectious groups were inoculated with 10^7 *P. yoelii* 17XL injected with 100 and 200 ml/kg of PI root extracts as P+PI_L and P+PI_H, respectively. PI was dissolved in 0.9% normal saline and administered at the dose of 100 and 200 mg/kg; i.p. for 12 days while NC and PC group received 0.9% normal saline (0.2 ml/kg; i.p.) for the same period. All mice were sacrificed at day 12 post-infection. The liver was harvested and immediately kept in 10% formalin solution.

5. Histopathological examination

Tissue sections were prepared form the liver after formalin-fixed, dehydrated with ethanol, cleared in xylene, embedded in paraffin and cut into 6 µm-thick sections using a rotary microtome. Sections were stained with haematoxylin and eosin (H&E) and evaluated under a light microscope. The photomicrographs were obtained from five a photograph in five different fields of each mouse. In each field, the diameter of five hepatocytes, five Kupffer's cells, and five areas of hepatic sinusoids were randomly measured. All measurements were performed using program Image processing and analysis in Java (ImageJ) version 1.80.

6. Statistical analysis

Statistical analyses were performed using one-way ANOVA (SPSS version 18.0), compared statistically between groups. The differences at the $p \leq 0.05$ was considered as significant difference

RESULTS AND DISCUSSION

Effect of PI root extracts on histopathological changes of liver

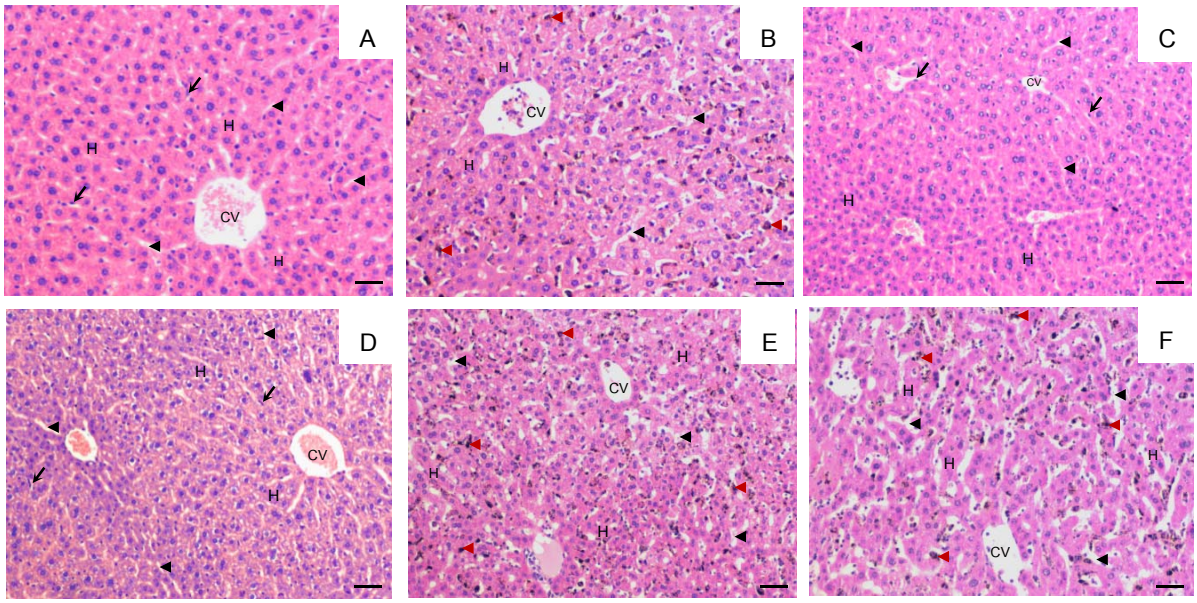


Figure 1 Effect of PI root extract on histopathological changes in various treatment groups at 10x magnification. (A) Negative control group; (B) Parasite control group; (C) PI low dose only group; (D) PI high dose only group; (E) PI low dose treatment group and (F) PI high dose treatment group. CV; central vein, H; hepatocytes, Kupffer's cells (black arrow), hepatic sinusoids (black arrow head), and haemozoin (red arrow head). Scale bar=50 µm.

In untreated control, the liver revealed normal histology of hepatocytes, Kupffer's cells and hepatic sinusoids; there were no evidence inflammation and haemozoin pigments (Fig. 1A). Liver sections of PC group showed the significant increase in swelling of hepatocytes, distended Kupffer's cells containing haemozoin pigments, which were small brownish-black crystalline and sinusoidal dilation compared with those in NC group (Fig. 1B). In PI_L and PI_H groups showed normal histology with no sign of inflammation (Fig. 1C, 1D). In P+PI_L and P+PI_H groups, the livers revealed similar histology to those in the PC group (Fig. 1E, 1F). In P+PI_L group the dilation of hepatic sinusoids, was significantly ameliorated compared with PC group (Table 1). This was in contrast with the study of the protective effect of PI root extract on paracetamol-induced hepatotoxicity showing regenerating hepatocytes and mild inflammation in the group treated with 200 mg/kg of PI extract. (Rajasekaran and Periasamy, 2011).

The phytochemical analysis on PI revealed the presence of plumbagin, flavonoids, steroids, and tannins (Lenora *et al*., 2011). Flavonoids have effects on membrane permeability and inhibition of membrane enzymes, a property that may suppress mechanism of free radicals (Havsteen, 1983). The antioxidant capacity of flavonoids is attributed to the high reactivity of the free radical substituents by damaging double bonds in a structure to donating electrons for free radicals (Heim *et al*., 2002). Malaria induces the generation of free radicals in the liver (Guha *et al*., 2006). The accumulation of excessive free radicals induces lipid oxidation along with attacks to cellular materials and subsequently causes damage to cellular components (Reuter *et al*., 2010). It appeared that the hepatoprotective effects of PI extracts are dose dependent.

Table 1 Changes in sizes of hepatocyte, Kupffer's cells and width of hepatic sinusoids due to PI root extracts treatment of mice infected with *P. yoelii* 17 XL.

Groups	Diameter of liver		
	Hepatocytes	Kupffer's cells	Hepatic sinusoid
NC	12.76 ± 0.86	2.82 ± 0.31	4.41 ± 0.60
PC	14.75 ± 0.68[a]	4.64 ± 0.37[a]	9.08 ± 0.92[a]
PI_L	13.19 ± 0.47	2.67 ± 0.19	4.11 ± 0.31
PI_H	13.53 ± 1.10	2.73 ± 0.12	4.18 ± 0.29
P+PI_L	13.82 ± 0.82[a]	4.22 ± 0.29[a]	7.42 ± 1.55[a, b]
P+PI_H	14.76 ± 0.65[a]	4.34 ± 0.32[a]	8.65 ± 0.43[a]

[a] Significant difference at $p \leq 0.05$ compared with NC group

[b] Significant difference at $p \leq 0.05$ compared with PC group

CONCLUSION

PI low dose treatment (100 mg/kg) was able to improve the hepatic sinusoids, significantly. However, the optimal dose of PI has to be investigated.

ACKNOWLEDGEMENTS

This study is supported by the Siriraj Graduated Thesis and I would like to thanks to staffs from Department of Anatomy, Faculty of Medicine Siriraj Hospital, Mahidol University for suggestion and support services.

REFERENCES

Becker, K., Tilley, L., Vennerstrom, J. L., Roberts, D., Rogerson, S., and Ginsburg, H. 2004. Oxidative stress in malaria parasite-infected erythrocytes: host–parasite interactions. **International journal for parasitology** 34 (2): 163-189.

Carlton, J., Silva, J., and Hall, N. 2004. The genome of model malaria parasites, and comparative genomics, pp. 33-63. In Andrew, P.W. and Chris, J.J., eds. **Malaria parasites: genome and molecular biology**. Horizon Scientific Press, England.

Checker, R., Sharma, D., Sandur, S. K., Khanam, S., and Poduval, T. 2009. Anti-inflammatory effects of plumbagin are mediated by inhibition of NF-kappaB activation in lymphocytes. **International immunopharmacology** 9 (7-8): 949-958.

Guha, M., Kumar, S., Choubey, V., Maity, P., Bandyopadhyay, U., Guha, M. and Bandyopadhyay, U. 2006. Apoptosis in liver during malaria: role of oxidative stress and implication of mitochondrial pathway. **The FASEB Journal** 20 (8): 1224-1226.

Havsteen, B. 1983. Flavonoids, a class of natural products of high pharmacological potency. **Biochemical pharmacology** 32 (7): 1141-1148.

Heim, K.E., Tagliaferro, A.R., and Bobilya, D.J. 2002. Flavonoid antioxidants: chemistry, metabolism and structure-activity relationships. **The Journal of nutritional biochemistry** 13 (10): 572-584.

Horata, N., Suttirat, S., Panpanich, T., Siriphor, A., Navaprayoonvach, B., Suwanwisolkij, N., and Janwithayanuchit, I. 2017. *In vitro* antimalarial activity and cytotoxity of 20 ethanolic crude extracts from Thai herbs against *Plasmodium falciparum* TM267. **Songklanagarind Medical Journal** 35 (2): 109-120.

Kaewbumrung, S., and Panichayupakaranant, P. 2014. Antibacterial activity of plumbagin derivative-rich *Plumbago indica* root extracts and chemical stability. **Natural product research** 28 (11): 835-837.

Lenora, R., Dharmadasa, R., Abeysinghe, D., and Arawwawala, L. 2011. *Plumbago indica* Linn. (S. Ratnitul): Comparison of Chemical Profiles and Plumbagin Contents under Different Growing Systems. **In Proceedings of 11th Agricultural Research Symposium** 372: 376.

Lorsuwannarat, N., Saowakon, N., Ramasoota, P., Wanichanon, C., and Sobhon, P. 2013. The anthelmintic effect of plumbagin on *Schistosoma mansoni*. **Experimental parasitology** 133 (1): 18-27.

Maoz and Neeman. 1998. Antimicrobial effects of aqueous plant extracts on the fungi *Microsporum canis* and *Trichophyton rubrum* and on three bacterial species. **Letters in Applied Microbiology** 26 (1): 61-63.

McKallip, R.J., Lombard, C., Sun, J., Ramakrishnan, R.J.T., and Pharmacology, a. 2010. Plumbagin-induced apoptosis in lymphocytes is mediated through increased reactive oxygen species production, up-regulation of Fas, and activation of the caspase cascade. **Toxicology and applied pharmacology** 247 (1): 41-52.

Padhye, S., Dandawate, P., Yusufi, M., Ahmad, A., and Sarkar, F.H. 2012. Perspectives on medicinal properties of plumbagin and its analogs. **Medicinal research reviews** 32 (6): 1131-1158.

Percário, S., Moreira, D.R., Gomes, B.A., Ferreira, M.E., Gonçalves, A.C.M., Laurindo, P.S. and Green, M.D. 2012. Oxidative stress in malaria. **International Journal of Molecular Sciences** 13 (12): 16346-16372.

Rajasekaran, A., and Periasamy, M. 2011. Protective effect of ethanolic root extract of *Plumbago indica* L. on paracetamol induced hepatotoxicity in rats. **Afr J Pharm Pharmacol** 5: 2330-4.

Reuter, S., Gupta, S.C., Chaturvedi, M.M. and Aggarwal, B.B. 2010. Oxidative stress, inflammation, and cancer: how are they linked?. **Free Radical Biology and Medicine** 49 (11): 1603-16.

Saha, D., and Paul, S. 2014. Antibacterial activity of *Plumbago indica*. **Turk J Pharm Sci** 11: 217-222.

Saxena, S., Pant, N., Jain, D.C. and Bhakuni, R.S. 2003. Antimalarial agents from plant sources. **Current Science** 85 (9): 1314-1329.

Schwikkard, S., and van Heerden, F.R. 2002. Antimalarial activity of plant metabolites. **Natural Product Reports** 19 (6): 675-692.

Tan, M., Liu, Y., Luo, X., Chen, Z. and Liang, H. 2011. Antioxidant activities of plumbagin and its Cu (II) complex. **Bioinorganic chemistry and applications** 2011: 5.

Thiengsusuk, A., Chaijaroenkul, W. and Na-Bangchang, K. 2013. Antimalarial activities of medicinal plants and herbal formulations used in Thai traditional medicine. **Parasitology research** 112 (4): 1475-1481.

Viriyavejakul, P., Khachonsaksumet, V. and Punsawad, C. 2014. Liver changes in severe *Plasmodium falciparum* malaria: histopathology, apoptosis and nuclear factor kappa B expression. **Malaria journal** 13 (1): 106.

Wang, C.C., Chiang, Y.M., Sung, S.C., Hsu, Y.L., Chang, J.K. and Kuo, P.L. 2008. Plumbagin induces cell cycle arrest and apoptosis through reactive oxygen species/c-Jun N-terminal kinase pathways in human melanoma A375. S2 cells. **Cancer letters** 259 (1): 82-98.

White, N.J. 2008. *Plasmodium knowlesi*: The Fifth Human Malaria Parasite. **Clinical Infectious Diseases** 46 (2): 172-173.

World Health Organization. 2017. **World malaria report 2017**. Available Source: https://www.who.int/malaria/publications/world-malaria-report-2017/en/, March 1, 2018.

ฤทธิ์ต้านแบคทีเรียฉวยโอกาสและการเสริมฤทธิ์ยาปฏิชีวนะของส่วนสกัดจากใบผักหวานป่า

Antibacterial Activities and Synergistic Effect of *Melientha suavis* Pierre with Antibiotic against Opportunistic Bacteria

วิสาตรี คงเจริญสุนทร[1*] มุกดา วันเย็น และ ณัฐวดี ฟูเจริญไพบูลย์[1]

Wisatre Kongchareonsuntorn[1*], Mukda Wanyen and Nattawadee Phoocharoenpaiboon[1]

บทคัดย่อ

ผักหวานป่า (*Melientha suavis* Pierre) เป็นผักพื้นบ้านที่อุดมไปด้วยสารฟีโนลิกและฟลาโวนอย์ ส่วนสกัดจากใบผักหวานป่าด้วยเมทานอล สามารถยับยั้งการเจริญแบคทีเรียฉวยโอกาส เช่น Methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA) ได้ดีที่สุดโดยมีค่า MIC เท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร และพบว่าส่วนสกัดจากใบผักหวานป่ายับยั้งการเจริญของแบคทีเรียน้อยกว่ายาแอมพิซิลลินและเตตราซัยคลิน และความเข้มข้นของส่วนสกัดจากใบผักหวานป่าและยาปฏิชีวนะเพิ่มขึ้นจะให้ค่า Inhibition zone เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ผลการเสริมฤทธิ์ พบว่าเมื่อนำส่วนสกัดผักหวานป่ามาใช้ร่วมกับเตตราซัยคลิน สามารถเสริมฤทธิ์กันบางส่วนในการยับยั้งเชื้อ *Pseudomonas aeruginosa* สายพันธุ์ดื้อยา โดยมีค่า FICI เท่ากับ 0.515 นอกจากนี้เมื่อนำส่วนสกัดผักหวานป่าร่วมกับแอมพิซิลลิน พบว่าสามารถเสริมฤทธิ์กันบางส่วนในการยับยั้งเชื้อ *P. aeruginosa* ATCC 27853 และ *P. aeruginosa* สายพันธุ์ดื้อยา โดยมีค่า FICI เท่ากับ 0.75 และ 0.625 ตามลำดับ

ABSTRACT

Melientha suavis Pierreis is a vegetable that contains phenolic and flavonoid compounds. The methanol extract from the leave of *M. suavis* Pierre had antibacterial activity against opportunistic bacteria. The best antibacterial activity of *M. suavis's* extract was against Methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA) by MIC of 10 mg/ml. Compared to the antibacterial activity of ampicillin and tetracycline, the results revealed that *M. suavis's* extract exhibited less antibacterial activity. Also, we found that the more concentration of *M. suavis's* extract were increased, the more Inhibition zones of ampicillin and tetracycline were also increased at statistics significance ($p<0.05$). For synergistic effect, the result indicated partially synergistic effect of the extract of *M. suavis* combined with tetracycline against *P. aeruginosa* ATCC 27853 by FICI of 0.515. Morover, we found partially synergistic effect against both *P. aeruginosa* ATCC 27853 and drug resistant *P. aeruginosa* when applying the extract of *M. suavis* with ampicillin, with the FICIs of 0.75 and 0.625, respectively.

Key Words: *Meiientha suavis* Pierre, methanol extract, synergistic effect, opportunistic bacteria

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

[1]ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ชลบุรี 20130

[1]Biology Department, Faculty of Science, Burapha University, Chonburi 2013

คำนำ

ปัจจุบันสาเหตุของโรคติดเชื้อแบคทีเรียฉวยโอกาส ถือว่าเป็นปัญหาสาธารณสุขที่สำคัญของประเทศไทย เชื้อแบคทีเรียฉวยโอกาส เช่น *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Proteus mirabilis*, *Serratia marcescens* และ *Staphylococcus aureus* มักพบเป็นสาเหตุที่ทำให้ร่างกายและอวัยวะต่าง ๆ เกิดการทำงานผิดปกติ เมื่อร่างกายอ่อนแอหรือเป็นโรคเรื้อรัง และมักพบมีอุบัติการณ์การดื้อยาอย่างรุนแรงและเป็นสาเหตุการตายของผู้ป่วยในโรงพยาบาลอันดับต้นของหลายประเทศ (Sedghizadeh *et al*., 2017; Fair & Tor, 2014) ในปัจจุบันแบคทีเรียฉวยโอกาสเหล่านี้สามารถปรับตัวให้ดื้อต่อยาปฏิชีวนะหลายขนาน ซึ่งสาเหตุเกิดจากการใช้ยาปฏิชีวนะอย่างแพร่หลาย พฤติกรรมการใช้ยาปฏิชีวนะไม่ครบขนาด ใช้ยาบ่อยติดต่อกันเป็นเวลานาน และการใช้ไม่ถูกกับโรค ซึ่งการที่เชื้อปรับตัวดื้อยามากขึ้น ทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการรักษาเพิ่มขึ้นมาก (Dhama *et al*., 2014; Fair & Tor, 2014) ดังนั้นเพื่อลดปัญหาการหายาปฏิชีวนะชนิดใหม่ ลดการเกิดแบคทีเรียดื้อยาและเพื่อลดผลข้างเคียงของการใช้ยาดังกล่าว นักวิจัยจึงได้มีความพยายามใช้สารสกัดจากธรรมชาติมาทดแทน ซึ่งปลอดภัยกว่าและมีประวัติการใช้เป็นอาหารมาแต่โบราณ ซึ่งมีการศึกษาวิจัยมากมายเกี่ยวกับผักพื้นบ้านและพืชสมุนไพรที่มีฤทธิ์ต้านแบคทีเรีย (Dhama *et al*., 2014) สารบริสุทธิ์มากมายที่สกัดได้จากสมุนไพรและสามารถยับยั้งการเจริญหรือฆ่าแบคทีเรียด้วยกลไกหลากหลาย (Upadhyay *et al*., 2014)

ผักหวานป่า (*Meiientha suavis* Pierre) คือพืชวงศ์ Opiliaceae ซึ่งเป็นผักพื้นบ้านที่พบในป่าแถบภาคตะวันตก เช่น จังหวัดกาญจนบุรี เป็นไม้ยืนต้นขนาดกลาง ที่นิยมนำยอดและใบอ่อนมาปรุงอาหาร เพราะมีคุณค่าทางโภชนาการสูง มีวิตามินเอ วิตามินซี แคลเซียมและฟอสฟอรัส ผักหวานป่ามีสรรพคุณทางยามากมาย เช่น แก้ไข้ แก้ร้อนในกระหายน้ำ ถอนพิษ แก้ปวด (ณรงค์ มูลคำ, 2554; ณัฏฐากร เสมสันทัด และ บัณฑิต โพธิ์น้อย, 2552) ผักหวานป่ามีฤทธิ์ทางชีวภาพ เช่น ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ (Tianpech *et al*., 2008) พืชวงศ์เดียวกับผักหวานป่าคือ *Cansjera rheedii* มีฤทธิ์ต้านมะเร็งและลดการเกิดเส้นเลือดใหม่ (Rashina and Kumar, 2018) อย่างไรก็ตามยังไม่พบรายงานเกี่ยวกับฤทธิ์ต้านแบคทีเรียของผักหวานป่า พบเพียงพืชวงศ์เดียวกับผักหวานป่า เช่น สารฟีโนลิกและฟลาโวนอย์ที่สกัดจาก *Juniperus drupacea* Labill สามารถยับยั้งแบคทีเรียแกรมบวก *Staphylococcus aureus* (Miceli *et al*., 2011) และรายงานของพืชวงศ์ Opiliaceae ชนิดอื่น ๆ เช่น สารสกัดรากที่ได้จาก *Cansjera rheedii* สามารถต้านเชื้อ *Bacillus subtilis* (Sharma *et al*., 2010) และส่วนสกัดเมทานอลจาก *Rhapalopillia perrieri* มีฤทธิ์ต้านเชื้อ *B. subtilis*, *E. coli* และ *P. aeruginosa* (Rakotoniriana *et al*., 2010) นอกจากนี้พบรายงานวิจัยเกี่ยวกับการเสริมฤทธิ์ยาอะม๊อกซี่ซิลลิน (amoxicillin) กับผักพื้นบ้านสามารถต้านเชื้อ *S. aureus* (Abd El-Kalek & Eman, 2012) หรือส่วนสกัดจากใบชาร่วมกับยาคลอแรมเฟนนิคอลสามารถต้านเชื้อ *E. coli* เป็นต้น และการศึกษาการเสริมฤทธิ์อื่น ๆ มากมาย (Tiwari *et al*., 2005; Pereira *et al*., 2016; Sevil, 2011) ดังนั้นจะเห็นได้ว่าผักหวานป่ามีฤทธิ์ทางชีวภาพที่น่าสนใจ และพืชสมุนไพรบางชนิดสามารถเสริมฤทธิ์กับยาปฏิชีวนะเพื่อต้านเชื้อแบคทีเรีย

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการศึกษาฤทธิ์ต้านแบคทีเรียฉวยโอกาสของใบผักหวานป่า และฤทธิ์ของใบผักหวานป่าร่วมกับยาแอมพิซิลลิน และเตตราซัยคลินในการยับยั้งแบคทีเรียฉวยโอกาส งานวิจัยนี้อาจจะใช้เป็นข้อมูลที่สนับสนุนว่าผักหวานป่ามีสรรพคุณทางยาตามตำรับยาจริง และเพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานประกอบการพิจารณาในการนำผักพื้นบ้านมาพัฒนาเป็นยารักษาโรค แทนการใช้ยาปฏิชีวนะหรือใช้ควบคู่กับยาปฏิชีวนะต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมส่วนสกัดจากใบผักหวานป่า

เก็บส่วนใบอ่อนของผักหวานป่าสดจากอำเภอบ่อพลอย จังหวัดกาญจนบุรี ในช่วงเดือนเมษายน 2557 ถึงกรกฎาคม 2557 รหัสพรรณไม้อ้างอิงคือ ScBuu-NyKan/57 (ส่วนพฤกษศาสตร์ป่าไม้, 2557) ซึ่งได้รับการยืนยันสายพันธุ์ โดย ดร. เบญจวรรณ ชีวปรีชา (นักพฤษศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ชลบุรี) นำใบอ่อนมาล้างด้วยน้ำกลั่น ปล่อยทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำมาบดให้เป็นผงละเอียด 2 กิโลกรัม นำมาสกัดด้วย เมทานอล: น้ำกลั่น (อัตราส่วน 80: 20) ปริมาตร 6,000 มิลลิลิตร (อัตราส่วน 1: 4) และนำไประเหยแห้งด้วยเครื่อง rotary evaporator ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส ได้ส่วนสกัดจำนวน 123.33 กรัม คิดเป็น 24.69 เปอร์เซ็นต์จากน้ำหนักเริ่มสกัด (% yield)

การหาปริมาณสารฟีโนลิครวมและฟลาโวนอยด์

1.1 หาปริมาณฟีโนลิครวม โดยนำส่วนสกัดผักหวานป่าความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร วิเคราะห์โดยปรับปรุงจากวิธีของ Wagh *et al*. (2012) โดยนำส่วนสกัดใบผักหวานป่าไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ 765 นาโนเมตร ใช้กรดแกลิค (Merck, Germany) ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร เป็นสารมาตรฐาน

1.2 หาปริมาณฟลาโวนอยด์รวม โดยนำส่วนสกัดผักหวานป่าความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร วิเคราะห์ ที่ได้ปรับปรุงจากวิธี Wagh *et al*. (2012) นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร และใช้เควอร์เซติน (Quercetin, Merck, Germany) ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร เป็นสารมาตรฐาน จากนั้นนำไปคำนวณหาปริมาณฟลาโวนอยด์รวม

เชื้อแบคทีเรียที่นำมาศึกษา

เชื้อแบคทีเรีย ได้แก่ *Acinetobacter baumannii*, *B. subtilis, E. coli* ATCC 25922*, Klebsiella pneumoniae*, Methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA), *P. aeruginosa* ATCC 27853 (ไม่ดื้อยา), *S. aureus* ATCC 25923 ได้รับความอนุเคราะห์จากภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ยกเว้นเชื้อ *P. aeruginosa* สายพันธุ์ดื้อยา ซึ่งดื้อยาหลายขนาน รหัส 1-375/04-2015 แยกได้จากสิ่งส่งตรวจจากผู้ป่วย ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากโรงพยาบาลชลบุรี จังหวัดชลบุรี

การศึกษาฤทธิ์ต้านแบคทีเรียโดยวิธี Agar Diffusion Susceptibility Test

นำเชื้อแบคทีเรียจำนวน 2-3 โคโลนี มาเพาะเลี้ยงในอาหารเหลว Mueller Hinton Broth (MHB, Becton Dickinson, USA) จากนั้นนำมาเทียบความขุ่นกับ McFarland No. 0.5 (1.5×10^8 CFU/ml) แล้วผสมเชื้อให้เข้ากันใส่ในอาหาร Mueller-Hinton Agar (MHA, Becton Dickinson, USA) จากนั้นใส่สารทดสอบ (ความเข้มข้นลดลงสองเท่า คือ 0.312-80 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) ปริมาตร 40 ไมโครลิตร ในการทดลองนี้ใช้ยาแอมพิซิลลินและเตตราซัยคลินเป็นสารเปรียบเทียบ แล้วนำไปบ่มที่ อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18-24 ชั่วโมง ทำการทดสอบกับแบคทีเรียแต่ละชนิด จำนวน 3 ซ้ำ บันทึกผล inhibition zone หาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และหาค่า MIC (Clinical and standard Institute, 2006)

การศึกษาการเสริมฤทธิ์ของส่วนสกัดผักหวานป่าร่วมกับยาปฏิชีวนะ

ทำการทดสอบเช่นเดียวกับการหาค่าความเข้มข้นต่ำสุดของส่วนสกัดผักหวานป่าแต่แตกต่างกันในการวางแผนการทดสอบแต่ละ treatment ด้วย checkerboard assay (Padalia & Chanda, 2015) โดยนำยาแอมพิซิลลินและเตตราซัยคลิน ที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ คือ 1.25-160 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ปริมาตร 20 ไมโครลิตร ผสมกับส่วนสกัดใบผักหวานป่าที่ระดับความเข้มข้น 1.25-160 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ปริมาตร 20 ไมโครลิตร มาผสมให้เข้ากัน เติมลงในอาหาร MHA ที่ผสมเชื้อแบคทีเรีย จากนั้นนำเพลทอาหารไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18-24 ชั่วโมง ทำการทดสอบจำนวน 3 ซ้ำ นำไปบันทึกผลการทดลอง และหาค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน แล้วนำมาหาค่า MIC co-treatment และคำนวณหาค่าดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพร่วม Fractional Inhibitory Concentration Indices (FICI) ดังนี้ FICI คือค่าผลรวมของ FIC ของยาปฏิชีวนะ (MIC ของการออกฤทธิ์ร่วม/ MIC ของยาปฏิชีวนะ), และ FIC ของส่วนสกัดสมุนไพร (ค่า MIC ของการออกฤทธิ์ร่วม/MIC ของส่วนสกัดสมุนไพร) แปลผลดังนีคือ

FICI < 0.5 เสริมฤทธิ์กัน (synergistic), 0.5 < FICI < 1 เสริมฤทธิ์กันบางส่วน (Partially synergistic),
FICI=1 มีแนวโน้มเสริมฤทธิ์ (Additive), 1 < FICI < 4 ฤทธิ์ไม่แตกต่างจากการใช้สารตัวเดียว (Indifferent),
FICI > 4 ต้านฤทธิ์กัน (Antagonistic)

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

1. การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-way ANOVA) ของค่าเฉลี่ย inhibition zone หาค่าความแตกต่างของข้อมูลด้วยวิธี Tukey โดยใช้โปรแกรม Minitab เวอร์ชัน 17.0 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

2. การวิเคราะห์แบบแฟคเทอเรียลในแผนแบบสุ่มในบลอคสมบูรณ์ (Factorial Experiment in a Randomized Complete Block Design) เพื่อทดสอบอิทธิพลร่วมระหว่างยาแอมพิซิลลิน และเตตราซัยคลิน กับส่วนสกัดผักหวานป่าในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการวิเคราะห์คุณภาพของใบผักหวานป่า

ส่วนสกัดจากจากผักหวานป่าที่เก็บได้ในหน้าร้อนมีปริมาณสารประกอบฟีโนลิครวมเท่ากับ 1.49 ± 0.11 มิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อมิลลิกรัมของกรดแกลิค และพบปริมาณฟลาโวนอยด์รวมเท่ากับ 2.70 ± 0.25 มิลลิกรัมสมมูลของเควอร์เซตินต่อมิลลิกรัมของเควอร์เซติน ซึ่งปริมาณสารฟีโนลิคและฟลาโวนอยด์อาจเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับฤดูกาล (Boutakiout, 2016) และดัดแปลงวิธีวัดจาก Wagh *et al*. (2012) ให้ได้ผลดีที่สุด

ผลการศึกษาฤทธิ์ต้านแบคทีเรียของส่วนสกัดผักหวานป่า

พบว่าส่วนสกัดจากผักหวานป่า สามารถยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียฉวยโอกาสทุกชนิดที่ทดสอบ (MIC อยู่ระหว่าง 10-20 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) ยับยั้งเชื้อ MRSA ได้ดีที่สุด (ค่า MIC เท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) รองลงมาคือ *A. baumannii* และ *B. subtilis* และ *S. aureus* ATCC 25923 MIC เท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร แต่ยับยั้งเชื้อ *E. coli* ATCC 25922 ได้น้อยที่สุด (MIC 80 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) (แสดงดังตารางที่ 1) ซึ่งรายงานวิจัยนี้ให้ผลตรงกับการทดสอบของพืชวงศ์เดียวกับผักหวานป่า คือ *Cansjera rheedii* ให้ผลการทดสอบของ inhibition zone ในการต้านเชื้อ *B. subtilis* ได้ต่ำกว่างานวิจัยนี้ (Sharma *et al*., 2010) และสามารถต้านเชื้อ *B. subtilis E. coli* และ *P. aeruginosa* ได้เช่นเดียวกับ *Rhapalopillia perrieri*

(Rakotoniriana *et al*., 2010) ซึ่งกลไกการออกฤทธิ์ยังไม่ทราบแน่ชัด อาจเป็นเพราะผักหวานป่ามีฟลาโวนอย์เป็นองค์ประกอบจึงยับยั้งเชื้อได้ดี ซึ่งฟลาโวนอยด์อาจจะไปยับยั้งการสร้างผนังเซลล์ รบกวนการทำงานของเยื่อหุ้มเซลล์ในการขนส่งสารเข้าออกเซลล์ อย่างไรก็ตามคงต้องสกัดฟลาโวนอยด์หรือสารบริสุทธิ์จากผักหวานป่ามาทดสอบต่อไป (Upadhyay *et al*., 2014) ดังนั้นจึงเห็นได้ว่าผักหวานป่ามักมีฤทธิ์ต้านแบคทีเรียบางชนิดได้ดี เช่นเดียวกับรายงานวิจัยต่าง ๆ (Dhama *et al*., 2014; Upadhyay *et al*., 2014)

Table 1 The antibacterial activity of *M. suavis* extract, ampicillin and tetracycline against gram negative and positive bacteria

Bacteria	Test substance	Diameters of zones of inhibition from various of concentration									
		0.312 mg/ml	0.625 mg/ml	1.25 mg/ml	2.5 mg/ml	5 mg/ml	10 mg/ml	20 mg/ml	40 mg/ml	80 mg/ml	MIC (mg/ml)
AB	MS	-	-	-	-	-	-	1.03±0.02^{A}	1.20±0.07^{A}	1.41±0.06^{A}	20
	AMP	-	-	-	-	-	-	-	-	0.92±0.02^{D}	80
	TET	-	-	-	-	0.97±0.05^{E}	1.77±0.05^{D}	2.03±0.05^{D}	2.63±0.12^{B}	2.73±0.05^{A}	5
EC	MS	-	-	-	-	-	-	-	-	0.96±0.06^{B}	80
	AMP	-	-	-	-	-	-	-	0.82±0.02^{D}	0.95±0.04^{D}	40
	TET	-	-	-	0.93±0.12^{E}	1.30±0.22^{D}	1.67±0.09^{D}	1.83±0.12^{C}	2.47±0.05^{B}	2.70±0.08^{A}	2.5
KP	MS	-	-	-	-	-	-	-	0.98±0.06^{B}	1.23±0.05^{A}	40
	AMP	-	-	1.27±0.05^{C}	1.57±0.05^{B}	1.85±0.04^{A}	1.70±0.08^{A}	1.97±0.05^{A}	2.35±0.04^{A}	2.40±0.16^{A}	1.25
	TET	-	1.47±0.05^{D}	1.60±0.08^{D}	1.67±0.05^{D}	1.90±0.08^{C}	1.98±0.16^{C}	2.78±0.02^{B}	3.2±0.14^{A}	3.23±0.17^{A}	0.625
PSAT	MS	-	-	-	-	-	-	-	1.23±0.10^{A}	1.46±0.12^{A}	40
	AMP	-	-	-	-	-	1.13±0.09^{C}	1.48±0.06^{B}	1.66±0.12^{A}	2.00±0.14^{A}	10
	TET	1.00±0.00^{E}	1.20±0.16^{E}	1.67±0.12^{D}	2.03±0.12^{C}	2.27±0.05^{B}	2.33±0.09^{B}	2.33±0.12^{B}	2.80±0.05^{A}	3.20±0.08^{A}	0.312
PSMD	MS	-	-	-	-	-	-	-	1.20±0.08^{A}	1.43±0.12^{A}	40
	AMP	-	-	-	-	-	-	1.00±0.00^{D}	1.05±0.07^{C}	1.28±0.04^{B}	20
	TET	-	-	-	-	-	-	1.05±0.07^{E}	1.20±0.07^{E}	1.33±0.04^{D}	20
BS	MS	-	-	-	-	-	-	0.91±0.08^{B}	1.01±0.06^{A}	1.15±0.07^{A}	20
	AMP	-	-	-	0.92±0.02^{D}	1.07±0.05^{C}	1.02±0.10^{C}	1.07±0.10^{C}	1.10±0.16^{C}	1.17±0.12^{C}	2.5
	TET	-	1.92±0.02^{D}	1.95±0.04^{D}	2.30±0.1^{C}	2.35±0.04^{C}	2.52±0.02^{B}	2.77±0.05^{B}	3.23±0.05^{A}	3.33±0.24^{A}	0.625
MRSA	MS	-	-	-	-	-	0.93±0.12^{B}	1.13±0.12^{A}	1.35±0.07^{A}	1.80±0.12^{A}	10
	AMP	-	-	-	0.67±0.02^{D}	0.83±0.05^{D}	1.12±0.08^{C}	1.43±0.05^{B}	1.55±0.04^{B}	2.00±0.36^{A}	2.5
	TET	-	-	1.35±0.11^{D}	1.62±0.13^{D}	2.05±0.18^{D}	2.23±0.21^{C}	2.17±0.24^{C}	2.57±0.05^{B}	2.97±0.05^{A}	1.25
SA	MS	-	-	-	-	-	-	1.03±0.09^{A}	1.10±0.09^{A}	1.41±0.06^{A}	20
	AMP	-	0.67±0.02^{D}	0.78±0.02^{D}	0.98±0.02^{D}	1.27±0.05^{C}	1.38±0.02^{B}	1.42±0.06^{B}	2.35±0.04^{A}	2.78±0.02^{A}	0.625
	TET	-	1.72±0.02^{D}	1.77±0.02^{D}	1.88±0.02^{D}	1.97±0.02^{D}	2.03±0.05^{D}	2.45±0.04^{C}	2.77±0.02^{B}	2.95±0.04^{A}	0.625

Results expressed as mean ± S.D.

(-) No antibacterial activity. ($^{A-E}$) These letters show statistically significant differences at the 95% confidence level. ($p \leq 0.05$)

Bacteria: AB = *A. baumannii*, EC = *E. coli* ATCC 25922, KP = *K. pneumoniae*, PSAT = *P. aeruginosa* ATCC 27853, PSMD = *P. aeruginosa* MDR, BS = *B. subtilis*, MRSA = Methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* and SA = *S. aureus* ATCC 25923

Test substance: MS = *M. suavis* extract, AMP = Ampicillin and TET = tetracycline

การศึกษาการเสริมฤทธิ์ของส่วนสกัดผักหวานป่าร่วมกับยาปฏิชีวนะ

การทดสอบการเสริมฤทธิ์ของส่วนสกัดผักหวานป่า ได้ทำการเลือกเชื้อแบคทีเรีย *P. aeruginosa* เพียงชนิดเดียวมาศึกษาเพราะเป็นเชื้อที่มีอุบัติการณ์การดื้อยาสูงมาก พบเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดการเสียชีวิตมากที่สุดในโรงพยาบาล ซึ่งผลการศึกษาการเสริมฤทธิ์ของส่วนสกัดผักหวานป่าเมื่อใช้ร่วมกับยาปฏิชีวนะแสดงดังตารางที่ 2 และพบว่าส่วนสกัดผักหวานป่าเมื่อใช้ร่วมกับยาเตตราซัยคลิน จะออกฤทธิ์ได้ดีและเสริมฤทธิ์กันบางส่วนในการยับยั้ง *P. aeruginosa* สายพันธุ์ดื้อยา (มีค่า FICI 0.515) เช่นเดียวกับเมื่อใช้ร่วมกับยาแอมพิซิลลิน สามารถเสริมฤทธิ์กันบางส่วนในการยับยั้งเชื้อ *P. aeruginosa* สายพันธุ์ดื้อยา และ *P. aeruginosa* ATCC 27853 (ไม่ดื้อยา) ให้ค่า FICI 0.625 และ FICI 0.75 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามส่วนสกัดผักหวานป่าจะออกฤทธิ์ไม่แตกต่างจากยาเตตราซัยคลิน เมื่อใช้เมื่อใช้ส่วนสกัดผักหวานป่าร่วมกับเตตราซัยคลินในการยับยั้งเชื้อ *P. aeruginosa* ATCC 27853 สายพันธุ์ไม่ดื้อยา (FICI เท่ากับ 1.0312) งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าใบผักหวานป่าสามารถเสริมฤทธิ์ยาปฏิชีวนะในการยับยั้งเชื้อ *P. aeruginosa* เช่นเดียวกับน้ำมันหอมระเหยจากใบของ *Eucalyptus globules* กับยาเจนตามัยซิน เพราะยับยั้ง *P. aeruginosa* ได้เช่นเดียวกัน (Pereira *et al*., 2014) และให้ผลคล้ายกับสารกลุ่มฟีโนลิคจากน้ำมันหอมระเหยของเครื่องเทศบางชนิด เช่น โรสแมรี่ร่วมกับยา gentamicin สามารถช่วยเสริมฤทธิ์ในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย (Sevil, 2011) อาจจะเป็นไปได้ที่ผักหวานป่าพบสารฟีโนลิคซึ่งอาจเสริมฤทธิ์กับยาปฏิชีวนะไปช่วยกันยับยั้งโปรตีนโดยขับยาออกนอกเซลล์ (efflux pump activity) (Stavri *et al.,* 2007) เป็นต้น อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเบื้องต้น ซึ่งยังไม่สามารถนำผลทดสอบนี้ไปใช้จริง ดังนั้นควรเลือกใช้เอทานอลเป็นสารสกัดแทนเมทานอลเพื่อความปลอดภัย

Table 2 The comparison of synergistic effect from *M. suavis* extract combined with ampicillin and tetracycline against *P. aeruginosa* ATCC 27853 and *P. aeruginosa* MDR by using agar diffusion susceptibility test

Bacteria	MIC							FIC				FICI	
	MS	TET	AMP	MS + TET		MS + AMP		MIC of MS + Tet / MIC of MS	MIC of MS + Tet / MIC of Tet	MIC of MS + Amp / MIC of MS	MIC of MS + Amp / MIC of Amp	MS + TET	MS + AMP
				MS	TET	MS	AMP						
PSAT	40	0.312	10	1.25	0.312	10	5	0.031	1	0.25	0.5	1.031	0.75
PAMD	40	20	20	0.625	10	5	10	0.016	0.5	0.125	0.5	0.516	0.625

Bacteria: PSAT = *P. aeruginosa* ATCC 27853 and PSMD = *P. aeruginosa* MDR

Test substance: MS = *M. suavis* extract, AMP = Ampicillin and TET = tetracycline

เมื่อทราบการเสริมฤทธิ์ได้แล้วจึงจะสกัดสารออกฤทธิ์จากผักหวานป่าด้วยเอทานอล ดังนั้นยังไม่สามารถนำผลทดสอบนี้ไปใช้จริง

งานวิจัยนี้พิสูจน์ให้เห็นว่าใบผักหวานป่ามีฤทธิ์ต้านเชื้อจุลินทรีย์และสามารถเสริมฤทธิ์กับยาแอมพิซิลลินและเตตราซัยคลิน ซึ่งข้อมูลพื้นฐานนี้ อาจจะนำผักหวานป่ามาเป็นทางเลือกใหม่ในการนำพืชสมุนไพรพื้นบ้านมารักษาโรคติดเชื้อ เพิ่มมูลค่าให้พืชผักท้องถิ่น หรือสกัดสารบริสุทธิ์จากผักหวานป่ามาใช้ทดแทนยาปฏิชีวนะที่เคยใช้ไม่ได้ผลในอนาคต

สรุป

ใบผักหวานป่าเป็นผักพื้นบ้านที่พบสารกลุ่มฟีโนลิคและฟลาโวนอยด์เป็นองค์ประกอบ และพบว่าส่วนสกัดผักหวานป่าเพียงอย่างเดียว สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียฉวยโอกาสทุกชนิดที่นำมาทดสอบ และส่วนสกัดผักหวานป่ายังสามารถเสริมฤทธิ์กันบางส่วนเพื่อยับยั้งเชื้อ *P. aeruginosa* สายพันธุ์ดื้อยาและไม่ดื้อยา เมื่อใช้ร่วมกับยาเตตราซัยคลินและแอมพิซิลลิน ยกเว้น เมื่อใช้ร่วมกับยาเตตราซัยคลิน จะออกฤทธิ์ไม่ต่างกันกับการใช้ยาเตตราซัยคลินเพียงชนิดเดียว ในการยับยั้งการเจริญของเชื้อ *P. aeruginosa* สายพันธุ์ไม่ดื้อยา

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยสำเร็จได้เพราะได้รับความช่วยเหลือจากภาควิชาจุลชีววิทยา มหาวิทยาลัยบูรพา และโรงพยาบาลชลบุรีที่เอื้อเฟื้อให้เชื้อจุลินทรีย์ในการทำการศึกษาทดลอง และขอขอบคุณภาควิชาชีววิทยา มหาวิทยาลัยบูรพา ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์เครื่องมือต่าง ๆ ในการทำทดลอง และขอขอบคุณ ดร.เบญจวรรณ ชีวปรีชา ที่ช่วยระบุสายพันธุ์ผักหวานป่า

เอกสารอ้างอิง

ณรงค์ มูลคำ. 2553. **ปลูกผักพื้นบ้าน อาหาร-ยาต้านโรค**. กรุงเทพฯ: บริษัทแซทโฟร์ พริ้นติ้งจำกัด.

ณัฏฐากร เสมสันทัด และ บัณฑิต โพธิ์น้อย. 2552. **ผักหวานป่า**. กลุ่มงานวนวัฒนวิจัย สำนักวิจัย และพัฒนาการป่าไม้ กรมป่าไม้.

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

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.

Fair, R.J. and Tor, Y. 2014. Antibiotics and bacterial resistance in the 21st century. **Perspectives in Medicinal Chemistry** 6: 25-64.

Miceli, N., Trovato, A., Marino, A., Bellinghieri, V., Melchini, A., Dugo, P., Cacciola, F., Donato, P., Mondello, L., Guvenc, A., De Pasquale, R. and Taviano, M.F. 2011. Phenolic composition and biological activities of *Juniperus drupacea* Labill. berries from Turkey. **Food and Chemical Toxicology** 49: 2600-2608.

Munde-Wagh, K.B., 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.

Padalia, H., and Chanda, S. 2015. Antimicrobial efficacy of different solvent extracts of *Tagetes erecta* L. flower, alone and in combination with antibiotics. **Applied Microbiology** 1(1): 1-10.

Pereira, V., Dias, C., Vasconcelos, M.C., Rosa, E. and Saavedra, M.J. 2014. Antibacterial activity and synergistic effects between *Eucalyptus globulus* leaf residues (essential oils and extracts) and antibiotics against several isolates of respiratory tract infections (*Pseudomonas aeruginosa*). **Industrial Crops and Products** 52: 1-7.

Rakotoniriana, E.F., Rajaonarison, J.F., Raoelison, E.G., Rajaonarivelo, N.M., Solofoniaina, M., Rakotonirina, B., Randriamampionona, D., Rabemanantsoa, C., Cheuk, K., Urveg-Ratsimamanga, S. and Leclercq, J.Q. 2010. Antimicrobial activity of 23 endemic plants in Madagascar. **Tropical Journal of Pharmaceutical Research** 9(2): 165-171.

Rashina, V.M. and Kumar, A. 2018. Cytotoxicity and angiogenic activity of *Cansjera rheedii* J. Gmelin. **International Journal of Current Research in Life Sciences** 7(6): 2176-2178.

Sedghizadeh, P.P., Mahabady, S. and Allen, C.M. 2017. Opportunistic oral Infections. **Dental Clinics of North America** 61: 389-400.

Sharma, J.V.C., Malleswari, G., Rao J.V., Balaram, V.M. and Sangeetha R. 2010. Antimicrobial and anthelmintic activity of *Cansjera rheedii* root extract. **International Journal of Chemical Sciences** 8(2): 1091-1095.

Tiwari, R.P., Bharti, H.D., Kaur, R.P. and Hoondal, G.S. 2005. Synergistic antimicrobial activity of tea and antibiotics. **Indian Journal of Medical Research** 122: 80-84.

Tianpech, N., Swatsitang, P., and Tanpanich, S. 2008. Antioxidant capacity and nutritional value of Pak- Wanpa (*Melientha suavis* Pierre.). **KKU Science Journal** 36(Supplement): 75-82.

Toroglu, S. 2011. *In-vitro* antimicrobial activity and synergistic/antagonistic effect of interactions between antibiotics and some spice essential oils. **Journal of Envionmental Biology** 32(1): 23-29.

Upadhyay, A., Upadhyaya, I., Johny, A.K. and Venkitanarayanan, K. 2014. Combating pathogenic microorganisms using plant-derived antimicrobials: a minireview of the mechanistic basis. **BioMed Research International** 5(12): 1-18.

Histological Changes in Liver on Malarial Mouse Model Treated with *Citrus hystrix* DC. Peels Extract

Rossukon Renumat[1], Aikkarach Kettawan[2], Aporn Chunjarunee[1] and Thanaporn Rungruang[1*]

ABSTRACT

The purpose of this study was to evaluate the effect on liver histology changes of *Citrus hystrix* DC. (CH) peel extract on *Plasmodium yoelii* 17XL infection in ICR mice. Experimental groups comprise non-malaria infected mice as a control, mice with parasite infection only, mice receiving CH peel crude extract at 500 mg/kg (low dose CH) and 1000 mg/kg (high dose CH) without parasite infection, and mice receiving CH peel extract at 500 mg/kg (low dose CH treatment) and 1000 mg/kg (high dose CH treatment) after *P. yoelii* infection. The livers were collected, processed using conventional paraffin technique and stained with hematoxylin and eosin. The normal control, high dose CH, and low dose CH groups revealed normal histology of the livers. The diameters of hepatocytes, sinusoids and Kupffer's cells in high dose CH and low dose CH mice showed no significant difference compared with those in the normal control mice. In parasite infected, low and high dose CH treatment groups, the liver showed significant hepatocyte, distension of sinusoids and hemozoin in Kupffer's cells.

In conclusion, it is likely that CH does not help to reduce the damages in the malaria infected-livers.

Key words: *Citrus hystrix* DC., malaria, liver, histology

*Corresponding author; e-mail address: Thanaporn.run@mahidol.ac.th

[1]Department of Anatomy. Faculty of Medicine Siriraj Hospital, Mahidol university, Bangkok, 10700

[2]Institute of Nutrition, Mahidol university, Salaya, Nakon Pathom 73000, Thailand

INTRODUCTION

Malaria is a major health problem in the tropics and subtropics. In 2015, it is estimated that 216 million cases of malaria occurred worldwide and 445,000 died from malaria globally (World Health Organization, 2015). Malaria is a protozoan disease, transmitted by the bite of an infected female mosquito. During malarial infections, the parasites enter the bloodstream, migrate to the liver and from there infect red blood cells, induces biochemical modifications in the membranes of red blood cells, mimicking the physiologic cell's aging process (Omodeo-Salè *et al*., 2003). Thus, increased production of reactive oxygen species causes of oxidative stress. High levels of reactive oxygen species are produced by activated monocytes and neutrophils in the host and during degradation of hemoglobin in the parasite, which affect cell and organ pathological changes, damage cell structures such as carbohydrates, lipids, nucleic acids leading to cell death in the host (Postma *et al*., 1996).

The increasing and widespread resistance of parasites to the current antimalarials is a major problem in the prevention and treatment of this disease. Two important currently used antimalarial drugs are derived from plants. Artemisinin was derived from Qinghao plant (*Artemisia annua*) and quinine from the cinchona tree *(Cinchona)*. Thus, plants could be promising sources of new antimalarial compounds as in the cases of quinine and artemisinin.

Citrus hystrix DC. (CH) also known as makrut lime is a citrus fruit native to tropical Asia. The zest and rind may also be used, but the fruit itself has almost no juice and is primarily used for traditional medicinal purposes. The valued parts of CH are the leaves and fruit peel. Moreover, fruit peel has been reported to exhibit higher antioxidant contents than the other parts (Wijaya *et al*., 2017).

CH peel also consists of flavonoids including naringenin and hesperidin (Tirkey *et al*., 2005). In previous studies in vitro, was found that CH can inhibit the growth of malaria parasite (Horata *et al*., 2017). It could be purposed that there were active compounds in CH which are potential inhibitors against during malaria-infected. In this study, *Plasmodium yoeli* 17XL has been used in because its genes show similar to human malaria, *Plasmodium falciparum*. Therefore, the aim of this study is to investigate the histology changes of liver in *Plasmodium yoeli* 17XL infected mice following treatment with CH peel extract.

MATERIALS AND METHODS

Preparation of ethanol extract

C. hystrix was washed, peeled off, cut into small pieces and dried in an oven at 35°C. Dried peels were extracted with 70% ethanol using maceration method for 5 days and re-maceration of residue for consecutive 3 days at room temperature in dark condition. The extracts were filtered through a Whatman No.1 filter paper, concentrated at 45°C by rotary vacuum. Evaporator and stored at -20 ^{o}C before used.

Parasites preparation

Plasmodium yoelii 17XL were obtained from Assist. Prot. Dr. Thanaporn Rungruang (originated from Prof. Dr. Motomi Torii from Ehime University School of Medicine and Prof. Dr. Osamu Kaneko from Institute of Tropical Medicine, Nagasaki University, Japan). *Plasmodium yoelii* 17XL infected blood stock was infected to donor mice by intraperitoneal injection. Percent parasitemia was checked using Giemsa staining method. Blood was collected from tail snip bleed for thin blood smear preparation, fixed with methanol and stained with Giemsa. Mice with 20% parasitemia were selected. The donor mice were sacrificed with CO_2 and blood was collected via cardiac puncture. One milliliter of blood from each mouse was collected into a heparinized syringe. The percentage of parasitemia and red blood cell count were determined and appropriate dilutions of the infected blood with normal saline were determined. Each mouse in the infected groups was intraperitoneally on day 0 with 0.2 ml of infected blood containing about 1×10^7 *P. yoelii* parasitized red blood cells.

Animals

Female ICR mice, aged 6-7 weeks and weighing 20-22 grams, were obtained from National Laboratory Animal Center, Mahidol University, Nakorn Pathom, Thailand. They were exposed to a 12:12 dark-to-light cycle and provided with free access to a pellet diet and clean drinking water.

Experimental design

Mice were divided into six groups (five mice in each group). Group 1 (normal control group) was not inoculated with the parasite and received only standard diet. Group 2 (parasite infected group) was injected with 0.2 ml of *P. yoelii* 17XL infected red blood cells on day 0 and received a standard diet. Group 3 (high dose CH) and group 4(low dose CH) received standard diet and were injected with CH peel extract 1000 mg/ kg, 500 mg/kg respectively for 20 days. Group 5 (high dose CH treatment) and group 6(low dose CH treatment) served as parasite infected groups and received CH peel extract at 1000 and 500 mg/kg respectively, for 20 days.

Histological studies

Mice were sacrificed and the livers were collected. Small pieces of livers were fixed in 10% formalin for 1 or 2 days, dehydrated with serial ethanol cycles (70% to absolute) and embedded in paraffin. The paraffin-embedded tissues were cut into 6-μm thick sections. The tissue sections were deparaffinised, stained with Mayer hematoxylin and eosin and viewed under a light microscope. Image J program was used for measuring all histomorphometrics and the quantity of hemozoin, which determined as percent of black and white areas in the histological sections.

RESULTS

The histological changes of the liver.

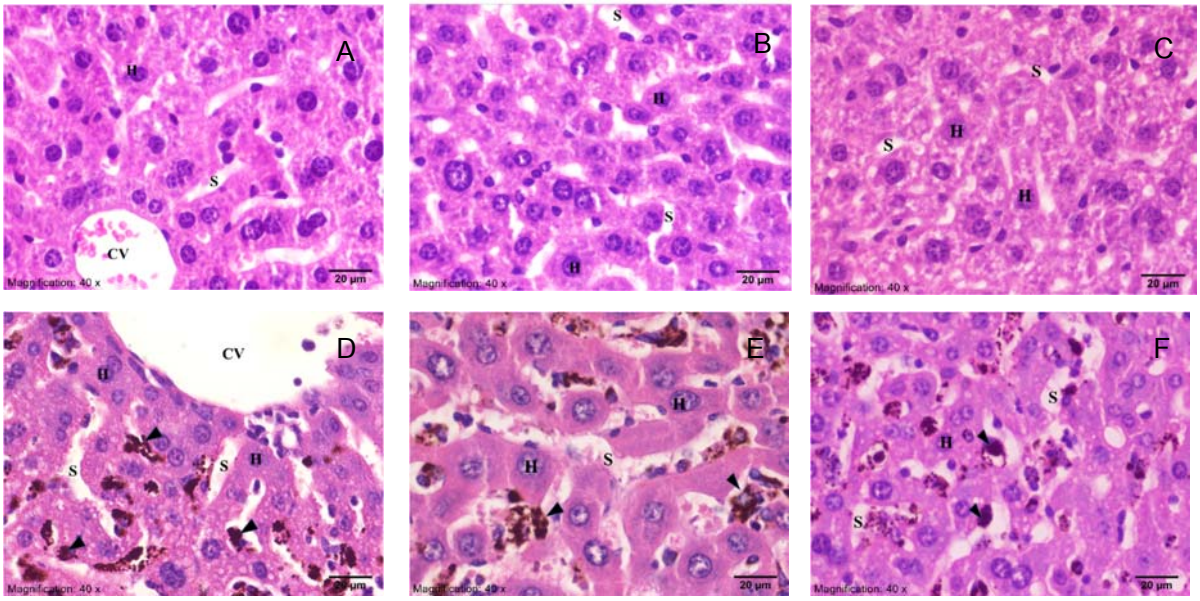


Figure 1. Histology of liver. A) Normal control group, B) High dose CH group, C) Low dose CH group, D) Parasite infected group, E), High dose CH treatment group F) Low dose CH treatment group. H: Hepatocyte, S: Hepatic sinusoid, Black arrow: Hemozoin.

The livers of normal control, high dose CH and low dose CH groups showed normal histology with the central veins collected blood draining through sinusoids of a hepatic lobule. Hepatocytes are polygonal epithelial cells with abundant eosinophilic, granular cytoplasm and large, centrally located round nuclei. Hepatic sinusoids are vascular spaces lined by a fenestrated endothelium, Monocyte-derived Kupffer's cell are located within the vascular spaces of hepatic sinusoids (Figure 1A, B, C). In contrast, parasite infected, high dose treatment and low dose treatment groups showed swelling of hepatocyte, distended sinusoid and hemozoin in the Kupffer's cell. The liver became dark-brown from hemozoin, the pigment the brown-dark from the digestion of blood by *Plasmodium* and showed dilated sinusoids containing macrophages and parasitized erythrocytes (Figures 1D, E, F &2). This pigment was not detectable in uninfected groups (Figure A, B, C)

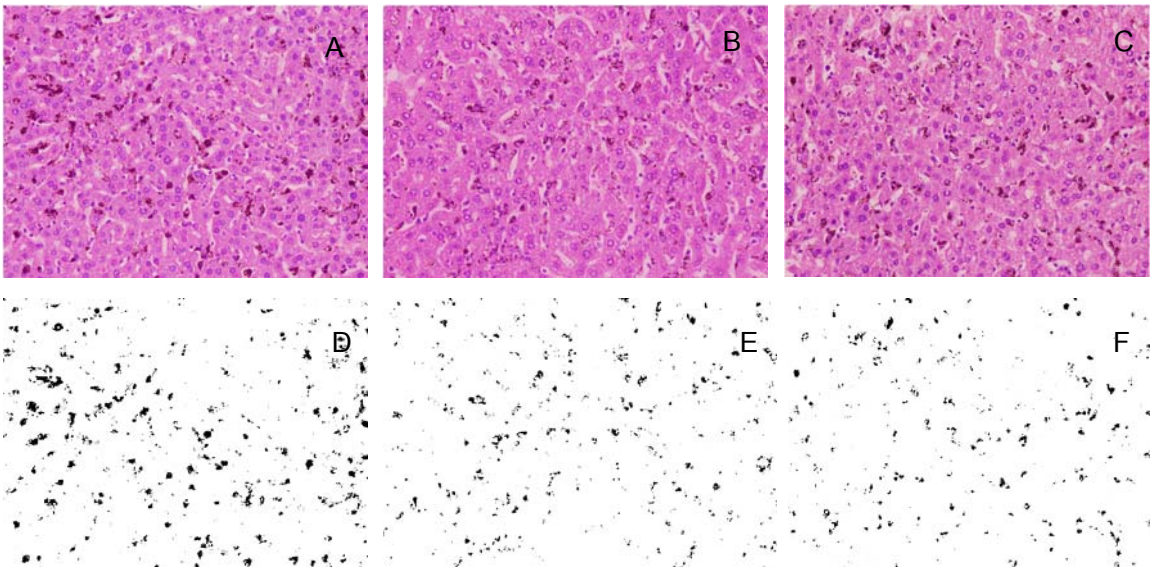


Figure 2. Image analysis of hemozoin in the liver at 40X.; A) Parasite infected group, B) High dose treatment group, C) Low dose treatment group. D, E &F obtained from Image J analysis of A, B& C, respectively, showing hemozoin as black areas.

Diameters of hepatocytes, hepatic sinusoids and Kupffer's cells in parasite infected, high dose CH treatment and low dose CH treatment groups increased significantly compared with those in the normal control group. In contrast, these parameters were not different among the high dose CH and low dose CH and normal control group. Besides, percent hemozoin in parasite infected only, high dose CH treatment and low dose CH treatment groups increased significantly difference compared with the normal control group (Table 1.).

Table 1. Histological changes of the liver tissue.

Groups	Diameter (μm)			% hemozoin
	hepatocyte	hepatic sinusoid	Kupffer's cell	
Normal control	11.42±0.97	3.60±0.28	2.70±0.18	0.00±0.00
Parasite infected	13.92±0.17[a]	4.24±0.24[a]	3.28±0.18[a]	1.97±0.33[a]
High dose CH	11.89±0.85	3.25±0.14	2.43±0.17	0.00±0.00
Low dose CH	11.70±0.59	3.27±0.24	2.43±0.13	0.00±0.00
High dose CH treatment	13.20±0.52[a]	4.40±0.33[a]	3.75±0.10[a]	2.17±0.43[a]
Low dose CH treatment	13.40±0.10[a]	4.85±0.40[a]	3.90±0.29[a]	2.00±0.23[a]

Data were expressed as mean ± SE. Statistical analysis for comparing treatment effect of each group of mice by using one-way ANOVA.

[a]: $P<0.05$ was considered as significant difference compared to the normal control group.

DISCUSSION

The livers of the normal control, low dose CH and high dose CH groups showed normal histology whereas parasite-infected mice, showed swollen hepatocytes, hyperplasia and enlargement of Kupffer's cells, distended and congested hepatic sinusoid, accumulated hemozoins in hepatic sinusoids. In addition, the inflammatory cells were found close to the central vein likely as a result from inflammation, cytotoxic substances and white blood cell accumulation (Wunjuntuk *et al*.,2016). Histopathological changes of hepatocytes, hemozoin deposition, inflammatory infiltrates might be explained that during *Plasmodium* infection, phagocytes were activated and generated large amounts of reactive oxygen species (ROS) and reactive nitrogen species (RNS), causing an imbalance between the formation of oxidizing species and the activity of antioxidants (Percário *et al*., 2012). This imbalance triggers oxidative stress, in the case of liver malaria and can lead to damage vascular membrane, which leads to increased permeability and fluid leaked into hepatocytes cause to cell inflammation (Vaughan and Kappe 2017).

From our finding, CH peels extract had no effects on the liver histology. The liver of high and low dose treatment groups might have the increase of hyperphagocytotic activity of macrophages to fight against the infection as same as the reports previously (Laskin *et al*., 2010). It is likely that CH does not help to reduce the courses of inflammation that occurred in malaria infected-liver. However, Arencibia Pita *et al*. (2006) showed that hepatic effects observed during the presentation in malaria were not associated with the parasitemia level, therefore, further studies on the effects of CH extract in malaria should be performed on other biochemical analyses.

CONCLUSION

We conclude that CH peels extract is unable to normalize the liver histological on *Plasmodium*-infected mice. Our current report is not sufficient to determine the efficacy of CH peels extracts to normalize the liver histology on *Plasmodium* infected mice. Thus, we suggested that the biochemical analysis, mechanism of action and histopathological examination need to be investigated further.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors are grateful to the Department of Anatomy. Faculty of Medicine Siriraj Hospital, Mahidol university for the technological and laboratory help.

REFERENCE

Arencibia, L.P., Jiménez, M.R., Serrano, A. M., Menéndez, R.C., and Ricardo, M.F. 2006. Severe malarial infection in adults aged over 18 years: one-year experience. **Revista cubana de medicina tropical** 58 (3): 219-225.

Horata, N., Suttirat, S, Panpanich, T., Siriphor, A., Navaprayoonvach, B., Suwanwisolkij, N., and Janwithayanuchit, I. 2017. In Vitro Antimalarial Activity and Cytotoxity of 20 Ethanolic Crude Extracts from Thai Herbs Against *Plasmodium Falciparum* TM267. **Songklanagarind Medical Journal** *35*(2): 109-120.

Laskin, D. L., Sunil, V. R., Gardner, C. R., and Laskin, J. D. 2011. Macrophages and tissue injury: agents of defense or destruction? **Annual review of pharmacology and toxicology** 51: 267-288.

Omodeo-Salè, F., A. Motti, N. Basilico, S. Parapini, P. Olliaro and D. Taramelli. 2003. Accelerated senescence of human erythrocytes cultured with Plasmodium falciparum. **Blood** 102(2): 705-711.

Percário, S., Moreira, D. R., Gomes, B. A., Ferreira, M. E., Gonçalves, A. C. M., Laurindo, P. S., and Green, M. D. 2012. Oxidative stress in malaria. ***International Journal of Molecular Sciences*** *13*(12): 16346-16372.

Postma, N., J. Zuidema, E. Mommérs and W. Eling. 1996. Oxidative stress in malaria; implications for prevention and therapy. **Pharmacy World and Science** 18(4): 121-129.

Vaughan, A. M., and Kappe, S. H. 2017. Malaria parasite liver infection and exoerythrocytic biology. Cold Spring Harb. **Perspect. Med** 7: a025486.

Tirkey, N., Pilkhwal, S., Kuhad, A., and Chopra, K. 2005. Hesperidin, a citrus bioflavonoid, decreases the oxidative stress produced by carbon tetrachloride in rat liver and kidney. **BMC pharmacology** 5(1): 2

Wijaya, Y., Widyadinata, D., Irawaty, W., and Ayucitra, A. 2017. Fractionation of Phenolic and Flavonoid Compounds from Kaffir Lime (*Citrus hystrix*) Peel Extract and Evaluation of Antioxidant Activity. **Reaktor** 17(3): 111-117.

World Health Organization. 2016. World malaria report 2015. **World Health Organization**.

Wunjuntuk K., Kettawan A., Rungruang T., Charoenkiatkul S .2016. Anti-fibrotic and anti-inflammatory effects of parboiled germinated brown rice (Oryza sativa 'KDML 105') in rats with induced liver fibrosis. **J Funct Foods** 26:363–372

Production of Protein Hydrolysates from Waste of Big-oui Using Papain and Bromelain

Sunisa Suwannaphan[1*]

ABSTRACT

Big-oui is one of the most commonly cultivated fish for human consumption in Thailand. Fish processing generated a large amount of waste which accounted for 24% of head and skin. In an attempt to add more value to fish wastes, this research is aimed to produce protein hydrolysates from head and skin wastes of Big-oui. These wastes were hydrolyzed with papain (P) and bromelain (B) in the ratios of P30:B70, P50:B50 and P70:B30. The results showed that degree of hydrolysis of P30:B70 (63.32±5.74%) and P70:B30 (63.20±7.68%) were significantly higher than P50:B50 (52.10±3.26%). The proximate analysis of protein hydrolysates revealed that the protein contents of P70:B30 and P30:B70 were 80.40±0.22% and 80.12±0.15%, respectively and were significantly higher than that of P50:B50 (70.46±0.40%). Conversely, the fat content of P50:B50 (11.27±1.13%) were significantly higher than those of P30:B70 (3.28±0.33%) and P70:B30 (1.65±0.01%). Moreover, P70:B30 showed the best solubility in water, followed by P30:B70 and P50:B50. There were no significant differences in water-holding capacity among the three protein hydrolysates but the oil-holding capacity of P30:B70 was shown to be significantly higher than those of P50:B50 and P70:B30. The P70:B30 exhibited the best of emulsion capacity and emulsion stability. In addition, the antioxidant properties of the protein hydrolysates were evaluated. The antioxidant activities of P50:B50 (36.93±1.18%) and P70:B30 (35.59±1.29%) were significantly higher than that of P30:B70 (28.02±1.60%). The P70:B30 contained relatively high concentration of proteins with excellent functional properties. Thus, it may further be used as the protein supplement.

Key Words: Big-oui, protein hydrolysate, papain, bromelain, functional property, antioxidant activity

*Corresponding author; email address: **sns_mai@hotmail.com**

[1]Discipline of Food Science and Technology, Faculty of Agricultural Technology and Agro-Industry, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, 60 Moo 3 Asian Highway, Phranakhon Si Ayutthaya 13000

INTRODUCTION

Freshwater aquaculture production is increasing. Fisheries statistics of Thailand reported that the Big-oui is produced approximately 27.6% in 2013. A large amount of solid waste in terms of fish head (21%), backbone (14%), fin and lung (10%), viscera (7%), liver (5%), spawn (4%) and skin (3%) are discarded from fish processing industries (waterman, 2001). These wastes can be used to produce fish meal but sell at a low price. In order to add more value to protein-rich fish wastes, these wastes are converted into the protein hydrolysates (Wisuthiphate et al., 2016). The protein hydrolysates can be developed through hydrolysis technique. Enzymatic hydrolysis is the safest method of choice and is more profitable than chemical hydrolysis owing to hydrolysis enzymatically are operated under mild condition which generated even quality of protein (Kristinsson and Rasco, 2000a). The proteolytic enzyme can be obtained from plants (papain and bromelain) (Wisuthiphate et al., 2016), animals (pepsin and trypsin) (Slizyte et al., 2016) and microorganisms (alcalase, flavourzyme and novozyme) (Amorim et al., 2016). The protein hydrolysates are used as protein supplements for human and animal (Venugopal and Shahidi, 1995; Nesse et al., 2001) because they contained relatively high-quality protein.

Therefore, this research is aimed to optimize the ratio of papain and bromelain for producing the protein hydrolysates from waste of Big-oui which contained high level of protein and exhibited good functional properties.

MATERIALS AND METHODS

Preparation of Big-oui waste

The fish samples, Big-oui were purchased from Tha Rua market, Phra Nakhon Si Ayutthaya. They were collected in ice-cold conditions and immediately brought to a laboratory. The 150 g minced fraction of head and skin portions were heated in a boiling water bath at 100ºC for 10 min to inactivated endogenous enzyme activity. The pH of samples were adjusted to 7.0 by adding 1 mM phosphate buffer and further homogenized with blender. They were divided into plastic containers and stored at -20ºC until use.

Preparation of fish protein hydrolysate

The fish protein hydrolysate was prepared following the method of Abdulazees et al. (2013) with a slight modification. The sample (75 g) was pre-incubated at 55ºC in a shaker at 200 rpm for 10 min. Then, it was added with 200 units of papain and bromelain with the ratios of P30:B70, P50:B50, and P70:B30. The reaction was further performed at 55ºC and the degree of hydrolysis was measured at the intervals of 0, 30, 60, 90 and 120 min continuously. After 120 min of incubation, the reaction was terminated by heating the solution to 100ºC for 20 min, assuring the enzyme inactivation.

The residual protein hydrolysate was then cooled and centrifuged at 9,000 rpm for 40 min. The supernatant was collected, lyophilized and stored at -20ºC until use.

Degree of hydrolysis (DH)

DH was evaluated following the method described by Hoyle and Merritt (1994).

Proximate composition

Protein contents in the raw material (fresh head and skin of Big-oui) and the protein hydrolysates were determined using the Kjeldahl method (N×6.25) according to ISO5983-2 (ISO, 2009). Lipid in samples were determined by Soxhlet extraction (AOAC, 2006). Moisture and ash contents were measured according to protocol of ISO6496 (ISO, 1999) and ISO5984 (ISO, 2002), respectively.

Determination of molecular weight of protein hydrolysate

The molecular weight of the protein hydrolysates was estimated by SDS-PAGE (12%) as described by Laemmli (1970).

Functional property

The functional properties of the protein hydrolysates were determined in terms of solubility (Robinson and Hodgen, 1940), water and oil holding capacities (Awolu, 2017), emulsion capacity and emulsion stability (Perez and Augusto, 2016).

Antioxidant activity

Antioxidant activity was analyzed using 2, 2, Diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) method described by Kitts et al. (2000).

RESULTS AND DISCUSSION

Degree of hydrolysis (DH)

The DH increased with increasing hydrolysis time for both control sample (without added enzyme) and the protein hydrolysated hydrolyzed with the three ratios of enzymes (P30:B70, P50:B50 and P70:B30). The DH of P30:B70 (63.32±5.74%) and P70:B30 (63.20±7.68%) were significantly higher than P50:B50 (52.10±3.26%). The DH of P30:B70 and P70:B30 increased significantly up to 90 min; thereafter, non-significant increase was observed (Figure 1). This reduction of hydrolysis rate could be due to enzyme inhibition by hydrolysis products (Valencia et al., 2014) which also reduced the recovery of soluble protein (Shahidi et al., 1995). Thus, only 90 min was sufficient to produce the highest protein contents for P30:B70 and P70:B30, whereas P50:B50 took more time for a full

hydrolysis (up to 120 min). The results obtained suggested that DH depended on the type of enzyme, enzyme concentration and hydrolysis time.

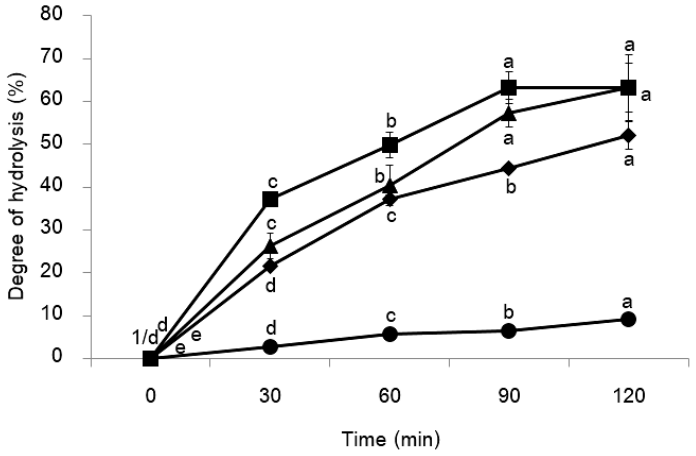


Figure 1 Degree of hydrolysis obtained by enzyme hydrolysis using three ratios of papain and bromelain for 0 to 120 min. Control (●), P30:B70 (▲), P50:B50 (◆) and P70:B30 (■)

1/ Lowercase letters indicate significant differences in DH obtained by enzyme hydrolysis.

Proximate analysis

Proximate compositions of the raw material and the freeze-dried protein hydrolysates were displayed in the Table 1. Moisture and protein contents of the raw material were 59.18±2.20% and 16.01±1.13%, respectively, which were lower than those of Narrow-barred Spanish mackerel (76.80% and 25.20%, respectively). Lipid content (12.40±3.64%) and ash content (5.08±0.76%) of the raw material were higher than those of Narrow-barred Spanish mackerel (0.43% and 0.89%, respectively) (Abdulazeez et al., 2013). The moisture contents of the three freeze-dried protein hydrolysates were significantly lower than the raw material about 6.4 to 12 folds because they lost most of their moisture contents during freeze drying process (Bueno-Solano et al., 2009). Conversely, the protein contents were significantly higher than in the raw material due to solubilization of proteins during hydrolysis and removal of insoluble solid matter by centrifugation (Chalamaiah et al., 2010). There were no significant differences in protein contents between P30:B70 and P70:B30, and these contents were higher than P50:B50. These results may be due to competing substrate interaction in the presence of equal ratios of papain and bromelain, resulting in the decrease in protein hydrolysis (Mansfield et al., 1999). Moreover, P30:B70 and P70:B30 had lipid contents lower than the raw material and P50:B50 due to the removal of fat layer after hydrolysis. During hydrolysis process, muscle cell membranes tended to round up and form insoluble vesicles, leading to the removal of membrane structured lipids during centrifugation for the recovery of the soluble protein (Shahidi et al., 1995).

Table 1 Proximate analysis of the raw material and the freeze-dried protein hydrolysates

Sample	Proximate composition (g/100 g sample)			
	Moisture	Protein	Lipid	Ash
Raw material	59.18±2.20$^{A2/}$	16.01±1.13^{C}	12.40±3.64^{A}	5.08±0.76^{C}
P30:B70	5.01±0.17$^{Cc3/}$	80.12±0.15^{Aa}	3.28±0.33^{Bb}	9.09±2.04^{Ans}
P50:B50	8.19±0.04^{Bb}	70.46±0.40^{Bb}	11.27±1.13^{Aa}	7.24±0.07^{Bns}
P70:B30	9.23±0.30^{Ba}	80.40±0.22^{Aa}	1.65±0.01^{Bc}	7.31±0.23^{Bns}

2/ Capital letters indicate significant differences in proximate compositions between the raw material and each of freeze-dried protein hydrolysate ($P \leq 0.05$)

3/ Lowercase letters indicate significant differences in proximate compositions among three freeze-dried protein hydrolysates ($P \leq 0.05$)

Determination of molecular weights of protein hydrolysates

The control sample showed broad range of proteins with molecular weights ranging from 10 to 170 kDa. After hydrolysis, the major low molecular weight proteins of the three protein hydrolysates were found to be between 12 and 23 kDa (Figure 2). This finding was close to the report of Perez and Augusto (2016) which revealed that the catfish protein hydrolysates had a molecular weight of 15 kDa or below.

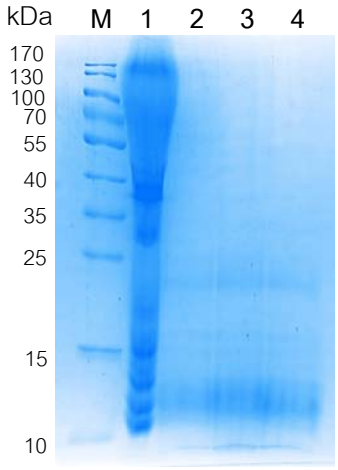


Figure 2 SDS-PAGE profiles of protein hydrolysates (total protein 100 µg/lane). PageRuler™ Prestained Protein Ladder (M), Control (1), P30:B70 (2), P50:B50 (3) and P70:B30 (4)

Functional property

Solubility

Although the three freeze-dried protein hydrolysates showed similar protein sizes on SDS-PAGE, the solubility of protein hydrolysates of P70:B30 (89.42±1.13%) was significantly higher than

P30:B70 (83.64±1.38%) and P50:B50 (36.59±2.55%). These results may be owing to the differences in the substrate specificity of papain and bromelain, leading to proteins/peptides substances composed of different types of amino acid compositions. The protein hydrolysate containing high amounts of proteins with good solubility can be used as milk replacers for pig and calf (Gildberg, 1988; Venugopal and Shahidi, 1995).

Water and oil holding capacities

The results revealed that there were no significant differences in water holding capacities among three freeze-dried protein hydrolysates (3.33±0.58 to 4.00±0.02 mL/g). The oil holding capacity of P30:P70 (1.50±0.03 mL/g) was significantly higher than those of P50:B50 (1.03±0.06 mL/g) and P70:B30 (1.00±0.01 mL/g). The P30:B70 may be composed of hydrophobic amino acids more than P50:B50 and P70:B30 (Don et al., 1991).

Emulsion stability

The emulsion activities of the three freeze-dried protein hydrolysates was shown in Figure 3. The P70:B30 exhibited better emulsion stability than those of P30:B70 and P50:B50, respectively. These results were due to the generation of peptides of lower sizes throughout the time of hydrolysis which tend to migrate toward the interface in the emulsion system (Perez and Augusto, 2016). After 45 min of incubation, the emulsion activities of P30:B70 and P50:B50 were 68.20±2.20% and 55.70±0.70%, respectively. However after 15 min incubation, the emulsion activities of P50:B50 (84.90±0.70%), P70:B30 (89.40±0.20%) and P30:B70 (90.10±0.70%) were higher than that of the protein hydrolysate obtained from catfish (82.00%) (Perez and Augusto, 2016).

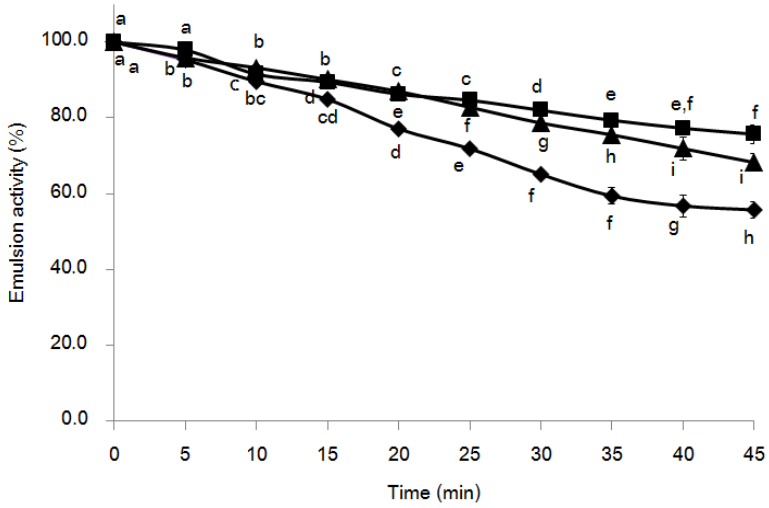


Figure 3 Emulsion activities of protein hydrolysates. P30:B70 (▲) P50:B50 (◆) และ P70:B30 (■)

Antioxidant activity

The results showed that there were no significant difference in the antioxidant activities between P50:B50 (36.93±1.18%) and P70:B30 (35.59±1.29%). Those two activities were higher than an activity of P30:B70 (28.02±1.60%). The antioxidant activities of these protein hydrolysates were quite low. This may resulted from proteins/peptides obtained had low amounts of amino acids such as histidine, leucine, tyrosine, methionine and cysteine, resulting in low antioxidant properties (Yu et al., 2018).

CONCLUSION

The waste (head and skin) of Big-oui were hydrolyzed with papain and bromelain in the ratios of P30:B70, P50:B50 and P70:B30. The P70:B30 were the most suitable ratio for the production of the protein hydrolysate because it had high protein content and good functional properties. Further investigation is needed to determine the amino acid sequences in the peptides by tandem mass spectrometry (LC-MS/MS).

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was supported by the Research and Development Institute of Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi.

REFERENCES

Abdulazeez, S.S., B. Ramamoorthy and P. Ponnusamy. 2013. Proximate analysis and production of protein hydrolysate from king fish of Arabian gulf coast-Saudi arabia. **Int. J. Pharm. Biol. Sci.** 3: 138-144.

Amorim, R.G.O., F.C. Deschamps and M.L. Pessatti. 2016. Protein hydrolysate waste of white mouth croaker (*Micropogonias furnieri*) as a way of adding value to fish and reducing the environmental liabilities of the fishing industry. **Lat. Am. J. Aquat. Res.** 44: 967-974.

AOAC Authors. Official methods of analysis Lipids, Fats and Oils Analysis Total Fat Animal Feed - item 16. Association of Analytical Communities, Gaithersburg, MD, 17th edition, 2006. Reference data: Method 920.39; NFNAP; LIPD; FA.

Awolu, O.O. 2017. Optimization of the functional characteristics, pasting and rheological properties of pearl millet-based composite flour. **Heliyon.** 3: 1-17.

Bueno-Solano, C., J. Lopez-Cervantes, O.N. Campas-Baypoli, R. Lauterio-Garcia, N.P. Adan-Bante and D.I. Sanchez Machado. 2009. Chemical and biological characteristics of protein hydrolysates from fermented shrimp by-products. **Food Chem.** 112: 671-675.

Chalamaiah, M., G.N. Rao, D.G. Rao and T. Jyothirmayi. 2010. Protein hydrolysates from meriga (*Cirrhinus mrigala*) egg and evaluation of their functional properties. **Food Chem.** 120: 652-657.

Don, B.L.S., A.M.R. Pilosof and G.B. Bartholomai. 1991. Enzymatic modification of soy protein concentrates by fungal and bacterial proteases. **J. Am. Oil Chemists Soc.** 68: 102-105.

Gildberg, A. 1988. Aspartic proteinases in fishes and aquatic invertebrates. **Comp. Biochem. Physiol.** 91B: 425-435.

Hoyle, N. and J.H. Merritt. 1994. Quality of fish protein hydrolysates from herring (*Clupea harengus*). **J. Food Sci.** 59: 76-79.

ISO, 1999. ISO6496. **Animal feeding stuffs — determination of moisture and other volatile matter content.** ISO Standard 6496. International Standards Organization.

ISO, 2002. ISO5984. **Animal feeding stuffs — determination of crude ash.** ISO Standard 5984: 2002.International Standards Organization.

ISO, 2009. ISO5983-2. **Animal feeding stuffs — determination of nitrogen content and calculation of crude protein content — part 2: block digestion/steam distillation method.** International Standards Organisation.

Kitts, D.D., N.W. Arosha and H. Chun. 2000. Antioxidant properties of a North American ginseng extract. **Mol. Cell. Biochem.** 203: 1–10.

Kristinsson, H.G. and B.A. Rasco. 2000a. Fish protein hydrolysates: Production, biochemical, and functional properties. **Crit Rev Food Sci.** 40: 43-81.

Laemmli, U. K. 1970. Cleavage of structural proteins during the assembly of the head of bacteriophage T4. **Nature.** 227: 711-716.

Mansfield, S.D., C. Mooney and J.N. Saddler. 1999. Substrate and enzyme characteristics that limit cellulose hydrolysis. **Biotechnol. Prog.** 15: 804–816.

Nesse, K.O., A.P. Nagala, P. Marimuthu and M. Singh. 2011. Efficacy of a fish protein hydrolysate in malnourished children. **Ind. J. Clin. Biochem.** 26: 360-365.

Perez, G. and C. Augusto. 2016. **Developing and characterization of catfish skin hydrolysates including antioxidant and antimicrobial properties.** LSU Master's Thesis. 4529.

Robinson, H.W. and C.G. Hodgen. 1940. The biuret reaction in the determination of serum protein I. A study of the condition necessary for the production of the stable color which bears a quantitative relationship to the protein concentration. **J. Biol. Chem.** 135: 707–725.

Shahidi, F., X.Q. Han and J. Synowiecki. 1995. Production and characteristics of protein hydrolysates from capelin (*Mallotus villosus*). **Food Chem.** 53: 285-293.

Slizyte, R., K. Rommi, R. Mozuraityte, P. Eck and K. Five and T. Rustad. 2016. Bioactive of fish protein hydrolysates from defatted salmon. **Biotechnol. Rep.** 11: 99-109.

Valencia, P., M. Pinto and S. Almonacid. 2014. Identification of the key mechanisms involved in the hydrolysis of fish protein by alcalase. **Proc. Biochem.** 49: 258-264.

Venugopal, V. and F. Shahidi. 1995. Value-added products from underutilized fish species. **Crit. Rev. Food Sci. Nutr.** 35: 431-453.

Waterman, J.J. 2001. **Measures, stowage rate and yield of fishery products.** Advisory Note No. 17, Torry Research station, Aberdeen, Scotland, U.K.

Wisuthiphate, N., S. Klinchan and S. Kongruang. 2016. Fish protein hydrolysate production by acid and enzymatic hydrolysis. **Int. J. Appl. Sci. Technol.** 9: 261-270.

Yu, Y., F. Fan, D. Wu, C. Yu, Z. Wang and M. Du. 2018. Antioxidant and ACE inhibitory activity of enzymatic hydrolysates from *Ruditapes philippinarum*. **Molecules.** 23: 1189-1203.

การผลิตไบโอเอทานอลจากฟางข้าวโดยปรับสภาพด้วยไมโครเวฟร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

Bioethanol Production from Rice Straw by Microwave-Assisted Dilute Sodium Hydroxide Pretreatment

ดวงใจ โอชัยกุล[1*] นภาพักตร์ ด้วงเงิน[1] และ เชิดศักดิ์ มณีรัตนรุ่งโรจน์[1]

Duangjai Ochaikul[1*], Napapak Duangngoen[1] and Cherdsak Maneeruttanarungroj[1]

บทคัดย่อ

ฟางข้าวเป็นชีวมวลประเภทลิกโนเซลลูโลส เมื่อย่อยสลายจะได้น้ำตาลเฮกโซสและน้ำตาลเพนโตส ซึ่งสามารถนำมาผลิตไบโอเอทานอล งานวิจัยนี้ใช้วิธีการปรับสภาพฟางข้าวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับการใช้คลื่นไมโครเวฟ พบว่าการใช้คลื่นไมโครเวฟที่มีกำลังไฟ 240 วัตต์เป็นเวลา 120 วินาทีร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ให้ปริมาณน้ำตาลสูง 23.33 ± 1.80 กรัมต่อลิตร นำส่วนกากของฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพย่อยต่อด้วยเอนไซม์ ACCELLERASE 1500 และหมักด้วยเชื้อยีสต์สองชนิดคือ *Saccharomyces cerevisiae* TISTR 5088 และ *Scheffersomyces stipitis* TISTR 5806 โดยหมักแยกกันในไฮโดรไลเสทของฟางข้าว *S. cerevisiae* TISTR 5088 ผลิตเอทานอลได้ 4.70 ± 0.01 กรัมต่อลิตร ที่ 24 ชั่วโมง และมีค่าอัตราการผลิตเอทานอล 0.36 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง ขณะที่ *S. stipitis* TISTR 5806 ผลิตเอทานอลได้ 4.37 ± 0.17 กรัมต่อลิตร และมีค่าอัตราการผลิตเอทานอล 0.18 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง จากการศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของวิธีการปรับสภาพและนำฟางข้าวไปใช้ผลิตเอทานอลได้

ABSTRACT

Rice straw is one of the abundant lignocellulosic biomass. It can hydrolyze to hexose and pentose sugar. These sugars can produced to bioethanol production. This research has been made to carry out microwave pretreatment with sodium hydroxide solution. The result revealed that the microwave pretreatment at 240 watt for 120 second with 5% (w/v) sodium hydroxide produced high level of reducing sugar (23.33 ± 1.80 gL^{-1}). The pretreated rice straw was further hydrolyzed with ACCELLERASE 1500. Two yeasts consisting of *Saccharomyces cerevisiae* TISTR 5088 and *Scheffersomyces stipitis* TISTR 5806 were separately used as inoculum in fermentation process of rice straw hydrolysate. *S. cerevisiae* TISTR 5088 produced ethanol concentration of 4.70 ± 0.01 gL^{-1} at 24 h with a productivity of 0.36 $gL^{-1}h^{-1}$, whereas *S. stipitis* TISTR 5806 produced ethanol concentration of 4.37 ± 0.17 gL^{-1} with a productivity of 0.18 $gL^{-1}h^{-1}$. Our result demonstrated the potential pretreatment method and application of rice straw for bioethanol production.

Key words: Rice straw, Bioethanol, Microwave pretreatment

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

[1]ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

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

คำนำ

ในปัจจุบันมีความพยายามหาพลังงานทดแทนเพื่อนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนทรัพยากรปิโตรเลียม ซึ่งเอทานอลเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพชนิดหนึ่ง ที่ไม่เพียงแต่จะลดปัญหาของน้ำมันเชื้อเพลิงที่นำเข้าจากต่างประเทศ แต่ยังช่วยลดปัญหามลพิษทางสิ่งแวดล้อมเนื่องจากเอทานอลมีปริมาณออกซิเจนในปริมาณสูง (Huang *et al*., 2008) และเอทานอลเป็นเชื้อเพลิงที่สะอาด เผาไหม้ได้สมบูรณ์ ลดการปลดปล่อยก๊าซต่าง ๆ ที่เป็นสาเหตุของการเกิดภาวะโลกร้อน

พลังงานชีวมวลเป็นหนึ่งในพลังงานทดแทนที่ได้จากอินทรีย์สารของพืชและสัตว์ ซึ่งกระบวนการแปรรูปชีวมวลให้ได้พลังงาน มีหลายรูปแบบ เช่น การเผาไหม้โดยตรง การผลิตแก๊สชีวภาพ การหมัก และการผลิตเชื้อเพลิงเหลว สามารถผลิตเอทานอลได้จากวัตถุดิบประเภทน้ำตาล แป้ง เช่น อ้อย ข้าวโพด มันสำปะหลัง หรือวัตถุดิบอื่น ๆ สำหรับประเทศไทย วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น ฟางข้าว เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ ฟางข้าวเป็นวัตถุดิบเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลสที่สามารถนำมาใช้ในการผลิตเอทานอล โดยฟางข้าวประกอบด้วย เซลลูโลสร้อยละ 32-47 เฮมิเซลลูโลส 19-27 และลิกนินร้อยละ 5-24 ซึ่งเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในฟางข้าวสามารถถูกย่อยเป็นน้ำตาลเฮกโซสและเพนโตส โดยการใช้สารเคมีหรือเอนไซม์ (Maiorella, 1985) เพื่อให้จุลินทรีย์นำไปใช้ในการหมักเป็นเอทานอล การใช้วัตถุดิบจำพวกลิกโนเซลลูโลสจำเป็นต้องมีการปรับสภาพก่อน ซึ่งมีหลายวิธีทั้งวิธีกายภาพ ทางเคมี ทางชีวภาพ และวิธีทางเคมี-ฟิสิกส์ ซึ่งการปรับสภาพด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับสารละลายด่างเจือจาง เป็นหนึ่งในวิธีทางเคมี-ฟิสิกส์ โดยวิธีดังกล่าว เป็นขั้นตอนที่การปรับสภาพและการย่อยเป็นน้ำตาลเกิดขึ้นภายในขั้นตอนเดียวกัน (Marx *et al*., 2014)

Saccharomyces cerevisiae เป็นจุลินทรีย์ที่นิยมใช้ในการหมักเอทานอลเนื่องจากเจริญได้อย่างรวดเร็ว มีความทนต่อเอทานอลที่ความเข้มข้นสูง ให้ผลผลิตเอทานอลสูง แต่ไม่สามารถหมักน้ำตาลเพนโตสได้ (Kumar *et al*., 2009) *Scheffersomyces stipitis* สามารถหมักน้ำตาลเพนโตสและน้ำตาลเฮกโซสให้เป็นเอทานอลได้ แต่ทนต่อปริมาณเอทานอลได้ต่ำ ปริมาณเอทานอลมากกว่า 30-35 กรัมต่อลิตร สามารถยับยั้งปฏิกิริยาการหมักได้ (Laplace *et al*., 1991)

ในงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อนำฟางข้าวซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรใช้ในการหมักเอทานอล ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพฟางข้าวโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ และเปรียบเทียบปริมาณเอทานอลที่ได้จากการหมักไฮโดรไลเสทของฟางข้าวด้วยเชื้อ *Saccharomyces cerevisiae* TISTR 5088 และ *Scheffersomyces stipitis* TISTR 5806

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมวัตถุดิบ

ตัดฟางข้าวให้มีขนาด 2-3 เซนติเมตร อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 1-2 วันจนแห้ง นำไปปั่นให้เป็นผง ประมาณ 2-3 มิลลิเมตร เก็บผงฟางข้าวในถุงพลาสติกที่ปิดสนิท

ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพฟางข้าวโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับการใช้คลื่นไมโครเวฟ

ศึกษากำลังไฟของเครื่องไมโครเวฟ

นำผงฟางข้าว 10 กรัมเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 2.0 (น้ำหนักต่อปริมาตร) ปริมาตร 100 มิลลิลิตร (อัตราส่วนฟางข้าวต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1:10) นำไปให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟกำลังไฟต่าง ๆ ดังนี้ 80 240 และ 400 วัตต์เป็นเวลา 120 วินาที หลังจากนั้นกรองแยกเอากาก ล้างด้วยน้ำกลั่นจนพีเอชของน้ำที่ล้างเป็นกลาง อบกากที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 48 ชั่วโมงจนแห้ง บดให้ละเอียด นำมาย่อยด้วยเอนไซม์ ACCELLERASE 1500 ซึ่งเป็นเอนไซม์เซลลูเลสชนิดหนึ่ง ประกอบด้วยเอนไซม์หลายชนิดทำงานร่วมกัน มีกิจกรรมของเอนไซม์ Endoglucanase 2,200 - 2,800 CMC U/g และกิจกรรมของเอนไซม์ Beta - glucosidase 450 - 775 pNPG U/g โดยใช้ความเข้มข้นของเอนไซม์ 0.5 มิลลิลิตรต่อกรัมฟางข้าว เติมอะซีเตทบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ พีเอช 5.0 ปรับปริมาตรให้ครบ 100 มิลลิลิตร บ่มในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (water bath) ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง เก็บตัวอย่างและปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 4500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที นำส่วนใสที่ได้วิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์โดยวิธี Dinitrosalicylic (DNS) (Miller, 1959)

ศึกษาเวลาในการใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

ทำการทดลองเหมือนข้างต้นโดยใช้คลื่นไมโครเวฟที่มีกำลังไฟที่ทำให้ได้น้ำตาลรีดิวซ์สูง และแปรผันเวลาในการใช้คลื่นไมโครเวฟ ดังนี้ 60 90 120 และ 150 วินาที วิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์

ศึกษาความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

ทำการทดลองเหมือนข้างต้น โดยใช้กำลังไฟของเครื่องไมโครเวฟ เวลาในการใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงศึกษาความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ดังนี้ร้อยละ 1.0 2.0 และ 5.0 (น้ำหนักต่อปริมาตร) วิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์

ศึกษาการหมักเอทานอล

เชื้อจุลินทรีย์

Saccharomyces cerevisiae TISTR 5088 และ *Scheffersomyces stipitis* TISTR 5806 จากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

การเตรียมหัวเชื้อ *S. cerevisiae* TISTR 5088

เลี้ยงเชื้อ *S. cerevisiae* TISTR 5088 บนอาหาร Yeast extract - Peptone - Dextrose, YPD (ยีสต์สกัด 10 กรัมต่อลิตร เปปโตน 20 กรัมต่อลิตร น้ำตาลกลูโคส 20 กรัมต่อลิตร และผงวุ้น 15 กรัมต่อลิตร) บ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ถ่ายลงอาหารเหลว YPD เลี้ยงในสภาวะเขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 660 นาโนเมตร ให้ได้ค่าการดูดกลืนแสงเท่ากับ 0.5 (Yadav *et al*., 2011)

การเตรียม *S. stipitis* TISTR 5806

เลี้ยง *S. stipitis* TISTR 5806 ในอาหารแข็งเอียง Malt extract - Glucose - Yeast extract - Peptone Agar, MGYP (มอลต์สกัด 5 กรัมต่อลิตร ยีสต์สกัด 5 กรัมต่อลิตร เปปโตน 20 กรัมต่อลิตร กลูโคส 5 กรัมต่อลิตร ไซโลส 30 กรัมต่อลิตร และผงวุ้น 15 กรัมต่อลิตร) บ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ถ่ายลงในอาหารเหลว MGYP เลี้ยงในสภาวะเขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 660 นาโนเมตร ให้ได้ค่าดูดกลืนแสงเท่ากับ 0.5 (Yadav *et al*., 2011)

การหมักไฮโดรไลเสทของฟางข้าวด้วยเชื้อ *Saccharomyces cerevisiae* TISTR 5088

นำไฮโดรไลเสทที่ได้จากการย่อยด้วยเอนไซม์ ACCELLERASE 1500 ปรับพีเอชเป็น 5.5 ฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 20 นาที (Pasha *et al*., 2007) เติมหัวเชื้อ *Saccharomyces cerevisiae* TISTR 5088 ร้อยละ 10 (โดยปริมาตร) หมักในสภาวะเขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 ชั่วโมง เก็บตัวอย่างทุก 12 ชั่วโมง (Guragain *et al*., 2011) นำตัวอย่างปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 5000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที วิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์โดยวิธี DNS ปริมาณเอทานอลโดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี และน้ำหนักเซลล์แห้ง

การหมักไฮโดรไลเสทของฟางข้าวด้วยเชื้อ *Scheffersomyces stipitis* TISTR 5806

ทำการหมักและวิเคราะห์ผลเช่นเดียวกับข้างต้นโดยใช้เชื้อ *Scheffersomyces stipitis* TISTR 5806

การวิเคราะห์ทางสถิติ

การวางแผนการทดลองแบบ CRD (Completely Randomized Design) มีจำนวน 3 ซ้ำวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนและเปรียบเทียบความแตกต่างในแต่ละตัวอย่างที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.5$) ด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS ในการวิเคราะห์

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการศึกษากำลังไฟในการใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ปรับสภาพฟางข้าว

รังสีไมโครเวฟมีประสิทธิภาพในการย่อยชีวมวล (Ooshima *et al*., 1984) โมเลกุลที่มีขั้วเช่น น้ำ หรือไอออนชนิดต่าง ๆ จะดูดซับพลังงานของคลื่นไมโครเวฟ และเปลี่ยนเป็นกระแสไฟฟ้าซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เป็นสาเหตุให้โมเลกุลเกิดการเสียดสีและปลดปล่อยความร้อนออกมาทำลายพันธะไฮโดรเจนในโมเลกุลของสาร (Palav and Seetharaman, 2006) ในการศึกษานี้ใช้การปรับสภาพฟางข้าวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ร่วมกับการให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟต่าง ๆ พบว่าเมื่อใช้กำลังไฟที่สูงขึ้นปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยพบว่าการใช้กำลังไฟของเครื่องไมโครเวฟ 400 วัตต์ ให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงสุด 27.41 ± 5.14 กรัมต่อลิตร การใช้กำลังไฟ 240 วัตต์ ให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ 22.56 ± 3.19 กรัมต่อลิตร ซึ่งไม่แตกต่างทางสถิติกับการใช้กำลังไฟ 400 วัตต์ (Figure 1) แต่การใช้กำลังไฟ 400 วัตต์ทำให้ฟางข้าวมีลักษณะไหม้บางส่วน ในการทดลองต่อไปจึงเลือกใช้กำลังไฟ 240

วัตต์ Redding *et al*. (2011) พบว่าการปรับสภาพด้วยไมโครเวฟที่อุณหภูมิสูง (140 - 160 องศาเซลเซียส) และอุณหภูมิต่ำว่า 130 องศาเซลเซียส จะทำให้ได้ปริมาณน้ำตาลต่ำ ดังนั้นการปรับสภาพด้วยไมโครเวฟ อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมที่ทำให้ได้น้ำตาลสูงสุดภายหลังการย่อยด้วยเอนไซม์

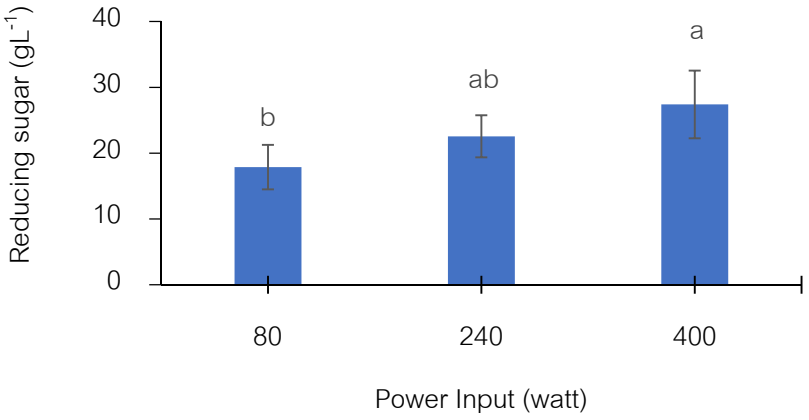


Figure 1 Effect of power input of microwave irradiation-assisted dilute sodium hydroxide treated rice straw on reducing sugar

ผลของเวลาที่ใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ปรับสภาพฟางข้าว

การปรับสภาพฟางข้าวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรร่วมกับการให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟ 240 วัตต์ เป็นเวลาต่าง ๆ พบว่าเมื่อใช้คลื่นไมโครเวฟเป็นเวลา 150 วินาทีให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงสุด 24.54 ± 0.22 กรัมต่อลิตร ซึ่งปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้ไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 กับการใช้คลื่นไมโครเวฟเป็นเวลา 120 วินาที ซึ่งให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ 23.56 ± 1.25 กรัมต่อลิตร (Figure 2)

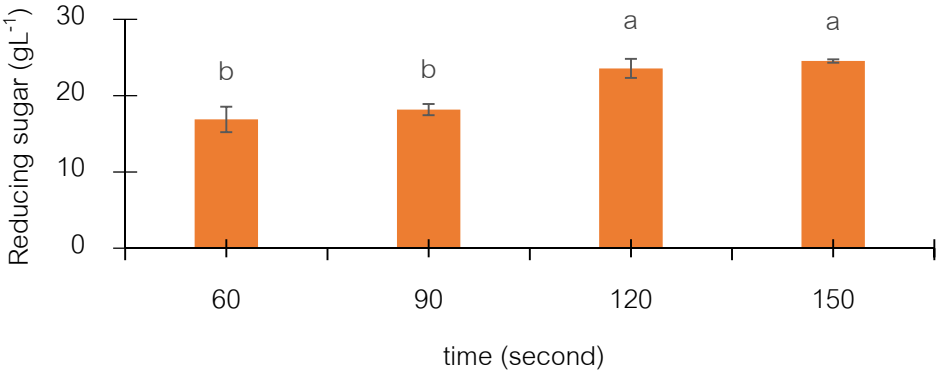


Figure 2 Effect of time of microwave irradiation-assisted diluted sodium hydroxide treated rice straw on reducing sugar

ผลของความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับการใช้คลื่นไมโครเวฟในการปรับสภาพฟางข้าว

การปรับสภาพฟางข้าวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1.0 2.0 และ 5.0 น้ำหนักต่อปริมาตร ร่วมกับการให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟ 240 วัตต์ เป็นเวลา 120 วินาที พบว่าการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 5.0 ให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงสุด 23.33 ± 1.80 กรัมต่อลิตร (Figure 3) Keshwani and Cheng (2009) ศึกษาการย่อย switchgrass และ Bermuda grass โดยปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 3 ร่วมกับไมโครเวฟ พบว่าใน switchgrass และ Bermuda grass มีปริมาณน้ำตาลกลูโคส 2.8 กรัมต่อ Switchgrass 10 กรัม และ 2.5 กรัมต่อ Bermuda grass 10 กรัม ตามลำดับ Zhu *et al.* (2006) รายงานการใช้ไมโครเวฟร่วมกับด่างในการปรับสภาพฟางข้าว จะทำให้อัตราการย่อยสลายเป็นน้ำตาลเพิ่มสูงขึ้น และมีการสูญเสียน้ำตาลลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ด่างอย่างเดียวในการปรับสภาพ

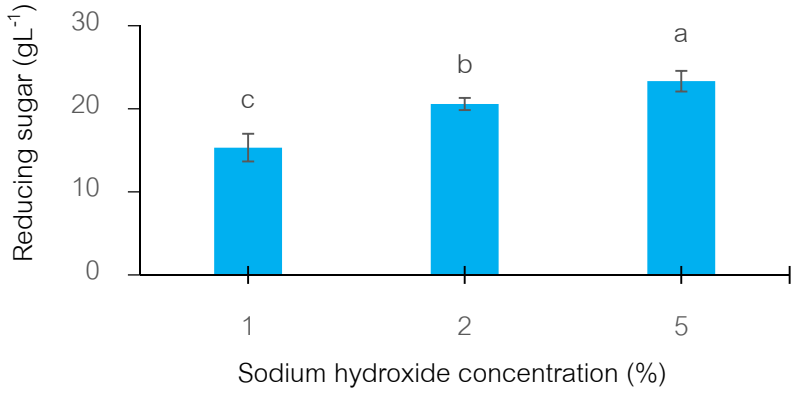


Figure 3 Effect of microwave-assisted with sodium hydroxide at various concentrations for rice straw treating on reducing sugar

ผลการวิเคราะห์ปริมาณลิกโนเซลลูโลส (ลิกนิน เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส)

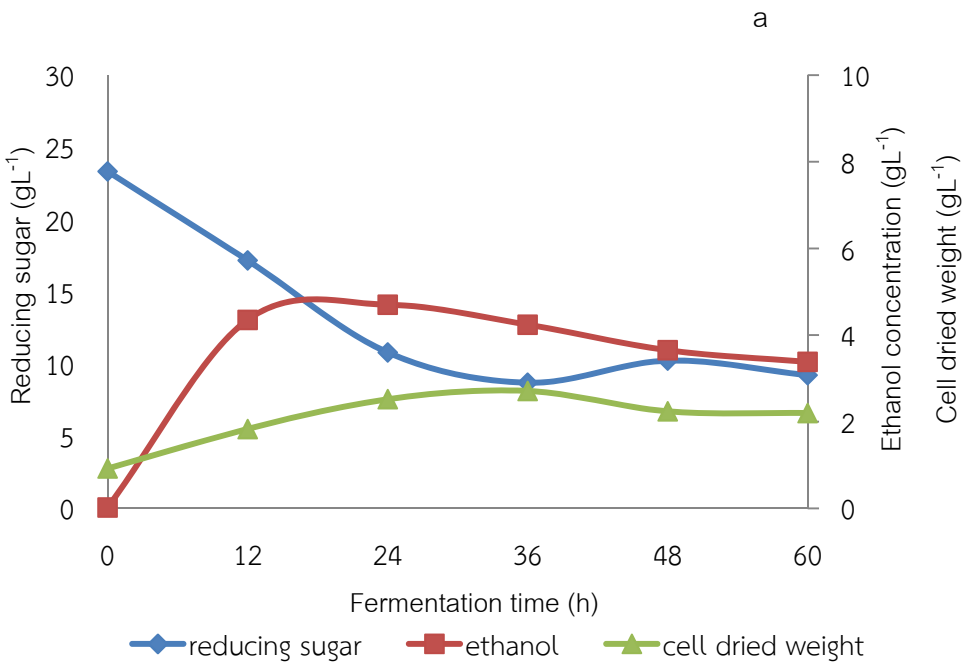
นำฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 5.0 น้ำหนักโดยปริมาตรร่วมกับการใช้คลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟ 240 วัตต์เป็นเวลา 120 วินาที พบว่าฟางข้าวหลังการปรับสภาพมีปริมาณลิกนินลดลง จากร้อยละ 3.59 ± 0.12 เหลือร้อยละ 3.32 ± 0.35 ปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเพิ่มขึ้น (Table 1) ทั้งนี้อาจเนื่องจากการปรับสภาพด้วยคลื่นไมโครเวฟจะมีผลไปทำลายโครงสร้างของลิกนินและเพิ่มพื้นที่ผิวของเซลลูโลส มีผลทำให้ปริมาณลิกนินลดลงและปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเพิ่มขึ้น (Ma *et al.*, 2009)

Table 1 Changes in chemical composition of microwave-assisted dilute sodium hydroxide

Pretreatment	Lignin (%)	Cellulose (%)	Hemicellulose (%)
Untreated	3.59 ± 0.12	43.84 ± 0.52	19.92 ± 0.43
Microwave-assisted diluted sodium hydroxide pretreated rice straw	3.32 ± 0.35	60.66 ± 0.78	20.74 ± 0.79

การศึกษาการหมักเอทานอล

จากการนำไฮโดรไลเสทที่ได้จากการย่อยด้วยเอนไซม์ ACCELLERASE 1500 หมักด้วยเชื้อ *S. cerevisiae* TISTR 5088 หรือ *S. stipitis* TISTR 5806 พบว่าการหมักด้วย *S. cerevisiae* TISTR 5088 หรือ *S. stipitis* TISTR 5806 ปริมาณเอทานอลเพิ่มสูงสุดในชั่วโมงที่ 24 เท่ากับ 4.70 ± 0.01 และ 4.37 ± 0.17 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ หลังจากนั้น ปริมาณเอทานอลจะลดลง (Figure 4) ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับการทดลองของ Kapoor *et al*. (2008) ค่าอัตราการผลิตเอทานอล (Productivity, Qp) ของเชื้อ *S. cerevisiae* TISTR 5088 และ *S. stipitis* TISTR 5806 เท่ากับ 0.36 และ 0.18 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าการหมักเอทานอลจากฟางข้าวโดยใช้เชื้อ *S. cerevisiae* TISTR 5088 จะให้ปริมาณเอทานอลสูงกว่าการใช้เชื้อ *S. stipitis* TISTR 5806



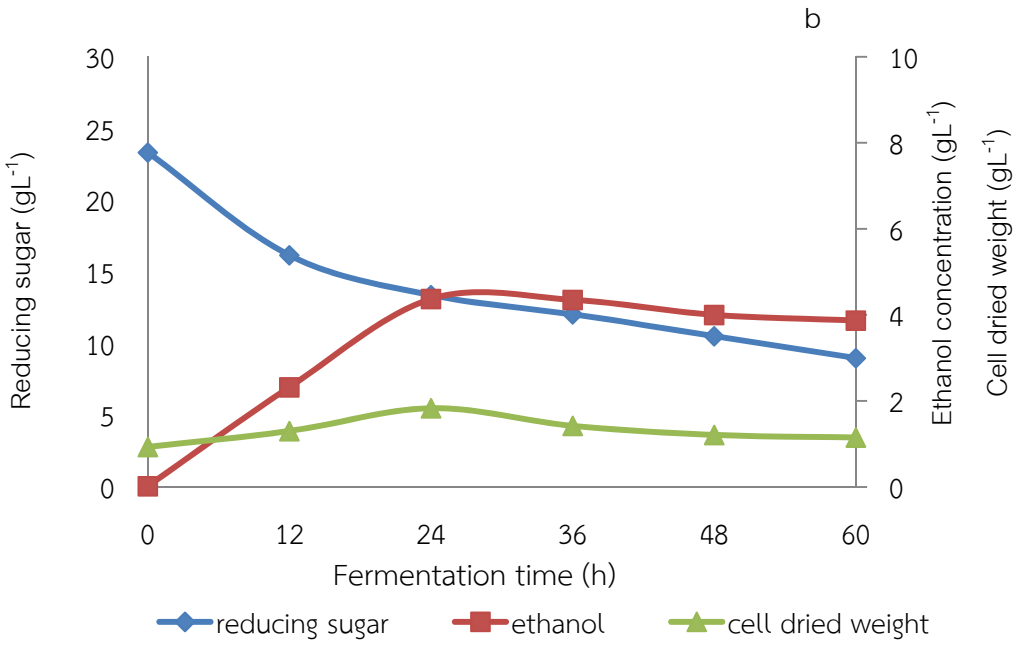


Figure 4 Ethanol, reducing sugar and cell dried weight obtained during fermentation of rice straw hydrolysate by *Saccharomyces cerevisiae* TISTR 5088 (a) and *Scheffersomyces stipitis* TISTR 5806 (b) for 60 h

สรุป

การปรับสภาพฟางข้าวโดยการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับการใช้คลื่นไมโครเวฟ พบว่าการใช้ไมโครเวฟที่มีกำลังไฟ 240 วัตต์ ร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 5 (น้ำหนักโดยปริมาตร) เป็นเวลา 120 วินาที ให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูง 23.33 ± 1.80 กรัมต่อลิตร เมื่อนำไฮโดรไลเสท ที่ได้จากการย่อยด้วยเอนไซม์หมักเอทานอล โดยการใช้เชื้อ *S. cerevisiae* TISTR 5088 หรือ *S. stipitis* TISTR 5806 พบว่าการหมักด้วยเชื้อ *S. cerevisiae* TISTR 5088 และ *S. stipitis* TISTR 5806 ให้ปริมาณเอทานอลสูงเท่ากับ 4.70 ± 0.01 และ 4.37 ± 0.17 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ที่ 24 ชั่วโมงของการหมัก มีอัตราการผลิตเอทานอล 0.36 และ 0.18 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ ดังนั้นการหมักด้วย *S. cerevisiae* TISTR 5088 สามารถผลิตเอทานอลจากฟางข้าวได้สูงกว่า *S. stipitis* TISTR 5806 เล็กน้อย

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ได้สนับสนุนทุนวิจัยในงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

Guragain, Y.N., J.D. Coninck, F. Husson, A. Durand, S.K. Rakshit. 2011. Comparison of some new pretreatment methods for second generation bioethanol production from wheat straw and water hyacinth. **Bioresource Technology** 102: 4416-4424.

Huang, H.J., S. Ramaswamy, U.W. Tschirner, B.V. Ramarao. 2008. A review of separation technologies in current and future biorefineries. **Separation and Purification Technology** 62: 1-21.

Kapoor, M., L.M. Nair, R.C. Kuhad. 2008. Cost - effective xylanase production from free and immobilized *Bacillus pumilus* strain MK 001 and its application in saccharification of *Prosopis juliflora*. **Biochemical Engineering Journal** 38: 88-97.

Keshwani, D.R. and J.J. Cheng. 2009. Microwave - based alkali pretreatment of switchgrass and coastal Burmuda grass for bioethanol production **Biotechnology Progress** 26: 644-652.

Kumar, R., G. Mago, V. Balan, C.E. Wyman. 2009. Physical and chemical characterization of corn stover and poplar solids resulting from leading pretreatment technologies. **Bioresource Technology** 100: 3948-3962.

Laplace, J.M., J.P. Delgened and R. Molleta. 1991. Combined alcoholic fermentation of D-xylose and D-glucose by four delected microbial strains: process considerations in relation to ethanol tolerance. **Biotechnology Letters** 13: 445-450.

Ma, H., W.W. Liu, X. Chen, Y.J. Wu and Z.L. Yu. 2009. Enhanced enzymatic saccharification of rice straw by microwave pretreatment. **Bioresource Technology** 100: 1279-1284.

Maiorella, B.I. 1985. Ethanol. In Young, M. (Ed). Comprehensive Biotechnology. Pergamon Press. Oxford. pp. 861-914.

Marx, S., B. Ndaba, I. Chiyanzu and C. Schabort. 2014. Fuel ethanol production from sweet sorghum bagasse using microwave irradiation. **Biomass and Bioenergy** 65: 145-150.

Miller, G.L. 1959. Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. **Analytical Chemistry** 31: 426–428.

Ooshima, H., K. Aso, Y. Harano and T. Yamamoto. 1984. Microwave treatment of cellulosic materials for their enzymatic-hydrolysis. **Biotechnology Letters** 6: 289–294.

Palav, T. and K. Seetharaman. 2006. Mechanism of starch gelatinization and polymer leaching during microwave heating. **Carbohydrate Polymer** 65(3): 364–370.

Pasha, C., R.C. Kuhad, L.V. Rao. 2007. Strain improvement of thermotolerant *Saccharomyces cerevisiae* VS 3 strain for better utilization of lignocellulosic substrates. **Journal of Applied Microbiology** 103: 1480-1489.

Redding, A.P., Z.Y. Wang, D.R. Keshwani and J.J. Cheng. 2011. High temperature diluted acid pretreatment of coastal Bermuda grass for enzymatic hydrolysis. **Bioresource Technology** 102: 1415-1424.

Yadav, K., S. Naseeruddin, S. Prashanthi, G.S. Prashanthi, L. Sateesh and L.V. Rao. 2011. Bioethanol fermentation of concentrated rice straw hydrolysate using co-culture of *Saccharomyces cerevisiae* and *Pichia stipitis*. **Bioresource Technology** 102: 6473-6478.

Zhu, S., Y. Wu, Z. Yu, Q. Chen, G. Wu, F. Yu, C. Wang and S. Jin. 2006. Microwave - assisted alkali pre - treatment of wheat straw and its enzymatic hydrolysis. **Biosystems Engineering** 94: 437-442.

การยืนยันชนิดแบคทีเรียที่แยกได้จากลำไส้ส่วนต้นของปลานิลด้วยวิธีทางจุลชีววิทยาและชีววิทยาโมเลกุล

Approval of Isolated Bacteria from the Proximal Intestine of Nile Tilapia Using Microbiological and Molecular Analysis

สุชนิทธิ์ งามกาละ[1*] วุฒินันท์ รักษาจิตร์[1] และ คมสัน สัจจะสถาพร[1]

Suchanit Ngamkala[1*], Wuttinun Raksajit[1] and Khomson Satchasataporn[1]

บทคัดย่อ

การเพาะเชื้อแบคทีเรียจากลำไส้ส่วนต้นของปลานิลที่ได้รับแบคทีเรียกรดแลคติกชนิด *Lactobacillus rhamnosus* GG พบว่ามีโคโลนีของแบคทีเรียกรดแลคติกเพิ่มจำนวนขึ้นมากในอาหารเลี้ยงเชื้อจำเพาะ deMan, Rogosa and Sharpe (MRS) เมื่อเทียบกับกลุ่มที่ไม่ได้รับ *L. rhamnosus* GG วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้เพื่อทดสอบชนิดของแบคทีเรียที่แยกได้ว่าเป็น *L. rhamnosus* GG ด้วยวิธีทางจุลชีววิทยาและตรวจยืนยันด้วยวิธีปฏิกิริยาลูกโซ่โพลีเมอเรส ผลการทดสอบทางจุลชีววิทยาพบว่าแบคทีเรียที่แยกได้เป็นแกรมบวก มีรูปร่างเป็นท่อน และสามารถเจริญได้ใน MRS มีลักษณะโคโลนีสีขาวขุ่น ผิวหน้านูน ขอบเรียบ แบคทีเรียที่แยกได้นี้สามารถเจริญที่ pH 4.5, 6 และ 7.5 และที่อุณหภูมิ 15, 37 และ 45 องศาเซลเซียส การทดสอบ Catalase ให้ผลลบ ผลการวิเคราะห์พีซีอาร์ของแบคทีเรียที่แยกได้ พบผลิตภัณฑ์มีขนาด 700 คู่เบส ซึ่งมีลำดับนิวคลีโอไทด์ที่เฉพาะตัวเหมือนกับดีเอ็นเอในจีโนมของ *L. rhamnosus* GG จากผลการศึกษาสามารถยืนยันได้ว่าเชื้อที่แยกได้จากตัวอย่างลำไส้ส่วนต้นของปลานิลเป็นชนิด *L. rhamnosus* GG

ABSTRACT

The bacterial culture from the proximal intestine of Nile tilapia that administrated by lactic acid bacteria, *Lactobacillus rhamnosus* GG revealed the higher number of colony-forming of lactic acid bacteria on selective media, namely deMan, Rogosa and Sharpe (MRS), compared to non-administrated group. The present study aimed to examine the isolated bacteria that were *L. rhamnosus* GG, by using microbiological method and to confirm by PCR method. The microbiological results showed that the isolated bacteria were gram positive with rod-shaped pattern and grew on MRS as opaque-white colony, smooth-convex surface with rounded edges. The isolated bacteria were able to grow at pH 4.5, 6 and 7.5 and at 15, 37 and 45°C. The catalase test was negative. The PCR analysis of isolated bacteria obtained the amplicon of 700 bp, which present a single copy DNA in the genome of *L. rhamnosus* GG genome. Taken together, the isolated samples from the proximal intestine of Nile tilapia were confirmed as *L. rhamnosus* GG.

Key words: *Lactobacillus rhamnosus* GG, microbiological method, PCR

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

[1]ภาควิชาเทคนิคการสัตวแพทย์ คณะเทคนิคการสัตวแพทย์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

คำนำ

ในปัจจุบันการเพาะเลี้ยงปลานิลในประเทศเพื่อการค้ามีอัตราการเพิ่มจำนวนสูงขึ้น ซึ่งการเกิดโรคในปลาถือเป็นสาเหตุสำคัญที่ก่อให้เกิดความสูญเสียทางเศรษฐกิจอย่างมาก โดยเฉพาะโรคที่เกิดจากการติดเชื้อแบคทีเรีย โดยจะทำให้ปลาที่ติดเชื้อแสดงอาการต่างๆ และพบรอยโรคที่แตกต่างกันออกไป เกิดความเครียด ทำให้ปริมาณการผลิตลดน้อยลง (Bricknell and Dalmo, 2005) การให้สารเพื่อกระตุ้นภูมิคุ้มกันทั้งแบบจำเพาะและไม่จำเพาะในปลาถือเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพและให้ผลดีในการป้องกันการติดเชื้อ (Vadstein, 1997; Irianto and Austin, 2002) โปรไบโอติกส์แบคทีเรีย คือ แบคทีเรียที่มีชีวิตซึ่งอาจมีเพียงชนิดเดียวหรือเป็นส่วนผสมของแบคทีเรียหลายๆ ชนิดที่สามารถปรับปรุงสมบัติของแบคทีเรียดั้งเดิมที่อาศัยอยู่ในลำไส้ การใช้โปรไบโอติกส์แบคทีเรียสามารถกระตุ้นการเจริญเติบโต ยับยั้งเชื้อก่อโรค และลดความเครียดของสัตว์น้ำ รวมไปถึงการบำบัดหรือแก้ไขคุณภาพน้ำให้ดีขึ้น ได้แก่ แบคทีเรียกลุ่ม Lactic acid bacteria (LAB) เช่น *Lactoacillus* spp. *Pedioccocus* spp. แบคทีเรียกลุ่ม *Bacillus* spp. เช่น *B. subtilis* และแบคทีเรียกลุ่ม Nitrifying bacteria รวมทั้งยีสต์ (Gatesoupe, 1999) ดังนั้นการใช้โปรไบโอติกส์แบคทีเรียในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะนำมาใช้แทนยาปฏิชีวนะและสารเคมี เพราะมีความปลอดภัยต่อสัตว์ ผู้ผลิตและผู้บริโภคมากกว่า ช่วยลดปัญหาที่เกิดจากการใช้ยาปฏิชีวนะและสารเคมีในการป้องกันโรค และปัญหาการดื้อยาของแบคทีเรียจากการใช้ยามากเกินความจำเป็น นอกจากนี้ยังป้องกันปัญหาการตกค้างของสารเคมีในผลผลิตสัตว์น้ำได้ (Gatesoupe, 1999; GomesGil *et al*., 2000) สำหรับโปรไบโอติกส์แบคทีเรียชนิด *Lactobacillus rhamnosus* GG เป็นโปรไบโอติกส์แบคทีเรียที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายทั้งในทางการศึกษาและทางการค้า ซึ่งสามารถกระตุ้นภูมิคุ้มกันแบบไม่จำเพาะ และช่วยเพิ่มการยึดติดของแบคทีเรียชนิดอื่นๆ ที่มีประโยชน์กับชั้นเยื่อเมือก โดย *L. rhamnosus* GG นี้มีต้นกำเนิดที่แยกได้มาจากลำไส้ของมนุษย์ (Yan and Polk, 2012)

มีการศึกษาถึงการแยกชนิดของเชื้อแบคทีเรียจากลำไส้ปลาและการใช้วิธีการต่างๆ ในการระบุชนิดของเชื้อแบคทีเรีย โดย Kumar และคณะ (2013) ได้ทำการศึกษาถึงการแยกและระบุชนิดของ *Lactobacillus* spp. ที่มีสมบัติเป็นโปรไบโอติกส์จากลำไส้ของปลาน้ำจืด 5 สายพันธุ์ พบ *Lactobacillus* spp. จำนวน 22 Isolates จากการแยกทั้งหมด 120 Isolates แบ่งเป็น *L. plantarum* (19 isolates) และ *L. casei* (3 isolates) โดยทั้งสองสายพันธุ์มีความคล้ายคลึงกัน จากการพิสูจน์เอกลักษณ์โดยศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาและลักษณะการเจริญ พบว่าเป็นแบคทีเรียที่สามารถเจริญได้ดีใน MRS สามารถเจริญได้ในอุณหภูมิ 15 และ 45 องศาเซลเซียส มีลักษณะของโคโลนีเป็นสีขาว ไม่โปร่งแสง ผิวหน้านูน ผิว เรียบ ขอบกลม เมื่อทำการย้อมสีแกรมเชื้อจะติดสีแกรมบวก มีลักษณะเป็นแท่ง เคลื่อนที่ได้ ผลการตรวจสอบสมบัติของเชื้อทางสรีรวิทยาและทางชีวเคมี พบว่าการทดสอบ Catalase ให้ผลลบ การทดสอบ Indole ให้ผลลบ และการทดสอบ Nitrate reduction ให้ผลลบ และสามารถศึกษาลักษณะการหมักย่อยน้ำตาลชนิดต่างๆ ได้ เช่น Glucose, Galactose, Arabinose, Manose, Lactose และ Manitol จะใช้ในการแยกชนิดได้ (Kumar *et al*.,2013) อีกทั้งยังมีการคัดกรอง *Lactobacillus* spp.ที่แยกได้ที่มีสมบัติของโปรไบโอติกส์แบคทีเรียอีกด้วย เช่น การทนต่อ pH ที่เป็นกรดและการทนต่อ Bile salt (Chemlal-Kherraz *et al*., 2012) ซึ่งเป็นประโยชน์ในการนำไปใช้ในการปรับปรุงโปรไบโอติกส์แบคทีเรีย เพื่อลดการสูญเสียในการเพาะเลี้ยงปลาได้ นอกจากนี้จากเดิมที่มีการแยกชนิดของเชื้อแบคทีเรียด้วยการเพาะเลี้ยงด้วยอาหารที่จำเพาะกับเชื้อ ก็มีการศึกษาเพื่อแยกสายพันธุ์ของเชื้อ *L. rhamnosus* GG ด้วยวิธี

ชีววิทยาโมเลกุลต่างๆ เช่น Polymerase chain reaction (PCR), Random amplified polymorphic DNA analysis (RAPD), Pulsed-field gel electrophoresis (PFGE) หรือ Amplified fragment length polymorphism (AFLP) (Brandt and Alatossava, 2003; Ahlroos and Tynkkynen, 2009) ดังนั้นการใช้เทคนิคทางชีววิทยาโมเลกุลจึงเป็นวิธีที่สามารถลดระยะเวลาในการทดสอบได้ มีความถูกต้องและความแม่นยำสูง

จากผลการศึกษาทางจุลพยาธิวิทยาต่อการตอบสนองทางภูมิคุ้มกันแบบไม่จำเพาะชนิดเซลล์เมือกในลำไส้ปลานิล จากผลการชันสูตรซากและการเพาะแยกเชื้อแบคทีเรียจากลำไส้ส่วนต้นบนอาหารเลี้ยงเชื้อชนิด MRS พบแบคทีเรียในกลุ่ม LAB เพิ่มจำนวนขึ้นมากในกลุ่มของปลานิลที่ได้รับโปรไบโอติกส์แบคทีเรีย *L. rhamnosus* GG เมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม (Data not shown) การศึกษาในครั้งนี้จึงเป็นการทดสอบยืนยันชนิดของแบคทีเรียที่สามารถแยกได้ว่าเป็นชนิด *L. rhamnosus* GG จากตัวอย่างลำไส้ส่วนต้นของปลานิลที่ได้รับโปรไบโอติกส์แบคทีเรีย *L. rhamnosus* GG ด้วยวิธีทางจุลชีววิทยา (ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา ลักษณะการเจริญ สรีรวิทยาและทางชีวเคมี) และตรวจยืนยันปฏิกิริยาลูกโซ่โพลีเมอเรส

อุปกรณ์และวิธีการ

การเก็บตัวอย่าง

นำปลานิลกลุ่มที่ได้รับอาหารผสมโปรไบโอติกส์ *L. rhamnosus* GG (10^9 CFU ต่ออาหาร 1 กรัม) เป็นเวลา 1 เดือน มาทำการุณยฆาตด้วยวิธีการน็อคน้ำแข็ง (Ice shock) ทำการชันสูตรซากและเก็บตัวอย่างลำไส้ส่วนต้นของปลา เพื่อยืนยันการตรวจพบเชื้อ *L. rhamnosus* GG ในลำไส้ โดยนำไปศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา ลักษณะการเจริญ สรีรวิทยาและทางชีวเคมี ร่วมกับวิธีทางชีววิทยาโมเลกุลต่อไป

การพิสูจน์เอกลักษณ์ของเชื้อแบคทีเรียที่แยกได้จากลำไส้ส่วนต้นของปลานิลด้วยวิธีทางจุลชีววิทยา

นำเชื้อแบคทีเรียที่แยกได้จากการเก็บตัวอย่างลำไส้ส่วนต้นของปลานิล มาเลี้ยงในอาหาร MRS broth โดยบ่มที่อุณหภูมิ 37°C นาน 48 - 72 ชั่วโมง จากนั้นทำการแยกเชื้อแบคทีเรียให้บริสุทธิ์ (Isolated bacteria) ด้วยวิธี Streak plate method ลงบนอาหาร MRS-vancomycin agar plates (1.5% agar) บ่มที่อุณหภูมิ 37°C นาน 48-72 ชั่วโมง ในสภาวะปลอดออกซิเจน (Anaerobic condition) (Ahlroos and Tynkkynen, 2009) นำโคโลนีเดี่ยวที่ได้มาทำการพิสูจน์เอกลักษณ์ของเชื้อ โดยดูจากลักษณะทางสัณฐานวิทยา ลักษณะการเจริญ สรีรวิทยาและทางชีวเคมี (ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2554) โดยศึกษาเปรียบเทียบกับเชื้อ *L. rhamnosus* GG มาตรฐาน (ATCC 53103)

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเชื้อที่แยกได้จากลำไส้ส่วนต้นปลานิล

เตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดแข็ง MRS (1.5% agar) นึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121°C นาน 15 นาที จากนั้นเทอาหารเลี้ยงเชื้อลงบนจานเลี้ยงเชื้อโดยทำในตู้ปลอดเชื้อ รอจนวุ้นแข็งตัว จากนั้นขีดเชื้อจากแบคทีเรียที่เตรียมไว้ข้างต้นลงบนอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดแข็ง MRS บ่มที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง อ่านผลและจดบันทึกผลการทดลองโดยสังเกตลักษณะโคโลนีที่เกิดขึ้นในจานเลี้ยงเชื้อ

ลักษณะการติดสีแกรมของเชื้อที่แยกได้จากลำไส้ส่วนต้นปลานิล

นำเชื้อแบคทีเรียมาเกลี่ยลงบนสไลด์และทำการตรึงรอยสเมียร์ (Fixing) โดยการผ่านเปลวไฟ 2 – 3 ครั้ง ทิ้งให้เย็น จากนั้นย้อมด้วย Crystal violet นาน 1 นาที แล้วย้อมทับด้วยสารละลาย Iodine นาน 1 นาที เมื่อครบตามเวลาแล้วทำการล้างสีออกด้วย 95% alcohol จนไม่มีสีของ Crystal violet ออกมา (ไม่เกิน 20 วินาที) ล้าง

ด้วยน้ำกลั่นแล้วย้อมทับด้วย Safranin O นาน 1 นาที ล้างด้วยน้ำกลั่นอีกครั้ง รอจนสไลด์ให้แห้ง นำมาตรวจดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ โดยสังเกตและจดบันทึกรูปร่างและการติดสีของแบคทีเรีย

ลักษณะการเจริญของเชื้อที่แยกได้จากลำไส้ส่วนต้นปลานิลที่ pH 2, 4.5, 6, 7.5 (pH tolerance test)

ทำการปรับ pH ของอาหารเลี้ยงเชื้อชนิด MRS broth ด้วย Conc. HCl และ NaOH จากนั้นทำการแบ่ง MRS broth ในแต่ละ pH ใส่ลงในขวดรูปชมพู่จำนวน 12 ขวด ขวดละ 20 มิลลิลิตร (ทำการทดสอบเชื้อละ 3 ซ้ำ) ทำการทดสอบการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียที่แยกได้ โดยบ่มที่อุณหภูมิ 37°C นาน 5-7 วัน สังเกตการเจริญของเชื้อโดยดูจากความขุ่นของอาหารเลี้ยงเชื้อและตะกอนแบคทีเรียที่พบ

ลักษณะการเจริญของเชื้อที่แยกได้จากลำไส้ส่วนต้นปลานิลที่อุณหภูมิ 15°C และ 45°C (Temperature tolerance test)

เตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อ MRS broth ใส่ขวดรูปชมพู่จำนวน 12 ขวด ขวดละ 50 มิลลิลิตร ทำการเขี่ยเชื้อแบคทีเรียที่แยกได้ลงในอาหารเลี้ยงเชื้อ นำไปบ่มพร้อมเขย่าที่อุณหภูมิ 15°C และ 45°C นาน 48 - 72 ชั่วโมง ด้วยเครื่อง Incubator shaker (ทำการทดสอบเชื้อละ 3 ซ้ำ) จากนั้นทำการจดบันทึกผลการทดลองโดยดูจากความขุ่นของอาหารเลี้ยงเชื้อและตะกอนแบคทีเรียที่พบ

การทดสอบ Catalase ของเชื้อที่แยกได้จากลำไส้ส่วนต้นปลานิล

ทำการหยด 3% H_2O_2 จำนวน 1 หยด ลงบนแผ่นสไลด์ที่สะอาด จากนั้นใช้ไม้จิ้มฟันที่ผ่านการฆ่าเชื้อเขี่ยเชื้อลงไปผสมกับ 3% H_2O_2 บนแผ่นสไลด์ ผลบวกจะเกิดปฏิกิริยาโดยเห็นเป็นฟองฟู่เกิดขึ้น

การสกัดดีเอ็นเอจากเชื้อแบคทีเรียที่แยกได้จากลำไส้ส่วนต้นปลานิล

นำเชื้อแบคทีเรียที่อยู่ในช่วง Log phase ปริมาตร 1.5 มิลลิลิตร มาปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 12,000 rpm เป็นเวลา 1 นาที ล้างและละลายตะกอนเซลล์ด้วย TE buffer pH 8.0 ปริมาตร 1 มิลลิลิตร จากนั้นเติม 10% Sodium dodecyl sulfate ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร บ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 5 นาที เติมสารละลาย Phenol: Chloroform: Isoamyl alcohol (25: 24: 1) จำนวน 1 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันและนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 12,000 rpm เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นนำส่วนใสด้านบนมาตกตะกอนดีเอ็นเอ โดยนำส่วนใสมาเติม 100% Isopropanol ปริมาตร 2 มิลลิลิตร บ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 20 นาที และนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 12,000 rpm เป็นเวลา 10 นาที ทิ้งสารละลายส่วนใส จากนั้นละลายตะกอนดีเอ็นเอด้วย 70% Ethanol ปริมาตร 1 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 12,000 rpm เป็นเวลา 2 นาที เก็บตะกอนดีเอ็นเอแล้วละลายด้วย Sterile MQ water ปริมาตร 20 ไมโครลิตร เก็บที่ -20°C

ปฏิกิริยาลูกโซ่โพลีเมอเรส (Polymerase chain reaction, PCR)

นำดีเอ็นเอที่สกัดได้มาทำปฏิกิริยาลูกโซ่โพลีเมอเรส ใช้ไพรเมอร์ F-LGG และ R-LGG primer ที่มีความจำเพาะกับ *L. rhamnosus* GG สายพันธุ์เดียว ซึ่งอ้างอิงจากการศึกษาของ Ahlroos and Tynkkynen (2009) และได้ตรวจสอบคุณสมบัติของไพรเมอร์ดังกล่าวด้วยโปรแกรม Primer3 (http://bioinfo.ut.ee/primer3-0.4.0/) จากนั้นนำไพรเมอร์มาใช้ตรวจสอบยืนยันด้วยวิธีปฏิกิริยาลูกโซ่โพลีเมอเรส ส่วนผสมของพีซีอาร์ (PCR) ปริมาตร 20 ไมโครลิตร ประกอบด้วย 10xPCR buffer 2 ไมโครลิตร 50 mM $MgCl_2$ 0.8 ไมโครลิตร 2.5 mM dNTP 1.6 ไมโครลิตร F-LGG primer (5'-CGC CCT TAA CAG CAG TCT TCA AAT-3') 0.4 ไมโครลิตร R-LGG primer (5'-ACG CGC CCT CCG TAT GCT TAA ACC-3') 0.4 ไมโครลิตร DNA polymerase (5 unit/µl) 0.5 ไมโครลิตร Sterile water 13.3 ไมโครลิตร และดีเอ็นเอ 1 ไมโครลิตร นำส่วนผสมตัวอย่างเข้าเครื่อง Thermal

cycler (GeneAmp® PCR system 9700) โดยมีขั้นตอนในการทำ พีซีอาร์ดังนี้ (1) Pre-denaturation ที่อุณหภูมิ 94°C เป็นเวลา 5 นาที (2) Denaturation ที่อุณหภูมิ 94°C เป็นเวลา 50 วินาที (3) Annealing ที่อุณหภูมิ 56°C เป็นเวลา 50 วินาที (4) Extension ที่อุณหภูมิ 72°C เป็นเวลา 50 วินาที โดย (2)-(4) ทำซ้ำจำนวน 35 รอบ และ (5) Final extension ที่อุณหภูมิ 72°C เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นนำผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาพีซีอาร์ไปแยกแถบดีเอ็นเอด้วยวิธีอิเล็กโตรโฟรีซิส (Electrophoresis) ในเจลอะกาโรส (Agarose gel) ที่มีความเข้มข้น 0.8% ใน 1xTAE buffer โดยให้กระแสไฟฟ้า 100 โวลต์ เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำเจลไปย้อมด้วยเอธิเดียมโบรไมด์ (Ethidium bromide) 3-5 นาที แล้วล้างออกด้วยน้ำและนำไปตรวจสอบแถบดีเอ็นเอที่เกิดขึ้นได้ด้วยเครื่อง UV Transilluminator จึงทำให้เห็นแถบดีเอ็นเอขึ้นบนเจลอะกาโรส ซึ่งมีขนาดประมาณ 700 คู่เบส เสร็จแล้วนำผลผลิตที่ได้ส่งไปตรวจสอบลำดับนิวคลีโอไทด์ที่บริษัท WardMedic (http://www.wardmedic.com/) หลังจากนั้นนำลำดับนิวคลีโอไทด์ที่ส่งตรวจดังกล่าวมาวิเคราะห์ลำดับนิวคลีโอไทด์เปรียบเทียบกับจีโนมของ *L. rhamnosus* GG ด้วยโปรแกรม BLASTN ในฐานข้อมูล GenBank ของ NCBI

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ของเชื้อแบคทีเรียที่แยกได้จากลำไส้ส่วนต้นของปลานิลด้วยวิธีทางจุลชีววิทยา

จากการพิสูจน์เอกลักษณ์โดยการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาบนอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดแข็ง MRS ของเชื้อแบคทีเรียที่แยกได้จากลำไส้ส่วนต้นของปลานิล พบว่ามีลักษณะของโคโลนีเป็นสีขาวขุ่น ผิวหน้านูน ขอบเรียบ พบลักษณะเซลล์ติดสีน้ำเงินอมม่วง (แกรมบวก) มีลักษณะเป็นท่อน เซลล์เรียงตัวกันเป็นสายยาว ซึ่งลักษณะที่พบดังกล่าวนี้มีความสอดคล้องกับลักษณะของเชื้อ *L. rhamnosus* GG ที่จัดอยู่ในกลุ่ม Lactic acid bacteria (LAB) (Sanders, 1999) และจากการศึกษาของ Raja และคณะ (2009) พบว่าเมื่อเพาะเลี้ยง *L. rhamnosus* GG ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนเชื้อจะมีความยาว 10 ไมโครเมตรขึ้นไป แต่เมื่อทำการเพาะเลี้ยงในสภาวะปกติที่มีออกซิเจนพบว่าเซลล์จะมีขนาดสั้นลงเหลือเพียง 7-8 ไมโครเมตร ส่วนผลการศึกษาลักษณะการเจริญ สรีรวิทยาและทางชีวเคมีของเชื้อที่แยกได้ สามารถสรุปได้ดังตาราง (Table 1) โดยการพิสูจน์เอกลักษณ์ของเชื้อที่แยกได้โดยดูจากลักษณะสรีรวิทยาและลักษณะทางชีวเคมีที่สามารถทำได้ง่ายและใช้เวลาทดสอบไม่นานนักสามารถดูจากการทดสอบ Catalase ซึ่งให้ผลลบ ส่วนการศึกษา pH tolerance test และ Temperature tolerance test พบว่า pH ที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตของเชื่อที่แยกได้อยู่ที่ pH 4.5 6.0 และ 7.5 และเจริญได้ที่อุณหภูมิ 15°C และ 45°C ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Raja และคณะ (2009) ที่แสดงว่า *L. rhamnosus* GG สามารถเจริญเติบโตได้ดีที่อุณหภูมิ 35°C ที่ pH ช่วง 3-7 โดยที่ pH 6.5 การเจริญของ *L. rhamnosus* GG จะลดลง ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้ทั้งหมดนั้นมีความสอดคล้องกับเชื้อ *L. rhamnosus* GG มาตรฐาน นอกจากนี้การเตรียมเชื้อแบคทีเรียที่แยกได้จากลำไส้ส่วนต้นของปลานิลในช่วงแรกนั้น ทำโดยการแยกเชื้อ *Lactobacillus* spp. ใน MRS-vancomycin agar plates บ่มที่อุณหภูมิ 37°C นาน 48-72 ชั่วโมง ในสภาวะปลอดออกซิเจน (Anaerobic condition) นั้น ในสภาวะดังกล่าวจะยับยั้งการเจริญของเชื้อ LAB สายพันธุ์อื่นๆ เช่น *Enterococcus* spp., *Streptococcus* spp.และ *Bifidobacterium* spp. ในทางเดินอาหารได้ (Ahlroos and Tynkkynen, 2009)

Table 1 Physiological characteristics of isolated bacteria

Physiological characteristics	*L. rhamnosus* GG (Positive control)	Isolated bacteria
pH tolerance test		
pH 2,0	-	-
pH 4.5	+	+
pH 6,0	+	+
pH 7.5	+	+
Temperature tolerance test		
At 15°C	+	+
At 45°C	+	+
Catalase test	-	-

+ = Positive result

- = Negative result

การพิสูจน์เอกลักษณ์ของเชื้อแบคทีเรียที่แยกได้จากลำไส้ส่วนต้นด้วย PCR

ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วย PCR พบว่าผลิตภัณฑ์ PCR ของดีเอ็นเอที่สกัดได้จากตัวอย่างเชื้อแบคทีเรียที่แยกได้จากลำไส้ส่วนต้น มีขนาดประมาณ 700 คู่เบส ซึ่งตรงกับ *L. rhamnosus* GG มาตรฐาน (Figure 1) และเมื่อวิเคราะห์ลำดับนิวคลีโอไทด์ ด้วยโปรแกรม BLASTN พบว่าลำดับนิวคลีโอไทด์มีความเฉพาะตัว (Unique) เหมือนกับดีเอ็นเอ (Single copy) ในจีโนมของ *L. rhamnosus* GG ซึ่งสอดคล้องกับรายงานการศึกษาของ Ahlroos and Tynkkynen (2009) ซึ่งพิสูจน์และยืนยันเชื้อ *L. rhamnosus* GG ออกจากสายพันธุ์อื่น เช่น *L. zeae* ATCC 393, *L. casei* ATCC 334, *L. rhamnosus* ATCC 7469, *L. rhamnosus* 1/6 และ *L. rhamnosus* LC705 ด้วย RAPD-PCR โดยที่ไพรเมอร์ที่จำเพาะดังกล่าว อีกทั้งไพรเมอร์ไม่มีความจำเพาะกับจีโนมของแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบสายพันธุ์อื่น เช่น เชื้อ *Escherichia coli* และ *Staphylococcus aureus* แต่อย่างไรก็ตามการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อยืนยันการพบเชื้อ *L. rhamnosus* GG เท่านั้น จึงไม่ได้ทำการแยกชนิดสายพันธุ์อื่นๆ ของ *Lactobacillus* spp. จากตัวอย่างลำไส้ส่วนต้น

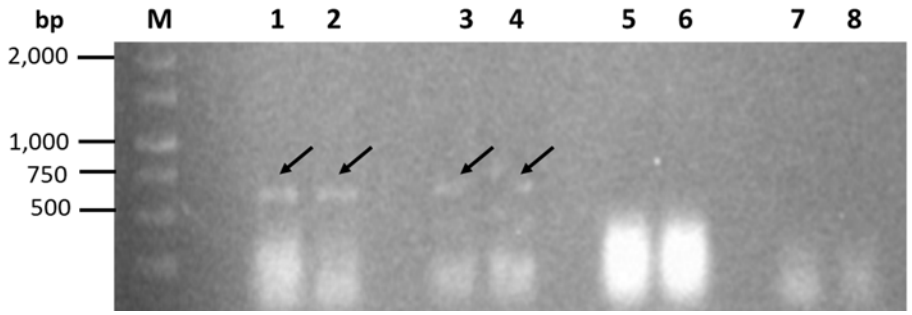


Figure 1 Amplified PCR products (10 μl of each sample) using specific primer (indicated by arrow). Lane M: GeneRuler 1kb DNA Ladder, Lane 1-2: amplicons using DNA template from *Lactobacillus rhamnosus* GG (positive control, 700 bp), Lane 3-4: amplicons using DNA template from isolated bacteria from proximal intestine sample (700 bp), Lane 5-6: no amplicons using DNA template from *Escherichia coli,* and Lane 7-8: no amplicons using DNA template from *Staphylococcus aureus.* PCR products were run on 0.8% agarose gel in 1XTAE buffer.

สรุป

การให้โปรไบโอติกส์แบคทีเรียชนิด *Lactobacillus rhamnosus* GG เสริมในอาหารแก่ปลานิล จะมีส่วนช่วยให้จำนวนแบคทีเรียกรดแลคติกเพิ่มจำนวนขึ้นมาก ซึ่งการใช้วิธีทางจุลชีววิทยาสามารถพิสูจน์เอกลักษณ์ของเชื้อกลุ่ม *Lactobacillus* spp. ออกจากแบคทีเรียกลุ่มอื่นๆ ที่แยกได้จากลำไส้ส่วนต้นของปลานิล และการใช้วิธี PCR ที่มีไพรเมอร์จำเพาะต่อเชื้อ *L. rhamnosus* GG จะช่วยในการยืนยันชนิดของแบคทีเรียในกลุ่มเดียวกันได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะเทคนิคการสัตวแพทย์และสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (รหัสโครงการวิจัย อ -ช 1.55) ที่สนับสนุนทุนและเอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ต่างๆ ในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2554. **จุลชีววิทยาปฏิบัติการ**. พิมพ์ครั้งที่ 6 บริษัทเจ้าพระยาระบบการพิมพ์ จำกัด, กรุงเทพฯ.

Ahlroos, T. and S. Tynkkynen, 2009. Quantitative strain-specific detection of *Lactobacillus rhamnosus* GG in human faecal samples by real-time PCR. **Journal of Applied Microbiology**. 106: 506514.

Brandt, K. and T. Alatossava. 2003. Specific identification of certain probiotic *Lactobacillus rhamnosus* strains with PCR primers based on phage-related sequences. **International Journal of Food Microbiology**. 84: 189-196.

Bricknell, I. and R.A. Dalmo. 2005. The use of immunostimulants in fish larval aquaculture. **Fish and Shellfish Immunology**. 19: 457-472.

Chemlal-Kherraz, D., F. Sahnouni, A, Matallah-Boutiba. and Z. Boutiba. 2012. The probiotic potential of lactobacilli isolated from Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*)'s intestine. **African Journal of Biotechnology**. 11(68): 13220-13227.

Gatesoupe, F.J. 1999. The use of probiotics in aquaculture. **Aquaculture**. 180: 147-165.

GomesGil, B., A. Roque. and J.F. Turnbull. 2000. The use and selection of probiotic bacteria for use in the culture of larval aquatic organisms. **Aquaculture**. 191: 259-270.

Irianto, A. and B. Austin. 2002. Use of probiotics to control furunculosis in rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* (Wallbaum). **Journal of Fish Diseases**. 25: 1-10.

Kumar, Y., B. Chisti., A.K. Singh., H. Masih. and S.K. Mishra. 2013. Isolation and characterization of Lactobacillus species from fish intestine for probiotic properties. **International Journal of Pharma and Bio Sciences**. 4(1): 11-21.

Raja, M.M.M., A. Raja. and M.M. Imran. 2009. Lactobacillus as a probiotic feed for chickens. **International Journal of Poultry Science**. 8: 763-767.

Sanders, M.E. 1999. Probiotics. **Food Technology**. 53: 67-77.

Vadstein, O. 1997. The use of immunostimulation in marine larviculture: possibilities and challenges. **Aquaculture**. 155: 401-417.

Yan, F. and D.B.Polk. 2012. Lactobacillus rhamnosus GG: An updated strategy to use microbial products to promote health. **Functional food reviews**. 4(2): 77–84.

การดูดซับทางชีวภาพของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมด้วยไซยาโนแบคทีเรีย สไปรูลิน่า พลาเทนซิส

Biosorption of Chromium (VI) by Cyanobacteria *Spirulina platensis*

วุฒินันท์ รักษาจิตร์[1*] สุชนิทธิ์ งามกาละ[1] ชัยณรงค์ สกุลแถว[1] คมสัน สัจจะสถาพร[1]
ฉันท์ชนก ดวงศรี[1] ธนู แซ่ว่าง[1] และ วนิดา ปานอุทัย[2]

Wuttinun Raksajit[1*], Suchanit Ngamgala[1], Chainarong Sakulthaew[1], Khomson Satchasataporn[1],
Chanchanok Duangsri[1], Thanoo Saewang[1] and Wanida Pan-utai[2]

บทคัดย่อ

งานวิจัยครั้งนี้ เป็นการศึกษาผลของปัจจัยภายนอกต่อการดูดซับทางชีวภาพของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมด้วยไซยาโนแบคทีเรีย สไปรูลิน่า พลาเทนซิส ออกจากสารละลายโดยใช้การวิเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชัน สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ผลการทดลองพบว่า สไปรูลิน่า พลาเทนซิสสามารถดูดซับเฮกซะวาเลนต์โครเมียมในสารละลายได้ สภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับโครเมียมคือที่พีเอชเท่ากับ 5.0 ภายใต้ระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 120 นาที ปริมาณชีวมวลแห้งเท่ากับ 0.3 กรัมต่อเดซิลิตร ความสามารถสูงสุดของสไปรูลิน่า พลาเทนซิสในการดูดซับเฮกซะวาเลนต์โครเมียม เท่ากับ 26.32 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยการดูดซับเฮกซะวาเลนต์โครเมียมมีความสอดคล้องกับสมการของแลงค์มียร์ มากกว่าสมการของฟรุนดิช ผลการศึกษานี้บ่งชี้ว่า สไปรูลิน่า พลาเทนซิส มีคุณสมบัติเป็นตัวดูดซับโลหะที่นำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีโครเมียมปนเปื้อนได้

ABSTRACT

External factors affecting the biosorption of Cr(VI) from aqueous solution by cyanobacteria *Spirulina platensis* was investigated by using atomic absorption spectrometer. The results found that dried *S. platensis* can absorb chromium (VI) in aqueous solution. The optimal Cr(VI) biosorption by *S. platensis* was achieved at pH 5.0 during a 120 min contact time with 0.3 g/dL of biomass. The maximum biosorption capacity obtained was 26.32 mg/g.The Langmuir adsorption equation better described the adsorption of Cr(VI) ion onto the biomass than did the Freundlich adsorption equation. Overall results indicated that *S. platensis* is a promising metal biosorbent for the treatment of waste water containing chromium.

Keywords: Biosorption, chromium (VI), *Spirulina platensis*, Cyanobacteria

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

[1]ภาควิชาเทคนิคการสัตวแพทย์ คณะเทคนิคการสัตวแพทย์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

[2]ฝ่ายจุลชีววิทยาประยุกต์ สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[2]Section of Applied Microbiology, Institute of Food Research and Product Development (IFRPD), Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

ปัจจุบันการปนเปื้อนโลหะหนักในแหล่งน้ำเป็นปัญหาที่สำคัญมาก เนื่องจากแหล่งน้ำเป็นที่อยู่อาศัยของสัตว์น้ำ พืชน้ำ และใช้ในการอุปโภคบริโภคของมนุษย์ โลหะหนักความถ่วงจำเพาะมากกว่าน้ำ 5 เท่า จึงสามารถสะสมอยู่ในสิ่งแวดล้อมได้นาน สิ่งมีชีวิตที่อาศัยในแหล่งน้ำที่ปนเปื้อนโลหะหนัก จะพบการสะสมโลหะหนักในเนื้อเยื่อซึ่งอาจเกิดจากการกินตามห่วงโซ่อาหาร โลหะหนักเหล่านี้จะสะสมอยู่ในสิ่งมีชีวิตจนถึงระดับหนึ่งและแสดงอาการทางพยาธิภาพออกมา โครเมียม (Chromium) เป็นโลหะหนักชนิดหนึ่งที่ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การชุบโลหะ การผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ การผลิตเม็ดสี การชุบเครื่องประดับ การย้อมผ้า การฟอกหนังสัตว์ และมีรายงานพบโครเมียมในแหล่งน้ำที่มีการปนเปื้อนของถ่านลิกไนซ์ (Darakas *et al*., 2013) การได้รับโครเมียมในปริมาณมากนั้น จะเป็นพิษต่อสุขภาพร่างกายของมนุษย์ (Zhitkovich, 2011) เนื่องจากโครเมียมเป็นสารก่อกลายพันธุ์ โครเมียมละลายน้ำได้ง่ายและซึมผ่านเนื้อเยื่อต่างๆได้ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่ง โครเมียมในรูปเฮกซะวาเลนต์ (Cr(VI)) สามารถดูดซึมเข้าสู่ร่างกายได้ดีกว่าโครเมียมไตรวาเลนต์ (Cr(III)) ทั้งยังส่งผลกระทบต่อระบบหัวใจและตับ (Saha et al., 2011) จากการศึกษาพบว่าการได้รับโครเมียมในปริมาณน้อยอย่างต่อเนื่องจะเหนี่ยวนำให้เกิด DNA damage และรบกวนกระบวนการ transcription ของเซลล์ (Ovesen *et al*., 2014)

การกำจัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย สามารถทำได้หลายวิธี ทั้งการบำบัดด้วยวิธีทางเคมีและวิธีทางกายภาพ เช่น วิธีออสโมซิสย้อนกลับ (reverse osmosis) การแยกกรองด้วยไฟฟ้า (electrodialysis) การกรอง (filtration) การแลกเปลี่ยนประจุ (ion-exchange) และการตกตะกอนด้วยวิธีทางเคมี (chemical precipitation) เป็นต้น ซึ่งในปัจจุบันมีการศึกษาการกำจัด Cr(VI) ในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยอาศัยหลักความสามารถในการละลาย โดย Cr(VI) จะถูกรีดิวซ์ไปเป็น Cr(III) (Glorias-Garcia *et al*., 2014) การกำจัด Cr(VI) โดยใช้ nano-filtration (Barikbin *et al*., 2015) การกำจัด Cr(VI) โดยใช้ polyaniline/polyvinyl alcohol ซึ่งจะถูกใช้เป็นตัวดูดซับไอออนของ Cr(VI) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Karthik and Meenakshi, 2014) อย่างไรก็ตามวิธีการทางเคมีและวิธีทางกายภาพมีข้อเสียคือ ไม่สามารถกำจัดโลหะหนักออกได้อย่างสมบูรณ์ ต้องใช้ตัวทำปฏิกิริยาและพลังงานมาก จึงได้มีการใช้การบำบัดด้วยวิธีทางชีวภาพเป็นทางเลือก การบำบัดด้วยวิธีการทางชีวภาพ โดยใช้มวลชีวภาพธรรมชาติในการดูดซับเรียกว่า การดูดซับทางชีวภาพ (biosorption) เป็นวิธีทางชีวเคมีและฟิสิกส์ที่เกิดขึ้นระหว่างประจุของโลหะหนักกับเซลล์จุลินทรีย์ โลหะหนักที่ถูกดูดซับและสารดูดซับชีวภาพสามารถนำกลับไปใช้ในระบบได้ ปัจจุบันได้มีการศึกษาการดูดซับโลหะหนักด้วยวิธีทางชีวภาพหลายวิธี เช่น การศึกษาการดูดซับสังกะสี (Zn) โดย *Pseudomonas aeruginosa* ที่ยังมีชีวิต พบว่าสามารถดูดซับ Zn ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Ahmady-Asbchin *et al*., 2015) การดูดซับยูเรเนียม (U) โดยใช้ immobilized *Rhodotorola glutinis* พบว่า *R. glutinis* สามารถดูดซับ U จากน้ำเสียได้ (Bai *et al*., 2014) สาหร่ายสีน้ำตาล *Sargassum bevanom* ดูดซับ Cr(VI) ที่ปนเปื้อนในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมได้ดี (Javadian *et al*., 2013) *Anabaena sphaerica* สามารถเป็นตัวดูดซับแคดเมียม (Cd) และตะกั่ว (Pb) ได้ดีเยี่ยม (Abdel-Aty *et al*., 2013)

ไซยาโนแบคทีเรีย (Cyanobacteria) จะผลิต extracellular polysaccharides (EPSs) และสารประกอบต่างๆบนผิวเซลล์ ได้แก่ โปรตีน พอลีแซคคาไรด์ กรดไพรูวิก (pyruvic acid) สารฮิวมิก (humic substances) กรดยูโรนิก (uronic acid) กรดนิวคลีอิก (nucleic acid) และลิพิด (lipid) รวมถึงสารที่มีหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ได้แก่ หมู่คาร์บอกซีลิก (carboxylic group) หมู่ฟอสฟอริก (phosphoric group) หมู่อะมิโน (amino group) และหมู่ไฮ

ดรอกซีลิก (hydroxylic group) ซึ่งโลหะหนักจะถูกดูดซับบนพื้นผิวของเซลล์และสามารถนำเข้าสะสมอยู่ภายในเซลล์ กระบวนการจับกันระหว่างโลหะหนักกับ EPSs อาจจะเกิดปฏิกิริยาแบบใดก็ได้ขึ้นอยู่กับไอออนของโลหะหนักและลักษณะของพอลีแซคคาไรด์ (Micheletti *et al*., 2008)

สไปรูลิน่า พลาเทนซิสเป็นไซยาโนแบคทีเรียแบบเส้นสาย (filament) ที่ขดบิดกันเป็นเกลียว ที่ไม่มีเยื่อหุ้มนิวเคลียส พื้นผิวของเซลล์ ประกอบด้วยสารจำพวกพอลีแซคคาไรด์ (polysaccharides) โปรตีน (protein) และไขมัน (lipid) ซึ่งทำหน้าที่ในการดูดซับโลหะหนัก ซึ่งพอลีแซคคาไรด์บนผิวเซลล์เกี่ยวข้องกับการป้องกันเซลล์จากความแห้งแล้งหรือสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม (Limoli *et al*., 2015) ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น extracellular polysaccharides (EPSs) และ intracellular polysaccharides (IPSs) (Shiraishi, 2015) และมีรายงานการใช้สไปรูลิน่า พลาเทนซิส ดูดซับโลหะหนักหลายชนิด เช่นการดูดซับสังกะสีในน้ำ (Zinicovscaia *et al*., 2013) การดูดซับโลหะหนักแคดเมียมและทองแดงในน้ำ (Fang *et al*., 2011) การดูดซับแคดเมียมและนิกเกิลในน้ำและการดูดซับทองแดงภายใต้สภาวะที่แตกต่างกัน (Al-Homaidan *et al*., 2014) จากข้อมูลข้างต้นแสดงให้เห็นว่าศักยภาพของสไปรูลิน่า พลาเทนซิส ในการดูดซับโลหะหนักได้ รวมทั้งเป็นการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่ศึกษาการดูดซับทางชีวภาพของเฮกซะวาเลนต์โครเมียมโดยใช้ชีวมวลของสไปรูลิน่า พลาเทนซิส

อุปกรณ์และวิธีการ

การเพาะเลี้ยงสไปรูลิน่า พลาเทนซิสและการเตรียมตัวดูดซับ

สไปรูลิน่า พลาเทนซิสได้รับความอนุเคราะห์จากฝ่ายจุลชีววิทยาประยุกต์ สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร นำมาเลี้ยงในอาหารเลี้ยง Zarrouk (Zarrouk, 1966) ภายใต้แสงฟลูออเรสเซนต์ที่ความเข้มแสง 40 ไมโครโมลโฟตอนต่อตารางเมตรต่อวินาที ณ อุณหภูมิคงที่ 32°C และนำไปเขย่าที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที เก็บเซลล์ด้วยการหมุนเหวี่ยงด้วยความเร็ว 8,000 g เป็นเวลา 10 นาที และล้างเซลล์ด้วยน้ำกลั่น 3 ครั้ง เตรียมตัวดูดซับโดยนำเซลล์ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 60°C เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อใช้ในการทดลองต่อไป

ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับเฮกซะวาเลนต์โครเมียม (Cr(VI)) ของสไปรูลิน่า พลาเทนซิส

ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมต่อการดูดซับ Cr(VI) ของสไปรูลิน่า พลาเทนซิส

เตรียมเซลล์ 0.3 กรัมน้ำหนักแห้ง เติมลงในสารละลาย Cr(VI) ที่มีความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร (0.3 กรัมต่อเดซิลิตร) ที่พีเอช เท่ากับ 5.0 นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที เมื่อเวลาผ่านไป 30 60 90 120 150 และ 180 นาที ตามลำดับ เก็บตัวอย่างและนำไปกรองด้วยกระดาษ Whatman นำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณ Cr(VI) ที่เหลือด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชัน สเปกโทรโฟโตมิเตอร์

ความเป็นกรด-ด่าง (พีเอช) ที่เหมาะสมต่อการดูดซับ Cr(VI) ของสไปรูลิน่า พลาเทนซิส

เตรียมเซลล์ 0.3 กรัมน้ำหนักแห้ง เติมลงในสารละลาย Cr(VI) ที่มีความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร (0.3 กรัมต่อเดซิลิตร) ที่พีเอชต่างกัน 6 ระดับ คือ 4.0 5.0 6.0 7.0 8.0 และ 9.0 นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 120 นาที จากนั้นนำไปกรองด้วยกระดาษ Whatman และนำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณ Cr(VI) ที่เหลือด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชัน สเปกโทรโฟโตมิเตอร์

ปริมาณชีวมวลของสไปรูลิน่า พลาเทนซิส ที่เหมาะสมต่อการดูดซับ Cr(VI)

เตรียมเซลล์ให้ 0.05 0.1 0.2 0.3 0.5 และ 1.0 กรัมน้ำหนักแห้ง เติมลงในสารละลาย Cr(VI) มีความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร (กรัมต่อเดซิลิตร) ที่พีเอช เท่ากับ 5.0 นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 120 นาที จากนั้นนำไปกรองด้วยกระดาษ Whatman และนำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณ Cr(VI) ที่เหลือด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชัน สเปกโทรโฟโตมิเตอร์

ประสิทธิภาพของสไปรูลิน่า พลาเทนซิส ในการดูดซับ Cr(VI)

เตรียมเซลล์ 0.3 กรัมน้ำหนักแห้ง เติมลงในสารละลาย Cr(VI) ที่มีความเข้มข้น 10 ถึง 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร (0.3 กรัมต่อเดซิลิตร) ที่พีเอช เท่ากับ 5.0 นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 120 นาที จากนั้นนำไปกรองด้วยกระดาษ Whatman และนำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณ Cr(VI) ที่เหลือด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชัน สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ คำนวณปริมาณการดูดซับโครเมียม ดังสมการ

$$q_e = \frac{V(C_i - C_f)}{m}$$

เมื่อ q_e คือ ปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับต่อปริมาณเซลล์ (มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม) V คือ ปริมาตรของสารละลาย Cr(VI) (มีหน่วยเป็นมิลลิลิตร) C_i คือ ความเข้มข้นตั้งต้นของ Cr(VI) (มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร) C_f คือ ความเข้มข้นสุดท้ายของ Cr(VI) (มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร) m คือ ปริมาณน้ำหนักแห้งของเซลล์ (มีหน่วยเป็นกรัม) และวิเคราะห์ไอโซเทอร์มการดูดซับโดยใช้สมการแลงค์เมียร์ (Langmuir) และฟรุนดิช (Freundlich)

สมการแลงค์เมียร์ (Langmuir, 1918) มีรูปสมการ คือ

$$q = \frac{q_0 C}{K + C}$$

โดย q คือ ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับหนึ่งหน่วยมวล q_0 คือ ปริมาณตัวถูกละลายมากที่สุดต่อตัวดูดซับหนึ่งหน่วยมวล (มิลลิกรัมต่อกรัม) ค่า C คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่สมดุล (ลิตรต่อมิลลิกรัม) ค่า K คือ ค่าคงที่ที่ได้จากการทดลอง และจากสมการแลงค์เมียร์หากพลอตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง 1/q กับ 1/C จะได้เป็นเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ K/q_0 และจุดตัดแกน Y เท่ากับ $1/q_0$ สามารถเขียนเป็นสมการได้ คือ

$$\frac{1}{q} = \frac{K}{q_0 C} + \frac{1}{q_0}$$

สมการฟรุนดิช (Freundlich, 1906) มีรูปสมการ คือ

$$q = K\sqrt[n]{C}$$

โดย q คือปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อตัวดูดซับหนึ่งหน่วยมวล C คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่สมดุล K และ n คือ ค่าคงที่ที่ได้จากการทดลอง และจากสมการฟรุนดิช หากพลอตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ln q กับ ln C จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ 1/n และจุดตัดแกน Y เท่ากับ ln K

$$\ln q = \ln K + \left(\frac{1}{n}\right) \ln C$$

การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติ n=3 และแสดงค่าเฉลี่ยผลการทดลอง $\pm$ SD

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ระดับความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมต่อการดูดซับ (Cr(VI))

ผลการศึกษาพบว่าระดับความเป็นกรด-ด่าง (พีเอช) ที่เหมาะสมต่อการดูดซับ Cr(VI) ในสารละลายดีที่สุดเท่ากับ 5.0 (Figure 1A) ขณะที่พีเอชต่ำกว่า 7.0 โครเมียมจะเกิดเป็นสารประกอบที่มีประจุเป็นลบ เช่น $Cr_2O_7^{2-}$, $HCrO_4^-$ และ $Cr_2O_4^{2-}$ ซึ่งสามารถจับกับประจุบนผิวของตัวดูดซับได้ดี เมื่อพีเอชสูงกว่า 7.0 โครเมียมอาจเกิดโครงสร้างเชิงซ้อนกับไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลง ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Kleinubing *et al*. (2010).

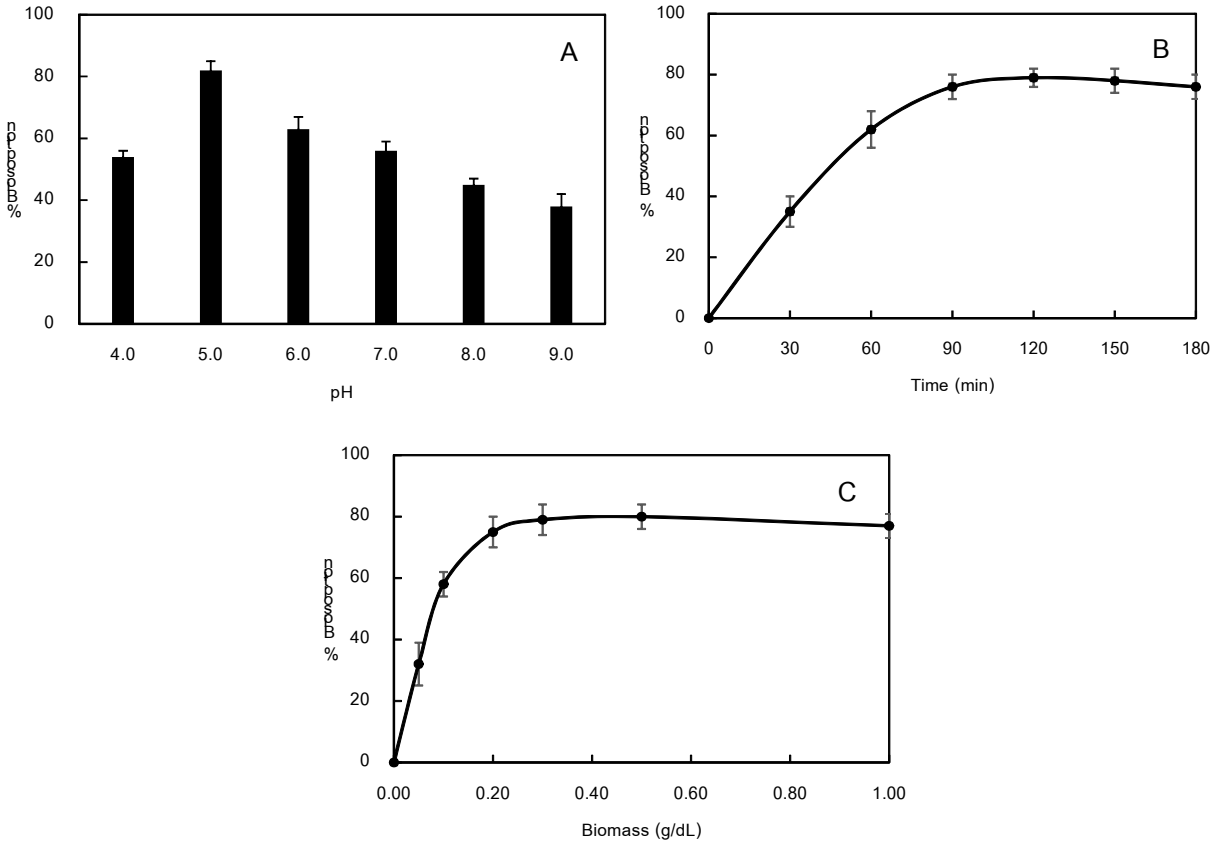


Figure 1 Factors influencing the biosorption of Cr(VI) on *Spirulina platensis* biomass (A) pH (biomass dose = 0.3 g/dL, contact time = 120 min), (B) contact time (biomass dose = 0.3 g/dL, pH = 5.0), and (C) biomass dose (contact time = 120 min, pH = 5.0).

ระยะเวลาที่เหมาะสมต่อการดูดซับ Cr(VI)

ผลการศึกษาพบว่าในช่วงเวลา 90 นาทีแรก สไปรูลิน่า พลาเทนซิส สามารถดูดซับ Cr(VI) ได้อย่างรวดเร็ว (Figure 1B) เนื่องจากพื้นที่ผิวบนเซลล์ยังมีที่ว่างเพียงพอในการจับกับโครเมียม ซึ่งการดูดซับจะเข้าสู่สมดุลที่เวลา 120 นาที (Sari and Tuzen, 2008)

ปริมาณชีวมวลของสไปรูลิน่า พลาเทนซิส ต่อการดูดซับ Cr(VI)

ผลการศึกษาพบว่าปริมาณชีวมวลมีผลต่อการดูดซับ Cr(VI) ปริมาณเซลล์ 0.3 กรัมน้ำหนักแห้ง ในปริมาตรสารละลาย 100 มิลลิลิตร (0.3 กรัมต่อเดซิลิตร) สามารถดูดซับโครเมียมได้ดีที่สุด (Figure 1C) เมื่อชีว

มวลมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นการดูดซับ Cr(VI) ลดลง ซึ่งเกิดการจับกันของเซลล์ทำให้พื้นที่ผิวเซลล์ที่มีประสิทธิภาพลดลง ผลการทดลองสอดคล้องกับการดูดซับโลหะชนิดอื่น (Sulaymon *et al*., 2013)

ประสิทธิภาพสูงสุดของสไปรูลิน่า พลาเทนซิส และไอโซเทอมของการดูดซับ Cr(VI)

ผลการศึกษาพบว่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดของในสารละลาย Cr(VI) เท่ากับ 26.67 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง เมื่อนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ไอโซเทอมโดยใช้สมการของแลงค์เมียร์ (Figure 2A) และสมการของฟรุนดิช (Figure 2B) พบว่าลักษณะของกราฟมีความสอดคล้องกับสมการของแลงค์เมียร์มากกว่าสมการของฟรุนดิช โดยพิจารณาจากค่า R squared เท่ากับ 0.998 (Table 1) แสดงให้เห็นว่าการดูดซับ Cr(VI) โดยสไปรูลิน่า พลาเทนซิส เป็นแบบ pseudo-first-order rate ซึ่งสอดคล้องกับรายงานก่อนหน้านี้ในการดูดซับตะกั่วและแคดเมียม (Bulgariu *et al*., 2013)

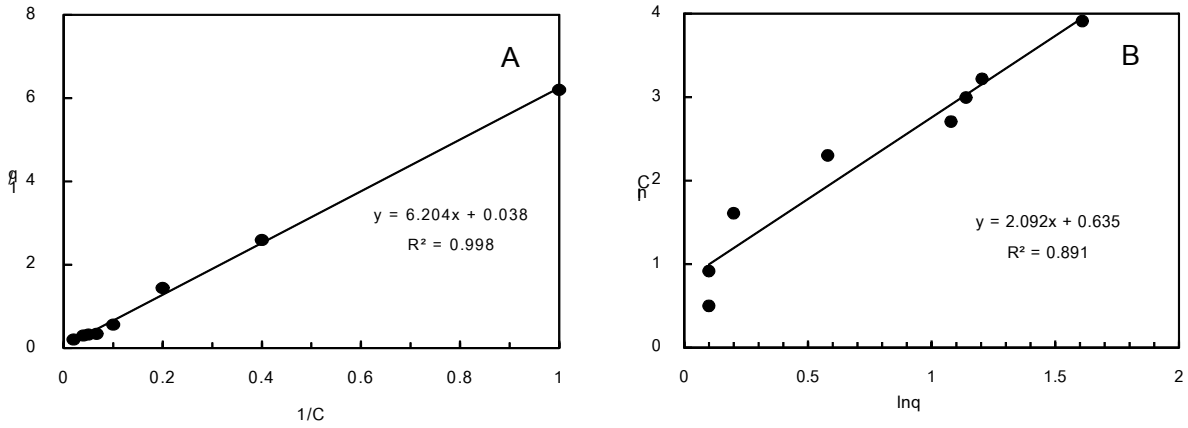


Figure 2 Adsorption isotherm for the biosorption of Cr(VI) on *Spirulina platensis* biomass (A) Langmiur adsorption isotherm and (B) Freundich adsorption isotherm.

Table 1 The biosorption isotherm of hexavalent chromium on *Spirulina platensis* biomass.

Parameters	Langmuir adsorption Isotherm			Freundlich adsorption Isotherm		
	K	q_0	R^2	K	1/n	R^2
Cr(VI)	163.1	26.32	0.998	0.47	2.092	0.891

R^2 is defined as coefficient of determination for biosorption

สรุป

สไปรูลิน่า พลาเทนซิส (*Spirulina platensis*) มีศักยภาพในดูดซับเฮกซะวาเลนต์โครเมียม (Cr(VI)) ในสารละลายได้ดีที่สุดที่พีเอชเท่ากับ 5.0 ภายใต้ระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 120 นาที ปริมาณชีวมวลเท่ากับ 0.3 กรัมต่อเดซิลิตร และความสามารถสูงสุดของสไปรูลิน่า พลาเทนซิส ในการดูดซับ Cr(VI) เท่ากับ 26.32 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งรูปแบบการดูดซับสอดคล้องกับสมการของแลงค์เมียร์

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะเทคนิคการสัตวแพทย์และสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่สนับสนุนทุนวิจัย (ว -ท(ด)172.54) และเอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

Abdel-Aty, A.M., N.S. Ammar, H.H. Abdel Ghafar and R.K. Ali. 2013. Biosorption of cadmium and lead from aqueous solution by fresh water alga *Anabaena sphaerica* biomass. **Journal of Advanced Research** 4(4): 367-374.

Ahmady-Asbchin, S., M. Safari and R. Tabaraki. 2015. Biosorption of Zn (II) by *Pseudomonas aeruginosa* isolated from a site contaminated with petroleum. **Desalination and Water Treatment** 54(12): 3372-3379.

Al-Homaidan, A.A., H.J. Al-Houri, A.A. Al-Hazzani, G. Elgaaly and N.M.S. Moubayed. 2014. Biosorption of copper ions from aqueous solutions by *Spirulina platensis* biomass. **Arabian Journal of Chemistry** 7(1): 57-62.

Bai, J., Z. Li, F. Fan, X. Wu, W. Tian, X. Yin, L. Zhao, F. Fan, L. Tian, Y. Wang, Z. Qin and J. Guo. 2014. Biosorption of uranium by immobilized cells of *Rhodotorula glutinis*. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry** 299(3): 1517-1524.

Barikbin, B., S.B. Mortazavi and G. Moussavi. 2015. Simultaneous removal of Cr(VI) from water containing sulfate using nanofiltration. **Desalination and Water Treatment** 53(7): 1895-1901.

Bulgariu, L., M. Lupea, D. Bulgariu, C. Rusu and M. Macoveanu. 2013. Equilibrium study of Pb(II) and Cd(II) biosorption from aqueous solution on marine green algae biomass. **Environmental Engineering and Management Journal** 12: 183-190.

Darakas, E., V. Tsiridis, M. Petala and A. Kungolos. 2013. Hexavalent chromium release from lignite fly ash and related ecotoxic effects. **Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering** 48(11): 1390-1398.

Fang, L., C. Zhou, P. Cai, W. Chen, X. Rong, K. Dai, W. Liang, J.-D. Gu and Q. Huang. 2011. Binding characteristics of copper and cadmium by cyanobacterium *Spirulina platensis*. **Journal of Hazardous Materials** 190(1-3): 810-815.

Freundlich, H.M.F. 1906. Uber die adsorption in losungen. **Zeitschrift für Physikalische Chemie** 57: 385-470.

Glorias-Garcia, F., J.M. Arriaga-Merced, G. Roa-Morales, V. Varela-Guerrero, C.E. Barrera-Díaz, B. Bilyeu. 2014. Fast reduction of Cr(VI) from aqueous solutions using alumina. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry** 20(4): 2477-2483.

Javadian, H., M. Ahmadi, M. Ghiasvand, S. Kahrizi and R. Katal, 2013. Removal of Cr(VI) by modified brown algae *Sargassum bevanom* from aqueous solution and industrial wastewater. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers** 44 (6): 977- 989.

Karthik, R. and S. Meenakshi. 2015. Adsorption study on removal of Cr(VI) ions by polyaniline Composite. **Desalination and Water Treatment** 54(11): 3083-3093.

Kleinubing, S.J., R.S. Vieira, M.M. Beppu, E. Guibal, M.G.C. Silva. 2010. Characterization and evaluation of copper and nickel biosorption on acidic algae *Sargassum filipendula*, **Journal of Materials Research** 13: 541-550.

Langmuir, I. 1918. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. **Journal of the American Chemical Society** 40: 1361-1403.

Limoli, D.H., C.J. Jones and D.J. Wozniak, 2015. Bacterial extracellular polysaccharides in biofilm formation and function. **Microbiology Spectrum** 3(3): art. no. MB-0011-2014.

Micheletti, E., G. Colica, C. Viti, P. Tamagnini and R. De Philippis. 2008. Selectivity in the heavy metal removal by exopolysaccharide-producing cyanobacteria. **Journal of Applied Microbiology** 105(1): 88-94.

Ovesen, J.L., Y. Fan, J. Chen, M. Medvedovic, Y. Xia and A. Puga. 2014. Long-term exposure to low-concentrations of Cr(VI) induce DNA damage and disrupt the transcriptional response to benzo[a]pyrene. **Toxicology** 316 (1): 14-24.

Ozturk, S., B. Aslim, Z. Suludere and S. Tan. 2014. Metal removal of cyanobacterial Exopolysaccharides by uronic acid content and monosaccharide composition. **Carbohydrate Polymers** 101(1): 265-271.

Saha, R., R. Nandi and B. Saha. 2011. Sources and toxicity of hexavalent chromium. **Journal of Coordination Chemistry** 64(10): 1782-1806.

Sari, A. and M. Tuzen. 2008. Biosorption of Pb(II) and Cd(II) from aqueous solution using green alga (*Ulva lactuca*) biomass. **Journal of Hazardous Materials** 152: 302-308.

Shiraishi, H. 2015. Association of heterotrophic bacteria with aggregated *Arthrospira platensis* exopolysaccharides: Implications in the induction of axenic cultures. **Bioscience, Biotechnology and Biochemistry** 79(2): 231-241.

Sulaymon, A.H., A.A. Mohammed and T.J. A.l-Musawi. 2013. Competitive biosorption of lead, cadmium, copper, and arsenic ions using algae. **Environmental Science and Pollution Research** 20: 3011-3023.

Zarrouk, C. 1966. Contribution a l'etude d'une cyanobacterie: influence de divers facteurs physiques et chimiques sur la croissance et la photosynthese de *Spirulina maxima* (Setchell et Gardner) Geitler. PhD thesis, University of Paris, France.

Zhitkovich, A. 2011. Chromium in drinking water: Sources, metabolism, and cancer risks. **Chemical Research in Toxicology** 24(10): 1617-1629.

Zinicovscaia, I., G. Duca, V. Rudic, L. Cepoi, T. Chiriac, M.V. Frontasyeva, S.S. Pavlov and S.F. undorina. 2013. *Spirulina platensis* as biosorbent of zinc in water. **Environmental Engineering and Management Journal** 12(5): 1079-1084.

การคัดเลือกและการศึกษาลักษณะจำเพาะของแบคทีเรียทนเค็มที่คัดแยกจากดินในการเป็นแบคทีเรียปฏิปักษ์ต่อราสาเหตุโรคพืชในดิน

Screening and Characterization of Halotolerant Bacteria Isolated from Soils and Analysis of Their Potential against Soilborne Pathogenic Fungi

สุกัญญา เทพธีร์[1] อัณณชญาน์ มงคลชัยพฤกษ์[2] เยาวภา อร่ามศิริรุจิเวทย์[1] และ สาวิตร ตระกูลน่าเลื่อมใส[1*]

Sukanya Thaptee[1], Anchaya Mongkolchaiyaphruek[2], Yaovapa Aramsirirujiwet[1] and Savitr Trakulnalarmsai[1*]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาแบคทีเรียทนเค็มจำนวน 245 ไอโซเลท ที่คัดแยกงานวิจัยก่อนหน้าจากดิน 2 แหล่ง จากการทดสอบด้วยวิธี dual culture พบแบคทีเรียทนเค็มจำนวน 36 ไอโซเลท เป็นแบคทีเรียปฏิปักษ์ต่อราสาเหตุโรคพืชในดินทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ *Colletrotrichum gloeosporioides* DOAC2201, *Sclerotium rolfsii* DOAC2357 และ *Fusarium oxysporum* DOAC1716 และไอโซเลท P5-29, P9-21 และ P7-18 ยับยั้งราแต่ละชนิดได้ดีที่สุดตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ลำดับเบสของยีน 16S rRNA ระบุว่า P5-29 และ P9-21 คือ *Bacillus subtilis* และ P7-18 คือ *Bacillus tequilensis* การศึกษาลักษณะจำเพาะของแบคทีเรียปฏิปักษ์ที่คัดเลือกจำนวน 22 ไอโซเลท แสดงให้เห็นว่าทุกไอโซเลทสร้างเอนไซม์ย่อยสลาย ไซเดอโรฟอร์ และไฮโดรเจนไซยาไนด์ได้ และพบว่าสารออกฤทธิ์ประเภทสารน้ำและสารประกอบอินทรีย์ระเหยมีกิจกรรมในการยับยั้งการเจริญของรา และการยับยั้งจากสารประกอบอินทรีย์ระเหยไม่มีความจำเพาะกับราทดสอบ

ABSTRACT

In this study, a total of 245 isolates of halotolerant bacteria previously isolated from soils were screened for antagonistic bacteria using dual culture assay. Thirty-six out of 245 were shown to be antagonist against soilborne pathogens, *Colletrotrichum gloeosporioides* DOAC2201, *Sclerotium rolfsii* DOAC2357 and *Fusarium oxysporum* DOAC1716. The highest inhibition with antifungal activity against each fungal tested were P5-29, P9-21 and P7-18, respectively. Sequencing analysis of 16S rRNA gene identified as *Bacillus subtilis* (P9-21 and P5-29) and *Bacillus tequilensis* (P7-18). All of selected 22 antagonist isolates could produce hydrolytic enzyme siderophore and HCN. Diffusible and volatile organic compounds were responsible for inhibitory fungal pathogens and volatile organic compounds activity inhibited non-specificity of fungal test.

Key Words; halotolerant bacteria, antagonistic bacteria, soilborne pathogen

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

[1] ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์

[1] Department of Microbiology, Faculty of Science

[2] ภาควิชาพืชสวน คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 10900

[2] Department of Horticulture, Faculty of Agriculture, Kasetsart University 10900

คำนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมเนื่องจากมีสภาพแวดล้อมทางดินและทางภูมิอากาศที่เหมาะสมต่อการเจริญของพืช เทคโนโลยีชีวภาพสีเขียว (green biotechnology) เป็นกลยุทธ์ที่นำเทคโนโลยีทางชีวภาพมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการทางการเกษตรซึ่งเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและเป็นทางเลือกเพื่อการพัฒนาทางการเกษตรอย่างยั่งยืน การประยุกต์ใช้จุลินทรีย์ที่มีบทบาทในการส่งเสริมการเจริญของพืช หรือ plant growth promoting bacteria (PGPB) เป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการลดปัญหาจากการใช้ปุ๋ยเคมี (Glick, 2012) โดยกลไกในการส่งเสริมการเจริญของพืชแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ กลไกทางตรง ได้แก่ การเพิ่มสารอาหารให้พืช การกระตุ้นการเจริญของรากพืช และกลไกทางอ้อม เช่น กลไกในการควบคุมโรคพืช เป็นต้น ในปัจจุบันราสาเหตุโรคพืชส่งผลกระทบในการเพาะปลูกและเป็นปัญหาทั่วโลกโดยเฉพาะพื้นที่เขตร้อน อีกทั้งราสาเหตุโรคพืชในดินมีความสามารถในการอยู่รอดในดินได้เป็นเวลาหลายๆปีจึงยากที่จะคาดการณ์และวินิจฉัยการก่อโรค (Steven et al., 2003) ปัจจุบันมีการศึกษาแบคทีเรียปฏิปักษ์อย่างแพร่หลายในด้านการประยุกต์ใช้เป็นสารควบคุมชีวภาพและกลไกที่เกี่ยวข้องในการควบคุม เช่น สายพันธุ์ *Bacillus* เป็นแบคทีเรียปฏิปักษ์ที่สามารถสร้างสารออกฤทธิ์ชีวภาพและสร้างเอนไซม์ย่อยสลายได้ เช่น เอนไซม์ไคติเนส โปรติเอส และเบต้า-1,3 กูลคาเนส (Lin et al., 2014) และจากรายงานของ Zouari et al. (2016) พบว่า *Bacillus amyloliquefaciens* สร้างสารปฏิชีวนะ เช่น iturin surfactin และ fengycin และมีผลในการยับยั้งการเจริญของรา *Fusarium oxysporum, Aspergillus niger* และ *Botrytis cinereal* อย่างไรก็ตาม วิธีการในการควบคุมราสาเหตุโรคพืชในดิน การนำแบคทีเรียทนเค็มที่เป็นแบคทีเรียปฏิปักษ์ มาประยุกต์ใช้ เป็นหนึ่งในกลยุทธที่สามารถลดการแพร่กระจายของราสาเหตุโรคพืชในดินได้ เนื่องจากแบคทีเรียทนเค็มสามารถเจริญได้ในสภาพแวดล้อมหลายสภาวะ เช่น สภาวะที่มีเกลือหรือไม่มีเกลือ

งานวิจัยนี้จึงมุ้งเน้นในการศึกษาแบคทีเรียทนเค็มที่คัดแยกจากดิน 2 แหล่ง ที่มีสภาพแวดล้อมแตกต่างกัน ในการเป็นแบคทีเรียปฏิปักษ์ต่อราสาเหตุโรคพืชในดิน 3 ชนิด ได้แก่ รา *Colletrotrichum gloeosporioides* DOAC2201 (CG), *Fusarium oxysporum* DOAC1716 (FO) และ *Sclerotium rolfsii* DOAC2357 (SR) และศึกษาคุณสมบัติในการเป็น PGPB รวมถึงสารออกฤทธิ์ที่มีผลในการยับยั้งการเจริญของรา ผลที่ได้จากการศึกษาสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลทรัพยากรจุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการยับยั้งราสาเหตุโรคพืชในดินและสามารถนำไปใช้ในการพัฒนาเป็นสารควบคุมหรือกำจัดราสาเหตุโรคพืชในดินได้อย่างปลอดภัย ทำให้สารเคมีตกค้างในสิ่งแวดล้อมลดลง

อุปกรณ์และวิธีการ

การคัดเลือกแบคทีเรียทนเค็มที่มีความสามารถในการยับยั้งราสาเหตุโรคพืชในดิน

แบคทีเรียทนเค็ม จำนวน 245 ไอโซเลท ถูกนำมาทดสอบความสามารถในการยับยั้งราสาเหตุโรคพืชโดยใช้เทคนิค dual culture (Dinesh et al., 2015) เพาะเชื้อแบคทีเรียในอาหาร PDA pH 7.0 ขีดเป็นเส้นตรง ให้ห่างจากจุดศูนย์กลาง 2 cm ขีดทั้งสองด้านของจานอาหาร ใช้ cork-borer เจาะวุ้นบริเวณปลายเส้นใยเชื้อรานำไปวางตรงบริเวณกลางจานอาหาร ชุดควบคุมเพาะเลี้ยงเฉพาะเชื้อรา แล้วพันเพลทด้วยพาราฟิล์มให้แน่นเพื่อป้องกันการระเหยของสารออกฤทธิ์ นำไปบ่มที่อุณหภูมิห้อง สังเกตผลการทดลองเป็นเวลา 20-47 วัน เพื่อให้ผลการทดลองนิ่ง ตรวจผลการทดลองโดยวัดรัศมีเส้นใยเชื้อรา แล้วนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณ %Inhibition (I) = [(C–T)/C)×100] I คือ เปอร์เซ็นการยับยั้งการเจริญ C และ T รัศมีของโคโลนีราในชุดควบคุมและชุดทดสอบตามลำดับ

จากนั้นเก็บตัวอย่างเส้นใยราที่ถูกยับยั้งไปศึกษาความเสียหายภายใต้กล้องจุลทรรศน์ โดยใช้เทคนิค scotch tape และได้คัดเลือกแบคทีเรียปฏิปักษ์จำนวน 22 ไอโซเลท โดยอาศัยความแตกต่างของขนาดรูปร่างเซลล์แบคทีเรียจากความยาวและความกว้างของเซลล์ และความสามารถในการยับยั้งราทดสอบ และจัดจำแนกชนิดของแบคทีเรียโดยการวิเคราะห์ลำดับของยีน 16S rRNA แล้ววิเคราะห์ความเหมือนของลำดับเบสด้วยการ BLAST (Siddikee et al., 2010)

การศึกษาคุณสมบัติจำเพาะในการเป็นแบคทีเรียส่งเสริมการเจริญของพืช

นำแบคทีเรียปฏิปักษ์ที่คัดเลือกจำนวน 22 ไอโซเลท มาทดสอบการสร้างสาร Indole-3-acetic acid (IAA) เพาะเลี้ยงแบคทีเรียในอาหารเหลว Haloalkaliphile (HA) ที่เติม L-tryptophan (5 mM) pH 7.6 บ่มเขย่าเป็นเวลา 72 ชั่วโมง และวัดปริมาณ IAA ด้วยวิธีทางเคมีตามวิธีการของ Solon and Robert (1951) โดยนำ supernatant ทำปฏิกิริยากับ Salkowski's reagent แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 530 nm เทียบกับกราฟมาตรฐานของ IAA และทดสอบการละลายฟอสเฟต ในอาหารแข็ง Pikovskaya's pH 7.6 ที่เติมด้วย $Ca_3(PO_4)_2$ 5 กรัมต่อลิตร ตามวิธีการของ Sabrina et al. (2006) บ่มเป็นเวลา 7 วัน จากนั้นวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโคโลนีและเส้นโซนใสแล้วนำข้อมูลที่ได้คำนวณค่า solubilization index (SI) = (เส้นผ่าศูนย์กลางของโซนใส/เส้นผ่าศูนย์กลางของโคโลนี)

การศึกษาคุณสมบัติจำเพาะและสารยับยั้งราสาเหตุโรคพืชของแบคทีเรียปฏิปักษ์ที่คัดเลือก

1. ศึกษาคุณสมบัติในการเป็นแบคทีเรียปฏิปักษ์ โดยศึกษาความสามารถในการสร้างเอนไซม์ย่อยสลาย ได้แก่เอนไซม์เซลลูเลส โปรติเอส ไคติเนส และ เบต้า-1,3-กลูคาเนส และศึกษาการสร้างไซเดอโรฟอร์โดยเพาะเลี้ยงเชื้อในอาหารแข็ง HA ที่ไม่เติมธาตุเหล็ก และ overlay ด้วย CAS medium (Miranda et al., 2007) ไฮโดรเจนไซยาไนด์ทดสอบโดยเพาะเลี้ยงเชื้อในอาหารแข็ง HA ที่เติม glycine เป็นสารตั้งต้น และตรวจสอบโดยสังเกตการเปลี่ยนสีของกระดาษกรองที่ชุ่มด้วยสารละลาย picric acid ที่วางในฝาเพลท จากสีเหลืองเป็นน้ำตาลแสดงถึงการสร้างไฮโดรเจนไซยาไนด์ (Bakker and Schippers, 1987)

2. ศึกษาการสร้างสารออกฤทธิ์ประเภทสารน้ำ และการทดสอบชนิดของสารในด้านการเป็นเอนไซม์ย่อยสลายหรือสารออกฤทธิ์อื่น เพาะเลี้ยงแบคทีเรียในอาหารเหลว PDB ชนิดต่างๆ เพื่อคัดเลือกอาหารที่เหมาะสมต่อการสร้างสาร ประกอบไปด้วย (ก) อาหาร PDB pH 7.0 (ข) อาหาร PDB ที่เติม casamino acid (0.5%) และ trace element ($MgSO_4$ 0.5 g/l $FeSO_4$ 1 mg/l + $MnSO_4$ 10 mg/l) pH 7.0 และ(ค) อาหาร PDB ที่เติม yeast extract (0.2%) และ trace element จากนั้นนำ cell-free supernatant (CFS) ไปทดสอบกิจกรรมในการยับยั้งราสาเหตุโรคพืชโดยใช้วิธี disk diffusion และตรวจสอบกิจกรรมของเอนไซม์ในอาหารทดสอบเอนไซม์

3. ทดสอบกิจกรรมของสารออกฤทธิ์ในการเป็นสารประกอบอินทรีย์ระเหย ทดสอบโดยใช้วิธี double dish (Wan et al., 2008) ทำการเพาะเชื้อแบคทีเรียโดยขีดเป็นเส้นตรงจำนวน 3 แถว ทั้งในแนวตั้งและแนวขวาง (ขนาด 7.5-8.5 cm) บนอาหาร PDA ที่เติม citrate pH 7.5 และเพาะเลี้ยงราในอาหาร PDA ตรงบริเวณกลางจานอาหาร นำเพลทประกบกันให้สนิทโดยให้เพลทที่เพาะเชื้อแบคทีเรียอยู่ด้านบน พันด้วยพาราฟิล์มให้แน่น บ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 3-7 วัน สังเกตการเจริญของเชื้อรา และคำนวณ %Inhibition (%I)

ผลและวิจารณ์

แบคทีเรียทนเค็มที่มีความสามารถในการยับยั้งราสาเหตุโรคพืชในดิน

จากผลของโครงการวิจัยก่อนหน้านี้ ได้คัดแยกแบคทีเรียทนเค็มจากดิน 2 แหล่ง ได้แก่ ดินจากสถานีวิจัยกาญจนบุรี ซึ่งเป็นดินแห้งแล้งและดินจากพื้นที่สีเขียวบางกระเจ้า เป็นดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ โดยทำการคัดแยกในอาหาร HA pH 7.6 เมื่อทดสอบความสามารถในการยับยั้งรา โดยเทคนิค dual culture พบแบคทีเรียทนเค็มเป็นแบคทีเรียปฏิปักษ์ จำนวน 36 ไอโซเลท คิดเป็น 14.7% (n= 245) ผลการยับยั้งจำแนกได้เป็น 4 กลุ่ม ได้แก่กลุ่มที่ยับยั้งราทั้ง 3 ชนิด (SR+CG+FO) มีจำนวน 5 ไอโซเลท กลุ่มยับยั้งรา CG และ FO มีจำนวน 12 ไอโซเลท กลุ่มยับยั้งรา SR และ FO มีจำนวน 2 ไอโซเลท และกลุ่มยับยั้งเฉพาะรา SR มีจำนวน 17 ไอโซเลท แบคทีเรียที่สามารถยับยั้งรา SR พบค่าการยับยั้งอยู่ในช่วง 60.1-77.9% รา CG ในช่วง 51.0-69.3% และรา FO ค่าการยับยั้งอยู่ในช่วง 48.6-63.7% ไอโซเลทที่มีศักยภาพในการยับยั้งรา SR, CG และ FO สูงที่สุด ได้แก่ไอโซเลท P9-21, P5-29 และ P7-18 ตามลำดับ ผลดังแสดงใน Fig. 1 จากการศึกษาความผิดปกติของราที่ถูกยับยั้งภายใต้กล้องจุลทรรศน์พบว่า รา SR ส่วนใหญ่เส้นใยเหี่ยว เส้นใยบวมและผนังกั้นของเส้นใยสั้นลง รา CG ส่วนใหญ่พบเส้นใยและปลายเส้นใยบวม ไม่พบความผิดปกติของ conidia และรา FO ส่วนใหญ่พบความผิดปกติของ conidia เส้นใยบวมและพบเส้นใยเหี่ยว และผลการทดสอบการเจริญในอาหารทดสอบที่มีเกลือ NaCl (1.5%) และไม่มีเกลือ พบว่าแบคทีเรียสามารถเจริญได้ในทั้งสองสภาวะซึ่งเป็นคุณสมบัติของแบคทีเรียทนเค็ม ผลการวิเคราะห์ลำดับเบสของยีน 16S rRNA (1465 bp.) พบว่า P9-21 ระบุเป็นแบคทีเรีย *B. subtilis* (ความเหมือน 99.87%) P5-29 คือ *B. subtilis* (ความเหมือน 99.80%) และ P7-18 คือ *B. tequilensis* (ความเหมือน 99.93%)

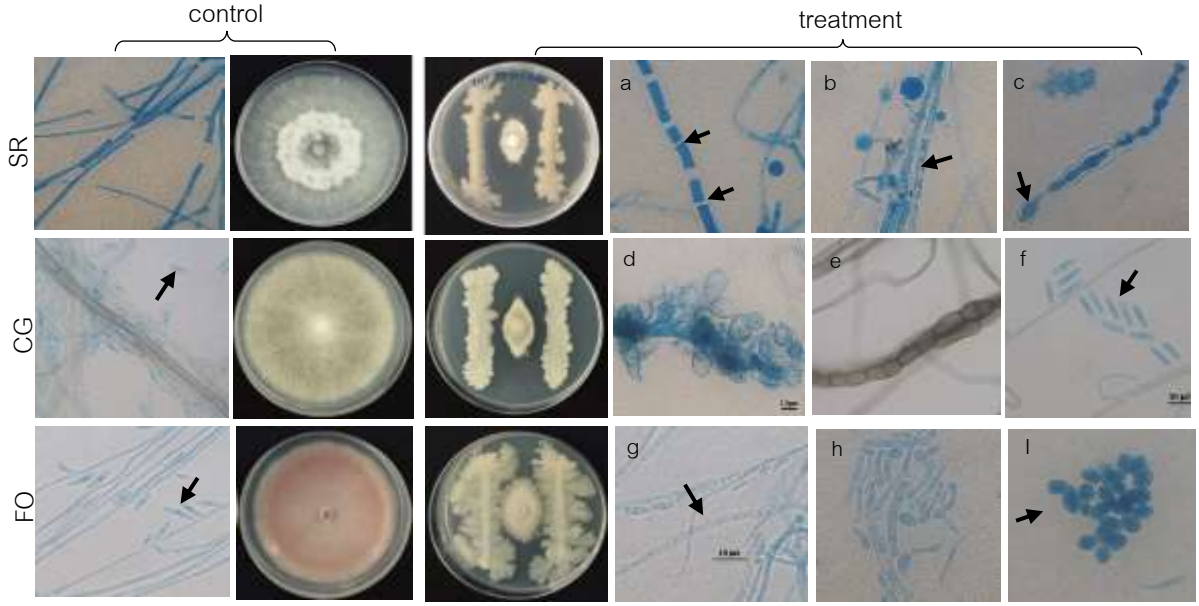


Fig.1 Antagonistic activity of three highest potential antagonist, P9-21, P5-29 and P7-18 against either SR, CG and FO on dual culture test, respectively. Light microscopic analysis (1500X) of fungal structure (a) longitudinal septum decreased (b) lysis of fungal hyphae (c) hyphae swelling (d,e) hyphae and hyphae tip swelling (f) normal conidia (g) lysis of fungal hyphae (h) hyphae swelling (I) swelling and thick wall conidia (abnormal conidia)

คุณสมบัติในการเป็นแบคทีเรียส่งเสริมการเจริญของพืชและการเป็นแบคทีเรียปฏิปักษ์

การศึกษาคุณสมบัติจำเพาะในการเป็น PGPB ของแบคทีเรียทนเค็มที่คัดเลือกจำนวน 22 ไอโซเลท พบแบคทีเรียทนเค็มจำนวน 8 ไอโซเลท สร้าง IAA ได้ในช่วง 3.43-12.77 µg/ml ได้แก่ไอโซเลท P9-21, 1-14, P4-20, P7-30, SP12, P1-15, SP18 และ SP65 และพบแบคทีเรียทนเค็มเพียง 1 ไอโซเลท สามารถละลายฟอสเฟตได้แก่ SP65 (SI = 1.2) แบคทีเรียที่สามารสร้าง IAA และลายฟอสเฟตเป็นแบคทีเรียที่มีคุณสมบัติในการส่งเสริมการเจริญของพืช เนื่องจาก IAA เป็นฮอร์โมนที่จัดอยู่ในกลุ่มออกซินซึ่งช่วยกระตุ้นการเจริญของพืช และการละลายฟอสเฟตโดยแบคทีเรียจะปลดปล่อยเอนไซม์หรือกรดอินทรีย์มาละลายสารประกอบอินทรีย์ฟอสเฟตทำให้พืชได้ธาตุฟอสฟอรัสในรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ สำหรับคุณสมบัติในการเป็นแบคทีเรียปฏิปักษ์จากการทดสอบการสร้างเอนไซม์ย่อยสลาย ไซเดอโรฟอร์ และไฮโดรเจนไซยาไนด์ พบว่าแบคทีเรียทนเค็มที่คัดเลือกสร้างเอนไซม์เซลลูเลสและโปรติเอสได้ทุกไอโซเลท พบสร้างเอนไซม์ไคติเนสได้เพียง 1 ไอโซเลท คือ P12-4 และไม่พบการสร้างเอนไซม์เบต้า-1.3-กลูคาเนส ซึ่งการสร้างเอนไซม์ย่อยสลายของแบคทีเรียปฏิปักษ์เป็นหนึ่งในคุณสมบัติในการยับยั้งราสาเหตุโรคพืช โดยการย่อยสลายผนังเซลล์ของเชื้อรา (Lin et al., 2014) แบคทีเรียสามารถสร้างไซเดอโรฟอร์และไฮโดรเจนไซยาไนด์ ได้ทุกไอโซเลท ดังแสดงใน Fig. 2 และ Table 1 ซึ่งไซเดอโรฟอร์เป็นโปรตีนขนาดเล็กที่มีความจำเพาะกับเหล็กสูง แบคทีเรียที่สร้างไซเดอโรฟอร์จะแย่งจับเหล็กทำให้ราสาเหตุโรคพืชขาดแคลนธาตุเหล็กซึ่งเป็นการขัดขวางการเจริญของรา ไฮโดรเจนไซยาไนด์เป็น secondary metabolite ออกฤทธิ์ในการทำลายราสาเหตุโรคพืชโดยยับยั้งกระบวนการหายใจ (Monika et.al, 2018)

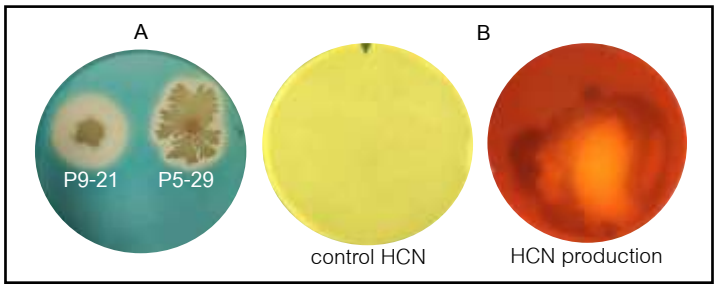


Fig. 2 Siderophore and hydrogen cyanide (HCN) produced by selected antagonistic bacteria (A) Siderophore (B) HCN production

สารยับยั้งราสาเหตุโรคพืชของแบคทีเรียปฏิปักษ์ที่คัดเลือกได้

ผลการทดสอบกิจกรรมของ CFS ของแบคทีเรียปฏิปักษ์ที่คัดเลือก 22 ไอโซเลท โดยใช้เทคนิค disk diffusion พบ CFS มีกิจกรรมในการยับยั้งรา CG และ FO (Fig. 3) และไม่พบกิจกรรมในการยับยั้งรา SR และ CFS ที่ได้จากการเพาะเลี้ยงในอาหาร PDB ที่เติม casamino acid (0.5%) และ trace element และอาหาร PDB ที่เติม yeast extract (0.2%) และ trace element มีกิจกรรมในการยับยั้งรามากกว่าอาหาร PDB (control) สารในกลุ่ม diffusible compounds ที่อยู่ใน CFS มีกิจกรรมในการยับยั้งรา CG และ FO สารดังกล่าวเช่น สารออกฤทธิ์ประเภทเอนไซม์หรือเมทาบอไลต์อื่นๆ เมื่อทดสอบกิจกรรมของเอนไซม์ พบกิจกรรมของเอนไซม์โปรติเอสจำนวน 20 ไอโซเลท เอนไซม์เซลลูเลส 12 ไอโซเลท (Table 1) สำหรับการศึกษาการสร้างสารประกอบอินทรีย์ระเหย พบว่าทุกไอโซเลทมีความสามารถในการสร้างสารประกอบอินทรีย์ระเหยและพบกิจกรรมในการยับยั้งราสาเหตุโรคพืชทุกชนิดที่ทำการทดสอบ (Table 1) ไอโซเลทที่พบกิจกรรมของสารประกอบอินทรีย์ระเหยในการยับยั้งรา SR, CG และ FO สูงที่สุดคือ P5-29 (88.2%), P12-14 (84.7%) และ SP18 (45%) ตามลำดับ ผลแสดง

ใน Fig. 4 และ Table 1 โดย P12-14 คือ *Bacillus safensis* (ความเหมือน 99.87%) และ SP18 คือ *B. safensis* (ความเหมือน 99.86%) จากการระบุชนิดโดยการวิเคราะห์ลำดับเบสของยีน 16S rRNA (1465 bp.)

Table 1 Antifungal characteristics of 22 selected antagonistic bacteria

Isolate	Mycelial growth inhibition* (%)[a]			SD (SI)[b]	HCN[c]	enzyme activity by cell-free supernatant[d]				Volatile compounds activities (%)[a]		
	SR	CG	FO			P	C	Ch	G	SR	CG	FO
P5-29	75.2±2.20	69.3±1.53	54.2±1.20	1.2	+++	-	+	-	-	88.2	46.9	27.3
P7-18	76.0±0.67	67.9±1.27	63.7±0.92	2.0	++	+	+	-	-	70.0	36.5	22.5
P9-21	77.9±0.58	68.5±2.14	58.6±1.39	2.1	++	+	+	-	-	71.2	69.0	22.5
1-14	0	59.8±1.43	53.9±1.43	1.5	+	+	-	-	-	65.3	37.6	20.0
3-16/2	0	68.1±0.93	57.6±0.71	1.4	+	+	-	-	-	71.2	37.3	19.6
P4-10	0	60.0±1.18	56.8±1.23	1.5	+	+	-	-	-	80.0	65.5	34.1
P4-20	0	64.7±2.35	63.0±1.23	1.3	++	+	-	-	-	78.2	48.4	24.5
P6-18	0	61.0±0.27	55.6±2.14	1.6	++	+	-	-	-	66.5	38.3	27.3
P7-30	0	60.0±3.11	54.7±0.71	1.1	+	+	-	-	-	77.1	42.9	26.5
P11-3	0	64.3±0.68	58.8±0.71	1.0	+	+	-	-	-	75.3	56.3	29.4
P12-2	0	51.0±0.90	48.6±1.89	1.1	+	+	-	-	-	77.6	46.8	19.6
P12-4	0	61.6±1.89	57.6±3.77	1.2	+	+	-	-	-	75.6	63.9	21.4
P8-20	73.6±3.55	0	54.0±0.92	1.0	++	-	-	-	-	86.5	80.5	23.6
SP12	76.7±1.16	0	54.2±2.09	2.2	++	+	+	-	-	71.2	46.9	24.5
3-6/2	68.2±1.34	0	0	1.2	+	+	+	-	-	77.1	55.9	30.8
4-1	65.1±2.01	0	0	1.1	+	+	+	-	-	75.3	55.9	32.3
P1-15	68.2±0.67	0	0	1.7	+	+	+	-	-	62.9	53.5	23.1
P7-29	73.6±0.67	0	0	1.5	+	+	+	-	-	69.4	62.9	20.8
P10-25	70.7±0.89	0	0	1.1	+	+	+	-	-	63.5	58.5	23.1
P12-14	68.6±3.49	0	0	1.1	+	+	+	-	-	78.2	84.7	29.2
SP18	64.0±4.03	0	0	1.3	+	+	+	-	-	80.9	82.4	45.4
SP65	69.4±0.67	0	0	1.1	+	+	+	-	-	82.4	67.1	23.1

SD = siderophore production HCN = Hydrogen cyanide production

[a] I = [(C - T) / C] × 100, Where I = % Inhibition, C and T = radial growth (cm) of fungal mycelial in control and treatment, respectively. * The experiment was achieved by dual culture assay (obtained from three experiment)

[b] = Solubilization index (SI) = total diameter (colony + halo zone diameter)/colony diameter

[c] = + slight positive result, ++ strong positive result, +++ very strong positive result

[d] = P (Protease), C (cellulase), Ch (chitinase) and G (beta-1,3-glucanase), + positive result, - negative result

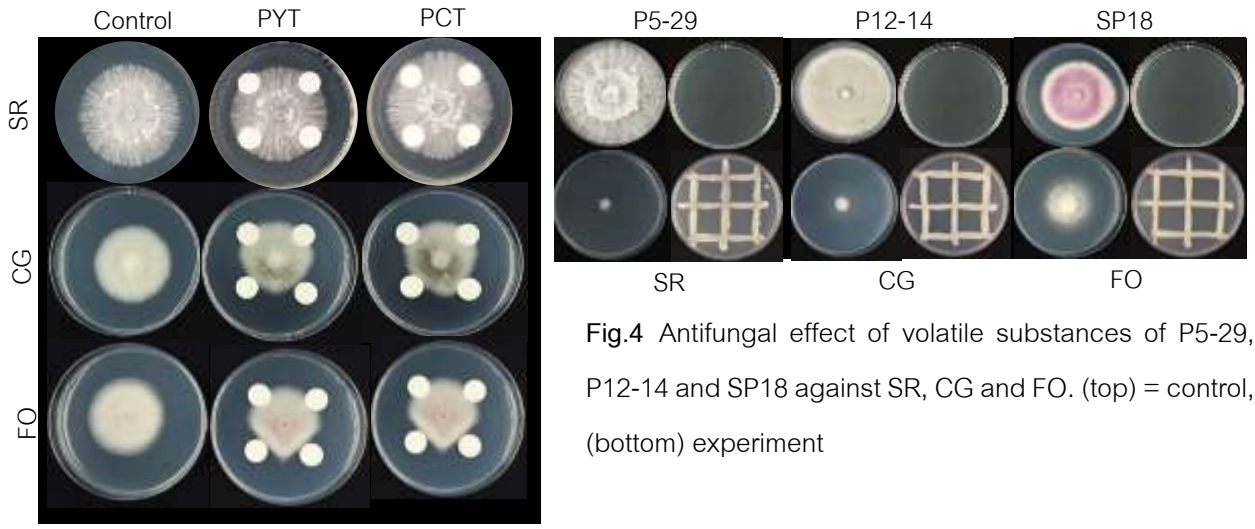


Fig.4 Antifungal effect of volatile substances of P5-29, P12-14 and SP18 against SR, CG and FO. (top) = control, (bottom) experiment

Fig.3 Antifungal activities of cell-free supernatant of P5-29 grown in PDB supplemented with 0.2% yeast extract and trace element (PYT) or 0.5% casamino acid and trace element (PCT)

สรุป

ผลการคัดเลือกแบคทีเรียทนเค็มที่เป็นแบคทีเรียปฏิปักษ์ต่อราก่อโรคในดิน ได้จำนวน 36 ไอโซเลท จาก 245 ไอโซแลท คิดเป็น 14.7% จากการศึกษาจำเพาะในการเป็นแบคทีเรียปฏิปักษ์ พบว่าแบคทีเรียที่คัดเลือกจำนวน 22 ไอโซเลท จาก 36 ไอโซเลท มีคุณสมบัติในการสร้างเอนไซม์ย่อยสลาย สร้างไซเดอโรฟอร์ และไฮโดรเจนไซยาไนด์ จากการศึกษาสารที่เกี่ยวข้องในการยับยั้ง พบว่าสารออกฤทธิ์ยับยั้งราก่อโรคในดินประเภทสารน้ำที่ตรวจพบกิจกรรมคือ เอนไซม์โปรติเอสและเซลลูเลส มีกิจกรรมในการยับยั้งรา CG และ FO และพบสารออกฤทธิ์ประเภทสารประกอบอินทรีย์ระเหย ที่ทดสอบและตรวจพบกิจกรรมคือ ไฮโดรเจนไซยาไนด์ สามารถยับยั้งราทั้ง 3 ชนิดได้ นอกจากนี้ยังพบความสามารถในการสร้าง IAA และการละลายฟอสเฟต ซึ่งเป็นคุณสมบัติในการส่งเสริมการเจริญของพืชอีกด้วย ผลการจัดจำแนกโดยการวิเคราะห์ลำดับเบสของยีน 16S rRNA ระบุว่าแบคทีเรียปฏิปักษ์ที่คัดเลือกได้ที่มีความสามารถในการยับยั้งราทดสอบได้ดีเป็นแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* (P5-29 และ P9-21), *Bacillus tequilensis* (P7-18) และ *Bacillus safensis* (P12-14 และ SP18) ผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงแบคทีเรียทนเค็ม กลุ่ม *Bacillus* ที่มีความหลากหลายที่พบในดิน เป็นกลุ่มทรัพยากรจุลินทรีย์ที่เป็นแบคทีเรียปฏิปักษ์ต่อราก่อโรคในดิน ซึ่งสามารถนำมาพัฒนาเพื่อการประยุกต์ใช้ควบคุมโรคราก่อโรคพืชต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการทำกิจกรรมส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัยประเภททุนบัณฑิตศึกษาจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประจำปี 2560

เอกสารอ้างอิง

Bakker, W. A. and B. Schippers. 1987. Microbial cyanide production in the rhizosphere in relation to potato yield reduction and *Pseudomonas* SPP-mediated plant growth-stimulation. **Soil Biology and Biochemistry**. 19 (4): 451-457.

Berg, G., A. Krechel, M. Ditz, R. A. Sikora and J. Hallmann. 2005. Endophytic and ectophytic potato-associated bacterial communities differ in structure and antagonistic function against plant pathogenic fungi. **FEMS Microbiology Ecology**. 51: 215-229.

Dinesh, R., M. Anandarai, A. Kumar, Y. KundilBini, K.P. Subila and R. Aravind. 2015. Isolation, characterization, and evaluation of multi-trait plant growth promoting rhizobacteria for their growth promoting and disease suppressing effects on ginger. **Microbiological Research**. 173: 34-43.

Glick, R.B. 2012. Plant growth-promoting bacteria: mechanisms and applications. **Scientifica**. 1-15.

Miranda, S.P., N. Cabirol, T.R. George, LS. R. Zamudio, F.J. Fernández. 2007. O-CAS, a fast and universal method for siderophore detection. **Journal of Microbiological Methods**. 70(1): 127-31.

Sabina, Z., S. Usmani, B.R. Singh, and J. Musarrat. 2006. Significance of *Bacillus subtilis* strain SJ-101 as a bioinoculant for concurrent plant growth promotion and nickel accumulation in *Brassica juncea*. **Chemosphere**. 64, 991-997.

Siddikee, M.A., P.S. Chauhan, R. Anandham, G.H. Han, and T. Sa. 2010. Isolation, Characterization, and Use for Plant Growth Promotion Under Salt Stress, of ACC Deaminase-Producing Halotolerant Bacteria Derived from Coastal Soil. **Journal of Microbiology and Biotechnology**. 20(11), 1577–1584

Solon, A.G. and P.W. Robert. 1951. Colorimetric estimation of indoleacetic acid. **Plant Physiology**. 26 (1): 192–195.

Steven, T.K., S.V. Krishna and D.R. Michael. 2003. Vegetable diseases caused by soilborne pathogens. **ANR Publication**: 1-13.

Wan, M., G. Li, J. Zhang, D. Jiang and H.C. Huang. 2008. Effect of volatile substances of *Streptomyces platensis* F-1 on control of plant fungal diseases. **Biological Control**. 46(3): 552-559.

Zouari, I., L. Jlaiel, S. Tounsi and M. Trigui. 2016. Biocontrol activity of the endophytic *Bacillus amyloliquefaciens* strain CEIZ-11 against *Pythium aphanidermatum* and purification of its bioactive compounds. **Biological Control**. 100: 54-62.

การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตเห็ดฟาง ด้วยการใช้แบคทีเรียสร้างสปอร์

Increasing Efficiency of Straw Mushroom Production by Using Endospore Forming Bacteria

พีรพัฒน์ ดวงสร้อยทอง[1] สุรางค์ สุธิราวุธ[1] อัจฉรา พยัพพานนท์[2] และ เยาวภา อร่ามศิริรุจิเวทย์[1*]

Peeraphat Doungsoitong[1], Surang Suthirawut[1], Ahchara Payapanon[2] and Yaovapa Aramsirirujiwet[1*]

บทคัดย่อ

การทดลองนี้ใช้แบคทีเรีย *Bacillus subtilis* สายพันธุ์ BC05 ที่คัดแยกมาจากวัสดุเพาะเห็ดฟาง จากการทดลองของสุนีย์ (2557) โดยนำเชื้อแบคทีเรียมาเลี้ยงแบบเขย่าในอาหาร nutrient broth เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นับปริมาณเซลล์ได้ 10^6-10^7 หน่วยโคโลนี/มิลลิลิตร ฉีดพ่นแบคทีเรียลงบนวัสดุเพาะเห็ดฟางปริมาตร 250 มิลลิลิตร ต่อพื้นที่เพาะเห็ด 1 ตารางเมตร โดยวางแผนการทดลองแบบ Randomized Complete Block Design; *RCBD* และมีกรรมวิธีควบคุมคือไม่ได้ใส่แบคทีเรีย พบว่าการฉีดพ่นด้วยแบคทีเรียสายพันธุ์ BC05 ให้ผลผลิตเห็ดฟางมากกว่ากรรมวิธีควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยช่องการทดสอบที่ฉีดพ่นแบคทีเรียให้ผลผลิตเห็ดฟางเฉลี่ย 2.32 กิโลกรัม/ตารางเมตร มากกว่าช่องการทดสอบในกรรมวิธีควบคุมที่ให้ผลผลิตเห็ดฟางเฉลี่ย 1.74 กิโลกรัม/ตารางเมตร จึงนำแบคทีเรียสายพันธุ์ BC05 มาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์รูปแบบแห้งโดยใช้ทัลคัมเป็นวัสดุยึดเกาะ นำผลิตภัณฑ์ผงแห้งมาเพิ่มจำนวนเซลล์ โดยใส่ในนมถั่วเหลืองและบ่ม 24 ชั่วโมง ก่อนนำมาผสมน้ำและฉีดพ่นบนวัสดุเพาะเห็ดฟาง พบว่าผลผลิตเห็ดฟางจากช่องการทดสอบที่ฉีดพ่นแบคทีเรียมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับผลผลิตเห็ดฟางจากช่องการทดสอบในกรรมวิธีควบคุม

ABSTRACT

Bacillus subtilis BC05 which was isolated from straw mushroom substrate (Sunee, 2014) was used in this research. The bacteria were cultivated in nutrient broth and shook for 24 hours which gave bacteria cells about 10^6- 10^7 cfu/ml. The bacteria suspension 250 ml per 1 square meter was spayed on straw mushroom substrate. In terms of the experiment's design, Randomized Complete Block Design (RCBD) was applied in this research and compared the straw mushroom yield by using treatment and control methods. The result shown that there were significant differences in the straw mushroom yield by those two methods at the 0.05 level of significance which the treatment provided straw mushroom yield 2.32 kilogram per square meter of the substrate used which more than the yield got from control, 1.74 kilogram per square meter of the substrate used. Moreover, the bacteria were created to powder product in this research by using talcum as adhesives and tested for their ability to increase mushroom yield in the mushroom house. By mixing the powder product with soy milk and incubated for 24 hours. Then, diluted with water before spraying on the straw mushroom substrate. The results presented that there was no significant difference ($p > 0.05$) of the straw mushroom yield between bacteria spraying treatment and control.

Key Words: straw mushroom, endospore forming Bacteria, competitive fungi

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

[1]ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

[2]กลุ่มวิจัยและพัฒนาเห็ด สำนักวิจัยพัฒนาเทคโนโลยีชีวภาพ

คำนำ

ในปัจจุบันการเพาะเห็ดฟางในประเทศไทยมีวิธีการเพาะที่หลากหลาย ตั้งแต่การเพาะเห็ดฟางในตะกร้า การเพาะเห็ดฟางกองเตี้ย และการเพาะเห็ดฟางโรงเรือน ซึ่งวัสดุเพาะเห็ดฟางที่เกษตรกรผู้เพาะเห็ดฟางนิยมใช้มีหลายชนิด เช่น การเพาะเห็ดฟางด้วยขี้ฝ้ายหมักปูพื้นด้วยฟางข้าว การเพาะเห็ดฟางด้วยทะลายปาล์ม การเพาะเห็ดฟางด้วยกากมันสำปะหลัง เป็นต้น ทั้งนี้ในการเพาะเห็ดฟางในวิธีต่างๆ ปัญหาที่เกษตรกรผู้เพาะเห็ดฟางมักพบเจอก็คือ ปัญหาเชื้อราแข่งขันบนวัสดุเพาะเห็ด เชื้อราแข่งขันเหล่านี้ติดมาจากวัสดุเพาะเห็ดฟางซึ่งในขั้นตอนการอบไอน้ำฆ่าเชื้อในวัสดุเพาะเห็ด ในการเพาะเห็ดแบบโรงเรือนอาจมีบางครั้งที่อุณหภูมิที่ใช้ในการฆ่าเชื้อไม่สูงพอที่จะกำจัดเชื้อในวัสดุเพาะเห็ดได้ หรือเวลาที่ใช้ในการอบไอน้ำฆ่าเชื้อไม่นานพอ ก็จะทำให้มีเชื้อราแข่งขันหลงเหลืออยู่ในวัสดุเพาะได้ หลังจากที่ใส่หัวเชื้อเห็ดฟางบนวัสดุเพาะแล้ว เชื้อราแข่งขันเหล่านี้ก็จะแย่งอาหารและยับยั้งการเจริญเส้นใยของเห็ดฟางและส่งผลให้ผลผลิตเห็ดฟางตกต่ำลง หรือหากมีการจัดการบริหารความสะอาดรอบๆ โรงเรือนเพาะเห็ดไม่ดีพอ เชื้อราในบริเวณรอบๆก็อาจจะระบาดในโรงเรือนเพาะเห็ดได้

บุษบา (2542) รายงานสาเหตุของเชื้อราก่อโรคในเห็ดฟาง เช่น *Sclerotium rolfsii* ซึ่งก่อให้เกิดโรคราเม็ดผักกาดบนดอกเห็ดฟาง นอกจากนี้ยังมีโรคราเขียวที่เกิดจากราเขียว ได้แก่ *Trichoderma* และ *Gliocladium* ซึ่งจะมีสีเขียวอ่อนหรือเขียวเข้ม ราเขียว *Penicillium* มีสีเขียวอมเทา ที่เจริญจากขี้ฝ้ายหรือฟางข้าวซึ่งเจริญแข่งขันกับเชื้อเห็ดฟาง ทำลายดอกเห็ดอ่อนๆ ทำให้ผลผลิตของเห็ดตกต่ำลง

Payapanon *et al*. (2010) รายงานการใช้ *Bacillus subtilis* B2 และ *Paenibacillus polymyxa* N10 ที่แยกได้จากแหล่งเพาะเห็ดฟาง และจากเปลือกปอสาตามลำดับ มาฉีดพ่นบนวัสดุเพาะเห็ดฟาง พบว่าแบคทีเรียสามารถยับยั้งเชื้อราแข่งขัน และเป็นการช่วยเพิ่มสารอาหารให้กับเส้นใยเห็ดฟาง ส่งผลให้ผลผลิตเห็ดฟางเพิ่มขึ้นได้ นิพนธ์ (2538) กล่าวว่าปัจจุบันมีการนำเชื้อจุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพในการควบคุมโรคพืช หรือเชื้อจุลินทรีย์ปฏิปักษ์ มาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ออกขายในรูปแบบต่างๆ เพื่อให้เกษตรกรสามารถนำไปใช้ได้สะดวกและง่ายต่อการเก็บรักษา เช่น การผลิตในรูปแบบน้ำ แบบผง เป็นต้น การศึกษาครั้งนี้ เป็นการนำเชื้อ *Bacillus subtilis* BC05 มาทดสอบหาความสามารถในการเพิ่มผลผลิตเห็ดฟางในโรงเรือน รวมไปถึงการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์แห้งให้สะดวกในการใช้งานและเก็บรักษาโดยใช้ทัลคัมเป็นวัสดุยึดเกาะ ซึ่งการใช้แบคทีเรียสร้างสปอร์ในการยับยั้งเชื้อราแข่งขันนี้เป็นวิธีทางชีวภาพที่ปลอดภัยกับผู้ใช้งานกว่าการใช้สารเคมีอีกด้วย

วิธีการทดลอง

1. แบคทีเรียที่ใช้ในการศึกษา

เชื้อแบคทีเรียสร้างสปอร์ *Bacillus subtilis* สายพันธุ์ BC05

ได้มาจากงานวิจัยของสุนีย์ (2557) โดยคัดแยกมาจากวัสดุเพาะเห็ดฟาง ซึ่งเมื่อนำมาทดสอบความสามารถในการยับยั้งการเจริญของเชื้อราแข่งขันในโรงเพาะเห็ดและเชื้อราสาเหตุโรคพืช ด้วยวิธี Dual culture บนอาหาร PDA (Potato dextrose agar) พบว่าสามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อราแข่งขันได้ดี

2. การเตรียมแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* สายพันธุ์ BC05 ใน nutrient broth เพื่อใช้ทดสอบประสิทธิภาพต่อการเพิ่มผลผลิตเห็ดฟางในโรงเรือน

เตรียมเชื้อแบคทีเรียทดสอบโดยนำเชื้อแบคทีเรียมาเพาะเลี้ยงบนอาหารเลี้ยงเชื้อ nutrient agar นำไปบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ถ่ายเชื้อแบคทีเรียทดสอบ จำนวน 1 loop ลงในอาหารเลี้ยงเชื้อ nutrient broth ปริมาตร 100 มิลลิลิตร นำไปเขย่าที่ความเร็ว 130 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นถ่ายเชื้อปริมาตร 10 มิลลิลิตร ใส่ลงใน flask ขนาด 500 มิลลิลิตร ที่บรรจุอาหาร nutrient broth ปริมาตร 200 มิลลิลิตร และนำไปเขย่า ที่ความเร็ว 130 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3. การทดสอบประสิทธิภาพของแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* สายพันธุ์ BC05 ใน nutrient broth ต่อการเพิ่มผลผลิตเห็ดฟางในโรงเรือน

ทำการทดสอบในโรงเพาะเห็ดฟาง มีชั้นเพาะเห็ดจำนวน 3 แถว แบ่งออกเป็นแถวละ 4 ชั้นย่อย แต่ละชั้นย่อยมีขนาด 0.8x6 ตารางเมตร โดยทำการจัดแบ่งช่อง ดังนี้ ชั้นเพาะมีขนาด 0.8x6 ตารางเมตร กั้นแบ่งด้วยฟิวเจอร์บอร์ด 6 ช่อง แต่ละช่องจะมีขนาด 0.8x1 ตารางเมตร กำหนดช่องทดสอบโดยการสุ่มภายในบล็อกสมบูรณ์ Randomized Complete Block Design; *RCBD* ฉีดพ่นแบคทีเรียทดสอบในอาหารเลี้ยงเชื้อ nutrient broth 250 มิลลิลิตรต่อตารางเมตรลงบนวัสดุเพาะเห็ดฟางโดยมีกรรมวิธีควบคุมคือไม่ได้ฉีดพ่นแบคทีเรีย แล้วจึงใส่หัวเชื้อเห็ดฟางลงบนวัสดุเพาะเห็ดฟาง จากนั้นดำเนินขั้นตอนเพาะเห็ดฟางจนได้ผลผลิต เก็บเกี่ยวผลผลิตและบันทึกน้ำหนักผลผลิตเห็ดฟางต่อช่องเพื่อวิเคราะห์ผล และประเมินความแตกต่างระหว่างผลผลิตเห็ดฟางจากช่องการทดลองที่ฉีดพ่นแบคทีเรีย และไม่ได้ฉีดพ่นแบคทีเรีย ด้วยโปรแกรม SXW 8.0 ตามวิธีของ Sipio et al. 2017 และ Channa et al. 2017

4. การพัฒนาแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* สายพันธุ์ BC05 เป็นผลิตภัณฑ์ที่ใช้ทัลคัมเป็นวัสดุยึดเกาะ

เลี้ยงเชื้อแบคทีเรียในอาหารเลี้ยงเชื้อ nutrient broth บนเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 130 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นเติมสารละลาย 10% $MgSO_4.7H_2O$ 0.1M และ 10% methyl cellulose พักไว้ 20 นาที แล้วผสมกับวัสดุยึดเกาะทัลคัมที่นึ่งฆ่าเชื้อแล้วในอัตราส่วน 1:2 โดยปริมาตรต่อน้ำหนัก ผสมให้เข้ากันดีก่อนนำมาอบในตู้อบแห้ง บดให้ละเอียดด้วยเครื่องปั่นละเอียดแล้วเก็บไว้ในถุงพลาสติกเพื่อนำมาทำการทดสอบต่อไป (บูรณี, 2555) จากนั้นทำการตรวจปริมาณแบคทีเรียที่มีชีวิตรอดในผลิตภัณฑ์แบคทีเรีย โดยนำผลิตภัณฑ์แบคทีเรีย *Bacillus subtilis* สายพันธุ์ BC05 ที่ใช้ทัลคัมเป็นวัสดุยึดเกาะจำนวน 1 กรัม มาตรวจนับปริมาณแบคทีเรีย ด้วยวิธี dilution plate count บนอาหาร nutrient agar บ่มเชื้อที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง แล้วตรวจนับแบคทีเรียที่เจริญบนผิวหน้าอาหาร

5. การทดสอบประสิทธิภาพของแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* สายพันธุ์ BC05 ในผลิตภัณฑ์ที่ใช้ทัลคัมเป็นวัสดุยึดเกาะ ต่อการเพิ่มผลผลิตเห็ดฟางในโรงเรือน

นำผลิตภัณฑ์ผงทัลคัม 14 กรัม ใส่ในนมถั่วเหลือง 1 กล่อง (250 มิลลิลิตร) บ่มทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง เพื่อใช้เป็นหัวเชื้อ จากนั้นผสมน้ำ 250 มิลลิลิตร ก่อนนำไปฉีดพ่นลงบนวัสดุเพาะเห็ด ในปริมาณ 250 มิลลิลิตรต่อตารางเมตร ลงบนวัสดุเพาะเห็ดฟางโดยมีกรรมวิธีควบคุมคือไม่ได้ฉีดพ่นแบคทีเรีย แล้วจึงใส่หัวเชื้อเห็ดฟางลงบนวัสดุเพาะเห็ดฟาง วางแผนการทดลองแบบสุ่มภายในบล็อกสมบูรณ์ Randomized Complete Block Design; *RCBD* แบ่งกั้นวัสดุเพาะให้แยกกันด้วยแผ่นฟิวเจอร์บอร์ด เช่นเดียวกับการทดลองก่อนหน้านี้

และประเมินความแตกต่างระหว่างผลผลิตเห็ดฟางจากช่องการทดลองที่ฉีดพ่นแบคทีเรีย และไม่ได้ฉีดพ่นแบคทีเรีย ด้วยโปรแกรม SXW 8.0 ตามวิธีของ Sipio et al. 2017 และ Channa et al. 2017

6. การศึกษาระยะเวลาการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์แบคทีเรีย *Bacillus subtilis* สายพันธุ์ BC05 ที่ใช้ทัลคัมเป็นวัสดุยึดเกาะ

นำผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง (27-30 องศาเซลเซียส) และทำการตรวจนับปริมาณแบคทีเรียที่มีชีวิตรอดในผลิตภัณฑ์ที่แบ่งเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องทุก 1 เดือน

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. การเตรียมแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* สายพันธุ์ BC05 ใน nutrient broth เพื่อใช้ทดสอบประสิทธิภาพต่อการเพิ่มผลผลิตเห็ดฟางในโรงเรือน

เมื่อเตรียมเชื้อแบคทีเรียทดสอบใน nutrient broth ปริมาณ 200 มิลลิลิตร นำไปตรวจนับปริมาณเซลล์แบคทีเรีย โดยนำมาตรวจนับปริมาณแบคทีเรียด้วยวิธี dilution plate count บนอาหาร NA พบว่าปริมาณแบคทีเรียทดสอบใน nutrient broth ในการทดลองที่ 1, 2 และ 3 คือ 3.43×10^6, 9.48×10^5 และ 2.27×10^7 หน่วยโคโลนี/มิลลิลิตร ตามลำดับ

2. การทดสอบประสิทธิภาพของแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* สายพันธุ์ BC05 ใน nutrient broth ต่อการเพิ่มผลผลิตเห็ดฟางในโรงเรือน

ทำการฉีดพ่นแบคทีเรียทดสอบในอาหารเลี้ยงเชื้อ nutrient broth 250 มิลลิลิตรต่อช่องลงบนวัสดุเพาะเห็ดฟางโดยมีกรรมวิธีควบคุมคือไม่ได้ฉีดพ่นแบคทีเรีย พบว่ามีปริมาณแบคทีเรียทดสอบใน nutrient broth ในการทดสอบที่ 1, 2 และ 3 คือ 3.43×10^6, 9.48×10^5 และ 2.27×10^7 หน่วยโคโลนี/มิลลิลิตร ตามลำดับ

โดยในการทดสอบครั้งที่ 1, 2 และ 3 ผลผลิตของเห็ดฟางที่ได้จากการฉีดพ่นแบคทีเรียที่อยู่ในอาหาร nutrient broth ลงบนวัสดุเพาะเห็ดฟาง ให้ผลผลิตดอกเห็ดฟาง 0.93 , 2.01 และ 2.32 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าการไม่ฉีดพ่นแบคทีเรีย (control) โดยให้ผลผลิตดอกเห็ดฟาง 0.88, 1.92 และ 1.74 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ตามลำดับ และเมื่อนำมาวิเคราะห์ทางสถิติด้วยโปรแกรม SXW 8.0 พบว่าผลผลิตดอกเห็ดฟางระหว่างช่องที่ฉีดพ่นแบคทีเรียและไม่ฉีดพ่นแบคทีเรียในการทดสอบครั้งที่ 1 และ 2 มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ และในการทดลองที่ 3 พบว่าผลผลิตดอกเห็ดฟางระหว่างช่องที่ฉีดพ่นแบคทีเรียและไม่ฉีดพ่นแบคทีเรียมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

Table 1 Yield of fresh straw mushroom in the mushroom farm compared between spraying bacteria in nutrient broth and control method.

Treatment	Yield of fresh mushroom(kg) per square meter of the substrate used. [a]		
Number of testing	1 May 2016	2 August 2016	3 August 2016
Control	0.88 a	1.92 a	1.74 b
Nutrient broth + *B. subtilis* BC05	0.93 a	2.01 a	2.32 a
C.V. (%)[b]	2.8	2.8	2.8

[a] Mean followed by a common letter are not significantly different at 5% level by CRD.

[b] Coefficient of variation

3. การพัฒนาแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* สายพันธุ์ BC05 เป็นผลิตภัณฑ์ที่ใช้ทัลคัมเป็นวัสดุยึดเกาะ

การพัฒนาแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* สายพันธุ์ BC05 เป็นผลิตภัณฑ์ที่ใช้ทัลคัมเป็นวัสดุยึดเกาะ โดยเพิ่มปริมาณแบคทีเรียในอาหารเหลว nutrient broth ผสมสารละลาย 10% $MgSO_4.7H_2O$ 0.1M และ 10% methyl cellulose แล้วผสมกับวัสดุยึดเกาะทัลคัมในอัตราส่วน 1:2 โดยปริมาตรต่อน้ำหนัก ก่อนนำมาอบในตู้อบแห้ง บดให้ละเอียดด้วยเครื่องปั่นละเอียด นำมาตรวจนับปริมาณเซลล์แบคทีเรียที่มีชีวิตรอดในผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ โดยนำผลิตภัณฑ์ 1 กรัม มาตรวจนับปริมาณแบคทีเรียด้วยวิธี dilution plate count บนอาหาร nutrient agar พบว่าปริมาณแบคทีเรียที่มีชีวิตรอดในผลิตภัณฑ์ที่ใช้ทัลคัมเป็นวัสดุยึดเกาะ ที่เตรียมจากอาหาร nutrient broth คือ $2x10^7$ หน่วยโคโลนี/กรัม

4. การทดสอบประสิทธิภาพของแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* สายพันธุ์ BC05 ในผลิตภัณฑ์ที่ใช้ทัลคัมเป็นวัสดุยึดเกาะ ต่อการเพิ่มผลผลิตเห็ดฟางในโรงเรือน

เมื่อนำผลิตภัณฑ์ 14 กรัม ใส่ในนมถั่วเหลือง 250 มิลลิลิตร บ่มทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง เพื่อใช้เป็นหัวเชื้อ จากนั้นผสมน้ำ 250 มิลลิลิตร ก่อนนำไปฉีดพ่นลงบนวัสดุเพาะเห็ด ในปริมาณ 250 มิลลิลิตรต่อตารางเมตรลงบนวัสดุเพาะเห็ดฟางโดยมีกรรมวิธีควบคุมคือไม่ได้ฉีดพ่นแบคทีเรีย พบว่ามีปริมาณแบคทีเรียทดสอบในนมถั่วเหลืองในการทดสอบที่ 4, 5 และ 6 คือ $4.6x10^7$, $7.46x10^7$ และ $1.7x10^8$ หน่วยโคโลนี/มิลลิลิตร ตามลำดับ

โดยในการทดสอบครั้งที่ 4 และ 5 ผลผลิตของเห็ดฟางที่ได้จากการฉีดพ่นแบคทีเรียจากผลิตภัณฑ์ทัลคัมในนมถั่วเหลืองลงบนวัสดุเพาะเห็ดฟาง ให้ผลผลิตดอกเห็ดฟาง 1.24 และ 0.9 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าการไม่ฉีดพ่นแบคทีเรีย (control) โดยให้ผลผลิตดอกเห็ดฟาง 1.16 และ 0.82 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ตามลำดับ และในการทดลองที่ 6 พบว่าผลผลิตของเห็ดฟางที่ไม่ฉีดพ่นแบคทีเรีย (control) ให้ผลผลิตดอกเห็ดฟาง 1.67 กิโลกรัมต่อตารางเมตร มากกว่าผลผลิตของเห็ดฟางที่ได้จากการฉีดพ่นแบคทีเรียจากผลิตภัณฑ์ทัลคัมในนมถั่วเหลืองเล็กน้อย ซึ่งให้ผลผลิตดอกเห็ดฟาง 1.65 กิโลกรัมต่อตารางเมตร และเมื่อนำมาวิเคราะห์ทางสถิติด้วยโปรแกรม SXW 8.0 พบว่าผลผลิตดอกเห็ดฟางระหว่างช่องที่ฉีดพ่นแบคทีเรียและไม่ฉีดพ่นแบคทีเรียในการทดสอบครั้งที่ 4, 5 และ 6 แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ

Table 2 Yield of fresh straw mushroom in the mushroom farm compared between spraying bacteria in talcum powder and control method.

Treatment	Yield of fresh mushroom(kg) per square meter of the substrate used.[a]		
Number of testing	4 September 2016	5 October 2016	6 November 2016
Control	1.16 a	0.82 a	1.67 a
Talcum powder + *B. subtilis* BC05	1.24 a	0.90 a	1.65 a
C.V. (%)[b]	2.93	2.93	2.93

[a] Mean followed by a common letter are not significantly different at 5% level by CRD.

[b] Coefficient of variation

5. การศึกษาระยะเวลาการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์แบคทีเรีย *Bacillus subtilis* สายพันธุ์ BC05 ที่ใช้ทัลคัมเป็นวัสดุยึดเกาะ

ทำการตรวจนับปริมาณแบคทีเรียที่มีชีวิตรอดในผลิตภัณฑ์ที่แบ่งเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องทุก 1 เดือน ผลการทดลองพบว่า ผลิตภัณฑ์ของแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* สายพันธุ์ BC05 ที่ใช้ทัลคัมเป็นวัสดุยึดเกาะสามารถมีชีวิตอยู่รอดได้เป็นเวลา 5 เดือนโดยที่ไม่พบการลดลงของปริมาณแบคทีเรียในผลิตภัณฑ์ในระยะเวลา 5 เดือนนี้ โดยเริ่มต้นตรวจนับปริมาณแบคทีเรียได้ $2x10^7$ หน่วยโคโลนี/กรัม และเดือนที่ 5 ตรวจนับปริมาณแบคทีเรียได้ $2.6x10^7$ หน่วยโคโลนี/กรัม (Table 3)

Table 3 shows quantity of survival bacteria in the product of *Bacillus subtilis* BC05 that used Talcum as an adhesive (Classifying by the number of months).

Number of months	0*	1	2	3	4	5
Number of bacteria (CFU)	$2x10^7$	$1.6x10^7$	$1.8x10^7$	$1.1x10^7$	$2.5x10^7$	$2.6x10^7$

0* refer to the quantity of initial bacteria

สรุป

จากการทดสอบประสิทธิภาพของเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* สายพันธุ์ BC05 ใน nutrient broth ต่อการเพิ่มผลผลิตเห็ดฟาง พบว่าในการทดสอบครั้งที่ 1, 2 และ 3 ช่องการทดสอบฉีดพ่นแบคทีเรียให้ผลผลิตเห็ดฟางมากกว่าช่องที่ไม่ได้ฉีดพ่นแบคทีเรีย และเมื่อวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติระหว่างผลผลิตเห็ดฟางจากช่องการทดลองที่ฉีดพ่นแบคทีเรีย และไม่ได้ฉีดพ่นแบคทีเรีย ด้วยโปรแกรม SXW 8.0 พบว่า ในการทดสอบครั้งที่ 1 และ 2 เมื่อเปรียบเทียบผลผลิตเห็ดฟางจากช่องการทดสอบที่ฉีดพ่นแบคทีเรียและไม่ฉีดพ่นแบคทีเรีย พบว่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 แต่ในการทดสอบครั้งที่ 3 ช่องการทดสอบฉีดพ่นแบคทีเรียให้ผลผลิตเห็ดฟางมากกว่าช่องที่ไม่ได้ฉีดพ่นแบคทีเรียอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับ 0.05 สอดคล้องกับงานวิจัยของ Payapanon et al. (2011) ซึ่งพบว่าการใช้แบคทีเรีย *B. subtilis* สายพันธุ์ B2 ที่เลี้ยงในอาหาร nutrient broth แล้วฉีดพ่นลงวัสดุเพาะเห็ดฟางสามารถควบคุมเชื้อราแข่งขันของเห็ดฟางได้และช่วยให้ผลผลิตเห็ดฟางสูงกว่ากรรมวิธีควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

การพัฒนาผลิตภัณฑ์เชื้อแบคทีเรียในวัสดุยึดเกาะทัลคัม เป็นการช่วยให้เกษตรกรสามารถนำไปใช้งานได้ง่าย และสะดวกต่อการเก็บรักษา ซึ่งในการทดสอบระยะเวลาการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ที่ใช้ทัลคัมเป็นวัสดุยึดเกาะ พบว่าเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 เดือน ไม่พบการลดลงของปริมาณแบคทีเรียในผลิตภัณฑ์ที่ใช้ทัลคัมเป็นวัสดุยึดเกาะ และ Payapanon et al. (2011) ได้ใช้เชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* เพิ่มจำนวนในนมถั่วเหลืองแล้วใช้ฉีดพ่นเพื่อควบคุมเชื้อราแข่งขันของเห็ดได้ ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองนี้ที่นำผลิตภัณฑ์แบคทีเรียมาเพิ่มปริมาณเซลล์ในนมถั่วเหลืองก่อนนำมาผสมน้ำ แล้วนำมาทดสอบโดยการนำไปฉีดพ่นลงบนวัสดุเพาะเห็ด

เปรียบเทียบกับ ช่องการทดสอบที่ไม่ได้ฉีดพ่นแบคทีเรีย การทดสอบครั้งที่ 4 และ 5 ช่องการทดสอบที่ฉีดพ่นแบคทีเรียให้ผลผลิตเห็ดฟางมากกว่าช่องการทดสอบที่ไม่ได้ฉีดพ่นแบคทีเรีย และในการทดสอบที่ 6 ช่องการทดสอบที่ไม่ได้ฉีดพ่นแบคทีเรียให้ผลผลิตเห็ดฟางมากกว่าช่องการทดสอบที่ฉีดพ่นแบคทีเรีย โดยในการทดลองครั้งที่ 4 5 และ 6 เมื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์พบว่า ผลผลิตเห็ดฟางจากช่องการทดสอบที่ฉีดพ่นแบคทีเรียและช่องการทดสอบที่ไม่ได้ฉีดพ่นแบคทีเรีย มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ทั้งนี้หลังจากแจกจ่ายผลิตภัณฑ์เชื้อแบคทีเรียในวัสดุยึดเกาะทัลคัมให้เกษตรกรผู้เพาะเห็ดฟางทดลองใช้ เกษตรกรผู้เพาะเห็ดฟางให้ข้อมูลกลับมาว่าตัวผลิตภัณฑ์ใช้ง่าย พบราแข่งขัน เช่นราเขียว ลดลง แต่หลังจากฉีดพ่นแล้วพบคราบสีขาวจากผงแป้งทัลคัมบนวัสดุเพาะเห็ดฟาง ซึ่งน่าจะมีการศึกษาในเรื่องหาวัสดุยึดเกาะชนิดอื่นที่มีความสามารถในการละลายน้ำเพื่อไม่ให้เกิดคราบแป้งบนวัสดุเพาะเห็ดฟาง และศึกษาการลดปริมาณเชื้อราแข่งขันในโรงเพาะเห็ดฟางในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติที่สนับสนุนทุนในงานวิจัย ขอขอบคุณทุน Innovation Hub – Food & Agriculture: Translational Research:PRE-SEED FUND มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ขอขอบคุณ คุณลุงจรัญ เฉลิมพร เกษตรกรเพาะเห็ดฟางจังหวัดพระนครศรีอยุธยาที่เอื้อเฟื้อโรงเพาะเห็ดฟาง เพื่อใช้ในการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

เทวินทร์ กุลปิยะวัฒน์, อัจฉรา พยัพพานนท์, มานิตา คงชื่นสิน, พิเชฐ เชาวน์วัฒนวงศ์ และ พลอยชมพู กรวิภาสเรือง. 2552, น. 69-73. การสำรวจการใช้สารป้องกันกำจัดศัตรูพืชในเห็ดที่ผลิตเป็นการค้า. *ใน* **เห็ดไทย 2552**. สมาคมนักวิจัยและเพาะพันธุ์เห็ดแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.

นิพนธ์ ทวีชัย. 2538. งานวิจัยในปัจจุบันด้านการใช้เชื้อแบคทีเรียบางชนิดควบคุมโรคพืชโดยชีววิธี, น.120-145. *ใน* **เชื้อจุลินทรีย์ควบคุมศัตรูพืช**. สำนักกองทุนสนับสนุนการวิจัยและกรมวิชาการเกษตร, กรุงเทพฯ.

บุษบา ล้อประเสริฐ. 2542. **เห็ดฟาง**. ชมรมนักเพาะเห็ดแห่งประเทศไทย. เพื่อนเกษตร, กรุงเทพฯ.

บูรณี พั่ววงษ์แพทย์, ณัฏฐิมา โฆษิตเจริญกุล, ทิพวรรณ กันหาญาติ และ รุ่งนภา ทองเครั่ง. 2555, น. 842-850. **การพัฒนาผลิตภัณฑ์ *Bacillus subtilis* สายพันธุ์ DOA-WB4 แบบผงเพื่อควบคุมโรคเหี่ยวที่เกิดจากแบคทีเรียของมันฝรั่ง**. รายงานผลงานวิจัยประจำปี 2555. สำนักวิจัยพัฒนาการอารักขาพืช กรมวิชาการเกษตร, กรุงเทพฯ.

สุนีย์ คำพันธ์. 2557. **การคัดเลือกแบคทีเรียสร้างเอนโดสปอร์ที่มีศักยภาพ ในการเพิ่มผลผลิตเห็ดฟาง**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 176 หน้า.

อานนท์ เอื้อตระกูล. 2530. **การเพาะเห็ดฟางฉบับสมบูรณ์**. พิมพ์ครั้งที่ 2. แสงทวีการพิมพ์, กรุงเทพฯ.

Briones, G.L., P. Varoquaux, Y. Chambroy, J. Bouquant, G. Bureau, and B. Pascat. 1992. Storage of common mushroom under controlled atmospheres. **International of Journal Food Science and Technology**. 27: 493-505.

Burton, K.S., S. Sreenivasaprasad, T. Rama, C.E. Evered and A. MeGarry. 1995. Mushroom quality and senescence. pp. 687-693. *In* T. J. Elliott, ed. **Mushroom Science XIV Science and Culuvation of Edible Fungi**. Wellesbourne, UK.

Cho, K.Y., K. H. Yung, and S.T. Chang. 1982. Preservation of Cultivated Mushroom, pp. 63-86. *In* Chang S. T. and T. H. Quimio (eds.). **Tropical Mushroom: Biological Nature and Cultiva Method**, The Chinese University Press, Hong Kong.

Ferreira, J.H.S., F.N. Matther and A.C. Thomas. 1991. Biological control of *Euthypa lata* on grapevine by an antagonistic strain of *Bacillus subtilis.* **Phytopathology**. 81: 283-287.

McGarry, A. and K.S. Bonton. 1994. Mechanical properties of mushroom *Agaricus bisporus*. **Mycolological Research**. 98: 241-245.

Nalisha, I., M. Muskhazli and T. NorFarizan. 2006. Production of bioactive compounds by *Bacillus subtilis* against *Sclerotium rolfsii.* **Malaysian Journal of Microbiology**. 2(2):19-23.

Naveed Ali Channa, Imran Khatri, Fida Hussain Magsi, Maqsood Ahmed Chandio, Abdul Rasheed, Abid Ali Soomro and Shahid Hussain Lashari. 2017. Prevalence of insect pests of sunflower at Golarchi Badin Sindh, Pakistan. **International Journal of Fauna and Biological Studies 2017**. 4(5): 25-30.

Payapanon, A., S. Suthirawut, P. Roongrawee, T. Kulpiyawat and A. Somrith. 2010. To increase the straw mushroom yield with *Bacillus* sp. In the proceeding of 16th Asean Agricultural Symposium. **1thInternational on Agricultural Technology (Sufficiency Agriculture)**. 432-435. King Mongkut's Institue of Technology Ladkrabang.

Sheema Kanwal Sipio, Muhammad Ibrahim Kubar, Imran Khatri and Ashraf Ali Jamali. 2017. Oviposition response of lesser grain borer Rhyzopertha dominica (fabricius, 1792) (coleoptera: bostrichidae: dinoderinae) on various food grains. **Sci.Int. (Lahore)**. 29 (1), 263-265.

Tano, K., J. Arul, G. Doyon and F. Castaigne. 1999. Atmospheric composition and quality of fresh mushrooms in modified atmosphere packages as affected by storage temperature abuse. **Journal of Food Science**. 64, 1079-1077.

การพัฒนาวิธีวิเคราะห์ปริมาณก๊าซเรดอน-222 ในตัวอย่างน้ำบาดาล

Development Determination of Radionuclide Radon-222 in Groundwater

เฉลิมขวัญ ปิติโสภณางกูร[1*] และ ทัศนีย์ สายเงิน[1]

Chalermkwan Pitisobhananggul[1*] and Tussanee Saigern[1]

บทคัดย่อ

การตรวจวัดปริมาณกัมมันตภาพรังสีของก๊าซเรดอน-222 ในน้ำบาดาล โดยใช้วิธีการตรวจวัดกัมมันตภาพรังสีด้วยวิธีมาตรฐาน 2 วิธีคือ การตกตะกอนแบเรียมซัลเฟต ($BaSO_4$) นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดปริมาณรังสีแอลฟารวมชนิด Gas Flow Proportional Counter และการสกัดเรเดียมด้วยเรซินชนิดแมงกานีสไดออกไซด์ (MnO_2) เปรียบเทียบกับเรซินชนิดแคตอิออน (DOWEX 50WX8,H^+) นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดปริมาณรังสีแอลฟารวมชนิด Liquid Scintillation Counter โดยเลือกพื้นที่ภาคกลาง และพื้นที่ภาคเหนือ เก็บตัวอย่าง จากแหล่งชุมชนในช่วงฤดูร้อน และฤดูหนาว พบว่าในพื้นที่ภาคกลางปริมาณกัมมันตภาพก๊าซเรดอน-222 มีค่าเฉลี่ย 0.03 Bq/L และ MDC 0.002 Bq/L ตามลำดับ ด้วยวิธีเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบปริมาณกัมมันตภาพก๊าซเรดอน-222 ในน้ำบาดาลพื้นที่ภาคเหนือ เดือนมีนาคมและเดือนธันวาคม ค่าปริมาณกัมมันตภาพก๊าซเรดอน-222 มีค่าเฉลี่ย 0.01 Bq/L, 0.09 Bq/L และMDC 0.002 Bq/L ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบวิธีการตรวจวัดค่าปริมาณก๊าซเรดอน-222 ตามวิธีมาตรฐานทั้ง 2วิธี พบว่าเครื่องวัดปริมาณรังสีแอลฟารวม-บีตารวมชนิด Liquid Scintillation Counter มีประสิทธิภาพดีกว่า และจากการใช้วิธีการสกัดเรเดียมด้วยเรซิน ชนิด MnO_2 กับเรซินชนิด DOWEX 50WX8,H^+ พบว่าเวลาที่เหมาะสมจะเข้าสู่สมดุลของการเกิดก๊าซเรดอน-222 ที่เวลา 60 วัน เมื่อเปรียบเทียบการวิเคราะห์เรซินทั้ง 2 ชนิด ผลการวิเคราะห์ค่าปริมาณกัมมันตภาพก๊าซเรดอน-222 ในตัวอย่างน้ำบาดาลมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน การพัฒนาวิธีวิเคราะห์สามารถนำมายืนยันผลการวิเคราะห์ค่าปริมาณกัมมันตภาพก๊าซเรดอน-222 ในตัวอย่างน้ำบาดาล ได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ

ABSTRACT

The measurement of radioactivity of Radon-222 in groundwater measured by the difference type of two methods used. The first method sedimentation of Barium Sulphate ($BaSO_4$) ,was analyzed by Gas Flow Proportional Counter. The second method the extraction of Radium with resin Manganese Dioxide (MnO_2) compared with the extraction of Radium with resin Cation (DOWEX 50WX8,H^+) and used The Liquid Scintillation Counter for analysis. Then, select an area in Central Region and Northern Region. Sampling groundwater from community in summer and winter. The radioactivity of radon-222 in Central Region, we found that the average 0.03 Bq/L and MDC 0.002 Bq/L. Sampling in March and December, the radioactivity measurement of radon-222 the average 0.01 Bq/L, 0.09 Bq/L and MDC 0.002 Bq/L. Comparison the amount of radon -222 measurement by two standard methods. We found that the total dose of gross alpha-beta liquid scintillation counter was better efficiency. The extraction of radium with resin MnO_2 and DOWEX 50WX8,H^+. The appropriate time get into equilibrium of radon-222 about 60 day. The analysis compared the two types of resins, the analysis amount of radioactive radon-222 in groundwater samples and observed that the efficiency has been the most closely. Development of the method analysis can be confirmed the result of the radioactivity analysis of Radon-222 in groundwater correctly and accurately.

Key Words: groundwater, resin, gas flow proportional counter, liquid scintillation counter.

*Corresponding author; e-mail address: **chalermkwan.p@oap.go.th**

[1]สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ เลขที่ 16 ถ.วิภาวดีรังสิต ลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

[1]Office of Atoms for Peace, 16 Vibhavadee Road, Chatuchak, Bangkok 10900

คำนำ

การตรวจวัดปริมาณกัมมันตภาพรังสีของก๊าซเรดอน-222ในธรรมชาติ ปัจจุบันมีวิธีการตรวจวัดค่าปริมาณก๊าซเรดอน-222 อาทิเช่น การใช้เครื่องวัดปริมาณรังสีแอลฟารวม-บีตารวมชนิด Gas Flow Proportional Counter ระดับแบกกราวนด์ต่ำ การตรวจวัดด้วยวิธีนี้มีการแทรกสอดของรังสีแอลฟารวมและบีตารวม (ฤทธี,2541) และไม่สามารถแยกพลังงานของรังสีที่แผ่ออกมา ทำให้ผลการวัดค่าปริมาณรังสีมีความคลาดเคลื่อน (H.Baganet al.,2010) ได้มีการพัฒนาวิธีการตรวจวัดค่าปริมาณก๊าซเรดอน-222 โดยใช้เครื่องวัดปริมาณรังสีแอลฟารวม-บีตารวมชนิด Liquid Scintillation Counter ซึ่งสามารถแยกพลังงานของรังสีแอลฟารวมและบีตารวม ได้ด้วยการแจกแจงชนิดของรังสีจากรูปร่างของพัลส์ ลดการเกิด Self Absorption (E Lara Ronustillo and M Rodriguez,2006) ตัวอย่างที่ใช้ทำการวิเคราะห์จะต้องเป็นสารละลายใส ทำให้ขั้นตอนวิธีการเตรียมตัวอย่างรวมเป็นเนื้อเดียวกันกับสารละลายเรืองแสงมีความยุ่งยาก วิธีการเตรียมตัวอย่างจำเป็นต้องผ่านกระบวนการแยกทางเคมี ส่วนใหญ่ใช้วิธีการตกตะกอนแบเรียมซัลเฟต (พรรณี,2528)ใช้ Method EPA 903.0 และวิธีการสกัดเรเดียมด้วยเรซินชนิดแมงกานีสไดออกไซด์ (MnO_2) ตามมาตรฐาน Method EPA 913.0 หรือ (RM -7500R_n) ในแหล่งน้ำบาดาลตามธรรมชาติโดยทั่วไป จะมีปริมาณก๊าซเรดอน-222 สูงกว่าแหล่งน้ำผิวดินและน้ำทะเล (U.S.EPA,2002) วัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิธีการตรวจหาปริมาณกัมมันตภาพรังสีในตัวอย่างน้ำบาดาล และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเรซินชนิดแคตอิออน (DOWEX 50WX8 H^+) ใช้เป็นตัวสกัดเรเดียม-226 ซึ่งมีราคาต่ำกว่า โดยเลือกพื้นที่ศึกษาในภาคกลาง จังหวัดกรุงเทพฯ จังหวัดอยุธยา และพื้นที่ภาคเหนือ จังหวัดเชียงใหม่ (กรมทรัพยากรธรณี, 2530) จากแหล่งชุมชน

อุปกรณ์และสารเคมี

อุปกรณ์

1. เครื่องวัดปริมาณรังสีแอลฟารวม-บีตารวมชนิด Gas Flow Proportional Counter
2. เครื่องวัดปริมาณรังสีแอลฟารวม-บีตารวมชนิด Liquid Scintillation Counter
3. จานวัดรังสีชนิดอะลูมิเนียม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร
4. เตาให้ความร้อน (hot plate)
5. บีกเกอร์ ขนาด 1 ลิตร
6. ขวดไวแอลชนิดแก้ว ขนาด 20 มิลลิลิตร
7. เครื่องชั่งความละเอียด 0.00001 กรัม
8. หลอดไฟอินฟาเรด (IR –Lamp)
9. เครื่องเหวี่ยงตะกอน
10. แผ่นพลาสติก ขวดพลาสติกชนิดโพลีเอทธิลีนขนาด 1ลิตร และถังน้ำ

สารเคมี

1. น้ำกลั่น หรือน้ำปราศจากอิออน (DI-Water)
2. กรดอะซิติริก (CH_3COOH) ความเข้มข้น 17.4 นอร์มอล
3. แอมโมเนียมซัลเฟต ($(NH_4)_2SO_4$) ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร
4. ตัวพา Barium (Ba^{2+}) ความเข้มข้น 16 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

5. ตัวพา Lead (Pb^{2+}) ความเข้มข้น 15 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร
6. กรดไนตริก (HNO_3) ความเข้มข้น 16 นอร์มอล
7. กรดซัลฟุริก (H_2SO_4) ความเข้มข้น 18 นอร์มอล
8. กรดซิตริก ($C_6H_8O_7$) ความเข้มข้น 1 โมลาร์
9. กรดเอทิลีนไดอามีนเตตราอาเซติก (Ethylenediaminetetraacetic acid) ความเข้มข้น 0.25 M.
10. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 6 นอร์มอล
11. เรซิน ชนิดแมงกานีสไดออกไซด์ (MnO_2) และชนิดแคตไอออน (DOWEX 50WX8,H^+)
12. สารละลายเรืองแสง (cocktail ชนิด Hisaf-3)

วิธีการดำเนินงาน

พื้นที่การเก็บตัวอย่าง

การเก็บตัวอย่างน้ำบาดาล เลือกศึกษาพื้นที่ภาคกลาง มีจังหวัดกรุงเทพฯ(วัดบางบัว และวัดสุวรรณนาราม) จังหวัดอยุธยา(วัดบ้านแพน) จำนวนทั้งหมด 3 บ่อ และพื้นที่ภาคเหนือ จังหวัดเชียงใหม่(อำเภอสารภี และอำเภอจอมทอง) โดยเก็บช่วงฤดูร้อนเดือนมีนาคม และฤดูหนาวเดือนธันวาคม จำนวนทั้งหมด 14 บ่อ จากแหล่งชุมชน

การเก็บตัวอย่าง

นำแผ่นพลาสติกใช้รองพื้นที่เก็บตัวอย่างบริเวณปากบ่อ เพื่อลดการปนเปื้อนจากฝุ่นและดิน ทำการสูบน้ำบาดาลเพื่อไล่น้ำที่ค้างอยู่ในท่อกรองทิ้งไว้ประมาณ 20 นาที แล้วใส่น้ำลงถังน้ำ นำขวดพลาสติกชนิดโพลีเอทธิลีนขนาด 1ลิตร จมลงในกลางถังน้ำให้เกิดฟองอากาศน้อยที่สุด พร้อมเก็บตัวอย่างน้ำบาดาลปริมาตร 1 ลิตรต่อตัวอย่าง จดบันทึกฐานข้อมูลพื้นที่ ตำแหน่ง วันที่เก็บ สถานที่เก็บ และชื่อตัวอย่าง

การเตรียมตัวอย่าง

การเตรียมด้วยวิธีการตกตะกอนแบเรียมซัลเฟต โดยใช้วิธีมาตรฐาน (Method : EPA 903.0) และการเตรียมด้วยวิธีการสกัดเรเดียมด้วยเรซิน โดยใช้วิธีมาตรฐาน (Method EPA 913.0 หรือ RM -7500R_n)

การวัดและคำนวณผลตัวอย่าง

จากวิธีที่ 1 นำตะกอนตัวอย่างน้ำบาดาลที่ผ่านการเตรียมด้วยวิธีการตกตะกอนแบเรียมซัลเฟต ไปวิเคราะห์หาปริมาณก๊าซเรดอน-222 ด้วยเครื่องวัดปริมาณรังสีแอลฟารวม-บีตารวมชนิด Gas Flow Proportional Counter โดยใช้เวลานับวัด 150 นาทีต่อตัวอย่าง จากผลการวัดนำไปคำนวณความเข้มข้นกัมมันตภาพเรเดียม-226 ในสมการที่ 1 ซึ่งผลการคำนวณนำไปหาค่าปริมาณก๊าซเรดอน–222 ในสมการที่ 2 และในสมการที่ 3 ใช้คำนวณค่าปริมาณกัมมันตภาพต่ำสุดที่วัดได้ในตัวอย่าง (Minimum Detectable Concentration, MDC) หน่วยเป็กเคอเรลต่อลิตร (Bq/L)

$$\text{สมการ หาค่าปริมาณกัมมันตภาพเรเดียม-226 (D)} = \frac{C / T}{60 \times Eff \times V \times R \times I} \text{ Bq/L} \quad (1)$$

เมื่อ C = ค่านับวัดปริมาณรังสีแอลฟารวม หน่วย counts/min (cpm)

Eff = ประสิทธิภาพของหัววัดรังสีแอลฟา (เปอร์เซ็นต์)

V = ปริมาตรตัวอย่าง หน่วย ลิตร

R = ผลผลิตจากการแยกตะกอน หรือน้ำหนักตะกอน (chemical yield)

I = Ingrowth factor คือ เวลาที่เกิดนิวไคลด์ลูกตั้งแต่ขั้นตอนตกตะกอนแบเรียม (Ra- $BaSO_4$)

T = ใช้เวลานับวัด 150 นาที

60 = ค่าคงที่ใช้เปลี่ยนหน่วย cpm เป็น counts/sec (cps)

สมการ หาค่าปริมาณกัมมันตภาพก๊าซเรดอน-222 $= {}^{226}Ra \times (1-\exp^{-\lambda T})$ Bq/L (2)

เมื่อ ${}^{226}Ra$ = ปริมาณกัมมันตภาพเรเดียม-226

λ = ค่าคงที่การสลายตัวของก๊าซเรดอน หน่วย ต่อนาที ($\lambda = 0.693/t_{1/2}$)

$t_{1/2}$ = ค่าครึ่งชีวิตการสลายตัวของก๊าซเรดอน-222 เท่ากับ 3.82 วัน

T = เวลาที่ใช้ขณะเตรียมตัวอย่างและค่ากึ่งกลางของเวลานับวัดตัวอย่าง หน่วย นาที

สมการ หาค่า MDC $= \dfrac{4.66 \times (C_B)^{1/2}}{60 \times Eff \times V \times R \times T_b}$ Bq/L (3)

เมื่อ 4.66 = ค่าคงที่ใช้คำนวณที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

C_B = ค่านับวัดรังสีพื้นหลัง หน่วย cpm

T_b = ใช้เวลานับวัด 150 นาที

Eff = ประสิทธิภาพของหัววัดรังสีแอลฟา หน่วย เปอร์เซ็นต์

V = ปริมาตรตัวอย่าง หน่วย ลิตร

R = ผลผลิตจากการแยกตะกอน หรือน้ำหนักตะกอน (chemical yield)

จากวิธีที่ 2 นำสารละลายตัวอย่างน้ำบาดาลที่ผ่านการเตรียมด้วยวิธีการสกัดเรเดียมด้วยเรซินแต่ละชนิด ไปวิเคราะห์หาปริมาณกัมมันตภาพก๊าซเรดอน-222 ด้วยเครื่องวัดปริมาณรังสีแอลฟารวม-บีตารวมชนิด Liquid Scintillation Counter โดยใช้เวลานับวัด 150 นาทีต่อตัวอย่าง นำค่านับวัดที่ได้ไปคำนวณปริมาณกัมมันตภาพก๊าซเรดอน–222 ในสมการที่ 4

สมการหาค่าปริมาณกัมมันตภาพก๊าซเรดอน-222 ในน้ำบาดาล (D) $= \left(\dfrac{(G - B)}{CF \times D \times V} \right) \times 0.037$ Bq/L (4)

เมื่อ G = อัตราค่านับวัดตัวอย่าง หน่วย cpm

B = อัตราค่านับวัดรังสีพื้นหลัง หน่วย cpm

CF = Calibration Faction หน่วย cpm/pCi(picocurie)

D = การสลายตัวของก๊าซเรดอน-222 ระหว่างเวลาเก็บตัวอย่างและค่ากึ่งกลางของเวลานับวัดตัวอย่าง หน่วย นาที

V = ปริมาตรสารละลายมาตรฐาน หน่วยมิลลิลิตร

0.037 = ค่าคงที่ใช้เปลี่ยนหน่วย pCi เป็น Bq

ผลและวิจารณ์

จากผลการตรวจวัดปริมาณกัมมันตภาพก๊าซเรดอน-222 ในน้ำบาดาล พื้นที่ภาคกลางและภาคเหนือ โดยมีช่วงระยะเวลาเก็บตัวอย่างฤดูร้อนและฤดูหนาว ใช้การเตรียมตัวอย่างด้วยวิธีที่ 1 การตกตะกอนแบเรียมซัลเฟต ($BaSO_4$) นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดปริมาณรังสีแอลฟารวมชนิด gas flow proportional counter มี

ค่ากัมมันตภาพภาพก๊าซเรดอน-222 แสดงผลในตารางที่ 1 และใช้การเตรียมตัวอย่างด้วยวิธีที่ 2 การสกัดเรเดียมด้วยเรซิน ชนิด MnO_2 แสดงผลในตารางที่ 2 กับเรซินชนิด DOWEX 50WX8,H^+ แสดงผลในตารางที่ 3

ตารางที่ 1 แสดงค่าปริมาณกัมมันตภาพก๊าซเรดอน-222 ในน้ำบาดาล พื้นที่ภาคกลาง จังหวัดกรุงเทพฯ, อยุธยา และพื้นที่ภาคเหนือ จังหวัดเชียงใหม่ โดยใช้วิธีมาตรฐาน (Method : EPA 903.0) การตกตะกอนแบเรียมซัลเฟต ($BaSO_4$)

ตัวอย่างน้ำบาดาล (จังหวัด)	จำนวนตัวอย่าง	ปริมาณกัมมันตภาพก๊าซเรดอน-222 (Bq/L)	ปริมาณกัมมันตภาพต่ำสุดที่วัดได้ในตัวอย่าง (Bq/L)
กรุงเทพฯ (กรกฎาคม)	2	0.04	0.002
อยุธยา (กรกฎาคม)	1	0.02	0.002
เชียงใหม่ (มีนาคม)	28	0.01	0.002
เชียงใหม่ (ธันวาคม)	28	0.09	0.002

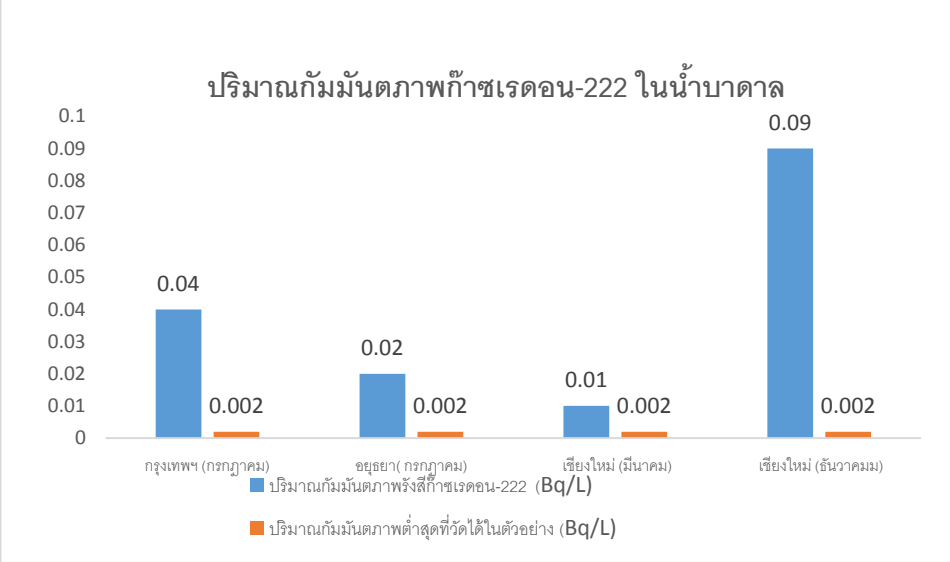
ตารางที่ 2 แสดงค่าปริมาณกัมมันตภาพก๊าซเรดอน-222 ในน้ำบาดาล พื้นที่ภาคเหนือ จังหวัดเชียงใหม่ เดือนมีนาคม ใช้วิธีมาตรฐาน (Method EPA 913.0) โดยใช้เรซิน ชนิด MnO_2 เมื่อเข้าสู่สมดุลที่เวลา 15 วัน, 30 วัน และ 60 วัน ตามลำดับ

ตัวอย่าง	ปริมาณกัมมันตภาพรังสีแอลฟารวมที่สมดุล 15 วัน		ปริมาณกัมมันตภาพรังสีแอลฟารวมที่สมดุล 30 วัน		ปริมาณกัมมันตภาพรังสีแอลฟารวมที่สมดุล 60 วัน	
	(cpm)	(Bq/L)	(cpm)	(Bq/L)	(cpm)	(Bq/L)
1	0.41	0.005	0.45	0.005	2.12	0.02
2	0.30	0.004	0.49	0.005	2.15	0.02
3	0.34	0.004	0.40	0.005	2.40	0.03
4	0.33	0.004	0.39	0.004	1.80	0.02

ตารางที่ 3 แสดงค่าปริมาณกัมมันตภาพก๊าซเรดอน-222 ในน้ำบาดาล พื้นที่ภาคเหนือ จังหวัดเชียงใหม่ เดือนมีนาคม ใช้วิธีมาตรฐาน (Method EPA 913.0) โดยใช้เรซิน ชนิด DOWEX 50WX8 H^+ เมื่อเข้าสู่สมดุลที่เวลา 15 วัน, 30 วัน และ 60 วัน ตามลำดับ

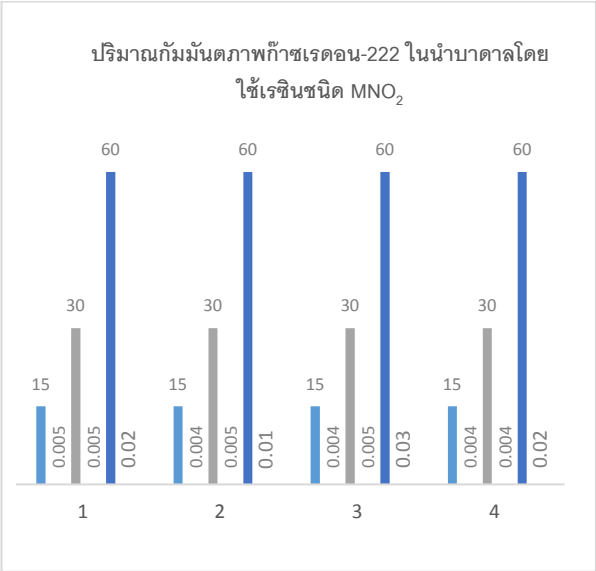
ตัวอย่าง.	ปริมาณกัมมันตภาพรังสีแอลฟารวมที่สมดุล 15 วัน		ปริมาณกัมมันตภาพรังสีแอลฟารวมที่สมดุล 30 วัน		ปริมาณกัมมันตภาพรังสีแอลฟารวมที่สมดุล 60 วัน	
	(cpm)	(Bq/L)	(cpm)	(Bq/L)	(cpm)	(Bq/L)
1	0.24	0.003	0.40	0.004	2.17	0.02
2	0.32	0.004	0.35	0.004	2.23	0.03
3	0.34	0.004	0.49	0.005	2.24	0.03
4	0.28	0.004	0.49	0.005	1.82	0.02

จากตารางที่ 1 ผลการวัดปริมาณกัมมันตภาพก๊าซเรดอน-222 ด้วยวิธีการตกตะกอนแบเรียมซัลเฟต ในตัวอย่างน้ำบาดาลพื้นที่ภาคกลาง จังหวัดกรุงเทพฯ และจังหวัดอยุธยา พบว่าพื้นที่ภาคกลางปริมาณกัมมันตภาพก๊าซเรดอน-222 มีค่าเฉลี่ย 0.03 Bq/L และ MDC 0.002 Bq/L ตามลำดับ ด้วยวิธีเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบผลการวัดปริมาณกัมมันตภาพก๊าซเรดอน-222 ในน้ำบาดาลพื้นที่ภาคเหนือ จังหวัดเชียงใหม่ จากการเก็บตัวอย่างเดือนมีนาคม และเดือนธันวาคม จำนวน 14 บ่อ ทำ 2 ซ้ำ มีทั้งหมด 56 ตัวอย่าง พบว่าตัวอย่างเดือนมีนาคม และเดือนธันวาคม ปริมาณกัมมันตภาพก๊าซเรดอน-222 มีค่าเฉลี่ย 0.01 Bq/L, 0.09 Bq/L และ MDC 0.002 Bq/L ตามลำดับ ดังภาพที่ 1

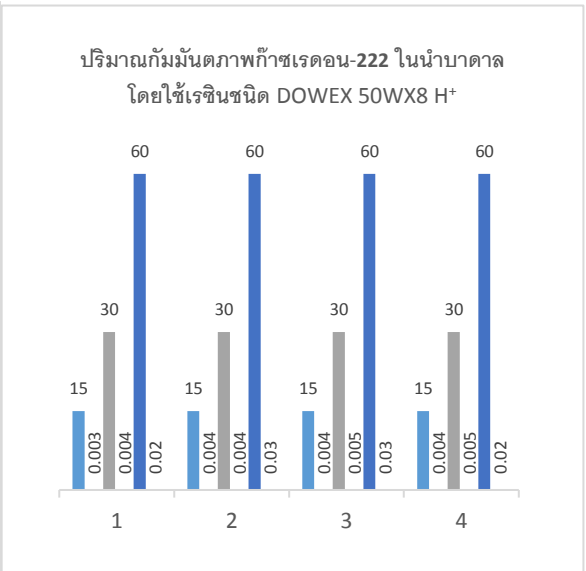


ภาพที่ 1 กราฟแสดงกัมมันตภาพรังสีแอลฟารวมในพื้นที่ภาคกลางและภาคเหนือ

จากตารางที่ 2 และ ตารางที่ 3 ผลการวัดปริมาณกัมมันตภาพก๊าซเรดอน-222 ด้วยวิธีการสกัดเรเดียมด้วยเรซิน ชนิด MnO_2 กับเรซินชนิด DOWEX 50WX8,H^+ ตัวอย่างน้ำบาดาลพื้นที่ภาคเหนือ จังหวัดเชียงใหม่ เดือนมีนาคม พบว่าค่านับวัดปริมาณกัมมันตภาพก๊าซเรดอน-222 ที่ใช้วิธีสกัดเรเดียมด้วยเรซินชนิด MnO_2 และชนิด DOWEX 50WX8 H^+ เมื่อเข้าสู่สภาวะสมดุลที่เวลา 15 วัน 30 วัน และ60 วัน มีค่านับวัดเพิ่มขึ้นตามลำดับที่สมดุลที่เวลา 60 วัน ซึ่งมีค่านับวัดเฉลี่ยไม่แตกต่างกัน ในภาพรวมพบว่าก่อนเข้าสู่สมดุลที่เวลา 15 วัน และ 30 วัน ประสิทธิภาพในการสกัดของชนิด MnO_2 มีค่านับวัดดีกว่าเมื่อใช้เรซินชนิด DOWEX 50WX8 H^+ ได้ค่านับวัดเฉลี่ยสูงสุดเมื่อเข้าสู่สภาวะสมดุลที่เวลา 60 วัน มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นเวลาที่เหมาะสมของวิธีสกัดเรเดียมด้วยเรซินทั้งชนิด MnO_2 และชนิด DOWEX 50WX8 H^+ จะเข้าสู่สมดุลของการเกิดก๊าซเรดอน - 222 ที่เวลา 60 วัน ดังภาพที่ 2 และภาพที่ 3 เมื่อเปรียบเทียบวิธีการตรวจวัดหาค่าปริมาณก๊าซเรดอน-222 ทั้ง 2 วิธี ในตารางที่ 1(เชียงใหม่ เดือนมีนาคม) มีค่าเฉลี่ย 0.01 Bq/L กับตารางที่2 และ3 มีค่าเฉลี่ย 0.02 Bq/L พบว่าเครื่องวัดปริมาณรังสีแอลฟารวม-บีตารวมชนิด Liquid Scintillation Counter มีประสิทธิภาพดีกว่า



ภาพที่ 2 แสดงปริมาณกัมมันตภาพก๊าซเรดอน-222 ในน้ำบาดาล



ภาพที่ 3 แสดงปริมาณกัมมันตภาพก๊าซเรดอน-222 ในน้ำบาดาล

สรุป

การวัดปริมาณกัมมันตภาพก๊าซเรดอน-222 ในตัวอย่างน้ำบาดาลพื้นที่ภาคกลาง จังหวัดกรุงเทพฯ และจังหวัดอยุธยา และในพื้นที่ภาคเหนือจังหวัดเชียงใหม่ ผลการวิเคราะห์ค่าปริมาณกัมมันตภาพก๊าซเรดอน-222 ในตัวอย่างที่ทำการศึกษา พบว่าค่าปริมาณกัมมันตภาพก๊าซเรดอน-222 เดือนมีนาคม และเดือนกรกฎาคม มีค่าต่ำกว่าเดือนธันวาคม ขึ้นอยู่กับสภาพแหล่งทางธรณีวิทยาและภูมิอากาศตามฤดูกาล เมื่อเปรียบเทียบวิธีการตรวจวัดหาค่าปริมาณก๊าซเรดอน-222 ทั้ง 2วิธี พบว่าเครื่องวัดปริมาณรังสีแอลฟารวม-บีตารวมชนิด Liquid Scintillation Counter มีประสิทธิภาพดีกว่า และจากการใช้วิธีการเตรียมตัวอย่างการสกัดเรเดียมด้วยเรซิน ชนิด MnO_2 กับเรซินชนิด DOWEX 50WX8,H^+ พบว่าเวลาที่เหมาะสมจะเข้าสู่สมดุลของการเกิดก๊าซเรดอน - 222 ที่เวลา 60 วัน เมื่อเปรียบเทียบวิธีการวิเคราะห์ เรซินทั้ง 2 ชนิด ผลการวิเคราะห์ค่าปริมาณกัมมันตภาพก๊าซเรดอน-222 ในตัวอย่างน้ำบาดาลมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน ดังนั้นการพัฒนาวิธีวิเคราะห์จากวิธีการตกตะกอนแบเรียมซัลเฟต ไปเป็นวิธีการวิเคราะห์ใหม่โดยใช้วิธีการสกัดเรเดียมด้วยเรซิน ชนิด MnO_2 และชนิด DOWEX 50WX8 H^+ สามารถนำมายืนยันผลการวิเคราะห์ค่าปริมาณกัมมันตภาพก๊าซเรดอน-222 ในตัวอย่างน้ำบาดาล ได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ

เอกสารอ้างอิง

พรรณี พักคงและ นวลฉวี รุ่งธนเกียรติ. 2528. **การหาปริมาณเรเดียม-226. ในบริเวณน้ำพุร้อนทางภาคเหนือของประเทศไทย**. ภาควิชารังสีประยุกต์และไอโซโทป คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

กรมทรัพยากรธรณี. 2530. **แหล่งพลังงานความร้อนใต้พิภพทางภาคเหนือของประเทศไทย**. โครงการสำรวจแหล่งพลังงานความร้อนใต้พิภพ.

ฤทธี มีสัตย์. 2541. **การหาความเข้มข้นของเรดอน-222 ในน้ำโดยใช้เครื่องลิควิดซินทิลเลชันชนิดวิเคราะห์รูปร่างพัลส์**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

U.S. Environmental Protection Agency (U.S.EPA)., 2002. **Implementation Guidance for Radionuclides**, Office of Ground Water and Drinking Water, EPA 816 –F-00-002, March.

E Lara Robustillo and M Rodriguez Alcla., 2006. **Simultaneous determination of alpha and beta emitters by liquid scintillation counting**.

H.Bagan et al., 2010. **Alpha/beta pulse shape discrimination in plastic scintillation using commercial scintillation detector**.

การหาปริมาณเปอร์เซ็นต์เถ้าอาหารที่ประชาชนบริโภคในประเทศไทยกับค่าอ้างอิงมาตรฐาน

Measurement of Percent Ash of Food in Thailand Compared with Reference Standard

เฉลิมขวัญ ปิติโสภณางกูร[1*] สุขใจ เกียรติศักดิ์วัฒนา[1] และ ทัศนีย์ สายเงิน[1]

Chalermkwan Pitisobhananggul[1*], Sukjai Kiatisakwatana[1] and Tussanee Saigern[1]

บทคัดย่อ

ค่าเปอร์เซ็นต์เถ้า (%ash)ในตัวอย่างเนื้อหมู เนื้อไก่ เนื้อวัว เนื้อปลาทับทิม ข้าวหอมมะลิ น้ำนมดิบและนมพาสเจอร์ไรส์จะมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของตัวอย่าง ชนิดตัวอย่าง ปริมาณตัวอย่าง และความชื้นขณะเตรียมตัวอย่าง ดังนั้นการหาปริมาณเปอร์เซ็นต์เถ้าจากน้ำหนักเถ้าต่อน้ำหนักสดก่อนนำไปเผาเป็นเถ้าเพื่อใช้ยืนยันความถูกต้องของกระบวนการเตรียมตัวอย่างในห้องปฏิบัติการทางกายภาพ ถือเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับนำไปหาค่าปริมาณกัมมันตภาพรังสีในตัวอย่างที่ถูกต้อง โดยส่วนใหญ่ตัวอย่างที่เหมือนกันจากแหล่งผลิตเดียวกันจะมีค่าเปอร์เซ็นต์เถ้าแต่ละตัวอย่างใกล้เคียงกัน จากการศึกษานี้ได้ค่าเปอร์เซ็นต์เถ้าในเนื้อหมู เนื้อไก่ เนื้อวัว เนื้อปลาทับทิม ข้าวหอมมะลิสหกรณ์เกษตร ข้าวหอมมะลิโรงสีข้าวชุมชุน นมดิบเกษตร นมดิบปากช่อง นมดิบราชบุรี และนมพาสเจอร์ไรส์เกษตร มีค่าเฉลี่ย 0.83%, 0.80%, 0.76%, 0.94%, 0.34%, 0.43%, 0.70%, 0.68%, 0.72% และ0.73% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบค่าปริมาณเปอร์เซ็นต์เถ้ากับค่าอ้างอิงมาตรฐานจากต่างประเทศ พบว่าตัวอย่างแต่ละชนิดมีค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์เถ้าใกล้เคียงกับค่ามาตรฐาน จากการเตรียมตัวอย่างตามวิธีมาตรฐาน สามารถนำตัวอย่างเถ้าไปใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณกัมมันตภาพรังสีในตัวอย่างได้ถูกต้อง

ABSTRACT

The percentage of ash (%ash) in Pork, Chicken, Beef, Red Tilapia Fish, Jasmine rice, Raw milk and Pasteurized milk depend on the composition of sample, the type of sample, the quantity of sample and the moisture during preparation of sample. Consequently, the percentage of ash from the mass of ash sample divide to the original masses, can confirm to verify of the physical laboratory preparation process. This is an important factor for the determination of the radioactivity in the sample accuracy. Principally, the same samples will come from the same source, the percentage of ash of the sample is close to standard. This experiment, the percentage of ash in Pork, Chicken, Beef, Red Tilapia Fish, Jasmine Rice from Agricultural Cooperation, Jasmine Rice from community mills, Raw milk from KU (Kasetsart University), Raw milk from Nakhon Ratchasima, Raw milk from Ratchaburi and Pasteurized milk from KU have an average 0.83%, 0.80%, 0.76%, 0.94%, 0.34%, 0.43%, 0.70%, 0.68%, 0.72% and 0.73% respectively. Comparison for the percentage of ash with the standard reference from abroad has been obviously shown that each types of the samples have the percentage of ash closely to the standard reference. According to the standard preparation of sample, this ash sample can be used to determine radioactivity of the sample accurately.

Key Words: beef, rice, milk, percentage of ash, radioactivity.

*Corresponding author; e-mail address: **chalermkwan.p@oap.go.th**

[1]สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ เลขที่ 16 ถ.วิภาวดีรังสิต ลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

[1]Office of Atoms for Peace, 16 Vibhavadee Road, Chatuchak, Bangkok 10900

คำนำ

การเตรียมตัวอย่างอาหารประเภทเนื้อสัตว์ ข้าวและน้ำนมจากแหล่งผลิตในประเทศไทย ซึ่งตัวอย่างแต่ละชนิดน้ำหนักสดไม่เท่ากัน เพื่อนำไปวัดค่าปริมาณกัมมันตภาพรังสีในตัวอย่าง มีวิธีการตรวจวัดโดยทางตรงจากการนำตัวอย่างสดที่มีน้ำหนักไม่น้อยกว่า 1 กิโลกรัมหรือมีปริมาตรไม่น้อยกว่า 1 ลิตร (IAEA,1989) ตัวอย่างที่ไม่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมจะมีค่าปริมาณกัมมันตภาพรังสีต่ำ จึงต้องทำการควบคุมคุณภาพด้วยวิธีการตรวจวัดโดยทางอ้อม เช่น การเพิ่มปริมาณหรือความเข้มข้นตัวอย่าง จะขึ้นอยู่กับน้ำหนักตัวอย่างเถ้าที่จะนำไปใช้กับงานศึกษาวิจัยหรือขั้นตอนวิเคราะห์ทางเคมี นอกจากนี้ยังมีปัจจัยที่สำคัญคืออุณหภูมิ ตัวอย่างแต่ละชนิดจะใช้อุณหภูมิสำหรับอบแห้งและเผาเป็นเถ้าแตกต่างกัน (IAEA,1970) อ้างถึงอุณหภูมิที่ใช้เผาตัวอย่างเถ้าเกิน 450°C จะเกิดการสลายตัวของซีเซียม-137(^{137}Cs) และอุณหภูมิเกิน 600°C จะเกิดการสลายตัวของสทรอนเชียม-90(^{90}Sr) ด้วยนิวไคลด์ทั้ง 2 ชนิด เกิดจากปฏิกิริยาฟิชชั่น หรือจากการทดลองอาวุธนิวเคลียร์ ทำให้ฟุ้งกระจายในชั้นบรรยากาศ ตกลงบนพื้นดิน แหล่งน้ำ และปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมและผ่านเข้าสู่ห่วงโซ่อาหาร (UNSCEAR,2000) จากการศึกษาตัวอย่างอาหารตั้งแต่ปี พ.ศ.2550 ถึงปัจจุบัน การหาปริมาณเปอร์เซ็นต์เถ้าในตัวอย่างเนื้อสัตว์ ข้าว และน้ำนมในประเทศไทย ได้ใช้วิธีมาตรฐานสำหรับการเตรียมตัวอย่างเถ้า เมื่อนำค่าเปอร์เซ็นต์เถ้าเฉลี่ยมาเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานอ้างอิงจากต่างประเทศ (IAEA,1989) จะมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งมีความสอดคล้องกับ (USDA,2001) ใช้ในการประเมินและยืนยันผลการวิเคราะห์ชนิดนิวไคลด์ในตัวอย่างที่มีปริมาณกัมมันตภาพรังสีต่ำให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. ตัวอย่างเนื้อหมู เนื้อไก่ เนื้อวัว เนื้อปลาทับทิม ข้าวหอมมะลิ น้ำนมดิบ นมพาสเจอร์ไรส์
2. เตาอบอุณหภูมิ 0-300 องศาเซลเซียส
3. เตาเผาอุณหภูมิ 0-500 องศาเซลเซียส
4. เตาให้ความร้อน
5. ชามกระเบื้องทนไฟ
6. บีกเกอร์ ขนาด 2 ลิตร
7. แท่งแก้วคนสารละลาย
8. เครื่องชั่งหยาบทศนิยม 2 ตำแหน่ง

วิธีการ

เลือกชนิดตัวอย่างเนื้อหมู เนื้อไก่ เนื้อวัว เนื้อปลาทับทิม ข้าวหอมมะลิจากตลาดสด แหล่งชุมชน หรือพื้นที่เกษตรกรรม น้ำนมดิบและนมพาสเจอร์ไรส์จากแหล่งผลิตน้ำนมในประเทศไทย เพื่อใช้เป็นตัวแทนตัวอย่างอาหารที่ประชาชนนิยมบริโภค อาหารประเภทเนื้อสัตว์เช่น เนื้อหมู เนื้อไก่ เนื้อวัว และเนื้อปลาทับทิม เลือกจากจังหวัดกรุงเทพฯ เชียงใหม่ สงขลา ขอนแก่น และอุบลราชธานี เก็บตัวอย่างปีละครั้ง ตั้งแต่ปี พ.ศ.2551- 2560 มีทั้งหมด 200 ตัวอย่าง ข้าวหอมมะลิสหกรณ์เกษตร เลือกจากจังหวัดกรุงเทพฯ และข้าวหอมมะลิโรงสีข้าวชุมชนเลือกจากจังหวัดชัยนาท เก็บตัวอย่างทุกเดือน ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2550 - 2556 มีทั้งหมด 168 ตัวอย่าง น้ำนมดิบและนมพาสเจอร์ไรส์จำนวน 4 ชนิดคือ นมดิบเกษตร นมดิบปากช่อง นมดิบราชบุรี และนมพาสเจอร์ไรส์เกษตร เลือก

จาก จังหวัดกรุงเทพฯ นครราชสีมา และจังหวัดราชบุรี เก็บตัวอย่างทุกเดือน ตั้งแต่ปี พ.ศ.2550 – 2557 มีทั้งหมด 384 ตัวอย่าง แล้วนำตัวอย่างแต่ละชนิดไปทำแห้งด้วยวิธีการอบแห้งและระเหย (drying) จนแห้งโดยใช้อุณหภูมิแตกต่างกัน นำไปเผาต่อจนเป็นเถ้าโดยส่วนใหญ่ใช้อุณหภูมิ 450 °C เนื่องจากงานทดลองนี้ต้องการนำตัวอย่างเถ้าไปวิเคราะห์หาปริมาณกัมมันตภาพรังสีในตัวอย่าง เช่น ^{137}Cs, ^{90}Sr เป็นชนิดนิวไคลด์ที่สำคัญในสิ่งแวดล้อมและอาจจะปนเปื้อนในอาหาร จึงจำเป็นควบคุมคุณภาพการวัดเช่นการเพิ่มปริมาณตัวอย่าง เวลาที่ใช้เผาตัวอย่างให้เหมาะสมกับตัวอย่างแต่ละชนิด อุณหภูมิที่ใช้อบแห้งและอุณหภูมิที่ใช้เผาเป็นตัวอย่างเถ้า ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการหาค่าเปอร์เซ็นต์เถ้า เมื่อเตรียมตัวอย่างเถ้าจนครบทุกตัวอย่าง แล้วนำมาคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์เถ้าในตัวอย่าง(%ash) หาค่าเฉลี่ยเพื่อเปรียบเทียบผลกับตารางค่ามาตรฐานที่ใช้อ้างอิง

เมื่อทราบน้ำหนักตัวอย่างสดก่อนนำไปเผาจนเป็นเถ้ากับน้ำหนักตัวอย่างเถ้าในอาหารแต่ละชนิด สามารถหาค่าเปอร์เซ็นต์เถ้าในตัวอย่าง (% ash) หรือการหาค่าร้อยละเถ้าในตัวอย่าง (% ash) สามารถคำนวณจากน้ำหนักตัวอย่างสดก่อนนำไปเผาจนเป็นเถ้ากับน้ำหนักตัวอย่างเถ้าในอาหารแต่ละชนิด ได้จากสมการ...(1)

$$\text{เปอร์เซ็นต์เถ้า (\% ash)} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างเถ้า (กรัม)}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างสด (กรัม)}} * 100 \quad (1)$$

น้ำหนักตัวอย่างเถ้า หมายถึง การนำตัวอย่างสดไปผ่านขั้นตอนการทำแห้งด้วยวิธีการระเหยหรือวิธีการอบแห้ง ก่อนนำไปเผาเป็นเถ้า มีหน่วยเป็นกรัม

น้ำหนักตัวอย่างสด หมายถึง น้ำหนักของตัวอย่างก่อนหรือที่ยังไม่ผ่านกระบวนการทำแห้งหรือเผาเป็นเถ้า

ขั้นตอนการวิเคราะห์

นำตัวอย่างเนื้อหมู เนื้อไก่ เนื้อวัว และเนื้อปลาไม่รวมก้างหรือกระดูก มีน้ำหนักประมาณ 10 กิโลกรัมต่อกิโลกรัม ไปชั่งน้ำหนักเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของตัวอย่างจริง ก่อนนำไปเตรียมตัวอย่างทางกายภาพ โดยนำไปบด สับหรือหั่นจนละเอียด ให้มีขนาดเล็กลง เทลงในชามกระเบื้องทนไฟ พร้อมระบุชื่อชนิดตัวอย่าง ก่อนนำไปทำให้แห้งในเตาอบโดยใช้อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 8 - 10 ชั่วโมง รอให้ตัวอย่างเย็น แล้วนำไปเผาจนเป็นเถ้าโดยใช้อุณหภูมิ 450°C เป็นเวลา 12 - 16 ชั่วโมง ลักษณะตัวอย่างเถ้ามีสีขาวออกเทา เมื่อตัวอย่างเถ้าเย็นนำไปชั่งน้ำหนักทันทีเพื่อป้องกันความชื้น

นำตัวอย่างข้าวหอมมะลิ มีน้ำหนัก 5 กิโลกรัมต่อตัวอย่างเทลงในชามกระเบื้องทนไฟ พร้อมระบุชื่อชนิดตัวอย่าง ก่อนนำไปทำแห้งในเตาอบโดยใช้อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 8 - 10 ชั่วโมง รอให้ตัวอย่างเย็น นำไปเผาจนเป็นเถ้าที่อุณหภูมิ 450°C เป็นเวลา 16 ชั่วโมง ลักษณะตัวอย่างเถ้ามีสีเกือบดำ เมื่อตัวอย่างเย็น นำไปชั่งน้ำหนักทันที

นำน้ำนมดิบและนมพาสเจอร์ไรส์ ทุกตัวอย่าง จำนวน 4 ชนิด โดยใช้ปริมาตร 5 ลิตรต่อตัวอย่างมาทำแห้งด้วยวิธีการระเหย (drying) เทตัวอย่างนมดิบและนมพาสเจอร์ไรส์ ปริมาตร 5 ลิตร ลงในบีกเกอร์ ขนาด 2 ลิตร นำไปทำแห้งด้วยวิธีการระเหยบนเตาให้ความร้อน (hotplate) จนครบปริมาตร 5 ลิตร โดยใช้อุณหภูมิ 150 – 170 °C คนด้วยแท่งแก้วอย่างสม่ำเสมอ เพื่อไม่ให้ตัวอย่างติดภาชนะจนเป็นตัวอย่างนมผงแห้ง ก่อนนำไปเผาให้เป็น

เถ้าที่อุณหภูมิ 450 °C เป็นเวลา 12 - 16 ชั่วโมง ลักษณะตัวอย่างเถ้ามีสีขาวออกเทา เมื่อตัวอย่างเย็น นำไปชั่งน้ำหนักทันที

คำนวณหาปริมาณเปอร์เซ็นต์เถ้าในตัวอย่างดังสมการ (1) แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์เถ้าในตัวอย่างอาหาร ตารางที่ 1 แสดงค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์เถ้าในตัวอย่างเนื้อหมู เนื้อไก่ เนื้อวัว และเนื้อปลาทับทิม ตารางที่ 2 แสดงค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์เถ้าในตัวอย่างข้าวหอมมะลิสหกรณ์เกษตรและข้าวหอมมะลิโรงสีข้าวชุมชน ตารางที่ 3 แสดงค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์เถ้าในตัวอย่างน้ำนมดิบและนมพาสเจอร์ไรส์ ตารางที่ 4 และตารางที่ 5 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์เถ้าอาหารมาตรฐานที่ใช้อ้างอิงจากต่างประเทศ

ผลและวิจารณ์

จากการหาปริมาณเปอร์เซ็นต์เถ้าในตัวอย่างอาหารประเภทเนื้อสัตว์ ข้าวและน้ำนมจากแหล่งผลิตในประเทศไทย ตั้งแต่ปี พ.ศ.2551-2560

ตารางที่ 1 แสดงค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์เถ้าในตัวอย่างเนื้อหมู เนื้อไก่ เนื้อวัว และเนื้อปลาทับทิม รวม 200 ตัวอย่าง

ปี พ.ศ.	จังหวัด	ชนิดตัวอย่าง	ค่าต่ำสุด-ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์เถ้า
2551 - 2560	กรุงเทพฯ	เนื้อหมู	0.44 – 1.26	0.9134
		เนื้อไก่	0.36 – 1.16	0.8083
		เนื้อวัว	0.26 – 1.36	0.7214
		เนื้อปลาทับทิม	0.51 – 1.91	1.1307
2552 - 2560	ขอนแก่น	เนื้อหมู	0.64 – 1.31	0.8543
		เนื้อไก่	0.38 – 1.16	0.7689
		เนื้อวัว	0.51 –0.77	0.6672
		เนื้อปลาทับทิม	0.29 – 0.97	0.7432
2552 - 2557	อุบลราชธานี	เนื้อหมู	0.44 – 1.26	0.7006
		เนื้อไก่	0.35 – 1.16	0.7250
		เนื้อวัว	0.26 – 1.36	0.6688
		เนื้อปลาทับทิม	0.56 – 2.05	1.0384
2551 - 2560	สงขลา	เนื้อหมู	0.15 – 1.65	0.9259
		เนื้อไก่	0.36 – 1.38	0.9927
		เนื้อวัว	0.34 – 1.50	0.8872
		เนื้อปลาทับทิม	0.54 – 1.46	0.8039
2551 - 2560	เชียงใหม่	เนื้อหมู	0.57 – 1.15	0.7396

		เนื้อไก่	0.24 – 1.37	0.7192
		เนื้อวัว	0.17 – 1.07	0.6779
		เนื้อปลาทับทิม	0.58 – 1.91	0.9683

ตารางที่ 2 แสดงค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์เถ้าในตัวอย่างข้าวหอมมะลิสหกรณ์เกษตร จังหวัดกรุงเทพฯและข้าวหอมมะลิ โรงสีข้าวชุมชนจังหวัดชัยนาทตั้งแต่ปี พ.ศ.2550 - 2556 รวม 168 ตัวอย่าง

ปี พ.ศ.	จังหวัด	ชนิดตัวอย่าง	ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์เถ้า
2550 – 2556	กรุงเทพฯ	ข้าวหอมมะลิสหกรณ์เกษตร	0.3449
2550 – 2556	ชัยนาท	ข้าวหอมมะลิโรงสีข้าวชุมชน	0.4279

ตารางที่ 3 แสดงค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์เถ้าในตัวอย่างน้ำนมดิบและนมพาสเจอร์ไรส์จากการนำน้ำนมไปผ่านการทำแห้งด้วยวิธีการระเหย ตั้งแต่ปี พ.ศ.2550 - 2557 รวม 384 ตัวอย่าง

ปี พ.ศ.	จังหวัด	ชนิดตัวอย่าง	ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์เถ้า
2550 - 2557	กรุงเทพฯ	นมดิบเกษตร	0.7027
2550 - 2557	นครราชสีมา	นมดิบปากช่อง	0.6834
2550 - 2557	ราชบุรี	นมดิบราชบุรี	0.7153
2550 - 2557	กรุงเทพฯ	นมพาสเจอร์ไรส์เกษตร	0.7305

ตารางที่ 4 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์เถ้าตัวอย่างอาหารชนิดต่างๆตามค่ามาตรฐานที่ใช้อ้างอิง (From USDA Nutrient Database for Standard Reference, 2001)

ชนิดตัวอย่าง	ค่าเปอร์เซ็นต์เถ้า (%ash)
White rice, long-grain	0.6
Milk, whole, Fluid	0.7
Beef	0.9
Chicken	1.0
Fish fillet	2.5
Pork ,fresh	0.9

ตารางที่ 5 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์เถ้าตัวอย่างอาหารชนิดต่างๆตามค่ามาตรฐานที่ใช้อ้างอิง (Mass Of Food Required For 10 Grams Of Ash) Technical Report No. 295, IAEA,1989

ชนิดตัวอย่าง	ค่าเปอร์เซ็นต์เถ้า (%ash)
Rice	0.65
Milk (Liquid)	0.70
Beef, Pork (Meat)	0.92
Chicken (poultry)	0.81
Fish	1.30

ผลการศึกษาค่าเฉลี่ยปริมาณเปอร์เซ็นต์เถ้าในเนื้อหมู เนื้อไก่ เนื้อวัว และ ปลาทับทิม จากจังหวัดกรุงเทพฯ ขอนแก่น สงขลา เชียงใหม่ และอุบลราชธานี ทั้งหมด 5 จังหวัด พบว่ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.83 %, 0.80 %, 0.76 % และ 0.94 % ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยปริมาณเปอร์เซ็นต์เถ้าในข้าวหอมมะลิสหกรณ์เกษตร จังหวัดกรุงเทพฯและข้าวหอมมะลิโรงสีชุมชน จังหวัดชัยนาท พบว่ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.34 % และ 0.43 % ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยปริมาณเปอร์เซ็นต์เถ้าในนมดิบเกษตร นมดิบปากช่อง นมดิบราชบุรี นมพาสเจอร์ไรส์เกษตร มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.70 %, 0.68 %, 0.72 % และ 0.73 % ตามลำดับ นำไปเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานที่ใช้อ้างอิงจากต่างประเทศ จะมีค่าใกล้เคียงกัน

สรุป

จากการศึกษาหาค่าเปอร์เซ็นต์เถ้า (%ash)ในตัวอย่างเนื้อหมู เนื้อไก่ เนื้อวัว เนื้อปลาทับทิม ข้าวหอมมะลิ น้ำนมดิบและนมพาสเจอร์ไรส์จะมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของตัวอย่าง ชนิดตัวอย่าง ปริมาณตัวอย่าง และความชื้นขณะเตรียมตัวอย่าง เมื่อได้ปฏิบัติตามกระบวนการขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างในห้องปฏิบัติการทางกายภาพตามวิธีมาตรฐาน ซึ่งมีปัจจัยที่สำคัญคือระดับอุณหภูมิ จำนวนชั่วโมงที่ใช้เตรียมตัวอย่างได้อย่างเหมาะสม สามารถนำตัวอย่างเถ้าไปใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณกัมมันตภาพรังสีในตัวอย่างได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณผู้ร่วมวิจัย ครอบครัว และเพื่อนร่วมงานที่ให้ความร่วมมือให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

IAEA.1989. Measurement of Radionuclides in Food and the Environmental. **Technical Report No. 295.** Vienna, 1989.

UNSCEAR. 2000 Source and Effects of Ionizing Radiation Report. B, p.94.

Melquiades, F.L. and C.R. Appoloni. 2004. Natural radiation levels in powdered milk samples. **Cienc.Tecnol. Aliment., Campinas** 24: 501-504

Ash Content of Selected Foods. From **USDA Nutrent Database for Standard Reference**. Release 14(July 2001) http://www.nal.usda.gov/fnic/cgi-bin/nut_search.pl

สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์ และวิศวกรรมศาสตร์

Subject: Architecture and Engineering

ภาคบรรยาย
Oral Presentation



KU
KASETSART
UNIVERSITY

กระเบื้องดินเผาที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมจากดินตะกอนน้ำประปา, เศษแก้วสีเขียว และดินขาวโคกไม้ลาย

Eco Friendly Clay Wall Tiles from Sediment Soil, Green Glass Cullet and Kok Mai Lai Clay

อานุภาพ ฟักสังข์[1*] และ อุบลรัตน์ หวังรักษ์ดีสกุล[1]

Arnuparp Fugsang[1*] and Ubolrat Wangrakdiskul[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติของกระเบื้องดินเผาที่ทำจากดินตะกอนน้ำประปา เศษแก้วสีเขียว และดินขาวโคกไม้ลาย กำหนดสูตรออกเป็น 3 กลุ่ม จำนวน 18 สูตร ในการเตรียมชิ้นงานทดสอบ นำวัตถุดิบทั้ง 3 ชนิดไปอบเพื่อไล่ความชื้น จากนั้นบดด้วยหม้อบด และนำไปร่อนผ่านตะแกรง 50 เมช (297 ไมครอน) ผสมวัตถุดิบแบบแห้งตามอัตราส่วนที่กำหนด โดยการเติมน้ำ 10% ของน้ำหนัก ขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮโดรลิกแบบทางเดียวด้วยแรงดัน 100 บาร์ ให้ได้ขนาด 50 x 100 x 7 มิลลิเมตร อบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 200ºC เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 950ºC ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 100ºC/ชั่วโมง คงอุณหภูมิเป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการทดสอบคุณสมบัติของชิ้นทดลอง ได้แก่ ค่าความต้านทานแรงดัด ค่าน้ำหนักที่สูญเสียหลังเผา ค่าการหดตัวหลังเผา ค่าการดูดซึมน้ำ ค่าความหนาแน่นรวม ผลการทดลองพบว่าสูตร A6 มีอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด โดยมีดินตะกอนน้ำประปา 10% เศษแก้วสีเขียว 60% และดินขาวโคกไม้ลาย 30% มีค่าความต้านทานแรงดัด 19.68 MPa และมีค่าการดูดซึมน้ำ 9.74% ผ่านเกณฑ์ มอก. 2508-2555

ABSTRACT

This research aims to study the properties of clay tiles made from sediment soil, green glass cullet, Kok Mai Lai Clay. The experimental formulation was divided into 3 groups of 18 formulas. For preparing the specimens, all raw materials used in this study are dried for removing moisture. Then, they are crushed with ball mill and sieved with 50 mesh (297 μm). All materials of each formula are mixed by dry mixing and sprayed with 10% water by weight. Uniaxial pressing with 100 bar has been used to prepare specimens in dimension 50x100x7 mm. All specimens are dried at 200° C for 2 hrs. Then, they are fired at temperature 950 ºC with a heating rate 100 ºC/hr. and soaking for 1 hr. After firing, all specimens are tested properties such as bending strength, weight loss, shrinkage, bulk density and water absorption. The results show that formula A6 is the best with the highest strength. It composed of 10% sediment soil, 60 % green glass cullet and 30% Kok Mai Lai Clay. It has bending strength 19.68 MPa and 9.74% water absorption consistent with the TIS 2508-2555.

Key Words: Sediment soil, Green glass cullet, Kok Mai Lai Clay, Clay wall tiles

*Corresponding author; e-mail address: patchboy191@gmail.com

[1]ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพมหานคร 10800

[1]Department of Production Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, 10800

คำนำ

ในการประกอบกิจการของโรงงานทุกโรงงานนั้น ล้วนมีกากของเสียอุตสาหกรรมเกิดขึ้น ซึ่งขึ้นกับปริมาณการผลิตของแต่ละโรงงาน โดยแหล่งกำเนิดของของเสียแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ส่วนที่หนึ่ง คือ กระบวนการผลิตหลัก เป็นการแปรรูปวัตถุดิบหลักไปเป็นผลิตภัณฑ์ของโรงงาน ส่วนที่สอง คือ กระบวนการสนับสนุนการผลิต ได้แก่ ระบบผลิตน้ำประปา ระบบผลิตไอน้ำ การซ่อมบำรุง ระบบบำบัดน้ำเสีย เป็นต้น และส่วนที่สาม คือ ส่วนสำนักงาน บ้านพักอาศัย และโรงอาหารบริเวณโรงงาน เช่น กระดาษ แบตเตอรี่ ขวดน้ำ ถุงพลาสติก เศษอาหาร เศษภาชนะ กากของเสียอุตสาหกรรมยังสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ กากของเสียไม่เป็นอันตราย (Non-hazardous waste) เช่น กระดาษ เศษเหล็ก เศษไม้ เศษอาหาร และกากของเสียอันตราย (Hazardous waste) ประกอบไปด้วยของเสียที่มีส่วนประกอบของสารที่เป็นพิษ ติดไฟง่าย มีฤทธิ์เป็นกรดหรือด่าง ทำปฏิกิริยากับสารอื่น มีสารกัมมันตรังสีเจือปน หรือมีเชื้อโรคติดต่อปะปนอยู่ จากข้อมูลของกรมโรงงานอุตสาหกรรมพบว่าในแต่ละปีมีการขออนุญาตนำกากของเสียไปกำจัดด้วยวิธีการฝังกลบประมาณ 7%-10% ของปริมาณของเสียทั้งหมดที่ขออนุญาตนำออกนอกบริเวณโรงงาน (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2555)

จากการขยายตัวทางเศรษฐกิจทำให้ภาคอุตสาหกรรมได้เพิ่มกำลังการผลิต เพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการของผู้บริโภค ส่งผลให้ปริมาณของเสียอุตสาหกรรมมีมากขึ้น ปัจจุบันจึงได้มีแนวคิดที่จะกำจัดกากเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมตามหลักสากล โดยใช้หลักการ 3 Rs ซึ่งได้แก่ การลดหรือทำให้เกิดน้อยลง (Reduce) การนำกลับมาใช้ซ้ำ (Reuse) การแปรรูปเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ (Recycle & Recovery) (วรพงษ์ เทียมสอน, 2553) ซึ่งสอดคล้องกับนโยบายกระทรวงอุตสาหกรรมที่จะนำกากของเสียภาคอุตสาหกรรมของภาครัฐและเอกชน มาทำให้เกิดการหมุนเวียน และนำกลับมาใช้ประโยชน์ในด้านอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องอย่างต่อเนื่อง รวมทั้งพัฒนาของเสียอุตสาหกรรมเป็นวัตถุดิบสำรอง เพื่อใช้สำหรับอุตสาหกรรมในอนาคต (ดวงกมล สุริยฉัตร และคณะ, 2547)

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าในงานวิจัยหลายๆงาน ได้นำของเสียอุตสาหกรรมมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในด้านอุตสาหกรรมเซรามิกส์ เช่น Luz and Ribeiro (2007) ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ที่จะใช้เศษแก้วในการผลิตพอร์ชเลน โดยดินขาว 60% ควอตซ์ 10% เฟลสปาร์ 25% เศษแก้ว 5% เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสม และเผาที่ 1,120 °C ดนุพล และคณะ (2553) ได้ศึกษากระเบื้องดินเผาแบบไม่เคลือบจากการนำดินเหนียวสทิ้งพระมาเติมตะกอนน้ำประปา และแร่แคลไซต์ เผาที่อุณหภูมิ 1,100°C – 1,150°C ผลการศึกษาพบว่าผ่านเกณฑ์ มอก. ของกระเบื้องดินเผาบุผนังภายนอกและมุงหลังคา ดนุพล และคณะ (2555) ได้นำหางแร่ดินขาวมาเติมเถ้าลอยไม้ยางพาราเพื่อผลิตกระเบื้องเซรามิก พบว่าปริมาณเถ้าลอยมีผลต่อกำลังดัด และการเปลี่ยนรูปในช่วงได้ความร้อน อัตราส่วนที่เหมาะสม คือ หางแร่ดินขาว 90% และเถ้าลอยไม้ยางพารา 10% เผาที่อุณหภูมิ 1,150°C อาบีดีน ดะแซสาเมาะ และคณะ (2557) ได้นำเถ้าไม้ยางพาราและดินขาว ซึ่งเป็นของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมมาเป็นส่วนผสมในการทำอิฐบล็อกประสานที่อายุการบ่ม 28 วัน พบว่าอิฐบล็อกประสานที่มีอัตราส่วนของดินขาว เถ้าไม้ยางพารา และทรายที่อัตราส่วน 3:1:2 โดยน้ำหนักผ่านมาตรฐานบล็อกประสานชั้นคุณภาพไม่รับน้ำหนัก Phonphuak et.al (2016) ได้ใช้ประโยชน์จากเศษแก้วเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกล และลดอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาของอิฐดินเผา พบว่าการเติมเศษแก้ว 10% และเผาที่ 900°C คุณสมบัติดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับอิฐดินแบบปกติเผาที่ 1,000°C

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อผลิตกระเบื้องดินเผาและทดสอบคุณสมบัติตามมาตรฐานอุตสาหกรรมไทย 2508-2555 จากการนำดินตะกอนน้ำประปาจากโรงงานผลิตน้ำบางเขน มาผสมกับดินขาวโคกไม้ลายจากจังหวัดปราจีนบุรี และเศษแก้วสีเขียว ซึ่งเป็นการนำกากของเสียอุตสาหกรรมมาใช้ประโยชน์ และก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

อุปกรณ์และวิธีการ

ศึกษาคุณสมบัติของวัตถุดิบ

นำวัตถุดิบที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัยทั้ง 3 ชนิด คือ ดินตะกอนน้ำประปาจากโรงงานผลิตน้ำบางเขน ดินขาวโคกไม้ลายจากจังหวัดปราจีนบุรี และเศษแก้วสีเขียวไปวิเคราะห์ด้วยวิธีการ X-Ray Fluorescence (XRF) เพื่อหาองค์ประกอบธาตุทางเคมี (Table 1)

Table 1 Chemical composition of raw materials

Compound		SiO_2	Al_2O_3	Na_2O	CaO	Fe_2O_3	TiO_2	K_2O	MgO	SO_3	ZrO_2	P_2O_5
Concentration (%)	Kok Mai Lai Clay	58.38	37.87	-	0.04	2.11	1.06	0.19	0.13	0.09	0.06	0.06
	Sediment Soil	60.95	25.96	0.33	0.91	6.22	0.85	1.93	1.41	0.57	0.03	0.46
	Green Glass Cullet	69.91	1.91	14.64	10.81	0.43	0.08	0.36	1.24	0.07	0.03	0

กำหนดสูตรการทดลอง

นำวัตถุดิบทั้ง 3 ชนิด ผสมในอัตราส่วนที่กำหนดตามแผนภาพสามแกน โดยแบ่งเป็น 3 กลุ่ม จำนวน 18 สูตรการทดลอง กลุ่ม A, B และ C ใช้ดินตะกอนน้ำประปาทดแทนดินขาวโคกไม้ลายที่ 10%, 20% และ 30% ตามลำดับ โดยทุกกลุ่มการทดลองจะใช้เศษแก้วสีเขียวไม่เกิน 60% เพราะเมื่อมีอัตราส่วนของเศษแก้วสีเขียวมากกว่า 60% จะทำให้อัดขึ้นรูปยาก (Table 2)

Table 2 Composition of the design mixtures

Formula No.		A1	A2	A3	A4	A5	A6	B1	B2	B3	B4	B5	B6	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Material (%)	Kok Mai Lai Clay	80	70	60	50	40	30	70	60	50	40	30	20	60	50	40	30	20	10
	Sediment soil	10	10	10	10	10	10	20	20	20	20	20	20	30	30	30	30	30	30
	Green glass cullet	10	20	30	40	50	60	10	20	30	40	50	60	10	20	30	40	50	60

เตรียมวัตถุดิบสำหรับการทดลอง

นำวัตถุดิบทั้ง 3 ชนิด ซึ่งได้แก่ ดินตะกอนน้ำประปา เศษแก้วสีเขียว และดินขาวโคกไม้ลาย ไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 200°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นบดด้วยหม้อบดแบบลูกบอล ด้วยระยะเวลา 3 ชั่วโมง 4 ชั่วโมง และ 40 นาที ตามลำดับ นำไปร่อนผ่านตะแกรง 50 เมซ (297 ไมครอน) ผสมวัตถุดิบแบบแห้งตามอัตราส่วนที่กำหนด โดยการเติมน้ำ 10% ของน้ำหนัก ขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮโดรลิกแบบทางเดียวด้วยแรงดัน 100 บาร์ ให้ได้ขนาด 50 x 100 x 7 มิลลิเมตร อบไล่ความชื้นอีกครั้งที่อุณหภูมิ 200 ºC เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 950 ºC ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 100 ºC/hr. คงอุณหภูมิเป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการทดสอบคุณสมบัติของชิ้นทดลอง ได้แก่ ค่าความต้านทานแรงดัด น้ำหนักที่สูญเสียหลังเผา ค่าการหดตัวหลังเผา ค่าการดูดซึมน้ำ และค่าความหนาแน่นรวม

ผลการทดลองและวิจารณ์

ค่าความต้านแรงดัด

$$B = \frac{3FL}{2bh^2} \qquad (1)$$

B = ค่าความต้านทานแรงดัด (MPa)

F = แรงกระทำ (N)

L = ระยะห่างระหว่างจุดรองรับที่ปลายทั้ง 2 ด้าน (Span Length) (mm)

b = ความกว้างของชิ้นงาน (mm)

h = ความหนาของชิ้นงาน (mm)

จากผลการทดสอบ (Figure 1A) พบว่ากลุ่ม A มีค่าความต้านแรงดัดสูงสุด 19.68 MPa และมีความต้านแรงดัดต่ำสุด 1.97 MPa กลุ่ม B มีค่าความต้านแรงดัดสูงสุด 18.98 MPa และมีความต้านแรงดัดต่ำสุด 1.86 MPa กลุ่ม C มีค่าความต้านแรงดัดสูงสุด 16.58 MPa และมีความต้านแรงดัดต่ำสุด 2.56 MPa ค่าความต้านแรงดัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของเศษแก้วสีเขียว

ค่าการสูญเสียน้ำหนักหลังเผา

$$\text{Weight Loss} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 \qquad (2)$$

Weight Loss = ค่าน้ำหนักที่สูญเสียหลังการเผา (%)

W_1 = น้ำหนักของชิ้นงานก่อนเผา (g)

W_2 = น้ำหนักของชิ้นงานหลังเผา (g)

จากผลการทดสอบ (Figure 1B) พบว่ากลุ่ม A มีค่าการสูญเสียน้ำหนักหลังเผาสูงสุด 8.43% และมีค่าการสูญเสียน้ำหนักหลังเผาต่ำสุด 4.14% กลุ่ม B มีค่าการสูญเสียน้ำหนักหลังเผาสูงสุด 8.46% และมีค่าการสูญเสียน้ำหนักหลังเผาต่ำสุด 4.57% กลุ่ม C มีค่าการสูญเสียน้ำหนักหลังเผาสูงสุด 8.89% และมีค่าการสูญเสียน้ำหนักต่ำหลังเผาสุด 5.04% ค่าการสูญเสียน้ำหนักหลังเผาจะมีค่าลดลงตามอัตราส่วนของดินตะกอนน้ำประปาและดินขาวโคกไม้ลายที่ลดลง

ค่าการหดตัวหลังเผา

$$\text{Shrinkage} = \frac{L_0 - L}{L_0} \times 100 \quad (3)$$

Shrinkage = ค่าการหดตัวหลังเผา (%)

L_0 = ยาวก่อนเผา (mm)

L = ความยาวหลังเผา (mm)

จากผลการทดสอบ (Figure 1C) พบว่ากลุ่ม A มีค่าการหดตัวหลังเผาสูงสุด 3.26% และมีค่าการหดตัวหลังเผาต่ำสุด 1.25% กลุ่ม B มีค่าการหดตัวหลังเผาสูงสุด 4.03% และมีค่าการหดตัวหลังเผาต่ำสุด 1.56% กลุ่ม C มีค่าการหดตัวหลังเผาสูงสุด 4.27% และมีค่าการหดตัวหลังเผาต่ำสุด 1.79% ค่าการหดตัวหลังเผาจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเศษแก้วที่เพิ่มขึ้น

ค่าการดูดซึมน้ำ

$$W = \frac{W_w - W_d}{W_w} \times 100 \quad (4)$$

W = ค่าการดูดซึมน้ำ (%)

W_w = น้ำหนักของชิ้นงานหลังต้ม (g)

W_d = น้ำหนักของชิ้นงานก่อนต้ม (g)

จากผลการทดสอบ (Figure 1D) พบว่ากลุ่ม A มีค่าการดูดซึมน้ำสูงสุด 21.03% และมีค่าการดูดซึมน้ำ 9.74% กลุ่ม B มีค่าการดูดซึมน้ำสูงสุด 22.77% และมีค่าการดูดซึมน้ำต่ำสุด 12.38% กลุ่ม C มีค่าการดูดซึมน้ำสูงสุด 22.30% และมีค่าการดูดซึมน้ำต่ำสุด 14.07% ค่าการดูดซึมน้ำจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณอัตราส่วนของดินตะกอนน้ำประปา และดินขาวโคกไม้ลายที่สูงขึ้น แต่ค่าการดูดซึมน้ำจะลดลงตามปริมาณอัตราส่วนของเศษแก้วสีเขียวที่เพิ่มขึ้น

ค่าความหนาแน่นรวม

$$\rho_b = \frac{m}{v} \quad (5)$$

ρ_b = ค่าความหนาแน่นรวม (g/cm^3)

m = น้ำหนักของชิ้นงานในอากาศ (g)

v = ปริมาตรของชิ้นงาน (cm^3)

จากผลการทดสอบ (Figure 1E) พบว่ากลุ่ม A มีค่าความหนาแน่นสูงสุด 2.52 g/cm^3 และมีค่าความหนาแน่นต่ำสุด 2.23 g/cm^3 กลุ่ม B มีค่าความหนาแน่นสูงสุด 2.53 g/cm^3 และมีค่าความหนาแน่นต่ำสุด 2.21 g/cm^3 กลุ่ม C มีค่าความหนาแน่นสูงสุด 2.55 g/cm^3 และมีค่าความหนาแน่นต่ำสุด 2.22 g/cm^3 ค่าความหนาแน่นจะมีค่าลดลงตามอัตราส่วนของดินตะกอนน้ำประปา และดินขาวโคกไม้ลายที่ลดลง

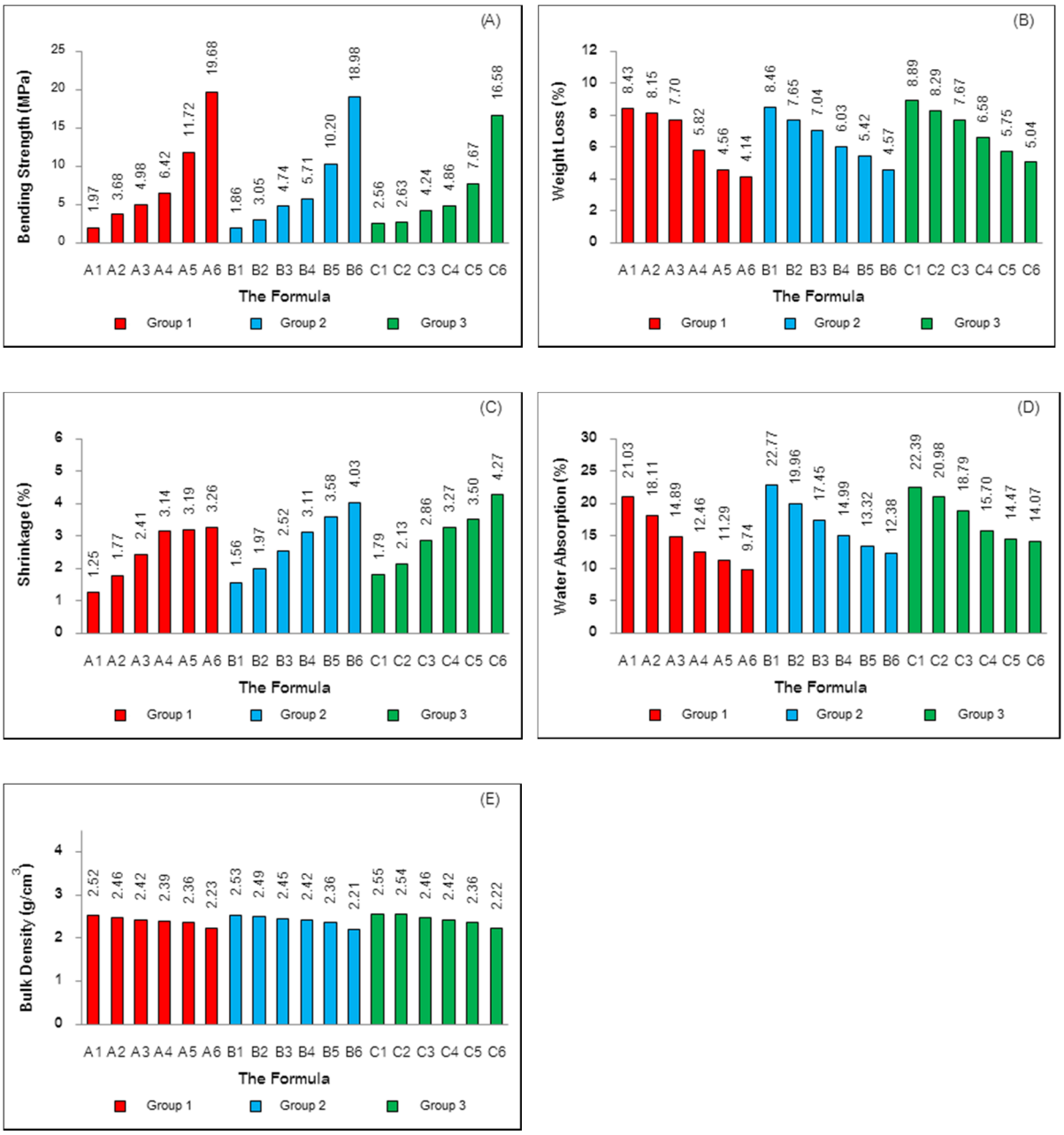


Figure 1 Test results: Bending Strength (A), Weight Loss (B), Shrinkage (C), Water Absorption (D) and Bulk Density (E)

สรุป

ค่าความต้านทานแรงดัด และค่าการหดตัวหลังเผามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ตามอัตราส่วนของเศษแก้วสีเขียว เนื่องจากเศษแก้วสีเขียวมีคุณสมบัติช่วยลดจุกสุกตัวในการเผา ทำให้ชิ้นงานเกิดการฟอร์มตัวเป็นแก้วได้เร็วขึ้น ทำให้โพรงช่องว่างภายในชิ้นงานมีน้อยลง (Luz and Ribeiro, 2007) เมื่อมีอัตราส่วนของเศษแก้วสีเขียวเพิ่มขึ้น จึงทำให้ค่าความต้านทานแรงดัด และค่าการหดตัวหลังการเผาสูงขึ้น

ค่าน้ำหนักที่สูญเสียหลังเผา มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับค่าการดูดซึมน้ำ เนื่องจากระหว่างการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100ºC ถึง 500ºC จะทำให้ปริมาณสารอินทรีย์และน้ำที่อยู่ในเนื้อดินถูกขจัดออกไป

(คชินท์ สายอินทวงศ์, 2551) เมื่อมีอัตราส่วนของดินตะกอนน้ำประปา และดินขาวโคกไม้ลายลดลง จึงทำให้ค่าน้ำหนักที่สูญเสียหลังการเผาลดลง

ค่าความหนาแน่นรวม มีแนวโน้มลดลงตามอัตราส่วนของดินตะกอนน้ำประปา และดินขาวโคกไม้ลาย เนื่องจากดินทั้ง 2 ชนิด มีค่าความหนาแน่นรวมมากกว่าเศษแก้วสีเขียว เมื่อมีอัตราส่วนของเศษแก้วสีเขียวมากขึ้น ค่าความหนาแน่นรวมจึงต่ำลง (My Agriculture information bank, 2015; The LibreTexts libraries, 2015)

จากผลการทดลองทั้งหมด 3 กลุ่ม 18 สูตร มีสูตรที่ผ่าน มอก. 2508-2555 จำนวน 3 สูตร คือ A6, B6 และ C6 โดยสูตร A6 มีค่าความต้านทานแรงดัด 19.68 MPa และค่าการดูดซึมน้ำ 9.74% ผ่านมาตรฐาน มอก. 2508-2555 กระเบื้องปูพื้นและบุผนัง BII(b) สูตร B6 และ C6 มีค่าความต้านทานแรงดัด 18.98 MPa และ 16.58 MPa และค่าการดูดซึมน้ำ 12.38% และ 14.07% ตามลำดับ ผ่านมาตรฐาน มอก. 2508-2555 กระเบื้องปูพื้นและบุผนัง BIII (Table 3)

Table 3 Bending Strength and Water Absorption Test result compare with TIS. 2508-2555

The Formula	Test Result		TIS.2508-2555				
			BI		BII		BIII
	Bending Strength (MPa)	Water Absorption (%)	a	b	a	b	
A6	19.68	9.74				√	
B6	18.98	12.38					√
C6	16.58	14.07					√

B means tiles formed by dry compression

I means low water absorption, a means total average water absorption is less than 0.3 %, b means total average water absorption is more than 0.5% and less than or equal 3%

II means medium water absorption, a means total average water absorption is more than 3% and less than or equal 6%, b means total average water absorption is more than 6% and less than or equal 10%

III means high water absorption, total average water absorption is more than 10%

จากผลการทดลองพบว่า สูตร A6 มีอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด โดยมี ดินตะกอนน้ำประปา 10% เศษแก้วสีเขียว 60% และดินขาวโคกไม้ลาย 30% มีค่าความต้านทานแรงดัด 19.68 MPa และมีค่าการดูดซึมน้ำ 9.74% ผ่านเกณฑ์ มอก. 2508-2555 กระเบื้องปูพื้นและบุผนัง BII(b)

ผลงานวิจัยนี้สามารถเพิ่มมูลค่าให้กับดินตะกอนน้ำประปา และเศษแก้วสีเขียว ก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์จากวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรม ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยเป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมกลับมารีไซเคิลให้เกิดประโยชน์ สามารถลดปริมาณวัสดุเหลือทิ้งที่ต้องกำจัดในระบบอุตสาหกรรมลงได้ อีกทั้งยังช่วยลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดกากของเสียที่เกิดจากโรงงานผลิตน้ำบางเขน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ และเครื่องมือ ขอขอบคุณโรงงานอิฐอ่างทอง ที่อนุเคราะห์ให้ตัวอย่างดินขาวโคกไม้ลาย และโรงผลิตน้ำประปาบางเขน ที่อนุเคราะห์ให้ตัวอย่างดินตะกอนน้ำประปา ทำให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2555. **คู่มือ 3 Rs กับการกำจัดของเสีย**. แหล่งที่มา: http://www2.diw.go.th/iwmb/form/iwd040_ผนวก%20ค_คู่มือ3Rs.pdf, 10 สิงหาคม 2561.

คชินท์ สายอินทวงศ์. 2551. **ออกซิเจน องค์ประกอบที่สำคัญสำหรับการเผา**. แหล่งที่มา: http://www.thaiceramicsociety.com/pc_burn_oxygen.php, 20 สิงหาคม 2561.

ดนุพล ตันนโยภาส, กัลยาณี คุปตานนท์ และ หทัยทิพย์ พันฤทธิ์ดำ. 2555. กระเบื้องเซรามิกมวลเบาชนิดใหม่ทำจากหางแร่ดินขาว และเถ้าลอยไม้ยางพารา. **วารสารวิชาการคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง** ปีที่ 7 (1): 70-82.

ดนุพล ตันนโยภาส, จิระวรรณ หนูฤทธิ์ และ สุชาติ จันทรมณี. 2553. สมบัติของกระเบื้องดินเผาสิ้งพระที่ผสมแคลไซต์ และตะกอนทิ้งจากโรงกรองน้ำประปา, น. 876-881. ***ใน* รายงานการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 8**. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา.

ดวงกมล สุริยฉัตร, ภาสันต์ วิชิตอมรพันธ์ และ วรรธนะ เรืองสำเร็จ. 2547. **รายงานวิชาการ ฉบับที่ สอพ. 16/2547**. 43 หน้า.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2555. **กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องเซรามิกส์**. มอก. 2508-2555.

วรพงษ์ เทียมสอน. 2553. **ผลิตภัณฑ์เซรามิกส์และแก้วจากกากเหลือทิ้งอุตสาหกรรม**. แหล่งที่มา: http://www.tpa.or.th/publisher/pdfFileDownloadS/TN218A_p068-72.pdf, 5 สิงหาคม 2561.

อาบีดีน ดะแซสาเมาะ, ฮาปีอเสาะ มาหะ และ ฮาลีเมาะ เจ๊ะบือราเฮง. 2557. สมบัติของอิฐบล็อกประสานจากเถ้าไม้ยางพาราผสมดินขาวนราธิวาส. **วารสารหน่วยวิจัยวิทยาศาสตร์เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อมเพื่อการเรียนรู้** ปีที่ 5 (2): 202-208.

Luz, A.P. and Ribeiro, S. 2007. Use of glass waste as a raw material in porcelain stoneware tile. **Ceramics International 33**: 761-765.

My agriculture information bank. 2015. **Density of soil: bulk density and particle density**. Available Source: http://www.agriinfo.in/?page=topic&superid=4&topicid=271. 29 July 2018.

Phonphuak, N. , Kanyakam S. and Chindaprasirt, P. 2016. Utilization of waste glass to enhance physical-mechanical properties of fired clay brick. **Journal of Cleaner Production 112**: 3057-3062.

The libretexts libraries. 2015. **Glass density evidence**. Available Source: https://chem.libre texts.org/Exemplars_and_Case_Studies/Exemplars/Forensics/Glass_Density_Evidence. 29 July 2018.

การจำแนกชนิดของความผิดพร่องบนสายส่ง 115 กิโลโวลต์ โดยใช้ตรรกศาสตร์คลุมเครือ

Fault Classification on 115 kV Transmission Line Using Fuzzy Logic

อดิเทพ จันทับ[1] และ ประจวบ อินระวงค์[1*]

Aditape Chantab[1] and Prajuab Inrawong[1*]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอวิธีการในการจำแนกชนิดของความผิดพร่องที่เกิดขึ้นบนสายส่งของระบบส่งจ่ายโดยใช้พื้นฐานตรรกศาสตร์คลุมเครือ สามารถจำแนกชนิดของความผิดพร่องแบบขนานทั้ง 10 ชนิด ที่เกิดขึ้นบนสายส่ง ได้อย่างมีความแม่นยำสูง ภายใต้เงื่อนไขความแตกต่างของค่าความต้านทานผิดพร่อง มุมที่เกิดความผิดพร่อง ระดับของโหลด และระยะที่เกิดความผิดพร่องบนสายส่ง โดยใช้ข้อมูลค่ากระแสทั้ง 3 เฟส ที่วัดได้ที่สถานีย่อยเท่านั้น มีการสร้างกรณีทดสอบจำนวนมากเพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของวิธีการนี้ โดยทำการศึกษาจากการจำลองโดยใช้ MATLAB Simulink และ fuzzy logic toolbox ผลจากการจำลองจำแนกชนิดของความผิดพร่องที่เกิดขึ้นบนสายส่งโดยวิธีนี้ พบว่ามีความถูกต้องในการจำแนก 98.75%

ABSTRACT

This research presents a fuzzy logic based fault classification technique to identify the type of fault in transmission system. The proposed technique is able to accurately identify all of 10 shunts fault that may occur in transmission line under different conditions of fault resistances, fault inception angles, loading levels and fault distances from relay. The proposed technique needs only 3 phases current measurements at substation. We used large number of simulation cases to verify the performances of the technique. The simulation studies had been carried out by using MATLAB Simulink and fuzzy logic toolbox. The result of the simulation is to classify the type of fault that occurs on the transmission line by this method. It was found that the accuracy of the classification was 98.75%.

Key Words: fault classification, transmission line, fuzzy logic

*Corresponding author; e-mail address: **prajuab@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

ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเป็นระบบที่มีความสำคัญมาก ซึ่งจำเป็นที่จะต้องใช้งานได้อย่างต่อเนื่อง เมื่อมีการเกิดความผิดพร่องขึ้นในระบบ อันเนื่องมาจากสาเหตุหลายประการ เช่น การเสื่อมของฉนวนไฟฟ้า ฟ้าผ่า สัตว์เลื้อยผ่าน กิ่งไม้เกี่ยวสายไฟฟ้า หรือ อุบัติเหตุ จะทำให้เกิดปัญหาต่อผู้ใช้ไฟฟ้าทั้งภาคครัวเรือน และภาคอุตสาหกรรม ซึ่งทำให้ขาดความสะดวกสบาย หรือเกิดผลเสียต่อธุรกิจของผู้ใช้ไฟฟ้า ระยะเวลาในการเกิดความผิดพร่องยิ่งมากก็ยิ่งสร้างความเสียหายให้กับระบบอย่างมาก เพื่อที่จะลดความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้น จึงจำเป็นจะต้องทำการแก้ไขเพื่อให้ระบบกลับมาใช้งานได้อย่างปกติภายในเวลาอันรวดเร็ว

เพื่อที่จะแก้ไขระบบได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว การจำแนกชนิดและตำแหน่งของความผิดพร่องจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก ในอดีตเมื่อมีการเกิดความผิดพร่องเกิดขึ้นในระบบ ก็จะทำการแก้ไขระบบได้อย่างล่าช้า อันเนื่องมาจากไม่ทราบข้อมูลเกี่ยวกับการเกิดความผิดพร่อง เพราะไม่มีเครื่องมือ อุปกรณ์หรือวิธีการในการวิเคราะห์ความผิดพร่องที่เกิดขึ้น ซึ่งในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้านั้นสายส่งถือว่าเป็นส่วนที่มีความสำคัญมาก จึงมีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาเกี่ยวกับการจำแนกชนิดและตำแหน่งของความผิดพร่องที่เกิดขึ้นบนสายส่ง จากการศึกษาวิธีจำแนกโดยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม(ANN) พบว่ามีความแม่นยำในการจำแนกชนิดของความผิดพร่อง แต่จะต้องมีการสอนค่าของข้อมูลต่างๆ เช่น ค่าความต้านทานผิดพร่อง ค่าระดับของโหลด มุมที่เกิดความผิดพร่อง และค่าอื่นๆ ให้กับ ANN ซึ่งข้อมูลมีจำนวนมาก และใช้เวลาค่อนข้างจะนานในการสอน(Suman Kumar Saha, 2012) วิธีจำแนกโดยใช้การแปลงเวฟเล็ต(Wavelet Transform) โดยการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ของระดับพลังงานของสัญญาณกระแสและแรงดัน สามารถจำแนกชนิดความผิดพร่องได้แม่นยำ(V. Ashok, 2013) วิธีจำแนกโดยใช้ตรรกศาสตร์คลุมเครือ (fuzzy logic) สามารถจำแนกชนิดความผิดพร่องที่เกิดขึ้นโดยใช้เพียงข้อมูลค่ากระแสที่วัดได้ มีความแม่นยำสูงในการจำแนก (Carlo Cecati, 2012)

งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาเกี่ยวกับการจำแนกชนิดของความผิดพร่องที่เกิดขึ้นบนสายส่งโดยใช้ตรรกศาสตร์คลุมเครือ เป็นเครื่องมือในการตัดสินใจหรือจำแนกชนิดของความผิดพร่อง จากแบบจำลองที่สร้างขึ้นโดยใช้ข้อมูลและพารามิเตอร์จริงของระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

อุปกรณ์และวิธีการ

รูปแบบของระบบกำลังไฟฟ้า

ระบบกำลังไฟฟ้านี้เป็นระบบส่งจ่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ซึ่งส่งจ่ายจากสถานีย่อยสุรินทร์2 ไปยังสถานีย่อยปราสาท โดยใช้สายส่ง 115 กิโลโวลต์ ความยาว 31 กิโลเมตร ดังแสดงใน Figure 1 และมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังแสดงใน Table 1

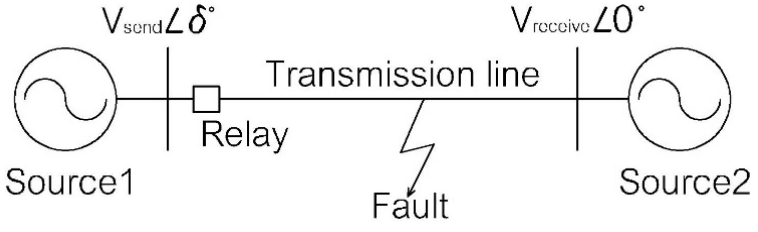


Figure 1 Power system model

Table 1 Power System Parameters

Source Data at Both Sending and Receiving Ends	
Short circuit level at Source1 (MVA)	925.019
Short circuit level at Source2 (MVA)	512.3059
Frequency (Hz)	50
Transmission Line Data	
Length (km)	31
Voltage (kV)	115
Positive sequence impedance (ohm/km)	0.0858110+j 0.3620400
Zero sequence impedance (ohm/km)	0.2548500+j 1.4223000

การจำลองระบบ

วิธีการในการจำแนกชนิดของความผิดพร่องนี้ใช้ค่าผลต่างมุมของส่วนประกอบลำดับต่างๆ และค่ากระแสในขณะที่เกิดความผิดพร่อง ที่ความถี่มูลฐาน ซึ่งคำนวณค่าดังสมการ (1) และ (2)

$$\begin{aligned} ang\_A &= \left|\angle I_{a1f} - \angle I_{a2f}\right| \\ ang\_B &= \left|\angle I_{b1f} - \angle I_{b2f}\right| \\ ang\_C &= \left|\angle I_{c1f} - \angle I_{c2f}\right| \end{aligned} \tag{1}$$

$$R_{0f} = \left(\frac{I_{a0f}}{I_{a1f}}\right) \text{ และ } R_{2f} = \left(\frac{I_{a2f}}{I_{a1f}}\right) \tag{2}$$

โดยที่ I_{a0f}, I_{a1f} และ I_{a2f} คือส่วนประกอบลำดับศูนย์ ส่วนประกอบลำดับบวก และส่วนประกอบลำดับลบของค่ากระแสเฟส a ขณะที่เกิดความผิดพร่อง ตามลำดับ และเช่นเดียวกัน ส่วนประกอบลำดับบวกและส่วนประกอบลำดับลบของเฟส b และ c คือ I_{b1f}, I_{b2f} และ I_{c1f}, I_{c2f} ตามลำดับ

สร้างแบบจำลองกรณีการเกิดความผิดพร่องบนสายสายส่ง ดังแสดงใน Figure 2 และทำการจำลองโดยกำหนดให้ช่วงเวลาที่เกิดความผิดพร่องเป็น 5 ไซเคิล ภายใต้เงื่อนไขความแตกต่างของค่าความต้านทานผิดพร่อง (R_f) มุมที่เกิดความผิดพร่อง(FIA) ระดับของโหลด(δ) และระยะที่เกิดความผิดพร่องบนสายส่ง(L) และนำข้อมูลมาคำนวณหาค่าเฉลี่ยสำหรับแต่ละค่าของ ang_A, ang_B, Ang_C, R_{0f} และ R_{2f} หลังจากนั้นนำค่าเฉลี่ยที่ได้ปัดค่าเป็นจำนวนเต็ม ซึ่งค่าที่ได้จะเขียนให้อยู่ในรูปค่าประมาณ ดังแสดงใน Table 2

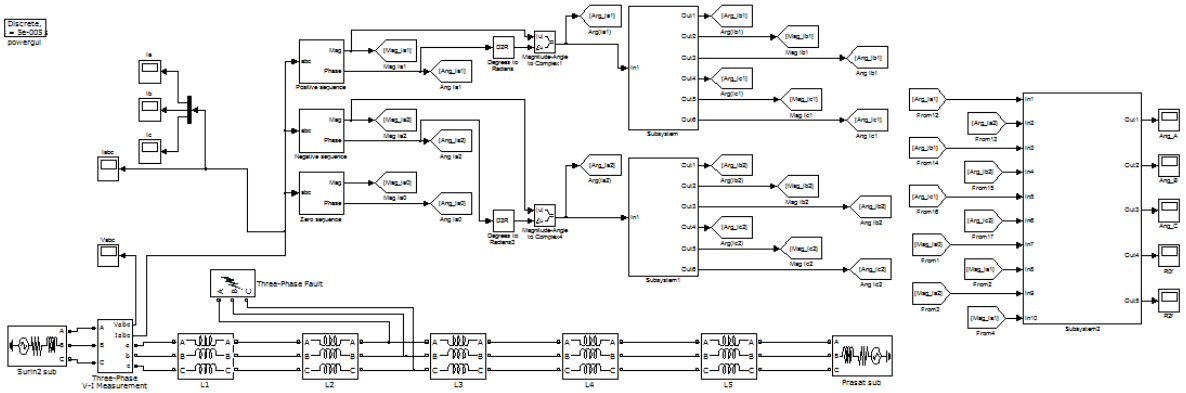


Figure 2 Power system simulation model

Table 2 Approximate mean value of the different quantities

Type of fault	Ang_A	Ang_B	Ang_C	R_{0f}	R_{2f}
a-g	20º	100º	140º	High	High
b-g	100º	20º	140º	High	High
c-g	140º	100º	20º	High	High
a-b	45º	75º	165º	Low	High
b-c	165º	45º	75º	Low	High
c-a	75º	165º	45º	Low	High
a-b-g	45º	75º	165º	High	High
b-c-g	165º	45º	75º	High	High
c-a-g	75º	165º	45º	High	High
Symmetrical	-	-	-	Low	Low

การจำแนกชนิดของความผิดพร่องโดยใช้ตรรกศาสตร์คลุมเครือ

1) ระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือ

นำค่าอินพุทแต่ละค่ามาทำการออกแบบ เพื่อทำการหาค่าฟังก์ชันสมาชิก ออกแบบฐานกฎเพื่อใช้ในการอนุมาน หลังจากทำการการอนุมานแล้วมีการรวมค่าที่ได้จากการรวมกฎต่างๆ เพื่อแสดงเป็นค่าเอาท์พุต ซึ่งระบบนี้มีโครงสร้าง ดังแสดงใน Figure 3

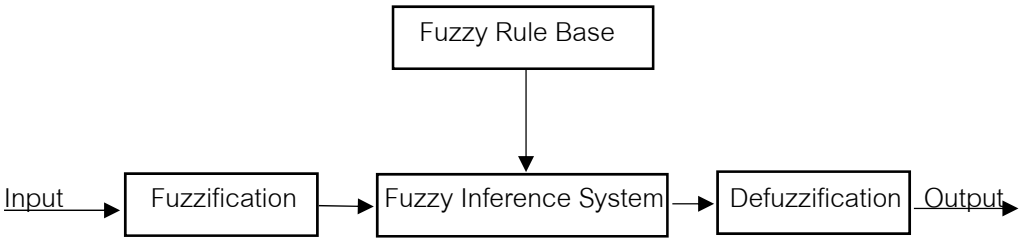


Figure 3 Fuzzy Logic System

2) ฐานกฎ

2.1) ถ้า ang_A เป็น approximately20º และ ang_B เป็น approximately100º และ ang_C เป็น approximately140º และ R_{0f} เป็น High และ R_{2f} เป็น High ดังนั้นเป็นความผิดพร่องชนิด a-g

2.2) ถ้า ang_A เป็น approximately100º และ ang_B เป็น approximately20º และ ang_C เป็น approximately140º และ R_{0f} เป็น High และ R_{2f} เป็น High ดังนั้นเป็นความผิดพร่องชนิด b-g

2.3) ถ้า ang_A เป็น approximately140º และ ang_B เป็น approximately100º และ ang_C เป็น Approximately20º และ R_{0f} เป็น High และ R_{2f} เป็น High ดังนั้นเป็นความผิดพร่องชนิด c-g

2.4) ถ้า ang_A เป็น approximately45º และ ang_B เป็น approximately75º และ ang_C เป็น Approximately165º และ R_{0f} เป็น Low และ R_{2f} เป็น High ดังนั้นเป็นความผิดพร่องชนิด a-b

2.5) ถ้า ang_A เป็น approximately165º และ ang_B เป็น approximately45º และ ang_C เป็น Approximately75º และ R_{0f} เป็น Low และ R_{2f} เป็น High ดังนั้นเป็นความผิดพร่องชนิด b-c

2.6) ถ้า ang_A เป็น approximately75º และ ang_B เป็น approximately165º และ ang_C เป็น Approximately45º และ R_{0f} เป็น Low และ R_{2f} เป็น High ดังนั้นเป็นความผิดพร่องชนิด c-a

2.7) ถ้า ang_A เป็น approximately45º และ ang_B เป็น approximately75º และ ang_C เป็น Approximately165º และ R_{0f} เป็น High และ R_{2f} เป็น High ดังนั้นเป็นความผิดพร่องชนิด a-b-g

2.8) ถ้า ang_A เป็น approximately165º และ ang_B เป็น approximately45º และ ang_C เป็น Approximately75º และ R_{0f} เป็น High และ R_{2f} เป็น High ดังนั้นเป็นความผิดพร่องชนิด b-c-g

2.9) ถ้า ang_A เป็น approximately75º และ ang_B เป็น approximately165º และ ang_C เป็น Approximately45º และ R_{0f} เป็น High และ R_{2f} เป็น High ดังนั้นเป็นความผิดพร่องชนิด c-a-g

2.10) ถ้า R_{0f} เป็น Low และ R_{2f} เป็น Low ดังนั้นเป็นความผิดพร่องชนิด symmetrical

3) ฟังก์ชันสมาชิก

ค่าอินพุตแต่ละตัวมีฟังก์ชันสมาชิกเป็นแบบ triangular ดังแสดงใน Figure 3 โดยจุด A และ C มีค่าความเป็นสมาชิก 0 ส่วนจุด B มีค่าความเป็นสมาชิก 1 โดยมีค่าพารามิเตอร์สำหรับแต่ละตัวแปรดังแสดงใน Table 3

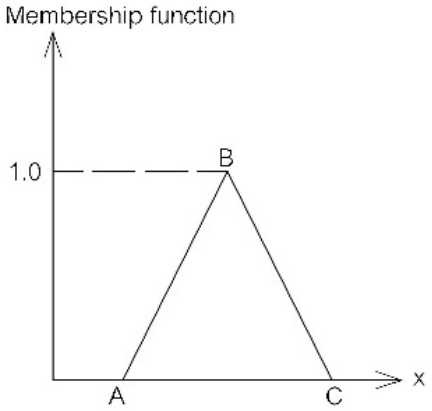


Figure 3 Triangular fuzzy membership function

Table 3 Fuzzy variables input

Fuzzy variable	Parameter function		
	A	B	C
approximately 20º	0º	20º	45º
approximately 45º	25º	45º	65º
approximately 75º	55º	75º	95º
approximately 100º	70º	100º	120º
approximately 140º	120º	140º	170º
approximately 165º	145º	165º	180º
Low-R_{0f}	0	0	0.1
High-R_{0f}	0.1	0.56	1.2
Low-R_{2f}	0	0	0.1
High-R_{2f}	0.1	0.6	1.2

ในการจำแนกชนิดของความผิดพร่องใช้ค่าเลขฐานสองจำนวน 4 บิต (b3 b2 b1 b0) ซึ่งบิตที่มีค่าเป็น 1 แสดงว่ามีความผิดพร่องเกิดขึ้น โดยบิต b3 มีความผิดพร่องที่เฟส a บิต b2 มีความผิดพร่องที่เฟส b บิต b1 มีความผิดพร่องที่เฟส c และ บิต b0 มีความผิดพร่องที่ ground และเมื่อนำค่าแต่ละบิตมาเรียงกันและแปลงเป็นเลขฐานสิบ จะได้ค่าดัง Table 4

Table 4 Fault code

Fault type	b3	b2	b1	b0	Equivalent decimal number
a-g	1	0	0	1	9
b-g	0	1	0	1	5
c-g	0	0	1	1	3
a-b	1	1	0	0	12
b-c	0	1	1	0	6
c-a	1	0	1	0	10
a-b-g	1	1	0	1	13
b-c-g	0	1	1	1	7
c-a-g	1	0	1	1	11
Symmetrical	1	1	1	1	15

ค่าเอาท์พุตมีฟังก์ชันสมาชิกเป็นแบบ triangular โดยมีค่าพารามิเตอร์ดังแสดงใน Table 5

Table 5 Fuzzy variables output

Fuzzy variable	Parameter function		
	A	B	C
a-g	8.5	9.0	9.5
b-g	4.5	5.0	5.5
c-g	2.5	3.0	3.5
a-b	11.5	12.0	12.5
b-c	5.5	6.0	6.5
c-a	9.5	10.0	10.5
a-b-g	12.5	13.0	13.5
b-c-g	6.5	7.0	7.5
c-a-g	10.5	11.0	11.5
Symmetrical	14.5	15.0	15.5

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการจำแนกชนิดของความพร่อง

จากการจำลองกรณีการเกิดความผิดพร่องที่เกิดขึ้นบนสายส่ง โดยใช้ MATLAB Simulink ในการจำลองภายใต้เงื่อนไขความแตกต่างของค่าความต้านทานผิดพร่อง(R_f) เท่ากับ 0.001, 5, 25 และ 50 โอห์ม มุมที่เกิดความผิดพร่อง(FIA) เท่ากับ 10º,30º,190º และ 210º ระดับของโหลด(δ) เท่ากับ 10º,20º และ 30º และระยะที่เกิดความผิดพร่องบนสายส่ง(L) เท่ากับ 0.2L, 0.4L, 0.6L และ 0.8L ซึ่ง L คือความยาวทั้งหมดของสายส่ง โดยจำลองการเกิดความผิดพร่องแบบขนานทั้ง 10 ชนิด ได้แก่ a-g, b-g, c-g, a-b, b-c, c-a, a-b-g, b-c-g, c-a-g และแบบ symmetrical รวมเป็น 1,920 กรณี และนำค่าของข้อมูลที่ได้จากการจำลองความผิดพร่องในแต่ละกรณีมาจำแนกชนิดของความผิดพร่อง โดยใช้ MATLAB fuzzy logic toolbox พบว่าสามารถจำแนกชนิดของความผิดพร่องได้ถูกต้องทั้ง 1,920 กรณี ซึ่งผลในการจำแนกความผิดพร่องบางส่วนได้แสดงใน Table 6 ถึง 8

Table 6 FLS Output (δ=10º, R_f=0.001 ohm, FIA=10º)

Fault distance	Type of fault									
	a-g	b-g	c-g	a-b	b-c	c-a	a-b-g	b-c-g	c-a-g	symmetrical
0.2L	9.0000	4.9982	3.0063	11.9960	6.0037	10.0042	13.0069	7.0019	10.9969	14.9800
0.4L	9.0000	4.9948	3.0029	11.9960	6.0038	10.0039	13.0043	7.0003	10.9965	14.9948
0.6L	9.0000	4.9957	3.0026	11.9961	6.0039	10.0036	13.0076	7.0013	10.9975	14.9944
0.8L	9.0000	4.9962	3.0028	11.9960	6.0040	10.0061	13.0042	7.0034	10.9962	14.9941

Table 7 FLS Output (δ=20º, R_f=25 ohm, FIA=30º)

Fault distance	Type of fault									
	a-g	b-g	c-g	a-b	b-c	c-a	a-b-g	b-c-g	c-a-g	symmetrical
0.2L	9.0000	4.9937	3.0060	11.9986	6.0027	10.0027	13.0021	7.0041	11.0150	14.9966
0.4L	9.0000	4.9969	3.0072	11.9982	6.0019	10.0023	13.0073	7.0026	10.9980	14.9949
0.6L	9.0000	4.9958	3.0037	11.9981	6.0017	10.0014	13.0026	7.0018	11.0006	14.9951
0.8L	9.0000	4.9987	3.0039	11.9982	6.0016	10.0014	13.0040	7.0004	10.9989	14.9954

Table 8 FLS Output (δ=30º, R_f=50 ohm, FIA=210º)

Fault distance	Type of fault									
	a-g	b-g	c-g	a-b	b-c	c-a	a-b-g	b-c-g	c-a-g	symmetrical
0.2L	9.0000	4.9971	3.0052	11.9988	6.0012	10.0014	13.0044	7.0032	10.9985	14.9968
0.4L	9.0000	4.9991	3.0040	11.9977	6.0038	10.0026	13.0121	7.0042	10.9944	14.9968
0.6L	9.0000	4.9944	3.0069	11.9958	6.0040	10.0040	13.0191	7.0111	10.9867	14.9967
0.8L	9.0000	4.9799	3.0200	11.9962	6.0036	10.0056	13.0101	7.0003	11.0065	14.9967

เพื่อยืนยันความแม่นยำของวิธีการในการจำแนกชนิดของความผิดพร่องนี้ จึงมีการจำลองกรณีการเกิดความผิดพร่องเพิ่มเติม โดยการเพิ่มระดับของโหลด(δ) เป็น 40º, 50º, 60º และ 70º ภายใต้เงื่อนไข R_f เท่ากับ 25 โอห์ม FIA เท่ากับ 30º และ L เท่ากับ 0.2L, 0.4L, 0.6L และ 0.8L รวมเป็น 160 กรณี แล้วนำค่าของข้อมูลที่ได้จากการจำลองความผิดพร่องในแต่ละกรณีมาจำแนกชนิดของความผิดพร่อง พบว่าสามารถจำแนกชนิดความผิดพร่องได้ถูกต้อง 159 กรณี และผิดพลาด 1 กรณี ซึ่งได้แสดงจำนวนที่มีการจำแนกผิดพลาด ดัง Table 9

Table 9 Number of incorrect classifications (FIA=30º, R_f=25 ohm)

δ	Fault Distance					δ	Fault Distance			
	0.2L	0.4L	0.6L	0.8L			0.2L	0.4L	0.6L	0.8L
40º	0	0	0	0		60º	0	0	0	0
50º	0	0	0	0		70º	0	0	0	1

มีการจำลองกรณีการเกิดความผิดพร่องเพิ่มเติมโดยมีการเพิ่มค่า R_f เป็น 75, 100, 125 และ 150 โอห์ม ภายใต้เงื่อนไข FIA เท่ากับ 210º δ เท่ากับ 30º และ L เท่ากับ 0.2L, 0.4L, 0.6L และ 0.8L รวมเป็น 160 กรณี แล้วนำค่าของข้อมูลที่ได้จากการจำลองความผิดพร่องในแต่ละกรณีมาจำแนกชนิดของความผิดพร่อง พบว่าสามารถจำแนกชนิดความผิดพร่องได้ถูกต้อง 133 กรณี และผิดพลาด 27 กรณี ซึ่งได้แสดงจำนวนที่มีการจำแนกผิดพลาด ดัง Table 10

Table 10 Number of incorrect classifications (FIA=30º, R_f=25 ohm)

R_f (ohm)	Fault Distance					R_f (ohm)	Fault Distance			
	0.2L	0.4L	0.6L	0.8L			0.2L	0.4L	0.6L	0.8L
75	0	0	0	0		125	0	0	3	5
100	0	0	0	5		150	0	3	5	6

สรุป

วิธีการในการจำแนกชนิดของความผิดพร่องที่เกิดขึ้นบนสายส่ง 115 กิโลโวลต์ โดยใช้ตรรกศาสตร์คลุมเครือนี้ สามารถจำแนกชนิดของความผิดพร่องที่เกิดขึ้นจากการจำลอง 2,240 กรณี มีความถูกต้อง 2,212 กรณี หรือคิดเป็น 98.75% และจากผลในการจำแนกพบว่าวิธีการนี้จะมีความผิดพลาดในการจำแนกเมื่อระดับโหลดมีค่าสูงขึ้นที่ 70º โดยเกิดความผิดพร่องที่ระยะ 80% ของความยาวสายส่ง และเมื่อค่าความต้านทานผิดพร่องมีค่าสูงขึ้นที่ 100 โอห์ม จะทำการจำแนกผิดพลาดเมื่อเกิดความผิดพร่องที่ระยะ 80% ของความยาวสายส่ง เมื่อความต้านทานผิดพร่องมีค่าสูงขึ้นที่ 125 โอห์ม จะทำการจำแนกผิดพลาดเมื่อเกิดความผิดพร่องที่ระยะตั้งแต่ 60% ของความยาวสายส่งขึ้นไป และเมื่อความต้านทานผิดพร่องมีค่าสูงขึ้นที่ 150 โอห์ม จะทำการจำแนกผิดพลาดเมื่อเกิดความผิดพร่องที่ระยะตั้งแต่ 40% ของความยาวสายส่งขึ้นไป สำหรับการออกแบบการจำแนกชนิดของความผิดพร่องนี้จึงเหมาะสำหรับการจำแนกเมื่อเกิดความต้านทานผิดพร่องไม่เกิน 50 โอห์ม ระดับของโหลดไม่เกิน 30º และระยะที่เกิดความผิดพร่องไม่เกิน 80% ของสายส่ง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จังหวัดนครราชสีมา ทุกท่าน ที่ให้คำปรึกษาในการทำวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

กองวิเคราะห์และวางแผนระบบไฟฟ้า ฝ่ายวางแผนระบบไฟฟ้า การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. 2558. **รายงานค่ากระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้าของ กฟภ. ปี 2558(2015).**

B. Das and J.V. Reddy. 2005. "**Fuzzy-logic-based fault classification scheme for digital distance protection.**" IEEE Transactions Power Delivery. Vol. 20, No. 2.

Carlo Cecati. 2012. "**Fuzzy-logic-based high accurate fault classification of single and double-circuit power transmission lines.**" International Symposium on Power Electronics Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion.

Vu Phan Huan. 2015. "**Fault Classification and Location on 220kV Transmission line Hoa Khanh – Hue Using Anfis Net**" Journal of Automation and Control Engineering Vol. 3, No. 2

Suman Kumar Saha. 2012. "**An ANN based Relay Design for Identication Faults of 400kv High Voltage AC Transmission Line.**" International Journal of Computer Applications Vol. 46, No.20

V. Ashok. 2013. "**Identification and Classification of Transmission Line Faults Using Wavelet Analysis**" ITSI Transactions on Electrical and Electronics Engineering Vol.1.

การประเมินผลกระทบของก๊าซปิโตรเลียมเหลวรั่วไหลจากถังกักเก็บในพื้นที่กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมกลั่นน้ำมัน

Impact Assessment of Liquid Petroleum Gas Release in Petrochemical Refinery

นิลวรรณ พลบุตร[1*] และ ศุภพัชรี รอดเดชา[2]

Nillawan Ponlaboot[1*] and Supacharee Roddecha[2]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินผลกระทบการรั่วไหลของก๊าซปิโตรเลียมเหลวที่ส่งผลต่อพื้นที่ใกล้เคียงโดยรอบ นำผลมากำหนดกลยุทธ์ในการตอบสนองภาวะฉุกเฉิน โดยใช้โปรแกรม PHAST ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ได้รับการยอมรับในการใช้จำลองผลกระทบจากการรั่วไหลของสารเคมี มาจำลองสถานการณ์การรั่วไหลของก๊าซปิโตรเลียมเหลวที่บรรจุในถังแนวนอนปริมาตร 6.4 ลูกบาศก์เมตร ภายใต้ความดัน 9.8 บาร์ และอุณหภูมิ 62 องศาเซลเซียส มีขนาดการรั่วไหล 1 นิ้ว ที่ความเร็วลม 1.48 เมตรต่อวินาที ผลการวิเคราะห์ผลกระทบจากการแพร่กระจายของก๊าซปิโตรเลียมเหลว พบว่าระดับความเข้มข้นของกลุ่มไอก๊าซที่ติดไฟได้จากจุดรั่วไหล ซึ่งเป็นระยะที่ต้องดำเนินการให้เป็นเขตปลอดประกายไฟ มีค่ารัศมีภายใน 33 เมตรจากจุดรั่วไหล การรั่วไหลที่มีระดับความเข้มข้น 5,500 ppm ซึ่งมีผลกระทบกับคนเล็กน้อย หากสัมผัสไม่เกิน 1 ชั่วโมง มีค่ารัศมีการแพร่กระจายจากจุดรั่วไหลครอบคลุมระยะ 38 เมตร และระยะรัศมีซึ่งสามารถทำให้ผู้อาศัยสามารถรู้สึกได้ถึงผลกระทบจากแรงดันของการระเบิด มีระยะห่าง 64 เมตร จากจุดที่เกิดการระเบิด

ABSTRACT

The purpose of this research is to evaluate the effect of liquefied petroleum gas (LPG) leakage on the surrounded areas and to study the safe distance from leakage to establish an emergency response plan. This research, the PHAST program has been used to simulate the leakage of LPG contained in a 12,900 cm^3 horizontal storage tank, under a pressure of 9.7 bar and a temperature of 62 ˚C. The leakage size is 1 inch, at a wind speed of 1.48 m/s. The results indicated that the concentration of the flammable vapors from the leakage point of a radius of 33 meters shall be treated as a non-sparking zone. The emission radius of the LPG at a concentration of 5,500 ppm that has minimal impact on humans if exposed less than one hour cover a distance of 57 meters from the point of leakage. The smallest shaking radius where the residents can feel the effect of the explosion pressure was 64 meters away from the point of explosion.

Keyword: PHAST, LPG, Impact Assessment, Leakage

[*]Corresponding author; e-mail address: nillawan.po@ku.th

[1]ภาควิชาวิศวกรรมความปลอดภัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

[2]ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

คำนำ

ในอุสาหกรรมกลั่นน้ำมันมีการนำก๊าซปิโตรเลียมเหลวมาเป็นเชื้อเพลิงในในกระบวนการกลั่น จัดเก็บอยู่ในรูปของก๊าซอัดในภาชนะปิด (Compress Gas) หรือของเหลวที่มีความดัน และมีการจัดเก็บในพื้นที่ปริมาณมาก ซึ่งหากมีการรั่วไหลหรือเกิดการระเบิดขึ้น อาจก่อให้เกิดอุบัติเหตุหรืออันตรายต่อผู้ปฏิบัติงาน ทรัพย์สิน หรือชุมชนโดยรอบ ดังนั้นการเตรียมการก่อนการเกิดเหตุฉุกเฉิน จะทำให้สามารถเตรียมในส่วนของอุปกรณ์ที่ใช้ในการระงับเหตุฉุกเฉิน ขั้นตอนในการปฏิบัติการระงับเหตุ เมื่อเกิดเหตุฉุกเฉินขึ้นสามารถนำอุปกรณ์ที่ใช้ในการระงับเหตุและสามารถปฏิบัติได้ตามขั้นตอนที่ได้กำหนดไว้ได้อย่างถูกต้อง รวดเร็วและปลอดภัย งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการจำลองเหตุการณ์การรั่วไหลของก๊าซปิโตรเลียมเหลว ซึ่งถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมการกลั่นน้ำมันแห่งหนึ่ง โดยก๊าซปิโตรเลียมเหลว ถูกบรรจุในถังกักเก็บแนวนอนในสถานะของเหลว ปริมาตร 6.4 ลูกบาศก์เมตร ภายใต้ความดัน 9.8 บาร์ และอุณหภูมิ 62 องศาเซลเซียส

(The International association of oil & gas producers 2016) สมาคมผู้ผลิตน้ำมันและก๊าซนานาชาติ หรือ OGP ได้กล่าวถึงการทำแบบจำลองผลกระทบไว้ว่า เป็นการคำนวณค่าเชิงตัวเลข ที่อธิบายถึงผลกระทบทางกายภาพที่เชื่อถือได้ของเหตุการณ์การรั่วไหลของสาร ซึ่งสารนั้นอาจมีความไวไฟ หรือมีความเป็นพิษ และผลกระทบนั้นอาจเป็นอันตรายต่อชีวิตและทรัพย์สิน และโปรแกรม PHAST ของบริษัท DNV เป็นหนึ่งในโปรแกรมที่ทางสมาคมฯได้แนะนำให้ใช้ในการทำแบบจำลองผลกระทบจากการรั่วไหลของสารเคมี

ขั้นตอนการทำแบบจำลองผลกระทบจากสารเคมีรั่วไหลโดยใช้โปรแกรม PHAST (Process Hazard Analysis Tools) เริ่มจากการนำข้อมูลตั้งต้นต่าง ๆ ทั้งข้อมูลที่เกี่ยวของกับสมบัติของสารที่เกิดการรั่วไหล เช่น ชนิดของสารที่รั่วไหล ความดัน อุณหภูมิ เป็นต้น ข้อมูลที่เกี่ยวกับถังเก็บ เช่น ปริมาณของสารในถังเก็บ สภาพภูมิประเทศที่วางถัง เป็นต้น ข้อมูลของการรั่วไหล เช่น ลักษณะของการรั่วไหล ขนาดของรูรั่ว หรือขนาดของท่อที่เกิดการรั่วไหล ตำแหน่งและทิศทางที่เกิดการรั่วไหล เป็นต้น มาทำแบบจำลองการรั่วไหล เพื่อหาอัตราการรั่วไหลของสาร หลังจากนั้นจึงทำการจำลองการแพร่ในอากาศ โดยการนำข้อมูลสภาพบรรยากาศ เช่น กลางวัน กลางคืน และความเร็วลม มาจำลองรูปร่างของกลุ่มควัน ในส่วนของการแสดงผลกระทบ หากเป็นสารที่ไวไฟ อาจจะติดไฟในทันทีที่รั่วไหล เกิดเป็นเพลิงไหม้ ทำให้ผู้ที่อยู่ในบริเวณนั้นได้รับอันตรายจากปริมาณรังสีความร้อน หากสารไวไฟนั้นไม่ได้ติดไฟในทันที แต่รั่วไหลออกมาตลอดเวลาและสะสมพลังงานขึ้นเรื่อย ๆ จะเกิดการระเบิดขึ้นได้ ทำให้ผู้ที่อยู่ในบริเวณนั้น หรือ สิ่งก่อสร้าง ได้รับอันตรายจากคลื่นการระเบิด หากเป็นสารที่มีความเป็นพิษสิ่งที่จะต้องแสดงผล คือ ระดับความเข้มข้นที่เป็นอันตราย

ที่ผ่านมามีการนำโปรแกรมมาประยุกต์ใช้ในการศึกษาการรั่วไหลของสารเคมีชนิดต่างๆ อย่างแพร่หลาย ดังเช่นตัวอย่างต่อไปนี้

(ดารารัตน์ พลอยทรัพย์ 2551) ได้ทำการประเมินการแพร่กระจาย และผลกระทบจากการแพร่กระจายความสามารถในการลุกติดไฟ และการระเบิด จากการรั่วไหลของก๊าซปิโตรเลียมเหลว โดยใช้โปรแกรม ALOHA มาใช้ในการประเมินเพื่อหาทิศทางการแพร่กระจาย และนำผลจากการประเมินมาประยุกต์ใช้ร่วมกับระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์โดยใช้โปรแกรม ArcGIS และโปรแกรม MARPLOT ร่วมกับ Google earth เพื่อแสดงให้เห็นทิศทางการแพร่กระจายและพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบ เพื่อจัดทำแผนป้องกันและรองรับภาวะฉุกเฉินที่อาจเกิดขึ้น

(สวิตา เลิศสุโภชวณิชย์ 2559)ได้ทำการศึกษาการประเมินความเสี่ยงของกระบวนการถ่ายเทคาร์บอนไดออกไซด์เหลวจากถังเก็บไปยังรถขนส่ง ในโรงงานผลิตคาร์บอนไดออกไซด์เหลว ซึ่งต้องใช้การจำลองผลกระทบจากการรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อพิจารณาระดับความรุนแรงที่ส่งผลกระทบต่อบุคคล ชุมชน สิ่งแวดล้อม และทรัพย์สิน การจำลองสถานการณ์การรั่วไหลใช้โปรแกรม PHAST ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ได้รับการยอมรับเพื่อใช้จำลองผลกระทบจากการรั่วไหลของสารเคมี การจำลองสถานการณ์การรั่วไหลนั้น ทำบนแผนผังจำลองของโรงงาน โดยแบ่ง แบบจำลองการรั่วไหลออกเป็น 2 แบบ คือ แบบจำลองการรั่วไหลที่ระดับความเข้มข้นที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ กับแบบจำลองการรั่วไหลที่ระดับความเข้มข้นที่เป็นไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ ผลจากการประเมินสามารถนำไปใช้ในการแก้ไขปรับปรุงระบบการถ่ายเทคาร์บอนไดออกไซด์งานวิจัยนี้ได้นำโปรแกรม PHAST 7.11 มาจำลองการรั่วไหลของก๊าซปิโตรเลียมเหลวและประเมินผลกระทบต่อพื้นที่ใกล้เคียงโดยรอบ ข้อมูลที่ได้จากการประเมิน สามารถแสดงผลลัพธ์ของผลกระทบด้วยเส้นชั้นความเสี่ยง ทำให้ทราบทิศทางการแพร่กระจายของสาร ปริมาณความเข้มข้นของสารที่กระจายออกไปในระยะต่างๆ และประเมินพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากการแพร่กระจายของสารที่เกิดการรั่วไหลและระเบิด ผลจากการประเมินสามารถนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ในการวางแผนกลยุทธ์ในการตอบสนองภาวะฉุกเฉินที่อาจเกิดขึ้น

งานวิจัยนี้ได้นำโปรแกรม PHAST 7.11 มาจำลองการรั่วไหลของก๊าซปิโตรเลียมเหลวและประเมินผลกระทบต่อพื้นที่ใกล้เคียงโดยรอบ ข้อมูลที่ได้จากการประเมิน สามารถแสดงผลลัพธ์ของผลกระทบด้วยเส้นชั้นความเสี่ยง ทำให้ทราบระยะการการแพร่กระจายของสาร ปริมาณความเข้มข้นของสารที่กระจายออกไปในระยะต่างๆ และประเมินพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากการแพร่กระจายของสารที่เกิดการรั่วไหลและระเบิด ผลจากการประเมินสามารถนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ในการวางแผนกลยุทธ์ในการตอบสนองภาวะฉุกเฉินที่อาจเกิดขึ้น

อุปกรณ์และวิธีการ

งานวิจัยเรื่องการประเมินผลกระทบรั่วไหลของก๊าซปิโตรเลียมเหลวจากถังกักเก็บในพื้นที่กระบวนการผลิตจะดำเนินการภายใต้ขอบเขตการวิจัย ดังนี้

1. จำลองการรั่วไหลของก๊าซปิโตรเลียมเหลวโดยใช้โปรแกรม PHAST 7.11 ซึ่งมีการกำหนดสภาวะและข้อมูลต่างๆในการทำแบบจำลอง จึงใช้ข้อมูลในการกำหนดสภาวะดังต่อไปนี้
   1.1 ถังกักเก็บ(Storage Tank) แนวนอน บรรจุของเหลวปริมาตร 6.4 ลูกบาศก์เมตร โดยก๊าซปิโตรเลียมเหลวอยู่ในสถานะของเหลว ภายใต้ความดัน 9.7 บาร์ และอุณหภูมิ 62 องศาเซลเซียส
   1.2 องค์ประกอบของก๊าซปิโตรเลียมเหลวประกอบด้วยอัตราส่วนของ โพรเพน (Propane) ต่อบิวเทน (Butane) 60:40
   1.3 ข้อมูลขนาดรูรั่วที่ถังกักเก็บอ้างอิงมาตรฐาน Risk-based Inspection Base Resource Document, API Publication 581, First Edition, May 2000 ขนาดของรูที่เกิดการรั่วไหลจากถังกักเก็บที่มีความถี่สูงสุดต่อปี ขนาด 1 นิ้ว ตำแหน่งที่เกิดการรั่วไหลคือข้อต่อระหว่างถังและท่อ ความสูงของรูรั่วจากพื้นดิน 109.5 เมตร ซึ่งผลจากการรั่วทำให้ก๊าซปิโตรเลียมเหลวในสถานะของเหลวรั่วออกมาออกมาในสถานะที่เป็นก๊าซเหลวและระเหยเป็นไอก๊าซทั้งหมด

1.4 ใช้ความเร็วลมเฉลี่ย 1.48 เมตรต่อนาที ช่วงเวลากลางวัน อุณหภูมิโดยเฉลี่ย 38 องศาเซลเซียส ข้อมูลจากกรมอุตุนิยมวิทยา จังหวัดกรุงเทพมหานคร ปี 2557-2559

1.5 ใช้สภาพบรรยากาศ D แทนเวลากลางวัน สภาพบรรยากาศกลาง ๆ มีแดดเล็กน้อย มีลมแรง ซึ่งเป็นสภาพบรรยากาศที่แนะนำให้ใช้ในการทำแบบจำลองการรั่วไหล เนื่องจากเป็นสภาพอากาศที่พบมากที่สุดตลอดปี (HSE, 2016)

2. โปรแกรมจะแสดงผลของเหตุการณ์ที่เป็นไปได้ แล้วนำเหตุการณ์ที่อาจเกิดขึ้นนั้นวิเคราะห์บริเวณที่คาดว่าจะได้รับผลกระทบและกำหนดกลยุทธ์ในการตอบสนองภาวะฉุกเฉิน (Pre-incident Plans)

ผลการทดลองและวิจารณ์

ส่วนที่ 1 ผลการจำลองเหตุการณ์และพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากการรั่วไหลของก๊าซปิโตรเลียมเหลว

โปรแกรมจะแสดงผลของเหตุการณ์ที่เป็นไปได้ 3 กรณี ซึ่งเมื่อวิเคราะห์ผลการแพร่กระจายและพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากการรั่วไหลของก๊าซปิโตรเลียมเหลว สรุปผลได้ดังนี้

1.1 กรณีการรั่วไหลแล้วเกิดก๊าซพิษ

จากการประเมินการรั่วไหลของก๊าซปิโตรเลียมเหลวจากถังกักเก็บขนาดความจุ 6.4 ลูกบาศก์เมตร ที่มีรูรั่วขนาด 1 นิ้ว พบว่าให้อัตราการรั่วไหลเชิงมวลเท่ากับ 2.89 กิโลกรัมต่อวินาที กรณีที่ก๊าซปิโตรเลียมเหลวรั่วไหลไม่เกิดการติดไฟ ก๊าซปิโตรเลียมเหลวจะเกิดการระเหยและแพร่กระจายตามกระแสลม (Downwind Dispersion) ที่ความเร็วลม 1.48 เมตรต่อนาที ดังแสดงใน Figure 1 ซึ่งแสดงผลการรั่วไหลที่ระดับความเข้มข้นที่เป็นอันตรายและส่งผลกระทบต่อสุขภาพ โดยพิจารณาค่าระดับอันตรายของการได้รับสัมผัสสารเคมีแบบเฉียบพลันในช่วงเวลารับสัมผัส 1 ชั่วโมง(Acute Exposure Guideline Level: AEGL) ดังนี้

AEGL-3 ที่ระดับความเข้มข้นตั้งแต่ 33,000 ppm ขึ้นไป พบว่ารัศมีของผลกระทบภายในระยะรัศมี 9 เมตรจากจุดรั่วไหล ส่งผลกระทบต่อการหายใจเข้าไปสำหรับมนุษย์ซึ่ง รวมถึงคนที่ไวต่อการสัมผัสสารเคมี อาจทำให้คนในบริเวณนั้นเสียชีวิตได้ในระยะเวลา 1 ชั่วโมง

AEGL-2 ที่ระดับความเข้มข้นตั้งแต่ 17,000-33,000 ppm พบว่ารัศมีของผลกระทบมีระยะทางอยู่ในช่วง 9-13 เมตร ส่งผลกระทบต่อการหายใจเข้าไปสำหรับมนุษย์ซึ่ง รวมถึงคนที่ไวต่อการสัมผัสสารเคมี อาจได้รับผลกระทบที่ไม่สามารถรักษาให้หายได้ หรือผลกระทบคงอยู่เป็นเวลานาน หรือไม่สามารถหนีออกจากบริเวณนั้นได้หากสัมผัสไม่เกิน 1 ชั่วโมง

AEGL-1 ที่ระดับความเข้มข้นตั้งแต่ 5,500-17,000 ppm พบว่ารัศมีของผลกระทบมีระยะทางอยู่ในช่วง 13-38 เมตร ส่งผลกระทบต่อการหายใจเข้าไปสำหรับมนุษย์ซึ่ง รวมถึงคนที่ไวต่อการสัมผัสสารเคมี หรืออ่อนแอกว่าปกติ อาจรู้สึกไม่สบาย ระคายเคืองหรือมีผลกระทบอย่างใดอย่างหนึ่ง อย่างไรก็ตามผลกระทบหรืออาการนั้นคงอยู่ชั่วคราว สามารถหายได้หากสัมผัสไม่เกิน 1 ชั่วโมง

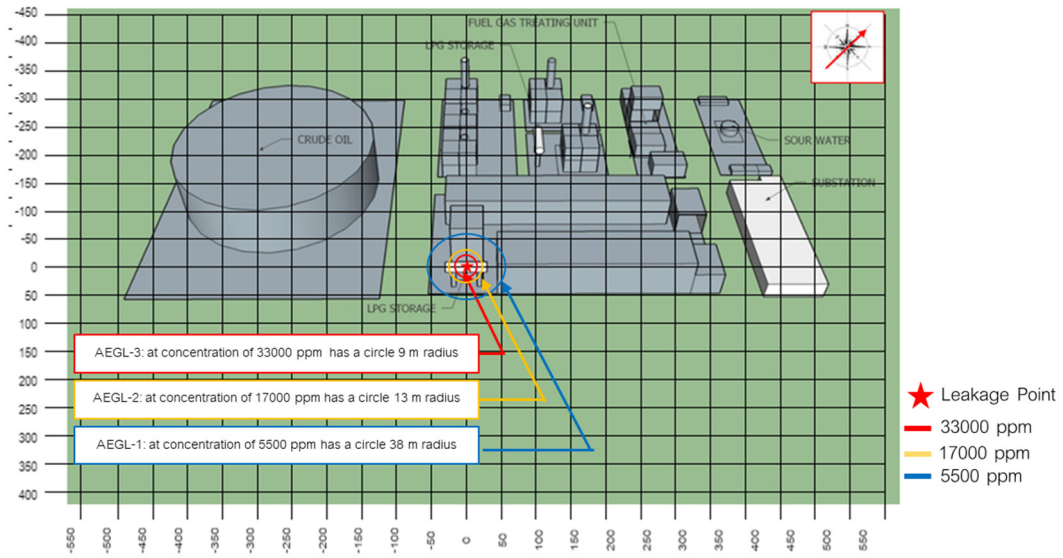


Figure 1 The concentration radius that can affect human health.

1.2 กรณีการรั่วไหลแล้วเกิดกลุ่มไอก๊าซที่ติดไฟได้

เมื่อก๊าซปิโตรเลียมเหลวรั่วไหลออกจากถังที่มีความดันสูง หากมีการสัมผัสประกายไฟทันทีจะทำให้เกิดการติดไฟในลักษณะที่เรียกว่า Jet fire ซึ่งจะส่งผลกระทบด้านความร้อนไปยังบริเวณโดยรอบ แต่กรณีนี้ไม่มีแหล่งที่มีประกายไฟจึงไม่เกิดการติดไฟ ทำให้ไม่พบระยะทางที่ได้รับผลกระทบจากรังสีความร้อนในระดับความเข้มรังสีความร้อนขนาด 4.0 12.5 และ 37.5 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร ซึ่งเป็นเป็นระดับความเข้มรังสีความร้อนที่ส่งผลกระทบต่อร่างกายมนุษย์ ทั้งนี้หากมีการสัมผัสประกายไฟในภายหลังที่ระดับค่าความเข้มข้นของสารที่เหมาะสม จะทำให้เกิดการติดไฟในลักษณะที่เรียกว่า Flash fire โดยพิจารณาจากระดับค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถติดไฟได้ของสาร (Lower Flammability Limit, LFL) ทั้งนี้พบว่ารัศมีของผลกระทบของค่าที่สามารถติดไฟในลักษณะ Flash fire ที่ความเข้มข้นของสารมากกว่าหรือเท่ากับ 8,500 ppm เกิดขึ้นได้ในรัศมี 0-33 เมตร ดังแสดงใน Figure 2

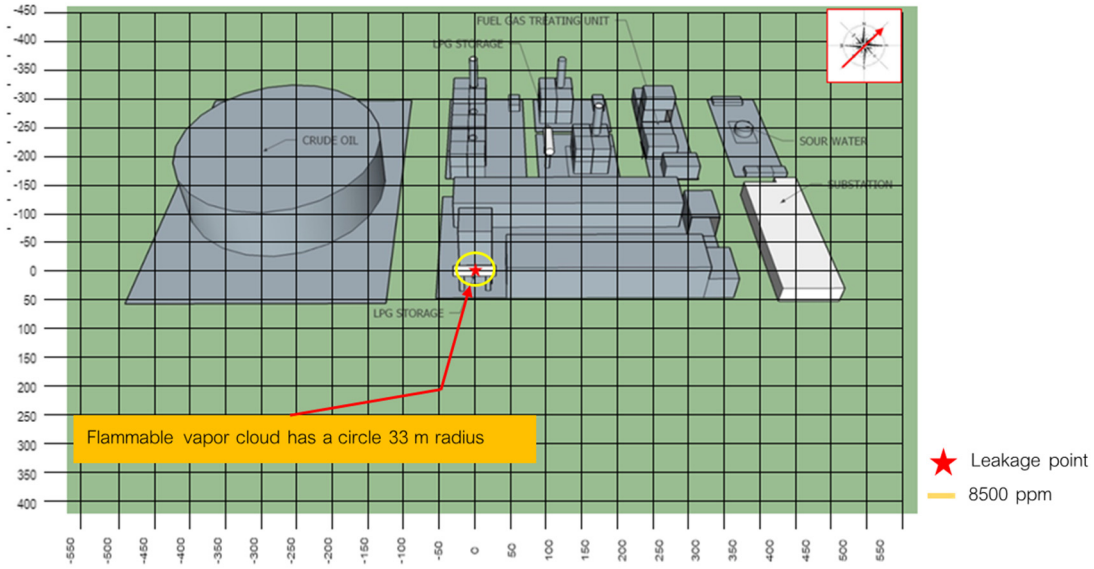


Figure 2 The concentration radius of the flammable vapors.

1.3 กรณีการรั่วไหลแล้วเกิดกลุ่มไอก๊าซที่ระเบิดได้ (Vapor Cloud Explosion)

เมื่อก๊าซปิโตรเลียมเหลวรั่วไหลออกจากถังและแพร่กระจายตามกระแสลม โดยระยะทางแพร่กระจายที่ยังคงคุณสมบัติที่สามารถติดไฟได้ คือ ยังมีค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถติดไฟได้ (LFL) เท่ากับ 0-33 เมตรจากจุดรั่วไหล ในกรณีที่มีแหล่งประกายไฟที่มีค่ามากพอที่จะทำให้เกิดการติดไฟได้ด้วยความเร็วสูง จะทำให้เกิดการระเบิดแบบ Vapor Cloud เมื่อประเมินแรงดันที่ได้รับผลกระทบจากแรงดันอัดของการระเบิด (Overpressure) พบว่า ผู้ที่ได้รับผลกระทบมีเพียงผู้ปฏิบัติงานในโรงงานที่เกิดเหตุเท่านั้น ซึ่งมีระยะอันตรายจากแรงดันของการระเบิด ดังแสดงใน Figure 3

ระดับของแรงดัน 0.21 บาร์ จะก่อให้เกิดความเสียหายแก่อาคาร หรือสิ่งก่อสร้างที่แข็งแรง มีรัศมีครอบคลุม 0-36 เมตร

ระดับของแรงดัน 0.14 บาร์ สามารถทำลายบางส่วนของอาคาร แต่ยังคงสามารถซ่อมแซมได้ มีรัศมีครอบคลุม 36-38 เมตร

ระดับของแรงดัน 0.02 บาร์ เป็นระดับแรงดันที่ชุมชนสามารถรู้สึกได้ มีรัศมีครอบคลุม 38-64 เมตร

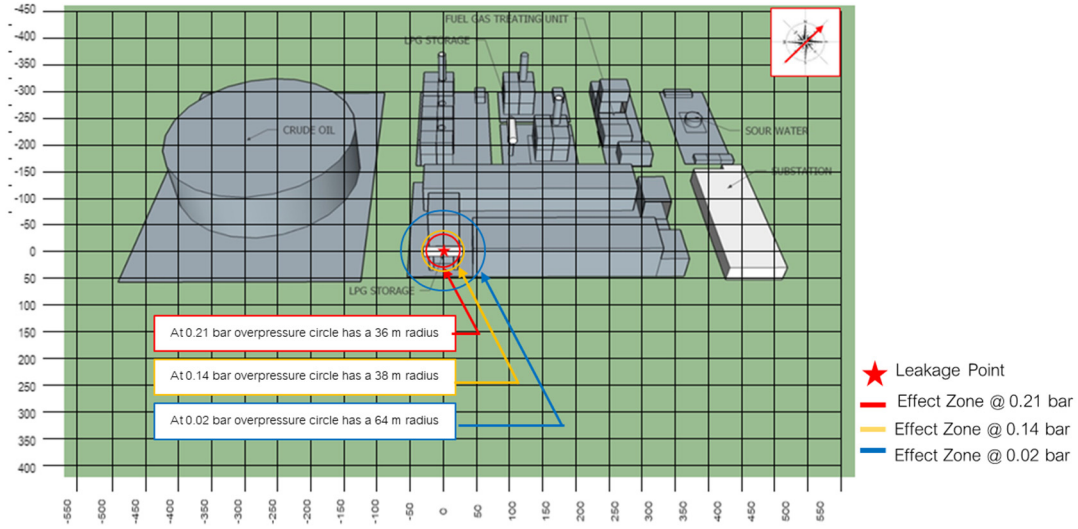


Figure 3 The effect zone of the explosion pressure.

ส่วนที่ 2 กำหนดกลยุทธ์ในการตอบสนองภาวะฉุกเฉิน (Pre-incident Plans)

การประเมินพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากการรั่วไหลของก๊าซปิโตรเลียมเหลวจากถังกักเก็บในพื้นที่กระบวนการผลิต พบว่าพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบอยู่ภายในพื้นที่โรงงานเท่านั้น จากผลกระทบที่เกิดขึ้นนำมากำหนดกลยุทธ์ในการตอบสนองภาวะฉุกเฉิน ดังนี้ รัศมีระยะตั้งแต่ 33 เมตรจากจุดเกิดเหตุ ต้องกำหนดให้เป็นเขตปลอดประกายไฟ ป้องกันการลุกติดไฟจากกลุ่มไอก๊าซที่ติดไฟได้ หากต้องนำรถดับเพลิงไปที่พื้นที่เกิดเหตุให้นำเข้าด้านเหนือลมโดยจุดจอดต้องไม่อยู่ในแนวเขตปลอดประกายไฟ และโรงงานต้องอพยพพนักงานจากสถานที่เกิดเหตุในรัศมีตั้งแต่ 64 เมตร อพยพไปทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ซึ่งเป็นด้านเหนือลม ซึ่งเป็นระยะที่ปลอดภัยจากอันตรายจากแรงดันของการระเบิดและอันตรายจากระดับความเข้มข้นของก๊าซปิโตรเลียมเหลวที่ส่งผลการทบต่อร่างกาย ดังแสดงใน Figure 4

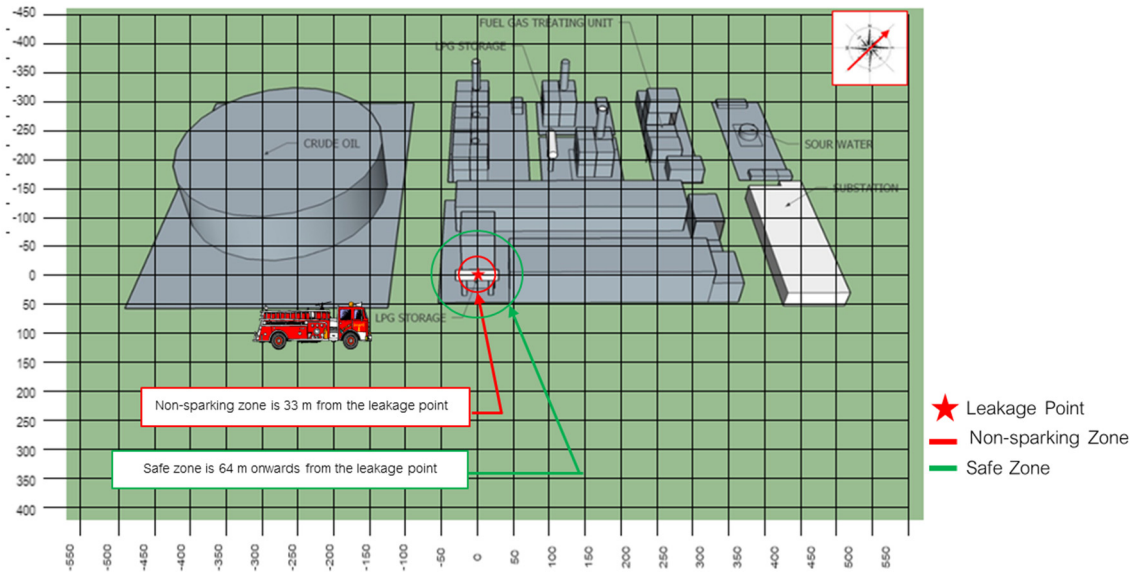


Figure 4 Emergency planning zone

สรุปผลและเสนอแนะ

สรุปผล

ผลการวิจัยการศึกษาประเมินผลกระทบการรั่วไหลของก๊าซปิโตรเลียมเหลวที่ส่งผลต่อพื้นที่ใกล้เคียงโดยรอบและประเมินระยะปลอดภัยจากการรั่วไหล พบว่าผลกระทบจากการแพร่กระจายของก๊าซปิโตรเลียมเหลวระดับความเข้มข้นของกลุ่มไอก๊าซที่ติดไฟได้จากจุดรั่วไหลซึ่งเป็นระยะที่ต้องดำเนินการให้เป็นเขตปลอดประกายไฟ มีค่ารัศมีภายใน 33 เมตรจากจุดรั่วไหล การการแพร่กระจายของก๊าซที่มีระดับความเข้มข้น 5,500 ppm ซึ่งมีผลกระทบกับคนเล็กน้อย หากสัมผัสไม่เกิน 1 ชั่วโมง มีค่ารัศมีการแพร่กระจายจากจุดรั่วไหลครอบคลุมระยะ 57 เมตร ในรัศมีการรั่วไหลระยะดังกล่าว ผู้ที่ได้รับผลกระทบได้แก่ ผู้ปฏิบัติงานในโรงงานที่เกิดเหตุเท่านั้น และผลกระทบจากแรงดันของการระเบิด ที่พื้นที่โดยรอบสามารถรู้สึกได้มีรัศมีเท่ากับ 64 เมตรจากจุดเกิดเหตุ อย่างไรก็ตามพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบในระยะรัศมีสูงสุด 64 เมตรนี้ ครอบคลุมเฉพาะพื้นที่ในโรงงาน ไม่ส่งผลกระทบต่อชุมชนหรือโรงงานข้างเคียง การกำหนดกลยุทธ์ในการตอบสนองภาวะฉุกเฉิน กำหนดเขตปลอดประกายไฟให้มีรัศมีระยะตั้งแต่ 0-33 เมตรจากจุดเกิดเหตุ ป้องกันการลุกติดไฟจากกลุ่มไอก๊าซที่ติดไฟได้ และโรงงานต้องอพยพพนักงานจากสถานที่เกิดเหตุในรัศมีตั้งแต่ 64 เมตร อพยพไปทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ซึ่งเป็นด้านเหนือลม ซึ่งเป็นระยะที่ปลอดภัยจากอันตรายจากแรงดันของการระเบิดและอันตรายจากระดับความเข้มข้นของก๊าซปิโตรเลียมเหลวที่ส่งผลการทบต่อร่างกาย

ข้อเสนอแนะ

1.งานวิจัยนี้ กำหนดขนาดรูรั่วการรั่วไหลของสารโดยใช้ข้อมูลตามมาตรฐาน API 581 Risk-based Inspection Base Resource Document ที่มีความถี่ในการเกิดสูงสุดต่อปี เพื่อให้ครอบคลุมผลกระทบที่อาจเกิดขึ้น ควรประเมินรูรั่วขนาดต่างๆ ที่มีโอกาสเกิดขึ้นด้วย

2.หากถังกักเก็บสารอันตรายในโรงงานมีหลายจุด งานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นตัวอย่างและเป็นแนวทางในการศึกษาการประเมินการรั่วไหลของสารอันตรายได้

เอกสารอ้างอิง

กรมธุรกิจพลังงาน. (2561). "บทความเรื่องก๊าซปิโตรเลียมเหลว." Retrieved 24 กุมภาพันธ์ 2561, from http://www.doeb.go.th.

ดารารัตน์ พลอยทรัพย์ (2551). การประเมินการแพร่กระจายจากการรั่วไหลของก๊าซปิโตรเลียมเหลว:กรณีศึกษาถังบรรจุก๊าซในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สวิตา เลิศสุโภชวณิชย์ (2559). การประเมินความเสี่ยงของการรั่วไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการถ่ายเทคาร์บอนไดออกไซด์เหลวเข้ารถขนส่ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยบูรพา.

About Acute Exposure Guideline Levels (AEGLs). 2016.

API Publication 581, First Edition. 2000. **Risk-based Inspection Base Resource Document**

DNV software. 2014. **Phast Advanced Training**

The International Association of Oil & Gas Producers. (2016). "Risk Assessment Data Directory: Consequence modelling." from http://www.ogp.org.uk/pubs/434-07.pdf.

การศึกษาเครื่องมือตรวจสอบการสัมผัสของล้อคอนทัวร์วิทูร เพื่อตรวจสอบการสัมผัสที่ไม่เหมาะสมระหว่างล้อและราง บริเวณลิ้นประแจของการรถไฟแห่งประเทศไทย

The Study of Vidura Contour Wheel Contact Gauge to Address Improper Wheel Rail Contact at Switch Point of State Railway of Thailand

ธนวัฒน์ ชาลีคาร[1*] กรรมมันต์ ชูประเสริฐ [1] และ วิชัย ศิวะโกศิษฐ์[1]

Thanawat Chaleekarn[1*], Kummun Choopasird[1] and Wichai Siwakosit[1]

บทคัดย่อ

การศึกษานี้เป็นการสร้าง และทดสอบการใช้เครื่องมือสำหรับตรวจสอบการสึกหรอของลิ้นประแจ เพื่อนำผลมาประเมินความเสี่ยงจากการตกรางบริเวณทางหลีกของการรถไฟแห่งประเทศไทย โดยใช้เครื่องมือตรวจสอบการสัมผัสของล้อคอนทัวร์วิทูร พิกัดล้อใหม่ มีมุมบังใบล้อ 66° ที่ใช้จริงของการรถไฟแห่งประเทศไทย ทำการทดสอบกับชุดประแจจำนวน 30 ชุด จากการศึกษาพบว่า ชุดประแจที่ใช้งานภายในย่านโรงงานมักกะสัน โดยเครื่องมือตรวจสอบการสัมผัสของล้อคอนทัวร์วิทูร สัมผัสกับลิ้นประแจใต้จุดอ้างอิงมุมบังใบล้อ 66° จำนวน 2 ชุด ได้ผลนำมาประเมินเบื้องต้นถือว่าเป็นจุดมีความเสี่ยงต่อการปีนรางสูง

ABSTRACT

This study constructs and tests a tool for gauging of switch wear with a purpose to evaluate a risk of derailment at the switch point of The State Railway of Thailand. The testing of Vidura contour wheel contact gauge is built according to unworn Vidura contour with flange angle of 66° with a reference mark at the lowest point of a flange slope. According to studies, it has been found that out of 30 switch points. 2 sets at Makkasan workshop yard have Vidura contour wheel contact gauge contract with switch point below reference mark. The preliminary assessment is considered a high risk for climbing.

Key Word: Railway, Railway Wheel, Vidura Contour, Derailment, Switch Point

*Corresponding author; e-mail address: tcsrt29@gmail.com

[1]ศูนย์วิศวกรรมระบบราง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร 10900

[1]Kasetsart University Rail Engineering Center, Mechanical Engineering Department, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

การคมนาคมขนส่งทางราง กำลังเป็นที่สนใจของประชาชนส่วนใหญ่ในประเทศไทย โดยการสนับสนุนของภาครัฐให้มีโครงการสร้างทางรถไฟขึ้นใหม่ และเพิ่มเติมจากโครงการเดิมหลายเส้นทาง ในอนาคตจะมีผู้ใช้บริการระบบรางเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก การเดินขบวนรถที่ปลอดภัยเป็นสิ่งสำคัญที่ส่งผลต่อความเชื่อมั่นของผู้ที่มาใช้บริการ อันตรายจากการเดินขบวนรถอย่างหนึ่งคือการตกราง การที่ขบวนรถตกรางแต่ละครั้งส่งผลกระทบในส่วนอื่นอีกมาก การบาดเจ็บ การสูญเสียชีวิตของผู้ปฏิบัติงาน หรือผู้โดยสาร สูญเสียงบประมาณในการกู้ภัย สูญเสียงบประมาณในการซ่อมบำรุงทาง และชิ้นส่วนอุปกรณ์ที่ชำรุดเสียหายที่เป็นผลมาจากการตกราง การตกรางเกิดขึ้นจากหลายสาเหตุอาทิ การใช้ความเร็วที่ไม่เหมาะสม ได้รับแรงกระแทกอย่างรุนแรง หรือการปีนรางบริเวณทางแยกในการเปลี่ยนเส้นทางการเดินรถ

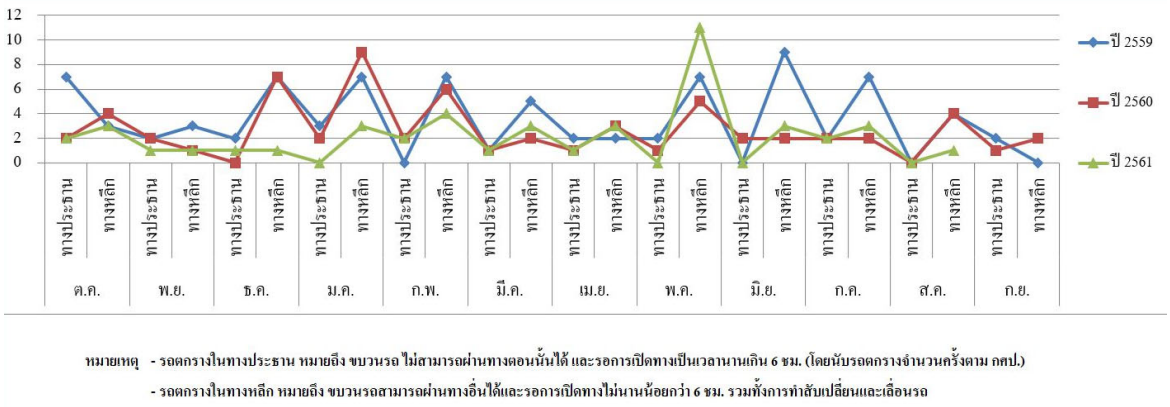


Figure 1 Derailment statistics comparing main line and siding of State Railway of Thailand in 2016 – 2018 (T. M. D. SRT, 2018)

จากรายงานสถิติการตกรางของขบวนรถ ฝ่ายการช่างกล การรถไฟแห่งประเทศไทย ที่ได้รวบรวมสถิติการตกรางจากปี 2557 - 2561 มีการตกรางทั้งสิ้น 350 ครั้ง ในปี 2561 มีการตกรางทั้งหมด 46 ครั้ง แบ่งเป็นตกรางบริเวณทางประธาน 10 ครั้ง และตกรางบริเวณทางหลีก 36 ครั้ง (T. M. D. SRT, 2018)

การศึกษานี้ผู้ศึกษามุ่งเน้นให้ความสำคัญต่อสาเหตุการตกรางขณะที่ล้อรถไฟเคลื่อนที่ไปตามทางรถไฟขณะผ่านลิ้นประแจ ซึ่งในจังหวะการเคลื่อนที่เข้าปะทะระหว่างล้อรถไฟกับลิ้นประแจ จะทำให้เกิดแรงกระแทกในแนวดิ่ง และแรงกระแทกในแนวนอน แรงในแนวนอนที่เกิดขึ้นขณะที่ล้อเคลื่อนที่เข้ากระแทกลิ้นประแจ หากลิ้นประแจสึกหรอเกินพิกัดอาจเป็นสาเหตุให้ล้อรถไฟปีนราง ทำให้ขบวนรถตกรางได้ ดังนั้น ผู้ศึกษาจึงได้ทำการทดสอบ โดยการนำชุดเครื่องมือตรวจสอบที่เป็นแบบจำลองของล้อแบบคอนทัวร์วิทูร ตามมาตรฐานของการรถไฟแห่งประเทศไทย ทดสอบกับลิ้นประแจที่มีทิศทางเป็นท่าทางแยก แล้วนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบกับทฤษฎีเพื่อประเมินความเสี่ยงเบื้องต้นของการตกรางบริเวณทางหลีกของการรถไฟแห่งประเทศไทย

อุปกรณ์และวิธีการ

การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องมือตรวจสอบความสึกหรอของลิ้นประแจ

ตามมาตรฐานของเครือข่ายรถไฟแห่งสหราชอาณาจักร ที่เกี่ยวข้องกับการบ่งชี้ความเสี่ยงของการตกรางที่ประแจ มุ่งเน้นไปที่การบ่งชี้ถึงอันตรายจากการตกรางโดยเฉพาะที่ลิ้นประแจ อันตรายจากการปีนรางของล้อรถไฟรวมถึงเงื่อนไขต่อไปนี้

- หน้าสัมผัสที่ไม่เหมาะสมระหว่างราง และลิ้นประแจ
- ลิ้นประแจ และรางสึกหรอมากเกินไปหรือผิดปกติ
- ความเสียหายที่มากเกินไปของลิ้นประแจ
- โปรไฟล์ของลิ้นประแจที่ไม่เหมาะสม

เงื่อนไขหลายประการที่เรียกว่า Derailment Hazards การตรวจสอบและซ่อมบำรุงเพื่อลดความเสี่ยงในการตกรางที่ประแจ ตามมาตรฐาน Network Rail Standard NR / L2 / TRK / 0053 ซึ่งรวมถึงจุดที่ล้อรถไฟกับลิ้นประแจสัมผัสกันอย่างไม่ถูกต้อง การตรวจสอบดำเนินการโดยใช้ Track gauge ที่ออกแบบมาเป็นพิเศษซึ่งรู้จักกันในชื่อ TGP8 Gauge ซึ่งอ้างอิงกับโปรไฟล์ P8 ของเครือข่ายรถไฟแห่งสหราชอาณาจักร งานวิจัยนี้จึงทำการประยุกต์ใช้เครื่องมือตรวจสอบการสึกหรอของลิ้นประแจ โดยอ้างอิงกับโปรไฟล์ล้อคอนทัวร์วิทูร พิกัดล้อใหม่ของการรถไฟแห่งประเทศไทย เพื่อให้มั่นใจว่าหน้าสัมผัสของล้อรถไฟไม่สามารถปีนขึ้นไปบนรางทำให้เกิดการตกราง (Zarembski, 2017)

การออกแบบ และสร้างเครื่องมือตรวจสอบการสัมผัสของล้อคอนทัวร์วิทูร สำหรับตรวจสอบความสึกหรอของลิ้นประแจ

การออกแบบเครื่องมือสำหรับตรวจสอบความสึกหรอของลิ้นประแจ อ้างอิงจากคอนทัวร์วิทูรตามรูปที่ 2 (M. E. C. SRT, 1962) พิกัดล้อใหม่ มีมุมบังใบล้อ 66° ที่ใช้งานในการรถไฟแห่งประเทศไทย ติดตั้งกับคานแข็งและมีความยาวของระยะห่างระหว่างแบบจำลองทั้งสองข้าง 927 มม. ตามพิกัดความยาวระหว่างล้อทั้งสองข้างที่ใช้งานในการรถไฟแห่งประเทศไทย โดยจะกำหนดให้สร้างจุดอ้างอิงที่จุดเริ่มต้นของมุมบังใบล้อ โดยวัดจากยอดบังใบ เนื่องจากเป็นจุดสุดท้ายของบังใบที่จะปีนรางได้ในกรณีที่ล้อรถไฟวิ่งเบียดเข้าหาราง และมุมของบังใบล้อเป็นมุมที่ชันที่สุดในคอนทัวร์วิทูร ดังนั้น หากคอนทัวร์วิทูรสัมผัสกับลิ้นประแจเหนือจุดอ้างอิง เงื่อนไขในการปีนรางยังคงมีลักษณะเหมือนกับเงื่อนไขปกติตาม Nadal's Criteria (Andersson, Berg, & Stichel, 2014) แต่หากคอนทัวร์วิทูรสัมผัสกับลิ้นประแจใต้จุดอ้างอิงเงื่อนไขในการปีนราง จะเปลี่ยนไป เนื่องจากบริเวณบังใบใต้จุดอ้างอิงนั้นมีมุมบังใบที่ต่ำกว่า 66° ซึ่งจะทำให้ล้อปีนรางได้ง่ายขึ้นกว่าเงื่อนไขปกติที่กำหนดจากมุมบังใบที่ 66° ดังนั้น เงื่อนไขในการกำหนดว่าการสัมผัสระหว่างคอนทัวร์วิทูร และลิ้นประแจเป็นไปตามพิกัดความปลอดภัยหรือไม่ จึงถูกกำหนดไว้ดังนี้

1. หากเครื่องมือตรวจสอบการสัมผัสของล้อคอนทัวร์วิทูร สัมผัสกับลิ้นประแจเหนือจุดอ้างอิง ถือว่าปลอดภัยจากการปีนราง
2. หากเครื่องมือตรวจสอบการสัมผัสของล้อคอนทัวร์วิทูร สัมผัสกับลิ้นประแจใต้จุดอ้างอิง ถือว่าไม่ปลอดภัยจากการปีนราง

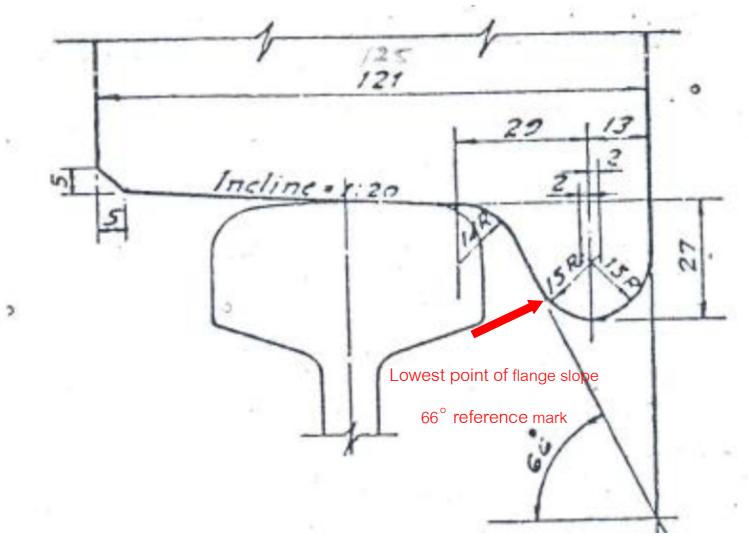


Figure 2 Vidura wheel contour of SRT. (M. E. C. SRT, 1962)



Figure 3 Calibration of flange angle with Vidura contour wheel profile gauge (September, 2018)



Figure 4 Vidura contour wheel contact gauge (September, 2018)

การทดสอบเครื่องมือตรวจสอบการสัมผัสของล้อคอนทัวร์วิทูร

นำเครื่องมือวัดไปทดสอบทำการวัดที่ภาคสนาม พื้นที่ที่ใช้ทดสอบคือ ย่านสับเปลี่ยนรถสินค้าพหลโยธิน ย่านสถานีบางซื่อ และย่านโรงงานมักกะสัน การรถไฟแห่งประเทศไทย ทดสอบโดยทำการวัดที่บริเวณที่มีขบวนรถผ่านประแจท่าทางแยกเป็นประจำ ทำการทดสอบวันที่ 15 และ 30 ของทุกเดือน เพื่อเก็บข้อมูลความเปลี่ยนแปลงของลิ้นประแจ การทดสอบเริ่มที่ระยะจากปลายลิ้นประแจตั้งแต่ 10 มม. ขึ้นไป ซึ่งเป็นระยะที่มีการเจียร์มุมของลิ้นประแจ เพื่อลดการกระแทกของล้อรถไฟกับปลายลิ้นประแจ ทำการดันเครื่องมือทดสอบให้เลื่อนไปตามหัวราง จากนั้นสังเกตจุดที่เครื่องมือแตะกับหัวราง แล้วนำข้อมูลเปรียบเทียบกับค่าทางทฤษฎี และทำการซ่อมบำรุงบริเวณที่มีความเสี่ยงต่อการปีนรางของล้อรถไฟ



Figure 5 Testing of Vidura contour wheel contact gauge with the switch point on Bangsue Station area (October, 2018)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลของการทดสอบเครื่องมือตรวจสอบการสัมผัสของล้อคอนทัวร์วิทูร

จากการศึกษาผลการทดสอบเครื่องมือตรวจสอบการสัมผัสของล้อคอนทัวร์วิทูร กับลิ้นประแจที่ใช้ในย่านสับเปลี่ยนรถสินค้าพหลโยธิน ย่านสถานีบางซื่อ และย่านโรงงานมักกะสัน จำนวน 30 ชุด พบว่า ประแจชุดที่ติดตั้งบริเวณที่ขบวนรถผ่านในท่าทางแยกเป็นประจำในเส้นทางหลัก หรือรางประธาน เช่น ประแจหมายเลข 300 (รูปที่ 6) ภายในย่านสถานีรถไฟบางซื่อ เป็นจุดที่เปลี่ยนทิศทางของขบวนรถไปยังเส้นทางรถไฟสายใต้ มีขบวนรถผ่านจำนวนมาก จะมีความสึกหรอของลิ้นประแจมากกว่าประแจชุดที่ติดตั้งอยู่บริเวณที่วิ่งผ่านในท่าทางตรงเป็นประจำ แต่การสึกหรอยังอยู่ในพิกัดที่ลิ้นประแจสัมผัสกับบังใบเหนือจุด 66° และมีประแจชุดที่มีความสึกหรอของลิ้นประแจอยู่ต่ำกว่าจุด 66° จำนวน 2 ชุด ติดตั้งอยู่ในบริเวณย่านโรงงานมักกะสัน ประแจชุดที่มีความสึกหรอมากที่สุด คือชุดประแจหมายเลข 2 ซึ่งเป็นชุดประแจที่มีอายุการใช้งานมากกว่า 50 ปี (รูปที่ 8)



Figure 6 Vidura contour wheel contact gauge with the used switch point contact is above the 66° mark on Bangsue Station area (October, 2018)

รูปที่ 7 ชุดประแจหมายเลข T21 ที่ติดตั้งใหม่ภายในย่านสับเปลี่ยนรถสินค้าพหลโยธิน มีขบวนรถวิ่งผ่านน้อยครั้ง จุดที่บังใบล้อสัมผัสกับลิ้นประแจอยู่เหนือจุด 66° อยู่ในเงื่อนไขที่ปลอดภัยจากการปีนรางของล้อรถไฟ



Figure 7 Vidura contour wheel contact gauge with the new switch point contact is above the 66° mark on Phaholyothin Freight Yard (October, 2018)



Figure 8 Vidura contour wheel contact gauge with the switch point contact is below the 66° mark on Makkasan Workshop (October, 2018)

สรุป

จากการศึกษาการทดสอบเครื่องมือตรวจสอบการสัมผัสของล้อคอนทัวร์วิทูรนี้ สามารถประเมินถึงความเสี่ยงของการปีนรางของล้อรถไฟเบื้องต้นได้ เมื่อจุดสัมผัสของบังใบล้อรถไฟกับลิ้นประแจอยู่เหนือจุดมาร์ค 66° ถือว่าอยู่ในเงื่อนไขไม่ทำให้เกิดการปีนราง และเมื่อจุดสัมผัสของบังใบล้อรถไฟกับลิ้นประแจอยู่ใต้จุดมาร์ค 66°

ถือว่าอยู่ในเงื่อนไขที่มีความเสี่ยงสูงที่อาจทำให้เกิดการปีนราง โดยทำการทดสอบกับชุดประแจที่ใช้ในย่านสับเปลี่ยนรถสินค้าพหลโยธิน ย่านสถานีบางซื่อ และย่านโรงงานมักกะสัน จำนวน 30 ชุด จากการศึกษาพบว่าชุดประแจที่ใช้งานภายในย่านโรงงานมักกะสัน เครื่องมือตรวจสอบการสัมผัสของล้อคอนทัวร์วิทูร สัมผัสกับลิ้นประแจใต้จุดอ้างอิงมุมบังใบล้อ 66° จำนวน 2 ชุด ได้ผลนำมาประเมินเบื้องต้นถือว่าเป็นจุดมีความเสี่ยงต่อการปีนรางสูง อาจนำไปสู่การปีนราง และตกรางได้ ต้องทำการซ่อมบำรุง หรือเปลี่ยนลิ้นประแจใหม่

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ 1. นายตรวจทางบางซื่อ และนายตรวจทางมักกะสัน การรถไฟแห่งประเทศไทย ที่กรุณาจัดการการทดสอบภาคสนาม และ ความปลอดภัยในการทดสอบ 2. ศูนย์วิศวกรรมเครื่องกล การรถไฟแห่งประเทศไทย ที่ได้อนุเคราะห์เครื่องมือ อบรมวิธีการใช้เครื่องมือ Vidura wheel profile Gauge และความปลอดภัยในการใช้งาน และ 3. งานรถสินค้าบางซื่อ การรถไฟแห่ประเทศไทย ที่กรุณาจัดทำเครื่องมือตรวจสอบการสัมผัสของล้อคอนทัวร์วิทูร

เอกสารอ้างอิง

Andersson, E., Berg, M., & Stichel, S. (2014). **Rail Vehicle Dynamics : 9.2 Flange Climbing - Derailment.** *Royal Institute of Technology*.

SRT, M. E. C. (1962). **Memo on Vidura Contour.** *the state railway of thailand*.

SRT, T. M. D. (2018). **Reported derailment accidents occurred in each of the areas responsible for August 2018.** *the state railway of thailand*.

Zarembski, A. M. (2017). **Switch Point Inspection Gauges to prevent Wheel Climb Derailments.** *University of Delaware. Technical Report*.

ปัจจัยต่ออุบัติเหตุในโรงงานขึ้นรูปโลหะด้วยเครื่องกด

Factors for Accidents in Metal Forming Factory by Pressing Machine

มลฤดี โตประดิษฐ์[1*] และ ดวงฤดี ฉายสุวรรณ[2]

Monrudee Topradit[1*] and Duangrudee Chaysuwan[2]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดอุบัติเหตุในกระบวนการขึ้นรูปแผ่นโลหะด้วยแรงกด โดยการเก็บข้อมูลจากการสอบถาม การตรวจสอบ และการสัมภาษณ์ ผลการวิเคราะห์ข้อมูล พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดอุบัติเหตุ คือ 1) เครื่องขึ้นรูปโลหะไม่มีที่ครอบปิดคลุมในบริเวณที่อาจเป็นอันตราย 2) เครื่องขึ้นรูปโลหะไม่มีที่ครอบป้องกันเท้าเหยียบโดยไม่ได้ตั้งใจ 3) คู่มือหรือวิธีการทำงานกับเครื่องขึ้นรูปโลหะไม่มีภาษาพม่าที่ติดไว้ในบริเวณสถานที่ทำงาน 4) พนักงานสวมใส่เครื่องประดับและเครื่องแต่งกายที่ไม่เหมาะสม แต่ไม่สวมอุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคล 5) ทัศนคติการให้ความสำคัญกับความปลอดภัย ต่อมาจึงได้กำหนดมาตรการในการป้องกันอุบัติเหตุ 2 มาตรการ ได้แก่ 1) ติดตั้งที่ครอบป้องกันไม่ให้เหยียบโดยที่ไม่ได้ตั้งใจกับเครื่องขึ้นรูปโลหะ 2) จัดทำคู่มือหรือวิธีการทำงานภาษาไทย-พม่า พร้อมทั้งติดตั้งไว้บริเวณสถานที่ทำงาน หลังจากนั้นประเมินมาตรการป้องกันด้วยวิธีการประเมินความเสี่ยง เปรียบเทียบก่อนและหลังมีมาตรการป้องกัน พบว่า คะแนนระดับความเสี่ยงจากระดับที่ยอมรับไม่ได้ (12 คะแนน) ลดลงอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ (3 คะแนน) นอกจากนี้ ผู้วิจัยได้เสนอแนะแนวทางการป้องกันอุบัติเหตุเพิ่มเติมให้กับโรงงาน ได้แก่ การติดตั้งที่ครอบปิดคลุมในบริเวณที่อาจเป็นอันตรายของเครื่องขึ้นรูปโลหะ และการจัดทำกิจกรรมส่งเสริมด้านความปลอดภัย

ABSTRACT

The objective of this research was to study factors affecting to occupational accidents in metal forming process with pressing machine. The method of collecting data were questionnaire, inspection and interview.The results of data analysis are 1) pressing machine without guarding in dangerous zone. 2) Pedal of pressing machine without cover. 3) No Myanmar language in work Instruction at working area. 4) Wearing not suitable jewelry and clothes but not using personal protective equipment (PPE). 5) Attitudes about safety awareness. After that researchers set up 2 accident prevention measurements are 1) cover of pedal installed with pressing machine and 2) work instruction was Thai - Myanmar and installed at working area. Then, it was evaluated and analyzed by risk assessment for comparing all data before and after. The results showed that the scores of unacceptable risks (Level 12) were reduced to acceptable risk (Level 3). In addition, researchers offered accident prevention guidelines for this factory. It was installed the guarding of pressing machine for hazardous zone and promoting in safety activities.

Keywords: Occupational Accidents, Metal Forming Process, Pressing Machine

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

[1]ภาควิชาวิศวกรรมความปลอดภัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

[2]ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

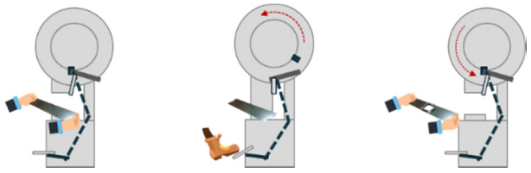
คำนำ

จากการศึกษารายละเอียดสถิติการประสบอันตรายหรือการเจ็บป่วยเนื่องจากการทำงาน ปี 2559 (สำนักงานกองทุนเงินทดแทน, 2559) ที่มีการจำแนกหมวดกิจการของนายจ้าง พบว่า หมวดกิจการที่มีจำนวนลูกจ้างประสบอันตรายสูงสุด คือ หมวดการผลิตผลิตภัณฑ์จากโลหะ ซึ่งมีจำนวนการประสบอันตราย 14,352 ราย (16.04 % ของจำนวนการประสบอันตรายทั้งหมด) เมื่อจำแนกตามความรุนแรงและประเภทกิจการในหมวดกิจการผลิตผลิตภัณฑ์จากโลหะ พบว่า การขึ้นรูปโลหะมีจำนวนสูงสุดเท่ากับ 2,078 ราย โดยความรุนแรงของการประสบอันตรายเนื่องจากการทำงาน ได้แก่ การหยุดงานไม่เกิน 3 วัน จำนวน 1,278 ราย หยุดงานเกิน 3 วัน 724 ราย สูญเสียอวัยวะ 75 ราย และตาย 1 ราย

ผู้วิจัยจึงเล็งเห็นความสำคัญในการค้นหาปัจจัยที่เป็นสาเหตุของการประสบอันตรายหรือเจ็บป่วยเนื่องจากการทำงานของประเภทกิจการการขึ้นรูปโลหะ ในกระบวนการขึ้นรูปแผ่นโลหะด้วยแรงกดจากโรงงานผลิตผลิตภัณฑ์โลหะแห่งหนึ่งในจังหวัดนครปฐม เพื่อหาปัจจัยปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดอุบัติเหตุจากการทำงาน โดยนำผลจากการวิเคราะห์มากำหนดมาตรการและแนวทางในการป้องกันและควบคุมการเกิดอุบัติเหตุจากการทำงาน

อุปกรณ์และวิธีการ

หลักการทำงานในกระบวนการขึ้นรูปแผ่นโลหะด้วยแรงกดชนิดใช้เท้าเหยียบ คือ เมื่อเท้าเหยียบไปที่แท่นเหยียบ โซ่จะปลดล็อกชุดกลไกทำให้เครื่องขึ้นรูปทำงาน โดยแม่พิมพ์จะเคลื่อนที่ลงตามแนวแกนสไลด์และเกิดการขึ้นรูปแผ่นโลหะ (ศรัณย์, 2547) ดังภาพที่ 1



Material put into the mold. Pedal used. Material brought out from the mold.

Figure 1 Simulation with metal forming machine

วิธีการวิจัย แบ่งเป็นลำดับขั้นตอน ดังนี้

1. ศึกษาสถิติการเกิดอุบัติเหตุย้อนหลังปี 2557 - 2559 ของพนักงานที่ปฏิบัติงานในกระบวนการขึ้นรูปแผ่นโลหะจากโรงงานผลิตผลิตภัณฑ์โลหะแห่งหนึ่งในจังหวัดนครปฐม พบว่าปัจจัยที่ทำให้เกิดอุบัติเหตุสูงสุดคือ เครื่องจักร จำนวน 17 ครั้ง รองลงมาคือแผ่นโลหะหรือชิ้นงาน จำนวน 13 ครั้ง อวัยวะที่ได้รับอุบัติเหตุสูงสุดคือ นิ้วมือ จำนวน 26 ครั้ง มือ 2 ครั้ง เท้าและข้อเท้า 1 ครั้ง และอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นทั้งหมดมีความรุนแรงถึงขั้นหยุดงานเกิน 3 วัน จำนวน 14 ครั้ง หยุดงานไม่เกิน 3 วัน จำนวน 14 ครั้ง และไม่หยุดงานจำนวน 3 ครั้ง โดยจะนำข้อมูลสถิติอุบัติเหตุมาวิเคราะห์ประกอบการหาปัจจัยในการเกิดอุบัติเหตุ

2. กำหนดวิธีการเก็บและวิเคราะห์ข้อมูล แบ่งได้ 3 วิธี ได้แก่ การสอบถาม การตรวจสอบ และการสัมภาษณ์

2.1 การสอบถาม

2.1.1 กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา คือ พนักงานที่ปฏิบัติงานกับเครื่องขึ้นรูปแผ่นโลหะด้วยแรงกดชนิดใช้เท้าเหยียบ จำนวน 30 คน จากโรงงานผลิตผลิตภัณฑ์โลหะแห่งหนึ่งในจังหวัดนครปฐม โดยใช้วิธีการหาขนาดของกลุ่มตัวอย่างที่เหมาะสมด้วยวิธีของทาโร่ ยามาเน่ (Yamane, 1973) ดังสมการที่ 1 จากการคำนวณได้ผลลัพธ์จำนวนของกลุ่มตัวอย่าง 28 คน

$$n = \frac{N}{1+Ne^2} \quad \text{---------- (1)}$$

n คือ ขนาดของกลุ่มตัวอย่าง

N คือ ขนาดของประชากรที่ใช้ในการวิจัย

e คือ ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจากการสุ่มตัวอย่าง (ระดับนัยสำคัญ 0.05)

2.1.2 สร้างแบบสอบถาม โดยสร้างและปรับปรุงแบบสอบถามจากการทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องให้สอดคล้องกับงานวิจัย แบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 ข้อมูลทั่วไปส่วนบุคคล ให้เลือกคำตอบตามตัวเลือกที่กำหนด ส่วนที่ 2 ข้อมูลความคิดเห็นเกี่ยวกับสภาพแวดล้อม พฤติกรรม และการบริหารจัดการความปลอดภัยในการทำงาน ให้ประเมินข้อคำถามตามระดับความคิดเห็น โดยกำหนดระดับความคิดเห็นตามวิธีของลิเคิร์ท (Likert, 1932) ดังตารางที่ 1

Table 1 Weight of opinion according to Likert

Opinion			Weight value
Environment	Behavior	Safety management	
Highest	Always	Strongly agree	5
High	Often	Agree	4
Moderate	Sometime	Uncertain	3
Low	Seldom	Disagree	2
Lowest	Never	Strongly disagree	1

ก. ตรวจสอบความเที่ยงตรงของแบบสอบถาม โดยผู้เชี่ยวชาญด้านความปลอดภัยจำนวน 3 ท่าน เพื่อตรวจสอบความถูกต้อง ครอบคลุมวัตถุประสงค์ และภาษาที่ใช้เหมาะสม ประเมินด้วยวิธีคำนวณหาดัชนีความสอดคล้องระหว่างข้อคำถามกับเนื้อหาหรือจุดประสงค์ (Item Objective Congruence: IOC) ค่า IOC ที่คำนวณได้อยู่ในช่วง 0.67 - 1.00 ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.5 ดังนั้น แบบสอบถามที่จัดทำขึ้นมีข้อคำถามที่วัดได้สอดคล้องกับเนื้อหาหรือจุดประสงค์ (ธานินทร์, 2557)

ข. ตรวจสอบความเชื่อถือได้ของแบบสอบถาม โดยนำแบบสอบถามที่ผ่านการทดสอบความเที่ยงตรงมาทดลองใช้กับพนักงานที่มีการทำงานเกี่ยวข้องกับการขึ้นรูปแผ่นโลหะ และคำนวณหาความเชื่อถือได้ด้วยวิธีสัมประสิทธิ์อัลฟาของครอนบัค (Cronbach's Alpha Coefficient) ค่าที่คำนวณได้มีค่าอยู่ในช่วง 0.769 - 0.861 ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.7 ถือว่าแบบสอบถามมีความเชื่อถือได้ (Gliem, and Gliem, 2003; Stephanie, 2007)

2.1.3 เก็บข้อมูลโดยการสอบถามกลุ่มตัวอย่าง พร้อมทั้งตรวจสอบความเรียบร้อยของแบบสอบถาม โดยสามารถรวบรวมได้ครบ คิดเป็น 100 % ของผู้ตอบแบบสอบถามทั้งหมด

2.1.4 วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ โดยใช้โปรแกรม SPSS

ก. สถิติเชิงพรรณนา วิเคราะห์ข้อมูลทั่วไปส่วนบุคคลโดยนำข้อมูลมาแสดงในรูปการแจกแจงความถี่ ร้อยละ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ธานินทร์, 2555) สำหรับการแปลผลข้อมูลระดับความคิดเห็นในด้านสภาพแวดล้อม พฤติกรรม และการบริหารจัดการความปลอดภัยในการทำงานที่แบ่งเป็น 5

ระดับนั้น จะนำคะแนนของระดับความคิดเห็นในแต่ละด้านรวมกันและหาค่าเฉลี่ย จากนั้นคำนวณหาความกว้างของอันตรภาคชั้นดังสมการที่ 2 เพื่อกำหนดช่วงคะแนนของระดับความคิดเห็นในแต่ละด้าน โดยแสดงดังตารางที่ 2

$$\text{ค่าอันตรภาคชั้น} = \frac{\text{คะแนนสูงสุด} - \text{คะแนนต่ำสุด}}{\text{จำนวนระดับชั้น}} = \frac{5-1}{5} = 0.80 \qquad \text{---------- (2)}$$

Table 2 Interpretation criteria for average score range of opinion

Opinion			Average score range of opinion
Environment	Behavior	Safety management	
Highest	Always	Strongly agree	4.21 - 5.00
High	Often	Agree	3.41 - 4.20
Moderate	Sometime	Uncertain	2.61 - 3.40
Low	Seldom	Disagree	1.81 - 2.60
Lowest	Never	Strongly disagree	1.00 - 1.80

จากการวิเคราะห์ข้อมูล สรุปได้ว่า กลุ่มตัวอย่างที่ศึกษาแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ไม่เคยเกิดอุบัติเหตุ คิดเป็น 60% และกลุ่มที่เคยเกิดอุบัติเหตุ คิดเป็น 40% ของผู้ตอบแบบสอบถามทั้งหมด โดยสาเหตุของอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นเนื่องจาก 1) เครื่องจักร 2) ผู้ปฏิบัติงาน 3) เพื่อนร่วมงาน 4) การบริหารจัดการความปลอดภัย เช่น สภาพพื้นที่การทำงาน การฝึกอบรม เป็นต้น ตามลำดับ โดยจำแนกรายละเอียดการวิเคราะห์ข้อมูล ได้ดังนี้

1) เพศ: กลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่เป็นเพศชาย ซึ่งมีสัดส่วนในการเกิดอุบัติเหตุมากกว่าเพศหญิง

2) อายุ: กลุ่มตัวอย่างทั้ง 2 กลุ่ม ส่วนใหญ่มีอายุอยู่ในช่วง 31 - 40 ปี ซึ่งมีสัดส่วนการเกิดอุบัติเหตุมากที่สุด

3) สัญชาติ: กลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่เป็นพนักงานพม่าและมีสัดส่วนการเกิดอุบัติเหตุมากกว่าคนไทย

4) ระดับการศึกษา: กลุ่มตัวอย่างทั้ง 2 กลุ่ม ส่วนใหญ่มีการศึกษาในระดับประถมศึกษา ซึ่งมีสัดส่วนในการเกิดอุบัติเหตุมากที่สุด

5) ประสบการณ์ในการทำงานกับเครื่องขึ้นรูปโลหะ: กลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่ที่มีประสบการณ์การทำงานน้อยกว่า 1 ปี มีสัดส่วนในการเกิดอุบัติเหตุมากที่สุด

6) ระดับความคิดเห็นด้านสภาพแวดล้อม: กลุ่มตัวอย่างทั้ง 2 กลุ่ม มีระดับความคิดเห็นอยู่ในระดับมาก

7) ระดับความคิดเห็นด้านพฤติกรรม: กลุ่มตัวอย่างทั้ง 2 กลุ่ม มีระดับความคิดเห็นอยู่ในระดับบางครั้ง

8) ระดับความคิดเห็นด้านการบริหารจัดการความปลอดภัย: กลุ่มที่ไม่เคยเกิดอุบัติเหตุมีระดับความคิดเห็นอยู่ในระดับเห็นด้วย และกลุ่มที่เคยเกิดอุบัติเหตุมีระดับความคิดเห็นอยู่ในระดับเห็นด้วยอย่างยิ่ง

9) ทัศนคติเกี่ยวกับด้านความปลอดภัยเรื่องการมีความรู้และความเข้าใจในการปฏิบัติงานของทั้ง 2 กลุ่ม ส่วนใหญ่อยู่ในระดับที่รู้และเข้าใจ และทั้ง 2 กลุ่มเห็นด้วยกับเรื่องความปลอดภัยในการทำงานถือเป็นหน้าที่หลักและให้ความสำคัญกับความปลอดภัยในระดับมากที่สุด

ข. สถิติอ้างอิง วิเคราะห์ข้อมูลระดับความคิดเห็นด้านสภาพแวดล้อม พฤติกรรม และการบริหารจัดการความปลอดภัยในการทำงาน โดยใช้หลักความน่าจะเป็นมาทดสอบสมมติฐาน ใช้สถิติการแจกแจงไคสแควร์ (Chi-Square: X^2) เพื่อหาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ศึกษา กำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติ (α) ที่ระดับ 0.05 กำหนดสมมติฐาน คือ H_0: ปัจจัยที่ศึกษาไม่มีความสัมพันธ์กับการเกิดอุบัติเหตุ และ H_1: ปัจจัยที่ศึกษามีความสัมพันธ์

กับการเกิดอุบัติเหตุ และนำผลการทดสอบสมมติฐานที่มีความสัมพันธ์กับการเกิดอุบัติเหตุ ($P \leq 0.05$) มาเป็นปัจจัยในการเกิดอุบัติเหตุ โดยแสดงข้อมูลปัจจัยในภาพรวมและปัจจัยข้อที่ศึกษาที่มีความสัมพันธ์กับการเกิดอุบัติเหตุ ดังตารางที่ 3

Table 3 Result of data analysis in hypothesis testing

Hypothesis	X^2	P	Meaning
Attitudes about safety	6.26	0.05	Reject H_0
Environment	17.12	0.84	Accept H_0
Behavior	17.14	0.56	Accept H_0
- Wearing not suitable jewelry and clothes and not using PPE	8.82	0.03	Reject H_0
Safety management	15.53	0.51	Accept H_0

Remark: Accept H_0 was factor not related to occupational accident. (not affecting to accident)
Reject H_0 (Accept H_1) was factor related to occupational accident. (affecting to accident)

หมายเหตุ: ยอมรับ H_0 คือ ปัจจัยที่ศึกษาไม่มีความสัมพันธ์กับการเกิดอุบัติเหตุ (ไม่มีผลต่อการเกิดอุบัติเหตุ)
ปฏิเสธ H_0 (ยอมรับ H_1) คือ ปัจจัยที่ศึกษามีความสัมพันธ์กับการเกิดอุบัติเหตุ (มีผลต่อการเกิดอุบัติเหตุ)

จากตารางที่ 3 ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับการเกิดอุบัติเหตุอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 คือ ทัศนคติการให้ความสำคัญกับความปลอดภัย การสวมใส่เครื่องประดับ การแต่งกายที่ไม่เหมาะสมกับการปฏิบัติงาน และการไม่ใช้อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคล โดยจะนำข้อมูลนี้มากำหนดมาตรการในการป้องกันการเกิดอุบัติเหตุจากการทำงาน

สำหรับการทดสอบสมมติฐานของข้อมูลทั่วไปส่วนบุคคล ได้แก่ เพศ อายุ สัญชาติ ระดับการศึกษา ประสบการณ์การทำงาน เป็นเรื่องเฉพาะบุคคลและเป็นสิ่งที่ควบคุมแก้ไขได้ยาก ดังนั้น การศึกษาครั้งนี้จึงไม่ได้นำข้อมูลดังกล่าวมาทดสอบสมติฐาน (ธานินทร์, 2555)

2.2 การตรวจสอบ

2.2.1 สร้างแบบตรวจสอบ โดยการชี้บ่งอันตรายด้วยวิธี Checklist เพื่อตรวจสอบว่าได้ปฏิบัติตามมาตรฐานหรือกฎหมาย ซึ่งกำหนดการตรวจสอบในกระบวนการขึ้นรูปแผ่นโลหะและสร้างแบบตรวจสอบโดยพิจารณาการปฏิบัติงานและกฎหมายด้านความปลอดภัย พร้อมทั้งตรวจสอบความสมบูรณ์โดยเชี่ยวชาญด้านความปลอดภัย เพื่อให้มั่นใจว่าครอบคลุมเนื้อหาตามวัตถุประสงค์ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2544)

2.2.2 ตรวจสอบการดำเนินงานโดยใช้แบบตรวจสอบ และชี้บ่งอันตรายและประเมินความเสี่ยงเพื่อหาแนวโน้มของอันตรายที่อาจเกิดขึ้น ใช้หลักเกณฑ์พิจารณาโอกาสคูณกับความรุนแรงตามเกณฑ์ดังตารางที่ 4 ซึ่งจะได้ระดับความเสี่ยง ดังตารางที่ 5 (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2544)

Table 4 Probability and severity level

Level	Probability	Severity
1	Rare occurrence; never occurred in 10 years or more.	Minor; Injury that requires first aid/ Less hurt/ Less damage.

Table 4 (Continued)

Level	Probability	Severity
2	Low occurrence; once occurred in 5-10 years.	Moderate; Injury that requires medical treatment/ Property damage.
3	Moderate occurrence; once occurred in 1-5 years.	High; Serious injury/ Property damage and stop some production.
4	High occurrence; once occurred in a year or more.	Severe; Disability or fatality/ Most property damage and stop all production.

Table 5 Risk level

Level	Risk score	Detail
1	1-2	Little risk.
2	3-6	Acceptable risk; Control method must be reviewed.
3	8-9	High risk; Control method must take action to reduce the risk.
4	12-16	Unacceptable risk. Stop all production and improve to reduce risk immediately.

2.2.3 วิเคราะห์ข้อมูลการประเมินความเสี่ยงโดยพิจารณาที่ระดับความเสี่ยงสูง และระดับยอมรับไม่ได้นำมาเป็นปัจจัยในการเกิดอุบัติเหตุ ดังตารางที่ 6 พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดอุบัติเหตุคือ 1) เครื่องขึ้นรูปโลหะไม่มีที่ครอบปิดคลุมบริเวณที่อาจเป็นอันตราย หรืออุปกรณ์ที่สามารถหยุดเครื่องได้ทันทีเมื่ออวัยวะของร่างกายเข้าใกล้บริเวณที่อันตราย หรืออุปกรณ์อื่นที่ป้องกันอวัยวะของร่างกายเข้าไปในบริเวณที่อาจเป็นอันตราย 2) เครื่องขึ้นรูปโลหะไม่มีที่ครอบป้องกันเท้าเหยียบโดยไม่ตั้งใจ 3) ไม่มีคู่มือหรือวิธีการทำงานกับเครื่องขึ้นรูปโลหะที่เป็นภาษาพม่า และไม่ติดไว้บริเวณสถานที่ทำงาน 4) พนักงานสวมเครื่องประดับขณะทำงาน ซึ่งทั้งหมดอยู่ในระดับความเสี่ยงที่ยอมรับไม่ได้

Table 6 Result of data analysis with risk assessment by Checklist

Result of Checklist	Hazard	Probability	Severity	Risk level
1. Pressing machine without guarding.	Worker injured.	4	3	Unacceptable risk
2. Pedal of pressing machine without cover.	Using pedals incidentally and worker injured.	4	3	Unacceptable risk
3. No Myanmar language in work Instruction at working area.	Miscommunication and don't understand the rules.	4	3	Unacceptable risk
4. Using jewelry.	Worker injured.	4	3	Unacceptable risk

2.3 การสัมภาษณ์

2.3.1 สร้างแบบสัมภาษณ์ โดยปรับปรุงแบบสัมภาษณ์จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องให้สอดคล้องกับงานวิจัย พร้อมทั้งเสนอต่ออาจารย์ที่ปรึกษาและผู้เชี่ยวชาญด้านความปลอดภัยเพื่อขอคำแนะนำและปรับปรุงให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ (กำพล, 2553; ธานินทร์, 2557)

2.3.2 สัมภาษณ์หัวหน้างานที่ควบคุมดูแลการทำงานของพนักงานที่ปฏิบัติงานกับเครื่องขึ้นรูปโลหะ

2.3.3 วิเคราะห์ข้อมูลจากการสัมภาษณ์มาใช้ประกอบการหาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดอุบัติเหตุ ดังนี้

ข้อมูลทั่วไปส่วนบุคคล คิดว่า เพศชายเกิดอุบัติเหตุมากกว่าเพศหญิง อายุและประสบการณ์ในการทำงานค่อนข้างน้อย และเป็นพนักงานพม่าเป็นส่วนมาก ซึ่งจะสื่อสารไม่เข้าใจกัน ทำให้ไม่เข้าใจในวิธีปฏิบัติงานหรือเข้าใจผิดวิธี ต้องสื่อสารผ่านล่ามและทวนสอบเสมอ สาเหตุหลักๆ ที่ทำให้เกิดอุบัติเหตุส่วนใหญ่เกิดจากพฤติกรรมในการปฏิบัติงาน ไม่รู้วิธีปฏิบัติงานเพื่อป้องกันอุบัติเหตุ และไม่เห็นเรื่องความปลอดภัยเป็นเรื่องสำคัญ

ข้อมูลด้านสภาพแวดล้อมในการทำงาน คิดว่า บริษัทฯ มีการตรวจวัดสภาพแวดล้อมในการทำงานและจัดให้มีมาตรการควบคุมอันตรายต่างๆ ตามที่กำหนด เช่น เสียง แสงสว่าง ท่าทางการทำงาน มีการจัดวางวัสดุอุปกรณ์ และแบ่งพื้นที่การทำงานอย่างเหมาะสม พร้อมทั้งมีการจัดทำ 5 ส. อยู่เสมอ แต่ยังพบการวางวัสดุอุปกรณ์ ไม่เป็นระเบียบ การเดินสายไฟไม่เรียบร้อย ซึ่งอาจจะเกิดอุบัติเหตุได้

ข้อมูลด้านพฤติกรรมการทำงาน คิดว่า เป็นสาเหตุการเกิดอุบัติเหตุส่วนใหญ่ เช่น ทำงานผิดวิธี ทำงานลัดขั้นตอน มีบางจุดที่ไม่เข้าแต่ไม่ถามหัวหน้างาน ไม่ใช้อุปกรณ์ช่วยในการนำชิ้นงานเข้า-ออก แต่งกายไม่เรียบร้อย ใส่เครื่องประดับและไม่สวมใส่อุปกรณ์ป้องกันอันตรายขณะทำงาน สลับหน้าที่กันทำงาน หยอกล้อเล่นกันขณะปฏิบัติงาน รีบปฏิบัติงาน ไม่ปิดเครื่องจักรก่อนทำความสะอาด ทำงานโดยที่สภาพร่างกายไม่พร้อม เป็นต้น ซึ่งต้องมีการกำหนดขั้นตอนการทำงาน ตรวจสอบ พร้อมทั้งเตือนเป็นประจำ

ข้อมูลด้านการบริหารจัดการความปลอดภัย คิดว่าบริษัทฯ มีการกำหนดนโยบาย กฎระเบียบและมาตรการด้านความปลอดภัยต่างๆ เครื่องขึ้นรูปโลหะมีการ์ดป้องกันอันตรายในจุดที่เป็นอันตราย เช่น สายพาน แต่ยังไม่ครอบคลุมทุกจุด ไม่มีการติดตั้งที่ครอบป้องกันไม่ให้เท้าเหยียบโดยไม่ได้ตั้งใจ มีการป้อนชิ้นงานโดยวิธีรางเลื่อนหรือใช้ไม้เขี่ยชิ้นงาน มีการจัดให้มีอุปกรณ์คุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคลรวมทั้งกำกับดูแลให้พนักงานสวมใส่ตลอดเวลาที่ปฏิบัติงาน มีการอบรมพนักงาน มีคู่มือการปฏิบัติงานเป็นภาษาไทย มีคณะทำงานด้านความปลอดภัย มีการวิเคราะห์หาสาเหตุเมื่อเกิดอุบัติเหตุพร้อมทั้ง ปรับปรุงแก้ไข มีการติดป้ายเตือนอันตรายทั้งภาษาไทย-พม่าในพื้นที่ปฏิบัติงาน และมีการจัดกิจกรรมส่งเสริมด้านความปลอดภัย

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการศึกษา พบว่า ปัจจัยที่เป็นสาเหตุและมีผลต่อการเกิดอุบัติเหตุจากการทำงานในกระบวนการขึ้นรูปแผ่นโลหะด้วยแรงกดของกลุ่มตัวอย่างที่ศึกษา คือ 1) การให้ความสำคัญกับความปลอดภัย 2) การสวมใส่เครื่องประดับ การแต่งกายไม่เหมาะสม และการไม่สวมใส่ PPE 3) เครื่องขึ้นรูปโลหะไม่มีที่ครอบปิดคลุมในบริเวณที่อาจเป็นอันตราย หรืออุปกรณ์ที่สามารถหยุดเครื่องได้ทันทีเมื่ออวัยวะของร่างกายเข้าใกล้บริเวณที่อันตราย หรืออุปกรณ์อื่นที่ป้องกันอวัยวะของร่างกายเข้าไปในบริเวณที่อาจเป็นอันตราย 4) เครื่องขึ้นรูปโลหะที่ใช้เท้าเหยียบไม่มีที่ครอบป้องกันไม่ให้เหยียบโดยที่ไม่ได้ตั้งใจ 5) คู่มือหรือวิธีการทำงานกับเครื่องขึ้นรูปโลหะไม่มีภาษาพม่าและไม่มีไว้ในบริเวณสถานที่ทำงาน ผู้วิจัยได้นำแนวคิดการปรับปรุงและป้องกันการเกิดอุบัติเหตุ ทั้งการปรับปรุงทางวิศวกรรม การให้ความรู้ การออกกฎระเบียบ การสร้างจิตสำนึกและการมีส่วนร่วมด้านความปลอดภัยมากำหนดมาตรการในการป้องกัน (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553; กำพล, 2553; ศีขรินทร์, 2553) ดังนี้

1. ติดตั้งที่ครอบป้องกันไม่ให้เหยียบโดยที่ไม่ได้ตั้งใจกับเครื่องขึ้นรูปโลหะ เพื่อป้องกันอุบัติเหตุในกรณีเหยียบเครื่องจักรโดยไม่ได้ตั้งใจหรือวัสดุตกหล่น ทับ เป็นเหตุให้กลไกของเครื่องจักรทำงาน และเกิดอุบัติเหตุได้

2. จัดทำคู่มือหรือวิธีการทำงานกับเครื่องขึ้นรูปโลหะภาษาไทย-พม่า และติดตั้งไว้บริเวณสถานที่ทำงาน ดังภาพที่ 2 เพื่อให้พนักงานได้ศึกษา ทราบถึงอันตราย และสามารถปฏิบัติตามขั้นตอนการทำงานได้อย่างถูกวิธี



Figure 2 Accident prevention measurement

จากการกำหนดมาตรการในการดำเนินการป้องกันการเกิดอุบัติเหตุ สามารถประเมินผลด้วยวิธีการประเมินความเสี่ยงเปรียบเทียบการดำเนินงานก่อนและหลังปรับปรุง ดังตารางที่ 7 พบว่า ระดับความเสี่ยงก่อนการดำเนินงานอยู่ในระดับที่ยอมรับไม่ได้ และหลังการดำเนินงานอยู่ในระดับที่ยอมรับได้

Table 7 Result of comparative measurement by risk assessment

Result of Checklist	Preventive measures	Before		After	
		Probability x Severity	Risk level	Probability x Severity	Risk level
1. Pedal of pressing machine without cover.	Cover of pedal installed with pressing machine.	4 x 3	Unacceptable risk	1 x 3	Acceptable risk
2. No Myanmar language in work Instruction at working area.	Work instruction was Thai - Myanmar language and installed at working area.	4 x 3	Unacceptable risk	1 x 3	Acceptable risk

เพื่อให้การดำเนินการป้องกันและควบคุมการเกิดอุบัติเหตุมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ผู้วิจัยจึงเสนอแนะแนวทางในการป้องกันอุบัติเหตุจากการขึ้นรูปแผ่นโลหะด้วยแรงกดเพิ่มเติม ดังนี้

1. ติดตั้งที่ครอบปิดคลุมบริเวณรอบๆ แม่พิมพ์หรือบริเวณอาจเป็นอันตราย โดยใช้แผ่นโลหะ พลาสติก ตะแกรงเหล็กที่มีขนาดเล็กพอที่มือจะสอดเข้าไปไม่ได้ เพื่อป้องกันและหลีกเลี่ยงไม่ให้อวัยวะของร่างกายเข้าไปอยู่ใต้แม่พิมพ์ในขณะที่เครื่องทำงาน และปรับปรุงวิธีการป้อนชิ้นงานโดยการใช้รางเทและการใช้แม่พิมพ์ชนิดเลื่อนเข้าออกได้ ดังรูปภาพที่ 3 (พิพัฒน์ และ ปโยธร, 2545; วิฑูรย์ และ วีรพงษ์, 2551)

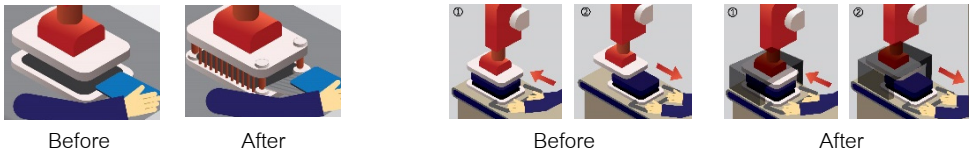


Figure 3 Model of accident prevention measurement; guarding set up for dangerous zone.

2. จัดทำกิจกรรมส่งเสริมด้านความปลอดภัยในการทำงานให้กับพนักงาน เพื่อส่งเสริมให้มีจิตสำนึกและให้ความสำคัญกับความปลอดภัยมากขึ้น โดยมีวัตถุประสงค์และเป้าหมายเพื่อลดและป้องกันอุบัติเหตุจากการทำงาน รวมทั้งมีการรณรงค์ตลอดทั้งปีและติดตามผลการดำเนินงานอย่างต่อเนื่อง

สรุป

ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดอุบัติเหตุในกระบวนการขึ้นรูปแผ่นโลหะด้วยแรงกด คือ 1) เครื่องขึ้นรูปโลหะไม่มีที่ครอบปิดคลุมในบริเวณที่อาจเป็นอันตราย 2) เครื่องขึ้นรูปโลหะไม่มีที่ครอบป้องกันเท้าเหยียบโดยไม่ได้ตั้งใจ 3) คู่มือหรือวิธีการทำงานกับเครื่องขึ้นรูปโลหะไม่มีภาษาพม่าที่ติดไว้ในบริเวณสถานที่ทำงาน 4) พนักงานสวมใส่เครื่องประดับ สวมเครื่องแต่งกายที่ไม่เหมาะสม และไม่สวมอุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคล 5) ทัศนคติการให้ความสำคัญกับความปลอดภัย และได้กำหนดมาตรการในการป้องกันอุบัติเหตุ 2 มาตรการ ได้แก่ 1) ติดตั้งที่ครอบป้องกันไม่ให้เหยียบโดยที่ไม่ได้ตั้งใจกับเครื่องขึ้นรูปโลหะ 2) จัดทำคู่มือหรือวิธีการทำงานภาษาไทย-พม่า พร้อมทั้งติดตั้งไว้บริเวณสถานที่ทำงาน ซึ่งสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

กรมโรงงานอุสาหกรรม. 2544. **ระเบียบกรมโรงงานอุตสาหกรรม ว่าด้วยหลักเกณฑ์การชี้บ่ง อันตรายและการประเมินความเสี่ยง และการจัดทำแผนงานบริหารจัดการความเสี่ยง พ.ศ. 2543.** ราชกิจจานุเบกษา (118 ตอนพิเศษ 58 ง): 28-55.

กำพล นันทะสำราญ. 2553. **ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดอุบัติเหตุจากการทำงานของพนักงาน: กรณีศึกษา นิคมอุตสาหกรรมบ้านหว้า (ไฮเทค) จังหวัดพระนครศรีอยุธยา.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ธานินทร์ ศิลป์จารุ. 2557. **การวิจัยและวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วย SPSS และ AMOS.** พิมพ์ครั้งที่ 15, ห้างหุ้นส่วนสามัญบิสซิเนสอาร์แอนด์ดี, กรุงเทพฯ.

พิพัฒน์ นพทีปกังวาล และ ปโยธร พลกรรณ์. 2545. **ความปลอดภัยในการทำงานเครื่องจักร.** พิมพ์ครั้งที่ 1. บริษัท ยุทธรินทร์การพิมพ์ จำกัด. กรุงเทพฯ

วิฑูรย์ สิมะโชคดี และวีรพงษ์ เฉลิมจิระรัตน์. 2551. **วิศวกรรมและการบริหารความปลอดภัยในโรงงาน.** พิมพ์ครั้งที่ 25, บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด (มหาชน), กรุงเทพฯ.

ศรัณย์ ปัญญาธรรม. 2547. **การประเมินความเสี่ยงของพนักงานที่ปฏิบัติงานกับเครื่องปั๊มโลหะแบบกลไก โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ความผิดพลาดแบบแผนภูมิต้นไม้.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ศิขรินทร์ สุขโต. 2553. **วิศวกรรมความปลอดภัย Safety engineering.** พิมพ์ครั้งที่ 1, มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น.

สำนักงานกองทุนเงินทดแทน. ม.ป.ป. **สถิติการประสบอันตราย หรือเจ็บป่วยเนื่องจากการทำงาน ปี 2559.** แหล่งที่มา: https://www.sso.go.th/wpr/assets/upload/files_storage/sso_th/d3789f5205a06fa221f1feaf85bf76b7.pdf, 3 พฤษภาคม 2561.

Gliem, J.A. and R.R. Gliem. 2003. **Calculating Interpreting, and Reporting Cronbach's Alpha Reliability Coefficient for Likert-Type Scales.** 2003 Midwest Research to Practice Conference in Adult Continuing, and Community Education.

Likert, R. 1932. **A Technique for the Measurement of Attitudes.** Archives of Psychology, New York.

Stephanie. 2014. **Cronbach's Alpha: Simple Definition, Use and Interpretation.** Available Source: http://www.statisticshowto.com/cronbachs-alpha-spss/, August 13, 2018

Yamane, T. 1973. **Statistics: An Introductory Analysis.** Harper and Row Publications, New York.

การออกแบบระบบติดตามประสิทธิภาพของห้องเย็นประหยัดด้วยไอโอที

Design of Performance Monitoring Affordable Cold Storage with IoTs

พีรศุษม์ ไชยศรีมณีพรรณ[1] และ ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์[1*]

Peerasutth Chaisrimaneepan[1] and Taweedej Siritanapipat[1*]

บทคัดย่อ

เนื่องจากปัญหาการเน่าเสียของผลผลิตทางการเกษตร และต้นทุนการทำห้องเย็นซึ่งมีราคาสูง ทำให้เกิดการระดมทุนของ WFLO (World Food Logistics Organization) เพื่อพัฒนาอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิที่มีชื่อว่า คูลบอท (Coolbot) และมีงานวิจัยในการพัฒนาอุปกรณ์ควบคุมการทำงานของเครื่องปรับอากาศคล้ายกันชื่อว่า Chilling Touch V.1 ทำหน้าที่เปลี่ยนช่วงการทำงานของเครื่องปรับอากาศให้มีอุณหภูมิต่ำ เพื่อให้เหมาะสมต่อการเก็บผลผลิตทางการเกษตร รวมถึงการป้องกันการเกิดน้ำแข็งที่คอยล์เย็น นำมาซึ่งการพัฒนาอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ Chilling Touch V.2 ที่ได้เพิ่มระบบติดตามประสิทธิภาพการทำความเย็น เพิ่มความสามารถในการประมวลผล ลดการใช้พลังงานจาก Heater และส่งข้อมูลขึ้นอินเตอร์เน็ต โดยการนำข้อมูลขึ้นไปเก็บบน Cloud Server ผ่านเว็บไซต์ Thingspeak โดยการส่งข้อมูลแบบ Real Time พร้อมการแสดงผลในรูปแบบของกราฟ ทำให้ผู้ใช้สามารถติดตามสถานะและความเป็นไปของระบบได้อย่างต่อเนื่อง ทันท่วงที ไม่ว่าจะอยู่ที่ไหนก็ตาม

ABSTRACT

Due to the problem of spoilage of agricultural products and the cost of making a cold storage room, which has a high price, resulting in the funding of WFLO (World Food Logistics Organization) to develop a temperature control device called Coolbot in the development of air conditioning to change the working range of the air conditioner to a low temperature to be suitable for the collection of agricultural products including to the prevention of ice formation at the evaporator coil, in the development of Chilling Touch V.2 has added a cooling performance monitoring system, increase comply ability, reduce energy consumption from heater increase ability to send data on the internet by bringing the data up to store on the Cloud Server via Thingspeak website by sending data in real time with the allowing users to keep track of the status and possibilities of the system in a timely manner, no matter where they are.

Key Words: Cold Room, Cold storage from house AC, Air Conditioner efficiency measurement

*Corresponding author; e-mail address: **taweedej.s@ku.th**

[1]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ10900

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

คำนำ

สืบเนื่องจากปัญหาการเน่าเสียของผลผลิตทางการเกษตรภายหลังการเก็บเกี่ยวซึ่งเกิดขึ้นทั่วโลก อันเนื่องมาจากการหายใจ (Respiration Heat) และการเผาผลาญพลังงาน (Metabolism) ของผลผลิตทางการเกษตร รวมถึงการเกิดภาวะออกซิเจนที่ไม่เพียงพอเป็นเหตุให้เกิดการเน่าเสียและเนื่องจากต้นทุนของห้องเย็นมีราคาสูง ทำให้เกิดการระดมทุนของ WFLO (World Food Logistics Organization) และความร่วมมือในการวิจัยโดย USAID (United States Agency For International Development) กับมหาวิทยาลัย UCDAVIS (University of California) พัฒนาอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิที่มีชื่อ คูลบอท (Coolbot) ทำหน้าที่เปลี่ยนจุดทำงานของเครื่องปรับอากาศให้ต่ำ เพื่อให้เหมาะสมต่อการเก็บผลผลิตทางการเกษตร ลดต้นทุนเมื่อเทียบกับการสร้างห้องเย็น และป้องกันการเกิดน้ำแข็งที่คอยล์เย็น อย่างไรก็ดีคูลบอทยังคงมีราคาสูงและจำเป็นต้องนำเข้า จึงได้เกิดออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ ชื่อชิลลิ่งทัช (Chilling Touch V.1) เพื่อทดแทนอุปกรณ์เดิมใช้ในการ วัดอุณหภูมิ ความชื้น แล้วนำไปวิเคราะห์หาค่าประสิทธิภาพของเครื่องปรับอากาศ (Coefficient of Performance : COP) เพื่อให้แน่ใจว่าระบบยังเหมาะสมกับการเก็บรักษากับผลผลิตทางการเกษตรหรือไม่ ทั้งนี้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบได้มีการพัฒนาอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิชื่อ Chilling Touch V.2 เพิ่มระบบติดตามประสิทธิภาพการทำความเย็น เพิ่มความสามารถในการประมวลผล ลดการใช้พลังงานจาก Heater และส่งข้อมูลขึ้นอินเตอร์เน็ต ทั้งนี้การรักษาสภาพอากาศให้เหมาะสมยังเป็นการลดต้นทุนในการผลิต ช่วยให้เกษตรกร ชาวสวน ชาวไร่ หรือผู้ค้าสามารถยืดอายุผลผลิตทางการเกษตรได้นานขึ้น ลดความสูญเสียผลผลิตทางการเกษตรอันเนื่องมาจากการเน่าเสีย ประหยัดพลังงานและทำให้มีผลผลิตจำหน่ายตลอดทั้งปี พร้อมส่งค่าที่วัดได้ขึ้นอินเตอร์เน็ตแสดงผลแบบทันที (Real Time) เพื่อให้ผู้ใช้สามารถเข้าถึงการทำงานของระบบเครื่องปรับอากาศได้ตลอดเวลา (ณภัทร และคณะ, 2556)

อุปกรณ์และวิธีการ

แนวคิดในการออกแบบและดำเนินการ

ในขั้นตอนของการเตรียมการในการวางแผนลำดำเนินการเป็นดังแสดงใน (Figure 1) วนจากซ้ายไปขวาและบนลงล่าง เริ่มจากการออกแบบและสร้างระบบวัดคุม ชุดควบคุม ระบบแสดงผล จากนั้นจึงทำการตรวจสอบการทำงานของอุปกรณ์แต่ละตัว เชื่อมต่ออุปกรณ์เข้ากับระบบทั้งหมดจากนั้นเก็บค่า อุณหภูมิ ความชื้น และหาค่าประสิทธิภาพการทำงานของระบบ และทดสอบการส่งค่าขึ้นอินเตอร์เน็ต

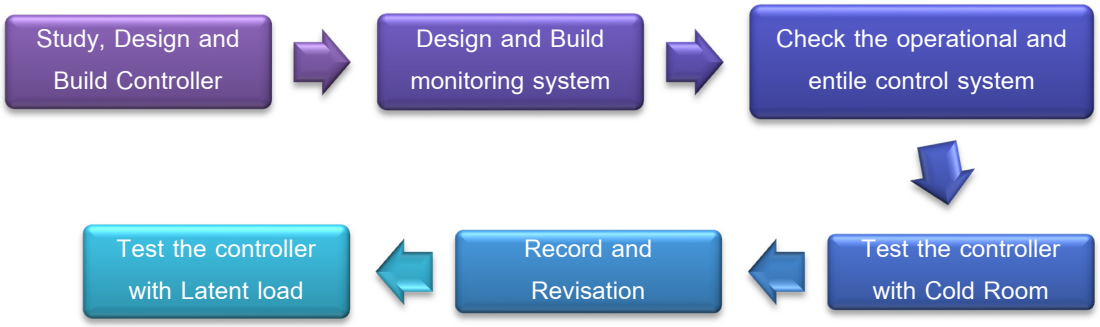


Figure 1 Concept design and implement.

แผนผังแสดงกรวดและประมวลผล

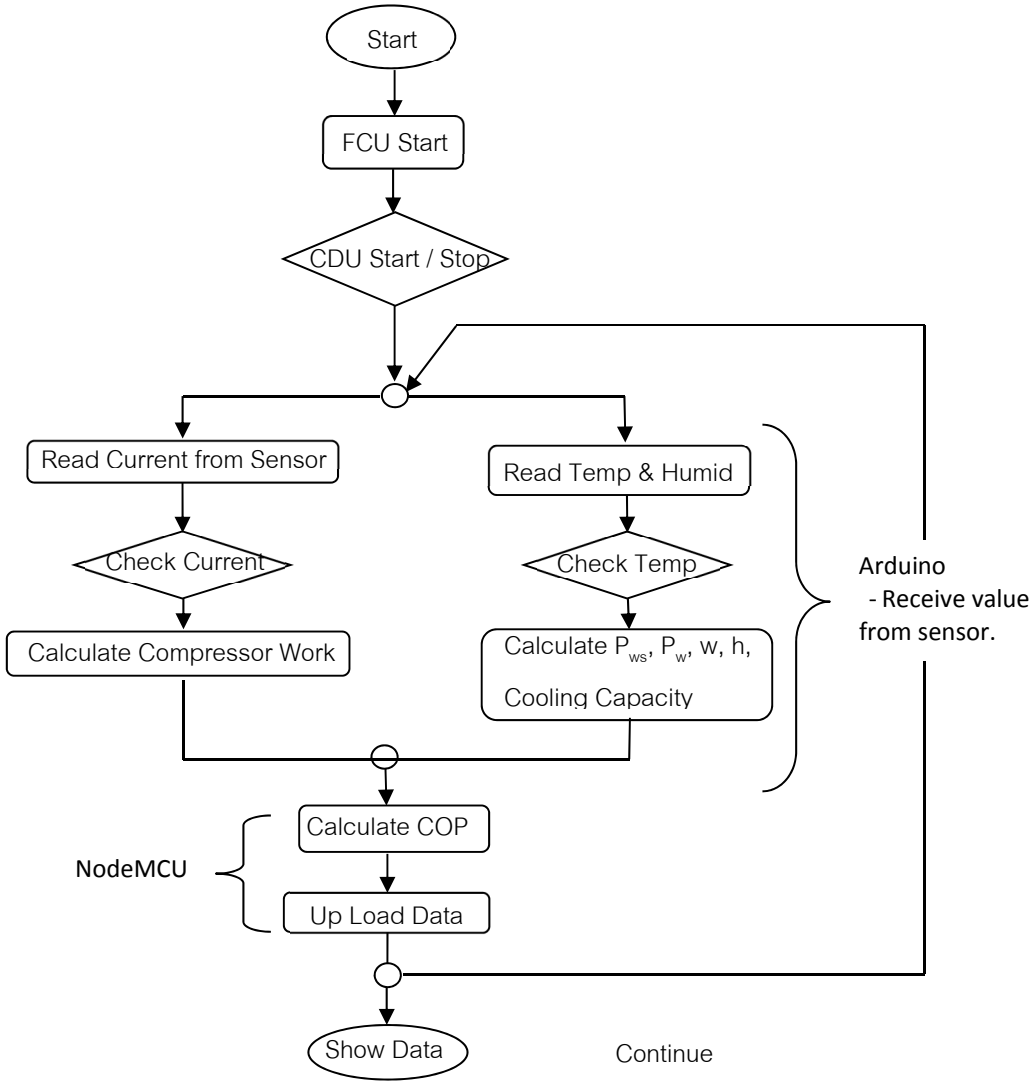


Figure 2 Flow Chart for measurement, calculation and evaluate performance.

ระบบจะเริ่มทำงานจาก คอยล์เย็น (Fan Coil Unit : FCU) หลังจากนั้น ส่วนคอยล์ร้อน (Condensing Unit : CDU) จะทำงานเพื่อเพิ่มความดันน้ำยาแอร์ในระบบจากนั้นขั้นตอนจะเป็นไปตาม (Figure 2) โดยระบบจะเริ่มอ่านค่าผ่านอุปกรณ์วัด (Sensor) หลังจากคอยล์ร้อนเริ่มทำงาน โดยอ่านค่ากระแสจากตัววัดกระแส (Current Transformer Sensor: CT) อุณหภูมิและความชื้นด้วยอุปกรณ์วัดอุณหภูมิและความชื้น (Detect Humidity Temperature Sensor : DHT) ซึ่งสัญญาณที่วัดได้จาก DHT จะเป็นสัญญาณ แอนะล็อก (Analog) จากนั้นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ อาร์ดูโน (Arduino) จะรับสัญญาณและทำการประมวลผล คำนวณหาค่า (Figure 3)

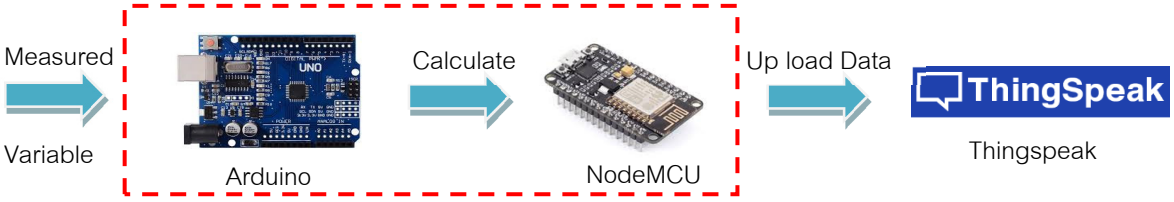


Figure 3 Controller sequence chart.

เพื่อส่งค่าต่อให้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ โนด เอ็ม ซี ยู (NodeMCU) เพื่อทำการคำนวนหาประสิทธิภาพและทำการส่งค่าทั้งหมดที่ได้ขึ้นอินเตอร์เน็ตพร้อมกับการแสดงผล จากนั้นกลับไปเริ่มกระบวนการวัดเก็บค่าใหม่อีกครั้ง

ขั้นตอนการออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์

ทำการออกแบบวงจรไฟฟ้า (Schematic Diagram) ที่ใช้ในการควบคุมตรวจวัดอุณหภูมิ ความชื้น และกระแส ด้วยโปรแกรม ฟลิทซิ่ง (Fritzing) ที่ใช้ในการเขียนและทดสอบวงจรไฟฟ้า (Figure 4) จากนั้นทำการประกอบอุปกรณ์เพื่อทำการทดสอบการทำงานของ Sensor และ ระบบการทำงานดังแสดงในรูป (Figure 5)

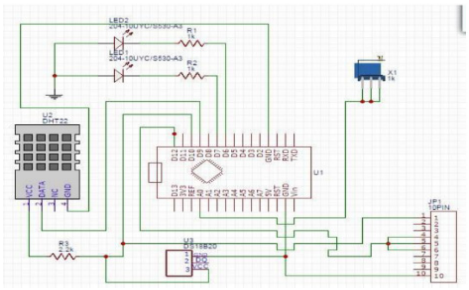


Figure 4 Schematic Diagram

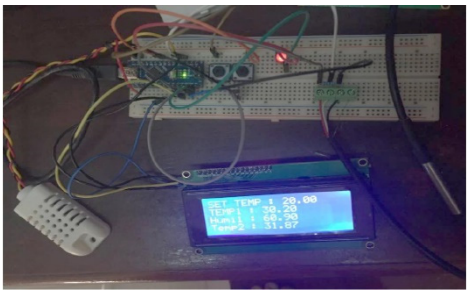


Figure 5 Location of Controller

จากนั้นทำการวางตำแหน่งที่ต้องการทำการติดตั้งอุปกรณ์วัด อุณหภูมิ ความชื้น กระแส และอุปกรณ์ควบคุมดังแสดงใน (Figure 6) ใน (Figure 7) แสดงให้เห็นถึงการติดตั้ง DS18B20 เป็นไอซีที่วัดอุณหภูมิและให้ค่าแบบดิจิทัลเพื่อใช้วัดอุณหภูมิหน้าคอยล์เย็นเพื่อตรวจสอบสภาวะของคอยล์เย็นว่าเกิดภาวะน้ำแข็งเกาะ (Freezing Coil) หรือไม่ เนื่องจาก DS18B20 มีความแม่นยำสูง (High Accuracy) ทนต่ออุณหภูมิต่ำได้สูงสุด -55 องศาเซลเซียส และส่งข้อมูลได้อย่างรวดเร็ว

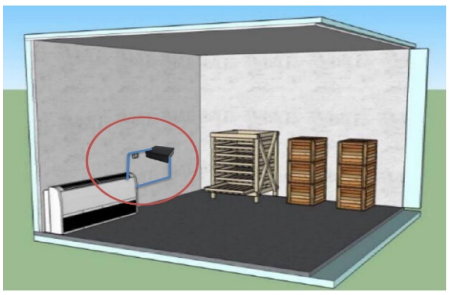


Figure 6 Chilling Touch controller.

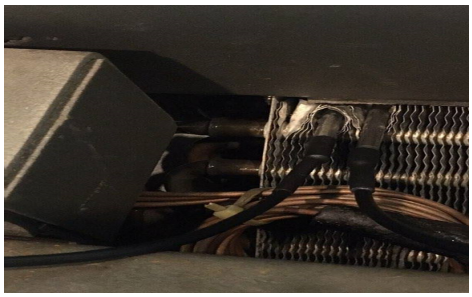


Figure 7 Measuring in Fan Coil Unit.

ภาพด้านล่างแสดงให้เห็นการติดตั้งอุปกรณ์วัด DHT22 (Figure 8) โดยใช้หลักการทำงานของ Resistive Humidity Sensing Component และ NTC Temperature Sensor Thermistor ในการวัดอุณหภูมิและความชื้น อุปกรณ์นี้ติดตั้งอยู่ภายในห้องเย็นเพื่อวัดอุณหภูมิและความชื้นก่อนนำไปคำนวณหาความดัน (P) และ Enthalpy (h) ผ่านบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ อาร์ดูโน

ต่อมาในรูป (Figure 9) ทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดกระแส CT หรือ LA55-P ใช้หลักการทำงานของ Hall Effect กล่าวคือเมื่อจ่ายกระแสผ่านสายไฟหรือขดลวดจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กขึ้นที่บริเวณรอบสายไฟ ดังนั้นเมื่อจับสนามแม่เหล็กได้และเปลี่ยนเป็นกระแสจะทำให้สามารถวัดกระแสได้ โดยอุปกรณ์วัดนี้ติดตั้งอยู่บริเวณด้านนอกเพื่อวัดกระแสที่จ่ายให้กับคอยล์ร้อน

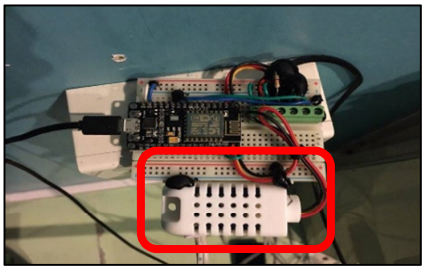


Figure 8 Sensor DHT22.

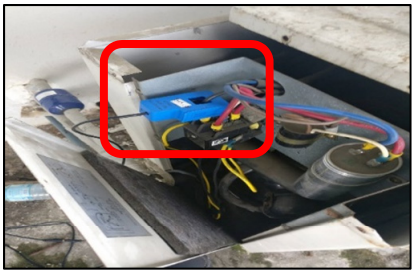


Figure 9 Hall Effect Sensor

ในขั้นตอนสุดท้ายทำการทดลองระบบการเก็บค่าอุณหภูมิ ความชื้น และกระแส ภายในห้องเย็นพร้อมทั้งการคำนวณและส่งค่าขึ้นอินเตอร์เน็ตออฟติง (IoTs) ผ่าน NodeMCU ESP8266 (Figure 10) และแสดงผลผ่านเว็บไซท์ Things Speak เทียบกับอุปกรณ์วัดความชื้นแบบพกพา Data Logger (Figure 11)

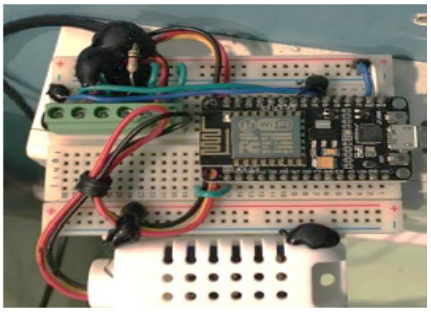


Figure 10 NodeMCU ESP8266.

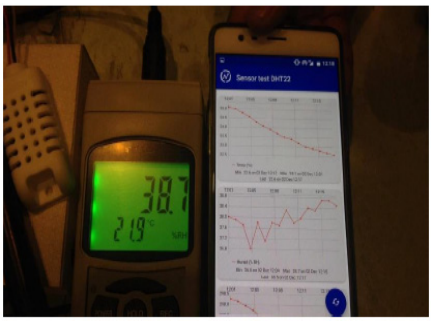


Figure 11 Upload Data to Thinks Speak

ผลการดำเนินงาน

ผลการทดสอบห้องเย็นโดยใช้ Chilling Touch V.2

อุณหภูมิห้องเย็น ขณะเริ่มต้นทำการทดสอบอยู่ที่ 23.5 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่ตั้งไว้ 7 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิเฉลี่ยทางเลขคณิตสำหรับผลผลิตทางการเกษตร และให้มีการตัดการทำงานหลังจากคอยล์มีสภาพเป็นน้ำแข็งเป็นเวลา 65 วินาที

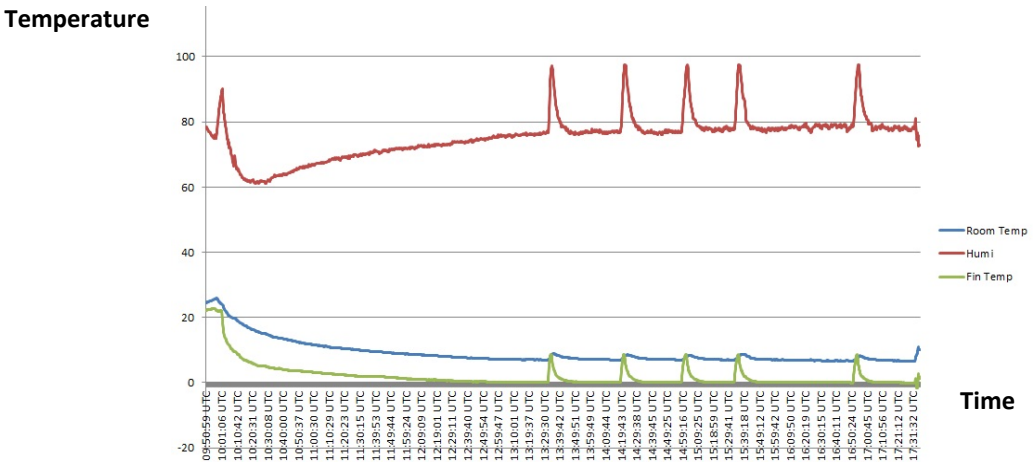


Figure 12 Graph plots between room temperature, fin temperature and humidity.

จากผลการทดสอบการทำงานของระบบพบว่า อุปกรณ์ควบคุม Chilling Touch V.2 สามารถควบคุมเครื่องปรับอากาศให้สามารถทำอุณหภูมิได้ที่ 7 องศาเซลเซียส และอุปกรณ์วัดทุกอย่างทำงานไอย่างเป็นปกติ โดยครั้งแรกของการทำงานพบว่า ระบบใช้เวลาถึง 3 ชั่วโมงในการดึงอุณหภูมิลงจาก 23.5 เป็น 7 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นพบว่าอุปกรณ์ควบคุม Chilling Touch V.2 ได้ทำการตัดการทำงานของคอมเพรสเซอร์ (Compressor) เมื่ออุณหภูมิที่คอยล์ต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 65 วินาที ทำให้กราฟของความชื้นภายในห้อง (Humidity) อุณหภูมิห้อง (Room Temperature) และอุณหภูมิที่คอยล์ (Coil Temperature) สูงขึ้น ก่อนที่จะลดลงภายหลังจากการกลับมาทำงานของ Compressorในรอบต่อไปของการตัดการทำงานของ Compressor ใช้เวลาประมาณ 40 นาที

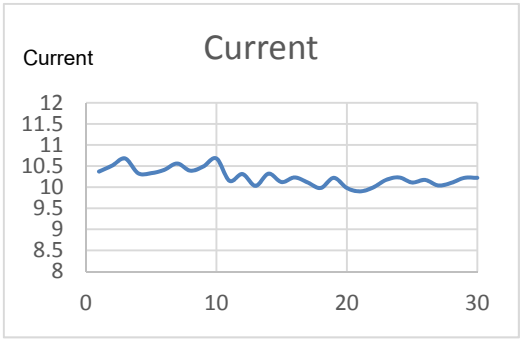


Figure 12 Plots of current.

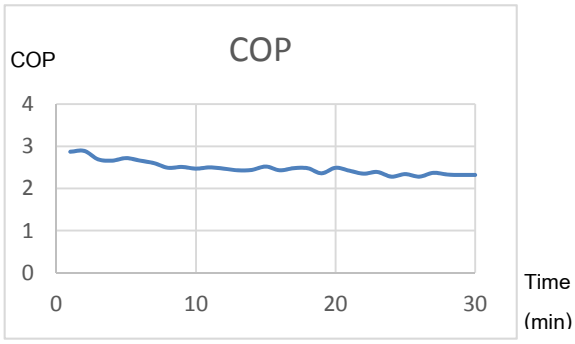


Figure 13 Plots of COP.

(Figure 11) แสดงค่ากระแสที่วัดได้จาก CT ในช่วงขณะเวลาหนึ่งพบว่ากระแสมีการแกว่งตัวเล็กน้อยอันเนื่องมาจากภาระการทำงานของพัดลม (Blower) และ Compressor ในแต่ละรอบการหมุน และค่าประสิทธิภาพ (COP) ของระบบดังแสดงใน (Figure 12) มาจากการคำนวณระหว่างกระแสไฟที่ป้อนเข้าระบบและค่าพลังงานที่เครื่องปรับอากาศทำได้ซึ่งมาจากการคำนวณ ระหว่างพลังงานความร้อนสัมผัส (Q_S)และความร้อนแฝง (Q_L)

ผลการทดสอบห้องเย็นโดยจำลองการแช่ผักและผลไม้

เพื่อเป็นการจำลองสิ่งที่เกิดขึ้นจริงในห้องเย็นอันได้แก่ การแลกเปลี่ยนความร้อนและการคายน้ำของผลผลิตทางการเกษตร โดยการนำถังใส่น้ำตั้งทิ้งไว้ตามจุดต่าง ๆ ภายในห้องและทำการทดลองเหมือนกับการทดลองก่อนหน้าเพื่อเก็บค่าอุณหภูมิความชื้นและหาประสิทธิภาพของระบบ



Figure 14 Cold room with latent load.

อุณหภูมิห้องเย็น ขณะเริ่มต้นทำการทดสอบอยู่ที่ 28.3 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่ตั้งไว้ 7 องศาเซลเซียส และให้มีการตัดการทำงานหลังจากคอยล์มีสภาพเป็นน้ำแข็ง 65 วินาที

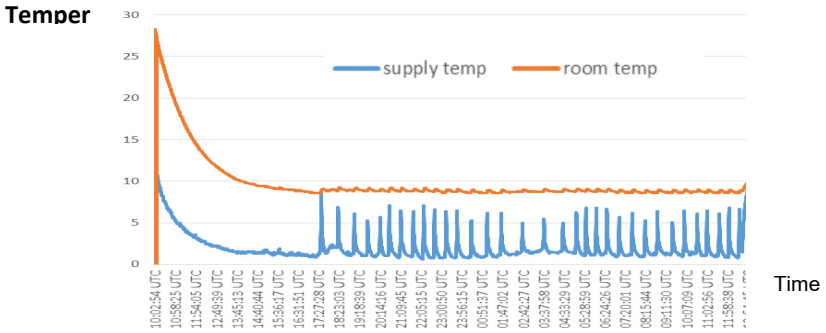


Figure 15 Graph plots between room temperature, fin temperature and humidity of Cold room with latent load.

จากผลการทดสอบพบใช้เวลา 19 ชั่วโมง ในการทำอุณหภูมิจาก 28.3 เป็น 8.5องศาเซลเซียส หลังจากนั้นค่าอุณหภูมิที่วัดได้มีการแกว่งตัวของช่วงข้อมูลเล็กน้อยเนื่องมาจากระบบพยายามดึงอุณหภูมิลงให้ได้ตามค่าที่ตั้งไว้ (7 องศาเซลเซียส) แต่เนื่องจากภาระโหลดที่มากเกินและขนาดเครื่องปรับอากาศที่ไม่เพียงพอทำให้ไม่สามารถดึงอุณหภูมิลงมาตามค่าที่ตั้งไว้

สรุป

จากผลการดำเนินงานพบว่า Chilling Touch V.2 สามารถทำการปรับช่วงการทำงานของเครื่องปรับอากาศและสามารถทำงานแทนที่ Coolbot หรือ Controller เดิมด้วยต้นทุนที่ถูกกว่า ทั้งนี้ Chilling Touch V.2 สามารถแสดงข้อมูลของอุณหภูมิและความชื้นผ่านหน้าจอ LCD พร้อมกับการส่งข้อมูลเหล่านั้นรวมถึงประสิทธิภาพของระบบ (COP) ที่คำนวณได้ขึ้น Cloud Server ผ่านทาง Thingspeak เพื่อนำค่าที่ได้เก็บไว้บนอินเตอร์เน็ต ทำให้เพียงแค่เข้าเว็บไซต์ Thingspeak ก็สามารถติดตามค่าต่าง ๆ ได้แบบ Real Time ทำให้ผู้ใช้สามารถวิเคราะห์การทำงานของระบบ วางแผนซ่อมบำรุง และคาดการณ์ความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นแก่ระบบปรับอากาศได้

อย่างไรก็ดีการคำนวณประสิทธิภาพของระบบปรับอากาศ (COP) ซึ่งเป็นตัวชี้วัดความสามารถของเครื่องปรับอากาศนั้น มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาเนื่องจากสภาวะการทำงานของระบบปรับอากาศที่มีการตัดและการต่อการทำงาน ทำให้การคิดค่าประสิทธิภาพเกิดความไม่แน่นอน (Figure 13) เช่นในช่วงที่ Compressor ตัดการทำงาน ค่า COP ก็จะต่ำลงหรืออาจไม่สามารถหาค่าได้ จนกว่า Compressor กลับมาทำงานอีกครั้ง ดังนั้นจึงต้องใช้การหาค่าเฉลี่ยทางคณิตศาสตร์เป็นตัวช่วยในการหาประสิทธิภาพรวมของระบบ

อย่างไรก็ดีการออกแบบระบบติดตามประสิทธิภาพของห้องเย็นราคาประหยัดด้วยไอโอที ทำให้เกษตรกรชาวไร ชาวสวน สามารถเข้าถึงห้องเย็นราคาประหยัดที่มีคุณภาพได้ในราคาถูก ช่วยให้ลดการสูญเสียอันเนื่องมาจากความขัดข้องของระบบปรับอากาศซึ่งอาจเกิดขึ้นได้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ไม่อาจสำเร็จลุล่วงไม่ได้หากไม่ได้รับความอนุเคราะห์และสนับสนุนจากคณาจารย์ ที่สละเวลาให้คำปรึกษาและคำแนะนำในรายละเอียดของงานตลอดจนชี้แนะแนวทางในการออกแบบ ทดลอง จนกระทั่งการแก้ปัญหา สุดท้ายนี้ขอขอบคุณนายธนกฤต และคณะ ฯ รวมถึงทีมงานในห้องทดลอง วิศวกรรมควบคุมระบบอัตโนมัติ ที่ได้ร่วมทำวิจัยและเก็บข้อมูลในครั้งนี้จนงานวิจัยนี้ลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

KoonBeng Ooi, MasaNoguchi and HingWah Chau, 2017, **Sustainable Heating or Cooling and Ventilation of Affordable Zero-energy Housing**, Procedia Engineering 10th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning, ISHVAC2017,1922 October 2017, Jinan, China.

Worramate, Kantapat, and Prem. 2015. **Affordable Cold Storage "Chilling Touch Controller"**. Mechanical Department Faculty of Engineer Kasetsart University.

ณภัทร คูสุวรรณ,ธนพร สิระชัยนันท,ธัญธรณ์ ทับอุดม.2556. **ห้องเย็นราคาประหยัด (อุปกรณ์ควบคุม)**. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลคณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ธนกฤต มงคลกิจงาม, อายุสม์ เวชพงศา,กชกร รัชนานุสรณ.2556. **ห้องเย็นจากแอร์ บ้านราคาประหยัด (ระบบตรวจวัดประเมินประสิทธิภาพการทงานา)**. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สิทธิโชค แซฟุง. 2549. **โปรแกรมหาประสิทธิภาพเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วน**. ภาควิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรม สาขาไฟฟ้ากำลัง (มหาบัณฑิต). บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

Harrison, L.P. (1965). **Fundamental concepts and definitions relating to humidity**.

Wexler and W.A. Wildhack, eds. **Humidity and moisture measurement and control in science and industry**. Reinhold Publishing, New York.

Olivieri, J. (1996). **Psychrometrics—Theory and practice**. ASHRAE, Atlanta.

Palmatier, E.P. (1963). **Construction of the normal temperature**. ASHRAE psychrometric chart. ASHRAE Journal 5:55.

Rohsenow, W.M. (1946). **The psychrometric determination of absolute humidity at elevated pressures**. Refrigerating Engineering 51(5):423.

องค์ประกอบโครงการบ้านจัดสรรในพื้นที่นิคมอุตสาหกรรมเพื่อรองรับสังคมสูงวัย กรณีศึกษาเขตเศรษฐกิจ อำเภอปลวกแดง จังหวัดระยอง

The Configurations of Housing Estate in the Industrial Areas in order to Support Aging Society: A Case Study in Pluakdaeng, Eastern Industrial District, Rayong

ตามตะวัน ประยูรรัตน์[1*] และ อันธิกา สวัสดิ์ศรี[2]

Tamtawan Prayunrat[1*] and Antika Sawadsri[2]

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษารูปแบบโครงการที่พักอาศัยที่สอดคล้องกับความต้องการด้านที่อยู่อาศัยของคนก่อนสูงวัยในอำเภอปลวกแดง โดยใช้วิธีการวิจัยแบบผสม ทั้งเชิงคุณภาพโดยใช้การสัมภาษณ์และการสำรวจทางกายภาพ และเชิงปริมาณ โดยใช้แบบสอบถาม เป็นเครื่องมือในการเก็บข้อมูล ผลการวิจัยถูกรายงานด้วยสถิติ พบว่า ปัจจัยด้าน ฐานรายได้ ความต้องการด้านที่อยู่อาศัยและการเตรียมความพร้อมด้านที่อยู่อาศัยก่อนสูงวัย มีผลต่อประเภทรูปแบบที่อยู่อาศัย ซึ่งประเภทบ้านแฝดชั้นเดียวและบ้านเดี่ยวชั้นเดียวจะเป็นที่ต้องการของประชากรส่วนใหญ่ที่สำรวจที่มี ฐานรายได้ของประชากรประมาณ 20,000-50,000 บาท ดังนั้นจึงมีงบประมาณที่สามารถซื้อบ้านได้อยู่ระหว่าง 1.1– 2 ล้านบาท และพบว่าผู้อยู่อาศัยต้องการการออกแบบพื้นที่บ้านพักอาศัยพร้อมองค์ประกอบที่เอื้ออำนวยกับผู้สูงวัยในอนาคต

ABSTRACT

This research studied the configurations of housing estate that is in line with needs of pre-aging Pluakdaeng residents. The mix-method was conducted by using both qualitative methods such as interview and physical survey and quantitative methods such as questionnaire as tools for data collection. Research results are reported by statistic which found that income, housing needs and preparation of pre-aging living space are affected to the configuration of housing estate. One-story detach house and one-story twin house is required by the most surveyed population. Residents' income base is normally between 20,000 to 50,000 bahts, so budget that the residents can afford a house is between 1.1 to 2 million bahts. Finally, the configurations of housing design that concern facilities for aging are needed.

Key Words: housing project, housing estate, universal design, industrial estate, aging society

*Corresponding author; e-mail address: **tamtawan15@gmail.com**

[1]ภาควิชาสถาปัตยกรรมภายใน คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยกรุงเทพ กรุงเทพฯ 10110

[1]Department of Interior Architecture, Faculty of Architecture, Bangkok University, Bangkok 10110

[2]ภาควิชาสถาปัตยกรรมภายใน คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

[2]Department of Interior Architecture, Faculty of Architecture, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520

คำนำ

การพัฒนาเศรษฐกิจในสภาพสังคมปัจจุบันมีการขยายตัวอย่างต่อเนื่อง ตามมติคณะรัฐมนตรี วันที่ 22 กันยายน พ.ศ. 2558 รัฐบาลได้มีนโยบายพัฒนาเศรษฐกิจพื้นที่บริเวณชายฝั่งทะเลตะวันออก เพื่อเป็นฐานการผลิตที่สำคัญและตั้งอยู่ในจุดยุทธศาสตร์ของภูมิภาคอาเซียน (สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ, 2560) ซึ่งโครงการนี้ต่อยอดมาจากแผนพัฒนาเศรษฐกิจภาคตะวันออก (Eastern Seaboard) โดยได้ดำเนินการมาแล้วในช่วงเวลา 30 ปีที่ผ่านมา โดยโครงการพัฒนาพื้นที่ชายฝั่งทะเลตะวันออกหรือโครงการอีสเทิร์นซีบอร์ด ตั้งอยู่ในอำเภอปลวกแดง จังหวัดระยอง เป็นการลงทุนของเศรษฐกิจไทยตั้งแต่ปี พ.ศ. 2524 จนถึงปัจจุบัน ส่งผลให้เกิดการจ้างงานและความต้องการของที่อยู่อาศัยที่มีการพัฒนาไปตามสภาพการดำรงชีวิต เศรษฐกิจและสังคม ธุรกิจด้านการลงทุนสร้างที่อยู่อาศัยเพื่อขายและเช่าในรูปแบบของโครงการบ้านจัดสรรจึงตอบสนองต่อความต้องการของคนทำงานที่มองหาที่พักอาศัยโดยโครงการบ้านจัดสรรที่มีการพัฒนาผังโครงการและรูปแบบของบ้าน เพื่อยกระดับคุณภาพชีวิตของตนเองและครอบครัว (ศูนย์ข้อมูลอสังหาริมทรัพย์ ธนาคารอาคารสงเคราะห์, 2560)

ในขณะเดียวกันสถานการณ์ด้านประชากรมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางอายุ จากผลสถิติของระบบสถิติทางการลงทะเบียนกรมการปกครองแสดงจำนวนของประชากรผู้สูงวัยอายุ 60 ปีขึ้นไป มีมากกว่า 10% และประชากรผู้สูงวัยอายุ 65 ปีขึ้นไป มีมากกว่า 7 % ซึ่งปัจจุบันประเทศไทยได้ก้าวเข้าสู่สังคมสูงวัยแล้ว โดยมีผลกระทบอยู่ 3 ด้าน ได้แก่ ด้านสุขภาพ, ด้านเศรษฐกิจ และด้านที่อยู่อาศัยสภาพแวดล้อม ใน 3 ด้านนี้มีความสำคัญและเกี่ยวข้องกันในการใช้ชีวิตของช่วงเริ่มเข้าสู่ช่วงสูงวัย โดยเฉพาะด้านที่อยู่อาศัยและสภาพแวดล้อมซึ่งหมายถึง สภาพอาคารที่พักอาศัย สภาพพื้นที่สาธารณะรอบนอกบ้าน ตลอดจนพื้นที่สาธารณะที่ใช้ร่วมกันอย่างถนนการออกแบบที่อยู่อาศัยจำต้องคำนึงถึงการออกแบบพื้นที่ใช้สอยและวัสดุอุปกรณ์ที่ช่วยลดความเสี่ยงและเน้นความปลอดภัย การอำนวยความสะดวกโดยใช้หลักการออกแบบเพื่อทุกคนมารองรับการดำรงชีวิตของผู้อยู่อาศัยที่เริ่มเข้าสู่ช่วงสูงวัยและมีการนำเทคโนโลยีมาใช้กับวัสดุงานออกแบบที่ตอบสนองกับการใช้ชีวิตภายในที่พักอาศัยให้มีความปลอดภัยและสะดวกสบายในการใช้งานของคนทุกวัย (ไตรรัตน์, 2558)

ในงานวิจัยนี้ได้ทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับการดำรงชีวิตที่ศึกษาด้านทัศนคติความพึงพอใจต่อที่พักอาศัยโดยได้รับอิทธิพลมาจากบุคคลสำคัญที่มีปฏิสัมพันธ์ต่อรูปแบบการดำรงชีวิตอย่างครอบครัวและกลุ่มเพื่อน ซึ่งรูปแบบการดำรงชีวิตสามารถเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพแวดล้อมและสังคมที่เป็นอยู่ (สรินยา, 2554) ส่วนด้านความต้องการที่อยู่อาศัยมีการศึกษาแนวคิดเกี่ยวกับความต้องการด้านที่อยู่อาศัยสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประการ คือความต้องการที่เป็นจริง (Housing Need) และความต้องการฉาบฉวย (Housing want) (มานพ, 2538) และศึกษาเกี่ยวกับสังคมสูงวัยซึ่งมูลนิธิสถาบันวิจัยและพัฒนาผู้สูงอายุไทย (มส.ผส.) (2554) มีการรวบรวมข้อมูลและวิจัยเกี่ยวกับการดูแลคุณภาพชีวิตของผู้สูงอายุโดยการวางแผนเตรียมความพร้อมเรื่องที่อยู่อาศัยและสภาพแวดล้อมของชุมชนที่อยู่อาศัยในอนาคต

การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์หลัก เพื่อศึกษาฐานรายได้ของกลุ่มคนทำงานที่กำลังมองหาที่พักอาศัย ความต้องการของผู้อยู่อาศัยในเขตเศรษฐกิจและศึกษาการเตรียมความพร้อมด้านที่อยู่อาศัยก่อนสูงวัยเพื่อเป็น

แนวทางกำหนดรูปแบบการวางผังโครงการและที่พักอาศัยที่สามารถพัฒนาคุณภาพชีวิตของผู้อยู่อาศัยและตอบสนองความต้องการของผู้ที่ต้องการที่อยู่อาศัยในอนาคต

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

แบบสอบถาม เครื่องบันทึกเสียงและกล้องถ่ายรูป

วิธีการดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นงานวิจัยแบบผสมโดยการวิจัยเชิงคุณภาพใช้การสัมภาษณ์และการสำรวจทางกายภาพและการวิจัยเชิงปริมาณซึ่งใช้การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติเพื่อสรุปผล โดยใช้แบบสอบถามเป็นเครื่องมือในการศึกษาข้อมูลจากแนวคิดที่เกี่ยวกับความต้องการของแต่ละบุคคลซึ่งเป็นความรู้สึก รสนิยมและทัศนคติ อีกทั้งยังต้องการข้อมูลที่เกี่ยวกับระดับคุณภาพชีวิตของผู้อยู่อาศัยในปัจจุบัน มุ่งศึกษาองค์ประกอบของความสัมพันธ์ระหว่างที่พักอาศัยกับสังคมสูงวัยที่มีผลต่อรูปแบบของที่พักอาศัยในเขตนิคมอุตสาหกรรม เพื่อเสนอแนวทางในการกำหนดรูปแบบการวางผังโครงการและที่พักอาศัยที่ตอบสนองความต้องการของผู้อยู่อาศัยและเตรียมความพร้อมด้านที่อยู่อาศัยก่อนสูงวัย โดยมีกรอบการวิจัยและตัวแปรในงานวิจัย ดัง Figure 1

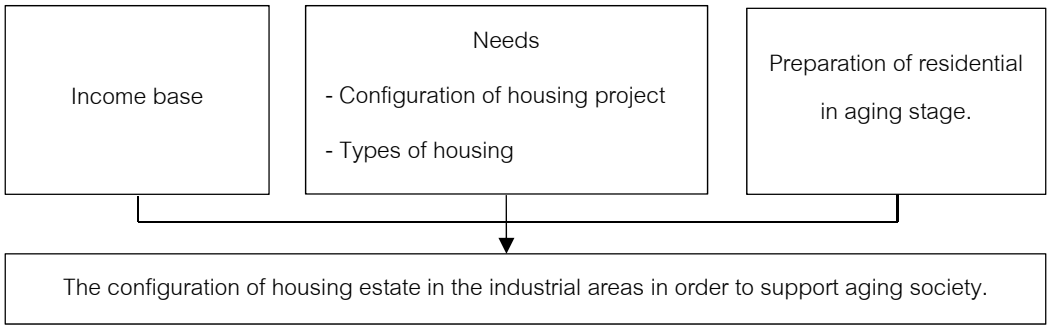


Figure 1 Research Framework

กลุ่มประชากรและการสุ่มตัวอย่าง

ประชากรที่ใช้ในการสุ่มตัวอย่างในงานวิจัยนี้คือ กลุ่มวัยกลางคนที่อาศัยอยู่ใกล้นิคมอุตสาหกรรมอีสเทิร์นซีบอร์ดและมีความสามารถในการซื้อบ้านโดยเกณฑ์อายุสูงสุดที่สามารถผ่อนชำระกับทางธนาคารได้ในช่วงอายุ 25-45 ปี โดยกลุ่มประชากรในช่วงอายุ 25-45 ปี (สำนักบริหารการทะเบียน กรมการปกครอง, 2559) มีจำนวน 23,943 คน ซึ่งขนาดของกลุ่มตัวอย่างได้มาจากการคำนวณขนาดกลุ่มตัวอย่างโดยใช้สูตรของทาโร ยามาเน่ (Yamane, 1967) การวิจัยในครั้งนี้กำหนดให้ระดับความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 95 หรือระดับนัยสำคัญที่ 0.5 ได้กลุ่มตัวอย่างจำนวน 393 ชุด

การสุ่มตัวอย่างงานวิจัยนี้ได้กำหนดพื้นที่ในการเก็บข้อมูลโดยการเลือกพื้นที่กรณีศึกษาโครงการบ้านจัดสรรในเขตอำเภอปลวกแดงซึ่งมีระยะทางไม่เกิน 10 กิโลเมตรจากที่ว่าการอำเภอและอยู่ในเขตอำเภอปลวกแดงโดยมีสิ่งอำนวยความสะดวกที่คล้ายกัน จึงเลือกการสุ่มตัวอย่างโดยใช้วิธีการสุ่มตัวอย่างแบบง่าย (simple random sampling) กรณีศึกษาประกอบด้วยที่พักอาศัย 3 แห่ง จำนวนทั้งหมด 1,136 ยูนิต

เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา

เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ทำการแบ่งเป็น 2 ส่วน ดังนี้

1. ข้อมูลของแต่ละโครงการบ้านจัดสรร ได้แก่ ลักษณะทางกายภาพ ผังโครงการบ้านจัดสรร เพื่อสำรวจและสังเกตการณ์พร้อมทำความเข้าใจสภาพแวดล้อมโดยรวมของโครงการบ้านจัดสรรที่ศึกษาประกอบไปด้วยการจัดวางผังโครงการโดยรวม พื้นที่ส่วนกลาง การเดินทางเข้าออกของโครงการ ถนนภายในโครงการ กิจกรรมของผู้ที่เข้ามาใช้พื้นที่ส่วนกลาง ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการลงสำรวจพื้นที่จริงด้วยตนเอง

2. แบบสอบถาม (Questionnaire) เพื่อศึกษาข้อมูลพื้นฐานและความต้องการของผู้ที่อยู่อาศัยในอำเภอปลวกแดง ลักษณะของแบบสอบถามประกอบด้วย 4 ส่วน ได้แก่

ส่วนที่ 1 ข้อมูลพื้นฐาน, ข้อมูลด้านเศรษฐกิจและสังคม

ส่วนที่ 2 ข้อมูลทัศนคติความพึงพอใจต่อที่พักอาศัยในปัจจุบัน

ส่วนที่ 3 ข้อมูลเกี่ยวกับความต้องการบ้านจัดสรร

ส่วนที่ 4 ข้อมูลเกี่ยวกับการเตรียมความพร้อมด้านที่อยู่อาศัยก่อนสูงวัย

การวิจัยครั้งนี้ได้ทำการศึกษารวมรวบข้อมูล แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง รวมถึงวิธีการสร้างแบบสอบถาม โดยมีการลงสำรวจพื้นที่ในบริเวณเขตเศรษฐกิจของอำเภอปลวกแดง ซึ่งใช้การถ่ายภาพพร้อมจดบันทึกข้อมูลจากการสังเกตและทบทวนวรรณกรรมก่อนนำมาเป็นข้อมูลในการสร้างเครื่องมือเพื่อใช้ในการสัมภาษณ์กลุ่มตัวอย่างในพื้นที่ จากนั้นดำเนินการสร้างแบบสอบถามและรวบรวมข้อมูลที่ได้จากแบบสอบถามทำการสรุปผลโดยใช้สถิติเชิงพรรณนา (Descriptive Statistic) ในการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาค่าร้อยละ (Percentage) ค่าเฉลี่ย (Mean) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) กับข้อมูลที่ได้จากแบบสอบถามและนำผลที่ได้ไปอภิปรายผลจากการศึกษาและสรุปผล

ผลการวิจัย

ผลการวิจัยพบว่าข้อมูลพื้นฐานของกลุ่มตัวอย่างเป็นเพศชายคิดเป็นร้อยละ 50.1 เป็นเพศหญิงคิดเป็นร้อยละ 49.9 ส่วนใหญ่มีอายุ 25 -30 ปี คิดเป็นร้อยละ 34.1 และช่วงอายุ 31-35 ปี คิดเป็นร้อยละ 31.6 มีสถานภาพโสด มีระดับการศึกษาอยู่ในช่วงปวส./ปวช. ถิ่นฐานเดิมมาจากภาคตะวันออกคิดเป็นร้อยละ 35.0 และ

ภาคอื่น ๆ รวมกันคิดเป็นร้อยละ 65.0 ประกอบอาชีพพนักงานบริษัทเอกชนมีตำแหน่งงานในระดับปฏิบัติการ ส่วนระยะเวลาทำงานในสถานที่ปัจจุบัน ตั้งแต่ 1 – 23 ปี โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 4.8 ปี มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 3.868 ด้านจำนวนสมาชิกในครอบครัวอาศัยอยู่ 2-3 คน รายได้ของครอบครัวรวมกันต่อเดือนโดยเฉลี่ย กลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่มีรายได้ช่วง 20,001- 30,000 บาท คิดเป็นร้อยละ 35.9 ช่วงรายได้ 30,001-40,000 บาท คิดเป็นร้อยละ 25.7 และช่วงรายได้ 40,001-50,000 บาท คิดเป็นร้อยละ 14.0

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลพฤติกรรมของผู้อยู่อาศัย มีวัตถุประสงค์เพื่อทำงานในกลุ่มนิคมอุตสาหกรรมซึ่งระยะเวลาในการพักอาศัยในอำเภอปลวกแดงอยู่ถาวรคิดเป็นร้อยละ 52.2 และอยู่ชั่วคราวคิดเป็นร้อยละ 47.8 ส่วนระยะเวลาอยู่ชั่วคราว มีตั้งแต่ 1 – 30 ปี โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 11.4ปี และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 6.803 การเดินทางส่วนใหญ่เดินทางโดยใช้รถยนต์ส่วนตัวคิดเป็นร้อยละ 47.1 รถสวัสดิการรับ-ส่งของบริษัทคิดเป็นร้อยละ 27.2 มีระยะทางระหว่างบ้านกับที่ทำงานอยู่ในช่วงระยะทาง 6-10 กิโลเมตรและการเข้าร่วมกิจกรรมชุมชนในละแวกบ้านของกลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่ไม่เคยเข้าร่วม ด้านผลการวิเคราะห์ข้อมูลความต้องการของผู้อยู่อาศัย พบว่าลักษณะที่อยู่อาศัยใหม่ของกลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่เลือกซื้อบ้านสำเร็จรูปจากโครงการบ้านจัดสรรโดยมีความต้องการบ้านเดี่ยวชั้นเดียวมีเนื้อที่ดินของบ้าน 30 – 50 ตารางวา 3 ห้องนอน 2 ห้องน้ำ และมีความต้องการส่วนพื้นที่ภายนอกตัวบ้านคิดเป็นร้อยละ 65.1 และ ห้องเก็บของคิดเป็นร้อยละ 40.5 มีงบประมาณที่สามารถผ่อนชำระในช่วงราคา 1.1 – 2 ล้านบาท และมีความต้องการพักอาศัยกับพ่อแม่และพักอาศัยกับคู่สมรส แผนการย้ายที่อยู่อาศัยใหม่ของกลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่ยังไม่มีแผนการย้ายที่อยู่ที่แน่นอน

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเกี่ยวกับทัศนคติที่มีผลต่อความพึงพอใจกับที่พักอาศัยในปัจจุบัน พบว่า ประชากรกลุ่มตัวอย่างมีความพึงพอใจกับที่พักอาศัยในด้านสภาพแวดล้อมและสังคมที่เป็นอยู่ โดยพึงพอใจกับที่พักอาศัยที่เดินทางสะดวกใกล้ที่ทำงานและอยู่บนพื้นที่สูงเนินมากกว่าพื้นราบซึ่งมีระดับค่าเฉลี่ยโดยรวม 3.51 จาก 5 ระดับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.913 อยู่ในระดับการแปลผลพึงพอใจมาก ในด้านทางกายและจิตใจมีพื้นที่สวนสาธารณะใกล้ที่พักอาศัยและทำให้รู้สึกถึงความเป็นส่วนตัวมีระดับค่าเฉลี่ยโดยรวม 3.42 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.949 อยู่ในระดับการแปลผลพึงพอใจมาก และด้านความปลอดภัยพึงพอใจกับเส้นทางเข้า-ออกของที่พักอาศัยที่มีเจ้าหน้าที่รักษาความปลอดภัยพร้อมระบบกล้องวงจรปิด มีระดับค่าเฉลี่ยโดยรวม 3.07 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 1.090 อยู่ในระดับการแปลผลพึงพอใจปานกลาง ส่วนความพึงพอใจในระบบแสงสว่างติดตั้งในส่วนของพื้นที่สาธารณะมีค่าเฉลี่ย 2.92 และความพึงพอใจในการดูแลซ่อมบำรุงเพื่อรองรับการใช้งานที่ต่อเนื่องมีผลค่าเฉลี่ย 2.85

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลความต้องการต่อองค์ประกอบของผังโครงการบ้านจัดสรร พบว่าเหตุผลในความต้องการที่อยู่อาศัยของกลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่ให้ความสำคัญในด้านทำเลที่ตั้งมากเป็นอันดับแรก รองลงมาได้แก่ ด้านรูปแบบบ้านและด้านสภาพแวดล้อมตามลำดับ ซึ่งด้านทำเลที่ตั้งกลุ่มตัวอย่างได้ให้ความสำคัญที่เชื่อมโยงมาจากระยะทางจากบ้านถึงที่ทำงานเป็นหลักโดยจะต้องมีความสะดวกในการเข้าถึงที่พักและที่ทำงานได้ง่าย

และรวดเร็วและเชื่อมโยงกับสภาพแวดล้อมที่มีสิ่งอำนวยความสะดวกโดยมีความสัมพันธ์กัน ส่วนด้านรูปแบบบ้านขึ้นอยู่กับขนาดและจำนวนสมาชิกในครอบครัวที่มีผลต่อการเลือกที่อยู่อาศัยให้เหมาะสม และความต้องการของสิ่งอำนวยความสะดวกในละแวกที่พักอาศัยของกลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่ให้ความสำคัญในการมีพื้นที่สวนสาธารณะมากเป็นอันดับแรก รองลงมาได้แก่ มีสถานพยาบาล และอันดับที่สาม คือ มีสถานที่ออกกำลังกายและมีอาคารสันทนาการ สนามเด็กเล่นและร้านสะดวกซื้อ ตามลำดับ

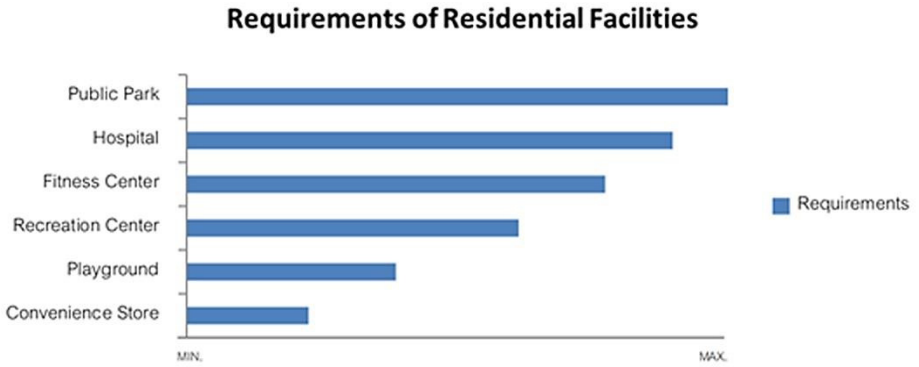


Figure 2 Requirements of residential facilities

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเกี่ยวกับการเตรียมความพร้อมด้านที่อยู่อาศัยก่อนสูงวัย พบว่าแผนการพักอาศัยหลังเกษียณอายุงานของกลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่ต้องการพักอาศัยบ้านของตนเอง โดยช่วงอายุที่ควรเริ่มเตรียมความพร้อมด้านที่อยู่อาศัยก่อนเข้าสู่ช่วงสูงวัยกลุ่มตัวอย่างให้ความสำคัญกับการเริ่มเตรียมความพร้อมด้านที่อยู่อาศัยตั้งแต่เริ่มทำงานช่วงอายุก่อน 30 ปี คิดเป็นร้อยละ 49.9 และช่วงอายุประมาณ 30 ปี คิดเป็นร้อยละ 40.2 ซึ่งครอบครัวมีบทบาทต่อการสนับสนุนในการเตรียมความพร้อมด้านที่อยู่อาศัยก่อนเข้าสู่ช่วงสูงวัย ในส่วนของที่อยู่อาศัยปัจจุบันของกลุ่มตัวอย่างมีองค์ประกอบบ้านที่เอื้ออำนวยกับวัยสูงอายุส่วนใหญ่ คือพื้นบ้านภายในมีระดับเท่ากันคิดเป็นร้อยละ 43.0 ห้องนอนอยู่ชั้นล่างคิดเป็นร้อยละ 34.9 และที่อยู่อาศัยปัจจุบันไม่มีองค์ประกอบบ้านที่เอื้ออำนวยกับวัยสูงอายุคิดเป็นร้อยละ 25.9 จากการวิจัยด้านองค์ประกอบบ้านที่เอื้ออำนวยกับวัยสูงอายุ พบว่า ส่วนใหญ่ที่อยู่อาศัยยังไม่มีสิ่งเอื้ออำนวยกับวัยสูงอายุ

สรุป

การศึกษาความต้องการต่อองค์ประกอบของผังโครงการบ้านจัดสรรและรูปแบบที่พักอาศัยที่มีความสัมพันธ์กับคุณภาพชีวิตช่วงสูงวัยในอนาคต เพื่อเป็นแนวทางในการจัดวางพื้นที่ที่เหมาะสมกับความต้องการเชิงพื้นที่ ความเป็นไปได้ในสถานะทางการเงินและรองรับการใช้พื้นที่ภายในและภายนอกที่อยู่อาศัยที่เหมาะกับทุกคน จากการวิจัยครั้งนี้พบว่าข้อมูลของฐานรายได้และความต้องการด้านที่อยู่อาศัยของกลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่มีฐานรายได้และงบประมาณในการผ่อนชำระบ้านในช่วงราคา 1.1 – 2 ล้านบาท มีพื้นที่ตัวบ้าน 30-50 ตารางวา และมี

พื้นที่ภายนอกรอบตัวบ้าน ส่วนด้านพฤติกรรมการใช้ชีวิตประจำวันนั้นส่วนใหญ่มีการใช้รถยนต์เป็นยานพาหนะในการเดินทางและกลุ่มตัวอย่างมาจากต่างจังหวัดมีการคาดการณ์ว่าจะอยู่อาศัยในอำเภอปลวกแดงแบบถาวร ซึ่งจากผลข้อมูลที่ได้ สามารถวิเคราะห์ประเภทที่อยู่อาศัยเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ประเภทบ้านแฝดชั้นเดียวและบ้านเดี่ยวชั้นเดียว โดยมีความสัมพันธ์และเป็นไปได้จากข้อมูลของฐานรายได้และข้อมูลของความต้องการ การออกแบบที่อยู่อาศัยอาจมีขนาดพื้นที่ใช้สอยที่เหมาะสมกับการใช้ชีวิตประจำวันและควรมีการเผื่อพื้นที่ขยายส่วนต่อเติมโครงสร้างในอนาคต เพื่อรองรับสมาชิกในครอบครัวที่อาจเพิ่มขึ้นและฐานรายได้ที่มากขึ้นตามอายุงาน สำหรับการออกแบบที่อยู่อาศัยด้านทางเข้าหลักควรมีทางลาดพร้อมราวจับเพื่อรองรับการใช้รถเข็นและสามารถใช้ทางลาดในการเข้าออกบ้านได้สะดวกขึ้น ลดความเสี่ยงในการก้าวขึ้นลงขั้นบันไดสำหรับผู้สูงวัยในอนาคต ภายในบ้านการจัดวางพื้นที่สอยใช้ต่าง ๆ ควรจัดวางไม่ซับซ้อนเน้นการเดินเข้าถึงพื้นที่ได้อย่างสะดวก ระดับพื้นภายในที่อยู่อาศัยควรมีระดับพื้นราบเท่ากันและเลือกใช้วัสดุปูพื้นที่ลดความมันวาวเพื่อลดความเสี่ยงการสะดุดและลื่นล้ม ควรมีการออกแบบสำรองสำหรับการติดตั้งปุ่มสัญญาณขอความช่วยเหลือภายในห้องนอนตำแหน่งหัวเตียงและภายในห้องน้ำ เพื่อเป็นการสำรองความต้องการในการใช้งานโดยผู้อยู่อาศัยอาจเล็งเห็นความเหมาะสมกับการใช้งานของสมาชิกในครอบครัว

สำหรับด้านการออกแบบผังโครงการบ้านจัดสรรจากการวิเคราะห์ข้อมูลทัศนคติด้านความพึงพอใจกับที่พักอาศัยควรให้ความสำคัญเรื่องการรักษาความปลอดภัย การออกแบบผังโครงการควรเน้นลักษณะการออกแบบสถานที่เปิดโล่ง ลดมุมอับสายตาหรืออาจมีการติดตั้งแสงสว่างในมุมอับพร้อมระบบกล้องวงจรปิด รวมถึงการดูแลซ่อมบำรุงระบบต่าง ๆ ให้สามารถใช้งานได้อย่างต่อเนื่อง ส่วนในด้านความต้องการของสิ่งอำนวยความสะดวกในละแวกที่พักอาศัยของกลุ่มตัวอย่าง โดยมีความต้องการหลัก 6 ข้อด้วยกัน ได้แก่ 1) สวนสาธารณะ 2) สถานพยาบาล 3) สถานที่ออกกำลังกาย 4) อาคารสันทนาการ 5) สนามเด็กเล่น 6) ร้านค้าสะดวกซื้อ ซึ่งจากความต้องการ 6 ข้อนี้ยังมีการคำนึงถึงการออกแบบเพื่อรองรับผู้สูงวัยในอนาคตที่จะใช้พื้นที่ร่วมกันภายในโครงการ โดยข้อมูลการวิเคราะห์จากฐานรายได้และความต้องการด้านที่อยู่อาศัย แสดงผลถึงประเภทที่อยู่อาศัยแบบผสมกันโดยภายในโครงการเป็นประเภทบ้านเดี่ยวชั้นเดียวและบ้านแฝดชั้นเดียว พร้อมทั้งจัดแบ่งพื้นที่ออกเป็นโซนที่อยู่อาศัยและโซนสาธารณะอย่างสวนสาธารณะที่มีพื้นที่บริเวณเป็นที่โล่งแจ้ง จัดสวนสวยงามและมีลานกว้างเพื่อใช้สำหรับทำกิจกรรม ออกกำลังกาย มีอาคารสันทนาการพร้อมสิ่งอำนวยความสะดวกในส่วนของสถานพยาบาลและร้านค้าสะดวกซื้อควรจัดอยู่ในบริเวณด้านหน้าโครงการเพื่อความสะดวกในการเดินทางสัญจรและการเข้าถึงของบุคคลภายนอกและภายในโครงการที่สามารถเข้าใช้บริการได้ พร้อมทั้งมีจุดบริการรถสวัสดิการรับ-ส่งเพื่อตอบสนองต่อกลุ่มเป้าหมายที่มีการเดินทางไปยังที่ทำงานโดยใช้บริการรถสวัสดิการของสถานที่ทำงาน สำหรับภายในโครงการบ้านจัดสรรมีการออกแบบให้มีทางเดินเท้าตลอดแนวหน้าที่อยู่อาศัยและมีม้านั่งพร้อมพนักผิงที่วางแขนขนาดเหมาะสมในการใช้งานตั้งกระจายเป็นระยะตามจุดต่าง ๆ เพื่อรองรับผู้สูงอายุสามารถใช้งานระหว่างการเดินออกกำลังกายหรือนั่งเล่นเพื่อพักผ่อนหย่อยใจร่วมถึงการข้ามถนนเพื่อเดินทางไปยังสวนสาธารณะ ควรมีการกำหนดทางม้าลายและปรับลดระดับระหว่างทางเดินทางและถนนเป็นทางลาดเพื่อลดความเสี่ยงในการก้าวข้ามระหว่างทางเดินเท้ากับถนนที่มีระดับ

แตกต่างกัน จากการวิเคราะห์ผลข้อมูลที่ได้นี้เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบที่อาจเป็นส่วนหนึ่งในการพัฒนาที่อยู่อาศัยที่ตอบสนองต่อกลุ่มเป้าหมาย

เอกสารอ้างอิง

ไตรรัตน์ จารุทัศน์. 2558. **คู่มือการออกแบบเพื่อทุกคน**. พิมพ์ครั้งที่ 2. เทพเพ็ญวานิสย์, กรุงเทพฯ.

มานพ พงศทัต. 2538. **แนวนโยบายที่อยู่อาศัยแห่งชาติ**. วิทยาลัยป้องกันราชอาณาจักร, กรุงเทพฯ.

มูลนิธิสถาบันวิจัยและพัฒนาผู้สูงอายุไทย. 2554. **4 มิติ สู่คุณภาพชีวิตผู้สูงวัยในชุมชน**. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการสร้างเสริมสุขภาพ (สสส.), กรุงเทพฯ.

ศูนย์ข้อมูลอสังหาริมทรัพย์ ธนาคารอาคารสงเคราะห์. 2560. **สถานการณ์ที่อยู่อาศัยภาคตะวันออก ปี 2560 แนวโน้ม ปี 2561**. แหล่งที่มา: https://www.propdna.net/article/สถานการณ์ที่อยู่อาศัยภาคตะวันออก-ปี-2560-แนวโน้ม-ปี-2561, 28 พฤษภาคม 2561.

สรินยา สงต์ประเสริฐ. 2554. **รูปแบบการดำเนินชีวิตที่ส่งผลต่อความนิยมในคอนโดมิเนียมตากอากาศระดับหรูหราในอำเภอหัวหิน**. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยกรุงเทพ.

สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ. 2560. **โครงการระเบียงเศรษฐกิจภาคตะวันออก (Eastern Economic Corridor : EEC)**. แหล่งที่มา: www.nesdb.go.th, 10 กรกฎาคม 2560.

สำนักบริหารการทะเบียน กรมการปกครอง. 2559. **จำนวนประชากรแยกรายอายุ อำเภอปลวกแดง จังหวัดระยองเดือน ธันวาคม พ.ศ. 2559**. แหล่งที่มา: http://stat.dopa.go.th/stat/statnew/upstat_age_disp.php, 27 กรกฎาคม 2560.

Yamane, T. 1967. **Statistics, An Introductory Analysis**, 2nd ed. Harper and Row, New York.

การพิจารณาผลเบื้องต้นของความแตกต่างระดับหมอนคอนกรีตต่อการทำงานของประแจกลไฟฟ้าสำหรับประแจขนาด 1:6 ของบริษัทรถไฟฟ้า ร.ฟ.ท. จำกัด

Preliminary Considerations of Effect from Level Difference of Sleepers on Ballasted Track to a Point Machine Operation for a 1:6 Turnout of SRTET Company

เอกชัย พัฒนะประยูรวงศ์[1*] กรรมมันต์ ชูประเสิรฐ์[1] วิชัย ศิวะโกศิษฐ[1] และ ประพจน์ ขุนทอง[1]

Ekachai Patthanaprayoonwong[1*], Kummun Chooprasird[1], Wichai Siwakosit[1] and Prapot Kunthong[1]

บทคัดย่อ

การศึกษานี้เป็นการพิจารณาผลเบื้องต้นของความต่างระดับของหมอนคอนกรีตต่อความผิดปกติของการทำงานของประแจกลไฟฟ้าที่ควบคุมประแจทางหลีก โดยใช้การเก็บข้อมูลจากการทำงานของประแจกลไฟฟ้าและข้อมูลของการบิดของรางเนื่องจากระดับที่ต่างกันหมอนคอนกรีตเนื่องจากน้ำหนักรถไฟที่เคลื่อนที่ผ่านประแจทางหลีกที่วางบนหินโรยทาง ข้อมูลความต่างระดับของหมอนคอนกรีตถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อแสดงลักษณะการทำงานที่ผิดปกติด้วยแบบจำลองที่สร้างขึ้นตามระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และเปรียบเทียบกับแรงดึงของประแจกลไฟฟ้า ผลจากการศึกษาพบว่าหากเกิดความต่างระดับของหมอนคอนกรีตเกินกว่า 5 เซนติเมตรจะส่งผลต่อการทำงานของมอเตอร์ประแจกลไฟฟ้าจนไม่สามารถเปลี่ยนท่าของประแจได้

ABSTRACT

This study is a preliminary consideration of the effect from level difference of concrete sleepers to a fault of a point machine which controls the turnout. The study uses the data collected from a point machine and geometrical data from level difference of concrete sleepers resulting from repetition loads from trains running pass the turnout installed on the ballast. The level difference data of concrete sleepers are simulated on a model using finite element method and the results are compared with the tensile force of a point machine. It can be shown that if the level difference are more than 5 cm, a point machine would not be able to change the position of a turnout.

Key words: point machine, fault detection, railway turnout, condition monitoring point machine fault, railway track switches

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

[1]ศูนย์วิศวกรรมระบบราง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร 10900

[1]KURAIL, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Thailand

คำนำ

ในปัจจุบันการขนส่งทางระบบรางได้รับการตอบรับในทางที่ดีเป็นอย่างมากสำหรับการคมนาคมในกรุงเทพมหานคร เนื่องจากปัญหาทางการจราจรทางถนนนั้นมีการใช้รถยนต์เป็นจำนวนมากขึ้นทุกวัน ทำให้การจราจรติดขัด ผู้คนไม่สามารถกำหนดเวลาเดินทางได้ รวมถึงการเกิดอุบัติเหตุต่างๆบนท้องถนนที่ไม่สามารถคาดเดาได้ การเดินรถไฟฟ้าจึงก่อให้เกิดความคล่องตัว และมีความปลอดภัยมากกว่า นอกจากนี้การขนส่งระบบรางยังช่วยลดการใช้พลังงานชีวะมวล น้ำมันเชื้อเพลิง รองรับการขยายตัวของเมืองและประชากรที่อาศัยนอกเขตเมือง ด้วยการขยายเส้นทางรถไฟออกสู่นอกเขตเมืองอีกด้วย ดังนั้นการศึกษาผลกระทบจากการทรุดตัวของหินโรยทางที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานประแจกลจึงถือได้ว่าเป็นการแก้ปัญหาในการเดินรถไฟที่จะทำให้เกิดความล่าช้าในการตั้งค่าเส้นทางการเดินรถไฟ ที่เป็นสาเหตุปัจจัยต้น ที่ส่งผลกระทบต่อการตั้งค่าเส้นทางการเดินรถไฟ

ประแจกลไฟฟ้าที่ทำงานโดยควบคุมการเคลื่อนที่ของปลายลิ้นรางเพื่อตั้งค่าทิศทางให้ประแจทางหลีกไปยังทิศทางที่กำหนดเส้นทางเพื่อให้รถเคลื่อนที่ผ่านไปทิศทางที่กำหนด โดยใช้เวลาการเคลื่อนที่ให้ครบวัฏจักรการทำงานเฉลี่ยประมาณ 15 วินาทีในรอบการทำงานปกติ การเคลื่อนที่ของประแจกลจะมีการเปลี่ยนแปลงไปจากการทรุดตัวของหินอัดโรยทางทำให้หมอนคอนกรีตที่วางบนหินเกิดการเคลื่อนตัวและการทรุดของชั้นดิน ทำให้เกิดการผิดรูปของหมอนคอนกรีต บิดเอียงไม่ได้ระดับ จึงทำให้การทำงานของประแจกลไฟฟ้าไม่สามารถทำงานครบวัฏจักรได้ และการกำหนดเส้นทางของประแจทางหลีกทำให้เกิดการตั้งค่าเส้นทางไม่สมบูรณ์จึงทำให้เกิดความล่าช้าในการเดินรถไฟ จากการศึกษาของ García Márquez, Roberts, and Tobias (2010). ใช้การเก็บข้อมูลสัญญาณต่างๆที่ถูกต้องและมาทดสอบที่อุปกรณ์โต๊ะทดสอบ เพื่อคาดการณ์การทำงานผิดปกติในรูปแบบต่างๆ ก่อนสัญญาณในการตรวจจับสัญญาณต่างๆของการทำงานปกติ Oyebande and Renfrew (2002) การทำงานผิดพลาดของอุปกรณ์ของประแจกลรวมถึงอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของประแจเป็นสาเหตุให้เกิดความล่าช้าในการเดินรถไฟ Lee (18-21 June 2012) ยังเป็นการเพิ่มรายจ่ายทั้งการให้บริการและงานซ่อมบำรุงรักษา การเฝ้าระวังโดยการบริหารการจัดการในการบำรุงรักษาประแจกลจึงมีความสำคัญที่จะเพิ่มประสิทธิภาพในการให้บริการการเดินรถไฟ Jonguk Lee (16 April 2016) ใช้อุปกรณ์การเฝ้าระวังการทำงานของประแจกลโดยสังเกตการณ์ความตรวจจับกระแสไฟฟ้าที่ผิดปกติและแรงที่กระทำผ่านเครื่องมือที่ติดตั้งการเฝ้าระวัง

การศึกษาการทำงานความผิดปกติของประกลไฟฟ้าในครั้งนี้จะจำลองการบิดตัวของหมอนคอนกรีตในระยะส่วนการเคลื่อนที่ของประแจทางหลีกส่วนที่ปลายลิ้นรางเคลื่อนตัวและแรงต้านแรงกดและแรงที่ขับเคลื่อนประแจกลไฟฟ้าในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อพิจารณาผลเบื้องต้นของความแตกต่างของระดับหมอนคอนกรีตที่มีผลกระทบต่อการทำงานของประแจกลไฟฟ้า เพื่อหาระยะการบิดตัวของหมอนคอนกรีตที่เหมาะสมกับการบิดตัวลิ้นรางของหมอนคอนกรีตที่เกิดจากการใช้งานจริงบนตามสภาพภูมิอากาศประแจกลไฟฟ้าที่ติดตั้งบนหินโรยทางของบริษัท รถไฟฟ้า ร.ฟ.ท. จำกัดหรือโครงการรถไฟฟ้าเชื่อมต่อท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ

อุปกรณ์และวิธีการ

การวัดระดับการบิดตัวหมอนคอนกรีต

การวัดระดับการบิดตัวของหมอนคอนกรีตจะได้ระยะการทรุดตัวของหมอนคอนกรีตโดยใช้เหล็กระดับวางพาดบนสันรางนำระดับน้ำดิจิตอลบนเหล็กระดับอีกทีค่าที่ได้จะเป็นองศาและใช้ ฟิลเลอร์เกจ ชิมใต้ระดับให้ระดับกลับเป็นศูนย์องศา ตามระยะของหมอนคอนกรีตที่รองรับประแจทางหลีกและลิ้นประแจที่เคลื่อนที่

การวัดแรงขับเคลื่อนมอเตอร์ประแจกลไฟฟ้าโดยเครื่อง MOBIWAPS

การวัดแรงขับเคลื่อนการทำงานมอเตอร์ประแจกลไฟฟ้าโดยเครื่อง MOBIWAPS เป็นการตรวจสอบยืนยันความถูกต้องของประสิทธิภาพการทำงานของประแจกลไฟฟ้าโดยการทดสอบแรงขับและแรงดึงของแขนกลเพื่อดูประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้า

การสร้างแบบจำลองบนโปรแกรม Solid works

การสร้างแบบจำลองเสมือนจริง แบบสามมิติ บนโปรแกรม Solid works เพื่อจะนำมาจำลองการบิดตัวของรางของหมอนคอนกรีตในช่วงที่ปลายลิ้นรางสามารถเคลื่อนตัว และระยะการบิดตัวในระยะที่สามารถยอมรับได้และที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของประแจกลไฟฟ้า ในรูปแบบการบิดตัวแบบต่างๆ

การจำลองการบิดตัวบนโปรแกรม PATRAN MSC

การนำแบบจำลองเสมือนจริงจากการสร้างแบบบนโปรแกรม Solid works มาทดสอบบนโปรแกรม PATRAN MSC เพื่อทดสอบการบิดตัวของรางลักษณะต่างๆจากการเก็บข้อมูลจากหน้างานเพื่อสังเกตลักษณะการบิดตัวแบบต่างๆและนำข้อมูลคุณสมบัติตามตารางที่ 1 เพื่อนำผลการทดสอบมาวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับงานจริงที่เพื่อพิจารณาผลเบื้องต้นที่ส่งผลกระทบกับการทำงานของประแจกลไฟฟ้าที่ไม่สมบูรณ์

Table 1 UIC60 Material Properties

Material properties	Symbol	Steel	Concrete
Density (kg/m^2)	ρ	7850	2500
Elastic modulus (N/m^2)	E	210 Gpa	30 Gpa
Yield stress (N/m^2)	s	0.4 Gpa	
Poisson ratio	U	0.3	0.2
Friction coefficient	m	0.2	

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากรูปที่ 1 แสดงให้เห็นถึงทฤษฎีที่นำมาใช้ในงานการศึกษาการทดสอบบนแบบจำลองจะแสดงให้เห็นถึงลักษณะการทรุดและบิดตัวของหมอนคอนกรีตที่เกิดการบิดตัวสะสมของหมอนคอนกรีตแบบสะสมและส่งผลต่อการทำงานของประแจกลไฟฟ้าโดยนำค่าที่วัดได้จริงจากหน้างานมาทำการทดลองเพื่อพิจารณาผลเบื้องต้นของความแตกต่างหมอนคอนกรีตต่อการทำงานประแจกลไฟฟ้า หาจุดที่เกิดแรงเสียดทานสะสมและแรงเสียดทานที่สูงนำไปสู่การทำงานที่ผิดปกติ โดยใช้โปรแกรมสร้างแบบจำลอง 3 มิติมีจุดสนในที่พิจารณาจากการเคลื่อนที่ของปลายลิ้นรางที่จะเกิด ดังรูปที่ 2

จากรูปภาพแบบจำลองทั้งหมด แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างระดับของหมอนคอนกรีต จุดที่เกิดแรงเสียดสะสมและแรงเสียดทานสูงในจุดที่เกิดจากระดับความต่างของหมอนคอนกรีตที่สูงต่ำมากกว่า 5 เซนติเมตร บนพื้นหินโรยทางที่ทำให้พื้นใต้ฐานรางของลิ้นรางเกิดแรงเสียดทานสูงที่มีผลรวมรวมมากกว่าแรงขับของมอเตอร์ประแจกลที่ 5000 นิวตัน จึงทำให้แรงขับของมอเตอร์ที่ไม่สามารถดันปลายลิ้นรางแนบอีกด้านได้เพื่อป้องกันความเสียหายของอุปกรณ์ไฟฟ้าจึงตัดกระแสไฟฟ้าในการจ่ายไฟฟ้าที่ขับมอเตอร์เพื่อป้องกันกระแสที่มากเกินการทำงานของมอเตอร์จากการทำงานเกินกำลังประสิทธิภาพของอุปกรณ์ไฟฟ้าในประแจกลไฟฟ้าตามสมการที่ (1) จากสูตรการคำนวณ

$$P = \sum_{i=1}^{n} \mu_i N_i \qquad (1)$$

โดยที่ P = แรงขับมอเตอร์ไฟฟ้าสูงสุด 5000 นิวตัน

μ_i = สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน 0.2 m

N_i = น้ำหนักของวัตถุ

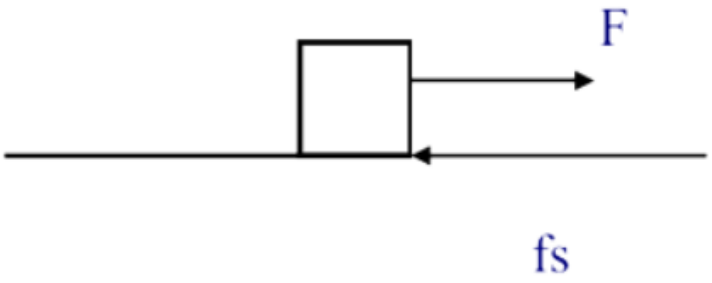


Figure 1 Idealized frictional force direction

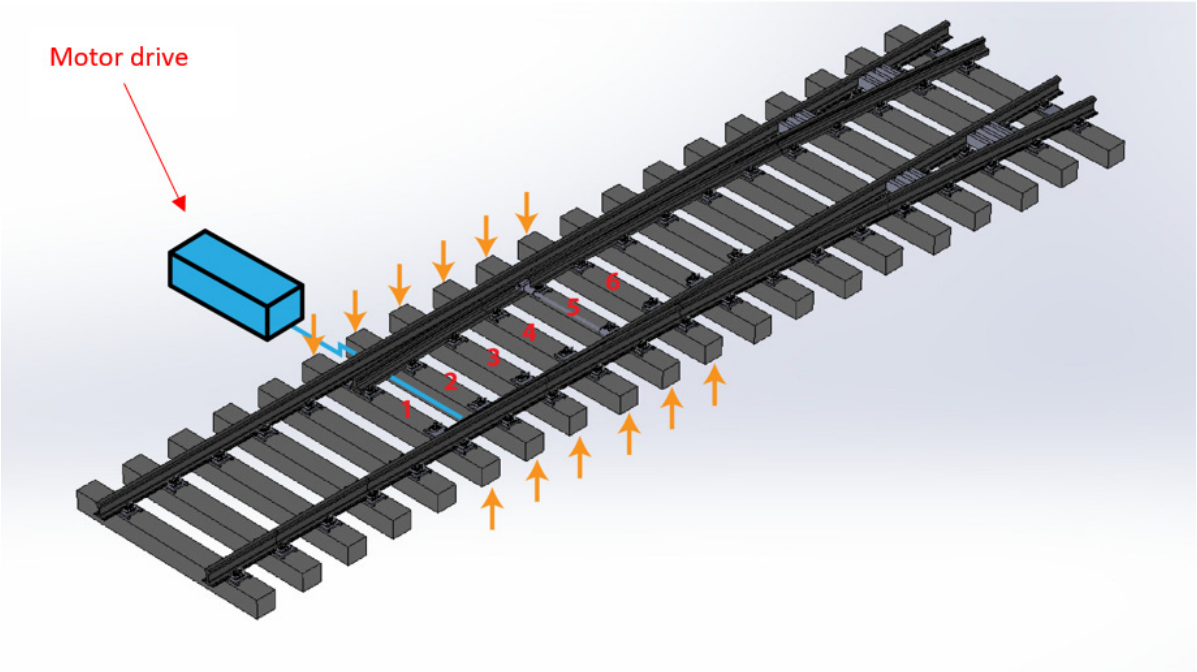


Figure 2 Twisted sleepers and point machine connected to motor drive

Table 2 Resulting frictional forces

จุดที่วัด	ค่าที่วัดได้ (N)	จุดที่วัด	ค่าที่วัดได้ (N)
1	776	1	215
2	739	2	1120
3	1120	3	1710
4	177	4	1190
5	1720	5	12800
6	12800	6	856
ผลรวมที่วัดได้	17332	ผลรวมที่วัดได้	17891

ภาพแสดงโครงสร้างของแบบประแจกลขนาด 1:6 ขนาดงานจริงมาใช้ทดสอบใน Finite element Patran Nastran เพื่อทดสอบการจำลองแบบการบิดตัวของหมอนคอนกรีต ดังรูปที่ 3 รูปที่ 4และรูปที่ 5 ผลของการจำลองการบิดตัวและนำผลที่เกิดจากการทรุดตัวของหมอนคนอกรีตทำให้รางบิดตัวและเกิดแรงเสียดทานสะสมของแต่ละหมอนคอนกรีตผลรวมรวมที่เกิดขึ้นดังตารางที่ 2 ทำให้มีแรงเสียดทานมากกว่าแรงขับเคลื่อนของประแจกลไฟฟ้าและผลของการทดสอบประสิทธิภาพแรงขับเคลื่อนของประแจกลไฟฟ้า ดังรูปที่ 6

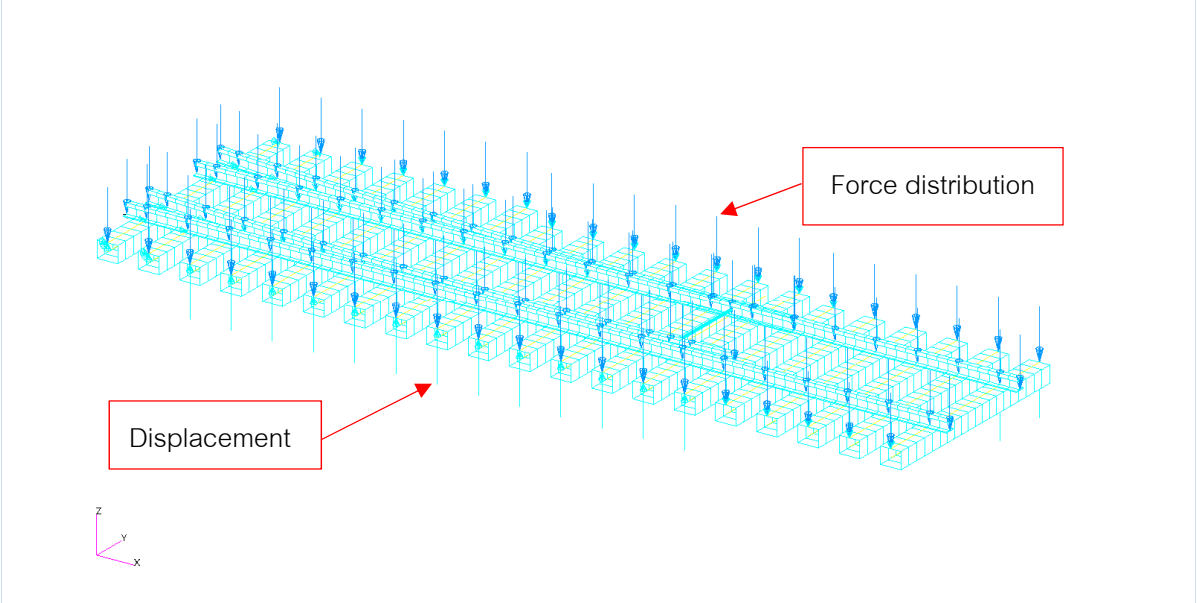


Figure 3 Finite element model showing displacement and load distribution on a twisted turnout

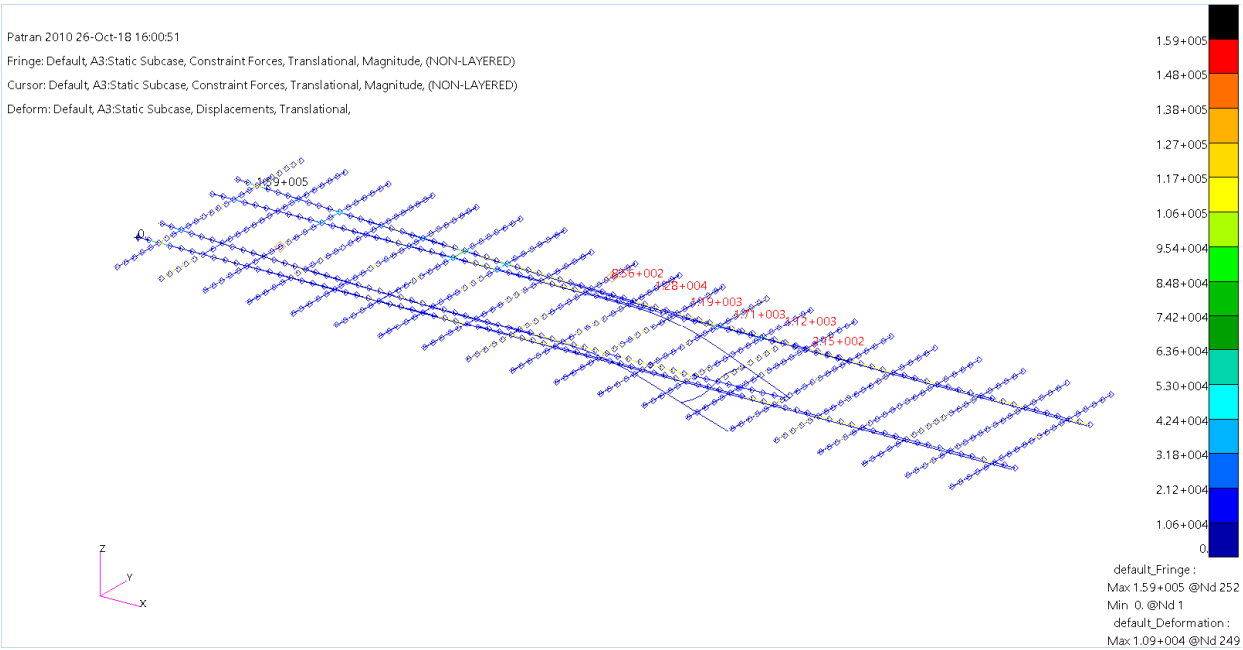


Figure 4 Stress values of the model

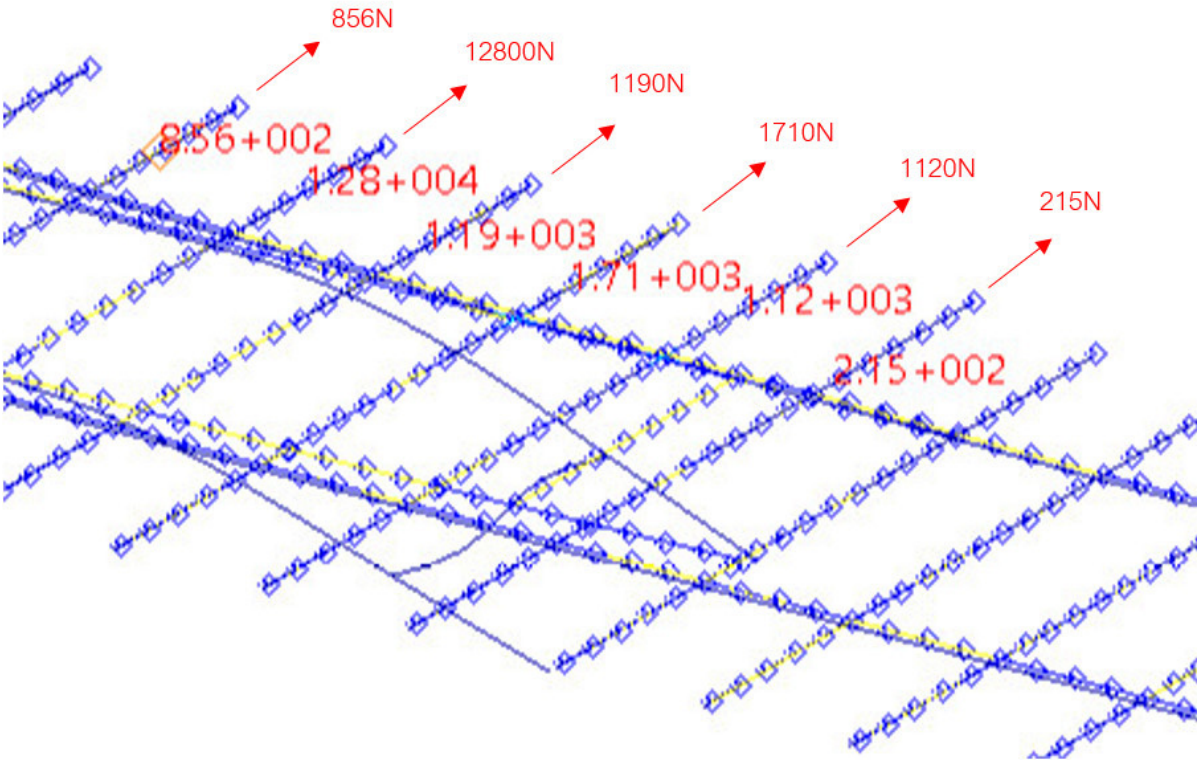


Figure 5 Friction force values of the model

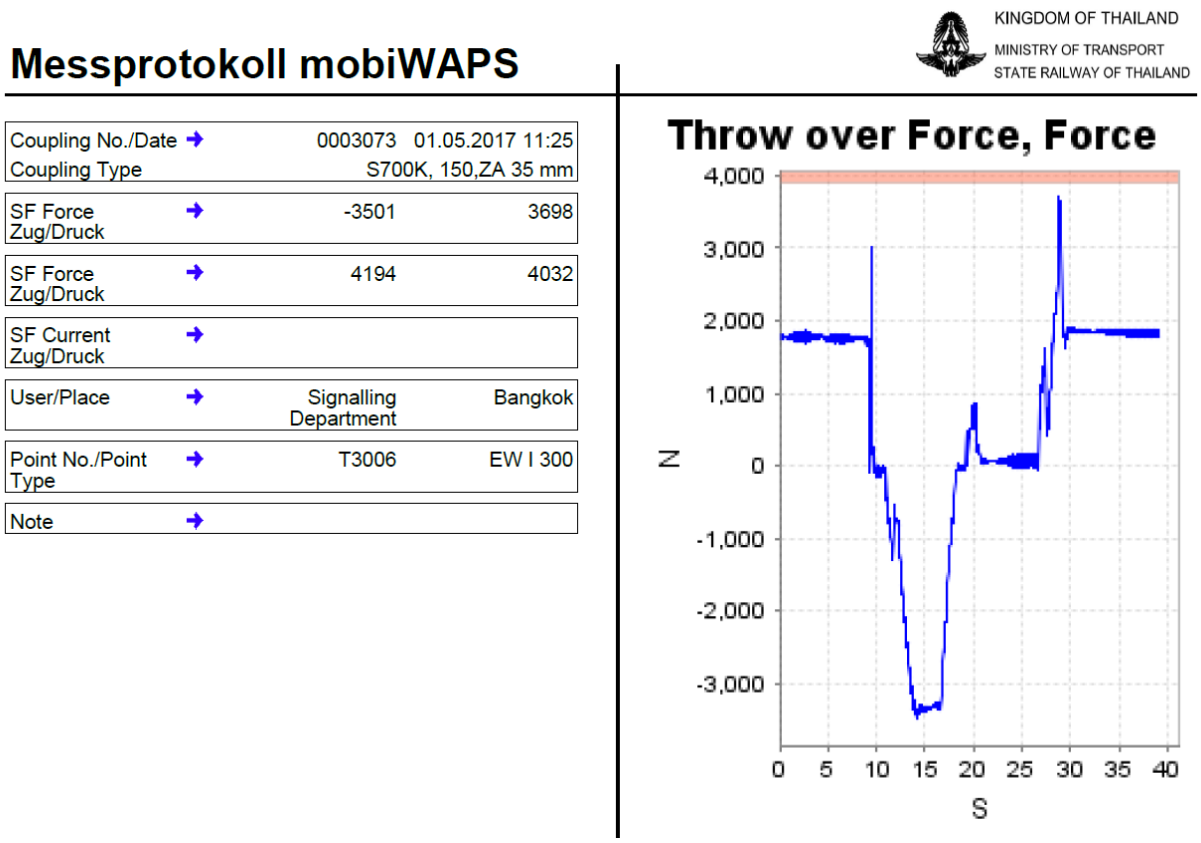


Figure 6 Test report of a motor drive force

สรุป

ผลการศึกษาพิจารณาผลเบื้องต้นบนแบบจำลองในโปรแกรม ไฟไนต์เอลิเมนต์ แสดงให้เห็นถึงจุดที่เกิดแรงเสียดทานสูงเพราะเกิดจากระดับที่แตกต่างของหมอนคอนกรีตที่มีความต่างของระดับมากจึงทำให้เกิดแรงเสียดทางของพื้นปลายลิ้นรางมากจน มอเตอร์ขับเคลื่อนไม่สามารถดันปลายลิ้นรางไปแนบอีกด้านได้ จากผลนี้จะทำให้ทราบถึงระยะเวลาที่เหมาะสมในการปรับระดับโดยการอัดหินโรยทางให้แน่นและปรับระดับหมอนคอนกรีตให้อยู่ในระนาบที่เหมาะสมที่จะทำให้ประแจกลไฟฟ้าทำงานได้โดยไม่เกิดปัญหาติดขัด และปรับตารางการบำรุงรักษาทางหลีกได้อย่างมีประสิทธิภาพ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ 1. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล 2.การรถไฟแห่งประเทศไทย 3. บริษัท รถไฟฟ้า ร.ฟ.ท.จำกัด

เอกสารอ้างอิง

Ardakani, H. D., Lucas, C., Siegel, D., Chang, S., Dersin, P., Bonnet, B., & Lee, J. (2012, 18-21 June 2012). *PHM for railway system — A case study on the health assessment of the point machines.* Paper presented at the 2012 IEEE Conference on Prognostics and Health Management.

García Márquez, F. P., Roberts, C., & Tobias, A. M. (2010). Railway point mechanisms: Condition monitoring and fault detection. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit,* 224(1), 35-44. doi:10.1243/09544097jrrt289.

Lee, J., Choi, H., Park, D., Chung, Y., Kim, H.-Y., & Yoon, S. (2016). Fault Detection and Diagnosis of Railway Point Machines by Sound Analysis. *Sensors (Basel, Switzerland), 16*(4), 549. doi:10.3390/s16040549.

Oyebande, B. O., & Renfrew, A. C. (2002). Condition monitoring of railway electric point machines. *IEE Proceedings - Electric Power Applications,* 149(6), 465-473. doi:10.1049/ip-epa:20020499.

อุปกรณ์สอบเทียบความชื้นในดินมาตรฐาน

Standard Soil Moisture Calibration Chamber

ปริยานุช ยวงใย[1] และ ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์[1*]

Priyanuch Yuangyai[1] and Taweedej Sirithanapipat[1*]

บทคัดย่อ

การพัฒนาอุปกรณ์วัดและสอบเทียบความชื้นในดินมุ่งเน้นเพื่อการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ที่สามารถวัดความชื้นในดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ สะดวก และรวดเร็ว ด้วยวิธีการวัดแบบGravimetric Water Content (GWC) โดยการอบร้อนดิน(Oven Drying) ที่น้ำหนักแตกต่างกัน 3 รูปแบบ ซึ่งกำหนดความชื้นในดินอ้างอิง GWC = 10% อุปกรณ์สอบเทียบความชื้นในดินประกอบด้วย Heater chamber ขนาด 30x30x30 ลูกบาศก์เซนติเมตร กำลังไฟฟ้า 300 วัตต์ ,ระบบควบคุมอุณหภูมิ, เครื่องชั่งน้ำหนักของดิน(Weight Scale) และระบบควบคุมการบันทึกข้อมูลที่เชื่อมต่อกับระบบอินเตอร์เน็ตเพื่อส่งข้อมูลผ่าน Cloud Sever (Thingspeak) แบบ Real-time ทำการทดสอบโดยการอบร้อนดินตัวอย่างที่อุณหภูมิ 90 - 95°C จากการทดสอบทำให้ทราบอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นในดิน, เวลาที่สุดเร็วในการอบดินตัวอย่าง และค่าความชื้นในดินมาตรฐานสำหรับสอบเทียบเครื่องมือวัดความชื้นในดิน

ABSTRACT

Developments of soil moisture calibration device focus on design and build the equipment that can measure soil moisture effectively, quickly and simply. Use to the oven drying method and gravimetric water content (GWC) measurement. In the testing there are difference soil weight 3 types whereof determine the reference soil moisture as GWC 10%. The soil moisture calibration chamber design include the heater chamber size 30x30x30 cm^3 with electrical power 300 watts, temperature control system, soil weight scales and data logging control system that connected to the Internet which record and send data through Cloud Server (Thingspeak) as real-time. By bake the sample soil at temperature 90 - 95°C. The test made it known the soil moisture change rate, the fastest time to baked soil and the standard of soil moisture for calibrate the soil moisture meter.

Key Words: Soil Moisture, Calibration, Measurement.

*Corresponding author; e-mail address: **taweedej.s@ku.th**

[1]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

คำนำ

ดินเป็นปัจจัยสำคัญที่จำเป็นต้องมีสำหรับทางด้านการเกษตรกรรม เพราะพืชส่วนใหญ่ทำการเพาะปลูกบนดินแทบทั้งสิ้น ถ้าไม่นับพืชที่เจริญเติบโตในน้ำ ซึ่งหน้าที่และความสำคัญของดินต่อการเจริญเติบโตของพืช คือ ทำหน้าที่เป็นวัสดุค้ำยันหรือที่ยึดเหนี่ยวของรากพืช, เป็นแหล่งความชื้น น้ำ อากาศและแร่ธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช (สำนักอุทกวิทยาและบริหารน้ำ 2554)

ความชื้นในดินถือว่ามีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งสำหรับสิ่งมีชีวิต ได้แก่ พืช หรือจุลินทรีย์ในดิน เนื่องจากน้ำเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของพืช เพื่อใช้ในขบวนการเมทาบอลิซึม (Metabolism) ต่าง ๆ เช่น ขบวนการสังเคราะห์แสงของพืชและจุลินทรีย์ในดินบางชนิด ซึ่งธาตุอาหารเหล่านั้นจะต้องอยู่ในรูปของสารละลาย น้ำจึงเป็นตัวทำละลายที่ดี ในการลำเลียงธาตุอาหารจากดินเข้าสู่ภายในลำต้นของพืช (อภินันท์ 2550) การทราบปริมาณความชื้นในดิน มีประโยชน์ต่อการกำหนดตารางและแสดงปริมาณการให้น้ำชลประทานสำหรับการเพาะปลูกพืชของเกษตรกร ทำให้พืชได้รับน้ำในปริมาณที่เหมาะสม ช่วยลดต้นทุนในการผลิต และเพิ่มผลผลิตได้ (มิตรผลกรุ๊ป 2560) วิธีการวัดความชื้นในดิน สามารถวัดได้ 2 วิธี คือ 1.การวัดโดยตรง (Direct Methods) เป็นการวัดความชื้นในดินด้วยการเก็บตัวอย่างดินมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ ซึ่งจะต้องมีการเก็บตัวอย่างดินใส่ในภาชนะและนำดินตัวอย่างมาชั่งน้ำหนักและไปอบในตู้อบที่ อุณหภูมิ 60 – 105°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำดินมาชั่งน้ำหนักอีกครั้งหนึ่งและทำการคำนวณเป็นค่าความชื้นในดิน เรียกวิธีนี้ว่า (Oven Drying Method) ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและมีความแม่นยำ สามารถคำนวณหาค่าความชื้นดินได้ 2 แบบ คือ 1.Gravimetric Water Content GWC (w) คิดเป็นสัดส่วนโดยมวล (% by weight) 2.Volumetric Water Content VWC (θ) คิดเป็นสัดส่วนโดยปริมาตร (% by volume) 2.การวัดโดยอ้อม (Indirect Methods) เป็นการวัดโดยใช้เครื่องมือวัดที่อาศัยหลักการทางวิทยาศาสตร์มาประยุกต์ใช้ และมีหน่วยวัดที่แตกต่างกัน สามารถวัดค่าความชื้นในดินและบันทึกผลได้ทันที แต่มีราคาสูง อาทิ เช่น เทนซิโอมิเตอร์ (Tensiometers), แท่งวัดความชื้นในดิน (Moisture Blocks) และเครื่องมือวัดความชื้นในดินด้วยนิวตรอน (Neutron Moisture Meter) เครื่องมือวัดดังกล่าวนิยมใช้อย่างมากในปันจุบันและเหมาะสำหรับการใช้งานในพื้นที่ภาคสนามทั่วไป(บุญแสน 2548) การวัดค่าความชื้นในดินที่กล่าวมาข้างต้น ได้มีผู้ให้ความสนใจและพัฒนาเครื่องมือวัดความชื้นในดินมากขึ้น เช่น การเลือกใช้เตาไมโครเวฟแทนเตาอบ (เจษฎาและมนัสชนก 2553) ซึ่งช่วยประหยัดเวลาในการหาปริมาณความชื้น และการเครื่องมือวัดความชื้นในดินแบบวัดความต้านทานไฟฟ้า (ศักดิ์ชัย 2552) เป็นต้น การสอบเทียบมาตรฐานจึงมีความจำเป็นอย่างมาก เพื่อทดสอบประสิทธิภาพและความแม่นยำของเครื่องมือวัดความชื้นในดิน จึงได้มีการสร้างอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิและวัดสภาพความชื้นในดินขึ้น โดยวิธีการอบดิน เป็นการจำลองสภาพแวดล้อม (กฤตภาสและภัทรพล2560) จากการศึกษาค้นคว้าข้อมูลถือเป็นแนวทางที่น่าสนใจในการพัฒนาอุปกรณ์ที่สามารถวัดความชื้นในดินและสอบเทียบอุปกรณ์เครื่องมือวัดความชื้นในดินได้

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการออกแบบและสร้าง Standard Soil Moisture Calibration Chamber เพื่อวัดความชื้นในดินและศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความชื้นในดิน ด้วยวิธีการการอบแห้งดิน (Oven Drying Method) จากดิน 3รูปแบบ พร้อมทั้งระบบควบคุมต่าง ๆ ที่สามารถแสดงค่าและบันทึกผลการทดสอบออนไลน์ เพื่อวิเคราะห์ผลการเปลี่ยนแปลงของความชื้นในดิน, เปรียบเทียบกับเวลาที่ใช้การทดสอบ และกำหนดค่าความชื้นในดินมาตรฐาน เพื่อใช้ในการสอบเทียบเครื่องมือวัดความชื้นในดิน และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับความชื้นในดินในอนาคตต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

อุปกรณ์สอบเทียบความชื้นในดิน (Standard Calibration Chamber)

Soil Example

ขั้นตอนการเตรียมดิน สำหรับดินตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ เป็นดินร่วน (Medium Loam) มีความละเอียดปานกลาง ในการทดสอบจะใช้ดินตัวอย่าง 3 รูปแบบ ด้วยอัตราส่วนการผสมของดินและน้ำอยู่ที่ 10 : 1, 7 : 0.7 และ 5 : 0.5 กิโลกรัม หรือ ความชื้นในดินอ้างอิงGravimetric Water Content (GWC) = 10 %

Heater Chamber

เป็นวัสดุประเภท Cement ทรงสี่เหลี่ยม ขนาด 30x30x30 ลูกบาศก์เซนติเมตร ความหนา 2.5 เซนติเมตร ภายในประกอบด้วยแหล่งกำเนิดความร้อน ที่ถูกติดตั้งไว้โดยรอบทำจาก แผ่นโลหะ 2 ชนิด คือ แผ่นอะลูมิเนียมแบบมีรู และแผ่นโลหะแบบเรียบ นำแผ่นโลหะทั้งสองแผ่นประกบเข้าหากันโดยตรงกลางระหว่างแผ่นโลหะทั้งสองได้ใช้ (Carbon Fiber Heating Wire) ความยาว = 10 เมตร จำนวน 2 ชุด ขดลงบนแผ่นโลหะเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งให้กำลังไฟฟ้า 300 วัตต์ และใช้เซนเซอร์ (Ds18b20) วัดอุณหภูมิ 2 ตำแหน่ง คือ อุณหภูมิของ Heater chamber (T1) และ อุณหภูมิดิน (T2) เชื่อมต่อกับระบบควบคุมการเปิด/ปิดอัตโนมัติ (Figure 1 and 2)

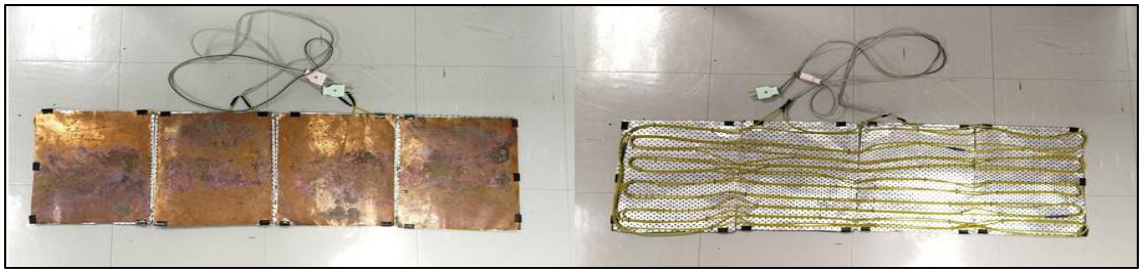


Figure 1 Fiber Heater

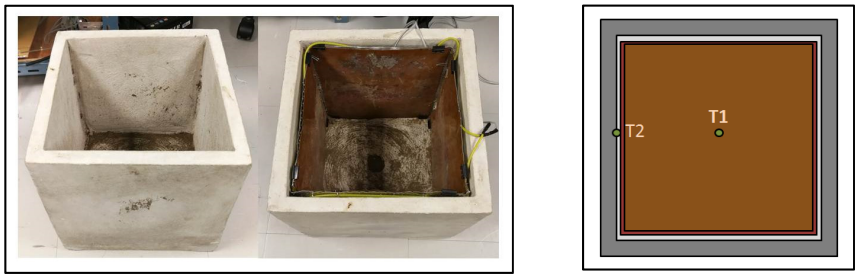
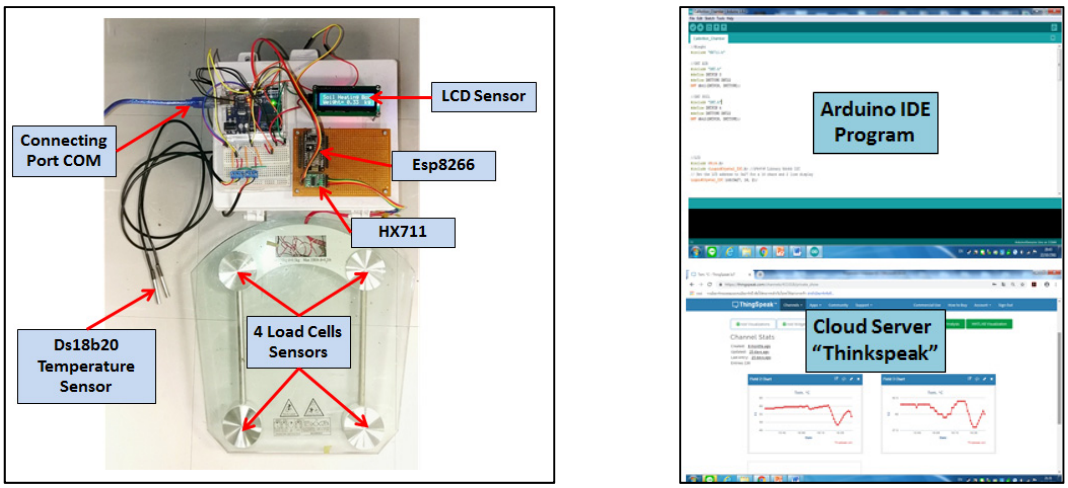


Figure 2 Heater Chamber and Temperature Control

Weight Scale and System Control

เครื่องชั่งน้ำหนักของดิน ประกอบด้วย เซนเซอร์ Load Cells 4 เซนเซอร์, เซนเซอร์ HX711(วัดค่าน้ำหนักดิน) และเซนเซอร์ LCD (แสดงผล) เชื่อมต่อกับ ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Esp8266 Wi-Fi NodeMCU) โดยทำการเขียนโปรแกรมการทำงานของเซนเซอร์ต่าง ๆ และอัพโหลดโปรแกรมลงบนไมโครคอนโทรลเลอร์ด้วยโปรแกรม Arduino IDE เพื่อบันทึกผลการทดลอง จากนั้นจึงจะสามารถทำการเชื่อมต่อระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับ

ระบบอินเตอร์เน็ตและส่งข้อมูลไปแสดงผลบนเซิร์ฟเวอร์ออนไลน์ที่เราได้ทำการสมัครและลงทะเบียนไว้ (Figure 3a and 3b)



(a) (b)

Figure 3 (a) System control (b) Arduino IDE Program and Cloud Server (Thingspeak)

การทดสอบอุปกรณ์สอบเทียบความชื้นในดิน (Standard Calibration Chamber)

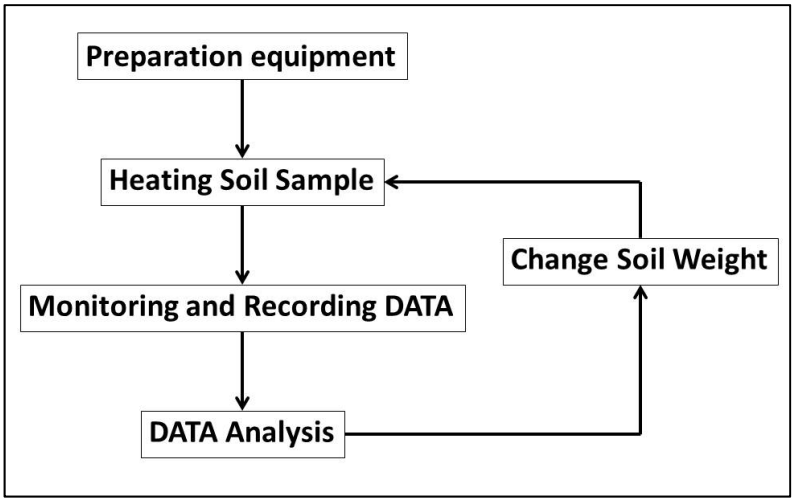


Figure 4 Testing chart

ขั้นตอนในการทดสอบ เริ่มต้นจากการเตรียมดินตัวอย่างในอัตราส่วนของดินและน้ำที่กำหนดความชื้นในดินอ้าง (GWC) = 10% อบใน Heater Chamber ที่อุณหภูมิ 90 - 95°C และบันทึกผล จากนั้นทำการเปลี่ยนดินตัวอย่าง ทำการทดสอบซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง และวิเคราะห์อัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นในดินของดินตัวอย่างทั้ง 3 รูปแบบ และระยะเวลาที่ใช้การอบดิน (Figure 4)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

อัตราการเปลี่ยนแปลงของความชื้นดิน

ในการทดสอบอุปกรณ์สอบเทียบความชื้นในดิน (Standard Soil Moisture Calibration Chamber)ได้ทำการวัดน้ำหนักของดินตัวอย่างและอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ จากนั้นและนำค่าที่วัดได้ไปคำนวณหาค่าความชื้นในดิน (GWC%) จากสมการ(1)

$$\text{GWC\%} = \frac{\text{Wet Soil Weight} - \text{Dry Soil Weight}}{\text{Dry Soil Weight}} \text{ x } 100 \quad (1)$$

ทำให้ทราบค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นในดินของดินทั้ง 3 รูปแบบ(อัตราส่วนดินและน้ำ = 10:1, 7:0.7 และ 5:0.5 กิโลกรัม) ใช้ระยะเวลาในการทดสอบ10 – 12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 90 - 95°C ในการทดสอบจะเห็นได้ว่าดินตัวอย่างที่น้ำหนักน้อยกว่า มีอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นในดินและอุณหภูมิที่ไวกว่า ซึ่งในการทดสอบมีค่าความเคลื่อนในการวัด ± 0.3 % สำหรับการวัดน้ำหนักของดิน และค่าความเคลื่อนในการวัด ± 0.5°C สำหรับการวัดอุณหภูมิ ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่มีความแม่นยำและยอมรับได้ (Figure 5 and 6)

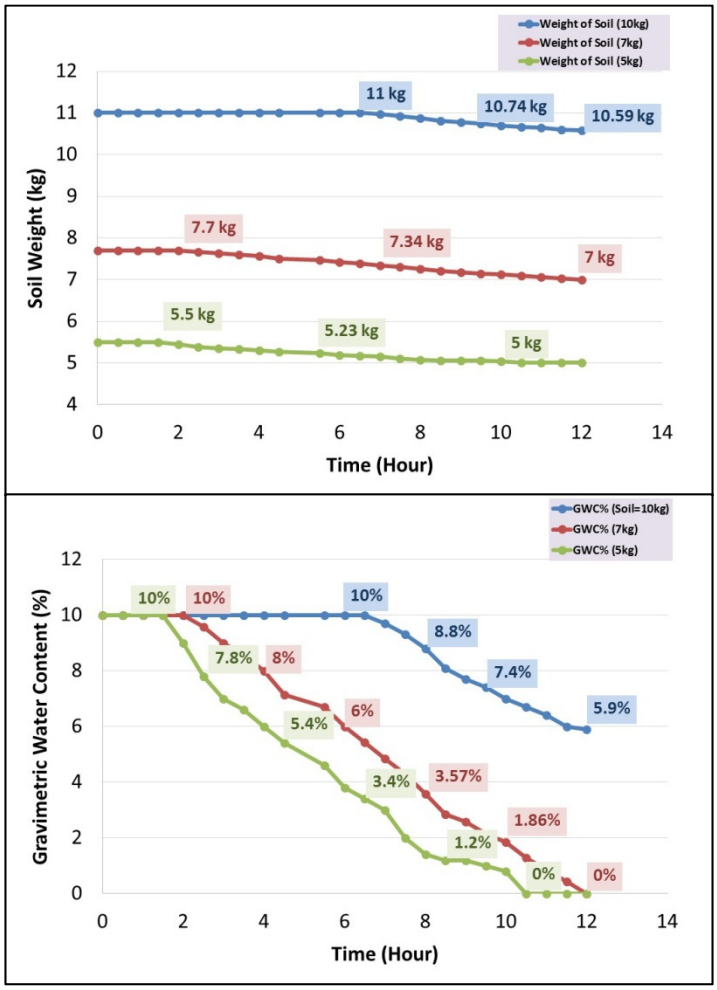


Figure 5 The results of Testing (Soil Weight and GWC %)

Soil Weight (kg)	Water (l)	GWC% Avg. / Time (hr.)	Time (hr.)
5	0.5	1.11%	10
7	0.7	1%	11.5-12
10	1	0.63%	19-20

Figure 6 Soil Moisture Change Rate and Times in Testing

การบันทึกข้อมูลบนคลาวด์เซิร์ฟเวอร์(Cloud Server) ด้วย Thingspeak

การประยุกต์เทคโนโลยี IoTs (Internet of Things) ในงานวิจัยนี้ช่วยส่งผลให้การวิเคราะห์ข้อมูลสะดวกและรวดเร็วมากยิ่งขึ้น สามารถอัพเดทผลการทดสอบได้ตลอดเวลา และยังเปิดกว้างให้กับผู้ที่สนใจงานวิจัย สามารถศึกษาข้อมูลและผลการทดลองเบื้องต้นได้ ผ่านระบบอินเตอร์เนต (Internet) (Figure 7)

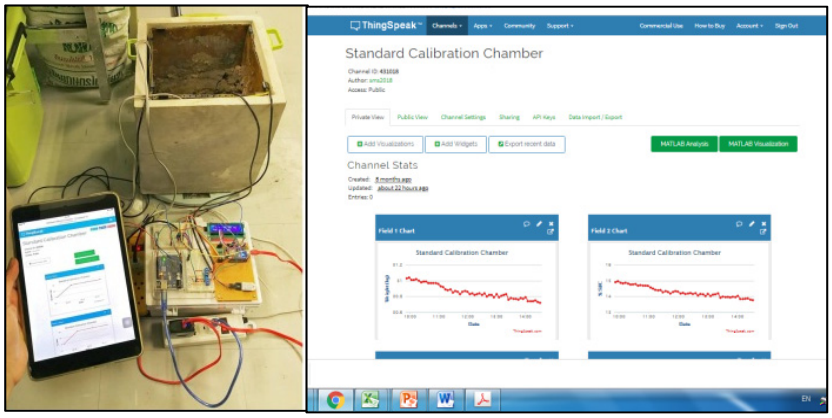


Figure 7 IoTs (Internet of Things) with Cloud Sever (Thingspeak)

สรุป

จากผลการทดสอบวัดความชื้นในดินด้วยอุปกรณ์สอบเทียบความชื้นในดิน (Standard Soil Moisture Calibration Chamber) ทำให้ทราบอัตราการเปลี่ยนของความชื้นในดินที่เปลี่ยนไป จากน้ำหนักของดินและอุณหภูมิที่ใช้ในการอบดิน เมื่อเทียบกับค่าความชื้นในดินอ้างอิงที่ใช้ในการทดสอบ โดยจากการวิเคราะห์ผลการทดสอบควรเลือกใช้อัตราส่วนของดินและน้ำที่ 5:0.5 กิโลกรัม ในการวัดและสอบเทียบความชื้นในดิน เนื่องจากอัตราส่วนดังกล่าวใช้เวลาในการทดสอบน้อยที่สุด จึงช่วยลดระยะเวลาในวัดและสอบเทียบความชื้นในดิน คิดเป็น 40-50% ของการทดสอบความชื้นในดินด้วยกระบวนการทางธรรมชาติหรือวิธีการวัดโดยตรงที่ผ่านมา และผลการทดสอบทำให้สามารถกำหนดค่าความชื้นในดินมาตรฐานเพื่อใช้ในการสอบเทียบเครื่องมือวัดความชื้นในดินอื่น ๆ นอกจากนี้การออกแบบและสร้างระบบ ควบคุมในการบันทึกผลแบบออนไลน์ ช่วยให้การนำผลการทดสอบมาวิเคราะห์ผลต่าง ๆ ได้รับความสะดวกและรวดเร็วมากยิ่งขึ้น สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนางานวิจัยเกี่ยวกับความชื้นในดินต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บุคลากรภายใน Automation Control and Dynamic Laboratory คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ทุกท่าน สำหรับการให้คำแนะนำและความรู้ต่าง ๆ ตลอดจนเอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ในการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

กฤตภาสและ ภัทรพล. 2560. **การควบคุมอุณหภูมิเพื่อการทดลองอุปกรณ์วัดสภาพความชื้นดิน**. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล. คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

เจษฎาและมนัสชนก. 2553. **การหาค่าความชื้นในดินโดยใช้ตู้อบไมโครเวฟ**. ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน.

บุญแสน เตียวนุกูลธรรม. 2548. **ความชื้นในดิน**. แหล่งที่มา : http://elearning.nsru.ac.th/web_ eLearning /soil /lesson_4_4.php.

มิตรผลกรุ๊ป. 2560. , มิตรผลโมเดิร์นฟาร์ม. **มารู้จักเทนซิโอมิเตอร์ ผู้ช่วยเตือนเมื่ออ้อยขาดน้ำ**. แหล่งที่มา : http://www.mitrpholmodernfarm.com/news/2017/11/มารู้จักเทนซิโอมิเตอร์.

ศักดิ์ชัย. 2552. **การพัฒนาเครื่องมือวัดความชื้นในดินแบบวัดความต้านทานไฟฟ้าเพื่อการเกษตร**. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ หน้า 4-20.

สำนักอุทกวิทยาและบริหารน้ำ. กรมชลประทาน. 2554. **คู่มือการหาปริมาณการใช้น้ำของพืช ปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิงและค่าสัมประสิทธิ์พืช**.

อภินันท์ กำนัลรัตน์ และคณะ. 2550. **ดินและพืช**. ภาควิชาพืชศาสตร์ คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. แหล่งที่มา : http://natres.psu.ac.th/Department/PlantScience/510-111web/book/book%20content.htm/chapter04/Agri_04.htm.

การศึกษาและพัฒนาระบบหยอดปุ๋ยอัตโนมัติตามค่าวิเคราะห์ดินในไร่อ้อย

A Study and Development of an Automatic Fertilizer Applicator for Sugar Cane Based on Soil Analysis Result

อานนท์ สายคำฟู[1*] และ ชัยยากร จันทร์สุวรรณ์[1]

Arnon Saicomfu[1*] and Chaiyakorn Jansuwan[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและพัฒนาระบบหยอดปุ๋ยอัตโนมัติโดยกำหนดอัตราการหยอดปุ๋ยอ้อยตามค่าวิเคราะห์ดินเพื่อใช้กับเครื่องหยอดปุ๋ยในไร่อ้อย โดยใช้การควบคุมความเร็วรอบของเพลาหยอดปุ๋ยในการกำหนดอัตราการหยอด ซึ่งใช้มอเตอร์กระแสตรง 24 โวลต์ ขนาด 350 วัตต์ พร้อมชุดเกียร์ทดที่มีความเร็วรอบสูงสุด 400 รอบต่อนาที การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino mega 2560 สั่งสัญญาณแบบ PWM (Pulse Width Modulation) สั่งค่าตั้งแต่ 40 ถึง 255 ผ่านชุดขับมอเตอร์ (DC motor drive) เพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์ โดยอาศัยหลักการปรับค่า Duty Cycle ของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์มากำหนดอัตราการหยอดของแม่ปุ๋ยแต่ละสูตร จากผลการศึกษา ปุ๋ยยูเรีย (46-0-0) สามารถหยอดได้อัตราตั้งแต่ 10 ถึง 50 กิโลกรัม/ไร่ ปุ๋ยฟอสฟอรัส (18-46-0) สามารถหยอดได้อัตราตั้งแต่ 12 ถึง 65 กิโลกรัม/ไร่ และปุ๋ยโพแทสเซียม (0-0-60) สามารถหยอดได้อัตราตั้งแต่ 10 ถึง 75 กิโลกรัม/ไร่ ซึ่งจากการทดลองพบว่าเป็นอัตราการหยอดที่เพียงพอสำหรับการใส่ปุ๋ยอ้อยตามค่าวิเคราะห์ดิน

ABSTRACT

The objective of this research was to study and develop a Sugar Cane Fertilizer Applicator with application rate automatically based on soil analysis. A screw conveyor used to vary the application rate was connected with DC gear motor (24 Volt, 350 watt, and 400 rpm) and controlled by a micro controller (Arduino mega 2560) by means of Pulse Width Modulation (PWM) of values from 40 to 255. The results showed that DC motor can feed Urea (46-0-0) at rate 10 to 50 kg/rai, Ammonium Phosphate (18-46-0) at rate 12 to 65 kg/rai, and Potassium Chloride (0-0-60) at rate 10 to 75 kg/rai. The result of these analyses showed that the feeder variable rates of fertilizer were suitable for sugar cane fertilizer rating followed by soils analysts.

Key words: sugar cane, fertilizer applicator, DC motor

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

[1]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

คำนำ

อ้อยเป็นพืชอุตสาหกรรมชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศไทย สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย [สอน.] (2560) รายงานผลการสำรวจประจำปี 2559/2560 โดยใช้ดาวเทียมประกอบการเก็บรายละเอียดภาคพื้นดินว่า มีการปลูกอ้อยใน 47 จังหวัด คิดเป็นพื้นที่ 10.99 ล้านไร่ มีผลผลิตอ้อยสูงถึง 92.95 ล้านตัน ผลิตเป็นน้ำตาลได้ประมาณ 10.02 ล้านตัน ซึ่งในจำนวนนี้ถูกส่งออกไปจำหน่ายยังต่างประเทศกว่า 8 ล้านตัน สร้างมูลค่ารวมได้ประมาณ 180,000 ล้านบาทต่อปี โดยประเทศไทยเป็นผู้ส่งออกน้ำตาลใหญ่เป็นอันดับ 3 ของโลก มีสัดส่วนการตลาด 9.5 เปอร์เซ็นต์

กิจกรรมการผลิตอ้อยเริ่มตั้งแต่ การเตรียมดิน การปลูก ดูแลรักษาให้น้ำให้ปุ๋ย และการเก็บเกี่ยวหรือการตัดอ้อย หลังจากนั้นจึงนำผลผลิตเข้าสู่กระบวนการผลิตน้ำตาลทราย ปัจจุบันวิทยาการจัดการปัจจัยการผลิตพืชมีความก้าวหน้าอย่างมาก เช่น การวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารหลักในดินที่ทำให้ทราบสภาวะธาตุอาหารของพืชและข้อจำกัดต่อการเจริญเติบโตของพืช โดยการยึดสมมติฐานที่ว่าผลการหาปริมาณธาตุอาหารหลักที่ได้จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการใช้ประโยชน์ของพืช ซึ่งการใช้ปุ๋ยเคมีกับพืชโดยทั่วไปนั้นยังมีประสิทธิภาพเพียง 20-50 เปอร์เซ็นต์ เท่านั้น (มงคลและพัชรี, 2543) ส่วนที่เหลือจะตกค้างอยู่ในดินและสูญหายไป ทำให้เกษตรกรมีต้นทุนการผลิตสูงขึ้น ดังนั้นการใช้ปุ๋ยเคมีตามค่าวิเคราะห์ดินจึงเป็นแนวทางหนึ่งที่จะสามารถเพิ่มผลผลิตได้และยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด โดยกรมวิชาการเกษตร (2553) ได้แนะนำอัตราการหยอดปุ๋ยอ้อยดังแสดงใน Table 1 โดยการใส่แม่ปุ๋ยทั้ง 3 สูตร คือ ยูเรีย (46-0-0) แอมโมเนียมฟอสเฟส (18-46-0) และโพแทสเซียมคลอไรด์ (0-0-60) อัตราที่ต้องการต่ำสุดเท่ากับ 21, 13 และ 10 กิโลกรัมต่อไร่ ตามลำดับ ส่วนอัตราที่ต้องการสูงสุดเท่ากับ 42, 26 และ 40 กิโลกรัมต่อไร่ ตามลำดับ ซึ่งการใส่ปุ๋ยทั้ง 3 สูตร สำหรับอ้อยปลูกหลังอ้อยงอก 30 วัน และสำหรับอ้อยตอหลังจากวันที่แต่งตอตามอัตราที่แนะนำ ยกเว้นปุ๋ยยูเรียที่ใส่เพียงครึ่งหนึ่งแล้วใส่ส่วนที่เหลือหลังจากครั้งแรก 60 วัน

Table 1 Recommendations of Fertilizer rate for sugar cane based on soil analysis

Soil analysis	Plant Crop		Ratoon Cane	
	The rate of fertilizer used (kg/rai)	The rate of Chemical fertilizer used (kg/rai)	The rate of fertilizer used (kg/rai)	The rate of Chemical fertilizer used (kg/rai)
Organic matter (OM)%	Nitrogen (N)	Urea (46-0-0)	Nitrogen (N)	Urea (46-0-0)
<1.0	18	34	24	42
1.0-2.0	12	21	18	31
>2.0	12	21	18	31
Phosphorus (P, mg/kg)	Phosphorus (P)	Ammonium Phosphate (18-46-0)	Phosphorus (P)	Ammonium Phosphate (18-46-0)
<15	6	13	12	26
15-30	6	13	9	20
>30	6	13	9	20
Potassium (K, mg/kg)	Potassium (K)	Potassium Chloride (0-0-60)	Potassium (K)	Potassium Chloride (0-0-60)
< 60	12	20	24	40
60-90	12	20	18	30
> 90	6	10	18	30

อย่างไรก็ตามการใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินนี้ ไม่สามารถกระทำได้โดยง่ายโดยเกษตรกรเอง ดังนั้นการใช้เครื่องหยอดปุ๋ยที่มีการควบคุมอัตราการหยอดตามความต้องการของพืชแบบอัตโนมัติ จะช่วยให้เกษตรกรสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ปุ๋ยเคมีเพื่อเป็นประโยชน์ต่อการเจริญเติบโตของพืชทำให้ได้ผลผลิตเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังตอบสนองนโยบายพัฒนาเศรษฐกิจของรัฐบาลยุค Thailand 4.0 ซึ่งในการศึกษานี้ได้ใช้มอเตอร์กระแสตรงเพื่อมากำหนดอัตราการหยอดปุ๋ยอ้อยโดยใช้สำหรับเครื่องหยอดปุ๋ยในไร่อ้อย โดยใช้การควบคุมความเร็วรอบของเพลาหยอดปุ๋ยแบบเกลียวลำเลียง (Screw Conveyors) มากำหนดอัตราการหยอดปุ๋ย เนื่องจากมอเตอร์กระแสตรงมีข้อดีคือ สามารถใช้แหล่งพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ของรถแทรกเตอร์ได้โดยตรง เพียงแต่ต้องใช้ตัวแปลงแรงดันไฟฟ้าจาก 12 โวลต์ ให้เป็น 24 โวลต์ เพื่อให้มอเตอร์ได้กำลังขับที่สูงขึ้น และมอเตอร์กระแสตรงยังมีราคาถูกมากเมื่อเทียบกับ Step Motor และ Servo motor ทำให้เครื่องหยอดปุ๋ยที่จะพัฒนานี้มีต้นทุนเพิ่มขึ้นไม่สูงมากนัก ซึ่งหากนำไปผลิตและจำหน่ายเชิงพาณิชย์แล้วเกษตรกรผู้ปลูกอ้อยจะสามารถเข้าถึงเทคโนโลยีนี้ได้ง่ายขึ้น

อุปกรณ์และวิธีการ

1. สำรวจและศึกษาหลักการทำงานพร้อมทดสอบอัตราการหยอดของเครื่องหยอดปุ๋ยสำหรับรถแทรกเตอร์ขนาดเล็กที่เกษตรกรนิยมใช้งานอยู่ปัจจุบัน ในส่วนของการทดสอบหาอัตราการหยอดใช้เครื่องปรับความเร็วรอบ (Invertor) ยี่ห้อ Hitachi รุ่น WJ 200 ขับมอเตอร์ขนาด 2 แรงม้า ส่งกำลังผ่านสายพานไปยังชุดเฟืองทด (Gear Box) แล้วจึงไปขับชุดเพลาหยอดปุ๋ยแบบเกลียวลำเลียง (Screw Conveyor) จากนั้นวัดอัตราการหยอดของแม่ปุ๋ย (N P K) ทั้ง 3 สูตร คือ ยูเรีย (46-0-0) แอมโมเนียมฟอสเฟส (18-46-0) และโพแทสเซียมคลอไรด์ (0-0-60) การทดสอบใช้เกลียวลำเลียงเดิมที่ติดมากับเครื่องซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและภายนอกเกลียวเท่ากับ 32 และ 55 มิลลิเมตร ตามลำดับ และมีระห่างระหว่างเกลียว (Pitch) เท่ากับ 30 มิลลิเมตร โดยใช้ความเร็วรอบของชุดเพลาหยอดปุ๋ยตั้งแต่ 30 ถึง 110 รอบต่อนาที จับเวลา 1 นาที นำปุ๋ยไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาอัตราการหยอดปุ๋ยของแต่ละสูตร

2. ออกแบบเครื่องหยอดปุ๋ยสำหรับหยอดปุ๋ยอ้อยตามค่าวิเคราะห์ดินแบบ 3 ถัง สร้างเครื่องต้นแบบในอาคารปฏิบัติการทางวิศวรรม และทดสอบหาแรงบิดของเพลาหยอดปุ๋ยสำหรับเครื่องที่ออกแบบขึ้นมาใหม่ด้วยการสร้างแขนเหล็กยาวข้างละ 1 เมตร จากจุดศูนย์กลางของเพลาหยอดปุ๋ย จากนั้นจึงใส่ปุ๋ยที่ต้องการทดสอบลงไปในถังแล้วนำตาชั่งแบบสปริงมาวัดแรงดึงที่ปลายแขนด้านใดด้านนึง ซึ่งการทดสอบนี้ได้ใช้แม่ปุ๋ย (N P K) ทั้ง 3 สูตร คือ ยูเรีย (46-0-0) แอมโมเนียมฟอสเฟส (18-46-0) และโพแทสเซียมคลอไรด์ (0-0-60) ในการทดสอบได้วัดแรงดึงของเพลาหยอดปุ๋ยอย่างละ 5 ซ้ำ เพื่อนำค่าแรงดึงสูงสุดเพลาหยอดแม่ปุ๋ยแต่ละสูตรมาใช้หาขนาดของมอเตอร์กระแสตรง โดยใช้สมการหาขนาดกำลังของมอเตอร์กระแสตรงดังสมการที่ 1

$$P = \frac{2\pi nT}{60} \qquad \text{..... (1)}$$

เมื่อ P คือ กำลังของมอเตอร์ (watts)

n คือ ความเร็วรอบ (rpm)

T คือ แรงบิด (N.m)

3. ทดสอบอัตราการหยอดปุ๋ยเพื่อหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราของปุ๋ยกับความเร็วรอบของมอเตอร์ชุดเพลาหยอดปุ๋ย โดยใช้คอมพิวเตอร์เขียนโปรแกรมให้กับชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino รุ่น Mega 2560 สั่งสัญญาณผ่านชุดขับมอเตอร์ เพื่อควบคุมการทำงานของมอเตอร์กระแสตรง 24 โวลต์ ขนาด 350 วัตต์ โดยใช้พลังงานไฟฟ้าจากหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 24 โวลต์ ขนาด 30 แอมป์ ดังแสดงแผนภาพใน Figure 1 ซึ่งการทดลองนี้จะสั่งสัญญาณ PWM ตั้งแต่ 40 ถึง 255 เพื่อควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ และทดสอบเก็บข้อมูลอัตราการหยอดปุ๋ยของแม่ปุ๋ยทั้ง 3 สูตรๆ ละ 3 ซ้ำ แล้วนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราของปุ๋ยกับความเร็วรอบของชุดเพลาหยอดปุ๋ย เพื่อนำมาใช้เป็นสมการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ในการกำหนดอัตราการหยอดปุ๋ยแต่ละสูตร

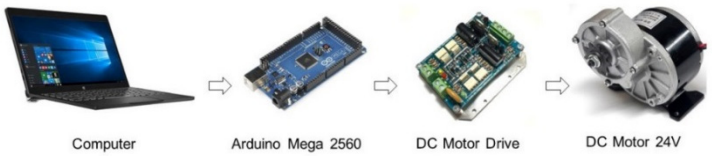


Figure 1 Diagram of DC motor Controller system

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการศึกษาหลักการทำงานและทดสอบอัตราการหยอดของเครื่องหยอดปุ๋ยสำหรับรถแทรกเตอร์ขนาดเล็กที่เกษตรกรนิยมใช้งานอยู่ปัจจุบัน

ผลการสำรวจโรงงานผลิตเครื่องจักรกลการเกษตรพบว่า มีโรงงานที่ได้ผลิตและจำหน่ายเครื่องใส่ปุ๋ยในไร่อ้อยเชิงพาณิชย์ เช่น ห้างหุ้นส่วนจำกัด คูโบต้า ก.แสงยนต์ จ.กาญจนบุรี ได้จำหน่ายเครื่องใส่ปุ๋ยในไร่อ้อยสำหรับพ่วงท้ายรถแทรกเตอร์ขนาดเล็ก ดังแสดงใน Figure 2 ซึ่งมีอุปกรณ์ที่สำคัญคือ มีชุดหยอดเป็นแบบเกลียวลำเลียง (Screw Conveyors) อัตราการหยอดปุ๋ยประมาณ 50 กิโลกรัม/ไร่ และถัง (Hopper) สามารถบรรจุปุ๋ยได้ 50 กิโลกรัม โดยมีหลักการทำงานคือ ใช้ล้อขับ (Ground wheel) ทำหน้าที่เป็นตัวขับเพลาลูกหยอดปุ๋ยที่มีลักษณะเป็นสกรูลำเลียง (Screw conveyors) ส่งกำลังผ่านชุดเฟืองโซ่ ซึ่งความเร็วรอบของล้อขับขึ้นอยู่กับความเร็วการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ และอัตราการหยอดปุ๋ยสามารถปรับได้ด้วยการเปลี่ยนชุดเฟืองโซ่ให้มีขนาดต่างกัน เมื่อลูกหยอดหมุนทำให้ปุ๋ยลงมาตามท่อลำเลียง โดยมีริปเปอร์ (Ripper) ทำหน้าที่เป็นตัวเปิดร่องดินให้ปุ๋ยลงไปลึกจากผิวดินประมาณ 10-15 เซนติเมตร และสามารถหยอดปุ๋ยอ้อยได้ทีละ 1 ร่อง

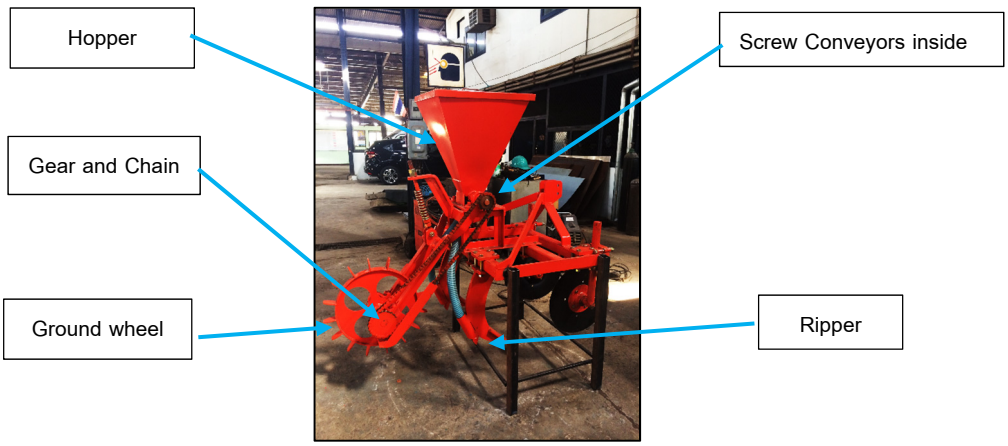


Figure 2 Sugar cane fertilizer applicator for small tractor

สำหรับในการทดสอบนี้ได้กำหนดให้ความเร็วของรถแทรกเตอร์เท่ากับ 1 เมตร/วินาที (3.6 กิโลเมตร/ชั่วโมง) ซึ่งเป็นความเร็วการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับพ่วงเครื่องหยอดปุ๋ยที่อยู่ในช่วง 3-8 กิโลเมตร/ชั่วโมง (วินิต, 2530) และกำหนดให้ระยะร่องอ้อยเท่ากับ 1.5 เมตร ซึ่งเป็นระยะปลูกโดยใช้เครื่องปลูกตามคำแนะนำการปลูกอ้อยของกรมวิชาการเกษตร (2552) เริ่มจากทดสอบอัตราการหยอดปุ๋ยยูเรียโดยใช้เกลียวลำเลียงเดิมที่ติดมากับเครื่อง พบว่าที่ความเร็วรอบของเพลาหยอดปุ๋ยเพียง 15 รอบต่อนาที มีอัตราการหยอดมากถึง 20 กิโลกรัมต่อไร่ ซึ่งเกือบเป็นการใส่ปุ๋ยยูเรียที่อัตราสูงสุดตามคำแนะนำ และจากการสังเกตลักษณะการไหลของปุ๋ยที่ออกมาพบว่า มีลักษณะการไหลที่ไม่ต่อเนื่องคือ ไหลออกมาเป็นช่วงๆ ตามจังหวะการหมุนของเกลียวลำเลียง หากใช้ควบคุมอัตราการหยอดปุ๋ยที่ 10 กิโลกรัม/ไร่ ต้องใช้ความเร็วรอบที่ต่ำมากซึ่งยากต่อการควบคุมและอาจจะส่งผลให้อัตราการหยอดที่ได้ไม่มีความแม่นยำ คณะผู้วิจัยจึงได้ออกแบบเกลียวลำเลียงขึ้นมาใหม่ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและภายนอกเกลียวเท่ากับ 45 และ 55 มิลลิเมตร ตามลำดับ และมีระห่างระหว่างเกลียว (Pitch) เท่ากับ 15 มิลลิเมตร ซึ่งได้ผลการทดสอบดังแสดงใน Table 2 พบว่าความเร็วรอบของเพลาหยอดปุ๋ยที่ 30-110 รอบต่อนาที ปุ๋ยยูเรีย แอมโมเนียมฟอสเฟส และโพแทสเซียมคลอไรด์ สามารถควบคุมอัตราการหยอดของปุ๋ยได้ในอัตราต่ำสุดเท่ากับ 7.96, 6.75 และ 6.10 กิโลกรัม/ไร่ ตามลำดับ และอัตราสูงสุดเท่ากับ 24.81, 22.04 และ 23.83 กิโลกรัมต่อไร่ ตามลำดับ ซึ่งเป็นอัตราที่เพียงพอสำหรับการใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินสำหรับอ้อยปลูกและอ้อยตอ มีเพียงแต่ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์สำหรับอ้อยตอเท่านั้นที่ตามคำแนะนำกำหนดให้มีอัตราสูงสุดที่ 40 กิโลกรัม/ไร่ ซึ่งอาจต้องใช้ความเร็วรอบมากกว่า 110 รอบต่อนาที ถึงสองเท่าหรือราว 200 รอบต่อนาที จึงจะเพียงพอตามคำแนะนำ

Table 2 The result of fertilizer rate testing of sugar cane fertilizer applicator for small tractor

Fertilizer	Fertilizers rate	Speed of Screw Conveyors (rpm)								
		30	40	50	60	70	80	90	100	110
Urea	kg/min	0.45	0.59	0.73	0.85	0.97	1.12	1.22	1.31	1.40
(46-0-0)	kg/rai	7.96	**10.47**	12.95	15.14	17.23	19.98	**21.61**	23.34	24.81
Ammonium Phosphate	kg/min	0.38	0.53	0.62	0.72	0.88	1.00	1.10	1.16	1.24
(18-46-0)	kg/rai	6.75	9.44	10.95	**12.87**	15.73	17.70	19.51	20.62	22.04
Potassium Chloride	kg/min	0.34	0.50	0.67	0.80	0.94	1.07	1.15	1.25	1.34
(0-0-60)	kg/rai	6.10	8.85	11.83	14.28	16.70	18.94	20.41	22.23	23.83

ผลการออกแบบ สร้างเครื่องต้นแบบ และทดสอบแรงบิดของเครื่องหยอดปุ๋ยที่ออกแบบใหม่

จากผลการทดสอบก่อนหน้านี้ คณะผู้วิจัยจึงได้การออกแบบเครื่องหยอดปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินแบบ 3 ถัง โดยใช้ชุดเกลียวลำเลียงปุ๋ยที่ออกแบบใหม่ที่สามารถนำมาใช้กำหนดอัตราการหยอดให้เหมาะสมตามคำแนะนำการใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดิน และได้สร้างเครื่องต้นแบบดังแสดงใน Figure 3 ซึ่งได้ออกแบบให้แต่ละถังสามารถบรรจุปุ๋ยได้ 30 กิโลกรัม และมุมเอียงของถังปุ๋ยด้านล่างมากกว่า 30 องศา เทียบกับแนวระนาบ เพื่อป้องกันการตกค้างของปุ๋ยที่อยู่ในถัง และผลการทดสอบแรงบิดพบว่าแม่ปุ๋ยที่ใช้แรงดึงสูงสุดคือ โพแทสเซียมคลอไรด์ (0-0-60) แอมโมเนียมฟอสเฟส (18-46-0) ปุ๋ยยูเรีย (46-0-0) ตามลำดับ ดังแสดงใน Table 3 ซึ่งสาเหตุที่ทำให้แม่ปุ๋ยแต่ละสูตรมีแรงดึงที่ไม่เท่ากันเกิดจากขนาดและความหนาแน่นของเม็ดปุ๋ยแต่ละสูตรที่มีค่าไม่เท่ากัน และพบว่ากำลังของมอเตอร์กระแสตรงที่ใช้กำหนดอัตราหยอดของแม่ปุ๋ยแต่ละสูตรที่ได้มีค่าแปรผันตามความ

ความหนาแน่นของแม่ปุ๋ยอีกด้วย จากผลการทดสอบหาแรงบิดพบว่ากำลังของมอเตอร์ที่ต้องใช้สำหรับหยอดปุ๋ยยูเรีย แอมโมเนียมฟอสเฟส และโพแทสเซียมคลอไรด์ มีค่าเท่ากับ 56.47, 79.06 และ 90.36 วัตต์ ตามลำดับ เมื่อนำไปคูณกับค่าความปลอดภัย (Safety factor) ที่เลือกใช้ค่าเท่ากับ 2 ได้กำลังของมอเตอร์สูงสุดประมาณ 200 วัตต์ คณะผู้วิจัยจึงเลือกใช้มอเตอร์กระแสตรง 24 โวลต์ ขนาด 350 วัตต์ พร้อมชุดเกียร์ทดมีความเร็วรอบสูงสุดที่ 400 รอบต่อนาที เนื่องจากเป็นขนาดที่สามารถหาซื้อได้ง่ายตามท้องตลาดและมีราคาที่ไม่สูงมากนัก

Table 3 The result of maximum torque testing and finding the power of DC motor

Fertilizer	Density (kg/m^3)	Max. Tension force (g)	Max. Torque (N.m)	Max. Speed of revolution (rpm)	DC Power (watts)
Urea (46-0-0)	810	500	4.91	110	56.47
Ammonium Phosphate (18-46-0)	1033	700	6.87	110	79.06
Potassium Chloride (0-0-60)	1140	800	7.85	110	90.36

ผลการทดสอบอัตราการหยอดปุ๋ยโดยใช้มอเตอร์กระแสตรง

เมื่อได้ขนาดของมอเตอร์กระแสตรง (DC motor) จึงนำมาใช้ขับเพลาหยอดปุ๋ย (Screw conveyor) เพื่อทดสอบหาอัตราการหยอดปุ๋ยแต่ละสูตร โดยใช้คอมพิวเตอร์เขียนโปรแกรมคำสั่งให้กับชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino รุ่น Mega 2560 สั่งสัญญาณ PWM (Pulse Width Modulation) ผ่านชุดขับมอเตอร์ (DC motor drive) เพื่อควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ในการกำหนดอัตราการหยอดปุ๋ยดังแสดงการทดสอบใน Figure 4 ในการทดลองนี้ใช้การควบคุมมอเตอร์แบบ PWM ซึ่งเป็นวงจรแบบ Switching Amplifier คือ การควบคุมแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์ โดยอาศัยหลักการปรับค่า Duty Cycle เพื่อปรับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์ ซึ่งเกิดการสูญเสียกำลังงานที่น้อยมาก และการควบคุมแบบนี้จะใช้งานได้ดีที่ความถี่คงที่หรือความถี่ที่มีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก (เอกชัย, 2552) ซึ่งในการทดลองนี้ได้กำหนดความเร็วของรถแทรกเตอร์คงที่ที่ 1 เมตร/วินาที และระยะห่างร่องอ้อยเท่ากับ 1.5 เมตร แล้วควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์โดยสั่งสัญญาณแบบ PWM โดยชุดไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถสั่งค่าได้ตั้งแต่ 0-255 ซึ่งเป็นค่าความสัมพันธ์โดยตรงกับค่า Duty cycle ตั้งแต่ 0 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ แต่ในการทดลองนี้ได้ใช้ค่า PWM ตั้งแต่ 40 ถึง 255 เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหยอดปุ๋ย (กิโลกรัม/ไร่) กับคำสั่งสัญญาณ PWM โดยจากผลการทดลองพบว่ายูเรีย (46-0-0) สามารถหยอดได้ตั้งแต่อัตรา 10 ถึง 50 กิโลกรัม/ไร่ แอมโมเนียมฟอสเฟส (18-46-0) สามารถหยอดได้ตั้งแต่ อัตรา 12 ถึง 65 กิโลกรัม/ไร่ และโพแทสเซียมคลอไรด์ (0-0-60) สามารถหยอดได้ตั้งแต่ อัตรา 10 ถึง 75 กิโลกรัม/ไร่ ดังแสดงใน Figure 5



Figure 3 The prototype of sugar cane fertilizer applicator based on soil analysis



Figure 4 Fertilizer rate Testing

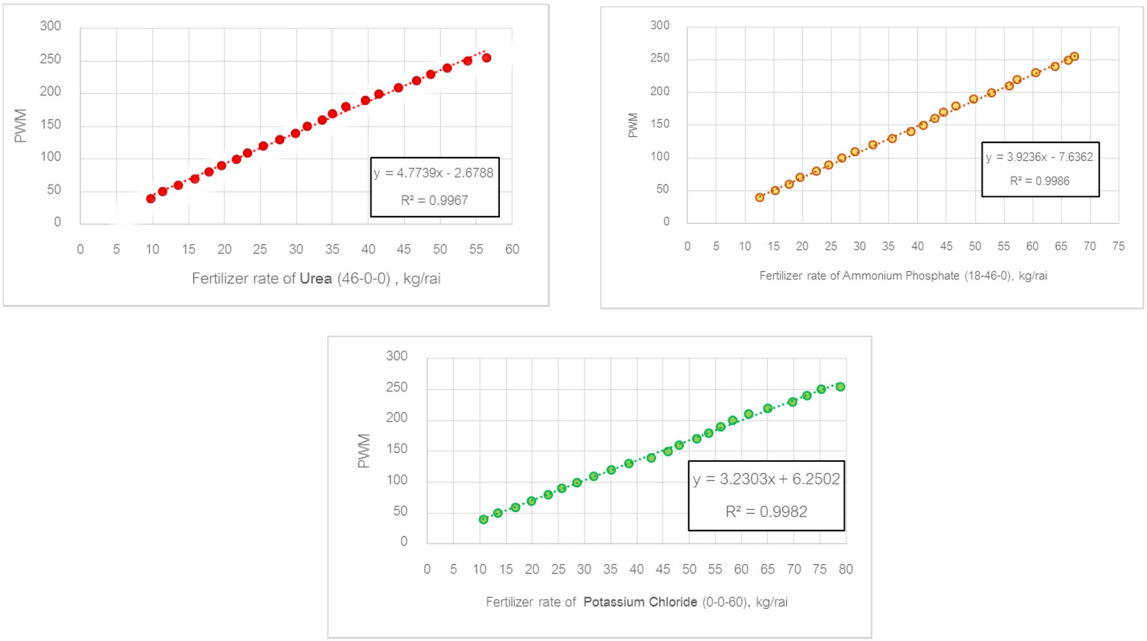


Figure 5 The result of fertilizer rate testing of *Urea* (46-0-0), *Ammonium Phosphate* (18-46-0) and *Potassium Chloride* (0-0-60)

จากผลการทดสอบการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ด้วยสัญญาณแบบ PWM สามารถนำมาเขียนสมการความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราของแม่ปุ๋ยกับคำสั่งสัญญาณ PWM เพื่อควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ขับชุดเพลาหยอดปุ๋ยแต่ละสูตรดังสมการที่ 2 ถึง 4 ซึ่งสามารถนำสมการเหล่านี้ไปควบคุมอัตราการหยอดของเครื่องหยอดปุ๋ยให้ตรงตามค่าวิเคราะห์ดินได้ โดยในสมการนั้นค่าความเร็วของรถแทรกเตอร์สามารถวัดได้จากชุด Encoder ที่วัดความเร็วรอบของ Ground wheel (รอบต่อนาที) แล้วแปลงค่ามาเป็นหน่วย เมตร/วินาที ส่วนระยะห่างระหว่างร่องอ้อยสามารถปรับเปลี่ยนค่าได้ในโปรแกรมของชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ (Arduino Mega 2560) ด้วยการใช้แป้นพิมพ์ (Keypad) ป้อนค่าระยะของร่องอ้อยตามที่ต้องการ

$$M_1 = V \times \frac{(R)}{1.5} \times (4.7739X_1 - 2.6788) \quad \ldots\ldots (2)$$

$$M_2 = V \times \frac{(R)}{1.5} \times (3.9236X_2 - 7.6362) \quad \ldots\ldots (3)$$

$$M_3 = V \times \frac{(R)}{1.5} \times (3.2303X_3 + 6.2502) \quad \ldots\ldots (4)$$

เมื่อ M_1, M_2, M_3 คือ คำสั่งสัญญาณ (PWM) ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์สำหรับปุ๋ยยูเรีย (46-0-0) ฟอสฟอรัส (18-46-0) และโพแทสเซียม (18-46-0) ตามลำดับ

X_1, X_2, X_3 คือ อัตราการหยอดปุ๋ย ยูเรีย (46-0-0) ฟอสฟอรัส (18-46-0) และโพแทสเซียม (0-0-60) (กิโลกรัม/ไร่) ตามลำดับ

V คือ ความเร็วการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ (เมตร/วินาที)

R คือ ระยะห่างของร่องอ้อย (เมตร)

สรุป

จากผลการศึกษาการควบคุมอัตรการหยอดปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินสำหรับอ้อย สามารถใช้มอเตอร์กระแสตรง 24 โวลต์ ขนาด 350 วัตต์ พร้อมชุดเกียร์ทดมีความเร็วรอบสูงสุดที่ 400 รอบต่อนาที มาควบคุมความเร็วรอบของเพลาหยอดปุ๋ยแบบเกลียวลำเลียง (Screw conveyors) ที่ได้ออกแบบขึ้นมาใหม่ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและภายนอกเกลียวเท่ากับ 45 และ 55 มิลลิเมตร ตามลำดับ และมีระห่างระหว่างเกลียว (Pitch) เท่ากับ 15 มิลลิเมตร โดยใช้ชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino mega 2560 สั่งสัญญาณแบบ PWM (Pulse Width Modulation) ส่งค่าตั้งแต่ 40 ถึง 255 ผ่านชุดขับมอเตอร์ (DC motor drive) ควบคุมแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์ โดยอากาศหลักการปรับค่า Duty Cycle ของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์ เพื่อมากำหนดอัตราหยอดของแม่ปุ๋ยแต่ละสูตร จากผลการทดสอบพบว่า ปุ๋ยยูเรีย (46-0-0) สามารถหยอดได้อัตราตั้งแต่ 10 ถึง 50 กิโลกรัม/ไร่ ปุ๋ยฟอสฟอรัส (18-46-0) สามารถหยอดได้อัตราตั้งแต่ 12 ถึง 65 กิโลกรัม/ไร่ และปุ๋ยโพแทสเซียม (0-0-60) สามารถหยอดได้อัตราตั้งแต่ 10 ถึง 75 กิโลกรัม/ไร่ ซึ่งเป็นอัตราที่เพียงพอสำหรับการใส่ปุ๋ยอ้อยตามค่าวิเคราะห์ดิน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ของสถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรมกรรม กรมวิชาการเกษตร ที่สนับสนุนและให้คำปรึกษา รวมถึงเอื้อเฟื้อสถานที่ในการสร้างและทดสอบเครื่องต้นแบบ

เอกสารอ้างอิง

กรมวิชาการเกษตร. 2552. **เอกสารแนะนำการปลูกอ้อย**. สถาบันวิจัยพืชไร่และพืชพลังงานทดแทน กรมวิชาการเกษตร. กรุงเทพฯ.

กรมวิชาการเกษตร. 2553. **คำแนะนำการใช้ปุ๋ยกับพืชเศรษฐกิจ**. พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักวิจัยพัฒนาปัจจัยการผลิตทางการเกษตร, กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. กรุงเทพฯ.

มงคง ต๊ะอุ่น และ พัชรี ธีระจินดาขจร. 2543. การพัฒนาระบบวิเคราะห์ดินเพื่อการจัดการรัพยากรที่ดินและสิ่งแวดล้อม. **วารสารศูนย์บริการวิชาการ** 8(3): 30-38.

วินิต ชินสุวรรณ. 2530. **เครื่องจักรกลเกษตรและการจัดการเบื้องต้น**. มหาวิทยาลัยขอนแก่น. ขอนแก่น.

สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย. 2561. **รายงานพื้นที่ปลูกอ้อยปีการผลิต 2559/2560**. แหล่งที่มา: http://www.ocsb.go.th/th/cms/detail.php?ID=923&SystemModuleKey=journal. 1 ตุลาคม 2561.

เอกชัย มะการ. 2552. **เรียนรู้ เข้าใจ ใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ด้วย Arduino**. พิมพ์ครั้งที่ 2. บริษัทอีทีทีจำกัด, กรุงเทพฯ.

ผลของสัดส่วนน้ำยางพาราต่อกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงของซีเมนต์เพสต์ โดยใช้กาวลาเทกซ์เป็นสารเชื่อมประสาน

Effect of Latex Mixed Ratio on Compressive Strength and Tensile Strength of Cement Paste Which Use Latex Glue as Surfactant

สรวิศ เรืองรุ่งชัยกุล[1*] และ ปิยนุช เวทย์วิวรณ์[1]

Sorawid Ruangrungchaikul[1*] and Piyanut Wethyavivorn[1]

บทคัดย่อ

การผสมยางพาราร่วมกับซีเมนต์เพื่อใช้เป็นวัสดุสำหรับก่อสร้างนั้นได้รับการพัฒนาในหลายพื้นที่มาอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ดีงานวิจัยภายในประเทศส่วนใหญ่ต่างศึกษาเกี่ยวกับการผสมยางพาราร่วมกับมอร์ตาร์หรือคอนกรีตโดยใช้สารเคมีเป็นสารเชื่อมประสาน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาเกี่ยวกับกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงของซีเมนต์เพสต์ผสมน้ำยางพาราโดยใช้กาวลาเทกซ์ซึ่งมีน้ำยางพาราเป็นวัตถุดิบเป็นสารเชื่อมประสาน จากผลการทดลองพบว่า การผสมน้ำยางพาราหรือกาวลาเทกซ์ทำให้กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ลดลง 7.89% ถึง 87.12% (ตัวอย่างผสมกาวลาเทกซ์ 5% และน้ำยางพารา 5% โดยใช้สารลดแรงตึงผิวเป็นสารเชื่อมประสานตามลำดับ) ขณะที่การผสมกาวลาเทกซ์ 15% และน้ำยางพารา 5% โดยใช้กาวลาเทกซ์เป็นสารเชื่อมประสานทำให้กำลังรับแรงดึงของซีเมนต์เพสต์ลดลง 3.79% และ 64.17% ตามลำดับ ทว่าการผสมน้ำยางพารา 15% โดยใช้สารลดแรงตึงผิวเป็นสารเชื่อมประสานทำให้กำลังรับแรงดึงของซีเมนต์เพสต์เพิ่มขึ้น 3.39% เมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม

ABSTRACT

Using latex mixed with cement as construction material continually develops in wide area. However, most domestic studies focused on latex mixed with mortar or concrete which use chemical as the surfactant. Consequently, this study aims to investigate the compressive strength and tensile strength of latex mixed cement paste which use latex glue, latex based material, as the surfactant. The results showed that latex mixing significantly decrease the compressive strength of cement paste 7.89% to 87.12% (5% latex glue and 5% latex with surfactant specimens, respectively). Different to the compressive strength, the tensile strength of cement paste slightly decrease, namely, 3.79% (15% latex glue specimens) and 64.17% (5% latex with latex glue specimens). The tensile strength of cement paste, furthermore, increase to 3.39% (15% latex with surfactant specimens) compared with control specimens.

Key Words: cement paste, latex, latex glue, surfactant

*Corresponding author; e-mail address: Sorawid.ru@ku.th

[1]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

คำนำ

ในปัจจุบันสภาวะโลกร้อน (global warming) ได้กลายเป็นปัญหาที่ทั่วโลกต่างให้ความสำคัญ และหาวิธีรับมือร่วมกันอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมก่อสร้าง ด้วยเหตุนี้จึงเกิดความสนใจและความพยายามในการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมผ่านการสรรหาวัสดุทางเลือกเพื่อใช้ในการก่อสร้างขึ้นอย่างกว้างขวาง โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อลดปริมาณการใช้วัสดุดั้งเดิม อาทิ ซีเมนต์และมวลรวม ด้วยวัสดุอื่นที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่า เช่น มีการบริโภคพลังงานในขั้นตอนการผลิตและขนส่งลดลง (Reddy and Jagadish, 2003) โดยคงความแข็งแรงและคุณสมบัติอื่นๆ ไว้ หรือพัฒนาให้ดีขึ้น

ยางพารา (rubber) จัดเป็นวัสดุทางเลือกประเภทพอลิเมอร์ (polymer) จากธรรมชาติวัสดุหนึ่งที่พบได้มากในประเทศไทย ทั้งนี้ การประยุกต์ใช้ยางพาราในงานก่อสร้างนั้นได้รับการวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่องทั้งภายในประเทศและต่างประเทศ ทว่าด้วยปัญหาเกี่ยวกับระยะเวลาที่ต้องใช้ในการเตรียมการและการก่อสร้างของการประยุกต์ใช้ยางพาราจากธรรมชาติ (natural rubber) ทำให้งานวิจัยในต่างประเทศส่วนใหญ่มุ่งเน้นที่การประยุกต์ใช้ยางพาราที่ได้จากการสังเคราะห์ (synthetic rubber) เป็นหลัก (Ohama, 1994) ขณะที่งานวิจัยภายในประเทศนั้นต่างมุ่งเน้นที่การประยุกต์ใช้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากยางพาราธรรมชาติเพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับยางพาราซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งของประเทศ อาทิ การศึกษาความสามารถในการเทได้ (workability) กำลังรับแรงอัด (compressive strength) กำลังรับแรงดัด (flexural strength) และลำดับการผสมของมอร์ตาร์ (mortar) และคอนกรีต (concrete) ผสมน้ำยางพารา (สิทธิชัย และคณะ, 2548) การประยุกต์ใช้น้ำยางพาราร่วมกับคอนกรีตเพื่อเป็นวัสดุสำหรับก่อสร้างคลองชลประทาน (พีรวัฒน์, 2549) การประยุกต์ใช้น้ำยางพาราเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติด้านการรับกำลังและการเป็นฉนวนความร้อนของคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ (ประชุม, 2550) การประยุกต์ใช้น้ำยางพาราร่วมกับมอร์ตาร์เพื่อใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานรอยร้าวสำหรับคลองชลประทาน (พีรวัฒน์, 2555) และเพื่อใช้เคลือบผิวคลองชลประทานสำหรับการบำรุงรักษา (พีรวัฒน์, 2558)

จะเห็นได้ว่างานวิจัยภายในประเทศส่วนใหญ่ต่างศึกษาเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ยางพาราร่วมกับมอร์ตาร์หรือคอนกรีต กล่าวคือ ใช้ทรายและหินซึ่งถือเป็นวัสดุหลักและดั้งเดิมเป็นมวลรวมในการผสม ทำให้องค์ความรู้เกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ยางพาราในงานก่อสร้างส่วนใหญ่เกี่ยวกับผลของการประยุกต์ใช้ยางพาราร่วมกับซีเมนต์ น้ำ และมวลรวมประเภททรายและหินเป็นหลัก นอกจากนี้ เนื่องด้วยปัญหาความไม่เข้ากันระหว่างน้ำยางพาราและซีเมนต์ (Figure 1) อันเนื่องมากจากคุณลักษณะความมีขั้วและไม่มีขั้วของวัสดุ (polar-non polar property) กล่าวคือ ซีเมนต์และน้ำจัดเป็นวัสดุประเภทมีขั้ว ขณะที่ยางพาราจัดเป็นวัสดุประเภทไม่มีขั้ว ทำให้ต้องมีการเติมสารลดแรงตึงผิว (Lutensol XL 80) เพื่อทำหน้าที่เชื่อมประสานให้วัสดุทั้งหมดสามารถผสมร่วมกันได้ อย่างไรก็ดี สารลดแรงตึงผิวดังกล่าวยังก่อให้เกิดฟองอากาศขึ้นในส่วนผสมซึ่งส่งผลต่อกำลังรับแรงของมอร์ตาร์หรือคอนกรีต (สิทธิชัย และคณะ, 2548) รวมทั้งยังอาจหาได้ไม่ง่ายนักตามท้องตลาด

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้กาวลาเทกซ์ซึ่งเป็นวัสดุที่หาได้ง่ายตามท้องตลาด มียางพาราเป็นวัตถุดิบพื้นฐาน และสามารถผสมเข้ากันได้ดีกับน้ำและซีเมนต์มาเป็นสารเชื่อมประสาน และเพื่อความเข้าใจถึงผลกระทบของการประยุกต์ใช้น้ำยางพาราร่วมกับซีเมนต์ รวมทั้งเพื่อเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาผลของการประยุกต์ใช้น้ำยางพาราร่วมกับมอร์ตาร์หรือคอนกรีตที่ใช้มวลรวมเป็นวัสดุทางเลือกที่น่าสนใจประเภทอื่น อาทิ

เศษพลาสติก (Sharma and Bansal, 2016) ในอนาคต งานวิจัยนี้จึงศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึง (tensile strength) ของซีเมนต์เพสต์ (cement paste) จำนวน 10 กลุ่มตัวอย่าง (Table 1) แบ่งเป็นตัวอย่างสำหรับศึกษากำลังรับแรงอัด กลุ่มละ 3 ตัวอย่าง รวม 30 ตัวอย่าง และตัวอย่างสำหรับศึกษากำลังรับแรงดึง กลุ่มละ 3 ตัวอย่าง รวม 30 ตัวอย่าง รวมทั้งสิ้น 60 ตัวอย่าง

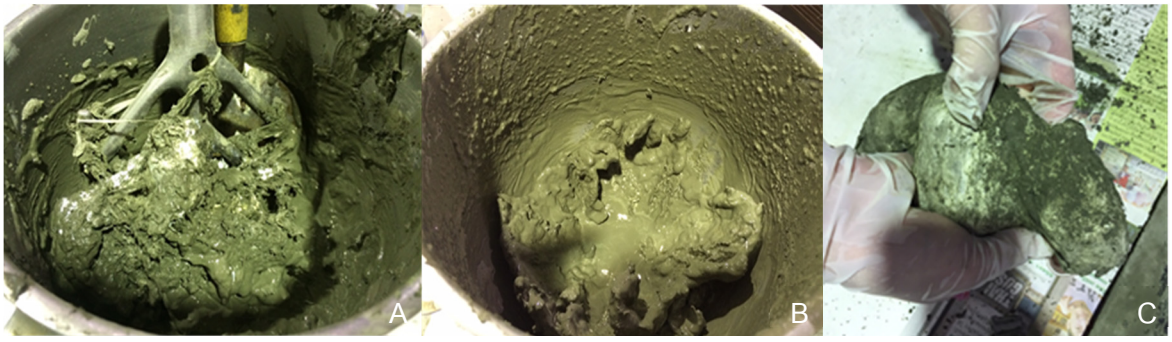


Figure 1 Incompatibility among cement paste and latex during mixing (A), after mixing (B) and after dry (C)

อุปกรณ์และวิธีการ

การผสมน้ำยางพารากับซีเมนต์เพสต์

เมื่อผสมน้ำยางพาราลงในมอร์ตาร์หรือคอนกรีตนอกจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (cement hydration) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาสำคัญที่ก่อให้เกิดวุ้นซีเมนต์ (cement gel) อันเป็นส่วนสำคัญของการก่อตัวของมอร์ตาร์หรือคอนกรีตแล้วนั้น ปฏิกิริยาที่สำคัญอีกปฏิกิริยาหนึ่ง ได้แก่ ปฏิกิริยาก่อตัวของน้ำยางพาราหรือส่วนพอลิเมอร์ (polymer phase formation) โดยความสัมพันธ์ระหว่าง 2 ปฏิกิริยาดังกล่าวขณะก่อตัวของมอร์ตาร์หรือคอนกรีตผสมน้ำยางพาราสามารถอธิบายได้ผ่าน 3 ขั้นตอนหลัก (Ohama, 1994) ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ในระยะแรกที่เริ่มผสมน้ำยางพารากับมอร์ตาร์หรือคอนกรีตนั้น อนุภาคพอลิเมอร์ (polymer particles) หรืออนุภาคยางต่างกระจายตัวอย่างสม่ำเสมออยู่ทั่วในซีเมนต์เพสต์ ในสถานะดังกล่าวนี้ซีเมนต์จะเริ่มทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็นวุ้นซีเมนต์ทีละน้อยอย่างต่อเนื่อง ขณะเดียวกันอนุภาคยางบางส่วนจะเริ่มตกตะกอนหรือเริ่มเกาะตามบริเวณผิวของวุ้นซีเมนต์เหล่านี้

ขั้นตอนที่ 2 ด้วยการที่น้ำเริ่มลดลงจากการเกิดวุ้นซีเมนต์อย่างต่อเนื่อง ทำให้อนุภาคยางค่อยๆถูกล้อมรอบอยู่ภายในโพรงคาพิลลารี (capillary pore) หรือช่องว่างที่เหลืออยู่ระหว่างอนุภาคซีเมนต์ที่ยังไม่กลายเป็นวุ้นซีเมนต์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันทีละน้อย ยิ่งการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันดำเนินต่อไปมากขึ้น น้ำภายในโพรงคาพิลลารีจะยิ่งลดลง ทำให้อนุภาคยางเริ่มจับตัวเป็นกลุ่มก้อนอนุภาคที่มีความต่อเนื่อง จนท้ายที่สุดเกิดเป็นชั้นของอนุภาคยางเคลือบติดอยู่บนบริเวณผิวของวุ้นซีเมนต์อย่างสมบูรณ์ ขณะเดียวกันชั้นของอนุภาคยางเหล่านี้ยังติดอยู่กับชั้นซิลิเกต (silicate layer) บนพื้นผิวของมวลรวมและทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างชั้นเคลือบด้วยกันอีกด้วย กล่าวได้ว่าอนุภาคยางทำหน้าที่เสมือนตัวเชื่อมประสานเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างโพรงหรือช่องว่างบางส่วนภายในส่วนผสมเหล่านี้ สาเหตุที่อนุภาคยางเข้าไปแทรกได้เพียงระหว่างช่องว่างบางส่วนนั้น เนื่องเพราะช่องว่างภายในซีเมนต์เพสต์มีขนาดที่แตกต่างกัน กล่าวคือ ตั้งแต่ระดับพิโคเมตร (picometer) ไปจนถึงหลายร้อยนาโนเมตร (nanometer) ขณะที่อนุภาคยางโดยทั่วไปมีขนาด 50 ถึง 500 นาโนเมตร แน่นอนว่าการแทรกซึมและ

เกิดปฏิกิริยาเคมีดังกล่าวนั้นถูกคาดหวังให้เป็นการเพิ่มพันธะหรือเพิ่มระดับการเชื่อมประสานระหว่างซีเมนต์และมวลรวม รวมถึงเพิ่มคุณสมบัติของมอร์ตาร์หรือคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วเช่นกัน

Table 1 Component ratio of sample groups

No.	Name	Latex (%)[1/]	Latex Glue (%)[2/]	Surfactant (%)[3/]
1	Control	-	-	-
2	L05+lut.	5.0	-	4.0
3	L10+lut.	10.0	-	4.0
4	L15+lut.	15.0	-	4.0
5	L05G05	5.0	5.0	-
6	L10G05	10.0	5.0	-
7	L15G05	15.0	5.0	-
8	G05	-	5.0	-
9	G10	-	10.0	-
10	G15	-	15.0	-

1/ Latex (%) = % by weight of water

2/ Latex Glue (%) = % by weight of cement

3/ Surfactant (%) = % by weight of latex

ขั้นตอนที่ 3 เมื่อน้ำในส่วนผสมหายไปจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ชั้นอนุภาคยางดังกล่าวมาแล้วข้างต้นจะเกิดการจับตัวกันกลายเป็นชั้นฟิล์ม (film) หรือเยื่อ (membrane) ที่มีความต่อเนื่องยิ่งขึ้นและรวมเข้ากับซีเมนต์ในลักษณะที่ต่างแทรกซึมระหว่างกันและกันกลายเป็นโครงข่ายเดียว เสมือนเป็นสารเชื่อมประสานเนื้อผสมทำหน้าที่ยึดจับมวลรวมก่อตัวเป็นมอร์ตาร์หรือคอนกรีต

ทั้งนี้ ประเภทของน้ำยางพาราที่ใช้ผสมในงานวิจัยนี้ ได้แก่ น้ำยางข้นชนิดแอมโมเนียสูง (ปริมาณเนื้อยาง 60%) โดยมีลำดับการผสมได้แก่ ผสมสารลดแรงตึงผิวหรือกาวลาเทกซ์กับน้ำก่อน จากนั้นจึงผสมน้ำยางพารา และผสมซีเมนต์เป็นวัสดุสุดท้าย โดยปริมาณน้ำยางพาราที่ใช้ผสมจะคิดเป็นเปอร์เซนต์แทนที่น้ำ ตัวอย่างเช่น กลุ่มตัวอย่าง L15+lut. หากใช้ซีเมนต์ปริมาณ 1,000 กรัม กำหนดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C ratio) เท่ากับ 0.3 (ซึ่งมีค่าเท่ากับ 300 กรัม) จะได้ว่า

ปริมาณน้ำยางพาราที่ใช้ คือ 0.15x300 เท่ากับ 45 กรัม

และปริมาณน้ำที่ใช้จริง คือ 300-45 เท่ากับ 255 กรัม

การเตรียมตัวอย่าง

การศึกษากำลังรับแรงอัดใช้ตัวอย่างจากการเตรียมด้วยแบบหล่อรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 50x50x50 มิลลิเมตร ขณะที่การศึกษากำลังรับแรงดึงใช้ตัวอย่างจากการเตรียมด้วยแบบหล่อบริเกท์ (briquette molds) โดยใช้ลำดับการผสมดังกล่าวไว้ข้างต้น อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ เท่ากับ 0.3 ผสมตามวิธีมาตรฐาน มอก. 15 เล่ม 17

การผสมมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกด้วยเครื่องผสม จากนั้นนำไปบ่มชื้นเป็นเวลา 7 วัน และบ่มแห้งเพื่อให้น้ำยางพาราแห้งกลายเป็นเนื้อยางต่ออีก 7 วัน แล้วจึงนำไปทดสอบ

ผลและวิจารณ์การทดลอง

ความหนาแน่นของซีเมนต์เพสต์ผสมน้ำยางพาราและกาวลาเทกซ์

จากการคำนวณค่าความหนาแน่น (Figure 2) พบว่า ซีเมนต์เพสต์ผสมน้ำยางพาราทั้งกลุ่มที่ใช้สารลดแรงตึงผิวและกาวลาเทกซ์เป็นสารเชื่อมประสาน รวมทั้งซีเมนต์เพสต์ผสมกาวลาเทกซ์มีความหนาแน่นลดลง โดยลดลงสูงสุดถึง 29.88% (กลุ่มตัวอย่าง L10+lut.) นอกจากนี้ซีเมนต์เพสต์ผสมน้ำยางพาราที่ใช้สารลดแรงตึงผิวเป็นสารเชื่อมประสานยังมีความหนาแน่นต่ำกว่าตัวอย่างกลุ่มอื่นอย่างมีนัยสำคัญ สอดคล้องกับการศึกษาของสิทธิชัย และคณะ (2548) ซึ่งกล่าวว่า การผสมสารลดแรงตึงผิวนั้นก่อให้เกิดฟองอากาศในมอร์ตาร์หรือคอนกรีตขึ้นเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้ความหนาแน่นและกำลังรับแรงของมอร์ตาร์หรือคอนกรีตมีค่าต่ำลง

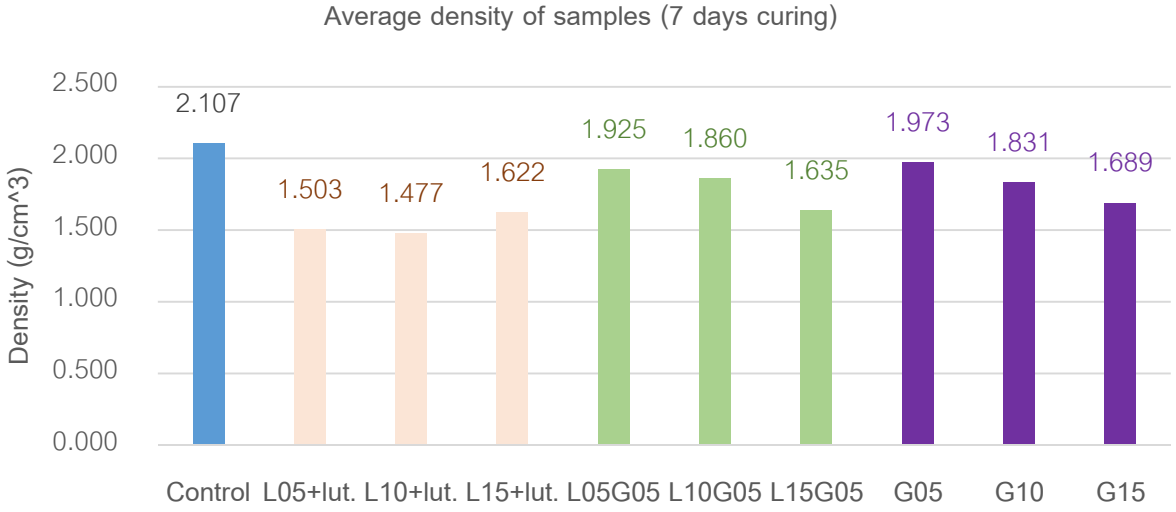


Figure 2 Average density of samples (7 days curing)

กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมน้ำยางพาราและกาวลาเทกซ์

จากผลการทดสอบ (Figure 3) พบว่า กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์แปรผกผันกับปริมาณของน้ำยางพาราและกาวลาเทกซ์ กล่าวคือ ซีเมนต์เพสต์ผสมน้ำยางพาราทั้งกลุ่มที่ใช้สารลดแรงตึงผิวและกาวลาเทกซ์เป็นสารเชื่อมประสาน รวมทั้งซีเมนต์เพสต์ผสมกาวลาเทกซ์มีกำลังรับแรงอัดต่ำลงอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งกลุ่มตัวอย่างที่ใช้สารลดแรงตึงผิวเป็นสารเชื่อมประสานซึ่งทำให้เกิดฟองอากาศจำนวนมาก (สิทธิชัย และคณะ, 2548) จนส่งผลต่อกำลังรับแรงอัด (87.12% ที่กลุ่มตัวอย่าง L05+lut.) ในขณะที่กลุ่มตัวอย่างที่ผสมน้ำยางพาราโดยใช้กาวลาเทกซ์เป็นสารเชื่อมประสานนั้นมีกำลังรับแรงอัดลดลงน้อยกว่า เนื่องจากไม่ได้รับผลจากการเกิดฟองอากาศจากการใช้สารลดแรงตึงผิว อย่างไรก็ดี อาจกล่าวได้ว่าน้ำยางพาราส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์มากกว่ากาวลาเทกซ์ สังเกตได้จากกลุ่มตัวอย่างที่ผสมน้ำยางพาราโดยใช้กาวลาเทกซ์

เป็นสารเชื่อมประสานมีแนวโน้มที่จะมีกำลังรับแรงอัดลดลง (48.75% ที่กลุ่มตัวอย่าง L05G05) มากกว่ากลุ่มตัวอย่างที่ผสมกาวลาเทกซ์เพียงอย่างเดียว (7.89% ที่กลุ่มตัวอย่าง G05)

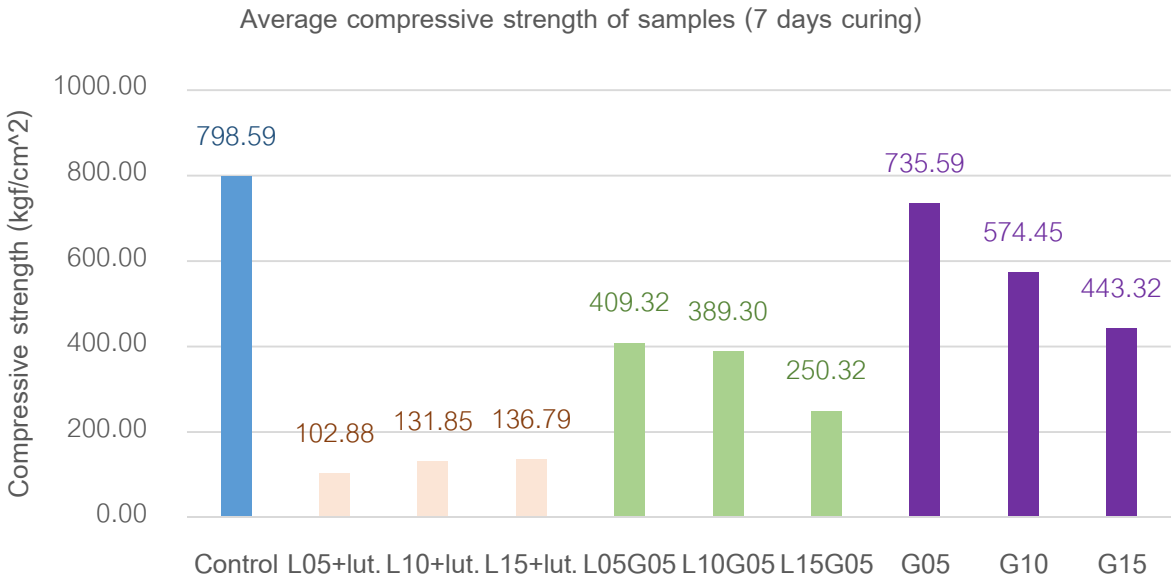


Figure 3 Average compressive strength of samples (7 days curing)

กำลังรับแรงดึงของซีเมนต์เพสต์ผสมน้ำยางพาราและกาวลาเทกซ์

จากผลการทดสอบ (Figure 4) พบว่า กำลังรับแรงดึงของซีเมนต์เพสต์จะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของน้ำยางพาราหรือกาวลาเทกซ์เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ดี มีเพียงกลุ่มตัวอย่าง L15+lut. เท่านั้นที่มีกำลังรับแรงดึงเฉลี่ยสูงกว่าตัวอย่างควบคุม (สูงขึ้น 3.39%) ในขณะที่กลุ่มตัวอย่างอื่นมีกำลังรับแรงดึงเฉลี่ยต่ำกว่าตัวอย่างควบคุมทั้งสิ้น ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากระยะเวลาการบ่มแห้งเพียง 7 วัน ไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาจับตัวเป็นชั้นฟิล์มของอนุภาคยางพารา ทำให้ภายในซีเมนต์เพสต์ไม่มีชั้นยางที่แข็งแรงเพียงพอจะเพิ่มกำลังรับแรงดึงของซีเมนต์เพสต์ให้สูงขึ้นได้อย่างที่ควรเป็น ในทางกลับกันชั้นยางที่ยังไม่แข็งแรงเพียงพอเหล่านี้กลับทำให้วุ้นซีเมนต์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันมีความต่อเนื่องลดลง ส่งผลให้กำลังรับแรงดึงเฉลี่ยต่ำกว่ากำลังรับแรงดึงเฉลี่ยของตัวอย่างควบคุม (ต่ำลง 36.29% ที่กลุ่มตัวอย่าง L05+lut. และ 64.17% ที่กลุ่มตัวอย่าง L05G05) สอดคล้องกับการศึกษาของสิทธิชัย และคณะ (2548) ซึ่งพบว่า กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตผสมน้ำยางพาราที่ระยะเวลาการบ่มแห้งในอากาศ 7 วัน มีค่าลดลง ขณะที่กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตผสมน้ำยางพาราที่ระยะเวลาการบ่มแห้งในอากาศ 14 และ 28 วัน มีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมน้ำยางพารา นอกจากนี้จะเห็นได้ว่ากลุ่มตัวอย่างที่ผสมเพียงกาวลาเทกซ์นั้นมีกำลังรับแรงดึงเฉลี่ยลดลงน้อยกว่าเมื่อเทียบกับกลุ่มตัวอย่างที่ผสมน้ำยางพารา (ลดลง 29.92% ที่กลุ่มตัวอย่าง G05) ซึ่งสอดคล้องกับผลทดสอบกำลังรับแรงอัดก่อนหน้านี้ กล่าวคือ การผสมซีเมนต์เพสต์ด้วยกาวลาเทกซ์นั้นส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงของซีเมนต์เพสต์เพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับการผสมด้วยน้ำยางพารา

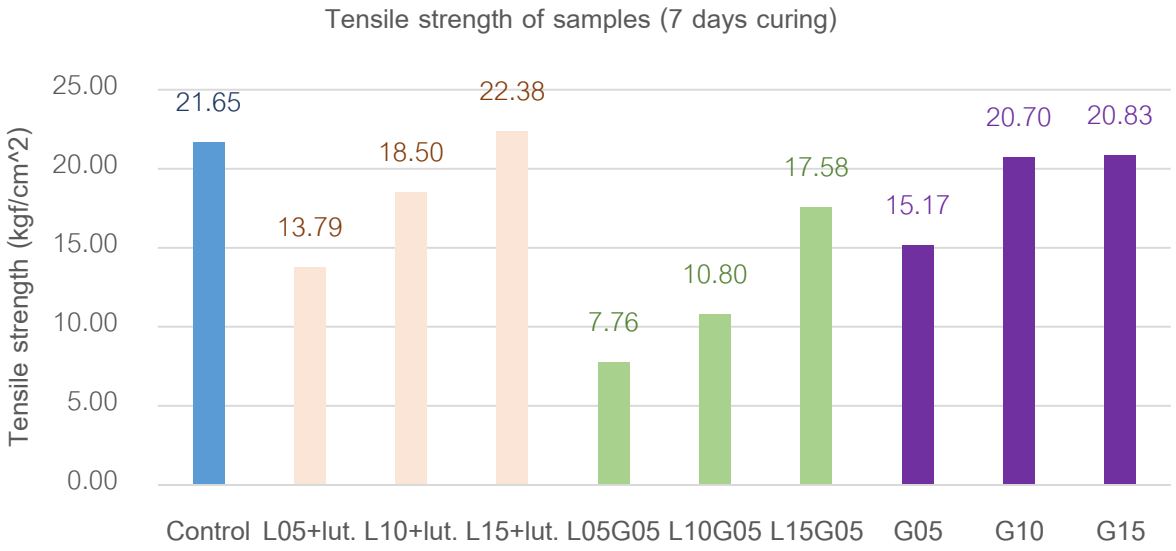


Figure 4 Average tensile strength of samples (7 days curing)

สรุป

จากผลการทดสอบ สามารถสรุปได้ว่าการผสมซีเมนต์เพสต์ด้วยน้ำยางพาราโดยใช้สารลดแรงตึงผิวหรือกาวลาเทกซ์เป็นสารเชื่อมประสาน รวมทั้งการผสมซีเมนต์เพสต์ด้วยกาวลาเทกซ์ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความหนาแน่น และกำลังรับแรงอัดลดลงแปรผันตามปริมาณที่ผสม โดยการใช้สารลดแรงตึงผิวเป็นสารเชื่อมประสานนั้นทำให้เกิดการลดลงสูงที่สุด เนื่องจากเกิดฟองอากาศขึ้นในซีเมนต์เพสต์ และการผสมด้วยกาวลาเทกซ์เพียงอย่างเดียวนั้นทำให้เกิดการลดลงต่ำที่สุด ในทางกลับกัน กำลังรับแรงดึงของซีเมนต์เพสต์มีแนวโน้มสูงขึ้นแปรผันตามปริมาณน้ำยางพาราหรือกาวลาเทกซ์ที่ใช้ผสม อย่างไรก็ดี เนื่องด้วยปฏิกิริยาจับตัวของอนุภาคยางอาจยังไม่สมบูรณ์พอ ทำให้แนวโน้มการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงดึงเหล่านั้นยังคงมีค่าต่ำกว่ากำลังรับแรงดึงของซีเมนต์เพสต์ปกติ (ยกเว้นกลุ่มตัวอย่าง L15+lut.) นอกจากนี้ยังกล่าวได้ว่า การผสมกาวลาเทกซ์เพียงอย่างเดียวนั้นส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงของซีเมนต์เพสต์เพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับการผสมน้ำยางพารา และการใช้กาวลาเทกซ์เป็นสารเชื่อมประสาน แม้จะทำให้ความหนาแน่นและกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ลดลงน้อยกว่า แต่ก็ทำให้กำลังรับแรงดึงเพิ่มขึ้นน้อยกว่าเช่นกันเมื่อเทียบกับการใช้สารลดแรงตึงผิวเป็นสารเชื่อมประสาน ดังนั้นควรต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมกับกลุ่มตัวอย่างที่มีส่วนผสมเดิม แต่เพิ่มระยะเวลาบ่มแห้งให้นานขึ้นเพื่อศึกษาว่าเมื่ออนุภาคยางเกิดการจับตัวกันสมบูรณ์ยิ่งขึ้นแล้วนั้น ความหนาแน่น กำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดึงของซีเมนต์เพสต์จะเปลี่ยนแปลงอย่างไร

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาและอาจารย์ทุกท่านที่กรุณาสละเวลาให้คำแนะนำและความรู้อันเป็นประโยชน์มากมาย ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน สำหรับสถานที่และอุปกรณ์ต่างๆ และที่สำคัญอย่างยิ่ง ขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับทุนวิจัยอันเป็นส่วนสำคัญยิ่งที่ทำให้งานวิจัยนี้สามารถดำเนินการได้จนแล้วเสร็จอย่างลุล่วง

เอกสารอ้างอิง

ประชุม คำพุฒ. 2550. การใช้น้ำยางพาราปรับปรุงสมบัติด้านการรับกำลังและการเป็นฉนวนกันความร้อนของคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ. **วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ**. 30 (2): 363-376.

พีรวัฒน์ ปลาเงิน. 2549. **การศึกษาการสูญเสียน้ำเนื่องจากการรั่วซึมในแบบจำลองคลองชลประทานที่มีส่วนผสมของน้ำยางพารา**. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์, มหาวิทยาลัยสยาม.

พีรวัฒน์ ปลาเงิน. 2554. **การพัฒนาสูตรมอร์ต้าผสมน้ำยางพาราสำหรับใช้เป็นตัวเชื่อมประสานรอยร้าวในคลองส่งน้ำชลประทาน**. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์, มหาวิทยาลัยสยาม.

พีรวัฒน์ ปลาเงิน. 2558. **การพัฒนาวัสดุเคลือบผิวคลองผสมน้ำยางพาราสำหรับใช้บำรุงรักษาคลองชลประทาน**. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์, มหาวิทยาลัยสยาม.

สิทธิชัย ศิริพันธุ์, พิทักษ์ บุญนุ่น, กิจถาวร โลหะ และ อนุรักษ์ กำเนิดว้ำ. 2548. **การใช้ยางธรรมชาติเพื่อพัฒนางานคอนกรีต**. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2516. **การผสมมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกด้วยเครื่องผสม**. มอก. 15 เล่ม 17-2516

Chandra, S. and Y. Ohama. 1994. **Polymers in Concrete**. CRC Press, Boca Raton, Florida.

Reddy, B.V. V. and K.S. Jagadish. Embodied energy of common and alternative building materials and technologies. **Energy and Buildings** (35): 129-137.

Sharma, R. and Bansal, P.P. Use of different forms of waste plastic in concrete - review. **Journal of Cleaner Production** (112): 473-482.

การศึกษารัศมีครอบคลุมการใช้บริการสถานีรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงินด้วยข้อมูลตำแหน่งมิเตอร์วัดค่าน้ำ

Study of Coverage Area of Mass Transit Station by Water Metering Data

กฤษณ์ กาญจนไวกูณฐ์[1*] อกชัย ศิริกิจพาณิชย์กูล[1] วิโรจน์ รุโจปการ[1] และ อดิชัย พรพรหมินทร์[2]

Krit Kanjanavaikoon[1*], Ackchai Sirikijpanichkul[1], Wiroj Rujopakarn[1] and Adichai Pornpromin[2]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงระยะทางในการเข้าถึงและออกจากสถานีรถไฟฟ้าหรือรัศมีครอบคลุมการใช้บริการสถานีรถไฟฟ้า โดยศึกษาถึงประชากรที่อาศัยอยู่หรือใช้งานในประเภทอาคารที่ก่อให้เกิดการเดินทางว่ามีความน่าจะเป็นในกวรเดินทางไปใช้บริการระบบรถไฟฟ้าที่ระยะทางเท่าใด โดยงานวิจัยนี้ได้รับอนุเคราะห์ข้อมูลตำแหน่งมิเตอร์วัดน้ำจากการประปานครหลวง ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการนำมาประยุกต์ใช้ในการคำนวณจำนวนประชากรที่ทำกิจกรรมอยู่ตามตำแหน่งมิเตอร์ ๆ นั้น โดยการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนประชากรและจำนวนผู้ที่ทำงานทั้งหมดในกรุงเทพซึ่งเป็นข้อมูลมาตราฐานจากสำนักงานสถิติแห่งประเทศไทยกับข้อมูลการใช้น้ำเป็นรายจุด การศึกษาวิเคราะห์ใช้เทคนิคการสร้างแบบจำลองการวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุคูณเพื่อสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลประชากรรายจุดที่วิเคราะห์ได้กับข้อมูลปริมาณผู้โดยสารที่เดินทางเข้าและออกจากสถานีรถไฟฟ้าที่ได้รับอนุเคราะห์จากการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย ผลการทดลอง พบว่าการเข้าถึงสถานีในช่วงเวลาเร่งด่วนเช้าของผู้ที่พักอาศัยในอาคารประเภทบ้านพักจะอยู่ในช่วงที่ระยะเดินทางที่ 250 – 2,500 เมตรจากสถานี แต่สำหรับผู้ที่พักอาศัยในอาคารประเภทคอนโดมิเนียม พบว่าจำแนกออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่เลือกอาศัยใกล้สถานีรถไฟฟ้าคือในช่วงระยะ 500 เมตรจากสถานี ด้วยระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 90 และผู้ที่อาศัยในระยะที่ไกลจากสถานีคือในช่วงระยะระหว่าง 4,750 – 6,000 เมตรจากสถานี ด้วยระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 90 ถึง 95 ส่วนในช่วงเวลาเร่งด่วนเย็นนั้น การเดินทางกลับบ้านด้วยรถไฟฟ้า ผู้ที่อาศัยในบ้านพัก มีระยะทางในการเดินทางกลับที่พักในช่วงระยะ 2,250 เมตรจากสถานี สำหรับผู้ที่พักอาศัยในคอนโดมิเนียม มีระยะทางในการเดินทางกลับที่พักในช่วงระยะ 500 – 6,000 เมตรจากสถานี และ พบว่าในช่วงเวลาเร่งด่วนเช้าผู้ที่เดินทางไปทำงาน เดินทางต่อจากสถานีไปจนถึงที่ทำงานในระยะทาง 250 – 6,000 เมตรจากสถานี สำหรับผู้ที่เดินทางไปเรียน มีระยะจากสถานีไปยังปลายทางอยู่ที่ 5750 – 6,000 เมตรจากสถานี ส่วนในช่วงเวลาเร่งด่วนเย็นผู้ที่ไปทำงานเดินทางเข้าสู่สถานีในระยะทาง 250 – 6,000 เมตรจากสถานี ส่วนนักเรียนนั้นไม่มีระยะทางที่นัยสำคัญกับการเดินทางเข้าสถานี ผลงานวิจัยนี้เป็นประโยชน์ต่อการวางแผนเพื่อพัฒนาและปรับปรุงพื้นที่โดยรอบสถานีและระบบการเข้าถึงสถานีรถไฟฟ้าต่อไป

ABSTRACT

This research is aimed at investigating the average coverage distance between the classified resident areas (house and condominium types) or workplaces and the Blue Line Mass Rapid Transit station in Thailand (MRTA). Thanks to the Metropolitan Waterworks Authority, the water metering data classified by user type are analyzed against number of population and employment data from the National Statistical Office of Thailand. In such practice, the population and employment along the water metering points are extracted which is analysed against the inbound and outbound ridership provided in courtesy of the Mass Rapid Transit Authority of Thailand using the multiple regression technique. The established regression models suggest that the access distance from home residents to MRTA station is in the range of 250 to 2,500 meters while the access distance from condominium residents to MRTA station is 500 meters for short distance coverage and 4,750 – 6,000 meters for long distance coverage in the morning peak and the egress distance from MRTA station to home residents is 2,250 meters while the egress distance from MRTA station to condominium is in the range of 250 – 6,000 meters in the evening peak. For home-based work trip, the egress distance from MRTA station to workplace is in the range of 250 to 6,000 meters while the egress distance from MRTA station to education destinations is 5,750 – 6,000 meters in the morning peak. While in the evening peak, the access distance from workplace to MRTA station is in the range of 250 – 6,000 meters and there is no significant access distance for return home-based education trips. The research results are beneficial to the planning and development of transit-oriented development and mass transit access system.

Keywords: Coverage Area, Water Metering, Mass Transit, Planning Data, Access and Egress

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

[1]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

[2]ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

คำนำ

ปัจจุบันการเดินทางด้วยรถไฟฟ้าได้เข้ามามีบทบาทกับการเดินทางมากยิ่งขึ้น ซึ่งในประเทศไทยการเดินทางด้วยรูปแบบรถไฟฟ้าเริ่มต้นตั้งแต่ปี 2542 โดยบริษัทระบบขนส่งมวลชนกรุงเทพ จำกัด (มหาชน) จากนั้นอีก 5 ปีทางการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย ก็ได้เปิดให้บริการรถไฟฟ้ามหานคร สายเฉลิมรัชมงคลขึ้นในปี 2547 สำหรับงานศึกษาการเดินทางเข้าและออกจากสถานี ในหลายประเทศเริ่มมีการศึกษาถึงระยะทางที่เหมาะสมในการเดินเท้าเข้าสถานี ในประเทศสหรัฐอเมริกา เช่น งานศึกษาของ Guerra et al. (2012) ได้ผลการศึกษาว่า ระยะทางที่เหมาะสมสำหรับเดินทางจากสถานีไปทำงานนั้นจะอยู่ในช่วง 1.2 กิโลเมตร และ 800 เมตร สำหรับเดินทางมาสถานีจากที่พักอาศัย ในประเทศเกาหลีใต้ งานศึกษาของ Sung et al. (2014) ได้ผลการศึกษาว่าในการทำแบบจำลองอุปสงค์โดยตรง (Travel Direct Demand) ระยะครอบคลุมที่เหมาะสมที่สุดคือที่ระยะ 500 เมตรจากสถานี และช่วงระยะ 750 เมตรเป็นระยะที่เหมาะสมสำหรับการพัฒนาพื้นที่รอบสถานี และในงานศึกษาของ Guttiérrez et al. (2011) ได้ทดสอบวิธีการสร้างอุปสงค์โดยตรง ที่ระยะทางต่าง ๆ ผลที่ได้คือช่วงที่เหมาะสมสำหรับสร้างสมการอุปสงค์โดยตรง จะอยู่ในช่วง 700-800 เมตร

ทั้งนี้หลายการศึกษาที่กล่าวมามักให้ความสนใจในระยะห่างจากสถานีเพื่อการพัฒนารอบสถานีและระยะทางเพื่อสร้างสมการแบบจำลองทางด้านอุปสงค์โดยตรง แต่สำหรับงานวิจัยนี้ระยะทางที่วิเคราะห์นั้นจะศึกษาครอบคลุมไกลออกไปจากสถานีถึง 6,000 เมตร เนื่องจากผลสำรวจของสำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจรพบว่าการเดินทางเข้าสู่สถานีรถไฟฟ้าของประชากรในกรุงเทพมหานครนั้นเดินทางด้วยรถโดยสารสาธารณะและจักรยานยนต์รับจ้างเป็นหลัก ซึ่งต่างจากต่างประเทศที่ว่าการเดินทางเข้าสู่สถานีรถไฟฟ้าจะเป็นการเดินเท้าเข้าสู่สถานีเป็นหลัก นอกจากนี้ในแบบจำลองได้มีการแยกประเภทของผู้ที่พักอาศัยเป็นผู้ที่อาศัยในบ้านพักทั่วไปกับผู้ที่พักอาศัยในคอนโดมิเนียม เพื่อศึกษาว่ามีระยะทางในการเข้าถึงสถานีต่างกันอย่างไร เช่นเดียวกับกลุ่มของผู้ที่ไปทำงานและกลุ่มที่เป็นนักเรียนนักศึกษา ว่าผู้ที่ไปทำงานและผู้ที่ไปเรียนนั้น มีระยะทางในการเข้าหรือออกจากสถานีแตกต่างกันหรือไม่อย่างไร

ข้อมูลและวิธีการ

การวิเคราะห์จำนวนประชากรและการจ้างงานบนตำแหน่งมิเตอร์วัดน้ำ

เนื่องด้วยตำแหน่งข้อมูลสำหรับข้อมูลด้านมิเตอร์น้ำจากการประปานครหลวงมีถึงเกือบสองล้านจุดในกรุงเทพมหานคร นนทบุรีและสมุทรปราการ การจำแนกข้อมูลจึงต้องทำด้วยโปรแกรมด้านภูมิศาสตร์และสารสนเทศในการจำแนกข้อมูล โดยผลที่ได้หลังจากการจำแนกข้อมูลจะทำให้ทราบถึงตำแหน่งของมิเตอร์ประเภทของอาคารที่ใช้มิเตอร์น้ำนั้นวัดค่าการใช้น้ำ และปริมาณน้ำที่ใช้เฉลี่ยต่อเดือน โดยการวิเคราะห์จำนวนประชากรและการจ้างงานใช้เกณฑ์อ้างอิงจากจำนวนและประชากรทั้งหมดในแต่ละเขตที่ทำการแบ่งไว้ ซึ่งทางผู้จัดทำใช้เขตรายย่อยของแบบจำลองระดับกรุงเทพมหานครและปริมณฑล (eBUM) ของสำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร และข้อมูลจากสำนักสถิติทางด้านสำมะโนประชากรและสำมะโนอุตสาหกรรมในการปรับแก้ข้อมูล โดยข้อมูลทั้งหมดจะถูกปรับเป็นปีมาตรฐานปี 2556 ซึ่งเป็นปีของข้อมูลตำแหน่งมิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล ผลจำนวนประชากรทั้งหมดดังแสดงในตารางที่ 1 (Table 1)

Table 1 Number of Population, Worker and Water Usage in Bangkok Nonthaburi and Samutprakarn

	Bangkok	Nonthaburi	Samutprakarn
Number of Residential Water Metering (Unit)	1,057,465	274,622	233,473
Number of Commercial and Industrial Water Metering (Unit)	319,093	31,787	45,570
Average Water Use per Residential Water Metering (m^3/Unit)	40.038	28.234	37.760
Average Water Use per Commercial and Industrial Water Metering (m^3/Unit)	123.070	108.441	203.187
Number of eBum Zone (Zone)	946	189	147
Number of Population (Person)	8,306,904	1,397,505	1,922,407
Number of Worker (Person)	4,989,211	939,033	1,336,389
Average Water use in Residential (Liter/Person/Day)	174	165	178

การวิเคราะห์ข้อมูลในระดับจังหวัดทั้งหมดจะถูกคิดมาจากจำนวนประชากรและจำนวนการจ้างงานในระดับแขวงหรือตำบล แล้วนำไปแบ่งตามโซนย่อยต่อไป โดยพิจารณาจากจำนวนการใช้น้ำทั้งหมดในโซนย่อยนั้น ๆ เทียบกับจำนวนคนต่อการใช้น้ำในระดับแขวงหรือตำบล จากนั้นจึงกระจายจำนวนประชากรและการจ้างงานจากระดับโซนย่อยลงไปบนจุดมิเตอร์น้ำแต่ละจุดที่กระจายตัวอยู่บนพื้นที่ ซึ่งใช้หลักการเดียวกันกับการกระจายจำนวนประชากรและการจ้างงานลงจากระดับแขวงไปเป็นระดับโซนย่อย

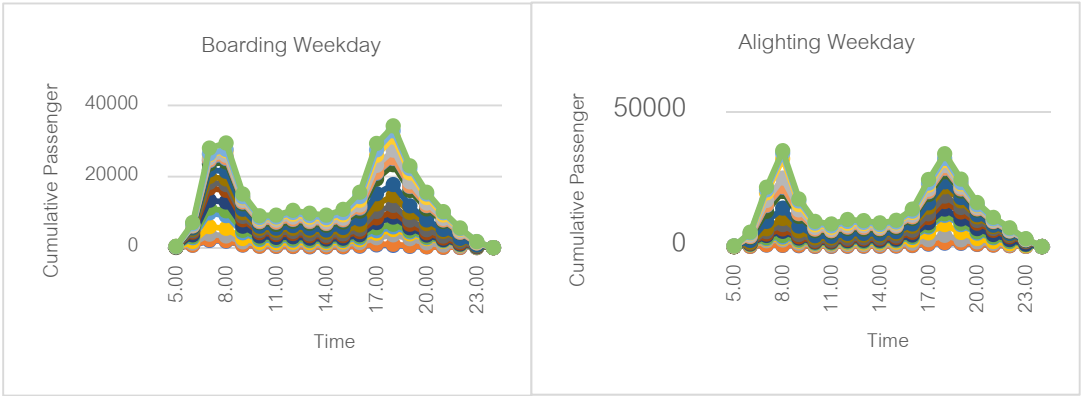
จำนวนประชากรและการจ้างงานกับระยะห่างที่ห่างจากสถานี

หลังจากที่ทราบจำนวนประชากรและการจ้างงานบนจุดมิเตอร์วัดน้ำแล้ว ต้องทำการวิเคราะห์ผลต่อว่ามิเตอร์นั้น ๆ อยู่ห่างจากสถานีรถไฟฟ้าเท่าใด เพื่อที่จะทำการวิเคราะห์ผลหาความสัมพันธ์ทางด้านระยะทางต่อไป โดยกลุ่มประชากรและการจ้างงานที่สนใจนั้นคือ ประชากรที่พักอาศัยอยู่ในอาคารประเภทที่พักอาศัยทั่วไป ประชากรที่พักอาศัยอยู่ในคอนโด แฟลต หรือหอพัก จำนวนผู้ที่ไปทำงาน และจำนวนผู้ที่ไปโรงเรียน

จำนวนผู้โดยสารและการจำแนกช่วงเวลาเร่งด่วน

จากข้อมูลจำนวนผู้โดยสารรายขาเข้าและรายขาออกที่ได้รับจากการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย (รฟม.) ทำให้สามารถจำแนกผู้โดยสารในช่วงเวลาเร่งด่วนได้ดังแสดง (Figure 1)

Figure 1 Cumulative Boarding Passenger and Cumulative Alighting Passenger



จะเห็นว่าช่วงเวลาเร่งด่วนเช้าปริมาณผู้โดยสารจะเพิ่มขึ้นอย่างมากตั้งแต่ในช่วงเวลา 6.00 นาฬิกาไปจนถึงช่วงเวลา 10.00 นาฬิกาจำนวนผู้โดยสารจะเริ่มลดลงและคงที่ไปจนถึงช่วงเวลาเร่งด่วนเย็นซึ่งเป็นเวลาตั้งแต่ 15.00 นาฬิกาไปจนถึง 22.00 นาฬิกา

การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ

การวิเคราะห์ครั้งนี้จะใช้วิธิการการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณในการหาความสัมพันธ์ของประชากรที่อาศัยอยู่ในอาคารประเภทที่พักอาศัยทั่วไป ประชากรที่อาศัยในอาคารประเภทคอนโดมิเนียม จำนวนผู้ที่ไปทำงาน และ จำนวนนักเรียน กับปริมาณผู้โดยสารในช่วงเวลาเร่งด่วนเช้าและเร่งด่วนเย็น ในระยะต่าง ๆ ที่ห่างจากสถานีรถไฟฟ้า เนื่องจากเป็นวิธีการที่สะดวกและสามารถอธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรได้ดี และได้รับการยอมรับโดยทั่วไป โดยจะทำการสร้างแบบจำลองขึ้นมาที่ระยะต่าง ๆ โดยมีตัวแปรขึ้นกับช่วงเวลา และมีการบังคับให้จุดตัดแกนผ่านจุด 0,0 เพื่อที่จะได้ทราบถึงจำนวนการเดินทางที่เกิดขึ้นต่อหน่วย

ผลวิจารณ์และการทดลอง

จากผลการทดสอบด้วยการสร้างแบบจำลองจากการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณที่ระยะเข้าสู่และออกจากสถานีรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงินที่ระยะต่าง ๆ พบว่าการเข้าถึงสถานีในช่วงเวลาเร่งด่วนเช้าของผู้ที่พักอาศัยในอาคารประเภทบ้านพักจะอยู่ในช่วงที่ระยะเดินทางที่ 250 – 2,500 เมตรจากสถานี ที่ระดับความเชื่อมั่นตั้งแต่ร้อยละ 95 ขึ้นไป แต่สำหรับผู้ที่พักอาศัยในอาคารประเภทคอนโดมิเนียม พบว่าจำแนกออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่เลือกอาศัยใกล้สถานีรถไฟฟ้าคือในช่วงระยะ 500 เมตรจากสถานี ด้วยระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 90 และผู้ที่อาศัยในระยะที่ไกลจากสถานี คือในช่วงระยะระหว่าง 4,750 – 6,000 เมตรจากสถานี ด้วยระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 90 ถึง 95 ซึ่งควรที่จะมีการศึกษาถึงสาเหตุในรายละเอียดต่อไป ส่วนในช่วงเวลาเร่งด่วนเย็นนั้น การเดินทางกลับบ้านด้วยรถไฟฟ้า ผู้ที่อาศัยในบ้านพัก มีระยะทางในการเดินทางกลับที่พักในช่วงระยะ 2,250 เมตรจากสถานี ด้วยระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 90 ถึง 95 สำหรับผู้ที่พักอาศัยในคอนโดมิเนียม มีระยะทางในการเดินทางกลับที่พักในช่วงระยะ 500 – 6,000 เมตรจากสถานี ด้วยระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ถึง 99 (Table 2) สำหรับผลการสร้างแบบจำลองวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณสำหรับผู้ที่ไปทำงานและนักเรียน พบว่าในช่วงเวลาเร่งด่วนเช้าผู้ที่เดินทางไปทำงาน เดินทางต่อจากสถานีไปจนถึงที่ทำงานในระยะทาง 250 – 6,000 เมตรจากสถานี ด้วยระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 90 ถึง 99 และพบว่าผู้ที่เดินทางไปเรียน มีระยะจากสถานีไปยังปลายทางอยู่ที่ 5750 – 6,000 เมตรจากสถานี ด้วยระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 90 ส่วนในช่วงเวลาเร่งด่วนเย็นผู้ที่ไปทำงานเดินทางเข้าสู่สถานีในระยะทาง 250 – 6,000 เมตรจากสถานี ด้วยระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 90 ถึง 99 ส่วนนักเรียนนั้นไม่มีระยะทางที่นัยสำคัญกับการเดินทางเข้าสถานี (Table 3)

Table 2 Analysis Result for Residential by Distance to Station

(N = 18)	Boarding AM Peak					Alighting PM Peak				
	Adjusted R Square	Coefficients		P-value		Adjusted R Square	Coefficients		P-value	
Distance to Station		Resident in House	Resident in Condominium	Resident in House	Resident in Condominium		Resident in House	Resident in Condominium	Resident in House	Resident in Condominium
250	0.557	0.516	0.755	0.001**	0.512	0.515	0.875	0.913	0.002**	0.656
500	0.623	0.369	0.939	0.007***	0.07*	0.620	0.520	2.039	0.021**	0.025**
750	0.696	0.236	0.259	0.000***	0.234	0.695	0.317	0.822	0.003**	0.035**
1000	0.740	0.169	0.162	0.000***	0.290	0.719	0.225	0.588	0.001**	0.041**
1250	0.749	0.134	0.105	0.000***	0.398	0.736	0.162	0.522	0.003**	0.026**
1500	0.738	0.106	0.105	0.000***	0.368	0.723	0.125	0.452	0.008**	0.037**
1750	0.704	0.080	0.129	0.002***	0.281	0.695	0.092	0.465	0.029**	0.034**
2000	0.665	0.060	0.162	0.006***	0.156	0.670	0.070	0.465	0.045**	0.021**
2250	0.643	0.051	0.150	0.01**	0.170	0.658	0.058	0.437	0.063*	0.022**
2500	0.616	0.042	0.145	0.023**	0.165	0.634	0.046	0.409	0.117	0.025**
2750	0.599	0.034	0.154	0.054*	0.144	0.625	0.033	0.417	0.229	0.021**
3000	0.578	0.028	0.149	0.109	0.157	0.613	0.022	0.417	0.421	0.021**
3250	0.573	0.024	0.157	0.128	0.140	0.610	0.018	0.428	0.468	0.018**
3500	0.537	0.020	0.142	0.235	0.186	0.580	0.007	0.417	0.792	0.022**
3750	0.533	0.016	0.153	0.294	0.143	0.584	0.002	0.432	0.922	0.015**
4000	0.522	0.014	0.153	0.337	0.143	0.570	0.001	0.422	0.960	0.017**
4250	0.519	0.011	0.161	0.423	0.130	0.570	-0.003	0.437	0.895	0.015**
4500	0.514	0.008	0.167	0.544	0.105	0.559	-0.006	0.426	0.794	0.015**
4750	0.507	0.005	0.177	0.673	0.084*	0.555	-0.009	0.437	0.671	0.012**
5000	0.505	0.003	0.183	0.798	0.067*	0.553	-0.011	0.435	0.575	0.01**
5250	0.504	0.002	0.183	0.874	0.055*	0.553	-0.011	0.424	0.528	0.009***
5500	0.498	0.001	0.184	0.952	0.054*	0.546	-0.012	0.423	0.478	0.009***
5750	0.496	0.000	0.184	0.978	0.05**	0.539	-0.013	0.413	0.452	0.009***
6000	0.502	-0.001	0.187	0.932	0.039**	0.548	-0.013	0.411	0.426	0.007***

* Significant at P 0.1

** Significant at P 0.05

*** Significant at P 0.01

Table 3 Analysis Result for Worker and Student by Distance to Station

(N = 18)	Alighting AM Peak					Boarding PM Peak				
	Adjusted R Square	Coefficients		P-value		Adjusted R Square	Coefficients		P-value	
Distance to Station		Worker	Student	Worker	Student		Worker	Student	Worker	Student
250	0.427	0.465	-2.988	0.002***	0.416	0.400	0.689	-3.333	0.003***	0.568
500	0.504	0.091	0.239	0.024**	0.275	0.425	0.164	0.130	0.017**	0.721
750	0.541	0.059	0.179	0.048**	0.304	0.486	0.102	0.175	0.041**	0.541
1000	0.496	0.067	-0.015	0.011**	0.902	0.490	0.111	-0.071	0.008***	0.720
1250	0.495	0.061	-0.038	0.011**	0.747	0.494	0.094	-0.050	0.012**	0.783
1500	0.470	0.055	-0.041	0.02**	0.730	0.473	0.080	-0.027	0.027**	0.885
1750	0.459	0.053	-0.056	0.02**	0.623	0.468	0.077	-0.046	0.027**	0.793
2000	0.435	0.045	-0.030	0.051*	0.803	0.455	0.066	-0.018	0.057*	0.923
2250	0.435	0.050	-0.075	0.024**	0.478	0.454	0.073	-0.083	0.029**	0.607
2500	0.468	0.055	-0.116	0.01**	0.247	0.488	0.081	-0.146	0.013**	0.337
2750	0.453	0.055	-0.135	0.015**	0.218	0.476	0.081	-0.173	0.018**	0.297
3000	0.482	0.058	-0.143	0.004***	0.087	0.499	0.086	-0.188	0.006***	0.137
3250	0.471	0.058	-0.152	0.005***	0.086	0.497	0.086	-0.208	0.006***	0.119
3500	0.393	0.036	-0.044	0.009***	0.295	0.414	0.048	-0.028	0.019**	0.659
3750	0.384	0.036	-0.048	0.009***	0.229	0.400	0.048	-0.037	0.019**	0.541
4000	0.378	0.035	-0.046	0.009***	0.230	0.395	0.047	-0.035	0.019**	0.537
4250	0.375	0.034	-0.046	0.008***	0.204	0.392	0.046	-0.038	0.018**	0.488
4500	0.383	0.035	-0.050	0.007***	0.155	0.395	0.048	-0.046	0.014**	0.386
4750	0.377	0.034	-0.049	0.007***	0.148	0.388	0.047	-0.045	0.015**	0.376
5000	0.376	0.034	-0.051	0.007***	0.127	0.385	0.046	-0.049	0.015**	0.334
5250	0.375	0.034	-0.052	0.007***	0.115	0.381	0.046	-0.051	0.016**	0.310
5500	0.364	0.033	-0.052	0.008***	0.115	0.370	0.044	-0.050	0.018**	0.314
5750	0.368	0.034	-0.057	0.007***	0.091*	0.371	0.046	-0.057	0.018**	0.264
6000	0.373	0.035	-0.061	0.007***	0.077*	0.374	0.047	-0.063	0.016**	0.228

* Significant at P 0.1

** Significant at P 0.05

*** Significant at P 0.01

สรุป

งานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนประชากร จำนวนผู้ที่ทำงานและนักเรียนทั้งหมดในกรุงเทพมหานครซึ่งเป็นข้อมูลมาตราฐานจากสำนักงานสถิติแห่งประเทศไทยกับข้อมูลการใช้น้ำเป็นรายจุดตำแหน่งโดยอาศัยข้อมูลผู้ใช้น้ำประปาจากการประปานครหลวง และวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลรายจุดตำแหน่งดังกล่าวกับปริมาณผู้โดยสารเข้าและออกจากระบบรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงินในช่วงเวลาเร่งด่วนเช้าและเร่งด่วนเย็นที่ได้จากการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทยและสำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร ที่ระยะห่างต่าง ๆ ระหว่างสถานีรถไฟฟ้ากับตำแหน่งที่พัก ที่ทำงาน และสถานศึกษา เพื่อศึกษาถึงระยะทางในการเข้าถึงและออกจากสถานีรถไฟฟ้าหรือรัศมีครอบคลุมการใช้บริการสถานีรถไฟฟ้า ผลการทดลอง พบว่าการเข้าถึงสถานีในช่วงเวลาเร่งด่วนเช้าของผู้ที่พักอาศัยในอาคารประเภทบ้านพักจะอยู่ในช่วงที่ระยะเดินทางที่ 250 – 2,500 เมตรจากสถานี แต่สำหรับผู้ที่พักอาศัยในอาคารประเภทคอนโดมิเนียม พบว่าจำแนกออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่เลือกอาศัยใกล้สถานีรถไฟฟ้าคือในช่วงระยะ 500 เมตรจากสถานี ด้วยระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 90 และผู้ที่อาศัยในระยะที่ไกลจากสถานี คือในช่วงระยะระหว่าง 4,750 – 6,000 เมตรจากสถานี ด้วยระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 90 ถึง 95 ส่วนในช่วงเวลาเร่งด่วนเย็นนั้น การเดินทางกลับบ้านด้วยรถไฟฟ้า ผู้ที่อาศัยในบ้านพัก มีระยะทางในการเดินทางกลับที่พักในช่วงระยะ 2,250 เมตรจากสถานี สำหรับผู้ที่พักอาศัยในคอนโดมิเนียม มีระยะทางในการเดินทางกลับที่พักในช่วงระยะ 500 – 6,000 เมตรจากสถานี และ พบว่าในช่วงเวลาเร่งด่วนเช้าผู้ที่เดินทางไปทำงาน เดินทางต่อจากสถานีไปจนถึงที่ทำงานในระยะทาง 250 – 6,000 เมตรจากสถานี สำหรับผู้ที่เดินทางไปเรียน มีระยะจากสถานีไปยังปลายทางอยู่ที่ 5750 – 6,000 เมตรจากสถานี ส่วนในช่วงเวลาเร่งด่วนเย็นผู้ที่ไปทำงานเดินทางเข้าสู่สถานีในระยะทาง 250 – 6,000 เมตรจากสถานี ส่วนนักเรียนนั้นไม่มีระยะทางที่นัยสำคัญกับการเดินทางเข้าสถานี ผลงานวิจัยนี้เป็นประโยชน์ต่อการวางแผนเพื่อพัฒนาและปรับปรุงพื้นที่โดยรอบสถานีและระบบการเข้าถึงสถานีรถไฟฟ้าต่อไป โดยความแม่นยำของผลการวิจัย ขึ้นอยู่กับจำนวนประชากรและการจ้างงานที่อยู่บนจุดมิเตอร์วัดน้ำ ซึ่งจำเป็นจะต้องอาศัยการตรวจสอบค่าอ้างอิงจากทางภาครัฐ นอกจากนี้ผู้วิจัยยังมีข้อแนะนำให้มีการวิเคราะห์ถึงปัจจัยอื่น ๆ อีกที่มีผลต่อการเดินทางเข้าและออกจากสถานี ทั้งนี้ผลการศึกษาที่ได้มีขอบเขตการศึกษาจำกัดอยู่ภายในระบบรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงินเท่านั้น ซึ่งอาจมีผลที่แตกต่างกับรัศมีครอบคลุมการใช้บริการของสถานีของรถไฟฟ้าระบบอื่น ๆ เช่น รถไฟฟ้าสายสีเขียว และรถไฟฟ้าเชื่อมต่อท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ เป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณการประปานครหลวงสำหรับข้อมูลตำแหน่งมิเตอร์วัดค่าน้ำและข้อมูลด้านการใช้น้ำ ขอบคุณการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทยในการสนับสนุนข้อมูลผู้โดยสารรถไฟฟ้าอย่างละเอียด ขอบคุณสำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจรในการสนับสนุนแบบจำลองกรุงเทพมหานครและปริมณฑลในการช่วยวิเคราะห์ข้อมูลด้านประชากรและการจ้างงาน

เอกสารอ้างอิง

กองนโยบายและแผนงาน สำนักผังเมือง กรุงเทพมหานคร. 2555. **รายงานการศึกษาเรื่องสถานประกอบกิจการและการจ้างงานในเขตกรุงเทพมหานคร ปี พ.ศ.2554.** 39 หน้า

สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร. 2558. **โครงการศึกษาพัฒนาปรับปรุง บำรุงรักษาระบบฐานข้อมูลข้อสนเทศและแบบจำลอง เพื่อบูรณาการพัฒนาการขนส่งและจราจรการขนส่งต่อเนื่องหลายรูปแบบและระบบโลจิสติก์** (TDL). 634 หน้า

สำนักงานสถิติแห่งชาติ. 2555. **สำมะโนประชากรและเคหะ พ.ศ. 2553 จังหวัดนนทบุรี.** 203 หน้า

สำนักงานสถิติแห่งชาติ. 2555. **สำมะโนประชากรและเคหะ พ.ศ. 2553 จังหวัดสมุทรปราการ.** 203 หน้า

สำนักงานสถิติแห่งชาติ. 2558. **รายงานประชากรแฝง พ.ศ. 2553.** 70 หน้า

สำนักงานสถิติแห่งชาติ. 2560. **สำมะโนอุตสาหกรรม พ.ศ. 2560 ข้อมูลพื้นฐาน กรุงเทพมหานคร.** 157 หน้า

สำนักงานสถิติแห่งชาติ. 2560. **สำมะโนอุตสาหกรรม พ.ศ. 2560 ข้อมูลพื้นฐาน จังหวัดนนทบุรี.** 73 หน้า

สำนักงานสถิติแห่งชาติ. 2560. **สำมะโนอุตสาหกรรม พ.ศ. 2560 ข้อมูลพื้นฐาน จังหวัดสมุทรปราการ.** 74 หน้า

Guerra, E., Cervero, R., & Tischler, D. 2011. The Half-Mile Circle: Does It Best Represent Transit Station Catchments?. Institute of transportation studies university of california, **berkeley. Working Paper Ucb-Its-Vwp-2011-5**, (July).

Gutiérrez, J., Cardozo, O. D., & García-Palomares, J. C. 2011. Transit ridership forecasting at station level: An approach based on distance-decay weighted regression. **Journal of Transport Geography**, 19(6), 1081–1092.

Sung, H., Choi, K., Lee, S., & Cheon, S. H. 2014. Exploring the impacts of land use by service coverage and station-level accessibility on rail transit ridership. **Journal of Transport Geography**, 36, 134–140.

Effect of Metal Oxides on Properties of Mica-based Glass-ceramics

Sahadsaya Prasertwong[1], Sukanda Angkulpipat[1], Thapanee Srichumpong[1], Chanchana Thanachayanont[2], Cristina Leonelli[3], Kallaya Suputtamongkol[4] and Duangrudee Chaysuwan[1*]

ABSTRACT

This research focuses on improving mechanical properties and coloration of mica-based glass-ceramics to be suitable for restorative dental materials. The machinable mica-based glass-ceramics prepared with 3.5 mol% fluorapatite were white and relatively opaque. It was derived from the glass system and added by metal oxides, e.g., CeO_2 and Fe_2O_3. In the heat treatment process, the optimum nucleation and crystallization temperatures were at 643°C and 917°C, respectively. All specimens were synthesized and characterized by X-ray diffraction and scanning electron microscope. The biaxial flexural strength of glass-ceramics was determined by a universal testing machine. XRD results presented that the glass-ceramics with variety of metal oxides had similar crystalline phases consisting of calcium-mica, fluorapatite, silicon oxide, anorthite and strontium apatite. From SEM analysis, it revealed interlocked plate-like microstructures of micas and other crystals in all specimens. Results of the color analysis were found that the addition of metal-based oxides in mica glass-ceramics improved the clinical shade of the glass-ceramics to close to that of natural teeth for more esthetic. The values of biaxial flexural strength were accepted according to Dentistry-Ceramic materials ISO 6872:2015 type II class 2b. Therefore, it could be used for restorative dental materials as partially or fully covered substructure ceramic for single-unit anterior or posterior prostheses adhesively cemented.

Keywords: Mica-based glass-ceramics, Dental restorations, Dental ceramics, Coloration, Color pigments

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

[1]Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, 50 Pahol Yothin Road, Chatuchak, Bangkok 10900

[2]National Metal and Materials Technology Center, 114 Thailand Science Park, Pahol Yothin Road, Khlong Luang, Pathum Thani 12120

[3]Dipartimento di Ingegneria “Enzo Ferrari”, Universita’ degli Studi di Modena e Reggio Emilia, Via Università 4, Modena 41121, Italy

[4]Deparment of Prosthodontics, Faculty of Dentistry, Mahidol University, 6 Yothi Road, Ratchathewi, Bangkok 10400

INTRODUCTION

Glass-ceramics are polycrystalline materials consisting of crystalline phases and glassy phase matrix. The properties of glass-ceramics strongly depend on the number of particles and particle size distribution of the crystalline phases (Noort *et al*., 2012). Leucite, mica and lithium disilicate glass-ceramics are clinically prevalent used as dental glass ceramic (Mukherjee *et al*., 2016). Mica glass-ceramics have been developed to fabricate as dental materials due to their properties such as chemical solubility, biocompatibility, machinability, good bonding and high hardness (Mukherjee *et al*., 2016; Liu *et al*., 2018). Mica-based glass-ceramic is one of typical machinable ceramics (Han *et al*., 2018; Srichumpong *et al*., 2016). The machinability is associated with cleavage of mica crystals and the interlocking structure formed by the plate-like mica crystals (Niyompan *et al*., 2013; Liu *et al*., 2018). Nowadays, mica-based glass-ceramics are being explored, but the color of these materials is limited due to their lack of transparency, whilst the demand of patients for ever better esthetics tooth like restoratives dental materials is increasing. For the mica-based glass-ceramics development, the translucency is necessarily needed to improve (Wang *et al*., 2009 ; Ghasemzadeh *et al*., 2012 ; Khani *et al*., 2013 ; Taruta *et al*., 2012).

The translucency of glass-ceramics can be developed by incorporating with some of the metal oxides such as ceria (CeO_2) or iron oxide (Fe_2O_3). In restorative dental materials, CeO_2as an opacifier is a well-known strategy to enhance the optical property in dental glass-ceramics. On the other hands, Fe_2O_3 will result in a severe problem of color disturbance. Fe_2O_3 as a colorant is used in glasses to produce various red-brown tones (Garai *et al*., 2016). It is possible that glass-ceramic is able to deliver the development of the coloration along with the hardness and machinability. The research aimed the effect of CeO_2 and Fe_2O_3 addition on color modification and properties of mica-based glass-ceramics which contained 3.5 mol% fluorapatite for restorative dental materials.

MATERIALS AND METHODS

Mica-based glass-ceramics were prepared from SiO_2-Al_2O_3-MgO-MgF_2-CaF_2-P_2O_5-$CaCO_3$-$SrCO_3$ system. Six glass compositions were provided: 1) a base glass composition and 2)-5) base glasses with various amounts of metal oxides. All raw materials were mixed for 2 h and, thereafter, melted in an alumina crucible at 1420°C for 1 h in a high temperature furnace. The glass melt was rapidly quenched in water to obtain glass frits. Glass frits were crushed and sieved through a 325 mesh (<45 μm). Consequently, Fe_2O_3 and CeO_2 were added in the composition as color pigments. Glass powder was remelted and the melts were poured to graphite mold which was preheated and annealed in the temperature range of 580-600 °C for 1-2 h in order to relieve thermal stresses and slowly cooled to room temperature to obtain a glass rod. Then the glass rod was nucleated at 643 °C for 10 min and further heat-treated at 917 °C for 10 min for crystallization to transform to glass-ceramic rod. Thermal behaviors of glass were characterized by simultaneous thermal analysis (STA 449 F3 Jupiter, NETZSCH, Germany), heated up to 1200 °C at a heating rate of 10 °C/min. The phase analysis by x-ray diffraction (XRD, X'Pert PW 3040/00, Phillips, Netherlands) was carried out with Cuk□ x-rays. All samples were collected in the 2θ range of 5°-80°. Scan parameters were stepped size of 0.02°, account time 1

sec at 30 kV and 40 mA. The microstructures of samples were determined by the scanning electron microscope (SEM, JSM-7800F, JEOL Ltd, Japan). All samples were well polished, ultrasonically cleaned for 10 min and etched by 10% hydrofluoric acid (HF) for 15 s. The etched samples were cleaned, dried and gold sputtered. For mechanical testing, specimen discs of 15.6 mm diameter and 2.0 mm thickness of each formula were prepared. The biaxial flexural test (BFS) was performed with a piston on three balls for determining flexural strength of mica-based glass-ceramics. Each specimen was supported on three stainless steel ball bearings 3.17 mm diameter and positioned 120º apart on a circle 10.0 mm diameter platform. A load was applied to the specimen center by a universal testing machine (Instron®5566, USA) at a crosshead speed of 0.5 mm/min until failure was occurred. The biaxial flexural strength was calculated according to the equation (1).

$$\sigma = -0.2387\frac{P(X-Y)}{b^2} \qquad (1)$$

Where $X = (1+v)\,ln\left(\frac{r_2}{r_3}\right)^2 + \left[\frac{1-v}{2}\right]\left(\frac{r_2}{r_3}\right)^2, Y = (1+v)\left[1+ln\left(\frac{r_1}{r_3}\right)^2\right] + (1-v)(\frac{r_1}{r_3})^2$

σ: the maximum center tensile stress (MPa), P: the load causing fracture (N), b: the specimen thickness at fracture origin (mm), □: Poisson's ratio (of ceramic = 0.25, ISO 6872), r_1: the radius of support circle (5.0 mm), $r_{2:}$ the radius of loaded area (0.75 mm) and r_3: the radius of a specimen (7.5 mm). The hardness was measured by a Vickers microhardness tester (422D, Innovatest, Netherlands) at load of 500 gF with a loading time 15 s. The thickness of samples was 2.0 mm and an average of at least 10 samples readings was taken. The color was determined by the colorimetry technique, using a colorimeter (Color flex 45/0, Hunter Lab, Reston, VA, USA) with reading ranging from 400 nm to 700 nm, observation angle 10º and D65 illuminant. All disc specimens of 0.5, 1.0, 1.5 and 2.0 mm of thickness were prepared for each code as in Table 1.

Table 1 Chemical compositions of each glass-ceramic (wt.%)

Sample codes	GCF3.5	F1	F2	C1	CF1	CF2
Mica frit	100.0	99.9	99.8	99.0	98.9	98.8
Fe_2O_3	-	0.1	0.2	-	0.1	0.2
CeO_2	-	-	-	1.0	1.0	1.0

RESULTS AND DISCUSSION

1. Thermal analysis

DSC curve of the GCF3.5 is shown in Figure 1, an endothermic peak corresponding to glass transition temperature (T_g) between the onset and the finish, then it was estimated from the plotted curved as 630 °C. The crystallization of glass into glass-ceramics was normally guided by the thermal analysis data. The optimum nucleation temperature was usually found that it located between the T_g and temperature above T_g by 50-100 °C (Noort *et al*., 2012). In addition, the nucleation temperature was determined to be close to the lowest temperature in the endothermic reaction corresponding to T_p

(Peak crystallization temperature) as shown in Figure 1. The two exothermic peaks indicated the crystallization temperature, corresponding to T_{p1} and T_{p2} (representing the first crystallization and the second crystallization temperatures). The crystallization temperature of mica-based glass-ceramics were determined to be 793 °C and 894 °C, respectively. Determination of the optimum nucleation temperature of heat treatment was obtained from Marotta's method (Marotta *et al*., 1981). Based on the thermal analysis data from Figure 1, T_{p2} was the second crystallization peak temperature of the as-quenched glass. T_{p2^*} was the previously-nucleated temperature using one-hour nucleation held at various nucleation temperatures (T_g-30°C, T_g-15°C, T_g°C, T_g+15°C and T_g+30°C). Figure 2 displays the optimum nucleation temperature values of the glass-ceramics. The point of intersection of tangent lines at holding temperature against (T_{p2}*- T_{p2}) was 643 °C which was considered as the optimum nucleation temperature.

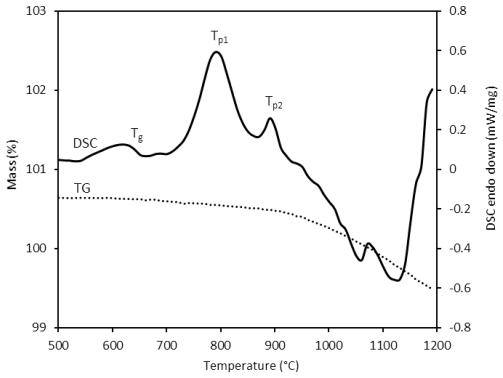


Figure 1 TGA/DSC curves of the GCF3.5

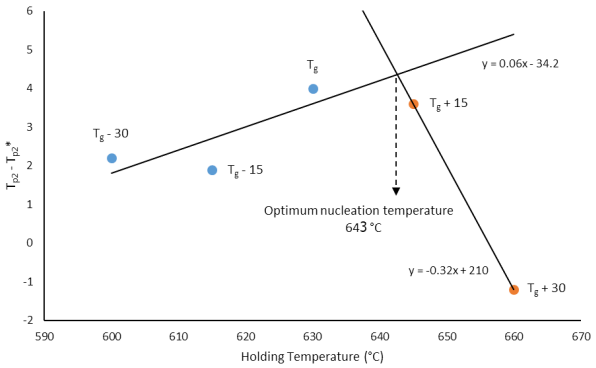


Figure 2 The optimum nucleation temperature of GCF3.5

2. XRD analysis

Figure 3 exhibits the XRD patterns of all prepared glass-ceramics. It presented that the major phases were calcium-mica ($CaMg_6Al_2Si_6O_{20}F_4$), fluorapatite ($Ca_5(PO4)_3F$) and silicon oxide (SiO_2) incorporated with strontiumapatite ($Ca_5(PO_4)_3Sr$), anorthite ($CaAl_2Si_2O_8$), forsterite (Mg_2SiO_4), cordierite ($Mg_2Al_4Si_5O_{18}$) and strontium aluminium silicate ($SrAl_2Si_2O_8$) as the minor phases. The addition of CeO_2 and Fe_2O_3 did not affect to chemical composition of specimens. It was found that the increasing addition of CeO_2 and Fe_2O_3 caused the relative intensity of calcium-mica, fluorapatite and silicon dioxide crystalline phases to be decreased.

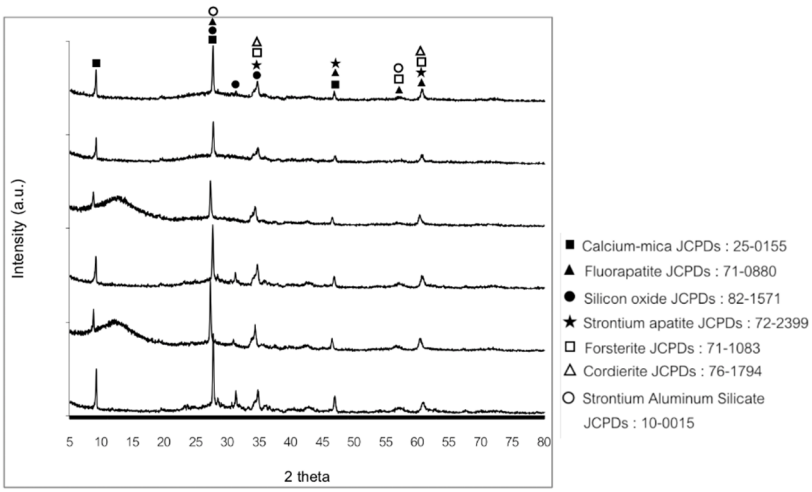


Figure 3 X-ray diffraction patterns of the various glass-ceramics after heat treatment.

3. SEM analysis

The SEM micrographs of the glass-ceramic specimens are revealed in Figure 4 (a)-(f) which illustrates the microstructures of GCF3.5, F1, F2, C1, CF1 and CF2 glass-ceramics, respectively. The samples were etched with 10% HF solution.

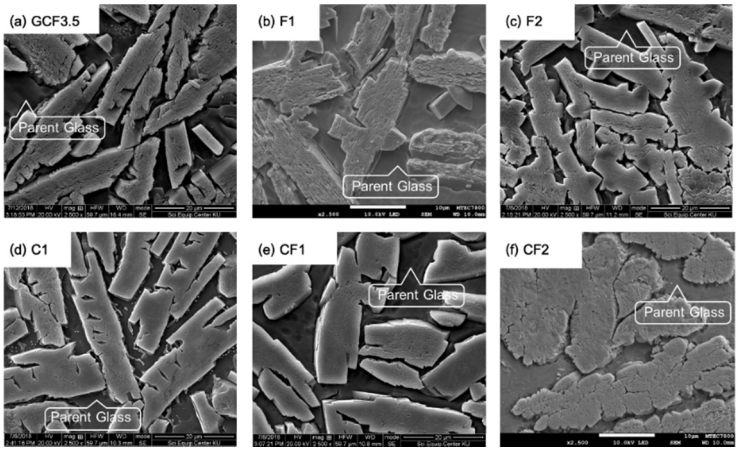


Figure 4 SEM micrographs of polished and chemically etched surfaces of (a) GCF3.5, (b) F1, (c) F2, (d) C1, (e) C1 and (f) CF2

The crystals performed uniformly and randomly distributed in the parent glass shown in Figure 4. The grain size of crystals approximately less than 10 μm were observed. Crystals are plate-like and rod-like shape having aspect ratio >1 which means height is longer than width leading to appropriate machinability. It shows the interlocking plate-like mica grains structure of all specimens. The machinability can be improved at the highest concentrations of mica and wherein has plate-like grains with a grain size smaller than 5 μm (Noort *et al.*, 2012).

4. Mechanical properties

Mica-based glass-ceramics are summarized their strength and hardness in Tables 2 and 3. The biaxial flexural strength of the glass-ceramics was in a range from 100.1 to 109.3 MPa. It can be seen that the best BFS value obtained was from the CF2 1 wt% of CeO_2 and 0.2 wt% of Fe_2O_3 of a value 109.31 MPa. The metal oxide addition did not significantly affect the strength of glass-ceramics. For biaxial flexural strength of all formulae, it was acceptable as dental ceramic type II class 2b as partially or fully covered substructure ceramic for single-unit anterior or posterior prostheses adhesively cemented.

Table 2. Biaxial flexural strength values of specimens with varied colorants and dental ceramics on ISO 6872:2015 (International Organization for Standardization, 2015)

Biaxial flexural strength (MPa)	GCF3.5	F1	F2	C1	CF1	CF2	Class1	Class2	Class3
Mean	105.24	106.76	100.68	105.23	100.17	109.31	50	100	300
(SD)	(±9.92)	(±15.63)	(±6.74)	(±11.38)	(±9.83)	(±18.47)			

Table 3. Micro hardness values of specimens with varied colorants and enamel and dentin of natural teeth. (Chun *et al*., 2004)

Hardness (HV)	Enamel	Dentin	GCF3.5	F1	F2	C1	CF1	CF2
Mean	365.45	71.93	406.09	425.3	402.2	559.6	505.5	699.2
(SD)	(±49.22)	(±6.75)	(±18.04)	(±17.80)	(±15.7)	(±24.0)	(±24.0)	(±19.11)

The microhardness of glass-ceramics in the range from 402.2 to 699.2 HV. Vickers hardness of all glass-ceramics both added and non-added color pigments exhibits higher value than that of enamel and dentin of natural teeth. The addition of CeO_2 leads to increasing micro hardness which can be seen if the values of GCF3.5 and C1 are compared. The highest microhardness value obtained was for the material that has 1 wt% of CeO_2 mixed with 0.2 wt% of Fe_2O_3 (CF2) with a value 699.2 HV due to high transparency and abundant proportion of parent glass, which the area is harder than crystalline zone, so when the probe contact to parent glass the value of hardness gives higher than that of crystalline one.

5. Colorimeter

The color of glass-ceramics was measured in the visible light region between 400 and 700 nm range, in order for acceptable colors for restorative dental materials. They should be displayed in yellow to reddish yellow shade. The quantity of pigments and the process of heat treatment are needed to be

controlled. The appearances and the contrast ratio (CR) of 2 mm thick specimens after crystallization are shown in Figure 5. The color of shade of specimens by CeO_2 (C1) would give yellow shade in glass-ceramics. The combination of CeO_2 and Fe_2O_3 (CF1 and CF2) in mica-based glass-ceramics would show a reddish-yellow color and increase the translucency as shown in Figure 5. After crystallization, the CR was approximately 72% for GCF3.5 and decreased to 58-75% for the glass-ceramics with metal oxides. The translucency of glass-ceramics reduces when CR value increases (Seidel *et al*., 2017). The smaller particle size and uniform dispersion of particles in glass-ceramics give the more effective of the opacity. The opacity is found increasing as the number of reflecting particles per unit volume increases (Noort *et al*., 2012; Han *et al*., 2018). Moreover, it was found that the translucency of glass-ceramics with metal oxides (F1, C1, CF1 and CF2) was slightly lighter than that of GCF3.5.

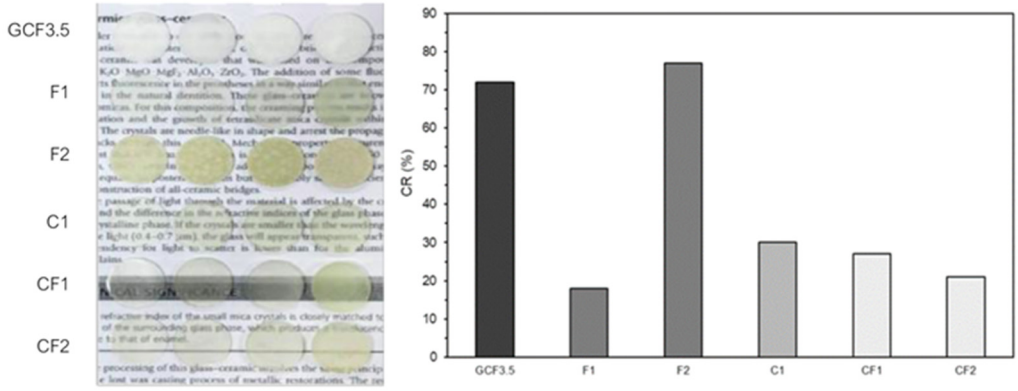


Figure 5 CR values of the GCF3.5, F1, F2, C1, CF1 and CF2 specimens.

CONCLUSION

CeO_2 and Fe_2O_3 addition into glass-ceramic presented a significant effect for the modification in color and translucency. The microstructures consist of mica crystals and parent glass spreading among the glass-ceramic structure in sort of interlocked plate-like microstructure of mica which affects to the machinability. The chemical compositions did not change by adding the metal oxides into glass-ceramics which confirmed by XRD. All glass-ceramics displayed the hardness values which were higher than that of enamel of natural tooth and the biaxial flexural strength that was in the range of acceptance according to Dentistry-Ceramic materials ISO 6872:2015 type II class 2b. It meant that it could be used for restorative dental materials as partially or fully covered substructure ceramic for single-unit anterior or posterior prostheses adhesively cemented.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank the Graduate School, Kasetsart University Research and Development Institute (KURDI) and Faculty of Engineering, Kasetsart University for research funding and scholarship for students. Furthermore, we would like to thank Faculty of Dentistry, Mahidol University and National Metal and Materials Technology Center for providing analytical instruments and work-places.

REFERENCES

Chun, K. J., H. H. Choi and J. Y. Lee. 2014. Comparison of Mechanical Property and Role between Enamel and Dentin in the Human Teeth. **Journal of Dental Biomechanics**. 5: 1758736014520809.

Garai, M. and B. Karmakar. 2016. Rare Earth Ion Controlled Crystallization of Mica Glass-Ceramics. **Journal of Alloys and Compounds**. 678: 360-369.

Ghasemzadeh, M., A. Nemati and S. Baghshahi. 2012. Effects of Nucleation Agents on the Preparation of Transparent Glass–Ceramics. **Journal of the European Ceramic Society**. 32(11): 2989-2994.

Han, L., J. Song, Q. Zhang, Z. Luo and A. Lu. 2018. Crystallization, Structure and Characterization of Mgo-Al2o3-Sio2-P2o5 Transparent Glass-Ceramics with High Crystallinity. **Journal of Non-Crystalline Solids**. 481: 123-131.

International Organization for Standardization. 2015. **ISO 6872:2015(E) Dentistry - Ceramic materials.**

Khani, V., P. Alizadeh and M. S. Shakeri. 2013. Optical Properties of Transparent Glass–Ceramics Containing Lithium–Mica Nanocrystals: Crystallization Effect. **Materials Research Bulletin**. 48(9): 3579-3584.

Liu, X., J. Zhou, S. Zhou, Y. Yue and J. Qiu. 2018. Transparent Glass-Ceramics Functionalized by Dispersed Crystals. **Progress in Materials Science**. 97: 38-96.

Marotta, A., A. Buri and F. Branda. 1981. Nucleation in Glass and Differential Thermal Analysis. **Journal of Materials Science**. 16(2): 341-344.

Mukherjee, D. P. and S. K. Das. 2016. Influence of Tio2 Content on the Crystallization and Micro structure of Machinable Glass-Ceramics. **Journal of Asian Ceramic Societies**. 4(1): 55-60.

Niyompan, A., S. Phumas, R. Tipakontitikul and T. Tunkasiri. 2013. Phase Formation, Microstructure and Electrical Properties of Mica Glass-Ceramics Containing Cr2o3 Produced by Heat Treatment. **Ceramics International**. 39: 427-431.

Noort, E. E.-M. a. R. v. 2012. **Glasses and Glass Ceramics for Medical Applications**. 1. Springer-Verlag New York.

Seidel, S., M. Dittmer, W. Höland and C. Rüssel. 2017. High-Strength, Translucent Glass-Ceramics in the System Mgo-Zno-Al2o3-Sio2-Zro2. **Journal of the European Ceramic Society**. 37(7): 2685-2694.

Srichumpong, T., K. Suputtamongkol., W. Chinpanuwat, P. Nampachoke, J. Bai, S. Angkulpipat, S. Prasertwong and D. Chaysuwan. 2016. Effect of Heat Treatment Time on Properties of Mica-Based Glass-Ceramics for Restorative Dental Materials. **Key Engineering Materials**. 702: 23-27.

Taruta, S., Y. Iwasaki, H. Nishikiori, T. Yamakami, T. Yamaguchi, K. Kitajima and K. Okada. 2012. Microstructures and Luminescent Properties of Ce-Doped Transparent Mica Glass-Ceramics. **Materials Science and Engineering: B**. 177(7): 504-509.

Wang, P., L. Yu, H. Xiao, Y. Cheng and S. Lian. 2009. Influence of Nucleation Agents on Crystallization and Machinability of Mica Glass–Ceramics. **Ceramics International**. 35(7): 2633-2638.

การศึกษาความเร็วของขบวนรถไฟฟ้า Airport Rail link ที่ใช้ในการเข้าโค้งบริเวณระหว่างสถานีลาดกระบังและสถานีสุวรรณภูมิ เพื่อป้องกันมิให้เกิดค่า Cant Excess ที่เกินกว่าค่ามาตราฐาน

The Study of Curving Speeds for an SRTET Train to Operate between Lat Krabang and Suvarnabhumi Airport Stations for Preventing Excessive Cant Excess Values

ณศิษฎ์ จีระพันธุ[1*] ธัญญะ เกียรติวัฒน์[1] และ วิชัย ศิวะโกศิษฐ[1]

Nasid Chirabhundhu[1*], Thanya Kiatiwat[1] and Wichai Siwakosit[1]

บทคัดย่อ

การศึกษานี้เป็นการศึกษาความเร็วของขบวนรถไฟฟ้า Airport Rail link ที่ใช้ในการเข้าโค้ง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในด้านความปลอดภัย และด้านระบบการเดินรถ โดยศึกษาจากโค้งบริเวณระหว่างสถานีลาดกระบังและสถานีสุวรรณภูมิ ซึ่งมีลักษณะเป็นโค้งที่มีการเปลี่ยนรัศมี โดยมีรัศมีโค้ง(Radius) ที่ 180 เมตร และ 1000 เมตร และมีระยะยกราง(Cant) ที่ 130 มิลลิเมตร และ 1000 มิลลิเมตร ตามลำดับ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดค่า Cant Excess ที่เกินกว่าค่ามาตรฐาน ผลการศึกษาพบว่าควรจะใช้ความเร็วที่ 52 กิโลเมตรต่อชั่วโมง หรือเข้าโค้งที่ความเร็วเท่ากับ Equivalent Speed เพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐาน และไม่เกิดการถ่ายเทน้ำหนักที่ไม่สมดุล

ABSTRACT

The study of curving speeds for an SRTET train for increasing an efficiency of safety and operation. This study take place at the curve between Lat Krabang station and Suvarnabhumi Airport Station, that classified as continuous curve by the radius of 180 and 1000 meter and the cant of 130 and 1000 millimeter respectively. This study aimed to preventing excessive Cant Excess values and had found that a curving speed of 52 km/hr should be used to prevent excessive cant excess or an equivalent speed profile should be utilized for eliminating unbalanced weight transfer.

Key words: Speed/Velocity, track, train, airport rail link, cant excess

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

[1]ศูนย์วิศวกรรมระบบราง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร 10900

[1]KURAIL, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Thailand

คำนำ

ในปัจจุบันการขนส่งทางรางถือว่าเป็นที่ยอมรับและเป็นตัวเลือกอันดับต้นๆในการแก้ปัญหาด้านการคมนาคม และการขนส่ง อาทิ เช่น ปัญหาด้านการจราจรในปัจจุบันมีจำนวนผู้ใช้รถ ใช้ถนนเพิ่มสูงขึ้น ปัญหาด้านความปลอดภัยของการเดินทางระยะไกล รวมไปถึงปัญหาค่าครองชีพที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อราคาเชื้อเพลิง ดังนั้นการศึกษาความเร็วที่เหมาะสมที่ใช้ในการเข้าโค้งของรถไฟ จะเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในหลายๆด้าน ทั้งด้านความปลอดภัยของผู้ใช้บริการ การใช้เวลาในการขนส่งผู้โดยสาร ซึ่งความเร็วในการเข้าโค้งนั้นก็เป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบอาจทำให้เวลาในการขนส่งผู้โดนสารล่าช้าได้

ในการเข้าโค้งของรถไฟนั้น จะมีการยกโค้งเพื่อชดเชยแรงหนีศูนย์กลาง เพื่อลดผลของแรงที่จะทำให้เกิดการถ่ายน้ำหนักไปที่ล้อรถไฟที่กดรางฝั่งนอกโค้ง โดยมีการกำหนดค่ายกโค้ง หรือ Cant ให้สอดคล้องกับรัศมีโค้ง ซึ่งเวลาเข้าโค้งนั้นจะเกิด Cant excess เมื่อใช้ความเร็วในการเข้าโค้งต่ำ ซึ่งในสวีเดนมีการกำหนดมาตรฐานไว้ ไม่ให้ค่าของ Cant excess เกินกว่า 70 มิลลิเมตร (Andersson, 2014) ซึ่งการที่เข้าโค้งที่มี Cant excess ส่งผลเสียที่หลากหลายประการ ไม่ว่าจะเป็นเรื่องการถ่ายเทน้ำหนักที่จะทำให้น้ำหนักลงที่ล้อด้านนอกน้อย และส่งผลให้ล้อปีนราง หรือ ตกรางได้ หรือจะเป็นการทำให้เกิดการสึกหรอที่ล้อ และรางด้านในที่มากกว่าปกติ ส่งผลให้ระยะเวลาในการซ่อมบำรุงเพิ่มมากขึ้น โดยการเกิด Cant Excess นั้นยังมีแนวโน้มที่จะส่งผลเสียต่อโครงสร้างหลักของทางวิ่งรถไฟ (Valehrach, 2017)

การศึกษานี้ มีแนวคิดที่จะหาความเร็วที่เหมาะสม เพื่อไม่ให้เกิดค่า Cant Excess ที่เกินกว่าค่ามาตรฐานขณะเข้าโค้ง และเพิ่มประสิทธิภาพในการขนส่งผู้โดยสารและความปลอดภัย

อุปกรณ์และวิธีการ

การเข้าโค้งแบบโค้งเปลี่ยนรัศมี

การเข้าโค้งมีหลายลักษณะแตกต่างกันออกไป ซึ่งลักษณะของโค้งต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 1 (Figure 1) (Siwakosit, 2018) โดยการศึกษานี้เป็นการศึกษาโค้งที่มีการเปลี่ยนรัศมีจากโค้งแรกที่มีรัศมี 180 เมตร สู่โค้งที่มีรัศมี 1000 เมตร โดยการเข้าโค้งลักษณะนี้จะมีช่วงที่เป็นโค้งต่อ อยู่สามช่วง

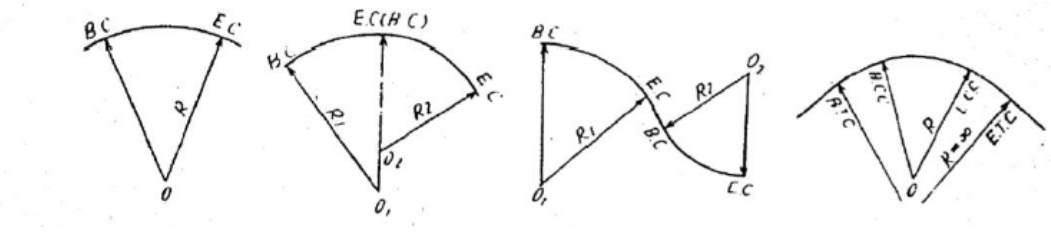


Figure 1 Track Curves (Siwakosit, 2018)

โค้งต่อ (Transition Curve)

โค้งต่อ หรือ Transition Curve หรือ Spiral Curve เป็นแนวของทางรถไฟในช่วงที่มีการเปลี่ยนจากทางตรงไปสู่ทางเข้าโค้ง หรือทางโค้งไปสู่ทางตรง ซึ่งมีรัศมีที่แปรผันจากค่าอนันต์ที่ติดต่อกับทางตรง และเป็นรัศมีเท่ากับรัศมีของโค้งแนวราบที่จุดต่อกับทางโค้ง เพื่อให้แรงหนีศูนย์กลางค่อยๆเพิ่มสู่ตัวรถ ซึ่งค่าความโค้งต่อ 1/R

และค่ายกโค้งในช่วงโค้งต่อสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ(Siwakosit, 2018) ซึ่งเป็นฟังค์ชั่นของระยะตามแนวกึ่งกลางทางรถไฟ S

$$\frac{1}{R}(s) = \frac{S}{L_S R_C} \quad (1)$$

และ

$$c(s) = \frac{SC_C}{L_S} \quad (2)$$

Where R = Radius (m)

S = Displacement (m)

C = Cant (mm)

L = Curve length (m)

การยกโค้ง (Cant)

ในการเข้าโค้งของรถไฟนั้น จะมีการยกโค้งเพื่อชดเชยแรงหนีศูนย์กลาง และจะส่งผลให้เกิดการถ่ายเทน้ำหนักสู่ล้อรถไฟที่กดรางฝั่งด้านนอก ซึ่งจะมีการกำหนดค่ายกโค้งหรือ Cant ให้สอดคล้องกับรัศมีโค้ง หากรัศมีโค้งมีค่าน้อย ค่ายกโค้งจะมาก และจะตรงกันข้ามกันกับโค้งที่มีค่ารัศมีมาก ซึ่งจะมีแรงที่เกี่ยวพันในการเข้าโค้ง ดังแสดงในรูปที่ 2

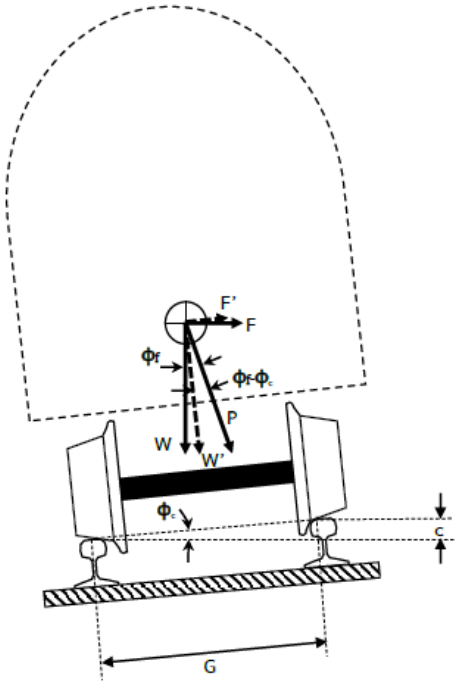


Figure 2 Forces occur due to Curve (Siwakosit, 2018)

ความเร็วสมดุล (Balancing Speed)

การเข้าโค้งที่ความเร็วสมดุล (Balancing Speed หรือ Equivalent Speed) คือความเร็วที่ใช้ในการเข้าโค้งที่ Actual Cant ซึ่งจะไม่เกิด Cant Excess โดยสมการของ Balancing Speed จากสมการที่(3) (Andersson *et al*, 2014) จะแปลผันกับ R หรือรัศมี

$$V_{eq} = \sqrt{\frac{R \times g \times h_t}{G}} \quad (3)$$

Where V_{eq} = Equivalent velocity (m/s)

g = Gravitational acceleration (m/s^2)

h_t = Track cant (m)

G = Gauge (m)

Equivalent Cant

Equivalent Cant(C_{eq}) คือค่าของการยกโค้งที่คำนวณจากสมการที่(4) (Andersson *et al*, 2014) โดยใช้ ความเร็วที่ Balancing Speed การเข้าโค้งที่ ค่ายกโค้งนี้ จะไม่ก่อให้เกิด Lateral Force กับตัวรถ

$$C_{eq} = \frac{G \times V^2}{g \times R} \quad (4)$$

Cant Excess

เมื่อรถไฟเข้าโค้งที่ต่ำกว่า Balancing Speed จะก่อให้เกิด Cant Excess(C_{ex}) โดยจากสมการที่(5) (Andersson *et al*, 2014)

$$C_{ex} = C_a - C_{eq} \quad (5)$$

Track Plane Acceleration

ในกรณีของ Quasistatic Curving นั้น จะมีความเร่งที่สัมผัสกับตัวรถ 2 ชนิด ได้แก่ แรงโน้มถ่วง **g** และความเร่งที่ขนานไปกับแนวทางวิ่ง (track plane) a_y ซึ่งค่าของ a_y แปรผันตรงกับ ค่าความเร็ว (**v**), รัศมี (**R**) และ ค่ายกโค้ง (h_t) ตามสมการที่(6) (Andersson *et al*, 2014)

$$a_y = \frac{v^2}{R} - g \cdot \frac{h_t}{G} \quad (6)$$

Quasistatic loads

ในขณะเข้าโค้งการถ่ายเทน้ำหนักระหว่างล้อทั้งสองข้างของรถจะเปลี่ยนไปหากรถไม่ได้วิ่งที่ Balancing Speed ซึ่งคำนวณได้ตามสมการที่(7) (Andersson *et al*, 2014)

$$Q_c = \frac{\text{axle load}}{G*g}(a_y h_{cg} + g\Delta y) \quad (7)$$

Where Δy = Lateral displacement (m)

h_{cg} = Nominal Center of Gravity Height from Top of Rail (m)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในปัจจุบันรถไฟฟ้า Airport Rail link บริเวณโค้งระหว่างสถานีลาดกระบังและสุวรรณภูมิ ที่ความเร็วคงที่ประมาณ 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งมีค่าความโค้ง 1/R และค่ายกโค้ง Cant ระหว่างสถานีลาดกระบังและสุวรรณภูมิ โดยค่าดังกล่าวคำนวณจากสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับซึ่งได้ผลตามรูปที่ 3 (Figure 3)

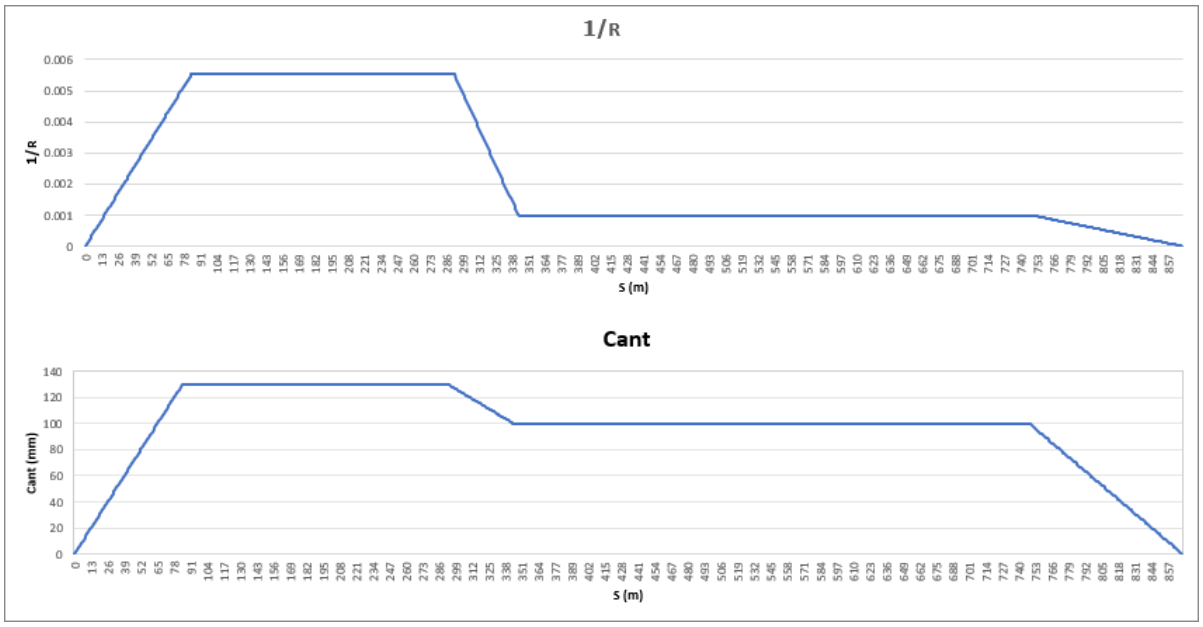


Figure 3 The relation between 1/R and Cant

จากรูปที่ 4 (Figure 4)กราฟแสดงผลการคำนวณจากสมการที่ (5) จะเห็นว่าค่า Cant Excess ของการเข้าโค้งที่ความเร็ว 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ในช่วงรัศมีโค้งที่ 1000 เมตร เกินกว่ามาตราฐานที่กำหนดไว้ 70 มิลลิเมตร

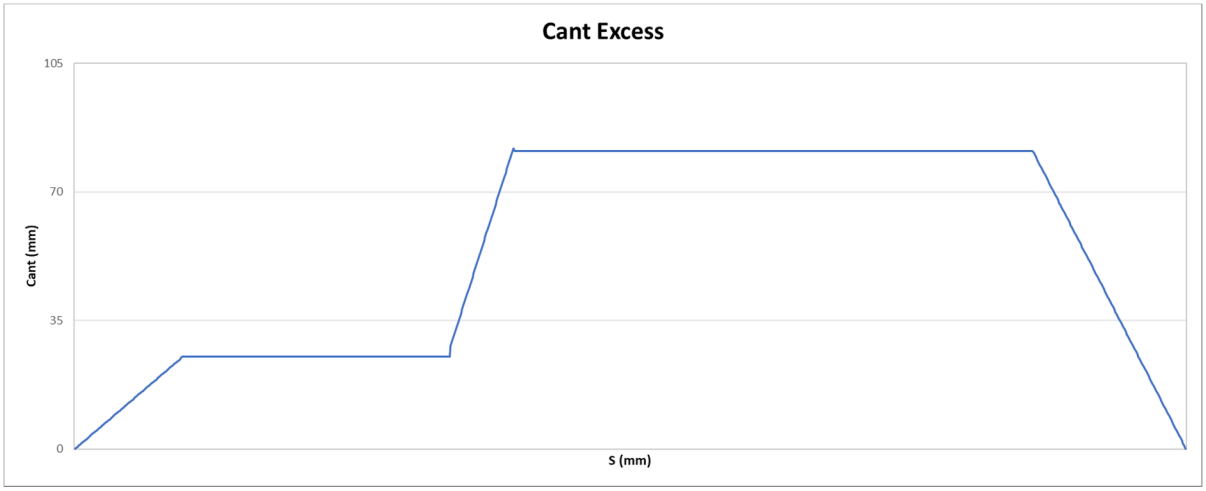


Figure 4 Cant Excess due to the speed of 40 Kilometer per hour

การเกิด Cant Excess ยังส่งผลให้ค่า Track Plane Acceleration เป็นลบจากการคำนวณจากสมการที่ (6) ดังแสดงในรูป 5 (Figure 5)และ Track plane acceleration ยังส่งผลต่อค่าการถ่ายเทน้ำหนักที่ได้จากสมการที่ (7) หรือ Quasistatic ดังแสดงในรูป 6 (Figure 6)

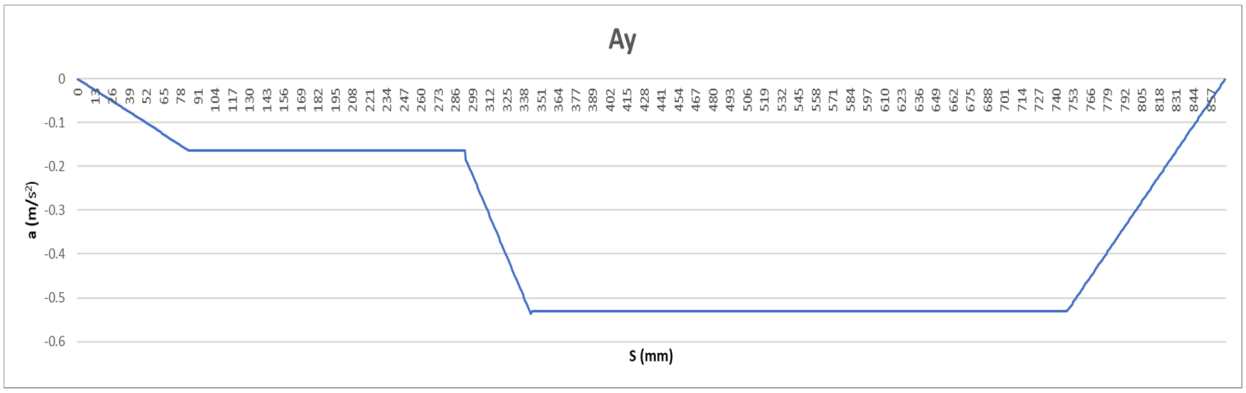


Figure 5 Track Plane Acceleration

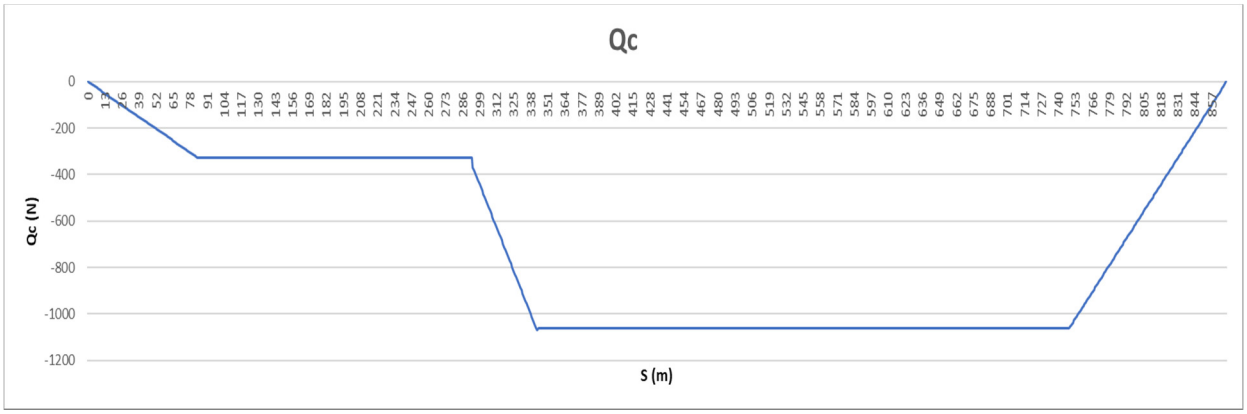


Figure 6 Quasistatic loads

การคำนวณหาค่าความเร็วที่เหมาะสมโดยใช้วิธีการนำความเร็วในช่วง 40 – 100 กิโลเมตรต่อชั่วโมงมาคำนวณให้ได้ค่าความเร็วที่เหมาะสมที่สุดเพื่อปรับปรุงค่า Cant excess ให้เป็นไปตามมาตรฐาน ซึ่งการเข้าโค้งของรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตเรลลิ้งอาจดำเนินการดังนี้

1. ให้ใช้ความเร็วเข้าโค้งคงที่ที่ 52 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เพื่อลดค่า Cant Excess ที่โค้งรัศมี 1000 เมตร ให้มีค่าตามมาตรฐานที่ประมาณ 70 มิลลิเมตรได้ดังแสดงในรูป7 (Figure 7) หรือ

2.ใช้ความเร็วที่ Equivalent Velocity ซึ่งความเร็วนี้จะไม่ก่อให้เกิด Cant Excess และ Cant Deficiency จะได้ Velocity Profile ดังที่แสดงในรูป 8 (Figure 8)



Figure 7 Cant Excess due to the speed of 52 Kilometer per hour

สรุป

การเข้าโค้งที่มีค่ายกโค้งสูง ด้วยความเร็วที่ต่ำ ก่อให้เกิด Cant Excess ส่งผลเสียที่หลากหลายประการนั้น และยังทำให้เวลาในการขนส่งล่าช้าลงกว่าที่ควร ซึ่งปัจจุบัน Airport Rail link ใช้ความเร็วในการเข้าโค้งที่ต่ำก่อให้เกิด Cant Excess ในช่วงโค้งรัศมี 1000 เมตร ซึ่งจากการศึกษาพบว่าควรจะใช้ความเร็วที่ 52 กิโลเมตรต่อชั่วโมง หรือเข้าโค้งที่ความเร็วเท่ากับ Equivalent Speed เพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐาน และไม่เกิดการถ่ายเทน้ำหนักที่ไม่สมดุล

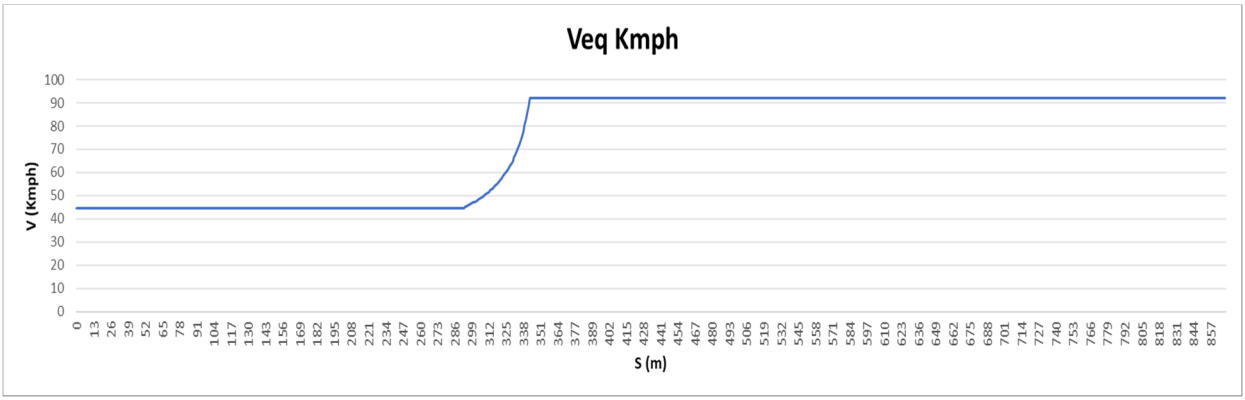


Figure 8 Equivalent Velocity Profile

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ 1. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล 2. บริษัท รถไฟฟ้า ร.ฟ.ท.จำกัด

เอกสารอ้างอิง

Siwakosit W. 2018. **Lecture Note for 01200432 Rolling Stock Technology Class**. Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok, Thailand.

Andersson E., Berg M., and Stichel S. 2014. **Rail Vehicle Dynamics**. KTH Railway Group, Stockholm, Sweden

Valehrach J., Riha T. and Dusek E. 2017. **Cant excess and cant deficiency evaluation in relation to train speed.** Faculty of Civil Engineering, Brno University of Technology, Czech Republic

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการดำเนินการก่อสร้างวางท่อจ่ายน้ำประปาบริเวณเขตพื้นที่ของการประปานครหลวง

Factors Affecting Water Pipeline Construction in the Area of Metropolitan Waterworks Authority

เพชร ศรีเพ็ชร์[1] ก่อโชค จันทวรางกูล[1*] และ ธิดารัตน์ จิระวัฒนาสมกุล[1]

Petchr Sripech[1], Korchok Chanthawarangul[1*] and Tidarut Jirawattanasomkul[1]

บทคัดย่อ

ปัจจุบัน ผู้ใช้บริการน้ำในพื้นที่ของการประปานครหลวงมีจำนวนเพิ่มขึ้น จึงจำเป็นต้องก่อสร้างวางท่อจ่ายน้ำประปา ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีจุดมุ่งหมาย เพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อการดำเนินการก่อสร้างวางท่อจ่ายน้ำในเขตพื้นที่ของการประปานครหลวง โดยกำหนดปัจจัยเป็น 7 ด้าน ประกอบด้วย ปัจจัยด้านสภาพพื้นที่ก่อสร้าง, แบบก่อสร้าง, การประสานงาน, แรงงานก่อสร้าง, เครื่องจักร และอุปกรณ์, การจัดการวัสดุ และการเงิน และทำการเก็บรวบรวมข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่าง ซึ่งแบ่งเป็นกลุ่มผู้บริหารงาน 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 กลุ่มของการประปานครหลวง และกลุ่มที่ 2 กลุ่มของผู้รับเหมาก่อสร้าง จากผลการสำรวจพบว่าปัจจัยที่มีผลกระทบมากที่สุด คือ ปัจจัยด้านสภาพพื้นที่ก่อสร้าง ในขณะที่ปัจจัยด้านปัญหาจากการประสานงาน และ ปัจจัยด้านปัญหาของแบบแปลนงานก่อสร้าง เป็นปัจจัยรองลงมาเป็นอันดับ 2 และ 3 ซึ่งสาเหตุที่พบบ่อยครั้งที่สุดคือพื้นที่ก่อสร้างมีการจราจรหนาแน่น โดยการจัดหาเส้นทางจราจรทดแทนอาจจะช่วยแก้ไขปัญหาได้

ABSTRACT

Currently, the number of water users in the area of Metropolitan Waterworks Authority (MWA) has increased; therefore, it is necessary to construct water pipelines. This research is conducted to study factors affecting water pipeline construction in the area of MWA. This research shows the studies of 7 factors affecting such construction including factor of construction area, construction drawing, collaboration, manpower, machine and equipment, material management and financing. Questionnaires are used to collect sample data which set in 2 groups of management team. First is MWA. Second is contractor. The experimental results reveal that top 3 ranking factors are as follow. First is construction area, second is collaboration and third is Construction Drawing. The most often cause is Construction area has heavy traffic, Detour route may help solve the problem.

Key Words: factors affecting, water pipeline construction, metropolitan waterworks authority

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

[1]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

[1]Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

คำนำ

การประปานครหลวงเป็นรัฐวิสาหกิจที่มีหน้าที่ ผลิต จัดส่ง และจำหน่ายน้ำประปาในเขตท้องที่กรุงเทพมหานคร จังหวัดนนทบุรี และจังหวัดสมุทรปราการ และควบคุมมาตรฐานเกี่ยวกับระบบประปาเอกชนในเขตท้องที่ดังกล่าว (พระราชบัญญัติการประปานครหลวง, 2510) ซึ่งในปัจจุบันพบว่าผู้ใช้น้ำมีจำนวนเพิ่มมากเป็น 2,328,598 ราย (รายงานประจำปี 2560 การประปานครหลวง, 2560) จึงจำเป็นต้องปรับปรุงท่อ และก่อสร้างวางท่อจ่ายน้ำเพิ่มเติมเพื่อรอรับเหตุดังกล่าว ซึ่งในการก่อสร้างสามารถแบ่งวงจรชีวิตของโครงการออกเป็น 4 ช่วง คือ ช่วงกำหนดโครงการ ช่วงการวางแผน ช่วงปฏิบัติการโครงการ และช่วงการส่งมอบโครงการ (Gray and Larson, 2006) โดยระหว่างการก่อสร้างวางท่อจ่ายน้ำประปานั้น ต้องพิจารณาข้อจำกัดของงานก่อสร้าง เพื่อช่วยในการวางแผนกิจกรรมของงาน (พนม, 2550) รวมไปถึงปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อการก่อสร้างวางท่อจ่ายน้ำประปา ที่จะทำให้การดำเนินงานไม่เป็นไปตามเป้าหมายของโครงการ ซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบสำคัญ 3 อย่าง คือ ต้นทุน คุณภาพ และเวลา (วิสูตร, 2548)

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการดำเนินการก่อสร้างวางท่อจ่ายน้ำในเขตพื้นที่ของการประปานครหลวงทั้งหมด 7 สาขา โดยกลุ่มตัวอย่างจำแนกเป็น 2 กลุ่มตัวอย่าง คือ กลุ่มที่ 1 กลุ่มผู้บริหารงานของการประปานครหลวง และกลุ่มที่ 2 กลุ่มผู้บริหารงานของผู้รับเหมา ซึ่งผลที่ได้รับจากงานวิจัยฉบับนี้พบว่าปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการดำเนินการก่อสร้างวางท่อจ่ายน้ำบริเวณเขตพื้นที่ของการประปานครหลวงมากที่สุด คือ ปัจจัยด้านสภาพพื้นที่ก่อสร้าง ในขณะที่ปัจจัยด้านปัญหาจากการประสานงาน และ ปัจจัยด้านปัญหาของแบบแปลนงานก่อสร้าง เป็นปัจจัยรองลงมาเป็นอันดับ 2 และ 3 โดยมีค่าผลกระทบของปัจจัยเฉลี่ยเท่ากับ 11.71, 9.06 และ 8.33 ตามลำดับ

อุปกรณ์และวิธีการ

ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

กลุ่มประชากรในการวิจัยนี้ จำแนกเป็น 2 กลุ่ม ดังต่อไปนี้

กลุ่มที่ 1 กลุ่มของตัวแทนเจ้าของงาน คือ ผู้บริหารงานก่อสร้างวางท่อจ่ายน้ำของการประปานครหลวง ซึ่งประกอบด้วยบุคลากรที่ทำหน้าที่ควบคุมและบริหารงานก่อสร้างในเขตพื้นที่ของการประปานครหลวง รวม 7 สำนักงานประปาสาขา ดังนี้ สุวรรณภูมิ, นนทบุรี, บางเขน, ประชาชื่น, พญาไท, มีนบุรี และลาดพร้าว ซึ่งมีกลุ่มประชากรทั้งสิ้น 173 คน

กลุ่มที่ 2 กลุ่มตัวแทนของผู้รับเหมา คือ ผู้บริหารงานของผู้รับเหมาก่อสร้างวางท่อจ่ายน้ำของการประปานครหลวง โดยทั่วไปจะประกอบด้วย 5 หน้าที่หลัก คือ วางแผน จัดองค์กร จัดคนเข้าทำงาน สั่งการ และควบคุม (ประกอบ, 2555) ซึ่งได้ขึ้นทะเบียนไว้กับการประปานครหลวง มีกลุ่มประชากรทั้งสิ้น 1,413 คน

ในงานวิจัยนี้ ใช้วิธีการเลือกกลุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง (Purposive sampling) ตามหลักการกำหนดกลุ่มตัวอย่าง (กัลยา, 2542) โดยกลุ่มตัวอย่างที่ทำการศึกษาเป็นบุคคลากรที่เคยบริหารงานก่อสร้างวางท่อจ่ายน้ำของการประปานครหลวงที่มูลค่าโครงการขนาด 5 – 15 ล้านบาท ในแต่ละเขตพื้นที่สำนักงานประปาสาขา รวม 7 สำนักงานประปาสาขา ดังนี้ สุวรรณภูมิ, นนทบุรี, บางเขน, ประชาชื่น, พญาไท, มีนบุรี และลาดพร้าว รวมกลุ่มตัวอย่างทั้งสิ้น 33 คน

เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บข้อมูล

งานวิจัยนี้ เป็นงานวิจัยเชิงสำรวจโดยใช้แบบสอบถาม (Questionnaire) เป็นเครื่องมือในงานวิจัย เพื่อสอบถามความคิดเห็นต่อปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อการดำเนินการก่อสร้างวางท่อจ่ายน้ำประปาบริเวณเขตพื้นที่ของการประปานครหลวง ประกอบด้วย 3 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1	ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม
ส่วนที่ 2	ความคิดเห็นเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการดำเนินการก่อสร้างวางท่อจ่ายน้ำประปาบริเวณเขตพื้นที่ของการประปานครหลวง
ส่วนที่ 3	ข้อคิดเห็น และข้อเสนอแนะ

การสร้างเครื่องมือวิจัย

ในการสร้างเครื่องมือวิจัย จะเป็นการนำแนวคิดที่ได้จากการศึกษาข้อมูล 2 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 ข้อมูลปฐมภูมิ (Primary Data) เป็นการเก็บข้อมูลจากการสัมภาษณ์จากทั้ง 2 กลุ่มประชากร ส่วนที่ 2 ข้อมูลทุติยภูมิ (Secondary Data) เป็นข้อมูลที่ได้จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และเอกสารการศึกษาต่าง ๆ เพื่อนำมาวิเคราะห์ในการสร้างชุดคำถามของเครื่องมือวิจัย มีการตรวจสอบความความเที่ยงตรงด้านเนื้อหา (Content Validity) โดยนำแบบสอบถามที่สร้างขึ้นไปสอบถามผู้เชี่ยวชาญ และผู้มีประสบการณ์ในการทำงาน จำนวน 3 คน และตรวจสอบความเข้าใจในข้อคำถาม จำนวน 3 คน จึงนำแบบสอบถามที่ได้มาปรับปรุง และนำแบบสอบถามไปทดสอบใช้กับกลุ่มประชากรที่ไม่ใช่กลุ่มตัวอย่าง จำนวน 30 คน เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์แอลฟาของครอนบาค (Cronbach's Coefficient Alpha) (Cronbach, 2003) โดยหาค่าความเชื่อมั่นของแบบสอบถาม (Reliability) ก่อนจึงจะนำแบบสอบถามไปใช้งาน

การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลในงานวิจัยฉบับนี้แบ่งออกเป็นส่วน ดังนี้ ส่วนที่ 1 การวิเคราะห์เชิงพรรณนา (Descriptive Analysis) เป็นการนำข้อมูลที่รวบรวมได้มากวิเคราะห์ทางสถิติ ประกอบด้วย ค่าร้อยละ (Percentage) ค่าเฉลี่ย(Mean) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) ส่วนที่ 2 การวิเคราะห์เชิงปริมาณ (Quantitative Analysis) เป็นการวิเคราะห์ระดับความสำคัญของปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบ โดย

วิเคราะห์ข้อมูลระดับผลกระทบจะคำนวณจากความถี่ของปัญหาที่เกิดขึ้น และค่าความรุนแรงของปัญหาที่เกิดขึ้น (ทวีรัตน์, 2543) ซึ่งมีสูตรดังนี้

ค่าผลกระทบ = ความถี่ของปัญหาที่เกิดขึ้น x ค่าความรุนแรงของปัญหาที่เกิดขึ้น (1)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม

จากการรวบรวมแบบสอบถามส่วนที่ 1 พบว่า กลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่เป็น กลุ่มเพศชาย มีอายุประมาน 31 – 40 ปี ระดับการศึกษาที่พบเป็นระดับปริญญาตรี มีประสบการณ์ทำงานในงานก่อสร้างวางท่อจ่ายน้ำอยู่ในช่วง 5-10 ปี และมากกว่า 20 ปี มีส่วนร่วมในการการบริหารโครงการมากกว่า 10 โครงการ ส่วนของกลุ่มผู้บริหารงานของการประปานครหลวงนั้นมีตำแหน่งล่าสุดอยู่ในกลุ่ม ช่างประจำโครงการ และกลุ่มผู้บริหารงานของผู้รับเหมามีตำแหน่งล่าสุดอยู่ในกลุ่ม ผู้จัดการบริษัท สำหรับมูลค่าสูงสุดของโครงการก่อสร้างวางท่อจ่ายน้ำประปาที่ผู้ตอบแบบสอบถามมีส่วนร่วมนั้น อยู่ที่ประมาณ 11-15 ล้านบาท มีมูลค่าโครงการที่มีส่วนร่วมล่าสุดเฉลี่ยอยู่ที่ 10.78 ล้านบาท และกลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่เป็นกลุ่มที่ร่วมงานกับการประปานครหลวง (table 1)

Table 1 General Information

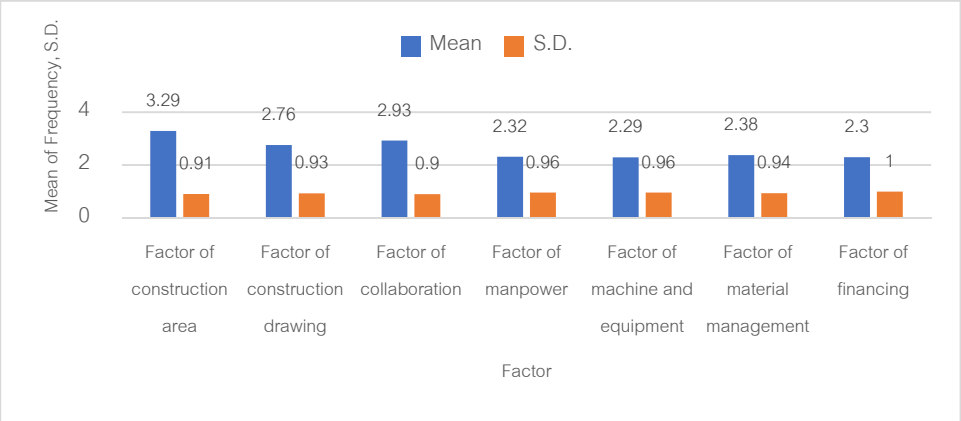
Description		Quantity	Percentage
1. Gender	Male	28	84.85%
2. Age	31 – 40 Years old	15	45.45%
3. Level of Education	Bachelor's degree	19	57.58%
4. Experience in pipeline construction	5-10 Years, Over 20 Years	12	36.36%
5. What is the number of water pipeline construction projects that you have participated in the project management	Over 10 Projects	19	57.58%
6. Latest position in water pipeline construction in the area of Metropolitan Waterworks Authority			
6.1 Part of management team of Metropolitan Waterworks Authority	Foreman	8	42.11%
6.2 Part of management team of Contractor	Company's Manager	5	35.71%
7. The highest Value of water pipeline construction projects that you have participated in the project management	11 – 15 Million Baht	9	27.27%
8. Value of latest pipeline construction project that you involve	Mean is 10,078,485 Baht	38	-
9. Currently, where do you work?	Metropolitan Waterworks Authority	19	57.58%

ผลการวิเคราะห์ความคิดเห็นเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการดำเนินการก่อสร้างวางท่อจ่ายน้ำประปาบริเวณเขตพื้นที่ของการประปานครหลวง

จากการรวบรวมแบบสอบถามส่วนที่ 2 ได้ผลงานวิจัย ดังนี้

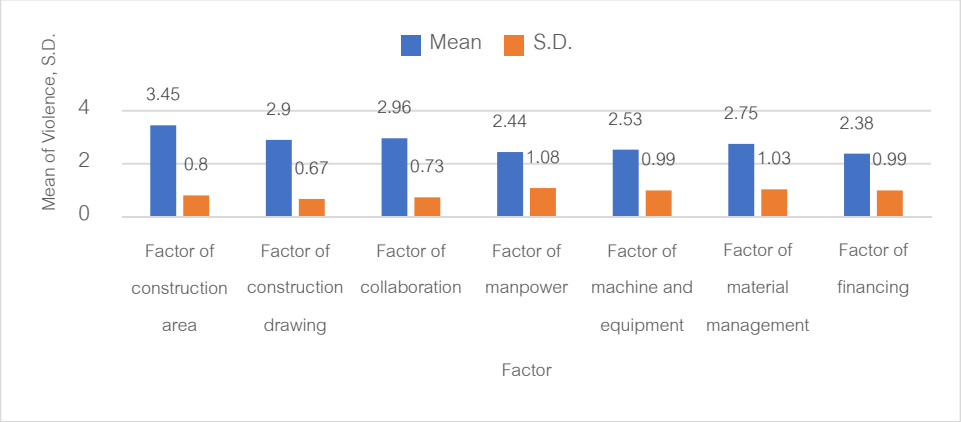
1. การพิจารณาตามระดับความถี่ที่เกิดขึ้นโดยกำหนดเกณฑ์ในการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยของความถี่ตามหลัก ลิเคิร์ทสเกล (Likert, 1961) ดังนี้ ค่าเฉลี่ยของค่าความถี่ระหว่าง 1.00-1.80 มีระดับความเห็นด้วยคือ ไม่เกิดเลย, 1.81-2.60 มีระดับความเห็นด้วยคือ น้อยครั้ง, 2.61-3.40 มีระดับความเห็นด้วยคือ บางครั้ง, 3.41-4.20 มีระดับความเห็นด้วยคือ บ่อยครั้ง และมากกว่า 4.21 มีระดับความเห็นด้วยคือ เป็นประจำ พบว่าสามารถลำดับปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการดำเนินการก่อสร้างวางท่อจ่ายน้ำประปาบริเวณเขตพื้นที่ของการประปานครหลวง ที่พบบ่อยครั้งที่สุดได้ดังนี้ ลำดับที่ 1 คือ ปัจจัยทางด้านสภาพพื้นที่ก่อสร้าง มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 3.29 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน อยู่ที่ 0.91 หมายถึงพบปัญหาดังกล่าวบางครั้ง ลำดับที่ 2 ปัจจัยทางด้านการประสานงาน มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 2.93 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน อยู่ที่ 0.93 หมายถึงพบปัญหาดังกล่าวบางครั้ง ลำดับที่ 3 ปัจจัยทางด้านแบบก่อสร้าง มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 2.76 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน อยู่ที่ 0.90 หมายถึงพบปัญหาดังกล่าวบางครั้ง (Figure 1, Table 2)

Figure 1 Frequency of Factors Affecting Water Pipeline Construction in the Area of Metropolitan Waterworks Authority



2. การพิจารณาตามระดับความรุนแรงที่เกิดขึ้นโดยกำหนดเกณฑ์ในการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยของความรุนแรงดังนี้ ค่าเฉลี่ยของค่าความรุนแรงระหว่าง 1.00-1.80 มีระดับความเห็นด้วยคือ น้อยที่สุด, 1.81-2.60 มีระดับความเห็นด้วยคือ น้อย, 2.61-3.40 มีระดับความเห็นด้วยคือ ปานกลาง, 3.41-4.20 มีระดับความเห็นด้วยคือ มาก และ มากกว่า 4.21 มีระดับความเห็นด้วยคือ มากที่สุด พบว่าสามารถลำดับปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการดำเนินการก่อสร้างวางท่อจ่ายน้ำประปาบริเวณเขตพื้นที่ของการประปานครหลวง ที่รุนแรงที่สุดได้ดังนี้ ลำดับที่ 1 คือ ปัจจัยทางด้านสภาพพื้นที่ก่อสร้าง มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 3.45 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน อยู่ที่ 0.80 หมายถึงมีระดับความรุนแรงมาก ลำดับที่ 2 ปัจจัยทางด้านการประสานงาน มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 2.96 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน อยู่ที่ 0.73 หมายถึงมีระดับความรุนแรงปานกลาง ลำดับที่ 3 ปัจจัยทางด้านแบบก่อสร้าง มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 2.90 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน อยู่ที่ 0.67 หมายถึงมีระดับความรุนแรงปานกลาง (Figure 2, Table 2)

Figure 2 Violence of Factors Affecting Water Pipeline Construction in the Area of Metropolitan Waterworks Authority



3. การพิจารณาตามค่าผลกระทบเกิดขึ้นโดยกำหนดเกณฑ์ในการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยของความรุนแรงดังนี้ ค่าเฉลี่ยของค่าความรุนแรงระหว่าง 1.00-5.80 มีระดับความเห็นด้วยคือ น้อยที่สุด, 5.81-10.60 มีระดับความเห็นด้วยคือ น้อย, 10.61-15.40 มีระดับความเห็นด้วยคือ ปานกลาง, 15.41-20.20 มีระดับความเห็นด้วยคือ มาก และ มากกว่า 20.21 มีระดับความเห็นด้วยคือ มากที่สุด พบว่าสามารถลำดับปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการดำเนินการก่อสร้างวางท่อจ่ายน้ำประปาบริเวณเขตพื้นที่ของการประปานครหลวงได้ดังนี้ ลำดับที่ 1 คือ ปัจจัยทางด้านสภาพพื้นที่ก่อสร้าง มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 11.71 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน อยู่ที่ 4.91 หมายถึงมีผลกระทบระดับปานกลาง ซึ่งมิได้เป็นไปในทิศทางเดียวกับการศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการดำเนินการก่อสร้างงานวางท่อประปาในพื้นที่ชั้นใน กรุงเทพมหานคร ที่ระบุว่าปัจจัยที่มีผลกระทบมากที่สุดคือปัจจัยด้านการเงิน (วรวิทย์, 2549) ลำดับที่ 2 ปัจจัยทางด้านการประสานงาน มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 9.06 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน อยู่ที่ 4.27 หมายถึงมีผลกระทบระดับน้อย ลำดับที่ 3 ปัจจัยทางด้านแบบก่อสร้าง มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 8.33 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน อยู่ที่ 4.11 หมายถึงมีผลกระทบระดับน้อย (Figure 3, Table 2)

Figure 3 Affectation of Factors Affecting Water Pipeline Construction in the Area of Metropolitan Waterworks Authority

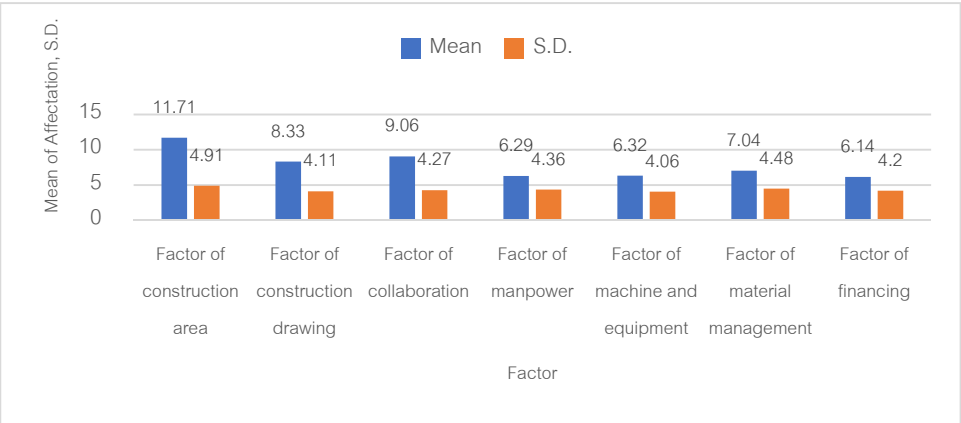


Table 2 Factors Affecting Water Pipeline Construction in the Area of Metropolitan Waterworks Authority

No.	Factors Affecting Water Pipeline Construction in the Area of Metropolitan Waterworks Authority	Frequency		Violence		Affectation	
		Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.
1	Factor of construction area	3.29	0.91	3.45	0.80	11.71	4.91
2	Factor of construction drawing	2.76	0.93	2.90	0.67	8.33	4.11
3	Factor of collaboration	2.93	0.90	2.96	0.73	9.06	4.27
4	Factor of manpower	2.32	0.96	2.44	1.08	6.29	4.36
5	Factor of machine and equipment	2.29	0.96	2.53	0.99	6.32	4.06
6	Factor of material management	2.38	0.94	2.75	1.03	7.04	4.48
7	Factor of financing	2.30	1.00	2.38	0.99	6.14	4.20

สรุป

จากการศึกษากลุ่มตัวอย่างพบว่า ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการดำเนินการก่อสร้างวางท่อจ่ายน้ำบริเวณเขตพื้นที่ของการประปานครหลวง มากที่สุดตามเรียงตามลำดับ 3 ลำดับ ได้ดังนี้ ลำดับที่ 1 คือ ปัจจัยด้านสภาพพื้นที่ก่อสร้าง โดยเกิดจากสาเหตุหลัก 3 ประการคือ 1.พื้นที่ก่อสร้างมีการจราจรหนาแน่น 2.ระบบสาธารณูปโภคใต้ดินอื่น ๆ กีดขวางแนวการก่อสร้าง และ 3.มีสิ่งปลูกสร้างกีดขวางแนวการวางท่อ ลำดับที่ 2 คือ ปัจจัยด้านการประสานงาน โดยเกิดจากสาเหตุหลัก 3 ประการคือ 1.เกิดผลกระทบเนื่องจากการจัดการจราจร 2.เกิดผลกระทบเนื่องจากการจัดหาเส้นทางจราจรทดแทนเส้นทางที่ดำเนินการก่อสร้างและ 3.เกิดความล่าช้าเนื่องจากการประสานงานกับเจ้าของพื้นที่ ลำดับที่ 3 คือ ปัจจัยด้านแบบแปลนงานก่อสร้าง โดยเกิดจากสาเหตุหลัก 3 ประการคือ 1.แนวการวางท่อที่กำหนดในแบบแปลนงานก่อสร้างคลาดเคลื่อนจากสภาพหน้างานจริง 2.แบบแปลนงานก่อสร้างกำหนดตำแหน่งสาธารณูปโภคที่เกี่ยวข้องไม่ครบถ้วน และ 3.รายละเอียดประกอบแบบแปลนงานก่อสร้างไม่ชัดเจน

สำหรับแนวทางการแก้ไขปัญหาสามารถทำได้ ดังนี้ กรณีปัจจัยลำดับที่ 1 ให้มีการประสานเจ้าหน้าที่ตำรวจ และวางแผนร่วมกันเพื่อจัดหาเส้นทางทดแทนหรือประสานงานด้านการจราจร ให้มีการขุดหลุมตรวจสอบและประสานเจ้าของสิ่งปลูกสร้างที่กีดขวางเพื่อรื้อย้ายก่อนการเข้าดำเนินการก่อสร้าง กรณีปัจจัยลำดับที่ 2 ให้มีการประสานงานและเข้าร่วมประชุมเพื่อจัดการจราจรกับเจ้าหน้าที่ตำรวจอย่างต่อเนื่องเพื่อลดปัญหาด้านการจัดการจราจร อีกทั้งให้มีการติดตามการประสานงานกับเจ้าของพื้นที่อย่างต่อเนื่องเพื่อลดการเกิดความล่าช้าจากการประสานงาน โดยหากเกิดความล่าช้าผู้รับเหมาควรแจ้งผลกระทบ เพื่อประกอบการตัดสินใจของเจ้าของงานโดยเร็ว (หอมทอง, 2549) และสำหรับกรณีปัจจัยลำดับที่ 3 ให้ผู้ออกแบบ ผู้บริหารงานก่อสร้าง และผู้รับเหมาเข้าร่วมตรวจสอบสถานที่ก่อสร้างร่วมกับเพื่อลดความคลาดเคลื่อนของการออกแบบ รวมถึงให้มีการทำบันทึกข้อตกลงเพิ่มเติมกรณีเกิดความไม่ชัดเจนในแบบแปลนงานก่อสร้าง

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จบรรลุตามเป้าหมายได้เพราะความช่วยเหลือจากผู้มีพระคุณทุกท่าน ผู้วิจัยขอขอบคุณ นายเอกธนัช มั่นเจริญ และนายจิรายุ ไทรบุญจันทร์ ผู้ซึ่งมีส่วนช่วยเหลือข้าพเจ้าในการรวบรวมแบบสอบถาม รวมถึง รศ.ดร.วีระเกษตร สวนผกา ผู้ซึ่งให้ความรู้ คำปรึกษา ข้อคิดเห็น และคำแนะนำต่าง ๆ เพื่อให้งานวิจัยฉบับนี้ออกมาสมบูรณ์ที่สุด ตลอดจนผู้ตอบแบบสอบถามทุกท่านที่สละเวลาอันมีค่าของท่านเพื่อทำให้งานวิจัยฉบับนี้ลุล่วง สุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า งานวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาค้นคว้าของผู้ที่สนใจ และนำไปเป็นแนวทางในการบริหารงานก่อสร้างต่อไป

เอกสารอ้างอิง

พระราชบัญญัติการประปานครหลวง พ.ศ. 2510. 2510. หน้า 2.

การประปานครหลวง. 2560. **รายงานประจำปี 2560 การประปานครหลวง**

Gray, C. F. and Larson, E. W. 2006. **Project Management: The Managerial Process.** New York: McGraw-Hill.

พนม ภัยหน่าย. 2550. **การบริหารงานก่อสร้าง**. พิมพ์ครั้งที่ 15. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริม. เทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น.

วิสูตร จิระดำเกิง. 2548. **การบริหารงานก่อสร้าง**. ปทุมธานี : วรรณกวี.

ประกอบ บำรุงผล. 2541. **การบริหารงานและควบคุมงานก่อสร้าง**. กรุงเทพฯ : ศูนย์ส่งเสริมวิชาการ.

กัลยา วานิชย์บัญชา. 2542. **การวิเคราะห์สถิติ : สถิติเพื่อการตัดสินใจ**. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์วิทยาลัย.

เกียรติสุดา ศรีสุข. 2552. “ความเชื่อมั่นของเครื่องมือวิจัย.” **ความเชื่อมั่นของแบบสอบถามโดยวิธีการของ Carnbach’s Alpha**. 27.

รองศาสตราจารย์พวงรัตน์ ทวีรัตน์. 2543. **วิธีการวิจัยทางพฤติกรรมศาสตร์และสังคมศาสตร์**. พิมพ์ครั้งที่ 8. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

Likert, R. 1961. **New Patterns of Management.** New York: McGraw-Hill.

วรวิทย์ คูลินทิพย์. 2549. **ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการดำเนินการก่อสร้างวางท่อประปาในพื้นที่ชั้นในกรุงเทพมหานคร**. การศึกษาโครงการเฉพาะเรื่อง สาขาวิชาวิศวกรรม และการบริหารการก่อสร้าง, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

สามารถ หอมทอง. 2549. **การศึกษาปัจจัยความล่าช้าระหว่างผู้รับเหมาหลักกับผู่รับจ้างช่วงที่ได้รับการแต่งตั้งในงานก่อสร้างอาคารสูง**. การศึกษาโครงการเฉพาะเรื่อง สาขาวิชาวิศวกรรม และการบริหารการก่อสร้าง, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

การประยุกต์ใช้วิธีพื้นผิวผลตอบสนองแบบบ็อก-เบห์นเคนสำหรับการพยากรณ์ความขรุขระผิวในการกัดข้างอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง

Application of Box–Behnken Design with Response Surface Methodology for Prediction of Surface Roughness in Side Milling of Aluminum Casting Semi-Solid

สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์[1*] ชาตรี หอมเขียว[1] และ วรพงศ์ บุญช่วยแทน[1]

Surasit Rawangwong[1*], Chatree Homkhiew [1] and Worapong Boonchouytan[1]

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมและพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวในการกัดข้างอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061 โดยใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบสนองแบบบ็อก-เบห์นเคน โดยมีปัจจัยที่ศึกษา คือ ความเร็วรอบ อัตราป้อน และความลึกในการตัด ผลจากการวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยในการกัดข้างชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061 พบว่า สภาวะที่เหมาะสมคือ ความเร็วรอบ 1,490 รอบ/นาที อัตราป้อน 80 มิลลิเมตรต่อนาที และความลึกในการตัด 0.15 มิลลิเมตร จากการทดลองยืนยันผลเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองจริงและค่าที่ได้จากการพยากรณ์ของสมการถดถอยเพื่อยืนยันผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งค่าความขรุขระผิวที่ได้จากการทดลอง เท่ากับ 0.220 ไมโครเมตร และค่าที่ได้จากการพยากรณ์ของสมการถดถอย เท่ากับ 0.212 ไมโครเมตร นำค่าทั้งสองมาคำนวณค่าอคติหรือค่าไบอัล ได้เท่ากับ 3.77% ซึ่งน้อยกว่าค่าอคติ ที่ตั้งไว้ไม่เกิน 5% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการกัดข้างอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061 ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความน่าเชื่อถือ และมีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้พยากรณ์ค่าความขรุขระผิวในการกัดข้างอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061

ABSTRACT

The objective of this research were to find the optimal conditions and prediction of surface roughness in side milling of Aluminum Casting Semi-Solid 6061 by using Box-Behnken Experimental Design. Factors in this study included with speed, feed rate and depth of cut. The result of optimal condition analysis with the factor on side milling of Aluminum Casting Semi-Solid 6061, found that an optimal condition was speed 1,426 rpm, feed rate 80 mm/min, and depth of cut 0.15 mm. From the confirmation test to verify the accuracy of the mathematical model. Comparing the values obtained from the real test and the predicted values of the regression equation to confirm the results of the mathematical model. The surface roughness obtained from the experiment was 0.220 micrometer and the predicted value of the regression equation was 0.212 micrometer. Both values were calculated for bias or bale values of 3.77%, which is less than the bias. It was found that the optimum conditions in the 6061 semi-solid aluminum die casting process obtained from the mathematical model were reliable. It is suitable for use in predicting surface roughness in Aluminum Casting Semi-Solid 6061.

Keywords: computer numerical control milling machine, aluminum casting semi-solid, surface roughness, prediction, response surface methodology

[*]Corresponding author; e-mail address: sitnong2@yahoo.co.th

[1]สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย จ.สงขลา 90000

[1]Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Songkhla, 90000

คำนำ

อุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ ชิ้นส่วนเครื่องยนต์ และชิ้นส่วนอุตสาหกรรมมีความสำคัญต่อการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศทั้งในด้านการผลิต และมีความเชื่อมโยงกับอุตสาหกรรมต่อเนื่องอื่นๆ ซึ่งทำรายได้ให้แก่ประเทศในแต่ละปีเป็นจำนวนมาก ภาครัฐได้ให้การส่งเสริมสนับสนุนในด้านการลงทุนการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์จนประเทศไทยกลายเป็นฐานการผลิตที่สำคัญแหล่งหนึ่งของเอเชีย อุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ของไทยได้มีการขยายการลงทุน และมุ่งพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องจนสามารถผลิตชิ้นส่วนให้มีความหลากหลาย มีคุณภาพ และมาตรฐานการผลิตอยู่ในระดับที่ผู้ผลิตระดับโลกยอมรับ ปัจจุบันการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ได้ครอบคลุมชิ้นส่วนต่างๆ เช่น ชิ้นส่วนเครื่องยนต์ ชิ้นส่วนระบบกันสะเทือน ชิ้นส่วนตัวถัง ชิ้นส่วนระบบขับเคลื่อน ชิ้นส่วนตกแต่ง และชิ้นส่วนแม่พิมพ์ เป็นต้น

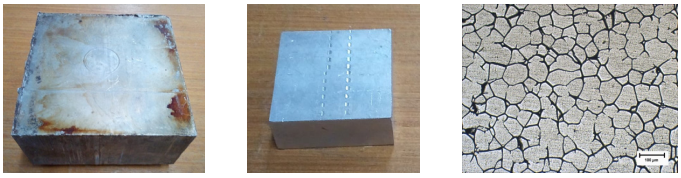
เทคโนโลยีการผลิตในปัจจุบันมีการเติบโตไปอย่างรวดเร็ว จะเห็นได้จากการพัฒนารูปแบบผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะที่หลากหลายและมีความซับซ้อนค่อนข้างมาก และผลิตภัณฑ์ที่ได้ต้องมีความถูกต้องและเที่ยงตรงสูง นอกจากนั้นผลิตภัณฑ์หลายๆ ประเภท จำเป็นต้องมีการระบุคุณลักษณะที่สำคัญเพื่อให้การนำผลิตภัณฑ์ไปใช้งานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ ซึ่งคุณลักษณะที่สำคัญอย่างหนึ่งก็คือค่าความขรุขระผิวสำเร็จ เช่น แบบพิมพ์สำหรับงานแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก แม่พิมพ์ตัด เป็นต้น เครื่องจักรที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้ผลิตชิ้นงานที่ต้องการคุณลักษณะเฉพาะเหล่านี้ ก็คือเครื่องจักรซีเอ็นซี ซึ่งเป็นเครื่องจักรกลที่มีความแม่นยำสูงและนิยมนำมาประยุกต์ใช้ในการกัดขึ้นรูปวัสดุหลากหลายประเภทได้ ปัจจุบันในการเลือกค่าตัวแปรในการผลิตชิ้นงานด้วยการกำจัดเศษนั้นจะอาศัยค่าที่อ้างอิงจากค่ามาตรฐานซึ่งเป็นการระบุโดยประมาณของตัวแปรที่สำคัญในการผลิตอยู่ในช่วงกว้างๆ ทั้งความเร็วรอบ อัตราป้อน เป็นต้น อย่างไรก็ตามผู้วิจัยเห็นว่าควรศึกษาในเชิงลึกหรือเจาะจงลงไป รวมทั้งการประเมินความสัมพันธ์ของตัวแปรการผลิตที่หลากหลายกับข้อจำกัดของชิ้นงานในลักษณะของผิวสำเร็จด้วย ทั้งนี้เพื่อสร้างองค์ความรู้และเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้ในงานทางอุตสาหกรรม

กระบวนการแปรรูปชิ้นงานด้วยการกัดเป็นการแปรรูปชิ้นส่วนอุตสาหกรรมที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง การกัดเป็นกระบวนการในการลดขนาดของชิ้นงานให้ได้รูปร่างตามที่ต้องการ ปัจจัยในการกัด ประกอบด้วย อัตราป้อน ความเร็วรอบ ความลึกในการตัด จำนวนคมตัด และวัสดุชิ้นงาน เป็นต้น ซึ่งในปัจจุบันอะลูมิเนียมผสมนิยมนำมาใช้ในการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ ชิ้นส่วนเครื่องยนต์ ชิ้นส่วนแม่พิมพ์ และชิ้นส่วนอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากอะลูมิเนียมมีความหนาแน่นต่ำ เป็นโลหะที่มีน้ำหนักเบา ทนทานต่อการเกิดสนิม และการผุกร่อนในสภาพแวดล้อมได้ดี สำหรับอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061 เป็นอะลูมิเนียมผสม แมกนีเซียม และซิลิกอน เป็นหลัก มีคุณสมบัติด้านความแข็งแรงสูง ต้านทานการกัดกร่อน ทำให้อะลูมิเนียมกลุ่มนี้จะนำไปใช้ทำชิ้นส่วนเครื่องยนต์ ชิ้นส่วนเรือเดินสมุทร ชิ้นส่วนอากาศยาน ชิ้นส่วนแม่พิมพ์ เป็นต้น ปัจจุบันมีการศึกษาเทคโนโลยีการหล่อโลหะกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Metal Casting) โดยใช้เทคนิค Gas Induced Semi-Solid; GISS) (เจษฎา, 2554; Burapa, et al, 2010) โดยการพ่นแก๊สไนโตรเจนลงไปในน้ำโลหะที่หลอมเหลวจะทำให้เกิดโครงสร้างเกรนเป็นแบบก้อนกลม (Globular Grain) โครงสร้างภายในรวมตัวกันแน่นขึ้นและมีโพรงอากาศน้อยลงส่งผลให้มีสมบัติทางกลที่ดีขึ้นรวมถึงการตอบสนองต่อกระบวนการทางความร้อนได้ดียิ่งขึ้น การนำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อโลหะกึ่งของแข็งด้วยกระบวนการ GISS นี้ไปใช้ในการผลิตชิ้นส่วนอุตสาหกรรมได้นั้น จำเป็นจะต้องผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการตัดเฉือน เพื่อให้ได้ขนาด และผิวชิ้นงานตามต้องการ อย่างไรก็

ตามองค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับการกัดชิ้นงานที่ผ่านกระบวนหล่อโลหะกึ่งของแข็งด้วยกระบวนการ GISS ยังมีการวิจัยค่อนข้างน้อย จากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อความขรุขระผิวชิ้นงานจะประกอบด้วยปัจจัยหลัก 3 ปัจจัย คือ ความเร็วรอบ อัตราป้อน และความลึกในการตัด ซึ่งจะเป็นปัจจัยในการศึกษาวิจัยนี้ ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมและพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวในกระบวนการกัดข้างอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061 เพื่อให้ได้ชิ้นส่วนอะลูมิเนียมที่มีคุณภาพ โดยใช้วิธีพื้นผิวผลตอบสนองด้วยการออกแบบการทดลองแบบบ็อก-เบห์นเคน

อุปกรณ์และวิธีการ

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วย 1) เครื่องกัดควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ ยี่ห้อ EMCO รุ่น PC Mill 50 ผลิตในประเทศออสเตรีย 2) เครื่องมือตัดที่ใช้ในการทดลองเป็นเอ็นมิล (End Mill) แบบ 2 คมตัด ยี่ห้อ S.A.P. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร 3) เครื่องวัดความขรุขระผิว ยี่ห้อมิตูโตโย รุ่น SJ-210 ผลิตในประเทศญี่ปุ่น 4) วัสดุที่ใช้ในการทดลองเป็นอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061 ที่ผ่านกระบวนการผลิตโลหะแบบหล่อกึ่งของแข็งโดยใช้เทคโนโลยี GISS ร่วมกับการหล่อแบบบีบอัด (Squeeze Casting) (เจษฎา, 2554; Burapa, et al, 2010) โดยเริ่มจากทำการหลอมอะลูมิเนียม เกรด 6061 ภายในเบ้าหลอมชนิดกราไฟต์ด้วยเตาหลอมไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทานที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เมื่ออะลูมิเนียมหลอมละลายดีแล้ว จึงทำความสะอาดอะลูมิเนียมหลอมเหลวด้วยฟลักซ์ (Flux) แล้วจึงทำการตักอะลูมิเนียมหลอมเหลวจากเตาหลอมในปริมาณ 700 กรัม นำไปเข้าสู่กระบวนการ GISS เพื่อผลิตอะลูมิเนียมกึ่งของแข็ง ด้วยการพ่นแก๊สไนโตรเจนผ่านแท่งกราไฟต์ลงไปในอะลูมิเนียมหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 660 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 วินาที จากนั้นจึงทำการเทหล่ออะลูมิเนียมกึ่งของแข็งที่ผลิตได้ลงไปในช่องว่างของแม่พิมพ์ อุณหภูมิของแม่พิมพ์ที่ใช้หล่อขึ้นรูปอยู่ที่ 300 องศาเซลเซียส แล้วจึงใช้แรงดันในการบีบอัดอะลูมิเนียมกึ่งของแข็งที่ 66 MPa ด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกขนาด 100 ตัน ทำให้ได้ชิ้นงานดิบของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061 ที่มีขนาด 100 x 100 x 25 มิลลิเมตร แสดงดัง Figure 1 (a) จากนั้นทำการตัดขนาดชิ้นงานสำหรับการทดลองให้มีขนาดกว้าง 50 มิลลิเมตร ยาว 50 มิลลิเมตร แสดงดัง Figure 1 (b) ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061 และค่าความแข็งแรง แสดงดัง Table 1 โครงสร้างทางจุลภาคของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็งเกรด 6061 ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีการหล่อแบบบีบอัดร่วมกับกระบวนการ GISS แสดงดัง Figure 1 (c)



(a) (b) (c)

Figure 1 Workpieces and Microstructures of aluminum casting semi-solid 6061

Table 1 Chemical components of Aluminum casting semi-solid 6061

Elements	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Al	Tensile Strength (MPa)
% Weight	0.57	0.41	0.26	0.06	1.08	0.01	0.02	0.04	Bal.	225

* Bal. = Balance

งานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้วิธีพื้นผิวผลตอบสนองโดยใช้แผนการทดลองบ็อก-เบห์นเคน สำหรับการพยากรณ์ความขรุขระผิวในการกัดข้างอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061 โดยใช้เครื่องกัดเครื่องกัดควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์เชิงตัวเลข หรือเครื่องซีเอ็นซี เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่ถูกต้องและมีความน่าเชื่อถือ โดยกำหนดขั้นตอนวิธีการวิจัยดังนี้

1) การออกแบบการทดลองในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบบ็อก-เบห์นเคน (Box – Behnken Design) (สมเกียรติ และภูมินทร์, 2554; ประไพศรี และพงศ์ชนัน, 2551; ปารเมศ, 2545; Montgomery, 2012) ซึ่งเป็นการออกแบบที่ทุกระดับของแต่ละปัจจัยอยู่ในช่วงที่ได้กำหนดไว้ ปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง ประกอบด้วย ความเร็วรอบ อัตราป้อน และความลึกในการตัด (สมเสียง และศิริชัย, 2559; ปารเมศ และชาญณรงค์, 2556; Elias, et al, 2016) ซึ่งแต่ละปัจจัยจะมีระดับการทดลอง 3 ระดับ วิเคราะห์ผลทางสถิติด้วยวิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM) โดยใช้โปรแกรม Design Expert V.9.1 ในการวิเคราะห์ผล ระดับของแต่ละปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง แสดงดัง Table 2 ผลตอบสนอง คือ ค่าความขรุขระผิว (Surface Roughness; R_a)

Table 2 Defined factors for experiments and their levels

Parameters	Level 1	Level 2	Level 3
Speed (rpm)	1,000	1,250	1,500
Feed Rate (mm/min)	80	105	130
Depth of Cut (mm)	0.15	0.25	0.35

2) การออกแบบวิธีการวัดค่าความขรุขระผิว เมื่อกัดชิ้นงานทดลองเสร็จแล้วให้ถอดชิ้นงานออกมาเพื่อวัดค่าความขรุขระผิว โดยจะวัดบนผิวอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061 การทดลองนี้จะทำการกัดด้านข้างอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061ระยะทาง 50 มิลลิเมตร และกำหนดจุดวัดที่ระยะห่างจากขอบของชิ้นงาน 10, 25, 40 มิลลิเมตร ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของชิ้นงานพอดี ใช้เครื่องวัดความขรุขระผิว ยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น SJ-210 โดยทำการวัดในทิศทางขนานกับทิศทางการกัด โดยในแต่ละค่าของสภาวะการกัดจะวัด 3 ตำแหน่ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยของค่าความขรุขระผิว

3) การวิเคราะห์ผลการทดลอง จากการออกแบบการทดลองแบบบ็อก-เบห์นเคน จะทำวิเคราะห์รูปแบบจำลองการถดถอยทางสถิติที่เหมาะสม การตรวจสอบความพอเพียงของรูปแบบจำลอง การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของผลการทดลอง และนำผลไปวิเคราะห์ตัวแบบสมการถดถอย (Regression) และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวในการกัดข้างอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061 โดยใช้โปรแกรม Design Expert V.9.1

4) การหาค่าสภาวะที่เหมาะสมของค่าความขรุขระผิว การวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมในการกัดข้างอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061 เป็นการวิเคราะห์เพื่อหาผลลัพธ์ โดยจะเลือกค่าระดับของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความขรุขระผิว (R_a) มีค่าน้อยที่สุด โดยใช้โปรแกรม Design Expert V.9.1

5) การทดลองยืนยันผล การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของค่าความขรุขระผิวในการกัดข้างอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061ว่าสามารถนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้มาใช้ในการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวในการกัดข้างอะลูมิเนียมหล่อกึ่ง

ของแข็ง เกรด 6061 ได้หรือไม่ จึงได้นำสภาวะที่เหมาะสมจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ไปทำการทดลองกัดข้างชิ้นงานจริง ซึ่งได้ทำการทดลองซ้ำจำนวนทั้งสิ้น 3 ครั้งการทดลอง พร้อมทั้งได้เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองจริงและค่าที่ได้จากการพยากรณ์ของสมการถดถอยเพื่อยืนยันผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยพิจารณาจากค่าอคติ (Bias) ที่ยอมรับได้ไม่ควรมากเกิน 5% โดย ค่าอคติ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 1

ค่าอคติ = [(ค่าที่ได้จากการพยากรณ์-ค่าที่ได้จากการทดลอง) / ค่าที่ได้จากการพยากรณ์] ×100 (1)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวในการกัดข้างอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบบ็อก-เบห์นเคน มีตัวแปรอิสระที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง ประกอบด้วย ความเร็วรอบ (Speed) อัตราป้อน (Feed Rate) และความลึกในการตัด (Depth of Cut) ซึ่งสามารถออกแบบสภาวะการกัดที่ใช้ในการทดลองได้ 17 สภาวะ ซึ่งจากการดำเนินงานวิจัยสามารถอธิบายผลการทดลองได้ดังนี้

1) การวิเคราะห์รูปแบบจำลองการถดถอยทางสถิติที่เหมาะสม จากผลการทดลองกัดข้างชิ้นงาน และวัดความขรุขระผิวของชิ้นงาน จากนั้นนำมาวิเคราะห์เพื่อเลือกรูปแบบจำลองการถดถอยทางสถิติที่เหมาะสม ซึ่งผลการวิเคราะห์ทางสถิติ แสดงดัง Table 4 พบว่า รูปแบบของสมการแบบลูกบาศก์ (Cubic) มีค่า Adj-R^2 เท่ากับ 98.71เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมากกว่ารูปแบบอื่นๆ ซึ่งหมายความว่า รูปแบบจำลองการถดถอยมีความสมรูปกับข้อมูล แต่รูปแบบของสมการแบบลูกบาศก์ (Cubic) ไม่ได้รับการยอมรับเนื่องจากมีข้อความเตือนในโปรแกรม Design Expert V.9.1 เกี่ยวกับ Aliased ในรูปแบบลูกบาศก์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการออกแบบบ็อก-เบห์นเคน มีการทำการทดลองไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดแบบจำลองลูกบาศก์ได้ จึงเลือกรูปแบบจำลองที่มีค่า Adj-R^2 รองลงมาคือ รูปแบบกำลังสอง (Quadratic) เท่ากับ 98.12 เปอร์เซ็นต์ (ชาญณรงค์ และนิพนธ์, 2549; อิทธิพล, ช่วงชัย และชวลิต, 2556) และมีค่า P-value ของ Lack of Fit เท่ากับ 0.2481 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งหมายความว่ารูปแบบจำลองสมการถดถอยมีความสมรูปกับข้อมูล ดังนั้นจึงสรุปได้ว่ารูปแบบจำลองกำลังสอง (Quadratic) มีความเหมาะสมที่จะใช้ในการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวในกระบวนการกัดข้างอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061

2) ตรวจสอบความพอเพียงของรูปแบบจำลอง เป็นการตรวจสอบความเหมาะสม และความถูกต้องของรูปแบบจำลอง เพื่อยืนยันความเพียงพอและความน่าเชื่อถือของรูปแบบจำลองการถดถอยที่ได้รับจากการทดลอง

Table 4 Fitted model summary

Summary (detailed tables shown below)					
	Sequential	Lack of Fit	Adjusted	Predicted	
Source	p-value	p-value	R-Squared	R-Squared	
Linear	< 0.0001	0.0039	0.7826	0.6975	
2FI	0.3832	0.0035	0.7889	0.6019	
Quadratic	0.0001	0.2481	0.9812	0.9153	Suggested
Cubic	0.2481		0.9871		Aliased

3) สมการถดถอยและการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความขรุขระผิว จากผลการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง พบว่าข้อมูลที่ได้มีความน่าเชื่อถือ จึงนำข้อมูลผลการวัดความขรุขระผิวมาทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัย เพื่อตรวจสอบว่าปัจจัยที่ทำการศึกษานั้นมีปัจจัยใดบ้างที่มีผลต่อความขรุขระผิวของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061 โดยกำหนดระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Design Expert V.9.1 Table 5 พบว่าปัจจัยหลัก ประกอบด้วย ความเร็วรอบ อัตราป้อน และความลึกในการตัด และอันตรกิริยาอื่นๆ ที่ทำการทดลองมีอิทธิพลต่อค่าความขรุขระผิวของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061 เนื่องจากมีค่า P-Value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 ยกเว้นอันตรกิริยาระหว่างความเร็วรอบกับอัตราป้อน เนื่องจากมีค่า P-Value มากกว่าระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 และจากการวิเคราะห์การถดถอย สามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆ และความขรุขระผิวในรูปของสมการกำลังสอง (Quadratic) ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการแบบ Actual Variable ดังสมการที่ 2 คือ

$$R_a = -1.34926 + (1.98400\times10^{-4} \times \text{Speed}) + (0.027956 \times \text{Feed Rate}) + (0.70150 \times \text{Depth of Cut}) + (1.12000\times10^{-6} \times \text{Speed} \times \text{Feed Rate}) + (1.51000 \times 10^{-3} \times \text{Speed} \times \text{Depth of Cut}) - (9.80000 \times10^{-3} \times \text{Feed Rate} \times \text{Depth of Cut}) - (3.22000 \times10^{-7} \times \text{Speed}^2) - (1.04600 \times10^{-4} \times \text{Feed Rate}^2) - (2.01250 \times \text{Depth of Cut}^2) \quad (2)$$

จากสมการถดถอยของค่าความขรุขระผิวในการกัดข้างอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061 สามารถนำมาสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนอง (Response surface plot) Figure 2 แสดงให้เห็นว่าถ้าใช้ความเร็วรอบเพิ่มขึ้นและใช้อัตราป้อนน้อยลง จะทำให้ค่าความขรุขระผิวลดลง และถ้าใช้ความเร็วรอบน้อยลง อัตราป้อนเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าความขรุขระผิวมากขึ้น Figure 3 แสดงให้เห็นว่าถ้าใช้ความลึกในการตัดเพิ่มขึ้น และใช้อัตราป้อนเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าความขรุขระผิวมากขึ้น และถ้าใช้ความลึกในการตัดน้อยลง อัตราป้อนน้อยลง จะทำให้ค่าความขรุขระผิวลดลง และ Figure 4 แสดงให้เห็นว่าถ้าใช้ความเร็วรอบน้อยลง และใช้ความลึกในการตัดเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าความขรุขระผิวมากขึ้น และถ้าใช้ความเร็วรอบเพิ่มขึ้น ความลึกในการตัดน้อยลง จะทำให้ค่าความขรุขระผิวลดลง

Table 5 ANOVA for the prediction of surface roughness (Ra)

ANOVA for Response Surface Quadratic model						
Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]						
	Sum of		Mean	F	p-value	
Source	Squares	df	Square	Value	Prob > F	
Model	0.18	9	0.020	94.02	< 0.0001	significant
A-Speed	6.216×10^{-3}	1	6.216×10^{-3}	28.58	0.0011	
B-Feed Rate	0.12	1	0.12	561.09	< 0.0001	
C-Depth of Cut	0.025	1	0.025	112.81	< 0.0001	
AB	1.960×10^{-4}	1	1.960×10^{-4}	0.90	0.3741	
AC	5.700×10^{-3}	1	5.700×10^{-3}	26.21	0.0014	
BC	2.401×10^{-3}	1	2.401×10^{-3}	11.04	0.0127	

A^2	1.705×10^{-3}	1	1.705×10^{-3}	7.84	0.0265	
B^2	0.018	1	0.018	82.75	< 0.0001	
C^2	1.705×10^{-3}	1	1.705×10^{-3}	7.84	0.0265	
Residual	1.522×10^{-3}	7	2.175×10^{-4}			
Lack of Fit	9.243×10^{-4}	3	3.081×10^{-4}	2.06	0.2481	not significant
Pure Error	5.980×10^{-4}	4	1.495×10^{-4}			
Cor Total	0.19	16				

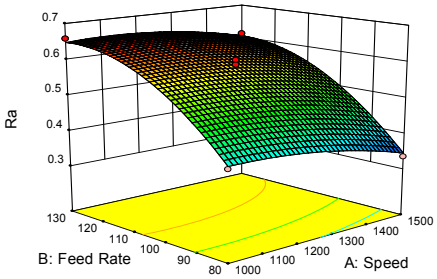


Figure 2 R_a vs speed and feed rate

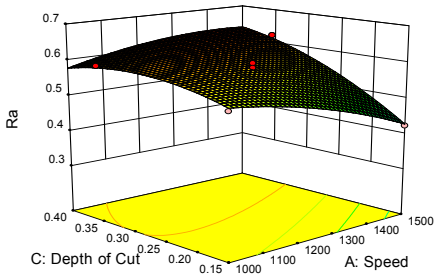


Figure 3 R_a vs feed rate and depth of cut

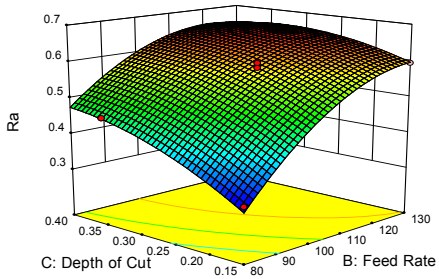


Figure 4 R_a vs speed and depth of cut

4) การหาค่าสภาวะที่เหมาะสมของค่าความขรุขระผิวในการกัดข้างอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็งเกรด 6061 เป็นการวิเคราะห์เพื่อหาผลลัพธ์โดยจะเลือกค่าระดับของปัจจัยที่อยู่ในช่วงขอบเขตของการทดลอง โดยส่งผลต่อค่าความขรุขระผิว (R_a) มีค่าน้อยที่สุด ผลการวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความขรุขระผิว เมื่อพิจารณาพบว่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ค่าความขรุขระผิวน้อยที่สุดของกัดข้างอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061 ซึ่งวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Design Expert V.9.1 คือ ความเร็วรอบ 1,490 รอบ/นาที อัตราป้อน 80 มิลลิเมตรต่อนาที และความลึกในการตัด 0.15 มิลลิเมตร ให้ค่าความขรุขระผิว (R_a) เท่ากับ 0.231 ไมโครเมตร และค่าความพึงพอใจ (Desirability) เท่ากับ 100% ซึ่งถือว่าข้อมูลมีความสมบูรณ์และแม่นยำ

5) การทดลองยืนยันผลของค่าความขรุขระผิว เป็นการทดลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของค่าความขรุขระผิวในการกัดข้างอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061ว่าสามารถนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้มาใช้ในการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวในการกัดข้างอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061 ได้หรือไม่ จึงได้นำสภาวะที่เหมาะสม ที่ความเร็วรอบ 1,490 รอบ/นาที อัตราป้อน 80 มิลลิเมตรต่อนาที และความลึกในการตัด 0.15 มิลลิเมตร ไปทำการทดลองกัดข้างชิ้นงานจริง ซึ่งได้ทำการทดลองซ้ำจำนวนทั้งสิ้น 3 ครั้งการทดลอง พร้อมทั้งได้เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองจริงและค่าที่ได้จากการ

พยากรณ์ของสมการถดถอยเพื่อยืนยันผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งค่าความขรุขระผิวที่ได้จากการทดลอง เท่ากับ 0.220 ไมโครเมตร และค่าที่ได้จากการพยากรณ์ของสมการถดถอย เท่ากับ 0.212 ไมโครเมตร นำค่าทั้งสองมาคำนวณค่าอคติ (Bias) ได้เท่ากับ 3.77% ซึ่งน้อยกว่าค่าอคติ (Bias) ที่ตั้งไว้ไม่เกิน 5% แสดงให้เห็นว่าสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการกัดข้างอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061 ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความน่าเชื่อถือและอนุมานได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ มีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้พยากรณ์ค่าความขรุขระผิวในการกัดข้างอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061

สรุป

การประยุกต์ใช้วิธีพื้นผิวผลตอบสนองแบบบ็อก-เบห์นเคนสำหรับพยากรณ์ความขรุขระผิวในการกัดข้างชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061 โดยสมการการพยากรณ์ประกอบด้วยปัจจัยการกัดข้าง ได้แก่ ความเร็วรอบ อัตราป้อน และความลึกในการตัด เพื่อใช้สำหรับวัดค่าความขรุขระผิว จากการวิเคราะห์การถดถอยทำให้สามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ ในการกัดข้างอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061 ด้วยรูปของสมการกำลังสอง (Quadratic) คือ

$$R_a = -1.34926 + (1.98400\times10^{-4} \times \text{Speed}) + (0.027956 \times \text{Feed Rate}) + (0.70150 \times \text{Depth of Cut}) + (1.12000\times10^{-6} \times \text{Speed} \times \text{Feed Rate}) + (1.51000 \times 10^{-3} \times \text{Speed} \times \text{Depth of Cut}) - (9.80000 \times10^{-3} \times \text{Feed Rate} \times \text{Depth of Cut}) - (3.22000 \times10^{-7} \times \text{Speed}^2) - (1.04600 \times10^{-4} \times \text{Feed Rate}^2) - (2.01250 \times \text{Depth of Cut}^2$$

และจากการวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยในการกัดข้างชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061 พบว่าปัจจัยที่เหมาะสม คือ ความเร็วรอบ 1,490 รอบ/นาที อัตราป้อน 80 มิลลิเมตรต่อนาที และความลึกในการตัด 0.15 มิลลิเมตร โดยให้ค่าความขรุขระผิวเท่ากับ เท่ากับ 0.231 ไมโครเมตร และค่าความพึงพอใจ (Desirability) เท่ากับ 100% และจากการทดลองยืนยันผลเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของค่าความขรุขระผิวในการกัดข้างอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061 โดยเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองจริงและค่าที่ได้จากการพยากรณ์ของสมการถดถอยเพื่อยืนยันผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งค่าความขรุขระผิวที่ได้จากการทดลอง เท่ากับ 0.220 ไมโครเมตร และค่าที่ได้จากการพยากรณ์ของสมการถดถอย เท่ากับ 0.212 ไมโครเมตร นำค่าทั้งสองมาคำนวณค่าอคติ (Bias) ได้เท่ากับ 3.77% ซึ่งน้อยกว่าค่าอคติ (Bias) ที่ตั้งไว้ไม่เกิน 5% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการกัดข้างอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061 ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความน่าเชื่อถือ และมีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้พยากรณ์ค่าความขรุขระผิวในการกัดข้างอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณรายได้ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ประจำปี 2561 และขอขอบคุณบริษัท กิสโค จำกัด สำหรับวัสดุอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็งที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

เจษฎา วรรณสินธุ์. 2554. เทคนิคการหล่ออะลูมิเนียมแบบกึ่งของแข็ง. ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ. **สมาคมอุตสาหกรรมหล่อโลหะไทย**. หน้า 48-53.

ชาญณรงค์ สายแก้ว และนิพนธ์ ชิลพัฒน์. 2549. การออกแบบการทดลองสำหรับการปรับปรุงผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิตการประยุกต์ในเครื่องย่อยขวดแก้ว. **วิศวกรรมสาร มข**. 33(4): 415-430.

ปรเมศวร์ เบ้าวรรณ และชาญณรงค์ สายแก้ว. 2556. การพัฒนาและปรับปรุงคุณภาพในอุตสาหกรรมการกัดขึ้นรูปแม่พิมพ์ด้วยการออกแบบการทดลอง. **วิศวกรรมสาร มข**. 13(2): 42-53.

ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และพงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์. 2551. **การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง**. สำนักพิมพ์ท้อป จำกัด. กรุงเทพฯ.

ปารเมศ ชุติมา. 2545. **การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม**. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.

สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ และภูมินทร์ แจ่มเชื้อ. 2554. การลดฟองอากาศในกระบวนการผลิตบรรจุภัณฑ์พลาสติกโดยการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์เบ็ห์นเกน. **การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ**. หน้า 171-175.

สมเสียง จันทาสี และศิริชัย ปั้นสมสกุล. 2559. การทานายความหยาบผิวในงานกัดอะลูมิเนียมเกรด 6061-T6 โดยใช้วิธีทางสถิติ. **วิศวสารลาดกระบัง** 33(2): 77-83.

อิทธิพล วรพันธ์, ช่วงชัย ชุปวา และชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์. 2556. การหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการเชื่อมด้วยความเสียดทานของเหล็ก AISI 1015 โดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง. **KKU Res. J.**18(6): 909-924.

Elias, R., Hamid, G. and Masoud, K. 2016. Effect of cutting speed parameters on the surface roughness of Al5083 due to recrystallization. **Mechanical Sciences** 7: 85–91

Montgomery, D.C. 2012. **Design and Analysis of Experiments**. 8th edition. John Wiley & Sons Inc.

R. Burapa, S. Janudom, T. Chucheep, R. Canyook and J. Wannasin, 2010. Effects of primary phase morphology on mechanical properties of Al-Si-Mg-Fe alloy in semi-solid slurry casting process, **Trans. Nonferrous Met. Soc.** China, Vol. 20, pp. 857-861.

การวิเคราะห์ค่าความเค้นซิงกุลาริตี้บนแผ่นเหล็กบางเจาะรูวงกลม หรือรอยเชื่อมภายใต้แรงดึงโดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์

Analysis of Stress Singularity on a Thin Steel Plate with a Circular Hole or a Welded Zone Under Tension Loading by Using FEM

อิทธิกร อาจหาญ[1] และ อรรถพร วิเศษสินธุ์[1*]

Ittikorn Arjharn[1] and Attaporn Wisessint[1*]

บทคัดย่อ

ปัจจุบันการติดตั้งสายสัญญาณเข้ากับรางรถไฟมีวิธีการที่หลากหลายยิ่งขึ้น โดยหนึ่งในนั้นคือการเชื่อมสายสัญญาณด้วยกระบวนการเชื่อมแบบเอกซ์โซเทอร์มิค ซึ่งจะต้องให้ความร้อนแก่รอยเชื่อมสูงถึง 900 องศาเซลเซียส ส่งผลให้เมื่อเย็นตัวลงจะก่อให้เกิดความเค้นตกค้างขึ้นบริเวณรอบรอยเชื่อม ในทำนองเดียวกันกับการติดตั้งสายสัญญาณด้วยการเจาะรูผ่านรางรถไฟที่จะทำให้ตัวรางเกิดความเค้นหนาแน่นบริเวณรูเจาะ ซึ่งจากทั้งสองสาเหตุที่กล่าวมาล้วนเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้รางรถไฟเกิดการแตกร้าวและก่อให้เกิดอุบัติเหตุ

ในงานวิจัยนี้จึงใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ในการหาค่าความเค้นซิงกุลาริตี้ของชิ้นงานทั้งสองแบบ โดยจะนำค่าความเค้นที่เกิดขึ้นภายใต้แรงดึงไปคำนวณหาค่าความเค้นเชิงมุมที่มีผลต่อการแตกของวัสดุ (Mode I) แล้วจึงนำไปเปรียบเทียบกัน เพื่อหาคำตอบว่าการติดตั้งสายสัญญาณแบบใดให้ผลที่ดีกว่า ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่า ชิ้นงานแบบเจาะรูจะมีสนามความเค้นเกิดขึ้นใกล้กับจุดซิงกุลาริตี้ ส่วนชิ้นงานแบบรอยเชื่อมจะพบสนามความเค้นในบริเวณที่ไกลออกไปเล็กน้อยจากจุดซิงกุลาริตี้

ABSTRACT

Nowadays, there are many railway track circuit installation technologies. One of them is exothermic welding that requires a temperature of 900 degree Celsius to weld the joint, but the residual stress will occur around the welded boundary. Similarly, the track circuit that installed by hole drilling method will get weakness which created by the stress concentration. These two factors are the main reason that causes the rail fracture and leads to an accident.

In this paper, to determine stress singularities caused by exothermic welding and a hole drilling, tensile test specimens with a welded zone and a circular hole are simulated using finite element method (FEM). The FEM results showed that the stress singularity fields have found nearby the singular point for the specimen with a circular hole and a little far from the singular point for the specimen with a welded zone.

Key Words: exothermic, stress concentration, finite element, residual stress, stress singularity

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

[1]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

คำนำ

การติดตั้งสายสัญญาณเข้ากับรางรถไฟแบบเจาะรูเป็นสาเหตุให้เกิดความเค้นหนาแน่นรอบรอยเจาะ ซึ่ง Stowell (1950) ได้ทำการหาค่าความเค้นหนาแน่นรอบรูวงกลมของแผ่นโลหะอลูมิเนียมอัลลอย พบว่าในช่วงที่วัสดุมีคุณสมบัติเสียรูปแบบยืดหยุ่นความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าประมาณสามเท่าของความเค้นที่ใส่เข้าไป และในช่วงที่วัสดุเสียรูปแบบพลาสติกจะมีค่าอัตราส่วนของความเค้นที่เกิดขึ้นลดลง นอกจากนั้นแล้วเมื่อใช้กระบวนการโฟโต้อีลาสติก หาค่าความเค้นหนาแน่นที่ถูกสร้างขึ้นจากรูวงกลมบนแท่งชิ้นงานที่อยู่ภายใต้แรงดึง พบว่ายิ่งชิ้นงานมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับขนาดความกว้างของชิ้นงานมากขึ้นเท่าใด จะทำให้ค่าความเค้นหนาแน่นมีค่าลดลงเรื่อยๆและจะสิ้นสุดอยู่แค่สองเท่าเท่านั้น (Wahl and Beeuwkes, 1930)

ในส่วนของการติดตั้งสายสัญญาณเข้ากับรางรถไฟด้วยวิธีการเชื่อมแบบเอกซ์โซเทอร์มิค จะก่อให้เกิดความเค้นตกค้างในบริเวณที่ได้รับความร้อนแล้วเกิดการเย็นตัวลง โดยอัตราการเย็นที่สูงขึ้นจะมีผลโดยตรงต่อปริมาณความเค้นตกค้างและโอกาสในการเกิดความเสียหายของวัสดุที่มากขึ้น (เสฏฐวุฒิ, 2015; Rasouli *et al*., 2008) ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Fricke (2005) และ Nasir *et al*. (2016) ที่พบว่าความเค้นตกค้างที่เกิดจากการเชื่อมจะไปรวมตัวกันอยู่ที่บริเวณรอยเชื่อมและมีลักษณะเป็นความเค้นดึง ส่งผลให้บริเวณที่มีการกระจุกตัวของความเค้นตกค้างสูงมีโอกาสที่จะเกิดรอยแตกร้าวและเกิดความเสียหายมากกว่าบริเวณอื่น

จากผลของความเค้นหนาแน่นและความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้น จึงเป็นที่มาให้งานวิจัยชิ้นนี้ต้องการศึกษาหาค่าความเค้นชิงกุลาริตี้ เพื่อเปรียบเทียบถึงโอกาสในการเกิดการเสียหายจากรอยแตกร้าวของการติดตั้งสายสัญญาณทั้งสองประเภท โดยใช้กระบวนการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในการสร้างแบบจำลองและคำนวณค่าความเค้น

อุปกรณ์และวิธีการ

คุณสมบัติและขนาดชิ้นงานทดลองต้นแบบ

สำหรับวัสดุที่นำมาเป็นชิ้นงานทดสอบ คือ เหล็ก SS400 ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น (JIS) โดยมีคุณสมบัติเป็นไปตามตารางดังนี้

Properties	Unit	Value
Mass Density Kg/m^3	Kg/m^3	7860
Young's Modulus	GPa	190
Yield Strength	MPa	290
Poisson's Ratio	-	0.29
Specific Heat	J/Kg-K	470
Thermal Expansion	μm/m-K	11
Thermal Conductivity	W/m-K	50

Table 1 Physical and Thermal Properties of SS400 steel in JIS standard

ในส่วนของรูปร่างและขนาดของชิ้นงานทดสอบจะอ้างอิงจาก American Society for Testing and Materials (ASTM) ด้วยมาตรฐาน ASTM E8/E8M-09 ตามภาพด้านล่างนี้

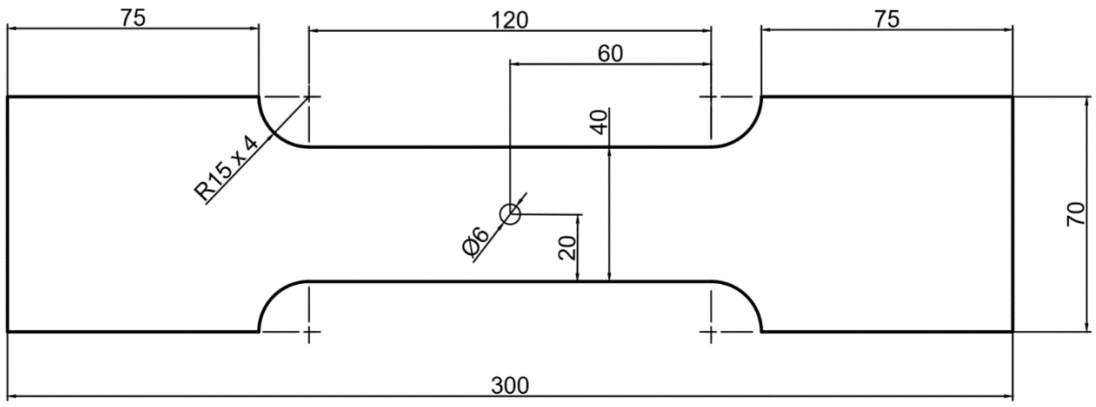


Figure 1 Dimension of Specimen (Hole) in ASTM standard (Unit : Millimeter , Thickness : 6.35 mm.)

อย่างไรก็ตามสำหรับชิ้นงานประเภทรอยเชื่อมนั้นจะมีคุณสมบัติ รูปร่างและขนาดเหมือนกับประเภทเจาะรูทุกประการ เว้นแต่จะไม่มีการเจาะรูตรงกลางและเปลี่ยนพื้นที่บริเวณดังกล่าวให้กลายเป็นพื้นที่สำหรับรับความร้อนจากการเชื่อมที่มีลักษณะเป็นวงกลมแทน โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 30 มิลลิเมตร

การวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์

ในด้านการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์จะใช้โปรแกรม Marc and Mentat (2005) สำหรับวิเคราะห์ผล โดยเริ่มจากทำการแบ่งรูปร่างของชิ้นงานทดสอบออกเหลือเพียงแค่ ¼ ของชิ้นงานต้นแบบ แล้วจึงสร้างเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมขึ้นภายในชิ้นงาน โดยจะกำหนดให้เอลิเมนต์ในบริเวณที่คาดว่าเป็นจุดความเค้นซิงกุลาริตี้ มีขนาดเล็กมาก เพื่อให้ผลที่ได้มีค่าความแม่นยำที่สุด

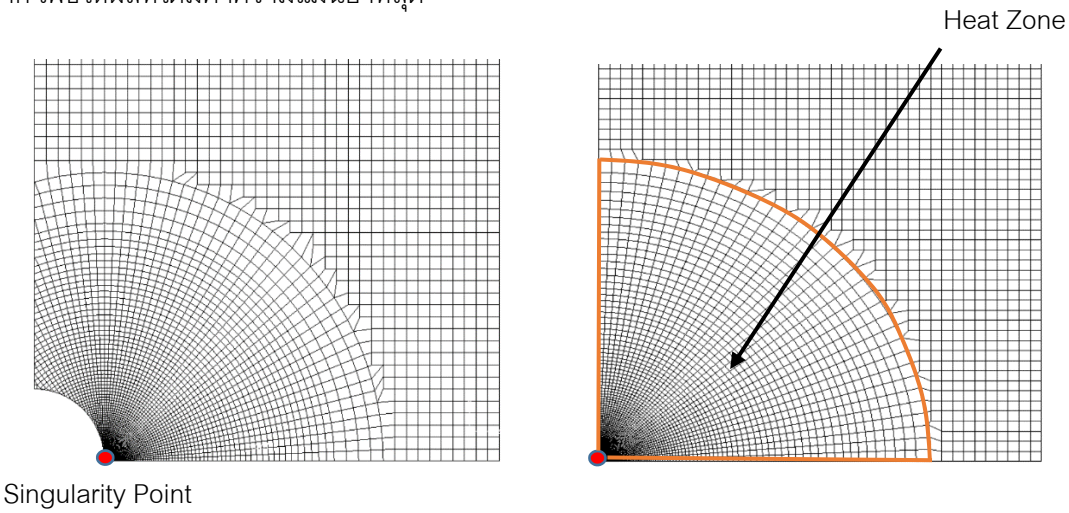


Figure 2 Elements in hole model (left) and Element in weld model (right)

หลังจากนั้นจึงทำการใส่ค่าคุณสมบัติตามตารางที่ 1 และเงื่อนไขที่จำเป็นให้แก่โมเดลชิ้นงานทั้งสองประเภท โดยกำหนดให้มีเงื่อนไขและขอบเขตที่สำคัญ ดังต่อไปนี้

1.) โมเดลทั้งสองประเภทเป็นแบบ 2D Plane Stress และใช้ Element 4 จุดเป็นหลัก

2.) โมเดลทั้งสองประเภทจะถูกตรึงไม่ให้เกิดการกระจัดตามแนวแกน X และ Y (Fixed Displacement) และถูกดึงด้วยความเค้นขนาด 149.487 MPa ดังภาพที่ 3(1A)
(ที่มา : น้ำหนักของโบกี้ที่กระทำกับเพลาล้อรถไฟตามมาตรฐานของการรถไฟไทย)

3.) กำหนดให้โมเดลชนิดรอยเชื่อมถูกดึงหลังจากที่เย็นตัวสู่อุณหภูมิห้องสมบูรณ์แล้ว

4.) สำหรับโมเดลรอยเชื่อม จะกำหนดให้อุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับอุณหภูมิห้อง (25 °C) แล้วใส่ความร้อนเข้าไปจนถึง 900 °C (เฉพาะพื้นที่บริเวณที่รับความร้อน) หลังจากนั้นจึงปล่อยชิ้นงานทิ้งไว้ให้เย็นตัวด้วยอากาศเท่านั้น (Air – Natural Convection Coefficient = 25 W/m^2-K)

5.) พิจารณาค่าความเค้นที่เกิดขึ้นทั้งในช่วงก่อนและหลังการเสียรูป (Elasto - Plastic)

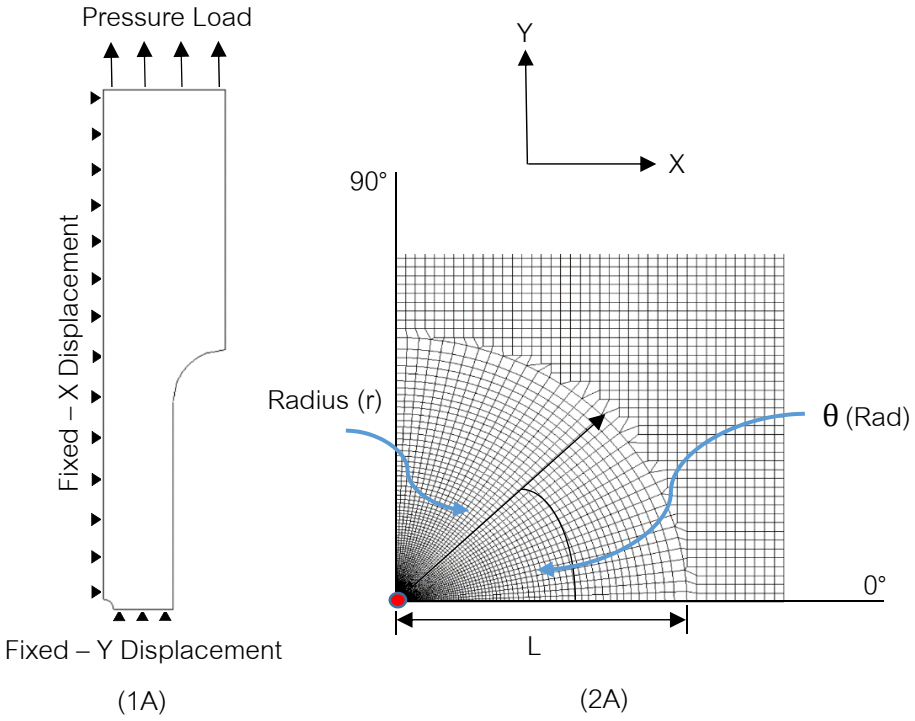


Figure 3 (1A) Hole Model Conditions, (2A) Weld Model Degree with r-θ coordinates

แล้วจึงทำการประมวลผลเพื่อทำการเก็บค่าความเค้นที่เกิดขึ้น (σ_{xx} , σ_{yy} , τ_{xy}) ตั้งแต่บริเวณจุดซิงกุลาริตี้จนถึงเอลิเมนต์สุดท้ายตามแนวรัศมี โดยจะแบ่งเก็บค่าความเค้นทุก 5 องศา ตั้งแต่แนวแกน X ($\theta = 0°$) จนถึงแนวแกน Y ($\theta = 90°$) ดังที่แสดงในภาพที่ 3(2A)

การคำนวณค่าความเค้นเชิงมุม

นำค่าตัวแปรตามแนวแกนทั้งสามประเภทข้างต้น มาทำการคำนวณใหม่เป็นค่าความเค้นเชิงมุมซึ่งมีอิทธิพลต่อการแตกหรือฉีกขาดของวัสดุมากที่สุด (Mode I) โดยใช้สมการดังนี้

$$\sigma_{\theta\theta} = \left(\frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2}\right) - \left(\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2}\right)\cos 2\theta - \tau_{xy}\sin 2\theta$$

เมื่อ σ_{xx} คือ ค่าความเค้นตามแนวแกน X (Pa)

σ_{yy} คือ ค่าความเค้นตามแนวแกน Y (Pa)

τ_{xy} คือ ค่าความเค้นเฉือนที่กระทำกับด้าน X โดยมีทิศไปตามแกน Y (Pa)

θ คือ มุมที่วัดจากจุดซิงกุลาริตี้ไปยังจุดที่สนใจ (Rad)

ผลการทดลองและวิจารณ์

จากการทดสอบหาค่าความเค้นที่ตำแหน่งองศาต่างกันของทั้งสองโมเดล พบว่าโมเดลเจาะรูจะมีค่าความเค้นเชิงมุมสูงสุดที่แนวแกน θ = 0 องศา บริเวณจุดซิงกุลาริตี้พอดี โดยมีค่าความเค้นเชิงมุมเท่ากับ 389.91 MPa ซึ่งความเค้นเชิงมุมนี้ประกอบไปด้วย

σ_{xx} = 0.63 MPa σ_{yy} = 389.91 MPa τ_{xy} = - 0.58 MPa

จะเห็นได้ว่าค่าความเค้นหลักที่ส่งผลต่อความเค้นเชิงมุมโดยตรง คือ ค่าความเค้นในแนวแกน y สามารถคิดเป็น 2.66 เท่าของความเค้นที่ใส่เข้าไป อันเป็นผลมาจากความเค้นหนาแน่นที่บริเวณรอบรูวงกลม ถือว่าสอดคล้องกับผลการทดลองของ Stowell (1950) และ Wahl and Beeuwkes (1930)

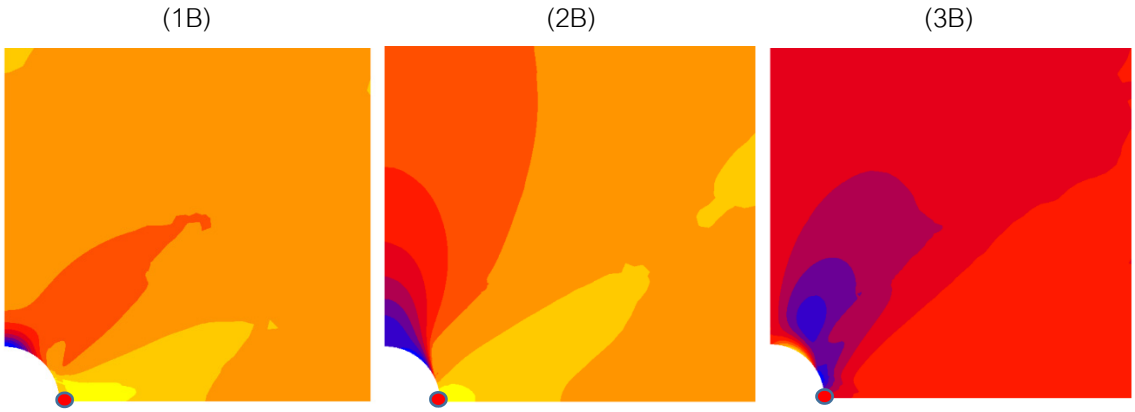


Figure 4 The results in (1B) σ_{xx} , (2B) σ_{yy} and (3B) τ_{xy} of Hole Model

ในส่วนของโมเดลแบบรอยเชื่อมนั้นจะมีค่าความเค้นเชิงมุมสูงสุดที่แนวแกน θ = 0 องศา ห่างจากจุดที่คาดว่าเป็นจุดซิงกุลาริตี้ ด้วยระยะ 0.264315 มิลลิเมตร โดยมีความเค้นเชิงมุมเท่ากับ 471.588 MPa ซึ่งความเค้นเชิงมุมค่านี้ประกอบไปด้วย

σ_{xx} = 109.45 MPa σ_{yy} = 471.59 MPa τ_{xy} = 0.001 MPa

จะเห็นได้ว่าค่าความเค้นหลักที่ส่งผลต่อความเค้นเชิงมุมโดยตรงยังคงเป็นค่าความเค้นในแนวแกน y เช่นเดิม โดยเมื่อนำไปหักล้างกับค่าความเค้นดึงที่ใส่เข้าไปแล้ว (149.487 MPa) ยังคงมีค่าความเค้นดึงหลงเหลืออยู่ จึงหมายความได้ว่าความเค้นดึงเหล่านี้ คือ ความเค้นตกค้างที่เกิดจากการเย็นตัวของรอยเชื่อมนั่นเอง ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Fricke (2005) และ Nasir *et al.* (2016)

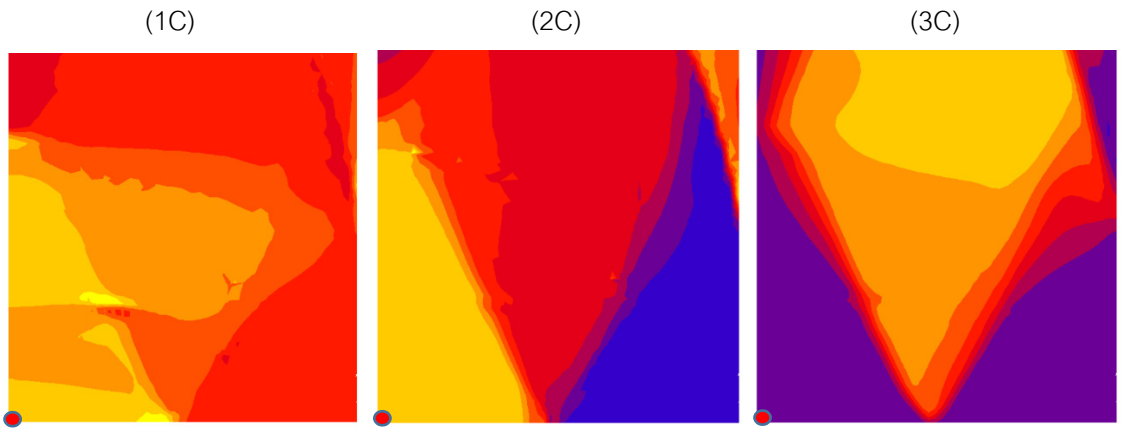
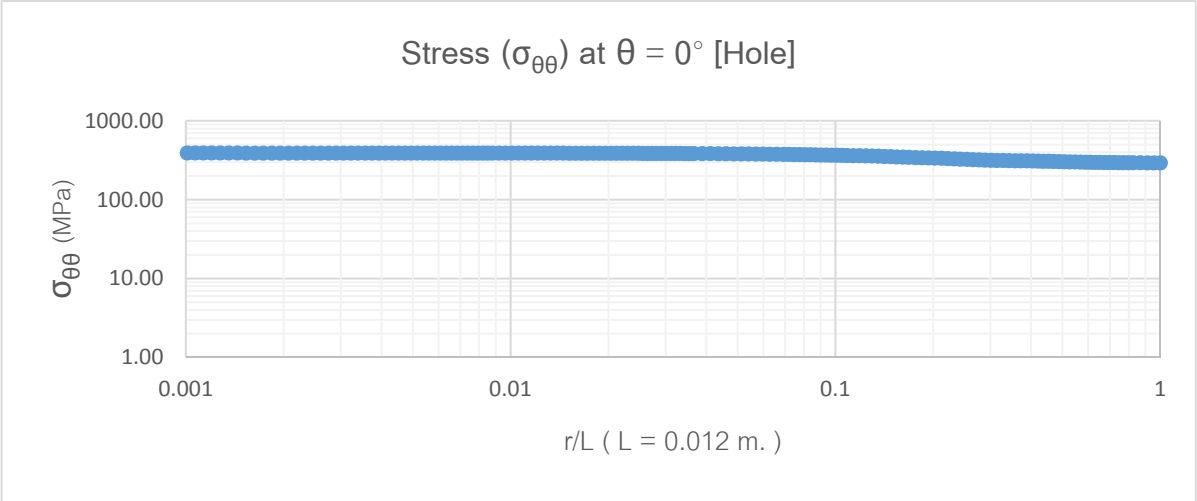


Figure 5 The results in (1C) σ_{xx} , (2C) σ_{yy} and (3C) τ_{xy} of Weld Model

และเมื่อนำค่าความเค้นเชิงมุมที่ได้ไปสร้างกราฟเทียบกับ r/L (อัตราส่วนระหว่างระยะจากจุดซิงกุลาริตี้ถึงจุดที่ต้องการวัดกับระยะจากจุดซิงกุลาริตี้ถึงจุดที่ไกลที่สุดของเอลิเมนต์สุดท้ายตามแนวรัศมี) จะได้กราฟดังนี้



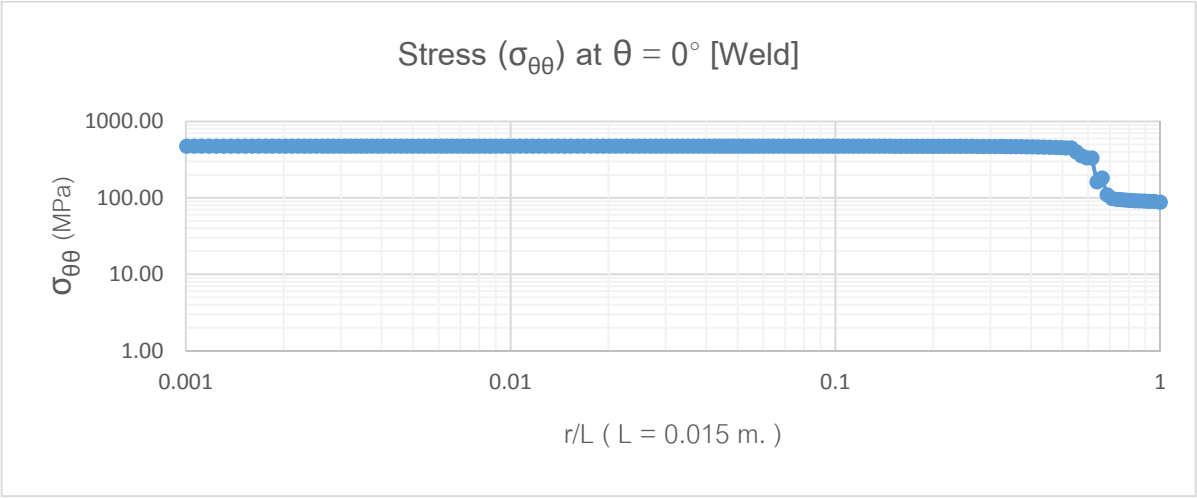


Figure 6 The comparison of $\sigma_{\theta\theta}$ and r/L Ratio with Logarithm Graph

หากพิจารณาจากกราฟข้างต้นจะเห็นได้ว่ากราฟของโมเดลชนิดเจาะรูนั้นจะแสดงถึงความเค้นเชิงมุมที่ลดลงทีละน้อยเมื่อเพิ่มระยะห่าง แต่จะไม่ลดลงต่ำไปกว่าสองเท่าของความเค้นที่ใส่เข้าไป ซึ่งเป็นผลมาจากความเค้นหนาแน่นในบริเวณรูเจาะที่ค่อยๆลดลงเมื่อห่างจากจุดซิงกุลาริตี้ที่มากขึ้น

ในทางกลับกันสำหรับกราฟของโมเดลชนิดรอยเชื่อมพบว่าค่าความเค้นเชิงมุมนั้นมีค่าค่อนข้างคงที่หรือลดลงน้อยมากในช่วงแรก แต่จะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงของความเค้นเชิงมุมแบบฉับพลันในช่วงบริเวณที่ใกล้กับขอบของรอยเชื่อม ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ว่าเป็นผลจากการเย็นตัวที่ไม่เท่ากันของรอยเชื่อม โดยเอลิเมนต์บริเวณขอบของพื้นที่รับความร้อน (r = L = 0.015 m.) จะเป็นเอลิเมนต์ที่มีความเค้นกดสูงสุด เนื่องมาจากพื้นที่รับความร้อนเกิดการขยายตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้เนื้อโลหะดันไปปะทะกับบริเวณที่ไม่ได้รับความร้อนที่มีอัตราการขยายตัวที่ต่ำกว่า เช่นเดียวกับบริเวณจุดซิงกุลาริตี้ของพื้นที่รับความร้อนที่สามารถขยายตัวจากความร้อนได้อย่างเต็มที่ จึงทำให้บริเวณจุดซิงกุลาริตี้มีค่าความเค้นดึงสูงสุด

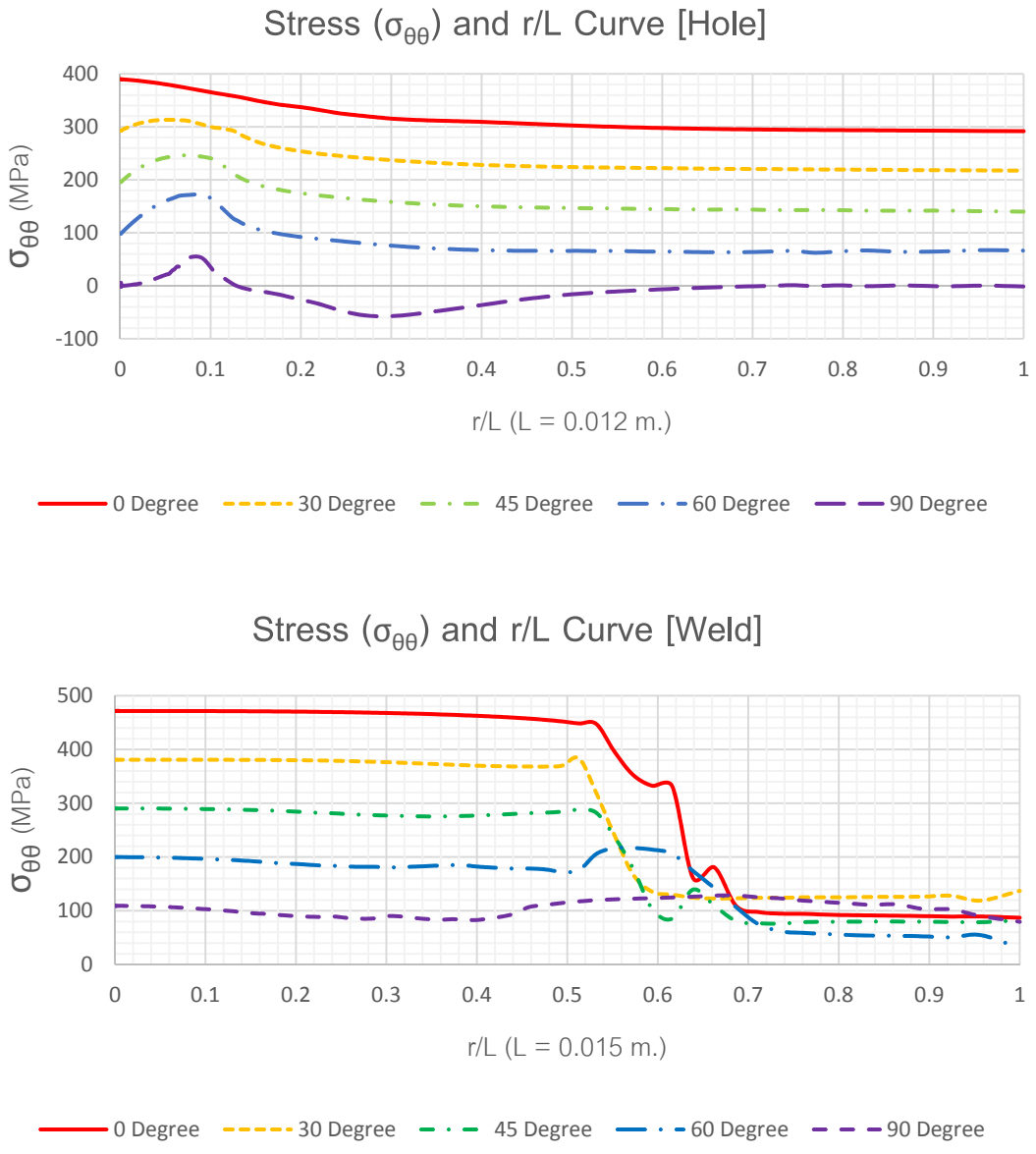


Figure 7 Stress ($\sigma_{\theta\theta}$) at θ = 0°/30°/45°/60°/90° of Hole and Weld Model

สรุป

จากผลการทดลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่พบ สามารถสรุปได้ว่าค่าความเค้นเชิงมุมที่เกิดขึ้นจากความเค้นตกค้างมีค่าสูงสุดมากกว่าค่าความเค้นเชิงมุมที่เกิดจากความเค้นหนาแน่น และเมื่อพิจารณาโอกาสในการเกิดความเสียหาย โดยใช้กราฟความเค้นเชิงมุมจากแกนองศาที่มีความเค้นเชิงมุมเกิดขึ้นสูงสุดของแต่ละโมเดล พบว่าในช่วงระยะ $0 < r/L < 0.5$ ชิ้นงานประเภทเจาะรูจะมีโอกาสในการเกิดความเสียหายมากกว่า เนื่องจากค่าความเค้นในบริเวณใกล้จุดซิงกุลาริตี้มีความแปรปรวนที่สูงกว่า โดยจะสามารถสังเกตได้จากกราฟชิ้นงานเจาะรูมีความชันลดลงมากกว่าชิ้นงานรอยเชื่อม และในช่วง $0.5 < r/L < 1$ ชิ้นงานรอยเชื่อมจะมีโอกาสเสียหายมากกว่า เนื่องจากกราฟความเค้นเชิงมุมต่อระยะ r/L มีความชันที่ลดลงอย่างรวดเร็ว

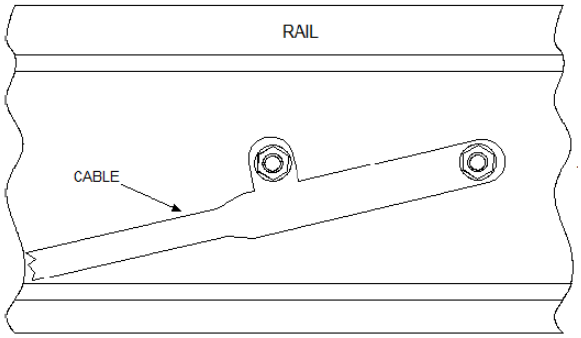


Figure 8 Cable attach to railway (Hole Drilling)
Source : Institution of Railway Signal Engineers



Figure 9 Cable attach to railway (Exothermic Welding)

เอกสารอ้างอิง

เสฏฐวุฒิ บุญรอด และ อรรถพร วิเศษสินธุ์. 2015. ผลกระทบของอัตราการเย็นตัวต่อสนามความเค้นซิงกุลาริตี้บนรอยต่อของวัสดุ 2 ชนิด โดยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์, ไม่ระบุหน้าที่พิมพ์. *ใน* **การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 29**. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, ไม่ระบุสถานที่พิมพ์.

Fricke, W. 2005. Effects of residual stresses on the fatigue behaviour of welded steel structure. **Mat.-wiss. u. Werkstofftech** 36 (11): 642-649.

Nasir, N. S. M., M. K. A. A. Razab, S. Mamat and M. I. Ahmad. 2016. REVIEW ON WELDING RESIDUAL STRESS. **ARPN Journal of Engineering and Applied Science** 11 (9): 6166-6175.

Rasouli, D., Sh. K. Asl, A. Akbarzadeh and G. H. Daneshi. 2008. Effect of cooling rate on the microstructure and mechanical properties of microalloyed forging steel. **Journal of Materials Processing Technology** 206: 92-98.

Stowell, E. Z 1950. **STRESS AND STRAIN CONCENTRATION AT A CIRCULAR HOLE IN AN INFINITE PLATE**. (Technical Note). National Advisory Committee for Aeroneutics, Washington.

Wahl, A. M. and R. Beeuwkes, Jr. 1930. **Stress Concentration Produced by Holes and Notches**. 9.

การจำลองแบบความเค้นสัมผัสที่จมูกตะเฆ่ของประแจมุม 1:12 ของการรถไฟแห่งประเทศไทย โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบพลวัต

Contact Stress Simulation at the Frog of the 1:12 Turnout of the State Railway of Thailand Using Dynamic Explicit Finite Element Method

โอภาส ติรมาศเสถียร[1,2*] ประพจน์ ขุนทอง[1] และ วิชัย ศิวะโกศิษฐ์[1]

Aophat Tiramatsathiar[1,2*], Prapot Khuntong[1] and Wichai Siwakosit[1]

บทคัดย่อ

ประแจมีสภาพที่เป็นจุดวิกฤตของทางที่มีค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงรักษาที่ค่อนข้างสูงตลอดอายุของการใช้งาน การชำรุดซึ่งอาจเกิดขึ้นได้จากความเค้นสัมผัส (Contact Stress) ของล้อรถไฟที่วิ่งผ่านในทาง โดยเฉพาะรถจักรที่มีน้ำหนักกดเพลาที่สูง เช่น รถจักร U20 โดยความเค้นสัมผัสที่มีค่าสูงจะทำให้วัสดุของจมูกตะเฆ่เกิดความชำรุดในลักษณะของความล้าที่เกิดจากการกลิ้งผ่านช่องว่างบริเวณจมูกตะเฆ่ ซึ่งบทความนี้จะได้ทำการศึกษาผลกระทบจากการวิ่งผ่านจมูกตะเฆ่ของล้อรถจักรที่มีน้ำหนักกดเพลา 20 ตัน ที่วิ่งในทางตรงด้วยความเร็วตามพิกัด 70 กม./ชม. ต่อขนาดของแรงกระทำที่เกิดขึ้นที่จมูกตะเฆ่โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบพลวัต ผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองแสดงให้เห็นว่าแรงที่กระที่จมูกตะเฆ่มีค่าสูงถึง 1.62 เท่าของแรงสถิต ค่าของความเค้น von Mises เท่ากับ 1.206 GPa ซึ่งจะเป็นค่าที่ถูกใช้ในการหาค่าวิกฤติของจมูกตะเฆ่ได้ต่อไป

ABSTRACT

Turnout is a critical element of railway which requires high maintenance cost throughout its life. Damage may be incurred from high value of contact stress by a running train wheel especially from a high axle load locomotive like U20 locomotive. High contact stress may cause damage to a frog due to a rolling of a wheel pass a slot. This study focuses on a rolling of a U20 locomotive wheel passes a frog on the tangent direction with an operating speed of 70 km/h to a magnitude of a contact force at a frog by using an explicit dynamic finite element method. The result shows that a contact force at a frog is 1.62 times of a static wheel load whereas a von Mises stress is 1.206 GPa which can be later used to calculate critical values of a frog.

Key Words: Frog, Train Wheel, Contact Stress, Deformation, Crossing Nose

*Corresponding Author; e-mail address: opass@hotmail.com

[1]ศูนย์วิศวกรรมระบบรางมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

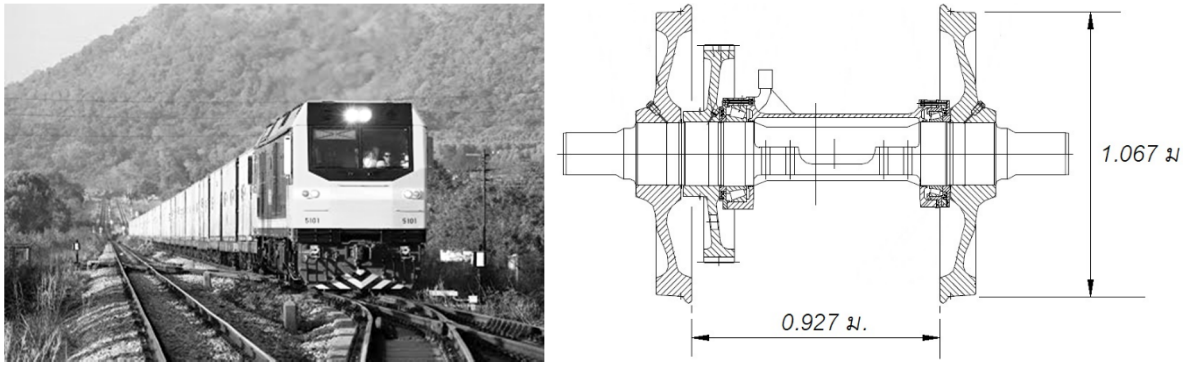
[1]KURAIL, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

[2]การรถไฟแห่งประเทศไทย เลขที่ 1 ถนนรองเมือง เขตปทุมวัน กรุงเทพ 10330

[2]State Railway of Thailand, No.1 Rongmuang Rd., Pathumwan, Bangkok 10330

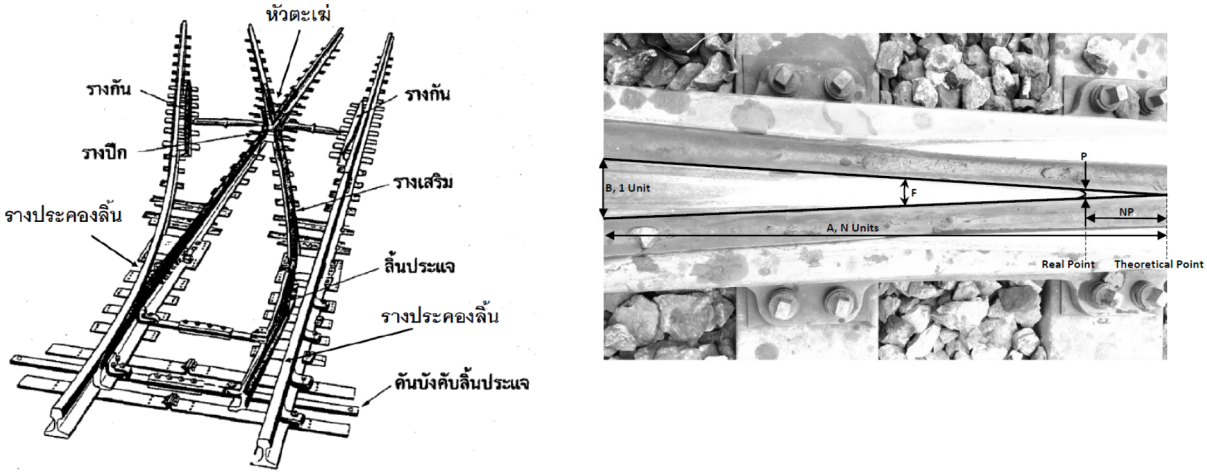
คำนำ

การรถไฟแห่งประเทศไทย มีการใช้งานหัวรถจักรชนิด SDA3 หรือ U20 ซึ่งเป็นหัวรถจักรที่มีน้ำหนักกดเพลาสูงที่สุดที่มีการใช้ในทางที่ 20 ตันต่อเพลา มีการจัดเรียงล้อแบบ Co-Co (1แคร่ จะมี 3 เพลา) มีกำลังขับสูงสุดที่ล้อรถจักรเท่ากับ 1,845 kW (สิทธิพงษ์, 2561) โดยมีลักษณะหัวรถจักรตามรูปที่ 1 (SRT, 2014) โดยมีการใช้งานส่วนใหญ่ระหว่างท่าเรือแหลมฉบังและศูนย์กระจายสินค้า (ICD) ของการรถไฟแห่งประเทศไทยเขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร คอนทัวร์ของล้อรถจักร U20 เป็นชนิดคอนทัวร์วิทูรซึ่งมีการใช้งานทั่วไปในการรถไฟแห่งประเทศไทย มีลักษณะตามรูปที่ 2 (SRT, 2011)



(a) (b)

Figure 1 (a) An SDA3 Locomotive or U20 Locomotive of SRT (SRT, 2014) (b) U20 Wheel profile (SRT,2011)



(a)

(b)

Figure 2 (a) Turnout Nomenclature (SRT, 1993) (b) Frog Dimensions (Siwakosit, 2015)

ประแจหรือประแจทางหลีกหรือ Turnout มีหน้าที่ในการเปลี่ยนเส้นทางการเดินรถของขบวนรถไฟ และสามารถวิ่งผ่านออกจากทางวิ่งเดิมไปสู่เส้นทางอื่นได้ โดยจะมีการวางประแจไว้ที่บริเวณทางแยก วางในทางหลีก บริเวณย่านสถานีเพื่อใช้ในการสับเปลี่ยนแนวทางวิ่งในกรณีต่างๆ กัน เช่นสับเปลี่ยนแนวทางวิ่ง การสับเปลี่ยนขบวนรถ เป็นต้น องค์ประกอบของประแจเป็นไปตามรูปที่ 2 (a) (SRT, 1993)

จมูกตะเฆ่คือส่วนที่เป็นปลายแหลมของตะเฆ่(Frog) ทำให้บังใบของล้อรถไฟสามารถวิ่งผ่านในการเปลี่ยนเส้นทางการเดินรถได้ มีลักษณะทางเรขาคณิตตามรูปที่ 2 (b) (Siwakosit, 2015) รูปทรงทางเรขาคณิตของตะเฆ่จะระบุเป็นอัตราส่วนของความยาวหรือเรียกเป็นมุม เช่น 1: N ซึ่งระยะ N จะหาได้จากการวัดที่จุดตัดทางทฤษฎี Theoretical point ไปยังริมขอบด้านวิ่ง Gauge side ที่แยกออกจากกัน 1 หน่วย ตามแนวกึ่งกลางของตะเฆ่

$$\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{1}{2\mathrm{N}}$$
$$\mathrm{N} = \frac{1}{2}\cot\left(\frac{\theta}{2}\right) \qquad (1)$$

หรือในหน่วยองศา คือ

$$\theta = 2\arctan\left(\frac{1}{2\mathrm{N}}\right) \qquad (2)$$

ในทางปฏิบัติการรถไฟแห่งประเทศไทยมีการใช้งานประแจมุม 1:12 ซึ่งหมายความถึงตะเฆ่ที่มีขนาดเท่ากับ no.12 (Frog Number) โดยในบทความนี้จะทำการสร้างแบบจำลองของตะเฆ่ที่มีขนาด no.12 ตามที่กำหนดโดยการรถไฟแห่งประเทศไทยต่อไป จมูกตะเฆ่เป็นส่วนของประแจที่ต้องรับแรงกระแทกจากล้อรถไฟในขนาดที่ค่อนข้างสูง โดยเกิดจากการวิ่งผ่านช่องว่างที่เว้นไว้ให้บังใบล้อวิ่งผ่าน ขนาดของแรงกระแทกที่สูงสามารถเกิดขึ้นได้จากรูปทรงเรขาคณิตของการสัมผัสของล้อกับรางมีความไม่เหมาะสมที่บริเวณเปลี่ยนผ่าน (Li, X. *et al.*, 2017) จนอาจนำมาซึ่งการเสียรูปพลาสติกถาวร การแตกร้าวในเนื้อวัสดุจากการล้า หรือ เกิดแผลที่ผิว (shelling) อื่นๆ

ตัวอย่างความเสียหายทางกายภาพของจมูกตะเฆ่ที่ใช้งานในทางของการรถไฟแห่งประเทศไทยเป็นไปตามรูปที่ 3 โดยทางเทคนิคแล้ว ประแจจะมีสภาพที่เป็นจุดวิกฤตของทางที่มีค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงรักษาที่ค่อนข้างสูงตลอดอายุของการใช้งาน การชำรุดซึ่งอาจเกิดขึ้นได้จากความเค้นสัมผัส (Contact Stress) ของล้อรถไฟที่วิ่งผ่านในทาง โดยเฉพาะรถจักรที่มีน้ำหนักกดเพลาที่สูง เช่น รถจักร U20 ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น โดยความเค้นสัมผัสที่มีค่าสูงจะทำให้เกิดความชำรุดวัสดุของจมูกตะเฆ่ในลักษณะของความล้าที่เกิดจากการกลิ้งผ่านช่องว่างบริเวณจมูกตะเฆ่ ซึ่งบทความนี้จะได้ทำการศึกษาผลกระทบจากการวิ่งผ่านจมูกตะเฆ่ของล้อรถจักรที่มีน้ำหนักกดเพลา 20 ตัน ที่วิ่งในทางตรงด้วยความเร็วตามพิกัด 70 กม./ชม. ต่อขนาดของความเค้นสัมผัสที่เกิดขึ้นที่จมูกตะเฆ่

อุปกรณ์และวิธีการ

1. ข้อมูลทั่วไป

- รถจักร U20 มีน้ำหนักกดที่ล้อขนาด 10 ตัน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางล้อ 1067 มิลลิเมตร ใช้ล้อชนิดคอนทัวร์วิทูร ความเร็วสูงสุด Max. Service Speed 100 km/h. สัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างล้อกับรางจะอยู่ที่ 0.30

Primary suspension	Stiffness	=	1.15	MN/m
	Damping	=	30	kNs/m
Wheelset(unsprung)	Mass	=	1510	kg
Ballast(Quality'good')	Stiffness	=	120	MN/m
	Damping	=	48	kNs/m
Rail pad	Stiffness	=	1300	MN/m
	Damping	=	45	kNs/m
หมอนคอนกรีต Sleeper	Mass	=	732	kg

- ตะเฆ่เป็นแบบที่ถูกหล่อมาจากเหล็กแมงกานิส(Manganese Steel Frog)ทั้งก้อน

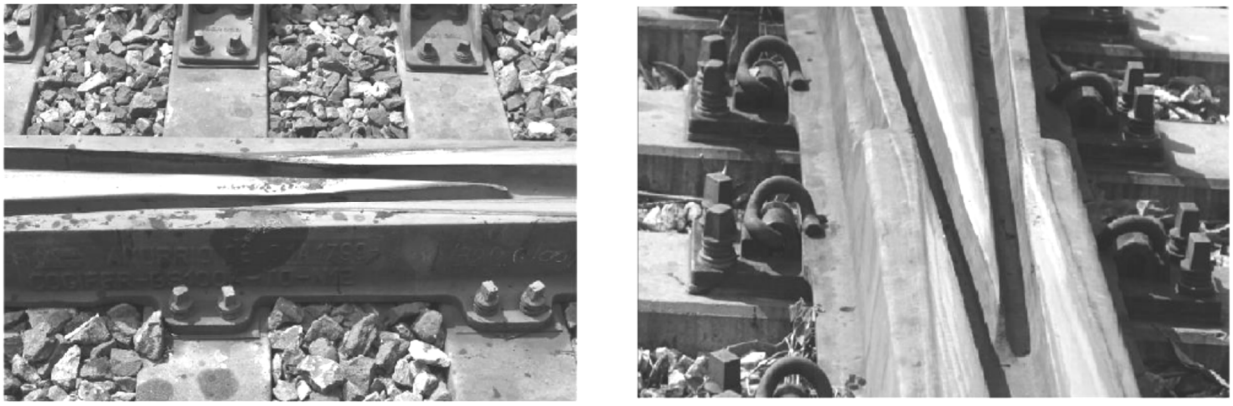


Figure 3 Damaged Frog of SRT

การจำลองพฤติกรรมของวัสดุ

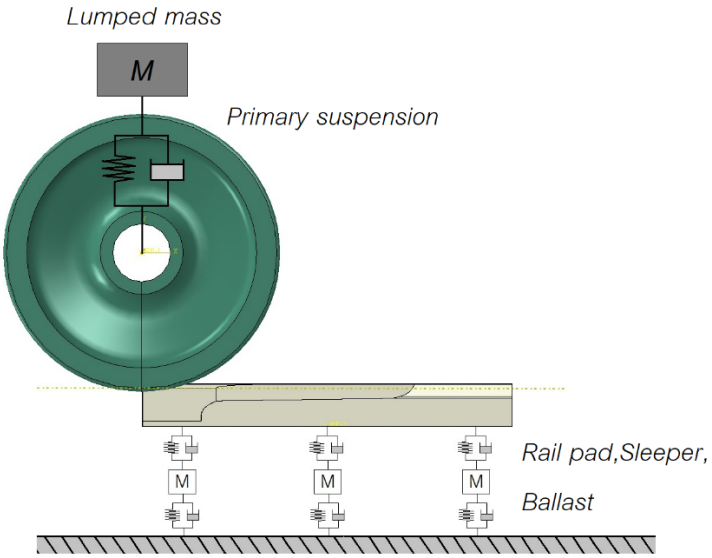
วัสดุยืดหยุ่นทางกลของวัสดุจำลองที่สร้างขึ้นนี้จะมีคุณสมบัติการยืดหยุ่น-การเสียรูป เหมือนกันทุกทิศทาง(isotropic) พารามิเตอร์จะแสดงไว้ในตารางที่ 1

Table 1 Properties of Steel and Manganese

Type	Steel(wheel)	Mn(crossing)
Density (kg/m^3)	7850	7800
Elastic Modulus (GPa)	210	190
Yeild Stress (MPa)	400	360
Poisson ratio	0.3	0.3
Max.Plastic Strain	50%	

2. ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นวิธีเชิงคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการคำนวณสมการเชิงตัวเลขที่มีความซับซ้อน โดยการสร้างสมาชิก หรือ เอลิเมนต์ (Element) ซึ่งมีการอธิบายไว้ในหนังสือด้านไฟไนต์เอเลเมนต์หลายเล่ม เช่น An Analysis of the Finite Element Method (Strang, 2008) ปฏิสัมพันธ์ด้านพลศาสตร์ของล้อ/ตะเฆ่ สามารถที่จะวิเคราะห์ได้โดยวิธี MBD ไฟไนท์อิลิเมนต์ (multi-body dynamics FE)



รูปแบบ(MBD)จะเป็นการนำเอาองค์ประกอบของโครงข้อแข็ง/ยืดหยุ่นของรถโดยใช้รูปแบบของสปริงค์(springs)และตัวหน่วง(dampers) ต่อเข้าด้วยกันอย่างเรียบง่าย(Wei, Z. *et al.*, 2018) รูปที่ 4 มวล-สปริงค์-ตัวหน่วง จะอยู่บนพื้นฐานของจำนวนดีกรีของความอิสระ (DOFs)

Figure 4 FE model of W/C dynamic impact

3. การสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม ABAQUS

การสร้างแบบจำลองจะทำในโปรแกรม abaqus ซึ่งเป็นโปรแกรมที่มีลิขสิทธิ์ถูกต้องตามกฎหมายของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ทำการขึ้นรูปเป็นแบบ 3D รูปที่ 5 พารามิเตอร์ในการสร้างรูปทรงเรขาคณิตของตะเฆ่จะได้จากแบบของบริษัทผู้ผลิต ความยาวของแบบจำลองที่นำเสนอในที่นี้จะอยู่ในช่วง 1.30 เมตร ภายในช่วงนี้เพียงพอที่จะตรวจสอบการเปลี่ยนถ่ายของล้อจากรางปีกไปยังจมูกตะเฆ่ได้อย่างสมบูรณ์

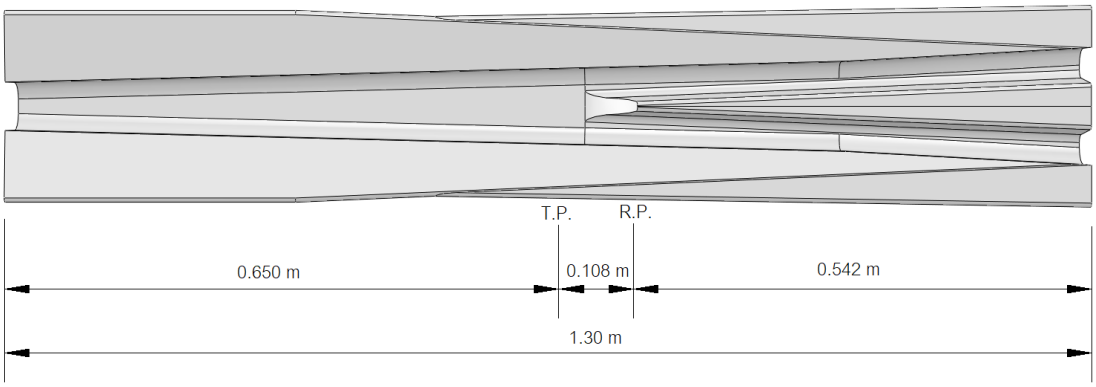


Figure 5 Model of a 1:12 Frog of SRT

4. ขั้นตอนการวิเคราะห์(Analysis procedure)

ในช่วงเริ่มต้นล้อจะวางอยู่บนรางปีกมีทิศทางการวิ่งเข้าหาตะเข่(facing) รูปที่ 6 ความเร็วในการวิ่งใช้ความเร็วคงที่ตามพิกัดในการบรรทุก 70 กม./ชม. (v = 19.44 ม/วินาที) ค่าของความเร็วเชิงมุมเท่ากับ 36.47 rad ขนาดของน้ำหนักกดล้อแบบสถิตจะเท่ากับ 100 kN การคำนวณจะไม่นำการดัดและการบิดของตะเข่และความไม่สม่ำเสมอของทางก่อนและหลังของชุดตะเข่มาคิด ปฏิสัมพันธ์ของล้อ/ตะเข่ในขณะที่กลิ้งเปลี่ยนผ่านจากรางปีกมายังจมูกตะเข่จะทำให้เกิดแรงกระแทกที่สูงขึ้น การจำลองนี้จะมุ่งเน้นความสนใจไปที่แรงกระแทกจากล้อ

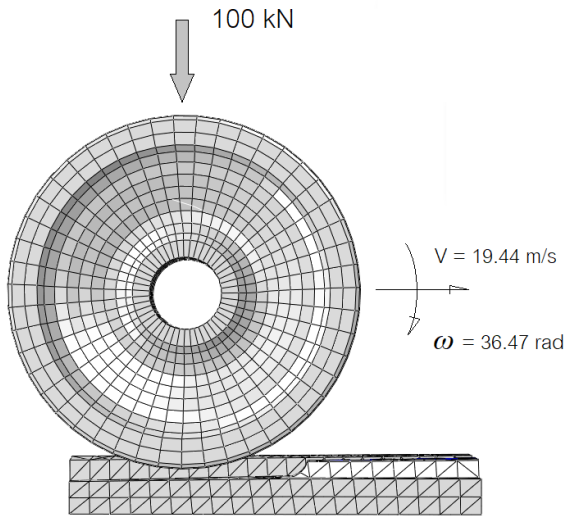


Figure 6 Locomotive Wheel Running Model

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลที่ได้จากแบบจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์จะพบว่าพฤติกรรมแบบไดนามิกระหว่างโปร์ไฟล์ล้อ/จมูกตะเข่จะมีความอ่อนไหวต่อรูปทรงเรขาคณิตเป็นอย่างมาก มีพารามิเตอร์อยู่หลายตัวที่จะส่งผลต่อแรงกระแทกบริเวณจมูกให้สูงขึ้น เป็นต้นว่าการเสียรูปของตะเข่หรือแม้แต่พื้นล้อเองก็ตาม ในการจำลองของการศึกษานี้พบว่า การวิ่งของล้อในบริเวณเปลี่ยนผ่านบนจมูกตะเข่ในขณะที่การเปลี่ยนผ่านเป็นไปอย่างสมบูรณ์ในรูปที่ 8 จะสามารถสร้างแรงกระแทกจากล้อได้สูงถึง 162.26 kN ซึ่งจะส่งผลทำให้เกิดความเค้นในเนื้อวัสดุที่สูงตามมาดังเช่นในรูปที่ 9 จะแสดงถึงความเค้น Von Mises ที่ได้จากการวิเคราะห์จะมีค่าสูงถึง 1.206 GPa ที่ตำแหน่ง 0.34 m วัดจากปลายจมูกตะเข่ ซึ่งจะเป็นเกณฑ์ที่ถูกใช้ในการหาค่าวิกฤติที่ล้อกระทำบนตะเข่ที่การแตกร้าวมีโอกาสเกิดขึ้นบนจมูกตะเข่ต่อไป

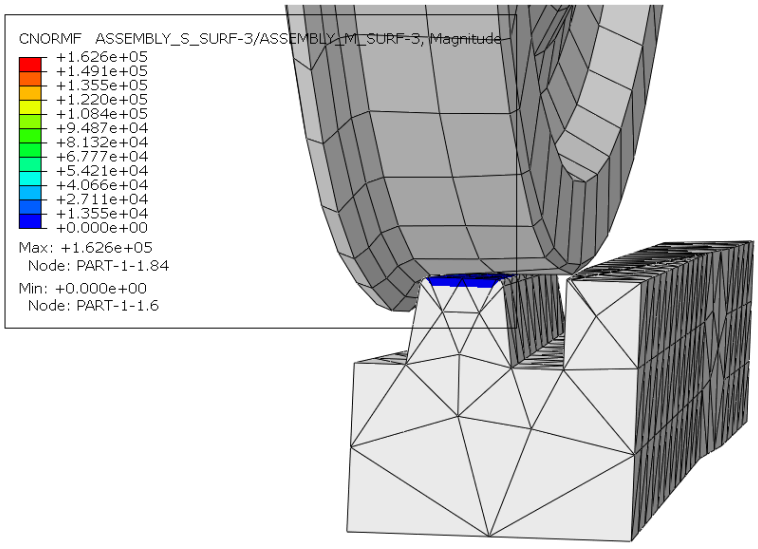


Figure 8 Impact Force at Frog of 162.6 kN

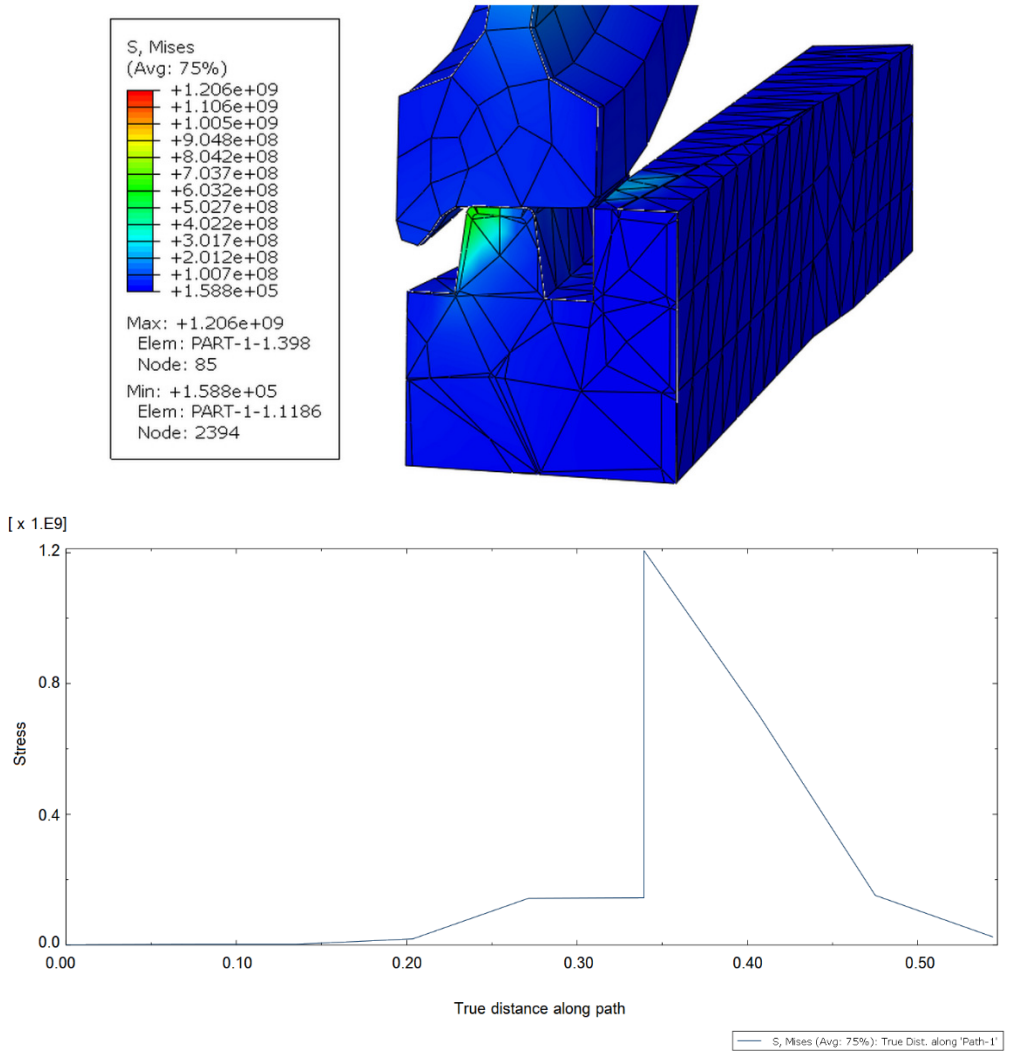


Figure 9 Von-Mises Stress Distribution at the Crossing

สรุป

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์จะทำให้รู้ถึงความสัมพันธ์ระหว่างโปร์ไฟล์ล้อ/จมูกตะเฆ่(ราง),ขนาดและตำแหน่งของการเสียรูปหรือชำรุด โดยสามารถนำไปใช้ในการประเมินถึงพิกัดในการใช้งาน ซึ่งการเสียรูปเรขาคณิตหรือการชำรุดของพื้นล้อหรือจมูกตะเฆ่เองก็ตามก็อาจจะสามารถสร้างแรงกระแทกในปริมาณที่สูงโดยประมาณ 2-3 เท่าของแรงกดเพลาล้อแบบสถิตย์ ซึ่งก็อาจก่อให้เกิดอันตรายร้ายแรงให้เกิดขึ้นได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับคุณสมบัติของวัสดุก็มีบทบาทสำคัญยิ่งต่ออายุการใช้งาน ผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองจะช่วยให้สามารถคำนวณอายุความล้าที่เริ่มแตกหักตามแนวทางที่กำหนดได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บริษัท เอทีโอเอเชียเทิร์นเฮ้าส์ จำกัด ที่ได้อนุเคราะห์แบบประแจมาใช้ในการวิจัยครั้งนี้ และการรถไฟแห่งประเทศไทย ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ในทำวิจัย และ ได้รับความกรุณาอย่างสูงจากศูนย์วิศวกรรมระบบรางมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำปรึกษาตลอดจนปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ

เอกสารอ้างอิง

สิทธิพงษ์ พรมลา. 2561. **เอกสารประกอบการสอนวิชา 200432 เทคโนโลยีหัวรถจักร**. คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

State Railway of Thailand, 2014, **Train Documentary No.10**, Bangkok, Thailand

State Railway of Thiland, 2011, **Technical Specification of High Performance CNC Portal Wheel Lath**, Bangkok, Thailand

State Railway of Thailand, 1993, **Permanent Way Knowledge**, Bangkok, Thailand

Siwakosit W., **Lecture Note for 01200431 Principles of Rail Engineering**, Faculty of Engineering, Kasetsart University

Strang G., 2008, **An Analysis of the Finite Element Method 2nd Edition**, Wellesley-Cambridge, USA

Guo, S.L., D.Y. Sun, F.C. Zhang, X.Y. Feng and L.H. Qian. 2013. Damage of a Hadfield Steel Crossing Due to Wheel Rolling Impact Passages. **Wear**. 305(1): 267-273.

Kaewunruen, S. 2014. Monitoring Structural Deterioration of Railway Turnout Systems Via Dynamic Wheel/Rail Interaction. **Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation**. 1(19-24).

Kassa, E. and J.C.O. Nielsen. 2009. Dynamic Train–Turnout Interaction in an Extended Frequency Range Using a Detailed Model of Track Dynamics. **Journal of Sound and Vibration**. 320(4): 893-914.

Li, X., P.T. Torstensson and J.C.O. Nielsen. 2017. Simulation of Vertical Dynamic Vehicle–Track Interaction in a Railway Crossing Using Green's Functions. **Journal of Sound and Vibration**. 410(318-329.

Ma, Y., A.A. Mashal and V.L. Markine. 2018. Modelling and Experimental Validation of Dynamic Impact in 1:9 Railway Crossing Panel. **Tribology International**. 118(208-226).

Markine, V.L., M.J.M.M. Steenbergen and I.Y. Shevtsov. 2011. Combatting Rcf on Switch Points by Tuning Elastic Track Properties. **Wear**. 271(1): 158-167.

Pletz, M., W. Daves and H. Ossberger. 2011. **A Wheel Passing a Frog Nose -Dynamic Finite Element Investigation of High Axle Loads.**

Wan, C., V.L. Markine and I. Shevstov. 2014. **Improvement of Vehicle-Turnout Interaction by Optimising the Shape of Crossing Nose.**

Wei, Z., A. Núñez, A. Boogaard, R. Dollevoet and Z. Li. 2018. Method for Evaluating the Performance of Railway Crossing Rails after Long-Term Service. **Tribology International**. 123(337-348).

Wiest, M., W. Daves, F.D. Fischer and H. Ossberger. 2008. Deformation and Damage of a Crossing Nose Due to Wheel Passages. **Wear**. 265(9): 1431-1438.

Xin, L., V.L. Markine and I.Y. Shevtsov. 2016. Numerical Procedure for Fatigue Life Prediction for Railway Turnout Crossings Using Explicit Finite Element Approach. **Wear**. 366-367(167-179).

การประเมินความรุนแรงและการจัดลำดับความสำคัญของโครงการด้านความปลอดภัยของการรถไฟแห่งประเทศไทย

Assessing the Severity and Prioritization of the State Railway of Thailand

กรธัช คนกาญจน์[1*] และ ฆนิศา รุ่งแจ้ง[2]

Gornthat Konkanchana[1*] and Kanisa Rungjang[2]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการประเมินความรุนแรงและการวิเคราะห์ค่าน้ำหนักของปัจจัยที่มีผลต่อการจัดลำดับความสำคัญของโครงการด้านความปลอดภัยของการรถไฟแห่งประเทศไทย โดยสอบถามจากผู้เชี่ยวชาญจำนวน 30 ท่าน วิเคราะห์ด้วยวิธี Analytic Hierarchy Process (AHP) ผลการวิเคราะห์พบว่าการจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยตามลำดับดังนี้ ความสอดคล้องกับมาตรฐานสากล ความสอดคล้องกับ KPI ของหน่วยงาน ต้นทุนการดำเนินงาน ระยะเวลาในการดำเนินการ ความสอดคล้องกับแผน/นโยบายรัฐบาล ส่วนด้านทางเลือกการแก้ไขปัญหาของปัจจัย เรียงตามความสำคัญได้ดังนี้ การปรับปรุงเส้นทางและสภาพทาง การอบรมพัฒนาบุคลากร การปรับปรุงอุปกรณ์และเทคโนโลยีให้ทันสมัย และการปรับปรุงกฎหมายและการบังคับใช้ ดังนั้นปัจจัยที่มีผลต่อการจัดลำดับความสำคัญของโครงการด้านความปลอดภัยของการขนส่งทางรางเป็นอันดับแรกคือ ความสอดคล้องกับมาตรฐานสากล และทางเลือกของปัจจัยที่ควรพิจารณาคือ การปรับปรุงเส้นทางและสภาพทาง

ABSTRACT

This research focuses on severity assessment and the analysis of weighting factors affecting safety project prioritization of the State Railway of Thailand Project. A total of 30 experts were interviewed and Analytic Hierarchy Process (AHP). The results of the analysis showed that the prioritization of factors in the following order Compliance with international standards Consistency with the KPI of the agency, operating costs Processing time Consistency with government plans / policies.As for the alternative solutions to the problem of factors Sort by importance as follows Improvement of routes and conditions Personnel development training Modern equipment and technology improvements And law and enforcement improvements. Therefore, the factors that affect the priority of the project for the safety of rail transport are first. Compliance with international standards And the choice of factors to consider is Improvement of routes and conditions.

Key Words: Railway Severity, Assessment for Transportation, State Railway of Thailand

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

[1]ฝ่ายโครงการพิเศษและก่อสร้าง การรถไฟแห่งประเทศไทย กรุงเทพฯ 10330

[1]The Special Project and Construction Department, State Railway of Thailand, Bangkok 10330

คำนำ

การขนส่งระบบรางเป็นการขนส่งผู้โดยสารหรือสินค้าด้วยยานพาหนะที่วิ่งไปตามราง ซึ่งมีต้นทุนต่ำกว่าการขนส่งทางถนน ส่งเสริมการค้าทั้งในและต่างประเทศ การขนส่งระบบรางเหมาะสมสำหรับการขนส่งในระยะทางปานกลางหรือไกล รวมทั้งสามารถขนส่งผู้โดยสารและสินค้าได้ครั้งละจำนวนมากและสามารถปรับตัวตามปริมาณการขนส่งได้ตามความต้องการ เพราะสามารถที่จะเพิ่มหรือลดจำนวนตู้ได้ง่าย มีความปลอดภัยจากอุบัติเหตุมากกว่าทางถนน ประหยัดพลังงานและช่วยลดปัญหาการจราจร นอกจากการขนส่งคนแล้ว สินค้าที่ขนส่งส่วนมากเป็นสินค้ามูลค่าต่ำและน้ำหนักมาก เช่น ถ่านหิน ผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม ปูนซีเมนต์ ข้าว น้ำตาล เป็นต้น การขนส่งสินค้าในระบบรางสามารถใช้ขนส่งตู้คอนเทนเนอร์ได้ ปัญหาหลักของการขนส่งระบบรางในปัจจุบัน คือ ความล่าช้า ในการขนส่งทั้งผู้โดยสารและสินค้า การจำกัดการขนส่งเพียงที่สถานีและตามเส้นทางที่รางรถไฟผ่าน ไม่ครอบคลุมไปถึงการขนส่งสินค้าถึงบ้านได้ ทำให้เกิดลักษณะของการขนถ่ายสินค้าที่ไม่สะดวก เพราะต้องขนส่งสินค้าไปยังสถานีรถไฟและรับสินค้าจากสถานีรถไฟไปเองเช่นกัน จึงต้องอาศัยการขนส่งประเภทอื่นร่วมด้วย หากสถานีรถไฟต้นทางหรือปลายทางอยู่ห่างจากแหล่งที่ต้องการขนส่งสินค้าไป จึงทำให้เกิดต้นทุนในการขนย้ายที่ต้องคำนึงถึงและนำมาคำนวณด้วยเช่นกัน รวมถึงความเสี่ยงในการเกิดการชำรุดเสียหายในระหว่างการเปลี่ยนโหมดในการขนส่งอีกด้วย หากสามารถลดความเสี่ยงที่เกิดจากการขนส่งวัตถุอันตรายด้วยระบบรางจะทำให้ (1) ป้องกันและลดการสูญเสียและอันตรายที่จะเกิดขึ้นจากวัตถุอันตรายที่มีต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมในการขนส่ง (2) เกิดการใช้ประโยชน์สูงสุดจากเครื่องจักรและแรงงานที่ใช้ในการผลิต (3) ทำให้ต้นทุนของการขนส่งลดต่ำลง ดังนั้น ผลของการที่ต้นทุนค่าขนส่งลดลง ก็จะทำให้ราคาสินค้าที่จำหน่ายลดลงตามไปด้วย (4) สามารถเพิ่มมูลค่าของสินค้าได้ เพราะถ้าส่งสินค้าไปยังที่ที่สินค้าดังกล่าวปริมาณน้อยคนต้องการมากย่อมทำให้สินค้ามีราคาแพงขึ้น (5) เกิดการแข่งขันอย่างเป็นธรรม การขนส่งที่มีประสิทธิภาพจะช่วยให้มีการกระจายสินค้าออกไปสู่ตลาดได้มากขึ้น รวมถึงแผนวิสาหกิจการรถไฟแห่งประเทศไทย พ.ศ.2560 – 2564 ได้รับความเห็นชอบจากคณะกรรมการรถไฟฯ เมื่อวันที่ 9 มิถุนายน 2560 โดยแผนวิสาหกิจการรถไฟแห่งประเทศไทย พ.ศ.2560 – 2564 มุ่งเน้นยกระดับคุณภาพการให้บริการขนส่งทางราง ปรับปรุงการดำเนินงานทั้งธุรกิจหลักและธุรกิจรองให้มีการบริหารจัดการอย่างมีประสิทธิภาพ พัฒนาองค์กรและบุคลากรให้สอดคล้องกับ การลงทุนโครงสร้างพื้นฐานระบบราง รวมทั้ง การเพิ่มฐานะทางการเงิน โดยสามารถกำหนดวิสัยทัศน์ (Vision) พันธกิจ (Mission) วัตถุประสงค์ (Objectives) ยุทธศาสตร์ (Strategies) และเป้าหมาย (Goals)รวมทั้งความเสี่ยงที่เกิดเหตุอันตรายจากการขนส่งทางรางที่สามารถเกิดขึ้นได้ในขณะทำการขนส่งทั้งผู้โดยสารและสินค้า

โดยข้อมูลรายงานอุบัติเหตุจากการรถไฟแห่งประเทศไทยจากการรวบรวมสถิติเหตุอันตรายที่เกิดขึ้นในรอบ 12 ปี ระหว่างปี พ.ศ. 2549-2560 มีค่าเฉลี่ยเกิดอุบัติเหตุ 539 ครั้งต่อปี ซึ่งในปี พ.ศ.2554 เกิดอุบัติเหตุสูงสุดคือ 609 ครั้ง การเกิดอุบัติเหตุมีแนวโน้มที่ไม่แน่นอน ทั้งนี้ในปี พ.ศ.2560 การเกิดอุบัติเหตุ 369 ครั้ง ซึ่งต่ำกว่าสถิติในปี พ.ศ.2560 เกือบ 50% ดังตารางที่ 1

Table 1 Railway Accident Statistic 2008 – 2017

สรุปสถิติเหตุอันตรายปีงบประมาณ ตั้งแต่ ปี ๒๕๔๙ - ๒๕๖๐

ปี / ลักษณะเหตุอันตราย (คน)	๒๕๔๙				๒๕๕๐				๒๕๕๑				๒๕๕๒				๒๕๕๓				๒๕๕๔				๒๕๕๕				๒๕๕๖				๒๕๕๗				๒๕๕๘				๒๕๕๙				๒๕๖๐			
	ครั้ง	เจ็บ	ตาย	SI	ครั้ง	เจ็บ	ตาย	SI	ครั้ง	เจ็บ	ตาย	SI	ครั้ง	เจ็บ	ตาย	SI	ครั้ง	เจ็บ	ตาย	SI	ครั้ง	เจ็บ	ตาย	SI	ครั้ง	เจ็บ	ตาย	SI	ครั้ง	เจ็บ	ตาย	SI	ครั้ง	เจ็บ	ตาย	SI	ครั้ง	เจ็บ	ตาย	SI	ครั้ง	เจ็บ	ตาย	SI	ครั้ง	เจ็บ	ตาย	SI
๑. ขบวนรถตกราง																																																
๑.๑ ในย่านสถานี	๘๔	๒	-		๖๑	๗๐	๓		๘๘	๑	๑		๖๐	-	-		๗๐	๗๗	๗		๗๒	๕	๐		๔๙	๒	๐		๗๑	๒	-		๔๘	-	-		๖๐	-	-		๖๘	๑	-		๕๑	-	-	
๑.๒ ระหว่างสถานี	๓๕	๑๑๕	๑๐		๓๐	๗๔	๔		๓๗	๑๖	๔		๓๔	-	-		๓๒	๓๐	๓		๔๑	๔๙	๔		๔๐	๓	๐		๕๔	๔๒	๓		๒๔	๒๓	๕		๒๕	๗๖	๗		๑๗	๕๓	๖		๑๐	๕	-	
รวมขบวนรถตกราง	**๑๑๙**	**๑๑๗**	**๑๐**	**๗๐**	**๙๑**	**๑๔๔**	**๗**	**๗๑**	**๑๒๕**	**๑๗**	**๕**	**๓๖**	**๙๔**	**๐**	**๐**	**๒๑**	**๑๐๒**	**๑๐๗**	**๑๐**	**๖๓**	**๑๑๓**	**๕๔**	**๔**	**๔๕**	**๘๙**	**๕**	**๐**	**๒๑**	**๑๒๕**	**๔๔**	**๓**	**๔๔**	**๗๒**	**๒๓**	**๕**	**๒๖**	**๘๕**	**๗๖**	**๗**	**๔๗**	**๘๕**	**๕๔**	**๖**	**๔๐**	**๖๑**	**๕**	**๐**	**๑๕**
๒. ยานพาหนะชนกับขบวนรถ																																															๒	
๒.๑ ในย่านสถานี	๑๔	๘	๕		๑๓	๒๐	๕		๑๒	๓	๑		๑๗	๑๗	๒		๙	๓	๔		๑๒	๕	๓		๑๔	๑๔	๓		๖	๒	๓		๒	-	-		๔	๒	-		๕	๔	-		๓	๑	๑	
๒.๒ ระหว่างสถานี	๑๔๐	๑๘๔	๔๘		๑๔๖	๑๑๓	๓๒		๑๕๓	๑๗๓	๗๐		๑๒๑	๑๓๒	๖๗		๑๓๙	๑๔๐	๖๑		๑๒๔	๑๙๒	๔๖		๑๒๗	๑๖๗	๓๗		๑๐๖	๑๑๓	๒๒		๑๒๕	๙๑	๒๗		๘๘	๙๘	๔๑		๗๒	๑๒๑	๓๒		๖๘	๕๒	๑๗	
รวมยานพาหนะชนกับขบวนรถ	**๑๕๔**	**๑๙๒**	**๕๓**	**๑๒๒**	**๑๕๙**	**๑๓๓**	**๓๗**	**๙๖**	**๑๖๕**	**๑๗๖**	**๗๑**	**๑๒๗**	**๑๓๘**	**๑๔๙**	**๖๙**	**๑๑๑**	**๑๔๘**	**๑๔๓**	**๖๕**	**๑๐๙**	**๑๓๖**	**๑๙๗**	**๔๙**	**๑๑๘**	**๑๔๑**	**๑๘๑**	**๔๐**	**๑๐๙**	**๑๑๒**	**๑๑๕**	**๒๕**	**๗๔**	**๑๒๗**	**๙๑**	**๒๗**	**๗๑**	**๙๒**	**๑๐๐**	**๔๑**	**๗๒**	**๗๗**	**๑๒๕**	**๓๒**	**๗๓**	**๗๑**	**๕๓**	**๒๐**	**๔๒**
๓. ขบวนรถชน/ทับคน																																																
๓.๑ ในย่านสถานี	๒๕	๑๐	๑๕		๒๙	๑๒	๑๗		๒๗	๘	๑๙		๒๒	๗	๑๕		๒๖	๑๑	๑๖		๑๔	๖	๘		๑๓	๓	๑๐		๑๗	๖	๑๑		๗	๕	๒		๑๔	๑๐	๔		๑๓	๓	๑๐		๙	๖	๓	
๓.๒ ระหว่างสถานี	๙๑	๒๒	๗๐		๘๔	๒๔	๖๓		๗๗	๒๗	๕๓		๙๕	๓๕	๖๔		๘๒	๒๓	๕๙		๘๐	๒๒	๕๘		๗๒	๓๐	๔๔		๖๒	๑๗	๔๖		๖๑	๒๖	๓๖		๖๕	๒๙	๓๖		๖๔	๒๖	๓๘		๗๔	๒๖	๔๘	
รวมขบวนรถชน/ทับคน	**๑๑๖**	**๓๒**	**๘๕**	**๗๔**	**๑๑๓**	**๓๖**	**๘๐**	**๗๓**	**๑๐๔**	**๓๕**	**๗๒**	**๖๗**	**๑๑๗**	**๔๒**	**๗๙**	**๗๕**	**๑๐๘**	**๓๔**	**๗๕**	**๖๙**	**๙๔**	**๒๘**	**๖๖**	**๖๐**	**๘๕**	**๓๓**	**๕๔**	**๕๔**	**๗๙**	**๒๓**	**๕๗**	**๕๑**	**๖๘**	**๓๑**	**๓๘**	**๔๒**	**๗๙**	**๓๙**	**๔๐**	**๔๘**	**๗๗**	**๒๙**	**๔๘**	**๔๘**	**๘๓**	**๓๒**	**๕๑**	**๕๒**
๔. คนตก/กระโดดลงขบวนรถ																																																
๔.๑ ในย่านสถานี	๑๒	๑๐	๒		๑๔	๑๓	๕		๑๖	๑๒	๖		๒๒	๑๙	๔		๒๒	๑๗	๕		๑๓	๑๐	๓		๑๔	๑๐	๕		๑๘	๑๓	๕		๑๒	๙	๓		๑๕	๑๒	๔		๒๑	๒๑	-		๑๔	๑๐	๔	
๔.๒ ระหว่างสถานี	๑๓	๘	๕		๒๓	๑๗	๖		๑๙	๙	๑๐		๓๒	๓๐	๑๑		๒๔	๒๑	๓		๓๙	๓๖	๓		๒๓	๒๐	๓		๒๕	๒๐	๕		๒๒	๑๗	๕		๒๔	๒๐	๔		๓๐	๒๒	๗		๑๒	๑๐	๒	
รวมคนตก/กระโดดลงขบวนรถ	**๒๕**	**๑๘**	**๗**	**๑๕**	**๓๗**	**๓๐**	**๑๑**	**๒๓**	**๓๕**	**๒๑**	**๑๖**	**๒๒**	**๕๔**	**๔๙**	**๑๕**	**๓๕**	**๔๖**	**๓๘**	**๘**	**๒๖**	**๕๒**	**๔๖**	**๖**	**๓๐**	**๓๗**	**๓๐**	**๘**	**๒๒**	**๔๓**	**๓๓**	**๑๐**	**๒๕**	**๓๔**	**๒๖**	**๘**	**๒๐**	**๓๙**	**๓๒**	**๘**	**๒๓**	**๕๑**	**๔๓**	**๗**	**๒๙**	**๒๖**	**๒๐**	**๖**	**๑๕**
๕. เหตุอันตรายอื่น ๆ																																																
๕.๑ การกระทำของคนร้าย	๒๙	๒๕	๗		๕๗	๓๐	๗		๒๙	๒๙	๘		๒๑	๒๖	๕		๒๑	๙	๑		๑๙	๙	๔		๑๕	๖	๒		๖	๒๔	๔		๒๔	๑๓	๐		๑๑	๗	๐		๑๓	๑๒	๑		๑๒	๓	-	
๕.๒ อุปกรณ์รางชำรุด	๔๗	-	-		๔๔	-	-		๒๘	-	-		๔๗	-	-		๓๑	-	-		๕๗	-	-		๑๐๑	-	-		๑๐๐	๐	๐		๑๖๑	๐	๐		๑๘๔	๐	๐		๑๐๒	-	-		๕๒	-	-	
๕.๓ ชนสัตว์	๔๐	-	-		๔๓	-	-		๗๒	-	-		๖๒	-	-		๔๑	-	-		๔๙	-	-		๔๑	-	-		๒๙	๐	๐		๔๑	๐	๐		๔๖	๐	๐		๖๘	-	-		๖๙	-	-	
๕.๔ ภัยธรรมชาติ	๑๗	-	-		๑๒	-	-		๑๗	-	-		๒๔	-	-		๒๖	-	-		๘๙	-	-		๔๘	-	-		๒๘	๑	๐		๔๗	๐	๐		๓๘	๑	๐		๒๗	๑	-		๔๕	-	-	
รวมเหตุอันตรายอื่น ๆ	**๑๓๓**	**๒๕**	**๗**	**๔๑**	**๑๕๖**	**๓๐**	**๗**	**๔๘**	**๑๔๖**	**๒๙**	**๘**	**๔๖**	**๑๕๔**	**๒๖**	**๕**	**๔๕**	**๑๑๙**	**๙**	**๑**	**๓๐**	**๒๑๔**	**๙**	**๔**	**๕๒**	**๒๐๕**	**๖**	**๒**	**๔๘**	**๑๗๒**	**๒๔**	**๔**	**๔๘**	**๒๗๓**	**๑๓**	**๐**	**๖๕**	**๒๗๙**	**๘**	**๐**	**๖๕**	**๒๑๐**	**๑๓**	**๑**	**๕๑**	**๑๗๘**	**๓**	**๐**	**๔๑**
รวมทั้งหมด	**๕๔๗**	**๓๘๔**	**๑๖๒**	**๓๒๒**	**๕๕๖**	**๓๗๓**	**๑๔๒**	**๓๑๑**	**๕๗๕**	**๒๗๘**	**๑๗๒**	**๒๙๗**	**๕๕๗**	**๒๖๖**	**๑๖๘**	**๒๘๗**	**๕๒๓**	**๓๓๑**	**๑๕๙**	**๒๙๗**	**๖๐๙**	**๓๓๔**	**๑๒๙**	**๓๐๔**	**๕๕๗**	**๒๕๕**	**๑๐๔**	**๒๕๕**	**๕๓๑**	**๒๓๙**	**๙๙**	**๒๔๒**	**๕๗๔**	**๑๗๔**	**๗๓**	**๒๑๘**	**๕๗๔**	**๒๐๗**	**๘๙**	**๒๓๖**	**๕๐๐**	**๒๑๔**	**๘๙**	**๒๒๒**	**๓๖๙**	**๑๑๓**	**๗๗**	**๑๕๔**

ที่มา : ปรับปรุงจากข้อมูลรายงานอุบัติเหตุการขนส่งการรถไฟฯ ของกองควบคุมและปฏิบัติการ การรถไฟฯ

การรถไฟฯ สามารถลดความเสี่ยงที่เกิดจากการขนส่งวัตถุอันตรายด้วยระบบรางจะทำให้ (1) ป้องกันและลดการสูญเสียและอันตรายที่จะเกิดขึ้นจากวัตถุอันตรายที่มีต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมในการขนส่ง (2) เกิดการใช้ประโยชน์สูงสุดจากเครื่องจักรและแรงงานที่ใช้ในการผลิต (3) ทำให้ต้นทุนของการขนส่งลดต่ำลง ดังนั้นผลของการที่ต้นทุนค่าขนส่งลดลง ก็จะทำให้ราคาสินค้าที่จำหน่ายลดลงตามไปด้วย (4) สามารถเพิ่มมูลค่าของสินค้าได้ เพราะถ้าส่งสินค้าไปยังที่ที่สินค้าดังกล่าวปริมาณน้อยคนต้องการมาก ย่อมทำให้สินค้ามีราคาแพงขึ้น (5) เกิดการแข่งขันอย่างเป็นธรรม การขนส่งที่มีประสิทธิภาพจะช่วยให้มีการกระจายสินค้าออกไปสู่ตลาดได้มากขึ้น

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อมุ่งเน้นการวิเคราะห์ค่าน้ำหนักปัจจัยที่มีผลต่อการการประเมินความรุนแรงและการจัดลำดับความสำคัญของโครงการด้านความปลอดภัยของการรถไฟแห่งประเทศไทย โดย พิจารณาปัจจัยหลักที่สำคัญ 5 ปัจจัยได้แก่ (1) ต้นทุนการดำเนินงาน (2) ระยะเวลาในการดำเนินการ (3)ความสอดคล้องกับ KPI ของหน่วยงาน (4) ความสอดคล้องกับมาตรฐานสากล(5) ความสอดคล้องกับแผน/นโยบายรัฐบาล

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลอุบัติเหตุในการขนส่งทางรางของประเทศไทย โดยจำแนกจำนวนอุบัติเหตุ สาเหตุการเกิดและความรุนแรงของอุบัติเหตุรายปี
2. เพื่อจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยที่ทำให้เกิดอุบัติเหตุและแนวทางในการลดอุบัติเหตุขนส่งทางรางโดยใช้ AHP
3. เพื่อเสนอแนะแนวทางในการลดปัจจัยความเสี่ยง และเพิ่มความปลอดภัยในการขนส่งทางรางของการรถไฟแห่งประเทศไทย

อุปกรณ์และวิธีการ

ปัจจัยที่มีผลต่อความเสี่ยงในการขนส่งวัตถุอันตรายทางรางในประเทศไทยโดยวิธี AHP โดยวิเคราะห์ข้อมูลที่สำรวจได้จากผู้เชี่ยวชาญด้วยวิธี AHP ดังนี้

1. ศึกษาเทคนิคกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (AHP)

ศึกษาเทคนิคการนำกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์มาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ ปัจจัยที่มีผลต่อความเสี่ยงในการขนส่งทางรางในประเทศไทย(การรถไฟแห่งประเทศไทย) โดยนำปัจจัยมาวิเคราะห์โดยอาศัยทฤษฎีและวิธีการของกระบวนการ ลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ รวมถึงพัฒนาคำถามเพื่อจัดทำแบบสอบถามในการรวบรวมข้อมูลในการ ตัดสินใจถึงความเสี่ยงในการขนส่งทางรางในประเทศไทย (การรถไฟแห่งประเทศไทย) Saaty (2008) อธิบายถึงหลักการในการวิเคราะห์ AHP ทั้งสิ้น 4 ประการ ได้แก่

1.1 การเปรียบเทียบส่วนกลับของความสัมพันธ์ (Reciprocal Comparison) โดยผู้ตัดสินใจต้องสามารถเปรียบเทียบและกำหนดจุดเด่นของปัจจัยที่พิจารณาในสิ่งที่ต้องการได้ โดยจะต้องสามารถเปรียบเทียบและสร้างความสัมพันธ์ของความสำคัญระหว่างปัจจัยได้ เช่น ถ้าปัจจัย A มีความสำคัญมากกว่าปัจจัย B อยู่เท่ากับ X เท่า

จะสามารถแสดงความสัมพันธ์ของความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยได้ว่า ความสำคัญการของปัจจัย B มีค่าเท่ากับ 1/X เท่าของความสำคัญของปัจจัย A

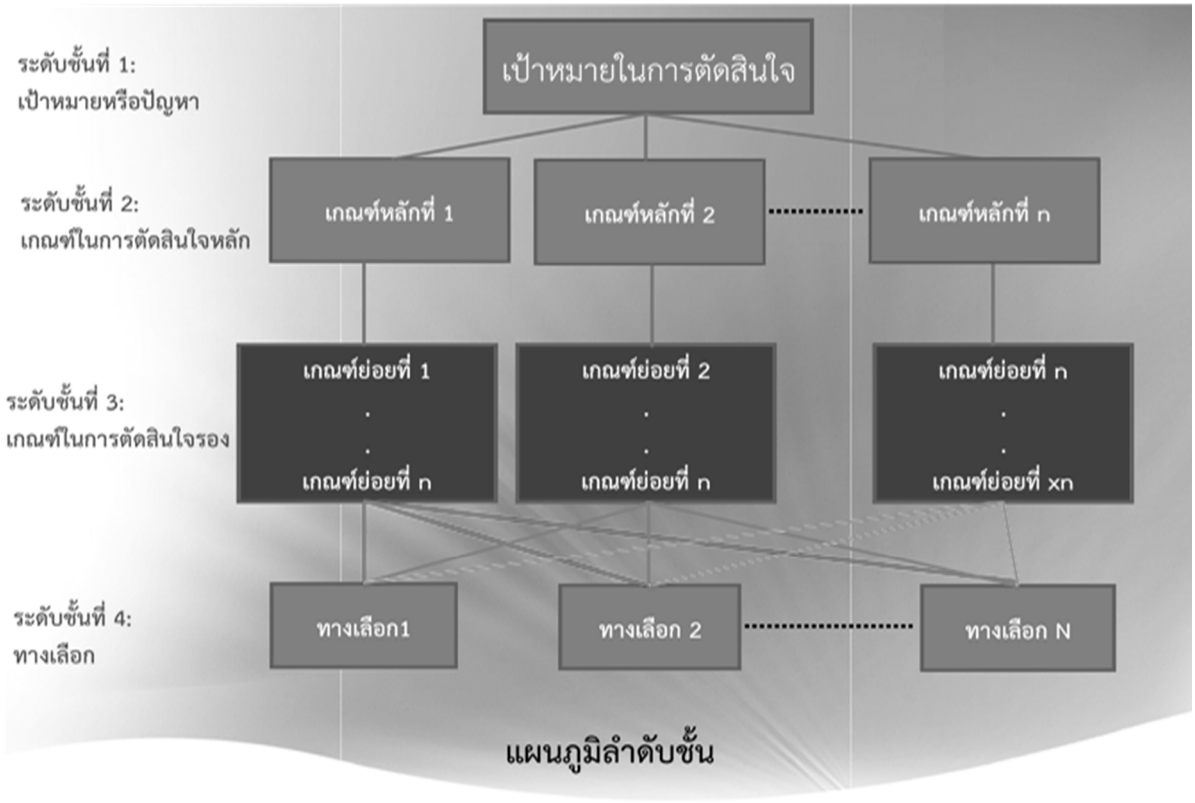
1.2 การพิจารณาความเหมือน (Homogeneity)

1.3 การพิจารณาความอิสระ (Independence)

1.4 การพิจารณาความคาดหวัง (Expectations)

โดยกระบวนการจัดลำดับความสำคัญประกอบไปด้วย การสลายตัว(Decompositions) การจัดลำดับความสำคัญ (Prioritization) การสังเคราะห์ (Synthesis) และ การวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity Analysis)

Figure 1 Analytical Hierarchy Process



2. วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการสัมภาษณ์

การเก็บรวบรวมข้อมูลในการสัมภาษณ์โดยใช้แบบสอบถาม จากผู้บริหารของการรถไฟแห่งประเทศไทยจำนวน 12 ท่าน จากผู้ปฏิบัติงานชำนาญการจำนวน 15 ท่าน สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจรจำนวน 2 ท่าน ตลอดจนกระทรวงคมนาคมจำนวน 1 ท่าน จากนั้นทำการวิเคราะห์และประมวลข้อมูลที่ได้จากผู้ตัดสินใจถึงความสำคัญของแต่ละปัจจัย เพื่อพิจารณาตัดสินใจ แนวทางที่สำคัญของการประเมินความสำคัญของปัจจัยความเสี่ยงในการขนส่งทางรางในประเทศไทย (การรถไฟแห่งประเทศไทย)โดยพิจารณาปัจจัยดังนี้ ๖(1)ต้นทุนการดำเนินงาน (2)ระยะเวลาในการดำเนินการ (3)ความสอดคล้องกับ KPI ของหน่วยงาน (4)ความสอดคล้องกับมาตรฐานสากล (5)ความสอดคล้องกับแผน/นโยบายรัฐบาล แนวทางการแก้ไขของปัจจัยได้แก่ (1)การปรับปรุง

เส้นทางและสภาพทาง (2)การอบรมพัฒนาบุคลากร (3)การปรับปรุงอุปกรณ์และเทคโนโลยีให้ทันสมัย และ (4)การปรับปรุงกฎหมายและการบังคับใช้กฎหมาย

Figure 2 Questionnaire Railway Severity Assessment for Transportation in State Railway of Thailand

การประเมินความรุนแรงและการจัดลำดับความสำคัญของโครงการด้านความปลอดภัยของการรถไฟแห่งประเทศไทย ด้วยวิธี AHP

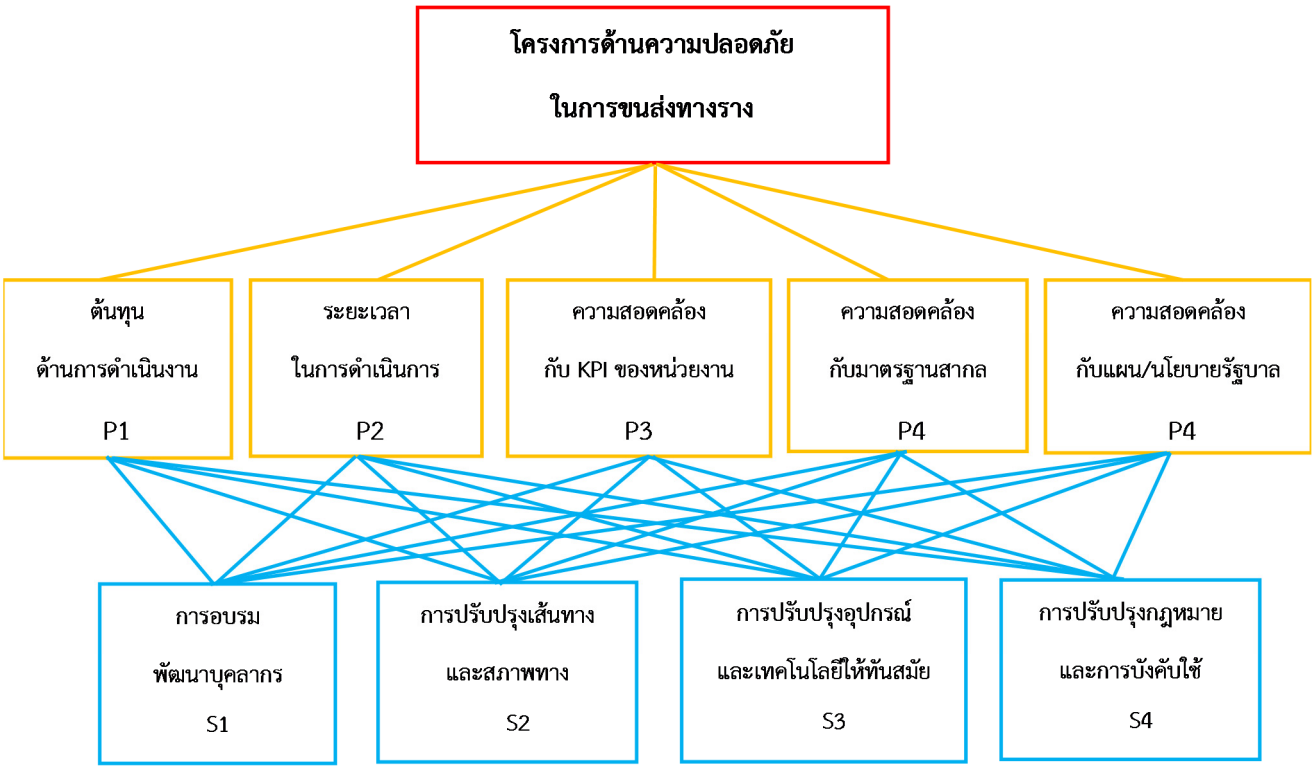
นิสิตปริญญาโทสาขาวิศวกรรมโครงสร้างพื้นฐานและการบริหาร
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

แบบสอบถามชุดที่ : _____ วันที่: _____ สถานที่สัมภาษณ์: _____
ผู้สำรวจ : นายกรธัช คนกาญจน์ รหัสนิสิต 5914551048
อาจารย์ปรึกษา : ผู้ช่วยศาตราจารย์ ดร.ฆนิศา รุ่งแจ้ง

เรื่อง การประเมินความรุนแรงและการจัดลำดับความสำคัญของโครงการด้านความปลอดภัยของการรถไฟแห่งประเทศไทยด้วยวิธี AHP

วัตถุประสงค์

แบบสอบถามฉบับนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อที่จะศึกษาการการประเมิน ความรุนแรงและการจัดลำดับความสำคัญของโครงการด้านความปลอดภัยของการรถไฟแห่ง ประเทศไทย โดยข้อคิดเห็นที่รวบรวมได้จะถูกนำไปวิเคราะห์โดยอาศัยทฤษฎีและวิธีการของกระบวนการลำดับเชิงวิเคราะห์ (AHP) เพื่อจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยต่างๆ



ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

การประเมินความรุนแรงและการวิเคราะห์ค่าน้ำหนักของปัจจัยที่มีผลต่อการจัดลำดับความสำคัญของโครงการด้านความปลอดภัยของการรถไฟแห่งประเทศไทย โดยสอบถามจากผู้เชี่ยวชาญจากการรถไฟแห่งประเทศไทย สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร ตลอดจนกระทรวงคมนาคม จำนวน 30 ท่าน ซึ่งผลที่ได้พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อความรุนแรงของอุบัติเหตุและนำมาซึ่งการจัดลำดับความสำคัญของโครงการด้านความปลอดภัยของการขนส่งทางราง มากที่สุดได้แก่ ความสอดคล้องกับมาตรฐานสากล ค่าน้ำหนักความสำคัญร้อยละ 10 ความสอดคล้องกับ KPI ของหน่วยงาน ค่าน้ำหนักความสำคัญร้อยละ 9 ความสอดคล้องกับแผน/นโยบายของรัฐบาล ค่าน้ำหนักความสำคัญร้อยละ 7 ระยะเวลาการดำเนินการ ค่าน้ำหนักความสำคัญร้อยละ 7 ต้นทุนการดำเนินงาน ค่าน้ำหนักความสำคัญร้อยละ 7 ตามลำดับ อัตราส่วนความสอดคล้องเท่ากับ 0.38 เนื่องจากความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญแต่ละท่านมีความแตกต่างโดยสิ้นเชิง แต่จะเห็นได้ว่าปัจจัยความสอดคล้องกับมาตรฐานสากลมีผลมากที่สุด ส่วนทางเลือกของปัจจัยพบว่า ด้านต้นทุนในการดำเนินงานทางเลือกที่เหมาะสมที่สุดคือ การปรับปรุงเส้นทางและสภาพทาง ค่าน้ำหนักความสำคัญร้อยละ 9 ด้านระยะเวลาในการดำเนินการทางเลือกที่เหมาะสมที่สุดคือ การอบรมพัฒนาบุคลากร ค่าน้ำหนักความสำคัญร้อยละ 9 ด้านความสอดคล้องกับ KPI ของหน่วยงานทางเลือกที่เหมาะสมที่สุดคือ การอบรมพัฒนาบุคลากร ค่าน้ำหนักความสำคัญร้อยละ 9 ด้านความสอดคล้องกับมาตรฐานสากลทางเลือกที่เหมาะสมที่สุดคือ การปรับปรุงเส้นทางและสภาพทาง การปรับปรุงอุปกรณ์และเทคโนโลยีให้ทันสมัย และการปรับปรุงกฎหมายและการบังคับใช้ ค่าน้ำหนักความสำคัญร้อยละ 8 ด้านความสอดคล้องกับแผน/นโยบายของรัฐบาลทางเลือกที่เหมาะสมที่สุดคือ การปรับปรุงกฎหมายและการบังคับใช้ ค่าน้ำหนักความสำคัญร้อยละ 9 เห็นได้ว่าในปัจจัยแต่ละด้านนั้นทางเลือกจะแตกต่างกันออกไปแต่มีค่าความสอดคล้องกันอยู่ โดยจากการจัดลำดับความสำคับแล้ว ทางเลือกของปัจจัยที่ควรพิจารณาคือ การปรับปรุงเส้นทางและสภาพทาง การอบรมพัฒนาบุคลากร การปรับปรุงอุปกรณ์และเทคโนโลยีให้ทันสมัย และการปรับปรุงกฎหมายและการบังคับใช้ ตามลำดับ โดยอัตราส่วนความสอดคล้องเท่ากับ 0.60 ทำให้วิเคราะห์ได้เช่นเดียวกับปัจจัยในการให้ความสำคัญกับโครงการด้านความปลอดภัยของการรถไฟแห่งประเทศไทย จะมีความคิดเห็นที่แตกต่างกันโดยสิ้นเชิง จึงทำให้ค่าความสอดคล้องสูงกว่าค่ามาตรฐาน

Table 2 Show value values, significance, average geometry of primary factors.

Expert	The importance of factors that cause accidents					Consistency Ratio
	Operational Costs	Operating Time	Compliance with KPIs	Compliance with international standards	Compliance with government plans / policies	
1st person	0.08	0.14	0.20	0.20	0.39	0.93
2nd person	0.14	0.09	0.21	0.45	0.11	1.23
3rd person	0.53	0.23	0.03	0.14	0.07	0.68
4th person	0.51	0.11	0.11	0.12	0.16	0.47
5th person	0.22	0.32	0.17	0.04	0.25	0.97
6th person	0.42	0.16	0.03	0.23	0.16	0.16
7th person	0.03	0.45	0.30	0.13	0.08	0.21
8th person	0.29	0.29	0.29	0.06	0.06	0.00
9th person	0.15	0.08	0.04	0.24	0.48	0.37
10th person	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.00
11st person	0.04	0.11	0.34	0.26	0.25	1.18
12nd person	0.03	0.08	0.19	0.36	0.35	0.17
13rd person	0.06	0.26	0.28	0.15	0.25	0.37
14th person	0.26	0.03	0.14	0.08	0.49	0.40
15th person	0.03	0.39	0.25	0.16	0.17	0.33
16th person	0.09	0.09	0.29	0.42	0.10	0.02
17th person	0.03	0.27	0.29	0.32	0.09	0.73
18th person	0.07	0.05	0.16	0.30	0.42	0.15
19th person	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.00
20th person	0.47	0.16	0.08	0.15	0.14	0.51
21st person	0.09	0.04	0.09	0.55	0.22	0.32
22nd person	0.16	0.36	0.20	0.14	0.14	0.12
23rd person	0.13	0.35	0.37	0.04	0.11	0.20
24th person	0.03	0.07	0.14	0.51	0.24	0.45
25th person	0.13	0.05	0.09	0.26	0.48	0.35
26th person	0.16	0.14	0.31	0.29	0.11	0.23
27th person	0.03	0.13	0.20	0.48	0.16	0.13
28th person	0.04	0.15	0.09	0.44	0.27	0.34
29th person	0.38	0.17	0.20	0.06	0.18	0.22
30th person	0.05	0.05	0.57	0.29	0.05	0.19
Geometric Mean	**0.17**	**0.17**	**0.20**	**0.24**	**0.21**	**0.38**

สรุป

การประเมินความรุนแรงโดยข้อมูลรายงานอุบัติเหตุจากการรถไฟแห่งประเทศไทยจากการรวบรวมสถิติเหตุอันตรายที่เกิดขึ้นในรอบ 12 ปี ระหว่างปี พ.ศ. 2549-2560 มีค่าเฉลี่ยเกิดอบัติเหตุ 539 ครั้งต่อปี ซึ่งในปี พ.ศ.2554 เกิดอุบัติเหตุสูงสุดคือ 609 ครั้ง การเกิดอุบัติเหตุมีแนวโน้มที่ไม่แน่นอน ทั้งนี้ในปี พ.ศ.2560 การเกิดอุบัติเหตุ 369 ครั้ง ซึ่งต่ำกว่าสถิติในปี พ.ศ.2560 เกือบ 50% ดังตารางที่ 1 และการวิเคราะห์ค่าน้ำหนักของปัจจัยที่มีผลต่อการจัดลำดับความสำคัญของโครงการด้านความปลอดภัยของการรถไฟแห่งประเทศไทย คือ ความสอดคล้องกับมาตรฐานสากล ความสอดคล้องกับ KPI ของหน่วยงาน ต้นทุนการดำเนินงาน ระยะเวลาในการดำเนินการ ความสอดคล้องกับแผน/นโยบายรัฐบาล ตามลำดับ ส่วนทางเลือกของการแก้ไขปัญหา คือ การปรับปรุงเส้นทางและสภาพทาง การอบรมพัฒนาบุคลากร การปรับปรุงอุปกรณ์และเทคโนโลยีให้ทันสมัย และการปรับปรุงกฎหมายและการบังคับใช้ ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี Analytic Hierarchy Process (AHP)ดังนั้นปัจจัยที่มีผลต่อการจัดลำดับความสำคัญของโครงการด้านความปลอดภัยของการขนส่งทางรางเป็นอันดับแรกคือ ความสอดคล้องกับมาตรฐานสากล และทางเลือกของการแก้ไขปัญหาปัจจัยของอุบัติเหตุที่ควรพิจารณาคือ การปรับปรุงเส้นทางและสภาพทาง เป็นอันดับแรก

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุกหน่วยงานของการรถไฟแห่งประเทศไทย สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร ตลอดจนกระทรวงคมนาคม รวมทั้งสาขาวิศวกรรมโครงสร้างพื้นฐานและการบริหาร ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่สนับสนุนในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

สุธรรม อรุณ. 2548. **การตัดสินใจโดยใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์** Analytic Hierarchy Process (AHP). สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร.

ฝ่ายบริการขนส่งสินค้าและคอนเทนเนอร์ การรถไฟแห่งประเทศไทย **สถิติการขนส่งสินค้าทางรางในประเทศไทย ปี พ.ศ.2556 ถึง ปี พ.ศ.2560**. รายงานการขนส่งสินค้าและคอนเทนเนอร์รายปี 2556-2560.

กองควบคุมและปฏิบัติการ การรถไฟแห่งประเทศไทย **สถิติอุบัติเหตุของการรถไฟแห่งประเทศไทย ปี พ.ศ.2551 ถึง ปี พ.ศ.2560**. การรถไฟแห่งประเทศไทย.

S.Cafiso, A.Di Graziano, and N.Di Blasi. 2006. **Risk Assessment on Railway Transportation of Hazardous Materials**. University of Catania,Italy: 97-106.

Thomas L.Saaty.2008. **The Analytic Hierachy Process**. McGraw, NewYork.

The Association of American Railroads (AAR). **United States Hazardous Materials Instructions for Rail**. United States Hazardous Materials Instructions for Rail January 4, 20111

การศึกษาสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าร่วมระหว่างพลังงานแสงอาทิตย์และระบบไฟฟ้าพื้นฐานสำหรับเครื่องเติมอากาศในบ่อเลี้ยงปลา

A Performance Study of Solar PV-Electrical Utility Hybrid for Aerator in Fish Pond

เสฏฐวุฒิ แผลงศรี[1] และ อัครินทร์ อินทนิเวศน์[1*]

Seththawut Plangsri[1] and Akarin Intaniwet[1*]

บทคัดย่อ

หมู่บ้านทุ่งยาว อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ เป็นหมู่บ้านที่มีการเลี้ยงปลานิลเพื่อการจำหน่าย โดยมีการใช้พลังงานไฟฟ้าสำหรับมอเตอร์ซึ่งใช้ในการเพิ่มออกซิเจนในน้ำ ทำให้พบปัญหาเกี่ยวกับต้นทุนที่สูง งานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์ที่จะนำระบบผลิตไฟฟ้าร่วมระหว่างพลังงานแสงอาทิตย์และระบบไฟฟ้าพื้นฐานมาใช้สำหรับเครื่องเติมอากาศ โดยใช้อินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์ควบคุมพลังงานไฟฟ้าจากทั้งสองแหล่ง ในเวลากลางวันเครื่องเติมอากาศจะใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นหลักและใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานเพิ่มเมื่อระบบผลิตพลังงานได้ไม่เพียงพอ จากการศึกษาพบว่าระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์สามารถทดแทนการใช้ไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานได้เฉลี่ยเท่ากับ 38% ค่าประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์เฉลี่ยตลอดการทดสอบมีค่าเท่ากับ 14.8% ผลตอบแทนอ้างอิงและผลตอบแทนสุดท้ายเท่ากับ 1.72 kWh/kW_p และ 1.70 kWh/kW_p ตามลำดับ

ABSTRACT

Tilapia farming business at Tung Yao village, Sansai, Chiang Mai, consumes high electrical energy due to the use of aerators which are employed in order to increase the oxygen level in the pond. This work, therefore, aims to reduce the utility bill by applying the PV-utility grid hybrid system to provide electrical power to the aerator. The DC power from the PV system is converted to AC power using a special PV-utility grid hybrid inverter. This inverter manages the energy from both sources so that it uses the energy from the PV system as the main input and the energy from utility grid will be used as the additional input during the daytime. From the study, the portion of energy generated by the PV system is about 38% of that from the utility grid. The average efficiency of the panel throughout the testing period is about 14.8%. This PV system provides the reference and final yield of 1.72 kWh/kW_p and 1.70 kWh/kW_p, respectively.

Key Words: Solar PV, performance, hybrid system, fish pond

*Corresponding author; e-mail address: **a.intaniwet@hotmail.co.th**

[1] หน่วยวิจัยด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมอัจฉริยะ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ 50290

[1] Smart Energy and Environmental Research Unit, School of Renewable Energy, Maejo University, Chiang Mai 50290

คำนำ

ประเทศไทยจัดเป็นประเทศที่มีการทำเกษตรกรรมเป็นรากฐานของประเทศ ในปัจจุบันการทำเกษตรกรรมมีความจำเป็นต้องใช้พลังงานเป็นอย่างมาก ส่งผลให้เกษตรกรมีภาระค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นจากกการใช้พลังงานไฟฟ้า ปัจจุบันประเทศไทยมีการใช้พลังงานทดแทนที่มีศักยภาพสูงสำหรับทดแทนการใช้พลังงานในภาคเกษตรกรรมและภาคปศุสัตว์เพิ่มมากขึ้น ตัวอย่างเช่น การใช้พลังงานชีวมวล และพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น เพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่ายจากค่าไฟฟ้าและค่าเชื้อเพลิง เมื่อพิจารณาถึงแหล่งพลังงานทดแทนพบว่าพลังงานแสงอาทิตย์เป็นตัวเลือกที่น่าสนใจในการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าลง เนื่องจากประเทศไทยมีค่าความเข้มแสงอาทิตย์อยู่ในระดับที่ดี โดยกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน ได้ศึกษาศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทยและจัดทำแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์จากข้อมูลดาวเทียมพบว่าประเทศไทยมีค่ารังสีอาทิตย์เฉลี่ยในหนึ่งปีประมาณ 18 MJ/m^2-day ซึ่งถือว่ามีศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างสูง(กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน [พพ.], 25) ข้อดีอีกอย่างหนึ่งของการใช้พลังงานแสงอาทิตย์คือแหล่งพลังงานนี้สามารถแปลงให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง อาศัยอุปกรณ์ที่เรียกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ทำให้สามารถนำพลังงานไฟฟ้าไปใช้ได้โดยตรงทำให้มีความสะดวกในการใช้งาน

ในการทำฟาร์มเลี้ยงปลานิลมีความจำเป็นต้องเปิดเครื่องเติมอากาศเพื่อเพิ่มออกซิเจนในน้ำสำหรับการเจริญเติบโตของปลาที่เลี้ยง โดยเครื่องเติมอากาศส่วนใหญ่ที่ผู้เลี้ยงปลานิยมใช้คือ เครื่องเติมอากาศแบบการใช้ใบพัดตีน้ำ โดยที่ความสามารถในการเพิ่มออกซิเจนจะขึ้นอยู่กับลักษณะรูปร่างและขนาดของใบพัดและขนาดของมอเตอร์ที่ใช้ แต่มีข้อเสียคืองบลงทุนและงบดำเนินการสูง(หน่วยวิจัยสังคมและสิ่งแวดล้อม คณะสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2555) จากที่กล่าวมา ทำให้ผู้เลี้ยงปลาต้องมีค่าต้นทุนในการเลี้ยงปลาที่สูงขึ้น เนื่องจากต้องใช้เครื่องเติมอากาศที่ต้องเปิดทำงานหลายชั่วโมงต่อวัน แต่ในขณะที่ได้ราคาขายปลาเท่าเดิม ทำให้เกษตรกรมีกำไรน้อย และในบางครั้งเกิดอุบัติเหตุที่ทำให้ไฟฟ้าดับ ส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำลดต่ำลงจนเป็นศูนย์อย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดเหตุการณ์ปลาน๊อคน้ำ และปลาตายทั้งบ่อทำให้เกษตรกรประสบภาวะขาดทุน

หมู่บ้านทุ่งยาว อำเภอ สันทราย จังหวัดเชียงใหม่ เป็นหมู่บ้านที่มีการเลี้ยงปลานิลเพื่อการจำหน่าย โดยมีการใช้พลังงานไฟฟ้าสำหรับมอเตอร์ซึ่งใช้ในการเพิ่มออกซิเจนในน้ำ ทำให้พบปัญหาเกี่ยวกับต้นทุนที่สูง และปลาน๊อคน้ำจากเหตุการณ์ไฟฟ้าดับ งานวิจัยนี้จึงได้มีวัตถุประสงค์ในการนำเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์มาช่วยผลิตไฟฟ้าเพื่อใช้ร่วมกับพลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน โดยมีการเก็บข้อมูลทางไฟฟ้า และข้อมูลแวดล้อมต่างๆ เพื่อนำมาใช้ในการประเมินสมรรถนะของระบบ งานวิจัยนี้จะเป็นการส่งเสริมให้เกิดการใช้พลังงานทดแทนร่วมกับพลังงานจากระบบพื้นฐาน ทำให้ช่วยลดต้นทุนค่าไฟฟ้า และเพิ่มความมั่นคงทางพลังงานให้เกษตรกรผู้เลี้ยงปลา และเป็นแนวทางให้กับเกษตรกรแขนงอื่น ๆ ในการพิจารณานำพลังงานทดแทนไปใช้ในงานต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ระบบในการจ่ายพลังงานไฟฟ้ากับระบบเติมอากาศ 2 ระบบคือไฟฟ้าที่ได้จากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ และไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน (Figure 1) โดยไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์นั้นจะมาจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกรวมจำนวน 9 แผง แต่ละแผงมีกำลังการผลิตสูงสุด 315 W จากนั้นไฟฟ้าจากทั้งสองระบบจะถูกส่งไปยังอินเวอร์เตอร์แบบไฮบริดยี่ห้อ Siemens รุ่น

SINAMICS V20 ซึ่งเป็นอินเวอร์เตอร์สำหรับการใช้งานกับมอเตอร์โดยเฉพาะ และรองรับการใช้งานสำหรับแหล่งจ่ายไฟฟ้าจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ร่วมกับระบบไฟฟ้าพื้นฐานจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค สัญญาณไฟที่ออกจากอินเวอร์เตอร์มาจะเป็น 3 เฟส และจะถูกจ่ายให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าของเครื่องเติมอากาศ ระบบนี้จะมีหลักการทำงานคือในเวลากลางวันระบบเซลล์แสงอาทิตย์จะผลิตไฟฟ้าเพื่อจ่ายให้กับเครื่องเติมอากาศเป็นหลัก แต่เมื่อกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ไม่เพียงพอ อินเวอร์เตอร์จะทำการดึงพลังงานไฟฟ้าส่วนที่ต้องการเพิ่มเติมมาจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน เพื่อให้เพียงพอต่อการใช้งานสำหรับระบบเติมอากาศ

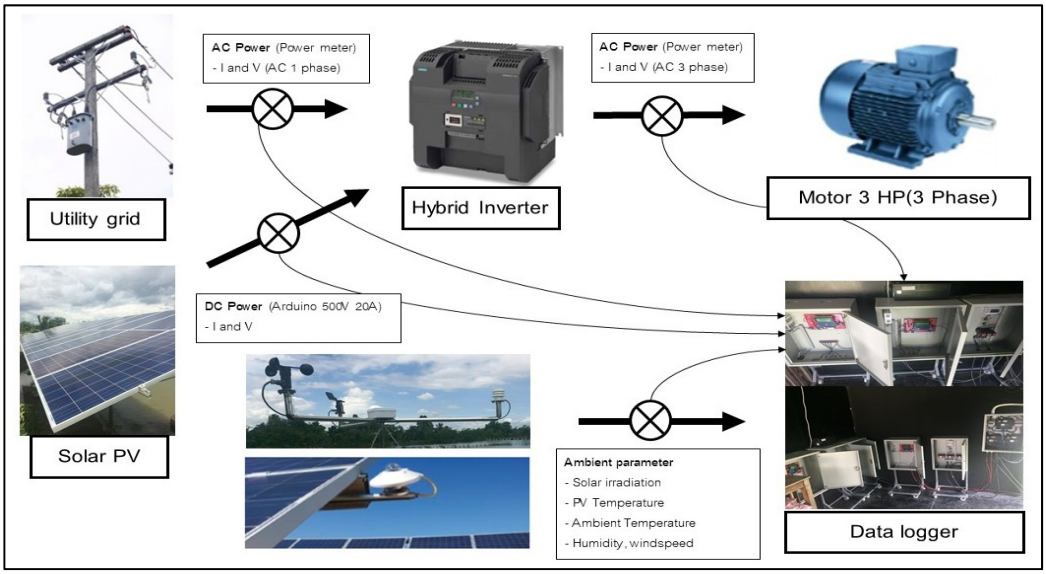


Figure 1 Schematic diagram of solar PV-electrical utility hybrid system for aerator.

ในการทดสอบระบบได้มีการวัดและบันทึกค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ซึ่งประกอบไปด้วย ค่ากำลังไฟฟ้าที่ออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (DC) ค่ากำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน (AC 1 Phase) และค่ากำลังไฟฟ้าที่ออกจากอินเวอร์เตอร์แบบไฮบริด (AC 3 Phase) สำหรับการเก็บข้อมูลแวดล้อม จะมีพารามิเตอร์ที่ทำการเก็บข้อมูล คือ ความเข้มแสงอาทิตย์ อุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และอุณหภูมิแวดล้อม โดยดำเนินการเก็บข้อมูลเป็นระยะเวลา 1 เดือน ทำการใช้งานระบบเป็นเวลา 9 ชั่วโมงต่อวัน เริ่มตั้งแต่เวลา 8.00 น.- 17.00 น.

ทฤษฎีที่ใช้วิเคราะห์ข้อมูล

ในงานวิจัยครั้งนี้ได้ทำการเก็บข้อมูล เพื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์ ผู้วิจัยได้แบ่งการวิเคราะห์ข้อมูลออกเป็นสองแบบ คือ สมรรถนะของระบบ และประสิทธิภาพของระบบ

การประเมินสมรรถนะของระบบ

ในการประเมินสมรรถนะของระบบ จะเริ่มต้นจากการหาค่าผลผลิตประจำวัน (Y_A, kWh/kW$_p$) ซึ่งหาได้จากอัตราส่วนระหว่างค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่อขนาดของระบบที่ติดตั้ง ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่าง ผลรวมของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ประจำวันด้าน DC (E_{DC}, kWh/day) ต่อค่ากำลังไฟฟ้าติดตั้งสูงสุดของระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (P_o, kW$_p$) (Hussin et al, 2013)

$$Y_{A,d} = \frac{E_{DC,d}}{P_o} \qquad \text{สมการที่ 1}$$

ผลผลิตสุดท้ายประจำวัน (Y_F, kWh/kW$_p$) คือค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตจากระบบต่อขนาดของระบบที่ติดตั้ง โดยเป็นอัตราส่วนระหว่าง ผลรวมของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ประจำวันด้าน AC (E_{AC}, kWh/day) ต่อค่ากำลังไฟฟ้าติดตั้งสูงสุดของระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (P_o, kW$_p$) (Hussin et al, 2013)

$$Y_{F,d} = \frac{E_{AC,d}}{P_o}$$ สมการที่ 2

ผลผลิตอ้างอิง (Y_R, h) คือค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทางทฤษฎี ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างรังสีรวม POA (Plane of Array, kWh/m^2) ต่อค่ารังสีอ้างอิงที่สภาวะมาตรฐานการทดสอบ ($G_{STC,}$ 1 kW/m^2) (Hussin et al, 2013)

$$Y_R = \frac{H_t}{G_{stc}}$$ สมการที่ 3

การประเมินประสิทธิภาพของระบบ

ประสิทธิภาพการผลิตพลังงานสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถคำนวณหาได้จากอัตราส่วนระหว่าง กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (P_{DC}, W) ต่อผลคูณระหว่างรังสีตกกระทบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Plane of Array, W) และพื้นที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (A, m^2) (Hussin et al, 2013)

$$\eta_{PV} = \frac{P_{DC}}{G_{i,POA} A_a} \times 100\%$$ สมการที่ 4

ประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นอัตราส่วนระหว่างผลรวมของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ (E_{AC}, kWh) ต่อผลคูณระหว่างรังสีรวม POA (Plane of Array, kWh/m^2) และพื้นที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (A, m^2) (Hussin et al, 2013)

$$\eta_{sys,m} = \frac{E_{AC,m}}{H_{t,m} A_a} \times 100\%$$ สมการที่ 5

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

พิจารณาค่าความเข้มแสงอาทิตย์เฉลี่ยระหว่างวันโดยพิจารณาเฉพาะช่วงที่เปิดเครื่องเติมอากาศ (Figure 2) พบว่าค่าความเข้มแสงอาทิตย์เฉลี่ยรายวันตลอดทั้งเดือนมีค่า 412 W/m^2 จากการสังเกตสภาพอากาศพบว่าวันที่มีความเข้มแสงอาทิตย์เฉลี่ยรายวันต่ำที่สุดคือ 194 W/m^2 เนื่องจากเป็นวันที่มีสภาพอากาศไม่ดี มีเมฆมากและมีฝนตก ส่วนวันที่มีค่าความเข้มแสงอาทิตย์เฉลี่ยรายวันสูงที่สุดมีค่า 596 W/m^2 จะพบว่าเป็นวันที่มีท้องฟ้าโปร่ง และไม่ค่อยมีเมฆบดบัง ในช่วงที่ทำการทดสอบพบว่ามีวันที่มีความเข้มแสงอาทิตย์สูงกว่าค่าเฉลี่ยรายวัน (412 W/m^2) ทั้งหมด 16 วัน

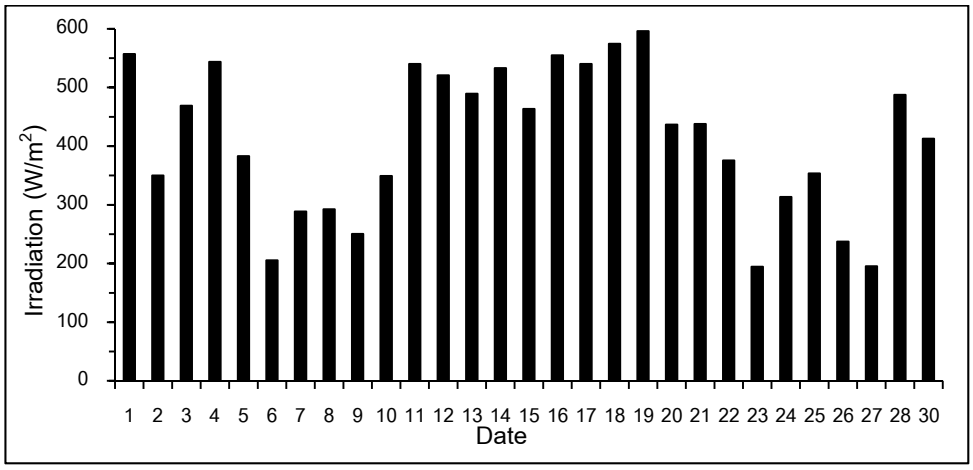


Figure 2 Daily average incident solar irradiation.

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์และค่าความเข้มแสงอาทิตย์ (Figure 3) พบว่ามีความสัมพันธ์กันเป็นแบบเส้นตรง ($R^2 = 0.9651$) โดยกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะแปรผันตรงกับค่าความเข้มแสงอาทิตย์ที่เพิ่มขึ้น และกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยรายวันตลอดทั้งเดือนจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับ 1.1 kW คิดเป็น 38% ของกำลังติดตั้งสูงสุด (2.835 kW) ระบบนี้ผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดเท่ากับ 1.8 kW (64% ของกำลังติดตั้งสูงสุด) ซึ่งเป็นวันที่ความเข้มแสงอาทิตย์เฉลี่ยรายวันอยู่ที่ 596 W/m^2

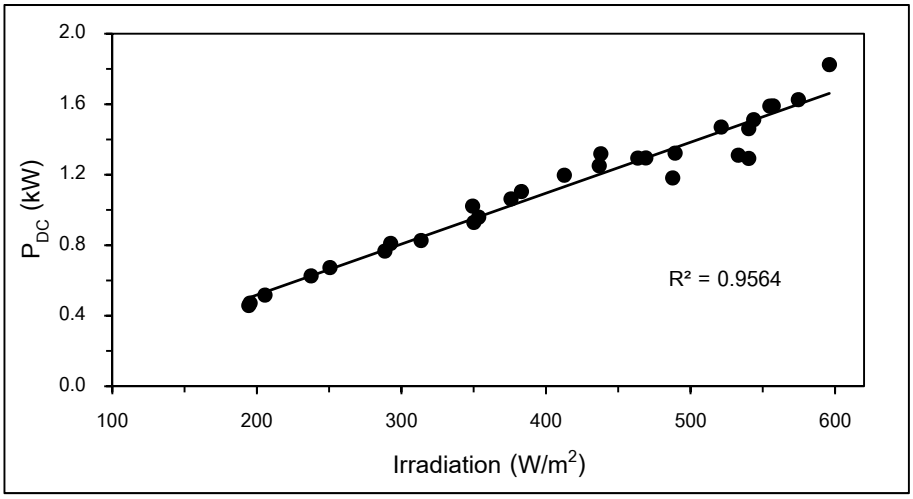


Figure 3 The relationship between DC power from a solar PV system and incident solar intensity.

เนื่องจากระบบที่ทำการทดลองเป็นการใช้พลังงานร่วมกันระหว่างพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบเซลล์แสงอาทิตย์และระบบไฟฟ้าพื้นฐานจากการไฟฟ้า จะทำงานโดยการเลือกใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ก่อนและดึงไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานมาเสริม เพื่อให้เพียงพอต่อการใช้งานของเครื่องเติมอากาศ ดังนั้นเมื่อช่วงเวลาที่มีค่าความเข้มแสงอาทิตย์อยู่ในระดับที่สูง ระบบเซลล์แสงอาทิตย์จะสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มาก ทำให้ดึงพลังงานจากการไฟฟ้าเพื่อมาชดเชยน้อยลง (Figure 4)

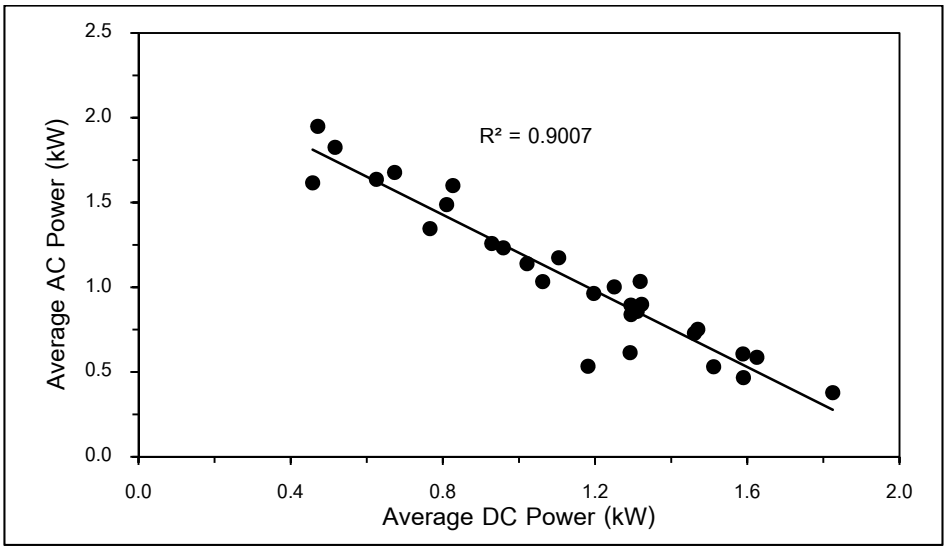


Figure 4 The relationship between AC power from utility grid and DC power generating by the solar PV system.

การวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Figure 5) พบว่ามีค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยตลอดการทดสอบของเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ที่ประมาณ 14.8% ซึ่งค่าที่ได้อยู่ในช่วงปกติของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกรวม และประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าร่วมนี้มีค่า 14.1% ต่อมาเป็นความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ อุณหภูมิแวดล้อม พบว่าอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่ามากกว่าอุณหภูมิแวดล้อมซึ่งเป็นไปตามทฤษฎี โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 33.6 °C และ 29.7 °C ตามลำดับ (Figure 5)

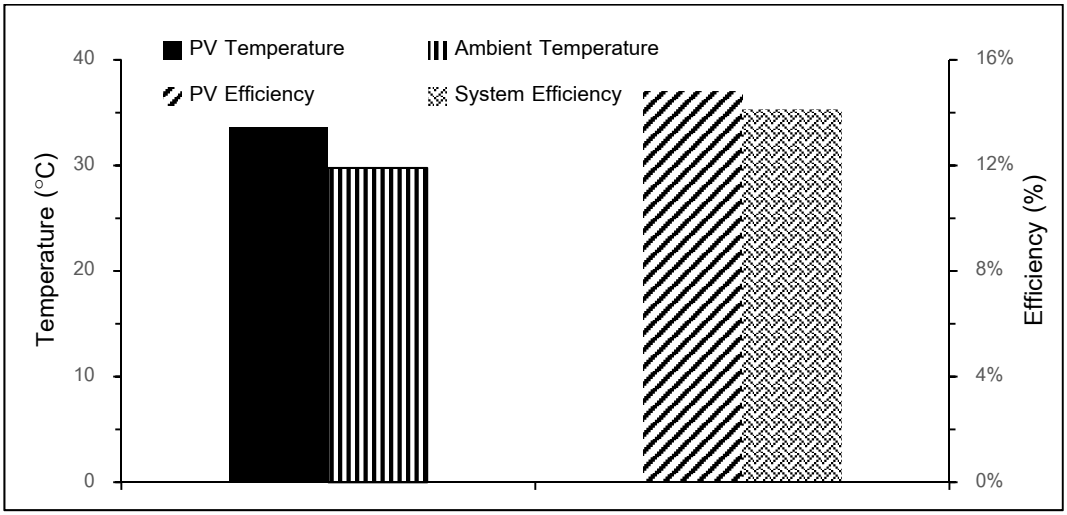


Figure 5 Average temperature and efficiency of the system.

เนื่องจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ทำการทดสอบและเก็บข้อมูลเป็นระยะเวลาหนึ่งเดือน เป็นระบบที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าร่วมกับกับระบบไฟฟ้าพื้นฐานของการไฟฟ้า เพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการของมอเตอร์ขนาด 3 HP ซึ่งจะมีไฮบริดอินเวอร์เตอร์สำหรับแปลงพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์และคอยชดเชยเมื่อพลังงานไฟฟ้าไม่เพียงพอโดยจะดึงไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานของการไฟฟ้ามาเพื่อชดเชยให้เพียงพอต่อความต้องการของมอเตอร์ (Figure 6) แสดงพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน พบว่า ในวันที่มีความเข้มแสงอาทิตย์อยู่ใน

ระดับที่สูงเพียงพอต่อความต้องการ ระบบเซลล์แสงอาทิตย์สามารถทดแทนการใช้พลังงานจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานของการไฟฟ้าได้มากกว่า 50 % ซึ่งมีจำนวน 16 วัน และจากการเก็บข้อมูลเป็นระยะ 1 เดือน พบว่าพฤติกรรมการเปิด-ปิด เครื่องเติมอากาศของเกษตรกรมีผลต่อความสามารถในการผลิตพลังงานไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ เพราะช่วงเวลาในการเปิดใช้งานระบบมาจากความเคยชินอาจจะไม่ตรงกับช่วงที่มีความเข้มแสงอาทิตย์เฉลี่ยสูงเพียงพอ ส่งผลให้ระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าได้น้อยกว่าที่ควรจะเป็น

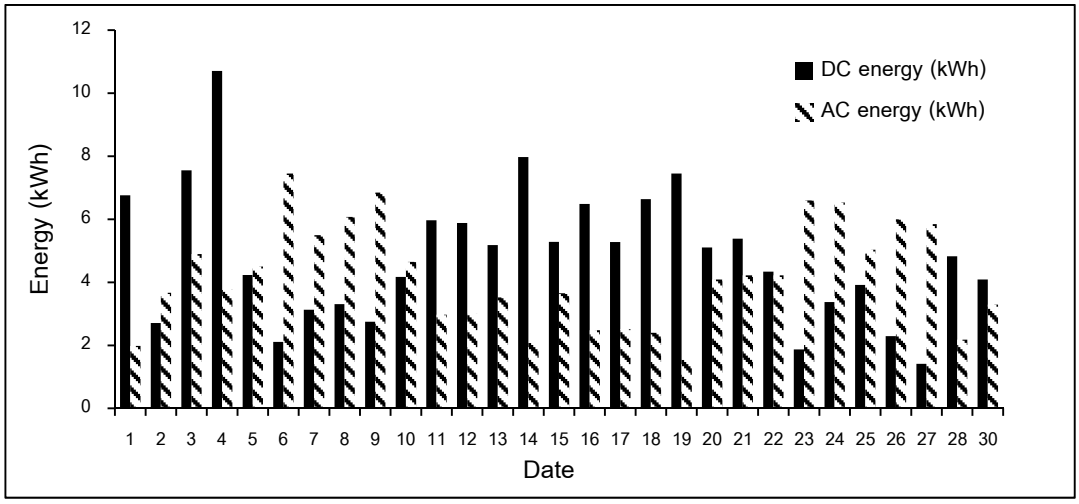


Figure 6 Total daily DC energy from the PV system and AC energy from the utility grid.

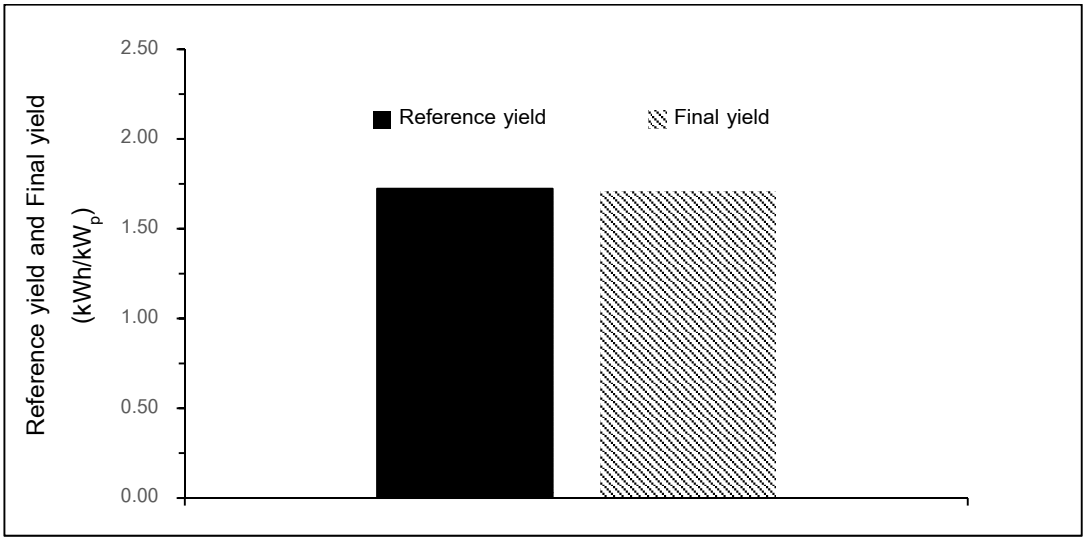


Figure 7 Show the Reference yield, Final yield and Performance ratio

แสดงค่าผลผลิตอ้างอิง (Reference yield, Y_R) ผลผลิตสุดท้าย (Final yield, Y_F) (Figure 7) พบว่าค่าผลตอบแทนสุดท้ายมีค่าน้อยกว่าค่าผลตอบแทนอ้างอิงอยู่เล็กน้อย โดยมีค่าผลตอบแทนอ้างอิงและผลตอบแทนสุดท้ายเท่ากับ 1.72 kWh/kW_p และ 1.70 kWh/kW_p แสดงว่าระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สามารถทำงานได้อย่างเต็มสมรรถนะ

สรุป

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการใช้พลังงานร่วมระหว่างระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์และระบบไฟฟ้าพื้นฐานของการไฟฟ้า เพื่อทดแทนการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน ในเวลากลางวันระบบจะทำงานโดยใช้พลังงานที่ผลิตได้จากระบบเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ไม่เพียงพอจึงทำการดึงไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานมาเพิ่มเพื่อให้เพียงพอต่อการใช้งานของมอเตอร์ในเครื่องเติมอากาศ จากการเก็บข้อมูลเป็นระยะเวลาหนึ่งเดือนพบว่าระบบเซลล์แสงอาทิตย์สามารถลดการใช้ไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานได้ 38% ประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์เฉลี่ยตลอดการทดสอบอยู่ที่ประมาณ 14.8% ผลตอบแทนอ้างอิงและผลตอบแทนสุดท้ายเท่ากับ 1.72 kWh/kW$_p$ และ 1.70 kWh/kW$_p$ ตามลำดับ โดยระบบผลิตไฟฟ้าร่วมนี้มีประสิทธิภาพระบบอยู่ที่ 14.1% จากการเก็บข้อมูลเป็นระยะ 1 เดือน พบว่าพฤติกรรมการเปิด-ปิด เครื่องเติมอากาศของเกษตรกรมีผลต่อความสามารถในการผลิตพลังงานไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์พอสมควร เพราะช่วงเวลาในการเปิดใช้งานระบบมาจากความเคยชินอาจจะไม่ตรงกับช่วงที่มีความเข้มแสงอาทิตย์เฉลี่ยสูงเพียงพอ ส่งผลให้ระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าได้น้อยกว่าที่ควรจะเป็น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก วิทยาลัยพลังงานทดแทนมหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่มอบทุนอุดหนุนการทำวิทยานิพนธ์ผ่านโครงการ “โครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทน ในกลุ่มประเทศอาเซียนในระดับบัณฑิตศึกษา” ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ในการสนับสนุนทุนในการวิจัย และบ่อเลี้ยงปลาสมหมายฟาร์มสำหรับเอื้อเฟื้อสถานที่ในการทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2555. **คู่มือพัฒนาและการลงทุนผลิตพลังงานทดแทน ชุดที่ 2 พลังงานแสงอาทิตย์**. แหล่งที่มา : http://www.dede.go.th/article_Attach/h_solar.pdf., 5 กันยายน 2561.

หน่วยวิจัยสังคมและสิ่งแวดล้อม คณะสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2557. **การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำและการปรับตัว สู่การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ในเขตภาคเหนือของประเทศไทย**. แหล่งที่มา : https://aquadaptorg.files.wordpress.com/2017/04/briefing-10th.pdf., 10 กันยายน 2560.

Hussin, M.Z., S. Shaari, and A.M. Omar. 2013. Field performance of grid connected photovoltaic system using amorphous silicon module. **International Journal of Renewable Energy** 8(2): 37-48.

Sundaram, S. and J.S.C. Babu. 2015. Performance evaluation and validation of 5MWp grid connected solar photovoltaic plant in South India. **Energy Conversion and Management** 100: 429-439.

Ayompe, L.M., A. Duffy, S.J. McCormack and M. Conlon. 2011. Measured performance of a 1.72 kW rooftop grid connected photovoltaic system in Ireland. **Energy Conversion and Management** 52: 816-825.

Effects of Ceiling Characteristic of Anidolic Lighting System on Daylighting in Office Buildings in Thailand

Bormey Long[1*] and Nuanwan Tuaycharoen[1]

ABSTRACT

The main purpose of this research study was to investigate the effects of ceiling characteristic of Anidolic Lighting System (ADS) on daylighting in office buildings in Thailand. Seven types of ceiling designs of ADS and one existing model were investigated in terms of illuminance levels and uniformity using DIAlux 4.13. The simulation was simulated during clear sky conditions during working hours in Bangkok, that is, from 8:00 a.m. – 4:00 p.m. The case study in this research was a working room with the size of 6 m x 5 m, and height of 4 m. This study focused on the southern orientation of the façade with a clear sky condition. The results illustrated that all types of ceiling models can obtain higher illuminance values than the required illuminance (500 lux). The result also showed that the values of uniformity were not merely different from each other, so the costs of each model was used as criteria instead to identify the best option. The results yielded the conclusion that the second model, a model with the 15° inclination of duct panels, has the best price. Hence, the findings from this study could be used as a design guideline for both designers and architects to design proper daylighting for office building and other types of building with similar characteristic.

Keywords: Anidolic Lighting System, Office, Daylighting

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

[1]Department of Building Innovation, Faculty of Architecture, Kasetsart University, Bangkok, 10900

INTRODUCTION

The use of daylighting in architectural design is an effective way to create a sustainable building idea. Daylighting can have many advantages. Working long-term in electric lighting is believed to be harmful for the human health; working by daylight is believed to result in less stress and discomfort (Vázquez-Moliní, 2013). Windows that permit daylight in buildings are important for the view and connection they provide with the outdoor climate. Daylight is also important for its quality, spectral composition, and variability. These two properties will lead to an improved vision. However, daylight can also produce uncomfortable solar glare and excessive luminance reflections on display screens, both of which interfere with good vision (Ruck, *et al*., 2000). Thus, the effect of daylight on the performance of tasks depends on how the daylight is delivered. Generally, most of the building types today permit sunlight to enter due to their implemented glazing system. As there is no shading device in the exterior, sunlight will directly enter into the space and yield heat gain. All of these factors need to be considered in daylighting design for buildings. In recent decades, a variety of daylighting technologies have been developed for this specific purpose (Roshan, 2013). As a result, the advanced daylight system turns out to be a tool to achieve important improvements on the quality of indoor daylight and significant reduction on the energy consumptions of the building. Anidolic Daylight System (ADS) is one of the effective daylighting techniques utilized for increasing daylight into the building space and is depending on the building orientation (Scartezzini and Courret, 2002).

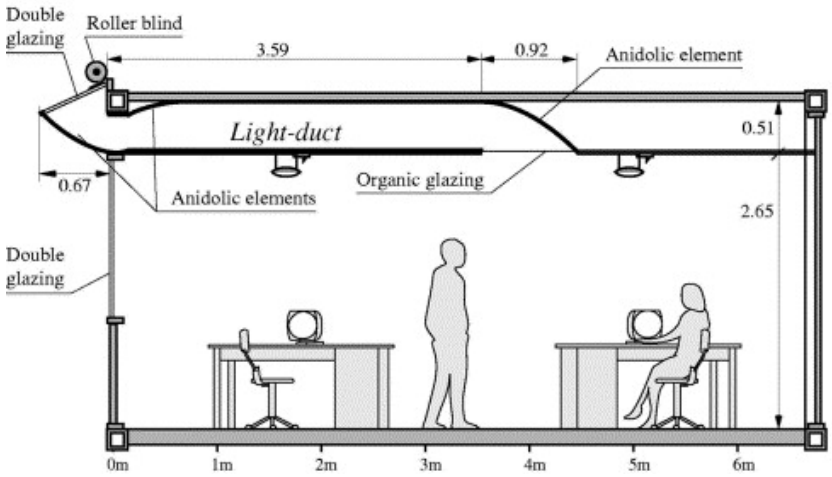


Figure 1 Cross section of Anidolic Daylight System (Scartezzini & Courret, 2002).

ADS was used to set up novel daylighting systems that develop on the efficient collection and redistribution of the diffuse component of daylight purpose. Anidolic system means (an: without and eidolon: image) that has three key components: the collector on the outside of the facade, the rectangular mirror light duct, and the distributing part (distributor) at the end of the duct, which is shown

in Figure 1 above. The system was designed as a result of the non-imaging optics theory (Scartezzini and Courret, 2002). Many studies have been carried out of the characteristics of ADS in other countries, especially in Europe and America (Linhart and Scartezzini, 2010). Some studies have been investigated in the tropics (Roshan, 2013; Roshan and Barau, 2016). There has, however, only been one study that was conducted with the Thailand climate (Munsub, 2018). Munsub (2018) investigated the characteristics of ADS for efficient daylight in office buildings in Thailand. Her study focused on the design of two independent variables. The first independent variable was the angle of light receiver—0, 30 and 60 degrees from the horizontal. The second factor was the size of ceiling diffusor varying from 1 m, 1.5 m and 2 m. Her results depicted that the best option was 0 degrees of light receiver with 2 m ceiling diffusor.

This main aim of this study was to investigate the effect of ceiling characteristics of ADS for efficient daylight in office buildings in Thailand. It should be noted that this study was the first attempt to show how ADS can be applied to increase quantity or quality of daylighting in the office space. Since the limitation of the time span of the study, south facing façade and clear sky condition would be explored only. And, other daylighting techniques such as adjustable blind and window configurations have not considered to improve daylighting in the scope of this study.

This research will help both designers and architects as this study can provide a design guideline for daylighting in order to enhance daylight into office buildings, and protect against the sunlight that penetrates office spaces. This would subsequently reduce the energy conservation from artificial lighting as the daylighting can compensate the lighting requirement of the office building.

MATERIALS AND METHODS

There are seven different types of duct ceilings that were designed and deployed into the building with installed ADS. All of these models were studied with the purpose to understand how much it can affect the building, compared to the existing model that doesn't have any light duct. In terms of practical implication for office building, the specific model was installed with a special technique. All the light duct panels can rotate 180°. All of them can be rotated independently by the users in the building providing convenience for the maintenance and cleaning purpose. These models were implemented inside the office room with size 6m x 5m and the height of 4m with a window. Overall details of the room are shown in Table 1.

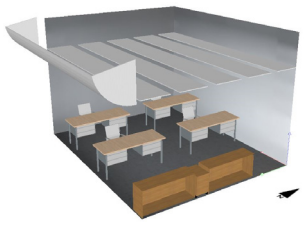
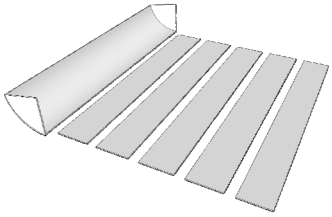
Table 1 Constant parameters of the room details.

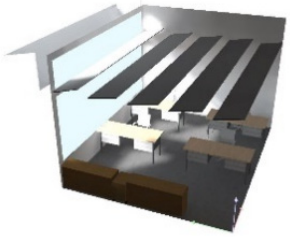
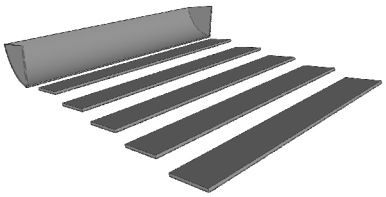
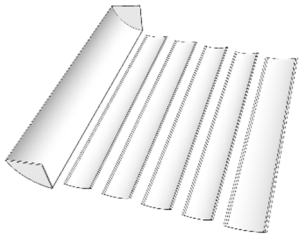
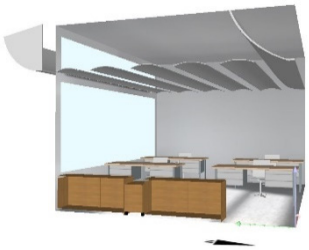
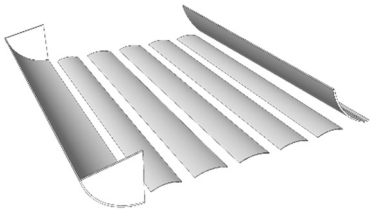
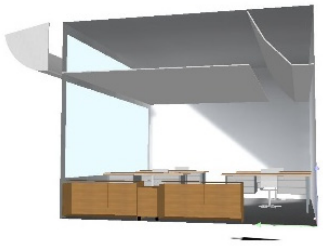
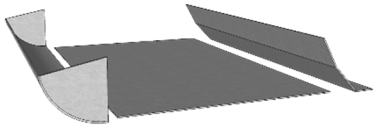
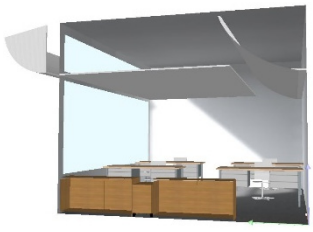
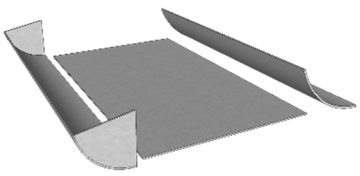
Constant		
Room Geometry	Width	5 m
	Length	6 m
	Height	4 m
Window Geometry	Width	5.6 m
	Height	2 m
	Reflectance	70%
Interior Photometric Property	Wall	60%
	Ceiling	80%
	Floor	30%

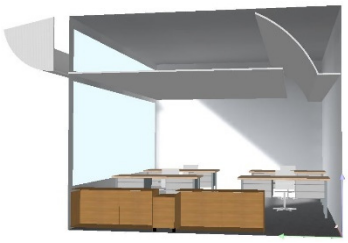
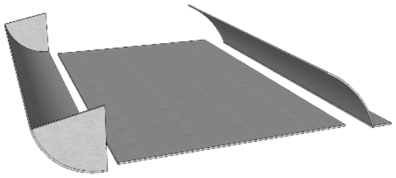
The software DIAlux 4.13 (DIAL, 2018) was used to simulate all the models. The time span of the simulations was set for the whole year during working hours in Bangkok (8:00 a.m. – 4:00 p.m.) Clear sky conditions were set in the simulation. This is because this study focuses solely on the effect of daylighting techniques (ADS) on the performance of direct sunlight protection and sunlight reflection into space. Clear sky conditions could, therefore, provide more specific results. Moreover, this study focused on the south orientation of the façade. The reason for this was that the sun path would be oriented towards the south for several months per year. This condition was the worst scenario for direct sunlight entering into space.

Different types of light duct panels were set in this study with a varying number of light diffusor depending on the model. One simulation with no ceiling duct was also tested in order to compare the results with the rest of the models. The model was installed at the south facade of the building. The size of the window is 2m in height and 5.6m in width. The window was installed at 0.8m above the floor surface and 0.2m below the Anidolic system. The gap between the ceiling and Anidolic is about 1m high. This process were repeated for each of the models. Details of all the models are described below.

Table 2 Options to be investigated.

Model	Perspective	Detail
		1) First light duct model design as flat panels. The first model is designed with a flat surface and there are 5 panels of the duct with 4 diffusors. Each of the panel size is 6m x 0.8m, and the gap between the panels 0.25 m. The panel can be made from plywood or gypsum board.

Model	Perspective	Detail
		2. Second model with the 15° inclination of duct panels. The second model is designed with the incline of the duct panel in order give a larger reflection of sunlight to the ceiling before it can be reflected to the room surface. Applying this method prevents direct sunlight from reaching the room.
		3. Third model: the curved shape with a 10° incline angle. The third model is designed with curved-shaped panels, also with a 10° inclination. The purpose of it was to adjust the gap of diffusors from one panel to another to equal each other (0.25m).
		4. Fourth model with 5 duct panels and a curve reflector. There are 5 curved duct panels with 5 diffusors at the back of the room with a curved reflector. Its function was to bounce back the light into the room. The size of these ducts is 6m x 0.7m and the diffusors gap is 0.3m.
		5. Fifth model with one diffusor and a straight reflector at the back. The Fifth model is focused on a single duct panel with the size of 6m x 4m that provides only one diffusor with the size of 0.5m. At the back of the room, there is a straight reflector to reflect the direct sunlight before it enters the room.
		6. Sixth model with one diffusor and a curved reflector. This model is followed the 5th model by just replacing the straight reflector with a curved shape reflector in order to obtain better results.

Model	Perspective	Detail
		7. Seventh model with reversed shape of model six. This model is also similar to the model presented above. The duct panel's size is however only 3.5m x 6m followed by the diffusor size 0.5m. The reversed curve shape was extended by 0.5m from the back wall.
		8. Existing Model

The dependent variable in the first study consisted of 2 main factors, which are 1) Illuminance (E) and 2) Uniformity (U). All of the models were installed in an office building with the size of 6m x 5m, and a height of 4m. There is also one large window situated at the south wall with a size of 5.6m in width and 2m in height, and installed with a clear glazing and a glass transmission of 0.9. The simulation was carried out using a 0.5m x 0.5m grid and 0.85m above the floor level. Subsequently, the results were analysed in terms of average annual illuminance compared to the standard of 500 lux (IESNA, 2011). The uniformity was further compared to the standard of 0.8 (IESNA, 2011). Then, the best options of ADS from this part was drawn.

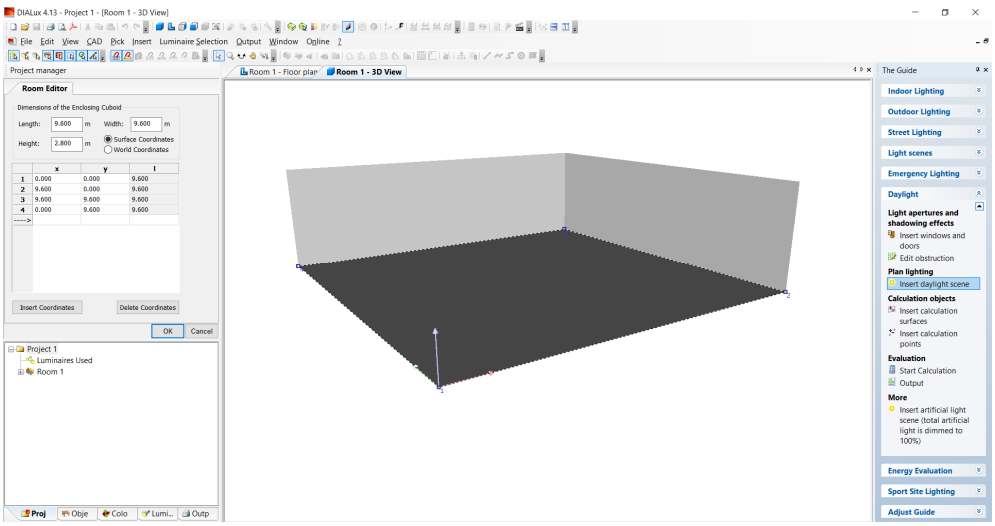


Figure 2. DIAlux 4.13 program.

RESULTS AND DISCUSSION

1. Results of average annual illuminance (lux)

Figure 3 shows the results of annual average illuminance (lux) from all the investigated models and the existing one. It was found that all types of ceiling models can obtain larger-illuminance levels as the requirement illuminance of 500 lux. Among all of these models, the first model with a flat surface, 5 panels of the duct with 4 light diffusors, obtains the highest annual average illuminance (6,518 lux). The seventh option has the lowest average with 2,529 lux. It should be noted that the results of illuminance level of option 7 was lower than option 5 and 6 due to the fact that the reversed curve shape at the back wall seem to reflect daylight back onto the ceiling.

Since all the options can reach the standard value, the average annual uniformity was used as criteria to obtain the best option in this first study.

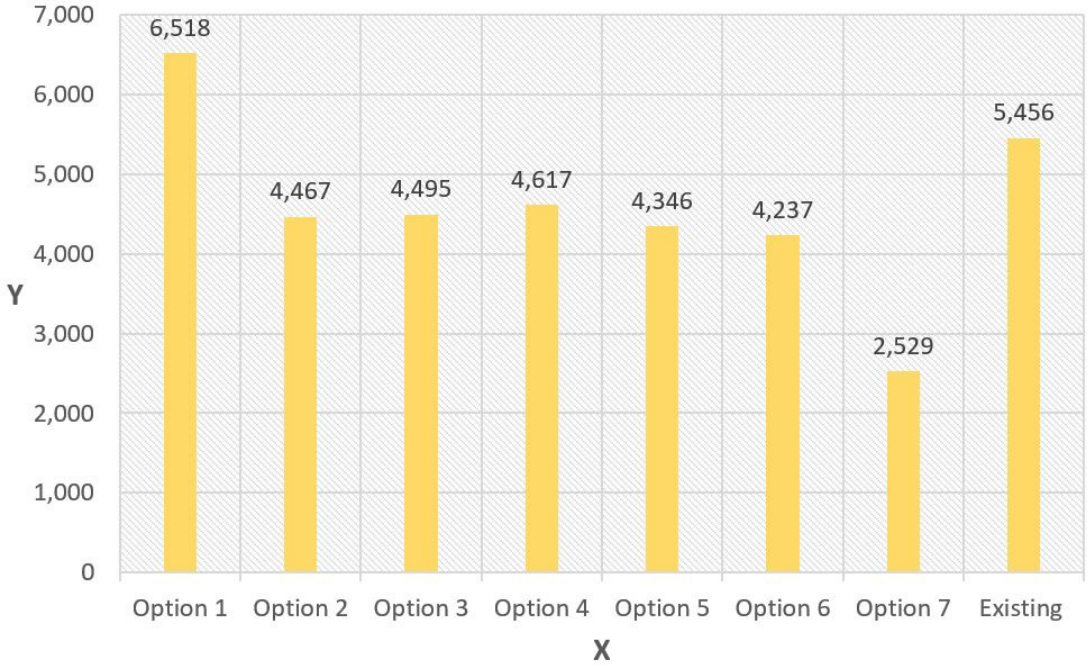


Figure 3 Average annual illuminance (lux) from seven types of ceiling characteristic of ADS.

2. Results of average annual uniformity

Figure 4 shows the average annual uniformity from all seven ceiling models and the existing model. The fourth model has the highest average uniformity of 0.15. The lowest uniformity is the existing model (U= 0.12).

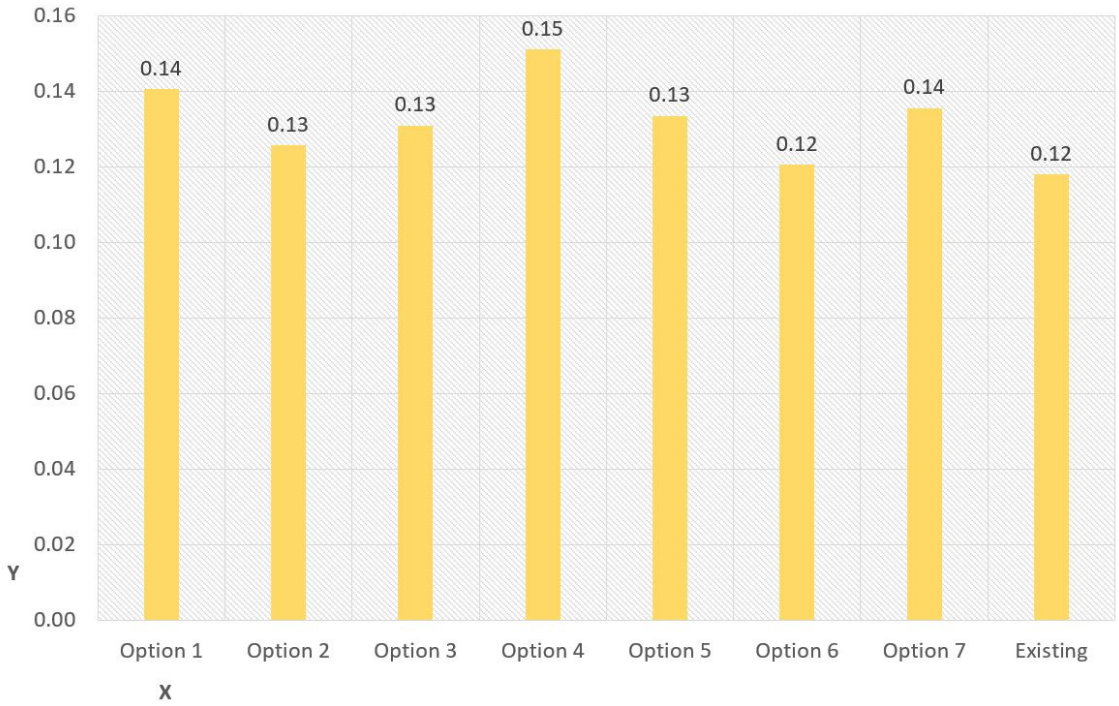


Figure 4 Average annual uniformity from seven types of ceiling characteristic of ADS.

As all the results of uniformity in each model are not merely different, the cost of the models was used as a criteria in order to emphasize the optimal option. Smartboard was used as material for all models, as the price is cheaper compared to other materials, especially if it is lighter than plywood. The costs of the model are listed in Table 3.

Table 3 Price of the models (SCG Smartboard).

Option	Area (m^2)	Price* (Baht)	Total (Baht)
1	25	177	4,425
2	24	177	4,248
3	26	177	4,602
4	32	177	5,664
5	31	177	5,487
6	35	177	6,195
7	36	177	6,372

*SCG smartboard (Onestockhome, 2018).

Therefore, the results yielded the conclusion that the best option for this part is the second model because it has the lowest prices.

CONCLUSION

The main purpose of this research study was to investigate the effect of ceiling characteristic of ADS on daylighting in an office building in Thailand. The results illustrated that all types of ceiling models can obtain higher illuminance values as the requirement illuminance (500 lux). The result also showed that the values of uniformity were not merely different from each other. Therefore, the costs of each model was used as criteria to obtain the best option. The findings of this study showed that the second model, a model with the 15° inclination of duct panels, seemed to have a better price to build compared to the other models. The research also have limitations on the time spent researching.

The data was also restricted to south faced orientation and in working hours in Bangkok, during clear sky conditions. In the next study, data should be collected at different facade orientation, times, and under different sky conditions such as partly cloudy or overcast skies to provide more coverage.

REFERENCES

DIALux. 2018. Retreived December 18th 2018 from https://www.dial.de/en/dialux-desktop/download/

IESNA. 2011. **The IES Lighting Handbook (10th Edition)**. New York: IESNA.

Linhart, F. and Scartezzini, J. L. 2010. Minimizing lighting power density in office rooms equipped with Anidolic Daylighting Systems. **Solar Energy**. 84(4): 587-595.

Mohsen Roshan, M. Z. B. K. (2013). Investigating the performance of Anidolic Daylighting System with respect to building orientation in tropical area IRACST. **Engineering Science and Technology: An International Journal (ESTIJ)**. 13(1): 74-79.

Munsub, J. 2018. **Anidolic Lighting System for Efficient Daylight in Office Buildings**. Master Thesis of Master of Science, Faculty of Architecture, Kasetsart University.

Onestockhome. 2018. Retrieved December 18th 2018 from https://www.onestockhome.com

Roshan, M. and Barau, A. S. 2016. Assessing anidolic daylighting system for efficient daylight in open plan office in the tropics. **Journal of Building Engineering**. 8: 58-69.

Ruck, N., Aschehoug, Ø., Aydinli, S., Christoffersen, J., Edmonds, I., Jakobiak, R., Kischkoweit-Lopin, M. & Klinger, M., Lee, E., Courret, G., Michel, L., Scartezzini, J.L. and Selkowitz, S. (2000). **Daylight in Buildings - A source book on daylighting systems and components**. Washington : Lawrence Berkeley.

Scartezzini, J. L.and Courret, G. (2002). Anidolic daylighting systems. **Solar Energy**. 73(2): 123-135.

Vázquez-Moliní, D. G. M. 2013. Horizontal daylighting system for office buildings. **Energy and Buildings**. 67: 525-530.

การวิเคราะห์การกระจายความเค้นในโครงประธานของรถโบกี้บรรทุกตู้คอนเทรนเนอร์ โดยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์

Analysis for Stress Distribution in Underframe of a Bogie Container Flat Wagon Using FEM

วัชรากร พรหมเศษ[1] และ อรรถพร วิเศษสินธุ์[1*]

Thanawat Chaleekarn[1] and Attaporn Wisessint[1*]

บทคัดย่อ

ในโรงซ่อมของการรถไฟแห่งประเทศไทย (รฟท.) การซ่อมบำรุงส่วนล่างจำเป็นต้องยกโครงประธาน โดยใช้ลิฟต์ติ้งแจ๊คยกที่จุดยกซึ่งอยู่ด้านข้างของโครงประธาน แต่หากมีรถไฟที่ชำรุดนอกโรงซ่อม และจำเป็นจะต้องยกโครงประธานขึ้นเพื่อซ่อมแซมและแก้ไข ซึ่งการยกรถนอกโรงซ่อมนั้นไม่สามารถใช้ลิฟต์ติ้งแจ๊คได้ จึงจำเป็นต้องใช้แม่แรงกระปุกในการยก แต่เนื่องจากจุดยกที่อยู่ด้านข้างของตัวรถ มีอุปสรรคเช่นฐานวางรองแม่แรงไม่ได้ระดับ หรือจุดที่วางแม่แรงมีสิ่งกีดขวาง ทำให้ไม่สามารถวางแม่แรงได้ จึงได้มีการใช้แม่แรงกระปุกยกที่โครงประธานหน้าอุดเพื่อความสะดวกและรวดเร็ว อย่างไรก็ตามการยกด้วยวิธีนี้ไม่ได้ระบุเป็นมาตรฐานการยกที่เหมาะสม ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงต้องทำการวิเคราะห์หาการกระจายความเค้นที่เกิดขึ้นกับโครงประธานในขณะใช้แม่แรงกระปุกยกรถบริเวณโครงประธานหน้าอุดโดยวิธีการทางไฟไนต์เอลิ-เมนต์ เพื่อประเมินความเสี่ยงที่จะเกิดความเสียหายของโครงประธานและกำหนดจุดยกที่เหมาะสมในการทำงาน

ABSTRACT

In State Railway of Thailand (SRT) depot, underframe of a bogie container flat wagon is lifted for maintenance using lifting jacks at the proper lifting points. By the way, if the train was damaged out of depot, them can't use the lifting jack, a bottom jack will be applied to lift an underframe at the headstock. However, the lifting by a bottom jack is not safe and not recommend. In this study, the lifting an underframe by a bottom jack at the headstock is simulated and analyzed using finite element method (FEM). Stress distribution in the underframe is determined. Finally, the opportunity for failure is discussed.

Keywords: Underframe; Stress distribution; bottom jack; FEM

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

[1]ศูนย์วิศวกรรมระบบราง ภาควิชาวิศวกรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร 10900

[1]KURAIL, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Thailand

คำนำ

การยกโครงประธานด้วยแม่แรงกระปุกที่โครงประธานหน้าอุด เป็นการปฏิบัติงานจริงที่ใช้ในแขวงรถสินค้าบางชื่อการรถไฟแห่งประเทศไทย เนื่องจากจุดที่ใช้ยกด้วยลิฟต์ติ้งแจ็คอยู่ด้านข้างของตัวรถ ไม่สามารถวางแม่แรงกระปุกเพื่อทำการยกได้ จึงต้องใช้แม่แรงกระปุกยกโครงประธานที่โครงประธานหน้าอุด ซึ่งการยกที่โครงประธานหน้าอุด ทำให้โครงประธานหน้าอุดเกิดความเสียหาย

จากงานวิจัยของ A.Kumar ได้วิเคราะห์โครงสร้างหัวรถจักร 5500 HP WDG5 ที่มีอุปกรณ์รวมอยู่ด้วย โดยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่ามีความเค้นเกิดที่บริเวณที่มีน้ำหนักกดที่โครงสร้าง ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างอยู่ในเกณฑ์การออกแบบ (A.Kumar, June 2011)

จากงานวิจัยของ K.Chlus and W.Kravomวิเคราะห์โครงประธานรถบรรทุกตู้คอนเทรนเนอร์ที่จุดรองรับของโครงประธาน ที่ใช้ชนิดของเหล็ก S355 (400 MPa) เป็นโครงสร้าง โดยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าค่าความเค้นที่เกิดขึ้นที่จุดรองรับของโครงประธาน เป็นค่าที่ได้มาตรฐาน ไม่ส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อโครงประธาน (K.Chlus and W.Kravom. 2012)

งานวิจัยนี้จึงใช้วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองวิธีการยกโครงประธานโดยใช้แม่แรงกระปุกยกรถบริเวณโครงประธานหน้าอุด โดยการออบแบบให้โครงประธานถูกยกด้วยแรงของแม่แรงในขณะที่มีการบรรทุกตู้คอนเทรนเนอร์อยู่บนโครงประธาน เพื่อให้เกิดความเค้นที่จุดที่ใช้แม่แรงกระปุกยกโครงประธานเสมือนจริงมากที่สุด จากนั้นวิเคราะจากพฤติกรรมของความเค้นที่ตกค้างที่โครงประธาน

อุปกรณ์และวิธีการ

การจำลองเหตุการณ์ในการยกโครงประธานที่โครงประธานหน้าอุด

เมื่อมีรถไฟที่ชำรุดที่อยู่นอกโรงซ่อมบำรุง และในการซ่อมแซมจำเป็นต้องยกโครงประธานขึ้นเพื่อแยกกับแคร่ของรถไฟ แต่เนื่องจากรถชำรุดอยู่นอกพื้นที่ของโรงซ่อมบำรุงจึงไม่สามารถยกด้วยลิฟต์ติ้งแจ็คได้ และรถไฟที่ชำรุดนั้นไม่สามารถเคลื่อนที่เข้ามาซ่อมแซมในโรงซ่อมบบำรุงได้ จึงจำเป็นจะต้องทำการยกรถด้วยแม่แรงกระปุก แต่เนื่องจากจุดที่กำหนดให้ใช้ในการยกด้วยลิฟต์ติ้งแจ็คนั้นไม่สามารถวางแม่แรงได้ จึงจำเป็นต้องใช้แม่แรงกระปุกยกที่โครงประธานหน้าอุด เพื่อให้สามารถทำการซ่อมบำรุงเพื่อให้นำกลับมาใช้งานได้ ในงานวิจัยนี้จะจำลองเหตุการณ์ในการยกรถด้วยแม่แรงกระปุกที่โครงประธานหน้าอุด ดังภาพที่ 1

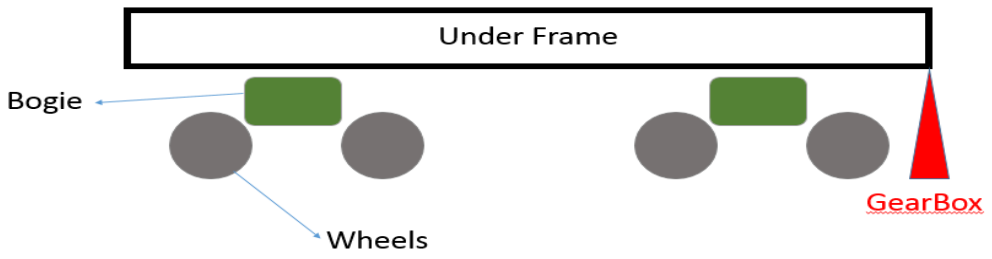


Figure 1 Lifting an underframe by a bottom jack at the headstock.

การออกแบบโครงประธานสำหรับวิเคราะห์โดยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการออบแบบโครงประธานเพื่อวิเคราะห์ผลการทดลอง จำเป็นต้องออกแบบให้ใกล้เคียงกับของจริงมากที่สุด เพื่อไม่ให้ผลที่ออกมาคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง โดยการออกแบบโครงประธานในครั้งนี้ อ้างอิงจากแบบแปลนรถบรรทุกตู้คอนเทรนเนอร์ (SRT, 1962) ที่ใช้งานในการรถไฟแห่งประเทศไทย โดยมีขนาดดังภาพที่ 2

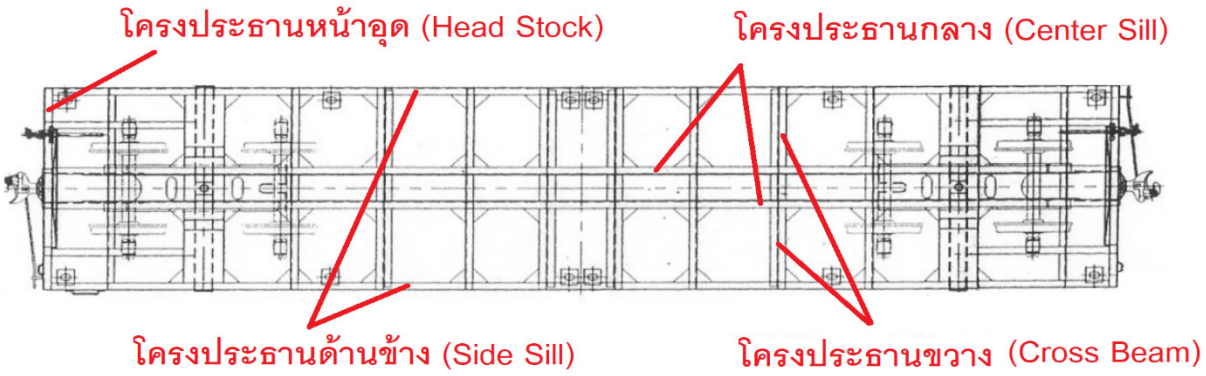


Figure 2 Top view drawing of bogie container flat (BCF).

การรถไฟแห่งประเทศไทยใช้เหล็กแผ่นรีดร้อน สำหรับงานโครงสร้างทั่วๆ ไป (SS400) ในการประกอบโครงประธาน เป็นเหล็กรูปล่างตัว C มีความหนา 5 มิลลิเมตร ทุกชิ้น โดยมีค่าคุณสมบัติของวัสดุดังตารางที่ 1

Material Properties	Steel (SS400)
Mass Density (kg/m^3)	7,850
Young's Modulus (GPa)	290
Poisson's Ratio	0.3
Yield Stress (MPa)	200

Table 1 Material Properties

การวิเคราะห์โดยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์โดยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นการวิเคราะห์ด้วยหลักของกลศาสตร์วัสดุ โดยในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์ถึงการกระจายความเค้น แล้วนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ถึงความเสียหายจะที่เกิดขึ้นเมื่อใช้แม่แรงกระปุกยกรถที่โครงประธานหน้าอุด โดยการจำลองสถานการณ์ให้โครงประธานประทุกตู้คอน-

เทรนเนอร์ และใช้แม่แรงกระปุกยกรถที่บริเวณหน้าอุด ซึ่งเป็นจุดที่ใช้ในสถานการณ์จริงผู้วิจัยได้เลือกใช้โปรแกรม Marc/Mentat 2005 ในการออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองในครั้งนี้ ตามภาพที่ 3

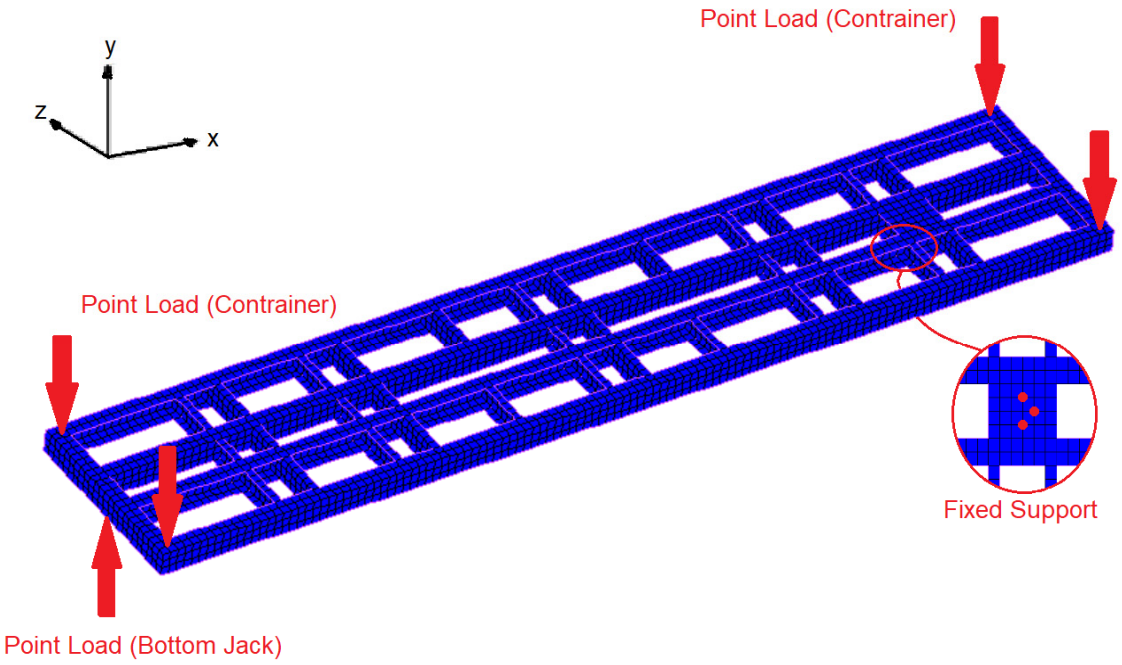


Figure 3 FEM model and boundary conditions.

แบบจำลองจะถูกยกด้วยแรงของแม่แรงกระปุกที่โครงประธานหน้าอุด(Point Load(Bottom Jack)) สำหรับการวิเคราะห์ความเค้นที่เกิดขึ้นในโครงประธาน

การวิเคราะห์แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิจัยนี้ใช้เอลิเมนต์รูปสี่เหลี่ยม ในการวิเคราะห์จะใช้เกณฑ์การเปลี่ยนสภาพวัสดุของ Von Mises เนื่องจากเกณฑ์การเปลี่ยนสภาพวัสดุของ Von Mises สามารถแสดงพฤติกรรมของความเค้นบริเวณจุด Fixed Support และ จุด Point Load ของแบบจำลองได้เป็นอย่างดี

ค่าการเคลื่อนัวหรือการกระจัด (Displacement) จัดอยู่ในรูปแบบสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ ตามชนิดของเอลิเมนต์ ซึ่งค่าการเคลื่อนตัวในทิสทาง x-y สำหรับเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมเป็นไปตามสมการดังนี้

$$u_i = \sum_{n=1}^{4} N_n \bar{u}_{in} \qquad (1)$$

โดยที่ u_i คือการกระจัดทิศทาง i , $\bar{u}_{in}$ เป็นการกระจัดที่จุดต่อ n ซึ่งมีทิศทางเดียวกับ i และ N_n คือฟังก์ชั่นการประมาณใน (Interpolation function) ที่จุดต่อ n จากนั้นเมื่อทราบค่าการกระจัดแล้วก็จะนำไปหาค่าความเครียดและความเค้นในทิศทางต่างๆต่อไป

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลของการวิเคราะห์โครงประธานเมื่อใช้แม่แรงกระปุกยกที่โครงประธานหน้าอุด

จากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ แรงของแม่แรงกระปุกที่กระทำต่อโครงประธานทำให้โครงประธานเกิดการเคลื่อนตัว หมุนทวนเข็มนาฬิกาไปตามแกน y โดยมีจุด Fixed support เป็นจุดหมุน ดังภาพที่ 4

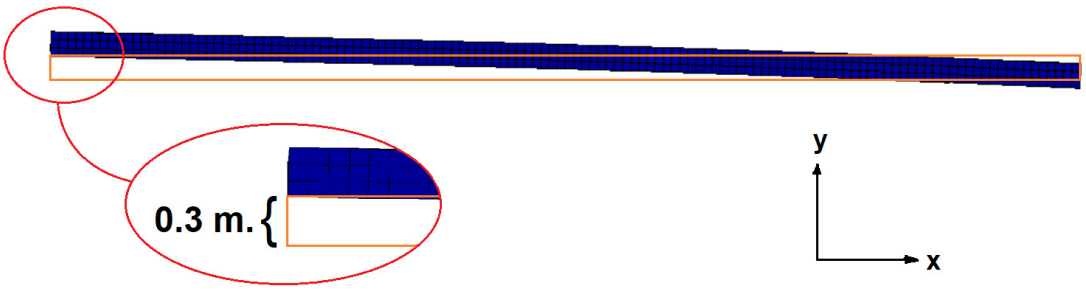


Figure 4 Show Displacement Y (u_y).

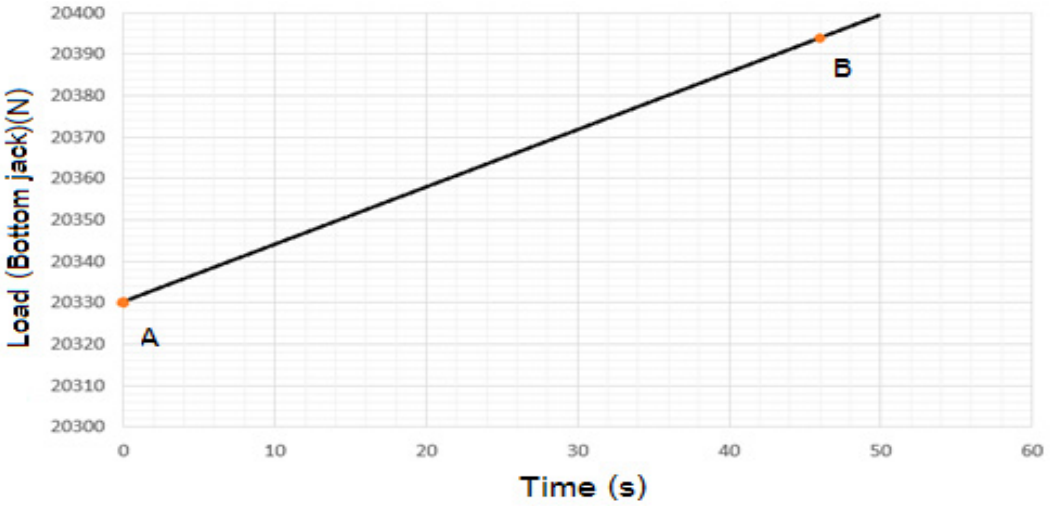


Figure 5 Load (Bottom jack)(N)

จากภาพที่ 5 แรงที่แม่แรงกระปุกกระทำที่โครงประธานหน้าอุด ซึ่งเป็นแรงที่ใช้ในการทดสอบ เพื่อให้ได้ระยะยกที่ใกล้เคียงกับการยกในสถานการณ์จริงซึ่งมีระยะยกที่ปลายจุดยก 0.3 เมตร จากกราฟแสดงถึงแรงของแม่แรงกระปุกที่เพิ่มขึ้นในการยกโครงประธาน จากจุด A คือจุดเริ่มต้นที่ทำให้โครงประธานเกิดการเคลื่อนที่ขึ้นไป

ตามแนวแกน Y จนถึงจุด B ระยะความสูงของโครงประธานจากจุด A ถึง จุด B จะอยู่ที่ 0.3 m โดยใช้เวลา 46 วินาที

ผลการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยศึกษาการวิเคราห์ความเค้น (Von Mises stress) ที่โครงประธาน พบว่าโครงประธานได้รับความเค้น อยู่เป็นจำนวนมาก โดยแรงที่เกิดขึ้นเกิดจากการดัดของโครงประธานด้วยแรงที่กระทำของแม่แรงกระปุกที่กระทำต่อโครงประธานหน้าอุด ส่งผลให้เกิดการดัดตัวของโครงประธานตามแนวแกน y

ค่าของความเค้น ที่เกิดขึ้นที่จุดยึดและโครงประธานกลางจนเกือบถึงจุดความเค้นคราก (Yield Stress) ซึ่งบ่งบอกถึงความเสี่ยงที่จะทำให้โครงประธานเกิดการเสียรูปได้ ถึงแม่ว่าความเค้น ที่โครงประธานหน้าอุดจะน้อยกว่าจุดยึดและโครงประธานกลาง แต่ก็มีโอกาสเสี่ยงที่จะทำให้เสียรูปได้เช่นกัน

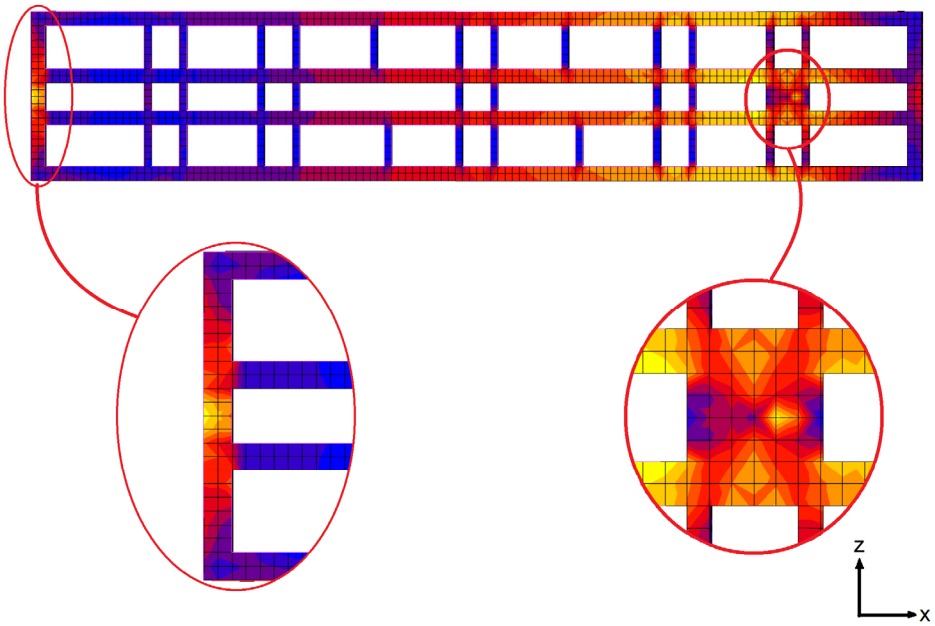


Figure 6 Von Mises Stress

Parts	Maximum Von Mises Stresses (MPa)
Head Stock	79.95
Fixed Displacement	167.019
Center Sill	172.925

Table 2 Excessive Von Mises stresses in under frame.

สรุป

งานวิจัยนี้ศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นกับโครงประธานเมื่อทำการยกรถบรรทุกตู้คอนเทรนเนอร์โดยใช้แม่แรงกระปุกยกที่โครงประธานหน้าอุด จากการจำลองเหตุการณ์แล้วนำมาวิเคราะห์ถึงความเค้นที่เกิดขึ้นกับโครงประธาน โดยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าการใช้แม่แรงยกโครงประธานที่โครงประธานหน้าอุด มีความเค้นสูงที่บริเวณโครงประธานกลางใกล้กับจุดยึดมากกว่าบริเวณอื่นๆ ส่งผลให้โครงประธานกลางมีความเสี่ยงต่อการเสียรูปได้

อย่างไรก็ตามหากจำเป็นจะต้องใช้แม่แรงกระปุกยกที่โครงประธานหน้าอุด ควรที่จะมีการเสริมความแข็งแรงของโครงประธานหน้าอุดเสียก่อน เพื่อให้โครงประธานสามารถรับแรงที่มากระทำ โดยที่โครงประธานหน้าอุดจะต้องไม่เสียรูป หรือเพิ่มจุดยกของแม่แรงกระปุก จากที่ใช้แม่แรงกระปุก 1 ตัว เพิ่มเป็น 2 ตัว เพื่อกระจายแรงจาก 1 จุด เป็น 2 จุด ซึ่งอาจจะช่วยในการลดแรงที่กระทำที่หน้าสัมผัสระหว่างแม่แรงกระปุกกับโครงประธานได้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ 1. ศูนย์วิศวกรรมเครื่องกล การรถไฟแห่งประเทศไทย ที่ได้อนุเคราะห์แบบแปลนโครงสร้างของรถบรรทุกตู้คอนเทรนเนอร์ และ 2.แขวงรถสินค้าบางซื่อ การรถไฟแห่ประเทศไทย ที่กรุณาสถานที่ในการจำลองเหตุการณ์ยกรถโดยใช้แม่งแรงกระปุกยกที่โครงประธานหน้าอุด

เอกสารอ้างอิง

A. Kumar. 2011. **FINITE ELEMENT ANALUSIS OF UNDERFRAME FOR 5500 HP WDG5 LOCOMOTIVE**. Report.

Karol Chlus and Wieslaw Krason. 2012. **NUMERICAL STANDARD TESTS OF RAILWAY CARRIAGE PLATFORM.** *Military University of Technology*. *Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol. 19, No. 3*.

SRT Mechanical Engineer Center. 1962. **Side Frame Profiles Drawing.** State Railway of Thailand. Bangkok,Thailand.

Setting Inflight Service Level for Low Cost Airline Using Data Analytic Approach

Pharita Tarom[1] and **Pornthep Anussornnitisarn**[1*]

ABSTRACT

Due to the nature business of low cost airline, the cost over its operation is crucial. Most of its service to customer need to justify as part of its earnings. Since, most of low cost airline flights are under 2-3 hours. Extra inflight services like food, beverage and gift are not an essential to customers in particular if that service must be paid. However, the low cost airlines need to provide inflight service as part of service strategies and perceived image. Setting service level of each service type is critical to maintain overall customer satisfactions and to profit or at least not losing money on each extra service. In this research, a hot meal service is the main focus due to its perishable characteristic. Currently, the low cost airline company in this study loses a majority of its inflight service due to unsold hot meals. The correlations between demand of hot meals and other operating factors and external factors like locations and seasons are determined. Then, based on found correlation, the inflight service policy is established and turn hot meal service from loss to profit service while maintaining acceptable service to customer.

Key words: inflight service, data analytic, service levels

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

[1]International Graduate Program in Industrial Engineering Program, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok, 10900

INTRODUCTION

Low cost airlines impact civil aviation market by changing the pricing pattern in the industry (Forgas et al., 2010. The growth of low cost airlines depend on purchasing behavior driven by value for money rather than services. The low cost airlines position themselves as an affordable hotel service provider. Though lower service quality, the low cost airlines succeeded in attracting consumers on the principle of value for money. However, they found difficulties in retaining and building loyal customer base. In contrast, traditional full service airlines offered value through superior services, low cost airlines solely dependent on lower price schemes. Therefore, it is important to low cost airline to strike a balance between price and service in order to develop loyalty among its customers while making profit. An important part of increasing the revenue of low cost airline business is the inflight sales and accurate demand forecasting is a crucial part of low cost airline revenue management that aims to maximize revenue by matching demand to available service. Service levels play a key role in determining customers purchase decisions and, customers who differ in their valuation for product quality, may also differ in their sensitivities to service levels. This service level measures on an item level which share of the customer's demand can be fulfilled. This research

LITERATURE REVIEWS

While accurate forecasting of bookings is the key to the success of hotel revenue management, there have been only a few published papers on forecasting hotel booking arrivals. Many studies of hotel forecasting have their origins in airline revenue management.

Andrew (1990); Weatherford and Kimes (2003); Chen and Kachani (2007) provided a good review of forecasting problems in airline and hotel revenue management. Hotel forecasting methods fall into one of three types: time-series models, advance booking models, and combined models

Time-series models consider only the final number of rooms on a particular stay night Zakhary et al. (2008). Simple time-series models such as exponential smoothing, moving averages, and regression as well as more advanced models such as ARIMA in various forms are used for forecasting based on historical daily final demand.

METHODS AND DATA COLLECTIONS

1. Trend and Pattern Analysis

It is a part of time series analysis (data in sequence over time) by comparing among factors which considered to be related. The common uses of trend and pattern analysis are 1) detect general pattern of relationship between associated factors or variables using graph and quantitative measurements, and 2) project the future direction of event or recognize a pattern to predict the future

result. Most of analysis use techniques such as exponential smoothing, Holt's linear trend equation and Holt-Winter seasonal equation and linear correlation analysis etc.

In this research, we comparing unit selling of hot meal and other factors such as 1) Destination, 2) Flight time (Hours), 3) Flight schedule (Morning, Afternoon, Evening and Night) and 4) Number of Passengers. Then, line graph and statistical comparison among data points are used as tool to draw conclusion on trend and patter among these factors.

The followings are some example trend and pattern found from interaction among the four main factors.

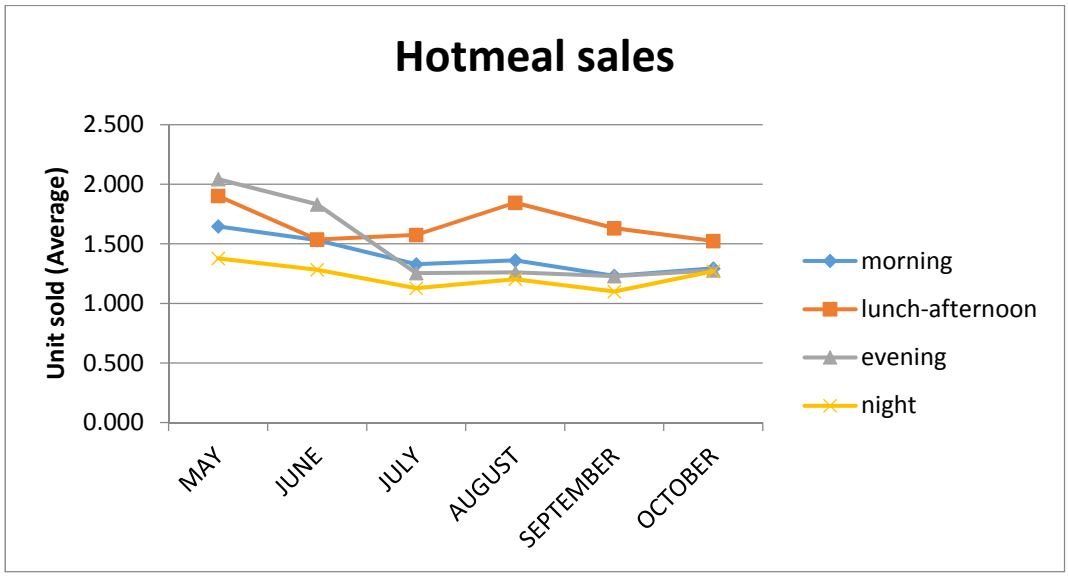


Figure 1 Hot meal sales among different schedule

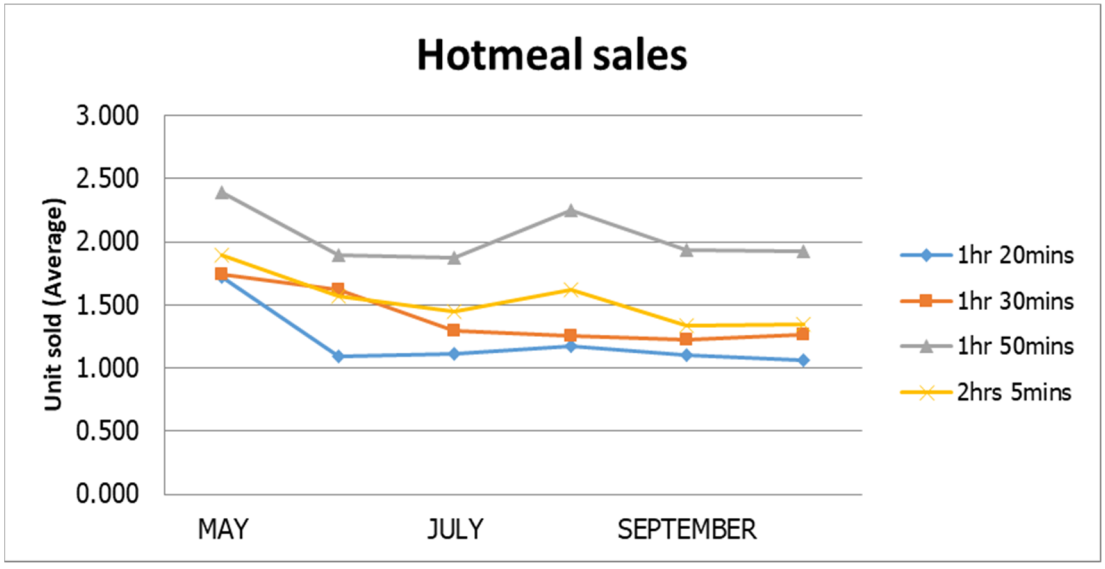


Figure 2 Hot meal sales among different flight time

In Figure 1, we found that night flight has less hot meal sales than morning flight similar to longer flight time has tendency to sale more hot meal than shorter flight time as shown in Figure 2.

2. Business analytic

Business analytics (BA) refers to a process of continuous iterative exploration and investigation of past business performance to gain insight and drive business planning (Davenport, 2007). Business analytics focuses on developing new insights and understanding of performance based on statistical methods in particular the correlations among data. In this research, three insights are found:

1) Few customers purchase hot meal during the flight which operate at night time in comparison to other flight schedule.
2) Flight time is also impact the purchase behavior of passenger. The longer the flight time, the higher chance passenger will purchase hot meals.
3) The profit margin is less comparing to loss margin of the unsold hot meal. There for it is better to sale all or have only one or two hot meal left.

Based on this three insights, it is better to load a hot meal only for one time (morning flight) in order to cover all demand throughout the day. Since it will definitely cover morning and afternoon demand where peak demand of hot meal. But there are greater chance that there is no hot meal available for customer during evening flight or night flight. In order to test this logic, the simulations of hot meal sales are developed with different number of loading hot meals. Seven scenarios are explored based on variation from moving average sale of each flight.

RESULTS AND DISCUSSION

The following results show the different profit between existing operation if using moving average method (Traditional approach) to forecast demand and a new policy based on data analytic results. The new policy only loads hot meals one time per day (Morning flight) based on daily moving average demand minus one meal.

Table 1 Simulation of existing practice based on moving average forecasting

	Flight#1	Flight#2	Flight#3	Total
Order Cost	฿265,122	฿235,794	฿132,990	฿633,906
Total Revenue	฿281,850	฿184,800	฿201,150	฿667,800
Profit Net	฿16,728	-฿50,994	฿68,160	฿33,894

Table 2 Simulation of new policy based on moving average forecasting minus one & single loading

	Flight#1	Flight#2	Flight#3	total
Order Cost	฿129,168	฿71,760	฿45,864	฿246,792
Total Revenue	฿253,986	฿122,250	฿88,200	฿464,436
Profit Net	฿124,818	฿50,490	฿42,336	฿217,644

As a results, the new policy significantly outperform current practice by increasing profit from 33,894 to 217,644 baht or 642%. Although the results came out to be as beneficial as expected, there are still opportunities for further potential developments. There are also certain root causes and factors needs to be further analyzed and collect its results data. Last but not the least, the results of these statistical tools and the relationship between processes would alter according to the changes to the customer importance of customer satisfaction survey. Difference results require differ solutions. Applying the service level to optimize the order hot meal is effective. It can reduce the amount of waste hot meal and can also increase profits from the original order as well. Further more low cost airline should warning passenger to be ordered in advance in night time flight if passenger want to eat for make passenger satisfy.

REFERENCES

Andrew, W. P et. al., 1990. Forecasting Hotel Occupancy Rates with Time Series Models: An Empirical Analysis. *Hospitality Research Journal*, 2: 173–182

Chen, C. and Kachani, S. 2007 Forecasting and optimisation for hotel revenue management, *Journal Revenue Pricing Management*, 6: 163-175

Davenport, Thomas H., and Harris, Jeanne G. (2007). *Competing on analytics. Boston: Harvard Business School Press*

Forgas, A. et. al, 2010. Antecedents of airline passenger loyalty: Low-cost versus traditional airlines, *Journal of Air Transport Management*, 4: 229-233.

Weatherford, L R. and Kimes, S.E, 2003. A comparison of forecasting methods for hotel revenue management, *International Journal of Forecasting*, 3: 401-415

Zakhary, A. et. Al., 2008, A Comparative study of the pickup method and its variations using a simulated hotel reservation data, *ICGST-AIML Journal*, 8: 15-21

การศึกษาการเสื่อมสภาพของโครงสร้างสะพานชนิดคานคอนกรีตอัดแรง รูปตัวไอ จากปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่น โดย FReET-D

Study Degradation of Prestressed Concrete I-Girder Bridge in term of Carbonation by Using FReET-D

ศักดิพงศ์ สาครประสิทธิ์[1*] วิชัย กิจวัทวรเวทย์[2] และ Drahomir Novak[3]

Sakdipong Sakhonprasit[1*], Wichai Kijawatworawet[2] and Drahomir Novak[3]

บทคัดย่อ

สะพานชนิดคานคอนกรีตอัดแรง รูปตัวไอเป็นโครงสร้างสะพานที่มีจำนวนน้อย และเป็นที่นิยมมากในปัจจุบัน อีกทั้งยังมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น และ ถือว่าเป็นชนิดที่ใหม่ในประเทศไทย อีกทั้งสะพานตัวอย่างอยู่ในตำแหน่งที่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จำนวนมาก การเสื่อมสภาพจาก ปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่น เป็นปฏิกิริยาที่เป็นผลอันเนื่องจาก ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และความชื้นสัมพัทธ์ จากผลของงานวิจัยทำให้ทราบว่าตัวโครงสร้างสะพานตัวอย่าง และโครงสร้างสะพานชนิดคานคอนกรีตอัดแรง รูปตัวไอ ตามมาตรฐานกรมทางหลวง นั้นมีความสามารถทนต่อ ปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่นได้ ทั้งในสภาวะจริง และในสภาวะวิกฤติตามทฤษฎี ในเชิงของความลึกที่เกิดปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่น โดยค่าความลึกที่เกิดปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่น ที่เกิดในสภาวะวิกฤติสูงสุด คือ 64.337 มิลลิเมตร และค่าระยะหุ้มคอนกรีตของสะพานตัวอย่างคือ 75.00 มิลลิเมตรซึ่งสามารถทนต่อปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่นได้

ABSTRACT

I girder bridges have less than another type, but the trend of this type is increasing every day. The Prapatone bridge is on the main road it means this bridge always have high carbon dioxide contents. The Degradation of Carbonation is the effect from carbon dioxide contents and relative humidity. From this research found The Prapatone bridge and other I girder bridge in Department of Highways (Thailand) can protected The Carbonation effect in real situation and in critical situation by theory in term of Carbonation depth. The deepest carbonation in critical event is 64.337 millimeter and the covering of this bridge is 75.00 millimeter. The covering of bridge is safety for carbonation effect.

Keywords: I girder bridge, Degradation, Carbonation

*Corresponding author, e-mail address: Ssakdipong@gmail.com

[1]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ นครปฐม

[2] รองศาตราจารย์ อาจารย์ประจำภาควิภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ นครปฐม

[3]Professor Ph.D. Vice dean for Science and Research Head of Institute of Structure Mechanics, Faculty of Civil Engineering Brno University of Technology, Brno, Czech Republic.

คำนำ

สะพาน เป็นสิ่งก่อสร้างที่มีความสำคัญ ในการเดินทางในปัจจุบัน เพราะเป็นสิ่งก่อสร้างที่สร้างขึ้นเพื่อเดินทางสัญจรข้ามสิ่งกีดขวาง เช่น แม่น้ำ ภูเขา อาคารบ้านเรือน เป็นต้น สร้างขึ้นเพื่อเดินทางจากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่ง โดยการก่อสร้างและการออกแบบ จะรองรับน้ำหนักบรรทุกของ สิ่งที่จะข้ามหรือ ใช้เพื่อข้าม แต่ยังมีปัจจัยที่มีผลต่าง ๆด้วย เช่นความสวยงาม ความสูง เป็นต้น สะพานที่ถูกใช้งานเป็นระยะเวลานาน มักจะมีผลกระทบในตัวโครงสร้าง เช่นการเสื่อมสภาพของตัวโครงสร้างเอง หรือการลดลงของกำลังรับแรงของคอนกรีต การเกิดรอยแตกร้าวของตัวโครงสร้างอันเนื่องมาจากปัจจัยต่าง ๆ

จากการสำรวจ (สำนักก่อสร้างสะพานกรมทางหลวง,2561) ในปีที่ผ่านมาพบว่าสะพานแบบคานรูปตัวไอ เป็นสะพานที่มีอยู่น้อยมาก เพียง 4.41 % เท่านั้นหรือจำนวน 685 สะพานจากสะพานทั้งหมด 15,512 สะพาน (วิชัย กิจวัทวรเวทย์,2555) โครงสร้างของสะพานแบบคานรูปตัวไอ นั้นมีการวางโครงสร้างพื้นอยู่แผ่นเหล็ก เพื่อกระจายน้ำหนักลงบนคานที่เชื่อมต่อกับระบบเสาเพื่อถ่ายแรง อีกทั้งสะพานแบบคานรูปตัวไอ ส่วนใหญ่จะสร้างที่ความยาว 20 – 30 เมตร มีโครงสร้างพื้นสำเร็จรูปหนา 5 เซนติเมตรโดยประมาณ คานของตัวสะพานจะเป็นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป ซึ่งตามท้องตลาดจะมีทั้งแบบ ระบบดึงลวดก่อน และดึงลวดหลัง (มาตรฐานงานกรมทางหลวง) ให้คำอธิบายสะพานชนิดนี้ว่า เป็นสะพานที่มีโครงสร้างเป็นวัสดุผสม (Composite Structure) และจะเป็นสะพานช่วงเดี่ยว (Simple Span)

งานวิจัยชิ้นนี้จะพิจารณาถึงการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เข้าภายในสะพานชนิดคานคอนกรีตอัดแรง รูปตัวไอ โดยใช้โปรแกรม ลิขสิทธิ์ FReET-D หาความลึกที่เกิดปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่นในสะพานชนิดคานคอนกรีตอัดแรง รูปตัวไอ ในช่วงอายุการใช้งานที่พิจารณา (W.KIJAWATWORAWET,D.NOVÁK,Z.KERŠNER and B. TEPLÝ,1999) การเกิดปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่น นั้นเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญของการเสื่อมสภาพของโครงสร้าง เนื่องจากปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่น จะส่งผลกระทบต่อกำลังต้านทานของโครงสร้าง และความสามารถในการใช้งาน หรือกล่าวคือทำให้โครงสร้างสูญเสียความน่าเชื่อถือ (Reliability) ลงในทุก ๆช่วงเวลา โครงสร้างคอนกรีตในประเทศไทยส่วนมากโดยเฉพาะ ในพื้นที่กรุงเทพมหานครเนื่องจากมีปริมาณการจราจรที่มาก ดังนั้นจึงต้องทำการวิเคราะห์การเสื่อมสภาพเนื่องจากปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่น ด้วย

อุปกรณ์และวิธีการ

ข้อมูลรายละเอียดของสะพาน

สะพานที่นำมาเป็นตัวแทนในการวิจัยครั้งนี้คือ สะพานพระประโทณ จังหวัดนครปฐม ตั้งอยู่บนถนนเพชรเกษม ซึ่งเป็นถนนที่มีการจราจรหนาแน่นตลอดทั้งวัน มีปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูง และเป็นสะพานชนิด คานคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป สร้างเสร็จในปี พศ.2549 โดยมีขนาดตาม Figure 1และมีความยาวแต่ละช่วง 20 เมตร และมีภาพจากสถานที่จริงตาม Figure 2 โดยระยะหุ้มของคอนกรีต คือ 7.5 เซนติเมตรหรือ 75 มิลลิเมตร

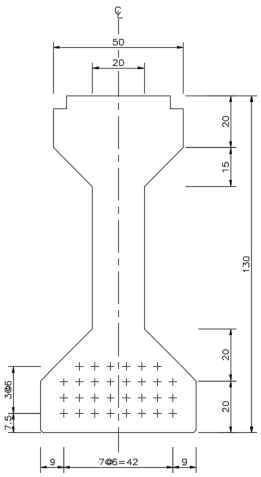


Figure 1 Dimention of bridge



Figure 2 Bridge in real situation

การเสื่อมสภาพเนื่องจากปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่น

(สำนักงานก่อสร้างและบูรณะสำนักโยธากรุงเทพมหานคร,2554) คาร์บอเนชั่น (Carbonation) เป็นปฏิกิริยาระหว่างก๊าซที่มีคุณสมบัติเป็นกรด (CO_2) เข้าไปทำปฏิกิริยากับซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว (Alkaline Cement Paste) โดยทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นหลัก ทำให้ได้แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) ดังสมการที่ (1)

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O \quad (1)$$

นอกจากนี้ยังอาจเกิดสารประกอบอื่น ๆ เช่น ไฮเดรตของซิลิกา ไฮเดรตของอลูมินา การเกิดคาร์บอเนชั่นโดยตัวของมันเองไม่ได้ทำให้คอนกรีตเสียหายแต่จะทำให้ความเป็นด่างของซีเมนต์เพสต์ลดลง โดยปกติซีเมนต์เพสต์มีความเป็นด่างสูงโดยมีค่า pH ระหว่าง 12.6 ถึง 13.5 และอาจลดลงเหลือเพียง 8 ถึง 9 ถ้าแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อยู่ในซีเมนต์ทำปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่นจนหมด ซึ่งหากมีอัตราการเกิดคาร์บอเนชั่นมากจะทำให้การเป็นด่างของคอนกรีตลดลงและทำให้ฟิล์มที่เคลือบอยู่ระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีต(Passivity Film) ถูกทำลายลง จึงอาจส่งผลให้เกิดสนิมของเหล็กเสริมในที่สุด โดยการตรวจสอบของสภาพโครงสร้างจริงด้วยการทดสอบคาร์บอเนชั่นสามารถทำ ได้โดยใช้วิธีของ RILEM โดยการใช้น้ำยาฟีนอฟทาลีน (Phenolphthalein) ในแอลกอฮอล์ฉีดลงบนผิวหน้าตัดคอนกรีตที่ต้องการวัดความลึกของคาร์บอเนชั่น โดยเจาะแท่งตัวอย่าง แล้วใช้สิ่วผ่าแท่งตัวอย่างออกเป็นสองซีก ต่อจากนั้นพ่นสเปรย์น้ำยาลงบนคอนกรีตส่วนที่ต้องการทราบ สารที่ทดสอบจะเปลี่ยนสีเป็นสีแดงเมื่อค่า pH ของคอนกรีตบริเวณนั้นสูงกว่า 10 หากไม่มีสีปรากฏขึ้นแสดงว่าค่า pH ต่ำกว่า 10

โปรแกรมลิขสิทธิ์ FReET-D

เป็นโปรแกรมที่ผลิต และพัฒนาโดยบริษัท Cervenka Consulting ในประเทศสาธารณะรัฐเช็ก (Červenka Consulting,2010) เป็นโปรแกรมที่สามารถทำซิมมูเลชั่นแบบ Latin Hypercube Sampling (LHS) กับค่าตัวแปรสุ่มที่ต้องการนำมาพิจารณาด้วยโดย มีฟังก์ชั่น ในการช่วยหาความลึกที่เกิดปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่นโดยมีตัวแปรสุ่ม ที่จำเป็นดังแสดงใน Table 1

Table 1 Shown the parameters in FReET-D Program

Parameter	Meaning	Value	Distribution
a	Concrete Covering (mm.)	75	Beta
t	Timeof exposure (year)	10-100 (10,20,,…,100)	Deterministic
C_CO2	Ambient CO_2 content (mg/m^3)	1,224	Normal
RH	Relative Humidity (%)	10-100(10,20,…,100)	Beta
c	Unit content of cement (kg/m^3)	313	Normal
w	Unit content of water (kg/m^3)	185	Normal
a_1	Unit content of aggr I	847	Normal
a_2	Unit content of aggr II	386	Normal
a_3	Unit content of aggr III	625	Normal
rho_c	Speacific Gravity of Cement	3,140	Normal
rho_a1	Speacific Gravity of aggr I	2,620	Normal
rho_a2	Speacific Gravity of aggr II	2,640	Normal
rho_a3	Speacific Gravity of aggr III	2,660	Normal

โดยโปรแกรมจะคำนวณหาความลึกที่เกิดปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่น (Červenka Consulting,2015) จากสมการที่ (2)

$$x_c = 0.35\text{rho\_c} \cdot \frac{\left(\frac{w}{c}-0.3\right)}{1+\frac{(\text{rho\_c})w}{1000c}} f(RH)\sqrt{(1+\frac{(\text{rho\_c})w}{1000c}+\frac{(\text{rho\_c})}{\text{rho\_a1}}\cdot\frac{a}{c})(\text{c\_co2})\frac{22.4}{44}10^6 t} \quad (2)$$

โดย x_c : ความลึกที่เกิดปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่น หน่วยเป็นมิลลิเมตร

t : ระยะเวลาที่พิจารณา หน่วยเป็นปี

มาตรฐานงานคอนกรีตเมื่อพิจารณาความคงทนและอายุการใช้งาน

(กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย, 2550) ความคงทนที่ดีของคอนกรีตคือ มีการออกแบบให้ตัวตอนดรีตและ เหล็กเสริม มีการซึมผ่านของสารที่เป็นอันตรายต่ำ โดยหากพิจารณาในหัวข้อของ คาร์บอเนชั่น คือความลึกของปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่น ของคอนดรีตมาตรฐานทดสอบโดยวิธีเร่ง (Standard Accelerated Test) ต้องมีค่าไม่ถึงตำแหน่งเหล็กเสริมชั้นนอกสุดก่อนอายุการใช้งานที่ปลอดการบำรุงรักษาที่ออกแบบไว้ ตัวอย่างสภาพแวดล้อมที่มีคาร์บอเนชั่น เช่น โครงสร้างในที่จอดรถ โครงสร้างริมถนนหรือใต้สะพานที่มีการจราจรหนาแน่นเป็นต้น โดยข้อกำหนดความลึกของปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่นที่ใช้ในการออกแบบ สามารถหาได้จาก สมการที่ (3)

$$C \geq \gamma_i \cdot X_c \quad (3)$$

โดยที่ γ_i : มีค่าเท่ากับ 1.0 สำหรับโครงสร้างที่ต้องการอายุการใช้งานที่ปลอดการบำรุงรักษาน้อยกว่า 15 ปี และมีค่าเท่ากับ 1.1 สำหรับโครงสร้างที่ต้องการอายุการใช้งานที่ปลอดการบำรุงรักษาตั้งแต่ 15 ปี ขึ้นไป

C : ระยะหุ้มเหล็กเสริมชั้นนอกสุด

ความลึกของปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่น วัดจากผิวที่เผชิญกับสภาพแวดล้อม ณ อายุคอนกรีตที่ออกแบบ (X_c) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4)

$$X_c = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k \cdot \sqrt{t_r} \quad (4)$$

โดยที่ α_1 : มีค่าเท่ากับ 1.0 สำหรับผิวคอนกรีตที่ไม่สัมผัสความเปียกชื้น และมีค่าเท่ากับ 0.95 สำหรับผิวคอนกรีตที่สัมผัสความเปียกชื้น

สัมประสิทธิ์ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอเนชั่น (α_2) สามารถกำหนดได้จาก Table 2

Table 2 Coefficient of intensity carbonation environment

Intensity carbonation environment	α_2
Normal environment	0.65
Medium risk of carbonation	0.85
High risk of carbonation	1.00

ที่มา : กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย, 2550.มยผ.1332-50 มาตรฐานงานคอนกรีต เมื่อพิจารณาความคงทนและอายุการใช้งาน

ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมคาร์บอเนชั่น สามารถกำหนดได้โดยใช้ figure 3 โดยขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยของบริเวณสถานที่ก่อสร้าง

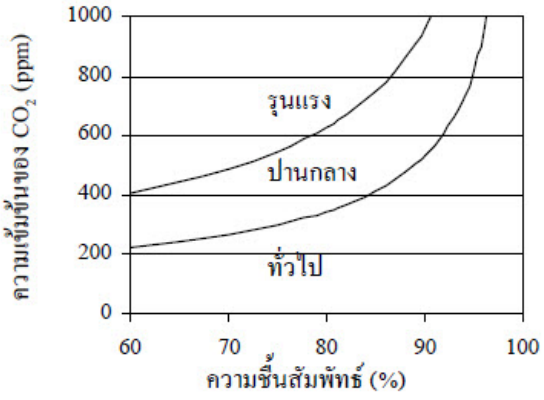


Figure 3 Shown the relative between carbon dioxide content and humidity

สัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอเนชั่น (k) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5) ดังต่อไปนี้

$$k = 17.5 \cdot k_r \cdot (w/b)^3 \quad (5)$$

ค่าสัมประสิทธิ์แสดงผลของการแทนที่เถ้าลอยในวัสดุประสาน สามารถกำหนดได้โดยใช้ Figure 4 (ชนิดของเถ้าลอย *2*ก และ *2*ข กำหนดตามมาตรฐาน มอก. 2135-2545 หรือ ว.ส.ท. 1014-46)

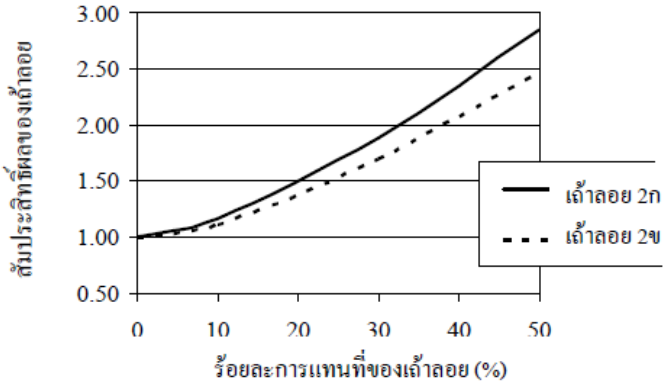


Figure 4 Shown coefficient of replacement fly ash in solder

วิธีการทำงานวิจัย

จากงานวิจัย (บัญญัติ วารินทร์ไหล,2561) ได้ทำการวัดปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งห่างจากสะพานตัวอย่าง ไปประมาณ 1 กิโลเมตร พบว่ามีความเข้มข้นอยู่ที่ 680 ppm หรือ 1224 mg/m^3 และมีความชื้นสัมพัทธ์ อยู่ที่ 55 % ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำค่าทั้งสองเป็นค่าตั้งต้น เพื่อทำข้อกำหนด โดยแบ่งเป็น 2 เงื่อนไข เงื่อนไขแรก กำหนดให้ ค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ มีการเปลี่ยนแปลง ดังนี้ คิดเป็นอัตราส่วน 0.2 ของค่าตั้งต้น และเพิ่มขึ้นทีละ 0.2 จนค่าเป็น 2 เท่าของค่าตั้งต้น อายุการใช้งานตั้งแต่ 10-100 ปีแบ่งคิดทีละ 10 ปี และ ให้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ มีค่าตั้งแต่ 10-100% แบ่งคิดทีละ 10% เงื่อนไขที่ 2 คือกำหนดให้ใช้ตัวแปรสุ่มตามค่าตั้งต้น เพื่อหาความลึกที่เกิดปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่นในสภาวะจริง รวมแบบจำลองทั้งสิ้น 101 แบบจำลองแต่ละแบบจำลอง กำหนดให้ทำ ซิมมูเลชั่น จำนวน 1,000 ซิมมูเลชั่น เพื่อให้ได้ค่าที่มีความน่าเชื่อถือ

ผลการทดลองและวิจารณ์

จากจำนวน แบบจำลองทั้งหมด เพื่อให้ง่ายต่อการเข้าใจ จึงเลือกแสดงแบบจำลองของค่าที่ได้จากแบบก่อสร้าง ในสภาวะจริง และช่วงวิกฤติตามทฤษฎีของแบบจำลอง หรือกล่าวคือ ค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเป็น 2 เท่าของสภาวะปกติ (สภาวะปกติ 1224 mg/m^3) อายุการใช้งาน 10-100 ปี ในค่าความชื้นสัมพัทธ์ตั้งแต่ 60-100% ดังแสดงใน Figure 5

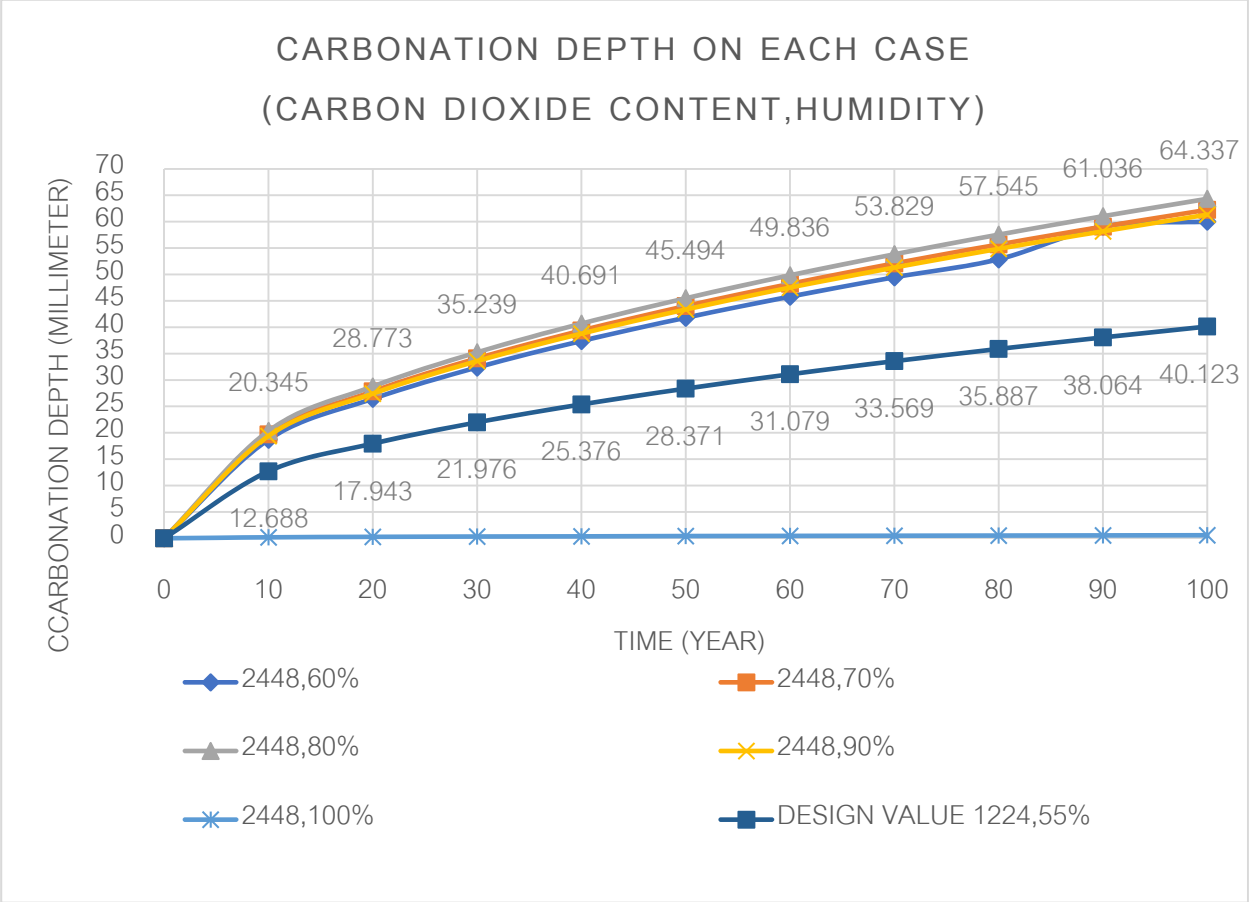


Figure 5 Shown Carbonation depth on carbon dioxide content 2448 mg/m^3, humidity 60 – 100% and the design value (carbon dioxide content 1224 mg/m^3)

สรุป

จากการวิจัยพบว่า ช่วงความชื้นสัมพัทธ์ที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่น มากที่สุดคือร้อยละ 80 ความลึกที่เกิดปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่น ที่มากที่สุด ในสภาวะที่วิกฤติตามทฤษฎีหรือ กล่าวคือความเข้มข้นเป็น2 เท่าของสภาวะปกติ ในช่วงอายุการใช้งาน 100 ปี คือระยะ 64.337 มิลลิเมตร และค่าความลึกที่เกิดปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่น ที่เกิดในสภาวะจริงสูงสุดคือ 40.123 มิลลิเมตร (Figure 5) ซึ่งมีระยะน้อยกว่าระยะหุ้มคอนกรีต 75.00 มิลลิเมตร ของ สะพานพระประโทณ ถือว่า สะพานพระประโทณ และ สะพานชนิด คานคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปตามมาตรฐานกรมทางหลวง สามารถทนต่อ การเสื่อมสภาพของปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่นได้เป็นอย่างดี

เนื่องจากงานวิจัยชิ้นนี้เป็นงานวิจัยขั้นต้น ดังนั้นข้อมูลที่ได้ อาจไม่ได้คำนึงถึงผลกระทบเนื่องจากปัจจัยอื่น การวิเคราะห์แต่ละแบบจำลองใช้เวลานาน จึงอาจมีการลดบางปัจจัยที่ส่งผล หากต้องการนำไปพัฒนา ต้องคำนึงถึงปัจจัยอื่น ๆ เพื่อทำการวิเคราะห์ให้ละเอียดมากขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่อง การเสื่อมสภาพของโครงสร้างสะพานชนิดคานคอนกรีตอัดแรง รูปตัวไอ อันเนื่องจากปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่น ฉบับนี้ได้เสร็จลุล่วงไปด้วยดีจึงขอขอบพระคุณ Brno University of Technology Faculty of Civil Engineering Institute of Structural Mechanics Czech Republic ที่อนุเคราะห์ สถานที่ในการทำการวิจัย ณ.ประเทศสาธารณะรัฐเช็ก และอุปกรณ์ในการทำงานวิจัย อีกทั้งขอขอบพระคุณกรมการทาง จังหวัดนครปฐมที่ได้อนุเคราะห์ข้อมูลในการทำงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย, 2550.**มยผ.1332-50 มาตรฐานงานคอนกรีต เมื่อพิจารณาความคงทนและอายุการใช้งาน**

บัญญัติ วารินทร์ไหล, 2561.**การเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตในสภาวะเร่งและสภาวะจริง**.วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปี ที่ 14 ฉบับที่ 1

วิชัย กิจวัทวรเวทย์, 2555.**การประเมินความสามารถรับน้ำหนักบรรทุกของสะพานประเภทคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอ**. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 17

สำนักงานก่อสร้างและบูรณะ สำนักโยธา กรุงเทพมหานคร, 2554.**โครงการจัดซ่อมและเสริมกำลังสะพานข้ามคลองในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานคร กลุ่ม 2**

สำนักก่อสร้างสะพานกรมทางหลวง, 2561.**ประเภทสะพาน**(http://bridge.doh.go.th/bmms/)

B. Teplý, 2012.**Probabilistic modelling of concrete structures degradation**

B. Teplý, 2014.**Asserting failure probability associated with degradation of concrete structures**

Červenka Consulting, 2010. **Multipurpose Probability Software for Statistical, Sensitivity and Reliability Analysis.**

Červenka Consulting, 2015.**FReET-D: Deterioration Module of the Multipurpose Probability Software for Statistical, Sensitivity and Reliability Analysis FReET.**

Drahomír Novák, 2014.**FReET: Software for the statistical and Reliability analysis of engineering. problems and FReET-D: Degradation module.** Advancces in Engineering Software 72(2014) 179-192.

W. KIJAWATWORAWET, D.NOVÁK, Z.KERŠNER and B. TEPLÝ, 1999.**Statistical Prediction of Carbonation Deterioration: Two-Case Studies in Thailand.** Building Research Journal Volume 47 1999.

An Initial Study on a Source of Curving Noise of a SkyTrain on a Small Curvature Circular Track with Non-Flange Curving

Nutthapat Kooncumchoo[1,2], Rachit Rugsasat[2], Niti Sujjawiso[2], Sittipong Promla[1] and Wichai Siwakosit[1*]

ABSTRACT

The running noise of a SkyTrain can be heard in the driver's cabin when running on a small curvature curve between two metro stations without a flange contact. This phenomenon has inspired this study to look into a source of this curving noise for the understanding of a probable root cause. A source of noise is identified by this study as corrugated rails. Corrugation wavelengths are predicted by a simplified model of L. Afferante and M. Ciavarella to be between 24.4 to 30.3 mm whereas a corrugation wave lengths from noise frequency recording are calculated to be between 27.8 to 37 mm.

Key words: Corrugation, Curving Noise

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

[1]Kasetsart University rail Engineering Center, Mechanical Engineering Department, Kasetsart University, Bangkok 10900

[2]Bangkok Mass Transit System Public Company Limited , Bangkok, 10900

INTRODUCTION

A sky train system is a relatively new mode of transportation in Bangkok. The first metro type sky train in Thailand is by Bangkok Mass Transit System Public Company Limited or "BTS SkyTrain" which has served Bangkok populations since December 1999 (BTS, 2018). All the length of the initial routes, which are Silom and Sukhumvit lines, are within the inner city and confined to large curvature circular tracks where the largest one being 0.01266 m^{-1} which is equal to the radius of only 79 m. All the smaller ones are not very small either and this condition has necessitated all BTS rolling stocks to be equipped with flange lubrication system due to the so-called on-flange contact curving (Siwakosit, 2018). The curve squeal noise on the routes are heard but that is an expected, easily understandable, and tolerable phenomenon right from the start of operation.



Figure 1 BTS Rolling Stocks (BTS, 2018)

BTS system has been expanded with extensions from both initial Silom and Sukhumvit lines since 2009 (BTS, 2018), which extend out of the city center and hence do not necessitate rolling stocks to negotiate large curvature curves. This, in effect, eliminates much of the squeal noise issue and allows the rolling stocks to keep up with small headway time by using higher operation speed in these portions. One particular portion of the extension, however, is particularly interesting due to the report from Train Controllers (TC). The running noise can be heard in the driver's cabin, but it is not consistent. On a hot and dry day, the noise can be heard rather noticeably, while on a rainy day, the noise cannot be heard at all. The curvature of this portion of the track is small which is only 0.0009834 m^{-1} (or 1016.9 m radius, a comparatively large radius curve) so that the curve squeal noise from flange contact (Siwakosit, 2018) is not a likely cause. This phenomenon has inspired this study to look into a source of this curving noise for the understanding of a probable root cause.

MATERIALS AND METHODS

1. Preambles

This study uses the following relevant information (Siwakosit 2018):

Maximum Axle Load = 16 tons

Maximum Operating Speed = 80 km/hr or 22.2 m/s

Maximum Acceleration and Deceleration = 1.1 m/s^2

Nominal Center of Gravity Height from Top of Rail = 2.0 m

Nominal Coefficient of Friction = 0.3

Wheel Profile = UIC S1002

Rail Profile = UIC 60

Track Gauge = Standard, 1.435 m

Nominal Contact Point to Contact Point Distance = 1.500 m

Nominal Wheel Diameter = 0.900 m

Nominal Flange Clearance = 9.00 mm

Maximum Curvature = 0.0009834 m^{-1}

Maximum Super Elevation = 50 mm

Wheel and Rail Modulus of Elasticity = 2 x 10^{11} N/m^2

Poisson's Ratio = 0.25

2. Quasi-Static Performance Analysis

A quasi-static performance analysis is used as a first line of analysis to gain understanding of a situation according to a normal mode of operation during this portion of a track. First, the geometrical data of the track is in a form of a typical single circular track with 2 tangent and 2 spiral portion with track super elevation. First, the simplified velocity profile is generated with a simple accelerate-hold-decelerate nature along with the track distance. Then the resistance of a 4-car train is generated according to a velocity profile. The tractive effort is then estimated from the resistance and traction information of a train and weight transfer is then analyzed, and finally traction ratio is calculated along the track. The track plane acceleration (Andersson *et al*, 2014) for the quasi static analysis for weight transfer can be written as

$$a_y = \frac{v^2}{R} - g\frac{h_t}{2b_0} \quad (1)$$

where a_y = Track Plane Acceleration, m/s^2

$\frac{1}{R}$ = Track Curvature, m^{-1}

R = Track Radius, m

v = Vehicle Speed, m/s

g = Gravitational Acceleration, m/s^2

h_t = Track Super Elevation, m

b_0= Nominal Contact Point to Contact Point Half Distance, m

The weight transfer (Andersson *et al*, 2014) is calculated by

$$P_c = \frac{P_0}{b_0 g}(a_y h_{cg} + g\Delta y) \qquad (2)$$

where P_c = Weight Transfer, ton

P_0 = Half Axle Load, ton

h_{cg} = Nominal Center of Gravity Height from Top of Rail, m

Δy = Lateral Sway Distance of a Center of Gravity, m

Electric passenger train resistance (Profilidis, 1995) is estimated as

$$Re = g\left\{\left(1.3\sqrt{\frac{10}{2P_0}} + 0.01v\right)W + 0.0807v^2 + \frac{800}{R}\right\} \qquad (3)$$

where Re= Total Running Resistance, N

W= Total Train Weight, ton

Tractive force at each driving wheel is calculated by

$$Q_0 = \frac{1000Wa_x + Re}{n} \qquad (4)$$

where n = Number of Tractive Wheels of an Electric Passenger Train

a_x= Forward Acceleration of a Train, m/s^2

Finally, a traction ratio is calculated as

$$\tau = \frac{Q_0}{P_0 \pm P_c} \qquad (5)$$

where τ = Traction Ratio of Each Driving Wheel where “+” is used for higher rail traction and “-“ is used for lower rail traction

3. Rail Corrugation Analysis

Rail corrugation has been an extensive field of study for a long time. A short pitch corrugation with wave lengths between 30 and 80 mm has been considered to be a difficult to understand issue (Afferrante and Ciavarella, 2009). A noise frequency produced from a wheel running on a corrugated rail can be written as

$$f = \frac{v}{\lambda} \qquad (6)$$

where f = Noise Frequency, Hz

λ = Corrugation Wave Length, m

v = Vehicle Speed, m/s

A model to predict a likelihood to initial a rail corrugation has been proposed by L. Afferante and M. Ciavarella (Afferrante and Ciavarella, 2009) by using a simple analytical contact mechanics model based on a perturbation of Carter's solution. They proposed that the dissipation of a frictional energy, W_1 ,between wheel and rail depends on a wave length, a forward speed, and a traction ratio, whereas the maximum likelihood for the initiation of a corrugation will occur when, at each value of a dissipation,

$$\frac{d\lambda}{dv} = \infty \qquad (7)$$

Due to space limitations the details of a model have to be omitted, but can be found in a cited paper (Afferrante and Ciavarella, 2009). The results are calculated with relevant information mentioned earlier in this paper.

4. Noise Recording

A simple "Zoom H1" recording device is used to identify noise frequency along with its generic software.

RESULTS AND DISCUSSION

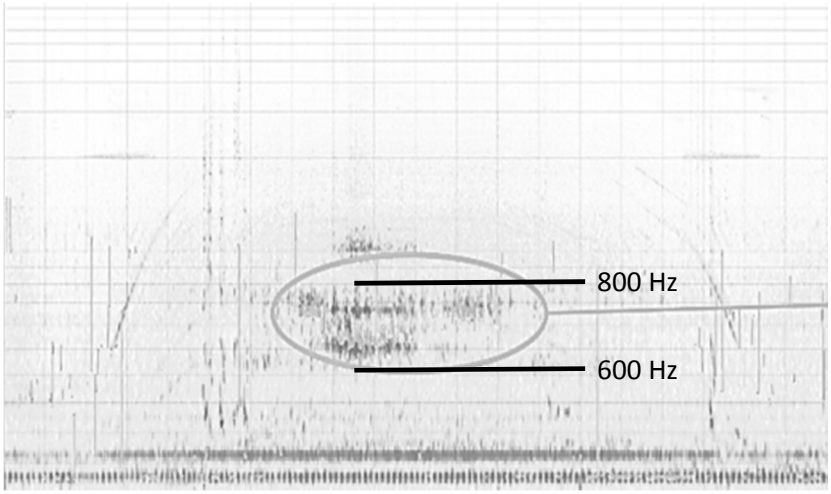


Figure 2 Noise Frequency Range

In figure 2, a recorded curving noise has been recorded from a train running at the location which occurs at around 35 to 60 seconds from the start of the train. This is approximately at 280 m from the station and end at around 550 m from the station. From equation 6, the corrugation wave length on the rail can be estimated as 27.8 mm to 37 mm. The noise intensity is audible but not very loud. Track curvature and track super elevation information versus track distance, and running speed profile and acceleration are shown in figure 3.

From equations 1 to 4, track plane acceleration, tractive force at each wheel, and wheel load on higher and lower rails can be estimated as in figure 4.

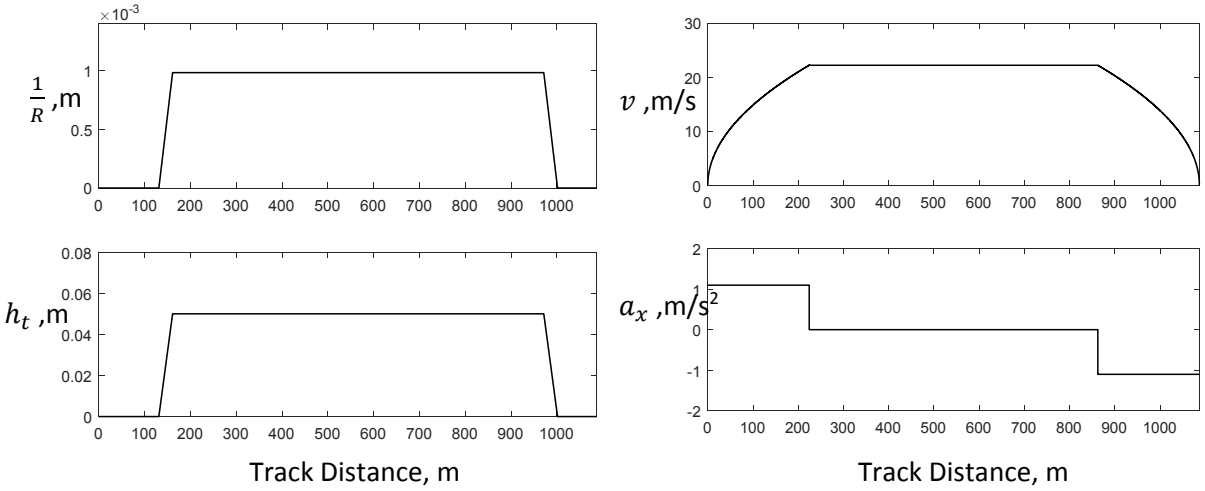


Figure 3 Track Curvature, Track Super Elevation, Speed Profile, and Acceleration Profile

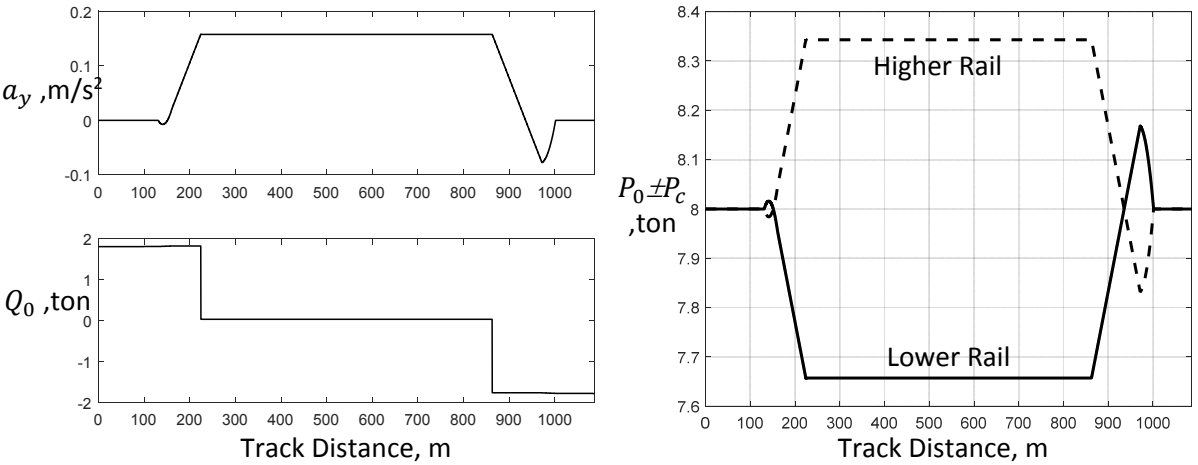


Figure 4 Track Plane Acceleration, Tractive Force at Each Wheel, and Wheel Load

From figure 4, it can be seen that the traction ratio as in equation 5 will be in the order of 0.765 and -0.765 from a quasi-static estimation. In reality, due to lower wheel load on the lower rail, it is likely that a corrugation may occur more easily on the lower rail on this curve. Furthermore, a traction ratio of 0.95 may happen when a train is accelerating to catch up with a designated speed profile from a signaling system. Therefore, a contour plot of frictional energy dissipation contour according to L. Afferante and M. Ciavarella can be shown in case of 0.95 traction ratio and in case of 0.05 traction ratio in figure 5. At 22.2 m/s, maximum likelihood of corrugation wave lengths according to equation 6 are predicted to be 24.4 mm to 30.3 mm for 0.05 and 0.95 traction ratio respectively.

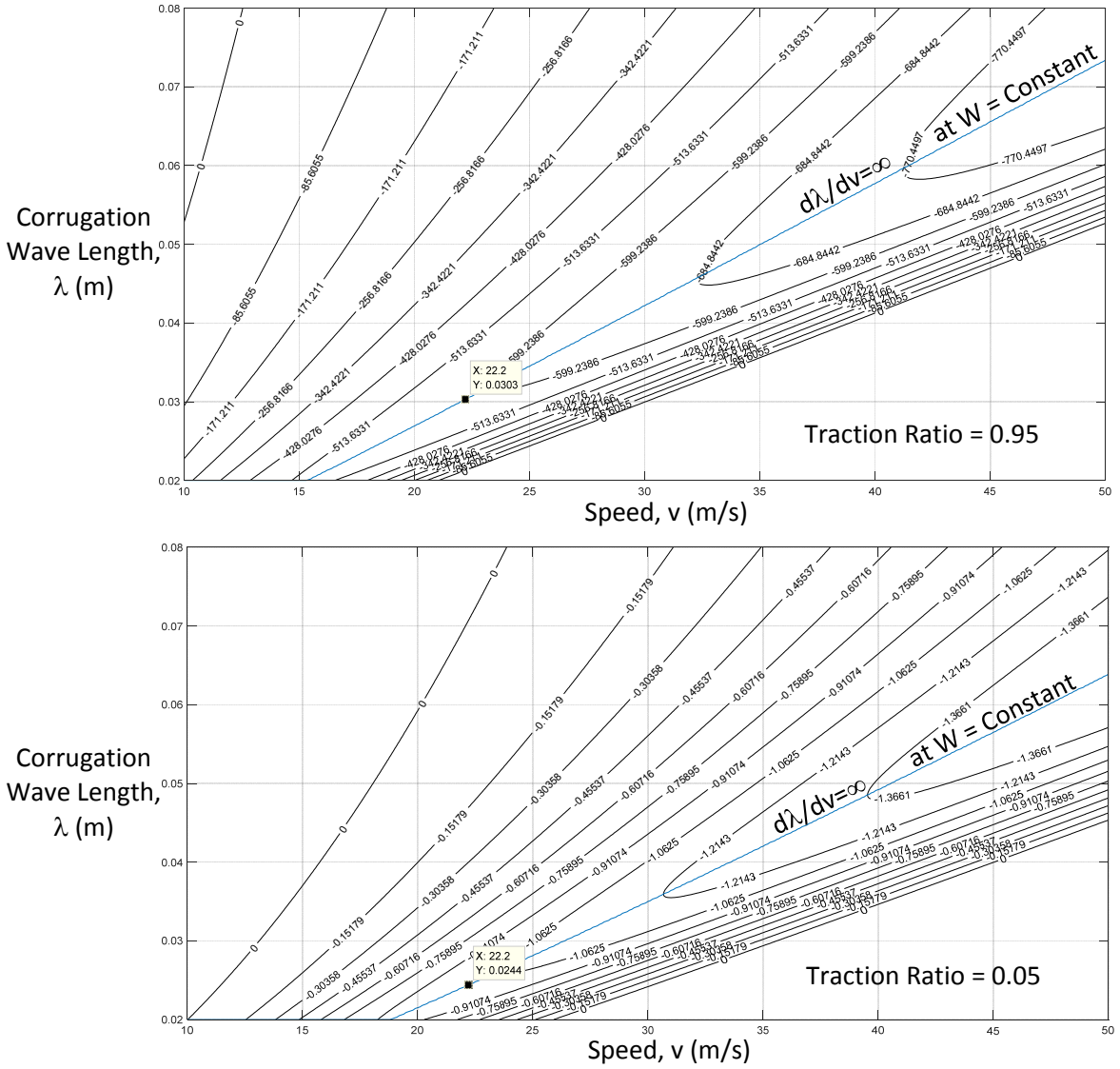


Figure 5 Frictional Energy Dissipation Contour Plots

CONCLUSIONS

Corrugation wavelengths are predicted by a simplified model of L. Afferante and M. Ciavarella to be between 24.4 to 30.3 mm. whereas corrugation wave lengths from noise frequency recording are calculated to be between 27.8 to 37 mm. A source of noise is therefore identified as a corrugated rail and prevention of noise can be focused on the aspect of rail maintenance and traction control system of a train. A maintenance of rail should be done in accordance with the increase of noise level.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to express their appreciation to BTS and Kasetsart University Rail Engineering Center for the initiation of this study.

REFERENCES

BTS Group, 2018. www.btsgroup.co.th/en/about/our-history

Siwakosit W. 2018. **Lecture Note for 01200432 Rolling Stock Technology Class**. Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok, Thailand.

Andersson E., Berg M., and Stichel S. 2014. **Rail Vehicle Dynamics**. KTH Railway Group, Stockholm, Sweden

Profilidis V.A., 1995. **Railway Engineering**. Avebury Technical, Cambridge, UK

Afferrante L. and Ciavarella M., 2009. Corrugation Models and the Roaring Rails Enigma: a Simple Analytical Contact Mechanics Model Based on a Perturbation of Carter's Solution, **J. of Mechanics of Materials and Structures**. Vol.4, No.2

การปรับปรุงคุณภาพถ่านชาร์จากทะลายปาล์มน้ำมันเปล่าด้วยกระบวนการทอรีแฟคชัน โดยใช้เศษพลาสติกพอลิพรอพิลีน

Upgrading of Char from Torrefaction of Oil Palm Empty Fruit Bunch by Waste Polypropylene

จินต์จุฑานันท์ ฐิตินันท์เมือง[1] เกวลี จอร์โอ[1] และ อภิญญา ดวงจันทร์[1*]

Jinjutanun Thitinunmuang[1], Kawalee Kyawoo[1] and Apinya Duangchan[1*]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพถ่านชาร์จากการทอริแฟคชันทะลายปาล์มน้ำมันเปล่าโดยใช้ขยะพลาสติกพอลิพรอพิลีน ซึ่งมีเป็นจำนวนมากและเป็นแหล่งพลังงานที่มีค่า โดยทำการทอริแฟคชันทะลายปาล์มน้ำมันเปล่าผสมเศษพลาสติกพอลีพรอพิลีนในอัตราส่วนชีวมวลต่อพลาสติก 4:1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 260-350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อศึกษาคุณภาพของถ่านชาร์ที่ได้ในแง่ค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง และสภาวะที่เหมาะสมในการทอริแฟคชัน พบว่าการทำทอรีแฟคชันทะลายปาล์มน้ำมันเปล่าผสมกับเศษพลาสติกพอลิพรอพิลีน ได้ถ่านชาร์ที่มีค่าความร้อนสูงสุด 34.89 MJ/kg ที่ 300 องศาเซลเซียส และได้น้ำมันมีค่าความร้อนสูงสุด 38.47 MJ/kg ที่ 350 องศาเซลเซียส ส่วนการทอรีแฟคชันทะลายปาล์มน้ำมันเปล่าโดยไม่เติมพอลิพรอพิลีนที่ 300 องศาเซลเซียสนั้น ได้ถ่านชาร์ และน้ำมันที่มีค่าความร้อนสูงต่ำกว่าเมื่อเติมพอลิพรอพิลีนที่อุณหภูมิเดียวกัน พอลิพรอพิลีนนั้นเพิ่มค่าความร้อนสูงของถ่านชาร์ถึง 81.2 เปอร์เซ็นต์ และของน้ำมัน 53.3 เปอร์เซ็นต์

ABSTRACT

This research is interested in upgrading of bio-char from torrefaction of oil palm empty fruit bunch (PFB) by using polypropylene (PP) waste plastic which was abundant and valuable energy resources. PFB was mixed with PP at a weight ratio of 4:1 and torrefied at 260-350°C for 1 hour. The quality of the char was concentrated on the heating value (HHV) from combustion of the solid fuel. The results showed that chars from the mixture torrefied at 300°C had the highest HHV of 34.89 MJ/kg. The highest HHV of liquid oil (38.47 MJ/kg) was from torrefaction of the mixture at 350°C. Torrefaction of PFB without PP at 300°C produced char and oil with HHV lower than those from torrefaction with PP. Compared to torrefaction of pure PFB at 300°C, it shows that PP increases HHV of the char and oil up to 81.2 and 53.3%, respectively.

Key Words: torrefaction, oil palm, polypropylene, plastic, char

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

[1]ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

คำนำ

ในปัจจุบันสิ่งที่ทุกประเทศต้องใช้เพื่อแลกกับการได้พลังงานมาคือ ทรัพยากรธรรมชาติ และคุณภาพของสิ่งแวดล้อมที่แย่ลง ซึ่งในปัจจุบันทุกประเทศกำลังให้ความสำคัญในการหาแหล่งกำเนิดพลังงานที่ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งพลังงานสามารถแบ่งออกเป็นสองประเภทคือ พลังงานหมุนเวียน ได้แก่ พลังงานน้ำ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม และพลังงานชีวมวล เป็นต้น และพลังงานสิ้นเปลือง ได้แก่ น้ำมัน แก๊สธรรมชาติ และถ่านหิน ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานหลักที่มีใช้อยู่ และกำลังจะหมดไป (คมสันติ์, 2553) พลังงานเชื้อเพลิงจากฟอสซิลเกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ทำลายชั้นบรรยากาศและทำให้เกิดภาวะโลกร้อน ในการเจริญเติบโตของพืชนั้นใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในการเจริญเติบโต เมื่อนำพืชหรือชีวมวลไปเผาก็จะได้ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับที่พืชใช้ในการเจริญเติบโต ซึ่งหมายถึงมีการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับศูนย์ (He *et al*., 2018) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นจะถูกนำเข้าสู่ วัฏจักรคาร์บอนของพืช ซึ่งซัลเฟอร์และคลอรีนที่อยู่ในชีวมวลมีปริมาณต่ำทำให้ไม่เกิดฝนกรด ด้วยเหตุผลนี้เชื้อเพลิงจากชีวมวลจึงเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าพลังงานจากฟอสซิล ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมซึ่งมีผลผลิตทางการเกษตรมากมาย พบว่ามีการนำชีวมวลมาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าได้แก่ ชานอ้อย แกลบ ทะลายปาล์มน้ำมัน และกะลามะพร้าว เป็นต้น แต่ยังมีชีวมวลที่เหลือใช้อีกเป็นจำนวนมากที่ยังไม่ถูกนำมาใช้งาน การทำเกษตรกรรมมีวัสดุทางเกษตรเหลือทิ้งจำนวนมาก ปริมาณวัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้ไม่ได้ถูกใช้งานต่อและถูกกำจัดโดยการเผาทิ้ง

จากข้อมูลของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนพบว่ามีการนำชีวมวลมาใช้เป็น ฟืน มาเผาเพื่อให้พลังงานความร้อน และนำมาเผาแบบเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ เพื่อเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นแก๊สในระบบแก๊สซิฟิเคชัน ทำให้ชีวมวลต้องสูญเสียพลังงาน และมวลจำนวนมาก ส่งผลให้เกิดการใช้พลังงานที่ไม่คุ้มค่า และเมื่อนำชีวมวลไปใช้ในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า เป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อต้มน้ำ หรือการใช้ประโยชน์อื่น ๆ มีปัญหาอีกหลายประการที่ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเผาไหม้ต่ำและต้องใช้เงินลงทุนสูง ได้แก่แหล่งวัตถุดิบกระจายอยู่ในพื้นที่ต่างๆ ทำให้ต้องใช้ต้นทุนในการขนส่งที่สูง ขนาดของชีวมวล ถ้ามีขนาดใหญ่ทำให้ประสิทธิภาพในการเผาไหม้ต่ำและได้ค่าความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอ ความชื้นในชีวมวลมีปริมาณความชื้นสูงทำให้ประสิทธิภาพในการเผาไหม้ต่ำและระยะเวลาในการเก็บสั้นเพราะการย่อยสลายทางชีวภาพ อีกทั้งยังให้ค่าความหนาแน่นของพลังงานต่ำ ดังนั้นเมื่อมีการนำชีวมวลมาใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทนอย่างจริงจัง จึงต้องมีเทคโนโลยีที่ช่วยแก้ไขปัญหาเหล่านี้ ซึ่งกระบวนการหนึ่งที่ช่วยแก้ปัญหาเหล่านี้ เรียกว่า กระบวนการทอริแฟคชัน (พงษ์, 2554)

กระบวนการทอริแฟคชัน เป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 200 ถึง 300 องศาเซลเซียส ซึ่งงานวิจัยของ Poudel *et al*. (2018) พบว่าที่ 300 องศาเซลเซียสได้ถ่านมากที่สุด และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นจะได้ถ่านไม่ต่างจากเดิม ดำเนินการในสภาวะอากาศเฉื่อย โดยความร้อนจะทำให้เกิดการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และ ลิกนินบางส่วน ทำให้ชีวมวลมีสมบัติไม่ชอบน้ำ เปราะ มีค่าความร้อนและความหนาแน่นของพลังงานสูงขึ้น (ยังคงเหลือพลังงานภายในถึง 90 เปอร์เซ็นต์ และมวลเหลือ 70 เปอร์เซ็นต์) อัตราส่วนของออกซิเจนต่อคาร์บอน และ ไฮโดรเจนต่อคาร์บอน มีค่าน้อยลง ทำให้สมบัติของชีวมวลที่ผ่านการทอริไฟด์มีสมบัติใกล้เคียงกับถ่านหินบางชนิด และอยู่ตรงกลางระหว่างถ่านหินกับถ่าน ซึ่งสามารถนำมาเผาร่วมและใช้ทดแทนถ่านหินได้ ซึ่งอิทธิพลที่ส่งผลต่อสมบัติที่ถูกปรับปรุงของชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชัน ได้แก่ ความชื้นของชีวมวลเริ่มต้น ขนาด อุณหภูมิ เวลาในการทอรีแฟคชัน อัตราการไหลของไนโตรเจน

และอัตราการให้ความร้อนในกระบวนการ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดในการปรับปรุงสมบัติของชีวมวล จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องพิจารณาเงื่อนไขของอิทธิพลต่างๆ เหล่านี้ให้เหมาะสมกับชนิดของชีวมวล และผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นไปตามที่ต้องการ (Poudel *et al*., 2018) วัสดุชีวมวลเหลือใช้ที่เราสนใจคือทะลายปาล์มน้ำมันเปล่า ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมการแปรรูปปาล์มน้ำมัน ซึ่งมีมากในภาคใต้ของประเทศไทย อุตสาหกรรมจะเหลือทะลายปาล์มน้ำมันทิ้งจำนวนมาก ซึ่งทะลายปาล์มน้ำมันมีค่าความร้อนสูง 7.24 MJ/kg (พิชัย, 2550) จึงเหมาะแก่การนำมาเป็นเชื้อเพลิง และปริมาณขยะพลาสติกได้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วโดยเฉพาะอย่างยิ่งพลาสติกพอลีพรอพิลีนซึ่งเป็นขยะพลาสติกที่มีมาก (ศุลีพร, 2559)

ก่อนหน้านี้มีการวิจัยเกี่ยวกับการทำทอรีแฟคชัน เช่น Irawan *et al*. (2017) ศึกษาหาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมสำหรับการทำทอรีแฟคชันในชีวมวลแต่ละชนิดและงานวิจัยเกี่ยวกับการไพโรไลซิสร่วมของชีวมวลผสมพลาสติกของ Johansson *et al*. (2018) และ Zhang *et al*. (2014) โดยเน้นการปรับปรุงทั้งปริมาณและคุณภาพของน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสโดยใช้เศษพลาสติกจากแหล่งต่างๆ กัน ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิสค่อนข้างสูงคือ 400-650 องศาเซลเซียสซึ่งจะได้น้ำมันไพโรไลซิสปริมาณมาก คุณภาพดี แต่ถ่านที่ได้มีปริมาณน้อยลง การไพโรไลซิสเพื่อที่จะได้น้ำมันที่คุณภาพดี และปริมาณสูงนั้นใช้อุณหภูมิที่ค่อนข้างสูงกว่าการผลิตถ่านจากกระบวนการทอริแฟคชัน ซึ่งงานวิจัยส่วนใหญ่เน้นการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิง อย่างไรก็ดีเนื่องจากประเทศไทยมีเศษชีวมวลทะลายปาล์มเปล่าและขยะพลาสติกจำนวนมาก การทอริแฟคชันกระทำที่อุณหภูมิไม่สูงนัก (ต่ำกว่า 400 องศาเซลเซียส) จึงน่าจะเป็นวิธีหนึ่งที่เหมาะสมสำหรับชุมชนในประเทศ ในการเปลี่ยนชีวมวลเป็นรูปพลังงานจากเชื้อเพลิงแข็ง และยังไม่พบว่ามีการศึกษาการทอริแฟคชันของทะลายปาล์มเปล่าร่วมกับเศษพลาสติกพอลิพรอพิลีน

งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาการทอริแฟคชันทะลายปาล์มน้ำมันเปล่ากับเศษพลาสติกพอลีพรอพิลีน และได้กำหนดอัตราส่วนผสมระหว่างทะลายปาล์มน้ำมันเปล่าต่อเศษพลาสติกพอลีพรอพิลีนไว้ที่อัตราส่วน 4:1 โดยน้ำหนัก โดยทำการศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทอริแฟคชัน เพื่อให้ได้ถ่านชาร์และน้ำมันที่มีค่าพลังงานสูงสุด โดยในเบื้องต้นพิจารณาค่าความร้อนที่ได้ของถ่านชาร์และน้ำมันจากการทอรีแฟคชัน

วัตถุดิบ อุปกรณ์และวิธีการ

วัตถุดิบ

วัตถุดิบที่ใช้ได้แก่ ทะลายปาล์มน้ำมันเปล่า และพอลิพรอพิลีน นำทะลายปาล์มน้ำมันเปล่าไปตากแดดเป็นเวลา 36 ชั่วโมง จากนั้นนำไปสับให้ละเอียดเฉลี่ยเส้นละ 5 เซนติเมตร แล้วนำมาอบแห้งในเครื่องอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หรือจนกว่าจะแห้ง แล้วนำเข้าเครื่องบดย่อยแบบหยาบ แล้วต่อด้วยเครื่องบดย่อยแบบละเอียดให้มีขนาดเล็กลงเป็นผง ทะลายปาล์มมีองค์ประกอบของ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจน 41.28, 5.72, 1.12 และ 51.88% ตามลำดับ มีค่าความร้อนสูง 12.86 MJ/kg ส่วนการเตรียมพอลิพรอพิลีน นำหลอดพลาสติก (polypropylene) มาลดขนาดประมาณไม่เกิน 1 เซนติเมตร อัตราส่วนของทะลายปาล์มน้ำมันเปล่าต่อพลาสติกพอลิพรอพิลีนเท่ากับ 4:1 โดยน้ำหนัก

อุปกรณ์

ประกอบด้วยปฏิกรณ์แบบกึ่งกะมีถังปฏิกรณ์ทำด้วยสเตนเลส ขนาดประมาณ 700 มิลลิลิตร บรรจุชีวมวลเพื่อทำการทอรีแฟคชัน มีเตาขดลวดไฟฟ้าทำหน้าที่ให้ความร้อนแก่ปฏิกรณ์ เครื่องควบแน่นมีน้ำหล่อเย็น

อุณหภูมิประมาณ 12 องศาเซลเซียส ทำหน้าที่ควบแน่นสารระเหยง่ายที่สลายตัวออกจากปฏิกรณ์ซึ่งถูกพาออกมาด้วยแก๊สไนโตรเจน และภาชนะรองรับน้ำมันแช่ในอ่างน้ำแข็งใส่เกลือ ลักษณะดัง Figure 1

วิธีการทดลอง

การทอรีแฟคชัน

นำวัตถุดิบ 50 กรัม ประกอบด้วยทะลายปาล์มน้ำมันเปล่า 50 กรัม หรือทะลายปาล์มน้ำมันเปล่า 40 กรัม ผสมพอลิพรอพิลีน 10 กรัม ลงในปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง อัตราการไหลเริ่มต้นของแก๊สไนโตรเจนความเข้มข้น 99.99% ที่ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ให้ความร้อนปฏิกรณ์โดยตั้งค่าอุณหภูมิตามสภาวะที่ต้องการ ตั้งค่าอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้อง ปรับเพิ่มค่าอุณหภูมิครั้งละ 50 องศาเซลเซียส ใช้เวลาประมาณ 10-15 นาทีต่อการเพิ่มอุณหภูมิในแต่ละครั้ง จนกระทั่งถึงอุณหภูมิสุดท้ายของอุณหภูมิตามสภาวะที่ต้องการในการทดลองนั้นๆ แล้วคงอุณหภูมิไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นปิดเตาลดอุณหภูมิปฏิกรณ์ลงมาที่อุณหภูมิห้อง แก๊สและไอระเหยที่ได้จากกระบวนการทอรีแฟคชัน ถูกลดอุณหภูมิและควบแน่นในหน่วยควบแน่น (condenser unit) แก๊สที่ไม่ควบแน่นไหลออกไปในตู้ดูดควัน (hood) ผลิตภัณฑ์ของเหลวและของแข็ง (ถ่านชาร์) ที่ได้ นำมาชั่งน้ำหนักและวิเคราะห์ค่าความร้อนสูงต่อไป

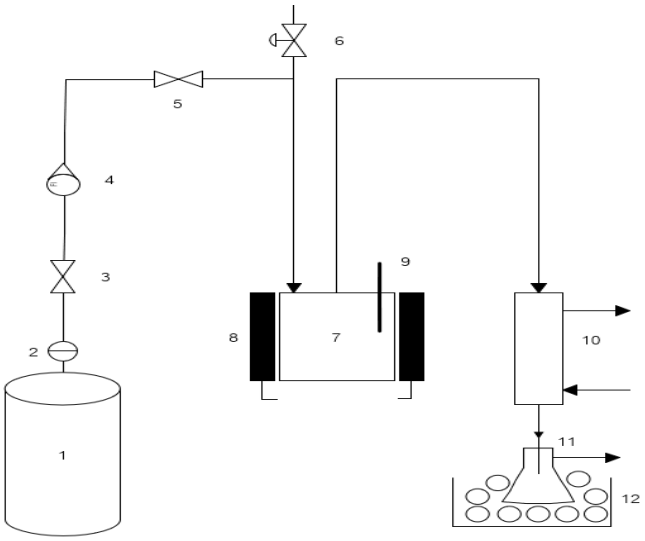


Figure 1 Torrefaction equipment

1. N_2 tank
2. regulator
3. check valve
4. rotameter
5. valve
6. pressure relief valve
7. reactor vessel
8. electric heater
9. thermocouple
10. condenser
11. flask
12. ice bath

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการทำทอรีแฟคชันทะลายปาล์มน้ำมันเปล่า

ผลการทำทอรีแฟคชันทะลายปาล์มน้ำมันเปล่าที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ Poudel *et al*. (2018) ได้รายงานว่าเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดในการทำทอริแฟคชันชีวมวลคือได้ผลได้ถ่านชาร์สูงสุดและค่าความร้อนสูงสูงสุด ในงานวิจัยนี้พบว่าได้ถ่านชาร์ และน้ำมัน bio-oil เฟสสารอินทรีย์ที่มีค่าความร้อนสูง

19.26 และ 23.41 MJ/kg ตามลำดับ โดยมีผลได้ถ่านชาร์อยู่ที่ 44.75 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ดังแสดงใน Table 1 น้ำมัน bio-oil นี้มีสองเฟสคือเฟสน้ำ 39.42 เปอร์เซ็นต์ และเฟสสารอินทรีย์ 14.20 เปอร์เซ็นต์

ผลของอุณหภูมิต่อการทำทอรีแฟคชันทะลายปาล์มน้ำมันเปล่าผสมพลาสติกพอลิพรอพิลีน

การทำทอริแฟคชันทะลายปาล์มน้ำมันเปล่าผสมพลาสติกพอลิพรอพิลีนที่อุณหภูมิ 260-350 องศาเซลเซียส แสดงผลดัง Table 1 พบว่าการทำทอรีแฟคชันทะลายปาล์มน้ำมันเปล่าและพอลิพรอพิลีนได้ถ่านชาร์มีค่าความร้อนสูงสุดที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส โดยที่อุณหภูมิ 260 300 และ 350 องศาเซลเซียส ได้ถ่านชาร์ที่มีค่าความร้อนสูง 32.88 34.89 และ 25.96 MJ/kg ตามลำดับ แต่น้ำมันที่ได้ที่ 350 องศาเซลเซียส มีค่าความร้อนสูงที่สุด โดยมีค่าความร้อนสูง 22.88 35.89 และ 38.47 MJ/kg ที่ 260 300 และ 350 องศาเซลเซียสตามลำดับ จะเห็นได้ว่าที่ 350 องศาเซลเซียส ถ่านชาร์มีค่าความร้อนสูงต่ำสุด และน้ำมันที่ได้มีค่าความร้อนสูงสูงที่สุด เนื่องจากที่ 350 องศาเซลเซียสชีวมวลมีการสลายตัวมากกว่าที่ 260 และ 300 องศาเซลเซียส กลายเป็นถ่านชาร์ น้ำมันและแก๊ส ทำให้สารที่มีค่าความร้อนสูงในชีวมวลไปอยู่ในน้ำมันเฟสสารอินทรีย์ส่วนใหญ่

Table 1 Torrefactions of oil palm empty fruit bunch (PFB) mixed with and without polypropylene (PP) at different temperatures.

Sample	Temperature (°C)	% Yield			High Heating Value (MJ/kg)		Note
		Char	Liquid		Char	Organic Phase	
			Organic phase	Aqueous phase			
PFB	300	44.75	14.20	39.42	19.26	23.41	Fine black powder
PP[a]	300	1.34	69.82	none	na	≈ 35.5	Ahmad *et al*. (2015)
PP[a]	350	1.56	67.74	none	na	≈ 35.5	Ahmad *et al*. (2015)
PFB:PP (4:1 by wt)	350	42.06	28.39	28.62	25.96	38.47	Fine black powder and char strips
	300	43.36	26.14	28.86	34.89	35.89	Fine black powder and more char strips than at 350°C
	260	54.32	13.03	29.65	32.88	22.88	Fine black powder and more char strips than at 300°C

a – from Ahmad *et al.* (2015) na – not available

การทอริแฟคชันที่อุณหภูมิสูงกว่า 300 องศาเซลเซียส ทำให้ถ่านชาร์มีค่าความร้อนสูงลดลง และน้ำมันเฟสสารอินทรีย์มีค่าความร้อนสูงขึ้น การผลิตน้ำมันไพโรไลซิสโดยทั่วไปทำการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิสูง ดังเช่นใน

งานวิจัยของ Johansson *et al*. (2018) และ Zhang *et al*. (2014) ที่ได้ศึกษาการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิสูงในช่วง 400-650 องศาเซลเซียส Ahmad *et al*. (2015) ได้ศึกษาการไพโรไลซิสพอลิพรอพิลีนในช่วงอุณหภูมิ 250-400 องศาเซลเซียส ซึ่งพบว่าพอลิพรอพิลีนเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ได้สูงสุด 98.66% ที่ 300 องศาเซลเซียส และได้ของเหลวสูงถึง 69.82% เมื่อพิจารณาปริมาณผลได้น้ำมัน และถ่านชาร์จากการทำทอริแฟคชันร่วมระหว่างทะลายปาล์มน้ำมันเปล่าและพอลิพรอพิลีนที่ 300 องศาเซลเซียส เทียบกับการทอริแฟคชันแต่ละวัตถุดิบเพียงอย่างเดียว เพื่อดูการเสริมปฏิกิริยา (synergy) พบว่าการทอริแฟคชันร่วมทำให้ได้ถ่านเพิ่มขึ้น 20.2 เปอร์เซ็นต์ และได้น้ำมันเพิ่ม 3.2 เปอร์เซ็นต์ ค่าความร้อนของน้ำมันยังเพิ่มขึ้นถึง 38.9 เปอร์เซ็นต์ นับว่าเป็นข้อดีของการทอริแฟคชันพลาสติกพอลิพรอพิลีนร่วมกับทะลายปาล์มน้ำมันเปล่า ที่นอกจากจะทำให้ได้ถ่านชาร์ที่มีคุณภาพดี มีค่าความร้อนสูงกว่าการทอริแฟคชันเฉพาะทะลายปาล์มน้ำมันเปล่า 81.2 เปอร์เซ็นต์แล้ว ยังเกิดการเสริมปฏิกิริยาได้ปริมาณถ่าน ปริมาณน้ำมัน และค่าความร้อนของน้ำมันเพิ่มขึ้นด้วย (ที่ 300 องศาเซลเซียส)

ถ่านชาร์ที่ได้มีลักษณะตามวัตถุดิบเริ่มต้น ดังนี้คือ ถ่านชาร์จากชีวมวลมีลักษณะเป็นผงละเอียด ส่วนถ่านที่ได้จากพลาสติกมีลักษณะเป็นเส้นๆ ตามลักษณะของหลอดเครื่องดื่มที่ถูกตัดเป็นท่อนสั้นๆ การทอริแฟคชันที่อุณหภูมิต่ำลงจะได้ผลได้ถ่านชาร์มากขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส จะเห็นถ่านชาร์เป็นเส้นมากกว่าที่ 350 องศาเซลเซียส และที่ 260 องศาเซลเซียสเห็นถ่านชาร์เป็นเส้น มากกว่าที่ 300 องศาเซลเซียส เช่นเดียวกัน

พลังงานความร้อนจากถ่านร่วมกับน้ำมัน

การคำนวณพลังงานความร้อนที่ได้จากน้ำมันร่วมกับถ่าน ดังแสดงใน Figure 2 จะทำให้ทราบว่าอุณหภูมิใดเหมาะสมที่สุดในการทอริแฟคชันเพื่อให้ได้พลังงานรวมสูงสุด โดยคิดพลังงานที่ได้จากการทอริแฟคชันวัตถุดิบ

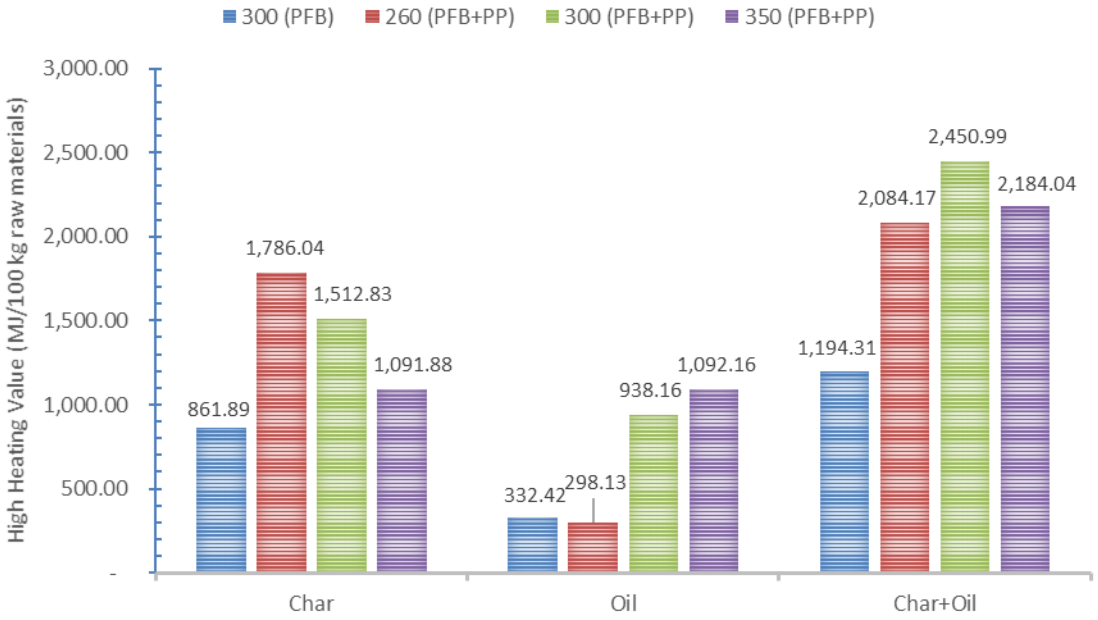


Figure 2 Energy from char and oil (organic phase) from torrefaction of palm empty fruit bunch (PFB) with and without polypropylene waste (PP) at a weight ratio of PFB to PP = 4:1

เริ่มต้น 100 กิโลกรัม ซึ่งผลการพิจารณาพลังงานที่ได้ของถ่านชาร์ร่วมกับน้ำมัน เรียงตามพลังงานที่ได้จากน้อยไปมาก ดังนี้ 300°C PFB (1,194.31 MJ) < 260°C PFB+PP (2,084.17 MJ) < 350°C PFB+PP (2,184.04 MJ) < 300°C PFB+PP (2,450.99 MJ) ดังนั้นอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส จึงเหมาะสมที่สุดในการทอริแฟคชันทะลายปาล์มน้ำมันเปล่าร่วมกับเศษพอลิพรอพิลีน

สรุป

พลาสติกพอลิพรอพิลีนสามารถปรับปรุงคุณภาพถ่านชาร์จากการทอริแฟคชันทะลายปาล์มน้ำมันเปล่าได้โดยสามารถเพิ่มค่าความร้อนสูง (high heating value) แก่ถ่านและน้ำมันที่ได้ โดยในการทดลองนี้เมื่อทำการทอรีแฟคชันพลาสติกชนิดพอลิพรอพิลีนกับทะลายปาล์มน้ำมันเปล่าที่ 260-350 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิในการทำทอริแฟคชันที่เหมาะสม คือที่ 300 องศาเซลเซียส เทียบกับการทอริแฟคชันทะลายปาล์มน้ำมันเปล่าที่ 300 องศาเซลเซียส พอลิพรอพิลีนสามารถปรับปรุงถ่านชาร์ทำให้ค่าความร้อนเพิ่มขึ้น 81.2 เปอร์เซ็นต์ และเกิดการเสริมปฏิกิริยา ผลได้ถ่านชาร์ และน้ำมันเพิ่มขึ้น และค่าความร้อนของน้ำมันสูงขึ้นอีกด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์สำหรับทุนสนับสนุนการทำวิจัย และขอขอบคุณ คุณยุพิน สุวรรณรัตน์ สำหรับทะลายปาล์มน้ำมันเปล่า

เอกสารอ้างอิง

คมสันต์ ศรีคงเพ็ชร. 2553. **พลังงานทดแทนพลังงานเพื่ออนาคตเศรษฐกรอาวุโสธนาคารแห่งประเทศไทย สำนักงานภาคตะวันออกฉียงเหนือ** (Online). http:/www.bot.or.th/Thai/Economic Conditions/Thai/Energy_Future.pdf., 26 ตุลาคม 2561.

พงษ์ ศิริจรุยนนท์. 2554. **การสำรวจชนิดและแหล่งชีวมวลประเทศไทยการนำเสนอศักยภาพของชีวมวลในประเทศไทย** (Online). http:/lib3.dss.go.th/Full text/Glass/Glass_Annual_Meeting_Handout /2011/Biomass_resources_survay_in_Thailand.pdf., 26 ตุลาคม 2561.

พิชัย ถิ่นสันติสุข. 2550. **กลุ่มอุตสาหกรรมพลังงานทดแทน สภาอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย** (Online). http://thewindustry.com/columnist/พิชัย%20ถิ่นสันติสุข(Pichai%20Tinsantisuk)/detail/% 7474s233., 26 ตุลาคม 2561.

ศุลีพร แสงกระจ่าง. 2559. **เอกสารวิชาการขยะพลาสติกภัยใกล้ตัว** (Online). http://library2.parliament. go.th/ejournal/content_af/2559/feb2559-7.pdf., 26 ตุลาคม 2561.

Ahmad, I., M.I. Khan, H. Khan, M. Ishaq, R. Tariq, K. Gul, and W. Ahmad. 2015. “Pyrolysis study of polypropylene and polyethylene into premium oil products.”, **International Journal of Green Energy** 12: 663-671.

He, C., C. Tang, C. Li, J. Yuan, K. Tran, Q. Bach, R. Qiu and Y. Yang. 2018. "Wet torrefaction of biomass for high quality solid fuel production." **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 91:259–271.

Irawan, A., L. Upe and M. Dwi. 2017. **Effect of torrefaction process on the coconut shell energy content for solid fuel.** Washington, D.C.: American Institute of Physics.

Johansson, A., L. Sandström, O. Öhrman and H. Jilveroc. 2018. "Co-pyrolysis of woody biomass and plastic waste in both analytical and pilot scale." **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis** 134: 102–113.

Poudel, P., S. Karki and S. Oh. 2018. "Valorization of waste wood as a solid fuel by torrefaction." **Energies** 11: 330-717.

Zhang, H., J. Nie, R. Xiao, B. Jin, C. Dong, and G. Xiao. 2014. "Catalytic co-pyrolysis of biomass and different plastics (polyethylene, polypropylene, and polystyrene) to improve hydrocarbon yield in a fluidized-bed reactor." **Energy Fuels** 28: 1940-1947.

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเก็บค่าธรรมเนียมการจราจรคับคั่ง ในเขตพื้นที่ธุรกิจของกรุงเทพมหานคร

Factors Influencing Congestion Charging in Bangkok Economic Area

ภาวิณี ทูลทิพย์[1*] เหมือนมาศ วิเชียรสินธุ์[1] และ วิโรจน์ รุโจปการ[1]

Pawinee Thunthip[1*], Muanmas Wichiensin[1] and Wiroj Rujopakarn[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีอิทธิพลต่อการเก็บค่าธรรมเนียมการจราจรคับคั่งในเขตพื้นที่ธุรกิจของกรุงเทพมหานคร กลุ่มตัวอย่างคือ กลุ่มผู้เดินทางซึ่งเป็นผู้ใช้รถยนต์ส่วนบุคคลที่มีอายุตั้งแต่ 22 ปีขึ้นไป เดินทางเข้ามาในพื้นที่เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร เพื่อทำงานเป็นประจำ โดยใช้แบบสอบถามจำนวน 300 ตัวอย่าง ซึ่งนำทฤษฎีพฤติกรรมตามแผน (The theory of planned behavior) และ Norm activation theory มาใช้ในการศึกษา จากนั้นทำการวิเคราะห์ปัจจัยเชิงสำรวจ พบว่าสามารถจัดกลุ่มปัจจัยได้ 7 ปัจจัย แล้วนำปัจจัยทั้งหมดมาทำการวิเคราะห์ปัจจัยเชิงยืนยัน พบว่า โมเดลมีความสอดคล้องกับข้อมูลอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ซึ่งประกอบด้วย 7 ปัจจัย คือ 1) ปัจจัยด้านบรรทัดฐานของบุคคล 2) ปัจจัยด้านการตระหนักถึงผลกระทบที่ตามมาจากการกระทำต่อบุคคลอื่น 3) ปัจจัยด้านการตระหนักถึงความรับผิดชอบในผลของการกระทำต่อบุคคลอื่น 4) ปัจจัยด้านทัศนคติที่มีต่อพฤติกรรม 5) ปัจจัยด้านการคล้อยตามกลุ่มอ้างอิง 6) ปัจจัยด้านการรับรู้ถึงการควบคุมพฤติกรรมของตนเองในการแสดงพฤติกรรมใดๆ และ 7) ปัจจัยด้านความตั้งใจแสดงพฤติกรรม

ABSTRACT

The objective of this research is to study factors influencing congestion charging in Bangkok Economic Area. The population in this study is the car owners more 22 year old who usually commute to work in Pathumwan, Bangkok.The samples used in study consisted of 300 people by questionnaire. This research uses the theory of planned behavior and Norm activation. The exploratory factor analysis found that were classified into 7 factors. Then, the all factors were used to analyze the result of confirmatory factor analysis showed that the model was statistically in adequate, namely 1) Personal Norm, 2) Awareness of Consequence, 3) Ascription of Responsibility, 4) Attitude, 5) Subjective Norm, 6) Perceived Behavioral Control, 7) Behavioral Intention.

Key Words: congestion charging, Bangkok Economic Area

*Corresponding author; e-mail address: PAWINEE9902@gmail.com

[1]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

คำนำ

ปัญหาการจราจรติดขัดในกรุงเทพฯ เป็นปัญหาที่สะสมมาอย่างยาวนาน และมีแนวโน้มจะรุนแรงมากขึ้นเรื่อยๆ เป็นผลอันเนื่องมาจากความต้องการในการเดินทางของประชาชนที่เพิ่มมากขึ้นและการเติบโตของเมืองอย่างรวดเร็ว ซึ่งทำให้มีการใช้ประโยชน์ที่ดินขยายตัวเพิ่มมากขึ้น และส่งผลกระทบในด้านต่างๆ เช่น การสูญเสียเวลาในการเดินทาง, การสิ้นเปลืองพลังงานจากเชื้อเพลิง, มลพิษทางอากาศและเสียง, ภาวะโลกร้อน, การเสียสุขภาพจิตของผู้ใช้รถใช้ถนน และก่อให้เกิดความเสียหายต่อประเทศในด้านเศรษฐกิจ สังคมและสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีอิทธิพลต่อการเก็บค่าธรรมเนียมการจราจรคับคั่งในเขตพื้นที่ธุรกิจของกรุงเทพมหานคร โดยการวิเคราะห์ความสัมพันธ์และอิทธิพลของปัจจัยต่างๆของผู้ใช้รถยนต์ส่วนบุคคล ซึ่งผลการวิจัยที่ได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นแนวทางการศึกษาต่อการแก้ไขปัญหาการจราจรติดขัดในอนาคต

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ธิษัณย์ พฤทธิพงษ์ (2547) ทำการศึกษาเรื่อง “การยอมรับของผู้เดินทางต่อมาตรการค่าใช้ถนนในกรุงเทพมหานคร” พบว่า ผู้เดินทางให้การยอมรับในมาตรการพอสมควร โดยกลุ่มผู้เดินทางด้วยระบบขนส่งสาธารณะจะมีการยอมรับมากกว่ากลุ่มอื่น นอกจากนั้น ผู้ใช้รถยนต์ส่วนบุคคลยังตั้งใจที่จะลดการใช้รถยนต์แล้วเปลี่ยนไปใช้ระบบขนส่งสาธารณะหรือใช้การจอดแล้วจรมากขึ้น

สุรเมศวร์ พิริยวัฒน์ (2553) ทำการศึกษาเรื่อง “อิทธิพลของมาตรการจัดการความต้องการเดินทางที่มีต่อความตั้งใจเปลี่ยนไปใช้รถไฟฟ้าขนส่งมวลชนของผู้ใช้รถยนต์ส่วนบุคคลในกรุงเทพมหานคร : กรณีศึกษามาตรการเชิงบังคับและมาตรการเชิงสนับสนุน” เป็นการนำเสนอกรณีศึกษาด้วยการตรวจสอบอิทธิพลที่แตกต่างกันของตัวแปรพฤติกรรมจากทฤษฎี The theory of planned behavior และ Norm-activation theory ผลการศึกษาแสดงให้เห็นผลกระทบของมาตรการเชิงบังคับโดยในกลุ่มตัวอย่างที่ได้รับข้อมูลการพัฒนาระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนควบคู่กับมาตรการเก็บค่าใช้ถนนมีผลลัพธ์ที่แสดงให้เห็นค่าอิทธิพลของตัวแปรที่ส่งผลต่อความตั้งใจที่จะเปลี่ยนไปใช้รถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่เพิ่มขึ้น

Cecilia Jakobsson และคณะ (1999) ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการยอมรับค่าธรรมเนียมการใช้ถนนโดยมีความสัมพันธ์ในการตั้งใจที่จะลดการใช้รถยนต์ในประเทศสวีเดนโดยใช้ทฤษฎี The theory of planned behavior และ Norm-activation theory ซึ่งมีผลลัพธ์การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการยอมรับค่าธรรมเนียมการใช้ถนน โดยมีความสัมพันธ์ในการตั้งใจที่จะลดการใช้รถยนต์กลายเป็นปัจจัยที่สำคัญน้อยกว่าปัจจัยความเป็นธรรมและการละเมิดสิทธิเสรีภาพ

Wenjun Zhang และคณะ (2016) ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความสัมพันธ์ระหว่างประชาชนในเรื่องการยอมรับค่าธรรมเนียมการใช้ถนนและการวัดประสิทธิผลของแต่ละปัจจัยในเมืองนานจิง ซึ่งมีผลลัพธ์ว่าไม่ประสบผลสำเร็จในเมืองนานจิง และปัจจัยทางสังคม, ทางจิตวิทยาและลักษณะระบบต่างมีความสำคัญทั้งหมด

วิธีดำเนินการวิจัย

การรวบรวมข้อมูล

ข้อมูลในการวิจัยรวบรวมจากกลุ่มผู้เดินทางซึ่งเป็นผู้ใช้รถยนต์ส่วนบุคคลที่มีอายุตั้งแต่ 22 ปีขึ้นไป เดินทางเข้ามาในพื้นที่เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร เพื่อทำงานเป็นประจำ (Home Base Work Trip, HBW) ผ่านแบบสอบถามจำนวน 300 ตัวอย่าง ซึ่งใช้วิธีการสำรวจข้อมูลแบบ Stated Preference (SP) และใช้ Likert scale แบ่งระดับความคิดเห็นเป็น 5 ระดับตั้งแต่ 1 (ไม่เห็นด้วยอย่างยิ่ง) ถึง 5 (เห็นด้วยอย่างยิ่ง) ซึ่งแบบสอบถามมีความตรงเชิงโครงสร้างและความเชื่อถือได้ (Cronbach's Alpha Coefficient) เท่ากับ 0.908

การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงสำรวจ (Exploratory Factor Analysis : EFA) ทำเพื่อจัดกลุ่มตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันให้อยู่ในกลุ่มเดียวกันโดยสกัดปัจจัยด้วยวิธีวิเคราะห์ปัจจัยหลัก (Principle Component Analysis) การหมุนแกนปัจจัยแบบมุมฉากด้วยวิธีแวริแมกซ์ (Varimax Method) และตั้งชื่อให้สอดคล้องกับปัจจัย

การวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยัน (Confirmatory Factor Analysis : CFA) ทำเพื่อตรวจสอบ ยืนยันความสอดคล้องผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงสำรวจตามทฤษฎีกับข้อมูลเชิงประจักษ์

ผลการศึกษา

การวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงสำรวจ

1. การทดสอบข้อมูล

ผลการทดสอบความเหมาะสมของกลุ่มตัวแปรพบว่าค่า Kaiser-Olkin Measure of Sampling Adequacy (KMO) เท่ากับ 0.826 และ Value Anti-image Matrices (MSA) มีค่าระหว่าง 0.690 - 0.916 โดยผลการทดสอบ Bartlett's Test of Sphericity พบว่าตัวแปรต่างๆมีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.000 ซึ่งค่าทั้งหมดผ่านเกณฑ์ที่กำหนดดังต่อไปนี้ตามลำดับ KMO > 0.80 MSA > 0.05 และ Sig < 0.05 สุภมาศและคณะ (2551) แสดงว่าตัวแปรชุดนี้มีความเหมาะสมที่จะนำมาวิเคราะห์ปัจจัย

2. การสกัดปัจจัย

การวิเคราะห์องค์ประกอบหลักโดยพิจารณาค่าความสัมพันธ์ร่วมกัน (Communality) คือค่าแสดงสัดส่วนของค่าแปรปรวนของตัวแปรที่สามารถอธิบายได้โดย Common Factor โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0 กับ 1 ถ้าตัวแปรใดมีค่านี้ต่ำตัวแปรนั้นจะถูกตัดออก สุวิมลและคณะ (2555) พบว่าค่าความสัมพันธ์ร่วมกันของตัวแปรทั้งหมด 30 ตัวแปรอยู่ระหว่าง 0.697 – 0.955 ซึ่งไม่มีตัวแปรใดๆถูกตัดออก

3. การหมุนแกนแบบมุมฉาก (Orthogonal Rotation)

การหมุนแกนวิเคราะห์องค์ประกอบแบบมุมฉากด้วยวิธีแวริแมกซ์โดยพิจารณาค่าน้ำหนัก (Loading) สามารถจัดเข้ากลุ่มปัจจัยได้ 7 ปัจจัยจำนวน 30 ตัวแปร ซึ่งมีค่าไอเกน (Eigenvalue) เกิน 1.00 และสามารถอธิบายความแปรปรวนได้ร้อยละ 77.231 ดังแสดงใน Table 1 และตั้งชื่อปัจจัยให้สอดคล้องกับตัวแปรตามบริบทดังแสดงใน Table 2

Table 1 Summary of exploratory factor analysis

Total Variance Explained						
Component	Initial Eigenvalues			Rotation Sums of Squared Loadings		
	Total	% of Variance	Cumulative %	Total	% of Variance	Cumulative %
1	9.033	30.109	30.109	3.973	13.244	13.244
2	3.975	13.249	43.358	3.957	13.189	26.433
3	3.230	10.766	54.124	3.682	12.272	38.705
4	2.556	8.520	62.643	3.125	10.417	49.122
5	1.714	5.712	68.356	2.865	9.551	58.673
6	1.500	4.999	73.354	2.701	9.004	67.677
7	1.163	3.876	77.231	2.491	8.303	75.981

การวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยัน

1. การทดสอบข้อมูล

การตรวจสอบความตรงเชิงโครงสร้าง (Construct Validity) ตามหลักการที่ Hair et al. (2010) ได้แนะนำไว้โดยมีค่าต่างๆที่ควรพิจารณาดังต่อไปนี้

ค่าเฉลี่ยความแปรปรวนที่ถูกสกัดได้ (Average Variance Extracted : AVE) คือค่าเฉลี่ยของ Communality ทั้งหมดในปัจจัย ซึ่งค่า AVE มีค่ามากกว่า 0.50 แสดงว่าเฉลี่ยแล้วปัจจัยแฝง (Latent Construct) อธิบายความแปรปรวนของตัวแปรวัด (Item) ได้มากกว่าความแปรปรวนความคลาดเคลื่อน (Error) ที่เหลืออยู่ในตัวแปรวัด (Item)

ความเชื่อมั่นได้ของปัจจัย (Construct Reliability : CR) เป็นดัชนีชี้วัดความเที่ยงตรงเชิงเหมือน (Indicator of Convergent Validity) ซึ่งค่า CR มีค่ามากกว่า 0.70 จะถือว่ามีความเชื่อมั่นดีและตัวแปรวัดทุกตัวเป็นตัวแทนของปัจจัยแฝงเดียวกันได้อย่างสอดคล้องดังแสดงใน Table 3

2. การวิเคราะห์ปัจจัยเชิงยืนยันของแบบจำลองทั้งหมดพร้อมกัน (Overall CFA Model)

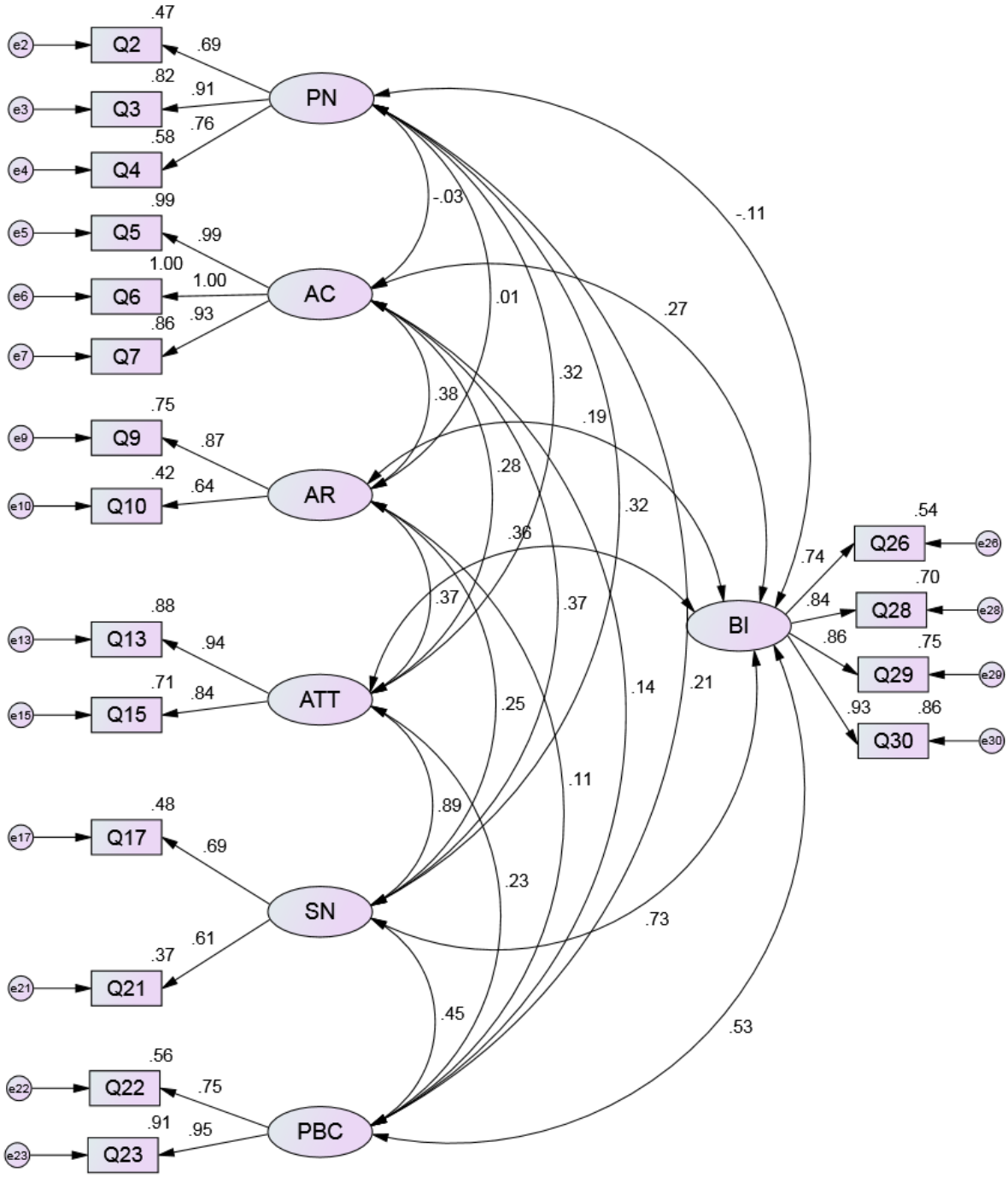
ให้ทุกปัจจัยเชื่อมกันด้วยลูกศรสองทิศทางซึ่งก็คือความแปรปรวนร่วม (Covariance) ระหว่างคู่ปัจจัยใดๆ โดยผลการวิเคราะห์ปัจจัยเชิงยืนยันทั้งหมดของแบบจำลอง (ก่อนลดจำนวนตัวแปร) แสดงในรูปแบบ Standardized พบว่าค่าดัชนีความสอดคล้องมีค่าไม่ดี จึงปรับปรุงแบบจำลองโดยการลดจำนวนตัวแปรซึ่งพิจารณาค่าน้ำหนักของตัวแปร (loading) และค่า Modification Indices (MI) จำนวน 30 ตัวแปร เหลือจำนวน 18 ตัวแปร และได้ผลการวิเคราะห์ปัจจัยเชิงยืนยันทั้งหมดของแบบจำลอง (หลังลดจำนวนตัวแปร) แสดงในรูปแบบ Standardized ได้แก่ χ^2/df = 3.324, p = 0.000, RMSEA = 0.088, SRMR = 0.063, GFI = 0.881, NFI = 0.918, TLI = 0.920, CFI = 0.941 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ดังแสดงใน Figure 1

Table 2 Factors influence on congestion charging in Bangkok Economic Area

Factor	Factor Interpretation	Variable Included in Factor	Loading
PN	Personal Norm	(Q1) Personal car is the most important factor on daily life.	0.787
		(Q2) You enjoy driving.	0.811
		(Q3) You prefer going to destination by car.	0.828
		(Q4) Driving yourself is more convenience than by other	0.813
AC	Awareness of Consequence	(Q5) Driving personal car is cause of noise pollution in Bangkok Economic Area.	0.950
		(Q6) Driving personal car is cause of traffic jam in Bangkok Economic Area.	0.952
		(Q7) Driving personal car is cause of economic problems in Bangkok Economic Area.	0.926
		(Q8) Driving personal car is cause of social problems in Bangkok Economic Area.	0.757
AR	Ascription of Responsibility	(Q9) Reducing car use will help you go to destination easily.	0.749
		(Q10) Reducing car use is more safety than using car Bangkok Economic Area.	0.752
		(Q11) Reducing car use improves the level of citizen well-being in this area.	0.737
		(Q12) Reducing car use will help people should respect traffic norms in Bangkok Economic Area.	0.706
ATT	Attitude	(Q13) Congestion charging reduce traffic congestion in Bangkok Economic Area.	0.885
		(Q14) Congestion charging noise pollution in Bangkok Economic Area.	0.819
		(Q15) Congestion charging save fuel.	0.872
		(Q16) Congestion charging will help you go to destination easily and quickly.	0.798
SN	Subjective Norm	(Q17) Your family agrees with congestion charging.	0.407
		(Q18) Your close friends agree with congestion charging.	0.385
		(Q19) Your family and close friends prefer to pay for congestion charging.	0.777
		(Q20) Your family and close friends agree to pay for congestion charging.	0.776
		(Q21) Most people prefer to pay for congestion charging.	0.626
PBC	Perceived Behavioral Control	(Q22) You prefer to pay for congestion charging voluntarily.	0.808
		(Q23) You will prefer to pay for congestion charging if you understand in objective well.	0.783
		(Q24) You will prefer to pay for congestion charging depend on your decision.	0.830
		(Q25) Congestion charging are not your problem.	0.811
BI	Behavioral Intention	(Q26) If you have to pay for congestion charging, you will ready to pay follow the rules.	0.856
		(Q27) If you have to pay for congestion charging, you will ready to not use personal car in this area on prohibited time.	0.830
		(Q28) If you have to pay for congestion charging, you will ready to go with others (Car Pool) in Bangkok Economic Area.	0.753
		(Q29) If you have to pay for congestion charging, you will ready to change to go by public transport.	0.759
		(Q30) If you have to pay for congestion charging, you will ready to drive your car less.	0.831

Table 3 Summary of construct validity

Factor	Factor Interpretation	Variable Included in Factor	Loading	AVE	CR
PN	Personal Norm	(Q1) Personal car is the most important factor on daily life.	0.670	0.578	0.845
		(Q2) You enjoy driving.	0.730		
		(Q3) You prefer going to destination by car.	0.830		
		(Q4) Driving yourself is more convenience than by other	0.800		
AC	Awareness of Consequence	(Q5) Driving personal car is cause of noise pollution in Bangkok Economic Area.	0.990	0.830	0.950
		(Q6) Driving personal car is cause of traffic jam in Bangkok Economic Area.	1.000		
		(Q7) Driving personal car is cause of economic problems in Bangkok Economic Area.	0.930		
		(Q8) Driving personal car is cause of social problems in Bangkok Economic Area.	0.690		
AR	Ascription of Responsibility	(Q9) Reducing car use will help you go to destination easily.	0.730	0.481	0.787
		(Q10) Reducing car use is more safety than using car Bangkok Economic Area.	0.640		
		(Q11) Reducing car use improves the level of citizen well-being in this area.	0.730		
		(Q12) Reducing car use will help people should respect traffic norms in Bangkok Economic Area.	0.670		
ATT	Attitude	(Q13) Congestion charging reduce traffic congestion in Bangkok Economic Area.	0.940	0.755	0.925
		(Q14) Congestion charging noise pollution in Bangkok Economic Area.	0.850		
		(Q15) Congestion charging save fuel.	0.860		
		(Q16) Congestion charging will help you go to destination easily and quickly.	0.820		
SN	Subjective Norm	(Q17) Your family agrees with congestion charging.	0.760	0.643	0.899
		(Q18) Your close friends agree with congestion charging.	0.730		
		(Q19) Your family and close friends prefer to pay for congestion charging.	0.900		
		(Q20) Your family and close friends agree to pay for congestion charging.	0.890		
		(Q21) Most people prefer to pay for congestion charging.	0.710		
PBC	Perceived Behavioral Control	(Q22) You prefer to pay for congestion charging voluntarily.	0.830	0.644	0.878
		(Q23) You will prefer to pay for congestion charging if you understand in objective well.	0.850		
		(Q24) You will prefer to pay for congestion charging depend on your decision.	0.690		
		(Q25) Congestion charging are not your problem.	0.830		
BI	Behavioral Intention	(Q26) If you have to pay for congestion charging, you will ready to pay follow the rules.	0.790	0.698	0.920
		(Q27) If you have to pay for congestion charging, you will ready to not use personal car in this area on prohibited time.	0.780		
		(Q28) If you have to pay for congestion charging, you will ready to go with others (Car Pool) in Bangkok Economic Area.	0.830		
		(Q29) If you have to pay for congestion charging, you will ready to change to go by public transport.	0.860		
		(Q30) If you have to pay for congestion charging, you will ready to drive your car less.	0.910		



χ^2 = 378.902, df = 114, χ^2/df = 3.324, p = 0.000, RMSEA = 0.088, SRMR = 0.063

GFI = 0.881, NFI = 0.918, TLI = 0.920, CFI = 0.941

Figure 1 Overall confirmatory factor analysis (standardized loadings)

สรุป

สรุปผลที่มีอิทธิพลต่อการเก็บค่าธรรมเนียมการจราจรคับคั่งในเขตพื้นที่ธุรกิจของกรุงเทพมหานคร โดยใช้แบบสอบถามจากกลุ่มผู้เดินทางซึ่งเป็นผู้ใช้รถยนต์ส่วนบุคคลที่มีอายุตั้งแต่ 22 ปีขึ้นไป เดินทางเข้ามาในพื้นที่เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร เพื่อทำงานเป็นประจำ จำนวน 300 ตัวอย่าง โดยผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงสำรวจโดยวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก และหมุนแกนแบบมุมฉากด้วยวิธีแวริแมกซ์สามารถจัดเข้ากลุ่มปัจจัยได้ 7 ปัจจัย จำนวน 30 ตัวแปร คือ ปัจจัยด้านบรรทัดฐานของบุคคล (Personal Norm, PN), ปัจจัยด้านการตระหนักถึงผลกระทบที่ตามมาจากการกระทำต่อบุคคลอื่น (Awareness of Consequence, AC), ปัจจัยด้านการตระหนักถึงความรับผิดชอบในผลของการกระทำต่อบุคคลอื่น (Ascription of Responsibility, AR), ปัจจัยด้านทัศนคติที่มีต่อพฤติกรรม (Attitude, ATT), ปัจจัยด้านการคล้อยตามกลุ่มอ้างอิง (Subjective Norm, SN), ปัจจัยด้านการรับรู้ถึงการควบคุมพฤติกรรมของตนเองในการแสดงพฤติกรรมใดๆ (Perceived Behavioral Control, PBC) และปัจจัยด้านความตั้งใจแสดงพฤติกรรม (Behavioral Intention, BI) ซึ่งสามารถอธิบายความแปรปรวนได้ร้อยละ 77.231 เมื่อนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยัน ทุกปัจจัยมีค่า AVE ใกล้เคียงและมากกว่า 0.50 ส่วนค่า CR มีค่ามากกว่า 0.70 แสดงให้เห็นว่ามีความตรงเชิงโครงสร้างที่ดี และผลการวิเคราะห์ปัจจัยเชิงยืนยันของแบบจำลองทั้งหมด (หลังลดจำนวนตัวแปร) เหลือจำนวน 18 ตัวแปร แสดงผลในรูปแบบ Standardized ได้แก่ χ^2/df = 3.324, p = 0.000, RMSEA = 0.088, SRMR = 0.063, GFI = 0.881, NFI = 0.918, TLI = 0.920, CFI = 0.941 ซึ่งถือว่ามีความสอดคล้องอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

เอกสารอ้างอิง

กัลยา วานิชย์บัญชา. 2556. **การวิเคราะห์สมการโครงสร้าง(SEM)ด้วย AMOS**. พิมพ์ครั้งที่ 1. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

สุภมาส อังศุโชติและคณะ. 2551. **สถิติวิเคราะห์สำหรับการวิจัยทางสังคมศาสตร์และพฤติกรรมศาสตร์ เทคนิคการใช้โปรแกรม** LISREL.เจริญดีมั่นคงการพิมพ์, กรุงเทพฯ.

สุรเมศวร์ พิริยวัฒน์.2553.อิทธิพลของมาตรการจัดการความต้องการเดินทางที่มีต่อความตั้งใจเปลี่ยนไปใช้รถไฟฟ้าขนส่งมวลชนของผู้ใช้รถยนต์ส่วนบุคคลในกรุงเทพมหานคร: กรณีศึกษามาตรการเชิงบังคับและมาตรการเชิงสนับสนุน.**วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา**21(3).

อภิญญาจันทรัตน์, สุธารินสถาปิตานนท์และวิโรจน์รุโจปการ. 2560. ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความสำเร็จในการก่อสร้างอาคารสูง, น. 609-614. ใน**การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่** 22, นครราชสีมา.

Cecilia Jakobsson, Satoshi Fujii and Satoshi Fujii.1999. Determinants of Car Users' Acceptance of Road Pricing. In **The conference "Urban Transport System"**.7-8 June 1999, Lund University, Sweden.

Diamantopoulos, A. and Siguaw, A.D. 2000.**Introducing LISREL. London**: Sage Publications.

Joseph F. Hair, al et. 2010. **Multivariate Data Analysis, A Global Perspective 7th edition: New Jersey**. Pearson Education.

การแพร่กระจายตัวของรอยแตกในพื้นสะพานคอนกรีตอัดแรงชนิดแผ่นพื้นตัน ด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้น

Crack Propagation in Prestressed Concrete Plank Girder Bridge by Using Nonlinear-Finite Element Analysis

ภูเบศ เลิศนันทกุล[1*] และ วิชัย กิจวัทวรเวทย์[2]

Pubeth Lertnantakul[1*] and Wichai Kijawatworawet[2]

บทคัดย่อ

บทความนี้ ได้ทำการศึกษาเรื่องการแพร่กระจายตัวของรอยแตกที่เกิดขึ้น ในสะพานคอนกรีตอัดแรงชนิดแผ่นพื้นตัน โดยใช้สะพานข้ามคลองพระมอพิสัย ณ ตำบลบางภาษี อำเภอบางเลน จังหวัดนครปฐม เป็นกรณีศึกษา โดยตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของโครงสร้างนั้นมีหลายตัวแปร แต่จะพิจารณาตัวแปรคุณสมบัติของคอนกรีตและลวดอัดแรง 5 ตัวแปรเท่านั้น ได้แก่ f_c', f_t, E_c, f_{ps}, E_{ps} โดยการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้น ซึ่งตัวแปรเหล่านี้เมื่อมีค่าที่เปลี่ยนแปลงไป จะส่งผลต่อการรับแรง การเกิดรอยแตก และการแอ่นตัวของโครงสร้าง โดยผู้วิจัยใช้โปรแกรม ATENA version 5.1.3 ในการดำเนินงานวิจัยนี้ เนื่องจากลักษณะเด่นของโปรแกรมที่สามารถจำลองโมเดลเสมือนจริง 2 มิติของโครงสร้างสะพานและยังสามารถทำการเพิ่มน้ำหนักที่กระทำเข้าไปทีละน้อยจนโครงสร้างเกิดการวิบัติได้ ทั้งนี้แรงกระทำที่พิจารณาจะเป็นลักษณะแรงสถิตยศาสตร์เท่านั้น ไม่รวมถึงแรงลม แรงแผ่นดินไหว ผลสรุปจากงานวิจัยนี้พบว่า ค่าตัวแปร f_{ps} เป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อการแพร่กระจายตัวของรอยแตกควบคู่กับการการแอ่นตัวของสะพานคอนกรีตอัดแรงชนิดแผ่นพื้นตันมากที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ

ABSTRACT

The article has studied of crack propagation in Prestressed Plank girder structure which Phra-mor-pi-sai bridge in Nakhon Pathom province for adapted in this case study. Considering the physical properties 5 variables of concrete and wire stand, such as f_c', f_t, E_c, f_{ps}, E_{ps} ,and this article has analyzed by Nonlinear – Finite Element Analysis. Therefore, variables were changed, there will be affected to bridge structure such as crack and displacement. The researcher used “ATENA” program version 5.1.3 in analyzing. This research only considered about the Static load. Summarily, the f_{ps} are main variables that affecting to crack propagation and displacement of Prestressed plank girder bridge significant.

Key words: prestressed concrete bridge, crack, number of cracks, finite element

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

[1]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ นครปฐม

[2]รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ นครปฐม

คำนำ

ในปัจจุบันสะพานเป็นสาธารณูปโภคที่สำคัญเป็นลำดับต้น ๆ ของระบบการคมนาคม โดยเป็นสิ่งที่เรียบง่ายและให้ความสะดวกสบายในการเดินทางมากขึ้น เช่น การข้ามแม่น้ำลำคลองต่าง ๆ หรือการใช้ในการข้ามผ่านถนนหรือแยกต่าง ๆ เป็นต้น (วิชัย, 2555) กล่าวว่า โครงสร้างสะพานคอนกรีตที่ถูกใช้งานมานานมักเสื่อมสภาพตามอายุการใช้งาน และสภาพ ที่มักพบบ่อย ได้แก่ การเกิดรอยแตกแยก คอนกรีตหลุดล่อนและการทรุดตัว เป็นต้น ซึ่งอาจเกิดจาก อุบัติเหตุ หรือเกิดจากการกัดกร่อนจากสารเคมีหรือจากสิ่งแวดล้อมตามธรรมชาติ ดังนั้นการตรวจสอบคุณสมบัติของคอนกรีตและเหล็กเสริม อายุการใช้งาน ความน่าเชื่อถือของสะพาน สามารถช่วยให้ผู้ใช้งานเกิดความปลอดภัยและมั่นใจในการเดินทางมากขึ้นด้วย ในปัจจุบันมีรูปแบบของสะพานมากมายหลายแบบและมีจำนวนมาก ดังนั้นการชำรุดเสียหายจึงมีจำนวนมากเช่นกัน ส่งผลให้สะพานเป็นอันตรายต่อผู้ใช้งาน ดังนั้นการตรวจสอบโครงสร้างสะพานจึงทำให้เกิดความน่าเชื่อถือของสะพานนั้น ๆ ได้

จากข้อมูลของ (กรมทางหลวง, 2561) พบว่าปัจจุบันในประเทศไทยมีสะพานมากกว่า 15,512 สะพาน ทั้งนี้มีสะพานคอนกรีตอัดแรงรูปแบบแผ่นพื้นตัน (Plank Girder) อยู่ทั้งสิ้นประมาณ 31.65 % ซึ่งมีมากเป็นอันดับที่ 2 รองลงมาจากสะพานชนิด Slab Type และในปัจจุบันก็มีแนวโน้มของการก่อสร้างสะพานชนิดนี้เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจากมีความเรียบง่ายในการก่อสร้างและยังสามารถสร้างได้รวดเร็วกว่าสะพานแบบหล่อในที่เนื่องจากเป็นแผ่นพื้นอัดแรงสำเร็จรูป ดังนั้นการวิจัยนี้จะพิจารณาที่สะพานชนิด Plank Girder นี้เป็นตัวแทนของสะพานที่ใช้ในงานวิจัย

(จิรายุส, 2559) กล่าวว่า จากงานวิจัยที่ได้ทำการวิเคราะห์รอยแตกของคานขวางของสะพานด้วยคุณสมบัติของคอยกรีตและเหล็กเสริม 4 ตัวแปร ได้แก่ f_c' , f_t , E_c , E_{ps} โดยทำการเพิ่มลดค่าตัวแปร 10% เทียบกับค่าเริ่มต้นที่ได้จากแบบก่อสร้าง พบว่า ตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อจำนวนรอยแตก ขนาดรอบแตก และการทรุดตัวมากที่สุด คือ f_c' และ f_t ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาในข้างต้นงานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์โครงสร้างของพื้นสะพานชนิด Plank Girder Bridge โดยแบบจำลองเสมือนจริงด้วยโปรแกรม ATENA version 5.1.3 ซึ่งเป็นโปรแกรมลิขสิทธิ์ของ Červenka Consulting จากประเทศสาธารณรัฐเช็ก โดยการวิเคราะห์ไฟไนท์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear - Finite Element) ด้วยตัวแปร f_c', f_t, E_c, f_{ps}, E_{ps} โดยทำการเพิ่มลดค่าให้ละเอียดขึ้น เพื่อหาจำนวนรอยแตก และการทรุดตัวที่เกิดขึ้นในโครงสร้างสะพาน ด้วยโปรแกรม ATENA 5.1.3 ทั้งนี้ผลการวิเคราะห์ที่ได้นั้นเป็นเพียงการเริ่มต้นเท่านั้น ยังสามารถนำไปต่อยอดหาค่าความน่าเชื่อถือและอายุการใช้งานของสะพานต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

รายละเอียดของสะพานที่นำมาวิเคราะห์

พื้นสะพานที่นำมาวิเคราะห์จะใช้แค่พื้นสะพานแผ่นเดียวเท่านั้น โดยมีความยาว 8 เมตร กว้าง 0.99 เมตร และมีความสูง 0.25 เมตร และมีคอนกรีตทับหน้าหนา 0.1 เมตร โดยหน้าตัดของพื้นสะพานและความยาวของคานแสดงใน Figure 1 และFigure 2 ตามลำดับ

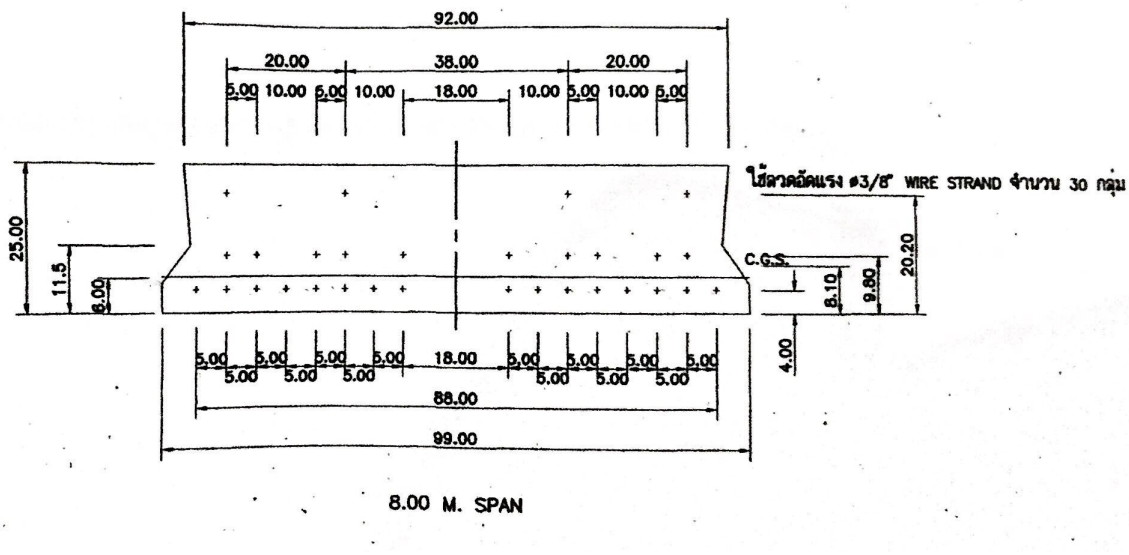


Figure 1 Cross-Section of Plank Girder

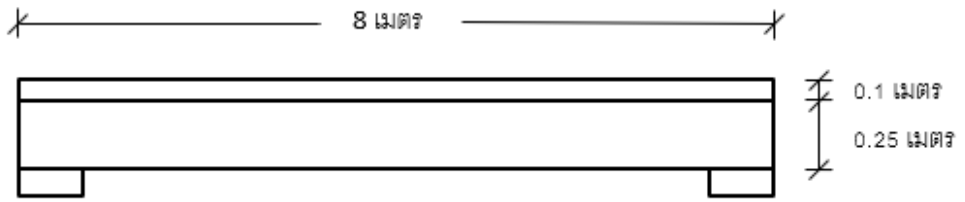


Figure 2 Span length of Plank Girder

กระบวนการเกิดรอยแตกและลักษณะการขยายตัวของรอยแตก

(Červenka Consulting, 2012) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตแสดงใน Figure 3 เป็นกราฟแสดงให้เห็นว่าวัสดุคอนกรีตนั้นจะมีพฤติกรรมบางช่วงที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear) ดังนั้นในการวิเคราะห์รอยแตกที่เป็นการวิเคราะห์ในรูปแบบ สถิติเชิงตัวเลข (Numerical Static Analysis) จึงจำเป็นต้องใช้วิธีการวิเคราะห์แบบไฟไนต์เอลิเมนต์สถิตยศาสตร์ แบบไม่เชิงเส้น (Static Nonlinear-Finite Element Analysis)

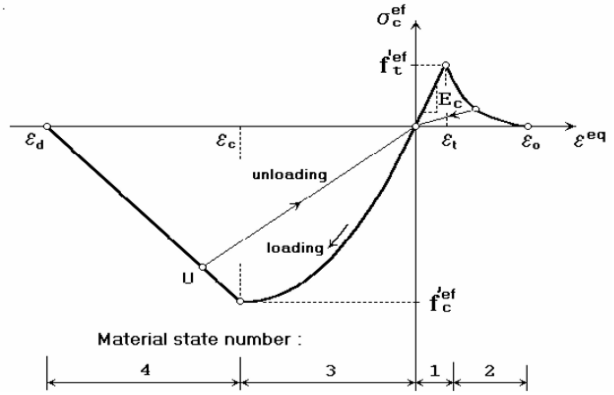


Figure 3 Stressed – Strain Curve

Reference: ATENA Program Documentation, Part 1 (2012)

(Červenka Consulting, 2012) การเกิดรอยแตกนั้นเป็นพฤติกรรมที่เป็นแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear) ของโครงสร้างวัสดุคอนกรีต โดยในการขยายตัวของรอยแตกนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วงคือ ช่วงแรก ช่วงที่ไม่เกิดรอยแตก (Uncrack zone) เนื่องจาก tensile strength ยังไม่ถึงจุดสูงสุด ช่วงที่สอง เป็นช่วงที่มีกระบวนการการขยายตัวของรอยแตกที่เกิดขึ้นบนผิวคอนกรีต (Process zone) อันเนื่องมาจาก tensile stress เกิดการลดลงอย่างต่อเนื่อง และช่วงที่สามเป็นช่วงที่เกิดและขยายตัวของรอยแตกเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง (Crack zone) แสดงใน Figure 4

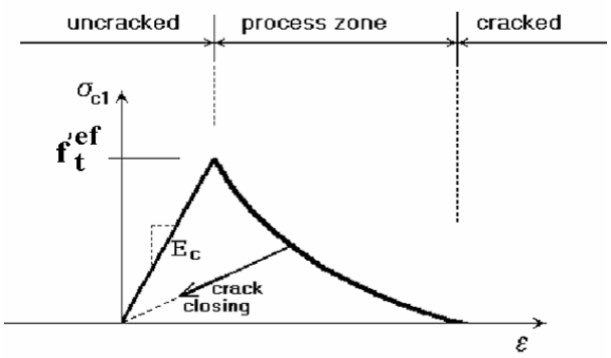


Figure 4 Stages of Crack

Reference: ATENA Program Documentation, Part 1 (2012)

การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์

ในการศึกษาได้ทำการวิเคราะห์สะพานด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรมที่ชื่อ ATENA version 5.1.3 โดยการสร้างแบบจำลองเสมือนจริง 2 มิติของโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงของสะพานชนิดแผ่นพื้นตันและใส่น้ำหนักกระทำจากรถบรรทุกซ้ำ ๆ เพิ่มขึ้นในจำนวนที่เท่า ๆ กัน เพื่อศึกษาพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงของลักษณะรอยแตก จำนวนรอยแตก ขนาดรอยแตกและการทรุดตัวของสะพาน เมื่อเทียบกับตัวแปรจากแบบก่อสร้างจริง โดยใช้ค่าคุณสมบัติต่างๆ ดัง Table 1 ตามแบบมาตรฐานของกรมทางหลวง โดยมีรูปแบบของการผสมผสานตัวแปรและมีการเพิ่มลดค่าของตัวแปรเทียบกับตัวแปรต้นแบบทีละ 2.5%, 5%, 7.5%, 10%, 12.5%, 15%, 17.5% และ 20% รวมทั้งสิ้น 160 โมเดล

Table 1 Properties of Concrete and Wire stand

Variables	Values	Unit	Symbol
Compressive strength of concrete (f_c')	350	ksc	A
Tensile strength of concrete (f_t)	32.93	ksc	B
Modulus of elasticity of concrete (E_c)	282,495.13	ksc	C
Tensile strength of wire stand (f_{ps})	17,584.1	ksc	D
Modulus of elasticity of wire stand (E_{ps})	1,970,000	ksc	E

Reference: แบบก่อสร้างสะพานข้ามคลองพระมอพิมัย กรมทางหลวงชนบทจังหวัดนครปฐม

โดย
$$f_t = 1.76\sqrt{f_c'} \quad (1)$$
$$E_c = 15200\sqrt{f_c'} \quad (2)$$

Reference: การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน (สาโรจน์, 2559)

เมื่อ

f_c' คือ กำลังอัดสูงสุดของคอนกรีต มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

f_t คือ กำลังแรงดึงของคอนกรีต มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

E_c คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

การสร้างแบบจำลองสองมิติและการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ATENA 2D version 5.1.3

เริ่มต้นจากการ plot จุดตามแบบของสะพานที่กำหนดลงใน AutoCAD และลากเส้นเชื่อมตามที่กำหนด จากนั้น Import สู่โปรแกรม ATENA version 5.1.3 ทำการใส่ Element ลงไปในแบบจำลองจำนวน 38 Elements จากนั้นใส่ข้อมูลคุณสมบัติคอนกรีตและเหล็กเสริม ใส่ Supports และเหล็กเสริมลงในแบบจำลอง และใส่น้ำหนักบรรทุก ณ ตำแหน่งที่ทำให้เกิดโมเมนต์สูงสุดบนสะพานโดยพิจารณาจาก Influence line จากนั้นใส่ Load Step กับแบบจำลอง โดยหลักการของ Load Step นั้นจะทำการแบ่งน้ำหนัก 25 ตันออกเป็นช่วง ๆ โดยแบ่ง 1 Load step มีน้ำหนักของล้อหน้าเท่ากับ 0.2 ตันและล้อหลังแบ่งเป็น 0.4 ตัน 2 ล้อ รวมเท่ากับน้ำหนัก 1 ตัน หรือกล่าวคือ 25 Load steps มีค่าเป็นน้ำหนักรถบรรทุก 10 ล้อตามมาตรฐานกรมทางหลวงที่พิจารณา 1 คันดัง Figure 5 โดยทำการวิเคราะห์จนกว่าตัวโครงสร้างจะเกิดการวิบัติ ทำการใส่จุดพิจารณา (Monitoring point) ในแบบจำลอง เพื่อให้โปรแกรมแสดงค่า ณ ตำแหน่งนั้น ๆ ออกมา โดยทำการใส่ที่ตำแหน่ง Supports ตำแหน่งใต้โหลดเพื่อให้แสดงค่าน้ำหนักรถบรรทุก ณ ช่วงเวลาต่าง ๆ และตำแหน่งกึ่งกลางสะพานเพื่อดูค่าการแอ่นตัวของสะพาน เมื่อใส่ทุกอย่างดัง Figure 6 แล้วจากนั้นเริ่มทำการวิเคราะห์ข้อมูลการแอ่นตัวและรอยแตกที่เกิดขึ้นในสะพาน โดยพิจารณา ณ ตำแหน่งวิกฤติออกมาข้างละ 0.5 เมตรของสะพานดัง Figure 7

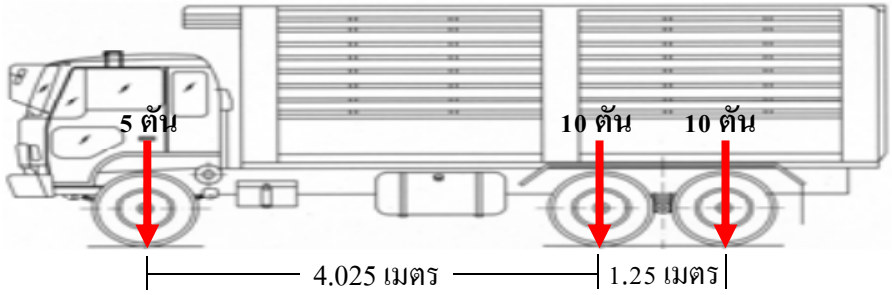


Figure 5 Thai Truck load 25 Tons

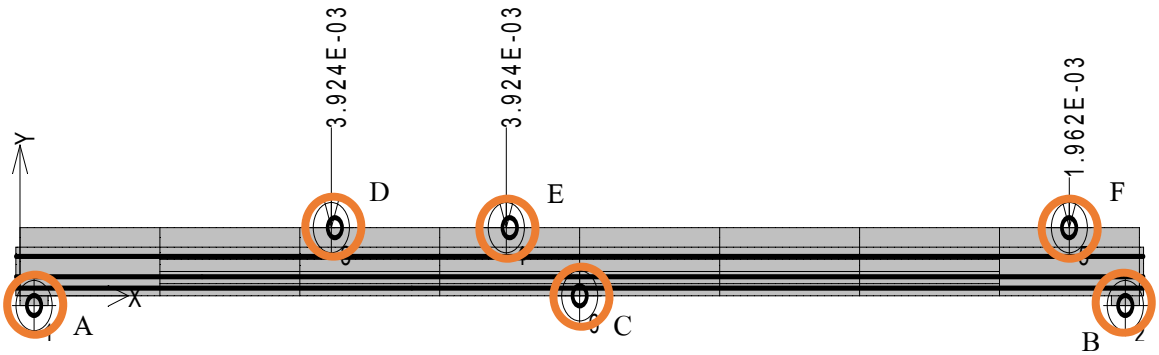


Figure 6 Model of Bridge after add load (MN) and Monitoring point

หมายเหตุ Monitoring point ของ Supports แทนด้วย A, B

Monitoring point ของ Displacement แทนด้วย C

Monitoring point ของ Truck load แทนด้วย D, E, F

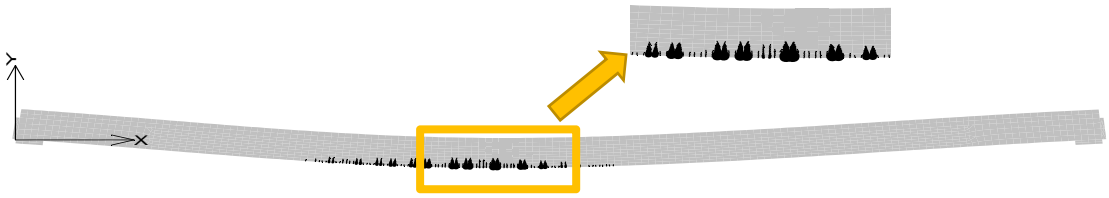


Figure 7 Model Analyzed by ATENA 2D version 5.1.3

ผลการทดลองและวิจารณ์

จากการจำลองโมเดลไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้นของแบบจำลองทั้งหมด 160 โมเดลผ่านโปรแกรมลิขสิทธิ์ ATENA version 5.1.3 ได้ทำการคัดเลือกค่าที่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างสะพานมากที่สุด ดังที่ได้แสดงตัวอย่างการเก็บข้อมูลดัง Table 2 มาพล็อตเป็นกราฟ

Table 2 Data for Displacement, Number of cracks and Crack width

Combination	Displacement (m.)	Number of Cracks	Crack Width (m.)
Original	0.03692	35	0.0001698
A-20%, B-20%	0.03835	41	0.0003014
A-20%, D-20%	0.04116	52	0.0004832
B-20%, D-20%	0.03729	54	0.0003801
C-20%, D-20%	0.05882	55	0.0003582
D-20%, E-20%	0.04081	57	0.0007803

หมายเหตุ *สัญลักษณ์ของตัวแปรแสดงใน Table 1 และ -20% ค่าการลดค่าตัวแปรนั้น ๆ ลง 20%

จาก Figure 8 เป็นการแสดง Elastic stage, In-Elastic stage และUltimate stage ของโครงสร้างสะพานคอนกรีตอัดแรงที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ATENA version 5.1.3 โดยจะทำการพิจารณารอยแตกและการแอ่นตัวในช่วง In-Elastic เท่านั้น พบว่าจาก Figure 9 แสดงถึงการแอ่นตัวของสะพานเทียบกับน้ำหนักบรรทุก และ Figure 10 แสดงถึงแพร่กระจายของรอยแตก พบว่าตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อการแอ่นตัวและการแพร่กระจายตัวของรอยแตกของสะพานมากที่สุดคือ กำลังรับแรงดึงของลวดอัดแรง (Tensile Strength of wire stand, f_{ps})

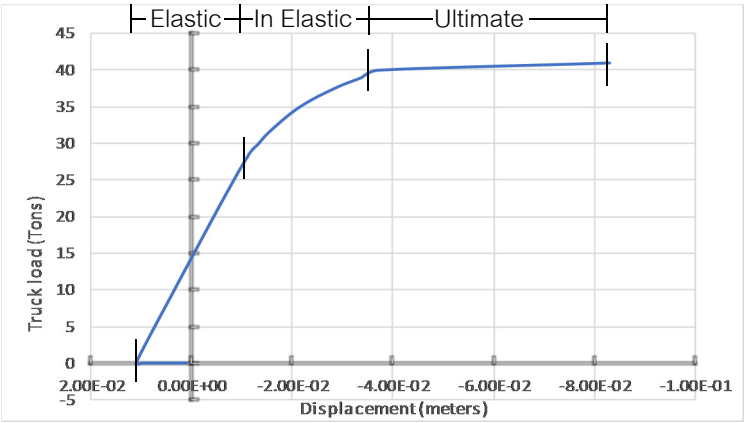


Figure 8 Stage of Modulus of Elasticity

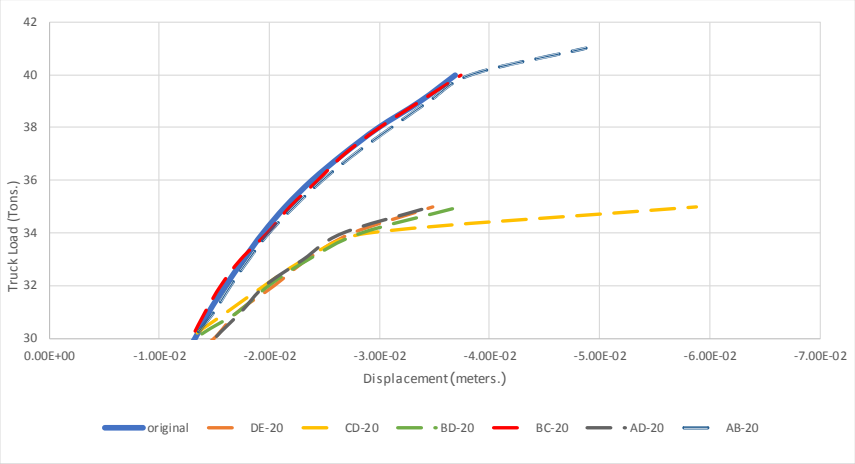


Figure 9 The relations between Truck load and Displacement

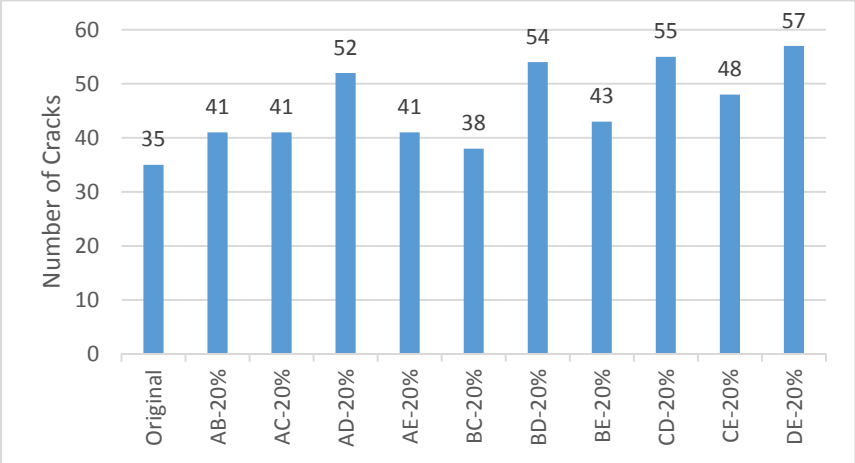


Figure 10 The Number of cracks at Truck load 40 Tons (Before Ultimate). And considering only the cracks larger than 0.4 millimeter

สรุป

บทความนี้ได้ทำการวิเคราะห์แบบผสมผสาน (Combination) ของตัวแปร 5 ตัวแปร ได้แก่ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (Compressive strength of concrete, f_c'), กำลังรับแรงดึงของคอนกรีต (Tensile strength of concrete, f_t), โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (Modulus of elasticity of concrete, E_c), กำลังรับแรงดึงที่จุดครากของลวดอัดแรง (Tensile strength of wire stand, f_{ps}) และ โมดูลัสยืดหยุ่นของลวดอัดแรง (Modulus of elasticity of wire stand, E_{ps}) โดยการสร้างแบบจำลองเสมือนจริงแบบสองมิติด้วยวิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้น จากโปรแกรมลิขสิทธิ์ ATENA version 5.1.3 เพื่อพิจารณาการแพร่กระจายของรอยแตก เมื่อค่าตัวแปรมีการเปลี่ยนแปลง พบว่าการทรุดตัวของโครงสร้างเมื่อค่าตัวแปรมีการเปลี่ยนแปลง พบว่าหากทำการลดค่าตัวแปร f_{ps} และ E_c การแอ่นตัวของโครงสร้างสะพานเกิดการแอ่นตัวมากที่สุดถึง 5.882 เซนติเมตร ซึ่งเมื่อเทียบกับสะพานต้นแบบที่มีการแอ่นตัวเท่ากับ 3.692 เซนติเมตร ซึ่งหมายถึงมีการแอ่นตัวของสะพานมากขึ้นถึง 62.768% (Table 2, Figure 9) และการแพร่กระจายตัวของรอยแตก หากทำการลดค่าตัวแปร f_{ps} และ E_{ps} จำนวนรอยแตกเกิดขึ้นมีจำนวนมากที่สุดถึง 57 รอยแตก ซึ่งเมื่อเทียบกับสะพานต้นแบบมีจำนวน 35 รอยแตก ซึ่งหมายถึงรอยแตกมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นถึง 61.404 % (Table 2, Figure 10) สามารถสรุปได้ว่า กำลังรับแรงดึงของลวดอัดแรง (Tensile Strength of wire stand, f_{ps}) มี

ผลกระทบต่อโครงสร้างสะพานมากที่สุด ทั้งนี้บทความนี้สามารถนำไปพิจารณาถึงขอบเขตในการออกแบบของโครงสร้างให้มีความปลอดภัย เมื่อมีค่าตัวแปรที่เปลี่ยนไปไม่ว่าจะเป็น การก่อสร้างที่ผิดพลาด คุณภาพของคอนกรีตและเหล็กเสริม และยังสามารถนำข้อมูลไปศึกษาต่อหรือใช้ประกอบในการพิจารณาการรับแรงของโครงสร้างสะพานคอนกรีตอัดแรงชนิดแผ่นพื้นตัน (Plank Girder)

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ Červenka Consulting และ Faculty of Civil Engineering, Brno University of Technology, Czech Republic ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้ license ของโปรแกรมลิขสิทธิ์ ATENA version 5.1.3 และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน และบุคลากรทุกท่าน ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำบทความนี้ รวมถึงขอขอบคุณกรมทางหลวงชนบทนครปฐม ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลของสะพานที่ใช้ทำวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

กรมทางหลวง . 2561 . **ระบบบริหารงานบำรุงรักษาสะพาน (**Bridge Maintenance and Management System**)** . สืบค้นเมื่อ มิถุนายน 20, 2561, จาก http://bridge.doh.go.th/bmms/.

กรมทางหลวงชนบท . 2554 . **แบบก่อสร้างสะพานข้ามคลองพระมอพิมัย** . นครปฐม.

จีรายุส เหลืองพาณิชย์กุล . 2559 . **การประเมินความน่าเชื่อถือของโครงสร้างสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กในประเทศไทยโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์** . วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ . กรุงเทพมหานคร.

วิชัย กิจวัทวรเวทย์ . 2554 . **การตรวจประเมินพินิจของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก** (Visual Inspection of Reinforced concrete Bridge) . การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติครั้งที่ 16.

สาโรจน์ ดำรงศีล . 2559 . **การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน** . มหาวิทยาลัยรัตนโกสินทร์ . นครปฐม.

ATENA Program Documentation, Part 1, **ATENA Theory Manual**, CERVENKA CONSULTING, 2000-2014.

ATENA Program Documentation, Part 4-1, **Tutorial for Program ATENA 2D**, ČERVENKA CONSULTING, 2000-20140.

การประเมินการแตกร้าวและขนาดของรอยแตกร้าวในสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดแผ่นพื้น โดยใช้การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้น

Evaluation of Crack and Crack Width in RC-Slab Bridge by Using Nonlinear Finite Element Analysis

นฤภู นนทกุลวิวัฒน์[1*] และ วิชัย กิจวัทวรเวทย์[2]

Narupoo Nontakulwiwat[1*] and Wichai Kijawatworawet[2]

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้ทำการประเมินการแตกร้าวและขนาดของรอยแตกร้าวในโครงสร้างสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดแผ่นพื้น ณ สะพานข้ามคลองห้วยจรเข้ ทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 4 ก.ม.54+393 ซึ่งโดยใช้การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้น ซึ่งจะพิจารณาค่าตัวแปรของคุณสมบัติของคอนกรีตและเหล็กที่มีผลต่อโครงสร้างมากที่สุดทั้งหมด 5 ตัวแปร คือ $f_c^{'}$, f_t, E_c, f_y และ E_s โดยทำการวิเคราะห์จากค่าเริ่มต้นของการออกแบบและทำการวิเคราะห์แบบการจัดหมวดหมู่แบบเป็นคู่ โดยการเพิ่มและลดค่าคุณสมบัติทั้ง 5 ตัวแปรนั้นทีละ2.5% จนถึง20%จากค่าเริ่มต้นของการออกแบบ ซึ่งทั้ง 5 ตัวแปรนี้ส่งผลต่อปัจจัยในหลายด้านที่มีผลต่อโครงสร้างของสะพาน ซึ่งความน่าสนใจในบทความนี้คือผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรม ATENA เวอร์ชั่น 5.1.3 จะเป็นโปรแกรมลิทสิทธิ์ ที่ทางผู้วิจัยจะต้องไปทำการศึกษาที่ Brno University ประเทศสาธารณรัฐเช็ก ซึ่งผลสรุปที่ได้จากการวิจัยคือคู่ของ $f_c^{'}$และ f_y โดยจะมีจำนวนรอยแตก ขนาดของรอยแตกและค่าการทรุดตัวเพิ่มขึ้นจากค่าออกแบบ 15, 51.44 และ 2.8เท่าตามลำดับ ต่อเมื่อลดค่าตัวแปรถึง 20%

ABSTRACT

The object of this research is to evaluate crack growth, crack width and displacement of reinforced concrete bridge at bridge over Huai Cholakhe Canal, No.4 Highway k.m.54+393. This case is analyzed by using Nonlinear Finite Element, then consider about the properties of concrete and steel that affect the structure most, that is $f_c^{'}$, f_t, E_c, f_y and E_s by Initially analyzed and two combination from design value by increasing and decreasing property of five values at 2.5% to 20% from design value. These five variables affect many factors which are affecting the structure. In this research, the researchers used the ATENA program version 5.1.3. It is license program. The researcher will have to study at Brno University, Czech Republic. The result of this research is a pair of compressive strength of concrete and tensile strength of steel will affect mostly.

Keywords: Crack growth, Crack width, Nonlinear Finite Element Analysis, Reinforced concrete bridge, ATENA program

[*]Corresponding author; e-mail address: **panuphat_mike@hotmail.com**

[1]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกาแพงแสน นครปฐม

[2]รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกาแพงแสน นครปฐม

คำนำ

สะพานเป็นโครงสร้างทางวิศวกรรมรูปแบบหนึ่ง ทำหน้าที่เชื่อมต่อพื้นที่ซึ่งมีอุปสรรคกีดขวางเส้นทางมิให้สัญจรได้โดยสะดวก เช่น คลอง แม่น้ำ หรือถนนเป็นต้น ปัจจุบันวิวัฒนาการของการก่อสร้างสะพานก้าวล้ำไปมาก ในปัจจุบันสะพานตามแบบมาตรฐานซึ่งกรมทางหลวงออกแบบให้รองรับน้ำหนักบรรทุกตามเกณฑ์สากลได้ วิชัย (2554) ซึ่งตลอดมากรมทางหลวงได้บำรุงรักษาสะพานที่อยู่ในความรับผิดชอบทั่วประเทศซึ่งมีมากกว่า 16000 แห่ง ให้อยู่ในสภาพที่ดีและมีความปลอดภัยในการใช้งานอย่างสม่ำเสมอถูกนำมาใช้ในเส้นทางคมนาคม แต่เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกยวดยานที่แล่นผ่านสะพานนั้นมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้นตลอดมาการก่อสร้างที่ไม่เป็นไปตามมาตรฐาน การบำรุงรักษาที่ไม่เหมาะสม ประกอบกับมียวดยานจำนวนมากฝ่าฝืนกฎหมายบรรทุกน้ำหนักเกินพิกัดทำให้สะพานได้รับความเสียหายมากขึ้น และปัจจัยทางสภาวะแวดล้อม ข้างต้นมีส่วนทำให้กำลังรับน้ำหนักลดลง โดยความเสียหายที่เพิ่มขึ้นมีผลโดยตรงต่อระดับความปลอดภัยในการใช้งานสะพานและต่ออายุขัยการใช้งานของสะพาน ดังนั้น จึงมีความจำเป็นที่จะต้องประเมินการตรวจสอบสภาพของสะพาน รวมทั้งประเมินกำลังรับน้ำหนักของโครงสร้างสะพาน เพื่อให้สะพานมีความมั่นคงแข็งแรงและสามารถใช้งานได้อย่างมีความปลอดภัย

จีรายุส (2559) วิธีการตรวจสอบสะพานนั่นมีหลายวิธี แต่สำหรับตัวอย่างที่นำมาศึกษานี้จะตรวจสอบถึงคุณสมบัติของคอนกรีตและเหล็กที่เปลี่ยนแปลงไป อันส่งผลต่อพฤติกรรมการแตกร้าว จำนวนรอยแตก ขนาดของรอยแตกและค่าการทรุดตัวในโครงสร้างของสะพาน สำหรับตัวอย่างที่ใช้นั่นได้อ้างอิงมาจากแบบมาตรฐานของกรมทางหลวง ซึ่งนั่นคือสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดแผ่นพื้น (Slab type)

ในบทความนี้ได้ศึกษาถึงพฤติกรรมการแตกร้าว จำนวนรอยแตก ขนาดของรอยแตกและค่าการทรุดตัวในโครงสร้างของสะพาน โดยใช้โปรแกรม ATENA เวอร์ชั่น 5.1.3 ซึ่งเป็นโปรแกรมลิขสิทธิ์ ที่ทางผู้วิจัยได้ไปศึกษาที่ Institute of Structural Mechanics Faculty of Civil Engineering Brno University of Technology Brno, Czech Republic โดยการใช้โมเดลโครงสร้างสะพานจริงแบบ 3 มิติ มาขึ้นรูปโมเดลในโปรแกรมแบบ 2 มิติ โดยวิธีวิเคราะห์แบบไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสถิตยศาสตร์ไม่เชิงเส้น(Static Nonlinear Finite Element Analysis) ซึ่งพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรทั้ง 5 ตัวแปร โดยการจัดหมวดหมู่แบบคู่ เพื่อศึกษาพฤติกรรมรอยแตกในโครงสร้างของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดแผ่นพื้น

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

ข้อมูลรายละเอียดของสะพาน

โครงสร้างสะพานที่นำมาศึกษาเป็นสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดแผ่นพื้น (Slab type) ณ สะพานข้ามคลองห้วยจรเข้ ทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 4 ตอน นครปฐม-ราชบุรี อำเมืองนครปฐม จังหวัดนครปฐม ก.ม. 54+393 มีความยาว 10 เมตร หนา 0.53 เมตร พิจารณาที่ความกว้าง 1 เมตร โดยอ้างอิงจากแบบมาตรฐานกรมทางหลวง 1994 (STANDARD DRAWING FOR HIGHWAY CONSTRUCTION 1994) ดังใน Figure 1 และ Table 1

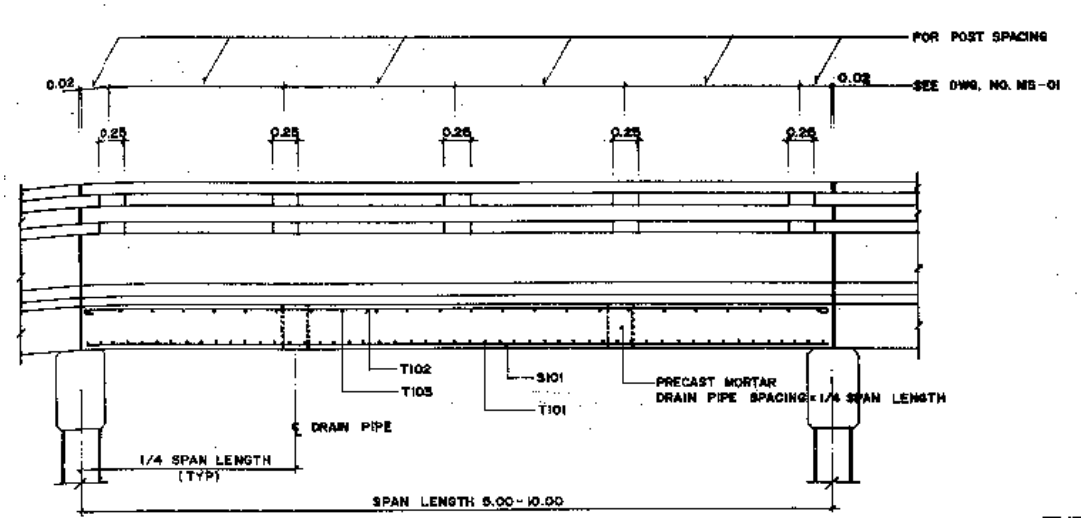


Figure 1 Cross section of reinforced concrete bridges.

Table 1 Table of slab reinforcement.

BAR MARK	SPAN 10.00 m	
	Diameter (mm)	@ (m)
S101	25	0.09
T102	9	0.3

สมบัติของคอนกรีต และการเกิดรอยร้าว

กรมทางหลวง (2544) คอนกรีตเป็นวัสดุที่ถูกผสมด้วยส่วนประกอบต่าง ๆมากมายเช่น ปูนซีเมนต์ มวลรวมหยาบ มวลรวมละเอียด น้ำ และสารเคมี เป็นต้น ส่วนประกอบต่าง ๆจะถูกผสมเข้าในอัตราส่วนที่เหมาะตามแต่ผู้ออกแบบ ซึ่งส่วนประกอบทั้งหมดจะทำปฏิกิริยาทางเคมีกันจะทำให้เกิดวัสดุที่มีความแข็งแรง รับแรงได้ดี จึงทำให้คอนกรีตเป็นส่วนประกอบหลักในโครงสร้างสะพาน รอยแตกจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ รอยแตกเชิงโครงสร้าง (Structural Cracks) และรอยแตกที่ไม่ใช่รอยแตกเชิงโครงสร้าง (Non Structural Cracks)

1. รอยแตกเชิงโครงสร้าง(Structure Cracks) มีสาเหตุมาจาก Stresses ที่เกิดจากน้ำหนักคงที่และน้ำหนักบรรทุกจรและจะถูกแบ่งย่อยออกเป็น 2 ชนิด คือ แตกจากการดัด (Flexure Cracks) และ รอยแตกจากการเฉือน (Shear Cracks) ดัง Figure 3

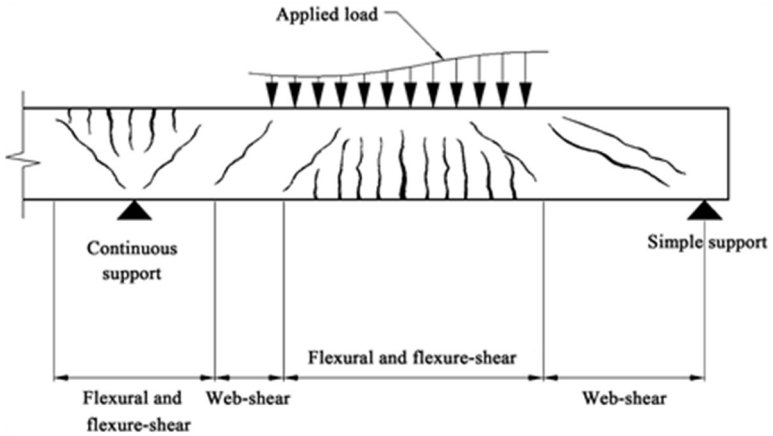


Figure 3 Type of cracking in concrete

ที่มา : http://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx

2. รอยแตกที่ไม่ใช่รอยแตกเชิงโครงสร้าง (Non Structural Cracks) ถูกแบ่งออกเป็น 3 ชนิดคือ รอยแตกเนื่องจากอุณหภูมิ (Temperature Cracks), รอยแตกเนื่องจากการหดตัว (Shrinkage Cracks) มีรอยแตกเนื่องจากคอนกรีตหลา (Mass Concrete Cracks) ซึ่งรอยแตกเหล่านี้จะมีขนาดเล็กและไม่มีผลกระทบต่อโครงสร้าง

กระบวณการแตกร้าว

กระบวณการแตกร้าวสามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ในขั้นแรกจะยังไม่มีการแตกร้าว เพราะมาจากการที่ยังไม่ถึงค่าของ tensile strength ในช่วงที่สองนี้คือกระบวณเริ่มแตกของคอนกรีตโดยที่มี tensile stress ลดลงจึงทำให้เกิดการเริ่มแตกร้าว และช่วงสุดท้ายนี้คือการแตกอย่างต่อเนื่องดัง Figure 4

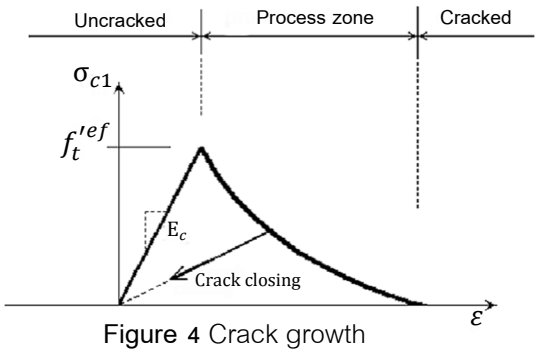


Figure 4 Crack growth

ที่มา : ATENA Theory Manual, Part 1 (2016)

การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรม ATENA เพื่อวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้น ซึ่งเป็นการวิเคราะห์แบบเชิงคณิตศาสตร์ ซึ่งจะใส่คุณสมบัติของคอนกรีตและเหล็กเสริม โดยพิจารณาจากมาตรฐาน วสท.1008 และแบบมาตรฐานกรมทางหลวง 1994 ดัง Table 2 และจะทำการเพิ่มลดคุณสมบัติทั้ง 5 นี้เป็น 2.5%, 5%, 7.5%, 10%, 12.5%, 15%, 17.5% และ20%ของค่าเริ่มต้นของการออกแบบ โดยการจับคู่(combination)แต่ละตัวแปรเข้าด้วยกัน เช่น $f_c^{'}$กับ f_t และ E_cกับ f_y เป็นต้น ซึ่งจะได้โมเดล และผลลัพธ์ทั้งหมด 161 ค่า โดย

$$E_c = 15100\sqrt{f_c'} \quad (1)$$

$$f_t = 1.76\sqrt{f_c'} \quad (2)$$

ที่มา : มาตรฐาน วสท.1008

Table 2 Material properties

Variable		Value	Unit	Symbol
Compressive strength of concrete (Cube, Cylinder)	$f_c^{'}$	210,175	ksc	A
Tensile strength of concrete	f_t	23.28	ksc	B
Young's modulus of elasticity of concrete	E_c	199754.2	ksc	C
Tensile strength of steel	f_y	2400	ksc	D
Young's modulus of elasticity of reinforcement	E_s	2040000	ksc	E

การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้น จะทำการสร้างแบบจำลองตัวอย่างโครงสร้างของสะพานเป็นแบบ 2 มิติโดยจะทำการใส่จุดที่ต้องการพิจารณา (Monitoring point) จะแบ่งออกเป็นจุดที่มีน้ำหนักบรรทุกมากระทำโดยการวิจัยครั้งนี้จะใช้เป็นน้ำหนัก Thai Truck load ที่ 25 ตัน ซึ่งตำแหน่งที่วางน้ำหนักบรรทุกนี้จะใช้วิธี Influence line มาช่วยในการหาตำแหน่งที่เกิดโมเมนต์สูงสุดเพื่อวางน้ำหนักบรรทุก ถัดมาคือจุดที่เป็นการรองรับของโครงสร้าง (Support) และสุดท้ายคือจุดที่ต้องการพิจารณาค่าการทรุดตัว (Displacement) จะอยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของโครงสร้างเพราะเป็นตำแหน่งที่เกินค่าโมเมนต์มากที่สุดของโครงสร้างดัง Figure 5

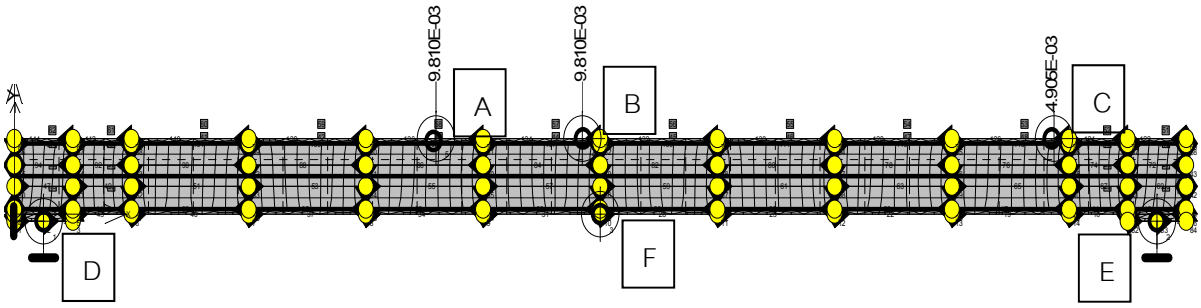


Figure 5 Structural simulation from Thai truck load (MN) (A-C), Support (D-E) and Displacement (F).

สิ่งที่ได้จากโปรแกรม ATENA นี้นั้นจะสามารถทราบถึงจำนวนรอยแตก ขนาดต่าง ๆของแต่ละรอยแตกนั้น และค่าการทรุดตัวเป็นต้น ซึ่งการวิจัยนี้จะศึกษาจำนวนรอยแตกเฉพาะบริเวณที่ห่างออกมาจากจุดกึ่งกลางสะพาน 0.5 เมตรทั้ง 2 ข้างดัง Figure 6 เพราะเป็นจุดที่เกิดโมเนต์สูงสุดและเพื่อเป็นบรรทัดฐานในการนับรอยแตกของโมเดลอื่น ๆอีกด้วย ส่วนของขนาดรอยแตกนั้นการวิจัยนี้จะศึกษาเฉพาะ Bruce A (1990) รอยแตกที่มีความรุนแรงต่อโครงสร้างหรือขนาดรอยแตกที่มีขนาดใหญ่กว่า 0.4 มิลลิเมตรเท่านั้นดัง Table 3

Table 3 Classification of crack widths

CLASSIFICATION OF CRACK WIDTHS	
Classification	Crack Width, CW (mm.)
Very fine	CW ≤ 0.1
Fine	0.1 ≤CW≤ 0.2
Medium	0.2 ≤CW≤ 0.3
Extensive	0.3 ≤CW≤ 0.4
Severe	CW > 0.4

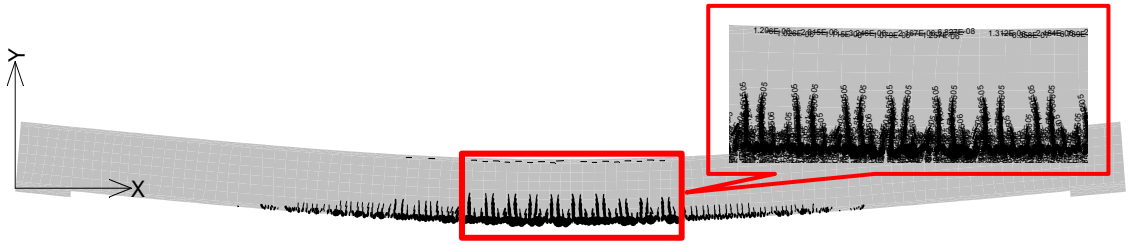


Figure 6 The results of the program.

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

หลังจากได้ทาการวิเคราะห์แบบ combination คู่ของทั้ง 5 ตัวแปรโดยวิธีวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้น จะสังเกตเห็นพฤติกรรมของโครงสร้างสะพานที่นำมาจำลองนั้นพบว่าเมื่อมีโหลดมากระทำต่อโครงสร้างของสะพานจะทำให้มีการเพิ่มขึ้นของจำนวนรอยแตก ขนาดของรอบ และการทรุดตัว

ซึ่งในบทความนี้จะยกคู่ตัวอย่างมาทั้งหมด 5 คู่ จาก 161 คู่ ที่มีผลมากที่สุดเปรียบเทียบกับค่าเริ่มต้นของการออกแบบ เมื่อมีการลดลงของค่าตัวแปร 20% เพราะจะเห็นได้ถึงความแตกต่างที่ชัดเจนทั้งจำนวณรอยแตก ขนาดรอยแตก และค่าการทรุดตัวดัง Table 4 และ Figure 7-9

Table 4 The most effective variable at 50 tons.

The most effective variable at 50 tons			
Variable	Number of cracks	Crack Width (m)	Displacement (mm)
Design value	17	5.73E-04	4.33E-02
A-20%, D-20%	255	2.95E-02	1.21E-01
C-20%, D-20%	235	2.26E-02	9.72E-02
D-20%, E-20%	219	1.32E-02	9.45E-02
B-20%, D-20%	214	1.13E-02	9.07E-02
A-20%, C-20%	154	7.75E-03	8.16E-02

โดย Figure 7 เป็นกราฟระหว่างจำนวนของรอยแตกกับน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มมากขึ้น โดยนับเฉพาะรอยแตกที่มีขนาดใหญ่กว่า 0.4 มิลลิเมตร ดังที่เคยกล่าวไว้ข้างต้น จะเห็นได้ว่าคู่ของ f'_c กับ f_y มีผลต่อจำนวนของรอยแตกของโครงสร้างมากที่สุดซึ่งเมื่อลดค่า 20% ที่น้ำหนักบรรทุก 50 ตัน ทั้ง 2 ตัวทำให้ค่าจำนวนของรอยแตกเพิ่มจากค่าเริ่มต้นของการออกแบบถึง 15 เท่า จึงทำให้ทั้ง 2 ตัวแปรนี้เป็นตัวที่ส่งผลมากที่สุดต่อจำนวนรอยแตกในโครงสร้าง

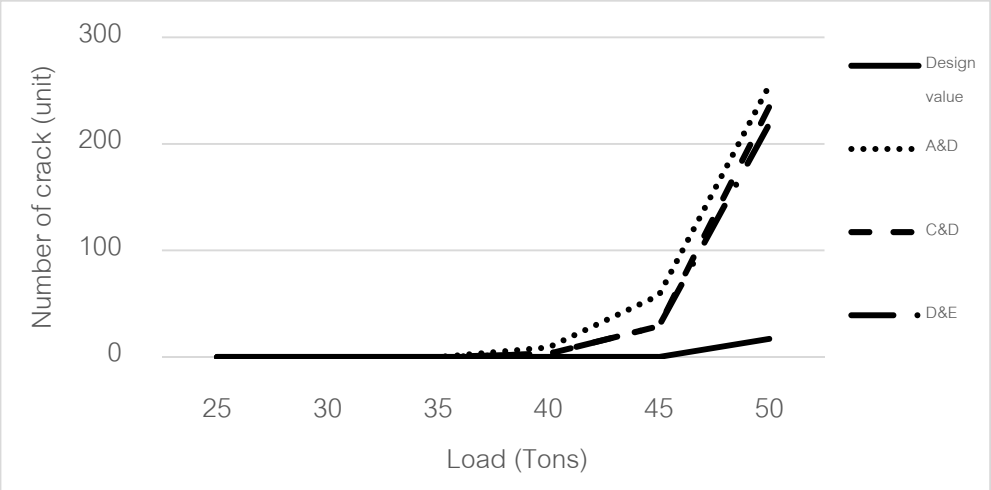


Figure 7 The most effective variable is a 20% in term number of cracks.

โดย Figure 8 เป็นกราฟระหว่างขนาดของรอยแตกที่ใหญ่สุดที่เกิดในโครงสร้างกับน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งในบทความนี้นั้นผู้จัดทำนั้นจะเจาะจงเฉพาะรอยแตกที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในโครงสร้างตามน้ำหนัก

บรรทุกต่าง ๆที่มากระทำ ซึ่งจากกราฟจะเห็นได้ว่าคู่ของ f'_cกับ f_y มีผลต่อขนาดรอยแตกของโครงสร้างมากที่สุดเช่นกันเมื่อลดค่า 20% ที่น้ำหนักบรรทุก 50 ตัน ทั้ง 2 ตัว ทำให้เกิดขนาดของรอยแตกที่ใหญ่ที่สุดในโครงสร้างเพิ่มจากค่าเริ่มต้นของการออกแบบถึง 51.44 เท่า จึงทำให้ทั้ง 2 ตัวแปรนี้เป็นตัวที่ส่งผลมากที่สุดต่อขนาดรอยแตกเช่นกัน

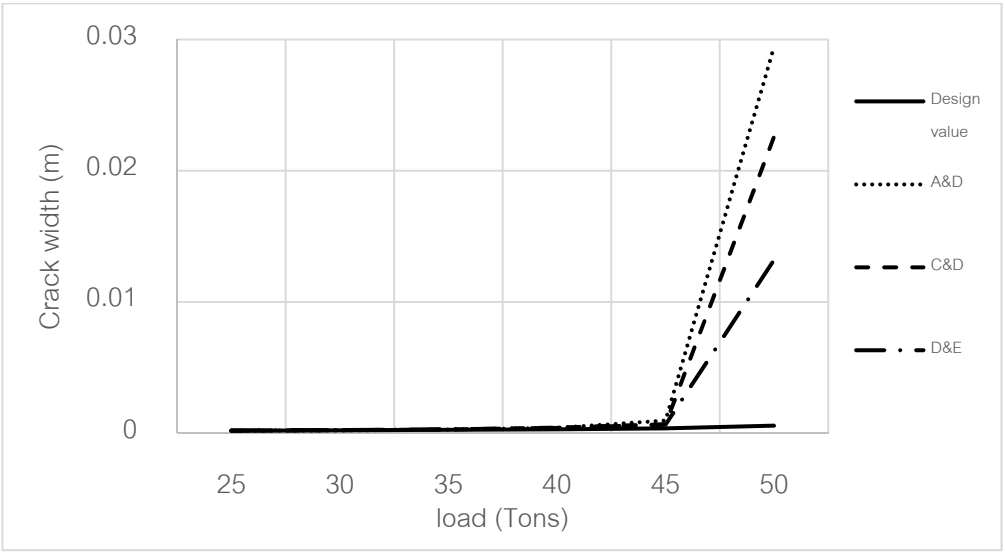


Figure 8 The most effective variable is a 20% in term crack width.

โดย Figure 9 เป็นกราฟระหว่างการทรุดตัวกับน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งจากกราฟจะเห็นได้ว่าคู่ของ f'_cกับ f_y มีผลต่อการทรุดตัวของโครงสร้างมากที่สุดเช่นกันเมื่อลดค่า 20% ที่น้ำหนักบรรทุก 50 ตัน ทั้ง 2 ตัว ทำให้เกิดการทรุดตัวเพิ่มจากค่าเริ่มต้นของการออกแบบถึง 2.8 เท่า จึงทำให้ทั้ง 2 ตัวแปรนี้เป็นตัวที่มีผลมากที่สุดต่อการทรุดของโครงสร้าง

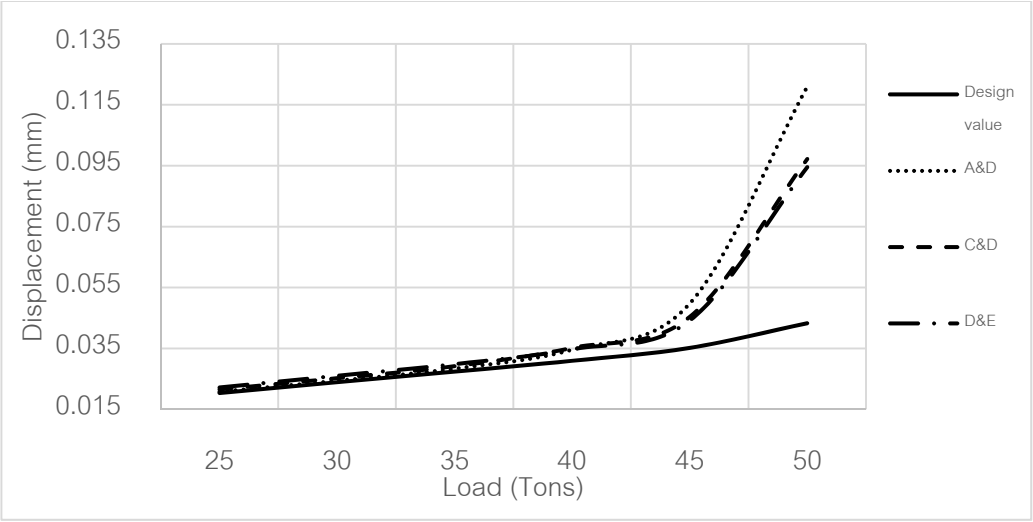


Figure 9 The most effective variable is a 20% in term displacement.

สรุป

ตัวแปรที่ส่งผลต่อโครงสร้างนั้นมีมากมาย แต่บทความนี้ได้ทำการพิจารณาเฉพาะตัวแปรทั้ง 5 ตัวคือ ค่าแรงอัดของคอนกรีต (f'_c) แรงดึงของคอนกรีต (f_t) โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (E_c) แรงดึงของเหล็กเสริม (f_y) และ

โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริม (E_s) เพราะมีผลกระทบต่อรอยแตกของโครงสร้างสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดแผ่นพื้นโดยตรง โดยการจำลองวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้นจากโปรแกรม ATENA เวอร์ชั่น 5.1.3 เมื่อทำการจับคู่ตัวแปรทั้ง 5 ตัวและปรับเปลี่ยนตัวแปร ทำการเปรียบเทียบกับค่าการออกแบบพบว่า คู่ที่มีผลมากที่สุดต่อโครงสร้างคือค่าแรงอัดของคอนกรีตและแรงดึงของเหล็กเสริม ซึ่งจำนวนรอยแตก ขนาดรอยแตก และค่าการทรุดตัวที่เพิ่มมากขึ้นนั้นจะแปรผันตามกับแรงอัดของคอนกรีตและแรงดึงของเหล็กเสริมโดยเมื่อตัวแปรทั้ง 2 ลดลงจะทำให้เกิดจำนวนรอยแตก ขนาดรอยแตกและค่าการทรุดตัวที่เพิ่มมากขึ้น โดยเพิ่ม 150%, 222.42% และ99.34% ตามลำดับ โดยเปรียบเทียบเมื่อลด 10%กับ20% อย่างมีนัยสำคัญ ดังTable 4 และ Figure 7-9 ซึ่งมีผลโดยตรงต่อโครงสร้างสะพานทั้งความแข็งแรงและความน่าเชื่อถือ อย่างไรก็ตามการศึกษาครั้งนี้ช่วยให้มีการคาดการณ์รอยแตกที่อาจจะเกิดกับกับตัวโครงสร้างสะพานเพื่อความปลอดภัยต่อผู้ใช้ทางสัญจรต่อไป และบทความความนี้ยังสามารถต่อยอดไปถึงโปรแกรม SARA, Freet-D และอื่น ๆได้อีกด้วย หรือมีผู้สนใจสามารถนำข้อมูลไปประยุกต์ใช้ในรูปแบบอื่น ๆได้อีกต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำงานวิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสนกับ Institute of Structural Mechanics Faculty of Civil Engineering Brno University of Technology Brno, Czech Republic และบุคลากรทุกท่านโดยเฉพาะ Prof. Drahomir Novák เป็นอย่างสูงที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้โปรแกรมลิขสิทธิ ATENA เวอร์ชั่น 5.1.3 และคำปรึษาต่างๆมากมาย รวมไปถึงสำนักงานกรมทางหลวงที่เอื้อเฟื้อข้อมูลในการทำวิจัยในครั้งนี้ ขอบคุณครับ

เอกสารอ้างอิง

จีรายุส เหลืองพาณิชย์กุล. 2559. การกระจายตัวของการแตกร้าวและขนาดของรอยแตกร้าวในสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กของคานขวางโดยใช้การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสถิตยศาสตร์ไม่เชิงเส้น, น.1-7. *ใน* **การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 21**. สงขลา

วิชัย กิจวัทวรเวทย์, ประเสริฐ ศิรินรานันตร์, วิมล ลาวัณย์วิสุทธ์. 2554. **การประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กและกรณีศึกษา**. *ใน* การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธา แห่งชาติ ครั้งที่ 16, มหาวิทยาลัยมหิดล, นครปฐม

Bruce A. Suprenant. 1990. **Evaluating cracks to repair cracks in masonry properly, you must first determine what caused them.** The Aberdeen Group.

Islam M. Ezz El-Arab. 2017. **Web Shear Strengthening Technique of Deep Precast Prestressed Hollow Core Slabs under Truck Loads.** Retrieved May 6, 2018, from https://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx

Vladimír Červenka, Libor Jendele, and Jan Červenka. 2016. **ATENA Program Documentation Part 1 Theory.** Červenka Consulting s.r.o. Prague

การเปรียบเทียบแรงภายในของสะพานขึงระนาบเดี่ยวสามช่วง

Comparison of the Internal Forces of the Three Span Single Plane Cable-Stayed Bridge

สมโพธิ์ วิวิธเกยูรวงศ์[1*] และ กฤษฎา สุวรรณไตร[1]

Sompothi Vivithkeyoonvong[1*] and Krisda Suvarnatrai[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบแรงภายใน (Internal Forces) ระหว่างสะพานขึงระนาบเดี่ยวสามรูปแบบ ได้แก่ แบบแผ่กระจาย (Radiating Type) แบบพิณตั้ง (Harp Type) และแบบพัด (Fan Type) แรงภายในที่นำมาเปรียบเทียบได้แก่ แรงตามแนวแกน (Thrust) แรงเฉือน (Shear) และโมเมนต์ดัด (Bending Moment) ของคานสะพาน (Bridge Girder) และเสาสูง (Bridge Pylon) ตลอดจนแรงดึง (Tension) ในเคเบิล (Cable) ผลการเปรียบเทียบพบว่าสำหรับคานสะพาน แรงตามแนวแกนสูงสุดเกิดขึ้นในชิ้นส่วนที่ 8 ของสะพานขึงแบบพิณตั้ง แรงเฉือนสูงสุดเกิดขึ้นในชิ้นส่วนที่ 6 ของสะพานขึงแบบพิณตั้ง และโมเมนต์ดัดสูงสุดบวกและลบเกิดขึ้นในชิ้นส่วนที่ 7 ของสะพานขึงแบบพิณตั้ง และเกิดขึ้นในชิ้นส่วนที่ 14 ของสะพานขึงแบบพัดตามลำดับ สำหรับเสาสูงแรงตามแนวแกนสูงสุดเกิดขึ้นในชิ้นส่วนที่ 27 ของสะพานขึงแบบแผ่กระจาย แรงเฉือนสูงสุดเกิดขึ้นในชิ้นส่วนที่ 27 ของสะพานขึงแบบพิณตั้ง และโมเมนต์ดัดสูงสุดเกิดขึ้นในชิ้นส่วนที่ 27 ของสะพานขึงแบบพิณตั้ง ในส่วนเคเบิลแรงดึงสูงสุดเกิดขึ้นในชิ้นส่วนที่ 37 ของสะพานขึงแบบพิณตั้ง

ABSTRACT

The objective of this research is to compare the internal forces among the single plane cable-stayed bridge for three types of cable arrangement namely, Radiating, Harp and Fan. The internal forces to be compared are trusts, shears and bending moments in the bridge girder and pylon, also tension in the bridge cables. The comparison found that, for bridge girder, the maximum thrust occurs in element 8 of Harp type, the maximum shear in element 6 of Harp type, the maximum position and negative bending moment in element 7 of Harp type and element 14 of Fan type respectively. For pylon, maximum thrust occurs in element 27 of Radiating type, the maximum shear in element 27 of Harp type, the maximum bending moment in element 27 of Harp type. In case of cable, the maximum tension in element 37 of Harp type.

Key Words: influence lines, cable stayed bridge, thrust, shear, bending moment

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

[1]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร 10900

[1]Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok

คำนำ

สะพานที่ประกอบด้วยคานสะพาน (Girder) และเสาสูง (Pylon) โดยใช้เคเบิล (Cable) ยึดที่คานสะพานกับเสาสูงจะเรียกว่าสะพานขึง (Cable Stayed-Bridge) หรือสะพานเคเบิลต่อเนื่อง (Cable Continuous Bridge) ที่โครงสร้างถูกแขวนอยู่ด้วยเคเบิล องค์ประกอบของสะพานขึงประกอบด้วยสามส่วนคือ เคเบิล คานสะพาน และเสาสูง ส่วนใหญ่สะพานขึงจะเป็นการสร้างข้ามแม่น้ำ หุบเขาลึก เหว และทางหลวงระหว่างเมือง เนื่องจากมีช่วงกลางสะพานที่ยาวโดยจะคำนึงถึงความต้องการทางคมนาคม รูปแบบที่สวยงาม และความประหยัด การกำหนดรูปแบบของสะพานขึงการวิเคราะห์และออกแบบส่วนประกอบของสะพานขึงที่เหมาะสม เช่น การกำหนดช่วงความยาวของสะพาน ขนาดและรูปแบบของเคเบิล ชนิดและหน้าตัดของคานสะพาน และเสาสูงทำให้สะพานขึงมีหลายรูปแบบ เช่น สะพานขึงระนาบเดี่ยว (Single Plane Cable-Stayed Bridge) หรือระนาบคู่ (Double Plane Cable-Stayed Bridge) รูปแบบการจัดวางเคเบิล เช่น แบบแผ่กระจาย (Radiating Type) แบบพิณตั้ง (Harp Type) แบบพัด (Fan Type) และอื่นๆ จึงสมควรมีการคำนวณเปรียบเทียบระหว่างรูปแบบต่างๆ เพื่อความเหมาะสมและประหยัดที่สุด

วัตถุประสงค์

เพื่อเปรียบเทียบค่าแรงตามแนวแกน แรงเฉือน และโมเมนต์ดัดในคานสะพานและเสาสูงตลอดจนแรงดึงในเคเบิลซึ่งเกิดจากน้ำหนักคงที่ของสะพานขึงระนาบเดี่ยวทั้งสามรูปแบบกล่าวคือ แบบแผ่กระจาย (Radiating Type) แบบพิณตั้ง (Harp Type) และแบบพัด (Fan Type)

ขอบเขตการศึกษา

เปรียบเทียบแรงตามแนวแกน แรงเฉือน และโมเมนต์ดัดซึ่งเกิดจากน้ำหนักคงที่ของโครงสร้างสะพานขึงระนาบเดี่ยวสามช่วง โดยมีรูปแบบการจัดวางเคเบิลเป็นแบบแผ่กระจาย (Radiating Type) แบบพิณตั้ง (Harp Type) และแบบพัด (Fan Type) ฐานรองรับของคานสะพานกำหนดให้เป็นแบบยึดหมุนเคลื่อนที่ได้ (Roller Support) ในส่วนฐานรองรับของเสาสูงกำหนดให้เป็นแบบยึดแน่น (Fixed Support) สำหรับเคเบิลยึดติดกับคานสะพานและเสาสูง ดังแสดงใน Figure 1, 2, 3

คานสะพานและเสาสูงใช้วัสดุเป็นเหล็ก และเคเบิลเป็นเหล็กรับแรงดึงสูง คานสะพานเป็นกล่องหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Box Section) เพราะเป็นลักษณะของคานสะพานที่ดีสุดในการรับแรงบิด (Torsional Restraint) ซึ่งเกิดจากน้ำหนักบรรทุกจรที่ไม่สมมาตร และแรงลมดัง แสดงใน Figure 5

เสาสูงเป็นกล่องเหล็กกลวงยาวต่อเนื่องโดยมีแผ่นเหล็กค้ำไว้ด้านในซึ่งภายในแบ่งเป็นช่องแบบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ายาวตามแนวตั้งของเสาสูงดัง แสดงใน Figure 6

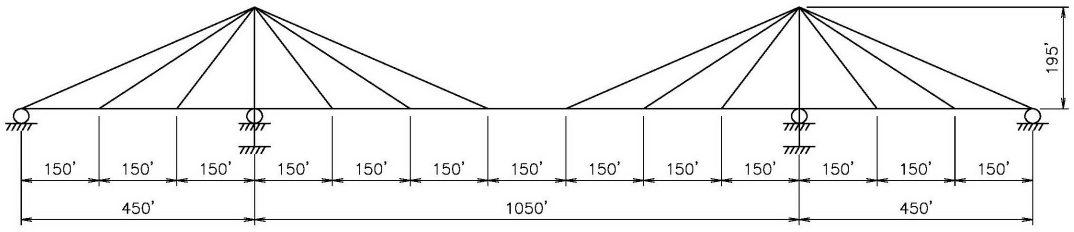


Figure 1 Cable-Stayed Bridge, Radiating Type

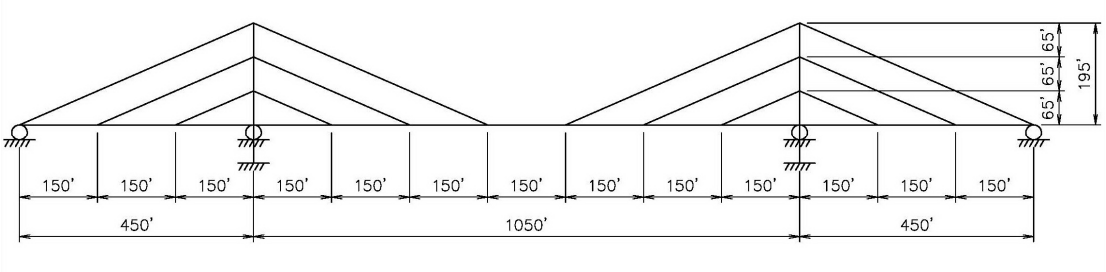


Figure 2 Cable-Stayed Bridge, Harp Type

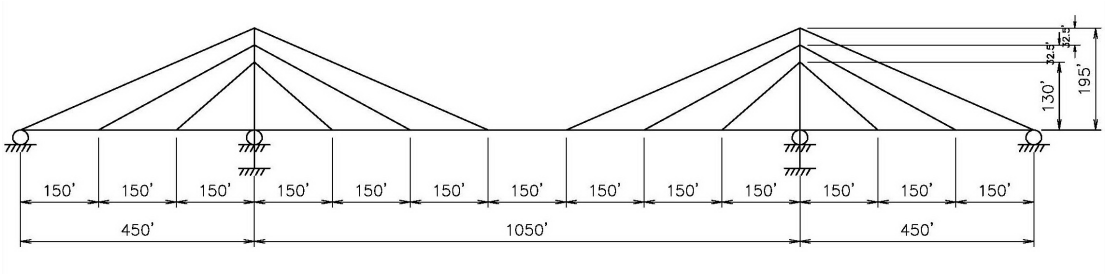


Figure 3 Cable-Stayed Bridge, Fan Type

การวิเคราะห์สะพานขึง

การวิเคราะห์สะพานขึงจะกระทำโดยวิธีสติฟเนส ทั้งนี้โครงสร้างสะพานขึงเป็นโครงสร้างแบบประกอบ (Composite Structures) ซึ่งประกอบด้วยชิ้นส่วนโครงข้อหมุน (Trusses) ได้แก่เคเบิล และโครงข้อแข็ง (Frames) ได้แก่คานสะพาน และเสาสูงรวมกัน โดยโครงสร้างที่เป็นโครงข้อหมุนจะมีชิ้นส่วนรับแรงตามแนวแกนเพียงอย่างเดียว ส่วนโครงสร้างที่เป็นโครงข้อแข็งจะมีชิ้นส่วนซึ่งสามารถรับแรงตามแนวแกน แรงเฉือน และโมเมนต์ดัด สำหรับการวิเคราะห์สะพานขึงกระทำโดยวิธีสติฟเนส (Stiffness Method) เป็นการวิเคราะห์ชิ้นส่วนโครงสร้างแบบเชิงเส้น (Linear Analysis) โดยพิจารณาเป็นโครงสร้างระนาบ (Plane Structure)

ตัวอย่างการวิเคราะห์

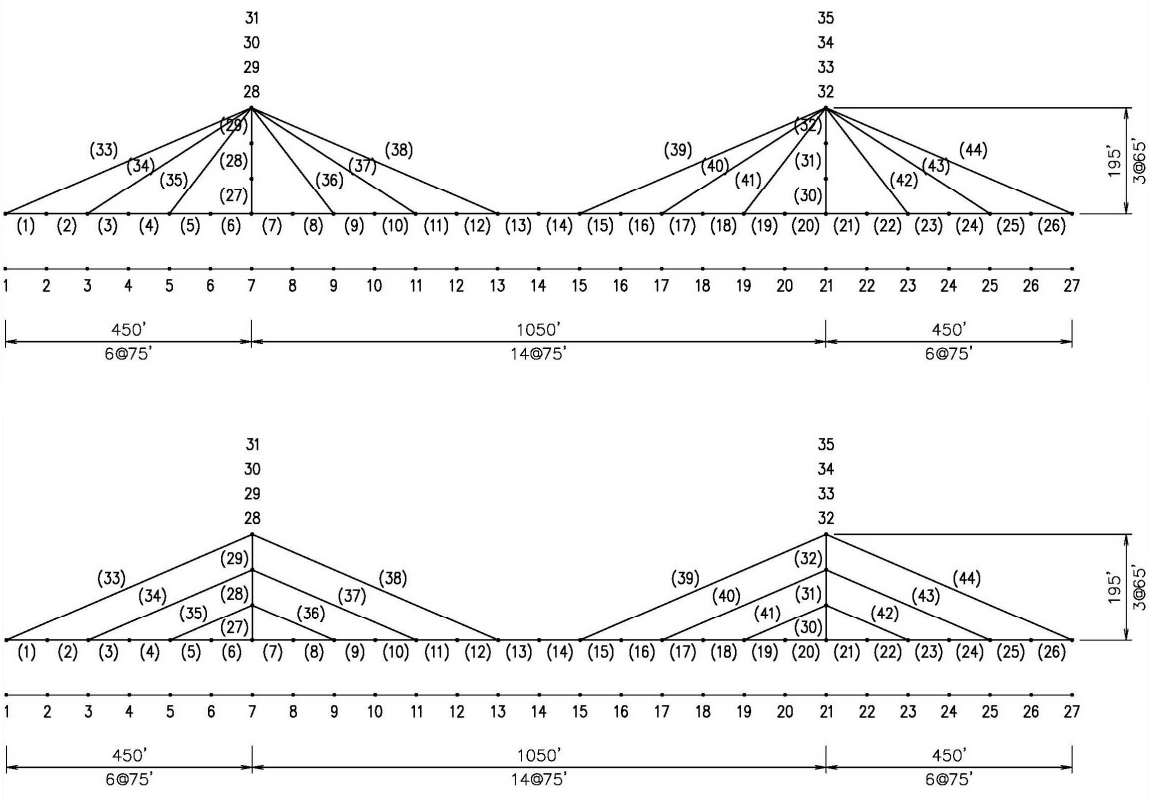
สะพานขึงเป็นสะพานที่มีฐานรองรับที่ประกอบด้วยคานสะพานมีความยาวรวมทั้งหมด 1,950 ฟุต และมีความยาวช่วงกลางเท่ากับ 1,050 ฟุต ความยาวช่วงริมเท่ากันเท่ากับ 450 ฟุต ส่วนเสาสูงมีความสูง 195 ฟุต โดยแบ่งเป็นสามรูปแบบดังนี้

1. สะพานขึงที่มีเคเบิลแบบแผ่กระจาย (Radiating Type) โดยมีคานสะพานแบ่งเป็น 26 ชิ้นส่วนย่อย (Element) ประกอบด้วย 27 จุดต่อ (Node) แต่ละชิ้นส่วนย่อยยาว 75 ฟุต เสาสูงแบ่งเป็นสามชิ้นส่วนย่อย แต่ละ

ชิ้นส่วนยาว 65 ฟุต ส่วนเคเบิลจะยึดติดระหว่างคานสะพาน แต่ละด้านของเสาสูงข้างละสามเส้นที่จุดบนสุดของเสาสูง ทั้งหมดนี้มีตัวเลขแสดงจุดต่อของชิ้นส่วนโครงสร้าง ส่วนตัวเลขในเครื่องหมาย ( ) แสดงหมายเลขของชิ้นส่วนย่อย สะพานขึงจะมีจุดต่อทั้งหมด 35 จุดต่อ และชิ้นส่วนย่อยทั้งหมด 44 ชิ้นส่วน ดังแสดงใน Figure 6

2. สะพานขึงที่มีเคเบิลแบบพิณตั้ง (Harp Type) โดยมีคานสะพานแบ่งเป็น 26 ชิ้นส่วนย่อย (Element) ประกอบด้วย 27 จุดต่อ (Node) แต่ละชิ้นส่วนย่อยยาว 75 ฟุต เสาสูงแบ่งเป็นสามชิ้นส่วนย่อย แต่ละชิ้นส่วนยาว 65 ฟุต ส่วนเคเบิลจะยึดติดระหว่างคานสะพาน แต่ละด้านของเสาสูงข้างละสามเส้น โดยเคเบิลทั้งสามจะขนานกันซึ่งทั้งหมดนี้มีตัวเลขแสดงจุดต่อของชิ้นส่วนโครงสร้าง และตัวเลขในเครื่องหมาย ( ) แสดงหมายเลขของชิ้นส่วนย่อย สะพานขึงจะมีจำนวนจุดต่อและชิ้นส่วนย่อยเหมือนแบบแผ่กระจาย ดังแสดงใน Figure 6

3. สะพานขึงที่มีเคเบิลแบบพัด (Harp Type) โดยมีคานสะพานแบ่งเป็น 26 ชิ้นส่วนย่อย (Element) ประกอบด้วย 27 จุดต่อ (Node) แต่ละชิ้นส่วนย่อยยาว 75 ฟุต เสาสูงแบ่งเป็นสามชิ้นส่วนย่อยยาวไม่เท่ากัน โดยชิ้นส่วนบนสุดยาว 32.5 ฟุต ชิ้นส่วนตรงกลางยาว 32.5 ฟุต และชิ้นส่วนล่างสุดยาว 130 ฟุต ส่วนเคเบิลจะยึดติดระหว่างคานสะพานแต่ละด้านของเสาสูงข้างละสามเส้น โดยเคเบิลทั้งสามจะไม่ขนานกันซึ่งทั้งหมดนี้มีตัวเลขแสดงจุดต่อของชิ้นส่วนโครงสร้าง และตัวเลขในเครื่องหมาย ( ) แสดงหมายเลขของชิ้นส่วนย่อย สะพานขึงจะมีจำนวนจุดต่อและชิ้นส่วนย่อยเหมือนแบบแผ่กระจายหรือแบบพิณตั้ง ดังแสดงใน Figure 4



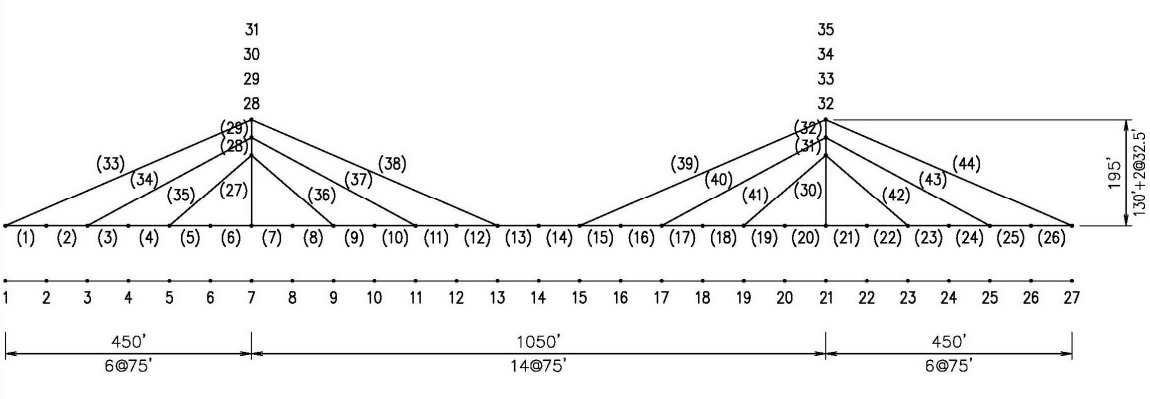


Figure 4 Node and Element of Cable-Stayed Bridge

สำหรับหน้าตัดคานสะพานมีลักษณะเป็นรูปกล่องสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Box Section) โดยมีแผ่นเหล็กด้านบน (Deck Plate) หนา 0.375 นิ้ว และแผ่นเหล็กด้านล่าง (Bottom Plate) หนา 0.75 นิ้ว ในส่วนด้านเอียงใช้แผ่นเหล็กหนา 0.75 นิ้ว แผ่นเหล็กเอวภายใน (Interior Web Plate) หนา 0.375 นิ้ว และแผ่นเหล็กเอวภายนอก (External Web Plate) หนา 0.75 นิ้ว ส่วนของคานซี่เหล็ก (Rib) ด้านบนหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมคางหมูวางเรียงในแนวสะพาน และติดกับแผ่นเหล็กด้านบน โดยระยะห่างระหว่างซี่เหล็กเท่ากับ 12 นิ้ว และใช้แผ่นเหล็กหนา 5/16 นิ้ว ซึ่งมีความกว้างที่ด้านบน และความกว้างที่ด้านล่าง และความสูงเท่ากับ 12 นิ้ว, 6 นิ้ว และ 12 นิ้ว ตามลำดับ ในส่วนของคานซี่เหล็กด้านล่างวางเรียงในแนวเดียวกันกับที่แผ่นเหล็กด้านเอียง โดยคานซี่เหล็กรูปตัวที (T-Section Rib) บนแผ่นเหล็กด้านล่างเป็นเหล็กขนาด WT 12 x 55 ระยะห่างระหว่างคานซี่เหล็ก 24 นิ้ว และด้านเอียงเป็นเหล็กขนาด WT 7 x 15 ระยะห่างระหว่างคานซี่เหล็ก 24 นิ้ว ความลึกของคานหน้าตัด 96 นิ้ว หน้าตัดสะพานประกอบด้วยสี่ช่องจราจร และมีราวป้องกันสองแนวสำหรับป้องกันเสาสูง และเคเบิลจากการถูกรถชน ในส่วนของราวป้องกันอีกสองแนวจะวางแต่ละข้างของสะพาน โดยราวป้องกันวางบนขอบสะพานที่มีขนาดกว้างหนึ่งฟุต และหนาหนึ่งฟุต โดยมีผิวจราจรแอสฟัลท์หนาสองนิ้ว ดังแสดงใน Figure 5

สำหรับหน้าตัดของเสาสูงมีลักษณะเป็นกล่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular Box Section) ด้านที่ตั้งฉากกับช่องจราจรกว้าง 72 นิ้ว และด้านที่ขนานกับช่องจราจรกว้าง 96 นิ้ว ภายในมีแผ่นเหล็กหนาหนึ่งนิ้ววางตั้งฉากกับช่องจราจรที่ระยะห่าง 24 นิ้ว และใช้แผ่นเหล็กหนาหนึ่งนิ้ววางขนานกับช่องจราจรที่ระยะห่าง 24 นิ้ว เช่นเดียวกัน และมีแผ่นเหล็กเสริมกำลังตามขวาง (Transverse Stiffener) วางห่างกัน 13 ฟุต ตลอดความสูงของเสาสูง ดังแสดงใน Figure 6

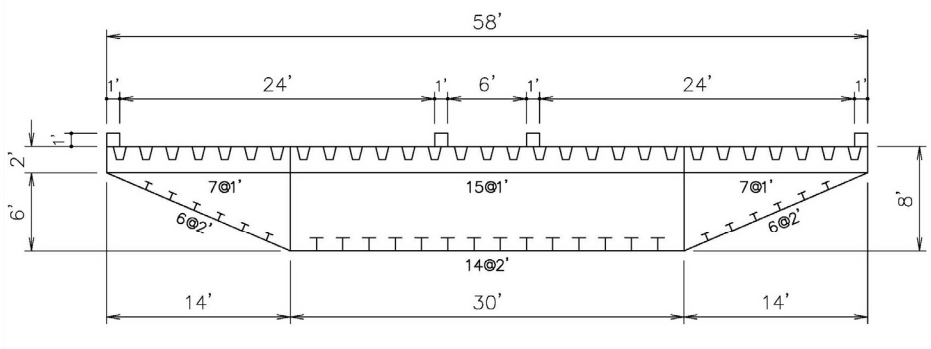


Figure 5 Bridge Deck Cross Section

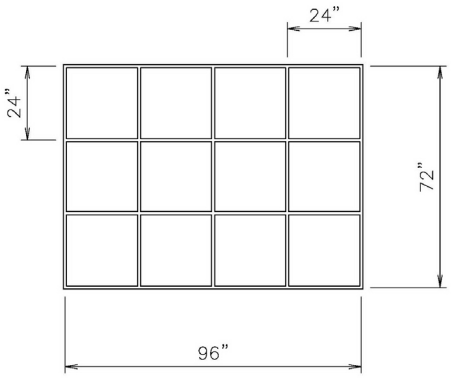


Figure 6 Pylon Cross Section

คุณสมบัติของหน้าตัดคานสะพาน และหน้าตัดเสาสูงดังนี้

- พื้นที่หน้าตัดของคานสะพาน	=	1,462	นิ้ว^2
- โมเมนต์ความเฉื่อยของคานสะพานรอบแกนประธานในแนวราบ	=	2,262,725	นิ้ว^4
- โมเมนต์หน้าตัดด้านบนของคานสะพานรอบแกนประธานในแนวราบ	=	46,910	นิ้ว^3
- โมเมนต์หน้าตัดด้านล่างของคานสะพานรอบแกนประธานในแนวราบ	=	47,373	นิ้ว^3
- โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กคานสะพาน	=	28 x 10^6	ปอนด์/นิ้ว^2
- พื้นที่หน้าตัดของเสาสูง	=	744	นิ้ว^2
- โมเมนต์ความเฉื่อยของเสาสูงรอบแกนประธานหลัก	=	709,662	นิ้ว^4
- โมดูลัสหน้าตัดของเสาสูงรอบแกนประธานหลัก	=	14,785	นิ้ว^3
- โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสาสูง	=	28 x 10^6	ปอนด์/นิ้ว^2

สำหรับเคเบิลมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่น 28 x 10^6 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และน้ำหนัก 490 ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต รวมกับน้ำหนักของวัสดุป้องกันสนิม 12 ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต โดยยอมให้เกิดหน่วยแรงดึง (Tensile Stress) ในเคเบิลไม่เกิน 100 กิโลปอนด์ต่อตารางนิ้ว โดยมีพื้นที่หน้าตัดดังนี้

- พื้นที่หน้าตัดของเคเบิลหมายเลข 33, 38, 39 และ 44	=	90	นิ้ว^2
- พื้นที่หน้าตัดของเคเบิลหมายเลข 34, 37, 40 และ 43	=	60	นิ้ว^2
- พื้นที่หน้าตัดของเคเบิลหมายเลข 35, 36, 41 และ 42	=	30	นิ้ว^2

ผลการวิเคราะห์

ผลการวิเคราะห์สะพานขึงทั้งสามรูปแบบคำนวณมาจากเส้นอิทธิพล (Influence Lines) ของสะพานขึงดังกล่าว ได้ค่าแรงตามแนวแกน แรงเฉือน และโมเมนต์ดัดสูงสุด ดังแสดงใน Table 1

หมายเหตุ: เนื่องจากโครงสร้างสะพานขึงระนาบเดียวสามช่วงมีลักษณะสมมาตรจึงแสดงค่าแรงภายในสูงสุด ในตารางเพียงข้างเดียว

(Type)	Radiating	(Harp)	(Fan)
Cable	**Internal Forces (Element)**	**Internal Forces (Element)**	**Internal Forces (Element)**
Thrust (kip)	-4.05907 (37)	-4.44814 (37)	-4.15206 (37)
Girder	**Internal Forces (Element)**	**Internal Forces (Element)**	**Internal Forces (Element)**
Thrust (kip)	7.18586 (7)	9.25924 (8)	8.50196 (7)
Shear (kip)	0.86952 (7)	-1.87578 (6)	0.94455 (7)
Positive Bending Moment (kip-ft)	128.08579 (7)	222.42488 (7)	148.71317 (7)
Negative Bending Moment (kip-ft)	-174.02632 (14)	-173.37853 (14)	-176.69266 (14)
Pylon	**Internal Forces (Element)**	**Internal Forces (Element)**	**Internal Forces (Element)**
Thrust (kip)	10.77404 (27)	8.89814 (27)	10.43857 (27)
Shear (kip)	0.29235 (27)	2.01585 (27)	0.74727 (27)
Bending Moment (kip-ft)	56.98188 (27)	139.27763 (27)	86.45139 (27)

Table 1 Analysis Results for Three types of Cable-Stayed Bridge

หมายเหตุ:

1. แรงตามแนวแกนบวก หมายถึง แรงดึง, แรงตามแนวแกนลบ หมายถึง แรงอัด

2. แรงเฉือนบวก หมายถึง แรงเฉือนขึ้น, แรงเฉือนลบ หมายถึง แรงเฉือนลง

3. โมเมนตัดบวก หมายถึง โมเมนต์ที่ทำให้เกิดแรงดึงด้านล่าง ของคานสะพาน และด้านขวาของเสาสูง, โมเมนตัดลบ หมายถึง โมเมนต์ที่ทำให้เกิดแรงดึงด้านบน ของคานสะพาน และด้านซ้ายของเสาสูง

4. ตัวเลขในวงเล็บ หมายถึง ชิ้นส่วนย่อยในสะพานขึง

สรุป

จากผลการเปรียบเทียบพบว่าสำหรับคานสะพาน แรงตามแนวแกนสูงสุดเกิดขึ้นในชิ้นส่วนที่ 8 ของสะพานขึงแบบพิณตั้ง แรงเฉือนสูงสุดเกิดขึ้นในชิ้นส่วนที่ 6 ของสะพานขึงแบบพิณตั้ง และโมเมนต์ดัดสูงสุดบวกและลบ เกิดขึ้นในชิ้นส่วนที่ 7 ของสะพานขึงแบบพิณตั้ง และเกิดขึ้นในชิ้นส่วนที่ 14 ของสะพานขึงแบบพัดตามลำดับ สำหรับเสาสูงแรงตามแนวแกนสูงสุดเกิดขึ้นในชิ้นส่วนที่ 27 ของสะพานขึงแบบแผ่กระจาย แรงเฉือนสูงสุดเกิดขึ้นในชิ้นส่วนที่ 27 ของสะพานขึงแบบพิณตั้ง และโมเมนต์ดัดสูงสุดเกิดขึ้นในชิ้นส่วนที่ 27 ของสะพานขึงแบบพิณตั้ง ในส่วนเคเบิลแรงดึงสูงสุดเกิดขึ้นในชิ้นส่วนที่ 37 ของสะพานขึงแบบพิณตั้ง

เอกสารอ้างอิง

นราธิป ดีแก้ว. 2545. **เส้นอิทธิพลสำหรับแรงปฏิกิริยา แรงตามแนวแกน แรงเฉือน และโมเมนต์ดัดของคานโค้งตั้งอินดีเทอร์มิเนท**. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร.

สมโพธิ์ วิวิธเกยูรวงศ์. 2550. **การวิเคราะห์โครงสร้างโดยวิธีแมทริกซ์**. พิมพ์ครั้งที่ 3. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร.

สมโพธิ์ วิวิธเกยูรวงศ์. 2557. **คู่มือการใช้โปรแกรม Bridge III การวิเคราะห์สะพานต่อเนื่องสามช่วงที่มีหน้าตัดเปลี่ยนแปลงตามความยาว**. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร.

สมโพธิ์ วิวิธเกยูรวงศ์. 2558. **คู่มือการใช้โปรแกรม PC Bridge III Version 2.1 การออกแบบสะพานคอนกรีตอัดแรงต่อเนื่องสามช่วงที่มีหน้าตัดเปลี่ยนแปลง**. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร.

Sompothi Vivithkeyoonvong. 1978. **An Optimization Design of Cable-Stayed Bridge**. Ph.D. Thesis, Brigham Young University, United States of America.

Larry Nyhoff, Sanford Leestma. 1995. **Fortran 77 and Numerical Methods for Engineers and Scientists**. Calvin College, United States of America.

Sompothi Vivithkeyoonvong. 2002. **Classical Methods in Structural Analysis**. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok.

ผลของการใช้สัญญาณอัตโนมัติที่ที่หยุดรถระหว่างสถานีสระแก้วและสถานีวัฒนานคร ต่อความจุทางสูงสุดของทางรถไฟทางเดี่ยว

Effects of Utilizing Automatic Signals at Stops between Sa Kaeo and Watthana Nakhon Stations to Ultimate Capacities of a Single Track Railway

สุรพล เอี่ยมสอาด[1,2] วิรุณศักดิ์ สันติเพ็ชร์[1] เอกชัย ศิริกิจพาณิชย์กูล[1] และ **วิชัย ศิวะโกศิษฐ**[1,3*]

Surapol Eiamsaard[1,2], Wiroonsak Santipach[1], Ackchai Sirikijpanichkul[1] and Wichai Siwakosit[1,3*]

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์ผลจากการใช้ระบบอาณัติสัญญาณชนิดสัญญาณไฟสีสามท่า และการใช้สัญญาณอัตโนมัติ ต่อความจุทางสูงสุดของทางรถไฟทางเดี่ยว ในกรณีที่มีการเดินรถในช่วงคอขวดระหว่างสถานีสระแก้ว และ สถานีวัฒนานคร ในเส้นทางคลอง 19 - อรัญประเทศ ในแบบรูปต่าง ๆ โดยพิจารณารถไฟสามประเภท ได้แก่ รถไฟท่องเที่ยว รถโดยสาร และ รถสินค้า และทิศทางการเดินรถทั้งแบบทิศทางเดียวกัน และทิศทางตรงข้ามกัน การคำนวณค่าความจุทางสูงสุดสามารถทำได้โดยใช้กราฟระยะทาง-เวลาของขบวนรถไฟตามแบบรูป และความสำคัญในการเดินรถที่กำหนดให้ โดยระบบอาณัติสัญญาณแบบตอนอัตโนมัติจะมีผลต่อการเพิ่มความจุทางในกรณีที่มีการเดินรถในทิศเดียวกัน แต่จะไม่มีผลต่อการเดินรถในทิศตรงข้ามกัน ความจุทางมีค่าสูงสุดที่ 7.90 ขบวนต่อชั่วโมง และที่ 2.85 ขบวนต่อชั่วโมงในกรณีที่เดินรถในทิศทางเดียวกันโดยใช้ระบบตอนอัตโนมัติ และ ระบบตอนสมบูรณ์ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงผลกระทบเชิงบวกต่อความจุทางสูงสุดจากระบบสัญญาณไฟสีอย่างมีนัยสำคัญ

ABSTRACT

This paper presents an analysis of effects of utilizing a 3 aspect color light signalling system with automatic signals to ultimate capacities of a single track railway at the bottleneck section between Sa Kaeo and Watthana Nakhon stations on the Klong 19 - Aranyaprathet corridor with different patterns. Special tourism train, passenger train, and freight train along with operation in the same and the opposite directions are considered. The ultimate capacities can be calculated by using distance-time curves according to operation patterns and priorities. The automatic block system has positive effects on capacities for the same direction operation but does not provide additional benefit to the opposite direction operation. The ultimate capacities are 7.90 and 2.85 trains per hour for automatic block system and absolute block system, respectively, which clearly show the positive effect from the color light system to capacities of this single track railway.

Key words: Color Light Signal, Automatic Signal, State Railway of Thailand, Ultimate Capacity, Single Track Railway

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

[1]Kasetsart University Rail Engineering Center, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

[2]Signalling and Telecommunication Department, State Railway of Thailand, Bangkok 10330

[3]President, Institution of Railway Signal Engineers, Thailand Section, Mech.Eng.Building, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

ทางรถไฟสายตะวันออกช่วงสถานีชุมทางคลองสิบเก้า ถึง สถานีอรัญประเทศ เป็นทางรถไฟชนิดทางเดี่ยวโดยมีทางหลีกอยู่ตามสถานีในแนวเส้นทาง ระยะห่างระหว่างสถานีที่มีทางหลีกที่ยาวที่สุด หรือช่วงคอขวด (Bottle Neck) อยู่ในช่วงระหว่างสถานีสระแก้ว (Sa Kaeo) และ สถานีวัฒนานคร (Watthana Nakhon) มีระยะทาง 28.6 กิโลเมตร โดยระหว่างสถานี มีที่หยุดรถไฟสามจุดได้แก่ ศูนย์ราชการจังหวัดสระแก้ว (Sa Kaeo Provincial Office) ท่าเกษม (Tha Kasem) และ ห้วยโจด (Huai Chot) โดยมีระยะห่าง และ กราฟความเร็วต่อระยะทาง (Speed Profile) ของขบวนรถไฟดีเซลรางที่ให้บริการในช่วงสถานี ตามรูปที่ 1 ซึ่งการให้บริการจะมีการหยุดรถตามที่หยุดรถไฟ และมีความเร็วเฉลี่ย 65.72 km/h ในการให้บริการระหว่างสถานีสระแก้วและสถานีวัฒนานคร ปัจจุบันระบบอาณัติสัญญาณเป็นชนิดตราทางสะดวก โดยใช้ระบบตอนสมบูรณ์ (Absolute Block) การรถไฟแห่งประเทศไทย มีโครงการที่จะติดตั้งระบบสัญญาณไฟสี (Color Light Signal) และระบบบังคับสัมพันธ์แบบคอมพิวเตอร์ (Computer Based Interlocking : CBI) ในเส้นทางคลอง 19 ถึงอรัญประเทศในอนาคต (รฟท, 2561)

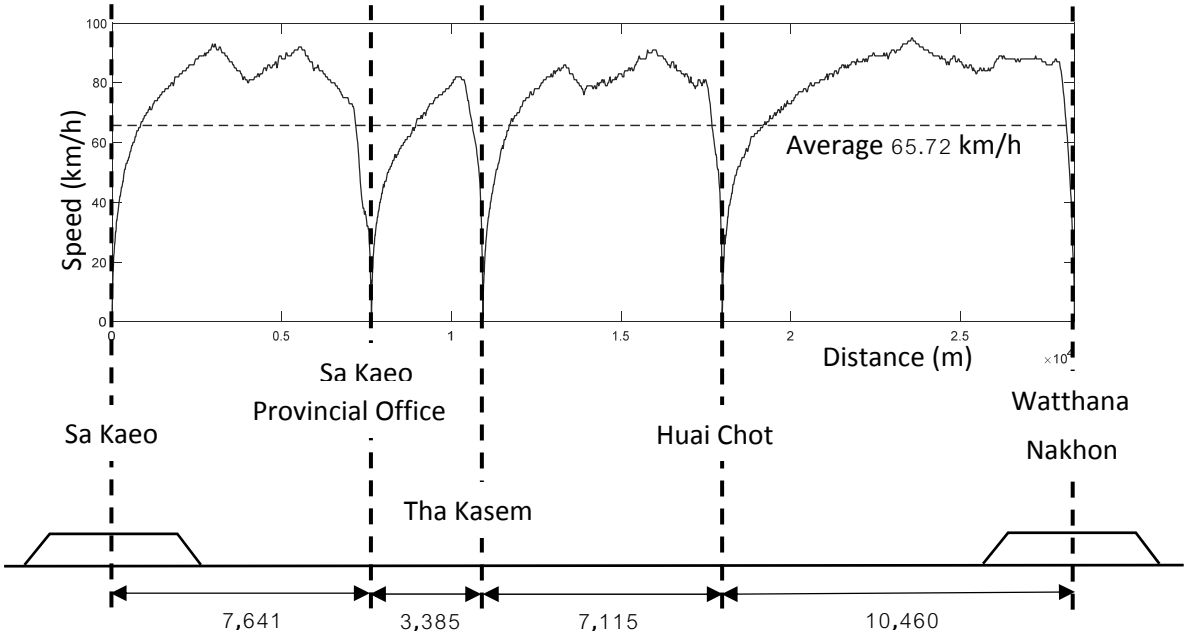


Figure 1 Train Speed Profile and Distance of Stops between Sa Kaeo and Watthana Nakhon Stations

ประเทศไทย และ ประเทศกัมพูชา จะเริ่มเปิดการเดินรถระหว่างสถานีอรัญประเทศ และ สถานีปอยเปตในปี พ.ศ. 2562 โดยเป็นการเดินรถระหว่างประเทศ ซึ่งในอนาคตอาจมีปริมาณขบวนรถไฟที่เพิ่มขึ้นในแนวเส้นทางสายคลอง 19-อรัญประเทศ และอาจมีรถไฟให้บริการในแนวเส้นทางสามประเภท ได้แก่ 1.รถไฟท่องเที่ยว ความเร็วเฉลี่ย 90 km/h ซึ่งไม่หยุดที่ที่หยุดรถระหว่างสถานี 2.รถโดยสารที่มีลักษณะการเดินรถตามรูปที่ 1 และ 3.รถสินค้า ความเร็วเฉลี่ย 50 km/h ซึ่งไม่หยุดที่ที่หยุดรถระหว่างสถานีเช่นเดียวกับรถไฟท่องเที่ยว บทความนี้เป็นการวิเคราะห์ผลจากการใช้ระบบอาณัติสัญญาณชนิดสัญญาณไฟสี และการใช้สัญญาณอัตโนมัติ (Automatic Signal) ต่อความจุทางสูงสุด (Ultimate Capacities) ของทางรถไฟทางเดี่ยว ในกรณีที่มีการเดินรถในเส้นทางในลักษณะต่างๆ

อุปกรณ์และวิธีการ

1.ระบบอาณัติสัญญาณ

ระบบอาณัติสัญญาณที่ใช้ในเส้นทางปัจจุบันเป็นระบบตอนสมบูรณ์ที่ใช้ลูกตราทางสะดวก มีหลักการสำคัญคือ อนุญาตให้มีรถไฟเพียงขบวนเดียว ในแต่ละตอน (Block) ในแต่ละช่วงเวลาที่มีการเดินรถในตอนนั้น ตอน คือช่วงระหว่างสถานีที่มีทางหลีก (Siding) ซึ่งเป็นปัจจัยที่กำหนดความยาวของตอน เช่นระหว่างสถานีสระแก้ว และ สถานีวัฒนานคร มีความยาวตอน 28.6 km ดังนั้น จะมีรถไฟเพียงขบวนเดียวที่เดินรถในตอนได้ในช่วง 28.6 km นั้น โดยใช้เวลาในการเดินรถ 1,514 วินาที หรือ 25.23 นาที พนักงานขับรถไฟจะต้องได้รับตราทางสะดวก (Token) จากสถานีตราทางสะดวก (สระแก้ว หรือ วัฒนานคร) ที่เริ่มออกรถ ไปส่งยังสถานีตราทางสะดวก (วัฒนานคร หรือ สระแก้ว) เพื่อให้สามารถเปิดตอนให้กับรถไฟขบวนต่อไปที่จะเดินรถเข้ามาในตอนได้

ระบบอาณัติสัญญาณชนิดสัญญาณไฟสีสามท่า (3 Aspect Color Light Signal) เป็นระบบอาณัติสัญญาณที่ใช้สัญญาณไฟสีเขียว หรือท่าอนุญาต (Proceed) สีเหลืองหรือท่าระวัง (Warning) และ สีแดงหรือท่าห้าม (Danger) ทำหน้าที่ให้สัญญาณแก่พนักงานขับรถไฟแทนการใช้สัญญาณประจำที่ชนิดอื่น และ ใช้ระบบบังคับสัมพันธ์แบบคอมพิวเตอร์แทนการใช้ระบบบังคับสัมพันธ์เชิงกล รวมถึงมีระบบตรวจสอบตำแหน่งของรถไฟโดยใช้วงจรไฟตอน (Track Circuit) โดยพนักงานขับรถไฟไม่ต้องรับส่งตราทางสะดวกในเส้นทางที่ใช้ระบบนี้ ระบบสัญญาณไฟสีสามท่า สามารถใช้งานกับเสาสัญญาณอัตโนมัติ ที่ติดตั้งระหว่างสถานีทางสะดวก เพื่อทำการแบ่งความยาวของตอนให้สั้นลง เรียกตอนที่ถูกแบ่งนี้ว่า ตอนอัตโนมัติ (Automatic Block) ซึ่งมีการกำหนดหลักการทำงานไว้ในข้อกำหนดการเดินรถของการรถไฟแห่งประเทศไทย (รฟท, 2549) ซึ่งในตอนที่มีการใช้งานเสาสัญญาณอัตโนมัติ จะทำให้สามารถเพิ่มจำนวนของขบวนรถไฟในตอนระหว่างสถานีได้มากขึ้น เนื่องจากตอนถูกแบ่งให้สั้นลง และ มีการให้สัญญาณแก่พนักงานขับรถให้เดินรถตามท่าสัญญาณได้ในแต่ละตอนอัตโนมัติ (Landex *et al*., 2006) เช่น ระหว่างสถานีทางสะดวก คือ สถานีสระแก้ว และ สถานีวัฒนานคร หากมีการติดตั้งเสาสัญญาณอัตโนมัติที่ที่หยุดรถทั้ง 3 ที่ ได้แก่ ศูนย์ราชการจังหวัดสระแก้ว ท่าเกษม และ ห้วยโจด จะทำให้เกิดตอนอัตโนมัติขึ้น 3 ตอน ในแต่ละทิศทางการเดินรถ ทำให้สามารถเพิ่มขบวนรถไฟที่เดินรถระหว่างสถานีทางสะดวกได้มากกว่าการใช้ระบบตอนสมบูรณ์

2.การวิเคราะห์ความจุทางสูงสุด

ความจุทางสูงสุด (Ultimate Capacity) หมายถึงความสามารถของเส้นทางรถไฟที่รองรับจำนวนขบวนรถไฟจำนวนมากที่สุดในช่วงเวลาที่กำหนด การคำนวณความจุทางเดี่ยวมีวิธีการคำนวณได้หลายวิธี เช่น การใช้วิธีการคำนวณตาม UIC 406 (Jamili, 2018) หรือ วิธีเชิงคำนวณทางคอมพิวเตอร์ (Feng et al, 2017) โดยความจุสูงสุดของทางรถไฟทางเดี่ยวอาจอยู่ในรูปสมการ (Janić,1984)

$$\mu = \frac{T}{t_{fm}+\bar{t}+t_{zn}} \qquad (1)$$

โดย μ คือ ความจุทางสูงสุด หน่วยขบวนรถไฟต่อชั่วโมง

T คือ ช่วงเวลาที่กำหนด เช่น 1 ชั่วโมง หรือ 3,600 วินาที

t_{fm} และ t_{zn} คือ ช่วงเวลาเผื่อเหลือเผื่อขาด (Buffer Time) ในหน่วยวินาที ซึ่งในบทความนี้กำหนดให้มีผลรวมเป็นเวลาประมาณ 5 นาที หรือ 300 วินาที

$\bar{t}$ คือ ค่าเฉลี่ยของช่วงเวลาที่น้อยที่สุดที่ขบวนรถไฟที่วิ่งเข้าสู่ช่วงคอขวดของเส้นทางรถไฟในลักษณะต่างๆ

ค่า $\bar{t}$ อาจประเมินได้จากสมการตามลักษณะการเดินรถในทางเดี่ยว (Janić,1984) หรือ ในบทความนี้จะได้พิจารณาค่า $\bar{t}$ โดยตรงจากกราฟระยะทาง-เวลา (Distance-Time Diagram) ของขบวนรถไฟที่เดินรถเข้าสู่ช่วงคอขวดในลักษณะต่างๆ ตามข้อกำหนดการจัดเรียงลำดับความสำคัญ (Priority) ของตารางเวลาการเดินรถของการรถไฟแห่งประเทศไทย

3.แนวทางการศึกษา

บทความนี้จะทำการเปรียบเทียบความจุทางสูงสุดที่เกิดขึ้นกับการเดินรถช่วงคอขวดของทางเดี่ยวระหว่างสถานีสระแก้ว และ สถานีวัฒนานคร โดยพิจารณาจากกรณีที่มีการใช้ระบบตราทางสะดวก (ตอนสมบูรณ์) เปรียบเทียบกับการใช้ระบบสัญญาณไฟสีที่มีการใช้เสาสัญญาณอัตโนมัติที่ที่หยุดรถทั้งสามแห่ง (ตอนอัตโนมัติ) โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบความจุสูงสุดในกรณีที่มีการเดินรถในทิศทางเดียวกัน และ การเดินรถในทิศตรงข้ามกัน มีรถไฟสามชนิด ได้แก่ รถท่องเที่ยว (Tourism Train : T) รถโดยสาร (Passenger Train : P) และรถสินค้า (Freight Train : F) Landex A. (Landex *et al*., 2006) ได้แสดงให้เห็นว่าการจัดเรียงการเดินรถโดยให้รถเร็วเดินก่อนรถช้า ส่งผลบวกต่อการเดินรถโดยรวม ซึ่งในการศึกษานี้จะกำหนดให้รถไฟที่มีความเร็วเฉลี่ยในการเดินรถสูงกว่า มีความสำคัญในการเดินรถสูงกว่า เพื่อจะได้ไม่ต้องมีการหยุดรอกัน และประหยัดเวลาในการเดินรถให้มากที่สุด ดังนั้นในบทความนี้ ลำดับการเดินรถในทิศทางเดียวกัน (สระแก้ว-วัฒนานคร และ วัฒนานคร-สระแก้ว) จะมีการกำหนดแบบรูป (Pattern) ดังนี้

TT PP FF TP PF TF TPF

และการเดินรถในทิศตรงข้ามกันจะมีการกำหนดแบบรูปดังนี้

TT PP FF TP และ PT PF และ FP TF และ FT

ซึ่งในแต่ละกรณีจะมีการพิจารณาค่า $\bar{t}$ จากกราฟระยะทาง-เวลา ตามที่จะแสดงในผลการทดลองต่อไป

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

รูปที่ 2 แสดงกราฟระยะทาง-เวลา ของรถไฟสามชนิดที่มีการเดินรถตามลำดับความสำคัญกรณีที่ใช้ระบบตอนสมบูรณ์ในแบบรูป TPF ซึ่งเวลาที่ใช้เดินรถท่องเที่ยว รถโดยสาร และ รถสินค้า มีค่า 1,113 1,514 และ 2,004 วินาทีตามลำดับ ซึ่งในกรณีที่ใช้ระบบตอนสมบูรณ์ เวลาที่ใช้ในการเดินรถของรถชนิดเดียวกันในทิศทางเดียวกัน หรือในทิศตรงข้ามกันจะมีเวลาที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งเมื่อรวมกับเวลาเผื่อเหลือเผื่อขาดแล้ว จะถือว่าใช้เวลาเท่าๆ กันได้ โดยเส้นประทางด้านขวาสุดแสดงถึงกราฟระยะทาง-เวลา ของรถท่องเที่ยวที่แสดงการเริ่มเดินรถในแบบรูปที่ซ้ำกันต่อไป เช่น ในกรณีแบบรูป TPF จะใช้เวลาเดินรถตามกันทั้งสองทิศทางรวมเท่ากับ 4,631 วินาที หรือ ในกรณีแบบรูป TP และ PT จะใช้เวลาเดินรถตามกัน หรือ เดินรถตรงข้ามกันทั้งสองทิศทางรวมเท่ากับ 2,627 วินาที เป็นต้น

รูปที่ 3 แสดงกราฟระยะทาง-เวลา ของรถไฟสามชนิดที่มีการเดินรถตามลำดับความสำคัญกรณีที่ใช้ระบบตอนอัตโนมัติในแบบรูป TPF ซึ่งการใช้ตอนอัตโนมัติ จะทำให้รถไฟขบวนวิ่งเข้าสู่ตอนในลำดับถัดไปสามารถวิ่งเข้าสู่ตอนได้เมื่อรถไฟขบวนก่อนหน้า วิ่งเข้าสู่ตอนถัดไปได้แล้ว โดยเวลาที่รถไฟ P T และ F ใช้ในการ

วิ่งผ่านที่หยุดรถศูนย์ราชการจังหวัดสระแก้ว ในทิศทางวิ่งจากสถานีสระแก้วไปยังสถานีวัฒนานครมีค่า 305.8 418 และ 551 วินาทีตามลำดับ และ เวลาที่รถไฟ P T และ F ใช้ในการวิ่งผ่านที่หยุดรถห้วยโจด ในทิศทางวิ่งจากสถานีวัฒนานครไปยังสถานีสระแก้วมีค่า 394.3 473 และ 709.7 วินาทีตามลำดับ ซึ่งเวลาที่แตกต่างกันในแต่ละทิศทางเกิดจากการกำหนดตำแหน่งของเสาสัญญาณอัตโนมัติตามที่หยุดรถซึ่งมีระยะทางไม่เท่ากัน โดยเวลาที่แสดงในรูปที่ 3 สามารถนำมาใช้ในการคำนวณกรณีที่มีการเดินรถตามกันโดยใช้ตอนอัตโนมัติในแบบรูป TT PP FF TP PF และ TPF และใช้รูปที่ 4 ในการคำนวณกรณีที่มีการเดินรถตามกันโดยใช้ตอนอัตโนมัติในแบบรูป TF

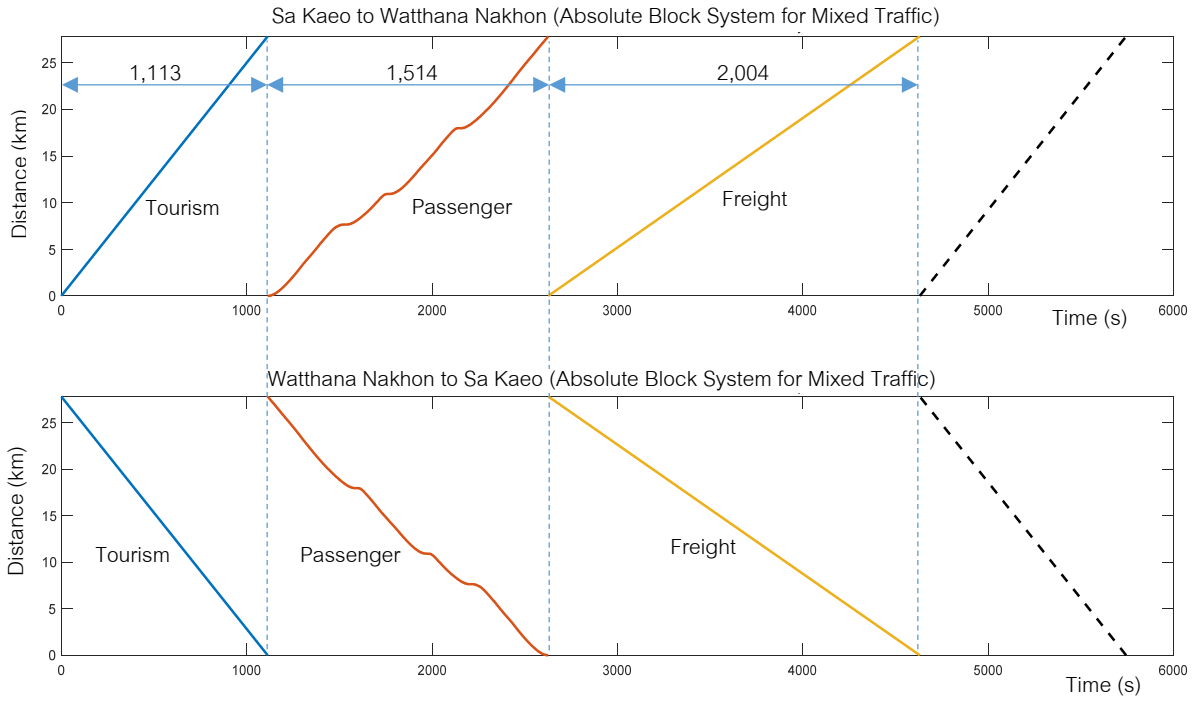


Figure 2 Distance-Time Diagrams for Absolute Block System for Mixed Traffic in both Directions

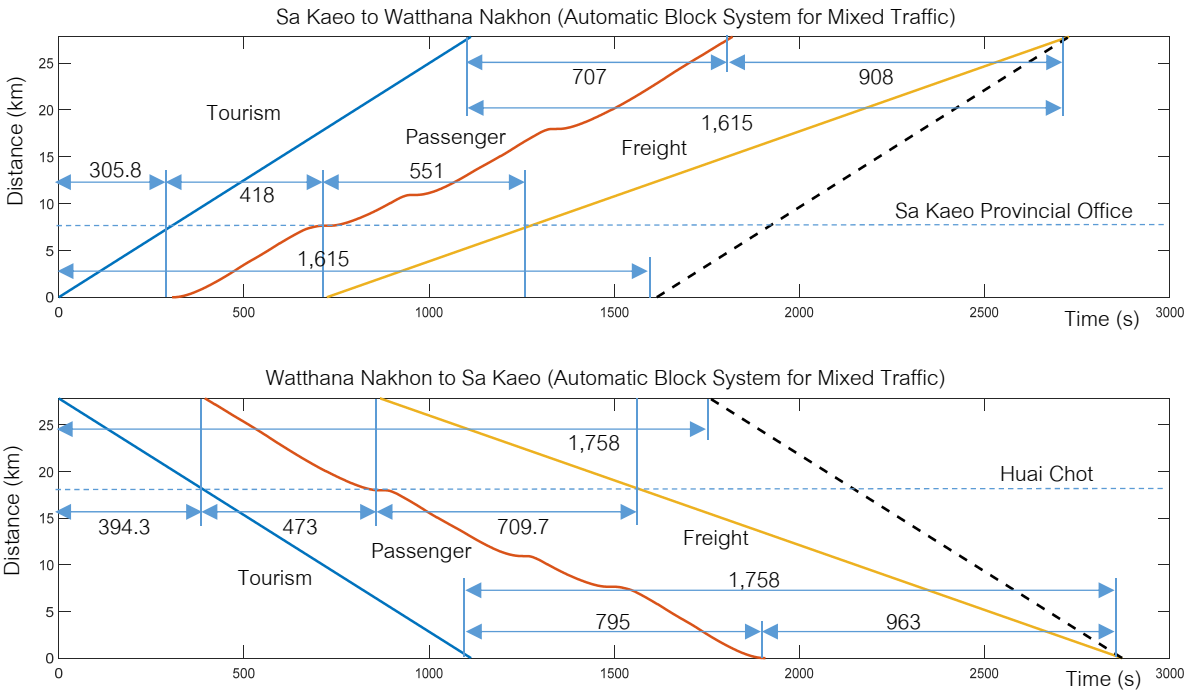


Figure 3 Distance-Time Diagrams for Automatic Block System for Mixed Traffic in both Directions

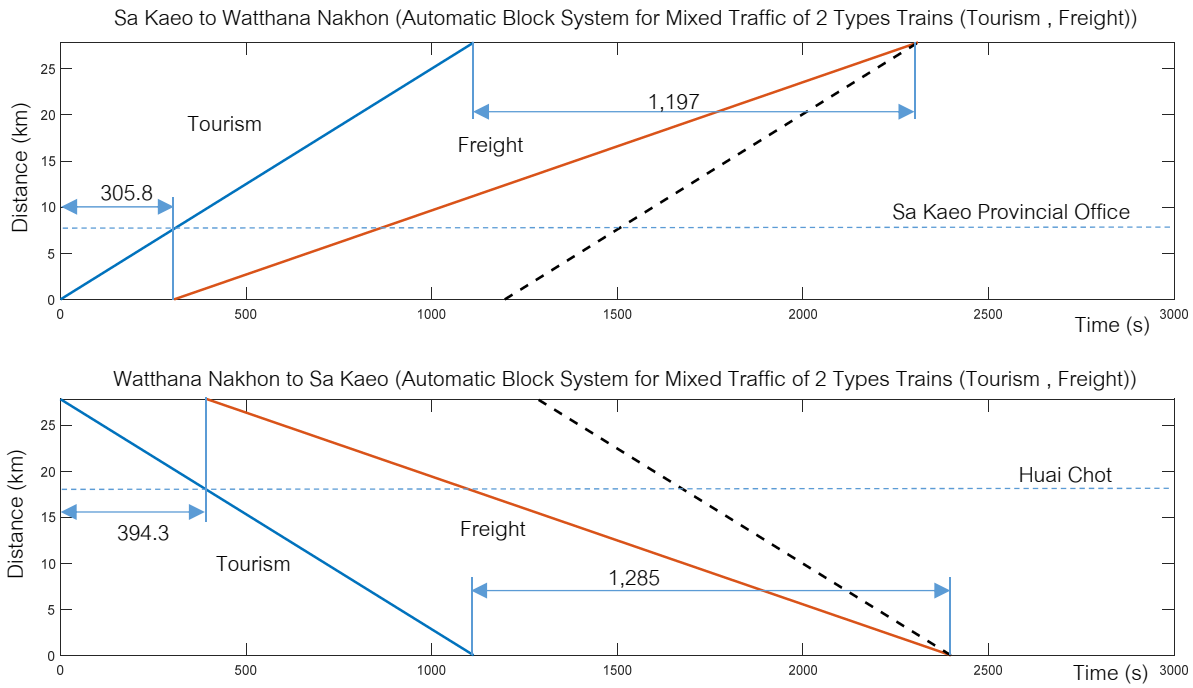


Figure 4 Distance-Time Diagrams for Automatic Block System for Mixed Traffic of 2 Types of Trains in both Directions

Table 1 $\bar{t}$ for the Same Directional Patterns

The Same Directional Patterns (s)				
Patterns	Sa Kaeo – Watthana Nakhon		Watthana Nakhon – Sa Kaeo	
	Absolute Block	Automatic Block	Absolute Block	Automatic Block
TT	2,226	612	2,226	789
PP	3,028	836	3,028	946
FF	4,008	1,102	4,008	1,419
TP	2,627	707	2,627	795
PF	3,518	908	3,518	963
TF	3,117	1,197	3,117	1,285
TPF	4,631	1,615	4,631	1,758

ส่วนการเดินรถในทิศตรงข้ามกันกรณีที่ใช้ระบบตอนอัตโนมัติ จะมีเวลาที่ใช้เท่ากับการใช้ระบบตอนสมบูรณ์ ในทุกแบบรูป เนื่องจากไม่สามารถใส่ขบวนรถเข้าไปเพิ่มได้ ต้องรอหลีกขบวนรถที่วิ่งเข้าสู่ตอนให้ผ่านทางหลีกไปก่อน

Table 2 $\bar{t}$ for the Opposite Directional Patterns

The Opposite Directional Patterns (s)	Absolute Block and Automatic Block
TT	2,226
PP	3,028
FF	4,008
TP and PT	2,627
PF and FP	3,518
TF and FT	3,117

Table 3 μ for the Same Directional Patterns

The Same Directional Patterns (train/h*)				
Patterns	Sa Kaeo – Watthana Nakhon		Watthana Nakhon – Sa Kaeo	
	Absolute Block	Automatic Block	Absolute Block	Automatic Block
TT	2.85	7.90	2.85	6.61
PP	2.16	6.34	2.16	5.78
FF	1.67	5.14	1.67	4.19
TP	2.46	7.15	2.46	6.58
PF	1.89	5.96	1.89	5.70
TF	2.11	4.81	2.11	4.54
TPF	2.19	5.64	2.19	5.25

*Add 5 minutes in each case to compensate for the in and out of the train.

Table 4 μ for the Opposite Directional Patterns

The Opposite Directional Patterns (train/h*)	Absolute Block and Automatic Block
TT	2.85
PP	2.16
FF	1.67
TP and PT	2.46
PF and FP	1.89
TF and FT	2.11

*Add 5 minutes in each case to compensate for the in and out of the train.

ตารางที่ 1 แสดงเวลา $\bar{t}$ ที่คำนวณได้กรณีที่ใช้ระบบตอนสมบูรณ์และระบบตอนอัตโนมัติ ในการเดินรถในทิศทางเดียวกันตามแบบรูปที่กำหนดไว้ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเวลา $\bar{t}$ ที่คำนวณได้ในกรณีตอนอัตโนมัติมีค่าที่ลดลงจากกรณีตอนสมบูรณ์อย่ามีนัยสำคัญ ตารางที่ 2 แสดงเวลา $\bar{t}$ กรณีที่มีการเดินรถในทิศตรงข้ามกันซึ่งไม่มีค่าที่แตกต่างกันทั้งสองกรณี ตารางที่ 3 แสดงค่าความจุทางสูงสุดกรณีที่ใช้ระบบตอนสมบูรณ์และระบบตอนอัตโนมัติในการเดินรถในทิศทางเดียวกันตามแบบรูปที่กำหนดไว้ ซึ่งมีการคำนวณตามสมการที่ 1 โดยใช้เวลาเผื่อเหลือเผื่อขาดที่ 300 วินาทีในการเดินรถแต่ละแบบรูป ตารางที่ 4 แสดงค่าความจุทางสูงสุดกรณีที่มีการเดินรถในทิศตรงข้ามกัน ซึ่งมีค่าเท่ากันทั้งกรณีที่ใช้ระบบตอนสมบูรณ์และระบบตอนอัตโนมัติ ซึ่งค่าความจุสูงสุดเกิดขึ้นในแบบรูป TT ที่ 7.90 ขบวนต่อชั่วโมง กรณีเดินรถทิศทางเดียวกัน และใช้ระบบตอนอัตโนมัติ เทียบกับกรณีแบบรูปเดียวกันที่ใช้ระบบตอนสมบูรณ์ที่ 2.85 ขบวนต่อชั่วโมง แสดงให้เห็นถึงผลกระทบเชิงบวกจากการใช้ระบบตอนอัตโนมัติต่อความจุทางสูงสุด ในขณะที่ความจุทางที่มีค่าน้อยที่สุดเกิดขึ้นในกรณีเดินรถในทิศตรงข้ามกันในแบบรูป FF ที่ 1.67 ขบวนต่อชั่วโมง โดยมีค่าเท่ากันทั้งแบบตอนสมบูรณ์และแบบอัตโนมัติ

การประเมินค่าความจุทางสูงสุดในกรณีที่มีการใช้แบบรูปในลักษณะผสมกัน สามารถทำได้โดยการให้ค่าน้ำหนักในแต่ละแบบรูปและทำการคำนวณค่าออกมา เช่น กำหนดให้มีการเดินรถโดยใช้ระบบตอนอัตโนมัติกรณีเดินรถในแบบรูป TT ทั้งไปและกลับร้อยละ 20 แบบรูป PF ทั้งไปและกลับร้อยละ 50 และ แบบรูป TPF ทั้ง

ไปและกลับร้อยละ 30 โดยไม่มีการรอหลีก จะคำนวณค่าความจุตามน้ำหนักที่กำหนดได้เป็น 6.00 ขบวนต่อชั่วโมง เป็นต้น

สรุป

การคำนวณค่าความจุทางสูงสุดสามารถทำได้โดยใช้กราฟระยะทาง-เวลาของขบวนรถไฟตามแบบรูปและความสำคัญในการเดินรถที่กำหนดให้ โดยระบบอาณัติสัญญาณแบบตอนอัตโนมัติจะมีผลต่อการเพิ่มความจุทางสูงสุดในช่วงคอขวดในกรณีที่มีการเดินรถในทิศเดียวกัน แต่จะไม่มีผลต่อการเดินรถในทิศตรงข้ามกัน ความจุทางที่มีค่าสูงสุดที่ 7.90 ขบวนต่อชั่วโมง ในกรณีที่เดินรถในทิศทางเดียวกันโดยใช้ระบบตอนอัตโนมัติ และที่ 2.85 ขบวนต่อชั่วโมงในกรณีที่เดินรถในทิศทางเดียวกันโดยใช้ระบบตอนสมบูรณ์ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงผลกระทบเชิงบวกต่อความจุทางสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนบทความขอขอบคุณฝ่ายอาณัติสัญญาณและโทรคมนาคม และ ฝ่ายการเดินรถ การรถไฟแห่งประเทศไทย ศูนย์วิศวกรรมระบบราง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และ ผศ.ดร.ฆนิศา รุ่งแจ้ง นิสิตปริญญาโท และปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ได้ร่วมเก็บข้อมูลในเส้นทางสายตะวันออกในการศึกษาครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

การรถไฟแห่งประเทศไทย. 2561. สัญญาเลขที่ สส./พ.2/2561. **สัญญาว่าจ้าง งานจ้างที่ปรึกษาจัดประกวดราคาพร้อมควบคุมงานก่อสร้าง เส้นทางสายตะวันออก ช่วงสถานีโยทะกา ถึง สถานีคลองลึก ตามโครงการปรับปรุงระบบอาณัติสัญญาณไฟสีทั่วประเทศ**

การรถไฟแห่งประเทศไทย. 2549. **ข้อบังคับและระเบียบการเดินรถ**

Jamili, A. (2018). Computation of practical capacity in single-track railway lines based on computing the minimum buffer times. **Journal of Rail Transport Planning & Management**, 8(2), 91-102.

Feng Li., Gao, Z., Wang, D. Z. W., Liu, R., Tang, T., Wu, J., & Yang, L. (2017). A subjective capacity evaluation model for single-track railway system with δ-balanced traffic and λ-tolerance level. **Transportation Research Part B: Methodological**, 105, 43-66.

Landex A., Kaas A.H. and Hansen S., 2006, **Railway Operation**, DTU, Denmark

Janić M., 1984, Single Track Line Capacity Model, **Transp.Plan.Technol.** 9, 135-151

การพัฒนามือถ่างความละเอียดระดับไมครอนที่ขับเคลื่อนโดยเพียโซอิเล็กทริก สำหรับกระบวนการทดสอบหัวอ่านฮาร์ดดิสก์

Development of a Piezoelectric Micro Gripper for Hard Disk Head Testing Process

วรพงค์ สุทธิศักดิ์ศรี[1] และ ดอน อิศรากร[1*]

Vorapong Sutthisaksri[1] and Don Isarakorn[1*]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนามือถ่างหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ ที่ใช้ในกระบวนการจำลองระยะขจัดที่เกิดขึ้นระหว่างหัวอ่านฮาร์ดดิสก์กับจานแม่เหล็กขณะกำลังทำงาน โดยระบบมือถ่างเดิมใช้กระบอกลมซึ่งหากมีการเปลี่ยนรุ่นของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ที่นำมาทดสอบ ต้องนำชุดขับเคลื่อนออกมาทำการปรับตั้งระยะใหม่ ผู้วิจัยจึงพัฒนาระบบมือถ่างที่ขับเคลื่อนโดยตัวขับเร้าแบบเพียโซอิเล็กทริก ที่สามารถปรับตั้งระยะขจัด ด้วยการป้อนค่าอินพุตที่ต้องการได้ จากผลการทดลองการป้อนอินพุตแบบ ON-OFF ซึ่งเป็นการทดลองที่สอดคล้องกับกระบวนการทดสอบจริง ระบบมือถ่างสามารถทำค่าระยะขจัดได้สูงสุดที่ 20 ไมโครเมตร และเมื่อนำระบบมือถ่างติดตั้งกับกริปเปอร์สามารถทำระยะขจัดได้สูงสุดที่ 12 ไมโครเมตร พบว่าระยะขจัดที่ได้เมื่อเทียบกับสัญญาณอินพุตที่ป้อนเข้าไปเป็นเชิงเส้นเพียงพอที่จะใช้งานจริงได้ ซึ่งทำให้ลดเวลาใช้ที่ใช้ในการปรับตั้ง และลดความผิดพลาดที่เกิดจากขั้นตอนเดิมได้

ABSTRACT

This paper presents the development of gripper used to stretch the suspension of Head Stack Assembly (HSA) for simulating the gap between a read/write head and a platter in a hard disk drive (HDD) manufacturing process. The piezoelectric stack actuator is used to derive the gripper instead of pneumatic actuator in order to make the electrical stretch length adjustment since the stretch length of old gripper is mechanically adjusted making a lot of inconvenience for testing the different version or dimension of HSA. To evaluate to the new gripper, the experiment is performed with driving a piezoelectric stack actuator to change the stretch length of gripper as in the manufacturing process. As the results, at 20 μm of maximum displacement of a piezoelectric stack actuator, the gripper can achieve the maximum stretch length of 12 μm which is a great length to make practical use.

Key Words: Micro Gripper, Piezoelectric transduction, Head stack assembly, Hard disk

[*]Corresponding author; e-mail address: **don.is@kmitl.ac.th**

[1]ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

[1]Department of Instrumentation and Control Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520

คำนำ

ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ในปัจจุบันเป็นส่วนสำคัญส่วนหนึ่งของอุปกรณ์มากมายที่มีการเก็บบันทึกข้อมูล ในการอุตสาหกรรมการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมที่มีความท้าทาย เนื่องจากฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีชิ้นส่วนการทำงานที่สำคัญมากมายหลายส่วน แล้วล้วนแต่เป็นชิ้นส่วนที่มีขนาดเล็กถึงเล็กมากและยังต้องใช้เทคโนโลยีในการผลิตขั้นสูง อีกทั้งหลังจากการผลิตแล้ว ต้องมีขั้นตอนในการทดสอบการทำงานของชิ้นงานแต่ละส่วนเพื่อตรวจสอบความสามารถในการทำงานโดยอ้างอิงตามสเปกได้ หัวอ่านฮาร์ดดิสก์จึงเป็นหนึ่งในชิ้นส่วนที่มีความสำคัญ จำเป็นต้องมีการทดสอบเสมอ และในกระบวนการทดสอบนั้นต้องใช้เครื่องมือทดสอบที่เป็นอุปกรณ์เฉพาะสำหรับการจำลองสถาณการณ์ต่างๆ ของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์

มือถ่างหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญในกระบวนการตรวจสอบหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์หลังจากการผลิต ซึ่งทำหน้าที่ในจำลองการถ่างหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ให้แยกจากจานแม่เหล็กเท่ากับระยะความสูง (z-height) หรือระยะขจัดค่าหนึ่ง ในขณะที่หัวอ่านทำงานในสถานการณ์จริง หัวอ่านฮาร์ดดิสก์แต่ละโมเดลนั้นมีค่าระยะความสูง (z-height) ของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์กับแผ่นจานแม่เหล็กที่สถานการณ์ต่างๆ ไม่เท่ากัน หากเมื่อมีการเปลี่ยนโมเดลทดสอบ จะต้องมีการนำออกมาปรับตั้งระยะใหม่ โดยมือถ่างหัวอ่านฮาร์ดดิสก์แบบเดิม แสดงดัง Figure 1 จะขับเคลื่อนด้วยกระบอกลม ซึ่งมีการทำงานแค่สองระยะคือสูงสุดกับต่ำสุด ไม่สามารถกำหนดที่ระยะอื่นๆ ด้วยตัวกระบอกลมเองได้ จึงต้องใช้ตัวหยุด (stopper) มาคั่นกลไกให้กระบอกลมชักออกตามแค่ระยะที่ต้องการ และในการปรับตั้งตัวหยุดแต่ละครั้งนั้นต้องทำโดยผู้เชี่ยวชาญ เนื่องจากระยะที่ปรับมีความละเอียดระดับไมโครเมตร ซึ่งสามารถตรวจสอบโดยใช้ Optical profiler หากตรวจสอบแล้วระยะที่ได้ผิดเพี้ยนจากค่าที่กำหนด จะต้องทำการปรับใหม่จนกว่าจะได้ค่าที่ต้องการ ขั้นตอนการปรับนั้นแสดงใน Figure 2 อีกทั้งขั้นตอนการนำกลับไปติดตั้งอาจมีการทำให้ระยะที่ปรับไว้เกิดผิดเพี้ยน ต้องนำมาปรับซ้ำอาจทำให้ใช้เวลาในกระบวนการนี้มากเกินที่ควรจะเป็น

เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงนำเสนอการพัฒนามือถ่างหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ที่ขับเคลื่อนโดยเพียโซอิเล็กทริก โดยศึกษาและพัฒนาระบบการขับเคลื่อนให้มีประสิทธิภาพและสามารถควบคุมระยะยืดหดได้ นำมาทดสอบคุณสมบัติ และออกแบบให้สามารถทำงานร่วมกับชิ้นส่วนเดิมอื่นๆ ของระบบได้

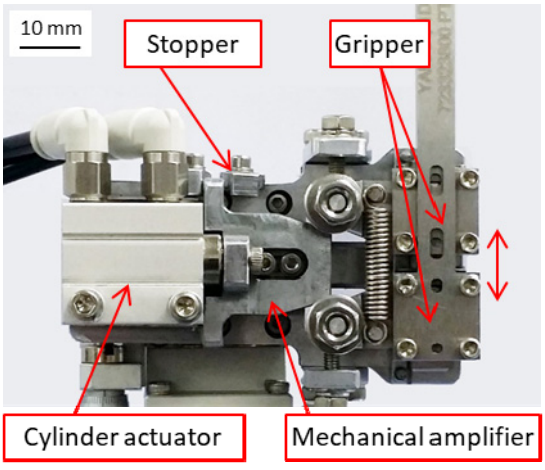


Figure 1 Conventional hard disk head testing tool

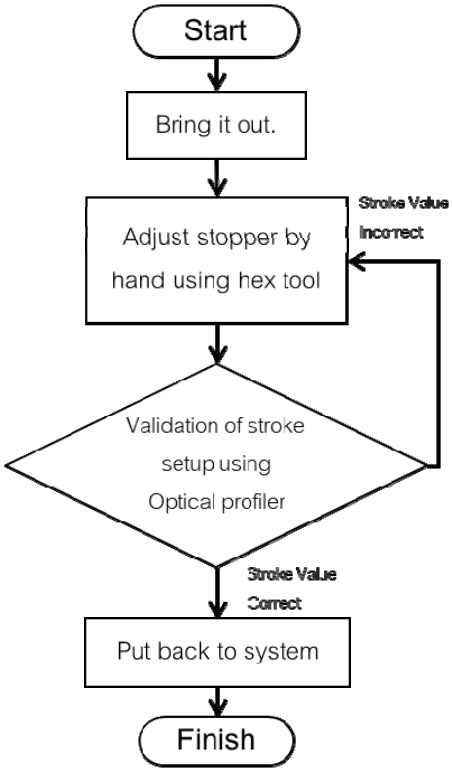


Figure 2 Flow diagram of manual stroke's adjustment

การทบทวนวรรณกรรม

จากการทบทวนวรรณกรรมในเรื่องของระบบขับเคลื่อนที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน พบว่ามีระบบการขับเคลื่อนที่น่าสนใจ ดังต่อไปนี้เช่น การขับเคลื่อนโดยหลักการไฟฟ้าสถิต ที่มีคุณสมบัติในด้านการใช้พลังงานต่ำ นำไปปรับใช้เข้ากับระบบได้ง่าย แต่ระยะขจัด และความเชื่อถือได้ อยู่ในเกณฑ์พอใช้ (D.A. Horsley *et al*., 1999) แม่เหล็กไฟฟ้า ที่มีคุณสมบัติเด่นในด้านที่สามารถให้ระยะขจัดที่ดีมาก แต่ในด้านของขนาด การใช้พลังงาน ความเชื่อถือได้ และการนำไปปรับใช้กับระบบทำได้ไม่ดี (D. Niarchos., 2003) การขยายตัวของวัสดุจากความร้อน มีคุณสมบัติที่เด่นในด้านของ ระยะขจัดที่ทำได้ ขนาด และการปรับใช้กับระบบ สามารถทำได้ดี แต่ในด้านของการใช้พลังงาน และความเชื่อถือได้นั้นยังทำไม่ได้ดีพอ (D. Saias *et al*., 2003) และ เพียโซอิเล็กทริก สามารถคุณสมบัติได้ดีในด้านของขนาด พลังงานที่ใช้ ระยะขจัดที่ทำได้ ความเชื่อถือได้ มีเพียงการนำไปปรับใช้กับระบบที่ค่อนข้างทำได้ยากสักเล็กน้อย (R.B. Evans *et al*., 1999) และจากการศึกษาของ GD. Gray and PA. Kohl. (2006) สรุปได้ว่าการขับเคลื่อนโดยหลักการเพียโซอิเล็กทริก มีคุณสมบัติเด่นกว่าแบบอื่นที่แสดงข้างต้น กล่าวคือ มีความเที่ยงตรงสูง ใช้พลังงานน้อย ควบคุมได้ แต่นำมาปรับใช้กับระบบยากสักเล็กน้อยแต่สามารถทำได้ และทำระยะขจัดได้น้อยกว่ากระบอกลม ซึ่งสามารถชดเชยด้วยออกแบบส่วนขยายทางกล

เพียโซอิเล็กทริกที่จะนำมาทดแทนระบบเดิมที่ขับเคลื่อนด้วยกระบอกลมนั้น สามารถควบคุมระยะยืดได้ตามระดับแรงดันที่จ่ายให้กับเพียโซอิเล็กทริกโดยการป้อนอินพุตให้กับวงจรขับ (Piezo driver) ได้ ซึ่งจะเป็นการพัฒนาระบบมือถ่างเพื่อลดระยะเวลา ขั้นตอน ในการเปลี่ยนแปลงระยะที่ต้องการใช้งานในแต่ละครั้ง เป็นการทำให้มือถ่างหัวอ่านฮาร์ดดิสก์นี้สามารถรองรับการใช้งานกระบวนการทดสอบหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ในปัจจุบัน และอนาคตได้

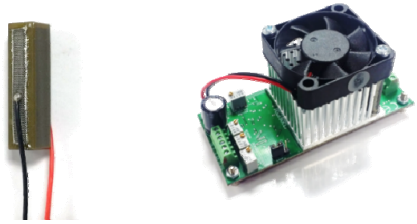
อุปกรณ์และวิธีการ

1. ระบบมือถ่าง

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เพียโซอิเล็กทริกแบบแท่ง (Piezo Stack) ซึ่งเป็นชนิดที่ให้ระยะขจัดที่สูงและรับแรงกดได้สูงสำหรับนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ โดยเลือกใช้จาก PiezoDrive รุ่น SA050520 (Figure 3(a)) ซึ่งสามารถทำระยะขจัดได้ถึง 31 ไมโครเมตรทนแรงกดได้ถึง 900 นิวตัน ที่การจ่ายแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ 150 โวลต์ มีขนาดกว้าง 5 มิลลิเมตร ยาว 5 มิลลิเมตร สูง 20 มิลลิเมตร (PiezoDrive, 2018a) เพียโซอิเล็กทริกแบบแท่งจะถูกขับด้วยวงจรขับ รุ่น PDu150 (Figure 3(b)) จาก PiezoDrive เช่นกัน วงจรขับสามารถควบคุมด้วยสัญญาณอินพุตที่ 0-7.5 โวลต์ โดยวงจรจะให้แรงดันเอาต์พุต สำหรับขับเพียโซที่ 0-150 โวลต์ ซึ่งมีอัตราขยายอยู่ที่ 1:20 (PiezoDrive, 2018b) และในการนำเพียโซอิเล็กทริกแบบแท่งมาใช้นั้น ต้องมีการใส่แรง Pre-Load ให้กับเพียโซอิเล็กทริกจึงสามารถทำงานได้ ผู้วิจัยจึงทำการออกแบบฐานยึด ด้วย 3D Printer เพื่อยึดเพียโซ แกนนำแรง และสปริง ที่มีค่า K = 117.62 N/m เป็น Pre-Load โดยออกแบบไว้ในแกนเดียวกัน และสามารถประกอบเข้ากับ กริปเปอร์แทนที่กระบอกลมได้

2. การทดลอง

Figure 4 แสดงระบบมือถ่างความละเอียดระดับไมครอนที่ขับเคลื่อนโดยเพียโซอิเล็กทริกสำหรับกระบวนการทดสอบหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ ซึ่งประกอบด้วย 1) ระบบมือถ่าง 2) วงจรขับ 3) แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงขนาด 24 โวลต์ 4) ดิจิตอลไมโครมิเตอร์ Nikon รุ่น MFC-101A (Figure 5(a)) 5) เครื่องกำเนิดสัญญาณ GW INSTEK รุ่น AFG-2225 (Figure 5(b)) 6) ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ Agilent รุ่น 34411A (Figure 5(c)) โดยสวิตช์ SW1 มีตำแหน่ง ON และ OFF ทำหน้าที่ควบคุมการป้อนสัญญาณอินพุตให้แก่วงจรขับ โดยมีการทดลองดังต่อไปนี้



(a) (b)

Figure 3 (a) piezoelectric stack actuator and (b) piezo drive amplifier module

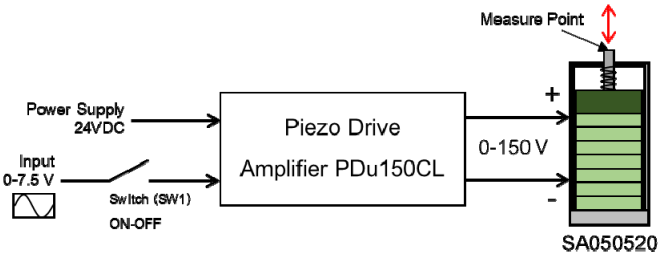


Figure 4 Overall system diagram

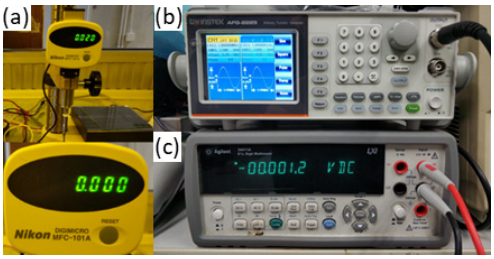


Figure 5 (a) digital micrometer (b) signal generator and (c) digital micrometer

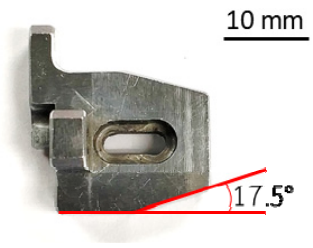


Figure 6 mechanical amplifier

2.1 วัดระยะขจัดของระบบมือถ่าง

ในขั้นตอนนี้นำระบบมือถ่างที่ได้จากข้อ 1 มาวัดค่าระยะขจัดของระบบด้วยไมโครมิเตอร์ ที่ตำแหน่งปลายของแกนนำแรงดัง Measure point ใน Figure 7(b) โดยแบ่งการทดลองเป็นสองการทดลองย่อย คือ แบบป้อนอินพุตแบบต่อเนื่อง และแบบป้อนอินพุตแบบ ON-OFF

การทดลองป้อนอินพุตแบบต่อเนื่อง จะทำการป้อนสัญญาณอินพุตให้กับวงจรขับ 0-7.5 โวลต์ เพิ่มครั้งละ 0.5 โวลต์ บันทึกค่าระยะขจัดจากไมโครมิเตอร์ และทำซ้ำโดยป้อนสัญญาณอินพุต 7.5-0 โวลต์ ลดครั้งละ 0.5 โวลต์ บันทึกค่าระยะขจัดทดลองอีกครั้งหนึ่ง และตลอดทำการทดลองสวิตช์ SW1 จะมีสถานะ ON ตลอด

สำหรับการทดลองป้อนอินพุตแบบ ON-OFF จะเริ่มการทดลองโดยปรับสวิตช์ SW1 ให้อยู่ในตำแหน่ง OFF และทำการปรับค่าสัญญาณอินพุต แล้วจึงปรับสวิตช์ SW1 ให้อยู่ในตำแหน่ง ON เพื่อป้อนสัญญาณอินพุตไปยังวงจรขับ บันทึกค่าระยะขจัดที่เกิดขึ้น แล้วปรับสวิตช์ SW1 กลับมาตำแหน่ง OFF ทำขั้นตอนดังกล่าวทุกครั้งในการเปลี่ยนค่าสัญญาณอินพุต เป็นการลดความล้าสะสมเสมือนทำให้เพียโซอิเล็กทริกกลับสู่สถานะเริ่มต้นทุกครั้ง โดยทำการป้อนสัญญาณอินพุต 0-7.5 โวลต์ เพิ่มครั้งละ 0.5 โวลต์ และ 7.5-0 โวลต์ ลดครั้งละ 0.5 โวลต์ นำค่าระยะขจัดที่ได้มาเขียนกราฟ เพื่อวิเคราะห์ว่าระบบมือถ่างที่ขับเคลื่อนโดยเพียโซอิเล็กทริกทดแทนกระบอกลมเดิมได้

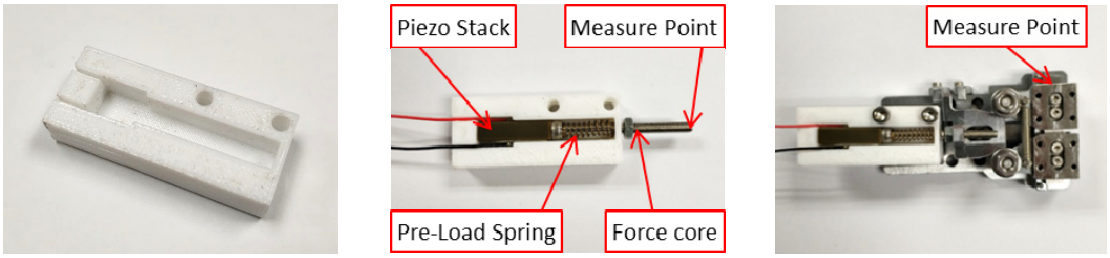
2.2 วัดระยะขจัดของกริบเปอร์

ทำการทดลองดังข้อ 2.1 อีกครั้งหนึ่ง โดยเปลี่ยนจุดวัดไปที่กริปเปอร์ที่ติดตั้งระบบมือถ่างที่ขับเคลื่อนโดยเพียโซอิเล็กทริกแล้ว โดยวัดที่จุด Measure point ใน Figure 7(c)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. ผลการออกแบบระบบมือถ่าง

ในการออกแบบฐานยึดสำหรับยึด เพียโซอิเล็กทริกชนิดแท่ง สปริง แกนนำแรง ไว้ในแนวแกน เพื่อให้ระบบเพียโซอิเล็กทริกสามารถทำงานได้ ในด้านท้ายของฐานยึดที่ดันด้านหนึ่งของเพียโซอิเล็กทริกไว้ต้องหนาเพียงพอที่ขณะทำงานยังคงรูปเดิมได้ และออกแบบตำแหน่งปลายของแกนนำแรงให้อยู่ในจุดที่สามารถส่งแรงให้ส่วนขยายทางกลในตำแหน่งเดิม เพื่อสามารถนำไปทดแทนกระบอกลมได้ทันที หลังจากออกแบบฐานยึดแล้วนำมาขึ้นรูปด้วย 3D Printer ได้ดัง Figure 7(a) นำเพียโซอิเล็กทริกแบบแท่ง สปริง และแกนนำแรง มาประกอบรวมกันได้เป็นระบบมือถ่าง ดัง Figure 7(b) และนำระบบมือถ่างไปประกอบรวมกับกริบเปอร์แทนที่กระบอกลมได้ดัง Figure 7(c)



(a) (b) (c)

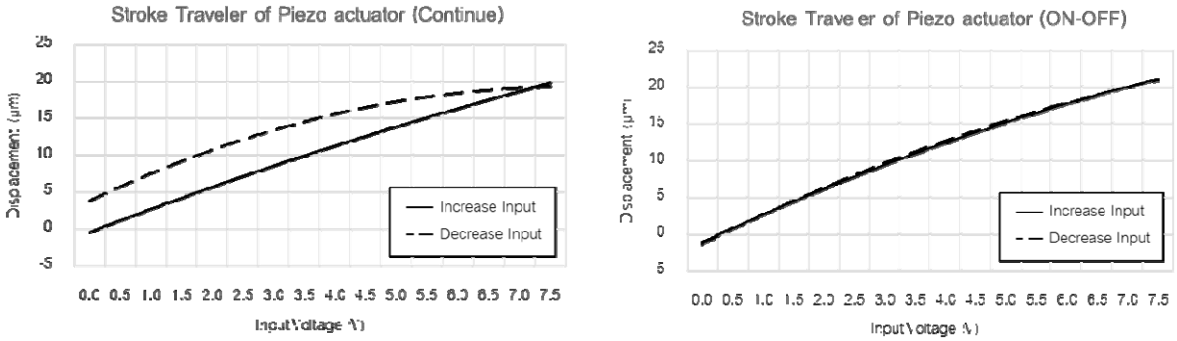
Figure 7 (a) 3D print case, (b) piezoelectric actuator and (c) gripper system

2. ผลการทดลอง

2.1 ผลการวัดระยะขจัดของระบบมือถ่าง

ผลการทดลองป้อนอินพุตแบบต่อเนื่อง แสดงดัง Figure 8(a) แกน x คือสัญญาณอินพุต (V) แกน y คือ ค่าระยะขจัดที่วัดได้ (μm) เส้นทึบคือค่าที่ได้จากการเพิ่มสัญญาณอินพุตครั้งละ 0.5 โวลต์ โดยเริ่มที่ 0 โวลต์ จนถึง 7.5 โวลต์ ส่วนเส้นประคือค่าที่ได้จากการลดสัญญาณอิตพุตครั้งละ 0.5 โวลต์ โดยเริ่มที่ 7.5 โวลต์ จนถึง 0 โวลต์ ซึ่งจะเห็นว่าการทดลองป้อนอินพุตแบบต่อเนื่องนี้กราฟผลการทดลองที่ได้จะมีฮิสเทอรีซีส และได้ระยะขจัดสูงสุดที่ 20 ไมโครเมตร

ผลการทดลองป้อนอินพุตแบบ ON-OFF แสดงดัง Figure 8(b) แกน x คือสัญญาณอินพุต (V) แกน y คือ ค่าระยะขจัดที่วัดได้ (μm) เส้นทึบคือค่าที่ได้จากการทดลองเพิ่มสัญญาณอินพุตครั้งละ 0.5 เริ่มที่ 0 โวลต์ จนถึง 7.5 โวลต์ ส่วนเส้นประคือค่าที่ได้จากการทดลองลดสัญญาณอิตพุตครั้งละ 0.5 โวลต์ โดยเริ่มที่ 7.5 โวลต์ จนถึง 0 โวลต์ ซึ่งจะเห็นว่าการทดลองป้อนอินพุตแบบ ON-OFF นั้นกราฟผลการทดลองที่ได้ไม่มีฮิสเทอรีซีส เข้าใกล้ระบบเชิงเส้น และได้ระยะจัดสูงสุดที่ 21 ไมโครเมตร



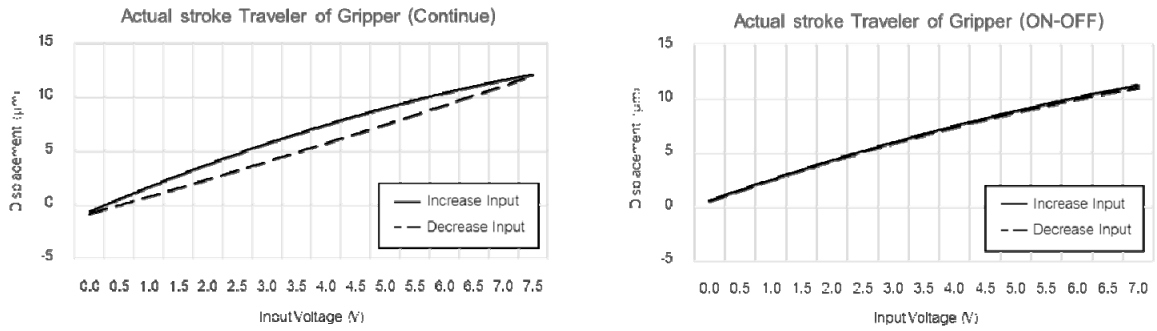
(a) (b)

Figure 8 Stroke traveler at tip of piezo actuator (a) continue input and (b) ON-OFF input

2.2 ผลการวัดระยะขจัดของกริปเปอร์

ผลการทดลองป้อนอินพุตแบบต่อเนื่อง แสดงดัง Figure 9(a) แกน x คือสัญญาณอินพุต (V) แกน y คือ ค่าระยะขจัดที่วัดได้ (μm) เส้นทึบคือค่าที่ได้จากการเพิ่มสัญญาณอินพุตครั้งละ 0.5 โวลต์ โดยเริ่มที่ 0 โวลต์ จนถึง 7.5 โวลต์ ส่วนเส้นประคือค่าที่ได้จากการลดสัญญาณอิตพุตครั้งละ 0.5 โวลต์ โดยเริ่มที่ 7.5 โวลต์ จนถึง 0 โวลต์ จะเห็นว่ากราฟผลการทดลองที่ได้จะมีฮิสเทอรีซีส ได้ระยะขจัดสูงสุดที่ 12 ไมโครเมตร และสังเกตว่าค่าระยะขจัดที่ได้ลดลงจากข้อ 2.1 ประมาณ 0.6 เท่า ซึ่งเป็นไปตามอัตราส่วนของส่วนขยายทางกล (Mechanical Amplifier) ของเครื่องมือเดิมที่มีค่า 1:0.631

ผลการทดลองป้อนอินพุตแบบ ON-OFF แสดงดัง Figure 9(b) แกน x คือสัญญาณอินพุต (V) แกน y คือ ค่าระยะขจัดที่วัดได้ (μm) เส้นทึบคือค่าที่ได้จากการทดลองเพิ่มสัญญาณอินพุตครั้งละ 0.5 เริ่มที่ 0 โวลต์ จนถึง 7.5 โวลต์ ส่วนเส้นประคือค่าที่ได้จากการทดลองลดสัญญาณอิตพุตครั้งละ 0.5 โวลต์ โดยเริ่มที่ 7.5 โวลต์ จนถึง 0 โวลต์ ซึ่งจะเห็นว่าการทดลองป้อนอินพุตแบบ ON-OFF นั้นกราฟผลการทดลองที่ได้ไม่มีฮิสเทอรีซีส เข้าใกล้ระบบเชิงเส้น และทำระยะจัดได้สูงสุดที่ 12 ไมโครเมตรเช่นกัน



(a) (b)

Figure 9 Stroke traveler at gripper system(a) continue input and (b) ON-OFF input

สรุป

สรุปผล

จากการพัฒนาระบบมือถ่างพบว่า สามารถปรับตั้งระยะขจัดได้โดยไม่จำเป็นต้องนำชุดเครื่องมือออกมาทำการปรับตั้ง เป็นการลดการสึกหรอและลดความคลาดเคลื่อนจากการถอดออก และการติดตั้ง ระบบมือถ่างนี้สามารถใช้ในกระบวนการทดสอบหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ได้หลายรุ่นเพราะสามารถปรับ ตามที่หัวอ่านแต่ละรุ่นระบุไว้ได้ สามารถลดกระบวนการในการทำงานจาก Figure 2 เหลือเพียงแค่ระบุค่าอินพุตตามระยะขจัดที่ต้องการดัง Figure 10 ทำให้ลดเวลาจากการปรับตั้ง และลดความผิดพลาดที่เกิดจากขั้นตอนเดิมได้ จากผลการทดลองการป้อนอินพุต ON-OFF ซึ่งเป็นการทดลองที่คล้ายกับกระบวนการทำงานจริง แสดงให้เห็นว่าระยะขจัดที่ได้เมื่อเทียบกับสัญญาณอินพุตที่ป้อนเข้าไปเป็นเชิงเส้นเพียงพอที่จะใช้งานจริงได้ และสามารถนำงานวิจัยนี้ไปพัฒนาหรือปรับใช้กับงานที่ต้องการควบคุมระยะในระดับไมโครเมตรได้

ข้อเสนอแนะ

หากต้องการให้การเคลื่อนที่ละเอียดขึ้นสามารถทำได้โดยการเปลี่ยนเพียโซอิเล็กทริกเป็นรุ่นที่ทำระยะยืดได้มากขึ้น และลดมุมที่มีผลต่ออัตราขายของชิ้นส่วนขยายทางกล และหากต้องการเพิ่มเพียงระยะของกริปเปอร์ สามารถทำได้โดยปรับมุมของชิ้นส่วนขยายทางกลให้มีอัตราขยายเพิ่มมากขึ้น แต่จะทำให้ความละเอียดโดยรวมของระบบลดลง และหากต้องการเพิ่มความแม่นยำของระบบ สามารถเพิ่มเซ็นเซอร์สเตรนเกจ (Strain Gauge) ป้อนให้กับวงจรขับ (Piezo Driver) เพื่อให้ระบบทำการควบคุมแบบป้อนกลับได้ (Close-Loop Control)

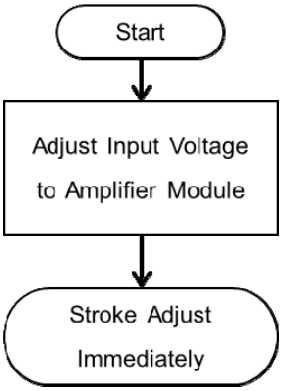


Figure 10 Flow diagram of Piezoelectric actuated system

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม ร่วมกับ บริษัท ซีเกท เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด (สัญญาเลขที่ MSD58I0138) ขอขอบคุณ บริษัท ซีเกท เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด และ ดร.พัฒนพงศ์ จันทร์พวง สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือและสถานที่ในการทำวิจัย ทำให้งานวิจัยดำเนินลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

D.A. Horsley, N. Wongkomet, R. Horowitz, A.P. Pisano. 1999. Precision Positioning using a Microfabricated Electrostatic Actuator. **IEEE Trans. on Magnetics**. 35: 993-999.

D. Niarchos. 2003. Magnetic MEMS: key issues and some applications. **Sensors and Actuators A** 109: 166-173.

D. Saias, P. Robert, S. Boret, C. Billard, G. Bouche, D. Belot, P. Ancey. 2003. An Above IC MEMS Switch. **IEEE Journal of Solid-State circuits**. 38: 2318-2324.

GD. Gray, PA. Kohl. 2006. Modeling and performance of a magnetic MEMS wiping actuator. **Journal of Microelectromechanical Systems**. 15: 904-911.

PiezoDrive. 2018a. **SA Series 150V Piezo Stack Actuators**. Available Source: https://www.piezodrive.com/actuators/150v-piezo-stack-actuators/ ,July 11, 2018.

PiezoDrive. 2018b. **PDu150CL-Low Noise 150V Piezo Driver with Strain Gauge Feedback**. Available Source: https://www.piezodrive.com/modules/pdu150cl/ ,July 11, 2018.

R.B. Evans, J.S. Griesbach, W.C. Messner. 1999. Piezoelectric Microactuator for Dual Stage Control. **IEEE Trans. on Magnetics**. 35: 977-982.

การแครกกิ้งน้ำมันกลั่นหนักโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/ZrO_2 และSO_4^{2-}/TiO_2/HZSM-5

Catalytic Cracking of Heavy Distillate Oil Using TiO_2/ZrO_2 and SO_4^{2-}/TiO_2/HZSM-5 Catalyst

ณปภัช ดลสิริฤทธิกุล[1] วัชราพรรณ วัฒนสมบัติ[1] และ อภิญญา ดวงจันทร์[1*]

Napaphut Dolsiririttigul[1], Watcharapun Wattanasombut[1] and Apinya Duangchan[1*]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการแครกกิ้งน้ำมันกลั่นหนักที่ได้จากกระบวนการกลั่นน้ำมัน เพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำมันกลั่นหนัก โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/ZrO_2 (50 : 50 โดยโมล) และ SO_4^{2-}/TiO_2/HZSM-5 ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 420 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ในปฏิกรณ์แบบกะ ผลการทดลองจากการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่า ได้ของแข็ง ของเหลว และแก๊สเท่ากับ 10.0, 69.9 และ 20.1% โดยน้ำหนักตามลำดับ เมื่อนำไปกลั่นลำดับส่วนได้ แก๊สโซลีน เคโรซีน แก๊สออยล์ และกากน้ำมัน 34.32, 24.08, 31.60 และ 10.01% ตามลำดับ โดยเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/ZrO_2 เทียบกับไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าได้ของแข็งลดลง ของเหลวเพิ่มขึ้น และแก๊สลดลงเล็กน้อยมีผลได้เท่ากับ 2.9, 77.6 และ 19.5% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และได้สัดส่วนน้ำมันจากการกลั่นดังนี้ แก๊สโซลีน เคโรซีน แก๊สออยล์ และกากน้ำมันเท่ากับ 37.43, 15.36, 33.48 และ 13.73% ตามลำดับ และเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา SO_4^{2-}/TiO_2/HZSM-5 เทียบกับ TiO_2/ZrO_2 ได้ของแข็งลดลง 80.7% และน้ำมันมีปริมาณแก๊สโซลีนสูงขึ้นมากถึง 49.7 % น้ำมันที่ผ่านการแครกกิ้งมีค่าความร้อนสูง 40-43 เมกะจูลต่อกิโลกรัม

ABSTRACT

This research studied catalytic cracking of heavy distillate oil from a refinery process in order to upgrade the heavy distillate oil using TiO_2/ZrO_2 (50:50 by mol) and SO_4^{2-}/TiO_2/HZSM-5 as catalysts. The experiment was performed at 420°C under nitrogen atmosphere in an autoclave reactor. Thermal cracking performed at the same conditions yielded solid, liquid, and gases products 10.0, 69.9, and 20.1% by weight, respectively. Fractions of gasoline, kerosene, gas oils, and residue were 34.32, 24.08, 31.06, and 10.01%, respectively. By using TiO_2/ZrO_2 catalyst, compared to thermal cracking, less solid coke, more liquid, and slightly lower gases were found. The products were 2.9, 77.6, and 19.5% by weight, respectively. The gasoline, kerosene, gas oils, and residue fractions were 37.43, 15.36, 33.48, and 13.73%, respectively. Compared to the TiO_2/ZrO_2 catalyst, the SO_4^{2-}/TiO_2/HZSM-5 catalysts reduced solid by 80.7%, and the gasoline fraction was increased by 49.7%. The high heating values of the liquid products from cracking were 40-43 MJ/kg.

Key Words: catalytic cracking, heavy distillate oil, TiO_2/ZrO_2, HZSM-5, refinery

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

[1]ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

คำนำ

น้ำมันที่ผลิตได้จากการกลั่นน้ำมันดิบบางส่วนของโรงกลั่นน้ำมัน ปัจจุบันมีน้ำมันกลั่นหนัก (heavy distillate oil) สูงถึงร้อยละ 39 ซึ่งยังไม่เหมาะต่อการใช้งาน หากสามารถปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันให้ตรงตามมาตรฐานได้ จะทำให้มีการผลิตน้ำมันเพื่อใช้ได้เพิ่มมากขึ้น อีกทั้งยังเป็นการลดต้นทุนการนำเข้าน้ำมันดิบอีกด้วย ซึ่งในปัจจุบันกระบวนการกลั่นแบบนี้เกิดขึ้น โดยการนำเอาน้ำมันดิบมาทำให้เกิดการแตกตัวในปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิสูงกว่า 500 องศาเซลเซียส และที่ความดันมากกว่า 65 บรรยากาศ (Sadrameli, 2015) เพื่อทำให้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างโมเลกุลขนาดใหญ่เกิดการแยกตัวหรือแตกตัวเป็นน้ำมันส่วนเบา ซึ่งการใช้อุณหภูมิและความดันที่สูงนี้ ทำให้กระบวนการแครกกิ้งมีความอันตราย นอกจากนี้ยังทำให้ต้นทุนในกระบวนการนั้นสูงอีกด้วย จึงมีการพัฒนาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเข้ามาช่วยในการแครกกิ้ง ปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิ้งในกระบวนการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม ช่วยเปลี่ยนน้ำมันที่มีจุดเดือดสูงไปเป็นน้ำมันที่มีจุดเดือดต่ำลง เหมาะสมกับการใช้งานเช่น แก๊สโซลีน เคโรซีน และดีเซล ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาจะช่วยให้โมเลกุลแตกตัวได้ดีขึ้น โดยไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบทางเคมีของน้ำมัน นอกจากนี้ยังทำให้การแครกกิ้งสามารถเกิดปฏิกิริยาแตกโมเลกุลได้ที่อุณหภูมิ และความดันต่ำลง

มีหลายงานวิจัยศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิ้งเช่น Dik *et al.* (2019) ศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา NiMo/ Zeolite Beta (BEA) Catalyst เนื่องจาก ซีโอไลต์ เป็นที่นิยมใช้โดยทั่วไปในปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิ้งในอุตสาหกรรมน้ำมันแต่มีราคาสูง ส่วน NiMo นิยมใช้ในอุตสาหกรรมเพราะราคาถูกและทนต่อสารประกอบที่มีซัลเฟอร์ได้ดี จากการศึกษาพบว่า ซีโอไลต์ ที่มีขนาดอนุภาคเล็กที่สุดและมีความเข้มข้นของ Bronsted acid side (BAS) มากที่สุดมีความสามารถในปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิ้งมากที่สุดแต่ซีโอไลต์ เกิดโค้กได้ง่าย Hou *et al*. (2017) ศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา SO_4^{2-}/TiO_2 บน HZSM-5 เพื่อใช้ในการแครกกิ้งน้ำมันพาราฟิน พบว่าสามารถใช้ในการแครกกิ้งน้ำมันได้ สามารถช่วยลดปริมาณโค้กที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาข้างเคียง ซึ่งโค้กเป็นตัวการสำคัญที่ทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยานั้นลดลง โดย SO_4^{2-} สามารถเพิ่มคุณสมบัติทางไฟฟ้าให้กับ TiO_2 อัตราส่วนที่ดีที่สุดจากการทดลองนี้ ประกอบด้วย Ti ร้อยละ 6 และ S ร้อยละ 0.7 Kondoh *et al.* (2015) ศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/ZrO_2 ในการแครกกิ้งน้ำมันเตา โดยทำการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธี sol-gel ในหลายอัตราส่วนด้วยกัน พบว่า TiO_2/ZrO_2 สามารถใช้ในการแครกกิ้งน้ำมันเตาให้เป็นน้ำมันชนิดเบาได้ นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติในเรื่องของพื้นที่ผิวที่เกิดปฏิกิริยาสูง ปริมาณความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาสูง และยังช่วยลดปริมาณของโค้กที่เกิดขึ้นอีกด้วย ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ช่วยให้การแครกกิ้งของน้ำมันเตามีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น และอัตราส่วนที่ดีที่สุดจากการทดลองนี้ คือ TiO_2 : ZrO_2 เท่ากับ 50 : 50 เนื่องจากมีปริมาณความเป็นกรดสูงที่สุด ซึ่งปริมาณความเป็นกรดนี้ถือเป็นตัวการสำคัญที่มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพในการแครกกิ้งน้ำมันเตา

งานวิจัยนี้สนใจการแครกกิ้งน้ำมันกลั่นหนักโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/ZrO_2 (50 : 50 โดยโมล) และเตรียมด้วยวิธีที่แตกต่างจากของ Kondoh *et al*. (2015) เปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยา SO_4^{2-}/TiO_2/HZSM-5 ซึ่งผลจากการศึกษาดังกล่าวสามารถนำไปขยายผลทางอุตสาหกรรมเพื่อเพิ่มคุณภาพของน้ำมันที่ผลิตได้ในประเทศไทยให้ได้ตรงตามมาตรฐานและเพิ่มกำลังการผลิตต่อไป

วัตถุดิบ อุปกรณ์และวิธีการ

วัตถุดิบ

น้ำมันกลั่นหนัก (heavy distillate oil) เป็นน้ำมันกลั่นหนักที่ได้จากการกลั่นที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียสในหน่วยกลั่นสุญญากาศ มีค่าความถ่วงจำเพาะ ณ อุณหภูมิ 15.6/15.6 องศาเซลเซียสเท่ากับ 0.8665-0.8718 (ASTM-D1298) จุดวาบไฟ 150-185 องศาเซลเซียส (ASTM-D93) จุดไหลเท 40-45 องศาเซลเซียส มีปริมาณน้ำน้อยมาก (ASTM-D95) และค่าความร้อนสูง 46.77 ± 0.16 MJ/kg (Model 1261)

ตัวเร่งปฏิกิริยา

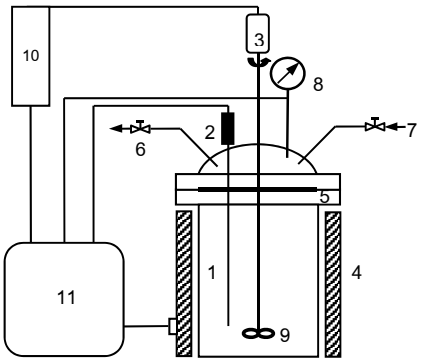
ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/ZrO_2 เตรียมจากการนำ TiO_2 (98% จากบริษัท ACROS ORGANICS) ซึ่งอยู่ในเฟส anatase และ ZrO_2 (98.5% จากบริษัท ACROS ORGANICS)ที่เป็นผงผสมกันโดยตรงซึ่งเป็นการผสมแบบแห้งอย่างละ 50 mol% โดยทำการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งหมด จำนวน 5.67 กรัม ซึ่งประกอบด้วย TiO_2 จำนวน 2.23 กรัม ผสมกับ ZrO_2 จำนวน 3.44 กรัม คนให้กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ แล้วเก็บไว้ในภาชนะที่มีฝาปิดมิดชิดภายในโถดูดความชื้น

ตัวเร่งปฏิกิริยา SO_4^{2-}/TiO_2/HZSM-5 เตรียมตามวิธีของ Durgakumari *et al*. (2002) และ Hou *et al*. (2017) โดยการชั่ง TiO_2 จำนวน 0.323 กรัม และ HZSM-5 (ZSM-5 Zeolite SiO_2/Al_2O_3 = 23 จากบริษัท ACROS ORGANICS) จำนวน 5 กรัม แล้วนำสารทั้งสองชนิดมาผสมกันในโกร่งบดสาร (mortar and pestle) โดยใช้ไซริงค์หยดเอทานอลเข้าไปผสมด้วย ขณะทำการบดสารเข้าด้วยกัน เพื่อใช้เป็นตัวประสานสารทั้งสองชนิด ทำการบดสารให้เข้ากันจนกระทั่งเอทานอลระเหยจนหมด จากนั้นนำของแข็งที่ได้ไปอบแห้งโดยใช้ตู้อบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำของแข็งที่ได้ไปเผาโดยใช้เตาเผาความร้อนสูง ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จะได้ TiO_2/HZSM-5 ลักษณะเป็นผงสีขาว จากนั้นนำไปผสมกับ $(NH_4)_2SO_4$ 1 โมลาร์ แล้วทำการกวนสารโดยใช้เครื่องกวนสาร ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 8 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำของแข็งที่ได้ไปอบแห้งโดยใช้ตู้อบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วนำของแข็งที่ได้ไปเผาโดยใช้เตาเผาความร้อนสูง ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จะได้ SO_4^{2-}/TiO_2/HZSM-5

การเตรียม HZSM-5 ที่ใช้เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา SO_4^{2-}/TiO_2/HZSM-5 ตามวิธีของ Wang *et al*. (1993) โดยทำการชั่ง NH_4NO_3 40 กรัม ละลายในน้ำปริมาตร 500 มิลลิลิตร จากนั้นเติม ZSM-5 จำนวน 5 กรัม ลงในสารละลาย จากนั้นทำการกวนสารละลาย ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำสารที่ได้มากรองแล้วล้างด้วยน้ำกลั่นพร้อมกับปรับค่า pH ให้เป็นกลาง แล้วนำไปอบแห้งที่ตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

ปฏิกรณ์

ปฏิกรณ์ที่ใช้ในการแครกกิ้งนั้นเป็นปฏิกรณ์แบบกะมีภาชนะทรงกระบอกขนาด 1000 มิลลิลิตร สำหรับบรรจุวัตถุดิบ หุ้มด้วยเตาขดลวดไฟฟ้า อุณหภูมิดำเนินการสูงสุดไม่เกิน 500 องศาเซลเซียส ใช้ใบกวนชนิด 6 ใบพัด ความเร็วรอบใบกวนสามารถปรับได้ลักษณะอุปกรณ์แสดงดัง Figure 1



1. reactor vessel 2. thermocouple 3. magnetic drive
4. furnace 5. gasket 6. gas outlet
7. gas inlet 8. pressure gauge 9. impeller
10. motor 11. temperature controller

Figure 1 An autoclave reactor

วิธีการแครกกิ้งน้ำมันกลั่นหนัก

สารตั้งต้นที่ใช้คือน้ำมันกลั่นหนักจากโรงกลั่นน้ำมัน ลักษณะทางกายภาพน้ำมันกลั่นหนักเป็นของแข็งสีดำ ดังนั้นจึงต้องนำไปอุ่นก่อนเพื่อให้น้ำมันกลั่นหนักอยู่ในสถานะของเหลว จากนั้นจึงแยกออกใส่ในบีกเกอร์เพื่อนำไปใช้ในการทดลองต่อไป การทดลองจะใช้น้ำมันกลั่นหนักจำนวน 100 กรัม โดยงานวิจัยนี้ทำการทดลองการแครกกิ้งน้ำมันกลั่นหนักทั้งหมด 3 แบบ คือ แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา แบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/ZrO_2 และแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา SO_4^{2-}/TiO_2/HZSM-5 ในแต่ละการทดลองใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจำนวน 2.5 กรัม โดยก่อนการทดลอง ทำการอัดแก๊สไนโตรเจนเข้าปฏิกรณ์เพื่อไล่แก๊สออกซิเจนออกจากระบบ จนได้สภาวะไร้ออกซิเจน ตั้งอุณหภูมิที่ 420 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิภายในปฏิกรณ์เท่ากับ 420 องศาเซลเซียสแล้วคงไว้ที่อุณหภูมินั้นเป็นเวลา 60 นาที เมื่อครบกำหนดเวลา ปิดเตาและทิ้งไว้ให้เย็น นำผลิตภัณฑ์ของเหลว (น้ำมันที่ผ่านการแครกกิ้ง) ใส่ในขวดภาชนะที่มีฝาปิดมิดชิด แล้วนำไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่งเพื่อหาสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ของเหลว ส่วนผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้ในปฏิกรณ์แบบกะจะแยกใส่ในบีกเกอร์แล้วนำไปชั่งด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง กรองล้างเอาน้ำมันที่ติดค้างอยู่ออก และนำของแข็งที่ได้ไปชั่งเพื่อหาสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ของแข็ง ส่วนแก๊สที่ได้คิดจากผลต่างของวัตถุดิบเริ่มต้นและผลิตภัณฑ์ของเหลวและของแข็งที่ได้

การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้

นำน้ำมันที่ผ่านการแครกกิ้งมากลั่นแยกหาปริมาณของผลิตภัณฑ์ในแต่ละช่วงอุณหภูมิ ได้แก่ แก๊สโซลีน (IBP-200˚C) เคโรซีน (201-250˚C) แก๊สออยล์ (250-370˚C) และ กากน้ำมัน (>370˚C) โดยใช้เครื่องกลั่นแยกจุดเดือดน้ำมันตามมาตรฐาน ASTM-D86 (Standard Test Method for Distillation of Petroleum Products at Atmospheric Pressure) และนำน้ำมันที่ผ่านการแครกกิ้งไปทดสอบด้วย bomb calorimeter เพื่อหาค่าความร้อนสูง (high heating value) ตามมาตรฐาน Model 1261 แล้วจึงนำค่าที่ได้เปรียบเทียบน้ำมันกลั่นหนักก่อนและหลังปรับปรุงคุณภาพ

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลของการแครกกิ้งน้ำมันกลั่นหนักต่อผลได้ผลิตภัณฑ์

ผลแสดงใน Figure 2 พบว่าการแครกกิ้งโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาได้ของแข็ง, ของเหลว(น้ำมัน) และแก๊ส 10.0, 69.9 และ 20.1 % โดยน้ำหนัก ตามลำดับ การแครกกิ้งโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/ZrO_2ให้ผลได้ 2.9, 77.6 และ 19.5 % โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/ZrO_2 มีความว่องไวสูง เนื่องจากมีความเป็นกรดสูง เกิดปฏิกิริยาแตกโมเลกุล (catalytic cracking reaction) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนที่ผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดีขึ้น ส่งผลให้ได้น้ำมันกลั่นเบามากขึ้น และยังช่วยลดการเกิดโค้ก (coke formation) โดยสังเกตจากปริมาณของน้ำมันที่ผ่านการแครกกิ้งนั้นเพิ่มขึ้น และ ปริมาณของโค้กที่เกิดขึ้นนั้นลดลง เมื่อเทียบกับแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา งานวิจัยนี้ใช้อัตราส่วน TiO_2:ZrO_2 ที่ 1:1 โดยโมล เนื่องจากเป็นอัตราส่วนที่ให้ผลดีที่สุดในงานของ Kondoh *et al*. (2015) เมื่อเปรียบเทียบกับแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแล้ว พบว่าแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/ZrO_2 สามารถลดปริมาณโค้กที่เกิดขึ้นจากการแครกกิ้งน้ำมันกลั่นหนักได้ 71 % ได้น้ำมันที่ผ่านการแครกกิ้งสูงกว่าแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 11 %และได้แก๊สที่ผ่านการแครกกิ้งต่ำกว่าแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 3 % ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับของ Kondoh *et al*. (2015) แต่ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/ZrO_2 ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีวิธีการเตรียมที่แตกต่างจากงานของ Kondoh *et al*. (2015) ที่ใช้วิธี Sol-gel ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

การแครกกิ้งโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา SO_4^{2-}/TiO_2/HZSM-5 ได้ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส เท่ากับ 0.56, 62.40 และ 37.04 %โดยน้ำหนักตามลำดับ สามารถลดปริมาณโค้กที่เกิดขึ้นจากการแครกกิ้งน้ำมันกลั่นหนักได้ 94 % แต่ได้น้ำมันที่ผ่านการแครกกิ้งต่ำกว่าแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 10 % และได้แก๊สสูงกว่าแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 84 % ตัวเร่งปฏิกิริยา SO_4^{2-}/TiO_2/HZSM-5 ช่วยให้การแครกกิ้งน้ำมันกลั่นหนักมีประสิทธิภาพมากขึ้น เนื่องจาก HZSM-5 มีความว่องไวสูงจากความเป็นกรดสูง เช่นเดียวกับตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/ZrO_2 อีกทั้ง SO_4^{2-}/TiO_2 ยังช่วยเพิ่มการแตกโมเลกุล ลดการเกิดโค้กซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ความสามารถในการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาในการแครกกิ้งนั้นลดลง (เอกวิทย์, 2544) แต่ข้อเสียที่สังเกตได้คือปริมาณของเหลวที่ได้นั้นลดลง เนื่องจากเกิด secondary reaction เกิดการแตกโมเลกุลของของเหลวบางส่วนไปเป็นแก๊ส จะเห็นได้ว่าปริมาณของแก๊สที่ได้จากการแครกกิ้งนั้นเพิ่มขึ้นเทียบกับแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองแล้วพบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา SO_4^{2-}/TiO_2/HZSM-5 มีประสิทธิภาพในการทำให้เกิดปฏิกิริยาแตกโมเลกุลมากกว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/ZrO_2 โดยสังเกตจากปริมาณแก๊สที่ผ่านการแครกกิ้งของแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา SO_4^{2-}/TiO_2/HZSM-5 นั้น มากกว่าของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/ZrO_2 แสดงให้เห็นว่า การแครกกิ้งนั้นมีประสิทธิภาพที่มากกว่า อีกทั้งปริมาณของโค้กที่เกิดขึ้นของแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา SO_4^{2-}/TiO_2/HZSM-5 ยังน้อยกว่าแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/ZrO_2 แต่อย่างไรก็ตามปริมาณของเหลวที่ได้กลับลดลงเนื่องจากความสามารถในการแตกตัวของตัวเร่งปฏิกิริยา SO_4^{2-}/TiO_2/HZSM-5 ที่สูงนั่นเอง จึงควรศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานี้ให้เหมาะสม หรือปรับปรุงตัวเร่งปฏิกิริยาให้เหมาะสมต่อการใช้งานต่อไป

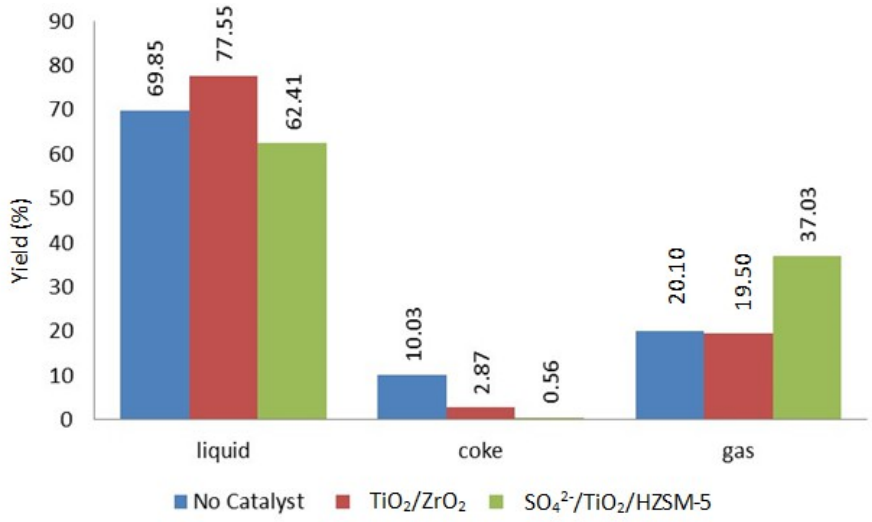


Figure 2 Cracking of heavy distillate oil at 420°C under N_2 atmosphere using different catalysts.

ผลของการแครกกิ้งน้ำมันกลั่นหนักต่อค่าความร้อนสูงของน้ำมัน

จาก Figure 3 เมื่อทำการหาค่าเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนของผลการวัดค่าทั้งหมด 3 ครั้ง แล้วพบว่าการแครกกิ้งโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา แบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/ZrO_2 และ SO_4^{2-}/TiO_2/HZSM-5 ได้ของเหลวมีค่าความร้อนสูงอยู่ที่ 42.57±1.20, 42.38±1.10 และ 40.71±0.67 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ พบว่าค่าความร้อนสูงของน้ำมันที่ผ่านการแครกกิ้งใกล้เคียงกันและมีค่าต่ำกว่าของน้ำมันกลั่นหนัก (46.77±0.16 MJ/kg) เนื่องมาจากน้ำมันกลั่นหนักส่วนหนึ่งแตกสลายไปอยู่ในรูปของแก๊สไฮโดรคาร์บอนซึ่งมีค่าความร้อนสูงสูงกว่าน้ำมัน จึงทำให้น้ำมันที่ได้จากการแครกกิ้งมีค่าความร้อนลดลง โดยเฉพาะน้ำมันจากการแครกกิ้งด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา SO_4^{2-}/TiO_2/HZSM-5 ซึ่งเกิดแก๊สไฮโดรคาร์บอนจำนวนมาก น้ำมันที่ได้สังเกตได้ว่ามีค่าความร้อนสูงต่ำที่สุด ส่วนการแครกกิ้งโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา และแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/ZrO_2 นั้นผลได้แก๊สใกล้เคียงกัน น้ำมันที่ได้สังเกตได้ว่ามีค่าความร้อนใกล้เคียงกันมาก

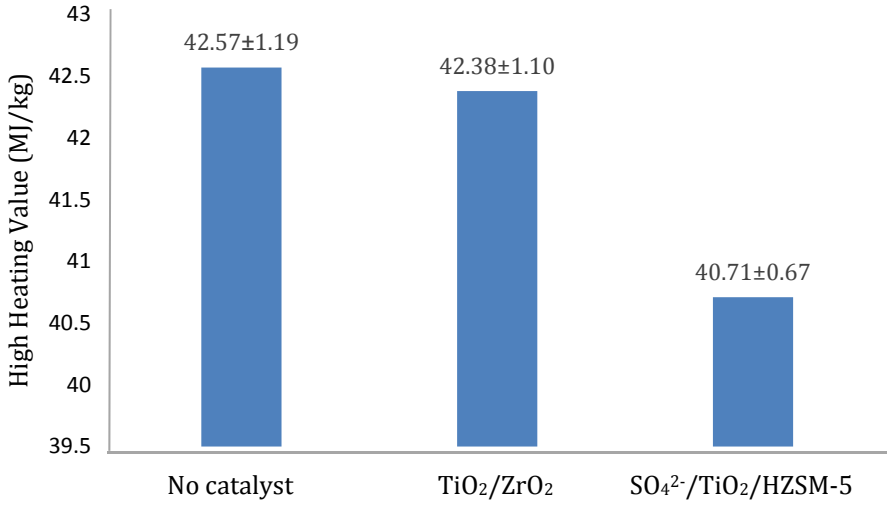


Figure 3 High heating values of oils from cracking of heavy distillate oil at 420°C under N_2 atmosphere.

ผลของการแครกกิ้งน้ำมันกลั่นหนักต่อสมบัติการกลั่นลำดับส่วนของน้ำมัน

ผลแสดงใน Figure 4 พบว่าการแครกกิ้งโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก๊สโซลีน, เคโรซีน, แก๊สออยล์ และกากน้ำมันเท่ากับ 34.32, 24.08, 31.60 และ 10.01% ตามลำดับ แบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/ZrO_2 ได้สัดส่วนที่เป็นแก๊สโซลีนสูงขึ้นเล็กน้อยโดยได้ แก๊สโซลีน เคโรซีน แก๊สออยล์ และกากน้ำมันเท่ากับ 37.43, 15.36, 33.48 และ 13.73% ตามลำดับและได้ผลได้ของน้ำมันสูงขึ้น ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยา SO_4^{2-}/TiO_2/HZSM-5 ได้แก๊สโซลีน, เคโรซีน แก๊สออยล์ และ กากน้ำมันเท่ากับ 56.04, 13.60, 22.56 และ 7.80% ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเทียบกับ TiO_2/ZrO_2 แบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา SO_4^{2-}/TiO_2/HZSM-5 ได้แก๊สโซลีนสูงขึ้นถึง 49.7% และปริมาณเคโรซีน, แก๊สออยล์ และกากน้ำมันลดลงทั้งหมด แสดงให้เห็นว่า SO_4^{2-}/TiO_2/HZSM-5 มีสมบัติในการแตกโมเลกุลที่ดีมากและทำให้น้ำมันหนักแตกตัวไปเป็นน้ำมันส่วนที่เบาขึ้นคือแก๊สโซลีนเป็นส่วนใหญ่ อย่างไรก็ตามผลได้ของน้ำมันของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา SO_4^{2-}/TiO_2/HZSM-5 นี้ลดลงเนื่องจากเกิดการแตกโมเลกุลของของเหลวบางส่วนไปเป็นแก๊ส ทำให้ได้แก๊สมากขึ้น

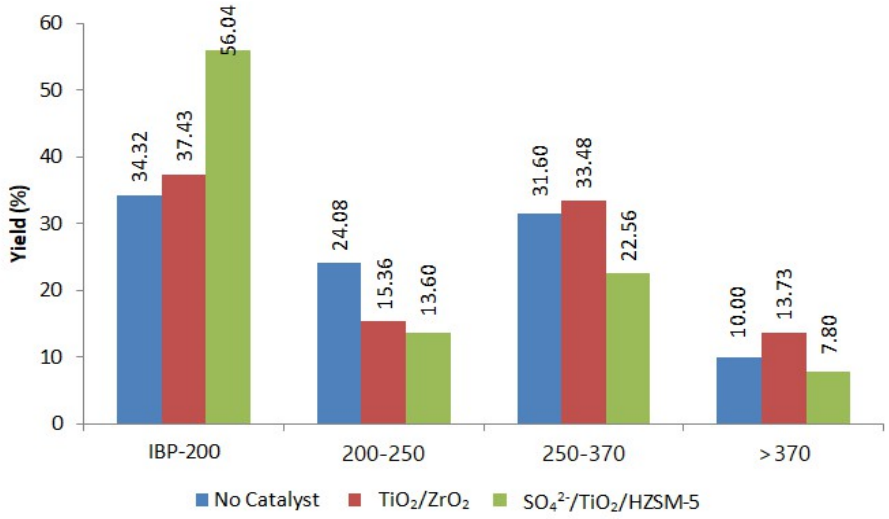


Figure 4 Fractionation distillation of liquid oil from catalytic cracking of heavy distillate oil at 420°C under N_2 atmosphere (gasoline (IBP-200˚C), kerosene (201-250˚C), gas oil (250-370˚C) and residue (>370˚C))

สรุป

จากการศึกษาการแครกกิ้งน้ำมันกลั่นหนักที่ได้จากกระบวนการกลั่นน้ำมัน เพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำมันกลั่นหนักโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าทั้งตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/ZrO_2 และตัวเร่งปฏิกิริยา SO_4^{2-}/TiO_2/HZSM-5 สามารถช่วยให้การแครกกิ้งน้ำมันมีประสิทธิภาพมากขึ้นและยังช่วยลดการเกิดโค้ก พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา SO_4^{2-}/TiO_2/HZSM-5 มีประสิทธิภาพในการทำให้เกิดปฏิกิริยาแตกโมเลกุลมากกว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/ZrO_2 ทำให้ได้น้ำมันที่มีคุณภาพสูงกว่าแม้ว่าการทดสอบค่าความร้อนสูงของน้ำมันจะให้ผลใกล้เคียงกัน แต่ผลได้ของน้ำมันที่ได้จากตัวเร่งปฏิกิริยา SO_4^{2-}/TiO_2/HZSM-5 น้อยกว่าของน้ำมันที่ได้จาก TiO_2/ZrO_2

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณโรงกลั่นน้ำมันฝางสำหรับตัวอย่างน้ำมันกลั่นหนักและข้อมูลสมบัติของน้ำมันกลั่นหนัก และขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนส่วนหนึ่งในการทำวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

เอกวิทย์ เพียรอนุรักษ์. 2544. **การศึกษาการเกิดโค้กบนตัวเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาในสภาพฟลูอิไดซ์ของนอร์มัลเฮกซะเดเคน**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

American Society for Testing and Material. 2007. Standard Test Method for Distillation of Petroleum Products at Atmospheric Pressure. ASTM designation : D-86 Vol.05.01, The ASTM Commetee of Standard, Eastons, MD, U.S.A.

Dik, P.P., I.G. Danilova , I.S. Golubev, M.O. Kazakov, K.A. Nadeina, S.V. Budukva, V.Yu. Pereyma, O.V. Klimov, I.P. Prosvirin, E.Yu. Gerasimov, T.O. Bok, I.V. Dobryakova, E.E. Knyazeva, I.I. Ivanova, A.S. Noskov. 2019. Hydrocracking of vacuum gas oil over NiMo/zeolite-Al_2O_3: Influence of zeolite properties. **Fuel** 237: 178-190.

Durgakumari, V., M. Subrahmanyam, K.V.S Rao, A. Ratnamala, M. Noorjahan and K. Tanaka. 2002. An easy and efficient use of TiO_2 supported HZSM-5 andTiO_2+HZSM-5 zeolite combinate in the photodegradation of aqueous phenol and p-chlorophenol. **Applied Catalysis A** 234:155-165.

Hou, X., Y. Qiu, E. Yuan, X. Zhang and G. Liu. 2017. SO_4^{2-}/TiO_2 promotion on HZSM-5 for catalytic cracking of paraffin. **Applied Catalysis A** 537: 12-23.

Kondoh, H., K. Tanaka, T. Tago, T. Masuda and Y. Nakasaka. 2015. Catalytic cracking of heavy oil over TiO_2-ZrO_2 catalysts under superheated steam conditions. **Fuel** 167: 288-294.

Mironenko, O. O., G. A. Sosnin, P. M. Eletskii, Yu. K. Gulyaeva, O. A. Bulavchenko, O. A. Stonkus, V. O. Rodina and V. A. Yakovlev. 2017. Catalytic steam cracking of heavy crude oil with molybdenum and nickel nanodispersed catalysts. **Catalysis in Industry** 9: 221-229.

Sadrameli, S.M. 2015. Thermal/catalytic cracking of hydrocarbons for the production of olefins:A state-of-the-art review I: Thermal cracking review. **Fuel** 140: 102–115.

Wang, L., L. Tao, M. Xie, G. Xu, J. Huang, Y. Xu. 1993. Dehydrogenation and aromatization of methane under non-oxidizing conditions. **Catalysis Letters** 21: 35-41.

การศึกษาการบ่งชี้ลักษณะ Fault ด้วยค่าพารามิเตอร์ที่มีนัยสำคัญ

Study of Indication in Fault Characteristics with Significant Parameters

ณัฏฐ์ศรณ์ โชติอัครรัตน์[1*] และ เกียรติยุทธ กวีญาณ[2]

Natsorn Chodakararat[1*] and Kiatiyuth Kveeyarn[2]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการหาตำแหน่ง Fault ด้วยวิธีการพิจารณาที่แรงดันของแต่ละบัสในระบบ โดยต้องศึกษาลักษณะการเกิด Fault ของแต่ละประเภทที่เกิดขึ้น และนำผลข้อมูลที่ได้นำไปใช้สอนโครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network) เพื่อจดจำข้อมูลของแต่ละรูปแบบ และสามารถบ่งบอกชนิดของ Fault ได้ถูกต้องเมื่อเกิดขึ้นจริง โดยระบบพื้นฐานขั้นต้นที่นำมาทดสอบการทำงานของ Fuzzy คือ ระบบ 9-bus system (WSCC Test Case) และสามารถเป็นแนวทางสำหรับระบบจำลองที่ใหญ่ขึ้น หรือ ระบบที่ใช้งานจริง

ABSTRACT

This research is to investigate the location of fault by considering the voltage of each bus in the system for each type of fault. The collecting data is then used to train the Fuzzy-Artmap Neural Network (FANN) to memorize the data of each type of fault and can identify the type of fault that occurs precisely. The basic system of testing Fuzzy operation is the 9-bus system (WSCC Test Case) and can be a guideline to a larger simulation system or an actual system.

Key Words: fault characteristics, 9-bus system, Neural Network

*Corresponding author; e-mail address: peng_03555@hotmail.com

[1]ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

[2]รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[2]Associate Professor, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

เนื่องด้วยการเจริญเติบโตของเศรษฐกิจเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ต้องมีการขยายตัวทางด้านระบบไฟฟ้าเพื่อตอบสนองความต้องการ ทำให้ระบบไฟฟ้ามีความซับซ้อนและยุ่งยากเพิ่มขึ้น มีการใช้พลังงานมากขึ้น ซึ่งการขยายระบบไฟฟ้าต้องลงทุนในการพัฒนาเทคนิค เทคโนโลยี ป้องกันที่ทันสมัย สะดวกรวดเร็ว จากเครือข่ายที่เพิ่มขึ้น ทำให้โอกาสเกิด Fault ในระบบก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย

ในอดีตการตรวจจับลักษณะในการเกิดความผิดพร่อง (Fault Detection) มีความล่าช้าเนื่องจากเทคโนโลยีในการประมวลผลและพารามิเตอร์ในการคำนวณมีน้อย ทำให้กระบวนการเคลียร์ Fault เกิดความล่าช้า เนื่องจากเป็นการแจ้งไฟดับจากผู้ใช้ไฟที่เกิดความขัดข้อง โดยไม่ทราบสาเหตุของการเกิดระบบไฟฟ้าขัดข้อง ชนิดของการเกิด Fault และตำแหน่ง Fault ทำให้แก้ไขสาเหตุหรือเกิดเหตุไฟฟ้าขัดข้องเป็นระยะเวลานาน ดังนั้นเพื่อให้ลดระยะเวลาในการตรวจสอบรูปแบบในการเกิดความผิดพร่องที่เกิดขึ้น ในระบบไฟฟ้าอย่างรวดเร็ว จึงเกิดการลงทุนเพิ่มขึ้นในด้านการพัฒนา เทคนิค เทคโนโลยี ระบบตรวจสอบป้องกันอยู่ตลอดเวลา

เพื่อนำไปสู่การแก้ไขปัญหาดังกล่าว และรับรู้ชนิดของ Fault ที่เกิดขึ้นที่รวดเร็ว ทันต่อเหตุการณ์ และเพิ่มประสิทธิภาพให้มากขึ้น งานวิจัยนี้จึงได้มีการเก็บรวบรวมข้อมูลการเกิด Fault จากระบบ 9-bus system และจำลองเหตุการณ์รูปแบบลักษณะต่างๆของ Fault ในระบบ เพื่อที่นำไปสู่ขั้นตอนการเรียนรู้ Machine Learning โดยใช้การตัดสินใจโดย Fuzzy ต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

Fuzzy-Artmap Neural Network (FANN)

ตรรกะศาสตร์คลุมเครือ (Fuzzy Logic) เป็นระบบโครงข่ายประสาทเทียมที่เป็นการจำลองมาจากระบบสมองของมนุษย์ โดยสมองของมนุษย์นั้นมีหน่วยประมวลผลขนาดเล็ก และเชื่อมโยงกันด้วยโครงข่ายประสาทจำนวนมาก ช่วยให้มนุษย์สามารถเรียนรู้และคิดวิเคราะห์ได้อย่างรวดเร็ว ในส่วนคอมพิวเตอร์นั้นไม่มีโครงข่ายที่ซับซ้อนคล้ายกับสมองของมนุษย์ เพียงแค่มีหน้าที่ในการประมวลผลโปรแกรมตามคำสั่งของมนุษย์เท่านั้น ดังนั้นเมื่อมนุษย์ต้องการจะให้คอมพิวเตอร์เรียนรู้สิ่งที่ต้องการประมวลผล จึงเป็นเรื่องที่ซับซ้อนในรูปแบบปกติ จึงได้มีการสร้างแบบจำลองแนวทางการเรียนรู้ของมนุษย์ ไปสู่คอมพิวเตอร์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม

การเรียนรู้ของมนุษย์ (Human learning)

การเรียนรู้ของมนุษย์นั้น มีหลายวิธี หนึ่งในนั้น คือ การที่มนุษย์รับข้อมูลมา และรับรู้ว่าข้อมูลนั้นคืออะไร จากนั้นมนุษย์จะทำการจดจำและเรียนรู้ในการรับรู้ในสิ่งที่คล้ายกัน เช่น ตอนที่เด็กเกิดมา จะยังไม่รู้ว่าสุนัขคืออะไร เด็กจะได้รับฟังจากพ่อแม่ของเขาว่านี่คือ “สุนัข” สมองของแต่ละคนจะทำการหาวิธีจดจำว่ารูปแบบข้อมูลลักษณะนี้คือ สุนัข เช่น มีสี่ขา มีขน เห่าได้ (Figure 1)

เมื่อเด็กได้เห็น “แมว” และพ่อแม่ของเขาบอกว่า นี้คือ “แมว” เด็กก็จะรับรู้เป็นข้อมูลอีกชุดนึง ซึ่งสมองของมนุษย์ก็จะเรียนรู้และหาวิธีแยกแยะข้อแตกต่างของสุนัขและแมวได้ และยิ่งเมื่อเด็กเห็นสุนัขและแมวบ่อยๆ

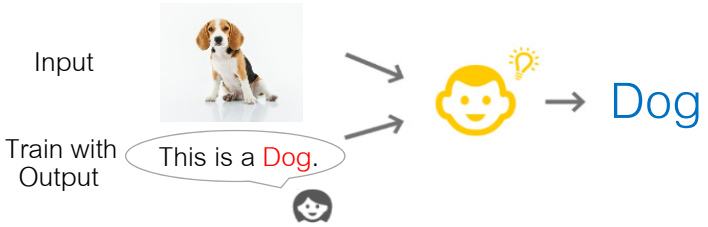


Figure 1 Human learning

และในรูปแบบที่แตกต่างกันเล็กน้อยมากขึ้นเท่าไหร่ เด็กก็จะสามารถแยกแยะ “สุนัข” และ “แมว” ได้ถูกต้องยิ่งขึ้น จะเห็นได้ว่า มนุษย์เรียนรู้จากการป้อนข้อมูลรายละเอียด (มองเห็นสุนัขและแมว) และการป้อนข้อมูลผลลัพธ์ (พ่อแม่บอกว่านี่คือสุนัขหรือแมว) ซึ่งในส่วนของการจดจำรูปแบบและรับรู้นั้น เป็นสิ่งที่มนุษย์คิดขึ้นมาเอง และ Neural Network ก็นำแนวคิดนี้มาใช้ช่วยให้คอมพิวเตอร์ สามารถที่จะเรียนรู้ได้

Machine vs Machine Learning

การรันโปรแกรมคอมพิวเตอร์ทั่วไปนั้น เกิดจากการที่มนุษย์เขียนโปรแกรมระบุการทำงานให้ เช่น การที่มนุษย์จะเขียนโปรแกรมแยกแยะสุนัขและแมว มนุษย์ต้องบอกคอมพิวเตอร์ว่า จะแยก สุนัข และ แมว ได้ด้วยวิธีไหน ซึ่งจะเห็นว่า Machine นั้นไม่จำเป็นต้องเรียนรู้อะไร เพียงแค่ทำงานตามคำสั่ง แต่เมื่อปรับให้เป็น Machine Learning ก็เหมือนจำลองการทำ Human Learning แบบข้างต้น โดยไม่จำเป็นต้องเขียนโปรแกรมแบบระบุการทำงานตรงๆ แต่จะให้ Input และ Output เข้าไป เพื่อสอนตัวคอมพิวเตอร์ ให้พัฒนาตัวเองและเรียนรู้ จากนั้นเมื่อให้ Input ใหม่เข้าไป ตัว Machine Learning ก็จะให้คำตอบออกมาโดยอ้างอิงจากสิ่งที่ได้เรียนรู้ไปแล้วนั่นเอง

Neuron

ส่วนที่เล็กที่สุดของโครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network) คือ Neuron ซึ่งทำหน้าที่คำนวณ Input ที่เข้ามา เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ออกไป โดยมีส่วนประกอบสำคัญดังนี้

- Input หรือค่าที่ส่งเข้ามาที่ Neuron โดยจะมีขาที่เข้ามาได้หลายขา ขึ้นอยู่กับจำนวนที่มนุษย์ต้องการสร้าง
- Weight เป็นการให้น้ำหนักของขาแต่ละขาที่ส่งเข้ามา โดยมีค่าระหว่าง 0-1 เมื่อเริ่มต้นจะเป็นการ Random ขึ้นมา จากนั้นตัว Neuron จะทำการเรียนรู้เรื่อยๆ ก็จะเป็นการปรับ weight ให้ได้คำตอบที่ใกล้เคียงที่สุด
- Bias คือค่าที่ช่วยเข้ามาทำให้ค่าที่เข้ามาอยู่ในระหว่าง 0 - 1 ได้ โดยจะเป็นเลข random และปรับไปเรื่อยๆ ทุกครั้งที่เรียนรู้
- Output คือผลลัพธ์
- Back Propagation คือการที่ Neuron นำค่า Error ของ Output ที่ได้ กับ Output ที่มนุษย์สั่งให้ Neuron เรียนรู้ นำไปปรับ Weight และ Bias ให้เกิดผลลัพธ์ที่ถูกต้องตามที่ได้เรียนรู้มา
- การสอนตัว Neuron นั้นจำเป็นต้องสอนหลายๆรอบเพื่อให้เกิด Error น้อยที่สุด ยิ่งทำการ Train มากเท่าไหร่ ตัว Weight และ Bias ก็จะปรับค่าให้ได้ Output ที่ใกล้เคียงผลลัพธ์ที่เราต้องการมากที่สุดนั้นเอง

รูปแบบของ Neural Network ที่ง่ายที่สุดคือ Feed-Forward Neural Network โดยจะแบ่ง Neuron ออกเป็นกลุ่มๆ โดยแต่ละกลุ่มจะเรียกเป็น Layer โดยข้อมูลที่เข้ามาจะไหลไปในทิศทางเดียว ไม่ไหลย้อนกลับจาก Layer หนึ่ง สู่อีก Layer หนึ่ง (Figure 2)

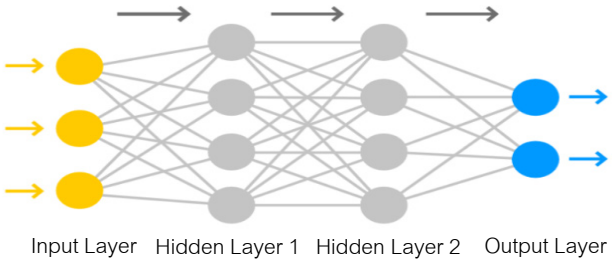


Figure 2 Feed-Forward Neural Network

ประเภทของความผิดพร่องในระบบไฟฟ้า (Type of Fault)

กระแสลัดวงจรในระบบไฟฟ้าที่สามารถประมวลผลได้โดยใช้โปรแกรม DIgSILENT PowerFactory นั้นมีทั้งหมด 11 ชนิดด้วยกันคือ

3-Phase Short-Circuit, 2-Phase Short-Circuit, Single Phase to Ground, 2-Phase to Ground, 1-Phase to Neutral, 2-Phase to Neutral, 3-Phase to Neutral, 1-Phase Neutral to Ground, 2-Phase Neutral to Ground, 3-Phase Neutral to Ground และ 3-Phase Short-Circuit (unbal.)

เนื่องจากระบบ 9-bus เป็นระบบแรงสูง ซึ่งไม่มีสาย Neutral ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงพิจารณาเฉพาะ 3-Phase Short-Circuit, 2-Phase Short-Circuit, Single Phase to Ground, 2-Phase to Ground และ 3-Phase Short-Circuit (unbal.) เท่านั้น

ระบบจำลองไฟฟ้ากำลัง (Power System Model)

ระบบพื้นฐานขั้นต้นที่นำมาทดสอบการทำงานของ Fuzzy คือ ระบบ 9-bus system (WSCC Test Case) จาก IEEE (Figure 3)

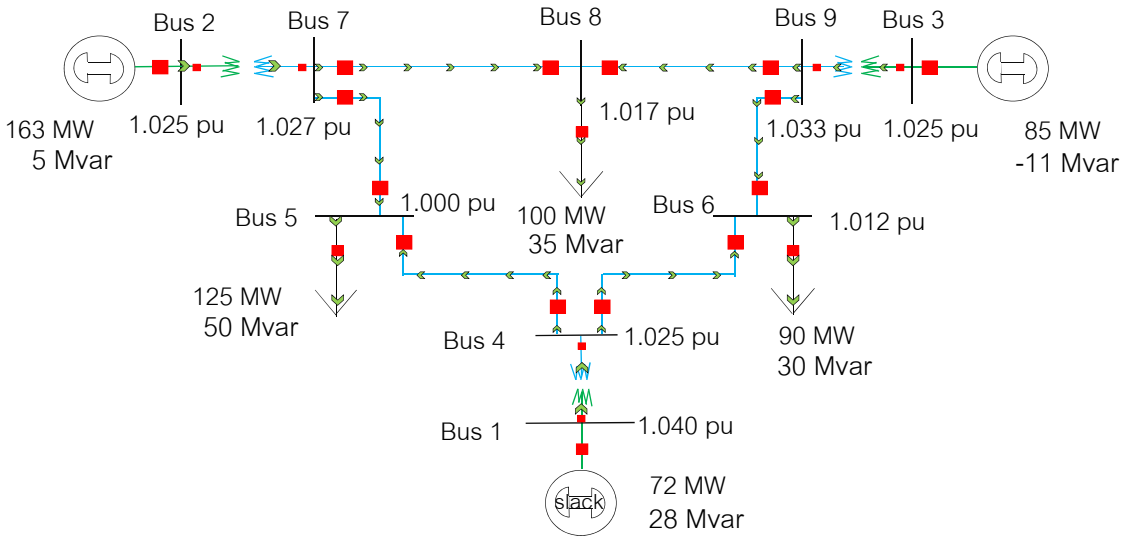


Figure 3 9-bus system (WSCC Test Case)

ระบบที่นำมาศึกษาเป็นระบบ 9-bus system (WSCC Test Case) โดยมีรายละเอียดตามมาตรฐานดังต่อไปนี้ “ เป็นระบบของ the Western System Coordinating Council (WSCC) ประกอบด้วย 9 บัสโดยมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 3 เครื่อง หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง 2 ขดลวด จำนวน 3 ตัว สายส่งจำนวน 6 เส้น และภาระจำนวน 3 ตัว โดยที่มีระดับแรงดัน 13.8 kV, 16.5 kV, 18 kV, และ 230 kV

*(www.al-roomi.org/power-flow/9-bus-system)

เนื่องจากงานนี้ มีการระบุตำแหน่ง ดังนั้นจึงต้องการรูปที่มองเห็นระยะทางที่ใกล้เคียงกับความจริง โดยอาศัยค่าของอิมพีแดนซ์ของสายส่ง (Figure 4)

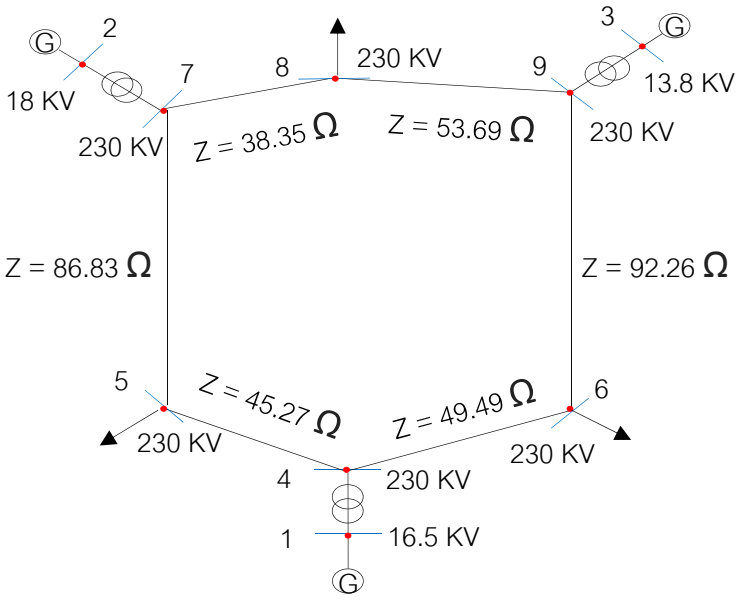


Figure 4 9-bus system from Z data

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากวงจรระบบดังกล่าว ได้ดำเนินการประมวลผลด้วยโปรแกรม DIgSILENT PowerFactory จำลองเหตุการณ์ของกระแสลัดวงจรในรูปแบบต่างๆ โดยแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนระบุตำแหน่ง และ ส่วนระบุชนิดของกระแสลัดวงจร โดยงานวิจัยนี้พิจารณาที่แรงดันเป็นหลัก เมื่อเกิดกระแสลัดวงจรใกล้กับจุดที่สังเกต ค่าแรงดันไฟฟ้าจะลดต่ำลง แต่เมื่อระยะทางไกลออกไปค่าแรงดันไฟฟ้าจะมีค่าสูงขึ้น โดยอาจไม่มีผลกระทบกับแรงดันที่ระยะไกลออกไปมาก ถ้าบัสที่ไกลออกไปอยู่หลังหม้อแปลง หม้อแปลงช่วยทำการลดผลกระทบแรงดันตกที่เกิดจากกระแสลัดวงจรในระบบได้ เนื่องจากหม้อแปลงมีค่า อิมพีแดนซ์สูง เมื่อเทียบกับสายส่ง โดยแยกเป็น 2 ประเภท

ประเภทที่ 1. ระบุตำแหน่งกระแสลัดวงจร

ดำเนินการเก็บค่าแรงดันและระยะทางของแต่ละบัสขณะจำลองเหตุการณ์กระแสลัดวงจรขึ้นในระบบ

พิจารณาแรงดันที่ละบัสตั้งแต่บัส 1-9 โดยดูว่าเมื่อเกิดกระแสลัดวงจรใกล้ ไกลบัสนั้นๆ แรงดันมีค่าเปลี่ยนแปลงอย่างไรบ้าง

ระยะทางอ้างอิงจากค่าอิมพีแดนซ์ (Figure 4) โดยวัดระยะห่างระหว่างจุดที่เกิดกระแสลัดวงจรกับจุดที่สังเกต (Table 1, Table 2, Figure 5, Figure 6, Figure 7, Figure 8)

Table 1 Voltage at Bus 1

Bus Fault	Focus Bus1	Distance
1	0	0
4	0.44216	less
5	0.70685	45.2751
6	0.71969	49.4919
7	0.81007	132.11
9	0.82205	141.758
8	0.85305	170.463
2	0.86662	132.11
3	0.87464	141.758

Table 2 Voltage at Bus 2

Bus Fault	Focus Bus2	Distance
2	0	0
7	0.39187	less
8	0.62668	38.3525
9	0.738	92.046
5	0.74938	86.835
4	0.77347	132.11
3	0.80775	92.046
1	0.8262	132.11
6	0.836	181.602

จากการคำนวนด้วยโปรแกรม DIgSILENT PowerFactory และ นำผลที่ได้ไปฝึกด้วย Neural Network ที่มีค่าพารามิเตอร์ และ รูปแบบดังนี้

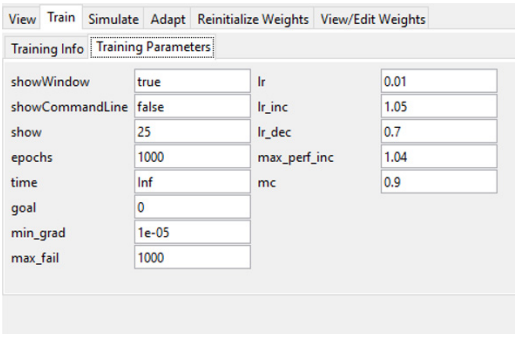


Figure 5 Training Parameters

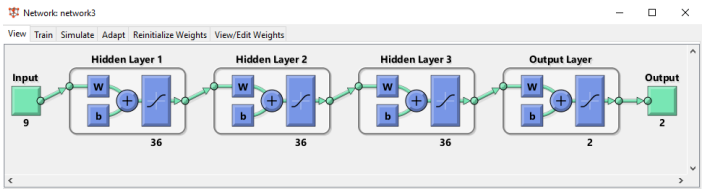


Figure 6 Create Network or Data

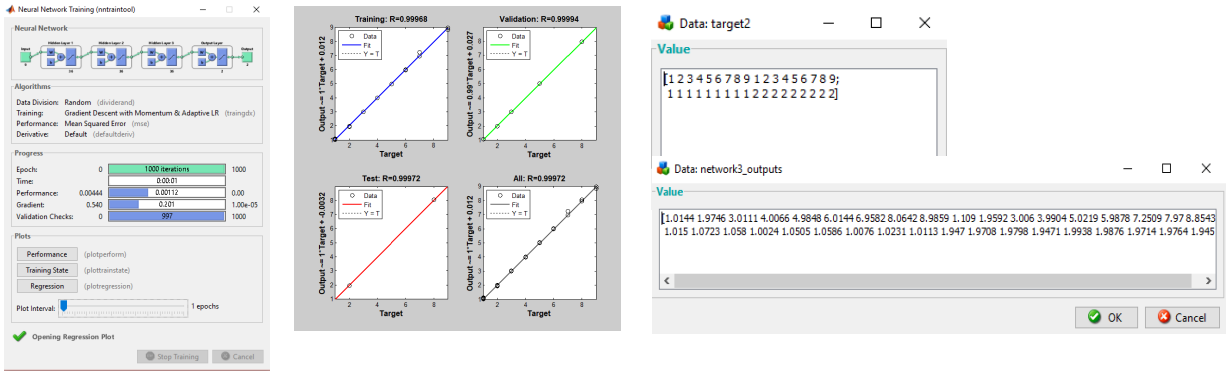


Figure 7 Train Network1

จากผลลัพธ์ ค่า error จากกราฟ (Figure 7) หรือ ค่า error ของแต่ละจุด (Figure 8) มีค่าน้อยมาก

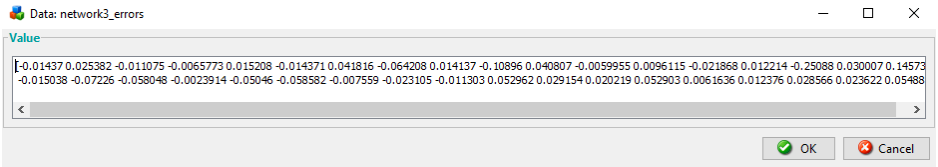


Figure 8 Data error

ผลจากการฝึกสอนพบว่า Neural Network สามารถจดจำรูปแบบและให้ผลลัพธ์เป็นตำแหน่งกระแสลัดวงจรได้

ประเภทที่ 2. ระบุชนิดของกระแสลัดวงจร

ส่วนนี้จะทำการเปรียบเทียบแรงดันโดยนำข้อมูลที่บัส 1 เฟส Aของแต่ละประเภทมาดูว่าแตกต่างกันอย่างไร (Table 3,Table 4)

Table 3 Voltage at Bus 1 Phase A

Bus	3Ø fault	2Ø fault	1Ø to ground	2Ø to ground	3Ø fault (unbal.)
1	0	0.52	0	0	0
2	0.826197	0.85077	0.837044	0.821149	0.826197
3	0.772635	0.818476	0.787211	0.769245	0.772635
4	0.20868	0.508286	0.190511	0.18789	0.20868
5	0.367082	0.539951	0.355206	0.339133	0.367082
6	0.369035	0.556899	0.359759	0.343803	0.369035
7	0.699728	0.75958	0.718957	0.694583	0.699728
8	0.683923	0.749358	0.702326	0.676659	0.683923
9	0.682491	0.757938	0.702447	0.678751	0.682491

Table 4 Voltage at Bus 1 Phase B and C

	2Ø fault		1Ø to ground		2Ø to ground	
Bus/Phase	B	C	B	C	B	C
1	0.52	1.04	0.974522	0.946527	0	0.813789
2	0.908519	1.025	1.023139	0.981962	0.844343	0.969136
3	0.86652	1.025	1.016438	0.976441	0.793789	0.952924
4	0.577137	1.025788	0.997235	0.937316	0.208887	0.868679
5	0.637352	0.995631	0.986557	0.909597	0.380347	0.871522
6	0.63787	1.012654	0.998453	0.927958	0.382628	0.882949
7	0.826782	1.025769	1.015742	0.962285	0.728436	0.931765
8	0.809999	1.015883	1.006418	0.951698	0.713657	0.921669
9	0.810615	1.032353	1.017847	0.969164	0.710766	0.932439

จาก Table 3 และ 4 สามารถวิเคราะห์ได้ว่า การเกิดกระแสลัดวงจรของแต่ละชนิดจะมีผลต่อแรงดันของแต่ละบัส และแต่ละเฟสที่แตกต่างกันไป ทำให้สามารถจำแนกได้ว่าเป็นกระแสลัดวงจรประเภทใด

จากการคำนวนด้วยโปรแกรม DIgSILENT PowerFactory และ นำผลที่ได้ไปฝึก Neural Network ที่มีค่าพารามิเตอร์และรูปแบบดัง (Figure 5) และ (Figure 9) ตามลำดับ

จากผลลัพธ์ ค่า error จากกราฟ หรือ ค่า error ของแต่ละจุด (Figure 9) มีค่าน้อยมาก

ผลจากการฝึกสอนพบว่า Neural Network สามารถจดจำรูปแบบและให้ผลลัพธ์เป็นชนิดของกระแสลัดวงจรได้

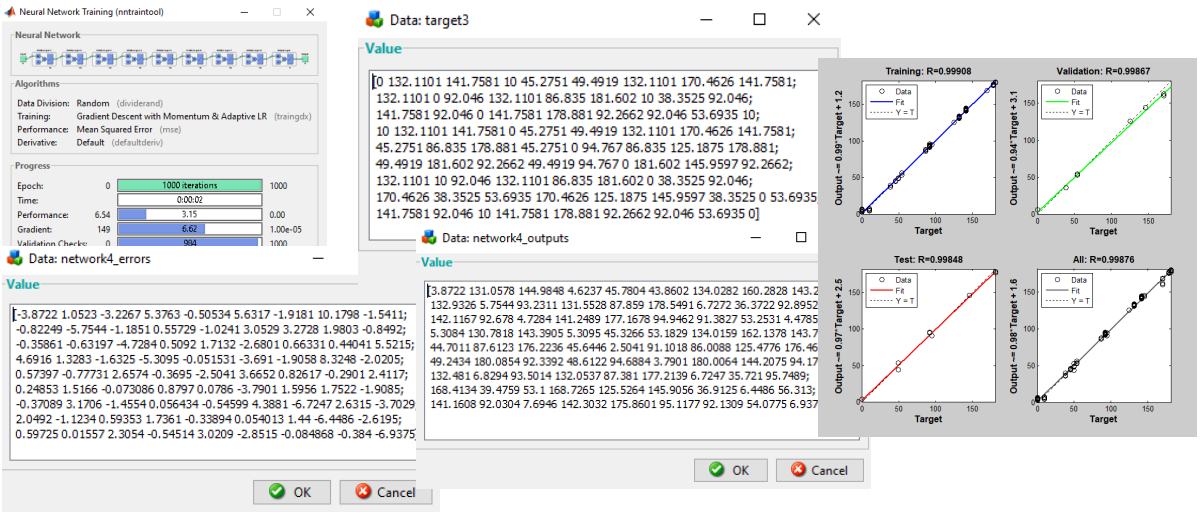


Figure 9 Train Network2 & Output Error

สรุป

จากผลการวิจัยข้างต้นสรุปได้ว่า การจำแนกประเภทของกระแสลัดวงจรและระบุตำแหน่งการเกิด อันดับแรกพิจารณาแรงดันที่แต่ละบัสโดยเทียบกับค่าอิมพีแดนซ์ ซึ่งค่าเปรียบเสมือนระยะทางที่ไกลออกไป พบว่าเมื่ออิมพีแดนซ์มีค่ามาก ค่าแรงดันตกมีค่าน้อยลง ทำให้รู้ตำแหน่งที่เกิดอยู่ไกลออกไป จากนั้นพิจารณาดูค่าแรงดันตกว่ามีค่าใกล้เคียงหรือตรงกับค่าแรงดันตกของกระแสลัดวงจรประเภทไหน เพื่อทำการจำแนกประเภท เมื่อสามารถรู้แนวทางการจำแนกและระบุตำแหน่งแล้วนั้น ผลจากการนำกระบวนการทางโครงข่ายประสาทเทียมเข้ามาช่วยเพื่อให้การวิเคราะห์แต่ละประเภทข้างต้น ซึ่งสามารถนำหลักการดังกล่าวมาฝึกทั้งสองประเภทร่วมกันซึ่งอาจทำให้เกิดการดำเนินไปได้รวดเร็วและมีประสิทธิภาพมากขึ้น นำไปสู่การแก้ไขที่รวดเร็วและ ลดค่าเสียหายเนื่องจากการแก้ไขที่ล่าช้าต่อไป

กิจกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่คอยให้การสนับสนุนแนะนำการทำงานให้งานดำเนินไปได้ด้วยดีขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ใช้สถานที่ได้การทำวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

G. A. Carpenter, S. Grossberg, and N. Markuzon, "Fuzzy ARTMAP: a neural network architecture for incremental supervised learning of analog multidimensional maps," *IEEE Trans. Neural Netw.,* vol. 3, pp. 698-713, 1992.

Tahmasebi, Pejman; Hezarkhani, Ardeshir (21 January 2011). "Application of a Modular Feedforward Neural Network for Grade Estimation". Natural Resources Research. 20 (1): 25–32.

L. A. Zadeh, "Fuzzy sets," *Inf. Control,* vol. 8, pp. 338-353, 1965.

การปรับปรุงคุณภาพน้ำมันชีวมวลจากต้นกระถินยักษ์สายพันธุ์ มก.5/7 ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา Ni_3P/HZSM-5 และ Cu-ZnO/CeO_2/ZrO_2/Al_2O_3

Upgrading of Bio-oil Derived from Pyrolysis of Giant Leucaena by Ni_3P/HZSM-5 and Cu-ZnO/CeO_2/ZrO_2/Al_2O_3 Catalysts

อาคเนย์ ประวัติยากูร[1] และ อภิญญา ดวงจันทร์[1*]

Arkanay Prawattiyakul[1] and Apinya Duangchan[1*]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันชีวมวลจากต้นกระถินยักษ์สายพันธุ์ มก. 5/7 โดยผ่านกระบวนการ catalytic cracking โดยตัวเร่งปฏิกิริยา Ni_3P/HZSM-5 ที่ทำให้เกิดการไฮโดรดีออกซิจิเนชัน และ Cu-ZnO/CeO_2/ZrO_2/Al_2O_3 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดไฮโดรเจนจากกระบวนการ steam reforming ของเมทานอล โดยทำปฏิกิริยาในปฏิกรณ์แบบถังกวนที่ 260 องศาเซลเซียส จากการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันชีวมวล พบว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni_3P/HZSM-5 ในบรรยากาศไนโตรเจน ผลได้น้ำมันเฟสสารอินทรีย์ใกล้เคียงกับของ thermal cracking แต่เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni_3P/HZSM-5 ในบรรยากาศไฮโดรเจนความดัน 5 บาร์ ผลได้เฟสสารอินทรีย์ และความหนืดลดลง และเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni_3P/HZSM-5 ร่วมกับ Cu-ZnO/ZrO_2/CeO_2/Al_2O_3 ในบรรยากาศไนโตรเจน พบว่าผลได้ของเฟสสารอินทรีย์สูงที่สุดอยู่ที่ 14.27 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและความหนืดลดลง และค่าความร้อนสูงของน้ำมันเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ระหว่าง 28.89 - 29.01 เมกะจูลต่อกิโลกรัม

ABSTRACT

This research focuses on upgrading of bio-oil derived from pyrolysis of Giant Leucaena by using Ni_3P/HZSM-5 catalyst for hydrodeoxygenation process and Cu-ZnO/CeO_2/ZrO_2/Al_2O_3 catalyst for steam reforming of methanol process. Reaction occurs in an autoclave reactor at 260°C. Using Ni_3P/HZSM-5 catalyst under nitrogen atmosphere, yield of the organic phase liquid was about the same as that from thermal cracking. However, using the same catalyst but in hydrogen pressure of 5 bar resulted in a slightly lower the organic phase liquid yield but the viscosity of oil was decreased. The highest organic phase yield of 14.27 wt% was found from upgrading of the crude bio-oil by using Ni_3P/HZSM-5 mixed with Cu-ZnO/CeO_2/ZrO_2/Al_2O_3 catalyst under nitrogen atmosphere. Moreover, the viscosity of the oil was also decreased. The organic phase liquid from catalytic cracking reactions had high heating values in the range 28.89-29.01 MJ/kg.

Key Words: bio-oil, catalyst, hydrodeoxygenation, steam reforming, giant leucaena

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

[1]ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

คำนำ

ในปัจจุบันพลังงานนับเป็นตัวขับเคลื่อนสำคัญในการดำเนินกิจกรรมหลาย ๆ อย่าง ปริมาณการใช้พลังงานมีความสัมพันธ์กับฐานะทางเศรษฐกิจของแต่ละประเทศ โดยพลังงานที่เป็นตัวขับเคลื่อนสิ่งต่าง ๆ นั้นมีแนวโน้มในการใช้ที่สูงขึ้น (Zhao *et al*., 2010) ซึ่งเป็นที่รู้กันดีว่าน้ำมันปิโตรเลียมเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญและเป็นแหล่งพลังงานที่ไม่สามารถผลิตขึ้นมาทดแทนได้ มีแนวโน้มที่ลดลงอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นพลังงานทดแทนจึงเป็นสิ่งที่สำคัญที่กำลังจะถูกนำมาใช้ทดแทนพลังงานแบบเดิม

ชีวมวล คือสิ่งที่ได้มาจากสิ่งมีชีวิต เช่น ต้นกระถินยักษ์ เนื่องจากต้นกระถินยักษ์ขยายพันธุ์ได้รวดเร็ว ดังนั้นต้นกระถินยักษ์จึงเป็นชีวมวลที่น่าสนใจที่จะนำมาผลิตน้ำมันชีวมวล ซึ่งประเทศไทยมีแหล่งชีวมวลอยู่มาก หากรู้จักนำมาใช้อย่างมีประสิทธิภาพ จะสามารถลดการใช้พลังงานด้านอื่น อาทิ พลังงานจากน้ำมัน ไฟฟ้า แก๊สถ่านหิน ฯลฯ ซึ่งจะช่วยลดการใช้พลังงานที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

กระบวนการไฮโดรทรีทเมนต์ (hydrotreatment) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นกระบวนการที่นิยมนำมาใช้เพื่อปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันชีวมวลที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสให้มีคุณภาพดีขึ้น โดยกระบวนการไฮโดรทรีทเมนต์นั้นเป็นกระบวนการให้ความร้อน (200-400 องศาเซลเซียส) และความดัน (100-200 บาร์) ในระบบปิด ซึ่งในกระบวนการนั้นจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชัน (hydrogenation) ไฮโดรดีออกซิจิเนชัน (hydrodeoxygenation) และดีคาร์บอกซิเลชัน (decarboxylation) เป็นต้น

ในเฟสน้ำของน้ำมันชีวมวลนั้นมีน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่จึงเป็นที่นิยมในการผลิตแก๊สไฮโดรเจนผ่านกระบวนการ Steam reforming (Hu *et al*, 2008) และกระบวนการ Steam reforming ของเมทานอล เป็นกระบวนการหนึ่งที่เป็นที่นิยมในการผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการนั้น โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่มี Cu เป็นองค์ประกอบนั้นเป็นที่นิยมในกระบวนการนี้ เนื่องจากทำให้เกิดปฏิกิริยาได้สูงขึ้นและมีราคาไม่สูง (Tajrishi *et al*., 2018) และ CuO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เกิดปฏิกิริยาได้ที่อุณหภูมิต่ำและมีความเสถียร นอกจาก Cu แล้วการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเติมโลหะหลายๆชนิดนั้นช่วยเพิ่มประสิทธิภาพมากขึ้น โดยเมื่อเติม Zr จะมีผลทำให้เพิ่ม methanol conversion เพิ่มอัตราการเกิดแก๊สออกซิเจนและลดปริมาณการเกิดแก๊สคาร์บอนมอนออกไซด์ Al_2O_3จะช่วยเพิ่มการเกิดแก๊สไฮโดรเจน เนื่องจากมีค่าพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยามากและยังช่วยให้การเกิดปฏิกิริยาของ Cu ได้ดีขึ้น (Yeseneva *et al*., 2008) ZnO ใช้เป็นสารเติมแต่งให้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มี Cu เป็นองค์ประกอบ โดยจะเพิ่มประสิทธิภาพในการเกิด reforming ของเมทานอล และ CeO_2 เป็นสารเติมแต่งที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาดีขึ้นเช่นกัน นอกจากนี้ CeO_2 ยังช่วยลดการเกิดโค้ก (coke formation) เนื่องจากมีคุณสมบัติเก็บออกซิเจนได้และลดการเกิดแก๊สคาร์บอนมอนออกไซด์ได้อีกด้วย (Tajrishi *et al*., 2018)

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีนิกเกิลเป็นองค์ประกอบนั้นจะช่วยให้เกิดกระบวนการ ไฮโดรดีออกซิจิเนชัน (hydrodeoxygenation) ได้มากยิ่งขึ้นอีกทั้งนิกเกิลเป็นธาตุที่มีราคาไม่สูงอีกด้วย เมื่อศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีฟอสเฟตเป็นองค์ประกอบก็ช่วยให้เกิดกระบวนการ ไฮโดรดีออกซิจิเนชัน เช่นกัน HZSM-5 Zeolite เป็น solid acid เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่สำคัญในการที่ทำให้แก๊สไฮโดรเจนและน้ำ ไปทำปฏิกิริยากับสารประกอบฟีนอลในน้ำมันชีวมวลและเปลี่ยนเป็นไฮโดรคาร์บอน (Feng *et al*., 2017) และยังทำให้เกิดการแตกวงอะโรมาติกโดยการดึงออกซิเจนออกมาจากโมเลกุล ในปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจิเนชัน (Zhao *et al*., 2010)

ในงานวิจัยนี้จึงสนใจใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni_3P/HZSM-5 มาใช้เพื่อปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันชีวมวลที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสต้นกระถินยักษ์โดยการเปลี่ยนสารประกอบฟีนอลให้เป็นไฮโดรคาร์บอนโดยผ่านปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจิเนชัน และศึกษาการผลิดแก๊สไฮโดรเจนจากกระบวนการ steam reforming ของ เมทานอล โดยผ่านตัวเร่งปฏิกิริยา Cu-ZnO/CeO_2/ZrO_2/Al_2O_3 เพื่อนำแก๊สที่ได้ไปใช้ร่วมกับการเปลี่ยนสารประกอบฟีนอลเป็นไฮโดรคาร์บอน

อุปกรณ์และวิธีการ

วัตถุดิบ

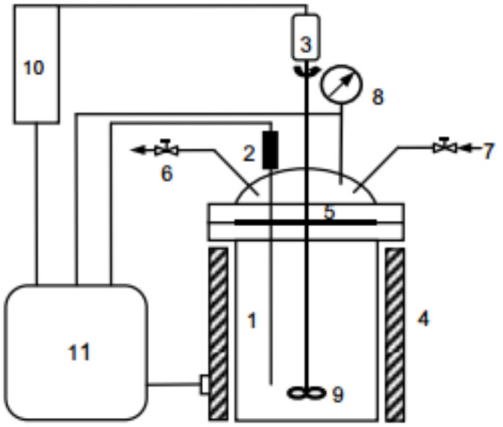
น้ำมันชีวมวลที่ได้จากการไพโรไลซิสจากไม้กระถินยักษ์สายพันธุ์ มก. 5/7 ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส โดยน้ำมันชีวมวลมีสมบัติดังแสดงใน Table 1

Table1 Elemental Analysis and High Heating Value (HHV) of Bio-oil (organic phase) Derived from Pyrolysis of Giant Leucaena

%C	%H	%O	%N	H/C	O/C	HHV
45.9	6.22	0.5	47.38	0.14	1.03	18.66

ปฏิกรณ์

ปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา เป็นปฏิกรณ์ภายใต้อุณหภูมิและความดันสูงประกอบด้วยตัวถังปฏิกรณ์ (reactor body) เป็นภาชนะทรงกระบอกขนาด 800 มิลลิลิตร สำหรับบรรจุวัตถุดิบ หุ้มด้วยเตาขดลวดไฟฟ้า มีเทอร์โมคับเปิล (thermocouple) เป็นตัววัดอุณหภูมิภายในเครื่องซึ่งแสดงค่าอุณหภูมิที่หน้าจอของเครื่องควบคุม (controller) ที่สามารถตั้งค่าอุณหภูมิที่ต้องการได้ อุณหภูมิดำเนินการสูงสุดไม่เกิน 500 องศาเซลเซียส โดยที่มีน้ำหล่อเย็นเป็นตัวควบคุมอุณหภูมิส่งมาทางท่อหล่อเย็น (cooling coil) และมีใบกวน (impeller) ช่วยกวนสารทำให้ปฏิกิริยามีอุณหภูมิและมีความเข้มข้นเท่ากัน ใบกวนเป็นชนิด 6 ใบพัด ความเร็วรอบใบกวนสามารถปรับได้ ความดันดำเนินการสูงสุดไม่เกิน 3000 psi อุปกรณ์แสดงดัง Figure 1



1. reactor vessel 2. thermocouple 3. magnetic drive
4. furnace 5. gasket 6. gas outlet
7. gas inlet 8. pressure gauge 9. impeller
10. motor 11. temperature controller

Figure 1 An autoclave reactor

การเตรียมสารตั้งต้น

ทำการเตรียมน้ำมันชีวมวลที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสต้นกระถินยักษ์สายพันธุ์มก. 5/7 โดยทำการผสมเฟสสารอินทรีย์ 28 เปอร์เซ็นต์และเฟสน้ำ 72 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เพื่อให้น้ำมันชีวมวลตั้งต้นมีสัดส่วนที่เท่ากันตลอดทุกการทดลอง

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับกระบวนการ steam reforming of methanol สำหรับการผลิตแก๊สไบโอไฮโดรเจน

เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Cu-ZnO/CeO_2/ZrO_2/Al_2O_3 (10:5:2:2:81) ด้วยวิธีเอิบชุ่ม (impregnation) โดยชั่ง aluminium oxide calcined (Al_2O_3) 4.05 กรัมและ zirconium (IV) oxide (ZrO_2) 0.1 กรัมทำการผสมกันต่อมานำ copper (II) nitrate trihydrate ($Cu(NO_3)_2.3H_2O$) 0.132 กรัม cerium (III) nitrate hexahydrate ($Ce(NO_3)_3 .6H_2O$) 0.04 กรัม zinc nitrate hexahydrate ($Zn(NO_3)_2.6H_2O$) 0.069 กรัม ไปละลายน้ำกลั่น 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร ทำการคนผสม 30 นาที และนำสารละลายที่ได้มาเอิบชุ่มบน Al_2O_3-ZrO_2 ที่ทำการผสมไว้ต่อมานำมาอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และนำไปคัลไซน์ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานี้ทำตามวิธีของ Tajrishi *et al.* (2018)

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับกระบวนการ Hydrodeoxygenation

เตรียม HZSM-5 Zeolite โดยวิธี Ion-exchange โดยการนำ ZSM-5 Zeolite 5 กรัม ผสมสารละลาย 1 M NH_4NO_3 โดยเตรียมจากการชั่ง NH_4NO_3 40 กรัม น้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร ต่อมาทำการกวนที่ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ล้างและกรองของแข็งด้วยน้ำ DI 4-5 ครั้ง เพื่อนำ NO_3^-ออก อบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมง คัลไซน์ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส 8 ชั่วโมง ตามวิธีของ Feng *et al*. (2017)

เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Ni_3P/HZSM-5 ด้วยวิธีเอิบชุ่ม (impregnation) โดยชั่ง ammonium phosphate dibasic ($(NH_4)_2HPO_4$) 0.95 กรัมและนำไปละลายน้ำกลั่น 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร ต่อมาเติม nickel (II) nitrate hexahydrate ($Ni(NO_3)_2.6H_2O$) 6.2 กรัม และหยดกรดไนตริก 1 โมลาร์ จนกว่าจะไม่มีตะกอน นำสารละลายที่ได้มาเอิบชุ่มบน HZSM-5 จำนวน 5 กรัม ต่อมานำมาอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และนำไปคัลไซน์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ตามวิธีของ Yu *et al*. (2019)

ขั้นตอนปฏิกิริยา Steam Reforming of Methanol และ Hydrodeoxygenation

น้ำมันชีวมวล 85 กรัม เมทานอล 15 กรัม สัดส่วนโดยน้ำหนักเฟสสารอินทรีย์ : เฟสน้ำ : เมทานอล (24 : 61 : 15) และตัวเร่งปฏิกิริยา Cu-ZnO/CeO_2/ZrO_2/Al_2O_3 1 กรัม Ni_3P/HZSM-5 1 กรัม มาทำปฏิกิริยาโดยใช้ปฏิกรณ์แบบหม้ออัดความดันภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ความดันบรรยากาศอุณหภูมิ 220 - 280 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงตามวิธีของ Feng *et al*. (2017) เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาทำการกรองตัวเร่งปฏิกิริยา ทำการชั่งน้ำมันชีวมวลที่ได้แล้วบันทึกผล

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลได้ของน้ำมันชีวมวล

น้ำมันชีวมวลที่ได้จากการไพโรไลซิสต้นกระถินยักษ์มาผ่านกระบวนการ thermal cracking และ catalytic cracking ผลได้แสดงใน Table 2 พบว่าเมื่อไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาค่าผลได้ของเฟสสารอินทรีย์ เฟสน้ำ และเฟสแก๊ส มีค่า 13.46 71.8 และ 14.74 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ โดยเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

Ni_3P/HZSM-5 ผลได้ของน้ำมันเฟสสารอินทรีย์มีค่าใกล้เคียงกับเมื่อไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อทำการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni_3P/HZSM-5 ในบรรยากาศของไฮโดรเจนพบว่าผลได้น้ำมันเฟสสารอินทรีย์ลดลงเล็กน้อย แต่สิ่งที่แตกต่างคือน้ำมันที่ได้มีความหนืดน้อยกว่าน้ำมันที่ได้ในบรรยากาศของไนโตรเจน อย่างไรก็ตามแก๊สไฮโดรเจนนั้นสามารถผลิตได้จากน้ำมันชีวมวลโดยในงานวิจัยนี้ใช้เมทานอลร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา Cu-$ZnO/ZrO_2/CeO_2/Al_2O_3$ เพื่อให้เกิด in situ bio-hydrogen เพื่อใช้ในปฏิกิริยา hydrogenation และ hydrodeoxygenation โดยไม่ต้องเติมแก๊สไฮโดรเจนในปฏิกรณ์ ผลการทดลองพบว่าค่าผลได้ของเฟสสารอินทรีย์สูงที่สุดอยู่ที่ 14.27 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยไบโอไฮโดรเจนนี้ไปเพิ่มเฟสของสารอินทรีย์ และน้ำมันที่ได้มีความหนืดลดลงเช่นเดียวกับเมื่อใช้แก๊สไฮโดรเจน เฟสของน้ำที่เกิดขึ้นมีค่าใกล้เคียงกันทุกการทดลองโดยมีค่าอยู่ระหว่าง 69 ถึง 72 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni_3P/HZSM-5 ภายใต้บรรยากาศไฮโดรเจน 5 บาร์ พบว่าเฟสของแก๊สมีค่าสูงที่สุดอยู่ที่ 17.97 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

Table 2 Yields of Thermal Cracking and Catalytic Cracking of the Bio-oil

Experiment	organic phase (%wt)	aqueous phase (%wt)	gas phase (%wt)
Thermal cracking	13.46	71.8	14.74
Ni_3P/HZSM-5	13.98	70.83	15.19
Ni_3P/HZSM-5, H_2	12.84*	69.19	17.97
Ni_3P/HZSM-5, Cu-$ZnO/ZrO_2/CeO_2/Al_2O_3$	14.27*	69.82	15.91

Remark * Lower viscosity

ผลค่าความร้อนสูง (High Heating Value, HHV)

ค่าความร้อนสูงของน้ำมันชีวมวลที่ได้นั้นเป็นดัง Figure 2 โดยเมื่อทำการปรับปรุงคุณภาพทั้ง thermal cracking และ catalytic cracking พบว่ามีค่าความร้อนสูงขึ้นทั้งหมดและเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้มีค่าความร้อนสูงกว่าเมื่อไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยเมื่อไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าความร้อน 27.78 เมกะจูลต่อกิโลกรัม และเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าความร้อนใกล้เคียงกันโดยมีค่าอยู่ระหว่าง 28 ถึง 30 เมกะจูลต่อกิโลกรัม

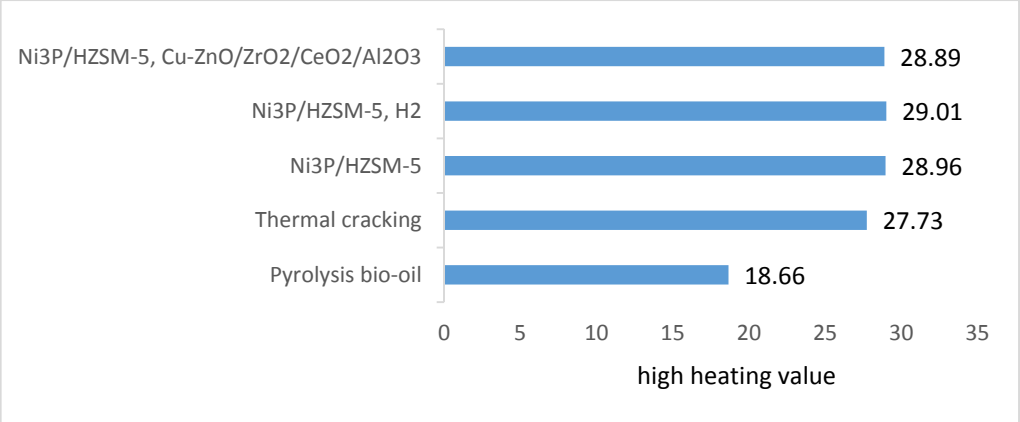


Figure 2 High heating values of oils (organic phase) from reactions using Ni_3P/HZSM-5 and Ni_3P/HZSM-5 mixed with Cu-$ZnO/ZrO_2/CeO_2/Al_2O_3$ under N_2 and H_2 atmosphere at 260°C.

นอกจากผลได้และค่าความร้อนของน้ำมันแล้ว ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อองค์ประกอบของน้ำมันก็มีความสำคัญโดยสามารถศึกษาได้จากผลการวิเคราะห์น้ำมันด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี แมสสเปคโตรสโคปี ซึ่งจะได้รายงานเพิ่มเติมต่อไป

สรุป

จากการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันชีวมวลพบว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni_3P/HZSM-5 ผสมกับ Cu-ZnO/ZrO_2/CeO_2/Al_2O_3 เปรียบเทียบกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni_3P/HZSM-5 เดี่ยวในบรรยากาศของไนโตรเจนและไฮโดรเจนทำให้เห็นผลของตัวเร่งปฏิกิริยา Cu-ZnO/ZrO_2/CeO_2/Al_2O_3 ต่อการเกิด in situ bio-hydrogen โดยทำให้ค่าผลได้ของเฟสสารอินทรีย์สูงที่สุดอยู่ที่ 14.27 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และทำให้ค่าความร้อนเพิ่มขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่สนับสนุนสถานที่ทำวิจัย ขอขอบคุณกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน สำหรับตัวอย่างน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสกระถินยักษ์สายพันธุ์มก.5/7 ขอขอบคุณไร่สุวรรณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับไม้กระถินยักษ์สายพันธุ์มก. 5/7 และขอขอบคุณบริษัท ปตท จำกัด (มหาชน) สาขาวังน้อย สำหรับ elemental analysis

เอกสารอ้างอิง

Feng, J., C. Hse, K. Wang, Z. Yang, J. Jiang and J. Xu. 2017. Directional liquefaction of biomass for phenolic compounds and in situ hydrodeoxygenation upgrading of phenolics using bifuncitonal catalysts. **Energy**

Hu, X. and G. Lu. 2008. Investigation of steam reforming of a series of model compounds derived from bio-oil for hydrogen production. **Applied Catalysis B: Environmental**

Tajrishi, O.Z, M. Taghizadeh and A.D. Kiadehi. 2018. Methanol steam reforming in a microchannel reactor by Zn-,Ce- and Zr- modified mesoporous Cu/SBA-15 nanocatalyst. **International Journal of Hydrogen Energy 48**

Yaseneva, P., S. Pavlova, V. Sadykov, E. Moroz, E. Burgina, L. Dovlitova, V. Rogov, S. Bamaev, S. Belochapkin and J. Ross. 2008. Hydrogenation production by steam reforming of methanol over Cu-CeZrYO_x–based catalysts. **Catalysis Today**

Yu, Z., A. Wang, S. Liu, Y. Yao, Z. Sun, X. Li, Y. Liu, Y. Wang, D.M. Camaioni and J.A. Lercher. 2019. Hydrodeoxygenation of phenolic compounds to cycloalkanes over supported nickel phosphides. **Catalysis Today**

Zhao, D. Li, P.Bui and S.T. Oyama. 2010. Hydrodeoxygenation of guaiacol as model compound for pyrolysis oil on transition metal phosphide hydroprocessing catalysts. **Applied Catalysis A: General**

ทัศนคติของผู้ประกอบการธุรกิจอาหารต่อการออกแบบ

An Attitude towards Design from Food Business Enterprises

อรช กระแสอินทร์[1*] และ พรปวีร์ ดิษฐคำเริง[1]

Aracha Krasae-in[1*] and Pornpavee Ditcomerueng[1]

บทคัดย่อ

เพื่อที่จะพัฒนาองค์ความรู้ในการเรียนการสอนทางด้านการออกแบบของคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ให้รองรับความต้องการของธุรกิจอาหารและเพื่อนำไปสู่การพัฒนานวัตกรรมทางอาหาร จึงได้ทำการสำรวจความคิดเห็นจากผู้ประกอบการในธุรกิจอาหารกับการออกแบบ ซึ่งผลที่ได้นั้น แสดงถึงความคิดเห็นในทางบวกของผู้ตอบแบบสอบถามถึงการออกแบบต่อธุรกิจอาหาร โดยแสดงถึงความสำคัญของการออกแบบต่อธุรกิจอาหารของตนเองในการที่จะสร้างความแตกต่างและความสามารถในการแข่งขันให้แก่ธุรกิจของตนเอง แม้ว่าในปัจจุบันผู้ตอบมองภาพธุรกิจของตนเองยังมีส่วนของการออกแบบค่อนข้างต่ำ และในรายละเอียดนั้น องค์ประกอบของการออกแบบแต่ละด้านได้รับความเห็นว่ามีความสำคัญสูงได้แก่ ลักษณะของอาหารใหม่หรือผลิตภัณฑ์อาหารใหม่ ตามด้วย บรรจุภัณฑ์อาหารหรือการจัดจาน การตกแต่งสถานที่หรือออกแบบภายใน การออกแบบเมนูและสิ่งพิมพ์ต่าง ๆ ในขณะที่ การให้บริการอาหาร และการเลือกอุปกรณ์ เช่น จาน ช้อน ส้อม และของตกแต่ง ถูกมองว่าเป็นองค์ประกอบทางการออกแบบที่สำคัญน้อยกว่า ซึ่งผลที่ได้จะเป็นส่วนในการนำไปพิจารณาการสร้างวิชาการเพื่อการออกแบบที่เป็นประโยชน์ต่อธุรกิจอาหาร ให้การออกแบบเข้าไปมีส่วนร่วมในธุรกิจอาหารอย่างรอบด้านและตั้งแต่จุดเริ่มต้นที่ผลิตภัณฑ์

ABSTRACT

This study was intended to find an attitude from the food business enterprises toward design, in order to create the specific design education responding to the development and innovation in food industry. The survey result shown the positive attitude on the design in the food business despite the self-assessed by the responders of the design on their existing business which shown moderate to low outcome. In detail, the design features that the responders perceived as important to their business were the appearance of new product, the design of packaging, interior and atmosphere design, and graphic menu and printing design consecutively; while the less important features were service design and the ornaments including cutlery, wares and decorative items. The design education and research for food business will consider this study's result as holistic approach which could create the benefit to the food industry.

Key Words: design, food industry

*Corresponding author; email address. **aracha.kr@ku.th**

[1]ภาควิชาสถาปัตยกรรม คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Architecture, Faculty of Architecture, Kasetsart University, Bangkok, 10900

คำนำ

อาหารเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมหลักของประเทศ โดยจากข้อมูลโดยสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมการลงทุนหรือ BOI รายงานว่าอุตสาหกรรมอาหารมีสัดส่วนต่อผลผลิตมวลรวมของประเทศในปี พ.ศ. 2559 ประมาณร้อยละ 23 (สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมการลงทุน, 2560) และด้วยนโยบายของการเป็นครัวของโลกหรือ “Kitchen of the World” รวมถึงการส่งเสริมการพัฒนาอุตสาหกรรมไปสู่การสร้างนวัตกรรมในนโยบาย Thailand 4.0 และการจัดตั้งเมืองนวัตกรรมด้านอาหาร (Food Innopolis) ที่ต้องการปรับเปลี่ยนโครงสร้างอุตสาหกรรมอาหารไทย จากการผลิตสินค้าและบริการที่ใช้แรงงานเข้มข้น ไปสู่สินค้าและบริการที่มีมูลค่าสูงขึ้น ที่ช่วยส่งเสริมให้เกิดการพัฒนาด้านนวัตกรรมการแปรรูปอาหารอย่างครบวงจร ก็น่าเชื่อได้ว่าภาคธุรกิจอุตสาหกรรมอาหารของประเทศไทยจะก้าวต่อไปในทิศทางที่เพิ่มมูลค่าและคุณค่าของผลิตภัณฑ์มากกว่าการขายวัตถุดิบ แต่มุ่งเน้นไปสู่ปลายน้ำตามแนวคิดของการจัดตั้ง Food Innopolis (สำนักเลขาธิการนายกรัฐมนตรี, 2559) ซึ่งส่วนหนึ่งของปลายน้ำ อาทิ การขายอาหารบรรจุสำเร็จ การบริการอาหาร เป็นต้น

ในฐานะที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์เป็นหนึ่งในสถาบันที่สร้างองค์ความรู้และบุคลากรทางด้านอาหารและการเกษตร การสอนในคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จึงน่าจะมีส่วนในการสร้างสรรค์การก้าวสู่นวัตกรรมทางด้านอาหารตามความเชี่ยวชาญของบุคลากรของคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ โดยเฉพาะทางด้านการออกแบบและการสร้างสรรค์ อีกด้านหนึ่ง เป็นที่ทราบกันดีว่าธุรกิจอาหารได้ใช้การออกแบบเป็นเครื่องมือเพื่อการสร้างธุรกิจมาอย่างต่อเนื่อง มีการสร้างสรรค์สิ่งใหม่ให้แก่ผู้บริโภคอยู่แล้ว การจะนำองค์ความรู้ทางการออกแบบมาสร้างสรรค์ในธุรกิจอาหารให้เหมาะสม ตรงต่อความต้องการของอุตสาหกรรมจึงควรมีการศึกษาเบื้องต้นเพื่อทราบความเห็นของการออกแบบในมุมมองของธุรกิจอาหาร เพื่อที่จะได้เกิดความเข้าใจและเป็นแนวทางต่อการพัฒนาองค์ความรู้และการศึกษาทางการออกแบบสำหรับธุรกิจอาหารด้วย

ธุรกิจหรือการประกอบการทางด้านอาหารมีความหลากหลายและเปลี่ยนแปลงไปตามความก้าวหน้าของสังคม ตามนิยามของกรมพัฒนาธุรกิจ (2557) รูปแบบของธุรกิจอาหารนั้น ประกอบไปด้วย การบริการจัดหาอาหารและเครื่องดื่ม รวมถึงไอศกรีมและเค้ก จัดเตรียมไว้พร้อมบริโภค มีหรือไม่มีที่นั่งก็ตาม ไม่ว่าจะเป็นบริการแบบให้นั่งโต๊ะหรือแบบบริการตนเองจากชั้นวางอาหาร ไม่ว่าจะรับประทานอาหารภายในร้าน นำกลับ หรือสั่งให้จัดส่งที่บ้าน เช่น ร้านอาหาร ภัตตาคาร คาเฟ่ เคาน์เตอร์ หรือบูธ ร้านอาหารแบบบริการตนเอง ร้านอาหารจานด่วน เคาน์เตอร์ หรือบูธในยานพาหนะ ร้านอาหารที่ให้บริการจัดส่ง เป็นต้น

การออกแบบกับอาหาร

ดังที่ทราบอยู่แล้วว่าธุรกิจอาหารได้ใช้การออกแบบเป็นเครื่องมือสำหรับธุรกิจเพิ่มความสามารถในการแข่งขัน แต่ในประเทศนั้น ศาสตร์ทางการออกแบบเพื่อธุรกิจอาหารนั้นยังไม่ได้มีการศึกษาอย่างเจาะจงทั้งที่ธุรกิจอาหารโดยทั่วไปก็น่าจะมีความตระหนักในการออกแบบอยู่แล้ว ในการออกแบบกับอาหารนั้น Jonathan Glancey สถาปนิก นักเขียนและบรรณาธิการด้านการออกแบบของหนังสือพิมพ์ The Guardian แห่งสหราชอาณาจักร กล่าวไว้ว่า “Human beings do not merely wish to eat, but to eat decoratively” หมายถึงมนุษย์เรา ที่มองหาแง่มุมต่าง ๆ เพื่อพัฒนาการใช้ชีวิตให้พิเศษมากยิ่งขึ้นอยู่เสมอไม่เว้นแม้แต่เรื่องของอาหารที่เป็นสิ่งพื้นฐานของชีวิตก็ตาม การออกแบบในธุรกิจอาหารจึงไม่ใช้แค่การตกแต่งส่วนประกอบ แต่น่าจะมีส่วนสำคัญในกระบวนการของธุรกิจ

วรธิดา วิทยฐานกรณ์ (Vitayathanagorn, 2007) ได้เสนอว่าการออกแบบอาหารมีความเกี่ยวพันแนบแน่นกับความรู้แขนงสำคัญ ๆ ที่หลากหลาย ทั้งศิลปะและเทคนิคการประกอบอาหาร วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร การศึกษาเชิงวัฒนธรรม อีกทั้งการออกแบบอาหารนั้น ยังเชื่อมโยงกับศาสตร์การออกแบบหลายสาขา อาทิ การออกแบบผลิตภัณฑ์ (Industrial Design) ออกแบบกราฟฟิก (Graphic/Information Design) งานออกแบบสภาพแวดล้อม (Environmental Design) ออกแบบภายในและเฟอร์นิเจอร์ (Interior/Furniture Design) การออกแบบแบรนด์ (Branding) แฟชั่น และการออกแบบสิ่งทอ (Fashion/Textile Design) ที่เป็นไปเพื่อรองรับกิจกรรมการกินและปรุงอาหาร

Francesca Zampollo (2013) ได้จำแนกลักษณะของงานออกแบบในธุรกิจอาหารเป็น 6 ประเภท อันได้แก่ 1.) Design For Food – การออกแบบเพื่อการสร้างสรรค์อาหาร เป็นการออกแบบผลิตภัณฑ์หรือวัตถุแวดล้อมโดยรอบเพื่อสร้างประสบการณ์ของการรับประทานอาหารให้แตกต่างออกไป อาทิ เครื่องครัว อุปกรณ์รับประทานอาหาร บรรจุภัณฑ์ เป็นต้น 2.) Food Product Design – การออกแบบอาหารในมุมมองของนักออกแบบอุตสาหกรรม ซึ่งเน้นไปที่การออกแบบผลิตภัณฑ์ที่ออกสู่ตลาดเป็นจำนวนมาก ยกตัวอย่างเช่นการออกแบบพาสต้าหรือผลิตภัณฑ์อาหารแป้งที่เป็นเส้นจากประเทศอิตาลีที่มีมากกว่า 1,200 ชนิด (Hildebrand, 2010) 3.) Design About Food – การออกแบบผลิตภัณฑ์ เรขนิเทศ หรืออื่น ๆ ที่ไม่ได้เกี่ยวกับอาหารโดยตรง แต่ใช้อาหารเป็นวัตถุดิบสำหรับการออกแบบ 4.) Food Space Design – การออกแบบพื้นที่สำหรับรับประทานอาหาร ซึ่งโดยมากจะเป็นการออกแบบตกแต่งภายใน อย่างไรก็ตาม พื้นที่ของการรับประทานอาหารไม่ได้จำกัดแต่ในอาคารเท่านั้น การสร้างประสบการณ์ของการรับประทานอาหารผ่านพื้นที่ ทำได้โดยการออกแบบองค์ประกอบของสภาพแวดล้อม อาทิ วัสดุ ผิวสัมผัส ที่ว่าง แสง เสียง และอื่น ๆ ที่ส่งผลต่อการรับประทานอาหารของคน 5.) Eating Design – การออกแบบประสบการณ์ของการรับประทานอาหาร เป็นความสัมพันธ์ระหว่างอาหารกับผู้รับประทานอาหารนั้น ซึ่งการออกแบบอาจจะเป็นได้ทั้งตัวผลิตภัณฑ์อาหาร บรรจุภัณฑ์ บริการอาหาร หรือระบบการจัดจำหน่าย ที่ช่วยสร้างประสบการณ์ของการรับประทานอาหาร 6.) Design With Food – การออกแบบโดยมีอาหารเป็นองค์ประกอบและมีกระบวนการของการทำอาหารเป็นวิธีการสร้างงานออกแบบ ซึ่งผู้ที่ทำการออกแบบอาหารในลักษณะนี้ ก็คือพ่อครัว หรือ “เชฟ” รวมถึงนักวิทยาศาสตร์อาหาร ซึ่งมีความเชี่ยวชาญในวัตถุดิบและการเปลี่ยนรูปของวัตถุดิบนั่นเอง :ซึ่งโดยรวมแล้ว แนวคิดของการออกแบบอาหารเป็นความพยายามในการทำให้อาหารนั้น สื่อสารและมีปฏิสัมพันธ์กับผู้รับประทานอาหาร ผู้บริโภค หรือแม้แต่สังคมทั่วไปมากขึ้น ทั้งนี้อาหารที่มีอยู่ปัจจุบันก็สามารถสื่อสารกับผู้บริโภคอยู่แล้ว แต่การออกแบบอาหารจะทำให้ควบคุมและกำหนดความหมายที่ต้องการจะสื่อไปยังผู้บริโภคได้ชัดเจนยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตาม การจะสื่อสารได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้น จะต้องเข้าใจว่าผู้บริโภคมีทัศนคติต่ออาหารอย่างไรก่อนจะตัดสินใจรับประทานอาหารนั้น

Copenhagen Institute of Interaction (2013) ประเทศเดนมาร์ก ได้ทำการศึกษาปัจจัยว่าผู้บริโภคตัดสินความน่าบริโภคของอาหารที่วางขาย โดยพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินสามารถแบ่งเป็นกลุ่มของปัจจัยได้ 4 อย่าง อันได้แก่ See(การมองเห็น) Touch(การสัมผัส) Smell(กลิ่น) และ Know(การรับรู้) อย่างไรก็ตาม ปัจจัยย่อย ๆ ของการที่ผู้บริโภคใช้ตัดสิน ก็จะมีรายละเอียดมากมาย อาทิ Variety (ความหลากหลาย) Design (รูปแบบ) Neatness (ความประณีต) Brand (ตราสินค้า) Price(ราคา) และอีกหลายปัจจัย ซึ่งพิจารณาแล้วจะเห็นได้ว่า ปัจจัยส่วนใหญ่จะเป็นกลุ่มที่ผู้บริโภครับรู้ได้ด้วยการมองเห็น (See) มีมากถึง 8 ข้อจากปัจจัยทั้งหมด

13 ข้อ แสดงถึงความสำคัญของรูปลักษณ์และสัณฐานของอาหารเป็นสิ่งทำให้สิ่งที่ผู้บริโภค"เห็น" ผลิตภัณฑ์อาหารของเราและมีความเชื่อว่าน่ารับประทานได้มากที่สุด

การศึกษาโดย Helmut Traitler, Birgit Coleman และ Karen Hofmann (2014) ในหนังสือ Food industry design, technology and innovation ได้เสนอถึงการพัฒนานวัตกรรมในอุตสาหกรรมอาหาร จะต้องใช้การออกแบบและความคิดสร้างสรรค์เป็นสำคัญ นำการออกแบบมาไม่ใช่แค่กระบวนการปลายทางของการพัฒนาผลิตภัณฑ์ แต่ขยายบทบาทไปสู่จุดเริ่ม และมองการพัฒนานวัตกรรมทางด้านอาหารว่าเป็นนวัตกรรมที่ผลักดันด้วยการออกแบบ หรือ "Design Driven Innovation" ซึ่งจะเห็นได้ว่าการออกแบบเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลความสำเร็จของธุรกิจอาหาร และเพื่อพัฒนาองค์ความรู้ทางการออกแบบในธุรกิจอาหาร จึงได้ทำการสำรวจทัศนคติของผู้ประกอบการในธุรกิจอาหารต่อการออกแบบ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

การสำรวจ

การสำรวจในครั้งนี้ คณะผู้วิจัยได้ทำการส่งแบบสำรวจทางอินเตอร์เน็ตไปยังกลุ่มเป้าหมาย อันได้แก่ ผู้ประกอบการธุรกิจอาหารโดยอาศัยเครือข่ายของสถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ อันแก่บุคคลทั่วไปที่ได้เข้ามารับการอบรมต่างๆของสถาบันฯ และบุคคลที่ผ่านการอบรมโครงการอาหารไทย "ครัวไทยสู่ครัวโลก"

แบบสอบถามได้ถูกแบ่งเป็น 3 ส่วน โดยส่วนแรก ได้สอบถามลักษณะการประกอบการธุรกิจอาหารให้ผู้ตอบ ซึ่งได้เป็น 7 กลุ่ม ซึ่งพิจารณาจากรูปแบบการจดทะเบียนธุรกิจของกรมพัฒนาธุรกิจ และพิจารณาจากข้อมูลของสถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ อันได้แก่ 1.) กลุ่มร้านอาหารหรือภัตตาคาร 2.) กลุ่มผู้ประกอบการอาหารบรรจุถุงหรือสั่งกลับบ้าน 3.) กลุ่มผู้ประกอบการผลิตอาหารบรรจุภัณฑ์สำเร็จรูป 4.) กลุ่มร้านอาหารหรือแผงที่ไม่มีที่นั่ง 5.) กลุ่มบริการจัดเลี้ยงจัดส่ง 6.) กลุ่มผู้ประกอบการสอนทำอาหาร และ 7.) กลุ่มอื่นๆที่อยู่นอกเหนือจากนี้

ส่วนที่สอง ทำการสอบถามความเห็นต่อการออกแบบในกิจการปัจจุบันของผู้ตอบ และความรู้สึกถึงความจำเป็นของการออกแบบต่อองค์ประกอบต่าง ๆ ในกิจการ ในลักษณะ Likert Scale ที่ถามความคิดเห็นในด้านต่าง ๆ โดยมีระดับคะแนนในแต่ละข้อตั้งแต่ 1-7 และส่วนที่สาม เป็นแบบสอบถามได้ถูกออกแบบโดยอ้างอิงการศึกษาในเรื่องการออกแบบอาหารที่อ้างอิงข้างต้น (Zampollo, 2013) และพิจารณาร่วมกับกายภาพหรือสิ่งที่สัมผัสและเห็นได้ของธุรกิจอาหาร และแบ่งคำถามทางการออกแบบเป็น 6 องค์ประกอบ อันได้แก่ 1.) รูปร่างลักษณะอาหารหรือตัวผลิตภัณฑ์อาหาร 2.) การออกแบบบรรจุภัณฑ์และการนำเสนอ 3.) บรรยากาศสถานที่หรือตกแต่งภายใน 4.) การออกแบบกราฟิกอันได้แก่ เมนูอาหาร การโฆษณาและสิ่งพิมพ์สำหรับกิจการ 5.) อุปกรณ์และสิ่งตกแต่งต่าง ๆ อาทิ ช้อน ส้อม และ 6.) การให้บริการอาหาร โดยเป็นแบบสอบถามในลักษณะ Likert Scale ที่มีระดับคะแนนตั้งแต่ 1-7 เช่นเดียวกัน

จากแบบสำรวจที่ส่งออกไป ได้ผู้ตอบแบบสำรวจรวมทั้งสิ้น 101 คน โดยกลุ่มผู้ตอบที่มากที่สุดได้แก่ ผู้ประกอบการที่ประกอบธุรกิจร้านอาหารหรือภัตตาคารที่มีที่นั่งให้บริการ จำนวนทั้งสิ้น 52 คน รองลงมาได้แก่ กลุ่มผู้ประกอบการอาหารบรรจุถุงหรือสั่งกลับบ้าน มีจำนวนทั้งสิ้น 18 คน และกลุ่มผู้ประกอบการอาหารแปรรูปลงบรรจุภัณฑ์ มีทั้งสิ้น 13 คน โดยมีผลจากการสำรวจดังตารางต่อไปนี้

Table 1 Survey result.

Type of Enterprise	Amount	Opinion of Design in Existing Business	Necessity of Design in Existing Business	Design of Features in Food Business						Opinion of Design to Success of Business
				Appearance of Product / Food	Packaging / Presentation	Interior and Atmosphere	Graphic Design / Menu / Printing	Service Design	Cutlery / Wares / Decorative Items	
Packaged / Processed Food	13	2.667	5.333	6.333	6.167	6.333	6.167	5.833	5.833	6.333
Take Home / Take Away	18	3.444	4.889	6.000	6.000	6.111	5.778	5.000	4.667	6.333
Service Restaurant	52	3.846	5.808	6.308	6.077	6.346	5.923	5.923	5.500	6.808
Food Stall / Street Vender	6	4.667	6.000	6.667	5.333	5.333	6.333	6.333	5.000	7.000
Catering / Delivey	10	4.400	4.800	6.000	6.000	5.600	5.800	5.800	5.400	6.200
Workshop / Cooking Studio	2	5.000	6.000	6.500	7.000	6.500	6.000	6.500	6.000	7.000
Accumulate/Average	101	4.004	5.472	6.301	6.096	6.037	6.000	5.898	5.400	6.612

อภิปรายผลการสำรวจ

จากการสำรวจ สามารถพิจารณาประเด็นของความเห็นต่องานออกแบบของผู้ประกอบการที่ชัดเจนได้ดังต่อไปนี้

1. ในด้านการออกแบบในธุรกิจปัจจุบัน แม้ว่าค่าเฉลี่ยของความเห็นจะอยู่ในระดับปานกลาง (4.004) และก็แสดงความเห็นถึงความจำเป็นของการออกแบบในธุรกิจของตนเองที่ระดับปานกลาง (5.472) แต่ผลการตอบในความเห็นว่าผู้ตอบเชื่อว่าการออกแบบจะมีผลดีต่อการสร้างความแตกต่างในธุรกิจอาหารกลับแสดงค่าเฉลี่ยที่สูงถึง 6.612 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผู้ประกอบการโดยส่วนมากมองเห็นประโยชน์ในการออกแบบต่อธุรกิจอาหารของตนเอง ที่แม้ว่าธุรกิจของตนเองที่เป็นอยู่อาจจะเริ่มต้นด้วยรูปแบบธรรมดาหรือทำตามอย่างหรือไม่ได้มีการออกแบบตามลักษณะที่ผู้ตอบมองว่าเป็นสิ่งพิเศษ แต่ค่าเฉลี่ยที่สูงก็แสดงว่าผู้ตอบโดยมากก็ยังเห็นถึงความสำคัญของการออกแบบต่อธุรกิจอาหาร

2. เมื่อสอบถามถึงความสำคัญของการออกแบบในองค์ประกอบต่าง ๆ ของธุรกิจอาหาร ผู้ตอบส่วนใหญ่ได้แสดงความเห็นถึงความสำคัญในระดับที่ค่อนข้างสูง ที่เห็นได้จากค่าเฉลี่ยของคะแนนที่ได้เกิน 5.5 ในเกือบทุกองค์ประกอบ ซึ่งสามารถเรียงลำดับองค์ประกอบที่ได้คะแนนสูงสุดไปยังต่ำสุดได้แก่ 1.) รูปร่างของผลิตภัณฑ์อาหาร 2.) บรรยากาศและการตกแต่งภายใน 3.) บรรจุภัณฑ์อาหารและการนำเสนอ 4.) งานออกแบบกราฟิกและสิ่งพิมพ์ต่าง ๆ ในร้าน 5.) การออกแบบบริการ ในขณะที่องค์ประกอบที่ได้คะแนนต่ำที่สุดได้แก่ อุปกรณ์ต่าง ๆ ในร้าน เช่น จาน ช้อน ส้อม โดยค่าเฉลี่ยของความสำคัญที่ 5.4 ซึ่งพอจะบ่งบอกได้ว่าผู้ประกอบการที่ได้ทำการสำรวจนั้น มองเห็นประโยชน์และความสำคัญของงานออกแบบในธุรกิจอาหาร แต่มีลำดับที่แตกต่างกันในรายละเอียด

3. เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบที่ได้คะแนนน้อยกว่า อันได้แก่หัวข้ออุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในร้านอาหาร และการออกแบบบริการ การที่ได้คะแนนน้อยกว่า อาจเป็นเพราะผู้ประกอบการมองไม่เห็นความเกี่ยวข้องของการออกแบบกับองค์ประกอบด้านนี้ นอกจากนี้ ผู้ประกอบการส่วนหนึ่งทำกิจกรรมอาหารที่ไม่ได้เน้นการบริการและไม่มีหน้าร้าน ได้แก่ กลุ่มผู้ประกอบการอาหารบรรจุถุงหรือสั่งกลับบ้าน กลุ่มผู้ประกอบการผลิตอาหารบรรจุภัณฑ์สำเร็จรูป กลุ่มร้านอาหารหรือแผงที่ไม่มีที่นั่ง และกลุ่มบริการจัดเลี้ยงจัดส่ง

4. เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยของการให้ความสำคัญแยกตามประเภทการประกอบการของผู้ตอบการสำรวจจะพบว่า กลุ่มผู้ประกอบการอาหารบรรจุถุงหรือสั่งกลับบ้าน กลุ่มแผงหรือร้านที่ไม่มีที่นั่งรับประทาน และกลุ่มที่ให้บริการจัดเลี้ยงหรือจัดอาหารจัดส่งนั้น มีค่าต่ำว่าอีก 3 กลุ่ม หรือต่ำกว่า 6.0 ซึ่งที่เป็นเช่นนี้อาจเพราะธรรมชาติของการประกอบกิจการ ที่ไม่ได้มีองค์ประกอบที่ลูกค้ามองเห็นหรือสัมผัสได้มากเหมือนอย่างร้านอาหาร และหรืออาจจะมีลักษณะการทำกิจการที่ง่ายกว่า ลูกค้ามีความซับซ้อนน้อยกว่าก็เป็นได้ แต่ก็ยังมองเห็นความสำคัญของการออกแบบอยู่ค่อนข้างสูง

นอกจากนี้ การผู้ตอบได้ให้ความสำคัญของการออกแบบต่อองค์ประกอบต่างๆ ในธุรกิจอาหาร ทั้ง 6 องค์ประกอบโดยผลคะแนนเฉลี่ยที่ค่อนข้างสูงนั้น สอดคล้องกับคะแนนที่สูงเช่นกันในความเห็นถึงการออกแบบที่นำไปสู่ความสำเร็จของธุรกิจของตน แต่การสำรวจนี้เป็นไปตามการประเมินจากความรู้สึกของผู้ประกอบการเท่านั้น ไม่ได้สะท้อนมาจากสภาพธุรกิจอย่างแท้จริง ดังเช่นเมื่อสอบถามความเห็นถึงการออกแบบกับการประกอบการในปัจจุบัน ผู้ประกอบการเหล่านั้นอาจมองว่าธุรกิจของตนเองยังมีการออกแบบที่ไม่ดีหรือดีมากและไม่ได้สอบถามถึงผลจากการออกแบบในธุรกิจที่มีอยู่กับผลของการประกอบการแต่อย่างใด แต่การสำรวจนี้แสดงถึงโอกาสในอนาคตที่ผู้ประกอบการเหล่านี้จะสร้างสรรค์ธุรกิจของตนเองให้มีความโดดเด่นและแข่งขันได้ด้วยการออกแบบต่อไป

เมื่อพิจารณาถึงคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ประกอบด้วยภาควิชาสถาปัตยกรรม ภูมิสถาปัตยกรรม และนวัตกรรมอาคาร องค์ความรู้ที่สามารถบูรณาการให้แก่ธุรกิจอาหารคือการตกแต่งและการสร้างบรรยากาศสำหรับร้านอาหารหรือที่ขายอาหารเป็นหลัก ในขณะเดียวกันก็สามารถจะช่วยเสริมความเข้าใจในทัศนศิลป์ที่ธุรกิจสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับกิจกรรมต่างในธุรกิจอาหารได้ นอกจากนี้ การเปิดหลักสูตรทางด้านออกแบบผลิตภัณฑ์ จะเป็นการสร้างองค์ความรู้ทางการออกแบบที่ช่วยเสริมในองค์ประกอบของธุรกิจอาหารด้านอื่น ๆ ต่อไปได้ในอนาคต

สรุป

การสำรวจทัศนคติต่อการออกแบบในธุรกิจอาหารนั้น และแสดงถึงทัศนคติในทางบวกและการเร่งผลประโยชน์ที่เกิดขึ้นเป็นการออกแบบและธุรกิจอาหารได้ ซึ่งผลที่ได้สามารถบ่งบอกถึง การตระหนักถึงความสำคัญของงานออกแบบของผู้ประกอบการธุรกิจอาหาร แสดงให้เห็นว่าการออกแบบน่าจะช่วยเสริมให้ธุรกิจของตนมีความแตกต่างและแข่งขันในธุรกิจได้ต่อไป ซึ่งในฐานะสถานศึกษาที่ให้ความรู้ทางด้านการออกแบบซึ่งควรพิจารณาสร้างองค์ความรู้ทางการออกแบบที่เจาะจงและเป็นประโยชน์ ซึ่งจากการศึกษา วิชาการที่คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สามารถจัดเพื่อธุรกิจอาหารตามลำดับความสำคัญจากทัศนคติของผู้ประกอบการที่ตอบแบบสำรวจ ได้แก่ งานการออกแบบตกแต่งภายใน การออกแบบกราฟิกและสื่อ

เพื่อธุรกิจอาหาร ในขณะเดียวกันก็ควรสร้างความเข้าใจต่อภาคธุรกิจอาหารหรือผู้ประกอบการอาหาร ทำวิจัยหรือการศึกษาในเชิงลึกถึงการออกแบบในอุตสาหกรรมอาหารทั้งระบบเพื่อสร้างองค์ความรู้ทางการออกแบบที่ส่งเสริมอุตสาหกรรมต่อไปอย่างรอบด้าน อาทิ อุปกรณ์ต่าง ๆ สำหรับการบริการอาหาร และ การออกแบบบริการ นอกจากนี้ ควรสร้างความเข้าใจของผู้ประกอบการธุรกิจอาหารในงานออกแบบ เพื่อให้มองเห็นถึงโอกาสที่จะใช้งานออกแบบเป็นเครื่องมือที่เป็นประโยชน์ต่อธุรกิจ ให้นำการออกแบบเป็นหนึ่งในองค์ประกอบเพื่อพิจารณาสร้างสรรค์อาหารควบคู่ไปตั้งแต่การพัฒนาสูตรหรือตำรับหรือธุรกิจ เพื่อเป็นฐานไปสู่การพัฒนานวัตกรรมในธุรกิจอาหารต่อไป

เอกสารอ้างอิง

กรมพัฒนาธุรกิจ. 2560. **ข้อมูลการจดทะเบียนนิติบุคคล เดือนพฤศจิกายน 2557**. แหล่งที่มา: http://www.dbd.go.th/download/document_file/Statisic/2557/26_201411.pdf, 10 กันยายน 2561.

สำนักเลขาธิการนายกรัฐมนตรี. 2559. มติ ครม. เพื่อประชาชน: การจัดตั้งและดำเนินการเมืองนวัตกรรมอาหาร (Food Innopolis), **วารสารไทยคู่ฟ้า**. แหล่งที่มา: http://www.thaigov.go.th/uploads/document/22/2016/10/pdf/thaikhufah-No31.pdf, 10 กันยายน 2561.

สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมการลงทุน. 2560. **Thailand's Rankings.** แหล่งที่มา: https://www.boi.go.th/index.php?page=thailand_rankings, 10 กันยายน 2561.

Copenhagen Institute of Interaction. 2013. **Bite-Size Trust**. Available Source: http://ciid.dk/education/portfolio/idp13/courses/people-centred-research/projects/bite-size-trust/, July 10, 2016.

Hildebrand, C., & Kenedy, J. 2011. **The geometry of pasta**. London, Boxtree.

Traitler, H., Coleman, B., & Hofmann, K. 2014. **Food industry design, technology and innovation**. London, John Wiley & Sons.

Vitatathanagorn, V. 2007. **Innovative Food Design** (Master's Dissertation). Brunel University, London, UK.

Zampollo, F. 2013. Food and Design: Space, Place and Experience [Editorial]. **Hospitality and Society**, 3: 181-187.

การวิเคราะห์ฐานรองรับเครื่องประแจกลไฟฟ้า

Analysis of Base-Plate for Electro-Mechanical Point Machine

สุริยันต์ กระเร็น[1*] และ ประพจน์ ขุนทอง[1]

Suriyan Kraren[1*] and Prapot Khunthong[1]

บทคัดย่อ

ในการวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นให้ความสำคัญในการติดตั้งประแจกลไฟฟ้าในทางวิ่ง ซึ่งมีพื้นที่ในการติดตั้งที่จำกัดจึงมีความจำเป็นต้องออกแบบฐานรองรับเครื่องประแจกลไฟฟ้า ในเชิงการวิเคราะห์เพื่อหาชนิดของอุปกรณ์ Anchor bolt ที่เหมาะสม เพื่อนำไปยึดเครื่องประแจกลไฟฟ้า โดยการสร้างแบบจำลองฐานคอนกรีตประกอบกับ Anchor bolt ชนิด Cast-in-place anchors 2 แบบด้วยกันคือ J-bolt และ L-bolt จากนั้นนำแบบจำลองที่ได้มาทำการวิเคราะห์ถึงความแข็งแรงของโครงสร้างด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์แบบยืดหยุ่นเชิงเส้น จากการศึกษาพบว่าแบบของ Anchor bolt ไม่มีผลต่อขนาดและการกระจายตัวของความเค้นบริเวณรอบของ Anchor bolt

ABSTRACT

This research focuses on the installation of electro-mechanical point machine in the runway on mainline. It has limited installation space. Therefore, it is necessary to design base-plate for electro-mechanical point machine. To analyze the type of anchor bolt suitable to base-plate for electro-mechanical point machine. Base-plate model with 2 different types of cast-in-place anchors; J-bolt and L-bolt. The models were analyzed for structural strength by linear elasticity finite element method. The study found that anchor bolt has no effect on the size and distribution of stress around the anchor bolt.

Key Words: point machine, point, railroad switch, turnout, base plate, foundation, anchor, rod, bolt

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

[1]ศูนย์วิศวกรรมระบบราง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร 10900

[1]Kasetsart University Rail Engineering Center, Mechanical Engineering Department, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

รถไฟฟ้าขนส่งมวลชน เป็นระบบขนส่งผู้โดยสารสาธารณะ แบบรางประเภทหนึ่งที่ทางการไทยมีแผนการลงทุนต่อเนื่องเพื่อแก้ปัญหาจราจรติดขัดในเขตกรุงเทพและปริมณฑล และถือเป็นหนึ่งในการบริการสาธารณะที่รัฐจัดหาให้เป็นทางเลือกในการเดินทางนอกเหนือจากการบริการขนส่งมวลชนพื้นฐานอื่นๆ ที่มีบริการอยู่ในพื้นที่โดยรอบกรุงเทพฯ และปริมณฑล

รถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในเขตเมือง เป็นบริการขนส่งมวลชนที่ใช้ขบวนรถไฟฟ้าวิ่งด้วยความเร็วปานกลางหรือสูง บนทางวิ่งที่ไม่ปะปนกับทางวิ่งของระบบขนส่งมวลชนอื่น โดยทางวิ่งอาจอยู่ใต้ดิน เหนือดิน หรือยกระดับขึ้นอยู่กับลักษณะพื้นที่ ขณะที่ระบบรถไฟฟ้ามีหลายประเภท ได้แก่ รถรางไฟฟ้า รถรางขนาดเบา รถไฟฟ้ารางเดียว รถไฟฟ้ารางหนักและรางเบา เป็นต้น

การเดินรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนสาธารณะสายแรกของไทย คือ เส้นทางรถไฟฟ้าเฉลิมพระเกียรติฯ ซึ่งเป็นรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนยกระดับที่เชื่อมพื้นที่เมืองชั้นในกับชั้นกลางของกรุงเทพมหานคร เปิดให้บริการครั้งแรกในช่วงปลายปี 2542 และต่อมามีการขยายเส้นทางรถไฟฟ้าใหม่ๆ เพิ่มขึ้นต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน

ปัจจุบันมีรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนเปิดให้บริการทั้งสิ้น 5 สาย โดยมีรายละเอียด ดังนี้

1) รถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกรุงเทพ ประกอบด้วย 2 เส้นทาง คือ

รถไฟฟ้า BTS สายสุขุมวิท หรือ รถไฟฟ้าสายสีเขียวอ่อน เป็นเส้นทางช่วงแรก หมอชิต-สุขุมวิท 77 ต่อมามีการเปิดให้บริการส่วนต่อขยาย ช่วงอ่อนนุช-แบริ่ง และเปิดให้บริการส่วนต่อขยายสายสีเขียวใต้ ช่วงสำโรง-สมุทรปราการ

รถไฟฟ้า BTS สายสีลม หรือ รถไฟฟ้าสายสีเขียวเข้ม เป็นเส้นทางช่วงแรก สนามกีฬาแห่งชาติ-สะพานตากสิน และมีการทยอยเปิดให้บริการส่วนต่อขยาย ช่วงสะพานตากสิน-วงเวียนใหญ่-บางหว้า

2) รถไฟฟ้ามหานคร ประกอบด้วย 2 เส้นทาง คือ

รถไฟฟ้ามหานคร สายเฉลิมรัชมงคล หรือ รถไฟฟ้าสายสีน้ำเงิน เส้นทางหัวลำโพง-บางซื่อ

รถไฟฟ้ามหานคร สายฉลองรัชธรรม หรือ รถไฟฟ้าสายสีม่วง เส้นทางบางใหญ่-บางซื่อ และเปิดบริการส่วนต่อขยายเชื่อมเส้นทางกับรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงินอีก 1 สถานีช่วงบางซื่อ-เตาปูน ทำให้เส้นทางรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงินและสายสีม่วงเดินรถเชื่อมต่อเป็นโครงข่ายเดียวกัน

3) รถไฟฟ้าเชื่อมท่าอากาศยานสุวรรณภูมิหรือ รถไฟฟ้าชานเมือง เป็นโครงการระบบขนส่งทางรถไฟเชื่อมเส้นทางจากท่าอากาศยานสุวรรณภูมิและสถานีขนส่งผู้โดยสารอากาศยานในเมือง สุวรรณภูมิ-พญาไท-บางซื่อ-ดอนเมือง

รถไฟฟ้า ARL City Line เส้นทางพญาไท-สุวรรณภูมิ

รถไฟฟ้า ARL Express Line เป็นการเดินรถจากสถานีมักกะสันวิ่งตรงสู่สถานีท่าอากาศยานสุวรรณภูมิโดยไม่หยุดจอดระหว่างทาง เพื่อให้เกิดความสะดวกกับผู้โดยสารที่ต้องการเดินทางโดยเครื่องบิน ปัจจุบันรถไฟฟ้าสายนี้อยู่ระหว่างปิดปรับปรุง (ปิยะนุช, 2560)

โดยการเดินรถไฟสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงคือความปลอดภัยเป็นอันดับแรก ซึ่งศูนย์ควบคุมการเดินรถหรือ Operation Control Center จะต้องรู้ตำแหน่งของรถไฟที่อยู่ในระบบทุกๆ ขบวน รวมไปถึงจำนวนรถไฟที่อยู่ใน Stabling Yard ด้วยระบบอาณัติสัญญาณ และโทรคมนาคม เป็นระบบที่บอกถึงตำแหน่งของรถไฟ และสามารถ

ควบคุมการเดินรถไฟได้ ทั้งที่ตัวรถไฟเอง และที่มีระบบควบคุมการขับเคลื่อนได้โดยตรงจากส่วนกลาง ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน หรือ ที่ใช้พนักงานควบคุม การรถไฟแห่งประเทศไทย และควบคุมการสับราง เพื่อบังคับให้รถไฟเคลื่อนไปยังเส้นทางที่ควบคุมการเดินทางเอาไว้ ซึ่งระบบการทำงานจะเป็นแบบสัมพันธ์กันทั้งหมด ข้อมูลทั้งหมดจะถูกส่งมาที่ศูนย์ควบคุมการเดินรถ และเจ้าหน้าที่ประจำสถานีที่เกี่ยวข้อง เพื่อทำให้การเดินรถเป็นไปอย่างปลอดภัย และมีประสิทธิภาพ

รถไฟที่วิ่งไปบนรางจะถูกควบคุมเส้นทางการเดินรถได้โดยการบังคับที่ ประแจสับราง ซึ่งถูกควบคุมจากศูนย์ควบคุมการเดินรถ หรือ จากสถานีโดยตรง ซึ่งจะเริ่มการควบคุมการเดินรถ ตั้งแต่ขบวนรถไฟยังอยู่ที่ Stabling Yard จนสิ้นสุดการเดินทาง

ประแจ คือเครื่องประดิษฐ์ ที่ใช้วางในทางเส้นหนึ่ง เพื่อให้ขบวนรถหรือล้อเลื่อนใด ๆ สามารถวิ่งผ่านออกจากทางเส้นนั้น แยกไปสู่ทางเส้นอื่นได้ สำหรับเครื่องประดิษฐ์ที่ใช้วางในทาง เพื่อให้ขบวนรถวิ่งในทางเส้นหนึ่งตัดผ่านทางเส้นอื่นได้ เรียกว่า ทางตัดผ่าน หรือ จุดตัด ซึ่งอนุโลมจัดอยู่ในพวกประแจเช่นกัน

หน้าที่การทำงานหลักของประแจคือ ต้องสามารถเปลี่ยนทิศทางและยอมให้รถไฟแล่นผ่านไปด้วยความเร็วที่กำหนดได้อย่างปลอดภัย ซึ่งพฤติกรรมของโครงสร้างของประแจขณะที่รถไฟวิ่งผ่านนั้นจะมีแรงกระแทกเนื่องจากการเปลี่ยนทิศทางของล้อรถไฟรวมทั้งความไม่สม่ำเสมอบนหน้าสัมผัสของล้อและรางบริเวณประแจ นอกจากนี้ยังมีแรงสู่ศูนย์กลางที่ถ่ายลงมาจากรถไฟขณะเลี้ยวโค้งด้วยความเร็ว จากเหตุผลดังกล่าวจึงจำเป็นที่ต้องกำหนดมาตรฐานของชิ้นส่วนต่าง ๆ ในประแจ รวมทั้งรูปทรงของประแจให้สอดคล้องกับความเร็วที่ใช้ออกแบบ ซึ่งฐานคอนกรีตสำหรับรองรับประแจเป็นหนึ่งในส่วนประกอบหลัก โดยประแจจะถูกยึดติดเข้ากับหมอนคอนกรีต โดยต้องสามารถรองรับแรงต่าง ๆ ที่ส่งลงมาจากประแจได้อย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัย (สนข., 2561)

ดังที่กล่าวข้างต้น ปัจจุบันได้มีการดำเนินการโครงการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนสายต่างๆ และส่วนต่อขยายเกิดขึ้นหลายโครงการ ซึ่งการติดตั้งโครงการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนนี้ มีความจำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์ประแจกลไฟฟ้าเพื่อควบคุมทิศทางของการเดินรถ โดยในส่วนงานก่อสร้างจะมีการเว้นพื้นที่บริเวณด้านข้างของทางวิ่งไว้เพื่อติดตั้งอุปกรณ์ประแจกลไฟฟ้า ตามตำแหน่งที่กำหนด ซึ่งส่วนงานติดตั้งระบบอาณัติสัญญาณ ต้องดำเนินการติดตั้งเครื่องประแจกลไฟฟ้าในทางวิ่ง จึงมีความจำเป็นต้องออกแบบฐานรองรับเพื่อยึดเครื่องประแจกลไฟฟ้าที่มีความเหมาะสม มีประสิทธิภาพ และมีความปลอดภัย โดยการออกแบบนี้ จะอาศัยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์แบบยืดหยุ่นเชิงเส้น มาช่วยพยากรณ์ความแข็งแรงของฐานรองรับ ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมในการนำมาใช้ในการวิเคราะห์

อุปกรณ์และวิธีการ

การออกแบบฐานรองรับเครื่องประแจกลไฟฟ้า

ชนิดของ Anchors ถูกแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ตามลักษณะของการติดตั้งแยกเป็น 1. Post-installed anchors และ 2. Cast-in-place anchors (i) headed bolt; (ii) L-bolt; (iii) J-bolt; (iv) welded headed stud (ACI COMMITTEE 318, 2002)

ในงานวิจัยนี้จะทำการออกแบบฐานรองรับเครื่องประแจกลไฟฟ้า โดยการใช้ฐานคอนกรีต ประกอบกับ Anchors Bolt ชนิด Cast-in-place anchors 2 แบบด้วยกัน คือ L-bolt และ J-bolt

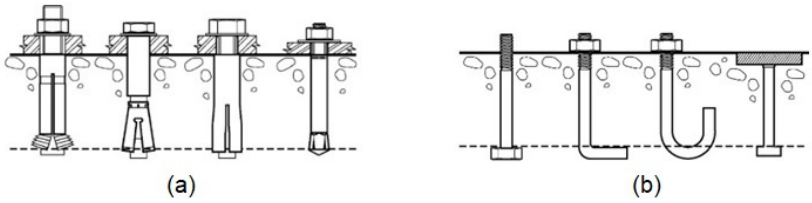


Figure 1 (a) Post-installed anchors (b) Cast-in-place anchors (ACI COMMITTEE 318, 2002)

การเสียหายของ Anchors bolt สามารถเกิดขึ้นได้ แม้ว่าจะมีการออกแบบถูกต้องตามหลักวิศวกรรมแล้ว แต่สภาวะแวดล้อมในการทำงานจริง เช่น สภาพคอนกรีต, วิธีการติดตั้ง, ความชื้น, Concrete strength, steel strength, embedment depth, และ edge distance เป็นต้น อาจจะส่งผลกระทบต่อการต้านทานแรงของอุปกรณ์ฝังยึดได้ จากการทดสอบ headed anchor bolt ที่ถูกระทำด้วยแรงดึง Tension force จะมีรูปแบบของการเสียหายได้ 5 รูปแบบดังนี้ (i) Steel failure (ii) Pullout Anchors rod (iii) Concrete breakout (iv) Side-face blowout (v) Concrete splitting ดัง Figure 3 (ACI Committee 349, 2007)

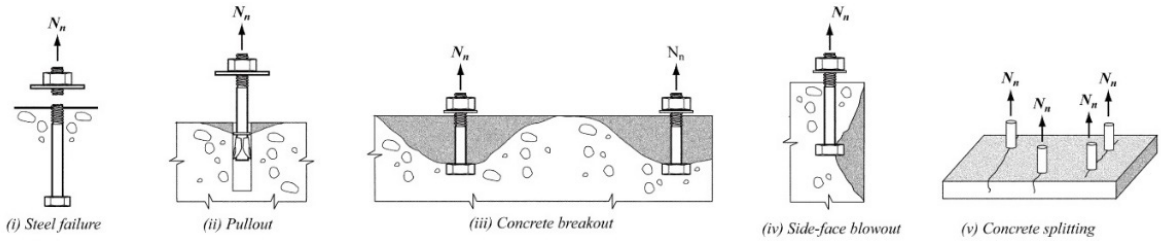


Figure 2 Failure modes for anchors (ACI Committee 349, 2007)

การสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์อิลิเมนต์ของฐานรองรับเครื่องประแจกลไฟฟ้า

เอลิเมนต์ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองแบ่งออกเป็น 2 ชนิด หลักๆได้แก่เอลิเมนต์ที่ใช้แทน Anchor bolt และเอลิเมนต์ที่ใช้แทนส่วนของคอนกรีต โดยสมมุติฐานว่าผิวของ Anchor bolt และคอนกรีตยึดติดด้วยกันโดยไม่มีการไถล ซึ่งกำหนดเป็นอิลิเมนต์แบบ 4 โหนด Hexagonal ที่มีการแบ่งขนาดของ อิลิเมนต์ในแต่ละแบบที่เท่ากัน โดยทำการสร้างแบบจำลอง 2 แบบ คือ แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของฐานรองรับเครื่องประแจกลไฟฟ้าประกอบกับ L-bolt M20 (Figure 3) และแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของฐานรองรับเครื่องประแจกลไฟฟ้าประกอบกับ J-bolt M20 (Figure 3) ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบยืดหยุ่นเชิงเส้น โดยใช้ โปรแกรม MSC Patran/Nastran 2018

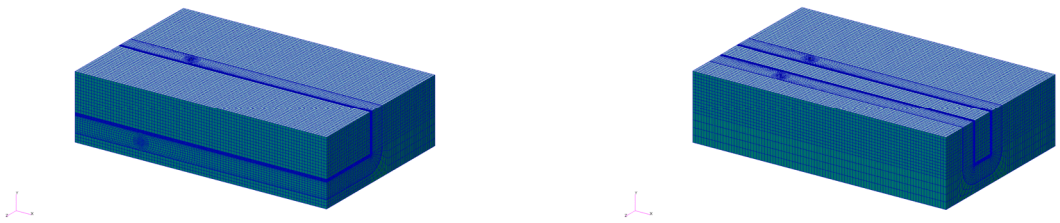


Figure 3 Base-Plate with L-bolt M20 (left) and Base-Plate with J-bolt M20 (right)

คุณสมบัติของเหล็กและคอนกรีต

ค่า Poisson's ratio ของคอนกรีตจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.14 และ 0.26 ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ (Rasoul, 2017) โดยในการศึกษานี้จะใช้คุณสมบัติของคอนกรีต ดังตารางด้านล่าง และกำหนดคุณสมบัติของ Anchor bolt เกรด 8.8 มีค่า Young's modulus 210 GPa Poisson's ratio 0.3 และ Density 7800 kg/m^3

Elastic modulus	E_c	35000	N/mm^2
Compressive strength	f_c	28	N/mm^2
Tensile strength	f_t	2.2	N/mm^2
Fracture energy	G_f	0.07	N/mm^2
Density	ρ_c	2.4x10^{-6}	kg/mm^3
Poisson's ratio	$\mathbf{u}$	0.18	-

Table 1 Material properties of concrete (Rasoul, 2017)

การวิเคราะห์ความแข็งแรงของฐานรองรับเครื่องประแจกลไฟฟ้า

ในการติดตั้งเครื่องประแจกลไฟฟ้าจำเป็นต้องมีการขันทอร์ค เพื่อให้เกิดความแข็งแรงและให้เป็นไปตามคู่มือและข้อกำหนดของการติดตั้ง โดยค่าสำหรับการขันทอร์ค นี้มีค่าเท่ากับ 150 Nm ซึ่งมีค่าพรีโหลดประมาณ 29 kN โดยค่าพรีโหลดนี้หาได้จาก สมการความสัมพันธ์ของทอร์คและพรีโหลด (Motosh, 1976)

$$T = P\left(\frac{p}{2\pi} + \frac{\mu_t r_t}{cos\beta} + \mu_n r_n\right)$$

โดย T คือ ทอร์คที่กระทำกับ Anchor bolt หน่วย N·m, P คือ พรีโหลดที่เกิดขึ้นจากการขันทอร์ค หน่วย kN, p คือ ระยะฟันเกลียวของ Anchor bolt หน่วย mm. μ_t คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างนอตและ Anchor bolt, r_t คือ รัศมีระยะฟันเกลียวของ Anchor bolt หน่วย mm. β คือ ครึ่งของมุมเอียงฟันเกลียว (30 degree for the UN or ISO threads), μ_n คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างหน้าของนอตและผิวเบียดอัด, r_n คือ รัศมีของพื้นที่สัมผัสระหว่างนอตกับผิวเบียดอัด หน่วย mm. Yu และ Zhou ศึกษาความสัมพันธ์ของการขันทอร์คและพรีโหลดเปรียบเทียบระหว่างระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์และสมการความสัมพันธ์ของทอร์คและพรีโหลดมีค่าความผิดพลาดประมาณไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ (Yu and Zhou, 2015)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลจากการคำนวณโดยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์แบบยืดหยุ่นเชิงเส้นของคอนกรีต แสดงใน Figure 4 Figure 5 และ Figure 6 และผลจากการคำนวณโดยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์แบบยืดหยุ่นเชิงเส้นของ Anchor bolt แสดงใน Figure 7 จากผลของการคำนวนจากแบบจำลองทั้ง 2 แบบ แสดงให้เห็นถึงค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเฉพาะบริเวณโดยรอบของหน้านอตและผิวคอนกรีตที่ถูกเบียดอัด ดังนั้นรูปร่างของ Anchor bolt จึงไม่มีผลต่อความแตกต่างของค่าความเค้นที่ได้

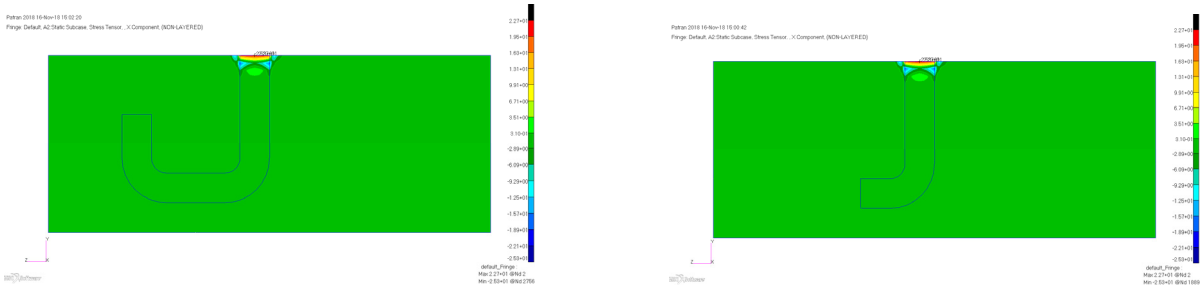


Figure 4 X direction stress of FE models, Concrete-plate J-bolt (left) and Concrete-plate L-bolt (right)

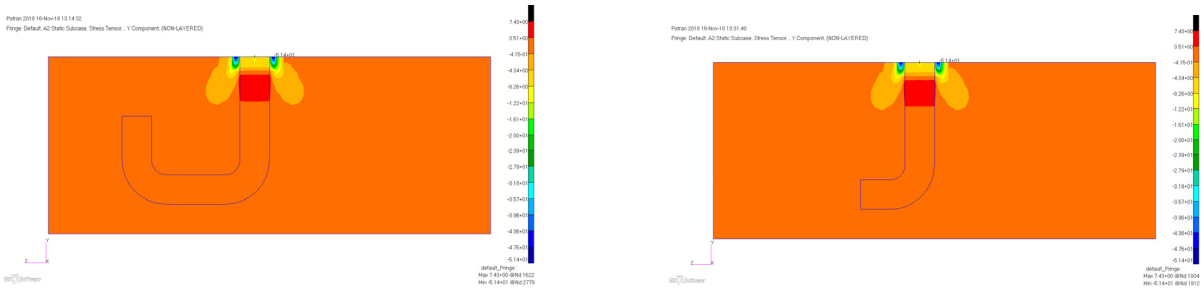


Figure 5 Y direction stress of FE models, Concrete-plate J-bolt (left) and Concrete-plate L-bolt (right)

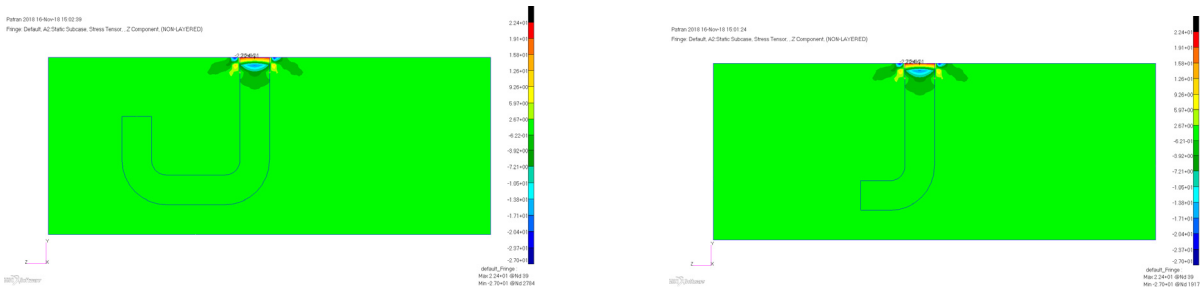


Figure 6 Z direction stress of FE models, Concrete-plate J-bolt (left) and Concrete-plate L-bolt (right)

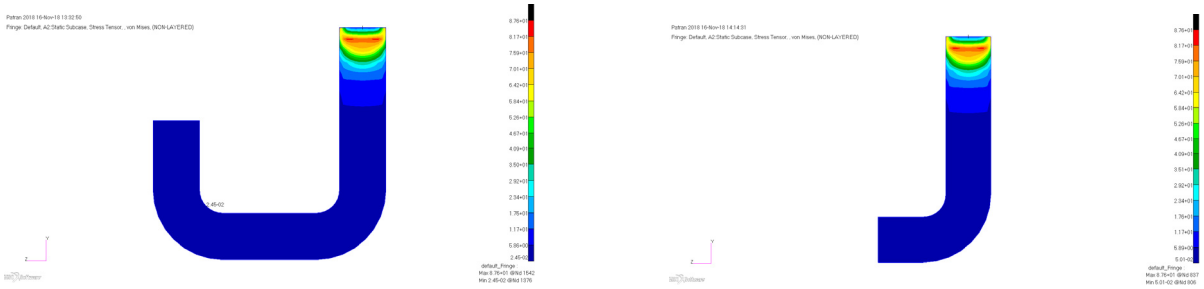


Figure 7 von Mises stress of FE models, J-bolt (left) and L-bolt (right)

สรุป

การสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์และใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์แบบยืดหยุ่นเชิงเส้นมาทำการวิเคราะห์ความเค้นอันเนื่องมาจากแรงขันทอร์ค เปรียบเทียบระหว่างผลการวิเคราะห์ฐานรองรับเครื่องประแจกลไฟฟ้าที่ใช้ Anchor bolt ทั้ง J-Bolt และ L-Bolt ไม่มีผลต่อค่าและการกระจายตัวของความเค้นบริเวณรอบของ Anchor bolt

เอกสารอ้างอิง

ปิยะนุช สถาพงศ์ภักดี. 2560. **ธุรกิจบริการเดินรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน**. ธนาคารกรุงศรีอยุธยา จำกัด (มหาชน). กรุงเทพฯ.

สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร. 2561. **คู่มือการออกแบบและก่อสร้างโครงสร้างทางรถไฟ**. สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร. กรุงเทพฯ.

ACI Committee 318. 2002. **BUILDING CODE REQUIREMENTS FOR STRUCTURAL CONCRETE (ACI 318-02) AND COMMENTARY (ACI 318R-02).** American Concrete Institute.

ACI Committee 349. 2007. **Guide to the Concrete Capacity Design (CCD) Method—Embedment Design Examples.** American Concrete Institute.

Motosh, N. 1976. **Development of Design Charts for Bolts Preloaded up to the Plastic Range.** ASME Journal of Engineering for Industry.

Q.M. Yu and H.L. Zhou. 2015. **Finite Element Study on Pre-Tightening Process of Threaded Connection and Failure Analysis for Pressure Vessel.** Northwestern Polytechnical University.

Rasoul, N. 2017. **Anchorage in Concrete Structures.** Luleå University of Technology.

การพยากรณ์เชิงปริมาณ กรณีศึกษา บริษัทนำเข้าฉนวนกันความร้อน

Qualitative Forecasting: A Case Study of Thermal Insulation Imported Company

พิชามญชุ์ อภิญญานันท์[1*] และ เชาวลิต หามนตรี[1]

Phichamon Aphinyanan[1*] and Chaowalit Hamontree[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการจัดการสินค้าคงคลังของบริษัทกรณีศึกษา เนื่องจากการใช้ฉนวนป้องกันความร้อนสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้พลังงานความร้อนสูงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างมาก เมื่อมีปริมาณความต้องการซื้อมากเป็นผลให้ในตลาดเกิดการแข่งขันสูง ผู้ขายจึงต้องพยายามขายในราคาที่ถูกเพื่อแข่งขันกับผู้ขายรายอื่น ดังนั้นเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวการลดต้นทุนเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการลดราคาสินค้าได้ การจัดการสินค้าคงคลังก็อาจช่วยให้สามารถลดต้นทุนให้กับสินค้าได้ โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้ข้อมูลรายการจัดเก็บสินค้าตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2561 ถึงเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2561 จำนวน 131 รายการมาหาวิธีการจัดหมวดหมู่สินค้าแบบ ABC มาแบ่งกลุ่มสินค้าโดยเลือกศึกษาเฉพาะหมวดสินค้ากลุ่ม A จำนวน 30 รายการซึ่งมีมูลค่าสินค้าคงคลังสูงสุดเท่ากับ 80.03% หลังจากนั้นได้นำข้อมูลสินค้ามาพยากรณ์เชิงปริมาณโดยการใช้รูปแบบอนุกรมเวลานำผลที่ได้มาคำนวณหาปริมาณการสั่งซื้อที่เหมาะสม

ABSTRACT

The purpose of this study is to improve the demand and inventory planning of a case study of thermal insulation imported company. Because of the high competition in current thermal insulation business. Seller needs to reduce the price for competition with other seller, so inventory management may also help to reduce costs. This study focused on the beverage with high sell volumes and costs by applying the ABC analysis technique to group the material. From the grouping process, selected material group A with 80.03% sell volume to forecast the demand by the Time Series Model. Then calculated economic order quantity to control the inventory level.

Key Words: inventory management, quantitative methods, reorder point

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

[1]ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

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

คำนำ

การป้องกันความร้อนของอุปกรณ์ที่สัมผัสกับเปลวไฟ, ลมร้อน, ก๊าซร้อนหรือของเหลวร้อนต่างๆ ช่วยทำให้ยืดอายุการใช้งานวัสดุเหล่านั้นและยังช่วยป้องกันอันตรายสิ่งรอบข้างจากความร้อนที่แผ่ออกมาด้วย ซึ่งฉนวนกันความร้อนถ้าแบ่งประเภทตามการใช้งานสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆคือ 1. ฉนวนกันความร้อนสำหรับอาคารบ้านเรือนและ 2. ฉนวนกันความร้อนสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งฉนวนประเภทที่ใช้ในอุตสาหกรรมจะต้องทนความร้อนสูง ดังนั้นการติดตั้งฉนวนกันความร้อนสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างมาก เมื่อมีปริมาณความต้องการซื้อมาก ผู้ขายหรือตัวแทนจำหน่ายจึงมีหลายรายตามไปด้วย ผู้ขายจึงต้องพยายามขายในราคาที่ถูกเพื่อแข่งขันกับผู้ขายรายอื่นๆ ดังนั้นการลดต้นทุนจึงเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการลดราคาสินค้าได้ ซึ่งงานวิจัยนี้ศึกษาการจัดการสินค้าคงคลังของบริษัทกรณีศึกษาเพื่อแก้ไขปัญหาการจัดเก็บสินค้าไม่ตรงกับความต้องการและสินค้าที่หมดสั่งมาขายไม่ทันกับความต้องการลูกค้า

การจัดการสินค้าคงคลังเป็นอีกกระบวนการหนึ่งในกิจกรรมของโลจิสติกส์และสายพานของห่วงโซ่อุปทานที่จะช่วยทำให้การใช้การจัดเก็บใช้สอยพื้นที่ให้ได้ประโยชน์สูงสุด ด้วยสาเหตุนี้บริษัทหรือองค์กรส่วนใหญ่พยายามที่จะทำให้ต้นทุนในการจัดเก็บสินค้าคงคลังต่ำที่สุดแต่ยังสามารถรองรับความต้องการของลูกค้าได้ การสั่งสินค้ามากักตุนไว้มากจนเกินไปเพียงเพื่อให้ได้ราคาต่อหน่วยที่ถูกอาจไม่คุ้มค่ากับค่าจัดเก็บสินค้าคงคลังที่เสียไปดังนั้นจึงมีการนำเอาทฤษฎี ABC Classification (อัญชลี ตามไวย์, 2014) มาช่วยแบ่งกลุ่มสินค้าเพื่อพิจารณากลุ่มที่มีมูลค่าสูงที่สุดหรือทุกกลุ่มตามต้องการ

การหาจุดสั่งซื้อสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนเพื่อหาวิธีการสั่งซื้อแบบประหยัดด้วยวิธีการ EOQ และ ใช้การกำหนดปริมาณการสั่งซื้อสินค้าด้วยวิธี Silver – Meal ตัวอย่างเช่นกรณีศึกษาบริษัท XYZ สินค้ากลุ่ม A เมื่อใช้วิธีทั้งสองในการลดต้นทุนสินค้าคงคลังสามารถทำให้ลดลงได้ 233,873.34 ต่อปี (กิ่งกาญจน์ ผลิกะ, 2016) การใช้วิธี EOQ และการหาจุดสั่งซื้อใหม่ (Reorder Point, ROP) เช่นในกรณีศึกษา ความต้องการลูกรีดของบริษัท บลูสโคปสตีล (ประเทศไทย) พบว่าในปีถัดไปหลังจากทำการวิจัยแล้วไม่จำเป็นต้องสั่งซื้อลูกรีดใหม่เลยเพราะปริมาณสินค้าคงคลังเพียงพอแล้วมีผลให้ประหยัดต้นทุนสินค้าคงคลังได้ (สัมฤทธิ์ ดวงศรี, 2008)

1.1 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.1.1 เพื่อลดปริมาณต้นทุนสินค้าคงคลัง

1.1.2 เพื่อพยากรณ์ยอดขายสินค้าคงคลังของบริษัทกรณีศึกษาได้

หลักการและทฤษฎีที่ใช้ในงานวิจัย

2.1 ทฤษฎีสินค้าคงคลัง

สินค้าคงคลัง (Inventory) หมายถึงสินค้าสำเร็จรูป งานระหว่างทำ หรือสินค้าระหว่างผลิตซึ่งรวมถึงวัตถุดิบวัสดุที่ใช้ในการผลิต สินค้าคงคลังเป็นสินทรัพย์ประเภทหมุนเวียนของกิจการที่มีไว้เพื่อขายตามปกติและมีไว้เพื่อใช้ในการผลิตสินค้าหรือบริการเพื่อขายต่อไป การจัดการสินค้าคงคลังจึงเป็นการเก็บทรัพยากรไว้ใช้ในปัจจุบันหรือในอนาคตเพื่อให้การดำเนินการของกิจการดำเนินไปอย่างราบรื่น ผ่านการวางแผนกำหนดปริมาณสินค้าคงคลังที่เหมาะสม

ต้นทุนของสินค้าคงคลัง (Inventory Cost) ได้แก่ ค่าใช้จ่ายในการซื้อสินค้า (Purchasing cost) ค่าใช้จ่ายคงตัว เมื่อมีการสั่งซื้อหรือสั่งผลิต (Set up cost/ Ordering cost) ค่าใช้จ่ายในการเก็บรักษาสินค้า (Holding cost) ค่าใช้จ่ายเมื่อสินค้าขาดมือ (Shortest cost)

2.1.1 ระบบการจำแนกวัสดุคงคลังเป็นหมวด ABC

ระบบนี้เป็นวิธีการจำแนกวัสดุคงคลังออกเป็นแต่ละประเภทโดยพิจารณาปริมาณและมูลค่าของวัสดุคงคลังแต่ละรายการเป็นเกณฑ์ เพื่อลดภาระในการดูแล ตรวจนับ และควบคุมวัสดุคงคลังที่มีอยู่มากมาย ซึ่งถ้าควบคุมทุกรายการอย่างเข้มงวดเท่าเทียมกัน จะเสียเวลาและค่าใช้จ่ายมากเกินความจำเป็น เพราะในบรรดาวัสดุคงคลังทั้งหลายของแต่ละธุรกิจจะมักเป็นไปตามเกณฑ์ดังต่อไปนี้

ก. A เป็นวัสดุคงคลังที่มีจำนวนประเภทน้อย (5-15% ของวัสดุคงคลังทั้งหมด แต่มีมูลค่ารวมค่อนข้างสูง 70-80% ของมูลค่าทั้งหมด) การควบคุมต้องควบคุมอย่างเข้มงวดมากด้วยการลงบัญชีทุกครั้งที่มีการรับจ่าย

ข. B เป็นวัสดุคงคลังที่มีจำนวนประเภทปานกลาง (30% ของวัสดุคงคลังทั้งหมด แต่มีมูลค่ารวมปานกลาง 15% ของมูลค่าทั้งหมด) การควบคุมต้องควบคุมอย่างเข้มงวดปานกลาง ด้วยการลงบัญชีคุมยอดบันทึกเสมอเช่นเดียวกับ A

ค. C เป็นวัสดุคงคลังที่มีจำนวนประเภทมาก (50-60% ของวัสดุคงคลังทั้งหมด แต่มีมูลค่ารวมค่อนข้างต่ำ 5-10% ของมูลค่าทั้งหมด) ไม่มีการจดบันทึกหรือมีก็เพียงเล็กน้อย

2.1.2 การพยากรณ์ยอดขายสินค้า

การพยากรณ์ หมายถึงการทำนายเหตุการณ์ในอนาคตโดยอาจนำข้อมูลในอดีตมาใช้พยากรณ์ผ่านการใช้หลักการทางคณิตศาสตร์หรือใช้ดุลยพินิจของผู้พยากรณ์หรือใช้ทั้ง 2 วิธีร่วมกันเพื่อให้ได้ผลพยากรณ์ที่แม่นยำที่สุด โดยวิธีการพยากรณ์มี 2 วิธีคือ วิธีเชิงคุณภาพและวิธีเชิงปริมาณ ซึ่งงานวิจัยนี้เลือกวิธีเชิงปริมาณที่ใช้รูปแบบทางคณิตศาสตร์เข้ามาช่วยโดยใช้ข้อมูลยอดขายในอดีตมาพยากรณ์ ในรูปแบบอนุกรมเวลาได้แก่

ก. วิธีแบบคงที่ (Naïve Approach)

ข. วิธีแบบคาดคะเนแนวโน้ม (Trend Projections)

ค. วิธีการหาค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (Moving Average)

ง. วิธีปรับเรียบแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล (Exponential Smoothing)

การหาความแม่นยำสำหรับการพยากรณ์ในแต่ละวิธีหาได้จากความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ (Forecast Errors) เป็นความแตกต่างระหว่างค่าจริงกับค่าพยากรณ์ได้แก่ ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสมบูรณ์ (Mean absolute deviation, MAD) ดังสมการที่ (1) และหาค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (Mean sum of square error, MSE) ดังสมการที่ (2)และค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสมบูรณ์ (MAPE) ดังสมการที่ (3)

$$MAD = \frac{\sum_{i=1}^{n} |x_i - F_i|}{n} \quad (1)$$

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - F_i)^2}{n} \quad (2)$$

$$MAPE = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n} \left| x_i - F_i \right| \div x_i}{n}\right) \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ X_i คือค่ายอดขายจริง

F_i คือค่าพยากรณ์ยอดขาย

n คือจำนวนชุดข้อมูล

วิธีการศึกษา

งานวิจัยนี้มีขั้นตอนดำเนินการวิจัยดังนี้

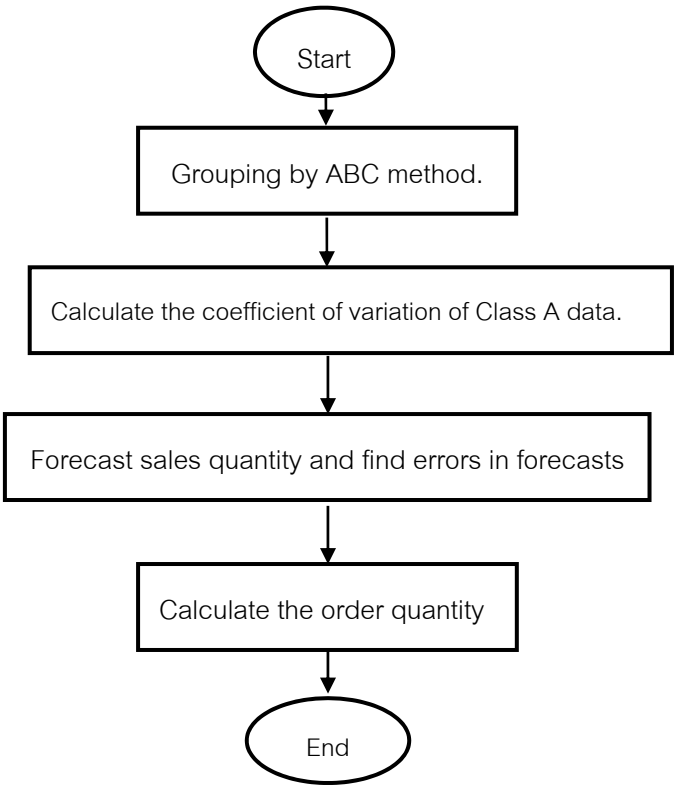


Figure 1 Research methods.

3.1 การกำหนดกลุ่มเป้าหมายที่จะศึกษา

จากการรวบรวมข้อมูลปริมาณการใช้วัสดุแต่ละรายการมีปริมาณการใช้ที่แตกต่างกันและเป็นข้อมูลจำนวนมาก ผู้วิจัยจึงได้กำหนดกลุ่มเป้าหมายที่จะศึกษาเป็นสินค้าจำนวน 139 รายการโดยใช้การแบ่งกลุ่มวัสดุด้วยเกณฑ์มูลค่ารวมต่อปี (ABC) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.1.1 การแบ่งกลุ่มวัสดุด้วยเกณฑ์มูลค่ารวม (ABC)

การแบ่งกลุ่มวัสดุด้วยเกณฑ์มูลค่ารวม (ABC) จะแบ่งวัสดุเป็น 3 กลุ่มซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

ก. คำนวณหามูลค่ารวมต่อหกเดือนของการใช้วัสดุแต่ละรายการ

ข. เรียงลำดับมูลค่ารวมต่อหกเดือนของการใช้วัสดุแต่ละรายการจากมูลค่ามากไปยังมูลค่าน้อย

ค. กำหนดเปอร์เซ็นต์มูลค่าสะสมของวัสดุแต่ละกลุ่ม

ง. แบ่งวัสดุเป็นกลุ่ม A กลุ่ม B และกลุ่ม C ตามเปอร์เซ็นต์มูลค่าสะสมของวัสดุแต่ละกลุ่ม

3.1.2 การพยากรณ์ยอดขายสินค้า

นำข้อมูลสินค้า Class A ที่ได้แบ่งกลุ่มด้วยวิธี ABC แล้วมาทำการพยากรณ์ยอดขายระยะกลางด้วยการพยากรณ์เชิงปริมาณวิธีอนุกรมเวลาแบบคาดคะเนแนวโน้ม (Trend Projections), การปรับเรียบแบบเอ็กโปเนนเชียล (Exponential Smoothing) และการหาค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ถ่วงน้ำหนัก (Weighted Moving Average) โดยใช้ข้อมูลการขายสินค้าแต่ละชนิดแบบรายวันจำนวน 181 วันตั้งแต่เดือน มกราคม พ.ศ. 2561 ถึง มิถุนายน พ.ศ. 2561 เป็นข้อมูลในการพยากรณ์

ข้อมูลการขายของสินค้าในกลุ่ม Class A ตั้งแต่เดือน ม.ค. 2561 ถึง มิ.ย. 2561 แสดงตามตารางที่ 1 เป็นสินค้ารายการ CF BLANKET T1260 D.128 7200x610x25mm (S) บางส่วน

TABLE 1 Sale quantity of CF BLANKET T1260 D.128 7200x610x25mm (S)

No	Code of products	Date	Quantity	Price per unit	Total
1	02-1212-872626	5/4/18	100	635	63,500
2	02-1212-872626	8/3/18	100	610	61,000
3	02-1212-872626	22/1/18	50	720	36,000
4	02-1212-872626	27/4/18	50	720	36,000
5	02-1212-872626	15/6/18	50	690	34,500

เมื่อได้ข้อมูลจากการพยากรณ์ยอดขายแต่ละวิธีแล้ว เพื่อให้ทราบความแม่นยำของการพยากรณ์นั้นต้องหาค่าความผิดพลาดของค่าพยากรณ์ด้วยวิธีหาค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสมบูรณ์ (Mean absolute deviation, MAD) และหาค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (Mean sum of square error, MSE) และค่าเฉลี่ยของร้อยละความผิดพลาดสัมบูรณ์ (Mean Absolute Percentage Error, MAPE) ซึ่งแสดงผลในหัวข้อที่ 4

ผลการศึกษา

4.1. ผลการแบ่งกลุ่มวัสดุด้วยเกณฑ์มูลค่ารวม (ABC)

เมื่อใช้แผนภูมิพาเรโตช่วยแบ่งแยกสินค้าเป็นหมวด ABC โดยใช้ข้อมูลในข้อ 3.1.1 แสดงได้ดังนี้

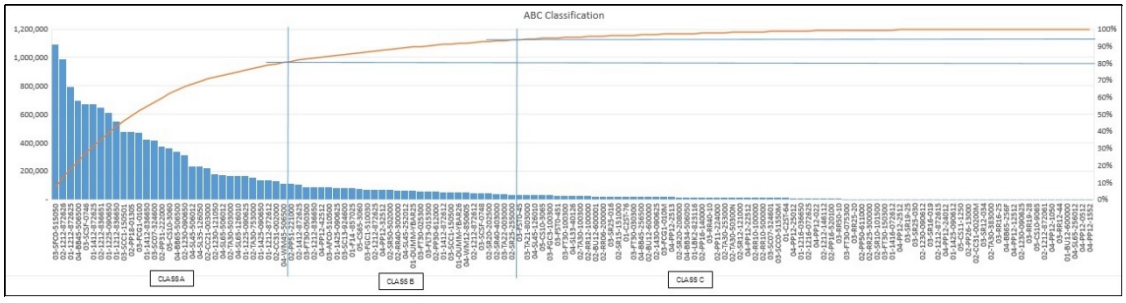


Figure 2 ABC Classification.

จากแผนภูมิพาเรโตในรูปที่ 2 จะแบ่งรายการสินค้าตามยอดขายรวมได้ดังนี้ สินค้ารายการที่ 1-30 เป็นสินค้า Class A มียอดขายสินค้ารวมเท่ากับ 80% ของยอดขายทั้งหมด สินค้ารายการที่ 32-70 เป็นสินค้า Class B มียอดขายสินค้ารวมเท่ากับ 15% ของยอดขายทั้งหมด สินค้ารายการที่ 71-139 เป็นสินค้า Class C มียอดขายสินค้ารวมเท่ากับ 5% ของยอดขายทั้งหมด

4.2 ผลการพยากรณ์ยอดขายสินค้า

เมื่อได้ข้อมูลจากการแบ่งกลุ่มสินค้าในหัวข้อ 4.1 ลำดับต่อไปจะนำข้อมูลรายการสินค้า Class A เนื่องจากเป็นกลุ่มสินค้าที่มีมูลค่าสูง ใช้ข้อมูลการขายสินค้ารายวันจำนวน 181 วันมาใช้สำหรับการพยากรณ์ยอดขายสินค้าด้วยวิธี Exponential Smoothing, Weighted Moving Average และ Trend Projection และนำผลการพยากรณ์สินค้าแต่ละรายการจำนวน 181 ข้อมูลมาหาค่าความคลาดเคลื่อนทั้ง 3 วิธีแล้วจะได้ผลลัพธ์ความคลาดเคลื่อนตามตารางที่ 2 ดังนี้

TABLE 2 Comparison of forecast error.

		FORECAST ERROR								
No	Product code	Exponential Smoothing			Trend Projection			Weighted Moving Average		
		MSE	MAD	MAPE	MSE	MAD	MAPE	MSE	MAD	MAPE
1	03-SFC0-515050	3.89	0.72	95.44	3.24	0.69	84.13	4.67	0.74	99.51
2	02-1212-872626	525.74	12.65	97.83	437.34	12.10	82.08	629.21	13.37	101.85
3	01-1212-872625	621.37	8.77	5.85	536.02	8.56	5.59	760.29	9.01	5.62
4	04-BB45-506500	2,084.95	12.74	151.35	1,756.83	12.32	156.50	2,493.92	13.14	210.07
5	03-SCSF-0746	2.25	0.30	99.97	1.90	0.29	93.38	2.71	0.30	100.00
6	01-1412-872625	283.77	5.80	202.97	239.90	5.78	81.29	335.59	6.02	147.25
7	02-1212-836651	779.81	10.05	103.70	646.93	9.64	80.35	944.60	10.58	120.83
8	01-1225-090650	94.44	3.15	91.74	78.35	3.11	90.68	113.22	3.21	90.97
9	03-SCC1-150501	0.30	0.21	0.95	0.25	0.21	0.95	0.36	0.22	0.96
10	01-1212-836650	600.97	6.87	166.66	503.24	6.60	107.37	737.70	7.15	164.72

จากตารางที่ 2 พบว่าการพยากรณ์ยอดขายสินค้าด้วยวิธี Trend Projection มีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด จึงให้ความแม่นยำมากที่สุดและเหมาะสมที่จะนำมาพยากรณ์ยอดขายสินค้า ตามตารางที่ 3 เพื่อใช้หายอดสั่งซื้อที่เหมาะสมต่อไป

TABLE 3 Demand forecasting by Trend Projection method

Forecasting by Trend Projection Method								
No	Product code	January	February	March	April	May	June	Total
1	03-SFC0-515050	12	11	12	11	11	10	67
2	02-1212-872626	258	228	248	235	238	226	1,433
3	01-1212-872625	247	189	172	129	94	53	885
4	04-BB45-506500	61	107	177	229	297	345	1,216
5	03-SCSF-0746	5	4	5	4	5	4	27
6	01-1412-872625	88	84	97	98	106	107	579

7	02-1212-836651	215	179	182	159	147	126	1,009
8	01-1225-090650	52	46	51	48	49	47	294
9	03-SCC1-150501	2	2	3	4	4	4	20
10	01-1212-836650	231	166	136	84	38	-11	643

เมื่อนำสินค้าทั้ง 31 รายการมาหาสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (VC) ของแต่ละรายการพบว่า สินค้าทุกรายการใช้วิธี EOQ Model และสินค้าที่สั่งซื้อไม่มีการรอสินค้าเมื่อสินค้าหมดสามารถสั่งซื้อสินค้าและไปรับสินค้าได้ทันทีสำหรับหาปริมาณสั่งซื้อและรอบระยะเวลาการสั่งซื้อในช่วงเดือน ม.ค.ถึง มิ.ย. แสดงผลดังตารางที่ 4 และ 5

TABLE 4 Economic Order Quantity used demand in Table 3

	EOQ Model					
No	Sum of demand (S)	Cost per order (O)	Cost of storage per unit (C)	$Q^*=\sqrt{(2SO/C)}$	Order number (S/Q*)	Order time (Week)
1	67	3	1	25	3	10
2	1433	3	1	114	13	2
3	884.99	3	1	90	10	3
4	1216	3	1	105	12	2
5	27	3	1	16	2	15
6	579	3	1	72	8	3
7	1009	3	1	96	11	2
8	294.01	3	1	52	6	5
9	20	3	1	13	1	18
10	643.01	3	1	76	8	3

TABLE 5 Order quantity by EOQ model

No	Product code	January	February	March	April	May	June	Total
1	03-SFC0-515050	25		25		25		75
2	02-1212-872626	228	228	228	228	228	228	1,368
3	01-1212-872625	180	180	180	180	180	180	1,080
4	04-BB45-506500	210	210	210	210	210	210	1,260
5	03-SCSF-0746	16			16			32
6	01-1412-872625	144	144	144	144	144	144	864
7	02-1212-836651	192	192	192	192	192	192	1,152

8	01-1225-090650	52	52	52	52	52	52	312
9	03-SCC1-150501	13				13		26
10	01-1212-836650	152	152	152	152	152	152	912
	Grand Total							7,081

จากตารางที่ 5 รายการสินค้าลำดับที่ 1 มียอดการสั่งแต่ละรอบเท่ากับ 25 ชิ้นและมีรอบเวลาการสั่งสินค้าทุก 10 สัปดาห์ รายการสินค้าลำดับที่ 2,4,7 ต้องสั่งสินค้าทุก 2 สัปดาห์ รายการสินค้าลำดับที่ 3 สั่งสินค้าทุก 3 สัปดาห์ รายการสินค้าลำดับที่ 5 สั่งสินค้าทุก 15 สัปดาห์ รายการสินค้าลำดับที่ 8 สั่งสินค้าทุก 5 สัปดาห์ รายการสินค้าลำดับที่ 9 สั่งสินค้าทุก 18 สัปดาห์ โดยทุกรายการสั่งสินค้าในปริมาณเท่ากันทุกงวด

สรุป

เพื่อแก้ไขปัญหาสินค้าขาดแคลนและลดต้นทุนสินค้าคงคลังลง ซึ่งผลการวิจัยสามารถแยกกลุ่มสินค้าที่มีมูลค่าสูงสุดหรือ Class A มาศึกษาและนำข้อมูลยอดขายในอดีตซึ่งใช้ระยะเวลาในการจัดเตรียมข้อมูลมากพอสมควรเพื่อมาทำการพยากรณ์เชิงปริมาณเดือนมกราคม ถึง มิถุนายน 2561 พบว่าวิธีการคาดคะเนแนวโน้ม (Trend Projections) ให้ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุดจึงเลือกวิธีนี้ในการหาค่าปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัดและรอบระยะเวลาการสั่งซื้อสินค้า โดยสรุปการประยุกต์ใช้ทฤษฎีจำแนกสินค้าแบบ ABC, การพยากรณ์ชนิดอนุกรมเวลา, EOQ Model นั้นทำให้บริษัทกรณีศึกษาได้วิธีการพยากรณ์สินค้าที่เหมาะสมและได้วิธีการสั่งซื้อสินค้าที่ประหยัดและรอบระยะเวลาในการสั่งสินค้าแต่ละรายการ

เอกสารอ้างอิง

อัญชลี ตามไวย์. 2014, การหาระดับสินค้าคงคลังสำรองที่เหมาะสมโดยใช้เทคนิคการจำลองสถานการณ์แบบมอนติคาร์โล กรณีศึกษา : สินค้าอุปโภคบริโภค, **วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต**, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

กิ่งกาญจน์ ผลิกะ, 2016, การบริหารสินค้าคงคลังโดยการประยุกต์ใช้ทฤษฎี ABC Classification Analysis เทคนิค EOQ Model และวิธี Silver-Meal : กรณีศึกษา บริษัท XYZ, **วารสารวิจัยราชภัฏพระนคร สาขามนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์**, ปีที่ 11 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน

สัมฤทธิ์ ดวงศรี, 2008, การวิเคราะห์ปริมาณการสั่งซื้อที่เหมาะสมเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการจัดการสินค้าคงคลัง กรณีศึกษา : การวางแผนความต้องการลูกรีด, **สารนิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต**, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจเลือกใช้รถยนต์ไฟฟ้า

Influencing Factor on Electric Vehicle (EV) Purchasing Decision

ณรงค์ชัย ศรีขวัญเจริญ[1] **เอกชัย ศิริกิจพาณิชย์กูล**[2*] และ สโรช บุญศิริพันธ์[2]

Narongchai Srikhwancharoen[1], Ackchai Sirikijpanichkul[2*] and Saroch Boonsiripant[2]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจเลือกใช้รถยนต์ไฟฟ้าโดยสำรวจด้วยวิธี Stated Preference (SP)ทำการจำลองสถานการณ์สมมติ ให้ผู้ตอบแบบสอบถามพิจารณา 3 ทางเลือกได้แก่ รถยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน (ICE) รถยนต์ไฟฟ้าแบบแบตเตอรี (BEV) และรถยนต์ไฟฟ้าไฮบริดแบบเสียบปลั๊ก (PHEV) เพื่อทราบถึงคุณลักษณะทางเทคนิคแนวทางความต้องการของผู้บริโภคที่มีต่อรถยนต์ไฟฟ้าตามหลักทฤษฎีอรรถประโยชน์ (Utility) และทำการวิเคราะห์แบบจำลองการเลือกใช้รถยนต์ไฟฟ้าแบบโลจิทพหุนาม (Multinomial Logit Model) ผลจากการศึกษาพบว่า ตัวแปรที่มีผลต่อฟังก์ชั่นอรรถประโยชน์สำหรับ รถยนต์ไฟฟ้าแบบแบตเตอรี (BEV) ได้แก่ ราคารถยนต์ ค่าเชื้อเพลิง และระยะทางต่อการชาร์จ 1 ครั้ง รถยนต์ไฟฟ้าไฮบริดแบบเสียบปลั๊ก (PHEV) ได้แก่ ราคารถยนต์ ค่าเชื้อเพลิง ระยะทางต่อการชาร์จ 1 ครั้ง และการปล่อยมลพิษความถูกต้องของการพยากรณ์ของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นพบว่า แบบจำลองการเลือกใช้รถยนต์ไฟฟ้าแบบแบตเตอรี (BEV) สามารถทำนายได้ถูกต้องร้อยละ 56.18 แบบจำลองการเลือกใช้รถยนต์ไฟฟ้าไฮบริดแบบเสียบปลั๊ก (PHEV) สามารถทำนายได้ถูกต้องร้อยละ 21.35

ABSTRACT

The purpose of this research is to investigate the influencing factors on electrical vehicle purchasing decisions with stated preference (SP) method. With simulated situations, respondents are requested to consider the characteristics of three options including Internal Combustion Engine (ICE), Battery Electric Vehicle (BEV) and Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV). The utility theory and multinomial logit model are adopted to find a set of the most relevant technical features and customer characteristics influencing consumers purchasing decisions. The output demonstrates that the influencing factors on EV purchasing include the price, the fuel cost and the distance while those on PHEV purchasing include the prices, the fuel cost, the distance and CO_2 emission. The precisions of developed model are 56.18% for BEV and 21.35% on PHEV, respectively.

Key Words: Electric Vehicle, Multinomial Logit Model, Stated Preference

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

[1]โครงการปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโครงสร้างพื้นฐานและการบริหาร ภาคพิเศษ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Professional Engineering Program, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

[2]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

คำนำ

ปัจจุบันการใช้รถยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicle) ในภาคการขนส่งได้รับความสนใจเพิ่มสูงขึ้นจากประเทศต่าง ๆ ทั่วโลก เนื่องจากเทคโนโลยีดังกล่าวอาศัยพลังงานไฟฟ้า ซึ่งเก็บสะสมอยู่ในแบตเตอรี่มาเป็นแหล่งพลังงานหลักในการขับเคลื่อน โดยเมื่อเปรียบเทียบกับยานพาหนะในปัจจุบันที่ใช้เครื่องยนต์สันดาปภายใน (Internal Combustion Engine) ซึ่งใช้น้ำมันหรือก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงหลัก จะพบว่า รถยนต์ไฟฟ้าจะไม่ปล่อยมลพิษในรูปของไอเสียสู่สภาพแวดล้อมและเมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพ การใช้พลังงานตั้งต้นหรือพลังงานปฐมภูมิ (Primary Energy) แล้วการใช้เชื้อเพลิงความร้อนมาผลิตไฟฟ้าเพื่อนำมาจ่ายให้กับยานพาหนะไฟฟ้าก็ยังมีความคุ้มค่าหรือมีประสิทธิภาพของการใช้พลังงานสูงกว่าการนำเชื้อเพลิงความร้อนมาใช้ในยานพาหนะที่เป็นเครื่องยนต์สันดาปภายในโดยตรงมาก (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2558) สอดคล้องกับการศึกษาของ ยศพงษ์ ลออนวล(2558) พบว่า การส่งเสริมเทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้าจะสามารถลดการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงได้สูงสุดถึง 2,090 กิโล-ตันน้ำมันเทียบเท่า (Kilo Ton of Oil Equivalent or KTOE)หรือคิดเป็นร้อยละ 12.9 ของศักยภาพการประหยัดพลังงานในภาคขนส่งตามร่างแผนอนุรักษ์พลังงาน (EEDP)และสามารถช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้เทียบเท่ากับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 6.13 ล้านตัน หรือคิดเป็นร้อยละ 12.1 เมื่อเปรียบเทียบกับการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากภาคการขนส่งของประเทศไทยในปี พ.ศ. 2551 นอกจากนี้จากการประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์และการเงินสามารถสรุปได้ว่าการสนับสนุนยานยนต์ไฟฟ้าตั้งแต่ปี พ.ศ. 2553 ถึง พ.ศ. 2573 จะช่วยให้ประเทศชาติลดการนำเข้าน้ำมันเชื้อเพลิงคิดเป็นมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ได้เฉลี่ย 12,893 ล้านบาทต่อปีและช่วยลดมลพิษทางอากาศซึ่งคิดเป็นมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ได้เฉลี่ย 67,437 ล้านบาท/ปีอย่างไรก็ตามปัจจุบันในประเทศไทย การพัฒนาอุตสาหกรรมรถยนต์ไฟฟ้ามีข้อจำกัดอยู่หลายประการ เช่น ทางด้านสถานีชาร์จไฟฟ้าที่ไม่ทั่วถึง ราคาสูง ความจุแบตเตอรี่มีจำกัด และใช้เวลาในการชาร์จแบตเตอรี่นาน ผู้วิจัยจึงดำเนินการวิจัยเพื่อศึกษาปัจจัยและทัศนคติที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจเลือกใช้และเพื่อทราบถึงคุณลักษณะทางเทคนิคและแนวทางความต้องการของผู้บริโภคที่มีต่อรถยนต์ไฟฟ้าและพยากรณ์โอกาสในการเลือกใช้รถยนต์ไฟฟ้า เพื่อให้ทราบถึงแนวโน้มความต้องการที่แท้จริงในการใช้งานของผู้บริโภค ซึ่งสามารถนำไปเป็นแนวทางส่วนหนึ่งในการสนับสนุนการเลือกใช้ยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทย ให้ตรงกับความต้องการของผู้บริโภคได้อย่างเหมาะสมต่อไป

วิธีการดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินการศึกษา

การศึกษาเรื่องปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจเลือกใช้รถยนต์ไฟฟ้ามีขั้นตอนการดำเนินการดังนี้

1.1 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจเลือกใช้รถยนต์ไฟฟ้า เอกสารเกี่ยวกับรถยนต์ไฟฟ้า และสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลและการวิเคราะห์ข้อมูล

1.2 รวบรวมข้อมูลเพื่อวางแผนการสำรวจข้อมูล และวิธีการเก็บรวบรวมข้อมูล

1.3 ดำเนินการสำรวจข้อมูล โดยใช้วิธีการสอบถามกลุ่มผู้บริโภคที่จะซื้อรถยนต์คันใหม่ในเขตกรุงเทพมหานคร

1.4 วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการสำรวจ โดยใช้สถิติเชิงพรรณนา

1.5 พัฒนาแบบจำลองการเลือกใช้รถยนต์ไฟฟ้า โดยการวิเคราะห์จากแบบจำลองโลจิทพหุนาม Multinomial Logit Model

1.6 สรุปผลการวิจัยและจัดทำข้อเสนอแนะที่ได้จากการวิจัย

ประชากรและตัวอย่างในการใช้วิจัย

ประชากรเป้าหมายในงานวิจัยนี้ คือ กลุ่มผู้บริโภคที่จะซื้อรถยนต์คันใหม่ และมีความสนใจที่จะเลือกใช้รถยนต์ไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ (BEV) ในเขตกรุงเทพมหานครซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีแนวโน้มในการนำรถยนต์ไฟฟ้ามาใช้ก่อนจังหวัดอื่น ๆ โดยในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการสำรวจด้วยวิธี Stated Preference (SP) เพื่อให้ทราบถึงพฤติกรรมการตัดสินใจการเลือก โดยการสร้างสถานการณ์สมมติขึ้นโดย Ortuzar และ Willumsen(1994) ได้แนะนำว่า การสำรวจด้วยวิธี Stated Preference (SP) ควรมีการสำรวจตัวอย่างอย่างน้อยประมาณ 75-100 ตัวอย่าง ผู้วิจัยจึงได้ทำการสำรวจกลุ่มตัวอย่างจากประชากรเป้าหมายโดยสุ่มจำนวนทั้งสิ้น194 ตัวอย่าง โดยแบบสอบถามแต่ละชุดจะมีส่วนของคำถามแบบ Stated Preference ซึ่งประกอบไปด้วยสถานการณ์สมมติ 9 สถานการณ์ จึงทำให้จำนวนคำตอบที่ได้รับจากการตอบแบบสอบถามมีจำนวนทั้งสิ้น 1,746 คำตอบสำหรับใช้ในการวิเคราะห์ผลการศึกษา

เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูล

เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูลเป็นแบบสอบถามซึ่งจำแนกออกเป็น 3 ตอน ดังนี้

ตอนที่ 1 สอบถามเกี่ยวกับข้อมูลส่วนบุคคลของกลุ่มตัวอย่างที่จะซื้อรถยนต์คันใหม่แบบให้เลือกตอบ ได้แก่ เพศ อายุ สถานภาพสมรส การศึกษา อาชีพ รายได้ ประเภทที่พักอาศัย จำนวนยานพาหนะที่มีครอบครองในครัวเรือนบุคคลที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจเลือกซื้อรถยนต์ แหล่งข้อมูลที่ใช้ในการพิจารณาตัดสินใจเลือกซื้อรถยนต์คันใหม่

ตอนที่ 2 สอบถามเกี่ยวกับข้อมูลด้านเทคนิค ได้แก่ จำนวนเที่ยวการเดินทางโดยเฉลี่ยต่อวัน ประสบการณ์ทดลองขับรถยนต์ไฟฟ้า ความต้องการรถยนต์ไฟฟ้า ความรู้ด้านเทคโนโลยีพื้นฐานเกี่ยวกับรถยนต์ไฟฟ้ายี่ห้อรถยนต์ไฟฟ้าความคิดเห็นเกี่ยวกับราคาของรถยนต์ไฟฟ้าระยะเวลาในการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าที่สถานีชาร์จไฟฟ้าและอายุการใช้งานแบตเตอรีของรถยนต์ไฟฟ้า

ตอนที่ 3 สอบถามข้อมูลการตัดสินใจเลือกรถยนต์ โดยเป็นการจำลองสถานการณ์ทางเลือก จำนวน 9 สถานการณ์ โดยให้ผู้ตอบแบบสอบถามพิจารณา 3 ทางเลือก

แบบสอบถามที่ถูกสร้างขึ้นสำหรับแต่ละสถานการณ์ที่สมมติขึ้นจะเป็นการเปรียบเทียบคุณสมบัติต่าง ๆ ของแต่ละทางเลือกที่ถูกสร้างสถานการณ์ให้เกิดขึ้น เสมือนหนึ่งว่าผู้บริโภคจะต้องทำการพิจารณาข้อมูลต่าง ๆ ก่อนที่จะดำเนินการเลือกรถยนต์คันใหม่ตัวอย่างเช่น มีการตั้งคำถามสร้างสถานการณ์ โดยมีปัจจัยเพื่อเปรียบเทียบให้ผู้บริโภคเลือกระหว่าง รถยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน (ICE) รถยนต์ไฟฟ้าแบบแบตเตอรี (BEV) และรถยนต์ไฟฟ้าไฮบริดแบบเสียบปลั๊ก (PHEV)

โครงสร้างแบบจำลอง

แบบจำลองการตัดสินใจเลือกซื้อรถยนต์ไฟฟ้าเป็นแบบจำลองที่ใช้คาดการณ์สัดส่วนของการตัดสินใจเลือกซื้อรถยนต์ไฟฟ้า โดยจะอยู่ในรูปของแบบจำลองโลจิท (Logit Model) ซึ่งประกอบด้วยฟังก์ชันอรรถประโยชน์ของรถยนต์ไฟฟ้าแต่ละประเภท ซึ่งในกรณีที่มีทางเลือกมากกว่า 2 ทางเลือก จะใช้แบบจำลองโลจิทพหุนาม (Multinomial Logit Model) เพื่อวิเคราะห์การตัดสินใจทางเลือก บนสมมติฐานว่าในการตัดสินใจเลือกใช้รถยนต์

ไฟฟ้าของผู้บริโภคมีทางเลือกเท่ากับ 3 ทางเลือก โดยผู้บริโภคจะพิจารณาทางเลือกทั้งหมดพร้อม ๆ กัน โดยรูปแบบโครงสร้างแบบจำลองพัฒนาขึ้นจากแบบจำลองโลจิทพหุนาม (Multinomial Logit Model) ซึ่งนำเสนอโดย Ben-Akiva(2008) ดังแสดงในสมการที่ (1) และ (2)

$$U_{in} = V_{in} + \varepsilon_{in} \quad (1)$$

โดยที่ U_{in} คือ อรรถประโยชน์หรือความพึงพอใจของคนที่ n ที่มีต่อทางเลือก i

V_{in} คือ ส่วนของอรรถประโยชน์ที่บุคคล n รับรู้และเห็นได้

ε_{in} คือ ส่วนของอรรถประโยชน์ที่ไม่แน่นอน

โอกาสที่จะตัดสินใจเลือกทางเลือก $\boldsymbol{i}$ ก็คือโอกาสที่ความพอใจที่ได้จาก $\boldsymbol{i}$ ไม่น้อยไปกว่าความพอใจที่ได้จากทางเลือก $\boldsymbol{j}$ เขียนได้ดังนี้

$$P_n(i) = P(U_{in} \geq U_{jn})$$

$$= \frac{1}{1+ e^{-\mu(V_{in}-V_{jn})}}$$

$$= \frac{e^{V_{in}}}{e^{V_{in}} + e^{V_{jn}}} \varepsilon_{in} \quad (2)$$

การกำหนดนิยามตัวแปร Y

ตัวแปร Y หมายถึง ค่าตัวแปร Dummy Variable ของการตัดสินใจการเลือกใช้รถไฟฟ้าของผู้บริโภคแบ่งออกเป็น 3 ค่า ประกอบด้วย รถยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน (ICE) รถยนต์ไฟฟ้าแบบแบตเตอรี่ (BEV) และรถยนต์ไฟฟ้าไฮบริดแบบเสียบปลั๊ก (PHEV) สามารถกำหนดค่าของตัวแปร Y ในฐานะ Dummy Variable สำหรับใช้ในการวิจัย เพื่อเป็นทางเลือกหลักสำหรับการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ตัวแบบจำลองการตัดสินใจ การเลือกใช้รถไฟฟ้าของผู้บริโภคกับทางเลือกอื่นๆ

การตรวจสอบความผิดปกติของตัวแปรอิสระ โดยวิธีการตรวจสอบปัญหา Multicollinearity ในงานวิจัยนี้ใช้ 2 วิธี คือ การตรวจสอบด้วย Simple Correlation Coefficients และ Variance Inflation Factors (VIF) พบว่าจากการตรวจสอบด้วย Simple Correlation Coefficients ตัวแปรอิสระทั้ง 34 ตัวแปรไม่มีค่าสหสัมพันธ์สูง (>0.80) จนก่อให้เกิดปัญหา Multicollinearityและจากการทดสอบปัญหา Multicollinearity ด้วย Simple Correlation Coefficients และ VIF สามารถสรุปได้ว่า ตัวแปรอิสระทั้ง 34 ตัวแปร ไม่มีปัญหา Multicollinearity เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของตัวแปรมีค่าต่ำกว่า 0.80 และค่าสถิติ VIF ของทั้ง 34 ตัวแปร มีค่าต่ำกว่า 5

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ผลการวิเคราะห์เบื้องต้นข้อมูลทั่วไป

ผลการวิเคราะห์เบื้องต้นเกี่ยวกับข้อมูลทั่วไปของผู้บริโภคพบว่า กลุ่มตัวอย่างเป็นเพศชาย จำนวน 150 คน (คิดเป็นร้อยละ 77.3) เป็นเพศหญิง จำนวน 44 คน (คิดเป็นร้อยละ 22.7) อายุน้อยกว่า 30 ปี จำนวน 80 คน (คิดเป็นร้อยละ 41.2) รองลงมา ได้แก่ อายุ 30-39 ปีจำนวน 68 คน (คิดเป็นร้อยละ 35.1)และ 40-49ปี จำนวน 36(คิดเป็นร้อยละ 18.6) ตามลำดับมีสถานภาพโสด จำนวน 123 คน (คิดเป็นร้อยละ 63.4) และสถานภาพสมรส จำนวน 71 คน (คิดเป็นร้อยละ 36.6) จบการศึกษาสูงสุดระดับปริญญาตรี จำนวน 114 คน (คิดเป็นร้อยละ 58.8) รองลงมา ได้แก่ สูงกว่าปริญญาตรี จำนวน 53 คน (คิดเป็นร้อยละ 27.3) และต่ำกว่าปริญญาตรี จำนวน 27 คน (คิดเป็นร้อยละ 13.9) ประกอบอาชีพพนักงาน/ลูกจ้างบริษัท จำนวน 71 คน (คิดเป็นร้อยละ 36.6) รองลงมา ได้แก่ ธุรกิจส่วนตัว จำนวน 45 คน (คิดเป็นร้อยละ 23.2)และนักเรียน/นักศึกษา จำนวน 41คน (คิดเป็นร้อยละ 21.1) ตามลำดับมีรายได้เฉลี่ยต่อเดือน 15,001-30,000 บาท จำนวน 73 คน (คิดเป็นร้อยละ 37.6) รองลงมา ได้แก่ มากกว่า 60,000 บาท จำนวน 38 คน (คิดเป็นร้อยละ 19.6)และไม่เกิน 15,000บาท จำนวน 35คน (คิดเป็นร้อยละ 18.0) ตามลำดับมีที่พักเป็นบ้านเดี่ยว จำนวน 83 คน (คิดเป็นร้อยละ 42.8) รองลงมา ได้แก่ ห้องชุด/คอนโด จำนวน 51 คน (คิดเป็นร้อยละ 26.3)และทาว์นเฮาส์/บ้านแฝด จำนวน 41คน (คิดเป็นร้อยละ 21.1) ตามลำดับมีรถยนต์ส่วนตัว จำนวน 137 คน (คิดเป็นร้อยละ 70.6) และไม่มีรถยนต์ที่อยู่ในการครอบครอง จำนวน 57คน (คิดเป็นร้อยละ 29.4)ตัดสินใจเลือกยานพาหนะด้วยตนเองมากที่สุด จำนวน 127 คน (คิดเป็นร้อยละ 65.5) รองลงมา ได้แก่ ญาติ/พี่น้อง/เพื่อน จำนวน 40 คน (คิดเป็นร้อยละ 20.6) และสามี/ภรรยา จำนวน 27 คน (คิดเป็นร้อยละ 13.9) ตามลำดับ และแหล่งข้อมูลผู้บริโภคที่ใช้ในการพิจารณาตัดสินใจซื้อรถยนต์คันใหม่ ได้แก่ อินเตอร์เน็ต จำนวน 144คน (คิดเป็นร้อยละ 74.2) รองลงมา ได้แก่ คำแนะนำของบุคคลใกล้ชิด เช่นญาติ พี่น้อง เพื่อน จำนวน 33คน (คิดเป็นร้อยละ 17.0) และโบรชัวร์แนะนำสินค้า/นิตยสาร จำนวน 17คน (คิดเป็นร้อยละ 8.8) ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์เบื้องต้นเกี่ยวกับข้อมูลด้านเทคนิค

ผู้บริโภคส่วนใหญ่มีระยะทางเฉลี่ยในการเดินทางต่อวันน้อยกว่า 50 กิโลเมตร จำนวน 144 คน (คิดเป็นร้อยละ 74.2) รองลงมา ได้แก่ 50-100 กิโลเมตร จำนวน 33 คน (คิดเป็นร้อยละ 17.0) และมากกว่า 200กิโลเมตร จำนวน 17คน (คิดเป็นร้อยละ 8.8) ตามลำดับส่วนใหญ่ไม่เคยทดลองขับรถยนต์ไฟฟ้า จำนวน 175คน (คิดเป็นร้อยละ 90.2) สำหรับผู้บริโภคที่เคยทดลองขับรถยนต์ไฟฟ้า ทุกคนพึงพอใจในการขับขี่รถยนต์ไฟฟ้า จำนวน 19 คน (คิดเป็นร้อยละ 9.8) ตามลำดับสนใจพิจารณาเลือกซื้อรถยนต์ไฟฟ้าในอีก 3 ปี ข้างหน้า โดยพบว่า ผู้บริโภคส่วนใหญ่สนใจซื้อ หากราคายอมรับได้จำนวน 103 คน (คิดเป็นร้อยละ 53.1)รองลงมา ได้แก่ สนใจซื้อ ถ้ามีสถานีชาร์จไฟเพียงพอ จำนวน 45 คน (คิดเป็นร้อยละ 23.2)และไม่สนใจซื้อ จำนวน15คน (คิดเป็นร้อยละ 7.7)ตามลำดับรู้จักเทคโนโลยีพื้นฐานเกี่ยวกับรถยนต์ไฟฟ้า ได้แก่ รถยนต์ไฟฟ้าไฮบริดแบบเสียบปลั๊ก (PHEV) จำนวน 57 คน (คิดเป็นร้อยละ 29.4) รองลงมา ได้แก่ รถยนต์ไฟฟ้าแบบใช้แบตเตอรี (BEV) จำนวน 39 คน (คิดเป็นร้อยละ 20.1) และไม่รู้จักเลย จำนวน 34 คน (คิดเป็นร้อยละ 34) ตามลำดับรู้จัก หรือมีความสนใจมากที่สุดในตอนนี้ได้แก่ TESLA จำนวน 116 คน (คิดเป็นร้อยละ 59.8) รองลงมา ได้แก่ Nissan จำนวน 25 คน (คิดเป็นร้อยละ12.9) และ BMW จำนวน 23คน (คิดเป็นร้อยละ 11.9) ตามลำดับส่วนใหญ่เห็นว่าปัจจุบันราคาของรถยนต์ไฟฟ้าสูงกว่ารถยนต์ระบบเชื้อเพลิง จำนวน 155 คน (คิดเป็นร้อยละ 79.9) รองลงมา ได้แก่ ราคาไม่มีความแตกต่างกันจำนวน 23 คน (คิดเป็นร้อยละ 11.9) และราคาของรถยนต์ไฟฟ้าต่ำกว่า จำนวน 16 คน (คิดเป็นร้อยละ8.2) ตามลำดับส่วนใหญ่เห็นว่า

ระยะเวลาในการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าที่บ้านต่อครั้งที่เหมาะสม ได้แก่ 1-3 ชั่วโมง จำนวน 65 คน (คิดเป็นร้อยละ 33.5) รองลงมา ได้แก่ 3-6 ชั่วโมง จำนวน 63 คน (คิดเป็นร้อยละ 32.5)และน้อยกว่า 1 ชั่วโมง จำนวน 32คน (คิดเป็นร้อยละ 16.5) ตามลำดับส่วนใหญ่เห็นว่าระยะเวลาในการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าที่สถานีชาร์จไฟฟ้าต่อครั้งที่เหมาะสม ได้แก่ 10-20 นาที จำนวน 77 คน (คิดเป็นร้อยละ 39.7) รองลงมา ได้แก่ น้อยกว่า 10 นาที จำนวน 75 คน (คิดเป็นร้อยละ 38.7)และ 20-30 นาที จำนวน 42คน (คิดเป็นร้อยละ21.6) ตามลำดับ และส่วนใหญ่เห็นว่าอายุการใช้งานแบตเตอรีของรถยนต์ไฟฟ้าที่เหมาะสม ได้แก่ 5-10ปี จำนวน150คน (คิดเป็นร้อยละ 77.3) รองลงมา ได้แก่ มากกว่า 10ปี จำนวน32 คน (คิดเป็นร้อยละ 16.5)และน้อยกว่า 5ปี จำนวน 12คน (คิดเป็นร้อยละ 6.2) ตามลำดับ

ผลการพยากรณ์โอกาสในการเลือกใช้รถยนต์ไฟฟ้า

การประมาณค่าของแบบจำลองการเลือกใช้รถยนต์ไฟฟ้า โดยใช้ Multinomial Logit Modelจะพิจารณาจากรถยนต์ไฟฟ้า 3 แบบ คือ รถยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน (ICE) รถยนต์ไฟฟ้าแบบแบตเตอรี (BEV) และรถยนต์ไฟฟ้าไฮบริดแบบเสียบปลั๊ก (PHEV)ตัวแปรที่ใช้แบ่งเป็นตัวแปรที่เป็นลักษณะเฉพาะของบุคคล ข้อมูลด้านเทคนิค และปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจเลือกใช้รถยนต์ไฟฟ้าได้ผลลัพธ์ที่เป็นฟังชันอรรถประโยชน์ ดังตารางที่ 1

Table 1 Result of Purchasing Decision Model

Influencing Factor	Battery Electric Vehicle (BEV)		Plug-in Hybrid Electric Vehicle(PHEV)	
	Coefficient	P-value	Coefficient	P-value
Constant	1.85208	.70	-2.00111	.4089
Prices	-3.20573***	.0078	7.39623***	.0000
Cost of Fuel	-7.53144***	.0000	-3.02823***	.0011
Distance	-2.82562***	.0077	2.00607**	.0319
CO2 Emission	-	-	4.24715***	.0025
Pct. Correct Pred.	99.25544		56.35739	
Pred.Pr	.5618		.2135	
Pseudo R-squared .93828				
Log likelihood function -5837.70706 McFadden Pseudo R-squared .0663540				

Note: ***, **, * Significance at 1%, 5%, 10% level.

สำหรับการพิจารณาความเหมาะสมของแบบจำลองจะพิจารณาโดยใช้ค่า P-value ที่มีค่าน้อยกว่าร้อยละ 5 และตรวจสอบเครื่องหมายของสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชั่นอรรถประโยชน์ว่าสอดคล้องกับความเป็นจริงหรือไม่ โดยพบว่า ตัวแปรที่มีผลต่อฟังก์ชั่นอรรถประโยชน์สำหรับการเลือกใช้รถยนต์ไฟฟ้า ได้แก่ ราคารถยนต์ ราคาเชื้อเพลิง ระยะทาง และการปล่อยมลพิษ โดยตัวแปรที่มีผลต่อฟังก์ชั่นอรรถประโยชน์สำหรับ รถยนต์ไฟฟ้าแบบแบตเตอรี (BEV) ได้แก่ ราคารถยนต์ ราคาเชื้อเพลิง และระยะทาง รถยนต์ไฟฟ้าไฮบริดแบบเสียบปลั๊ก (PHEV) ได้แก่ ราคารถยนต์ ราคาเชื้อเพลิง ระยะทาง และการปล่อยมลพิษ ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 3 และ 4

$$U_{BEV} = 1.85208 - 3.20573X_{BEV1} - 7.53144X_{BEV2} - 2.82562X_{BEV3} \quad (3)$$

$$U_{PHEV} = -2.00111 + 7.39623X_{PHEV1} - 3.02823X_{PHEV2} + 2.00607X_{PHEV3} + 4.24715X_{PHEV4} \quad (4)$$

จากแบบจำลองพบว่า ตัวแปรอื่นๆ ไม่มีนัยสำคัญในสมการอรรถประโยชน์ของรถยนต์ไฟฟ้าทั้ง 2 แบบ ทั้งนี้สาเหตุที่เป็นไปได้ประการหนึ่ง คือ การเลือกใช้รถยนต์ไฟฟ้าเป็นลักษณะถูกบังคับให้เลือก ซึ่งผู้บริโภคจะเลือกใช้รถยนต์ที่ตนเองคุ้นเคย รู้จัก หรือเคยได้ยินชื่อ โดยไม่ได้คำนึงถึงค่าอรรถประโยชน์ในปัจจัยด้านอื่นๆ ที่นำเข้ามาในการวิเคราะห์ เมื่อนำข้อมูลการเลือกใช้รถยนต์ไฟฟ้ามาทดสอบความถูกต้องของการพยากรณ์ของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น พบว่า แบบจำลองการเลือกใช้รถยนต์ไฟฟ้าแบบแบตเตอรี (BEV) สามารถทำนายได้ถูกต้องร้อยละ 56.18 แบบจำลองการเลือกใช้รถยนต์ไฟฟ้าไฮบริดแบบเสียบปลั๊ก (PHEV) สามารถทำนายได้ถูกต้องร้อยละ 21.35

สรุป

ปัจจัยที่มีผลต่อฟังก์ชั่นอรรถประโยชน์สำหรับการเลือกใช้รถยนต์ไฟฟ้า ได้แก่ ราคารถยนต์ ราคาเชื้อเพลิง ระยะทาง และการปล่อยมลพิษ และอาจยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อฟังก์ชั่นอรรถประโยชน์สำหรับการเลือกใช้รถยนต์ไฟฟ้าที่ยังไม่ได้ถูกนำเข้ามาวิเคราะห์ในแบบจำลอง ประกอบกับกลุ่มตัวอย่างอาจยังมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับอรรถประโยชน์สำหรับการตัดสินใจเลือกใช้รถยนต์ไฟฟ้าค่อนข้างน้อย หรือรู้เพียงเฉพาะกลุ่ม ดังนั้นจึงควรนำสารสนเทศด้านราคารถยนต์ ค่าเชื้อเพลิง ระยะทาง และการปล่อยมลพิษ มาเป็นประเด็นหลักในการประชาสัมพันธ์รถยนต์ไฟฟ้าเพื่อกระตุ้นให้ผู้บริโภคเกิดการรับรู้ ประเมินทางเลือก และตัดสินใจซื้อ และผลิตรถยนต์ไฟฟ้าให้สอดคล้องกับความต้องการของผู้บริโภค

เอกสารอ้างอิง

ยศพงษ์ ลออนวล.2558.**การศึกษาการพัฒนาของเทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้าและผลกระทบที่เกิดขึ้นสำหรับประเทศไทย**, ฉบับปรับปรุง 8 กุมภาพันธ์ 2558.กรุงเทพฯ :สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช)

สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. 2558. **โครงการศึกษาการเตรียมความพร้อมรองรับการใช้ยานพาหนะไฟฟ้าในอนาคตสำหรับประเทศไทย สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน**. กรุงเทพฯ : สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน.

สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. 2558. **รายงานสถิติพลังงานของประเทศไทย 2558 สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน**. กรุงเทพฯ : สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน.

Ortuzar JD. andWillumsen LG. 1994. **Transport Modelling.2nd ed.** John Wiley & Sons, England.

Ben-Akiva, M. 2008 Discrete Choice Analysis I: **Transportation Systems Analysis: Demand& Economics**, MIT Press.

การเลือกชนิดสารไวแสง ระยะเวลาการผสมและชนิดหลอดไฟสำหรับเพิ่มค่าความหนาแน่นของการเชื่อมขวางของฟิล์มจากยางธรรมชาติที่ผ่านการพรีวัลคาไนซ์ด้วย UV

Selection of Appropriate Photoinitiator Type, Mixing Time, and Lamp Type for Enhancing Crosslink Density of UV-Prevulcanized Natural Rubber Films

ศุทธินี แก้วเมืองคำ[1] ปณิธิ วิรุฬห์พอจิต[2] และ นันทิยา หาญศุภลักษณ์[1*]

Sutthinee Keawmaungkom[1], Panithi Wiroonpochit[2] and Nanthiya Hansupalak[1*]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งหาสภาวะเตรียมฟิล์มจากน้ำยางข้นชนิดแอมโมเนียสูงที่พรีวัลคาไนซ์ด้วยแสงยูวีเพื่อเพิ่มความหนาแน่นของการเชื่อมขวางสายโซ่ ปัจจัยที่ศึกษาคือสัดส่วนของสารไวแสงที่มีความเป็นขั้วต่างกัน (Darocure 1173/Irgacure 819) ระยะเวลาการผสม และชนิดหลอดไฟ (UVA และ UVB) แผ่นฟิล์มที่มีความหนาแน่นของการเชื่อมขวางสูงที่สุดเกิดจากการใช้ Darocure 1173 ชนิดเดียว ระยะเวลาผสม 10 นาทีและ UVA สาเหตุที่ทำให้สภาวะอื่นให้ค่าความหนาแน่นของการเชื่อมขวางของสายโซ่ต่ำเกิดจากความสามารถในการละลายของ Irgacure 819 ในน้ำยางเลเท็กซ์มีค่าต่ำในทุกสัดส่วนและระยะเวลาผสมที่ใช้ หลอด UVB ผลิตความร้อนมากกว่า จึงทำให้น้ำระเหยออกไปมาก น้ำยางพรีวัลคาไนซ์จึงเข้มข้นและหนืดสูง จึงเกิดปัญหาการถ่ายโอนมวลของอนุมูลอิสระที่เกิดจากการแตกตัวของสารไวแสงและสารกระตุ้นร่วม การเชื่อมขวางจึงเกิดได้น้อย

ABSTRACT

Optimization of UV prevulcanizing high ammonia concentrated natural rubber latex in order to raise the chain crosslink density was reported. The ratio of photoinitiators with different polarities (Darocure 1173/Irgacure 819), mixing time, and lamp type (UVA and UVB) were studied. The results showed that the highest crosslink density of films was achieved using Darocure 1173 only, the mixing time of 10 min, and the UVA lamp. The lower crosslink density under other conditions was due to the poorer solubility of Irgacure 819 in the latex mixture, regardless of the photoinitiator ratio or mixing time. In addition, more heat generated from the UVB lamp in relation to the UVA lamp enhanced water evaporation during radiation, leading to the increase in the concentration and viscosity of the prevulcanized latex. This decreased the mass transfer of radicals generated by dissociation of photoinitiator and coagent molecules. Hence, the crosslink density of rubber films was reduced.

Key Words: natural rubber latex, ultraviolet (UV) prevulcanization, photoinitiator

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

[1]ศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Center of Excellence on Petrochemical and Materials Technology, Chemical Engineering Dept., Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

[2]ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ปทุมธานี 12120

[2]National Metal and Materials Technology Center, Pathum Thani, 12120 Thailand

คำนำ

ผลิตภัณฑ์ฟิล์มยาง เช่น ถุงมือที่ใช้ในทางการแพทย์ และถุงยางอนามัย เป็นต้น ล้วนผลิตจากน้ำยางพรีวัลคาไนซ์ (Pre-vulcanized latex) โดยนำน้ำยางธรรมชาติหรือสังเคราะห์มาผ่านการวัลคาไนซ์ในสถานะที่เป็นของเหลวและขึ้นรูปด้วยการจุ่มแม่พิมพ์ลงไป เมื่อทำให้แห้งก็จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างตามที่ต้องการและพร้อมใช้งาน (ชินรัตน์, 2558) ในการพรีวัลคาไนซ์นี้ สามารถใช้ซัลเฟอร์เป็นสารเชื่อมขวางได้แต่ต่อมาพบว่าซัลเฟอร์ก่อให้เกิดอาการแพ้แบบที่ 4 เมื่อสัมผัส (Schlögl *et al*., 2014) ผู้ผลิตจึงหันมาใช้การฉายรังสีในการเชื่อมขวาง เช่น การฉายรังสีแกมมา (Gamma radiation) และอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet radiation, UV) เป็นต้น

ในกรณีฉายด้วยรังสีแกมมา ต้องเติมสารกระตุ้นร่วม (Coagent) เช่น n-butyl acrylate (nBA) เป็นต้น เพื่อทำหน้าที่ดูดซับแสงและแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระเข้าทำปฏิกิริยากับพันธะคู่ของสายโซ่ยาง ทำให้เกิดการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่หรือในสายโซ่เดียวกันได้ (Haque *et al*., 1996) อย่างไรก็ตามข้อเสียของการใช้รังสีแกมมา คือ การเสื่อมสภาพของฟิล์มยางหลังผ่านการบ่มเร่งมีค่าสูงที่เกิดจากพลังงานของรังสีแกมมามีความสามารถในการทะลุทะลวงสูง มีต้นทุนการผลิตสูง รวมทั้งความปลอดภัยในระหว่างดำเนินการต่ำ (Schlögl *et al*., 2010)

แสง UV นิยมใช้อย่างแพร่หลายเพื่อเปลี่ยนสมบัติและพื้นผิวของวัสดุพอลิเมอร์ที่ไม่ใช่ยาง โดยเป็นอุปกรณ์ที่มีราคาถูกกว่าอุปกรณ์ผลิตรังสีแกมมา ใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำ และไม่เป็นอันตรายต่อผู้ใช้งานด้วย (Schlögl *et al*., 2014) เนื่องจากแสง UV เป็นแหล่งพลังงานที่มีความสามารถในการทะลุทะลวงต่ำ ไม่เพียงพอที่จะทำให้สารกระตุ้นร่วมแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระ จึงจำเป็นต้องใช้สารไวแสง (Photoinitiator) ด้วย เพื่อให้สารนี้ดูดซับแสง UV และแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระก่อน จากนั้นจึงเข้าทำปฏิกิริยากับสารกระตุ้นร่วม เพื่อให้สารแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระเข้าเชื่อมขวางสายโซ่ยางได้ (Hansupalak *et al*., 2017)

งานวิจัยก่อนหน้า (Hansupalak *et al*., 2017) ได้แสดงให้เห็นแล้วว่าสามารถใช้แสง UV ในการพรีวัลคาไนซ์น้ำยางธรรมชาติข้นชนิดแอมโมเนียสูง โดยใช้ 1,6-hexanediol diacrylate (HDDA) และ **α**-hydroxyl ketone (Darocure 1173) เป็นสารกระตุ้นร่วมและสารไวแสง ตามลำดับ แต่พบว่าแผ่นฟิล์มที่ได้มีความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) 12 MPa ซึ่งต่ำกว่าแผ่นที่เตรียมโดยใช้ซัลเฟอร์เป็นสารเชื่อมขวางที่ความหนาเท่ากัน (**≈** 20 MPa) โดยคาดว่าเกิดจากสารไวแสงที่ใช้มีความเป็นขั้วสูงแต่สารกระตุ้นร่วมมีความเป็นขั้วต่ำ ทำให้โอกาสเข้าทำปฏิกิริยาของสารทั้งสองมีน้อย ผู้วิจัยจึงสนใจปรับปรุงแผ่นฟิล์มจากน้ำยางธรรมชาติข้นชนิดแอมโมเนียสูงให้มีสมบัติเชิงกลที่สูงขึ้นด้วยการเติมสารไวแสงที่มีความเป็นขั้วต่ำลงไปเพิ่มด้วย คือ Bis (2,4,6-trimethylbenzoyl)-phenyl phosphineoxide (Irgacure 819**)** เนื่องจากความสามารถในการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระของสารไวแสงขึ้นกับความสามารถในการดูดซับโฟตอนของสารไวแสงและปริมาณโฟตอนที่ปล่อยจากหลอดไฟในช่วงความยาวคลื่นเดียวกัน (Miguel *et al*., 2017) ดังนั้นชนิดของหลอดไฟที่เป็นแหล่งให้แสง UV เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญอย่างมาก บทความนี้รายงานการหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับเตรียมแผ่นฟิล์มจากน้ำยางธรรมชาติที่เป็นน้ำยางข้นชนิดแอมโมเนียสูงและผ่านการพรีวัลคาไนซ์ด้วยแสงยูวี ปัจจัยที่ศึกษาคือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของ Darocure 1173 ต่อ Irgacure 819 ระยะเวลาการผสม และชนิดหลอดไฟ (เลือกใช้หลอดไฟ UVA และ UVB เพราะปล่อยแสงโฟตอนครอบคลุมช่วงที่สารไวแสงทั้งสองชนิดดูดซับได้) บทความนี้รายงานเพียงผลการศึกษาเบื้องต้นที่วัดเพียงค่าความหนาแน่นของการเชื่อมขวางของแผ่นฟิล์มยางที่เตรียมที่สภาวะต่าง ๆ โดย

ค่าดังกล่าวแปรผันกับค่าความต้านทานแรงดึง (Hansupalak *et al*., 2017) ดังนั้นการวัดเพียงความหนาแน่นของการเชื่อมขวางจึงบ่งบอกเบื้องต้นของอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีต่อค่าความต้านทานแรงดึงได้

อุปกรณ์และวิธีการ

วัสดุและสารเคมี

น้ำยางข้นชนิดแอมโมเนียสูง (ร้อยละเนื้อยางแห้งคือ 60) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ไทยอีสเทิร์นรับเบอร์ จำกัด จังหวัดระยอง ส่วนสารเคมีสำคัญที่ใช้ได้แก่ α-hydroxyl ketone (Darocure 1173) Bis (2,4,6-trimethylbenzoyl)-phenyl phosphineoxide (Irgacure 819) และ เฮกเซนไดออล ไดอะคีเลต (1,6-hexanediol diacrylate, HDDA) ได้จากอุตสาหกรรมเคมีโตเกียว ญี่ปุ่น สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Sigma Aldrich Thailand) โทลูอีน (ความบริสุทธิ์ 99%, Lab Analytical Sciences, ไอร์แลนด์) และสารเคมีอื่น ๆ ถูกนำมาใช้โดยไม่ทำให้บริสุทธิ์ หลอดไฟที่ใช้คือหลอด UVA (Philips Actinic BL TL 8 watt; ปล่อยโฟตอนในช่วงความยาวคลื่น 315–400 nm) และหลอด UVB (Arcadia MINI UVB 8 watt; ปล่อยโฟตอนในช่วงความยาวคลื่น 280-315 nm)

การเตรียมแผ่นฟิล์ม

เตรียมอีมัลชันของสารกระตุ้นร่วมเข้มข้น 50% โดยผสม HDDA 100 กรัม น้ำปราศจากประจุ 99 กรัม และโพแทสเซียมลอเลต 1 กรัม นาน 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง เติมสารไวแสงแต่ละชนิดลงไปในอัตราส่วนต่างๆ กวนให้สารเข้ากัน (เวลาในการผสมที่ใช้คือ 10 นาทีและ 1 วัน) จากนั้นเติมน้ำยางข้นลงไปในสารละลายดังกล่าว และกวน 1 ชั่วโมง และเทลงในภาชนะ จากนั้นปิดปากภาชนะด้วยฟิล์มใสและฉายแสง UV 1 ชั่วโมง จำนวนหลอดไฟ UV ที่ใช้คือ 6 หลอด ระยะห่างระหว่างหลอดไฟกับผิวหน้าของของเหลวในภาชนะเท่ากับ 45 มิลลิเมตร ความสูงของของเหลวในภาชนะคือ 10 มิลลิเมตร อัตราส่วนของสารกระตุ้นร่วมต่อสารไวแสงเท่ากับ 1:1 ระหว่างการฉายรังสีมีการกวนอย่างต่อเนื่อง เทน้ำยางที่ผ่านการพรีวัลคาร์ไนซ์แล้วลงบนแผ่นกระจกและทิ้งไว้ในอุณหภูมิห้อง 72 ชั่วโมงแล้วจะได้แผ่นฟิล์มหนา 1 มิลลิเมตร (Hansupalak *et al*., 2017)

การวิเคราะห์แผ่นฟิล์ม

มอร์ฟอลอจีของแผ่นฟิล์มวิเคราะห์จากภาพที่ถ่ายด้วย Olympus CX31 HD digital microscope (อเมริกา) ความหนาแน่นของการเชื่อมขวาง (ρ_c; สมการที่ 1) วิเคราะห์โดยแช่แผ่นฟิล์มขนาด 2 × 2 เซนติเมตร ในโทลูอีน 7 วันเพื่อเข้าสู่สภาวะสมดุล อบแผ่นฟิล์มให้แห้งที่ 90 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง บันทึกน้ำหนักของแผ่นฟิล์มที่บวมด้วยโทลูอีน (W_{SW}) และน้ำหนักของแผ่นฟิล์มหลังแช่ในโทลูอีนและอบแห้งแล้ว (W_{AD})

$$\rho_c = \frac{-[ln(1-\phi_p)+\phi_p+\chi\phi_p^2]}{V_s\left(\phi_p^{1/3}-\frac{\phi_p}{2}\right)} \quad (1)$$

โดย χ คือพารามิเตอร์ Flory–Huggins ที่บ่งบอกแรงกระทำระหว่างยางกับโทลูอีน (= 0.393) V_s คือปริมาตรต่อโมลของโทลูอีน และ ϕ_p คือสัดส่วนโดยปริมาตรของเนื้อยางในแผ่นฟิล์มที่บวมด้วยโทลูอีน (สมการที่ 2)

$$\phi_p = \frac{1}{1+\frac{\rho_p}{\rho_s}\left(\frac{W_{SW}}{W_{AD}}-1\right)} \quad (2)$$

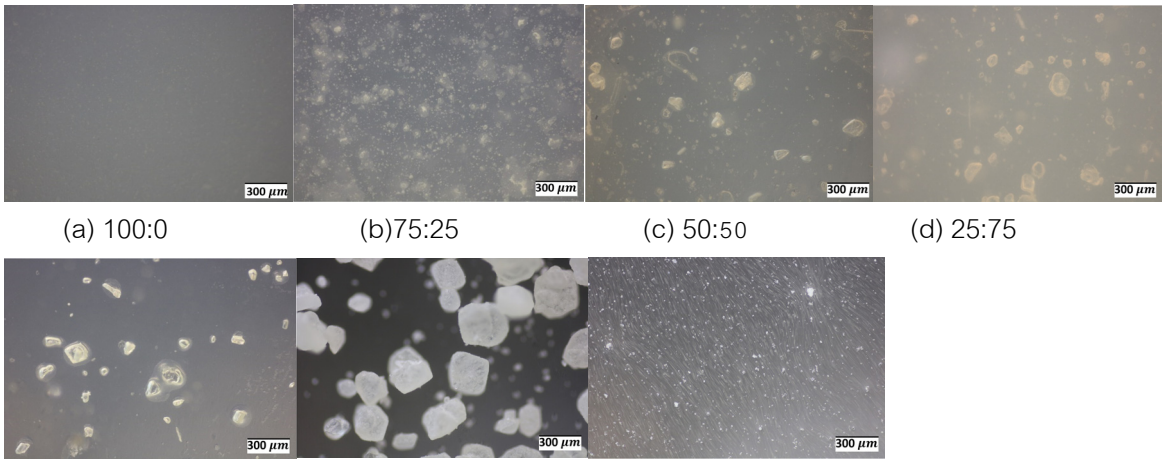
ρ_p และ ρ_s คือความหนาแน่นของเนื้อยาง (= 0.93 g/cm^3) และโทลูอีน (= 0.87 g/cm^3) ตามลำดับ (Hansupalak *et al*., 2017) ในการศึกษานี้ พบว่า W_{AD} มีค่าเท่ากับน้ำหนักของแผ่นฟิล์มก่อนนำมาแช่ในโทลูอีน จึงบ่งบอกว่าไม่มีการสูญเสียตัวอย่างจากการแช่ในโทลูอีนนี้)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลของสัดส่วนของ Darocure 1173/Irgacure 819 และระยะเวลาการผสม

ในการศึกษานี้ ได้ใช้หลอดไฟ UVA เท่านั้น มอร์ฟอลอจีของแผ่นฟิล์มที่เตรียมจาก Darocure 1173 เพียงชนิดเดียวและระยะเวลาการผสม 10 นาที มีอนุภาคขนาดต่ำกว่า 10 ไมครอนกระจายทั่วแผ่น (Figure 1a) มอร์ฟอลอจีในลักษณะเดียวกันนี้ยังคงพบเมื่อเพิ่มระยะเวลาการผสมเป็น 1 วัน (Figure 2a) อนุภาคที่พบนี้มีรูปร่างและขนาดที่ตรงกับอนุภาคของสารต้านอนุมูลอิสระที่ใช้ในการพรีวัลคาไนซ์นี้ [poly(dicyclopentadiene-co-P-cresol)] ดังแสดงใน Figure 1g นั่นคืออนุภาคที่พบเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ

ที่ระยะเวลาการผสม 10 นาที เมื่อเติม Irgacure 819 ลงไปโดยให้สัดส่วนของ Darocure 1173/Irgacure 819 เท่ากับ 75:25 ก็พบอนุภาคขนาดใหญ่กว่า 10 ไมครอนและมีหลากหลายรูปร่างจำนวนมากกระจายอยู่ในแผ่น (Figure 1b) เมื่อเพิ่มปริมาณของ Irgacure 819 ก็พบว่าขนาดอนุภาคในแผ่นฟิล์มมีขนาดใหญ่ขึ้นและยังมีหลากหลายรูปร่าง (>100 ไมครอน; Figures 1b–d) ทั้งนี้อนุภาคที่พบในแผ่นฟิล์มที่ใช้สัดส่วนของ Darocure 1173/Irgacure 819 เท่ากับ 25:75 (Figure 1d) มีขนาดและรูปร่างใกล้เคียงกับอนุภาคที่พบในแผ่นฟิล์มที่เตรียมจาก Irgacure 819 เพียงชนิดเดียว (Figure 1e) และอนุภาคของ Irgacure 819 ที่อยู่ในรูปของผง (Figure 1f) ผลที่ได้จึงบ่งบอกว่าอนุภาคเหล่านี้คือ Irgacure 819



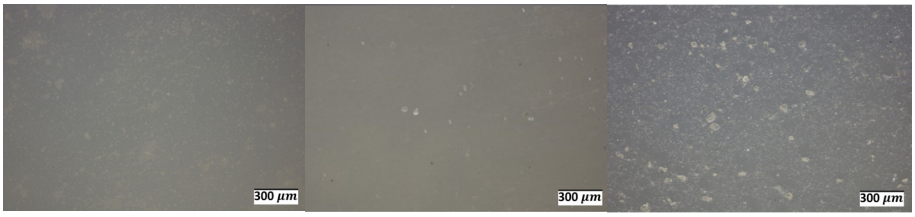
(a) 100:0 (b)75:25 (c) 50:50 (d) 25:75

(e) 0:100 (f) (g)

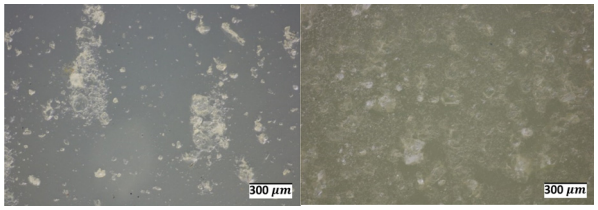
Figure 1 Microscope images of rubber films prevulcanized by using UV at various Darocure 1173/ Irgacure 819 ratios. The mixing time of 10 min and the UVA lamp were used for film preparation. (f) Irgacure 819 in powder form and (g) an aqueous solution of poly(dicyclopentadiene-co-P-cresol).

การเพิ่มระยะเวลาการผสมสารเป็น 1 วันสำหรับแผ่นฟิล์มที่เตรียมจาก Darocure 1173 และ Irgacure 819 ก็พบว่าอนุภาค Irgacure 819 มีขนาดเล็กลงเมื่อใช้สัดส่วนของสารเท่ากัน (Figures 1b–e และ 2b–e) แต่

การละลายของ Irgacure 819 ลดน้อยลงตามการเพิ่มปริมาณของ Irgacure 819 ที่ใส่ลงไป นั่นคือความสามารถในการละลายของ Irgacure 819 เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาการผสม แต่ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณสาร



(a) 100:0 (b) 75:25 (c) 50:50



(d) 25:75 (e) 0:100

Figure 2 Microscope images of rubber films prevulcanized by using UV at different Darocure 1173/ Irgacure 819 ratios. The mixing time of 1 day and the UVA lamp were used for film preparation.

จาก Table 1 เมื่อให้ระยะเวลาการผสมเท่ากับ 10 นาที แผ่นฟิล์มที่เตรียมจาก Darocure 1173 เพียงชนิดเดียวมีค่าความหนาแน่นของการเชื่อมขวางสูงที่สุด แต่ความหนาแน่นของการเชื่อมขวางของแผ่นฟิล์มมีค่าลดลงเมื่อลดปริมาณของ Darocure 1173 นั่นเป็นเพราะ Irgacure 819 ที่ใส่ลงไปแทนที่ Darocure 1173 มีความสามารถในการละลายในน้ำยางเลเท็กซ์ที่ต่ำ ส่งผลให้ปริมาณสารไวแสงที่สามารถแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระมีน้อยลง ก่อให้เกิดผลที่ตามมาคือปริมาณอนุมูลอิสระของสารกระตุ้นร่วมมีค่าลดลงไปด้วย ด้วยเหตุนี้สายโซ่ยางจึงเชื่อมขวางกันน้อยลง การเพิ่มระยะเวลาการผสมเป็น 1 วันยังสามารถเพิ่มค่าความหนาแน่นของการเชื่อมขวางของทุกแผ่นฟิล์มได้ (ยกเว้นแผ่นฟิล์มที่เตรียมจาก Irgacure 819 เพียงชนิดเดียว) เพราะการเพิ่มระยะเวลาการผสมทำให้ Irgacure 819 ละลายในระบบได้ดีขึ้น ทำให้เกิดอนุมูลอิสระของสารไวแสงมากขึ้น (Table 1)

กรณีใช้สารไวแสง Irgacure 819 เพียงชนิดเดียวนั้น พบว่าการเพิ่มระยะเวลาการผสมเป็น 1 วัน ทำให้ค่าความหนาแน่นของการเชื่อมขวางของแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้มีค่าลดลงร้อยละ 70 เมื่อเทียบกับแผ่นฟิล์มที่เตรียมโดยผสม 10 นาที สาเหตุของการลดลงนี้เกิดจากการผสมที่นานนี้ทำให้ Irgacure 819 มารวมตัวกันเป็นก้อนสีเหลืองขนาด 1–3 เซนติเมตรอยู่ที่ก้นภาชนะ (เนื่องจาก Irgacure 819 เป็นสารเคมีของแข็งชนิดเดียวในงานวิจัยนี้ที่มีสีเหลือง ส่วนสารเคมีของแข็งอื่นนั้นมีสีขาว) ก้อนสีเหลืองประกอบด้วยเม็ดกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตรจำนวนหนึ่งมารวมตัวกัน โดยพบหลังจากเทของเหลวลงไปในอีกภาชนะหนึ่งเพื่อนำไปฉายรังสี การพบก้อนขนาดใหญ่นี้บ่งบอกว่า มี Irgacure 819 ในน้ำยางเลเท็กซ์ที่จะก่อให้เกิดการเชื่อมขวางในแผ่นฟิล์มน้อยลง

เนื่องจากค่าความหนาแน่นของการเชื่อมขวางแปรผันกับค่าความต้านทานแรงดึง และวัตถุประสงค์ของงานวิจัยสุดท้ายแล้วก็คือการเพิ่มค่าความต้านทานแรงดึง ดังนั้นในการเตรียมแผ่นฟิล์มสำหรับศึกษาชนิดของ

หลอดไฟ ผู้วิจัยจึงเลือกใช้สารไวแสง Darocure 1173 เพียงชนิดเดียวและระยะเวลาการผสมนาน 10 นาที เพราะให้ค่าความหนาแน่นของการเชื่อมขวางต่ำกว่าการใช้ระยะเวลาการผสม 1 วันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

Table 1 Effect of the mixing time and photoinitiator ratio on the crosslink density of rubber films.

Mixing time	Darocure 1173: Irgacure 819	Crosslink density (mmol/cm^3)
10 min	100:0	0.0650 ± 0.0010
	75:25	0.0640 ± 0.0020
	50:50	0.0620 ± 0.0010
	25:75	0.0430 ± 0.0008
	0:100	0.0030 ± 0.0004
1 day	100:0	0.0746 ± 0.0009
	75:25	0.0676 ± 0.0004
	50:50	0.0636 ± 0.0008
	25:75	0.0498 ± 0.0006
	0:100	0.0009 ± 0.00005

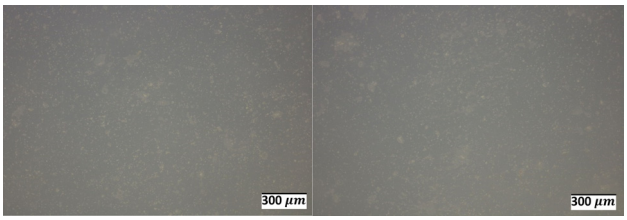
ผลของชนิดหลอดไฟ

เมื่อกำหนดชนิดสารไวแสงและระยะเวลาการผสมให้คงที่แล้ว ก็พบว่าชนิดของหลอดไฟที่ใช้ส่งผลต่อค่าความหนาแน่นของการเชื่อมขวางของแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้ (Table 2) การใช้หลอดไฟ UVA ให้ค่าความหนาแน่นของการเชื่อมขวางของแผ่นฟิล์มที่สูงกว่าการใช้หลอดไฟ UVB ประมาณ 2 เท่า ทั้งนี้ชนิดของหลอดไฟที่ต่างกันไม่ส่งผลต่อมอร์ฟอลอจีของแผ่นฟิล์ม โดยยังคงพบอนุภาคขนาดเล็กใกล้เคียงกันกระจายทั่วแผ่น ซึ่งเกิดจากสารต้านอนุมูลอิสระ (Figures 3a–b)

Darocure 1173 เป็นสารที่ดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเท่ากับ 200–360 nm (Ciba Specialty Chemicals, 2003) ซึ่งตรงกับช่วงความยาวคลื่นที่ปล่อยโฟตอนของหลอดไฟ UVA (315–400 m; ความยาวคลื่นที่ปล่อยโฟตอนมากที่สุดคือ 358 nm) และหลอดไฟ UVB (280–315 nm; ความยาวคลื่นที่ปล่อยโฟตอนมากที่สุดคือ 298 nm) ทั้งนี้พบว่า Darocure 1173 ดูดกลืนแสงมากสุดที่ความยาวคลื่น 245 nm รองลงมาคือ 280 และ 331 nm ตามลำดับ (Ciba Specialty Chemicals, 2003) ข้อมูลข้างต้นนี้บ่งบอกว่า ความยาวคลื่นที่ดูดกลืนแสงมากเป็นอันดับสองของสารไวแสงนี้ (280 nm) มีค่าใกล้เคียงกับช่วงความยาวคลื่นที่หลอดไฟ UVB ปล่อยโฟตอน ในขณะที่ความยาวคลื่นที่ดูดกลืนแสงมากเป็นอันดับสามของสารไวแสงนี้ (331 nm) มีค่าใกล้เคียงกับช่วงความยาวคลื่นที่หลอดไฟ UVA ปล่อยโฟตอน ดังนั้นการใช้หลอดไฟ UVB ควรให้ค่าความหนาแน่นของการเชื่อมขวางมากกว่าการใช้หลอดไฟ UVA ซึ่งขัดแย้งกับผลการทดลอง ซึ่งทำซ้ำ 2 ครั้ง (Table 2) การขัดแย้งระหว่างทฤษฎีและผลการทดลองนี้บ่งบอกอิทธิพลของปัจจัยชนิดอื่นที่มาขัดขวางการเชื่อมขวางของสายโซ่ขณะฉายรังสีด้วยหลอดไฟ UVB

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะของน้ำยางพรีวัลคาไนซ์ที่ได้หลังจากการฉายแสงด้วยหลอดไฟทั้งสองชนิดสิ้นสุดลง พบว่ากรณีใช้หลอดไฟ UVA นั้น น้ำยางพรีวัลคาไนซ์ยังคงมีลักษณะเป็นของเหลวที่มีความหนืดใกล้เคียงกับก่อนฉาย ในขณะที่น้ำยางพรีวัลคาไนซ์ที่ใช้หลอดไฟ UVB มีลักษณะข้นและหนืดมากกว่าน้ำยางก่อนฉาย จึงเป็นไปได้ว่าพลังงานที่ปล่อยออกมาจากหลอดไฟ UVB ที่สูงกว่าหลอดไฟ UVA นี้ ทำให้เกิดความร้อนมาก ส่งผลให้น้ำในระบบระเหยออกไปมากกว่า การที่สารหนืดมากขึ้นนี้สามารถขัดขวางการถ่ายเทมวลของอนุมูลอิสระ การเชื่อมขวางของสายโซ่จึงเกิดน้อยลง

ในงานวิจัยก่อนหน้า (Hansupalak *et al.*, 2017) ที่เตรียมแผ่นฟิล์มยางโดยใช้สารไวแสง Darocure 1173 เพียงชนิดเดียว สภาวะที่ใช้เตรียมแผ่นเหมือนกับที่ใช้ในบทความนี้ทุกประการ แต่สิ่งที่ต่างกันคืองานวิจัยก่อนหน้า (Hansupalak *et al.*, 2017) ใช้หลอดไฟ UVB และ UVA ชนิดละ 3 หลอด ในขณะที่บทความนี้ใช้หลอดไฟ UVA หรือ UVB เพียงชนิดเดียวจำนวน 6 หลอดสำหรับการฉายแต่ละครั้ง ค่าความหนาแน่นของการเชื่อมขวางที่ได้จากงานวิจัยก่อนหน้า (Hansupalak *et al.*, 2017) มีค่าเท่ากับ 0.05 mmol/cm^3 ซึ่งต่ำกว่าค่าที่ได้จากการใช้หลอดไฟ UVA เพียงชนิดเดียว (Table 2) นั่นแสดงว่าหลอดไฟ UVB ที่ใช้เพียง 3 หลอดนี้ก็ยังคงให้พลังงานที่สูงมากจนทำให้น้ำยางพรีวัลคาไนซ์หนืดและขัดขวางการเคลื่อนที่ของอนุมูลอิสระ



(a) UVA lamp (b) UVB lamp

Figure 3 Microscope images of rubber films prevulcanized by using different UV lamps. Darocure 1173 and mixing time of 10 min were used for film preparation.

Table 2 Effect of lamp type used on the crosslink density of rubber films.

Lamp type	Crosslink density (mmol/cm^3)
UVA	0.0720 ± 0.0010
UVB	0.0460 ± 0.0010

สรุป

งานวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็นว่าสามารถปรับปรุงค่าความหนาแน่นของการเชื่อมขวางของแผ่นฟิล์มที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติข้นชนิดแอมโมเนียสูงและผ่านการพรีวัลคาไนซ์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตได้ โดยสภาวะที่เหมาะสมคือ การใช้สารไวแสง Darocure 1173 เพียงชนิดเดียว ระยะเวลาการผสม 10 นาที และใช้หลอดไฟ UVA ทั้งนี้การลดความเป็นขั้วของสารไวแสง Darocure 1173 ลงด้วยการผสมกับสารไวแสงที่มีความเป็นขั้วต่ำ (Irgacure 819) ไม่สามารถเพิ่มความหนาแน่นของการเชื่อมขวางของแผ่นฟิล์มได้เพราะความสามารถในการละลายของ Irgacure 819 ในระบบที่ใช้มีค่าต่ำ ทั้งนี้การเพิ่มระยะเวลาการผสมเป็น 1 วันสามารถเพิ่มการละลาย Irgacure 819 ได้เพียงระดับหนึ่งเท่านั้น จึงทำให้ค่าความหนาแน่นของการเชื่อมขวางเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเท่านั้น

ส่วนอิทธิพลของชนิดหลอดไฟนั้น ก็พบว่าหลอดไฟ UVB ปล่อยโฟตอนในช่วงความยาวคลื่นที่ใกล้เคียงกับค่าความยาวคลื่นที่สารไวแสง Darocure 1173 ดูดซับแสงได้มากที่สุดก็ตาม แต่ด้วยความร้อนที่ปล่อยออกมามากทำให้น้ำในน้ำยางระเหย ส่งผลให้น้ำยางพรีวัลคาไนซ์ที่ได้มีความเข้มข้นสูงขึ้นและหนืดมากขึ้น จึงขัดขวางการเคลื่อนที่ของอนุมูลอิสระ และทำให้เกิดการเชื่อมขวางของสายโซ่น้อยลงเมื่อเทียบกับการใช้หลอดไฟ UVA

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณองค์กรต่อไปนี้ที่ให้การสนับสนุนทางด้านทุนการศึกษาและทุนวิจัย ศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารอ้างอิง

ชินรัตน์ ลาภพูลธนะอนันต์. 2558. **น้ำยางข้นพรีวัลคาไนซ์**. แหล่งที่มา: http://mahidolrubber.org/files/prevulcanized.pdf, 14 พฤศจิกายน 2561.

Ciba Specialty Chemicals. 2003. **Photoinitiators for UVCuring.** แหล่งที่มา: https://people.rit.edu/deeemc/reference_13/Imprint/Photoinitiators%20for%20UV%20curing.pdf, 14 พฤศจิกายน 2561.

Hansupalak, N., K. Uttra, P. Wiroonpochit, K. Jantawatchai and Y. Chisti. 2016. Sulfur-free prevulcanization of natural rubber latex by ultraviolet irradiation. **Industrial and Engineering Chemistry Research**. 56 (25): 7217-7223.

Haque, M.E., N.C. Dafader, F. Akhtar and M.U.D. Ahmad. 1996. Radiation dose required for the vulcanization of natural rubber latex. **Radiation Physics and Chemistry**. 48 (4): 505-510.

Neumann, M. G., Miranda, W. G., Schmitt, C. C., Rueggeberg, F. A., & Correa, I. C. (2005). Molar extinction coefficients and the photon absorption efficiency of dental photoinitiators and light curing units. **Journal of Dentistry**, 33(6), 525-532.

Schlögl, S., A. Temel, R. Schaller, A. Holzner and W. Kern. 2010. Prevulcanization of natural rubber latex by uv techniques: A process towards reducing type iv chemical sensitivity of latex articles. **Rubber Chemistry and Technology**. 83 (2): 133-148.

Schlögl, S., M.-L. Trutschel, W. Chassé, I. Letofsky-Papst, R. Schaller, A. Holzner, G. Riess, W. Kern and K. Saalwächter. 2014. Photo-vulcanization using thiol-ene chemistry: Film formation, morphology and network characteristics of UV crosslinked rubber latices. **Polymer**. 55 (22): 5584-5595.

การศึกษาปัจจัยของผู้ขับขี่รถยนต์ส่วนบุคคลที่ไม่ใช้บริการรถไฟฟ้า กรณีศึกษารถไฟฟ้ามหานครสายฉลองรัชธรรม

Preferences of Mass Transit Non User : A Case Study of Drivers Decision Choices on MRT Chalong Ratchadhum Line

ณปภัช ชาตรูประชีวิน[1] **เอกชัย ศิริกิจพาณิชย์กูล**[2*] และ เหมือนมาศ วิเชียรสินธุ์[2]

Napaphach Chatrupracheewin[1], **Ackchai Sirikijpanichkul**[2*] and Muanmas Wichiensin[2]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ทำให้ผู้ขับขี่รถยนต์ส่วนบุคคลไม่เลือกใช้บริการรถไฟฟ้าและคุณลักษณะทางประชากรศาสตร์ของผู้ขับขี่ฯเพื่อที่จะสามารถนำเสนอนโยบายที่ใช้ในการส่งเสริมให้ผู้ขับขี่ฯเปลี่ยนรูปแบบการเดินทางมาใช้บริการรถไฟฟ้าได้อย่างเหมาะสม ด้วยวิธีการสำรวจ Reveal Preference (RP) และสร้างแบบจำลองสมการถดถอยโลจิสติกส์ทวินาม (Binary Logistics Regression Model) โดยผลการวิเคราะห์พบว่า คุณลักษณะทางประชากรศาสตร์มีอิทธิพลต่อปัจจัยที่ทำให้ผู้ขับขี่ฯไม่เลือกใช้บริการรถไฟฟ้า ซึ่งสามารถนำไปใช้ประกอบการเสนอแนะนโยบายที่เกี่ยวข้อง เช่น รถวิ่งวนแบบไม่เสียค่าบริการ รถวิ่งวนร่วมบริการจากผู้ประกอบการ รถวิ่งวนสำหรับเด็กนักเรียน การประชาสัมพันธ์การให้บริการรถไฟฟ้า การปรับปรุงทางเดินเท้าทั้งภายในสถานีและโดยรอบสถานี สิ่งอำนวยความสะดวกสำหรับเด็กภายในสถานี และบัตรโดยสารแบบกลุ่ม ซึ่งคาดว่าจะช่วยปรับเปลี่ยนพฤติกรรมการเดินทางจากขับขี่รถยนต์ส่วนบุคคลมาใช้รถไฟฟ้ามากยิ่งขึ้น

ABSTRACT

The propose of this research is to investigate the relevant driver's demographic characteristics and influencing factors, that cause drivers not to choose rail mass transit mode, in order to propose policies which properly promote drivers' modal shift from road to rail mass transit. To address this, the study develops Binary Logistics Regression Model based on the Reveal Preference (RP) interview survey results. It is found that some demographic characteristics and factors influence drivers not to use rail mass transit. Such influencing factors allow the researchers to suggest appropriate policy to promote mass transit patronage such as free shutter bus, affiliated shutter bus, school shutter bus, route service public relation, appropriate footpath and infrastructure facilities and group transit card.

Key Words: rail mass transit, driver's demographic characteristics, binary logit model

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

[1]โครงการปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโครงสร้างพื้นฐานและการบริหาร ภาคพิเศษ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Professional Engineering Program, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

[2]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

คำนำ

“จังหวัดนนทบุรี” หนึ่งในจังหวัดปริมณฑล เป็นเมืองที่มีการขยายตัวของเขตที่อยู่อาศัยอย่างรวดเร็ว มีการก่อสร้างทั้งโครงการบ้านจัดสรร และคอนโดมิเนียมอย่างมากมาย ทำให้ปัจจุบันมีประชากรที่อาศัยอยู่ในจังหวัดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่เนื่องจากระบบขนส่งสาธารณะต่างๆ ยังขาดความสะดวกรวดเร็ว และเพียงพอต่อความต้องการในเดินทางที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้ประชาชนในจังหวัดนนทบุรีส่วนใหญ่นิยมขับขี่รถยนต์ส่วนบุคคลในการเดินทาง ส่งผลให้เกิดปัญหาการจราจรที่ติดขัดไม่ต่างไปจากกรุงเทพมหานคร ดังนั้นหากไม่มีการปรับปรุงระบบขนส่งสาธาณะเพื่อจูงใจให้ประชาชนลดการใช้รถส่วนบุคคลได้จะเกิดผลเสียตามมาอย่างมากมาย เช่น สิ้นเปลืองพลังงาน การสร้างควันพิษที่ส่งผลเสียต่อสุขภาพ การสูญเสียเวลาเดินทางบนท้องถนนที่ย่อมส่งผลต่อเศรษฐกิจของประเทศ รวมถึงภาระหนี้สินจากค่าเชื้อเพลิง เป็นต้น

รถไฟฟ้าสายสีม่วงช่วงบางใหญ่ – บางซื่อ หรือรถไฟฟ้ามหานคร สายฉลองรัชธรรม มีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาโครงข่ายการเดินทาง รองรับการขยายตัวของเมือง บรรเทาการจราจรที่ติดขัดในจังหวัดนนทบุรี เพิ่มความรวดเร็ว ปลอดภัย และความสะดวกสบายในการเดินทาง การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย (2548) อย่างไรก็ตาม ตลอดช่วงเวลาที่เปิดให้ดำเนินการยังพบว่าการใช้บริการรถไฟฟ้ามหานคร สายฉลองรัชธรรม ยังมีปริมาณการใช้บริการที่ไม่สอดคล้องกับระดับที่คาดการณ์ไว้

ดังนั้น งานศึกษานี้จึงมีจุดมุ่งหมายที่จะศึกษาถึงปัจจัยและคุณลักษณะทางประชากรศาสตร์ของผู้ขับขี่รถยนต์ส่วนบุคคลที่ส่งผลต่อการไม่เลือกใช้บริการรถไฟฟ้าเพื่อที่จะสามารถนำเสนอนโยบายที่สามารถส่งเสริมให้ผู้ขับขี่รถยนต์ส่วนบุคคลเปลี่ยนพฤติกรรมการเดินทางมาเป็นรถไฟฟ้า แก้ไขปัญหาการจราจรติดขัดที่จะส่งผลเสียต่อภาพรวมของประเทศชาติได้อย่างยั่งยืน

อุปกรณ์และวิธีการ

ทฤษฎีอรรถประโยชน์

Ben-Akiva (2008) ทฤษฎีอรรถประโยชน์เป็นวิธีที่ใช้วัดความพึงพอใจของการเลือกรูปแบบทางเลือก (Alternative) ซึ่งจะประกอบด้วย ฟังก์ชั่นอรรถประโยชน์เชิงสุ่ม (Random Utility) และ ส่วนประกอบของตัวแปรอิสระ (Systematic Components) ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการอรรถประโยชน์ได้ดังสมการที่ (1)

$$U_{in} = V_{in} + \varepsilon_{in} \quad (1)$$

โดยที่ U_{in} คือ ฟังก์ชั่นความพอใจของผู้เดินทางคนที่ n ที่เลือกรูปแบบทางเลือก i

V_{in} คือ ส่วนประกอบของตัวแปรอิสระ (Systematic Components) ที่วัดได้ของผู้เดินทางคนที่ n ที่เลือกรูปแบบทางเลือก i

ε_{in} คือ ฟังก์ชั่นอรรถประโยชน์เชิงสุ่ม (Random Utility) ของผู้เดินทางคนที่ n ที่เลือกรูปแบบทางเลือก i

แบบจำลองการวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติกทวินาม (Binary Logistics Regression Model)

ยุทธ (2555) การวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติก มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาว่าตัวแปรอิสระหรือตัวแปรทำนายใดบ้างที่สามารถอธิบายตัวแปรเกณฑ์ซึ่งเป็นตัวแปรทวินามหรือตัวแปรพหุนาม โดยอาจจะมีประเด็นของการศึกษา ดังนี้ 1. ตัวแปรอิสระใดบ้างที่สามารถใช้อธิบายโอกาสการเกิดเหตุการณ์หรือไม่เกิดเหตุการณ์ที่สนใจตามตัวแปรตามหรือตัวแปรเกณฑ์ พร้อมทั้งศึกษาระดับความสัมพันธ์ของตัวแปรทำนายแต่ละตัว 2. เพื่อทำนายโอกาสที่จะเกิดเหตุการณ์ที่สนใจ จากสมการโลจิสติกส์ที่เหมาะสมเพื่อทำให้ร้อยละของความถูกต้องในการทำนายมีค่าสูงสุด

สำหรับการวิเคราะห์โลจิสติกส์ทวินาม ตัวแปรตามหรือตัวแปรเกณฑ์ (y) มี 2 ค่าคือ ไม่เกิดเหตุการณ์ (y = 0) หรือเกิดเหตุการณ์ (y = 1) มีความสัมพันธ์กับตัวแปรทำนาย (x) ไม่อยู่ในรูปเชิงเส้น ทั้งนี้เพราะตัวแปรตามมี 2 ค่า คือ 0 กับ 1 จึงเป็นไปไม่ได้ที่ความสัมพันธ์จะอยู่ ในรูปเส้นตรง ซึ่งฟังก์ชันโลจิสติกส์เขียนได้ดังสมการที่ (2)

$$P(y) = \frac{1}{1+ e^{-f(x)}} \quad (2)$$

โดยที่ $P(Y)$ คือ ความน่าจะเป็นของการเกิดเหตุการณ์ที่สนใจ (Y=1)

e คือ exponential function (e = 2.71828)

$f(x)$ คือ ฟังก์ชั่นของตัวแปรทำนาย

ฟังก์ชันนี้มีคุณสมบัติอยู่ว่าเมื่อใส่ค่า x เข้าไปแล้วจะผลิตค่า Y ออกมาอยู่ในกรอบระหว่าง ศูนย์กับหนึ่ง โดยที่ไม่รวมค่าศูนย์และไม่รวมค่าหนึ่ง คือ $Y = (0,1)$

งานวิจัยนี้สร้างแบบจำลองวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติกส์ทวินาม โดยกำหนดให้คุณลักษณะทางประชากรศาสตร์ของกลุ่มตัวอย่างเป็นฟังก์ชั่นของตัวแปรทำนาย (Table 1) และโอกาสที่กลุ่มตัวอย่างจะเลือกยอมรับปัจจัยต่างๆที่ส่งผลให้กลุ่มตัวอย่างไม่เลือกใช้บริการรถไฟฟ้าแทนการขับขี่รถยนต์ส่วนบุคคลเป็นตัวแปรตาม (Table 2)

Table 1 List of independent variables

No.	Demographic characteristics	Exploratory Variable	Short form
1	Female	x_1	FEMALE
2	Age over 40 year old	x_2	AGE41
3	High income	x_3	H_INCOME
4	Having a children in family	x_4	KID
5	Used to take the service of rail mass transit.	x_5	RIDE
6	Unsatisfied with time spending by driving	x_6	USTIME
7	Unsatisfied with cost spending by driving	x_7	USCOST

Table 2 List of dependent variable

No.	Factor that causes driver not to use rail mass transit	Dependent Variable
1	Rail mass transit fare is too expensive.	y_1
2	Spend a lot of time.	y_2
3	Station is too far from accommodation.	y_3
4	Destination is too far from station.	y_4
5	Having accompanying luggage.	y_5
6	The access trip from accommodation to station is inconvenience.	y_6
7	The egress trip from station to destination is inconvenience.	y_7
8	Park and Ride service is insufficient.	y_8
9	Park and Ride's fare is too expensive.	y_9
10	Lack of information about service route.	y_{10}
11	Walking distance of access or egress trip is too long.	y_{11}
12	There are some family members accompanying.	y_{12}
13	Seats for passengers are insufficient.	y_{13}

จากตัวแปรตามทั้ง 13 ตัว สามารถสร้างสรรมการอรรถประโยชน์ให้อยู่ในรูปสมการที่ (3)

$$U_{in} = \beta_0 + \beta_1(\text{เพศ}) + \beta_2(\text{อายุ}) + \beta_3(\text{รายได้}) + \beta_4\left(\text{บุตรที่อาศัยอยู่ด้วยกัน}\right) + \beta_5\left(\text{เคยขึ้นรถไฟฟ้า}\right) + \beta_6(\text{ความพอใจด้านเวลาปัจจุบันปัจจุบัน}) + \beta_7(\text{ความพอใจด้านค่าใช้จ่ายปัจจุบัน}) \quad (3)$$

การประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองโลจิต

คมสัน (2548) การประมาณค่าสัมประสิทธิ์สำหรับแบบจำลองโลจิตที่นิยมใช้มากที่สุดคือวิธีผลรวมของความน่าจะเป็นสูงสุด (Maximum Likelihood Method) โดยที่ค่าของความเป็นไปได้ (Likelihood Function) เขียนได้ตามสมการที่ (4)

$$L = P(y_1 = 1) \times P(y_2 = 1) \times P(y_3 = 1) \times \ldots \times P(y_n = 1) \quad (4)$$

โดยที่ $P(y_n = 1)$ คือความน่าจะเป็นที่จะเกิดเหตุการณ์ที่น่าสนใจ สำหรับตัวอย่างที่ n เมื่อต้องการหาค่าของความเป็นไปได้สูงสุดที่จะทำให้เกิดเกตุการที่สนใจ นั้นก็คือค่า L ที่มากที่สุด

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการนำข้อมูลจากแบบสอบถามที่รวบรวมได้จำนวน 548 ชุดมาวิเคราะห์แบบจำลองทั้ง 13 ปัจจัย พบค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรทำนายที่มีอิทธิพลต่อแบบจำลองอย่างมีนัยสำคัญ เครื่องหมายหน้าสัมประสิทธิ์

แสดงทิศทางความมีอิทธิพลได้อย่างสมเหตุสมผลในทางพฤติกรรม และมีความสัมพันธ์กันระหว่างปัจจัยต่างๆที่ทำให้ผู้ขับขี่ไม่เลือกใช้บริการรถไฟฟ้าแทนการขับขี่รถยนต์ส่วนบุคคลและคุณลักษณะทางประชากรศาสตร์ ดังที่แสดงใน Table 3 และเมื่อแทนค่าตัวแปรในสมการถดถอยโลจิสติกส์ทวินามเพื่อหาความน่าจะเป็นในการเกิดเหตุการณ์ที่สนใจเทียบกับข้อมูลจากแบบสอบถามดังแสดงในตาราง Table 4

Table 3 The significance of parameter

	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8	Y9	Y10	Y11	Y12	Y13
	Coeff.	Coeff.	Coeff.	Coeff.	Coeff.	Coeff.	Coeff.	Coeff.	Coeff.	Coeff.	Coeff.	Coeff.	Coeff.
Constant	0.459	-0.195	0.702	0.187	0.139	0.487	-0.257	0.461	-0.095	-0.512	-0.309	-0.347	-0.354
FEMALE	-0.357		0.497	0.615					-0.631	0.664			
AGE41							0.569						
H_INCOME	-0.743							-0.755					
KID		0.388				0.645	0.419				0.605	1.089	
RIDE			-1.150	-0.712		-0.629	-0.489	-0.383		-1.393		-0.482	
USTIME				0.846			0.456						
USCOST			0.457									0.785	
Chi squared	21.12	25.00	54.05	51.64	11.73	32.52	50.05	21.95	20.06	59.13	27.77	60.32	13.33
Significance level	0.003	0.001	0.000	0.000	0.110	0.000	0.000	0.003	0.005	0.000	0.000	0.000	0.064

Table 4 List of percent error

No.	Factor that causes driver not using rail mass transit	Accept(%)	P(Y)(%)	Error(%)
1	Rail mass transit fare is too expensive.	43.61	44.85	2.85
2	Spend a lot of time.	48.18	49.34	2.40
3	Station is too far from accommodation.	57.85	62.96	8.84
4	Destination is too far from station.	61.68	61.12	-0.91
5	Having accompanying luggage.	49.27	53.47	8.52
6	The access trip from accommodation to station is inconvenience.	62.96	60.66	-3.65
7	The egress trip from station to destination is inconvenience.	56.57	53.44	-5.53
8	Park and Ride service is insufficient.	59.85	44.24	-26.08

No.	Factor that causes driver not using rail mass transit	Accept(%)	P(Y)(%)	Error(%)
9	Park and Ride's fare is too expensive.	41.24	39.63	-3.90
10	Lack of information about service route.	25.18	28.73	14.08
11	Walking distance of access or egress trip is too long.	52.55	48.84	-7.05
12	There are some family members accompanying.	50.36	54.58	8.38
13	Seats for passengers are insufficient.	44.53	41.24	-7.38

ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรทำนายที่มีอิทธิพลกับปัจจัยต่างๆที่ทำให้ผู้ขับขี่ไม่เลือกใช้บริการรถไฟฟ้าแทนการขับขี่รถยนต์ส่วนบุคคลอย่างมีนัยสำคัญ สามารถนำมาประยุกต์เพื่อนำเสนอนโยบายส่งเสริมการเดินทางโดยรถไฟฟ้าได้ ได้แก่

ปัจจัยด้านค่าโดยสารรถไฟฟ้า มีความสัมพันธ์กับกลุ่มเพศหญิงและกลุ่มผู้มีรายได้สูงในทิศทางตรงกันข้าม จึงไม่จำเป็นต้องมีนโยบายการลดราคาค่าโดยสารของรถไฟฟ้าลง

ปัจจัยด้านระยะเวลาการเดินทาง มีความสัมพันธ์กับกลุ่มผู้ที่มีบุตรหลานพักอาศัยอยู่ด้วยกันในทิศทางเดียวกัน จึงควรมีการจัดให้มีรถวิ่งวนสำหรับรับส่งเด็กนักเรียนระหว่างสถานี และย่านที่อยู่อาศัย ซึ่งในรถบัสให้มีเจ้าหน้าที่ดูแลเด็กนักเรียน และให้คำแนะนำในการเดินทางภายในสถานีรถไฟฟ้า จะสามารถลดเวลาการเดินทาง เพิ่มความสะดวกสบายในการเดินทางเข้าและออกจากสถานีรถไฟฟ้าได้

ปัจจัยด้านระยะห่างระหว่างบ้านและสถานีรถไฟฟ้า มีความสัมพันธ์กับกลุ่มผู้ที่เคยขึ้นรถไฟฟ้าในทิศทางตรงกันข้าม และกลุ่มเพศหญิงและกลุ่มผู้ที่รู้สึกไม่พอใจต่อค่าใช้จ่ายในการเดินทางโดยรถยนต์ส่วนบุคคลในทิศทางเดียวกัน จึงควรมีการจัดให้มีรถวิ่งวนแบบไม่เสียค่าบริการในย่านชุมชนที่มีประชากรแน่นหนาเพื่อมาส่งยังสถานีที่ใกล้ที่สุดในช่วงเร่งด่วนเช้าและเย็น

ปัจจัยด้านระยะห่างระหว่างสถานีรถไฟฟ้าถึงเป้าหมายการเดินทาง มีความสัมพันธ์กับกลุ่มผู้ที่เคยขึ้นรถไฟฟ้าในทิศทางตรงกันข้าม และกลุ่มเพศหญิงและกลุ่มผู้ที่รู้สึกไม่พอใจต่อระยะเวลาการเดินทางโดยรถยนต์ส่วนบุคคลในทิศทางเดียวกัน จึงควรจัดให้มีรถวิ่งวนร่วมบริการจากผู้ประกอบการ โดยขอความร่วมมือจากห้างสรรพสินค้า แหล่งการค้า และบริษัทสถานที่ทำงาน ซึ่งเป็นเป้าหมายการเดินทางหลักของผู้เดินทาง ให้จัดรถวิ่งรับประชาชนที่เดินทางมาจากสถานีรถไฟฟ้านั้น จะช่วยลดเวลาการเดินทาง และเพิ่มความสะดวกสบายในการเดินทางสู่เป้าหมายการเดินทางได้มากขึ้น

ปัจจัยด้านสัมภาระ ไม่มีความสัมพันธ์กับการไม่เลือกใช้บริการกลุ่มผู้ขับขี่ฯ จึงไม่จำเป็นต้องมีนโยบายการเพิ่มตู้ฝากสัมภาระในบริเวณสถานีรถไฟฟ้า หรือเสริมชั้นวางของในขบวนรถไฟฟ้า

ปัจจัยด้านความสะดวกสบายในการเดินทางจากบ้านสู่สถานีรถไฟฟ้า มีความสัมพันธ์กับกลุ่มผู้ที่เคยขึ้นรถไฟฟ้าในทิศทางตรงกันข้าม และกลุ่มผู้ที่มีบุตรหลานพักอาศัยอยู่ด้วยกันในทิศทางเดียวกัน การจัดให้มีรถวิ่งวนสำหรับรับส่งเด็กนักเรียนระหว่างสถานี และย่านที่อยู่อาศัยจะสามารถเพิ่มความสะดวกสบายในการเดินทางเข้าและออกจากสถานีรถไฟฟ้าได้

ปัจจัยด้านความสะดวกสบายในการเดินทางจากสถานีรถไฟฟ้าสู่เป้าหมายการเดินทาง มีความสัมพันธ์กับกลุ่มผู้ที่เคยขึ้นรถไฟฟ้าในทิศทางตรงกันข้าม และกลุ่มผู้มีอายุ 41 ปีขึ้นไป กลุ่มผู้ที่มีบุตรหลานพักอาศัยอยู่ด้วยกัน และกลุ่มผู้ที่รู้สึกไม่พอใจต่อระยะเวลาการเดินทางโดยรถยนต์ส่วนบุคคลในทิศทางเดียวกัน การจัดให้มีรถวิ่งวนร่วมบริการจากผู้ประกอบการ โดยขอความร่วมมือผู้ประกอบการสำหรับสิ่งอำนวยความสะดวกสำหรับเด็กและผู้สูงอายุ จะเพิ่มความสะดวกสบายในการเดินทางสู่เป้าหมายการเดินทางได้มากยิ่งขึ้น

ปัจจัยด้านจำนวนและระยะให้บริการของอาคารจอดแล้วจร มีความสัมพันธ์กับกลุ่มผู้มีรายได้สูงและกลุ่มผู้ที่เคยขึ้นรถไฟฟ้าในทิศทางตรงกันข้าม จึงไม่จำเป็นต้องมีนโยบายการสร้างอาคารจอดแล้วจรเพิ่มเติม

ปัจจัยด้านค่าบริการอาคารจอดแล้วจร มีความสัมพันธ์กับกลุ่มเพศหญิงในทิศทางตรงกันข้าม จึงไม่จำเป็นต้องมีนโยบายในการลดราคาค่าบริการอาคารจอดแล้วจรเพิ่มเติม

ปัจจัยด้านข้อมูลข่าวสารและการประชาสัมพันธ์ มีความสัมพันธ์กับกลุ่มผู้ที่เคยขึ้นรถไฟฟ้าในทิศทางตรงกันข้าม และกลุ่มเพศหญิงในทิศทางเดียวกัน จึงควรจัดให้มีการประชาสัมพันธ์การให้บริการรถไฟฟ้า หรือตำแหน่งสถานีต่างๆ ผ่านสื่อหรือช่องทางที่สามารถเข้าถึงกลุ่มเพศหญิงได้ง่าย

ปัจจัยด้านระยะเวลาการเดินเท้าเมื่อใช้บริการรถไฟฟ้า มีความสัมพันธ์กับกลุ่มผู้ที่มีบุตรหลานพักอาศัยอยู่ด้วยกันในทิศทางเดียวกัน จึงควรมีการปรับปรุงทางเดินเท้าทั้งภายในสถานีและโดยรอบสถานี เช่น การติดตั้งระบบทางเดินเลื่อนไฟฟ้าในบริเวณทางเดินในสถานีรถไฟฟ้า ทางเท้าที่เป็นระเบียบรอบสถานี และการปลูกต้นไม้โดยรอบทางเดินรอบสถานี รวมถึงสิ่งอำนวยความสะดวกสำหรับเด็กนักเรียน

ปัจจัยด้านจำนวนสมาชิกที่เดินทางไปด้วยกัน มีความสัมพันธ์กับกลุ่มผู้ที่เคยขึ้นรถไฟฟ้าในทิศทางตรงกันข้าม และกลุ่มผู้ที่มีบุตรหลานพักอาศัยอยู่ด้วยกัน และกลุ่มผู้ที่รู้สึกไม่พอใจต่อค่าใช้จ่ายในการเดินทางโดยรถยนต์ส่วนบุคคลในทิศทางเดียวกัน จึงควรมีการปรับปรุงสิ่งอำนวยความสะดวกสำหรับเด็กภายในสถานีและบัตรโดยสารแบบกลุ่ม ที่มีสิทธิพิเศษในการลดราคาค่าโดยสารหากผู้โดยสารเดินทางเป็นกลุ่มที่มีการขึ้นและลงสถานีรถไฟฟ้าเดียวกันในทุกเวลา

ปัจจัยด้านที่นั้งผู้โดยสาร ไม่มีความสัมพันธ์กับการไม่เลือกใช้บริการกลุ่มผู้ขับขี่ จึงไม่จำเป็นต้องมีนโยบายการเพิ่มขบวนผู้โดยสาร หรือเพิ่มจำนวนที่นั้งผู้โดยสาร

สรุป

คุณลักษณะทางประชากรศาสตร์ของผู้ขับขี่รถยนต์ส่วนบุคคลมีอิทธิพลต่อปัจจัยที่ทำให้ผู้ขับขี่ฯไม่เลือกใช้บริการรถไฟฟ้า ดังนั้นจึงสามารถนำผลการวิจัยที่ได้มาใช้ในการเสนอแนะนโยบายที่เหมาะสมกับคุณลักษณะทางประชากรศาสตร์ ที่จะช่วยส่งเสริมให้ผู้ขับขี่ฯปรับเปลี่ยนพฤติกรรมการเดินทางมาใช้บริการรถไฟฟ้ามากขึ้น ได้แก่ รถวิ่งวนแบบไม่เสียค่าบริการ รถวิ่งวนร่วมบริการจากผู้ประกอบการ รถวิ่งวนสำหรับเด็กนักเรียน การประชาสัมพันธ์การให้บริการรถไฟฟ้า การปรับปรุงทางเดินเท้าทั้งภายในสถานีและโดยรอบสถานี สิ่งอำนวยความสะดวกสำหรับเด็กภายในสถานี และบัตรโดยสารแบบกลุ่ม

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ โครงการพิเศษ PE ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่สำหรับทำงานวิจัย และผู้มีส่วนร่วมในการลงพื้นที่เก็บรวบรวมแบบสอบถาม รวมถึงผู้ตอบแบบสอบถามทุกท่านที่ให้ความร่วมมือ จนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย [รฟม.]. 2549 **Feasibility Study Report for MRTA Purple Line Project**

คมสัน สุริยะ. 2552. **แบบจำลองโลจิต: ทฤษฎีและการประยุกต์ใช้ในการวิจัยทางเศรษฐศาสตร์**. เชียงใหม่: ศูนย์การวิเคราะห์เชิงปริมาณ คณะเศรษฐศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

ยุทธ ไกยวรรณ์. 2555. **หลักการและการใช้การวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติคสำหรับการวิจัย**. วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย 4(1) : 1-12

Moshe Ben-Akiva. 2008. **Discrete Choice Analysis 1.** Transportation Systems Analysis: Demand & Economics

อิทธิพลจากความชื้นในการบ่มต่อการพัฒนากำลังรับแรงอัดของดินซีเมนต์

Effects of Curing Conditions on Strength Development of Soil Cement

ชยพล กิตติวิวัฒนพงศ์[1] วสุ พิพัฒน์เจษฎากุล[1] และ **ศุภกิจ นนทนานันท์**[1*]

Chayapon Kittiwiwattanapong[1], Wasu Phiphatjetsadakul[1] and Supakij Nontananandh[1*]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการพัฒนากำลังของดินเหนียวผสมปูนซีเมนต์ที่สภาวะความชื้นในการบ่มต่างกัน โดยทำการทดลองผสมตัวอย่างดินกับปูนซีเมนต์ที่สัดส่วนผสมของซีเมนต์ 250 kg/m^3 และบ่มตัวอย่างแบบไม่แช่ในภาชนะปิด 3 ชุดที่บรรจุของเหลวต่างกันไว้ที่ด้านล่างภาชนะประกอบด้วย น้ำ, สารละลายโซเดียมคลอไรด์ และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อบ่มตัวอย่างดินซีเมนต์ในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์แตกต่างกัน เมื่อครบกำหนดการบ่ม 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว และนำชิ้นส่วนบริเวณระนาบการพังทลายไปทดสอบเพื่อวิเคราะห์หาสารผลิตภัณฑ์หลัก (Reaction products) ด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD)

ผลจากการทดลองพบว่าความชื้นสัมพัทธ์ในการบ่มมีผลต่อการพัฒนากำลังของตัวอย่างดินซีเมนต์ ซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณ Calcium Silicate Hydrate (CSH) ที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่น

ABSTRACT

This research aims to study the strength of soil cement with different curing condition. Soil specimens are prepared by mixing soil with Ordinary Portland Cement (OPC) at a mixing ratio of 250 kg/m^3. The soil cement mixtures are then cured by unsoaked condition in seal containers which contain 3 different solutions at their bottom namely Water, NaCl and NaOH solutions, in order to provide different relative humidity. After curing the samples for 1, 3, 7, 14 and 28 days, the unconfined compression strength tests are performed. Small pieces of cement-treated soil samples along the failure planes are collected and placed in the X-Ray Diffractometer (XRD) in order to investigate the major reaction products.

The results showed that relative humidity affects the development of compressive strength of the cement-mixed soil in relations to the formation of Calcium Silicate Hydrate (CSH) due to hydration.

Key words: Chemical Stabilization, Soil Cement, Relative Humidity, Unconfined Compressive Strength, X-Ray Diffractometer Calcium Silicate Hydrate

*Corresponding author; e-mail address: nonta_2007@hotmail.com

[1]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

คำนำ

ในปัจจุบันพบว่าพื้นที่ก่อสร้างและโครงการก่อสร้างถนนส่วนใหญ่มักจะวางตัวอยู่ในชั้นดินอ่อนอย่างไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ เนื่องจากการขาดแคลนพื้นที่ที่เหมาะสมและการขยายตัวทางเศรษฐกิจของชุมชนเมือง จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าดินอ่อนมีคุณสมบัติที่ไม่เหมาะสมกับงานวิศวกรรม ทั้งนี้เนื่องจากมีกำลังรับแรงต่ำ มีการทรุดตัวสูง ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้โครงสร้างทางวิศวกรรมเกิดความเสียหาย (สุวัฒน์, 2538)

แนวทางการแก้ไขปัญหาของดินอ่อนอย่างมีประสิทธิภาพสามารถทำได้หลายวิธี อาทิเช่น การทำให้ดินแน่นขึ้น (Densification) การเสริมแรงให้กับดิน (Reinforcement) การระบายน้ำออกจากมวลดิน (Drainage) และการใช้สารเชื่อมประสาน (Cementation) (ณพล, 2556) สำหรับการปรับปรุงคุณภาพฐานรากในชั้นดินอ่อนโดยการใช้สารเชื่อมสารประสานเช่นปูนซีเมนต์เป็นวิธีที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายเพราะสามารถกำหนดคุณสมบัติที่ต้องการได้และสามารถควบคุมเวลาในการก่อสร้างได้ จึงสามารถประยุกต์ใช้ได้กับงานวิศวกรรมหลากหลาย เช่น การก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ (Soil Cement Column) เพื่อรองรับถนนบนดินอ่อน (DOH and JICA, 1998)

ในปัจจุบันมีงานวิจัยที่ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธีทางเคมีเช่นดินซีเมนต์เป็นจำนวนมาก ปัจจัยที่มีผลต่อระดับของการพัฒนากำลังของดินซีเมนต์ ได้แก่ ชนิดของดิน ปริมาณ และชนิดของสารเชื่อมประสาร ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา และการบ่มตัวอย่างดิน (Croft, 1967; Nontananandh et al, 2004) อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่คำนึงถึงสภาพแวดล้อมของการบ่มยังมีไม่มากนัก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเน้นการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับความชื้นสัมพัทธ์ในการบ่มตัวอย่างดินที่มีต่อการพัฒนากำลัง ที่จำลองความเป็นไปได้ของดินซีเมนต์ที่สัดส่วนผสมหนึ่งๆถูกบ่มใต้สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ที่แตกต่างกัน

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมตัวอย่าง สภาพการบ่มและวิธีการทดสอบ

ดินที่ใช้ในการวิจัยในครั้งนี้เป็นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ เก็บตัวอย่างที่ความลึกประมาณ 1.0 – 3.5 เมตร ตัวอย่างเป็นดินจำพวก CH ในระบบ USCS โดยดินมีปริมาณความชื้นตามธรรมชาติเท่ากับ 47.88% ความหนาแน่นเปียกเท่ากับ 1.64 t/m^3 ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.62 มีค่า Liquid Limit, Plastic Limit และ Plasticity Index เท่ากับ 59.60 %, 26.97 % และ 32.63 % ตามลำดับ (อดุลพัฒน์ และคณะ, 2559)

นำดินผสมกับปูนซีเมนต์ด้วยเครื่องผสมปูนซีเมนต์โดยใช้อัตราส่วนที่ให้กำลังรับแรงอัดสูงสุดคือ 250 kg/m^3 จากงานวิจัยของอดุลพัฒน์ และคณะ (2559) โดยใช้เวลาประมาณ 5 นาที เมื่อส่วนผสมเข้ากันดีแล้วจึงนำไปบรรจุในแบบหล่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 ซม. สูง 10 ซม. บดอัดตัวอย่างดินโดยการนวด (kneading) ส่วนผสมโดยใช้เหล็กกระทุ้ง (tamper) เป็นชั้นๆจนเต็มแบบหล่อ ควบคุมความหนาแน่นเริ่มต้นให้มีความสม่ำเสมอโดยนำไปชั่งน้ำหนัก หุ้มผิวด้านบนด้วยพลาสติกใสและยางรัดเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นที่ผิวหน้าและบ่มทิ้งไว้ในแบบหล่อ 24 ชั่วโมงเพื่อให้ตัวอย่างแข็งตัว หลังจากครบกำหนดเวลาจึงทำการถอดแบบหล่อ และนำตัวอย่างไปบ่มโดยบรรจุในกล่องพลาสติกที่มีฝาปิดแน่น โดยวางตัวอย่างเหนือระดับของสารละลายที่อิ่มตัว 3 ประเภท คือ NaCl, NaOH และน้ำ (H_2O) สภาวะการบ่มต่างๆเกิดจากไอของสารละลายที่อิ่มตัวดังกล่าวที่ให้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ต่างกันตามที่รวบรวมโดย Lu and Likos (2004) ดังแสดงใน Table 1

Figure 1 Relative humidity of solution at various temperatures (Lu and Likos, 2004)

Temperature (°C)	10°	25°	50°	Remarks
NaOH	5.5	7	-	Condition A
NaCl	76.5	75.5	74.5	Condition B
H_2O	100	100	100	Condition C

เมื่ออายุการบ่มครบกำหนดการบ่ม 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียวตามมาตรฐาน ASTM D2166 และนำชิ้นส่วนบริเวณระนาบการพังทลายไปทดสอบเพื่อวิเคราะห์หาสารผลิตภัณฑ์ (Reaction products) ด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD) รุ่น Philips X'Pert ใช้พลังงาน 40 KV 30 mA และอัตราของการส่องกราดอยู่ในช่วง 2 องศาต่อนาที

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการทดสอบตัวอย่างดินซีเมนต์ด้วยวิธี Unconfined Compressive Strength

จากการทดสอบหากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างดินซีเมนต์มีอัตราส่วนปูนซีเมนต์ 250 kg/m^3 มีอายุการบ่มตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ 1, 3, 7, 14 และ 28 วันโดยจำลองสภาวะการบ่มที่ช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 3 ช่วงคือ 5.5-7.0 % (Condition A), 74.5-76.5 % (Condition B) และ 100.0 % (Condition C) พบว่าตัวอย่างดินซีเมนต์มีการพัฒนากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม โดยตัวอย่างดินซีเมนต์ที่บ่มใน Condition A มีกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยสูงสุด ที่อายุการบ่ม 3, 7, และ 14 วัน อย่างไรก็ตาม หลังอายุการบ่ม 28 วัน กำลังรับแรงอัดของที่บ่มใน Condition B มีค่าใกล้เคียงกับตัวอย่างที่บ่มใน Condition A ดังแสดงใน Figure 1 ทั้งนี้ชุดตัวอย่าง Condition A และ Condition B มีค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่าชุดตัวอย่าง Condition C อย่างชัดเจนตลอดอายุการบ่ม (Figure 2)

อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นและการพัฒนากำลัง

Figure 3 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นพบว่าตัวอย่างดินซีเมนต์ทั้ง 3 ชุดมีอัตราการลดลงของปริมาณความชื้นอย่างชัดเจนในช่วงต้นของอายุการบ่ม หลังจากนั้นอัตราการลดลงของปริมาณความชื้นมีแนวโน้มลดลง อย่างไรก็ตามอัตราการลดลงของปริมาณความชื้นจะเป็นปฏิภาคผกผันกับความชื้นสัมพัทธ์ที่บ่มตัวอย่างดินกล่าวคือในชุดตัวอย่าง Condition A จะมีการสูญเสียความชื้นมากที่สุด รองลงมาคือชุดตัวอย่าง Condition B และ Condition C ที่มีอัตราการลดลงของปริมาณความชื้นน้อยที่สุด

การสูญเสียปริมาณความชื้นที่มากที่สุดเกิดใน Condition A ทั้งนี้เนื่องจากตัวอย่างดินซีเมนต์ใช้ความชื้นในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและบางส่วนเกิดจากการสูญเสียความชื้นจากการแพร่ออกสู่สภาพแวดล้อมภายนอกที่มีความชื้นสัมพัทธ์ที่ค่อนข้างต่ำ ถึงแม้ว่าตัวอย่างดินซีเมนต์จะมีการพัฒนากำลังได้ดีในช่วงต้น แต่กำลังในระยะยาวมีแนวโน้มลดลง (ดู Figure 4) นอกจากนี้ยังสังเกตจากพบว่าตัวอย่างที่อายุการบ่ม 28 วันมีลักษณะแห้งค่อนข้างเปราะ และมีการสลายตัว (slaking) ได้ง่ายเมื่อแช่น้ำ (soaked condition)

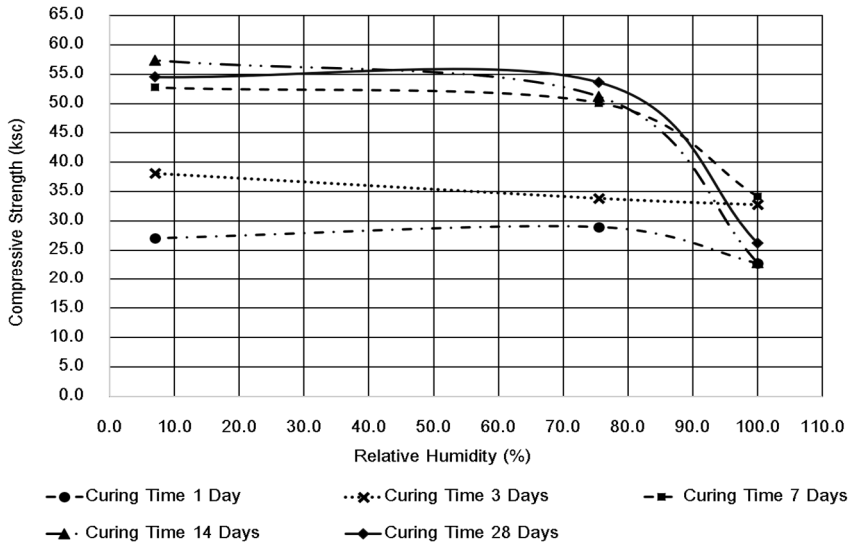


Figure 1 Effect of relative humidity on the strength of cement-stabilized soil

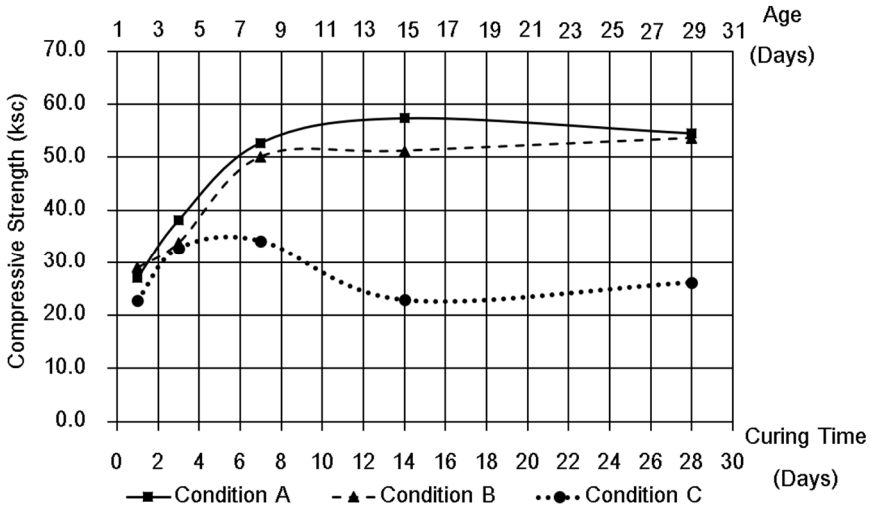


Figure 2 Strength-curing time of cement-stabilized soil

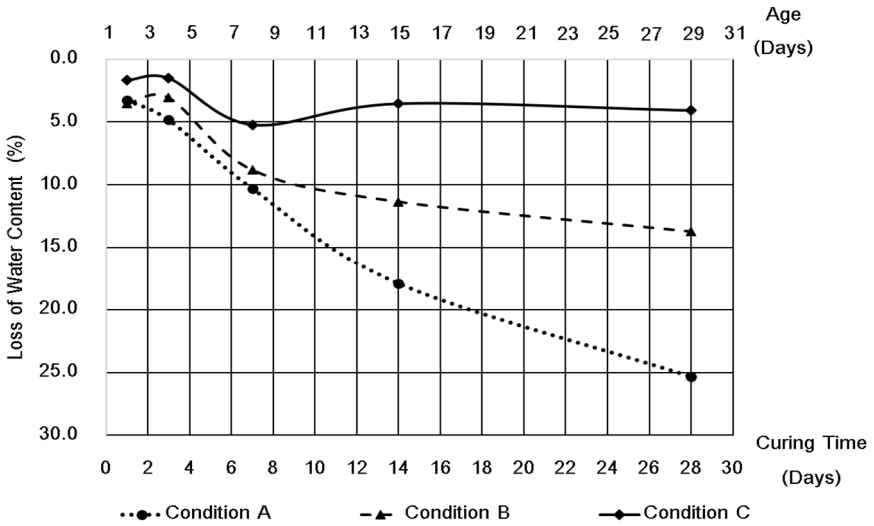


Figure 3 Loss of water content with curing time

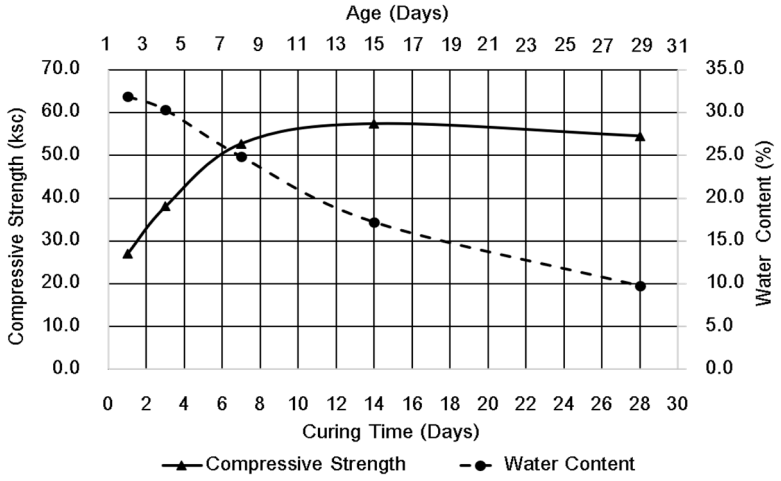


Figure 4 Compressive strength and changes in moisture content with curing time

(Condition A)

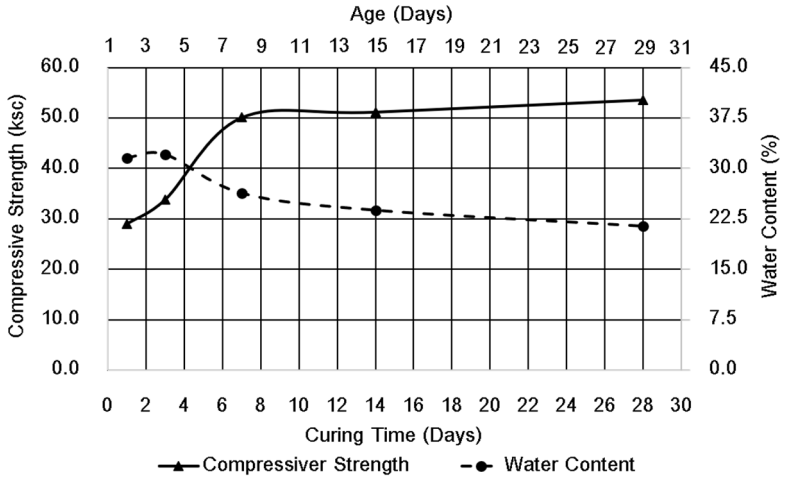


Figure 5 Compressive strength and changes in moisture content with curing time

(Condition B)

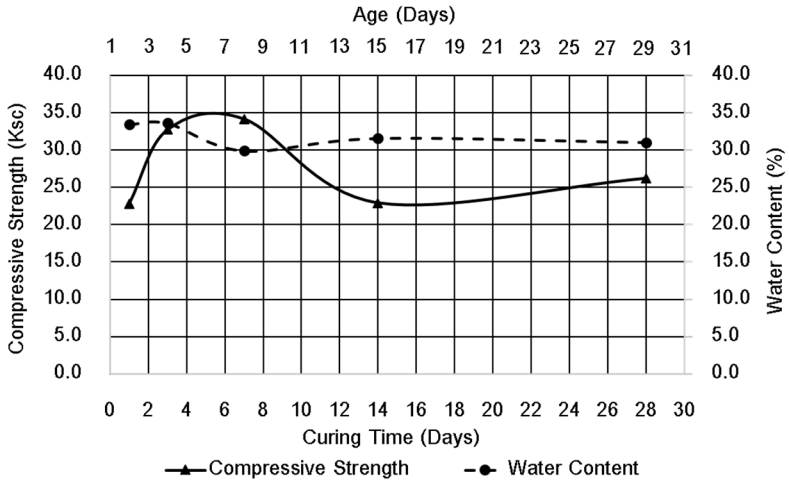


Figure 6 Compressive strength and changes in moisture content with curing time

(Condition C)

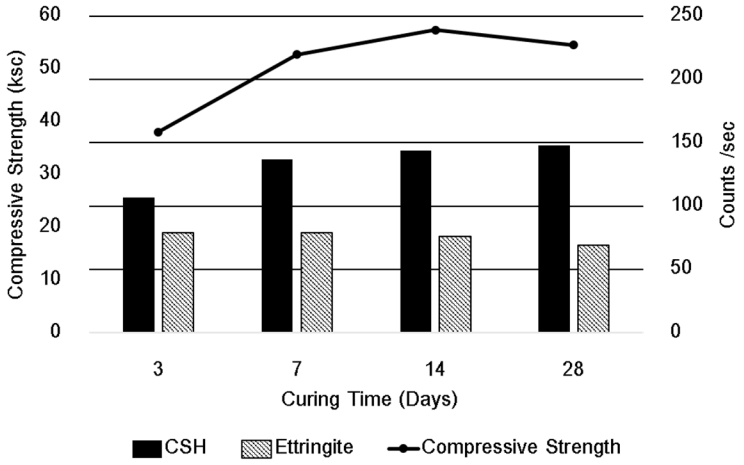


Figure 7 Compressive strength and reaction products with curing time

(Condition A)

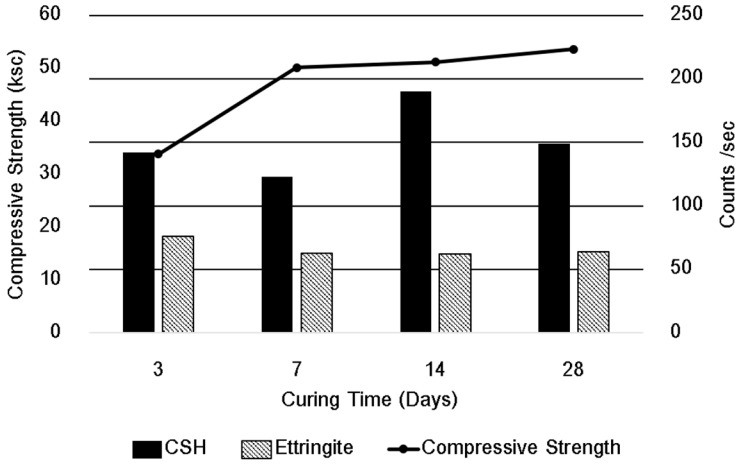


Figure 8 Compressive strength and reaction products with curing time

(Condition B)

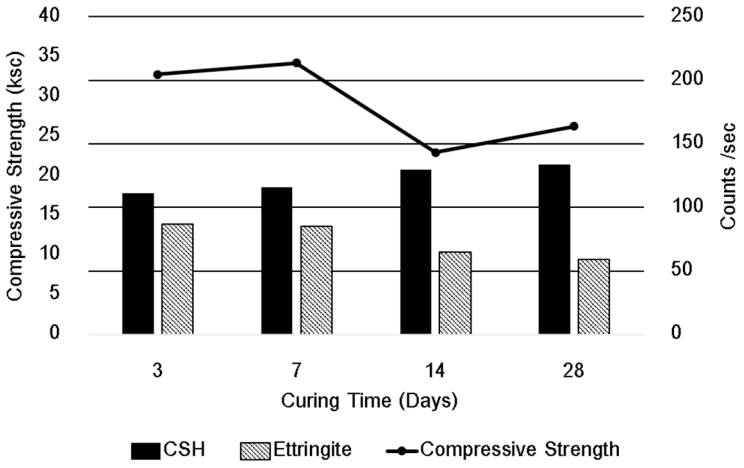


Figure 9 Compressive strength and reaction products with curing time

(Condition C)

Figure 5 แสดงความสัมพันธ์ของการพัฒนากำลังกับปริมาณความชื้นของตัวอย่างที่บ่มใน Condition Bพบว่าปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ในระดับนี้ มีผลดีต่อการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นตั้งแต่ช่วงเริ่มต้น สังเกตจากความชันของกราฟกำลังของดินที่ชันในช่วงอายุการบ่ม 1-7 วันที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน และความชันยังค่อยๆเพิ่มขึ้นในระยะยาวโดยที่ตัวอย่างดินซีเมนต์ยังมีสภาพที่สมบูรณ์ สำหรับตัวอย่างที่บ่มในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 100 % (Condition C) พบว่าในช่วง 1-7 วันแรกตัวอย่างจะมีปริมาณความชื้นลดลงเนื่องจากดินซีเมนต์ใช้ความชื้นในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นช่วงต้นค่อนข้างมากเช่นกัน แต่หลังจาก 7 วัน ปริมาณความชื้นในตัวอย่างดินกลับเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณความชื้นในสภาพแวดล้อมภายนอกมีมากกว่าจึงแพร่เข้าสู่ตัวอย่างดินซีเมนต์ ทำให้เกิดการบวมตัว และระนาบผิวลื่น (slip surface) เป็นผลทำให้การพัฒนากำลังในตัวอย่างดินซีเมนต์มีแนวโน้มคงที่หรือลดลงในระยะยาวดังแสดงใน Figure 6

ผลการศึกษาการเกิดสารผลิตภัณฑ์หลักและการพัฒนากำลัง

เมื่อนำชิ้นตัวอย่างเดียวกันกับที่ทดสอบกำลังรับแรงอัดมาทดสอบการส่องกราดด้วยเครื่อง X - Ray Diffractometer (XRD) เพื่อวิเคราะห์การเกิดสารผลิตภัณฑ์หลัก (major reaction products) ที่สัมพันธ์กับการพัฒนากำลังที่บ่มในสภาพความชื้นแตกต่างกันพบว่า Calcium Silicate Hydrate (CSH) เป็นสารผลิตภัณฑ์หลักที่ส่งผลต่อการพัฒนากำลังกล่าวคือเมื่อ CSH มีปริมาณเพิ่มขึ้นก็จะส่งผลให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น สำหรับงานวิจัยนี้ไม่พบความสัมพันธ์ระหว่างการพัฒนากำลังกับการเกิดสารผลิตภัณฑ์ Ettringite ที่จะช่วยสนับสนุนการพัฒนากำลังในดินซีเมนต์ที่เป็นดินเหนียวอ่อนและมีปริมาณความชื้นสูงมาก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้โดย Kamon and Nontananandh (1990)

งานวิจัยนี้พิจารณาสารผลิตภัณฑ์ CSH และ Ettringite ที่มุมของการส่องกราด 2θ เท่ากับ 50° และ 35° ตามลำดับซึ่งเป็นบริเวณไม่ซ้อนทับกับสารประกอบอื่น เมื่อพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและการเกิด CSH และ Ettringite ตามอายุการบ่มและเงื่อนไขในการบ่มที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูป Figure 7, Figure 8 และ Figure 9 พบว่า CSH จะเกิดขึ้นมากในช่วงแรกของการทำปฏิกิริยา และเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น การเกิด CSH จะแตกต่างกันขึ้นกับสภาวะการบ่มกล่าวคือในกรณีบ่มโดย Condition A ที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำมาก อัตราการเกิด CSH มีแนวโน้มลดลง (ดู Figure 7) เช่นเดียวกับกรณีการบ่มที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูงมาก (Condition C) ปริมาณ CSH มีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน (ดูFigure 9) ในขณะที่การบ่มที่ความชื้นสัมพัทธ์อยู่ในช่วงประมาณ 75% ปริมาณ CSH ยังคงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ดังแสดงใน Figure 8 ซึ่งสอดคล้องกับการพัฒนากำลังในระยะยาว

สรุป

จากการศึกษาการพัฒนากำลังของดินซีเมนต์ในสภาวะการบ่มที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆพบว่าความชื้นสัมพัทธ์ในการบ่มมีผลต่อการพัฒนากำลังของตัวอย่างดินซีเมนต์ ซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณ Calcium Silicate Hydrate (CSH) ที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ดังนั้นในการทำงานจริงในสนามจึงควรพิจารณาบ่มตัวอย่างให้สัมพันธ์กับบริเวณที่ใช้งานจริง ในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ต่ำประมาณ 5 - 7 % ดินซีเมนต์จะมีการพัฒนากำลังได้ดีในช่วงต้น แต่ในระยะยาวตัวอย่างมีแนวโน้มเปราะและมีกำลังลดลงเนื่องจากการสูญเสีย

ความชื้น ดังนั้นงานก่อสร้างในระดับตื้นใกล้ผิวดินหรือช่วงสภาพภูมิอากาศร้อนจึงควรระวังให้บ่มอย่างสม่ำเสมอ ในขณะที่การบ่มในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์สูงมากๆ เช่นงานปรับปรุงฐานรากที่อยู่ต่ำกว่าน้ำใต้ดิน การพัฒนากำลังในระยะยาวอาจจะไม่เป็นไปตามที่ต้องการ จึงควรเพิ่มสัดส่วนผสมของปูนซีเมนต์เพื่อชดเชยในส่วนนี้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD) สำหรับงานวิจัยนี้ และขอขอบคุณกริช พิทักษ์เมืองแมน นักวิจัยประจำภาควิศวกรรมวัสดุ ที่ให้ความช่วยเหลือในการเตรียมตัวอย่างและการส่องกราดตัวอย่างดินซีเมนต์

เอกสารอ้างอิง

ณพล อยู่บรรพต. 2556. **แนวทางการเลือกสารเสถียรภาพสำหรับการปรับปรุงคุณภาพด้วยวิธีทางเคมี**. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 23(3): 773-782.

สุวัฒน์ ติยะไพรัช, นิรันดร์ ชัยมณี, และ พิสิทธิ์ ธีรดิลก. 2538. **ดินเหนียวกรุงเทพ : สภาพธรณีวิทยาและการประยุกต์ใช้ในกรมทรัพยากรธรณี**. ความก้าวหน้าและวิสัยทัศน์ของการพัฒนาทรัพยากรธรณี: การประชุมวิชาการ กทธ กรุงเทพฯ, 93-99.

อดุลพัฒน์ บุนนาค, วุฒิกร ปิยะภิญโญวุฒิ, และสิทธิณัฐ ศรีน้อย. 2559. **การพัฒนากำลังของดินเหนียวกรุงเทพผสมปูนซีเมนต์**. ปริญญานิพนธ์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Croft, J.B. 1967. **The Influence of soil mineralogical composition on cement stabilization**. Geotechnique17: 119-135.

Department of Highway of Thailand (DOH) and Japan International Cooperation Agency (JICA), 1998. **Manual for Design and Construction of Cement Column Method**. 75 p.

Lu, N. and W.J. Likos. 2004. **Unsaturated Soil Mechanics**. John Wiley and Sons Publication, 584 p.

Nontananandh, S., S. Boonyong, T. Yoobanpot, and K. Chantawarangul, 2004. **Strength development of soft marine clay stabilized with cement and fly ash**. Kasetsart Journal 38(4): 539-552.

Kamon, M. and S. Nontananandh. 1990. **Contribution of stainless-steel slag to the development of strength for seabed hedoro.** Soil and Foundations, 30(4): 63-72.

การศึกษาทดลองเปรียบเทียบของอุปกรณ์วัดอุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกส์

A Study of Compare of Thermocouple in Ceramic Kiln

สิทธิโชค สืบแต่ตระกูล[1*] และ ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์[1]

Sittichoke Subteatakul[1*] and Taweedej Sirithanapipat[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาการเปรียบเทียบปรับแต่งสัญญาณอุปกรณ์วัดอุณหภูมิเพื่อนำไปใช้ในการออกแบบอุปกรณ์วัดอุณหภูมิเตาเผาเซรามิกส์ได้อย่างถูกต้องและแม่นยำเพื่อเป็นประโยชน์แก่ผู้ประกอบการเซรามิกส์ โดยศึกษาค่าอุณหภูมิที่อ่านได้จาก Universal Thermocouple Amplifier MAX31856 และ Universal Temperature Controller TAIE และ Honeywell โดยค่าอุณหภูมิที่วัดได้จะนำมาเทียบความถูกต้องกับไพโรเมตริกโคน ผลจากการวิจัยพบว่า อุณหภูมิที่อ่านได้จาก Universal Thermocouple Amplifier MAX31856 มีค่า 1215 องศาเซลเซียส มีค่าใกล้เคียงกับค่าอุณหภูมิของการโน้มลงของไพโรเมตริกโคนคือค่าที่อุณหภูมิ 1215 องศาเซลเซียสส่วนค่าอื่นๆที่วัดได้จาก Universal Temperature Controller TAIE และ Honeywell มีค่า 1195 องศาเซลเซียสและ 1207 องศาเซลเซียสตามลำดับ จะไม่ตงรงกับค่าอุณหภูมิของการโน้มลงของไพโรเมตริกโคน

จึงสรุปได้ว่าการปรับแต่งสัญญาณที่มาจาก Universal Thermocouple Amplifier มีความถูกต้องและแม่นยำสามารถควบคุมการเผาในเตาเผาเซรามิกส์ได้ ส่งผลให้ชิ้นงานที่ได้นั้นมีคุณภาพที่ดีกว่าการเผาเตาเซรามิกส์ไม่ทราบค่าอุณหภูมินอกไปกว่านั้นแล้วผู้วิจัยได้พัฒนาระบบตรวจวัดและแสดงผลอุณหภูมิประยุกต์กับ Internet of Thing โดยนำค่าอุณหภูมิที่วัดได้ในเตาเผาเซรามิกส์แสดงผลผ่าน Thingspeak.com เพื่อเพิ่มความสะดวกสบายให้แก่ผู้ประกอบการเซรามิกส์

ABSTRACT

The purpose of this study was to compare the calibration of the thermocouple signal for use in the design of ceramic furnace thermocouple accurately for the benefit of ceramics entrepreneurs. The temperature readable from the Universal Thermocouple Amplifier MAX31856 is 1215 ° C, close to the pentadenite temperature of 1215 ° C. Other values measured by the Universal Temperature Controller TAIE and Honeywell is 1195 degrees Celsius and 1207 degrees Celsius, respectively. It does not interfere with the temperature gradient of the pentadenic cone. It is concluded that the tuning of the signal from the Universal Thermocouple Amplifier is accurate and accurate.

Key words: Thermocouple, Signal Condition, Ceramic Kiln

*Corresponding author; e-mail address: Taweedej.s@ku.th

[1]ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

คำนำ

การตรวจวัดอุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกส์ถือเป็นสิ่งสำคัญที่ทำให้กระบวนการการเผาเซรามิกส์มีคุณภาพที่ดี แบบเดิมของผู้ประกอบการเซรามิกส์จะเป็นการใช้อุปกรณ์ในการวัดอุณหภูมิที่ไม่เหมาะกับช่วงอุณหภูมิในการเผาเซรามิกส์ทำให้ค่าอุณหภูมิที่แสดงออกมานั้นผิดเพี้ยนไม่ตรงกับความเป็นจริงเพราะอุปกรณ์วัดอุณหภูมิอาจไม่เหมาะกับช่วงอุณหภูมิที่ทำงาน หรือผู้ประกอบการเซรามิกส์ไม่ทำการวัดอุณหภูมิในระหว่างการเผาเซรามิกส์ ใช้แบบตั้งเวลาเผาเมื่อถึงเวลาที่ตั้งไว้จึงทำการปิดเตาโดยไม่สนใจอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในเตาเผา จึงทำให้ผู้ประกอบการส่วนมากประสบกับปัญหาคือไม่รู้ค่าอุณหภูมิในระหว่างการเผาเซรามิกส์ได้ สิ่งหนึ่งที่เป็นผลดีของการทราบค่าอุณหภูมิในระหว่างการเผาเซรามิกส์ที่ถูกต้องนั้น ผู้ประกอบการสามารถเพิ่มหรือลดอัตราการใช้เชื้อเพลิงได้เมื่อทราบว่าอุณหภูมิที่เผาเซรามิกส์มากไปหรือน้อยไป ส่งผลให้เกิดการประหยัดเชื้อเพลิงตลอดจนถึงค่าใช้จ่ายต่างๆในการเผาเซรามิกส์ และสามารถควบคุมอุณหภูมิภายในเตาเผาได้ อาจจะส่งผลให้ชิ้นงานที่ได้นั้นมีคุณภาพที่ดีกว่าการเผาที่ไม่ได้ควบคุมอุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกส์

อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาเซรามิกส์นั้นอยู่ในช่วงตั้งแต่เริ่มเผาที่อุณหภูมิห้องจนไปถึง 1200 องศาเซลเซียส เครื่องมือที่นิยมใช้วัดอุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกส์ส่วนมากจะเป็น thermocouple สามารถวัดอุณหภูมิได้สูงถึง 1600 องศาเซลเซียส หลักการทำงานเบื้องต้นของอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ thermocouple (สมนึก บุญพาไสว, 2550) นั้นพบว่าเมื่อนำลวดโลหะ 2 เส้นที่ทำด้วยโลหะต่างชนิดกันมาเชื่อมต่อปลายทั้งสองเข้าด้วยกัน ถ้าปลายจุดหนึ่งต่อทั้งสองมีอุณหภูมิต่างกัน จะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรเส้นลวดทั้งสองนี้ ปริมาณการไหลของกระแสไฟฟ้านี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามผลต่างอุณหภูมิที่ปลายจุดทั้งสอง และถ้าเปิดปลายจุดต่อด้านหนึ่งออก จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นที่ปลายเปิด แรงเคลื่อนไฟฟ้าชนิดนี้เรียกว่า “ซีเบ็คโวลเตจ” แรงดันเคลื่อนไฟฟ้านี้จะถูกส่งผ่าน signal condition ทำหน้าที่ส่งสัญญาณแรงดันให้มีความเหมาะสมโดยนำมาผ่านบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อที่จะประมวลผลแสดงผลลัพธ์ออกมาในรูปของอุณหภูมิ

ในงานวิจัยนี้นี้จึงได้นำเสนอระบบการวัดอุณหภูมิโดยใช้อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ Thermocouple Type S ซึ่งมีย่านการวัดถึง 1600 องศาเซลเซียลและเลือกใช้สัญญาณปรับแต่ง (signal condition) ที่เหมาะสมเพื่อไปปรับปรุงพัฒนาระบบการวัดอุณหภูมิเตาเผาเซรามิกส์แบบเดิมของผู้ประกอบการ เพื่อให้เป็นค่ามาตราฐานที่ถูกต้องของกระบวนการเผาเซรามิกส์โดยทดสอบเทียบกับไพโรเมตริกโคน ซึ่งเป็นเครื่องมือวัดอุณหภูมิ (temperature measurement) แบบไม่สัมผัสนิยมใช้งานในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้งานในย่านอุณหภูมิที่สูงกว่าย่านการวัด (range) ของเทอร์โมคัปเปิล (thermocouple) โดยสามารถวัดทดสอบเทียบกับเทอร์โมคัปเปิล การใช้งานในสภาวะที่อาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อเครื่องมือวัด (instrument) ได้ เช่น สภาวะแวดล้อมที่มีการกัดกร่อน เป็นต้น นอกจากนี้ยังนิยมใช้วัดอุณหภูมิของวัตถุที่มีการเคลื่อนที่ เช่น การวัดอุณหภูมิของวัตถุที่วางอยู่บนสายพานลำเลียง (conveyor) ในกระบวนการผลิต เป็นต้น โดยทั่วไปนิยมใช้สำหรับการวัดอุณหภูมิเพื่อการจดบันทึกข้อมูล (monitoring processes and operations) มากกว่าการวัดเพื่อควบคุมกระบวนการ (control processes and operations)

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

ออกแบบสร้างระบบการวัดและแสดงผลอุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกส์

ระบบการวัดและแสดงผลอุณหภูมิสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วน 1.อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ Thermocouple 2. signal condition 3.ระบบแสดงผล อุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่ใช้ในเตาเผาเซรามิกส์ในที่นี้ผู้วิจัยเลือกใช้ Thermocouple Type S ในส่วนที่สองคือ signal condition ผู้วิจัยเลือกใช้ Universal Thermocouple Amplifier MAX31856 และในส่วนที่สามคือระบบแสดงผล แสดงค่าอุณหภูมิในรูปของตัวเลขดิจิทัล 7-segment ส่วนประกอบต่างๆของระบบการวัดและแสดงผลอุณหภูมิที่ผู้วิจัยออกแบบ(Figure 1) และแสดง schematic diagram (Figure 2) ของระบบการวัดและแสดงผลอุณหภูมิ

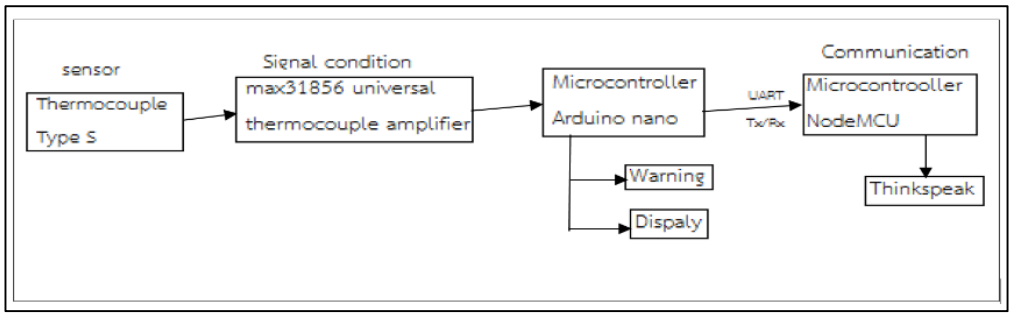


Figure 1 Measuring system and Temperature display

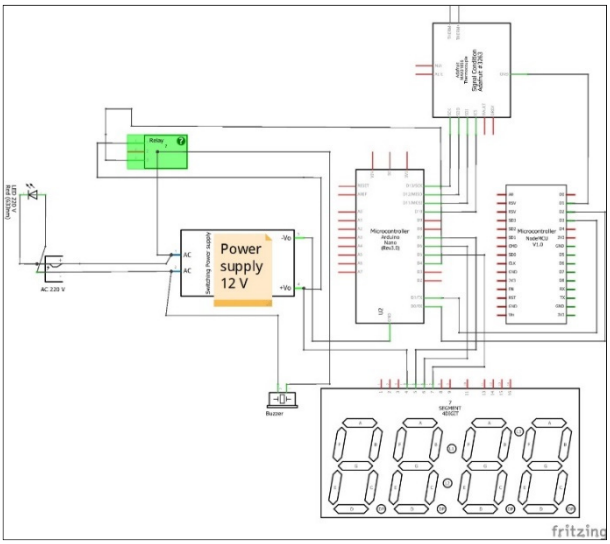


Figure 2 schematic diagram

วัสดุอุปกรณ์ส่วนประกอบต่างๆ ที่ใช้ในระบบการวัดและแสดงผลอุณหภูมิเตาเผาเซรามิกส์มีดังนี้

อุปกรณ์วัดอุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกส์ (thermocouple type S) Universal Thermocouple Amplifier MAX31856) สายสัญญาณอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ arduino nano โหนดเอ็มซียู (NodeMCU) กล่องอะคริลิก บอร์ดวงจรตัวเลขดิจิตอล (7-segment) อุปกรณ์จับยึดทางกล สายไฟแรงดันสูง สายไฟแรงดันต่ำ หลอดไฟ 220 โวลต์ หลอดไฟสัญญาณเตือนไซเรน แหล่งจ่ายไฟ 24 โวลต์ (power supply) แผงต่อสายไฟ (terminal block) รีเรย์ บอร์ดไข่ปลา ขาตั้ง บอร์ดไข่ปลา

ทดสอบเปรียบเทียบอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ

ทดสอบเปรียบเทียบอุปกรณ์วัดอุณหภูมิโดยเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่อ่านได้จาก signal condition ที่แตกต่างกัน (Figure 3) โดยที่ตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลจะติดตั้งไว้ผนังด้านด้านบนของเตาเผาเซรามิกส์

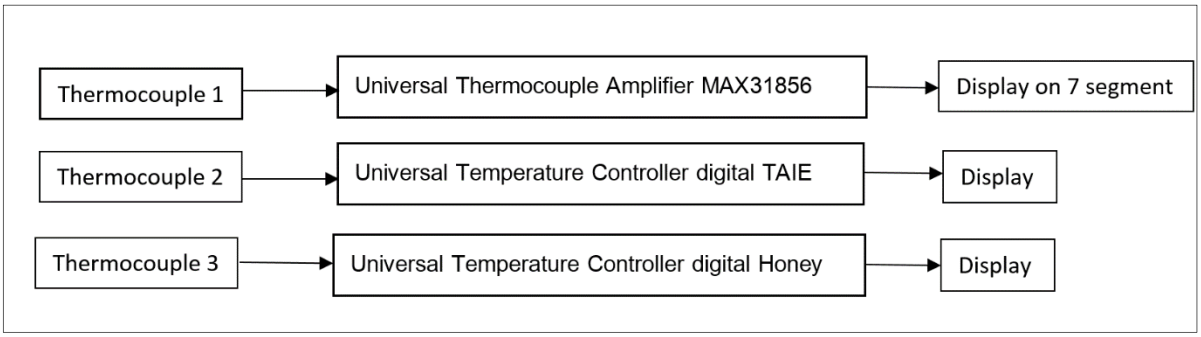


Figure 3 Compare of thermocouple

โดยที่ Universal Temperature Controller digital TAIE และ Universal Temperature Controller digital Honey เป็น signal condition เดิมที่ผู้ประกอบการใช้ในการวัดค่าอุณหภูมิเตาเผาเซรามิกส์และ Universal Thermocouple Amplifier MAX31856 เป็น signal condition ที่นำมาใช้ในระบบการวัดและแสดงผลอุณหภูมิที่ผู้วิจัยได้จัดทำขึ้น

พัฒนาระบบตรวจวัดและแสดงผลอุณหภูมิประยุกต์กับ Internet of Thing

ผู้วิจัยได้นำระบบการวัดและแสดงผลอุณหภูมิที่จัดทำขึ้นมาพัฒนาโดยการนำเทคโนโลยีด้าน Internet of Thing มาใช้ให้เกิดประโยชน์โดยนำชิป ESP8266-WiFi ในรูปของบอร์ดพัฒนา NodeMCU Development Board For ESP8266 โดยการส่งข้อมูลอุณหภูมิผ่านทาง UART Tx Rx จากบอร์ด arduino ส่งข้อมูลมายัง NodeMCU และส่งค่าอุณหภูมิไปแสดงที่หน้าเว็บบอร์ด Thinkspeak.com เพื่อให้ผู้ประกอบการเตาเผาเซรามิกส์สะดวกและง่ายต่อการเข้าไปดูค่าอุณหภูมิเตาเผาเซรามิกส์โดยที่ไม่ต้องอยู่หน้าเตาเผาเซรามิกส์

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ออกแบบสร้างระบบตรวจวัดและแสดงผลอุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกส์

ระบบตรวจวัดและแสดงผลอุณหภูมิที่ผู้วิจัยได้จัดทำขึ้นเพื่อที่จะทดสอบการเปรียบเทียบการปรับแต่งสัญญาณ (Figure 4)

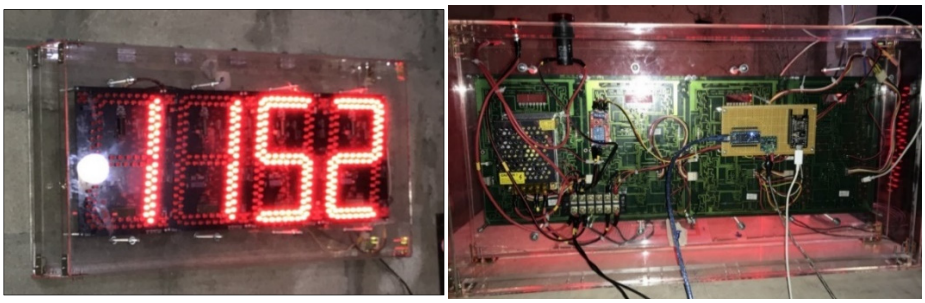


Figure 4 Measuring system and Temperature display Front view and back view

หน้าจอแสดงผลกล่องอะคิริกมีขนาด 690 x 350 x 47 มม. ตัวเลข 7-segment มีขนาด 8 นิ้ว ใช้หลอด LED สีแดง ทั้งหมด 4 หลัก เห็นได้ชัดเจนในระยะไม่ต่ำกว่า 10 เมตร

ทดสอบการเปรียบเทียบอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ

บันทึกค่าอุณหภูมิที่อ่านได้ในแต่ล่ะการทดลอง โดยบันทึกค่าอุณหภูมิจากตัวเลขดิจิทัลที่แสดงออกมาในขณะที่มีการเผาเตาเซรามิกส์ (Figure 5)

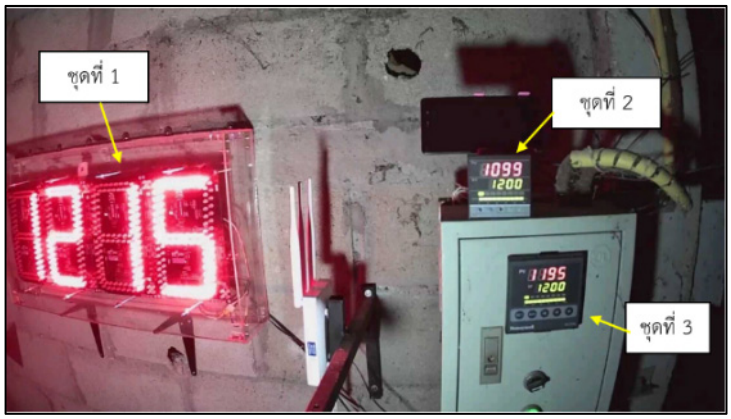


Figure 5 Temperature Display

สถานที่ทดลองเก็บค่าอุณหภูมิเตาเผาเซรามิกส์ ณ โรงงานฮ้อนทองเซรามิกส์ จังหวัดลำปาง อุณหภูมิบริเวณรอบๆ เตาเผาเซรามิกส์ 28-29 องศาเซลเซียสในระหว่างที่มีการเผาเตาเซรามิกส์ เริ่มเผาเตาเซรามิกส์ ในช่วงเวลา 16:30-23:30 น. หลังจาก 23:30 น.สิ้นสุดการเผาเตาเซรามิกส์ นำค่าอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองแต่ล่ะชุดแสดงบนกราฟ (Figure 6) ชุดที่ 1 Thermocouple ที่อ่านโดย Universal Thermocouple Amplifier MAX31856 ชุดที่ 2 Thermocouple ที่อ่านโดย Universal Temperature Controller digital TAIE และชุดที่ 3 Thermocouple ที่อ่านโดย Universal Temperature Controller digital Honeywell

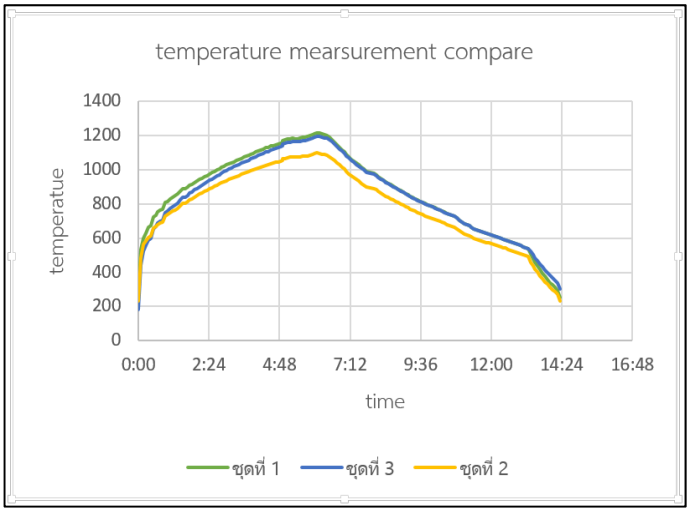


Figure 6 Temperature measurement compare

ค่าอุณหภูมิที่อ่านได้จาก (Figure 6) ในแต่ละการทดลอง โดยที่การทดลองที่ 1 Thermocouple ที่อ่านโดย Universal Thermocouple Amplifier MAX31856 อ่านค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ 1215 องศาเซลเซียส การทดลองที่ 2 Thermocouple ที่อ่านโดย Universal Temperature Controller digital TAIE อ่านค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ 1195 องศาเซลเซียส การทดลองที่ 3 Thermocouple ที่อ่านโดย Universal Temperature Controller digital Honeywell อ่านค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ 1207 องศาเซลเซียส

นำไพโรเมตริกโคน (Figure 7) มาทดสอบวัดอุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกส์โดยวางไพโรเมตริกโคนให้ใกล้ๆกับบริเวณอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ Thermocouple ชุดทดสอบเปรียบเทียบอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ ทั้ง 3 ชุด เพื่อนำค่าอุณหภูมิที่อ่านได้จากไพโรเมตริกโคนมาเทียบกับค่าอุณหภูมิที่อ่านได้จากอุปกรณ์วัดอุณหภูมิแต่ล่ะชุด



Figure 7 Pyrometric Cone before process

จากภาพด้านบนไพโรเมตริกโคนทั้ง 3 เบอร์เรียงจากซ้ายมาขวา เบอร์ 6 วัดอุณหภูมิเตาเผาเซรามิกส์ในช่วง 1201 องศาเซลเซียส เบอร์ 7 วัดอุณหภูมิเตาเผาเซรามิกส์ในช่วง 1215 องศาเซลเซียส เบอร์ 8 วัดอุณหภูมิเตาเผาเซรามิกส์ในช่วง 1236 องศาเซลเซียสตามลำดับ

หลังจากเผาเตาเซรามิกส์เสร็จนำไฟโรเมตริกโคนออกจากเตาเผาเซรามิกส์ ไฟโรเมตริกจะมีลักษณะปลายยอดของแต่ล่ะโคนจะโน้มลงมา (Figure 9) คือไพโรเมตริกโคนทั้ง 3 เบอร์ ที่ผ่านการเผาเตาเซรามิกส์

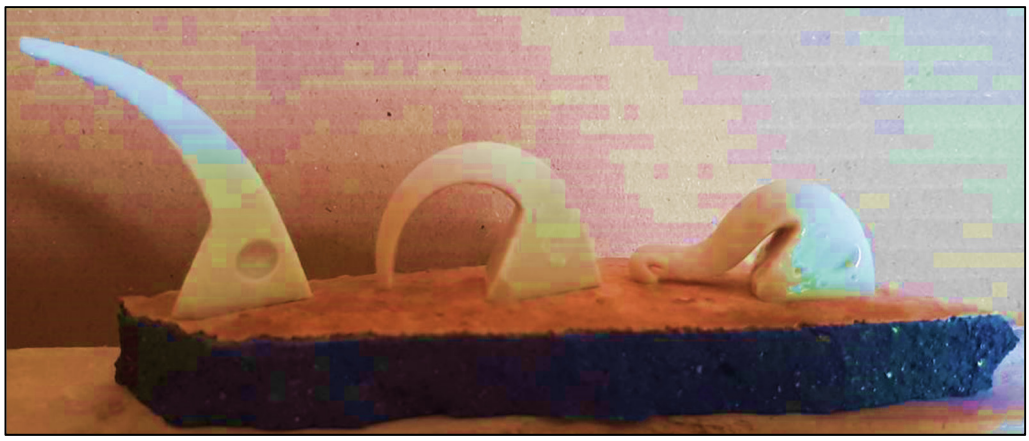


Figure 8 Pyrometric Cone after process end

จากการทดสอบไพโรเมตริกโคน เรียงตามเบอร์ ให้เบอร์ของโคนที่จะใช้วัดอุณหภูมิจริงอยู่กลาง (Firing Cone) ในที่นี้คือโคนเบอร์ 7 เป็นตัววัดอุณหภูมิจริงเรียงจากโคนเบอร์ 6 เบอร์ 7 และเบอร์ 8 โคนตัวแรกเรียกว่าโคนชี้นำ (Guide Cone) คือโคนเบอร์ 6 คือโคนที่ล้มลงไม่สามารถวัดมุมที่โค้งได้ ซึ่งโคนเบอร์ 6 คือโคนที่วัดอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 1201 องศาเซลเซียส แสดงว่าอุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกส์เกิน 1200 องศาเซลเซียสจริง เพราะเทียบกับอุปกรณ์วัดอุณหภูมิชุดที่ 1 อ่านค่าอุณหภูมิได้ประมาณ 1215 องศาเซลเซียส อุปกรณ์วัดอุณหภูมิชุดที่ 2 อ่านค่าได้ประมาณ 1195 องศาเซลเซียส อุปกรณ์วัดอุณหภูมิชุดที่ 3 อ่านค่าอุณหภูมิได้ประมาณ 1207 องศาเซลเซียส พิจารณาที่โคนเบอร์ 7 ปลายโคนโค้งลงถึงพื้น และสามารถวัดมุมที่โค้งลงมาได้ ส่วนโคน 8 จะเป็นโคนคุม (Guard Cone) ปลายโคนไม่ได้โค้งลงถึงพื้น ซึ่งโคนเบอร์ 8 จะวัดอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่ 1236 องศาเซลเซียสแต่ปลายโคนไม่ได้โค้งลงถึงพื้น แสดงว่าอุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกส์ไม่ได้เผาถึง 1236 องศาเซลเซียสเพราะ อุปกรณ์วัดอุณหภูมิชุดที่ 1 ชุดที่ 2 และชุดที่ 3 ค่าที่อ่านได้ไม่ถึง 1236 องศาเซลเซียส แสดงว่า ณ ตอนนั้นที่ทำการเผาเซรามิกส์อุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกส์ อยู่ระหว่าง 1201-1236 องศาเซลเซียส

พัฒนาระบบตรวจวัดและแสดงผลอุณหภูมิประยุกต์กับ Internet of Thing

การนำประโยชน์ด้าน Internet of Thing มาใช้กับระบบตรวจวัดและแสดงอุณหภูมิเตาเผาผ่านทางออนไลน์ thinkspeak.com (Figure 9) ทำให้สะดวกในการตามเข้าไปอ่านค่าอุณหภูมิเตาเผา ไม่จำเป็นต้องอยู่หน้าเตาเผาเซรามิกส์เพื่อจดค่าบันทึกค่าอุณหภูมิสามารถเปิดเว็บไซต์และอ่านบันทึกค่าอุณหภูมิเตาเผาเซรามิกส์

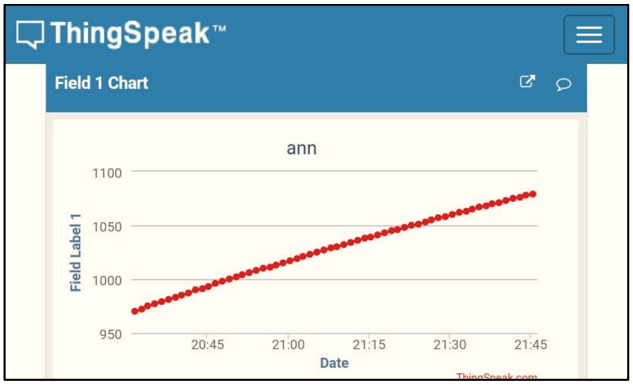


Figure 9 Temperature Display on Thinkspeak

สรุป

พิจารณาที่โคนเบอร์ 7 มีลักษณะโค้งงอลงมาถึงพื้น สามารถวัดมุมที่งอได้ แสดงว่า อุณหภูมิเตาเผาเซรามิกส์อยู่ในช่วงโคนเบอร์ที่ 7 หรืออยู่ที่อุณหภูมิประมาณ 1215 องศาเซลเซียส จึงสรุปได้ว่า อุปกรณ์วัดอุณหภูมิชุดที่สามารถวัดค่าแม่นยำและถูกต้องมีค่าตรงกับไพโรเมตริกโคนเบอร์ที่ 7 คือ อุปกรณ์วัดอุณหภูมิชุดที่ 1 ชุดที่ Thermocouple ต่อเข้ากับ signal condition Universal Thermocouple Amplifier MAX31856 วัดอุณหภูมิได้ 1215 องศาเซลเซียสซึ่งตรงกับโคนเบอร์ 7 Firing Cone ซึ่งเป็นโคนบอกอุณหภูมิเตาเผาเซรามิกส์จริง จึงสรุปได้ว่า ระบบการวัดและแสดงผลอุณหภูมิเตาเผาที่ผู้วิจัยออกแบบขึ้นมาสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้จริง สามารถวัดค่าอุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกส์ได้ถูกต้องและแม่นยำกว่า signal condition ตัวอื่นๆ นอกไปกว่านั้นตัวเลขดิจิทัลแสดงค่าอุณหภูมิมีขนาดใหญ่ เห็นตัวเลขชัดเจน ทำให้ผู้ประกอบการเห็นค่าอุณหภูมิตัวเลขชัดเจน บันทึกค่าอุณหภูมิได้ถูกต้องไม่ผิดเพี้ยนในระหว่างดำเนินการเผาเตาเซรามิกส์ และสามารถส่งค่าอุณหภูมิไปแสดงบน Thinkspeak.com สามารถดูค่าอุณหภูมิภายในเตาเผาเซรามิกส์ผ่านทางออนไลน์ได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนวิจัยจากโครงการพัฒนาศักยภาพบุคคลากร STEM (Science, Technology Engineering, and Mathematics) และโครงการ Innovation Technology Assistance Program (iTAP)

เอกสารอ้างอิง

สมนึก บุญพาสไสว. 2550. **การวัดและเครื่องมือวัด**. พิมพ์ครั้งที่ 2.บริษัทท๊อปการพิมพ์ จำกัดกรุงเทพฯ.

Bunyakiat, K. (2001). **Fuel and Combustion**. Bangkok : Chulalongkorn University Press. (in Thai).

Ceramic Industrial Development, Center. (1999). **Training Documents of Kiln Firing for Ceramics**. Lampang : author. (in Thai).

Kosasang, P., Sanrach, C. and Aschariyaphotha, N. (2011). Determination of A/F Ratio for the Open Burner Model. **The 49rd Conference of Kasetsart University**, Kasetsart University, Bangkok. (in Thai).

Lawanwadeekul, S., Khunyosying, T. and Moolintha, S. (2017). Development of environmental friendly production process of ceramic industries in Lampang Province. **The 3rd National Conference of Industrial Technology**.

การผลิตเกรย์วอเตอร์จากการบำบัดน้ำผิวดินปนเปื้อนน้ำเสียชุมชนด้วยการตกตะกอนเคมีและการกรองด้วยจีโอเทกซ์ไทล์ กรณีศึกษาน้ำคูมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Gray Water Production from Contaminated Surface Water Using Onsite Chemical Precipitation and Geotextile Filtration; Case Study of Canal Water, Kasetsart University

จินต์จุฑา ไวทยวงศ์สกุล[1*] นัทกาญจน์ ประเสริฐสังข์[2] และ จีมา ศรลัมพ์[1]

Chinchutha Waithayawongsakul[1*], Nattakarn Prasertsung[2] and Cheema Soralump[1]

บทคัดย่อ

การศึกษาประสิทธิภาพการปรับปรุงคุณภาพน้ำในคูระบายน้ำของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์โดยใช้การตกตะกอนเคมีและการกรองโดยจีโอเทกซ์ไทล์เพื่อพิจารณาถึงความเหมาะสมต่อการนำน้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดไปใช้งานในรูปแบบของเกรย์วอเตอร์ โดยการหาชนิดและปริมาณของสารตกตะกอนที่เหมาะสม โดยทดลองใช้สารตกตะกอน ได้แก่ สารส้ม โพลีเมอร์ชนิดประจุบวก โพลีเมอร์ชนิดประจุลบ ด้วยวิธีจาร์เทส พบว่าสารตกตะกอนที่เหมาะสมได้แก่สารส้มความเข้มข้น 120 mg/L ทำการทดลองปรับปรุงคุณภาพ โดยการสูบน้ำคูมาตกตะกอนเคมีบริเวณพื้นที่ด้านข้าง และผ่านการกรองด้วยจีโทเทกซ์ไทล์ที่ถูกตัดในรูปถุง ทำการทดลองในช่วงสภาพที่แตกต่างกัน 3 ช่วงคือ 1.ช่วงที่มีฝนตก 2.ช่วงที่ฝนหยุดตกไป 3 วัน และ 3.ช่วงที่ไม่มีฝนตก ในการทดลองพบว่าสารส้มและจีโอเทกซ์ไทล์สามารถลดค่าพารามิเตอร์ต่างๆได้ดีที่สุดในช่วงที่มีฝนตก โดยสามารถลดค่าความขุ่น,TS,TDS,COD,ฟอสเฟต,ทีเคอเอ็น ได้ถึง 84%, 30%, 26%, 90%, 82% และ 84% ตามลำดับ รองลงมาคือช่วงที่ฝนเว้นช่วงไป 3 วัน และลดได้น้อยที่สุดในช่วงที่ไม่มีฝนตก

ABSTRACT

A study on the efficiency of water treatment in Kasetsart University's drainage ditches using Geotextile was conducted to determine the suitability of the treated water to be used in the form of Gray water. To find type and amount of precipitates, Alum, Cationic Polymer, Anionic Polymer by Jar testing. In this study, alum was used in the amount of 120 mg/L as a precipitant, and the precipitated water was filtered with geotextile Fiber is cut in a bag. Experiment with three different weather conditions: 1. Rainy season 2. The rain stopped 3 days and 3. No rain. In experiments it was found that alum and gypsum were the best parameters in the rain. The turbidity, TS, TDS, COD, phosphate, TKN were decreased by 84%, 30%, 26%, 90%, 82% and 84%, respectively. 3 days and minimized during no rain

Key words: wastewater treatment, Alum, Coagulant, Geotube, Jar test

*Corresponding author; e-mail address: Chinchutha_clay66@yahoo.com

[1]ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

[2]ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สกลนคร 47000

[2]Department of Environmental Engineering, Faculty of Science and Engineering, Kasetsart University, Sakon Nakhon 47000

คำนำ

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน มีพื้นที่ 1,353,600 ตารางเมตร หรือ 846 ไร่ แบ่งเป็น 3 ส่วนได้แก่ 1.พื้นที่รองรับน้ำทั่วไปประมาณ 1,123,912 ตารางเมตร 2.พื้นที่คูระบายน้ำประมาณ 86,328 ตารางเมตร และ 3.พื้นที่สีเขียวประมาณ 143,360 ตารางเมตร (กองแผนงาน,2558) จากการศึกษาด้านการจัดการน้ำมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปี พ.ศ.2556 ถึง พ.ศ.2558 (จีมาและสมปรารถณา, 2559) น้ำเสียในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ส่วนหนึ่งถูกส่งไปบำบัดที่ระบบบำบัดกลาง และกว่าครึ่งของอาคารที่ยังไม่ได้ต่อท่อน้ำเสียไปยังระบบบำบัดกลางมีระบบบำบัดภายในอาคารและระบายน้ำทิ้งลงคูระบายน้ำที่จะออกสู่คูระบายน้ำสาธารณะบริเวณถนนวิภาวดี คูระบายน้ำในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์นอกจากจะรับน้ำทิ้งจากอาคารที่ตั้งอยู่ข้างคูแล้ว ยังรับน้ำจากการระบายน้ำและรับปริมาณน้ำฝนด้วย หากคุณภาพของระบบบำบัดน้ำเสียภายในอาคารไม่ดีน้ำทิ้งสู่คูก็จะทำให้คุณภาพน้ำในคูซึ่งเป็นน้ำผิวดินปนเปื้อน เนื่องจากปริมาณการใช้น้ำของมหาวิทยาลัยอยู่ที่ประมาณ 1,147,730.5 ลบ.ม.ต่อปี (เฉลี่ย พ.ศ.2557-พ.ศ.2559) และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มสูงขึ้นในทุกปี (จีมาและสมปรารถณา, 2559) ได้ทำการวิเคราะห์ลักษณะของน้ำคูระบายน้ำ ในช่วงฤดูแล้งได้ผลดังที่ได้แสดงใน **Table1** และในช่วงฤดูฝนดังที่ได้แสดงใน **Table 2**

Table 1 Water quality in arid period (March - April 2016)

upstream to downstream	pH	Turbidity (NTU)	COD (mg/L)	TS (mg/L)	TDS (mg/L)	TKN (mg/L)	P (mg/L)
Government savings bank	7.86	16.33	48.00	815.40	792	8.40	0.48
Gate 1 on Ngamwongwan Rd.	7.53	19.10	49.63	402.00	390	20.25	0.36
Ngamwongwan Parking Building 2	7.81	20.33	59.20	453.40	438	32.48	0.14
Office of Computer	7.62	36.27	68.80	660.00	598	15.77	0.36
Warunawan park	7.04	11.13	38.88	292.00	285	7.09	0.32

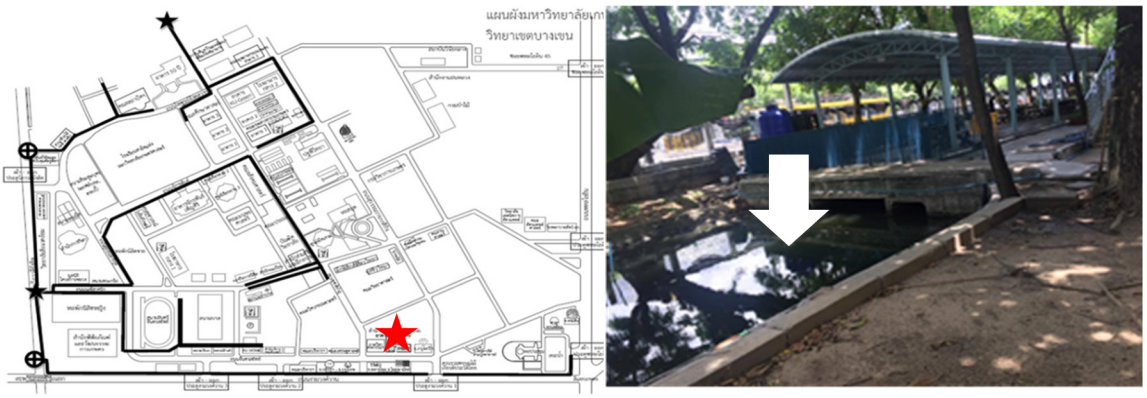
Ref จีมาและสมปรารถณา, 2559

Table 2 Water quality in rainy season (June 2016)

upstream to downstream	pH	Turbidity (NTU)	COD (mg/L)	TS (mg/L)	TDS (mg/L)
Government savings bank	7.61	15.63	81.70	279.20	256.00
Gate 1 on Ngamwongwan Rd.	7.49	3.72	22.85	317.34	312.00
Ngamwongwan Parking Building 2	7.38	3.80	34.27	329.20	319.20
Office of Computer	7.31	4.24	22.85	314.60	306.00
Warunawan park	7.45	7.10	33.12	308.00	292.00

Ref จีมาและสมปรารถณา, 2559

จาก **Table 1** และ **Table 2** จะสังเกตว่าของแข็งในน้ำ (Total Solid) จะลดลงในระหว่างที่ไหลไปตามคูระบายน้ำ และเพิ่มขึ้นในบริเวณที่มีการปล่อยน้ำเสียอาคารหรือมีการปนเปื้อนน้ำเสียจากอาคาร และบริเวณอาคารจอดรถถนนงามวงศ์วาน 1 และ 2 นั้นมีร้านอาหาร,สำนักงาน ฯ และมีผู้คนสัญจรอยู่เป็นจำนวนมาก รวมทั้งห้องน้ำด้วย และเมื่อผ่านบริเวณดังกล่าวไป ค่าซีโอดีและค่าของแข็งทั้งหมดมีค่าลดลงเนื่องจาก self-purification ของระบบคูธรรมชาติจนออกสู่คูน้ำสาธารณะบริเวณถนนวิภาวดีดังที่ได้แสดงใน **Figure 1**



a) b)

Figure 1 a) Kasetsart University, Location of sampling and b) pilot test location

จากปัญหาที่กล่าวมาในข้างต้นจึงเป็นที่มาของงานวิจัยชิ้นนี้ที่จะนำน้ำเสียจากคูระบายน้ำในมหา-วิทยาลัยที่ได้รับการปล่อยน้ำเสียจากกิจกรรมต่างๆในมหาวิทยาลัย มาผ่านกระบวนการบำบัดอย่างง่ายและรวดเร็ว ด้วย Chemical Coagulation และกรองผ่าน Geotextile Fiber แบบถุง ซึ่งเรียกว่า Geotextile tube ซึ่งเป็นวัสดุใยสังเคราะห์เพื่อเก็บตะกอน และมีราคาถูกเมื่อเทียบกับเยื่อกรองชนิดเมมเบรน (Membrane) จากการศึกษาของเจริญศักดิ์ (2541) ซึ่งได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการกรองน้ำที่ผ่านระบบบำบัดชนิดแอคติเวทเตดสลัดจ์ (Activated Sludge) โดยใช้ Geotextile เป็นตัวกรองพบว่า Geotextile มีความสามารถในการกรองของแข็งแขวนลอย และ COD ได้มากกว่า 60% , (Ebeling and Rishel, 2006) ได้ทำการศึกษาการกำจัดของแข็งแขวนลอยในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียน โดยใช้โพลีเมอร์ชนิดประจุบวก (Cationic Polymer) เป็นสารตกตะกอน พบว่า Geotextile Fiber มีความสามารถในการกักเก็บของแข็งแขวนลอย และในทางอ้อมสามารถลดค่าไนโตรเจน และฟอสฟอรัสได้ ซึ่งในงานวิจัยชิ้นนี้ต้องการจะนำน้ำที่ผ่านการบำบัดกลับมาใช้ในแบบ Gray Water ได้แก่น้ำที่คงมีค่าความสกปรกอยู่บ้าง แต่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ในบางกิจกรรม เช่น กิจกรรมรดน้ำต้นไม้ ทำความสะอาดพื้น ระบายน้ำในชักโครก เป็นต้น

อุปกรณ์และวิธีการ

1.การหาปริมาณสารตกตะกอนที่เหมาะสมสำหรับการตกตะกอนเคมี

จะทำการเก็บตัวอย่างน้ำ ที่บริเวณดังที่ได้แสดงใน **Figure 1** คูระบายน้ำที่บริเวณด้านหลังอาคารจอดรถงามวงศ์วาน 2 ซึ่งจะนำตัวอย่างน้ำมาทำการทดลองจาร์เทส (Jar testing) เพื่อหาปริมาณของสารตกตะกอน (Coagulant) ที่เหมาะสม (Optimum Dose) ซึ่งในงานวิจัยชิ้นนี้จะนำ สารส้ม (Alum) และโพลีเมอร์ชนิดประจุบวก (Cationic Polymer), โพลีเมอร์ชนิดประจุลบ (Anionic Polymer) มาใช้ในงานวิจัย แล้วทำการวัดค่าความ

เป็นกรดเบส (pH) และค่าความขุ่น (Turbidity) เมื่อได้ปริมาณของสารตกตะกอน (Coagulant) แล้วจะนำไปพัฒนาเป็นระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำขนาดเล็กข้างคูระบายน้ำด้านถนนงามวงศ์วาน

2.การบำบัดน้ำในคูด้วยการตกตะกอนเคมีและการกรองด้วยจีโอเทกซ์ไทล์

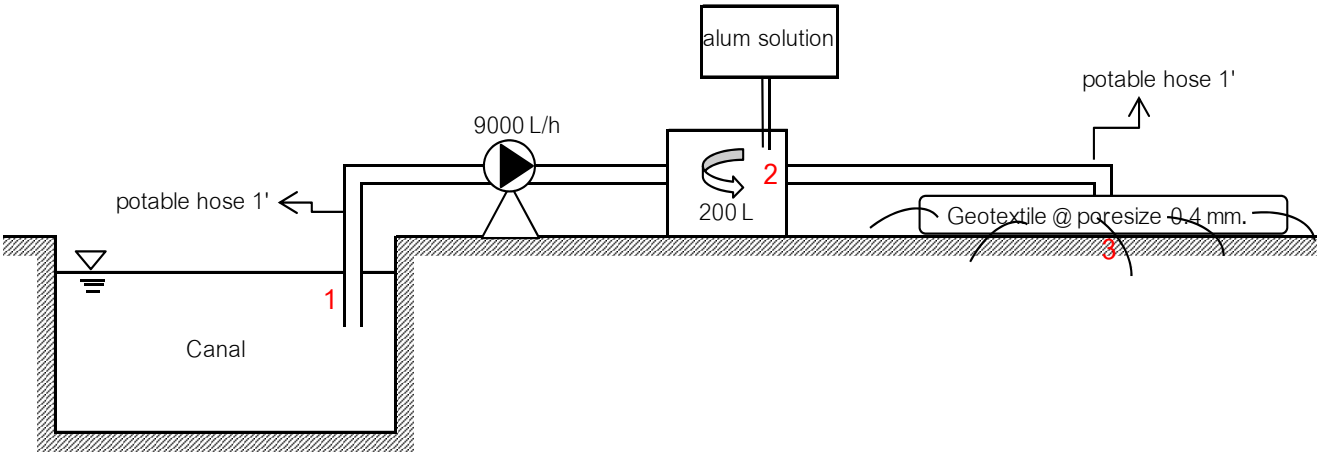


Figure 2 Diagram of small scale chemical coagulation and geotextile filtration

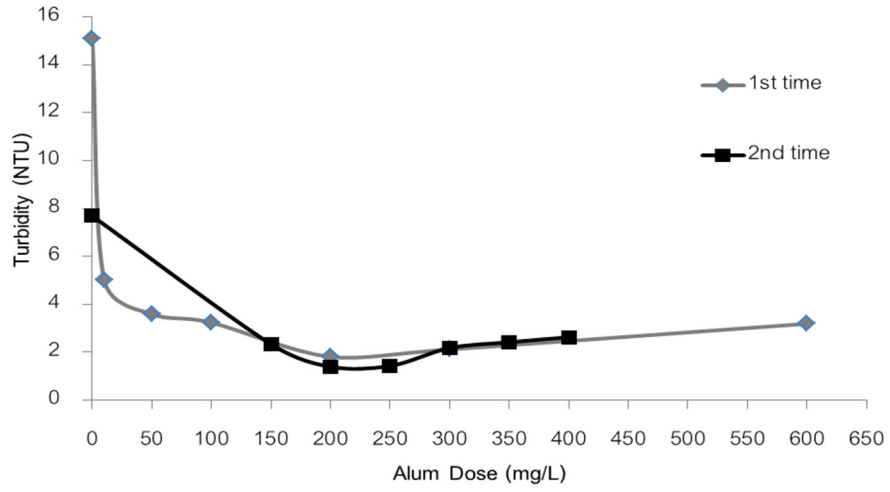
จาก **Figure 2** ใช้ Centrifugal pump 9000 L/h สูบน้ำจากคูขึ้นมาใส่ในถังขนาด 200 ลิตร พร้อมกับใส่สารส้มที่ได้ความเข้มข้นที่เหมาะสมจากการทำจาร์เทส ภายในถังเป็นเวลา 30 นาที แล้วถูกสูบไปยัง Geotextile Fiber ซึ่งตัดเป็นรูปถุงขนาดใหญ่ โดยตะกอนจะถูกกักอยู่ภายใน geotextile tube น้ำที่ผ่านออกมาคือน้ำที่ผ่านการบำบัด จากนั้นจะทำการเก็บน้ำตัวอย่างจากจุดที่ระบุใน **Figure 2** 1.น้ำคู 2.น้ำที่ผ่านการตกตะกอนด้วยสารส้ม 3.น้ำที่ผ่านการกรองด้วยจีโอเทกซ์ไทล์ มาทำการวัดพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ pH ความขุ่น (Turbidity, NTU) ของแข็งทั้งหมด (Total Solid, mg/L) ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (Total Dissolved Solid, mg/L) ซีโอดี (COD, mg/L) ฟอสเฟต (Phosphate, mg/L) และทีเคเอ็น (TKN, mg/L) ตามวิธีวิเคราะห์ Standard methods for the Examination of Water and Wastewater 21th edition

การทดลองดังกล่าวได้ทดลองกับน้ำ 3 ช่วงเวลาด้วยกัน 3 ช่วง ได้แก่ 1.ช่วงที่มีฝนตก 2.ช่วงที่ฝนเว้นช่วงไปได้ 3 วัน 3.ช่วงที่ฝนทิ้งช่วงหรือไม่มีฝนตก

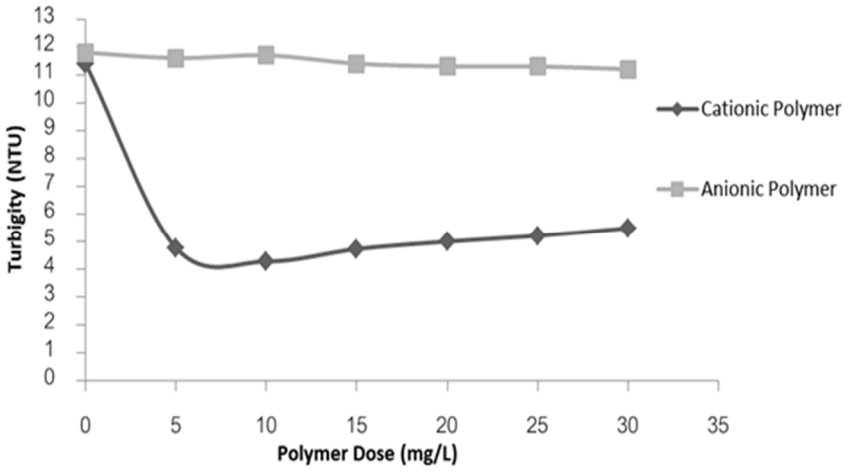
ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1.การทำจาร์เทสเพื่อหาปริมาณ Coagulant ที่เหมาะสม

สารส้ม (Alum) เป็นสารตกตะกอนที่หาซื้อได้ง่ายตามท้องตลาดและมีราคาที่ไม่แพง ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันอย่างพร่หลายในการใช้เป็นสารตกตะกอน โดยจะทำการเติมสารส้มที่ปริมาณต่างๆในช่วงระยะเวลากวนผสมที่ความเร็ว 120 rpm. เป็นเวลา 2 นาทีของการทำจาร์เทส (Jar testing) ซึ่งได้ผลดังที่ได้แสดงใน **Figure 3**



(a)



(b)

Figure 3 Dosage of a) alum and b) Cationic Polymer and Anionic Polymer

จาก **Figure 3a** แสดง Optimum Dose ต่ำสุดของสารส้ม อยู่ในช่วง 150- 250 mg/L ทั้งนี้ได้เลือกค่า Optimum Dose ที่ 200 mg/L และโพลีเมอร์เป็นสารตกตะกอน (Coagulant) ที่แบ่งชนิดตามประจุออกได้เป็น 2 ชนิด คือ โพลีเมอร์ชนิดประจุบวก (Cationic Polymer) และโพลีเมอร์ชนิดประจุลบ (Anionic Polymer) จึงต้องเลือกใช้ชนิดประจุให้เหมาะสมกับการใช้งาน โดยการนำเอาโพลีเมอร์ทั้งสองชนิดที่มีความเข้มข้น 0.1% มาทำจาร์เทส (Jar testing) ได้ผลดังที่แสดงใน **Figure 3b** ซึ่งแสดงว่าโพลีเมอร์ชนิดประจุบวก (Cationic Polymer) มีความสามารถในการตกตะกอนมากกว่าโพลีเมอร์ชนิดประจุลบ (Anionic Polymer) แต่เมื่อเปรียบเทียบกับ **Figure 3a** จะเห็นว่าสารส้มสามารถตกตะกอนได้ดีกว่าโพลีเมอร์ในความเข้มข้นที่เท่ากัน จึงเลือกสารส้มเป็นสารตกตะกอนเพียงชนิดเดียวที่ความเข้มข้น 120 mg/L

2.คุณภาพน้ำดูก่อนเข้าระบบ

ทำการเก็บน้ำในวันที่มีสภาพอากาศที่แตกต่างกัน 3 วัน ได้แก่ วันที่ 1st เป็นช่วงที่มีฝนตกทุกวัน น้ำคลองมีปริมาณน้ำฝนมาก, วันที่ 2nd เป็นช่วงที่ยังมีฝนตกอยู่ และเก็บตัวอย่างน้ำในวันที่ฝนเว้นระยะการตกไป 3 วัน

และในวันที่ 3rd เป็นช่วงที่มีไม่มีฝนตก ทำการวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังที่เคยกล่าวไปแล้วในข้างต้น เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับคุณภาพน้ำจากระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำ ได้ผลดังที่แสดงใน **Table 3**

Table 3 Canal water influent qualities

Parameter	1st test	2nd test	3rd test
pH	6.85	6.70	7.11
Turbidity (NTU)	28.90	19.10	14.87
TS (mg/L)	1398	1935	1851.33
TDS (mg/L)	1324	1842	1451.60
COD (mg/L)	139.20	28.83	33.89
Phosphate (mg/L)	0.17	0.14	0.26
TKN (mg/L)	6.44	0.09	5.41

2.1.ผลการทดลองและวิเคราะห์คุณภาพน้ำจากระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำ

นำน้ำตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการตกตะกอนด้วยสารส้ม,น้ำที่ผ่านการตกตะกอนด้วยสารส้มและกรองด้วย Geotextile ดังแสดงใน **Figure 2** ไปทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดได้ผลดังที่ได้แสดงใน **Figure 4**

จาก **Figure 4a** พบว่าค่า pH ของทั้ง 3 ครั้งอยู่ในช่วง 6.5-7.5 ตามมาตรฐานน้ำผิวดิน จาก **Figure 4b** พบว่าค่าความขุ่นลดลงจากการบำบัดเบื้องต้นด้วยกระบวนการตกตะกอนเคมีและการกรองด้วย Geotextile tube **Figure 4c** และ **Figure 4d** ค่าของแข็งทั้งหมด (TS) และค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (TDS) ลดลงเมื่อผ่านการบำบัด **Figure 4e** พบว่าค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมดลดลงจากการบำบัดยกเว้นวันที่ 3rd ที่ ค่าของแข็งละลายทั้งหมดเพิ่มขึ้นจากกระบวนการตกตะกอนทางเคมีและการกรองอันเนื่องมาจากกระบวนการตกตะกอน (Coagulation) และ **Figure 4f** ค่า COD ลดลงจากกระบวนการบำบัดดังกล่าว และคาดการณ์ว่าค่า BOD มีค่าต่ำกว่า 20 mg/L หากพิจารณาจากน้ำเสียชุมชน COD > BOD โดยประสิทธิภาพการกำจัด (%Removal) ได้สรุปไว้ใน **Table 4**

Table 4 % Removal Efficiency of the pilot system

% Removal	1st			2nd			3rd		
	by coagulation	by geotextile	total removal	by coagulation	by geotextile	total removal	by coagulation	by geotextile	total removal
Turbidity	80.10%	17.22%	83.53%	61.68%	12.57%	66.49%	50.84%	7.25%	54.41%
TS	29.18%	0.61%	42.07%	4.86%	1.52%	6.31%	29.88%	12.21%	38.44%
TDS	25.98%	0.00%	25.98%	0.87%	1.20%	2.06%	9.30%	2.94%	11.96%
SS	86.50%	60.00%	94.59%	83.87%	40.00%	90.32%	0.00%	0.00%	0.00%
COD	85.00%	33.33%	90.00%	0.20%	50.00%	60.00%	28.66%	20.00%	43.00%
P	79.76%	11.76%	82.14%	45.16%	19.12%	55.65%	8.40%	43.00%	47.80%
TKN	21.74%	79.56%	84.01%	94.15%	0.00%	94.15%	1.13%	2.90%	4.00%

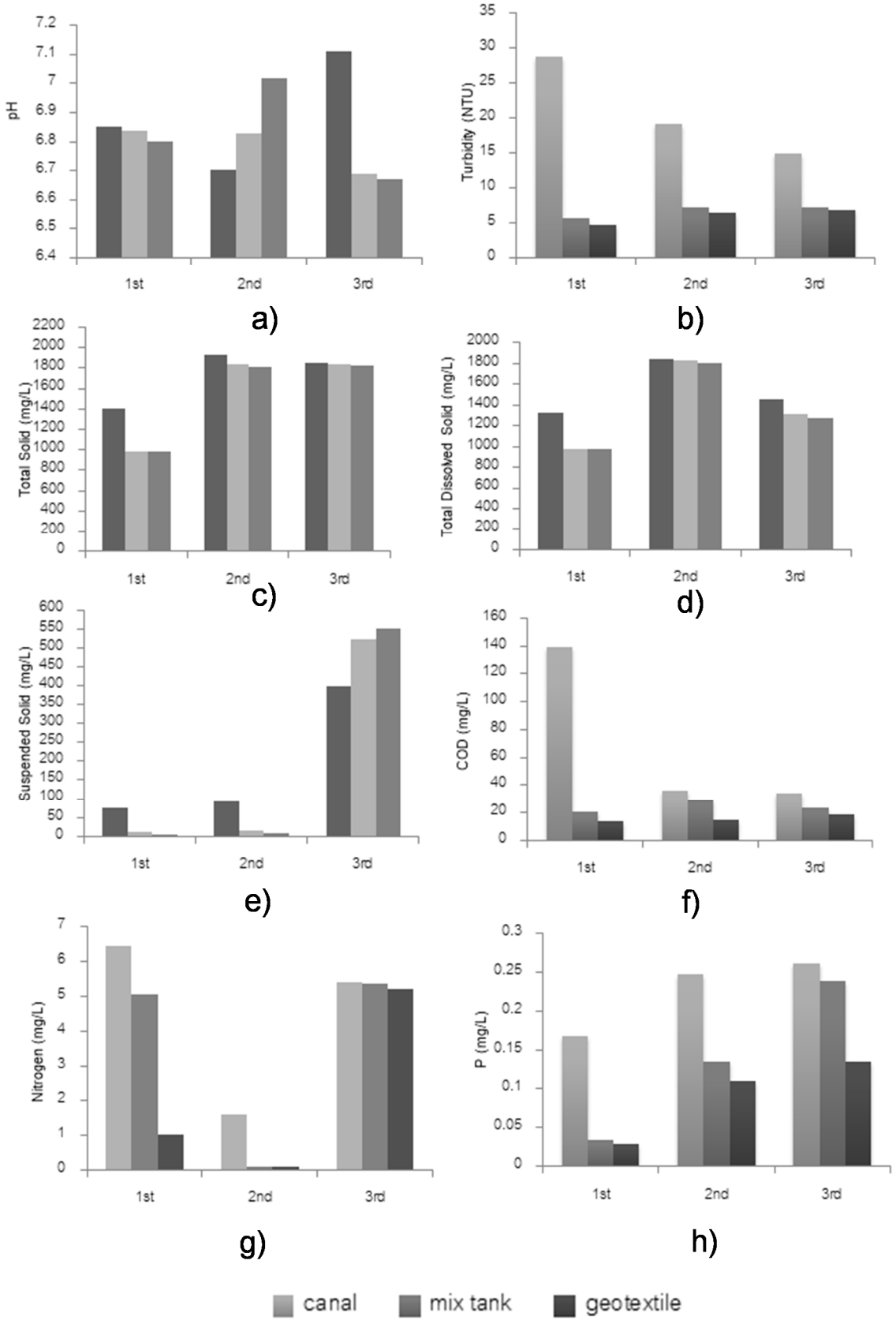


Figure 4 Water quality a) pH, b) Turbidity, c) TS, d) TDS, e) SS, f) COD, g) Nitrogen, h) Phosphate

2.2.ผลการทดลองและวิเคราะห์ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส

น้ำทิ้งที่ปล่อยลงสู่คูระบายน้ำถนนงามวงศ์วาน ส่วนหนึ่งมาจากน้ำเสียที่มาจากการอุปโภค เช่นจากร้านอาหาร เป็นต้น จึงต้องทำการวิเคราะห์ปริมาณสารอาหาร (Nutrient) หรือสารอินทรีย์ในน้ำ ได้แก่ วิเคราะห์โปรตีนในรูปแบบของทีเคเอ็น และฟอสเฟต จาก **Figure 4g** และ **Figure 4h** ปริมาณไนโตรเจนและฟอสเฟตของน้ำคูมีค่าต่ำอยู่แล้ว คืออยู่ในช่วง 1-6 mg/L และ 0.15-0.25 mg/L ตามลำดับ ค่าไนโตรเจนและฟอสเฟตดังกล่าวอยู่ในรูปสารละลาย ซึ่งเมื่อผ่านการกรองทำให้ค่าทีเคเอ็นและค่าฟอสเฟตลดลง สันนิษฐานว่าลดลงเนื่องจากการเกาะติดไปกับตะกอนและถูกกักไว้ใน Geotextile Tube

สรุป

จากการทำการทดลองบำบัดน้ำคูปนเปื้อนน้ำเสียจากอาคาร โดยมีเป้าหมายในการปรับปรุงคุณภาพน้ำเบื้องต้นด้วยระบบขนาดเล็กที่สามารถวางไว้ข้างคูน้ำภายในมหาวิทยาลัย ซึ่งประกอบไปด้วยการปรับปรุงคุณภาพน้ำจากการตกตะกอนเคมีและการกรองตะกอนด้วยถุง Geotextile พบว่าคุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดในช่วงเวลาต่างกัน ทั้งช่วงที่มีฝนตก, ช่วงที่ฝนเว้นระยะไป 3 วัน, และช่วงแล้ง มีค่า pH เป็นกลาง มีความขุ่นต่ำกว่า 10 NTU COD 10-20 mg/L และค่า TS และ TDS ที่ยังสูง (TDS ประมาณ 1000 – 18000 mg/L) น้ำดังกล่าวสามารถใช้ประโยชน์ได้หลายประการ อาทิ ใช้รดน้ำต้นไม้ หรือใช้เป็นน้ำทำความสะอาดโถสุขภัณฑ์สำหรับอาคารใกล้เคียง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัทเทนคาต้า จีโอซินเทติคส์ (ประเทศไทย) จำกัด ที่ช่วยอนุเคราะห์ Geotextile Fiber รุ่น GT500D มาใช้ในงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

จีมา ศรลัมพ์, และ สมปรารถนา ฤทธิ์พริ้ง. 2559. การศึกษาด้านจัดการน้ำมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์บางเขน. ใน**รายงานฉบับสมบูรณ์ ทุนอุดหนุนวิจัย มก. ปีงบประมาณ 2557**. กรุงเทพฯ.

นภาพร รุ่งเรืองใจเพชร. และปวิชญา บรรณาธรรม. 2559. **การออกแบบระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำขนาดเล็กสำหรับระบบคูมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน**. โครงงานวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Ebeling, J.M. and Rishel, K.L, 2006. **Performance Evaluation of Geotextile Tubes**. 6th Intern'l Conf. on Recirculating Aquaculture Roanoke, VA July 20-23, 2006.

Sadashiva Murthy, S. 2016. **Treatment of Domestic Wastewater Using Geotextile as a Filter media.** International Research Journal of Engineering and Technology Vol. 3 Issue 7,July 2016.

การพัฒนาแผนการปฏิบัติงานของรถเกี่ยวนวดข้าวด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

Development of Harvesting Planning of Rice Combine Harvester by Using Genetics Algorithm

สหชาติ เลิศศิริเภสัช[1*] เกรียงไกร แก้วตระกูลพงษ์[1] ถวัลย์ศักดิ์ เผ่าสังข์[1]
สมพงษ์ เจษฎาธรรมสถิต[1] รักศักดิ์ เสริมศักดิ์[1] และ ยุพดี ฟูประเสริฐ[1]
Sahachat Leartsiriphesaj[1*], Kriengkri Kaewtrakulpong[1], Thawansak Phaosang[1]
Somphong Jedsadathammasathit[1], Raksak Sermsak[1] and Yuphadee Fuprasert[1]

บทคัดย่อ

แผนการปฏิบัติงานเก็บเกี่ยวข้าวเปลือกของรถเกี่ยวนวดข้าวได้พัฒนาขึ้นเป็นแบบจำลองการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดตามหลักการเดินทางของพนักงานขาย และใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในการประมวลผลหาคำตอบเพื่อให้ได้ค่าระยะทางรวมของการเคลื่อนย้ายรถเกี่ยวนวดข้าวระหว่างแปลงที่น้อยที่สุด การทดสอบแผนปฏิบัติงานที่ได้พัฒนาขึ้น ได้ทำการจำลองสถานการณ์การเก็บเกี่ยวข้าวเปลือกของพื้นที่ปลูกข้าวในจังหวัดฉะเชิงเทราจำนวน 90 แปลง โดยเริ่มจากการแบ่งแปลงทั้งหมดออกเป็นกลุ่มย่อยจำนวน 5 กลุ่มย่อย โดยวิธี K-mean Clustering ทำการคำนวณแบ่งกลุ่มโดยที่จุดศูนย์กลางในแต่ละกลุ่มย่อยที่ให้ระยะทางรวมจากแต่ละแปลงถึงจุดศูนย์กลางในแต่ละกลุ่มย่อยนั้นๆ มีค่าสั้นที่สุด จากนั้นจึงทำการจัดลำดับการปฏิบัติงานเก็บเกี่ยวข้าวเปลือกที่ทำให้ระยะทางรวมของการเคลื่อนย้ายรถเกี่ยวนวดข้าวในแต่ละกลุ่มเป็นระยะทางที่สั้นที่สุดโดยอาศัยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในการหาคำตอบ เมื่อนำผลการจัดลำดับการปฏิบัติงานที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการจัดลำดับการเก็บเกี่ยวข้าวเปลือกด้วยการจำลองสถานการณ์การเก็บเกี่ยวแบบฮิวริสติก พบว่า การจัดลำดับการปฏิบัติงานด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมลดต้นทุนในการเคลื่อนย้ายรถเกี่ยวนวดข้าวลงได้ 22.70 เปอร์เซ็นต์

ABSTRACT

In this study, the harvest planning was designed for rice combine harvester. The purpose of the planning was to reduce the distance that the harvesters have to move from plot to plot. Then the harvest planning was designed based on the optimization model defined by using travelling salesman problem (TSP) technique. Genetics Algorithm (GA) was used to solve to get the set of plots that given the shortest moving distance. In order to check the performance of the developed harvest planning, the simulation of rice harvesting on 90 plots in area of Chachoengsao province was done. The K-means cluster analysis was used to divide such plots into 5 groups. The simulation result showed that total distance for moving the harvesters could be minimized by using the developed plan. The shortest moving distance for the harvesters solved by the GA could reduce the moving distance 22.70 percent when compared with solution solved by Heuristics method.

Key Words: rice harvester scheduling, harvesting and transportation, Genetic Algorithm

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

[1]ภาควิชาเกษตรกลวิธาน คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

คำนำ

ข้าวเป็นสินค้าที่ประเทศไทยผลิตเพื่อการส่งออก และเป็นสินค้าที่มีการแข่งขันในตลาดโลกสูง โดยในปี พ.ศ. 2559 ประเทศไทยส่งออกข้าวเป็นอันดับ 2 ของโลก คือปริมาณ 9.88 ล้านตัน (สมาคมผู้ส่งออกข้าวไทย, 2560) การเก็บเกี่ยวข้าวในปัจจุบันเกษตรกรใช้เครื่องจักรกลในการเก็บเกี่ยว ซึ่งยังใช้ทั้งแรงงานคนและเครื่องจักร และมีแนวโน้มต้นทุนการเก็บเกี่ยวเพิ่มสูงขึ้น โดยในช่วง ปี 2550 - 2552 มีอัตราการเพิ่ม ร้อยละ 5.23 ต่อปี (สำนักวิจัยเศรษฐกิจการเกษตร, 2557) ต้นทุนการเก็บเกี่ยวต่อไร่ถ้าใช้แรงงานคนจะใช้เวลา 45.29 ชั่วโมง คิดเป็นค่าใช้จ่าย 1,083.10 บาท แต่ถ้าใช้เครื่องเกี่ยวนวดจะใช้เวลาเพียง 0.27 ชั่วโมง คิดเป็นค่าใช้จ่าย 570.31 บาท (สำนักวิจัยเศรษฐกิจการเกษตร, 2557) การใช้รถเกี่ยวนวดมีต้นทุนการเก็บเกี่ยวต่ำกว่าการใช้แรงงานคนอยู่ 47.34 เปอร์เซ็นต์ และต้นทุนการเก็บเกี่ยวมีแนวโน้มสูงขึ้น ดังนั้นหากมีการวางแผนปฏิบัติงานเส้นทางเดินรถเกี่ยวนวดที่ดีก็จะสามารถช่วยลดต้นทุนทางโลจิสติกส์ของข้าวลงได้

การเก็บเกี่ยวและการขนส่งข้าว

การเก็บเกี่ยวข้าวโดยใช้แรงงานคน เกิดการสูญเสีย ดังนี้ 1)การสูญเสียจากการเกี่ยวข้าว 2)การสูญเสียจากการตากข้าวเป็นขั้นตอนลดความชื้นของข้าวก่อนการการตากที่นานเกินไปทำให้ข้าวมีการร่วงหล่นมากยิ่งขึ้น 3)การสูญเสียจากการมัดฟ่อน 4)การสูญเสียข้าวเปลือกขณะขนย้ายไปสถานที่นวดข้าว เป็นการขนฟ่อนข้าวมารวมกองไว้เพื่อรอการนวด 5)การสูญเสียจากการนวด หากนวดด้วยเครื่องนวดข้าวจะเกิดความสูญเสียน้อย เนื่องจาก เครื่องนวดข้าวที่มีใช้ในประเทศไทย มีสมรรถนะการทำงานที่ดีและเหมาะสม โดยรวมแล้วการสูญเสียที่เกิดจากใช้แรงงานคนเกี่ยวข้าว ขนย้าย ไปจนถึงการนวดข้าว มีประมาณ ร้อยละ 5 (สมชาย, 2552)

การเกี่ยวข้าวโดยใช้เครื่องเกี่ยวนวดข้าวได้เปอร์เซ็นต์ต้นข้าวที่สูงกว่า จึงช่วยเพิ่มผลผลิตข้าวต่อไร่ให้กับเกษตรกรได้ (สมชาย , 2552) ในประเทศไทยเกษตรกรนิยมขายข้าวภายหลังการเก็บเกี่ยวทันที เมื่อข้าวถึงโรงสีที่รับซื้อจะนำข้าวที่มีความชื้นสูงไปอบลดความชื้น ซึ่งไม่ส่งผลกระทบต่อเมล็ดข้าวมากเท่ากับการตากแผ่ในแปลงนา นอกจากการสูญเสียระหว่างการเก็บเกี่ยวแล้ว เกษตรกรยังเผชิญกับปัญหาการเก็บเกี่ยวข้าวให้ทันเวลา ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญที่มีผลต่อผลผลิตและคุณภาพข้าว เนื่องจากสภาพการผลิตข้าวในประเทศไทย เกษตรกรที่อยู่ใน พื้นที่เดียวกันจะใช้พันธุ์ข้าวชนิดเดียวกัน และปลูกข้าวในช่วงเดียวกัน จึงทำให้ต้องเกี่ยวข้าวในเวลาเดียวกัน เนื่องจากระยะสุกแก่ที่เหมาะสมกับการเก็บเกี่ยวอยู่ในช่วงสั้น ประมาณ 25-35 วันหลังออกดอก การเร่งเก็บเกี่ยวก่อน หรือหลังระยะสุกแก่อันเป็นช่วงเวลาที่ไม่เหมาะสมจะเกิดการสูญเสียเพิ่มขึ้น (วินิต และคณะ, 2543)

ระบบโลจิสติกส์ที่มีประสิทธิภาพมีความสำคัญต่อการกระจายสินค้าไปสู่ผู้บริโภคปลายทางทั่วโลก เพราะระบบโลจิสติกส์จะเป็นตัวเชื่อมหน่วยต่างๆในระบบเข้าด้วยกัน อันได้แก่ ผู้ผลิต ผู้รวบรวม ผู้ส่งออก และผู้บริโภค โดยการขนส่งจะเป็นตัวเชื่อมหน่วยต่างๆนี้เข้าด้วยกัน โดยสัดส่วนต้นทุนการขนส่งเป็นสัดส่วนใหญ่ของต้นทุนในระบบโลจิสติกส์ โดยจากการวิเคราะห์ต้นทุนพบว่าต้นทุนการขนส่งมีค่าประมาณ 35-50% ของระบบต้นทุนโลจิสติกส์ทั้งหมด (ศักรธร, 2559)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สุภกิจ (2554) ได้ศึกษาการคำนวณเชิงวิวัฒนาการโดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm : GA) ให้ความเห็นว่า GA สามารถแก้ปัญหาและหาผลลัพธ์ได้ดี เนื่องจาก GA ใช้การแข่งขันระหว่างประชากร

ในการค้นหาผลลัพธ์ แต่จะมีข้อด้อยในด้านการแบ่งปันข้อมูลระหว่างประชากร และได้ทำการทดสอบหาผลลัพธ์เปรียบการคำนวณเชิงวิวัฒนาการระหว่าง GA และ พาติคอลสวอมออปติมัยเซชัน (Particle Swarm Optimization : PSO) เปรียบเทียบโดยใช้ฟังก์ชั่นทางคณิตศาสตร์ที่รู้ค่าที่ดีที่สุดและผลลัพธ์ที่ดีที่สุด พบว่าการค้นหาผลลัพธ์ของฟังก์ชั่น Peak นั้น GA หาผลลัพธ์ได้เร็วกว่า PSO

Kallaya and Supachai (2017) ต้องการผลกำไรสูงสุดด้วยการจัดตารางรถตัดอ้อยให้เป็นเส้นทางที่ได้ผลดีที่สุด (optimal route) สู่แปลงเก็บเกี่ยวในขณะที่ให้ผลผลิตที่ได้สูงสุด (peak yield) และให้คำแนะนำว่าเกษตรกรควรปลูกพันธุ์ใกล้เคียงกันเพื่อสะดวกต่อการจัดการไร่แบบเดียวกันในกลุ่มที่จะให้รถตัดอ้อยร่วมกัน และแสดงให้เห็นว่าไดนามิกโปรแกรมมิงอัลกอริทึม (dynamic programing algorithm : HDPA) กับ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ฮิวริสติกส์ด้วย VRPTW (heuristics based on VRPTW mathematic model : HVRPTW) ให้ความแตกต่างผลลัพธ์กำไรสูงสุด 0.28 เปอร์เซ็นต์ โดยHDPA ใช้เวลาประมวลผลเฉลี่ย 21.1 วินาที ส่วน HVRPTW ใช้เวลาประมวลผลเฉลี่ย 77,323.7 วินาที นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่า HDPA สามารถประมวลผลแก้ปัญหา 5 ปัญหา สำหรับแปลงขนาด 30, 40 และ 50 แปลงได้

อุปกรณ์และวิธีการ

พื้นที่ศึกษา

จากการนำข้อมูลแปลงนาข้าวจากระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์การใช้ประโยชน์ที่ดินของกรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ในพื้นที่อำเภอบางน้ำเปรี้ยว จังหวัดฉะเชิงเทรา พบว่าแปลงนาข้าวในอำเภอบางน้ำเปรี้ยวมีจำนวนทั้งสิ้น 483 แปลง มีพื้นที่เฉลี่ยต่อแปลงเท่ากับ 500 ไร่ และแปลงนาข้าวที่มีพื้นที่ต่ำกว่า 30 ไร่มีจำนวนทั้งสิ้น 263 แปลง มีขนาดพื้นที่เฉลี่ยต่อแปลงเท่ากับ 10.6 ไร่ งานวิจัยนี้ต้องการวางแผนเส้นทางเดินรถเกี่ยวนวดระหว่างแปลงที่มีขนาดต่ำกว่า 30 ไร่ เนื่องจากการศึกษาภาคสนามพบว่าความสามารถเกี่ยวนวดของรถเกี่ยวนวดสามารถทำงานได้วันละ 30 ไร่ จึงทำการพัฒนาแผนปฏิบัติงานของรถเกี่ยวนวดแต่ละคันเป็นแผนปฏิบัติงานแบบรายสัปดาห์ หากกำหนดให้พื้นที่ศึกษามีรถเกี่ยวนวดปฏิบัติงานอยู่จำนวน 5 คัน จึงทำการแบ่งกลุ่มย่อยออกเป็น 5 กลุ่มตามจำนวนรถเกี่ยวนวดที่ปฏิบัติงานได้ในพื้นที่ โดยที่รถเกี่ยวนวดแต่ละคันมีความสามารถในการเกี่ยวนวดได้ 30 ไร่ต่อวัน เมื่อใช้รถเกี่ยวนวด 5 คัน พื้นที่ที่ทำงานได้ในหนึ่งสัปดาห์จะเท่ากับ 5คัน x 30 ไร่/วัน*คัน x 7 วัน/สัปดาห์ = 1050 ไร่ต่อสัปดาห์ เผื่อสภาพอากาศไม่เอื้ออำนวยอาจทำให้การเกี่ยวข้าวได้น้อยกว่าที่คาดการณ์ไว้ 10 เปอร์เซ็นต์ จำนวนแปลงที่ต้องการนำมาพัฒนาแผนการปฏิบัติงานของรถเกี่ยวนวดจะ เท่ากับ 0.9 x 1050 ไร่ต่อสัปดาห์ /10.6 ไร่ต่อแปลง = 90 แปลงต่อสัปดาห์ งานวิจัยนี้จึงได้ทำการสุ่มแปลงนาข้าวขนาดเล็กออกมาจำนวน 90 แปลง โดยเป็นการสุ่มหาพิกัดแปลงนาข้าวรอบๆ ศูนย์วิจัยข้าวฉะเชิงเทรา, กรมการข้าว เพื่อทดสอบแผนการการปฏิบัติงานของรถเกี่ยวนวดข้าวที่ได้พัฒนาขึ้น จากนั้นทำการหาพิกัดของแปลงดังกล่าวโดยใช้ระบบแผนที่ของบริษัทกูเกิล (Google LLC)

การออกแบบแผนการปฏิบัติงานของรถเกี่ยวนวดข้าว

ประกอบไปด้วย 2 ขั้นตอน คือ 1) การจัดกลุ่มของแปลงตามหลักการวิเคราะห์การจัดกลุ่ม (Cluster Analysis) และ 2) การคำนวณหาเส้นทางการปฏิบัติงานของรถเกี่ยวนวดในแต่ละกลุ่มย่อยตามหลักของรูปแบบปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (Traveling Salesman Problem)

การวิเคราะห์การจัดกลุ่ม (Cluster Analysis : CA)

การวิเคราะห์การจัดกลุ่ม (Cluster Analysis : CA) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ทางสถิติวิธีหนึ่งที่มีวัตถุประสงค์เพื่อให้สามารถจัดกลุ่มคุณสมบัติของข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์ โดยที่การวิเคราะห์นั้นมีหลักการคือแบ่งกลุ่มข้อมูลออกเป็นกลุ่มย่อยๆ โดยแบ่งข้อมูลที่คล้ายกันอยู่ในกลุ่มเดียวกันโดยความคล้ายกันอาจเป็นคุณสมบัติของข้อมูลที่ผู้วิจัยกำหนดขึ้น (ยุทธ, 2556) ซึ่งไม่จำเป็นต้องทราบจำนวนกลุ่มข้อมูลมาก่อน หรือไม่จำเป็นต้องทราบว่าแต่ละข้อมูลอยู่ในกลุ่มใดมาก่อน การวิเคราะห์กลุ่มข้อมูลนั้นประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ การวัดระยะห่างหรือความคล้าย และ เทคนิควิธีการแบ่งกลุ่ม โดยการวัดระยะห่างหรือความคล้าย โดยวัดความห่างตามชนิดข้อมูลได้ 2 ประเภทคือ ข้อมูลเชิงปริมาณ และ ข้อมูลเชิงคุณภาพ โดยการวัดระยะห่างข้อมูลเชิงปริมาณได้แก่ ค่าระยะห่างแบบยูคลิด เป็นวิธีมาตรฐานและนิยมในการหาค่าระยะทาง ส่วนการวัดระยะห่างข้อมูลเชิงคุณภาพจะเป็นข้อมูลที่อยู่ในรูปความถี่ ได้แก่ ค่าระยะห่างไคสแควร์ โดยในงานวิจัยนี้ใช้การวิเคราะห์การจัดกลุ่มแบบเคมีน (K-mean Cluster Analysis)

ปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (Traveling Salesman Problem: TSP)

ปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (Traveling Sale man Problem : TSP) เป็นรูปแบบการดำเนินการแก้ปัญหาการขนส่งโดยมีวัตถุประสงค์คือการเดินทางไปหาลูกค้าให้ครบทุกรายโดยใช้ค่าใช้จ่ายต่ำที่สุดหรือทำให้ระยะทางเดินทางรวมต่ำที่สุดโดยลูกค้าแต่ละรายจะได้รับการบริการเพียงครั้งเดียว(สุทธิชาและ เสรี, 2554)

โดยมีแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Mathematic Model) ดังนี้

ฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์ (Objective function : Z)

Minimize total transportation cost

$$\min(Z) = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} XijDij \quad (1)$$

ภายใต้ข้อจำกัด Subject to

$$\sum_{j=1}^{n} Xij = 1 \,, \forall i \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^{n} Xij = 1 \,, \forall j \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^{K} Xijkl <= K - 1 \,, \forall l \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^{K} Xijkl = K = N \,, l = 1 \quad (5)$$

$$Xij = \{0,1\} \quad (6)$$

$$Xijkl = \{1\} \quad (7)$$

โดยที่ N แทน จำแปลงเก็บเกี่ยวทั้งหมด

n แทน แปลงที่ต้องการเก็บเกี่ยว n={1, 2, 3, …, n}

i แทน แปลงเก็บเกี่ยวที่ i i={1, 2, 3, …, n}

j แทน แปลงเก็บเกี่ยวที่ j j={1, 2, 3, …, n}

Xij แทนการเดินทางระหว่างแปลงเก็บเกี่ยว (arc) ที่ i ไป j

Xij = 1 เมื่อเกิดการเดินทางแปลงเก็บเกี่ยวที่ iไปj

Xij = 0 เมื่อไม่เกิดการเดินทางแปลงเก็บเกี่ยวที่ iไปj

Dij แทนระยะทางจากแปลงเก็บเกี่ยวที่ i ไป j

k แทนจำนวนการเดินทางระหว่างแปลงเก็บเกี่ยว (arc) ที่เกิดในวงการเดินทางย่อย (sub tour)

l แทนจำนวนวงรอบทั้งหมดที่เกิดวงการเดินทางย่อย (sub tour)

Xijkl แทนการเดินทางระหว่างแปลงเก็บเกี่ยวที่ i ไป j arc ที่ k ของ sub tour ที่ l

แบบจำลองคณิตศาสตร์นี้ มีฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์ดังแสดงในสมการที่ 1โดยมีตัวแปรตัดสินใจคือ Xij ชนิดของตัวแปรตัดสินใจนี้เป็นแบบไบนารี (Binary variable) ซึ่งกำหนดโดยสมการที่ 6 เพื่อเป็นตัวกำหนดเส้นทางเดินรถ ถ้า Xij=1 จะเกิดการเดินทางจากแปลงที่ i ไปแปลงที่ j เพื่อหาเส้นทางเดินรถที่ให้ระยะทางรวมสั้นที่สุด ภายใต้ข้อจำกัดแปลงทุกแปลงจะต้องถูกเดินทางจากไป 1 ครั้ง ซึ่งกำหนดโดยสมการที่ 2 และ แปลงทุกแปลงจะต้องถูกเดินทางเข้าไป 1 ครั้ง ซึ่งกำหนดโดยสมการที่ 3 และจะต้องกำหนดเงื่อนไขเพิ่มเพื่อไม่ให้เกิดวงการเดินทางย่อย (sub tour) โดยกำหนดให้ผลรวมค่าXijkl ที่เกิดการเดินทาง (Xijkl = 1 ดังแสดงในสมการที่ 7) ใน sub tourใดๆ มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับจำนวนการเดินทาง (arc) ใน sub tour นั้น ๆ ลบ1 เพื่อเป็นการกำจัด sub tour นั้นๆ ดังแสดงในสมการที่ 4 ทำวนไปจนกระทั่งเหลือการเดินทางเพียงวงเดียว (l=1) โดยที่จำนวน arc ในวงนั้นจะเท่ากับจำนวนแปลงทั้งหมด (N) ดังแสดงในสมการที่ 5

การทดสอบแผนปฏิบัติงานของรถเกี่ยวนวดข้าว

การศึกษาครั้งนี้ มีแนวความคิดที่จะพัฒนาแผนการปฏิบัติงานของรถเกี่ยวนวดข้าวจำนวน 90 แปลง โดยใช้วิธีการสุ่มหาพิกัดแปลงนาข้าวรอบๆ ศูนย์วิจัยข้าวฉะเชิงเทรา เพื่อทดสอบแผนในการจำลองสถาณการณ์การเก็บเกี่ยวแผนการการปฏิบัติงานของรถเกี่ยวนวดข้าวที่ได้พัฒนาขึ้น โดยใช้ระบบแผนที่ของบริษัทกูเกิล (Google LLC) ในการหาพิกัด จากนั้นทำการแบ่งกลุ่มด้วยวิธีเคมีน (K-mean Clustering) โดยใช้ระยะทางระหว่างแปลงเป็นตัววัดความคล้ายกันในเชิงปริมาณ ทำการแบ่งกลุ่มเป็นจำนวน 5 กลุ่มย่อยตามจำนวนรถเกี่ยวนวด ภายใต้สมมุติฐานรถเกี่ยวนวดเดินทางโดยไม่กลับมาที่โรงจอด ซึ่งเป็นสมมุติฐานที่สอดคล้องกับแบบจำลองปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (TSP) โดยใช้โปรแกรม Solver ซึ่งเป็นโปรแกรมเสริมของโปรแกรม Microsoft excel ทำการหาจุดศูนย์กลางของแต่ละกลุ่มย่อยโดยให้ระยะทางรวมของทุก ๆ แปลงไปยังจุดศูนย์กลางย่อยที่ได้มีระยะทางน้อยที่สุด หลังจากนั้นจึงจัดทำแผนการปฏิบัติงานของรถเกี่ยวนวดข้าว โดยใช้แบบจำลองปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย ในการแก้ปัญหาโดยใช้โปรแกรม Solver ซึ่งเป็นโปรแกรมเสริมของโปรแกรม Microsoft Excel โดยใช้วิธีการแก้ปัญหาด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในการหาคำตอบ เนื่องจากถ้าใช้การหาคำตอบแบบ Factorial จะใช้เวลานานมากในการหาคำตอบ เช่นถ้าเรามีจำนวนแปลงเพียง 20 แปลง และใช้ตัวประมวลผลที่มีความเร็ว 3.1 GHz. ในการประมวลผล จะต้องใช้เวลารอคำตอบนานกว่า 24 ปีเลยทีเดียว ดังนั้นการใช้ GA ในการหาคำตอบ ซึ่งจัดเป็นการหาคำตอบด้วยวิธีเมตาฮิวริสติกส์ (Meta Heuristic Method) โดยอาศัยหลักการค้นหาผลลัพธ์โดยการวนซ้ำสุ่มพารามิเตอร์ เพื่อหาผลลัพธ์ที่ดีที่สุด ซึ่งหลักการค้นหา

ดังกล่าวอาจให้ผลลัพธ์ในการค้นหาแต่ละครั้งไม่ซ้ำกัน นอกจากนี้แล้วผลลัพธ์ที่ได้จะไม่ใช่ผลเฉลยที่ดีที่สุด แต่จะเป็นผลลัพธ์ที่เหมาะสมและยอมรับได้ เนื่องจากมีความแตกต่างจากผลเฉลยที่ดีที่สุดไม่มาก และใช้เวลาในการคำนวณที่สั้นกว่ามาก

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การแบ่งกลุ่มโดยใช้ K-Mean Analysis ทำการแบ่งกลุ่มเป็นจำนวน 5 กลุ่มย่อย ได้จำนวนแปลงในแต่ละกลุ่มย่อยคือ 21, 22, 12, 34 และ 1 แปลง ตามลำดับ (Table 1) โดยได้แปลงในแต่ละกลุ่มย่อยแสดงใน Table 1 เช่นในกลุ่มย่อยที่ 1 ได้แปลงเลขที่ 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 30, 31, 32, 33, 44, 45, 46, 47, 67, 73, 74 และ 75 (Table 2) หลังจากที่ได้เลขที่แปลงในแต่ละกลุ่มย่อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปก็จะทำการหาเส้นทางในแต่ละกลุ่มย่อยโดยพิจารณาจากระยะทางของแต่ละแปลงในกลุ่มย่อยนั้นๆ (Table 3) มาแก้ปัญหาด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ได้แผนการปฏิบัติงานของรถเกี่ยวนวดข้าวในกลุ่มย่อยที่ 1 ดังนี้ 13-15-44-16-32-21-20-18-19-17-45-31-33-46-47-73-14-74-30-67-75-13 ได้ระยะทางรวมในกลุ่มย่อยเท่ากับ 41.93 กิโลเมตร (Table 4)

Table 1 K-Mean Cluster Analysis

group#	Group	lat CG.	long CG.	min lat	max lat	min long	max long			
21	1	13.73594173	101.0486974	13.4928529	14.0080825	100.7843	101.5003			
22	2	13.85723901	101.1068693							
12	3	13.68468417	101.327015					Min		
34	4	13.79455956	101.123177					463.78		
1	5	13.86805861	100.9553653							
90									Min	
Plot no.	Plot code	lat	long	Dis.to1	Dis.to2	Dis.to3	Dis.to4	Dis.to5	Distance	Group
1	577	13.872784	100.9487219	11.6935976	10.9647615	29.15094	13.19212	0.562524419	0.562524	5
2	2367	13.8546001	100.9251852	11.8179634	12.5375274	30.10319	2.280101	2.280100865	2.280101	4
3	4194	13.8837494	100.9093068	14.0185251	13.753996	31.92748	3.35739	3.357389748	3.35739	4
4	4378	13.9520643	100.891454	18.4417842	16.2400264	35.2647	7.283213	7.283212934	7.283213	4
5	4559	13.9397645	100.9803746	14.8328697	10.4213699	29.69611	5.240004	5.24000449	5.240004	4
6	4596	13.8694046	100.9927237	9.98604071	7.92065509	26.35333	2.579404	2.579404174	2.579404	4
7	5164	13.8775706	101.00165	10.2974713	7.3944314	26.09875	3.26039	3.260389968	3.26039	4
8	7593	13.876904	101.0282576	9.82811627	5.59134902	24.51243	5.066467	5.066466925	5.066467	4
9	10896	13.873071	101.0282576	9.56645185	5.53311869	24.37034	5.041448	5.041447964	5.041448	4
10	11388	13.8535717	101.0546934	8.12700593	3.60902124	22.11039	6.926152	6.926152428	3.609021	2
11	12992	13.8382377	101.0481703	7.05851593	4.2571524	21.96467	6.726017	6.726017223	4.257152	2
12	14363	13.8197356	101.0411322	5.8052933	5.2221086	21.81621	6.792586	6.792586262	5.222109	2
13	14499	13.8082336	101.0344374	5.08425698	6.03421265	21.914	6.841597	6.841597267	5.084257	1
14	16967	13.7927299	101.0596716	3.99087929	5.5152762	19.89623	8.877762	8.877762262	3.990879	1
15	17107	13.7783923	101.0217344	3.46998899	8.00660493	22.0344	7.697416	7.697415597	3.469989	1
16	18371	13.748047	101.014868	2.47916964	9.85206437	21.9774	9.242745	9.242745265	2.47917	1
17	18497	13.7255356	101.0445654	0.77255568	10.0530816	19.69181	11.60133	11.60133396	0.772556	1
18	18972	13.7086923	101.0320341	2.20389505	11.4769292	20.42098	12.20261	12.2026123	2.203895	1
19	20124	13.6935156	101.0641348	3.11517243	11.6754024	18.14896	14.19055	14.19054608	3.115172	1
20	21352	13.7028552	101.0145247	3.28202918	12.4126937	21.59825	12.10788	12.10787884	3.282029	1
21	22307	13.7263693	100.9846556	4.46797284	12.3552543	23.79726	9.983273	9.983273085	4.467973	1
22	23787	13.815735	100.9705793	7.70498653	9.83039478	26.20372	3.759852	3.759852071	3.759852	4
23	24945	13.8413839	100.9870151	8.42895246	8.34198908	25.8317	2.85601	2.856009694	2.85601	4
24	24948	13.8378161	101.0405	7.05205154	4.77155708	22.416	6.233924	6.233924288	4.771557	2
25	25326	13.8536728	101.0841862	8.48449272	1.58436126	20.41315	8.943897	8.943896827	1.584361	2
26	25591	13.9083703	101.0788785	12.0784521	4.02211152	23.05129	8.964837	8.964836906	4.022112	2
27	25887	13.9055961	101.030293	11.7748309	6.24910829	25.52497	5.782524	5.78252442	5.782524	4
28	26136	13.8984623	100.9804826	12.161667	9.17283978	28.09459	2.721142	2.721142345	2.721142	4
29	27106	13.8707991	100.9904389	10.1363235	8.08800138	26.53785	2.427457	2.427456668	2.427457	4
30	27561	13.8004598	101.0608201	4.52965019	5.04427767	20.02947	8.643009	8.643009459	4.52965	1
31	28701	13.7517766	101.0570435	1.23508263	8.04817287	19.19465	10.6582	10.65820367	1.235083	1
32	28744	13.7284318	101.0182481	2.16395875	10.7880832	21.5177	10.56622	10.56621751	2.163959	1
33	29356	13.7461074	101.0827927	2.45491865	7.8459762	17.37613	12.17021	12.17020871	2.454919	1
34	30187	13.8041273	101.1178117	6.69906569	3.74167666	16.62208	12.0456	12.04560067	3.741677	2
35	30718	13.8837979	101.1730866	13.3322083	4.92280128	17.36556	15.06198	15.06197501	4.922801	2
36	30756	14.0080825	101.2311082	22.6057215	13.4839939	23.27506	21.33884	21.33884029	13.48399	2
37	32530	13.967106	101.1531739	17.5037463	8.22660262	22.88292	15.26423	15.26423483	8.226603	2
38	33300	13.9457819	101.1212449	15.3198712	6.18945792	22.93805	12.63981	12.63980597	6.189458	2
39	33597	13.9247892	101.0855393	13.2761264	4.88781049	23.49659	9.797912	9.797912085	4.88781	2
40	34546	13.898129	101.0340409	11.2365233	5.76303757	25.01119	5.81162	5.811620273	5.763038	2
41	35683	13.9164582	100.9732728	13.4991697	10.0831988	29.18078	3.560828	3.560828024	3.560828	4

42	36499	13.8747988	100.9461503	11.9106853	11.1556065	29.37176	0.787767	0.787766934	0.787767	4
43	36548	13.8137959	100.95645	8.32897491	10.8031348	27.07652	3.744875	3.744874812	3.744875	4
44	36791	13.7731185	100.9959321	4.45372802	9.60645777	23.64562	7.123825	7.123825323	4.453728	1
45	173	13.7437729	101.0450272	0.59675029	8.91650001	19.87973	10.57439	10.5743932	0.59675	1
46	186	13.7294323	101.1222749	5.09667849	8.88249687	14.46054	14.97095	14.97094535	5.096678	1
47	1968	13.7090871	101.17137	8.66485697	11.1492822	10.8707	18.50564	18.50563834	8.664857	1
48	3999	13.8331319	101.1081986	7.8630716	1.66591728	18.2449	10.81737	10.81736516	1.665917	2
49	4189	13.8511329	101.1521439	10.6827933	3.15222866	16.65819	13.62786	13.6278596	3.152229	2
50	4367	13.8494662	101.1816697	12.0640427	5.18901638	15.16091	15.66762	15.66761539	5.189016	2
51	6980	13.8047941	101.257544	15.1733433	11.0083276	9.574011	21.30239	21.30238895	9.574011	3
52	8740	13.7694505	101.2757401	15.8356481	13.1325252	6.835683	23.12927	23.12926832	6.835683	3
53	8759	13.741105	101.258574	14.4858686	13.1826869	6.120217	22.68125	22.68125112	6.120217	3
54	10775	13.6864052	101.3093858	18.3093708	18.2813687	1.222195	27.45545	27.45545424	1.222195	3
55	11550	13.6617194	101.2929063	17.6114915	18.622034	2.837219	27.29731	27.29731176	2.837219	3
56	11570	13.6110053	101.2795167	18.1099264	20.7503264	6.048692	28.54554	28.54553867	6.048692	3
57	11929	13.5816396	101.2496476	17.4816831	21.4167673	8.89107	28.33523	28.33522928	8.89107	3
58	11939	13.6336946	101.2276749	14.2226103	17.532802	7.704673	24.79002	24.79002268	7.704673	3
59	12196	13.6186799	101.2963395	18.9061204	21.0205975	5.022114	29.14816	29.1481649	5.022114	3
60	12723	13.5866454	101.3560776	23.578623	25.3827791	7.055646	33.78632	33.78631796	7.055646	3
61	13281	13.5556079	101.4453416	30.0642848	31.2825639	12.08227	40.09739	40.09738647	12.08227	3
62	13499	13.4928529	101.5002732	35.3865005	36.9999489	17.83589	45.64985	45.64984799	17.83589	3
63	14077	13.8585896	100.992288	9.3148771	7.90666109	26.02729	2.630113	2.630113153	2.630113	4
64	14391	13.8419403	100.988001	8.42810304	8.26956602	25.78606	2.884214	2.884213871	2.884214	4
65	15699	13.8338134	101.0204594	7.02860705	6.17749853	23.52241	5.075127	5.075127026	5.075127	4
66	15724	13.8161712	101.0433232	5.54823948	5.2206495	21.57504	7.046417	7.046417154	5.22065	2
67	15947	13.8005102	101.0606752	4.53123378	5.04788434	20.04002	8.632716	8.63271587	4.531234	1
68	16600	13.8124048	101.0912963	6.03947893	3.27486646	18.49867	10.13492	10.13492121	3.274866	2
69	16750	13.8558148	101.0882342	8.70951505	1.28957382	20.27026	9.206799	9.206798854	1.289574	2
70	16949	13.8530399	101.127021	9.72057251	1.42033152	18.03809	11.88949	11.8894931	1.420332	2
71	16987	13.8400776	101.108171	8.27464846	1.18753848	18.51976	10.71891	10.71890687	1.187538	2
72	17153	13.802512	101.1041292	5.97728336	3.78089388	17.39587	11.21692	11.21691819	3.780894	2
73	17562	13.7761565	101.0816107	3.58568696	5.85987214	18.07095	10.77459	10.77458933	3.585687	1
74	17679	13.7921384	101.0579374	3.92963584	5.61933864	19.99205	8.805254	8.805254238	3.929636	1
75	17762	13.8103621	101.0368624	5.19953292	5.81339436	21.81791	6.889873	6.889873391	5.199533	1
76	18187	13.8176511	100.9903818	6.92655824	8.48911673	24.97401	4.234978	4.234978137	4.234978	4
77	18367	13.8140066	100.9459222	8.90524114	11.4990152	27.76819	3.786077	3.786076618	3.786077	4
78	18491	13.8322286	100.9199393	11.0937334	13.0131068	29.87628	3.476661	3.476661245	3.476661	4
79	18735	13.8672667	100.8847181	14.4958232	15.3440431	33.01655	4.874961	4.874960999	4.874961	4
80	18758	13.8866056	100.8538273	16.9961372	17.5770869	35.49839	7.12204	7.122040284	7.12204	4
81	19302	13.9028601	100.8235139	19.3408542	19.8033107	37.86296	9.409315	9.409315186	9.409315	4
82	19332	13.9303221	100.7992632	21.8198402	21.8156429	40.16606	11.59623	11.59622937	11.59623	4
83	19361	13.9423708	100.7926231	22.6953366	22.4645728	40.93608	12.34451	12.34450614	12.34451	4
84	19764	13.9493755	100.7900248	23.1397525	22.7678662	41.30905	12.7136	12.7135956	12.7136	4
85	20116	13.9698281	100.7871378	24.2106684	23.3893264	42.12813	13.56644	13.56644435	13.56644	4
86	20186	13.9958815	100.7842508	25.585948	24.2291668	43.16978	14.73741	14.73741374	14.73741	4
87	20382	14.0031647	100.9104123	20.7609615	16.885933	36.18309	9.824792	9.824792199	9.824792	4
88	20740	13.9863569	100.9283116	19.1716342	15.2041768	34.49799	8.373311	8.373310545	8.373311	4
89	21191	13.9642248	100.9629554	16.8259367	12.3733718	31.6711	6.656103	6.656103065	6.656103	4
90	21938	13.9544188	101.0016411	15.4206163	9.88336611	29.16219	6.760428	6.760428071	6.760428	4

Table 2 Group 1, Clustering Details

Plot no.	lat	long
13	13.80823	101.0344
14	13.79273	101.0597
15	13.77839	101.0217
16	13.74805	101.0149
17	13.72554	101.0446
18	13.70869	101.032
19	13.69352	101.0641
20	13.70286	101.0145
21	13.72637	100.9847
30	13.80046	101.0608
31	13.75178	101.057
32	13.72843	101.0182
33	13.74611	101.0828
44	13.77312	100.9959
45	13.74377	101.045
46	13.72943	101.1223
47	13.70909	101.1714
67	13.80051	101.0607
73	13.77616	101.0816
74	13.79214	101.0579
75	13.81036	101.0369

Table 3 Group 1, Distance between each plot

	13	14	15	16	17	18	19	20	21	30	31	32	33	44	45	46	47	67	73	74	75
13	0	2.04353	2.237845	4.36688	5.7488	6.87035	8.17647	7.39979	6.61105	1.89779	4.1962148	5.61849028	5.43214514	3.59577	4.50741	8.14231	11.665	1.88721	3.93618	1.96536	0.22264
14	2.044	0	2.798371	4.36608	4.75213	6.10412	6.85271	6.9398	6.91073	0.53922	2.8315903	5.27755377	3.59081381	4.60149	3.52592	6.14284	9.62857	0.54129	1.89719	0.12643	1.98925
15	2.238	2.79837	0	2.14676	3.9728	4.86153	6.54659	5.23575	4.40803	3.09707	3.0509612	3.4556574	4.76571305	1.81717	2.87909	7.71612	11.3785	3.09008	4.13434	2.67201	2.44042
16	4.367	4.36608	2.146759	0	2.5713	2.96256	5.07086	3.11832	2.56575	4.8096	2.9214658	1.37339668	4.68871471	2.16791	2.10178	7.52155	11.1282	4.80563	4.99702	4.2529	4.55971
17	5.749	4.75213	3.972798	2.5713	0	1.44856	2.58933	2.59723	4.13418	5.29003	2.0049138	1.82685661	2.99536734	4.6947	1.25878	5.36869	8.82282	5.29132	4.32825	4.6873	5.87711
18	6.87	6.10412	4.861526	2.96256	1.44856	0	2.45002	1.27351	3.48924	6.63617	3.4373685	1.66131261	4.35100956	5.09577	2.58125	6.38895	9.61422	6.63651	5.77677	6.02881	7.02312
19	8.176	6.85271	6.546587	5.07086	2.58933	2.45002	0	3.48323	5.93412	7.38269	4.0496773	3.9785727	3.85043164	7.23291	3.70993	4.71542	7.47683	7.38649	5.82833	6.8184	8.27911
20	7.4	6.9398	5.235747	3.11832	2.59723	1.27351	3.48323	0	2.62298	7.45389	4.4723242	1.78338796	5.57632397	5.01503	3.52148	7.65759	10.8309	7.45276	6.85626	6.85019	7.57641
21	6.611	6.91073	4.408031	2.56575	4.13418	3.48924	5.93412	2.62298	0	7.3317	5.2934914	2.32224722	6.90706302	3.31821	4.33527	9.49808	12.9384	7.32696	7.52038	6.79424	6.8238
30	1.898	0.53922	3.097068	4.8096	5.29003	6.63617	7.38269	7.45389	7.3317	0	3.3692331	5.77312241	4.04517673	4.8585	4.06036	6.48071	9.89621	0.01059	2.20681	0.60765	1.78872
31	4.196	2.83159	3.050961	2.92147	2.00491	3.43737	4.04968	4.47232	5.29349	3.36923	0	3.12415569	1.81924768	4.46643	0.99621	4.7577	8.42053	3.37194	2.38816	2.78565	4.27552
32	5.618	5.27755	3.455657	1.3734	1.82686	1.66131	3.97857	1.78339	2.32225	5.77312	3.1241557	0	4.61755518	3.44648	2.12949	7.17818	10.6494	5.77104	5.47343	5.17903	5.79726
33	5.432	3.59081	4.765713	4.68871	2.99537	4.35101	3.85043	5.57632	6.90706	4.04518	1.8192477	4.61755518	0	6.27648	2.61079	2.95728	6.62416	4.05216	2.07499	3.60959	5.4498
44	3.596	4.60149	1.817167	2.16791	4.6947	5.09577	7.23291	5.01503	3.31821	4.8585	4.466427	3.44648267	6.27648341	0	3.94659	9.22409	12.8863	4.85064	5.91554	4.47512	3.81837
45	4.507	3.52592	2.879093	2.10178	1.25878	2.58125	3.70993	3.52148	4.33527	4.06036	0.9962097	2.12948527	2.6107934	3.94659	0	5.42116	9.04021	4.06104	3.37116	3.45407	4.62906
46	8.142	6.14284	7.716123	7.52155	5.36869	6.38895	4.71542	7.65759	9.49808	6.48071	4.7577005	7.17818117	2.9572784	9.22409	5.42116	0	3.66692	6.48989	4.27395	6.19902	8.11885
47	11.66	9.62857	11.37852	11.1282	8.82282	9.61422	7.47683	10.8309	12.9384	9.89621	8.4205283	10.6493925	6.62415837	12.8863	9.04021	3.66692	0	9.90613	7.7314	9.70045	11.6176
67	1.887	0.54129	3.090081	4.80563	5.29132	6.63651	7.38649	7.45276	7.32696	0.01059	3.3719425	5.7710383	4.05215591	4.85064	4.06104	6.48989	9.90613	0	2.21596	0.60776	1.77815
73	3.936	1.89719	4.134344	4.99702	4.32825	5.77677	5.82833	6.85626	7.52038	2.20681	2.3881645	5.47342954	2.07499135	5.91554	3.37116	4.27395	7.7314	2.21596	0	1.97085	3.88638
74	1.965	0.12643	2.672013	4.2529	4.6873	6.02881	6.8184	6.85019	6.79424	0.60765	2.7856471	5.17903328	3.6095897	4.47512	3.45407	6.19902	9.70045	0.60776	1.97085	0	1.92244
75	0.223	1.98925	2.44042	4.55971	5.87711	7.02312	8.27911	7.57641	6.8238	1.78872	4.2755162	5.7972592	5.44980282	3.81837	4.62906	8.11885	11.6176	1.77815	3.88638	1.92244	0

Table 4 Group 1, Routing

Route	From	To	Distance
13	13	15	2.237845
15	15	44	1.817167
44	44	16	2.167905
16	16	32	1.373397
32	32	21	2.322247
21	21	20	2.622977
20	20	18	1.273514
18	18	19	2.450022
19	19	17	2.589332
17	17	45	1.258777
45	45	31	0.99621
31	31	33	1.819248
33	33	46	2.957278
46	46	47	3.666917
47	47	73	7.731399
73	73	14	1.897188
14	14	74	0.126429
74	74	30	0.607653
30	30	67	0.010586
67	67	75	1.778152
75	75	13	0.222637
13		Tour Leng	41.92688

ทำการเปรียบเทียบระยะทางรวมในแต่ละกลุ่มย่อยระหว่างวิธีเชิงพันธุกรรม กับ วิธีฮิวริสติกส์โดยใช้อัลกอลิทึม (Algorithm) แบบ กรีดดี ฮิวริสติกส์ (Greedy Heuristic) โดยการเลือกเส้นทางเดินรถไปยังแปลงที่ใกล้ที่สุดก่อนในขณะนั้น ๆ โดยที่แปลงที่ผ่านการเดินทางไปแล้วก็จะไม่เดินทางไปอีก เป็นตัวเปรียบเทียบ ได้เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระยะทางรวมในแต่ละกลุ่ม ย่อยเป็น 19.08, 40.81, 9.05, 24.60 และ 0 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ โดยที่ความแตกต่างระยะทางรวมทั้ง 5 กลุ่มย่อยเท่ากับ 22.70 เปอร์เซ็นต์ (Table 5)

Table 5 Summary

		GA		Heuristic		
Group	no.of plot	Route	Distance(Km.)	Route	Distance(Km.)	%diff.
1	21	13-15-44-16-32-21-20-18-19-17-45-31-33-46-47-73-14-74-30-67-75-13	41.93	13-75-67-30-14-74-73-33-31-45-17-18-20-32-16-15-44-21-19-46-47-13	49.93	19.08
2	22	10-11-24-12-66-68-72-34-48-25-69-71-70-49-50-35-36-37-38-39-26-40-10	51.59	10-11-24-12-66-68-72-34-48-71-70-49-50-35-38-37-39-26-40-25-69-36-10	72.65	40.81
3	12	51-53-58-57-56-59-60-62-61-55-54-52-51	66.26	51-52-53-54-55-59-56-57-58-60-61-62-51	72.26	9.05
4	34	2-78-77-43-22-76-65-64-23-63-6-29-7-9-8-27-28-41-5-90-89-88-87-4-86-85-84-83-82-81-80-79-3-42-2	64.88	2-78-77-43-22-76-23-64-63-6-29-7-8-9-27-28-41-5-90-89-88-87-4-3-79-80-81-82-83-84-85-86-42-65-2	80.84	24.60
5	1	1-1	0.00	1-1	0.00	0.00
Total	90		224.67		275.68	22.70

สรุป

การพัฒนาแผนการปฏิบัติงานของรถเกี่ยวนวดโดยอาศัยขั้นตอนเชิงพันธุกรรมการจัดเส้นทางเดินรถเกี่ยวนวดโดยอาศัยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในการหาคำตอบ โดยเปรียบเทียบกับผลการจัดลำดับการเก็บเกี่ยว

ข้าวเปลือกด้วยการจำลองสถานการณ์การเก็บเกี่ยวแบบฮิวริสติก พบว่า การจัดลำดับการปฏิบัติงานด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมจะสามารถลดต้นทุนในการเคลื่อนย้ายรถเกี่ยวนวดข้าวลงไปถึง 22.70 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้แล้วงานวิจัยในอนาคตควรจะต้องคำนึงถึงรถขนส่งข้าวเปลือกไปยังจุดรับข้าว โดยรวมแผนการเดินรถเกี่ยวนวดกับรถขนส่งเข้ากันอย่างเป็นระบบ เพื่อที่จะได้ลดต้นทุนการขนส่งโดยรวมลงได้อีก

กิตติกรรมประกาศ

ทางคณะผู้วิจัยขอขอบศูนย์วิจัยข้าวฉะเชิงเทรา กรมการข้าว ที่ให้การสนับสนุนในการศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับการจัดการรถเกี่ยวนวดทั้งแบบญี่ปุ่น และแบบไทยประดิษฐ์

เอกสารอ้างอิง

ยุทธ ไกยาวรรณ. 2556. **การวิเคราะห์สถิติหลายตัวแปรสำหรับงานวิจัย**. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

วินิต ชินสุวรรณ, นคร แสงปลั่ง, สุรเวทย์ กฤษณะเศรณี, จารุวัฒน์ มงคลธนทรรศ, วสุ อุดมเพทายกุล, สมชาย ชวนอุดม, วราจิต พยอม, ณรงค์ ปัญญา, สุชาติ กลิ่นทองหลาง, ดาเรศร์ กิตติโยภาส, ชวาลวุฒฒ ไชยนุวัติ และ วีระ พิริยพันธุ์. 2543. **รายงานผลการศึกษา ระบบการใช้เครื่องจักรกลเกษตรสำหรับเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตและเพิ่มคุณภาพของผลผลิตข้าวหอมมะลิในเขตทุ่งกุลาร้องไห้**. โครงการการจัดระบบการใช้เครื่องจักรกลเกษตรเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตข้าวหอมมะลิในเขตทุ่งกุลาร้องไห้ เสนอต่อ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.

สมาคมผู้ส่งออกข้าวไทย. 2560. **สรุปสถานการณ์ส่งออกข้าวไทยปี 2559 และแนวโน้มและทิศทางการส่งออกข้าวไทย ปี 2560**. ข่าวสมาคมผู้ส่งออกข้าวไทย.

สำนักวิจัยเศรษฐกิจการเกษตร. 2557. **การศึกษาระบบการใช้เครื่องเกี่ยวนวด**. เอกสารวิจัยเศรษฐศาสตร์การเกษตร เลขที่118.

สุทธิชา ทับดารา และ เสรี เศวตเศรนี. 2554. **การจัดการขยะชุมชนใน**กรุงเทพ. วิศวกรรมสารมก. 78 (24): 34-45.

สุภกิจ นุตยะสกุล. 2554. **การคำนวณเชิงวิวัฒนาการระหว่าง เจเนติกอัลกอริทึม กับ พาติคอลสวอมออปติมัยเซชัน**. JOURNAL OF INFORMATION SCIENCE AND TECHNOLOGY VOL2 JUL-DEC 2011(2): 13-22.

สมชาย ชวนอุดม. 2552. **ความสูญเสียจากการเก็บเกี่ยวข้าวหอมมะลิโดยใช้แรงงานคนในพื้นที่ทุ่งกุลาร้องไห้**. บทความใน Postharvest Newsletter ปีที่ 8 ฉบับที่ 1 มกราคม - มีนาคม 2552.

ศักรธร บุญทวียุวัฒน์. 2559. **การออกแบบเส้นทางการขนส่งหลายรูปแบบเพื่อการส่งออกผลไม้**. วิศวสารลาดกระบัง ปีที่ 33 ฉบับที่ 1 มีนาคม 2559 : 78-83.

Kallaya Kittilertpaisan and Supachai Pathumnakul. 2017. **Integrating a multiple crop year routing design for sugarcane harvesters to plant a new crop.** Computer and Electronics in Agriculture 136 (2017): 58-70.

Effect of Multiple Curved Light Shelves on Daylighting in University Classrooms

Trodet Sok[1*] and Nuanwan Tuaycharoen[1]

ABSTRACT

The purpose of this study was to investigate the effects of characteristic of multiple curved light shelfs in university classrooms. There were seven types of curved light shelves investigated in term of illuminance levels and uniformity. This study compiled the illumination values from different shading models using DIALux 4.13 program, simulated at 8:00 am, 10:00 am, 12:00 pm, 2:00 pm and 4:00 pm on equinox (March 21st), summer solstice (June 21st) and winter solstice (December 21st). Following four orientations were investigated; north, south, east and west. All of the curved light shelves were installed inside the classroom with a size of 5 m wide and 8 m long with 3.5 m high for the simulations, where the most optimal one was selected. Each of the simulation was calculated under clear sky conditions in Bangkok, Thailand. The model was installed for the four-orientation façade of the building. The best type of multiple curved light shelves was the model with double external curved light shelves, which provided a better result for illuminance and uniformity on the south, north, east, west orientation façades.

Keywords: Curved light shelf, Daylighting, University classroom

*Corresponding author; e-mail address: soktrodet100@gmail.com

[1]Department of Building Innovation, Faculty of Architecture, Kasetsart University, Bangkok, 10900

INTRODUCTION

Good daylighting technique has shown to be an efficient method to maintain a comfortable indoor climate, reducing the energy consumption in buildings and reducing air-conditioning costs. This is because using daylight instead of artificial light can reduce energy consumption from artificial lighting. Also, proper daylighting technique can protect against sunlight and reduce heat gain into the inside building. Hence, this situation can reduce cool loads and operational costs as well. Other benefits of using daylighting are preventing eye strain and reducing stress. Commonly, a university classroom consists of many lighting problems such as glare from glazing windows, direct sunlight, low uniformity and low illuminance at the back of the room. Many studies in recent years have shown that using a light shelf could increase daylighting performance and protect against the sunlight entering into the building. The significant study conducted by Littlefair and his colleges (Littlefair, *et al*., 1994) suggested that a light shelf with a diffuse surface can result in increased interior daylight level and uniformity. A light shelf is usually positioned to prevent glare and maintain an adequate outside view. Its location was dictated by the room configuration, building orientation, ceiling height, building shape, and eye level of a person standing in the space. A light shelf is a horizontal reflective surface, at or above eye level, used both to distribute natural daylight into an occupied space and provide shading. Sunlight hits the upper surface of the light shelf and subsequently, reflect deeper into the interior of the building. Light shelves will improve the uniform illumination, increase daylighting performance in space and shaded un-wanted heat from direct sunlight (Lim and Heng, 2016). From the above evidences, it was likely that using light shelf could enhance lighting problems of a university classroom. Most of the studies in terms of light shelf were conducted in US and European. There are only a few studies conducted in Thailand. And, most of them investigated various characteristics of straight light shelf. Freewan (2010) found that the best light-shelf shapes are curved and chamfered in order to bounce more daylight deep into the interior space, thus improving both illuminance and uniformity (Freewan, 2010). Only one study in Thailand that explored the effect of curved light shelf was from a study by Kanchan (2017). Kanchan (2017) investigated the characteristics of a curved light shelf for a kindergarten classroom in Thailand. Her results indicated that the curved light shelf with 30° curved-down exterior member and 45° curved-up interior member were the best solutions for the kindergarten classroom. However, the study carried out by Kanchan (2017) explores the effects of characteristics of single curved light shelves. No study has been conducted in Thailand of multiple elements of curved light shelves.

From the above reasons, the purpose of this research was to develop multiple elements of curved light shelves suitable for daylighting in university classroom in Thailand. The results of this study will provide information of suitable multiple elements of curved light shelves to enhance the illuminance

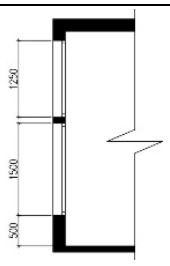
and uniformity in university classrooms in Thailand. And, the result could be used as a design guideline for daylighting in the university classroom and could be applied for other types of building with similar characteristics.

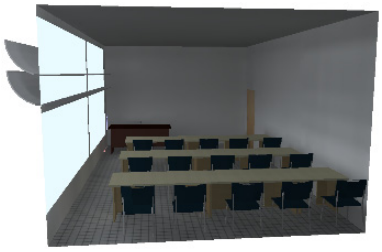
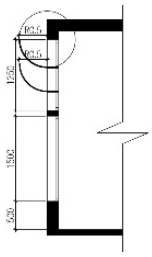
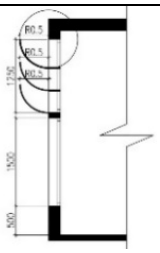
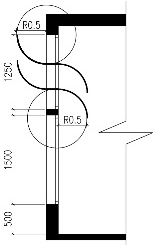
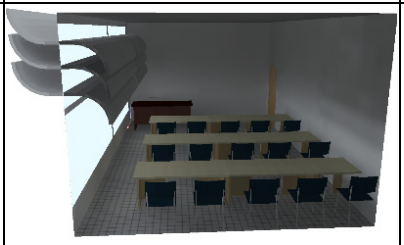
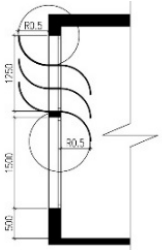
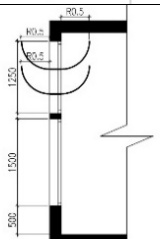
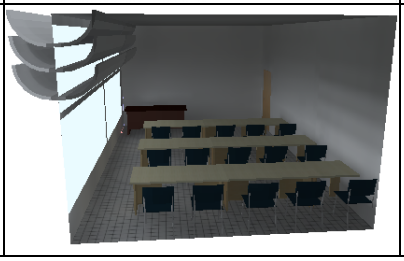
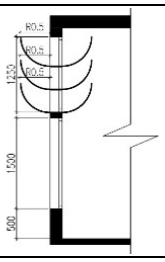
MATERIALS AND METHODS

This research study aimed to explore the effect of multiple curved light shelf on daylighting in university classroom which enhances daylighting to reach the standard requirement (300 lux) and increase the uniformity in a classroom (0.8) (IESNA, 2011). For the main study, the characteristic of multiple curved light shelf was the independent variable. Six different types of multiple curved light shelves were installed in the façade of the university classroom. The reason for choosing this multiple curved light shelves to be studied instead of modifying light shelf is the fact that each element would protect more sunlight, while reflecting more daylight into space. Therefore, the uniformity of the room would be increased. All of the multiple elements curved light shelves model were installed on the wall of university classroom (5m x 8m) for testing the simulation. This study compiles the illumination values from different shading models using the DIALux 4.13 program, simulated at 8:00 am, 10:00 am, 12:00 pm, 2:00 pm, 4:00pm in Equinox date (March 21st), in summer solstice (June 21st) and in winter solstice (December 21st). There were four orientations investigated, which are north, south, east and west. Each of the simulation was calculated under clear sky conditions in Bangkok, Thailand. Although clear sky is not a dominant sky in Bangkok (only 20% occurrence), the reason for choosing this sky condition to study due to the fact that the main aim of this research was to investigate the effect of shading device element of multiple curved light shelf on the performance of direct sunlight protection.

The size of the lower part of window was 1.5 m in height and 7.5 m in width. And above part of the window was 1.25 m in height and 7.5 m in width. The window with a clear glazing with the transmission of glass of 0.9 was installed at 0.5 m above the floor. This process was repeated for each of the models. Details of all models are described below.

Table 1 Options to be investigated in this study.

Description	Perspective view	2D section
Existing classroom: without any light shelf		

Description	Perspective view	2D section
First option: double external curved light shelves		
Second option: triple external curved light shelves		
Third option: double external up curved and internal down curved light shelves		
Fourth option: triple external up curved and internal down curved light shelves		
Fifth option: double external up curved and internal up curved light shelves		
Sixth option: Triple external up curved and internal up curved light shelves		

The dependent variables in this study consisted of 2 main factors; illuminance and uniformity. All of the models were installed in the university classroom with a size of 5 m wide and 8 m long with 3.5 m high. The classroom lecture is relied on projector screen presentation as a main visual task. DIALux 4.13 calculated the results from all the models by simulating with a 0.5 m x 0.5 m grid and 0.75 m above the floor level. Then, the results were analyzed in terms of the average annual illuminance and

uniformity. All seven models were simulated when the glazing faced towards south, north, east and west.

RESULTS AND DISCUSSION

1.Results of multiple curved light shelves on daylighting in south orientation

1.1 Results of average annual illuminance (lux) in south orientation

Figure 1 shows the results of the annual average illuminance (lux) from all the models in south orientation. It was found that all types of multiple curved light shelves can obtain higher illuminance values as requirement illuminance of 300 lux except for the fourth option. Among all of these options, the first option with double external up curved light shelf obtained the highest average annual illuminance (425 lux). The fourth option has the lowest average annual illuminance (299 lux).

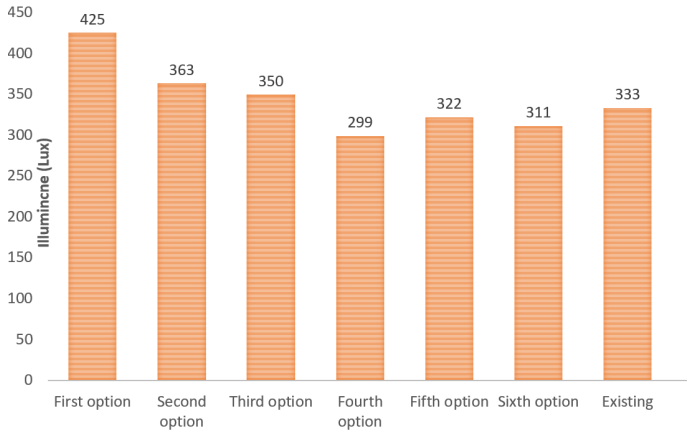


Figure 1 Average annual illuminance (lux) from six types of curved light shelf in south orientation

1.2 Results of average annual uniformity in south orientation

Figure 2 shows the average annual uniformity from all options and the existing model in south orientation. The uniformity values of all option models were lower than the existing except for the first option. The lowest uniformity was found in the fourth option (U= 0.105). The first option model has the highest average annual uniformity of 0.210. Thus, the results yielded the conclusion that the best option is the first option.

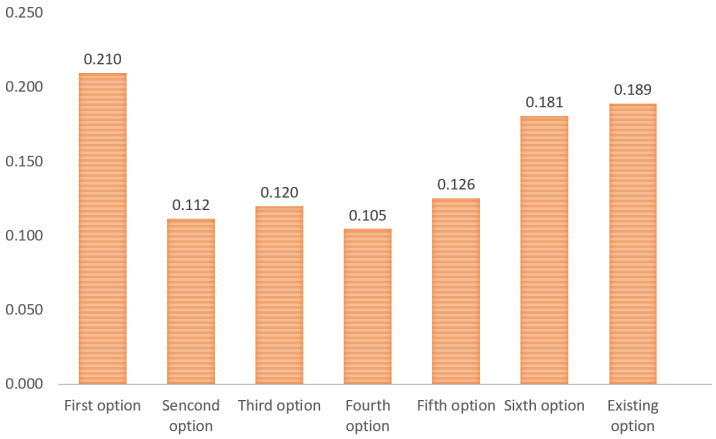


Figure 2 Average annual uniformity from six types of multiple curved light shelf in south orientation

2.Results of multiple curved light shelves on daylighting in north orientation

2.1 Results of average annual illuminance (lux) in north orientation

Figure 3 shows the average annual illuminance (lux) from all the investigated models and the existing one in north orientation. It was found that among the six multiple curved light shelves, the first option model had highest illuminance value. Additionally, the first option model had lower illuminance than the existing option, but higher than the five option models. However, all options cannot reach the standards. Nevertheless, the first option had the best multiple curved light shelves on daylighting performance in north orientation.

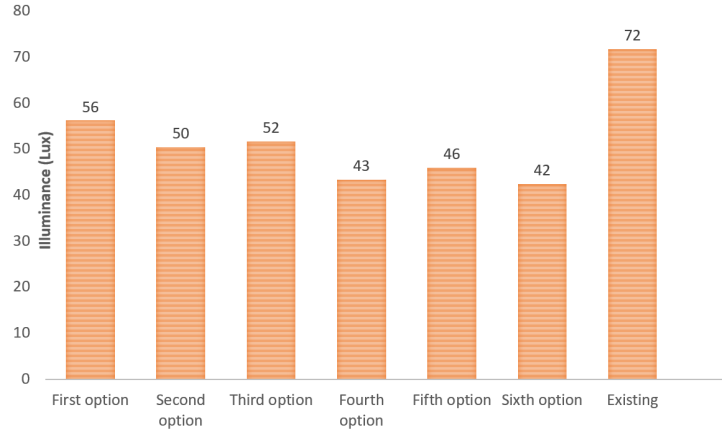


Figure 3 Average annual illuminance (lux) from six types of curved light shelf in north orientation

2.2 Results of average annual uniformity in north orientation

Figure 4 shows the average annual uniformity from all options and the existing model in north orientation. The uniformity values of all option models were lower than the existing except first option. The lowest uniformity was found in the sixth option model (U= 0.146). The first option model had the highest average annual uniformity of 0.441. Thus, the results yielded the conclusion that among the six multiple curved light shelves, the best option was found to be the first option model (double external up curved light shelf).

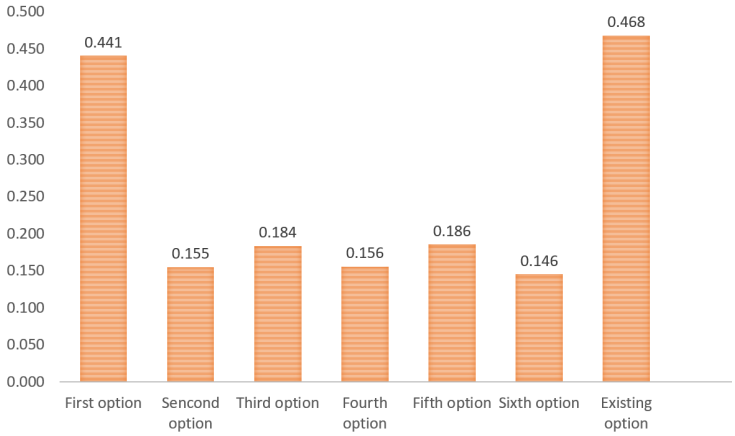


Figure 4 Average annual uniformity from six types of multiple curved light shelf in north orientation

3.Results of multiple curved light shelf on daylighting in east orientation

3.1 Results of average annual illuminance (lux) in east orientation

Figure 5 shows the average annual illuminance (lux) from all the investigated models and the existing one in east orientation. The fourth option had the lowest illuminance value (182 lux). It was found that among the six multiple curved light shelves, the first option model had the highest illuminance value (242 lux). Furthermore, the first option model had a lower illuminance than the existing model (344 lux), but higher than the other five option models. However, all options do not reach the standards except the existing one. The first option had the best multiple curved light shelf on daylighting performance in East orientation.

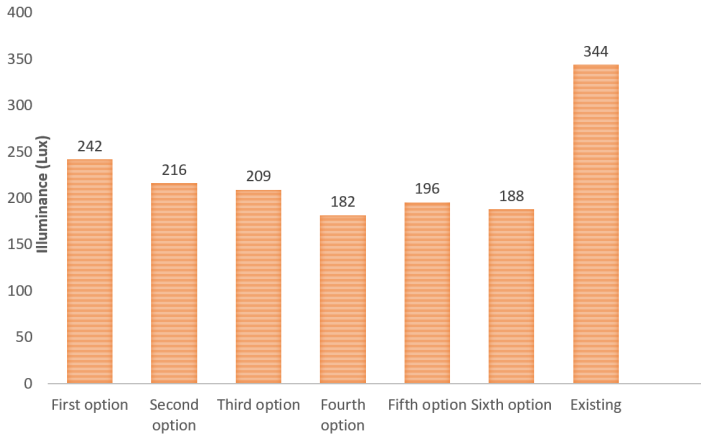


Figure 5 Average annual illuminance (lux) from six types of curved light shelf in east orientation

3.2 Results of average annual uniformity in east orientation

Figure 6 shows the average annual uniformity from all options and the existing model in east orientation. The uniformity values of all option models were lower than the existing one except for the first option. The lowest uniformity was found in the sixth option model (U= 0.126). The first option model had the highest average annual uniformity of 0.321. Thus, the results yielded the conclusion that among

the six multiple curved light shelves, the best option was the first option model (double external up curved light shelf).

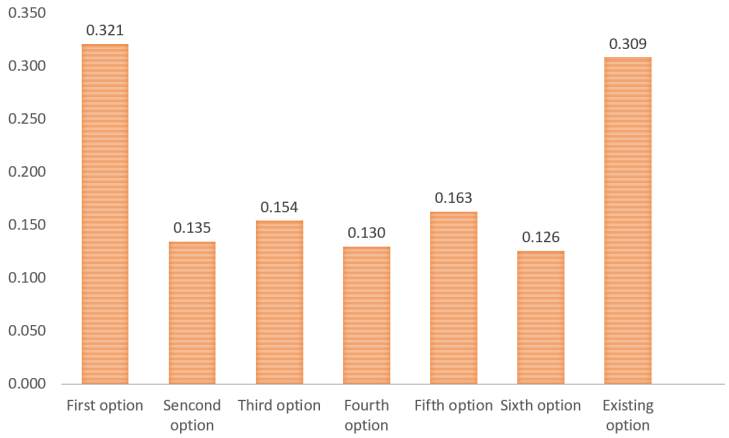


Figure 6 Average annual uniformity from six types of multiple curved light shelf in East orientation

4. Results of multiple curved light shelves on daylighting in west orientation

4.1 Results of average annual illuminance (lux) in west orientation

Figure 7 shows the average annual illuminance (lux) from all the investigated models and the existing in West orientation. Fourth option has lowest illuminance value (133 lux). It was found that among of six multiple curved light shelves, the first option model was highest illuminance value (184 lux). Even, first option model had lower illuminance than existing model (205 lux), but it was higher than another five option models. However, all options cannot reach the standard but the first option was the best multiple curved light shelf on daylighting performance in west orientation.

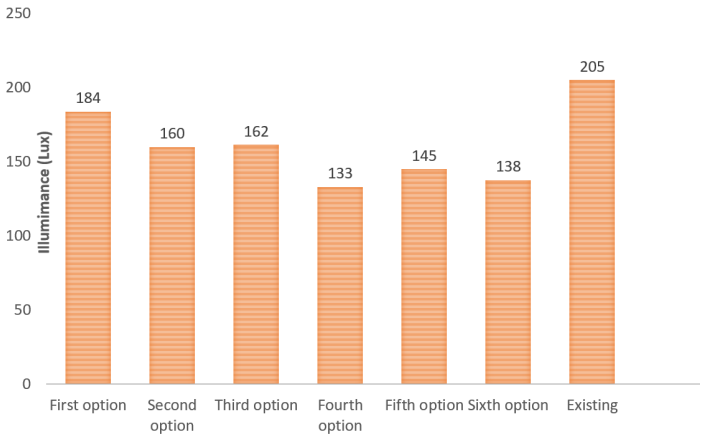


Figure 7 Average annual illuminance (lux) from six types of curved light shelf in west orientation

4.2 Results of average annual uniformity in west orientation

Figure 8 shows the average annual uniformity from all option and the existing model in West orientation. The uniformity value of all option models was lower than existing except first option. The lowest uniformity is the sixth option model (U= 0.130). The first option model had the highest average

annually uniformity of 0.357. Thus, the results yielded the conclusion that among of six multiple curved light shelves, the best option was first option model (double external up curved light shelf) in west orientation.

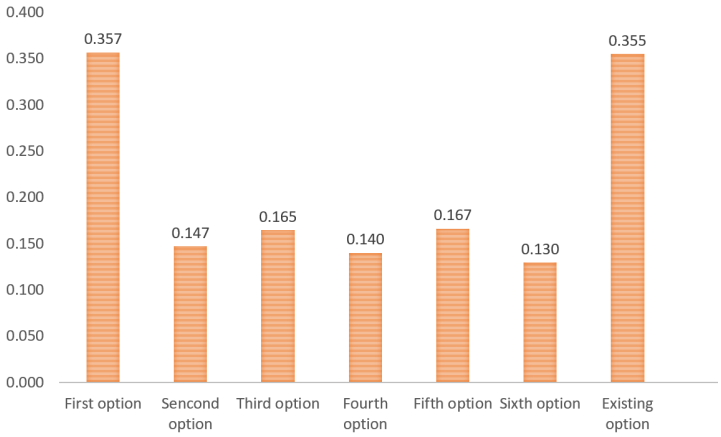


Figure 8 Average annual uniformity from six types of multiple curved light shelf in west orientation

CONCLUSION

The purpose of this research study was to investigate the effects of the multiple curved light shelves on daylighting in a university classroom in Thailand. There were four orientations to be explored, which were when the glazing faced towards south, north, east and west. The results in the south orientation concluded that the first model, which is the double external curved light shelves, seems to have a better average annual illuminance and uniformity than all models. The results in the north, east and west orientation indicated that the first model seems to have a better average annual illuminance than all models except for the existing model. However, the first model is the best option and obtain maximum uniformity values for daylighting in university classrooms in Thailand. In terms of practical implication for architects and designers, smart board could be selected as a material for these multiple curved light shelf models. And, for the best model, the first option with double external curved light shelves, the costs is only about 4606 THB (11.76m^2x 392THB). The outcomes of the study could be used as a design guideline for university classroom. For example, the university classroom where glare is an important issue such as lecture room containing VDT screens. This is because the curved element of light shelf could reflect more uniform sunlight. Therefore, contrast between the screens would be more reduced.

It should be noted that the dates of the simulations were equinox date (March 21st), summer solstice (June 21st) and winter solstice (December 21st) from 08:00 to 16:00 under clear sky conditions only as this study focused on performance of direct sunlight. For complete results, other sky conditions such as overcast sky and partly cloudy sky and other time periods should be explored.

ACKNOWLEDGEMENTS

I would like to express my special thanks to Faculty of Architecture in Kasetsart University for giving me the golden opportunity to carry out this wonderful project.

REFERENCES

Kanchan, R. 2017. **The Development of Curved Light Shelf for Classroom in Kindergarten.** M.S. Thesis, Faculty of Architecture, Kasetsart University.

Lim, Y. W. and Heng, C.Y.S. (2016). Dynamic Internal light shelf for tropical daylighting in high-rise office buildings. **Building and Environment**. 106: 155-166.

IESNA. 2011. **The IES Lighting Handbook (10th Edition): Reference and Application**. New York: IESNA.

Freewan, A. A. 2010. Maximizing the lightshelf performance by interaction between lightshelf geometries and a curved ceiling. **Energy Conversion and Management**. 51(8): 1600-1604.

Littlefair, P.J., Aizlewood, M.E. and Birtles, A.B. 1994. The performance of innovative daylighting systems. **Renewable Energy**. 5(5): 920-934.

Mohsenin, M. and Hu, J. 2015. Assessing daylight performance in atrium buildings by using climate based daylight modeling. **Solar Energy**. 119: 553-560.

การให้ความรู้ด้านเทคนิคของโครงการที่ต้องประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมระหว่างการจัดทำการมีส่วนร่วมของประชาชนกรณีศึกษา โครงการด้านพลังงาน

Technical Information Communication during Public Participation for Environmental Impact Assessment; the Case Study on Energy Related Project

ชโลทร จันทร์เศษ[1*] และ จีมา ศรลัมพ์[2]

Chalothorn Junsed[1*] and Cheema Soralump[2]

บทคัดย่อ

ปัจจุบันปัญหาความขัดแย้งจากโครงการพัฒนาด้านพลังงานขนาดใหญ่ ที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพนับวันยิ่งทวีความรุนแรงมากขึ้น เนื่องจากการขาดความรู้และความเข้าใจในการมีส่วนร่วมของประชาชนอย่างแท้จริง งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ วิเคราะห์ระดับความซับซ้อนของข้อมูลเชิงเทคนิคที่เหมาะสม ของการมีส่วนร่วมในแต่ละช่วงโดยใช้หลักการ (SWOT) เพื่อปรับปรุงกระบวนการรับฟังความคิดเห็นในรายงานการวิเคราะห์ผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่มีอยู่ให้พัฒนายิ่งขึ้น โดยใช้แบบสัมภาษณ์ออนไลน์เป็นเครื่องมือในการเก็บรวบรวมข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่างผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง รวมถึงการได้สัมภาษณ์เชิงลึกกับแกนนำผู้ต่อต้านชาวใต้ไม่เอาโรงไฟฟ้าถ่านหินซึ่งนับว่าเป็นการขับเคลื่อนทางสังคมที่แสดงให้เห็นถึงความล้มเหลวของการมีส่วนร่วมของประชาชนต่อโครงการที่นับว่าเป็นโครงการด้านหลังงานที่เป็นตัวขับเคลื่อนเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศ

ABSTRACT

Current issues in the conflict from the large energy project development, environmental impact and health days underscored more severe due to the lack of knowledge and understanding on the participation of the people truly. Therefore, this research has the objective analysis of the level of complexity of the appropriate technical information of participation in each interval by using the (SWOT) to improve hearing in the impact analysis report to the environment. By using online interviews as a tool to collect data from a sample group of stakeholders. Related research documents as well as in-depth interviews with leaders who oppose the southerners do not remove the coal-fired power plants, which are considered to be a social drive to demonstrate the failure of the participation of the citizen's project that is behind the project, tasks that are important economic drivers of the country.

Key words: public participation, environmental health impact assessment, citizen's right to know, access to information

[*]Corresponding, e-mail address: zchalothorn@thaioilgroup.com

[1]ภาควิชาสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

คำนำ

ในการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมของโครงการขนาดใหญ่ ด้านพลังงาน มีผู้มีส่วนได้ส่วนเสียจำนวนมาก หนึ่งในการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมฯ คือการจัดให้มีกระบวนการมีส่วนร่วมของประชาชน (public participation) โดยหลักการที่สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เสนอให้มีคือการกระบวนการรับฟังความคิดเห็น 3 รอบได้แก่ ค.1 ค.2 และ ค.3 หนึ่งในกระบวนการมีส่วนร่วมของประชาชนคือการนำเสนอข้อมูลของโครงการที่มีความหลากหลายในทุกแง่มุม รวมทั้งข้อมูลเชิงเทคนิคของโครงการ การเข้าถึงข้อมูล ซึ่งจะเป็นระดับที่มีความสำคัญมากที่สุดเป็นก้าวแรกที่ภาครัฐจะเปิดโอกาสให้ประชาชนแสดงความคิดเห็นและรับทราบรวมทั้งการให้ข้อมูลที่เป็นข้อเท็จจริงที่เป็นประโยชน์ต่อผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย การรับฟังความคิดเห็น เป็นกระบวนการที่เปิดให้ประชาชนมีส่วนร่วมทั้ง การทำ ค.1 รับฟังความคิดเห็นต่อขอบเขตการศึกษา และการทำ ค.2 การมีส่วนร่วมในการประเมินผล การเกี่ยวข้องเป็นการเปิดโอกาสให้ประชาชนมีส่วนร่วมในการปฏิบัติงาน หรือร่วมเสนอแนะ และ การทำ ค.3 ซึ่งเป็นการรับฟังความคิดเห็นต่อการร่างรายงาน ทั้งจากคู่มือการมีส่วนร่วมของประชาชนในการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม ปี พ.ศ. 2557 กล่าวโดยสรุปว่าหลักการการทำการมีส่วนร่วมเป็นดังรูปที่ 1



Fig 1 Principle of Public Participation, adapted from ONEP, 2014

อย่างไรก็ดี ถึงแม้ว่าในกระบวนการปัจจุบัน จะมีแนวทางในการจัดทำการมีส่วนร่วมอย่างชัดเจน ความขัดแย้งระหว่างผู้มีส่วนได้ส่วนเสียก็ยังเกิดขึ้น ก็ยังคงเห็นจากสื่อสาธารณะต่างๆ เช่น โทรทัศน์ การให้สัมภาษณ์ที่แสดงถึงความไม่เห็นด้วย รวมทั้งสื่อ Social Media และพบว่าบางครั้งผู้มีส่วนได้ส่วนเสียมีการท้วงถึงการไม่สามารถจะเข้าถึงข้อมูลที่ต้องการได้รับอย่างสะดวก ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการวิจัยจึงมีเป้าหมายเพื่อการศึกษาลักษณะการเข้าถึงข้อมูล ด้านเทคนิคทางวิศวกรรมของโครงการ โดยมีลำดับความซับซ้อนที่ต่างกันเพื่อให้เกิดการมีส่วนร่วมของประชาชนที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดซึ่งในรายงานซึ่งในรายงานวิจัยนี้ มีเป้าหมายเพื่อนำเสนอแนวทางการให้ข้อมูลทางเทคนิคและข้อมูลเชิงวิศวกรรมในระหว่างกระบวนการมีส่วนร่วมรวมถึงรูปแบบการให้ข้อมูลในขั้นตอนต่างๆของแต่ละกระบวนการรับฟังความคิดเห็นและระดับความลึกของข้อมูลเทคนิควิศวกรรมที่เหมาะสม

อุปกรณ์และวิธีการ

วิธีการเก็บรวบรวมข้อมูล

สำหรับงานวิจัยนี้เน้นถึงระดับความซับซ้อนเชิงเทคนิคของข้อมูลที่แสดงให้เห็นถึง ทัศนคติ พฤติกรรม และความเข้าใจต่อกระบวนการมีส่วนร่วมของประชาชน ดังนั้นวิธีการเก็บรวบรวมข้อมูลจึงใช้วิธี การทำแบบสอบถาม การสัมภาษณ์เชิงลึก (In – depth Interviews) โดยใช้การเลือกตัวอย่างแบบเฉพาะเจาะจง (Purposive Selection) ให้ครอบคลุมถึงระดับความเข้าใจต่อโครงการนั้นๆเพื่อจะสามารถนำข้อมูลมาวิเคราะห์โดยใช้หลักการ SWOT เพื่อนำเสนอปรับปรุงการให้ข้อมูลเทคนิคด้านวิศวกรรมระหว่างกระบวนการรับฟังความคิดเห็น

กลุ่มเป้าหมายและผู้ให้ข้อมูลที่สำคัญ

งานวิจัยครั้งนี้ประกอบด้วยกลุ่มเป้าหมายและผู้ให้ข้อมูลหลัก ซึ่งเป็นผู้ที่สมควรได้รับข้อข้อมูลก่อนดำเนินโครงการ โดยจะสามารถวัดระดับความรู้จากการทำแบบสอบถามแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มหลัก ดังนี้ 1) ประชาชนที่ได้รับผลกระทบจากโครงการ 2) บุคคลทั่วไปผู้สนใจโครงการ 3) เจ้าหน้าที่หน่วยงานราชการที่เกี่ยวข้องกับโครงการ 4) นักวิชาการสิ่งแวดล้อม องค์การพัฒนาเอกชนด้านสิ่งแวดล้อมและอื่นๆ (NGOs) 5) องค์กรพัฒนาเอกชนและองค์กรภาคประชาสังคม โดยการคัดเลือกประชาชนที่ได้รับผลกระทบเริ่มจากการสัมภาษณ์โดยใช้เทคนิคของการใช้แบบสอบถามคัดกรองข้อมูลเพื่อให้ได้ความหลากหลายของข้อมูลมากยิ่งขึ้นและมีการใช้ร่วมกับแบบสอบถามออนไลน์

เครื่องมือเก็บรวบรวมข้อมูลแบบสัมภาษณ์ออนไลน์

คำถามจากแบบสอบถามออนไลน์จะจะมุ่งเน้นถึงหลักการของกระบวนการรับฟังความคิดเห็น ค.1 ค.2 และ ค.3 ซึ่งจะประกอบไปด้วย การเข้าถึงข้อมูล ซึ่งจะเป็นระดับที่มีความสำคัญมากที่สุดเป็นก้าวแรกที่ภาครัฐจะเปิดโอกาสให้ประชาชนแสดงความคิดเห็นและรับทราบรวมทั้งการให้ข้อมูลที่เป็นข้อเท็จจริงที่เป็นประโยชน์ต่อผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย การรับฟังความคิดเห็น เป็นกระบวนการที่เปิดให้ประชาชนมีส่วนร่วมทั้ง การทำค.1 รับฟังความคิดเห็นต่อขอบเขตการศึกษา และการทำค.2การมีส่วนร่วมในการประเมินผล การเกี่ยวข้องเป็นการเปิดโอกาสให้ประชาชนมีส่วนร่วมในการปฏิบัติงาน หรือร่วมเสนอแนะ และ การทำค.3ซึ่งเป็นการรับฟังความคิดเห็นต่อการร่าง

รายงาน

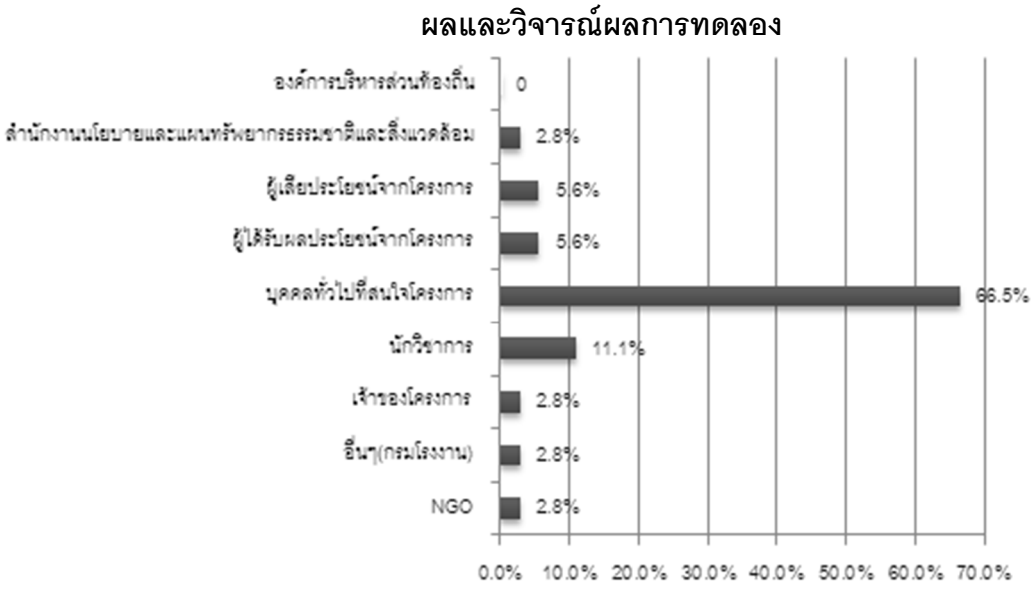


Fig 2a Interviewee information: type of stakeholder

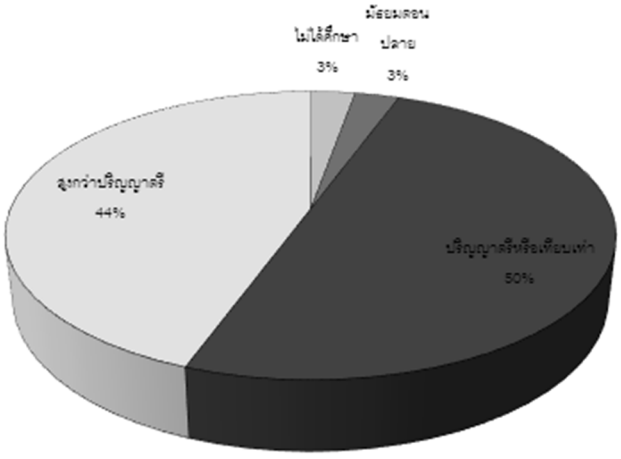


Fig 2b Interviewee information: education

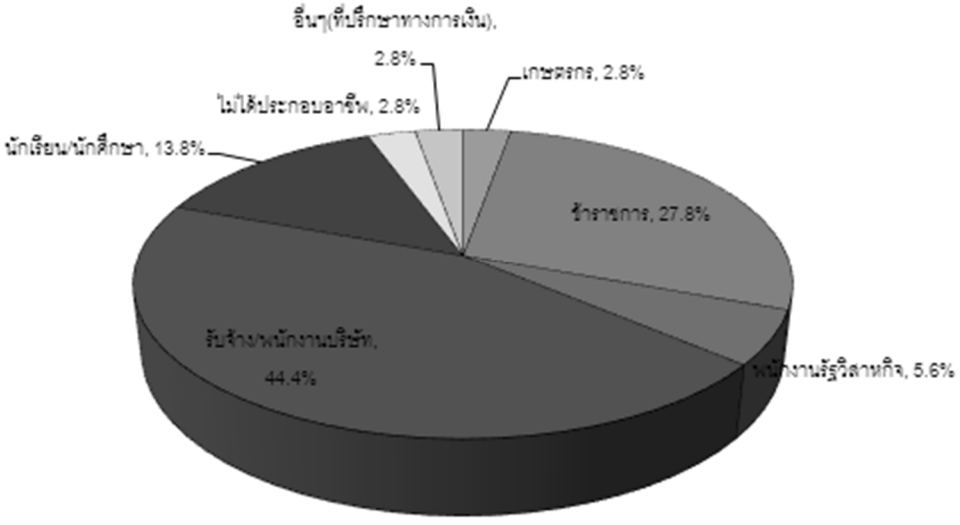


Fig 2c Interviewee information: occupation

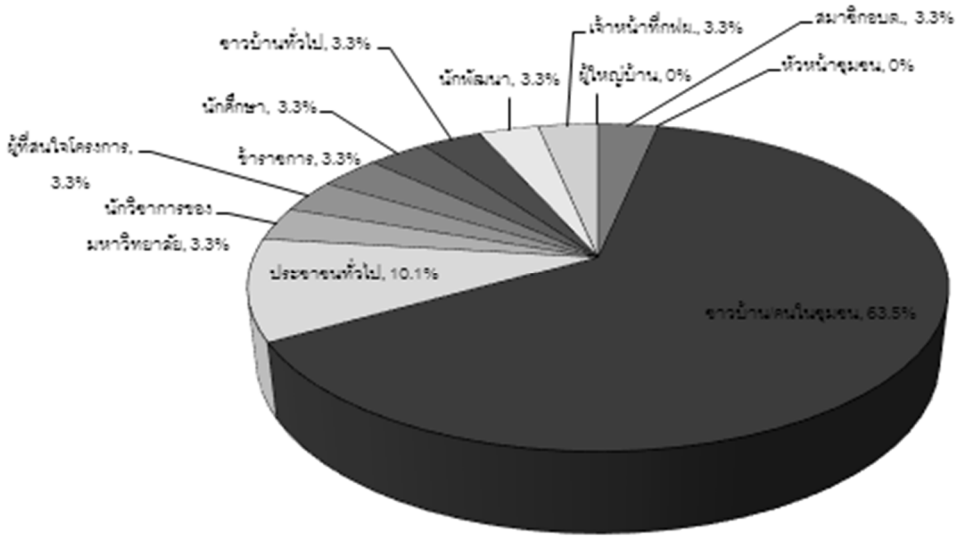


Fig 2d Interviewee information: social status

Fig 2b พบว่าวุฒิการศึกษาพบว่า50% จบการศึกษามากกว่าปริญญาตรี โดยผู้ตอบแบบสอบถามระบุสถานภาพทางสังคมคือ 65% บุคคลทั่วไปที่สนใจในโครงและไม่ยอมเปิดเผยตัวตนที่แท้จริง ร้อยละ 44.4% ของผู้ที่ทำแบบสอบถามทำอาชีพรับจ้างและพนักงานบริษัท 27.8% ข้าราชการ

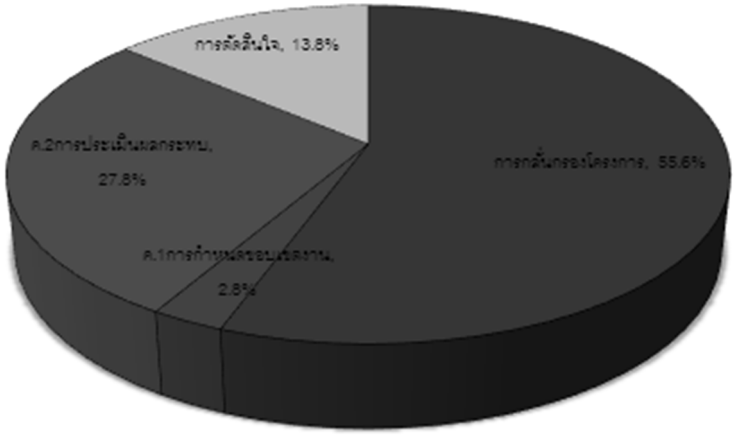


Fig 3a. Access to project: opinion on first access to information

จากรูปที่ 3a ผู้ตอบแบบสอบถามมีความเห็นว่าการเข้าถึงข้อมูลครั้งแรก 55.6% ควรได้รับข้อมูลได้ในช่วงของการกลั่นกรองโครงการ 27.8% จะรับทราบข้อมูลในช่วงของค.2 การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม 13.9 % ได้รับข้อมูลอยู่ในช่วงของการตัดสินใจ และอีก 2.8% ได้รับข้อมูลอยู่ในช่วงของค.1

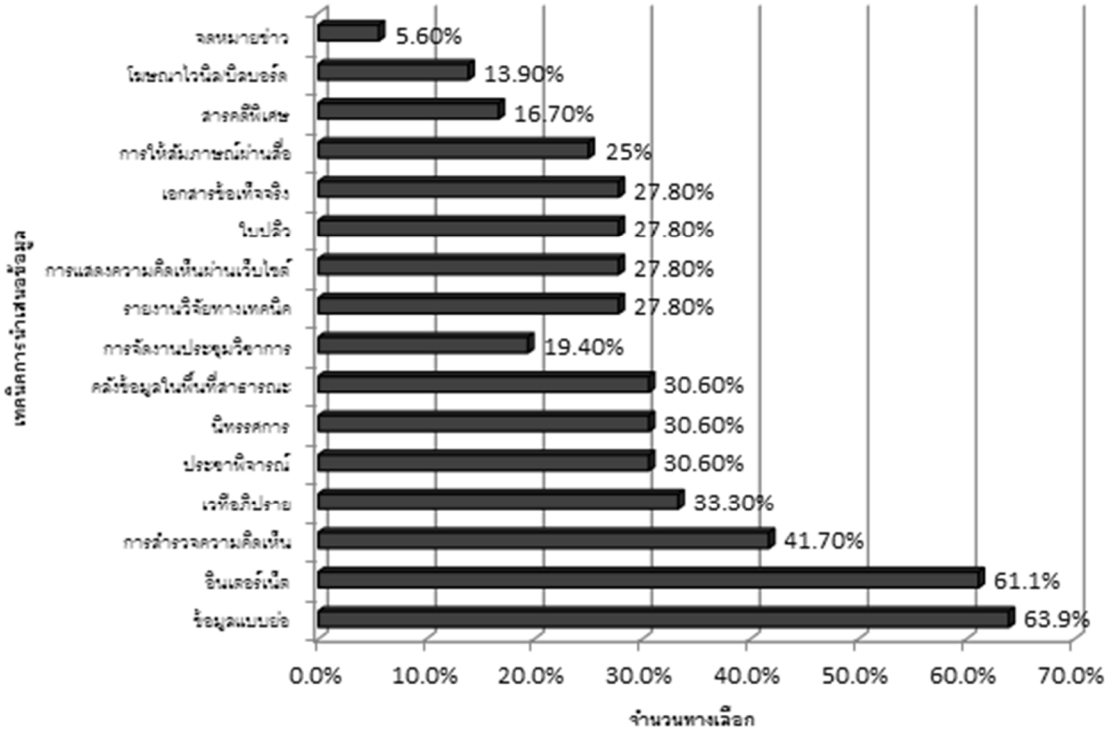


Fig 3b Access to project: appropriate information presentation

จาก Fig 3b แสดงให้เห็นถึงเทคนิคในการนำเสนอข้อมูลโดยเทคนิคส่วนใหญ่ที่ประชาชนและผู้มีส่วนได้ส่วนเสียส่วนใหญ่ต้องการ คือการได้ข้อมูลสรุปโดยย่อเพราะข้อมูลที่ได้จะกระชับ สั้นง่ายและได้ใจความและได้รับทราบข้อมูลของโครงการได้อย่างครบถ้วน ต้องการข้อมูลทางอินเตอร์ 41.7% ต้องการสำรวจความคิดเห็นเพราะจะได้ข้อเท็จจริงที่ตรงประเด็นและประหยัดระยะเวลาในการทำสื่อเพื่อลดความสิ้นเปลืองของทรัพยากรและเทคนิคการนำเสนออื่นๆที่เหลือจะเป็นการอยากได้ข้อมูลในลักษณะของการทำประชาพิจารณ์ ใบปลิว/แผ่นผับ การแสดงความคิดเห็นผ่านทางเว็ปไซต์ การจัดประชุมสัมมนาทางวิชาการ โฆษณา ตามลำดับ ทั้งนี้ภายหลังจากการได้รับทราบข้อมูลทางด้านข้อเท็จจริงแล้วผู้สนใจโครงการและผู้มีส่วนได้ส่วนเสียควรที่จะเตรียมประเด็นหัวข้อที่จะนำไปซักถามในวันที่มีการจัดทำประชาพิจารณ์ และเอกสารรายละเอียดเกี่ยวกับโครงการทุกๆฉบับประชาชนควรเก็บไว้เป็นหลักฐานเพื่อการได้รับข้อมูลที่ตรงกันทั้งก่อนดำเนินโครงการ ระหว่างดำเนินโครงการและหลังดำเนินโครงการ

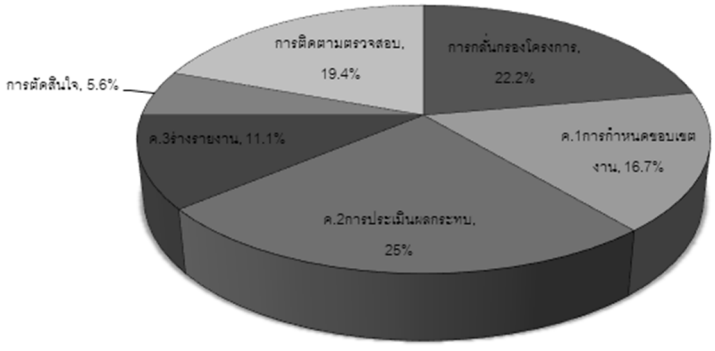


Fig 3c Access to project: real experience on first access to project information

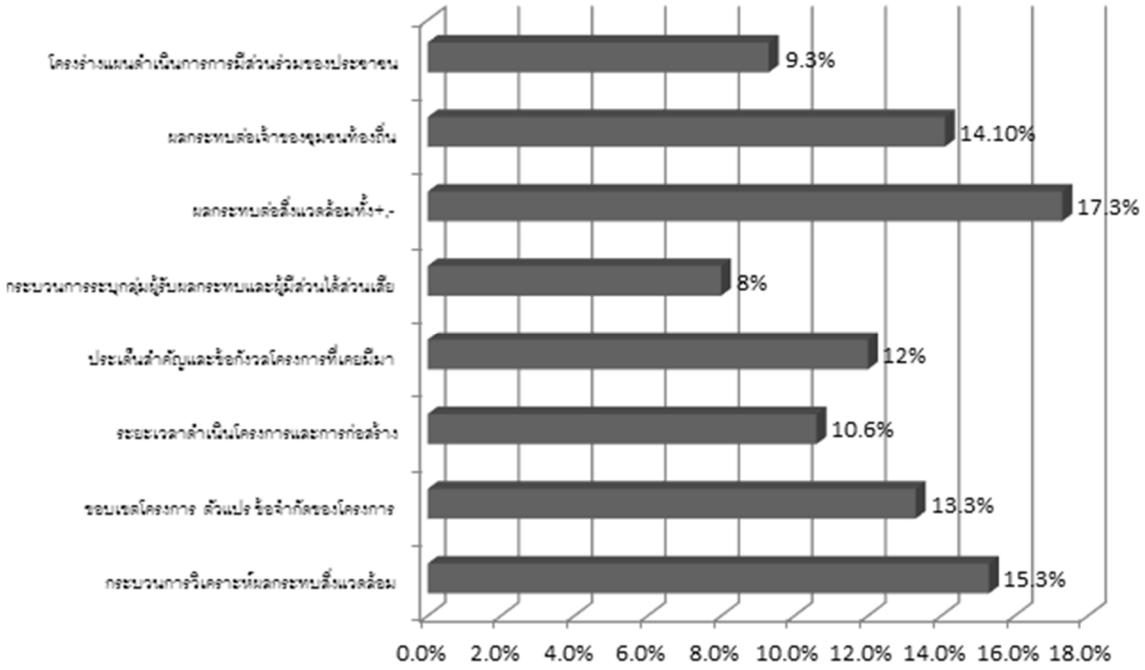


Fig 3d 3b Access to Project: important topics needed clarification from project owner

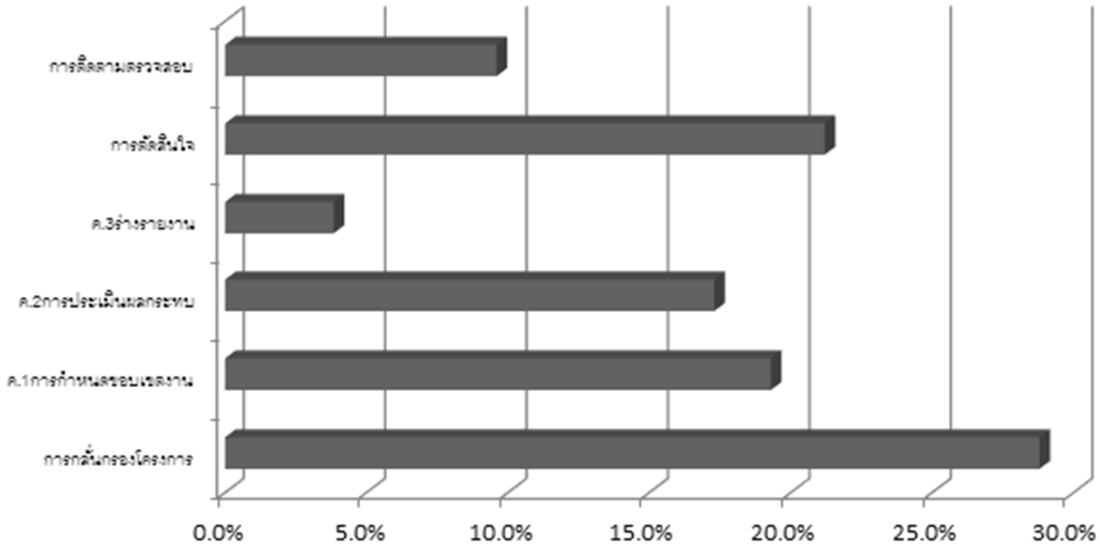


Fig 4a Stakholder Opinion: appropriate step the project owners' public opinion/suggestion

Fig. 4a แสดงถึงการรับฟังความคิดเห็นว่าควรจัดทำในขั้นตอนใด 42.9% ควรมีการรับฟังความเห็นตั้งแต่ขั้นตอนของการกลั่นกรองโครงการซึ่งการทำแบบสอบถามเป็นไปในทิศทางที่ถือว่าอยู่ในการที่ดีเพราะจะได้มีการทราบข้อมูลข้อเท็จจริงตั้งแต่ก่อนดำเนินโครงการแต่อีก 31.41% ยังคงมีความเข้าใจผิดเพราะกระบวนการรับฟังความคิดเห็นนั้นไม่ควรไปอยู่ในช่วงตัดสินใจเพราะช่วงของการตัดสินใจโดยส่วนนี้จะเป็นการอนุญาตให้เกิดการก่อสร้างโครงการและร่างรายงานการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมแล้วการทำประชาพิจารณ์ในขั้นตอนนี้จึงถือว่าล่าช้าเกินไปและอาจจะส่งผลกระทบตามมานอกจากผู้ตอบแบบสอบถามคิดว่า 91.7% ของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียควรได้รับข้อมูลไม่น้อยกว่า 15 วันก่อนดำเนินโครงการและอีก 86.1% อยากให้มีการระบุตัวตนในขั้นตอนของการแจ้งข้อมูล

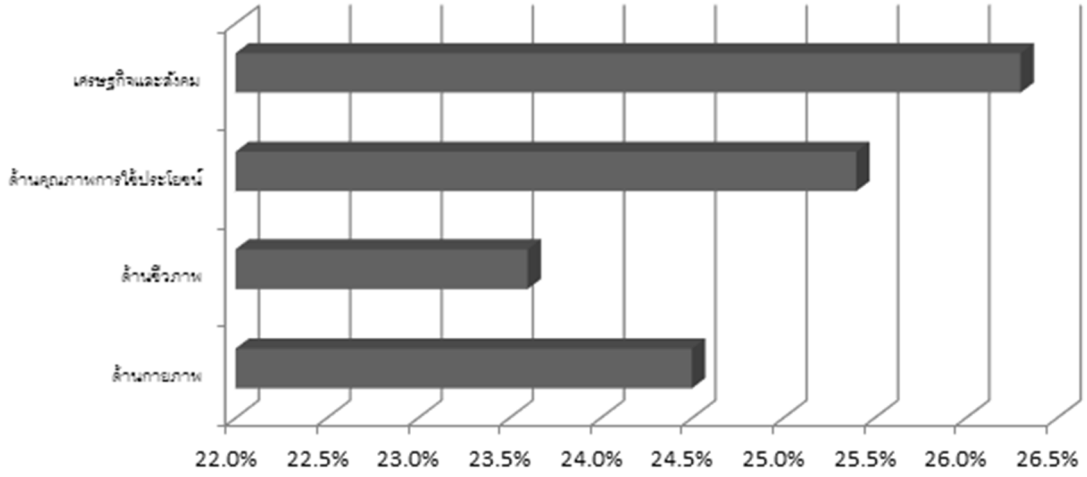


Fig 4b Stakholder Opinion: issue impacted by scope of the project

จาก Fig 4b พบว่า 85.7% ต้องการทราบประเด็นเศรษฐกิจและสังคมโดยจากการสัมภาษณ์เชิงลึกต่อผู้ทำแบบสอบถามมองว่าหากจะต้องมีโครงการด้านโรงไฟฟ้าเกิดขึ้นภายในชุมชนท้องถิ่นของตนเองนั้นจะส่งผลกระทบระยะยาวต่อเศรษฐกิจมากน้อยเพียงใดเพราะหากเพิ่มอัตราการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจแล้วอาจส่งผลกระทบต่อการทำลายทรัพยากรธรรมชาติตามมาได้และอาจจะทำลายขนบธรรมเนียมทางวัฒนธรรมที่สืบต่อกันมาซึ่งทั้งนี้อาจจะส่งผลกระทบต่อการเกิดความขัดแย้งได้ในอนาคต

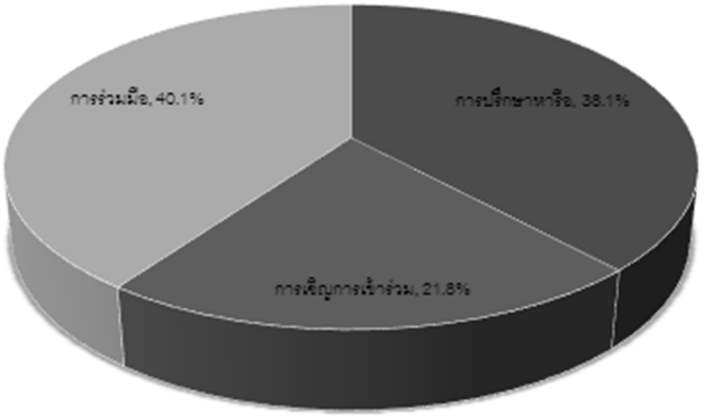


Fig 4c Stakholder Opinion: expected method for public hearing

จาก Fig 4c แสดงให้เห็นถึง ระดับของการมีส่วนร่วมในกระบวนการรับฟังความคิดเห็นโดยจะมุ่งเน้นไปในส่วนของ การร่วมมือ การปรึกษาหารือ และการเชิญการเข้าร่วมอยู่ในระดับที่ไม่แตกต่างกันมากซึ่งในส่วนของขั้นตอนการรับฟังความคิดเห็นนั้นระดับการมีส่วนร่วมถือเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพมากที่สุด

นอกจากนี้ผู้ให้สัมภาษณ์คิดว่า กระบวนการรับฟังความคิดเห็น ค.1 ค.2 และ ค.3 ควรมีการจัดประชุมอย่างน้อยเดือนละ 3 ครั้ง และปัจจัยที่มีผลต่อการทำประชาพิจารณ์คือผู้เข้าร่วมประชุมมีความแตกต่างหรือไม่ระหว่างการรับฟังความคิดเห็น ค.1 - ค.3

ต่อคำถามถึงเทคนิคที่เหมาะสมในกระบวนการรับฟังความคิดเห็นโดยร้อยละ 22% คิดว่าเทคนิคที่จะมีประสิทธิภาพมากที่สุดคือการให้ข้อมูลสรุปโดยย่อ โดยผู้ทำแบบสอบถามส่วนใหญ่จะคิดว่าการได้ข้อมูลของโครงการทังทางด้าน ผลกระทบทั้งทางด้านกายภาพ ชีวภาพ เศรษฐกิจและสังคม ควรมาในรูปแบบที่อ่านแล้วเข้าใจง่ายสั้นกระชับรวบรวมข้อมูลที่เป็นประโยชน์ภาพหรือตัวหนังสือชัดเจนอ่านง่ายอีกทั้งยังต้องการให้ทำการแจกผู้เป็นผู้มีส่วนได้ส่วนเสียทั้งในรัศมีใกล้ (5 กิโลเมตร) และ รัศมีไกล (10 กิโลเมตร) อีกร้อยละ 21% เป็น

เทคนิคของอินเตอร์เน็ต สื่อทางอิเล็กทรอนิกส์รวมถึงโซเชียลต่างๆ เพราะเป็นสิ่งที่เข้าถึงได้ง่ายในยุคสมัยปัจจุบัน แต่ยังถือว่าเป็นเทคนิคที่ยังมีข้อบกพร่องเล็กน้อยเนื่องจากชาวบ้าน หรือผู้สนใจโครงการบางส่วนจะเป็นช่วงผู้สูงอายุเทคนิคชนิดนี้ยังถือว่าเป็นเทคนิคที่ไม่สามารถเข้าได้ถึงผู้สนใจโครงการในทุกช่วงอายุ ร้อยละ 20 % เป็นเทคนิคการได้ข้อมูลแบบการสำรวจความคิดเห็นโดยเทคนิคชนิดนี้จะได้มีการสนทนากันระหว่างเจ้าของโครงการและผู้ได้รับผลกระทบข้อมูลก็จะได้รับจากการพูดคุยซึ่งถือเป็นอีกช่องทางในการเข้าถึงได้อย่างดีแต่จะมีข้อบกพร่องในส่วนของที่ไม่มีเอกสารที่เป็นลายลักษณ์อักษรซึ่งอาจจะนำไปสู่การได้ข้อมูลที่บิดเบือนและไม่โปรงใส และในส่วนของเทคนิคที่เหลือการจะอยู่ในระดับที่ลดลั่นกันมา

และจากการสอบถามเชิงลึกกับผู้มีส่วนได้ส่วนเสียส่วนใหญ่คิดว่าหลังจากขั้นตอนกระบวนการรับฟังความคิดเห็น ค.1 ค.2 และ ค.3 เรียบร้อยแล้วควรมีการเปิดเผยรายงานประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมและเอกสารที่เกี่ยวข้องควรอยู่ในรูปเล่มรายงานที่ผ่านช่องทาง Social media ที่สามารถให้ประชาชนต่างๆสามารถมาค้นหาข้อมูลได้และสามารถดาวโหลดเป็นเอกสารที่สามารถเผยแพร่ออกสู่สาธารณะได้อย่างเปิดเผย

จากการประเมินผลการศึกษาเบื้องต้น ได้มีการจัดทำ SWOT analysis วิเคราะห์ปัจจัยทั้งภายในและภายนอกซึ่งส่งผลต่อกระบวนการมีส่วนร่วมของประชาชน ทั้งจุดแข็ง (strength) จุดอ่อน (weakness) โอกาส (opportunities) และการคุกคาม (threats) ดังแสดงในตารางที่ 1 ก่อโอกาสให้เกิดการปรับปรุงการมส่วนร่วมของประชาชน และการให้ข้อมูลเชิงเทคนิคด้านวิศวกรรมของโครงการต่อไป

สรุป

ประชาชนคิดว่ากระบวนการต่างๆในกระบวนการรับฟังความคิดเห็นควรเริ่มตั้งแต่ขั้นตอนกลั่นกรองโครงการเพราะเป็นขั้นตอนแรกที่จะเป็นการได้รับข้อมูลต่างๆของโครงการ ผลกระทบต่างๆที่อาจจะส่งผลต่อสิ่งแวดล้อมบริเวณโดยรอบ จึงถือว่าเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญที่สุดที่จะทำให้ผู้เกี่ยวข้องของโครงการในทุกๆส่วนเกิดความเข้าใจที่ตรงกันอีกทั้งรูปแบบการนำเสนอข้อมูลก็ถือว่ามีความสำคัญเนื่องด้วยเป็นสื่อกลางที่ทำให้เข้าถึงประชาชนต่างๆได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยประชาชนส่วนใหญ่ต้องการการนำเสนอข้อมูลที่เข้าใจง่ายและมีข้อมูลที่ครบถ้วนและชัดเจนเมื่อมีกระบวนการรับฟังความคิดเห็นแล้วก็ควรจะมีสถานะติดตามผลความก้าวหน้าของขั้นตอนต่างๆเพื่อที่จะให้ประชาชนได้เห็นถึงความก้าวหน้าของโครงอันนำไปสู่ตามหลักสำคัญของกระบวนการในส่วนของการเกี่ยวข้องคือประชาชนสามารถติดตามข้อมูลทุกๆอย่างได้ในทุกๆขั้นตอนเพื่อที่จะลดช่องว่างของการได้ข้อมูลที่ไม่ถูกต้องทั้งจาก สื่อ หรือ นักวิชาการ อาจก่อให้เกิดการประท้วงตามมาได้อีกทั้งเจ้าของโครงการนั้นก็ควรที่จะมีความโปร่งใสและตระหนักให้เห็นถึงความสำคัญจากเสียงของประชาชนเพราะจะถือว่าเป็นการผลักดันที่ส่งผลที่ดีต่อการดำเนินโครงการในระยะยาว ดังนั้นการระบุบตัวตนในทุกๆขั้นตอนของกระบวนการรับฟังความคิดเห็นนั้นถือเป็นสิ่งสำคัญที่แสดงให้เห็นถึงความโปร่งใส่ทั้งผู้ได้รับผลกระทบและเจ้าของโครงการเพราะจะเป็นการลดสาเหตุที่อาจนำมาสู่กระบวนการประท้วงดังที่เห็นในปัจจุบัน

Table 1 SWOT analysis for EIA's public participation

จุดแข็ง (strength) ภายใน	จุดอ่อน (weaknesses) ภายใน	โอกาส (opportunity) ภายนอก	คุกคาม (threat) ภายนอก
- มีกระบวนการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เป็นระบบ - เปิดโอกาสให้มีการปรับปรุงกระบวนการเป็นระยะอย่างต่อเนื่อง - มีกฎหมายรองรับที่รัดกุม	- ขาดการบังคับใช้กฎหมายอย่างทั่วถึง - การพิจารณา EIA เป็นรายโครงการโดยรัฐไม่ได้มีการวางแผนเชิงยุทธศาสตร์ที่ชัดเจน ทำให้ขั้นตอนของการกลั่นกรองโครงการกระทำในระดับหน่วยงานย่อย เปิดโอกาสให้เกิดการยับยั้งโครงการที่สามารถจะมีอิทธิพลถึงขั้นหยุดโครงการ ทำให้เกิดความเสียหายต่อประเทศ - ขั้นตอนของการติดตามตรวจสอบ (monitoring) ข้อกำหนดด้านสิ่งแวดล้อมที่โครงการต้องปฏิบัติตาม ไม่สามารถแก้ไขปัญหา/ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ครบถ้วน ทำให้เกิดความไม่ไว้วางใจต่อกระบวนการติดตามตรวจสอบ เป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้เกิดลักษณะอาการต้านโครงการแบบ Not in My Backyard Syndrome (NIMBYs)	- มีการตื่นตัวในการเกิดความตระหนักในการรักษาสิ่งแวดล้อมของคนในสังคม ส่งผลให้เกิดการเรียนรู้ การให้ความรู้ที่ถูกต้องเรื่องการรักษาสภาพแวดล้อมที่ดี - สร้างโอกาสในการปรับปรุงกระบวนการมีส่วนร่วมของประชาชน (public participation) ในยุคของการเข้าถึงข่าวสารข้อมูลโดยให้เกิดความหลากหลายของข้อมูลที่นำเสนอ ทั้งต่อผู้รับที่มีความหลากหลาย และให้เหมาะสมกับระยะเวลาแต่ละช่วงของโครงการ	- กระแสการยับยั้งโครงการจากผู้เสียผลประโยชน์ทั้งในระดับท้องถิ่น หรือในระดับนานาชาติ ส่งผลให้เกิดผลกระทบต่อการพัฒนาประเทศ - สภาวะเศรษฐกิจในปัจจุบันส่งผลให้การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมเป็นเวทีในการแสดงความคิดเห็นเรื่องเศรษฐกิจและสังคม ซึ่งไม่ใช่เป้าหมายหลักของการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณหน่วยงานสำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เป็นหน่วยงานในสังกัดกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (สผ.) และหน่วยงานคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน (กกพ.) รวมถึงผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านสำหรับการแสดงความคิดเห็นสำหรับแบบสอบถามในการจัดทำวิทยานิพนธ์

เอกสารอ้างอิง

Erwin, William. (1976). Participation Management: Concept Theory and Implementation. Atlanta : Georgia State University.

Paliwal, Ritu, (2006) EIA practice in India and its evaluation using SWOT analysis, Environmental Impact Assessement Review. 26(492-510).

พิเชฐ โสภณแพทย์. 2555. การประเมินการมีส่วนร่วมของประชาชนในการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม กรณีศึกษาโรงไฟฟ้าถ่านหินเขาหินซ้อน จังหวัดฉะเชิงเทรา.

สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2557. แนวทางการมีส่วนร่วมของประชาชนและการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมทางสังคมในกระบวนการ.

วิเคราะห์ผลกระทบสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพมหานคร: บริษัท ดอกเบี้ย จำกัด.

สานักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2558ข. แนวทางการจัดทารายงาน.

การวิเคราะห์ผลกระทบสิ่งแวดล้อมด้านอาคาร การจัดสรรที่ดิน และบริการชุมชน. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: ห้างหุ้นส่วนจากัด บี.วี.ออฟเซ็ต.

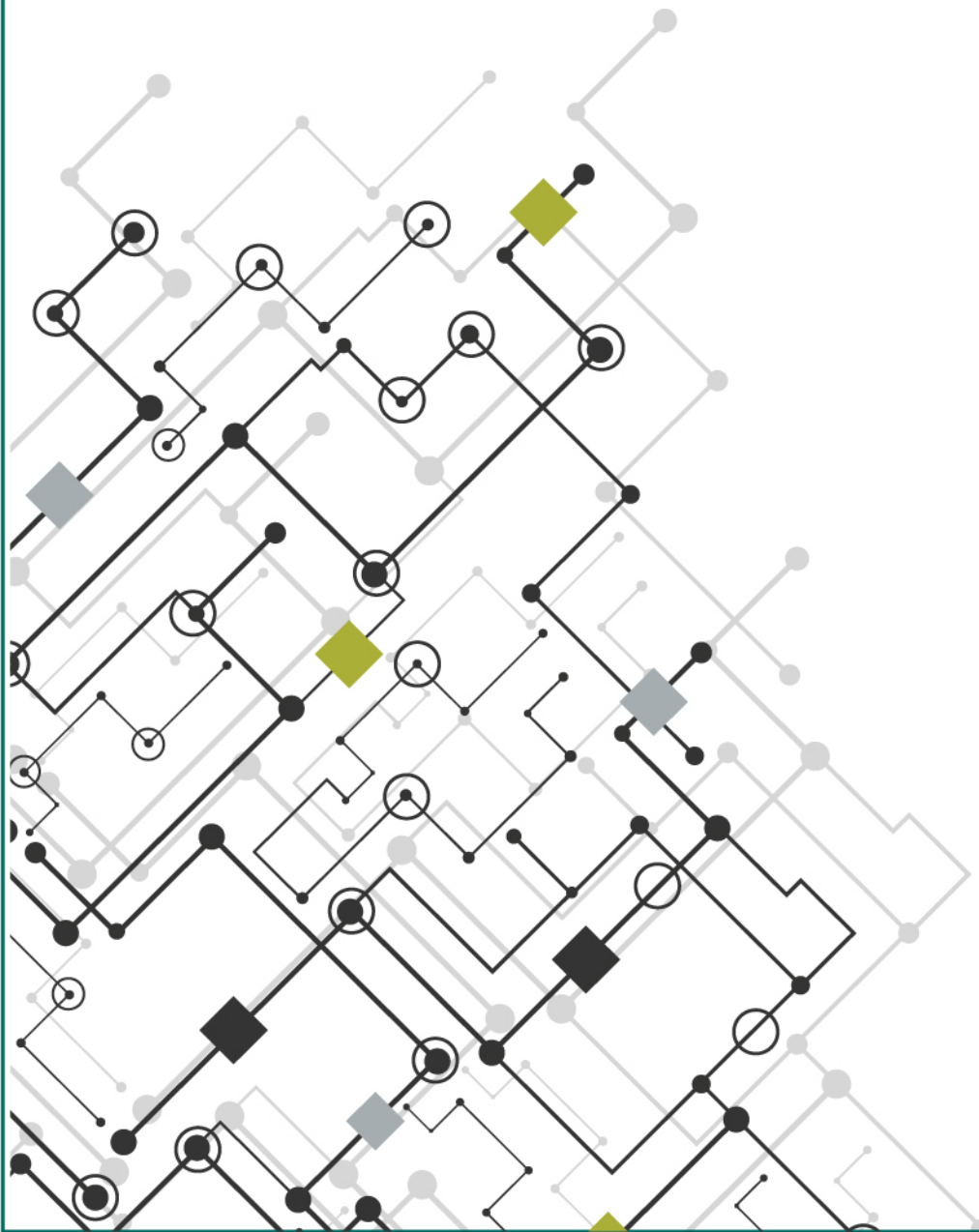
สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2558ก. ระบบการวิเคราะห์ผลกระทบสิ่งแวดล้อม ของประเทศไทย. พิมพ์ครั้งที่ 13. กรุงเทพมหานคร:ห้างหุ้นส่วนจากัด บี.วี.ออฟเซ็ต.

สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์ และวิศวกรรมศาสตร์

Subject: Architecture and Engineering

ภาคโปสเตอร์

Poster Presentation



KU
KASETSART
UNIVERSITY

Preliminary Consideration of a Cause of Wheel Thread Damage for the SDA3 Locomotive Wheels of the State Railway of Thailand

Supagon Rakvongbut[1,2], Sittipong Promla[1], Thana Phupuekrat[1] and Wichai Siwakosit[1*]

ABSTRACT

Surface damage has been found on the thread of an SDA3 locomotive's wheels with Vidura contour of the State Railway of Thailand (SRT). Large value of compressive stress typical of rail freight and locomotive operation which always calls for high tractive efforts and high axle loads have led to a study of the cause of damage along the Rolling Contact Fatigue (RCF) concept which has been found to be a probable cause of damage according to the analysis of this study. The value of maximum contact stress is calculated by Hertz's contact stress theory to be 1,112.4 x 10^6 N/m^2. At the maximum tractive effort condition of the locomotive, the values of maximum contact stress to A class AAR steel's yield strength ratio and tractive effort to normal load ratio are 3.5571 and 0.3899 respectively which indicates the racheting behavior from the shakedown diagram that may lead to the initiation of RCF damage.

Key words: Vidura, RCF, State Railway of Thailand, SDA3, Locomotive, U20

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

[1]Kasetsart University rail Engineering Center, Mechanical Engineering Department, Kasetsart University, Bangkok 10900

[2]Makkasan Workshop, State Railway of Thailand, Bangkok, 10400

INTRODUCTION

The SDA3 locomotives have been procured and utilized by the State Railway of Thailand (SRT) since 2014 with the purpose to haul freight wagons between Laem Chabang Sea Port in Chonburi province and SRT Inland Container Depot at the outskirt of Bangkok. The axle load of the locomotive is 20 tons per axle while the arrangement of wheels is a Co-Co type with AC traction motors providing maximum traction power of 1,845 kW at wheel rims (Promla, 2018). The locomotive is utilized usually at its full capacity. See figure 1 (SRT, 2014) for the appearance of the locomotive.



Figure 1 An SDA3 locomotive or U20 locomotive of SRT (SRT, 2014)

The wheel contour is the SRT Vidura which is of a conical nature with 1 to 20 conicity on the wheel thread as illustrated in figure 2 (SRT, 2011). The wheel thread damage, as in figure 3, has been founded on the locomotive wheels during maintenance which is a rather large and noticeable surface pitting type. This preliminary study is intended to analyze the cause of this problem.

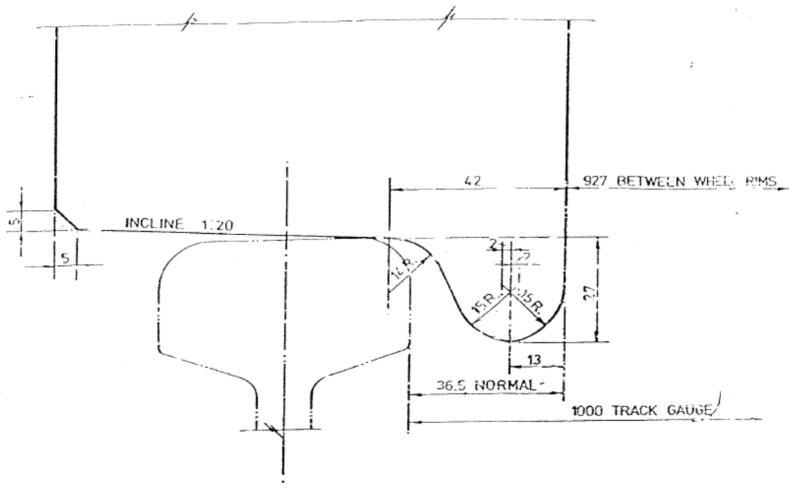


Figure 2 Vidura wheel contour of SRT (SRT,2011)



Figure 3 Wheel tread damage of an SDA3 Locomotive of SRT

Rolling Contact Fatigue (RCF) damage has been identified and extensively studied by researchers especially in the field of railway engineering (FRA, 2011). RCF damage on wheel in general is caused by, firstly, crack initiation which can be predicted on the surface of a wheel by using shakedown limit and on the subsurface of a wheel by the Dang Van criterion (FRA, 2011), and secondly crack propagation due to rolling contact between wheel and rail with large value of compressive stress typical of rail freight and locomotive operation which always calls for high tractive efforts and high axle loads (FRA, 2011). The wheel thread damage of an SDA3 locomotive as shown in figure 3 resembles very closely with the RCF damage shown in the literature, and it is very intuitive to investigate the cause of damage along the RCF concept.

MATERIALS AND METHODS

1. Preambles

An SDA3 locomotive has the following relevant performance requirements (Promla, 2018):

Axle Load = 20 tons with Co-Co wheel arrangement

Traction Power at Wheel Rims = 1845 kW

SRT Designated Coefficient of Friction = 0.43

Locomotive Maximum Tractive Effort = 459 kN

Wheel Profile = SRT Vidura as in figure 2

Rail Profile = BS100A as in (Siwakosit *et al*., 2015)

Wheel and Rail Modulus of Elasticity = 2×10^{11} N/m^2

Poisson's Ratio = 0.25

Yield Strength of Wheel Material= $0.577 \times 542 \times 10^6$ N/m^2 , AAR class A/von Mises criteria (FRA, 2011)

2. Hertz's Contact Theory

Heinrich Hertz had proposed his contact theory with application to multiple-stacked lens under constrained forces in order to investigate the optical properties (Hertz, 1882). As a first line of methodology in contact stress analysis due to its generality and well-accepted results, Hertz contact theory is used in this study for contact stress distribution and implication to RCF. Details of Hertz's contact theory can be found, for instance, in a rail vehicle dynamics book (Andersson *et al*, 2014) and the relations to be used in the analysis of contact stress distribution can be expressed according to a paper by Srivastava *et al.* (Srivastava *et al*., 2017). For a strictly tangent track motion of a wheel, the contact pressure distribution P in the Hertz's elliptical contact can be written as

$$P(x,y) = P_o(1 - (\frac{x}{a})^2 - (\frac{y}{b})^2)^{1/2} \quad (1)$$

where x = a longitudinal coordinate along the rail of a contact patch

y = a lateral coordinate perpendicular to x

a = major semi-axis along x

b = minor semi-axis along y

P_o = maximum contact stress

The values of a and b can be calculated according to Hertz's contact theory which starts from determining the shape factors A and B which depend on the longitudinal radii of wheel profile and rail and the lateral radii of wheel and rail, all of which are determined at the geometrical contact point between wheel and rail.

It can be shown (Andersson *et al*, 2014) that

$$A = \frac{1}{2}(\frac{1}{r_{yR}} - \frac{1}{r_y}) \quad (2)$$

$$B = \frac{1}{2}(\frac{1}{r_{xR}} - \frac{1}{r_x}) \quad (3)$$

$$\Theta = \cos^{-1}(\frac{A-B}{A+B}) \quad (4)$$

where r_{yR}= a rail radius in lateral direction

r_y = a wheel radius in lateral direction

r_{xR} = a rail radius in longitudinal direction which is normally has an infinite value

r_x = a wheel radius in longitudinal direction which is the same as a nominal wheel radius of a locomotive

Θ = a function of shape factors A and B which will determine constants m and n from the figure 4 which is generated from a look-up table from Hertz's theory in a book by Andersson *et al*. (Andersson *et al*, 2014).

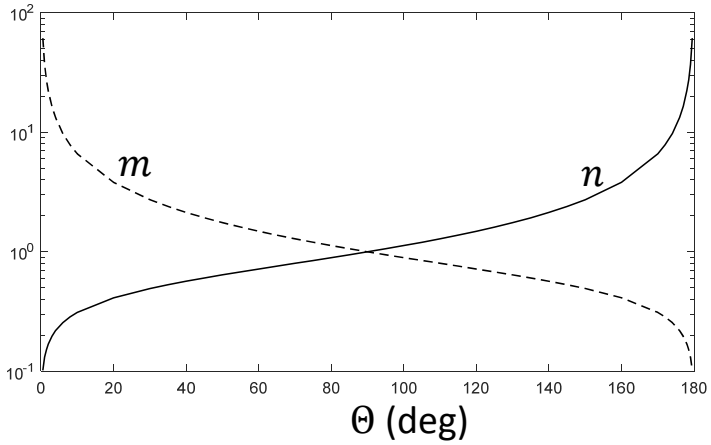


Figure 4 Values of m and n according to Θ ,generated from a table (Andersson *et al*, 2014)

Values of a , b, and P_o will be determined (Andersson *et al*, 2014) from

$$a = m\left(\frac{1.5N\left(1-\nu^2\right)}{E(A+B)}\right)^{1/3} \quad (5)$$

$$b = n\left(\frac{1.5N\left(1-\nu^2\right)}{E(A+B)}\right)^{1/3} \quad (6)$$

$$P_o = \frac{1.5N}{\pi ab} \quad (7)$$

where N = wheel load

E = modulus of elasticity

ν = Poisson's ratio

3. Shakedown Diagram

In continuum mechanics (Ghadimi et al., 2016), elastic shakedown behavior of a material means a plastic deformation which occurs during early periodic application of load while the steady state behavior under cyclic load is perfectly elastic, while plastic shakedown behavior means that the steady state behavior is a closed elastic-plastic loop without net accumulation of plastic deformation, and racheting behavior means that the steady state behavior is an open elastic-plastic loop where the material accrues a net strain for each cycle.

RCF can be avoided when the wheel material has an elastic shakedown behavior while the initiation of RCF can occur when a wheel material has a racheting behavior. A shakedown diagram re-generated in figure 5 for spherical contacts (FRA 2011) is a guideline to check the shakedown behavior of the wheel and rail contact according to the maximum contact stress P_o, a yield strength of wheel or rail material k, a tractive effort of a wheel T and a wheel load N.

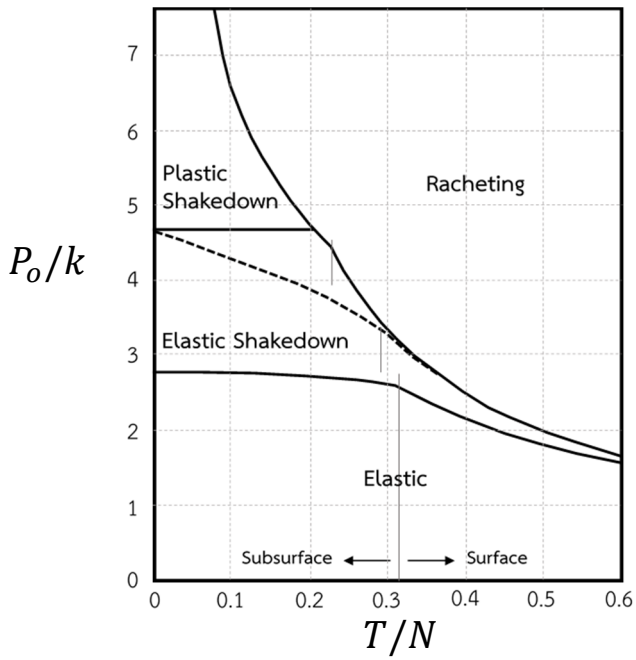


Figure 5 A redrawn shakedown diagram for spherical contacts (FRA 2011)

RESULTS AND DISCUSSION

Calculation of stress distribution in a case of a Vidura wheel contour for an SDA3 locomotive rolling on a tangent track with BS100A rail profile has been performed. The parameter values are specified as r_{yR}= 0.30 m, r_y=r_{xR}=∞, r_x= 0.5335 m, and by using equations 1 to 7 and figure 4, the stress distribution can be illustrated as in figure 6, where the maximum contact stress is 1,112.4 x 10^6 N/m^2.

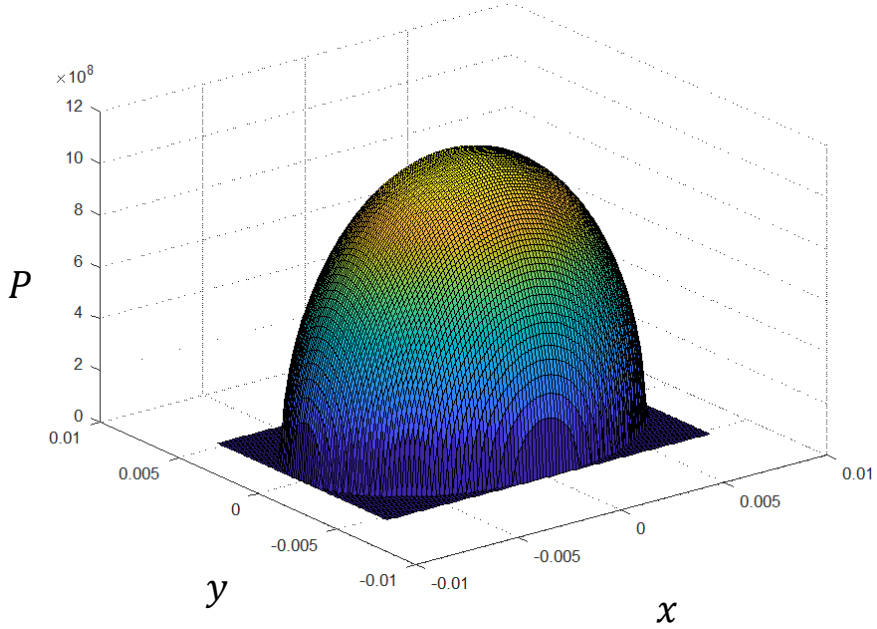


Figure 6 Contact stress distribution at the contact patch of an SDA3 locomotive wheel with Vidura contour and BS100A rail

According to von Mises criteria (FRA, 2011), the value of k has been taken as 57.7% of yield strength of a wheel which is in general not very easy to determined precisely. With T taken as 1/12 of the locomotive maximum tractive effort, it can be shon in the shakedown diagram that the SDA locomotive wheel for this operating condition is in the racheting zone as in figure 7 where P_o/k = 3.5571 and T/N = 0.3899 which put it in the risk of having RCF damage initiation on the surface of the wheel.

.

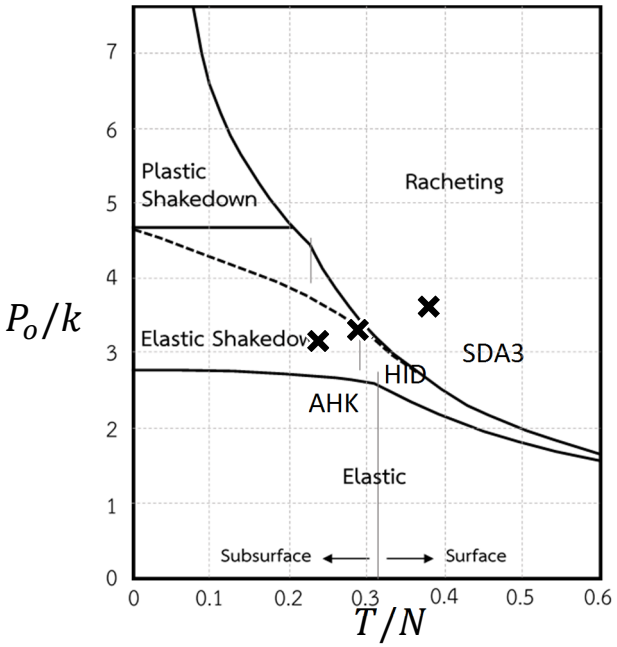


Figure 7 An SDA3 locomotive wheel, marked with "x" for P_o/k = 3.5571 and T/N = 0.3899, in the maximum tractive effort condition is well within the racheting zone of a shakedown diagram with high risk of RCF damage initiation (HID and AHK are also shown as a comparison)

As a means of comparison, an HID locomotive and an AHK locomotive from SRT which use the same wheel and rail contour but with different axle loads and maximum tractive efforts (Promla, 2018) are also indicated in the shakedown diagram of figure 7 where P_o/k and T/N are (3.2318,0.30) and (3.1394,0.256) respectively. It can be seen that HID is in the borderline of elastic shakedown zone while AHK is well within elastic shakedown zone which indicates that both of them have lower risk of RCF initiation than that of SDA3 which may explain why SRT locomotives do not have an RCF problem prior to SDA3.

CONCLUSION

RCF has been found to be a probable cause of damage on the wheel of an SDA locomotive according to the analysis of this study. The value of maximum contact stress is calculated by Hertz's contact stress theory to be 1,112.4 x 10^6 N/m^2. At the maximum tractive effort condition of the

locomotive, the values of maximum contact stress to yield strength ratio and tractive effort to normal load ratio are 3.5571 and 0.3899 respectively which indicates the racheting behavior from the shakedown diagram that may lead to the initiation of RCF damage, which may be prevented by the reduction of the contact stress.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to express their appreciation to SRT Sriracha depot staffs for their support and SRT Mechanical Engineering Department for the initiation of this study.

REFERENCES

Sitipong Promla. 2018. **Lecture Note for 01200432 Rolling Stock Technology Class**. Faculty of Engineering Kasetsart University Bangkok, Thailand.

State Railway of Thailand. 2014. **Train Documentary No.10**. Bangkok, Thailand.

State Railway of Thiland. 2011. **Technical Specification of High Performance CNC Portal Wheel Lath** Bangkok, Thailand.

Federal Railroad Administration. 2011. **Rolling Contact Fatigue: A Comprehensive Review**. US Department of Transportation Washington DC, USA.

Siwakosit W, Phupuekrat T, and Chooprasert K. 2015. Preliminary Consideration of a Wheel-Rail Interaction of the Vidura Wheel Profile and BS 100A Rail Profile to Lateral Dynamic of an SRT Wheelset on a Meter Gauge Straight Track, **The 2nd Thailand Rail Academic Symposium (TRAS-2)**, August 26-27, 2015 Phitsanulok, Thailand.

Hertz H. 1882. Über die Berührung fester elastische Körper. **J. Für Die Reine U. Angew. Math.** 92 (1882) 156-171.

Andersson E, Berg M, and Stichel S. 2014. **Rail Vehicle Dynamics**. KTH Railway Group, Stockholm, Sweden.

Srivastava J.P, Sarkar P.K, Messala V.R.K., and Ranjan V. 2017. Rolling Contact Fatigue Life of Rail for Different Slip Conditions. **Latin American Journal of Solids and Structures**. http://dx.doi.org/10.1590/1679-78254161

Ghadimi B, Nikraz H, and Rosano M. 2016. Dynamic Simulation of a Flexible Pavement Layers Considering Shakedown Effects and Soil-Asphalt Interaction. **Transportation Geotechnics**. Vol.7 (June 2016): pages 40-58.

การศึกษาความเข้มข้นในบรรยากาศของเบนซีนบริเวณกลุ่มนิคมอุตสาหกรรมในพื้นที่มาบตาพุด

Concentration of Benzene in Ambient Air of Map Ta Phut Industrial Complex Area

เจนจิรา สันทาลุนัย[1] และ พิชญ์นรี ลลิตาภรณ์[1*]

Jenjira Suntalunai[1] and Phichnaree Lalitaporn[1*]

บทคัดย่อ

การศึกษาความเข้มข้นของเบนซีน (Benzene, BZ) บริเวณกลุ่มนิคมอุตสาหกรรมในพื้นที่มาบตาพุด จังหวัดระยอง เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับกำหนดแนวทางหรือมาตรการในการจัดการ BZ ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยได้ทำการศึกษาการเปรียบเทียบความเข้มข้นของพื้นที่มาบตาพุดกับพื้นที่ชุมชนเมือง ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ BZ กับสภาพอุตุนิยมวิทยา ได้แก่ ความชื้นสัมพัทธ์ (RH) อุณหภูมิ (Temp) และความเร็วลม (WS) และวิเคราะห์การกระจายตัวของ BZ ด้วยวิธีการประมาณค่าช่วง (Inverse Distance Weight, IDW) โดยผลการศึกษาพบว่า ความเข้มข้นของ BZ ในพื้นที่มาบตาพุดยังมีแนวโน้มสูงขึ้น ในขณะที่พื้นที่ชุมชนเมืองมีแนวโน้มลดลง และพบว่า RH Temp และ WS มีผลต่อความเข้มข้นของ BZ น้อย (ค่า R^2 0.0304 0.0109 และ 0.0496 ตามลำดับ) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นของ BZ ไม่ได้รับอิทธิพลจากสภาพอุตุนิยมวิทยาอย่างเดียว แต่มีปัจจัยอื่นร่วมด้วย เช่น ทิศทางลม และแหล่งกำเนิด BZ ที่อยู่ในพื้นที่ และค่าความเข้มข้นของ BZ ที่มีค่าสูงเกินค่าเฝ้าระวัง 24 ชั่วโมง (7.6 μg/m^3) ได้รับผลกระทบจากช่วงเวลาที่โรงงานอุตสาหกรรมกลุ่มปิโตรเคมีและปิโตรเลียมมีการซ่อมบำรุงหรือกิจกรรมที่ไม่ใช่การผลิตปกติ

ABSTRACT

The study on ambient benzene (BZ) concentrations around Map Ta Phut complex, Rayong province aims for providing the information to develop the effective BZ management guideline or measure. This project compares BZ concentrations between the industrial and urban areas, as well as correlation between BZ concentrations and meteorological condition, i.e. relative humidity (RH), temperature (Temp), and wind speed (WS). The project also analyzes the BZ distribution by using Inverse Distance Weight (IDW) method. The study shows BZ concentrations in the Map Ta Phut industrial area has a tendency to increase, while urban areas are in oppose. According to the study, the RH, Temp and WS have marginal effect on the BZ concentrations (R2 0.0304, 0.0109, and 0.0496 respectively). The results are showed that ambient BZ concentrations could not only affected by meteorological data but also affected by other factors such as wind direction and source of BZ. However, BZ concentrations which are higher than the 24-hour monitoring standard values of 7.6 μg/m^3, occur during the maintenance or abnormal processing period of the petroleum and petrochemical industries.

Key words: Benzene, Map Ta Phut, Pollution in Rayong, wind speed, VOCs

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

[1]ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

คำนำ

เบนซีน เป็นสารไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัว ประเภทแอโรแมติกส์ (Aromatics) ที่พบได้ในธรรมชาติ หรือได้จากการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการทางเคมีและกระบวนการเปลี่ยนแปลงในโรงกลั่นน้ำมัน เป็นสารเติมแต่งเพื่อเพิ่มเลขออกเทน (Octane number) ในน้ำมันเบนซิน (Gasoline) แต่ในปัจจุบันมีการจำกัดปริมาณ BZ ในน้ำมันเบนซินเนื่องจากเป็นสารก่อมะเร็ง นอกจากนี้ยังใช้เป็นสารตัวกลาง (Intermediate) ในการผลิตสารเคมีอื่นในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีกลุ่มแอโรแมติกส์หลายชนิด เช่น สไตรีน (Styrene) ฟีนอล (Phenol) ไซโคลเฮกเซน (Cyclohexane) เป็นต้น (บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน), 2554)

พื้นที่ตำบลมาบตาพุด จังหวัดระยอง เป็นพื้นที่ที่มีโรงงานอุตสาหกรรมหนาแน่น ประกอบด้วยนิคมอุตสาหกรรมซึ่งเป็นที่ตั้งของโรงงานอุตสาหกรรมกลุ่มปิโตรเลียมและปิโตรเคมีหลายแห่ง วัตถุดิบในกระบวนการผลิตเป็นน้ำมันดิบ (Crude oil) ซึ่งเป็นสารไฮโดรคาร์บอนจะถูกนำเข้าสู่กระบวนการกลั่นลำดับส่วนเพื่อให้ได้เป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ออกมา เช่น BZ ไซลีน (Xylene) โทลูอีน (Toluene) น้ำมันดีเซล (Diesel) เป็นต้น ส่งผลให้พื้นที่ดังกล่าวยังคงมีปัญหาสารอินทรีย์ระเหยเกินค่ามาตรฐานคุณภาพอากาศเฉลี่ย 1 ปี สำหรับ BZ กฎหมายได้กำหนดค่ามาตรฐานเฉลี่ย 1 ปี ต้องไม่เกิน 1.7 $\mu g/m^3$ (ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 2550) ซึ่งในปี พ.ศ. 2560 พื้นที่ของจังหวัดระยอง BZ มีค่าเฉลี่ย 1 ปี ของทุกสถานีตรวจวัดอยู่ในช่วง 1.3 - 5.5 $\mu g/m^3$ โดยผลการตรวจวัดคุณภาพอากาศจาก 10 สถานีตรวจวัดของกรมควบคุมมลพิษ (Pollution Control Department, PCD) พบว่ามีถึง 8 สถานีตรวจวัดที่ค่า BZ เกินค่ามาตรฐาน (กรมควบคุมมลพิษ, 2561)

สำหรับการศึกษานี้ได้ทำการศึกษาถึงความเข้มข้นของ BZ บริเวณพื้นที่กลุ่มนิคมอุตสาหกรรมในพื้นที่มาบตาพุด จังหวัดระยอง โดยใช้ข้อมูลตรวจวัด BZ สถานีภาคพื้นดินที่ตั้งอยู่ภายในและรอบนอกนิคมอุตสาหกรรม ศึกษาความสัมพันธ์ของสภาพอุตุนิยมวิทยาที่มีต่อความเข้มข้นของ BZ และประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Geographic Information System, GIS) ด้วยวิธี IDW เพื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของ BZ ในพื้นที่ ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการศึกษานี้จะเป็นประโยชน์ต่อการกำหนดแนวทางหรือมาตรการในการจัดการ BZ ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

อุปกรณ์และวิธีการ

ข้อมูลตรวจวัดเบนซีนภาคพื้นดิน

ใช้ข้อมูลตรวจวัด BZ เป็นค่ารายเดือน พ.ศ. 2550 - 2560 จากสถานีภาคพื้นดินของ PCD 5 จังหวัด ได้แก่ จังหวัดเชียงใหม่ กรุงเทพมหานคร จังหวัดขอนแก่น จังหวัดสงขลา และจังหวัดระยอง และค่าอุตุนิยมวิทยา ได้แก่ RH และ Temp (ค่าเฉลี่ยช่วงเวลา 10.00 - 15.00 น. ของวันที่ทำการตรวจวัด) และข้อมูลตรวจวัด BZ และ WS (ตรวจวัดพร้อมกับ BZ) ค่ารายเดือน พ.ศ. 2555 - 2560 ของสำนักงานนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด การนิคมอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย (Industrial Estate Authority of Thailand, IEAT) โดยสถานีตรวจวัดรอบกลุ่มนิคมอุตสาหกรรมของ PCD และ IEAT มีรายชื่อตาม Table 1 และมีจุดที่ตั้งสถานีดังแสดงใน Figure 1

การกระจายตัวของเบนซีน

นำข้อมูลการตรวจวัดภาคพื้นดินในพื้นที่มาบตาพุดมาจัดเตรียมให้อยู่ในรูปแบบสำหรับวิเคราะห์ด้วยระบบ GIS จัดทำพิกัดของสถานีตรวจวัดของ PCD และ IEAT ให้อยู่ในระบบ WGS1984 UTM zone 47N โดย

เลือกใช้วิธี IDW ซึ่งเป็นการทำนายค่าตัวเลขบริเวณที่ไม่มีข้อมูลเพื่อให้มีความต่อเนื่องของข้อมูลในทุกพื้นที่ จะให้ผลลัพธ์ออกมาเป็นข้อมูลแบบราสเตอร์ (Raster Format) และวิเคราะห์ร่วมกับข้อมูลกิจกรรมการซ่อมบำรุงใหญ่และเหตุฉุกเฉินของโรงงานอุตสาหกรรมในพื้นที่มาบตาพุด ของศูนย์เฝ้าระวังและควบคุมคุณภาพสิ่งแวดล้อม (Environmental Monitoring and Control Center, EMCC) สำนักงานนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด

Table 1 Symbol of PCD station and IEAT station

PCD	Station	IEAT	Station
R1	Map Ta Phut health promoting hospital	R11	Wat Map Cha Lut
R2	Wat Map Cha Lut	R12	Wat Nong Fab
R3	Wat Nong Fab school	R13	Ban Map Ta Phut
R4	new Map Ta Phut city	R14	Wat Sophon Wanaram
R5	Ban Phleng community	R15	Ban Phleng community
R6	Ban Takuan public healt center	R16	new Map Ta Phut city
R7	Neon Payom community	R17	Ban Takuan public healt center
		R18	Map Ta Phut health promoting hospital
		R19	intersection between I-3 road and I-4 road
		R20	Map Ta Phut Industrial estate
		R21	I-2 road
		R22	PTT chemical I-1
		R23	I-4 road
		R24	eastern of Map Ta Phut complex
		R25	I-7 road

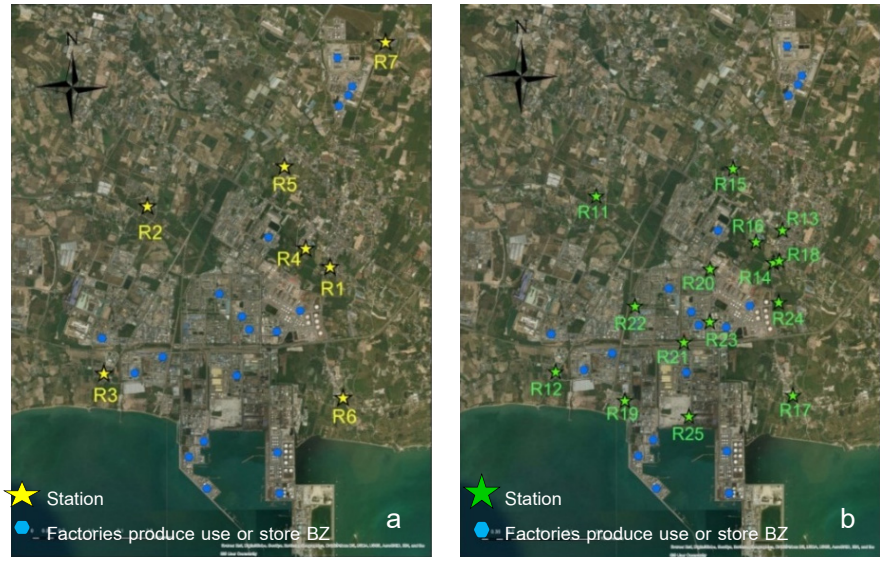


Figure 1 Sampling site of: (a) PCD station and (b) IEAT station

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ความเข้มข้นของเบนซีนในพื้นที่มาบตาพุด และจังหวัดอื่นในประเทศไทย

Figure 2a แสดงความเข้มข้น BZ ที่ตรวจวัดโดย PCD ซึ่งสถานีตรวจวัดตั้งอยู่รอบพื้นที่กลุ่มนิคมฯ พบว่าค่าเฉลี่ยรายปีช่วงแรกทุกสถานีมีค่าสูงกว่ามาตรฐานรายปี และเริ่มมีการปรับลดลงในช่วงปี พ.ศ. 2555 โดยความเข้มข้นทุกสถานีจะมีค่าอยู่ในช่วง 1 - 4.5 $\mu g/m^3$ ยกเว้นที่สถานี R5 ที่มีค่าสูงกว่า 4.5 $\mu g/m^3$ หากพิจารณาตามตำแหน่งที่ตั้งของสถานี R5 เป็นแหล่งชุมชนที่ตั้งอยู่ระหว่างโรงงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับ BZ ทำให้อาจได้รับผลกระทบเมื่อมีลมพัดจากทะเลขึ้นมาบนชายฝั่งพาเอา BZ ที่อยู่ในพื้นที่นิคมอุตสาหกรรมซึ่งตั้งอยู่ทิศใต้

ของสถานีขึ้นมา หรือเมื่อลมพัดจากพื้นที่นิคมอุตสาหกรรมที่อยู่ในทิศตะวันออกเฉียงเหนือมาผ่านยังจุดที่ตั้งสถานีตรวจวัดออกสู่ทะเล นอกจากนี้จุดที่ตั้งสถานี R5 เป็นพื้นที่ริมถนน ยานพาหนะที่ใช้เชื้อเพลิงซึ่งมีส่วนผสมของ BZ สามารถปลดปล่อย BZ ออกสู่บรรยากาศได้เช่นกัน สำหรับ Figure 2b แสดงความเข้มข้น BZ ที่ตรวจวัดโดย IEAT โดยสถานีตรวจวัดมีทั้งตั้งรอบนอกนิคมฯ (R11 - R18) และในพื้นที่นิคมฯ (R19 - R25) โดยพบว่าความเข้มข้นของ BZ ของทุกสถานีจะอยู่ในช่วง 0 - 6 $\mu g/m^3$ ยกเว้นที่สถานี R23 มีค่าสูงกว่า 7 $\mu g/m^3$ เมื่อพิจารณาตามจุดที่ตั้งสถานีตรวจวัดจะเห็นว่าสถานี R23 อยู่ใกล้โรงงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับ BZ สามแห่ง ทำให้ผลตรวจวัด BZ สูงกว่าในสถานีอื่น และเมื่อเทียบค่าความเข้มข้นของ BZ ในพื้นที่มาบตาพุดกับจังหวัดอื่นที่เป็นชุมชนเมืองหลักของแต่ละภาคในประเทศไทย ดังแสดงใน Figure 2c พบว่าความเข้มข้นของ BZ ในจังหวัดต่าง ๆ มีแนวโน้มลดลง ในขณะที่พื้นที่มาบตาพุดยังคงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากสถานีตรวจวัดในจังหวัดอื่นเป็นพื้นที่ชุมชน แหล่งกำเนิด BZ หลักเกิดจากยานพาหนะ ประกอบกับในปี พ.ศ. 2555 กรมธุรกิจพลังงานได้กำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำมันเบนซินให้มี BZ ไม่เกิน 1 %Vol (ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน, 2555) ทำให้ BZ จากยานพาหนะมีค่าลดลง ซึ่งผลการศึกษานี้สอดคล้องกับการศึกษาของ Tiwari *et al.*, (2009) ที่ศึกษาความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหย (Volatile organic compound, VOCs) ในพื้นที่อุตสาหกรรมและชุมชนเมือง โดยพบว่า BZ ซึ่งเป็นหนึ่งในสาร VOCs ที่ศึกษาในพื้นที่อุตสาหกรรมมีความเข้มข้นสูงกว่าพื้นที่ชุมชนเมือง

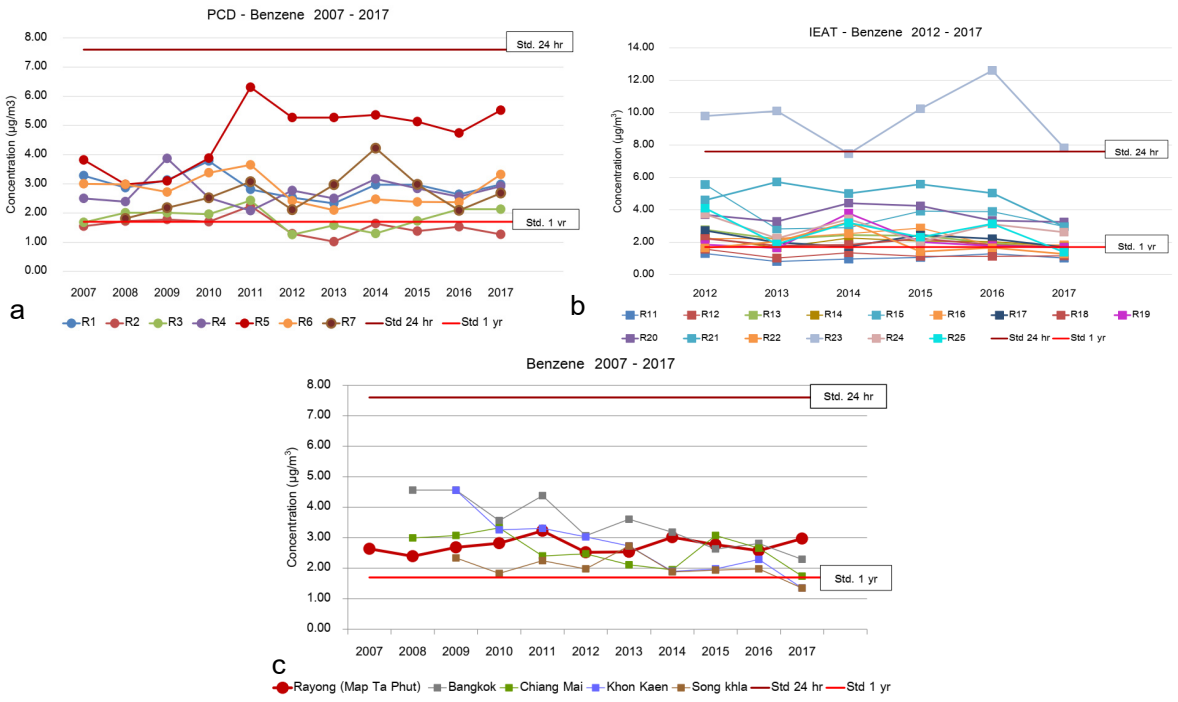


Figure 2 The BZ concentration situation: (a) BZ concentration in Map Ta Phut measured by PCD, (b) BZ concentration in Map Ta Phut measured by IEAT and (c) BZ concentration in Map Ta Phut and other provinces in Thailand measured by PCD

จากภาพรวมความเข้มข้นของ BZ ในปัจจุบันของพื้นที่มาบตาพุดยังคงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบค่าผลการตรวจวัดสาร BZ ในบรรยากาศของทั้ง IEAT และ PCD จะเห็นได้ว่า ค่า BZ ของพื้นที่ภายในนิคมอุตสาหกรรมมีค่าสูงกว่าพื้นที่รอบนอก เนื่องจากได้รับผลกระทบจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ประกอบกิจการเกี่ยวข้องกับ BZ ไม่ว่าจะเป็นการผลิต ใช้ หรือเก็บรักษา BZ ภายในโรงงาน นอกจากนี้ สถานที่ตั้งสถานีตรวจวัดของทั้ง PCD และ IEAT บางสถานีเป็นจุดที่อยู่ริมถนนซึ่งมีการจราจรหนาแน่น ยานพาหนะถือเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อความเข้มข้น BZ ขณะตรวจวัดด้วย

ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพอุตุนิยมวิทยาและความเข้มข้นของเบนซีน

Figure 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ BZ และข้อมูลอุตุนิยมวิทยา ได้แก่ RH Temp และ WS ซึ่งพบว่าค่า R^2 ของ BZ กับทุกปัจจัยมีค่าเข้าใกล้ 0 (ค่า R^2 0.0304 0.0109 และ 0.0496 ตามลำดับ) โดยความเข้มข้นของ BZ ส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วง 0 - 5 $\mu g/m^3$ และมีบางครั้งที่ตรวจพบค่าสูงขึ้นมากกว่า 10 $\mu g/m^3$ โดยค่าที่สูงขึ้นมานี้เกิดปรากฏได้ทั้งในช่วงที่ RH Temp WS มีค่าต่ำและสูง แสดงให้เห็นว่าข้อมูลอุตุนิยมวิทยามีผลต่อความเข้มข้น BZ น้อย และเป็นไปได้ว่ามีปัจจัยอื่นที่มีผลต่อการกระจายตัวของ BZ คือ อิทธิพลของลมบกลมทะเลซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Giakoumi *et al.*, (2008)

ทั้งนี้หากพิจารณาพื้นมาบตาพุดบริเวณที่เป็นพื้นที่ริมชายฝั่ง พบว่าสถานีตรวจวัดที่อยู่ใต้ลมมีความเข้มข้น BZ สูงกว่าในช่วงเวลาที่ไม่มีลมทะเล หรือในกรณีที่เกิดลมบกพัดจากชายฝั่งออกสู่ทะเล เนื่องจากในช่วงเวลาที่เกิดลมทะเลพัดจากเข้าสู่ชายฝั่งผ่านพื้นที่นิคมฯ ที่มีโรงงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับ BZ แล้วพา BZ กระจายตัวออกไปด้วย ทำให้ BZ ถูกพัดผ่านสถานีตรวจวัดที่ตั้งอยู่ทิศใต้ลม

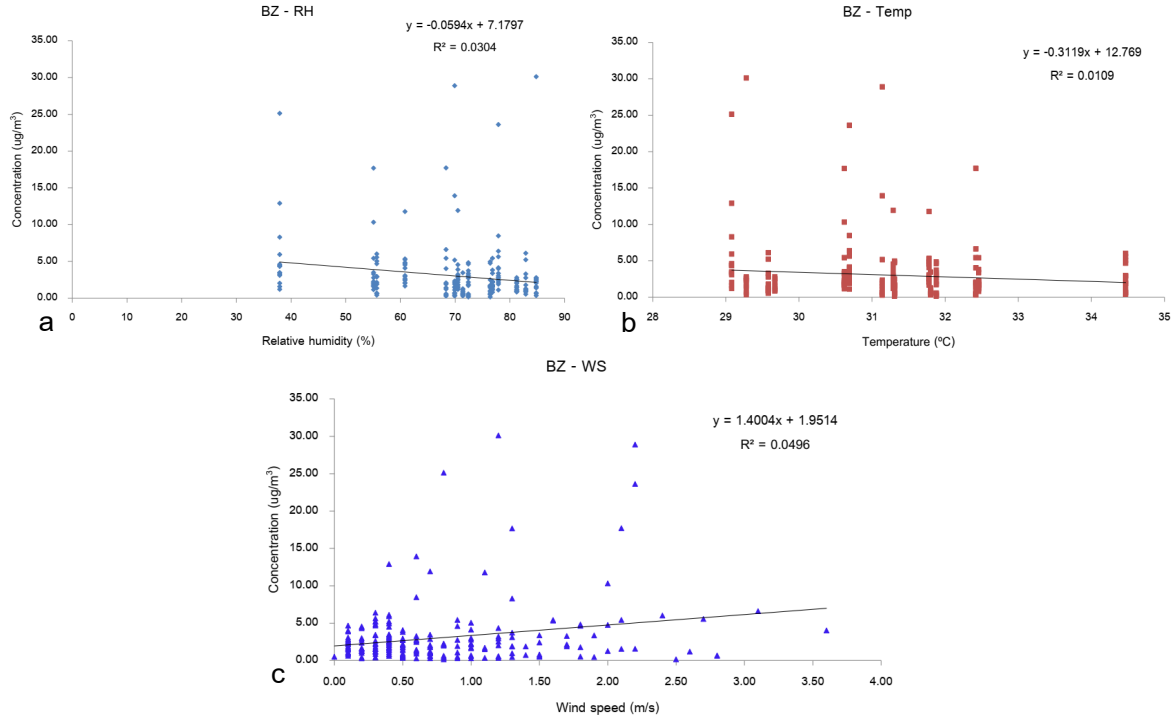


Figure 3 The relationship between BZ concentrations and meteorological conditions: (a) relative humidity, (b) temperature and (c) wind speed in Map Ta Phut from 2016 to 2017

นอกจากนี้ความเข้มข้นของ BZ อาจได้รับผลกระทบแหล่งกำเนิด BZ ที่เป็นโรงงานอุตสาหกรรมในกลุ่มปิโตรเลียมและปิโตรเคมี ซึ่งมีกิจกรรมบางอย่างที่ก่อให้เกิดการปลดปล่อย BZ ออกสู่บรรยากาศสูงกว่าในสภาวะการผลิตปกติ เช่น การเปิดอุปกรณ์ในกระบวนการผลิตที่มี BZ ตกค้าง ทำให้สถานีที่ตั้งอยู่ใกล้โรงงานอุตสาหกรรมที่มีกิจกรรมดังกล่าวมีผลการตรวจวัดสูงตามไปด้วย หรือช่วงเวลาที่มีกิจกรรมดังกล่าวมีลมทะเลหรือลมบกร่วมด้วย ทำให้ BZ กระจายตัวออกไปสู่สถานีใกล้เคียงได้เช่นกัน ดังนั้น ความเข้มข้นของ BZ ในพื้นที่มาบตาพุดได้รับอิทธิพลจากหลายปัจจัยร่วมกัน ไม่ว่าจะเป็น RH Temp WS ทิศทางลม และแหล่งกำเนิด BZ ที่อยู่ในพื้นที่ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Eylem *et al.*, (2003) ที่พบว่าความเข้มข้นของ VOCs ที่ตรวจวัดรอบพื้นที่อุตสาหกรรมปิโตรเคมีและปิโตรเลียมได้รับผลกระทบจาก Temp และ WS ร่วมกับปัจจัยอื่น เช่น ทิศทางลม แหล่งกำเนิด VOCs ด้วย

การกระจายตัวของเบนซีนในพื้นที่มาบตาพุด

จากข้อมูลตรวจวัด BZ ของ PCD และ IEAT พบว่ามีเพียงแค่บางเดือนเท่านั้นที่ผลการตรวจวัดมีค่าสูง (Peak) กว่าค่าเฝ้าระวัง 24 ชั่วโมง (7.6 µg/m^3) (ประกาศกรมควบคุมมลพิษ, 2550) เมื่อนำข้อมูลตรวจวัดของทั้งสองหน่วยงานที่มีการตรวจวัดในช่วงเวลาเดียวกันหรือต่อเนื่องกันมาวิเคราะห์ด้วยวิธี IDW จะได้ผลดังแสดงในรูป โดย Figure 4a แสดงผลการวิเคราะห์ของ IEAT และ PCD (ช่วงวันที่ 10 - 12 ตุลาคม พ.ศ. 2560) ซึ่งมีผลการตรวจวัดของทุกสถานีมีค่าต่ำกว่า 7.6 µg/m^3 ทั้งนี้ทำการวิเคราะห์ผลการตรวจวัดแยกหน่วยงาน และวิเคราะห์ร่วมกัน จะเห็นว่าการกระจายตัวของ BZ พื้นที่ทั้งในและรอบนอกนิคมฯ เป็นไปในทิศทางเดียวกัน และเมื่อตรวจสอบร่วมกับข้อมูลกิจกรรมของศูนย์ EMCC พบว่าในช่วงเวลาดังกล่าวไม่มีโรงงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับ BZ มีกิจกรรมซ่อมบำรุงหรือเหตุฉุกเฉิน

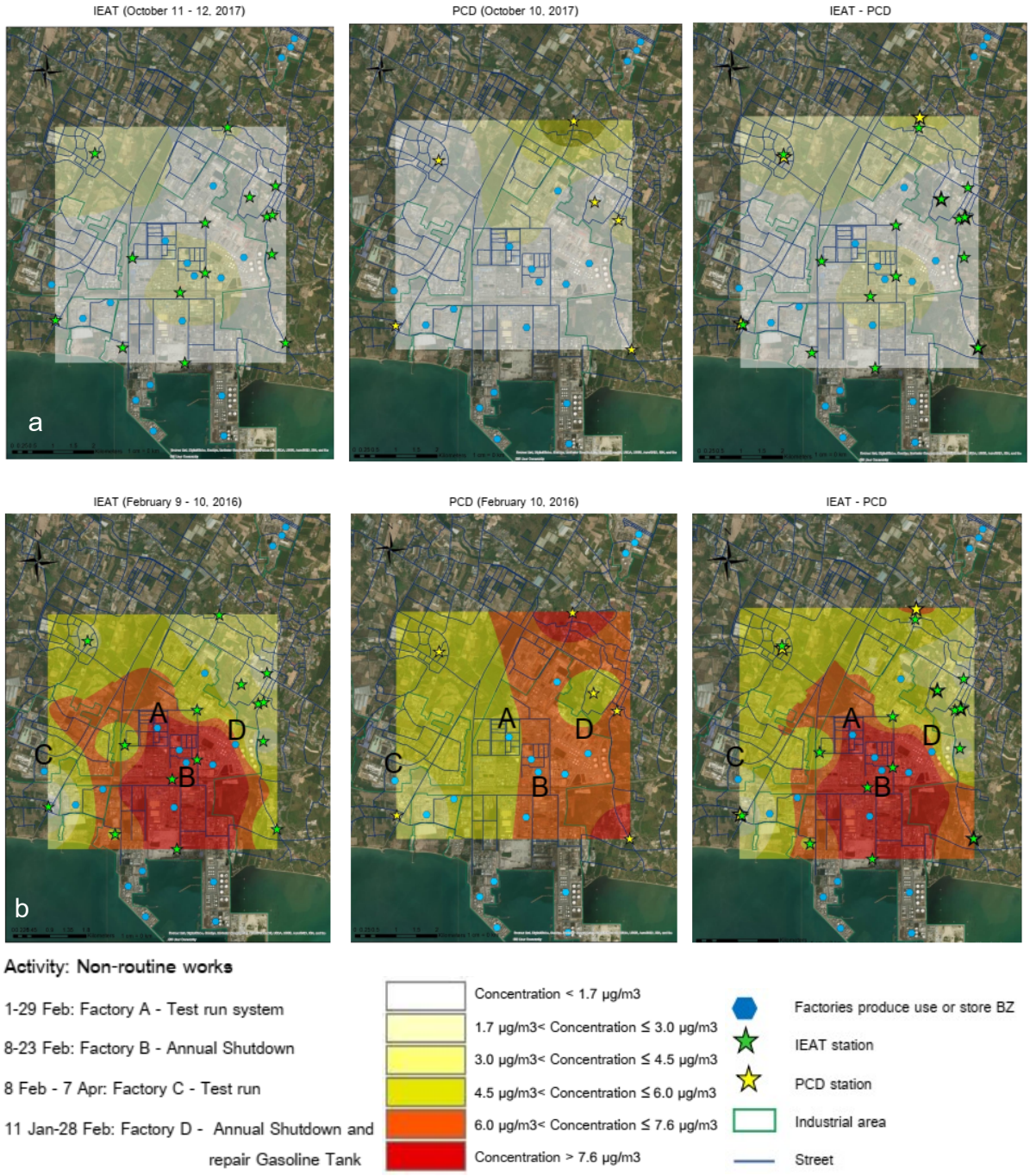


Figure 4 Distribution of BZ over Map Ta Phut area analyzed by IDW method

และเมื่อนำข้อมูลผลการตรวจวัดที่เกิด Peak บางสถานีทั้งของ PCD และ IEAT (ช่วงวันที่ 9 - 10 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559) ได้ผลการวิเคราะห์ดัง Figure 4b โดยข้อมูลของ IEAT แสดงให้เห็นว่าในพื้นที่นิคมฯ มีความเข้มข้นของ BZ สูงเกิน 7.6 μg/m^3 ครอบคลุมโรงงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวกับ BZ ถึง 7 โรงงาน ในขณะเดียวกันข้อมูลของ PCD แสดงให้เห็นว่าบางส่วนในนิคมฯ และรอบนอกมีความเข้มข้น BZ สูงทั้งที่เกินและไม่เกินค่าเฝ้าระวัง 24 ชั่วโมง และเมื่อวิเคราะห์ผลร่วมกันจะเห็นได้ชัดเจนว่าในพื้นที่นิคมฯ มีค่าสูงเกิน 7.6 μg/m^3 จากการตรวจสอบข้อมูลศูนย์ EMCC พบว่าโรงงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับ BZ มีกิจกรรมที่ไม่ใช่การผลิตปกติ ได้แก่ การซ่อมบำรุงอุปกรณ์ และการทดลองเดินระบบ ซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกับผลการวิเคราะห์ IDW แต่อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์การกระจายตัวของ BZ ด้วยวิธี IDW เป็นการประมาณค่าโดยการสุ่มความเข้มข้นแต่ละจุดจากตำแหน่งที่สามารถส่งผลกระทบไปยังพื้นที่ที่ต้องประมาณค่าได้ ซึ่งจะมีผลกระทบ น้อยลงเรื่อย ๆ ตามระยะทางที่ไกลออกไป โดยไม่ได้คำนึงถึงสภาพอากาศขณะที่ตรวจวัด ซึ่งอาจมีความแปรปรวนสูง รวมทั้งค่าความเข้มข้นและจำนวนจุดตรวจวัดที่ใช้ในการวิเคราะห์ทำให้การแสดงผลแตกต่างกัน ดังเช่นผลการวิเคราะห์ของ PDC และ IEAT ที่แม้จะเป็นผลการตรวจวัดวันเดียวกัน แต่ด้วยความเข้มข้นของแต่ละจุดและระยะห่างจากแต่ละจุดที่ไม่เท่ากันทำให้ผลการวิเคราะห์ที่แสดงแตกต่างกัน ทั้งนี้ วิธี IDW ถือเป็นวิธีการวิเคราะห์ที่ไม่ยุ่งยาก และใช้ในการวิเคราะห์การกระจายตัวของ BZ ในเบื้องต้นร่วมกับข้อมูลจากศูนย์ EMCC ได้ ซึ่งผลการศึกษานี้สอดคล้องกับ Chung *et al.*, (2010) ที่ศึกษาลักษณะการรับสัมผัส BZ ขณะมีการซ่อมบำรุงใหญ่ของคนงานในโรงงานอุตสาหกรรมปิโตรเคมี พบว่าในช่วงเวลาดังกล่าว พนักงานที่ปฏิบัติงานได้รับสัมผัส BZ สูง นอกจากนี้ยังมี Chung *et al.*, (2016) ศึกษาเปรียบเทียบการรับสัมผัส BZ ช่วงการซ่อมบำรุงและการผลิตปกติของโรงงานอุตสาหกรรมปิโตรเคมีของประเทศเกาหลีใต้ โดยพบว่า ในช่วงเวลาปฏิบัติงานระยะยาว (8 ชั่วโมง) มีการได้รับสัมผัส BZ มากกว่าช่วงเวลาผลิตปกติ 1.7 - 9 เท่า นั่นแสดงให้เห็นว่าช่วงเวลาที่มีการซ่อมบำรุงหรือกิจกรรมอื่นที่ไม่ใช่การผลิตปกติ (Non-routine works) BZ ที่อยู่ในกระบวนการผลิตจะถูกปลดปล่อยออกสู่บรรยากาศมากกว่าส่งผลให้ความเข้มข้นของ BZ ในบรรยากาศสูงขึ้นตามไปด้วย

สรุป

การศึกษานี้เป็นการศึกษาความเข้มข้นของ BZ บริเวณพื้นที่รอบนิคมอุตสาหกรรม ตำบลมาบตาพุด จังหวัดระยอง ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีโรงงานอุตสาหกรรมปิโตรเลียมและปิโตรเคมีหนาแน่น โดยจากข้อมูลการตรวจวัดความเข้มข้น BZ ของสถานีภาคพื้นดินแสดงให้เห็นว่าพื้นที่มาบตาพุดยังคงมีแนวโน้มสูงขึ้นกว่าในจังหวัดอื่น และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ BZ กับสภาพอุตุนิยมวิทยา ได้แก่ RH Temp และ WS พบว่า RH Temp และ WS มีผลต่อความเข้มข้นของ BZ น้อย (ค่า R^2 0.0304 0.0109 และ 0.0496 ตามลำดับ) แสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นของ BZ ไม่ได้รับอิทธิพลจากสภาพอุตุนิยมวิทยาอย่างเดียว แต่มีปัจจัยอื่นร่วมด้วย เช่น ทิศทางลม แหล่งกำเนิด BZ เป็นต้น และเมื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของ BZ ด้วยวิธี IDW พบว่า ความเข้มข้นของ BZ ที่สูงเกินค่าเฝ้าระวัง 24 ชั่วโมง เกิดจากช่วงเวลาที่โรงงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับ BZ มีการซ่อมบำรุงหรือกิจกรรมที่ไม่ใช่การผลิตปกติ ดังนั้น ในการควบคุมความเข้มข้นของ BZ ในพื้นที่มาบตาพุดควรมุ่งเน้นกำหนดแนวทางหรือมาตรการของโรงงานอุตสาหกรรมปิโตรเคมีและปิโตรเลียมในช่วงที่มีการซ่อมบำรุง เพื่อให้มีการควบคุมและลดการปลดปล่อย BZ ออกสู่บรรยากาศ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยในครั้งนี้ รวมทั้งกรมควบคุมมลพิษที่ให้ข้อมูล BZ RH และ Temp การนิคมอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทยที่ให้ข้อมูล BZ WS และข้อมูลกิจกรรมของโรงงานอุตสาหกรรมในนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด และสถาบันปิโตรเลียมแห่งประเทศไทยที่ให้คำแนะนำในการศึกษา

เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. 2561. **สรุปสถานการณ์สารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศ (VOCs) ปี 2560**. แหล่งที่มา: http://www.pcd.go.th/Info_serv/pol_maptapoot_airVocs_year2017.cfm.

บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน). 2554. **สารานุกรม เปิดโลกปิโตรเคมี**. บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน), กรุงเทพฯ 450 หน้า.

ประกาศกรมควบคุมมลพิษ. 2550. **กำหนดค่าเฝ้าระวังสำหรับสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศโดยทั่วไปในเวลา 24 ชั่วโมง**. ราชกิจจานุเบกษา เล่ม 126 ตอนพิเศษ 13ง.

ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน. 2555. **กำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันเบนซิน**. ราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 129 ตอนพิเศษ 160ง.

ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ. 2550. **กำหนดมาตรฐานค่าสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศโดยทั่วไปในเวลา 1 ปี**. ราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 124 ตอนพิเศษ 143ง.

Eun-Kyo Chung, Jung-Ah Shin, Byung-Kyu Lee, Jiwoon Kwon, Naroo Lee, Kwang-Jae Chung, Jong-Han Lee, In-Seop Lee, Seong-Kyu Kang and Jae-Kil Jang. 2010. Characteristics of Occupational Exposure to Benzene during Turnaround in the Petrochemical Industries. **Safety and Health at Work** 2010 1: 51–60.

Eun-Kyo Chung, Jae-Kil Jang and Dong-Hee Koh. 2016. A Comparison of Benzene Exposures in Maintenance and Regular Works at Korean Petrochemical Plants. **Journal of Chemical Health & Safety** 24(3): 21–26.

Eylem Cetin, Mustafa Odabasi, and Remzi Seyfioglu. 2003. Ambient Volatile Organic Compound (VOC) Concentrations around a Petrochemical Complex and a Petroleum Refinery. **The Science of the Total Environment** 312(03): 103–12.

Giakoumi, A, T H Maggos, and J Michopoulos. 2009. $PM_{2.5}$ and Volatile Organic Compounds (VOCs) in Ambient Air: A Focus on the Effect of Meteorology. **Environ Monit Assess** (2009) 152: 83–95.

Vasu Tiwari, Yoshimichi Hanai, and Shigeki Masunaga. 2010. Ambient Levels of Volatile Organic Compounds in the Vicinity of Petrochemical Industrial Area of Yokohama, Japan. **Air Qual Atmos Health** (2010) 3: 65–75.

ข้อเสนอแนะการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำในสภาวะการใช้ประโยชน์ที่ดินที่เปลี่ยนแปลงของลุ่มน้ำคลองวังหีบ จังหวัดนครศรีธรรมราช

Recommendations for Managing Water Resources in Changing Land Use Conditions of Khlong Wang Heep Basin, Nakhon Si Thammarat Province

บริวัฒน์ ชัยงาม[1*] และ สิตางศุ์ พิลัยหล้า[1]

Boriwat Chaingam[1*] and Sitang Pilailar[1]

บทคัดย่อ

ในช่วงระยะเวลา 10 ปี พื้นที่ลุ่มน้ำคลองวังหีบมีรูปแบบการใช้ประโยชน์ที่ดินเปลี่ยนแปลงไป กล่าวคือ มีพื้นที่แหล่งน้ำและพื้นที่ชุมชนเพิ่มขึ้น แต่พื้นที่ป่าและพื้นที่เกษตรกรรมลดลงเล็กน้อย มีการปรับเปลี่ยนชนิดพืชที่ปลูกจากนาข้าวไปเป็นไม้ยืนต้น อาทิ ยางพารา ปาล์ม ไม้ผล เพิ่มขึ้น ทำให้รูปแบบความต้องการใช้น้ำในพื้นที่เปลี่ยนไป การศึกษานี้ประยุกต์ใช้แบบจำลอง SWAT เพื่อประเมินการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำท่าอันเป็นผลจากการใช้ประโยชน์ที่ดินที่เปลี่ยนแปลงไป ประเมินความต้องการใช้น้ำครอบคลุมการเกษตร อุปโภคบริโภค และน้ำเพื่อรักษาระบบนิเวศน์ โดยใช้ข้อมูลที่เป็นปัจจุบัน พบว่า การที่พื้นที่นาข้าวลดลงส่งผลให้ความต้องการใช้น้ำรายเดือนค่อนข้างคงที่ ไม่ผันผวนอย่างในอดีต แต่ยังมีปัญหาขาดแคลนน้ำในช่วงเดือนมกราคม ถึง พฤษภาคม รวมประมาณ 19 ล้าน ลบ.ม. แต่ในเดือนอื่นๆ มีน้ำส่วนเกินรวมประมาณ 52 ล้าน ลบ.ม. หากพัฒนาแหล่งน้ำแบบเกษตรกรช่วยเหลือตนเอง ในพื้นที่ประมาณ 31 ตร.กม. ขึ้นไปจะสามารถบรรเทาปัญหาน้ำขาดแคลนและอุทกภัยได้

ABSTRACT

Over the past 10 years, the pattern of land use in Khlong Wang Heep Basin has been changed; i.e. the area of water resources and community area has increased, whilst the forest and agricultural areas decreased slightly. Modification of plant species from rice fields to perennial trees such as rubber, palm trees, fruit increased, resulting in a change in water demand in the area. This study uses a SWAT model to assess changes in runoff due to altered land use, including the water demand which cover agricultural, consumer and water to maintain the ecosystem. Using the current data, the decrease in rice paddy area resulted in a constant monthly demand for water, no fluctuations like it was. Water shortages in January to May totaled about 19 million cubic meters, but in other months there is the excess water about 52 million cubic meters. The study suggests that developing a self-help farmer's water source, around 31 sq.km., will be able to alleviate the problem of water shortage and flood in Khlong Wang Heep Basin.

Key Words: Water Management, Land Use Change, Swat

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

[1]ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

คำนำ

ลุ่มน้ำคลองวังหีบ เป็นลุ่มน้ำย่อยในลุ่มน้ำแม่น้ำตรัง อยู่ในลุ่มน้ำภาคใต้ฝั่งตะวันตก มีพื้นที่ลุ่มน้ำรวมทั้งสิ้น 155 ตร.กม. ครอบคลุมตำบลนาหลวงเสน ตำบลหนองหงส์ ตำบลควนกรด และตำบลนาไม้ไผ่ อำเภอทุ่งสง จังหวัดนครศรีธรรมราช ในอดีตพื้นที่ส่วนใหญ่เป็นพื้นที่เกษตรกรรมเพื่อการเพาะปลูกข้าว ยางพารา ปาล์ม และไม้ผล โดยในปี พ.ศ. 2543 มีพื้นที่นาข้าวคิดเป็นร้อยละ 17 ของพื้นที่ทั้งหมด ในหน้าแล้งเกษตรกรประสบปัญหาขาดแคลนน้ำ จึงเป็นที่มาของแผนดำเนินโครงการวังหีบ ซึ่งมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อใช้เป็นแหล่งเก็บกักน้ำเพื่อการเพาะปลูก เพื่อการอุปโภค-บริโภค และเพื่อบรรเทาอุทกภัยในช่วงฤดูน้ำหลาก โดยมีตัวเขื่อนวังหีบขนาดความจุ 20 ล้านลูกบาศก์เมตรปิดกั้นคลองวังหีบที่บ้านสระแก้ว หมู่ที่ 1 และบ้านคอกช้าง หมู่ที่ 5 ตำบลนาหลวงเสน อำเภอทุ่งสง จังหวัดนครศรีธรรมราช อย่างไรก็ตาม พบว่าในปี พ.ศ. 2559 พื้นที่เพาะปลูกข้าวลดลงเหลือร้อยละ 6 โดยเกษตรกรได้ปรับเปลี่ยนไปปลูกพืชเศรษฐกิจ อาทิ ยางพารา ปาล์มน้ำมัน ตามกลไกการตลาดที่มุ่งเน้นการส่งออกมากกว่าการเกษตรเพื่อเป็นแหล่งอาหารในพื้นที่ ส่งผลให้รูปแบบความต้องการการใช้น้ำของเกษตรกรเปลี่ยนแปลงไป โดยที่ความต้องการใช้น้ำเพื่อการอุปโภคบริโภคยังเพิ่มขึ้นตามจำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้น จากข้อเท็จจริงของการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน วิถีชีวิตและภูมิสังคมที่เปลี่ยนแปลงไปนี้ ส่งผลให้ประชาชนผู้อาจได้รับผลกระทบจากการก่อสร้างโครงการฯ ไม่เห็นด้วยกับการดำเนินโครงการ และเรียกร้องให้มีการบริหารจัดการน้ำด้วยแนวทางอื่นๆ นอกเหนือจากการก่อสร้างเขื่อน

ผู้ศึกษาเห็นว่า การเก็บกักน้ำส่วนเกินในหน้าฝน เพื่อใช้ในหน้าแล้งในลักษณะบ่อน้ำการเกษตร (Farm Pond) เป็นทางเลือกหนึ่งที่ควรพิจารณาและศึกษา จึงได้ประเมินปริมาณน้ำท่าและความต้องการใช้น้ำที่สอดคล้องกับวิถีชีวิตและการใช้ประโยชน์ที่ดินในปัจจุบัน ที่ เพื่อวิเคราะห์ปริมาณน้ำที่ควรเก็บกักให้เพียงพอสำหรับการเกษตรในหน้าแล้ง รวมทั้ง น้ำเพื่อการอุปโภคบริโภคในชุมชน เพื่อนำไปสู่ข้อเสนอการบริหารจัดการน้ำในรูปแบบที่เกษตรกรสามารถดำเนินการได้ในพื้นที่ของตนเองตามศักยภาพ

อุปกรณ์และวิธีการ

พื้นที่ศึกษา

ลุ่มน้ำคลองวังหีบ เป็นลุ่มน้ำย่อยในลุ่มน้ำแม่น้ำตรัง อยู่ในลุ่มน้ำภาคใต้ฝั่งตะวันตก มีพื้นที่ลุ่มน้ำรวมทั้งสิ้น 155 ตร.กม. ดังแสดงใน Figure 1 มีปริมาณฝนเฉลี่ยรายปีมากกว่า 1,900 มิลลิเมตร โดยพื้นที่ต้นน้ำอยู่ในเขตพื้นที่คุณภาพลุ่มน้ำชั้น 1A มีปริมาณน้ำท่าด้านต้นน้ำประมาณ 27 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี และมีปริมาณน้ำท่าไหลเสริมตามระยะทางลำน้ำ (side flow) อีกประมาณ 100 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี (กรมชลประทาน, 2559)

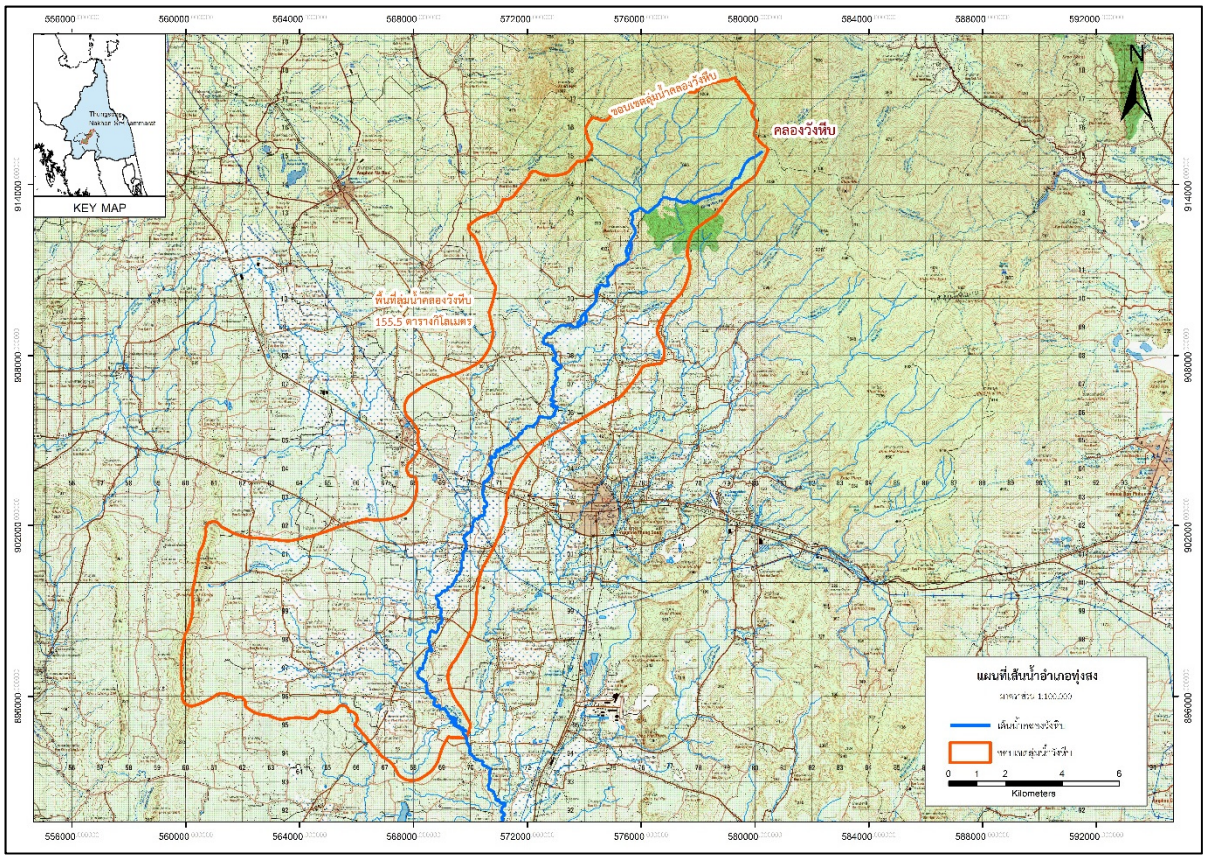


Figure 1 Study Area: Wang Heep Basin

การเลือกแบบจำลองในการประเมินน้ำท่า

การศึกษานี้ประเมินน้ำท่าโดยประยุกต์ใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ SWAT Model (Soil and Water Assessment Tool) เนื่องจากต้องการศึกษาในเชิงผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินในช่วงระยะเวลาต่าง ๆ ซึ่งแบบจำลอง SWAT สามารถจำลองลักษณะทางกายภาพของลุ่มน้ำเป็นหลัก สามารถวิเคราะห์และตรวจสอบความถูกต้อง ซึ่งเปรียบเทียบผลที่ได้จากความสัมพันธ์ทางลักษณะภูมิประเทศ เป็นแบบจำลองชนิดกระจายพารามิเตอร์ ที่คำนวณผลครอบคลุมระดับลุ่มน้ำ สามารถจำลองได้ในช่วงระยะเวลาที่ยาวนานสำหรับประเมินผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน ทั้งยังเป็นแบบจำลองสาธารณสิทธิ์และหลักการคำนวณฝนส่วนเกินของแบบจำลองเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวาง กระบวนการจัดการไม่ซับซ้อน โดยข้อมูลที่ใช้ได้แก่ ข้อมูลสภาพภูมิประเทศ (DEM) ข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน ข้อมูลดิน ข้อมูลสภาพอากาศ และข้อมูลปริมาณน้ำเฉลี่ยรายเดือน ในปี พ.ศ. 2550 2555 และ 2559

การสอบเทียบแบบจำลอง

ในการสอบเทียบแบบจำลอง SWAT ผู้ศึกษาใช้ข้อมูลน้ำท่ารายเดือนเฉลี่ย ของสถานีวัดน้ำท่า X.56 สถานีในแม่น้ำตรัง บ้านท่าประดู่ อำเภอห้วยยอด จังหวัดตรัง โดยใช้ช่วงข้อมูลปี 2523 ถึง 2552 ผลการสอบเทียบดังแสดงใน Figure 2 โดยมีค่าความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง, ค่า R^2 = 0.58 EI 0.20

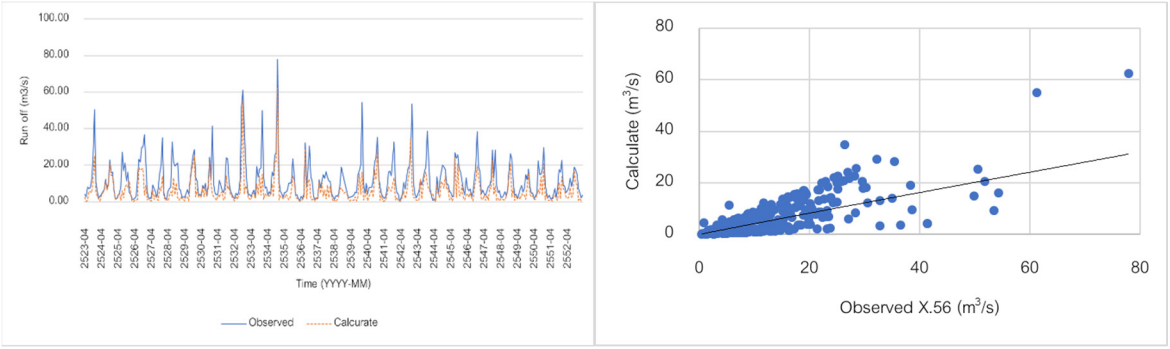


Figure 2 Model calibration

การประเมินความต้องการน้ำ

ผู้ศึกษาได้สอบถามประชาชนในตำบลนาหลวงเสนบางส่วนเกี่ยวกับการใช้น้ำ พบว่า ปัจจุบันอาศัยน้ำฝนในการปลูกยางพาราและไม้ผล บางส่วนใช้น้ำจากคลองส่งน้ำของกรมชลประทานที่มีอยู่แล้ว ในส่วนของน้ำอุปโภคบริโภคนั้นประชาชนใช้น้ำประปาภูเขา และประปาหมู่บ้านเป็นหลัก

ทั้งนี้ การศึกษานี้ได้ประเมินความต้องการใช้น้ำในพื้นที่โดยวิเคราะห์ตามบริบทภูมิสังคมของพื้นที่ที่เป็นปัจจุบัน ทั้งในด้านเกษตรกรรม และน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภค โดยในส่วนของน้ำเพื่อการเกษตรนั้นวิเคราะห์ความต้องการการใช้น้ำของพืชที่ปลูกในพื้นที่ ได้แก่ ข้าว ยางพารา ปาล์มน้ำมัน และไม้ผล

การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน

Figure 3 แสดงสัดส่วนร้อยละการใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่ลุ่มน้ำคลองวังหีบในปี พ.ศ. 2550 เปรียบเทียบกับปี พ.ศ. 2555 และ 2559 พบว่า พื้นที่ที่เป็นน้ำเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0.64 เป็น 1.57 และ 1.65 ตามลำดับ โดยพื้นที่ชุมชนและพื้นที่เมืองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นกัน จากร้อยละ 3.24 เป็น 5.16 และ 5.76 ตามลำดับ ในขณะที่พื้นที่ป่าไม้และพื้นที่เกษตรกรรมลดลงเล็กน้อย กล่าวคือ พื้นที่ป่าไม้ลดลงจากร้อยละ 22.97 เป็น 22.94 และ 22.08 และพื้นที่เกษตรกรรมลดลงจากร้อยละ 68.16 เป็น 65.03 และ 66.73 ตามลำดับ

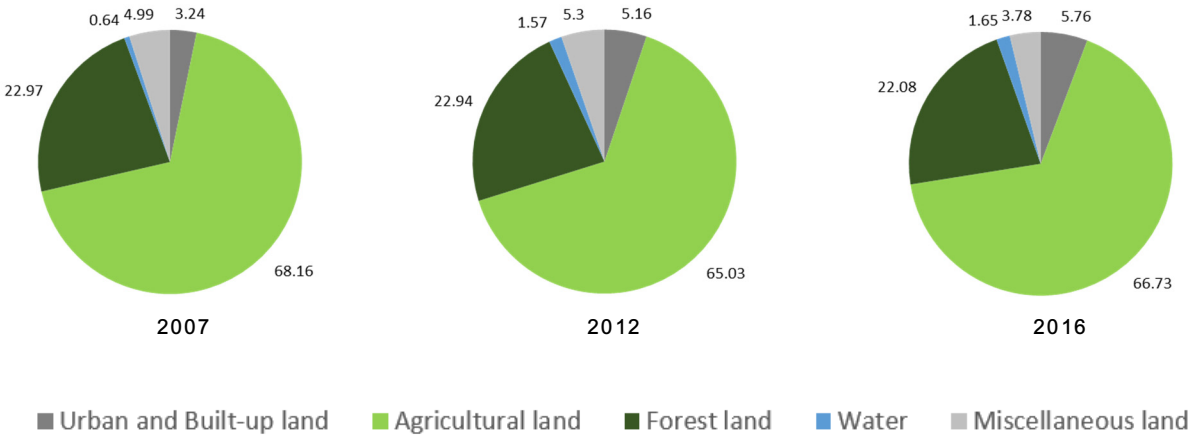


Figure 3 Percentage of Land Use in 2007, 2012, and 2016

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของชนิดพืชที่ปลูก จากข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดินของกรมพัฒนาที่ดิน ดังแสดงใน Table 1 พบว่ามีพื้นที่ปลูกข้าวลดลงจากร้อยละ 17.08 ในปี พ.ศ. 2550 เหลือร้อยละ 8.95 และ 6.68 ในปี พ.ศ. 2555 และ 2559 ตามลำดับ โดยมีพื้นที่ปลูกไม้ยืนต้นเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 37.17 เป็น 44.80 และ 51.28 ตามลำดับ

Table 1 Land Use Type

Land Use Types	2007		2012		2016	
	Area (Rai)	%	Area (Rai)	%	Area (Rai)	%
Urban and Built-up land	3138.75	3.24	4973.88	5.16	5586.14	5.76
Agricultural land	66030.00	68.16	62684.39	65.03	64715.87	66.73
Paddy field	16546.25	17.08	8627.18	8.95	6478.38	6.68
Field crop	145.31	0.15	67.48	0.07	242.45	0.25
Perennial	36008.44	37.17	43184.08	44.80	49712.81	51.26
Orchard	8486.25	8.76	7759.64	8.05	5877.09	6.06
Horticulture	2024.69	2.09	347.01	0.36	135.77	0.14
Pasture and farm house	58.13	0.06	57.84	0.06	77.59	0.08
Aquatic pant	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Integrated farm	2760.94	2.85	2641.17	2.74	2191.79	2.26
Forest land	22252.19	22.97	22112.56	22.94	21413.55	22.08
Water	620.00	0.64	1513.37	1.57	1600.20	1.65
Miscellaneous land	4834.06	4.99	5590.80	5.30	3559.23	3.78
Total	**96875.00**	**100.00**	**96875.00**	**100.00**	**96875.00**	**100.00**

ที่มา: กรมพัฒนาที่ดิน

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การประเมินน้ำท่า

การศึกษานี้แบ่งพื้นที่ลุ่มน้ำคลองวังหีบ ด้วยข้อมูลระดับความสูงของพื้นที่ Digital Elevation Model (DEM) Dem ออกเป็น 25 ลุ่มน้ำย่อย ดังแสดงใน Figure 4 ผลการประเมินน้ำท่าในลุ่มน้ำคลองวังหีบโดยใช้แบบจำลอง SWAT พบว่า ปริมาณน้ำท่าในหน้าฝน ในปี พ.ศ. 2559 > 2555 > 2550 โดยมีปริมาณน้ำท่าเท่ากับ 120.18 104.23 และ 96.75 ล้าน ลบ.ม. ตามลำดับ และปริมาณน้ำท่าในหน้าแล้ง ในปี พ.ศ. 2559 > 2555 > 2550 เช่นกัน โดยมีปริมาณน้ำท่าเท่ากับ 22.56 18.32 และ 15.78 ล้าน ลบ.ม. ตามลำดับ แม้ไม่อาจสรุปได้ว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำท่าในปีปัจจุบันเมื่อเทียบกับปีอดีตเกิดจากสาเหตุใด แต่ตัวเลขของประมาณน้ำท่าที่เพิ่มขึ้นร้อยละ 24 ในหน้าฝน และร้อยละ 42 ในหน้าแล้งนับว่าเป็นตัวเลขที่มีนัยสำคัญและพึงคำนึงถึงในเรื่องการบริหารจัดการน้ำในลุ่มน้ำ

จากการประเมินน้ำท่าในช่วงระยะเวลา 10 ปีที่พิจารณา สามารถคำนวณหาปริมาณน้ำท่ารายเดือนเฉลี่ยของพื้นที่ลุ่มน้ำคลองวังหีบ ดังแสดงใน Table 2 เพื่อใช้ในการวิเคราะห์สมดุลน้ำรายเดือนต่อไป

Subbasin	Area	Subbasin	Area
1	4.287294	14	4.304955
2	10.07322	15	1.649249
3	3.653975	16	1.083236
4	9.025018	17	12.25147
5	10.00474	18	6.259265
6	4.086259	19	0.593432
7	10.40302	20	4.912567
8	1.133481	21	2.123646
9	7.688962	22	6.958407
10	6.429457	23	3.23627
11	4.755243	24	6.24363
12	17.34253	25	7.795557
13	8.70512	SUM	155

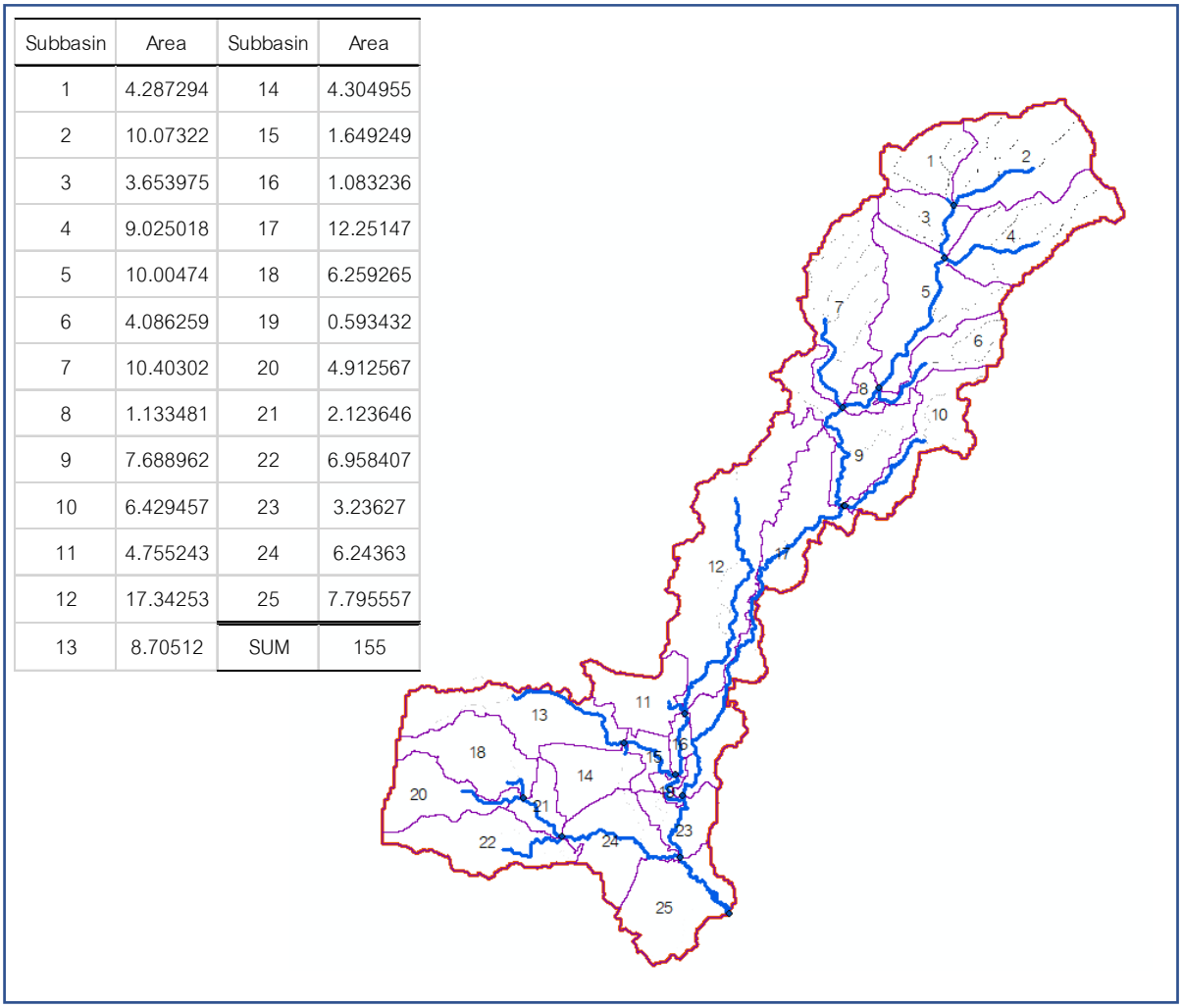


Figure 4 Subbasins in Khlong Wang Heep Basin

Table 2 Average Monthly Runoff in Khlong Wang Heep Basin

	Mountly averge Run Off, million m^3												Yeary
	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	(million m3)
Average	3.04	4.69	6.58	10.85	10.34	15.35	20.62	23.37	18.29	7.18	3.52	3.50	127.32
Max	6.73	11.13	12.67	30.38	22.01	47.98	56.76	72.24	50.32	15.29	8.68	12.08	204.49
Min	1.02	1.51	2.74	2.23	2.24	6.39	10.68	11.11	3.35	2.46	1.32	0.41	79.68
%	2.38%	3.69%	5.17%	8.52%	8.12%	12.05%	16.20%	18.35%	14.36%	5.64%	2.76%	2.75%	100.00%

การประเมินความต้องการใช้น้ำรายเดือน

จากการประเมินความต้องการการใช้น้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำคลองวังหีบ โดยพิจารณาความต้องการน้ำเพื่อการเพาะปลูกข้าว ยางพารา ปาล์มน้ำมัน ความต้องการใช้น้ำเพื่อการอุปโภคบริโภค และ น้ำเพื่อรักษาระบบนิเวศน์ ดังแสดงใน Table 3 พบว่า แม้ความต้องการใช้น้ำเพื่อการอุปโภคบริโภคในปี พ.ศ. 2559 สูงกว่าในปี พ.ศ. 2550 แต่ผลรวมความต้องการใช้น้ำในทุกกิจกรรมในปี พศ. 2559 มีค่า 93.49 ล้านลูกบาศก์เมตร น้อยกว่าความต้องการใช้น้ำรวมในปี พ.ศ. 2550 ซึ่งมีค่า 94.37 ล้านลูกบาศก์เมตร

นอกจากนี้ จะเห็นว่าในปี พ.ศ. 2550 นั้นความต้องการใช้น้ำรายเดือนเพิ่มขึ้นในช่วงเดือนมิถุนายน ถึงกันยายน อันซึ่งเป็นผลมาจากความต้องการใช้น้ำของนาข้าว แต่ในปี พ.ศ. 2559 ซึ่งนาข้าวลดลงไปมาก ความต้องการใช้น้ำตามรอบเวรการปลูกข้าวลดลง พื้นที่ส่วนใหญ่เป็นยางพาราและปาล์มน้ำมัน ซึ่งมีความต้องการน้ำ

คงที่อย่างต่อเนื่อง ในทำนองเดียวกับความต้องการน้ำอุปโภคบริโภคและน้ำเพื่อรักษาระบบนิเวศน์ที่มีค่าคงที่ในแต่ละเดือนเช่นกัน ทำให้ความต้องการน้ำรายเดือนมีค่าค่อนข้างคงที่

Table 3 Monthly Average Water Demand in Khlong Wang Heep Basin

Year	Water Demand	Monthly average Water Demand, Million m^3												Yearly
		Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	(Million m3)
2007	Sum Demand	7.72	7.65	8.28	8.19	8.37	7.80	7.56	7.55	7.61	7.92	7.87	7.86	94.37
	Paddy field	0.00	0.00	0.55	0.40	0.61	0.22	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.79
	Rubber	7.05	7.05	7.05	7.05	7.05	7.05	7.05	7.05	7.05	7.05	7.05	7.05	84.66
	Oil Plam	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.27
	Orchard	0.31	0.24	0.32	0.38	0.35	0.17	0.14	0.14	0.20	0.51	0.46	0.45	3.70
	Water Supply	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	2.04
	Environment flow	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	1.92
2016	Sum Demand	7.73	7.73	7.92	7.88	7.95	7.82	7.76	7.76	7.75	7.73	7.73	7.73	93.49
	Paddy field	0.00	0.00	0.11	0.08	0.12	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.35
	Rubber	7.39	7.39	7.39	7.39	7.39	7.39	7.39	7.39	7.39	7.39	7.39	7.39	88.71
	Oil Plam	0.00	0.00	0.08	0.06	0.09	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.26
	Orchard	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.02	0.00	-0.01	-0.01	0.05
	Water Supply	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	2.20
	Environment flow	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	1.92

การวิเคราะห์สมดุลน้ำ

เมื่อพิจารณาสมดุลน้ำจากปริมาณน้ำต้นทุนที่มีและความต้องการใช้น้ำรายเดือน ดังแสดงใน Table 4

Table 4 Water Balance in Khlong Wang Heep Basin

Year	Monthly average Run off, Million m^3												Yearly
	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	(Million m3)
2007	-4.68	-2.95	-1.69	2.68	2.00	7.57	13.09	15.55	10.71	-0.73	-4.34	-4.36	32.86
2012	-5.21	-3.55	-1.91	2.43	1.83	7.02	12.40	14.85	10.07	-1.06	-4.72	-4.75	27.39
2016	-4.69	-3.03	-1.33	2.99	2.42	7.55	12.90	15.34	10.56	-0.55	-4.20	-4.23	33.74

พบว่า มีสถานการณ์น้ำขาดแคลนในช่วงเดือนมกราคม ถึงพฤษภาคม แต่ในเดือนอื่นๆ มีปริมาณน้ำเกินความต้องการ จากข้อมูลในปี 2559 ปริมาณน้ำที่ขาดแคลนคิดเป็น 19 ล้านลูกบาศก์เมตร โดยมีน้ำส่วนเกินประมาณ 52 ล้านลูกบาศก์เมตร ดังนั้น หากมีการเก็บน้ำส่วนเกินในช่วงเดือนมิถุนายน ถึง ธันวาคม จะทำให้ในเดือนที่เหลือมีน้ำเพียงพอทั้งสำหรับการเกษตร การอุปโภคบริโภค และการรักษาระบบนิเวศน์ ซึ่งหากเก็บน้ำได้ใกล้เคียงกับ 52 ล้านลูกบาศก์เมตรจะเป็นการบรรเทาอุทกภัยในพื้นที่ด้านท้ายของลุ่มน้ำวังหีบได้มากกว่าการก่อสร้างเขื่อนวังหีบแห่งเดียว ซึ่งมีขนาดความจุ 20 ล้านลูกบาศก์เมตร

ทั้งนี้ ในการวิเคราะห์การพัฒนาแหล่งน้ำแบบเกษตรกรช่วยเหลือตนเอง (Self-Sustainable Water Management) ซึ่งพิจารณาใช้พื้นที่ร้อยละ 30 ของพื้นที่เพาะปลูกทั้งหมด จะใช้พื้นที่ประมาณ 31 ตร. กม. หรือ 19,393 ไร่ ในการพัฒนาเป็นแหล่งกักเก็บน้ำกระจายทั่วไปในพื้นที่เกษตร และพื้นที่สาธารณะที่มีความเหมาะสมตามลักษณะภูมิประเทศ

สรุป

จากข้อมูลปี พ.ศ. 2550 2555 และ 2559 พื้นที่ลุ่มน้ำคลองวังหีบมีการใช้ประโยชน์ที่ดินเปลี่ยนแปลงไป โดยสัดส่วนพื้นที่ที่เป็นน้ำ พื้นที่ชุมชนและพื้นที่เมืองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่พื้นที่ป่าไม้และพื้นที่เกษตรกรรมลดลงเล็กน้อย ซึ่งเมื่อพิจารณาในรายละเอียดชนิดพืชที่ปลูก พบว่า มีพื้นที่ปลูกข้าวลดลงร้อยละ 11 มีพื้นที่ปลูกไม้ยืนต้น อาทิ ยางพารา ปาล์ม และไม้ผลเพิ่มขึ้นร้อยละ 14 ผลการประเมินปริมาณน้ำท่าลุ่มน้ำคลองวังหีบ พบว่า มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทั้งในหน้าแล้งและหน้าฝน โดยปี พ.ศ. 2559 ปริมาณน้ำท่าในหน้าแล้งมากกว่าในปี 2550 ร้อยละ 43 และในหน้าฝนปริมาณน้ำท่าในปี พ.ศ. 2559 มากกว่าปี 2550 ร้อยละ 24

ผลการวิเคราะห์ความต้องการการใช้น้ำครอบคลุมน้ำเพื่อการเกษตร น้ำเพื่อการอุปโภคบริโภคและน้ำเพื่อรักษาระบบนิเวศน์ พบว่า ความต้องการใช้น้ำรายเดือนในปี พ.ศ. 2550 มีความผันผวนขึ้นอยู่กับความต้องการใช้น้ำรายเดือนของข้าว แต่ในปี พ.ศ. 2559 ซึ่งพื้นที่นาข้าวลดลง ความต้องการใช้น้ำรายเดือนค่อนข้างคงที่ และแม้ว่าจำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อความต้องการใช้น้ำอุปโภคบริโภคมากขึ้น แต่ผลรวมความต้องการใช้น้ำในทุกกิจกรรมมีค่าน้อยกว่าในอดีต

เมื่อวิเคราะห์สมดุลน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำคลองวังหีบ พบว่า มีสถานการณ์น้ำขาดแคลนในช่วงเดือนมกราคมถึงพฤษภาคม รวมประมาณ 19 ล้านลูกบาศก์เมตร แต่มีน้ำส่วนเกินในเดือนอื่นๆ รวมประมาณ 52 ล้านลูกบาศก์เมตร หากเก็บน้ำส่วนเกินไว้ใช้ในหน้าแล้งจะบรรเทาปัญหาน้ำขาดแคลนและอุทกภัยได้ โดยพื้นที่ที่เหมาะสมสำหรับการพัฒนาแหล่งน้ำแบบเกษตรกรช่วยเหลือตนเอง คือประมาณ 31 ตร. กม. หรือ19,393 ไร่

เอกสารอ้างอิง

กรมชลประทาน. 2559. **โครงการศึกษาความเหมาะสมและผลกระทบสิ่งแวดล้อม โครงการวังหีบ จังหวัดนครศรีธรรมราช**. บริษัท ซิกม่า ไฮโดร คอนซัลแตนท์ จำกัด และ บริษัท ครีเอทีฟ เทคโนโลยี จำกัด, กรุงเทพฯ.

กรมชลประทาน. 2559. **ข้อมูลอุตุ-อุทกวิทยา**.

กรมแผนที่ทหาร. 2555. **แผนที่ความสูงภูมิประเทศเชิงเลข** (DEM).

ณัฐพัชร์ วงษ์ศุภลักษณ์. 2558. **ผลของการให้น้ำชลประทานเพิ่มเติมต่อการเจริญเติบโต ผลผลิต และคุณภาพผลผลิตของปาล์มน้ำมันในช่วงฤดูแล้ง (ปีที่ 2)**.

นุชนารถ ศรีวงศิตานนท์. 2556. **อุทกวิทยาขั้นสูง**. พิมพ์ครั้งที่ 1. บริษัทวีรวรรณ พริ้นท์ติ้ง แอนด์ แพ็คเกจจิ้ง จำกัด, นนทบุรี.

วีระพล แต้สมบัติ, 2532. **ทฤษฎีความน่าจะเป็นและสถิติสาหรับนักอุทกวิทยา**. ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ

สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำและการเกษตร. 2556. **ลุ่มน้ำชายฝั่งทะเลภาคใต้ฝั่งตะวันตก**. แหล่งที่มา: http://www.haii.or.th/wiki/index.php/ลุ่มน้ำชายฝั่งทะเลภาคใต้ฝั่งตะวันตก

การศึกษาวิธีการประเมินสภาพระบบเคเบิลใต้ดิน

A Study of Condition Assessment Method for Underground Cable Systems

นาตยา คล้ายเรือง[1*] อรอุไร หนูหอม และ ประภัสสรา คำวงค์ษา[1]

Nattaya Klairuang[1*], Onurai Noohawm and Prapassara Khumwongsa[1]

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการศึกษาวิธีการประเมินสภาพระบบเคเบิลใต้ดิน ซึ่งจะบ่งบอกถึงความเสี่ยงหรือระดับความเสียหายของระบบเคเบิลใต้ดิน เพื่อใช้เป็นแนวทางในการวางแผนบำรุงรักษา จากการศึกษาและรวบรวมข้อมูลการประเมินสภาพระบบเคเบิลใต้ดิน พบว่าวิธีการตรวจสอบหรือทดสอบที่มีการใช้เพื่อประเมินสภาพระบบเคเบิลใต้ดินมีด้วยกัน 7 วิธี ได้แก่ การถ่ายภาพความร้อน การวัดค่าความต้านทานฉนวน การวัดค่าอัตราการซึมซับไดอิเล็กตริก การวัดค่าดัชนีการเปลี่ยนขั้วโมเลกุลของฉนวน การใช้ผลจากเครื่องวัดสัญญาณ TDR การวัดค่าความสูญเสียของฉนวน และการวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วน ประกอบกับผลการตรวจสอบสภาพภายนอกด้วยสายตา และอายุการใช้งานของอุปกรณ์ ซึ่งผลจากทั้ง 9 ปัจจัยนี้จะมีค่าน้ำหนักความสำคัญต่อสภาพระบบเคเบิลใต้ดินมากน้อยแตกต่างกัน โดยค่าน้ำหนักที่ใช้ในบทความนี้ได้มาจาก 2 แนวทางคือ จากบทความวิจัยที่เกี่ยวข้อง และจากผู้เชี่ยวชาญงานเคเบิลใต้ดิน หลังจากได้ค่าน้ำหนักความสำคัญของแต่ละปัจจัยก็จะนำไปทำการประเมินสภาพระบบเคเบิลใต้ดินและอุปกรณ์ประกอบด้วยค่าดัชนีสุขภาพ ผลจากการประเมินดัชนีสุขภาพจะแสดงได้ว่าระบบเคเบิลมีสภาพดี ปานกลาง หรือเสื่อมสภาพ

ABSTRACT

This article shown the results of the evaluation of the underground cable systems condition assessment to specify the level of risk or damage in underground cable systems and guidance to preventive maintenance planning. The studying and data collecting from the underground cable system condition assessment were 7 methods to monitoring or testing for evaluated the underground cable system condition. Which consisted of thermal imaging, insulation resistance, dielectric absorption ratio (DAR), polarization index (PI), time domain reflectometry (TDR), dielectric dissipation factor (tan delta) and partial discharge combination with visual check and age of equipment. As a result, shown that 9 factors were different significance for underground cable systems condition. The weight of each factor in this article came from two approaches related with both articles and underground cable experts. After weighting in each factor, it would be evaluated by the physical index. The results of the physical index evaluation were divided into 3 conditions include good, fair or poor cable system.

Key Words: underground cable, condition index, health index

*Corresponding author: e-mail address: **nattaya@eng.src.ku.ac.th**

[1] ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา ชลบุรี 20230

[1] Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering at Sriracha, Kasetsart University Sriracha Campus, Chonburi 20230

คำนำ

พลังงานไฟฟ้าถือเป็นพลังงานที่สำคัญที่สุดสำหรับสิ่งอำนวยความสะดวกต่างๆ ในการที่จะทำให้ระบบไฟฟ้ามีประสิทธิภาพและเสถียรภาพ จำเป็นจะต้องมีการบำรุงรักษาอย่างต่อเนื่องเพื่อป้องกันความล้มเหลวในระบบไฟฟ้า วิธีการบำรุงรักษาและเครื่องมือที่ใช้ในการบำรุงรักษาต้องมีประสิทธิภาพและมีความถูกต้องสูง ซึ่งการที่ระบบไฟฟ้าล้มเหลวในแต่ละครั้งนั้นทำให้เกิดความเสียหายซึ่งคิดเป็นเงินจำนวนมหาศาล โดยเฉพาะโรงงานอุตสาหกรรมหรืออาคารภาคธุรกิจที่ต้องการใช้ไฟฟ้าในระบบการผลิตและการบริการ

ปัจจุบันการพัฒนาทางด้านระบบสายส่งและระบบจำหน่ายมีแนวโน้มที่จะทำเป็นระบบสายใต้ดินมากขึ้น ถึงแม้ว่าสายใต้ดินมีข้อจำกัดในเรื่องค่าใช้จ่ายซึ่งต้องใช้เงินลงทุนสูง การบำรุงรักษายุ่งยาก และปัญหาด้านเทคนิคต่างๆ แต่สายส่งใต้ดินก็มีข้อดีหลายประการ เช่น การไม่รบกวนทัศนียภาพของบ้านเมือง การขจัดปัญหาเรื่องเสาไฟล้มเนื่องจากอุบัติเหตุต่างๆ ได้รับผลกระทบเนื่องจากการเกิดฟ้าผ่าน้อย ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญ ของไฟดับบริเวณกว้าง นอกจากนี้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ ออกมาจากสายใต้ดินยังมีปริมาณที่น้อยมากเมื่อเทียบกับสายเหนือดิน

การประเมินสภาพเคเบิลใต้ดินโดยการตรวจสอบและวินิจฉัยจากผลการตรวจวัดคุณภาพของระบบเคเบิลหรืออุปกรณ์ประกอบถือเป็นสิ่งสำคัญที่สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการวางแผนการบำรุงรักษาระบบเคเบิลใต้ดิน โดยการตรวจติดตามผลการทดสอบระบบเคเบิลใต้ดินซึ่งจะทำให้พบความบกพร่องในอุปกรณ์ส่วนต่างๆ ก่อนที่จะเกิดความเสียหาย ก็จะทำให้การทำงานของระบบส่งจ่ายไฟฟ้ามีประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ระบบประเมินสภาพยังมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการบริหารจัดการสินทรัพย์ของหน่วยงานอีกด้วย

รูปแบบความขัดข้องในระบบเคเบิลใต้ดินมีหลายรูปแบบซึ่งสามารถจำแนกได้ตามชนิดของเคเบิลใต้ดินหรืออุปกรณ์ประกอบ เช่น หัวต่อปลายสาย(terminator) หรือจุดต่อสาย(joint) โดยสาเหตุความขัดข้องที่เกิดขึ้นตลอดอายุการใช้งานโดยทั่วไปแล้วจำแนกได้เป็นความเสียหายที่เกิดจากการติดตั้งและทางกล เช่น รอยขูดขีด แรงกดมากเกินไป ความเสียหายระหว่างการใช้งาน เช่น จ่ายโหลดเกิน เกิดกระแสลัดวงจร และความเสื่อมจากการใช้งาน (aging) เช่น water treeing, tracking เป็นต้น

การตรวจสอบหาความบกพร่องที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ในระบบสายไฟฟ้าใต้ดินเป็นเรื่องยากและเป็นปัญหาสำคัญเนื่องจากอุปกรณ์ส่วนใหญ่ถูกฝังอยู่ใต้ดิน ดังนั้นการตรวจสอบหาจุดบกพร่องหรือประเมินอัตราความเสื่อมสภาพของอุปกรณ์ในระบบสายไฟฟ้าใต้ดินจำเป็นต้องพิจารณาจากหลายๆ ปัจจัย ซึ่งทำได้ค่อนข้างยากบางครั้งไม่สามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่า ดังนั้นเมื่อเกิดความเสียหายขึ้นทำให้ต้องใช้ระยะเวลานานในการตรวจสอบและซ่อมบำรุง ตลอดจนการเปลี่ยนอุปกรณ์ก็ทำได้ยากต้องใช้เวลานาน และมีต้นทุนค่อนข้างสูง ดังนั้นวิธีการประเมินสภาพฉนวนของระบบสายไฟฟ้าใต้ดินและอุปกรณ์ประกอบ ได้แก่หัวต่อปลายสาย และจุดต่อสายที่เข้าถึงได้ยาก จำเป็นต้องมีวิธีการประเมินที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งควรทำบ่อยๆ เท่าที่สามารถทำได้ วิธีการตรวจสอบวินิจฉัยเพื่อประเมินสภาพอุปกรณ์ระบบเคเบิลใต้ดินหลังติดตั้งใช้งาน ทำได้หลายวิธีมีทั้งวิธีการทดสอบ online และ offline การตรวจสภาพภายนอก และการใช้ข้อมูลอื่นๆ ประกอบการประเมิน

อุปกรณ์และวิธีการ

1. วิธีการการตรวจสอบเพื่อวินิจฉัย (Diagnostic testing)

จากผลการศึกษาพบว่า หลายๆงานวิจัยแนะนำให้ใช้มากกว่าหนึ่งเทคนิคการตรวจสอบเพื่อประเมินสภาพอุปกรณ์ ซึ่งเทคนิคการตรวจสอบสภาพฉนวนที่มีประสิทธิภาพ มีการใช้งานค่อนข้างแพร่หลาย มีเครื่องมือตรวจวัดในหลายรูปแบบ ได้แก่การทดสอบหาการดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge, PD) ซึ่งมีทั้งการทดสอบแบบ Offline และ Online แต่เนื่องจากการตรวจสอบ PD ไม่สามารถตรวจพบจุดบกพร่องบางรูปแบบได้ เช่น Water tree จึงจำเป็นต้องมีเทคนิคการตรวจวัดอื่นๆร่วมด้วย ได้แก่การวัดค่าความสูญเสียของฉนวน (Dielectric Dissipation Factor, tanδ) และ การความต้านทานฉนวน (Insulation resistance) และอีกหนึ่งวิธีคือ Time-Domain Reflectometry (TDR) โดยที่แต่ละวิธีมีรายละเอียดดังนี้

1.1 Partial Discharge (PD)

PD คือการเกิดดิสชาร์จหรือเบรกดาวน์บางส่วนเกิดขึ้นในช่องว่างส่วนเล็กๆ ในเนื้อฉนวนเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าสูงๆ ไม่ได้เป็นการเบรกดาวน์แบบสมบูรณ์เชื่อมช่องว่างในเนื้อฉนวนที่อยู่ระหว่างตัวนำ PD เกิดขึ้นได้ทั้งในฉนวนแข็ง เหลว และก๊าซ หากปล่อยให้เกิด PD ต่อไปจะนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนทำให้ฉนวนเสียสภาพการเป็นฉนวนในที่สุด การทดสอบ PD ทำในเคเบิลทุกชนิด โดยจะทำการทดสอบกับเคเบิลใหม่ตามมาตรฐานกำหนด นอกจากนี้ควรเพิ่มการทดสอบหา PD หลังจากที่ติดตั้งเคเบิลใช้งานไปแล้ว เนื่องจากอาจมีปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการติดตั้ง หรือมีข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นจากการใช้งานซึ่งอาจเกิดปัญหาลุกลามต่อไปได้

การตรวจจับ PD ทำได้ทั้ง Online และ Offline เทคนิคการตรวจจับแบบ Online ทำได้โดยใช้ หม้อแปลงกระแสความถี่สูง (High Frequency Current Transformers, HFCTs) เพื่อตรวจจับสัญญาณ ทรานเซียนต์จากดิสชาร์จ ส่วนเทคนิคการตรวจจับแบบ Offline ทำได้โดยใช้ Voltage Divider ที่แหล่งกำเนิดแรงดันหรือที่ปลายสุดของวงจร

1.2 Dielectric Dissipation Factor หรือค่า tanδ

การตรวจวัดค่า tanδ เป็นการทดสอบเพื่อหาระดับกำลังไฟฟ้าสูญเสียในเนื้อฉนวน(dielectric) เปรียบเทียบค่าที่วัดได้กับค่าอ้างอิงตามชนิดของวัสดุไดอิเล็กตริก การวินิจฉัยเพื่อประเมินสภาพของฉนวนเคเบิลโดยเปรียบเทียบค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกแตกต่างจากค่าอ้างอิงมากเท่าไร การทดสอบ tanδ ประเมินคุณภาพของฉนวนเคเบิล สามารถพยากรณ์อายุที่เหลืออยู่ และวางแผนในการเปลี่ยนสายเคเบิลได้

หลักการทดสอบทำได้โดยป้อนแรงดัน AC และวัดมุมเฟสที่แตกต่างกันระหว่างรูปคลื่นแรงดันกับกระแสจะได้ค่า tanδ มุมเฟสนี้เป็นมุมของกระแสรวม (I) ของกระแสชาร์จ (I_C)และกระแสสูญเสีย (I_R) tanδ เป็นอัตราส่วนกระแสสูญเสียกับกระแสชาร์จ ตามภาพที่ 1

วงจรเทียบเท่าสำหรับสายเคเบิลประกอบด้วยความต้านทาน (R) และตัวเก็บประจุ (C) ต่อขนานกัน แรงดันขึ้นกันค่าความต้านทาน tanδ วัดได้ที่ความถี่ ω และ แรงดันไฟฟ้า V เป็นอัตราส่วนระหว่างกระแส I_R และ I_C ตามสมการที่ (1)

$$DF = \tan(\delta) = \frac{I_R}{I_C} = \frac{\sqrt{I^2 - I_C^2}}{I_C} \frac{V/R}{V/(1/\omega C)} = \frac{1}{\omega RC} \qquad (1)$$

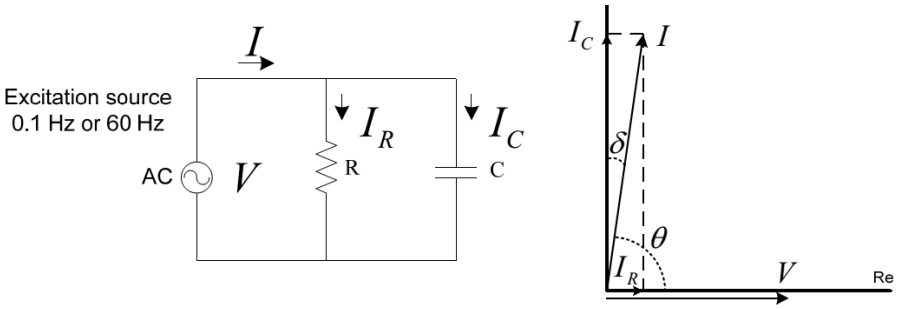


Figure 1 Equivalent Circuit for tan δ Measurement and Phasor Diagram

1.3 Time-Domain Reflectometry (TDR)

TDR เป็นการทดสอบโดยส่งพัลส์ความถี่สูงเข้าไปที่ปลายสายเคเบิลด้านหนึ่ง เมื่อมีความไม่ต่อเนื่องของอิมพีแดนซ์ก็จะส่งสัญญาณสะท้อนกลับมาที่ต้นทาง ซึ่งพัลส์ที่สะท้อนกลับจะมีค่าเป็นบวกหรือลบขึ้นอยู่กับอิมพีแดนซ์ของตำแหน่งผิดพร่องว่ามีค่ามากหรือน้อยกว่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของเคเบิล (Characteristic Impedance of The Cable) โดยสามารถแปลงค่าระยะทางจากความเร็วของพัลส์เพื่อระบุตำแหน่งที่เกิดเหตุ และผู้ใช้งานที่มีประสบการณ์จะสามารถบอกสาเหตุที่เกิดได้จากรูปร่างของสัญญาณพัลส์ที่สะท้อนกลับ พัลส์จะวิ่งไปในสายเคเบิล เมื่อมีความไม่ต่อเนื่องของอิมพีแดนซ์ก็จะส่งสัญญาณสะท้อนกลับมาที่ต้นทาง ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับขึ้นกับค่าอิมพีแดนซ์ของจุดผิดพร่องและอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายเคเบิล ดังสมการ

$$\rho = \frac{Zd - Zo}{Zd + Zo} \qquad (2)$$

ρ : Refection coefficient

Z_0 : Characteristic impedance of the cable

Z_d : Impedance of a discontinuity

โดยทั่วไปแล้ววิธีการนี้จะต้องดับไฟเพื่อทำการทดสอบ (Offline) โดยจะส่งพัลส์ความถี่สูงแรงดันต่ำ (Fast Rise Time, Low Voltage Pulse) ให้ระหว่างตัวนำและชิลด์ของฉนวนเคเบิลที่จุดต่อหรือปลายสาย โดยพัลส์ที่ส่งไปและสะท้อนกลับจะแสดงให้เห็นเทียบกับเวลาบนจอชนิดเดียวกับออสซิลโลสโคป ซึ่งการแปลผลจะต้องทำโดยผู้ใช้งาน โดยจะมีการแปลงค่าระยะทางจากความเร็วของพัลส์เพื่อระบุตำแหน่งที่เกิดเหตุ และผู้ใช้งานที่มีประสบการณ์จะสามารถบอกสาเหตุที่เกิดได้จากรูปร่างของสัญญาณพัลส์ที่สะท้อนกลับ ระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบ (รวมการแปลผล) ใช้เวลา 5-10 นาทีต่อครั้ง หลังจากที่ต่อเครื่องวัด TDR เข้ากับสายเคเบิลแล้ว วิธีการนี้อาจไม่ได้ใช้สำหรับประเมินสภาพระบบเคเบิลใต้ดินโดยตรง แต่จะทำเมื่อพบปัญหาและต้องการทราบตำแหน่งที่เกิดความเสียหาย

1.4 Insulation Resistance

เป็นการประเมินคุณสมบัติฉนวนโดยการวัดค่าความต้านทานฉนวน (Insulation Resistance) ในช่วงระยะเวลาที่พิจารณาหรือเป็นการทดสอบวัดความต้านทานกับเวลา (Time-Resistance Test) ได้แก่วิธีการวัดค่า Polarization Index (PI) และวิธีการวัดค่า Dielectric Absorption Ratio (DAR) โดยวัตถุประสงค์ของการอ่านค่าความต้านทานฉนวนเพื่อประเมินสภาพของฉนวนระหว่างตัวนำ (Conductor) และกราวนด์ (Ground) โดยการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเข้าไปและคำนวณค่าความต้านทานได้จากการวัดกระแสรั่ว (Leakage Current)

โดยพิจารณาอุณหภูมิของอุปกรณ์ขณะทำการวัดด้วยซึ่งควรอยู่ในสภาวะปกติ โดยค่าความต้านทานฉนวนจะแปรผกผันกับอุณหภูมิซึ่งถ้าอุณหภูมิสูงค่าความต้านทานฉนวนจะมีค่าต่ำ

1.4.1 วิธีการวัดค่า Polarization Index (PI)

การประเมินสภาพด้วยดัชนี Polarization เป็นการหาค่าอัตราส่วนของการค่าความต้านทานที่วัดได้ที่เวลา 10 นาทีต่อค่าความต้านทานที่วัดได้ที่เวลา 1 นาที ดัชนีนี้ยังใช้ในการประเมินฉนวนของเครื่องจักรกลไฟฟ้าได้ด้วยเช่นกัน โดยมาตรฐาน IEEE std 43-2000 แนะนำให้ใช้สำหรับเครื่องจักรกลแบบ AC และ DC กรณี class A ค่า PI ต่ำสุดเป็น 1.5 นอกนั้นยังคงเป็น 2.0 และหากวัดค่าความต้านทานที่ 1 นาทีได้สูงกว่า 5 GΩ

1.4.2 วิธีการวัดค่า Dielectric Absorption Ratio (DAR)

การประเมินสภาพฉนวนสายเคเบิลด้วยวิธี DAR เป็นการหาค่าอัตราส่วนของค่าความต้านทานที่วัดได้ที่เวลา 60 วินาทีต่อค่าความต้านทานที่วัดได้ที่เวลา 30 วินาที ซึ่งดูคล้ายกับวิธี PI โดยวิธี DAR มีความเหมาะสมกับอุปกรณ์ที่มีวัสดุฉนวนแบบลดกระแสดูดกลืน (Absorption Current Decreases) เช่นสายเคเบิลฉนวน XLPE

2. วิธีการประเมินสภาพระบบเคเบิลใต้ดิน

การออกแบบโครงสร้างการประเมินสุขภาพ (Health Index) ส่วนใหญ่จะมีวิธีคล้ายๆกันกับการประเมินสุขภาพอุปกรณ์อื่นๆ ในระบบไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วย

1. ตัวประกอบที่มีผลต่อสมรรถนะ (Influencing Factor, IF)
2. คะแนนในแต่ละตัวประกอบ IF (Grading) โดยให้ความหมายว่าแต่ละตัวประกอบมีลักษณะใดให้คะแนนเท่าใด ค่าที่ต่ำจะแสดงถึงสภาพที่ใกล้ล้มเหลว โดยให้คะแนนเป็น 3 ระดับคือ 0,1 และ 3 เพื่อให้ระบบเคเบิลและอุปกรณ์ประกอบที่ยังอยู่ในสภาพดีมีดัชนีสูงแตกต่างจากระบบที่เริ่มมีสภาพด้อยลง
3. ความสำคัญหรือน้ำหนักของตัวประกอบ IF ที่มีความสัมพันธ์กับสุขภาพ ซึ่งถูกประมาณค่าผ่านตัวประกอบให้น้ำหนัก (Weighting Factor, WF)

ดังนั้นดัชนีประเมินสุขภาพสามารถแสดงเป็นสูตรได้ดังนี้

$$HI = \sum \left[WF_i \times GIF_i \right] \quad (3)$$

เมื่อ HI คือ ค่าดัชนีสุขภาพ

WF_i คือ น้ำหนักของปัจจัย i

GIF_i คือ คะแนนของปัจจัย i

i คือ ปัจจัยที่ 1,2,3,…,9

การเลือกตัวประกอบ การให้ค่าคะแนน และการให้ค่าน้ำหนักสำหรับงานวิจัยนี้ อ้างอิงจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และจากความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญหรือบุคลากรที่เป็นผู้มีประสบการณ์ในงานเคเบิลใต้ดินปัจจัยที่มีผลต่อสุขภาพของเคเบิลใต้ดินและอุปกรณ์ประกอบ ประกอบด้วยข้อมูลทางกายภาพ ได้แก่ 1) สภาพภายนอก และ 2) อายุการใช้งาน และผลจากการทดสอบ diagnostic ได้แก่ 3) อุณหภูมิ 4) ความต้านทานฉนวน 5) dielectric absorption ratio (DAR) 6) polarization index(PI) 7) time domain reflectometry 8) partial discharge และ 9) tan δ แนวทางของวิธีการประเมินสภาพเคเบิลใต้ดินและอุปกรณ์ประกอบในภาพรวมแสดงตามภาพที่ 2

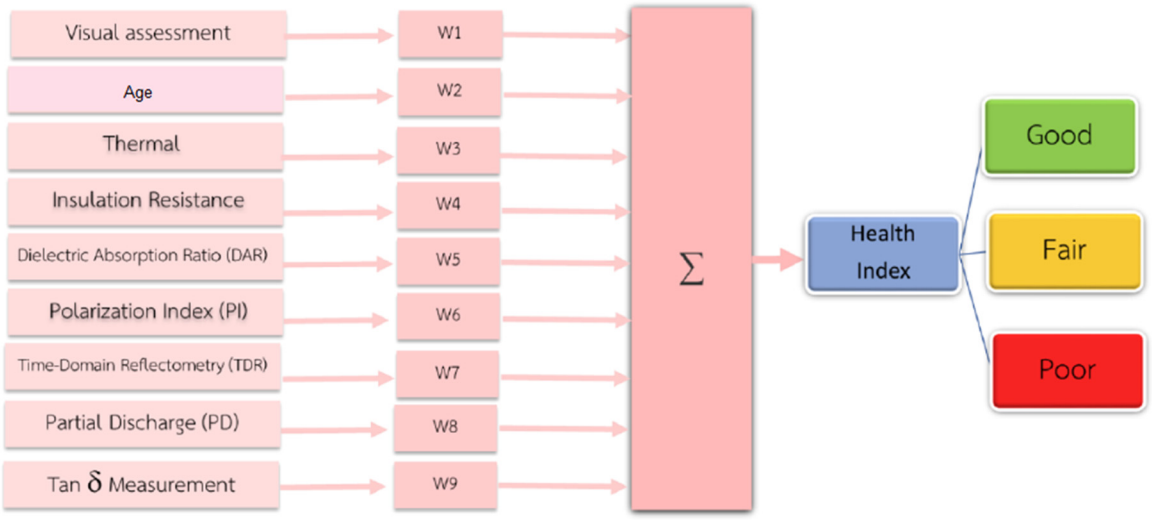


Figure 2 Diagram shows all factors for condition assessment of underground cable systems and equipment.

การประเมินสภาพอุปกรณ์ในระบบสายไฟฟ้าใต้ดินสามารถแบ่งการพิจารณาออกเป็น 3 ส่วน คือ 1) การประเมินสภาพระบบสายไฟฟ้าใต้ดินทั้งระบบ ซึ่งประกอบด้วยส่วนของสายเคเบิล หัวต่อสาย และหัวต่อปลายสาย 2) การประเมินสภาพหัวต่อสาย และ 3) การประเมินสภาพหัวต่อปลายสาย แผนภาพแสดงแนวทางการประเมินสภาพระบบสายไฟฟ้าใต้ดินและอุปกรณ์ระบบสายไฟฟ้าใต้ดินในภาพรวม แสดงดังภาพที่ 2 และ ค่าน้ำหนักของแต่ละตัวประกอบซึ่งได้จากการทบทวนงานวิจัยจำนวน 43 บทความ และจากความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญและผู้มีประสบการณ์ในงานสายเคเบิลใต้ดินจำนวน 23 ท่าน สรุปเป็นค่าน้ำหนักของแต่ละปัจจัยได้ดังแสดงในตารางที่ 1

Table 1 Weighting of influencing factors

Weighting Factor	Influencing factors	Weighting Factor (%)		
		Cable System	Joint	Terminator
W_1	Visual Inspection	-	28	28
W_2	Age	19	10	10
W_3	Thermal Imaging	-	27	27
W_4	Insulation resistance	15	-	-
W_5	Dielectric absorption ratio	11	-	-
W_6	Polarization index	8	-	-
W_7	Time domain reflectometry	4	-	-
W_8	Partial Discharge (PD)	23	35	35
W_9	Tan δ	20	-	-

ผลจากการประเมินค่าดัชนีสุขภาพสามารถบอกได้ว่าระบบเคเบิลใต้ดินหรืออุปกรณ์ประกอบมีสภาพดีสามารถใช้งานต่อไปได้ บำรุงรักษาตามแผนปกติ สภาพปานกลางสามารถใช้งานต่อไปได้ แต่ต้องประเมินสภาพถี่ขึ้น และอาจมีวางแผนเปลี่ยนทดแทนต่อไป หรือเสื่อมสภาพควรเปลี่ยนทดแทนทันที ดังแสดงในตารางที่ 2

Table 2 Underground cable system and equipment condition following health index

Health Index (HI)	Condition of UG
HI ≤ 1.0	Poor
1.0 < HI ≤ 2.0	Fair
HI > 2.0	Good

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

กรณีศึกษาการประเมินสภาพระบบเคเบิลใต้ดิน

ใช้ข้อมูลระบบสายเคเบิลใต้ดินระบบ 24 kV ของไฟฟ้านครหลวงเป็นกรณีศึกษา เป็นข้อมูลจากฝ่ายบำรุงรักษาระบบไฟฟ้า กองบำรุงรักษาสายส่ง แผนกรักษาสายส่งใต้ดิน ใช้งานมาแล้ว 5 ปี ตรวจพบจุดร้อนแดงที่หัวต่อสายเคเบิลเฟส C ดังภาพที่ 3 และตรวจพบเปลือกสายเคเบิลแตกที่เฟส C ดังภาพที่ 4 ประกอบกับผลการทดสอบ diagnostic ต่างๆ มาให้คะแนนตามสภาพแล้วคูณกับค่าน้ำหนัก ได้ผลการประเมินดังตารางที่ 3

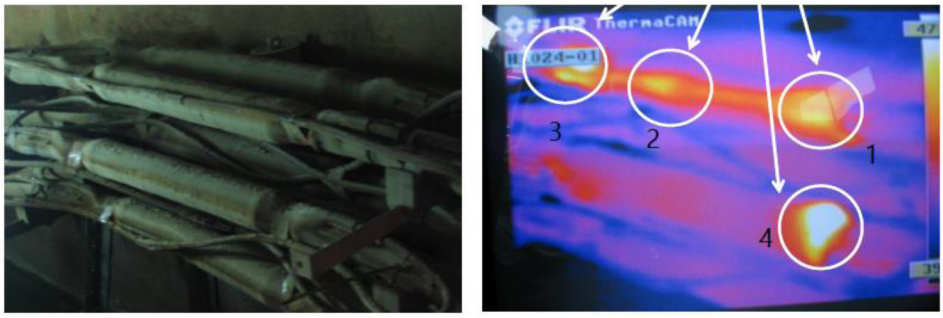


Figure 3 Thermal imaging of terminators.



Figure 4 Insulation tape of phase C terminator melted.

จากตารางที่ 3 เมื่อนำค่าดัชนีสุขภาพที่คำนวณได้มาพิจารณาสภาพตามตารางที่ 2 พบว่าเฟส A และ B มีค่าดัชนีเท่ากับ 2.87 และ 2.15 ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในสภาพดี สามารถใช้งานได้ตามปกติ ส่วนเฟส C มีค่าดัชนีเท่ากับ 0.76 ซึ่งเสื่อมสภาพต้องทำการแก้ไขปรับปรุงโดยวางแผนบำรุงรักษาหรือเปลี่ยนทดแทนทันที ผลการวิเคราะห์หาค่าดัชนีสุขภาพอาจจะยังบอกไม่ได้แน่ชัดว่ามีความแม่นยำมากน้อยเพียงใด จำเป็นต้องมีการเก็บผลการตรวจสอบแล้วนำมาประเมินค่าดัชนีและติดตามผลอย่างต่อเนื่องต่อไปเพื่อหาความเหมาะสมของค่าน้ำหนักและความสัมพันธ์ของสภาพระบบเคเบิลและอุปกรณ์ประกอบกับค่าดัชนีที่หาได้

Table 3 condition assessment of underground cable system

Influencing factors	$WFI_i \times GFI_i$		
	Phase A	Phase B	Phase C
Visual Inspection	0.56	0.56	0.00
Age	0.39	0.39	0.39
Thermal Imaging	0.54	0.54	0.00
Insulation resistance	0.15	0.05	0.00
Dielectric absorption ratio	0.04	0.04	0.04
Polarization index	0.03	0.03	0.03
Time domain reflectometry	0.04	0.04	0.00
Partial Discharge (PD)	0.93	0.31	0.31
Tan δ	0.20	0.20	0.00
Health Index	2.87	2.15	0.76
Condition	Good	Good	Poor

สรุป

การศึกษาวิธีการประเมินสภาพสายเคเบิลใต้ดินและอุปกรณ์ประกอบ โดยข้อมูลอินพุตที่ใช้ในการประเมินของหัวต่อปลายสาย (Terminator) หัวต่อสาย (Joint) และระบบสายไฟฟ้าใต้ดินมีลักษณะแตกต่างกันบางข้อมูล จากผลการศึกษาในครั้งนี้ หากนำผลการศึกษาหรือวิธีการที่ได้ไปเป็นแนวทางในการพิจารณากำหนดแผนการบำรุงรักษา และใช้เป็นข้อมูลการตัดสินใจเปลี่ยนทดแทน ก็จะสามารถลดความเสี่ยงในการเกิดความล้มเหลวของระบบเคเบิลใต้ดินได้ ซึ่งส่งผลดีต่อระบบไฟฟ้าให้มีเสถียรภาพและมีประสิทธิภาพในการทำงานมากยิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณการไฟฟ้านครหลวง โครงการวิจัยและพัฒนาความชำนาญด้านไฟฟ้ากำลังคณะวิศวกรรมศาสตร์ และคณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

Aziz Suhaimi, Huzainie Shafi Abd Halim, Tashia Marie. 2013. Assessment of On-line Diagnostic Using Partial Discharge Mapping Systems in Medium Voltage Cable, **International Conference on Electricity Distribution,** Stockholm: pp. 1248

Mirrasoul J. Mousavi and Karen L. Butler-Purry. 2009. A Novel Condition Assessment System for Underground Distribution Applications. **IEEE Transactions on Power System**, Vol. 24, No. 3

สาขาอุตสาหกรรมเกษตร

Subject: Agro-Industry

ภาคบรรยาย

Oral Presentation



KU
KASETSART
UNIVERSITY

ลักษณะเฉพาะและสมบัติของโฟมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชผสมเส้นใยมะพร้าวดัดแปรพื้นผิว

Characteristics and Properties of Foam-Structured Thermoplastic Starch (TPS) and Surface Modified Coconut Fiber

กัญญพัชร คล้ายรัศมี[1] ปิยะวณี จริยะสกุลโรจน์[1] เลอพงศ์ จารุพันธ์[1*] และ วาณี ชนเห็นชอบ[1]

Kanyapat Klairasamee[1], Piyawanee Jariyasakoolroj[1], Lerpong Jarupan[1*] and Vanee Chonhenchob[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาโฟมฐานชีวภาพที่นำผลผลิตทางการเกษตรของประเทศไทย ได้แก่ เส้นใยมะพร้าวจากจังหวัดสมุทรสงคราม และ สตาร์ชมันสำปะหลัง มาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยนำเส้นใยมะพร้าวมาดัดแปรพื้นผิวด้วยวิธีการทางเคมี ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ และ โซเดียมไดซัลไฟด์ ทำการศึกษาสัณฐานวิทยาของเส้นใยมะพร้าวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และ ทำการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของเส้นใยมะพร้าวด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี พบว่าเส้นใยมะพร้าวดัดแปรพื้นผิวจะมีลักษณะขรุขระมากกว่าเส้นใยมะพร้าวเดิม เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงของหมู่ฟังก์ชันหลังการดัดแปรพื้นผิว ซึ่งส่งผลต่อการยึดเกาะของเส้นใยมะพร้าวในวัสดุเพิ่มมากขึ้น ทำการผลิตโฟมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชผสมเส้นใยมะพร้าวดัดแปรพื้นผิวในแต่ละสูตร ด้วยกระบวนการอัดรีด และวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะต่อสัณฐานวิทยา สมบัติเชิงกายภาพ และ สมบัติเชิงกล ของโฟมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชผสมเส้นใยมะพร้าวดัดแปรพื้นผิวพบว่า การเติมเส้นใยมะพร้าวในวัสดุผสมช่วยเสริมสมบัติเชิงกลของวัสดุได้

ABSTRACT

This research has developed a bio-based foam applied of Thailand's agricultural products included coconut fiber from Samut Songkhram province and cassava starch. The coconut fiber was modified by chemical methods for surface modification with sodium hydroxide and sodium disulfide and was characterized the morphology by using a scanning electron microscope and functional groups were investigated by Fourier transform infrared spectroscopy. The TPS/surface modified coconut fiber foam obtained was further characterized the morphology of foam structure, physical and mechanical properties. The TPS/surface modified coconut fiber foam with addition of coconut fiber can improve mechanical properties of materials.

Key Words: cassava starch, coconut fiber, thermoplastic starch foam

* Corresponding author; e-mail address: lerpong.j@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

บรรจุภัณฑ์ (package) จากพลาสติกเป็นที่นิยม เนื่องจากสามารถขึ้นรูปได้หลายวิธีทำให้สามารถเลือกใช้ได้ตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ พลาสติกมีน้ำหนักเบา มีความทนทานต่อการใช้งานและความเสียหาย แต่เนื่องจากพลาสติกเป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ฐานปิโตรเคมีทำให้เมื่อเสร็จสิ้นการใช้งาน จะกลายเป็นขยะที่ย่อยสลายไม่ได้ รวมถึงโฟม (foam) คือวัสดุที่มีโพรงอากาศขนาดเล็กอยู่ภายในโครงสร้างของวัสดุ โพรงอากาศที่เกิดขึ้นเกิดจากสารขยายตัวหรือสารทำให้เกิดโฟม (blowing agent หรือ foaming agent) ที่ทำหน้าที่ลดเนื้อของวัสดุในโครงสร้าง โดยเมื่อได้รับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะกลายเป็นไอทำให้วัสดุมีน้ำหนักเบา (จิราวรรณ, 2550) โดยโฟมฐานชีวภาพ (bio-based foam) ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อเป็นวัสดุทางเลือกจากวัสดุย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable materials) และวัสดุชีวฐาน (bio-based materials) เพื่อลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม

โฟมฐานชีวภาพ เช่น โฟมฐานสตาร์ช (starch-based foams) เป็นโฟมที่พัฒนาขึ้นมาเพื่อทดแทนโฟมฐานปิโตรเคมี และนิยมนำมาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์หลายรูปแบบ รวมถึงวัสดุเสริมภายในบรรจุภัณฑ์เช่น วัสดุกันกระแทกและฉนวนกันความร้อน เนื่องจากบรรจุภัณฑ์ไม่เพียงใช้ในการบรรจุ (packaging) สำหรับบรรจุผลิตภัณฑ์ (containment) หรือรองรับผลิตภัณฑ์เพียงเท่านั้น บรรจุภัณฑ์ และการบรรจุยังมีหน้าที่สำคัญในการคุ้มครอง (protection) และการถนอม (preservation) ผลิตภัณฑ์จากความเสียหาย และการเสื่อมเสียที่อาจเกิดขึ้น ภายในสภาวะการเก็บรักษา การขนส่ง และการจัดจำหน่าย (งามทิพย์, 2554) โดยความเสียหายกับตัวสินค้าอาจเกิดจากอันตรายทางกลได้แก่ การกดทับ (compression) การกระแทก (shock) และการสั่นสะเทือน (vibration) รวมทั้งความเสียหายที่เกิดจากปัจจัยแวดล้อมอื่น เช่น อุณหภูมิ (temperature) ความชื้น (humidity) และ บรรยากาศ (atmosphere) นอกจากนี้ยังรวมถึงความเสียหายจากการปนเปื้อนสารเคมีหรือจุลชีพ

วัสดุกันกระแทกย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากสตาร์ชมันสำปะหลัง (cassava starch) สามารถขึ้นรูปผ่านกระบวนการอัดรีด (extrusion process) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงมีลักษณะคล้ายอาหารประเภทพองกรอบ (expanded product) โดยเมื่อนำมาทำการทดสอบความสามารถในการรับแรงกดทับเปรียบเทียบกับโฟมฐานปิโตรเคมี โฟมฐานสตาร์ชมันสำปะหลังมีความสามารถในการรับแรงไม่เทียบเท่าโฟมฐานปิโตรเคมี จึงได้มีการปรับปรุงสมบัติของโฟมฐานสตาร์ชเพิ่มขึ้น วิธีการหนึ่งคือการเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติที่มีสมบัติและลักษณะเฉพาะคือ ความแข็งแรง ทนทาน เช่น เส้นใยกัญชง เส้นใยป่านศรนารายณ์ และเส้นใยมะพร้าว เป็นต้น (ลิลลี่ และคณะ, 2544) และด้วยประเทศไทยมีพืชเศรษฐกิจจำนวนมาก รวมถึงมะพร้าวที่พบว่าหลังเสร็จสิ้นกระบวนการแปรรูปมะพร้าว จะเหลือส่วนประกอบของมะพร้าวโดยเฉพาะกาบมะพร้าว ที่สามารถนำมาแปรรูปด้วยกระบวนการทางกลได้เป็นเส้นใย ที่แข็งแรง มีความหยุ่นเหนียว สามารถนำมาทำปฏิกิริยาทางเคมีได้ โดยนำเส้นใยมะพร้าวไปทำปฏิกิริยาทางเคมี พื้นผิวของเส้นใยมะพร้าวจะเกิดความขรุขระ (วันดี, 2556) ในทำนองเดียวกันกับ Hemsri *et al.,* (2012) รายงานการศึกษาสัณฐานวิทยาและองค์ประกอบทางเคมี พบว่าเส้นใยมะพร้าวที่ผ่านการทำปฏิกิริยาทางเคมีจะมีพื้นผิวที่ขรุขระ และ สะอาดเนื่องจากมีการกำจัดองค์ประกอบต่างๆ เช่น ไขจากธรรมชาติ (natural wax), เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) และ ลิกนิน (lignin) มากกว่าเส้นใยมะพร้าว

เดิม และDiao *et al.,* (2014) ได้นำเส้นใยมะพร้าวดัดแปรพื้นผิวมาใช้เป็นสารเสริมแรงในวัสดุผสมกลูเตนข้าวสาลี (wheat gluten) โดยพื้นผิวที่ขรุขระของเส้นใยเป็นการเพิ่มพื้นที่ยึดติดกับตัววัสดุ มีความเข้ากันได้กับวัสดุมากกว่าเส้นใยมะพร้าวเดิม ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลที่เพิ่มขึ้น เส้นใยมะพร้าวดัดแปรพื้นผิวจึงเหมาะสมในการนำไปใช้เป็นเส้นใยเสริมแรงในวัสดุผสม

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาลักษณะเฉพาะของโฟมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชผสมด้วยเส้นใยมะพร้าวดัดแปรพื้นผิวที่ผลิตด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ รวมถึงศึกษาสมบัติของโฟมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชผสมเส้นใยมะพร้าวดัดแปรพื้นผิว ที่นำผลผลิตทางการเกษตรของประเทศไทยมาประยุกต์ใช้ และเป็นแนวโน้มในการพัฒนาวัสดุกันกระแทกและฉนวนกันความร้อนฐานชีวภาพต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมเส้นใยมะพร้าวสำหรับการดัดแปรพื้นผิว

เส้นใยมะพร้าว จากจังหวัดสมุทรสงคราม ได้จากกาบมะพร้าวสดที่ผ่านการตีใยทางกลได้เป็นเส้นใยมะพร้าวทำให้องค์ประกอบทางเคมีไม่เปลี่ยนแปลง นำเส้นใยมะพร้าวมาตัดย่อยด้วยเครื่องบดแบบค้อนเหวี่ยง ทำการดัดแปรพื้นผิวด้วย โซเดียมไฮดรอกไซด์ และ โซเดียมไดซัลไฟด์ ดัดแปลงจากวิธีของ ณัฐวดี (2555) และ นวพล (2558) นำเส้นใยมะพร้าวดัดแปรพื้นผิวมาอบและร่อนผ่านตะแกรงร่อน (Retsch Laboratory test sieve NO. 20, 30 และ 40, ASTM E11) เส้นใยที่ได้มีความยาวประมาณ 1-6 มิลลิเมตร

การศึกษาสัณฐานวิทยาและวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยมะพร้าวเดิมและเส้นใยมะพร้าวดัดแปรพื้นผิว

ในการศึกษาสัณฐานวิทยาของเส้นใยมะพร้าวเดิมและเส้นใยมะพร้าวดัดแปรพื้นผิว โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (รุ่น FEI Quanta 450; Thermo Fisher Scientific, US) ก่อนการวิเคราะห์ตัวอย่างจะติดลงบนสตับ (stub) และเคลือบด้วยทอง ทำการวิเคราะห์ความยาวและพื้นผิวของตัวอย่างกำลังขยาย 30x และ 1000x สำหรับการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (รุ่น TENSOR 27GmbH; Bruker, Germany) โดยเตรียมตัวอย่างเส้นใยมะพร้าว ปริมาณ 1-2 มิลลิกรัม อัดให้มีลักษณะเป็นแผ่นบางโดยเครื่องอัดความดัน 10 ตันต่อตารางนิ้ว และทดสอบในโหมดแบบสะท้อนกลับในช่วงคลื่น 400-4000 ซม.$^{-1}$

การผลิตโฟมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชผสมเส้นใยมะพร้าวดัดแปรพื้นผิวด้วยกระบวนการอัดรีด

การขึ้นรูปโฟมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชผสมเส้นใยมะพร้าวดัดแปรพื้นผิว โดยทำการเตรียมสตาร์ชมันสำปะหลัง กลีเซอรอล และน้ำกลั่น (starch/glycerol/DW) ในอัตราส่วน 60:20:20 ทำการผสมด้วยเครื่องผสมอาหาร ทำการผสมเป็นเวลา 9 นาที โดยใช้กลีเซอรอลและน้ำกลั่นเป็นพลาสติไซเซอร์ ซึ่งน้ำกลั่นสามารถเป็นสาร

ขยายตัวอีกด้วย เมื่อได้เมทริกซ์สตาร์ช จะเติมโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตเป็นสารขยายตัว และเส้นใยมะพร้าวดัดแปรพื้นผิวในปริมาณ น้ำหนักต่อเรซิน 100 ส่วน (part per hundred of resin, phr) แสดงดังตารางที่ 1

Table 1 Thermoplastic starch/treated coconut fiber foam formulations

Formula	Cassava starch (%)	Glycerol (%)	Distilled water (%)	$NaHCO_3$ (phr)	Treated coconut fiber,TCF (phr)
TPS/0TCF	60	20	20	1	0
TPS/1TCF	60	20	20	1	1
TPS/3TCF	60	20	20	1	3
TPS/5TCF	60	20	20	1	5

วัตถุดิบที่เตรียมจะทำการขึ้นรูปโฟมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (รุ่น LTE-20-40; Labtech Engineering, Thailand) โดยโฟมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชผสมเส้นใยมะพร้าวดัดแปรพื้นผิวจะมีลักษณะเป็น loose fill หรือวัสดุที่มีการขยายตัว (expanded product)

การศึกษาสัณฐานวิทยาของโฟมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชผสมเส้นใยมะพร้าวดัดแปรพื้นผิว

เตรียมตัวอย่างของโฟมโดยแช่ตัวอย่างในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลา 5 นาที และ นำมาตัดหรือหักจากนั้นอบตัวอย่างในตู้อบความร้อนแบบสุญญากาศ ติดตัวอย่างลงบนสตับและเคลือบด้วยทอง และ ทำการวิเคราะห์แบบภาพตัดขวางที่กำลังขยาย 50x และ 100x เพื่อศึกษาการกระจายตัวและการยึดเกาะของเส้นใยในเมทริกซ์และรูปแบบโครงสร้างของโพรงอากาศภายในตัวอย่าง

ดัชนีการหลอมไหลและอัตราส่วนการขยายตัวของโฟมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชผสมเส้นใยมะพร้าวดัดแปรพื้นผิว

ทำการศึกษาดัชนีการหลอมไหลของเม็ดโฟม ตามมาตรฐาน ASTM D1238-10 ด้วยเครื่องทดสอบอัตราการหลอมไหลของพอลิเมอร์ อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส Load 2,160 กรัม และศึกษาอัตราส่วนการขยายตัวของโฟม ตามวิธีของ Bhatnagar and Hanna (1996), Cha *et al*. (2001) และ Shogren *et al.* (2002) โดยใช้ตัวอย่างทดสอบ 10 ตัวอย่าง คำนวณอัตราการขยายตัวจาก เส้นผ่านศูนย์ของโฟมส่วนหารเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวดาย และ วิเคราะห์ผลทางสถิติ

สมบัติเชิงกลของโฟมเทอร์พลาสติกสตาร์ชผสมเส้นใยมะพร้าวดัดแปรพื้นผิว

การวิเคราะห์สมบัติเชิงกล ตามวิธีของ Bhatnagar and Hanna (1996) และ Zhou *et al.* (2006) เตรียมตัวอย่างยาว 10 มิลลิเมตร ทดสอบค่าความต้านทานแรงกดด้วยเครื่องยูนิเวอร์แซลเทสติง (รุ่น Testometric micro 350) โดย cylindrical probe เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 6 มิลลิเมตร ที่ Load cell 50 กิโลกรัม ความเร็ว 30 มิลลิเมตร/นาที และ วิเคราะห์ผลทางสถิติ

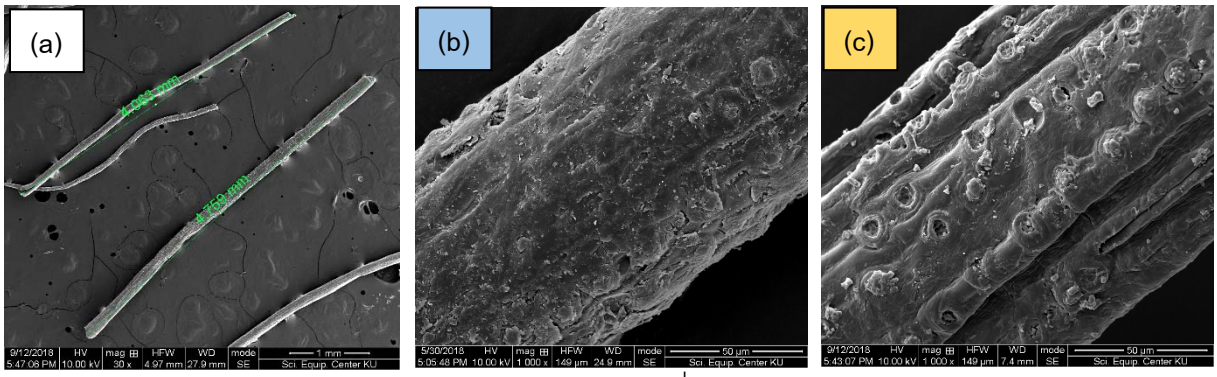
การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

การเตรียมตัวอย่างในการวิเคราะห์อย่างน้อย 10 ซ้ำ ทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยการทดสอบความแปรปรวน และ เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างทรีตเมนต์โดยวิธี Duncan's ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยโปรแกรมสถิติ IBM SPSS รุ่น 20

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

สัณฐานวิทยาและองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยมะพร้าวเดิมและเส้นใยมะพร้าวดัดแปรพื้นผิว

เส้นใยมะพร้าวเดิมและเส้นใยมะพร้าวดัดแปรพื้นผิวเมื่อศึกษาสัณฐานวิทยาพบว่ามีลักษณะพื้นผิวของเส้นใยดัดแปรมีความขรุขระ และ สะอาดกว่าเส้นใยมะพร้าวเดิม เนื่องจากมีการกำจัดองค์ประกอบต่างๆ เช่น ไข



จากธรรมชาติ, เฮมิเซลลูโลส และ ลิกนิน เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 1

Figure 1 SEM micrographs of coconut fiber (a) fiber length measurement of 30x (b) Untreated of 1000x (c) Treated of 1000x

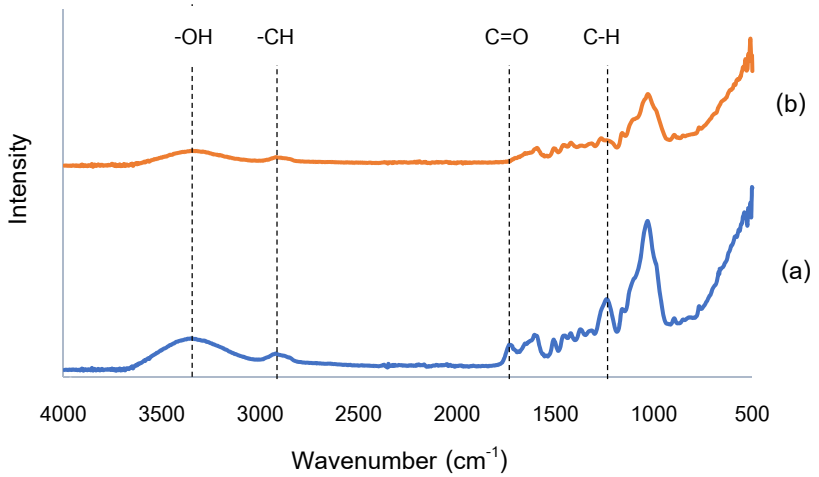


Figure 2 FT-IR spectrum of (a) untreated coconut fiber and (b) treated coconut fiber

ซึ่งเมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีเส้นใยมะพร้าวดัดแปรพื้นผิวจากผล FT-IR สเปกตรัม ในช่วงเลขคลื่น 400-4000 ซม$^{-1}$ ดังแสดงในรูปที่ 2 พบว่า พีคที่แสดงถึงองค์ประกอบของลิกนิน ที่ปรากฏที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1600-1800 ซม$^{-1}$ ซึ่งเป็นตำแหน่งของหมู่คาร์บอนิล (C=O) ของเส้นใยที่ดัดแปรพื้นผิวลดลง ในทิศทางเดียวกับตำแหน่งเลขคลื่น 1375-1500 ซม.$^{-1}$ เป็นตำแหน่งของหมู่ C-H แบบสั่นงอ หรือพีคที่แสดงถึงองค์ประกอบของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส และที่ตำแหน่งเลขคลื่น 3200-3400 ซม.$^{-1}$ เป็นตำแหน่งของหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) พบว่าพีคของเส้นใยมะพร้าวดัดแปรก็ลดลงเช่นเดียวกัน สอดคล้องกับลักษณะสัณฐานวิทยาที่ปรากฏแสดงถึงความขรุขระ และองค์ประกอบทางเคมีที่เปลี่ยนไปของเส้นใย อ้างอิงจาก Arsyad *et al*. (2015)

กระบวนการขึ้นรูปโฟมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชผสมเส้นใยมะพร้าวดัดแปรพื้นผิวด้วยกระบวนการอัดรีด

การขึ้นรูปโฟมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชผสมเส้นใยมะพร้าวดัดแปรพื้นผิวด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ สามารถทำการขึ้นรูปโฟมในลักษณะคล้ายขนมพองกรอบได้ แต่จะมีการขึ้นรูปที่ช้ากว่าสูตรที่ไม่ได้เติมเส้นใยเป็นส่วนประกอบ ลักษณะของโฟมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชค่อนข้างไม่คงที่เมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าระหว่างการขึ้นรูป ซึ่งอาจมีผลมาจากโครงสร้างของโพรงอากาศภายใน ซึ่งทำให้เกิดการติดของตัวอย่างบริเวณหน้าดาย (die) ในบางสูตร

สัณฐานวิทยาของโฟมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชผสมเส้นใยมะพร้าวดัดแปรพื้นผิว

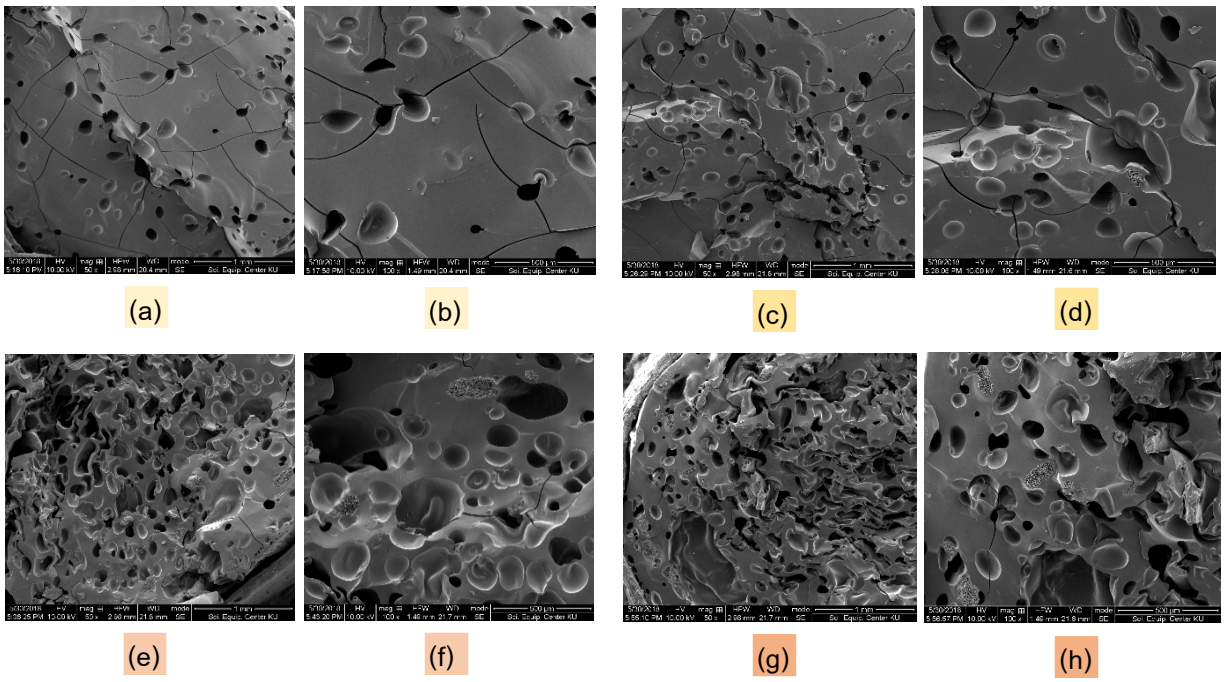


Figure 3 SEM micrographs of (a) TPS/0TCF of 50x and (b) TPS/0TCF of 100x
(c) TPS/1TCF of 50x and (d) TPS/1TCF of 100x
(e) TPS/3TCF of 50x and (f) TPS/3TCF of 100x
(g) TPS/5TCF of 50x and (h) TPS/5TCF of 100x

จากภาพที่ 3 แสดงโครงสร้างด้านในของโฟมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชผสมเส้นใยมะพร้าวดัดแปรพื้นผิวในแต่ละสูตร ที่สูตร TPS/0TCF มีขนาดของโครงสร้างของโพรงอากาศหรือเซลล์ปิด (closed-cell structure) ที่มีขนาดใกล้เคียงกัน อ้างอิงจาก บรรเลง (2546) ได้แบ่งตามโครงสร้างของโพรงอากาศ ได้เป็น 2 ประเภท คือ เซลล์ปิด เป็นโพรงอากาศที่เกิดขึ้นจากการขยายตัวของวัสดุไม่เชื่อมถึงกัน และ เซลล์เปิด (open cell foam) เป็นโพรงอากาศที่เกิดจากการขยายตัวของวัสดุพร้อมกันจำนวนมาก ผนังเซลล์เชื่อมต่อถึงกันจนทำให้อากาศหมุนเวียนถึงกันได้ ซึ่งโพรงอากาศแบบเซลล์เปิดพบได้จากภาพที่ 3 (e) TPS/3TCF และ (g) TPS/5TCF ที่กำลังขยาย 50x ตามลำดับพบโพรงอากาศแบบเซลล์เปิดเป็นจำนวนมาก โดยที่สูตร TPS/1TCF, TPS/3TCF และ TPS/5TCF แสดงการกระจายตัวและการยึดเกาะของเส้นใยได้ดีในเมทริกซ์สตาร์ช

ดัชนีการหลอมไหลและอัตราส่วนการขยายตัวของโฟมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชผสมเส้นใยมะพร้าวดัดแปรพื้นผิว

Table 2 Melt flow index and expansion ratio of thermoplastic starch/treated coconut fiber foam

Formula	Melt flow index	Diameter		Expansion ratio
	(g/10 min)	(mm)	cv%	
TPS/0TCF	0.24[b]	4.02[a]	2.14	1.34[a]±0.09
TPS/1TCF	0.06[a]	4.72[b]	0.94	1.57[b]±0.04
TPS/3TCF	0.10[a]	5.94[d]	2.47	1.98[d]±0.15
TPS/5TCF	0.07[a]	5.63[c]	0.73	1.88[c]±0.04

Means in the same row with different letters are significantly different at 0.05 level

ค่าดัชนีการหลอมไหลของโฟมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ผสมเส้นใยมะพร้าวดัดแปรพื้นผิว พบว่าในสูตรที่มีการเติมเส้นมะพร้าวทั้ง 3 สูตรเปรียบเทียบกับสูตร TPS/0TCF ที่มีค่าดัชนีการหลอมไหลที่สูงกว่าประมาณ 2 เท่า ตามที่แสดงค่าในตารางที่ 2 สอดคล้องกับตอนขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ และค่าอัตราส่วนการขยายตัว พบว่า TPS/3TCF และ TPS/5TCF มีอัตราส่วนการขยายตัวใกล้เคียงกัน โดยมีผลมาจากโพรงอากาศแบบเซลล์เปิดภายในโครงสร้างของทั้ง 2 สูตรที่เส้นใยมะพร้าวเข้าไปขัดขวางการจับกันของเมทริกซ์สตาร์ช ทำให้เกิดโพรงอากาศภายในโครงสร้างเชื่อมถึงกัน

สมบัติเชิงกลของโฟมเทอร์พลาสติกสตาร์ชผสมเส้นใยมะพร้าวดัดแปรพื้นผิว

สมบัติเชิงกลของโฟมพบว่าเมื่อเติมเส้นใยมะพร้าวลงไปมีแนวโน้มของความสามารถในการต้านทานแรงกดได้มากขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 3 สอดคล้องกับระยะหดตัวหรือเสียรูปของวัสดุ โดยการเติมเส้นใยทำให้โครงสร้างของโฟมเกิดโพรงอากาศซึ่งโพรงอากาศแบบเซลล์เปิด ผนังเซลล์เชื่อมต่อถึงกันทำให้ สูตร TPS/3TCF และ TPS/5TCF จะมีลักษณะนิ่ม และมีความยืดหยุ่นมากกว่า ทำให้สามารถรับแรงกดได้มากขึ้น

Table 3 Mechanical properties of thermoplastic starch/treated coconut fiber foam

Formula	Compressive strength (N)	Compressive deformation (mm)
TPS/0TCF	254.47[a]±34.22	1.35[a]±0.61
TPS/1TCF	249.82[a]±25.74	1.04[a]±0.63
TPS/3TCF	273.33[a]±48.75	0.95[a]±0.36
TPS/5TCF	281.15[a]±41.37	1.18[a]±0.32

Means in the same row with different letters are significantly different at 0.05 level

สรุป

เส้นใยมะพร้าวที่ปรับสภาพพื้นผิวด้วยวิธีทางเคมี ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบทางเคมีและสภาพพื้นผิวของเส้นใย ส่งผลต่อการกระจายตัว ความเข้ากันได้ และ เกาะติดในเมทริกซ์สตาร์ชได้ดี เส้นใยมะพร้าวดัดแปรพื้นผิวไม่เกิดการเกาะกลุ่มกัน และ ไม่ขัดขวางการเกิดโพรงอากาศภายในโครงสร้าง ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลที่เพิ่มขึ้นของวัสดุผสม ซึ่งเป็นแนวโน้มในการพัฒนาวัสดุกันกระแทกและฉนวนกันความร้อนจากโฟมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชผสมเส้นใยมะพร้าวดัดแปรพื้นผิว ด้วยสภาวะหรือขึ้นรูปด้วยกระบวนการอื่นต่อไป

เอกสารอ้างอิง

งามทิพย์ ภู่วโรดม. 2554. **การบรรจุอาหาร**. พิมพ์ครั้งที่ 2. บริษัท เอส.พี.เอ็ม. การพิมพ์ จำกัด, กรุงเทพฯ.

จิราวรรณ หาญวัฒนกุล. 2550. **โฟมพลาสติกชนิดพอลิยูรีเทนและพอลิสไตรีน**. แหล่งที่มา: http://www.dss.go.th/dssweb/st-articles/files/bla_4_2550_foams.pdf, 19 มิถุนายน 2561.

ณัฐวดี ทองจันทร์. 2555. **แผ่นดูดซับเอทิลีนจากทางใบปาล์มน้ำมันผสมผงถ่านกัมมันต์สำหรับมะละกอพันธุ์ปลักไม้ลาย** (*Carica papaya L.*). วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

นวพล สุขอุดม. 2558. **สมบัติเชิงกลและการแตกสลายทางชีวภาพของกระถางพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เสริมแรงด้วยเส้นใยทางใบปาล์มน้ำมัน**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

บรรเลง ศรนิล. 2546. **เทคโนโลยีพลาสติก**. พิมพ์ครั้งที่ 15. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ.

ลิลลี่ กาวีต๊ะ, ฐิติวรา เส็งหลวง, ยุพดี เผ่าพันธ์, กมรินทร์ พรหมรัตน์รักษ์, มาลี ณ นคร, ศรีสม สุวรรณวงศ์, วีระชัย ณ นคร และ สุรียา ตันติวิวัฒน์. 2544. **พืชเส้นใย กัญชง** Fiber Crop hemp (*Cannabis sativa L var. sativa*).แหล่งที่มา: http://www3.rdi.ku.ac.th/exhibition/50/plant/43_plant/43_plant.html, 19 มิถุนายน 2561.

วันดี ธรรมจารี. 2556. การดัดแปรพื้นผิวเส้นใยธรรมชาติ (Surface Modification of Natural Fiber). **Technology promotion and INNOMag** 39 (227): 61-64.

Arsyad, M., I.N.G. Wardana, Pratikto and T.S. Irawan. 2015. The morphology of coconut fiber surface under chemical treatment. **Revista Matéria**. 20(1): 169-177.

Bhatnagar, S. and M.A. Hanna. 1996. Physical, mechanical and thermal properties of starch-based plastic foams. **Transactions of the ASAE**. 38(2): 567-571.

Brahmakumar, M., C. Pavithran and R. Pillai. 2005. Coconut fibre reinforced polyethylene composites: effect of natural waxy surface layer of the fibre on fibre/matrix interfacial bonding and strength of composites. **Composites Science and Technology**. 65: 563-569.

Cha, J., D. Chung, P. Seib, R. Flores and M. Hanna. 2001. Physical properties of starch-based foams as affected by extrusion temperature and moisture content. **Industrials Crops and Products**. 14: 23-30.

Diao, C., T. Dowding, S. Hemsri and R. Parnas. 2014. Toughened wheat gluten and treated coconut fiber composite. **Composites: Part A**. 58: 90-97.

Georges. A., C. Lacoste and E. Damien. 2018. Effect of formulation and process on the extrudability of starch-based foam cushions. **Industrial Crops and Products**. 115: 306-314.

Hemsri, S., K. Grieco, A. Asandei and R. Parnas. 2012. Wheat gluten composites reinforced with coconut fiber. **Composites Part A**. 43: 1160-1168.

Shogren, R., J. Lawton and K. Tiefenbacher. 2002. Baked foam: starch modifications and additives improve process parameters, structure and properties. **Industrial Crops and Products**. 16: 69-79.

Verma, D., P. Gope, A. Shandilya, A. Gupta and M. Maheshwari. 2012. Coir fibre reinforcement and application in polymer composites: A review. **Journal of Materials and Environmental Science**. 4(2): 263-276.

Wang, C., F. Li, L. Wang, J. Li, A. Guo, C. Zhang and P. Liu. 2015. Research on thermoplastic starch and different fiber reinforced biomass composites. **RSC Advances**. 5: 49824-49830.

Zhou, J., J. Song and R. Parker. 2006. Structure and properties of starch-based foam prepared by microwave heating from extrude pellets. **Carbohydrate Polymers**. 63: 466-475.

Zhou, J., J. Song and R. Parker. 2017. Microwave-assisted moulding using expandable extruded pellets from wheat flours and starch. **Carbohydrate Polymers**. 69: 445-454.

Synthesis and Characterization of Poly(ethylene glycol) Methyl Ether-Grafted Chitosan

Pawika Towongphaichayonte[1,2] and Rangrong Yoksan[1,2*]

ABSTRACT

The objectives of this work are to synthesize and characterize poly(ethylene glycol) methyl ether-grafted with chitosan (mPEG-*g*-CTS) and to study the possibility of mPEG-*g*-CTS as thickening agent. mPEG-*g*-CTS was synthesized via coupling reaction using 1-(3-dimethylaminopropyl)-3-ethylcarbodiimide hydrochloride (EDC·HCl) as coupling agent. Fourier-transform infrared spectrometry (FT-IR) and nuclear magnetic resonance spectrometry (NMR) confirmed the grafting of poly(ethylene glycol) methyl ether (Mn = 750 and 2000 Dalton) onto chitosan. mPEG-*g*-CTS exhibited greater water solubility as compared with chitosan and it had ability to increase viscosity of aqueous solution. The results suggest that mPEG-*g*-CTS is possible to be used as thickening agent.

Key Words: chitosan, poly(ethylene glycol) methyl ether, mPEG, thickening agent, viscosity

* Corresponding author; email-address: **rangrong.y@ku.ac.th**

[1]Department of Packaging and Materials Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

[2]Center for Advanced Studies in Nanotechnology for Chemical, Food and Agricultural Industries, Kasetsart University Institute for Advanced Studies, Kasetsart University, Bangkok 10900

INTRODUCTION

Chitosan is a polysaccharide found naturally in fungi especially in *Mucor, Absidia,* and *Rhizopus* species; however it is commercially derived from chitin by alkali deacetylation. Chitosan is edible and biocompatible natural polymer, which is gaining much attention in food, pharmaceutical and biotechnology. Chitosan can be used as antimicrobial, antioxidant, clarifying and thickening agents, however only in acidic form (Zivanovic *et al.* 2015; De Souza Soares, 2017). Chemical modification of chitosan is an alternative to improve its solubility. Some research groups reported that chitosan grafted with poly(ethylene glycol) methyl ether (mPEG-*g*-CTS) was soluble in water. mPEG is non-toxic and used in pharmaceutical field. The applications of mPEG-*g*-CTS are in pharmaceutical field such as nanoparticle or hydrogel for drug delivery (Fangkangwanwong *et al*., 2006; Yang *et al*., 2008; Cassettari *et al*., 2012, Tsao *et al*., 2015).

Therefore, the objectives of this work are to synthesize and characterize mPEG-*g*-CTS and to study the possibility of mPEG-*g*-CTS as thickening agent.

MATERIALS AND METHODS

1. Synthesis of carboxylic acid-terminated polyethylene glycol methyl ether (mPEG-COOH)

Polyethylene glycol methyl ether (mPEG, M_n = 750 and 2000 Daltons, Sigma-Aldrich, Inc., Germany, 3 g) was dissolved in dimethylformamide (DMF, Univar, Inc., Australia, 3 g of mPEG/mL of dimethylformamide, 1 mL) at 60 °C. After that succinic anhydride (Sigma-Aldrich, Inc., USA,1 mol/mol of mPEG) was added to the solution. Catalytic amount of pyridine (Merck GmbH, Germany) was then added into the mixture and stirred at 60 °C for 24 h. mPEG750-COOH and mPEG2000-COOH were collected by precipitating the mixture in diethyl ether (J.T. Baker, Inc., Thailand), washed with diethyl ether and dried in vacuum oven at ambient temperature.

2. Synthesis of poly(ethylene glycol) methyl ether-grafted chitosan

Chitosan solution (1% w/v, deacetylation degree of 0.85, molecular weight of 500 kDa, Seafresh chitosan (Lab) Co., Ltd., Thailand) was prepared by dissolving chitosan in acetic acid solution (1% v/v). After that mPEG750-COOH and mPEG2000-COOH (1 mol/mol of pyranose for mPEG750-COOH and 2 mol/mol of pyranose for mPEG2000-COOH) was added into chitosan solution and stirred until a clear solution was obtained. 1-hydroxybenzotriazole hydrate (wetted with not less than 14 wt.% of water, 97%, HOBt, Sigma-Aldrich, Inc., USA, 1.5 mol/mol of mPEG-COOH) was then added, followed by addition of 1-(3-dimethylaminopropyl)-3-ethylcarbodiimide hydrochloride (EDC·HCl, Tokyo Chemical Industry Co., Ltd., Japan, 1.5 mol/mol of mPEG-COOH). The reaction was carried out at ambient temperature for 24 h. Subsequently, it was dialyzed in water for few days before lyophilized

in a Freeze dryer (Gamma 2-16 LSC, Martin Christ Gefriertrocknungsanlagen GmbH, Germany) to obtain poly(ethylene glycol) methyl ether-grafted chitosan (mPEG-*g*-CTS).

3. Characterization of mPEG-COOH and mPEG-*g*-CTS

3.1 Chemical structure by Fourier-transform infrared spectroscopy

Sample was analyzed by a Fourier-transform infrared spectrometer (FT-IR, BrukerTensor 27, Bruker, Germany) in either an attenuated total reflection (ATR) mode over a wavenumber range from 500 to 4000 cm^{-1} with 16 scans at a resolution of 4 cm^{-1} or a transmission mode over a wavenumber range from 400 to 4000 cm^{-1} with 32 scans at a resolution of 4 cm^{-1}. For the measurement in transmission mode, sample was mixed with inactive potassium bromide (KBr) and the mixture was pressed into disc by a hydraulic press machine.

3.2 Chemical structure by Nuclear magnetic resonance spectroscopy

Sample was characterized by a Nuclear magnetic resonance spectrometer (NMR, Advance III-HD 400 MHz, Bruker, Germany). Chitosan was dissolved in deuterated acetic acid solution (1% v/v, CD_3COOD, Cambridge Isotope Laboratories, Inc., UK) in deuterated water (D_2O, Cambridge Isotope Laboratories, Inc., UK). mPEG-COOH and mPEG-*g*-CTS were dissolved in D_2O. The solution was transferred to NMR tube and the ^1H NMR measurement was performed at 70 °C.

4. Solubility test

Solubility of sample was tested at ambient temperature using a concentration of 1 mg/mL in different organic solvents including water, acetic acid solution (1% v/v), ethanol and acetone. Each mixture was mixed by using vortex for 1 min and then the solubility was observed.

5. Observation of solution flow

mPEG750-*g*-CTS and mPEG2000-*g*-CTS were dissolved in water with a concentration of 2% w/v and then 2 µL of mPEG750-*g*-CTS and mPEG2000-*g*-CTS solutions were dropped on acrylic plate. After that, the plate was tilted to 45 degree and the flow of solution was observed as compared with water.

RESULTS AND DISCUSSION

1. Chemical structure of mPEG-COOH and mPEG-*g*-CTS by Fourier-transform infrared spectroscopy

mPEG possessed peaks at 1086 cm^{-1} belonging to ether group, 2860 cm^{-1} assigning to methylene group and 3500 cm^{-1} referring to hydroxyl group (Figure 1a). Succinic anhydride showed peaks at 1782 cm^{-1} and 1710 cm^{-1} belonging to carbonyl group (Figure 1b). After the reaction of

mPEG with succinic anhydride, the obtained product, mPEG-COOH, showed new peak at 1743 cm^{-1} (ester group) (Figure 1c), implying the successful reaction for changing terminal hydroxyl group of mPEG to carboxylic group (Yoksan *et al*., 2003; Tsao *et al*., 2014).

Chitosan showed peaks at 1650 cm^{-1} (amide I), 1556 cm^{-1} (amide II), 2880 cm^{-1} (C-H stretching) and 902 cm^{-1} (pyranose ring) (Figure 1d). Comparing to chitosan, mPEG-*g*-CTS showed new peak at 1730 cm^{-1} belonging to ester bond (Figure 1e-f) from the grafting reaction of mPEG onto chitosan chain. In addition, the peak intensity at 2880 cm^{-1} (C-H stretching) of mPEG-*g*-CTS increased due to C-H stretching of mPEG (Fangkangwanwong *et al*., 2003; Tsao *et al*., 2014).

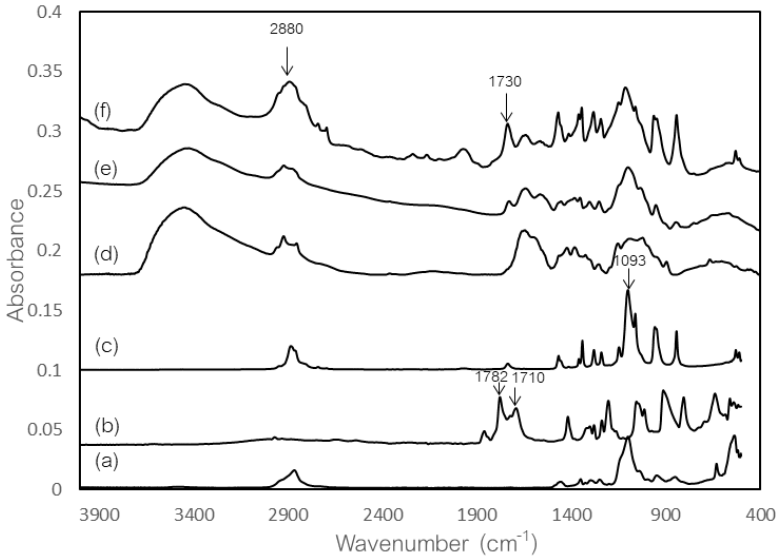


Figure 1 FT-IR spectra of (a) mPEG2000, (b) succinic anhydride, (c) mPEG2000-COOH, (d) chitosan, (e) mPEG750-*g*-CTS and (f) mPEG2000-*g*-CTS.

2. Chemical structure of mPEG-COOH and mPEG-*g*-CTS by Nuclear magnetic resonance spectrometry

Chitosan showed proton signals at **δ** = 5.27 ppm (pyranose ring proton, 1), **δ** = 3.58 ppm (pyranose ring proton, 2), **δ** = 3.85-4.45 ppm (pyranose ring protons, 3 to 6) and **δ** = 2.44 ppm (methyl protons of n-acetyl glucosamine, 7) (Figure 1a). mPEG2000-COOH showed proton signals at **δ** = 3.87 ppm (methyl protons, a), **δ** = 3.94-3.90 ppm (methylene protons, b), **δ** = 4.00-4.05 ppm (methylene protons, c), **δ** = 4.16-4.20 ppm (methylene protons, d and e), **δ** = 4.25-4.30 ppm (methylene protons, f), **δ** = 4.34-3.38 ppm (methylene protons, g) and **δ** = 3.19 ppm (methylene protons, h and i) (Figure 2b) (Fangkangwanwong *et al*., 2003; Deng *et al*., 2007; Tsao *et al*., 2014).

mPEG-*g*-CTS showed proton signals at **δ** = 3.4-3.9 ppm (methylene protons of mPEG, c to f and pyranose ring protons, 3 to 6) and **δ** = 3.30 ppm (methyl protons of mPEG, a) (Figure 2c). The degree of substitution (DS) of mPEG onto chitosan chain was calculated based on the integral ratio of methyl

protons of mPEG to pyranose proton at C-2, according to equation 1 (Fangkangwanwong *et al*., 2003; Deng *et al*., 2007; Tsao *et al*., 2014). DS of mPEG2000-*g*-CTS was 1.52.

$$DS = \frac{\text{(Methyl protons of mPEG)/3}}{\text{Pyranose proton at C-2 of chitosan}} \quad (1)$$

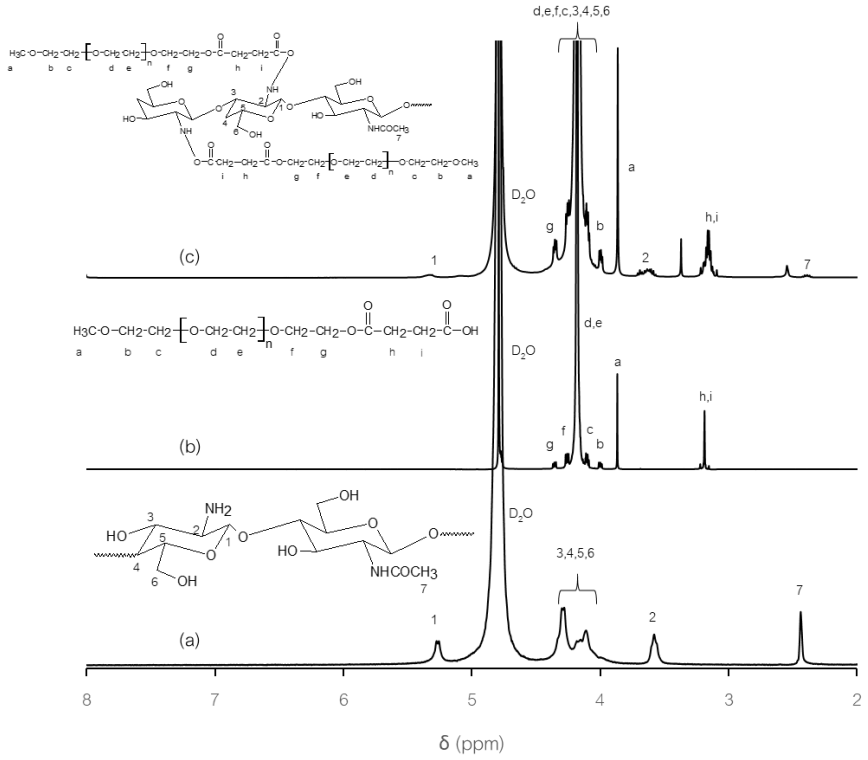
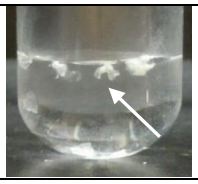
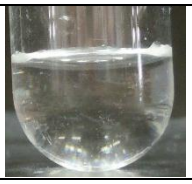
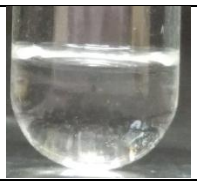
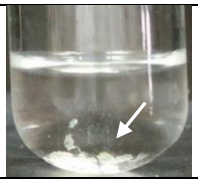
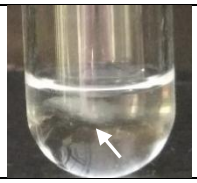
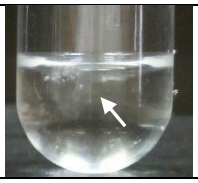
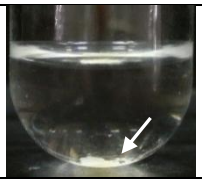
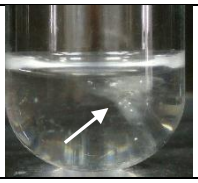


Figure 2 ^{1}H NMR spectra of (a) chitosan, (b) mPEG750-COOH and (c) mPEG2000-*g*-CTS.

3. Solubility of chitosan and mPEG-*g*-CTS

Chitosan was soluble in only acetic acid solution (1% v/v), while it was insoluble in water, ethanol and acetone. Both mPEG750-*g*-CTS and mPEG2000-*g*-CTS were soluble in water and acetic acid solution (1% v/v), while they were swellable in ethanol and acetone; however swellability and solubility of mPEG2000-*g*-CTS were greater than mPEG750-*g*-CTS. It was possible that water solubility of mPEG-*g*-CTS might be a result of crystalline reduction of chitosan (Yeng *et al*., 2002).

Table 1 Solubility of chitosan, mPEG750-*g*-CTS and mPEG2000-*g*-CTS in various solvents.

Solvent	Chitosan	mPEG750-*g*-CTS	mPEG2000-*g*-CTS
Water			
	Insoluble	Soluble	Soluble
Acetic acid solution (1% v/v)			
	Soluble	Soluble	Soluble
Ethanol			
	Insoluble	Swellable	Swellable (partially soluble)
Acetone			
	Insoluble	Swellable	Swellable (partially soluble)

4. Possibility of mPEG-*g*-CTS as thickening agent

In most cases, thickening agents are polymers, that can increase viscosity of liquid without change the properties of liquid system. Herein, the increase in viscosity of aqueous system by mPEG-*g*-CTS was examined by observing the flow of solution containing mPEG-*g*-CTS. Figure 3 shows that water flowed immediately after the plate was tilted, while CTS750-*g*-mPEG and CTS2000-*g*-mPEG solutions were still on the plate with a little movement, implying that CTS-*g*-mPEG could increase viscosity of liquid system. Viscosity of the solution will also be further investigated by other techniques.

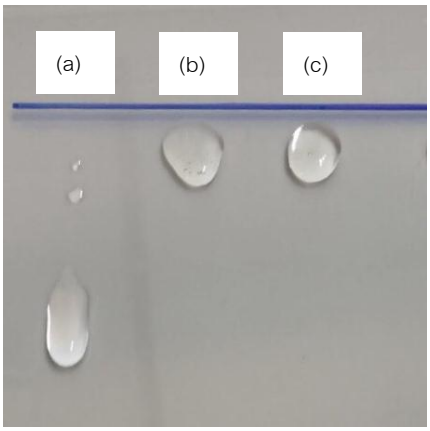


Figure 3 Picture of samples flowing on 45-degree-tilted acrylic plate: (a) water, (b) 2% w/v of mPEG750-*g*-CTS and (c) 2% w/v of mPEG2000-*g*-CTS.

CONCLUSION

mPEG-*g*-CTS was successfully synthesized via coupling reaction as confirmed by FT-IR and ^{1}H-NMR. For FT-IR, mPEG-*g*-CTS showed a new peak at 1730 cm^{-1} and the increased intensity of peak at 2886 cm^{-1} as compared with chitosan. For ^{1}H-NMR, mPEG-*g*-CTS presented signals of mPEG methyl protons and pyranose proton at C-2. mPEG750-*g*-CTS and mPEG2000-*g*-CTS were soluble in water and acetic acid solution but swellable in ethanol and acetone. The increased molecular weight of mPEG was resulted in better solubility. CTS-*g*-mPEG could increase viscosity of aqueous solution. Therefore, it was expected to be used as thickening agent.

ACKNOWLEDGEMENTS

Financial support was from the Center for Advanced Studies in Nanotechnology for Chemical, Food and Agricultural Industries, KU Institute for Advanced Studies, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

REFERENCES

De Souza Soares, L., J.T. de Faria, M.L. Amorim, J.M. de Araújo, L.A. Minim, J.S. dos Reis Coimbra, A.V.N. de Carvalho Teixeira and E.B. de Oliveira. 2017. Rheological and Physicochemical Studies on Emulsions Formulated with Chitosan Previously Dispersed in Aqueous Solutions of Lactic Acid. **Food Biophysics**. 12(1): 109-118.

Deng L., H. Qi, C. Yao, M. Feng and A. Dong. 2007. Investigation on the properties of methoxy poly(ethylene glycol)/chitosan graft co-polymers. **Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition**. 18: 1575-1589.

Fangkangwanwong J., M. Akashi, T. Kida and S. Chirachanchai. 2006. One-pot synthesis in aqueous system for water-soluble chitosan-*graft*-poly(ethylene glycol) methyl ether. **Biopolymers**. 82: 580-586.

Peter M.G. 2005. Chitin and chitosan in fungi, pp. 123-132. *In* Steinbüchel A., Ed. **Biopolymer online**. Wiley online library. DOI: 10.1002/3527600035.bpol6005.

Yang TC, CC. Chou and CF. Li. Preparation, water solubility and rheological property of the N-alkylated mono or disaccharide chitosan derivatives. **Food Research Internationnal**. 35:707–13.

Zivanovic S., R.H. Davis and D.A. Golden. 2015. Chitosan as an antimicrobial in food products, pp. 153-182. *In* **Handbook of Natural antimicrobials for food safety and quality**. Woodhead publishing, Cambridge, UK.

The Influence of Temperature on The Biofilm Formation of *Pseudomonas aeruginosa* and *Staphylococcus aureus* under Simulated Condition in The Poultry Processing Plant

Pawarisa Boonkoy[1] and Warapa Mahakarnchanakul[1*]

ABSTRACT

Biofilm formation of *Pseudomonas aeruginosa* and *Staphylococcus aureus* on food-contact-surfaces represents a significant risk for the public health. In this context, the study was about investigation of the relationship between the environmental conditions and biofilm formation. Adhesion and biofilm-forming ability of *P. aeruginosa* and *S. aureus* that previously isolated from poultry plant on stainless steel were assessed. For all temperature conditions; 10 ^{o}C and 30 ^{o}C, mono-species of *P. aeruginosa* and *S. aureus* had adhered on surface and formed biofilm which was assessed by EPS measurement. *P. aeruginosa* initially grew and formed biofilm at day tenth, this bacterium had the maximum adhesive cell and EPS reaching at low temperature. Whereas, *S. aureus* attached and formed biofilm at 30 ^{o}C in day tenth. In contact, *P. aeruginosa* and *S. aureus* were co-localized or self-segregated within the mixed biofilm. The multi-species biofilm presented bacterial adhesion and biofilm forming ability more rapid than mono-biofilm. The results showed that *S. aureus* have a physical preference to be located in the upper zones of the biofilm, when forming part of a multi-microbial structure with *Pseudomonas aeruginosa*. The temperature influenced the biofilm. These data also revealed that the growth temperature had a significant effect on the biofilm structure of both bacteria. Overall, our findings showed that the stress temperature conditions in the processing, some bacteria can grow and survive to form biofilms and lead to risk of the problem in food industry. In conclusion, in order to reduce the microbiological risk related to the biofilm formation, a better understanding of how *P. aeruginosa* and *S. aureus* attached and formed biofilm when it was exposed to conditions simulating in food processing plants is needed.

Key Words: Biofilm, Mixed culture, *P. aeruginosa*, *S. aureus*, Stainless steel, Temperature

[*] Corresponding author; e-mail address: **fagiwpm@ku.ac.th**

[1]Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok, 10900

INTRODUCTION

Bacteria most commonly live by adhering on surfaces and forming organized communities called biofilms (Malheiros *et al*., 2010). Biofilms are structured communities of bacterial cells enclosed in a self-produced polymeric matrix and adhered to surfaces (Costerton *et al*., 1999). The presence of biofilm on food contact surfaces is considered as a health hazard. Microbial biofilms may contain a considerable number of both spoilage and pathogenic microorganisms (Giaouris *et al*., 2005). Exposure of pathogens to surfaces may take place either by direct contact with contaminated materials or indirectly through airborne microflora (Kusumaningrum *et al*., 2003). The direct contact with raw materials or food products may cause secondary contamination by which the product may become unsafe (Vlkova *et al*., 2008). Several bacteria are known to form biofilms on different materials (Di Ciccio *et al*., 2012). However, biofilm formation is influenced by the nature of substratum, cell surface charge, presence of flagella and microbial growth phase (Pagedar and Singh, 2012). *Pseudomonas aeruginosa* and *Staphylococcus aureus* are important opportunistic human pathogens, causing major problem in food industry. In fact, *S. aureus* is among the common known cause of foodborne infections worldwide and the involvement of *P. aeruginosa* is such infections and food spoilage. Biofilm formation depends on the characteristics of the surface, the bacterial cell, the growth medium and other environmental conditions (Donlan and Costerton, 2002). Thus, to study which conditions can facilitate biofilm formation is needed to know the real incidence of any bacteria in a food processing plant.

The present study was carried out with the aim of evaluating the ability of *P. aeruginosa* and *S. aureus* isolated from the food contact surfaces and food environments, to form biofilms on stainless steel surfaces under different temperatures: 10 ^{o}C and 30 ^{o}C. This study was focused on two of the most important properties for potential contamination of foods in processing plants: adhesion to the surface and EPS of biofilm production.

MATERIALS AND METHODS

1. Preparation of microbial suspension

1.1 Single-culture preparation

The working stock of *S. aureus* and *P. aeruginosa,* was isolated from the contact surfaces in the poultry processing plant. It was transferred 1 loop into 10 mL sterilized Tryptic Soy Broth and was incubated at 37 ^{o}C for 24 hours, then spiked 10 μL into 10 mL of sterilized Tryptic Soy Broth for 18 hours, that was activated growth inoculum. The inoculums were used 0.1% for the biofilm experiments.

1.2 Mixed culture preparation

The working stock of two species were of *S. aureus* and *P. aeruginosa*. It was

transferred 1 loop into 10 mL sterilized TSB and was incubated at 37 °C for 24 hours, then was spiked 10 μL into 10 mL sterilized TSB and was incubated at 37 °C for 18 hours, it was activated growth inoculums. A combination of each species was done for two strains of *S. aureus* (8 log CFU/mL) and *P. aeruginosa* (8 log CFU/mL) suspension. The cell suspensions were mixed to form a two species mixture for the biofilm experiment.

2. Conditions for biofilm formation

2.1 Preparation of stainless steel coupons

Stainless steel coupons (type 304) size 2x5x1 cm. were used in this study, which were used in the poultry processing equipment. The coupons were immersed in 70% ethanol for 10 min to disinfect the surface, and rinsed with sterile distilled water. Washed stainless steel coupons were autoclaved at 121 °C for 15 min.

2.2 Biofilm production

The surface; stainless steel coupons, were transferred to bioreactor chamber and sterilized with autoclave at 121 °C for 15 min, then added 2,000 mL of 0.3 g/L TSB. Lastly, the coupons were incubated with 2 mL of an overnight grown culture (18 h) of single or mixed culture per bioreactor chamber. The population of bacteria in each sample was about 6 log CFU/mL. The samples were incubated at 10 °C and 30 °C for 5, 10, 15, 20, 25 and 30 days. Tryptic Soy Broth was released and re-prepared every day.

2.3 The simulated food processing and treatment of biofilms

Following biofilm formation, the coupons were subjected to repeated 24 hour cycles. Each cycle consisted of two sequential steps: (i) incubation in TSB for 16 h at 10 °C and 30 °C and (ii) storage without liquid medium (starvation) in bioreactor for 8 h at 10 °C and 30 °C. Samples were taken at selected intervals (on days 0, 5, 10, 15, 20, 25 and 30) to measure adhesive cell on the coupons and observe EPS in biofilms by ruthenium red assay.

3. Biofilm formation assays

3.1 Adhesive cell development and quantification

After 5, 10, 15, 20, 25 and 30 day of incubation, the coupons (two for each treatment) were submitted to bacterial counting in biofilm matrix. For this, the biofilm was scraped with sterile swabs, which were re-suspended in 9 mL of saline solution (0.85% NaCl) by vortexing for 30 s. The serial dilutions were prepared in the saline solution and aliquots of 100 μL were spread plated onto TSA plates, followed for incubation at 37 °C for 24 h. After the incubation period, the number of viable cells was counted and the results expressed in log CFU/cm^2 (Oliveira *et al*., 2010).

3.2 Extracellular polymeric substance (EPS) in biofilm assay by ruthenium red microplate staining

Ruthenium red staining is used in biofilm assays. The sampling stainless coupons were washed with 10 mL of saline solution (0.85% NaCl) for three times to remove non-adhesive cell. The removal of the biofilm was scraped by using sterilized swab. The head swab was transferred to test tubes, that contained 10 mL of the saline solution and stirred by vortexing for one minute. The samples were carefully transferred to a polystyrene microplate. The solution of ruthenium red (0.1%, 50 μL) was added to each well of the plate, and biofilms were stained for 45 minutes at room temperature. The amount of dye bound by the biofilm in each well was determined by subtracting the optical density (O.D.) at wavelength 450 nm. of the well from the average of the three blank wells (Borucki *et al*., 2003).

RESULTS AND DISCUSSION

1. Single-culture biofilm of *P. aeruginosa* and *S. aureus*

Biofilms are structured communities of cells enclosed in self-produced hydrated EPS matrix adherent to an inert surface (Sauer *et al*., 2007). Adhesive biofilm was introduced as a quick method to detect the bacterial attached or formed biofilm on food contact surfaces (Donlan *et al*., 2002). When biofilm forms, the microorganisms can produce extracellular polymeric substance which related to the main composition of biofilm (Harimawan *et al*., 2017). In this study, *P. aeruginosa* and *S. aureus* were formed biofilms in single culture and mixed culture. The results of Figure 1 showed that adhesive biofilms of single culture of *P.* aeruginosa (A) at 10 ^{o}C reached the maximum on day tenth (7.44 log CFU/ cm^{2}), then slightly decreased after the day tenth, then increased again on twenty days until twenty-five days and decreased on the remaining time, whereas at 30 ^{o}C on day tenth had lower adhesive cell on the coupons (5.97 log CFU/ cm^{2}) after that they decreased on the remaining time. In term of extracellular polymeric substance (EPS) that showed in Figure 1 (B), the amount of EPS was measured by modified ruthenium red microplate staining at wavelength 450 nm. as an indicator of extracellular polymeric substance which related to the important constituent of biofilm formation. The maximum EPS of *P. aeruginosa* at 10 ^{o}C reached on day tenth, while at 30 ^{o}C on day tenth had lower EPS value.

The biofilms enhance the ability of bacteria to survive stresses and constitute potential reservoirs for pathogens such as *S. aureus* (Abdallah *et al*., 2014). The number of *S. aureus* adhered on the coupons under different temperature conditions show in Figure 2 (A). The adhesive cell on surface increased with temperature. In particular, *S. aureus* at 30 ^{o}C resulted high population (6.89 log CFU/ cm^{2}) on day tenth and slightly decreased after. In contrast, at low temperature; 10 ^{o}C, *S. aureus* grew slowly and had the maximum of adhesive cell (4.32 log CFU/ cm^{2}) on twenty days. The

extracellular polymeric substance (EPS) parameters were presented the indication of biofilm production. EPS had correlation with adhesive cell at both temperatures, adhesion cell were increasingly related to EPS of *S. aureus* biofilm production during incubation times. Several studies have shown that the temperature changes, which take place in both food and medical environments, affect biofilm formation (Nilsson *et al*., 2011). The levels of biofilm formation by *S. aureus* on stainless surfaces over 15 days at 10 °C were assessed (Figure 2 (B)). In fact, Oulahal *et al*. (2008) found that the effect of the growth temperature on the formation of *S. aureus* biofilm is affected by several environmental factors such as nutrient availability and surface type. Biofilm formation depends on the characteristics of surface, the bacterial cell, the growth medium and other environmental factor (de Jesus Pimentel-Filho *et al*., 2014). *S. aureus* and its biofilm formation were recognized as a serious problem for food industries and were known about the ability of wild *S. aureus* isolated from food, food-handlers and food environments to form biofilms when they were exposed in food processing plants (Leite de Souza *et al*., 2014).

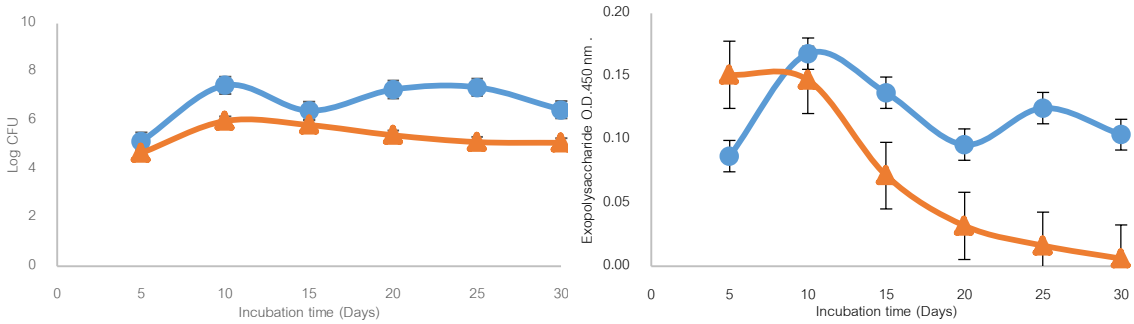


Figure 1 A) Adhesive cell of *P. aeruginosa* B) Extracellular polymeric substance (450 nm) in *P. aeruginosa* biofilm at different temperatures as 10 °C (●) and 30 °C (▲) on stainless steel coupons in 0.3 g/L TSB.

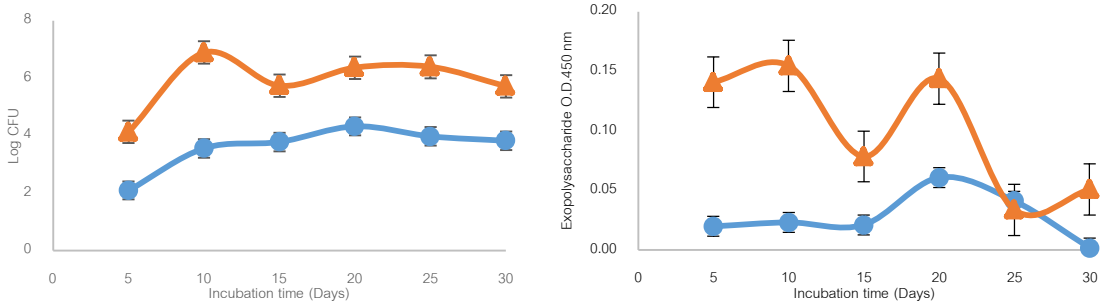
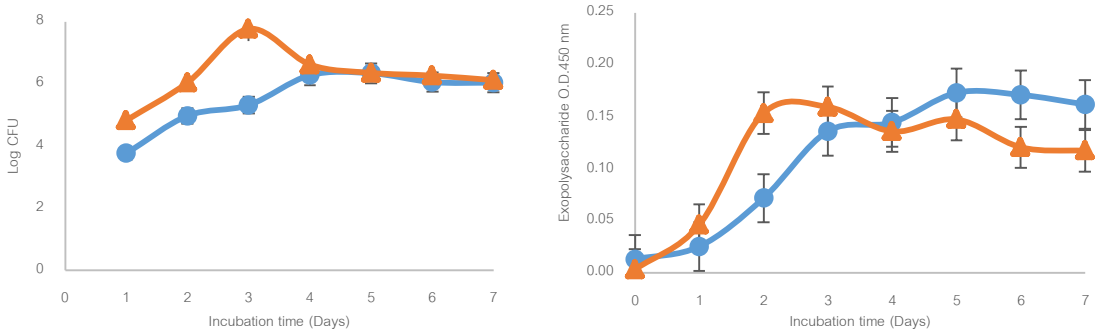


Figure 2 A) Adhesive cell of *S. aureus* B) Extracellular polymeric substance (450 nm) in *S. aureus* biofilm at different temperatures as 10 °C (●) and 30 °C (▲) on stainless steel coupons in 0.3 g/L TSB.

2. Mixed-species biofilm under simulated conditions

In this study found that mixed-species biofilm can form biofilm rapidly on six days at 10 °C and 30 °C. In adhesion bacteria result (Figure 3 (A)) expressed that low temperature had slightly

increasing attachment (6 log CFU/ cm^2) on day fourth until day sixth. In contrast, high temperature at 30 ^{o}C had the highest adhesion of mixed biofilm value (7.46 log CFU/ cm^2) on day third. Many studies reported that the maturation of a bacterial biofilm occurs between three to six days after the initial adhesion, and only after ten days an increased population density with pronounced production and deposition of exopolysaccharide is reached (mature biofilm). Moreover, EPS parameter had correlated with increasing adhesive cell at both temperatures. The previous study found that the optimum temperature for a microorganism is associated with an increase in nutrient intake resulting in a rapid formation of biofilm (Stepanovic *et al*., 2003). Most investigations regarding different aspects of *S. aureus* biofilms have been carried out using mono-species cultures. On the other hand, it has been extensively demonstrated that the majority of the staphylococcal species are able to associate with other microorganisms such as bacteria and yeasts and form polymicrobial structures (Elias and Banin, 2012). In these multispecies communities, the existing relationships



between *S. aureus* and the accompanying microbiota clearly influence the formation kinetics, morphology, and physicochemical characteristics of the final structure if compared to monospecies biofilms (Kucera *et al*., 2014). It has been detected that the distribution of *S. aureus* in a multispecies biofilm seems to be affected by the actual species composition of the community.

Figure 3 A) Adhesive cell of mixed culture B) Extracellular polymeric substance (450 nm) in mixed biofilm at different temperatures as 10 ^{o}C (●) and 30 ^{o}C (▲) on stainless steel coupons in 0.3 g/L TSB

CONCLUSION

Microbial biofilms enhance the ability of bacteria to survive in stress condition and can cause problems in the food industry. In fact, the persistence of biofilm on food contact surfaces, and equipments, may constitute a continuous source of contamination. This study suggested that the biofilms formation of *P. aeruginosa* and *S. aureus* was influenced by environmental conditions relevant for the food industry such as temperature. In the present study, *P. aeruginosa* and *S. aureus* from food environments were biofilm producers in at least one assay. This fact is of public health concern because it indicates a potential source for persistence of *P. aeruginosa* and *S. aureus*

contamination in the food industry. Based on our results, the majority of *P. aeruginosa* and *S. aureus* that showed the ability to form biofilm on the coupons were isolated from food surfaces. The stress temperature conditions in the processing, some bacteria can grow and survive to form biofilms and risk of the problem in food industry. In conclusion, in order to reduce the microbiological risk related to the biofilm formation, a better understanding of how *P. aeruginosa* and *S. aureus* attached and form biofilm when they are exposed to conditions simulating in food processing plants is needed.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank the Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Thailand. This research was financial supported by the poultry processing industry in Thailand.

REFERENCES

Abdallah, M., C. Benoliel, D. Drider, P. Dhulster and E. N. Chihib. 2014. Biofilm formation and persistence on abiotic surfaces in the context of food and medical environments. **Archives of Microbiology**. 196: 453-472.

Borucki, M. K., J. D. Peppin, D. White, F. Loge and D. R. Call. 2003. Variation in biofilm formation among strains of *Listeria monocytogenes*. **Applied and Environmental Microbiology**. 69(12): 7336-7342.

Costerton, J. W. 1999. Introduction to biofilm. **International Journal of Antimicrobial Agents**. 11: 217-221.

De Jesus Pimentel-Filho, N. de F., M. C. Martins, G. Bicalho Nogueira, H. Cuquetto Mantovani and M. C. Dantas Vanetti. 2014. Bovicin HC5 and nisin reduce *Staphylococcu aureus* adhesion to polydtyrene and change the hydrophobicity profile and Gibbs free Energy of adhesion. **International Journal of Food Micro-biology.** 190: 1-8.

Di Ciccio, P., M. Conter, E. Zanardi, S. Ghidini, A. Vergara and D. Paludi. 2012. *Listeria monocytogenes*: biofilm in food processing. **Italian Journal of Food Science.** 24(3): 203-213.

Donlan R. M. and J. W. Costerton. 2002. Biofilms: survival mechanisms of clinically relevant microorganisms. **Clinical Microbiology.** 15(2):167-193.

Elias, S. and E. Banin. 2012. Multi-species biofilms: living with friendly neighbors. **FEMS Microbiology Reviews**. 36: 990–1004.

Giaouris, E., N. Chorianopoulos and G. J. Nychas. 2005. Effect of temperature, pH, and water activity on biofilm formation by *Salmonella enterica enteritidis* PT4 on stainless steel surfaces as indicated by the bead vortexing method and conductance measurements. **Journal of Food Protection**. 68: 2149-2154.

Gibson, H., J. H. Taylor, K. E. Hall and J. T. Holah. 1999. Effectiveness of cleaning techniques used in the food industry in terms of the removal of bacterial biofilms. **Journal of Applied Microbiology**. 87(1): 41-48.

Harimawan, A., H. Devianto, I. C. Kurniawan, dan J. C. Utomo. 2017. Influence of Solution Initial pH on Biofilm Formation and Corrosion of Carbon Steel by *Serratia marcescens*. **Chemical engineering journal.** 17(2): 89-95.

Kucera, J., Sojka, M., Pavlik, V., Szuszkiewicz, K., Velebny, V. and Klein, P. 2014. Multispecies biofilm in an artificial wound bed-A novel model for *in vitro* assessment of solid antimicrobial dressings. J**ournal Microbiology Methods.** 103: 18–24.

Kusumaningrum, H. D., G. Riboldi, W. C. Hazeleger and R. R. Beumer. 2003. Survival of foodborne pathogens on stainless steel surfaces and cross-contamination to foods. **International Journal of Food Microbiology.** 85: 227-236.

Leite de Souza, E., Q. G. Silva Meira, I. de Medeiros Barbosa, A. J., Alves Aguiar Athayde, M. L. da Conceiç~ao and J. P. de Siqueira Júnior. 2014. Biofilm formation by *Staphylococcus aureus* from food contact surfaces in a meat-based broth and sensitivity to sanitizers. **Brazilian Journal of Microbiology.** 45: 67-75.

Malheiros, P. S., C. T. Passos, L. S. Casarin, L. Serraglio and E. C. Tondo. 2010. Evaluation of growth and transfer of *Staphylococcus aureus* from poultry meat to surfaces of stainless steel and polyethylene and their disinfection. **Food Control.** 21: 298-301.

Nilsson, R. E., T. Ross and J. P. Bowman. 2011. Variability in biofilm production by *Listeria monocytogenes* correlated to strain origin and growth conditions. **International Journal of Food Microbiology.** 150: 14-24.

Oliveira, M.M.M., D.F. Brugnera, M. G. Cardoso, E. Alves and R. H. Piccoli. 2010. Disinfectant action of *Cymbopogon* sp. essential oils in different phases of biofilm formation by *Listeria monocytogenes* on stainless steel surface. **Food Control.** 21: 549–553.

Oulahal, N., W. Brice, A. Martial and P. Degraeve. 2008. Quantitative analysis of survival of *Staphylococcus aureus* or *Listeria innocua* on two types of surfaces: polypropylene and stainless steel in contact with three different dairy products. **Food Control.** 19: 178-185.

Pagedar, A. and J. Singh. 2012. Influence of physiological cell stages on biofilm formation by Bacillus cereus of dairy origin. **International Dairy Journal.** 23: 30-35.

Sauer, K., A. H. Rickard and D. G. Davies. 2007. Biofilms and biocomplexity. **American Society for Microbiology**. 2: 347-353.

Stepanovic, S., I. Cirkovic and V. Mijac. 2003. Influence of the incubation temperature, atmosphere and dynamic conditions on biofilm formation by *Salmonella* spp. **Food Microbiology.** 20: 339–43.

Vlkova, H., V. Babak, R. Seydlova, I. Pavlik and J. Schlegelova. 2008. Biofilms and hygiene on dairy farms and in the dairy industry: sanitation chemical products and their effectiveness on biofilm sea Review. **Czech Journal of Food Science.** 26: 309-323.

Charcoal Types Affected the Carcinogenic Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Grilled Meat

Nattada Santisavekun[1*], Jak-anan Malarut[1] and Kanithaporn Vangnai[1]

ABSTRACT

Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) is an important carcinogen in grilled meat which are generally formed through the incomplete combustion of organic materials during grilling. Some PAHs, especially Benzo(a)pyrene (BaP), have been classified by the International Agency for Research on Cancer (IARC) as being carcinogenic and mutagenic in humans. Our study was aimed to investigate the effects of charcoal types on the formation of PAHs in grilled pork. Three types of charcoal including high-temperature refined charcoal using Iwate kiln (HTC), charcoal briquettes (CB) and low-temperature refined tradition wood charcoal (LTC) were used to grill sirloin pork, then PAHs were quantified in each sample using gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). BaP levels of sirloin pork grilled with of HTC (0.27 µg/kg) was lower than that of sirloin pork grilled with CB (0.44 µg/kg) and LTC (2.17 µg/kg). While the PAH4 levels of sirloin pork grilled with HTC (3.92 µg/kg) was much lower than those of sirloin pork grilled with CB (5.94 µg/kg) and LTC (20.44 µg/kg). Therefore, charcoal produced by high-temperature refining process used as the heat source to provide safer grilled meat.

Key Words: Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs), Meat, Charcoal, Grilling

* Corresponding author; e-mail address: **puinattada8@gmail.com**

[1] Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok, 10900

INTRODUCTION

Carcinogenic Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) have been reported to be present in grilled meat products. The International Agency for Research on Cancer has determined that benzo[a]pyrene (BaP) is carcinogenic to humans (group 1). The formation of PAHs (BaP)-DNA adducts in human body can interrupt the DNA replication process and is associated with increased risk of several cancers by intake of contaminated foods, whereas benz[a]anthracene (BaA), chrysene (Chry), benzo[k]fluoranthene (BkF) and benzo[b]fluoranthene (BbF) are possibly carcinogenic to humans (group 2B). PAH16 priority pollutants were defined by the Environmental Protection Agency (EPA) because of concerns regarding their contamination in food and the environment. According to European Food Safety Authority, although BaP is the most toxic PAH, BaP on its own is not a suitable indicator for the occurrence of PAHs in foods. Analysis using the sum of the contents of four PAHs (PAH4: BaP, BaA, BbF and Chry) is recommended as the most suitable indicator of PAHs in food. The PAH levels in food have been regulated via European Union (EU) Regulation No 835/2011. The maximum permitted level for BaP and PAH4 in grilled meat product is 2.0 µg/kg and 12.0 µg/kg, respectively.

PAHs contamination by intense thermal processing, such as charcoal grilling, is due to the direct pyrolysis of food nutrients and the direct deposition of PAHs from smoke produced through incomplete combustion of different thermal agents (Rey-Salgueiro *et al*., 2008). Grilled foods are increasingly popular both at home and in restaurants; however the higher levels of cooking carcinogens, make these foods a risk to the population. Therefore, charcoal type and charcoal kiln at various carbonization temperature are also important to affected properties of charcoal (fixed carbon, volatile matter, ash content and heating value) and the PAH levels in charcoal-grilled meat which still lack of the information and need further study. Iwate kiln have high efficiency because kiln is design to heat up thoroughly produce high quality of charcoal. It has been developed temperature closer kiln at 700°C, resulting charcoal get high heating value, fixed carbon and low volatile matter expected to reduce PAH in charcoal-grilled meat (Chotikhun and Laemsak, 2009). The main objective of this work was to study the influence of charcoal type (HTC, CB and LTC) which produced by different carbonization temperature level on PAHs formation and some qualities in grilled meat products.



Figure 1 Thai-Iwate kiln equipped with a flame tunnel located at a charcoal factory in Nakhon Rachasima (developed by Department of Forest Products, Faculty of Forestry, Kasetsart University, Thailand)

MATERIALS AND METHODS

1. Material

Sixteen PAH standards and QuEChERS Teflon centrifuge tube packed with 1200 mg of $MgSO_4$, 400 mg of primary-secondary amine (PSA), and 400 mg of end-capped C18 were obtained from Supelco Co. (Bellefonte, PA, USA). Magnesium sulfate ($MgSO_4$) and sodium acetate (CH_3COONa) were analytical grade purchased from Sigma-Aldrich (Bellefonte, PA, USA). The HPLC grade solvents (acetonitrile) were from RCI Labscan Asia Co., Ltd (MO, USA).

2. Sample preparation

Sirloin pork was purchased from supermarket in Bangkok, Thailand. The samples were cut into small pieces (about 3 x 4 x 0.5 cm) and marinated with water, sugar, oyster sauce, salt, garlic powder and black pepper powder.

3. Charcoal grilling process

Three types of charcoal (HTC, CB, and LTC) were used to grill sirloin pork (Figure 2). The set of charcoal grilling process including approximately 500 g of charcoal were placed in the bottom of the grill. The heating source was changed for each sample and the cover of the grill was opened during grilling process. Temperature of heating source was controlled at 280±10°C prior placing the sample on the grill and at 350-400°C during the grilling. The meat sample was grilled by using each charcoal type until the internal temperature of meat sample reached 65±5°C and will be grilled 6 minutes/side of LTC and 4 minutes/side of HTC and CB. After cooling to room temperature, all samples were packed in foil bags and stored at -20°C until use for PAHs analyses.

(a) (b) (c)



Figure 2 Charcoal types used in this study: (a) low-temperature refined tradition wood charcoal (LTC), (b) high-temperature refined charcoal using Iwate kiln (HTC), and (c) charcoal briquettes (CB)

4. Appearance and color measurement

Grilled meat color measurements (L*, a*, b*: CIELAB values) were carried out using an UltraScan Pro spectrophotometer (HunterLab, VA, USA) with a D65/8° illumination source. Three different samples of each sample treatment were measured at four random locations.

5. PAH extraction and clean-up

A portion of 5 g of ground meat sample was taken into a tube and then homogenized in 10 mL of deionized water for 1 min. Samples were spiked with the internal standard (Acenaphthene-d_{10} and Chrysene-d_{12}) 50 ppm 20 µL, followed by the addition of 10 mL of acetonitrile. Then the QuEChERS containing 6 g of $MgSO_4$ and 1.5 g of CH_3COONa was added, after which the tube was shaken for 1 min and centrifuged at 4000 rpm for 5 min at 25 °C. Subsequently, 6 mL of the supernatant was collected and added to a QuEChERS cleanup tube containing 400 mg of PSA, 1200 mg of $MgSO_4$, and 400 mg of C18EC for purification, followed by centrifuging at 4000 rpm for 5 min at 25 °C. The supernatant was collected, the elution was purged using N_2 gas to dry and then dissolved in 100 µL of acetonitrile and a 1 µL aliquot was taken for injection into GC-MS for PAH analysis (modified from Chen *et al*., 2013).

6. PAH analysis

The sample extracts were analyzed using a Gas Chromatograph (7890B, Agilent, Canada) and detected using MS (GC-MS) (5977A, Agilent, Canada). The separation of PAHs was performed on an DB-5 MS column (30 m x 0.32 mm x 0.25 µm; J&W Scientific, Folsom, CA, USA) following Lynam and Smith (2008).

7. Statistical analysis

A completely randomized design was used in this study. All experiments were conducted in triplicate and the mean and SD were reported. Statistical analysis was performed using Duncan's multiple range test using the SPSS version 23 computer software (IBM SPSS, Chicago, IL, USA) with significance decided at the 95% confidence level.

RESULTS AND DISCUSSION

Appearance and color analysis of different grilled meat samples.

The sirloin pork samples grilled with different types of charcoal were measured the lightness, redness and yellowness (L*, a* and b* value, respectively) and the result is presented in Table 1. Compared with the grilled meat with LTC, the grilled sirloin pork samples grilled with the HTC and CB treatments were notably lighter (higher L* value and lower a* value). Sirloin pork grilled with all treatments showed no significant difference in b* values. This could be due to HTC had higher amounts of fixed carbon, heating value and could produce low volatile matter and smoke (Chotikhun and Laemsak, 2009) which resulted in shorter grilling time compared with LTC. The shorter grilling

time caused the lighter color due to lower occurrence of Maillard reaction which is mainly attribute to the brown color of the grilled meat products.

Table 1 Appearance and color analysis of different charcoal grilled meat samples.

Marinade treatment	Appearance	Grilling time (min/side)	Color		
			L* value	a* value	b* value
LTC		6	39.12±2.47^{c}	9.30±0.88^{a}	15.64±1.67^{a}
HTC		4	59.38±0.93^{a}	3.35±0.76^{c}	15.47±1.17^{a}
CB		4	46.95±1.88^{b}	6.95±0.46^{b}	15.56±0.62^{a}

$^{a-c}$ Mean values with different subscripts indicate a significant difference ($p<0.05$).

LTC: low-temperature refined traditional wood charcoal, HTC: high-temperature refined charcoal using Iwate kiln, CB: charcoal briquettes.

PAH contents in sirloin pork grilled using different types of charcoal

Figure 3 shows the GC-MS chromatogram of PAH16 standards and internal standards with the SIM mode. The detection and quantification limits (LODs and LOQs) ranged from $1x10^{-4}$ – $5x10^{-4}$ ng/mL and $3x10^{-4}$ – $15x10^{-4}$ ng/mL, respectively. The recovery was in the range of 70.10 - 113.79%. All PAH levels found in all sirloin pork grilled samples were higher than the LOD and LOQ values. Some PAHs (such as Ane, Flt, BaA, BbF, BaP and InP) produced a recovery level above 100% which could be from the random errors when performing GC-MS analysis of PAHs as similarly found in the studies reported by Duedahl-Olesen *et al.* (2015). Based on the regulation indicated by European Commission Regulation (EC) No.835/2011, the recovery sets should be in the range of 50 - 120%. Therefore, the recovery ranged from 70.10 to 113.79% in this study was acceptable.

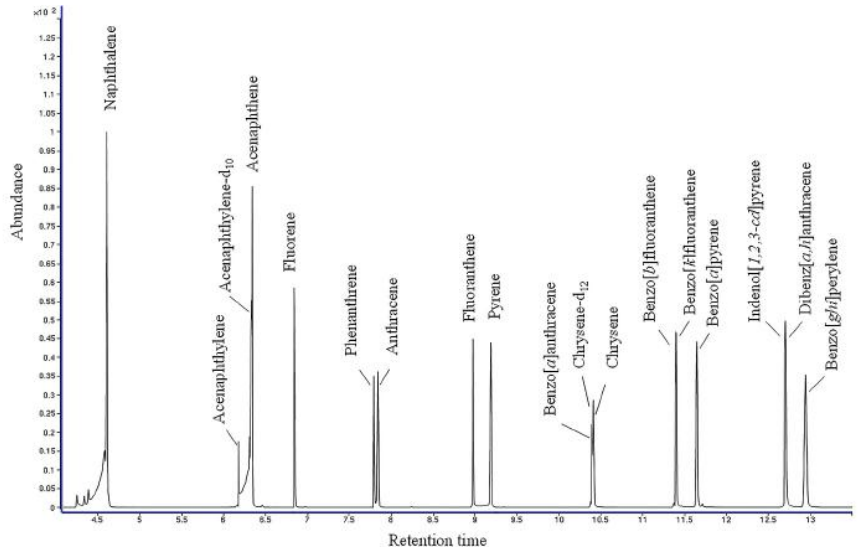


Figure 3 GC-MS chromatogram of PAH16 standard at 1 ppm (1 µL injection) using SIM mode.

The moisture contents of all grilled samples were in the range of 50 ± 2%. Sirloin pork grilled with wood charcoal treatments was contaminated with PAHs because during grilling, there are the occurrences of the direct pyrolysis of food nutrients in meat and also the fat dripping from meat into the wood charcoal led to the fat pyrolysis which increases the released smoke that carries PAHs (Duedahl-Olesen *et al*., 2015). The PAH levels as shown in BaP, PAH4 and PAH16 found in pork samples grilled with three different types of charcoal are showed in Table 2. Results revealed that Benzo[a]pyrene (BaP) levels in the sirloin pork grilled was in the range of 0.27-2.17 µg/kg, while the contamination of PAH4 in the sirloin pork grilled was in the range of 3.92-20.44 µg/kg and PAH16 was in the range of 29.70-117.13 µg/kg. The contamination of BaP and PAH4 in sirloin pork with LTC was higher than the standard of The European Commission Regulation (EC) No.835/2011, which set the maximum level of BaP and PAH4 for grilled meat products at 2.0 µg/kg and 12 µg/kg, respectively (EU, 2011). According to Table 2, the levels of BaP, PAH4 and PAH16 revealed no significant differences between sirloin pork grilled with HTC and CB. Sirloin pork with charcoal grilled treatments (HTC and CB) illustrated reduction effect on PAHs formation during charcoal grilling process in comparison to LTC. Sirloin pork grilled with HTC treatment showed the highest effect on reducing the generation of BaP (88%), PAH4 (81%) and PAH16 (75%). HTC is labeled as smokeless charcoal, high heating value and fixed carbon and low volatile matter (Chotikhun and Laemsak, 2009), this justifies lower amounts of PAHs in sirloin pork grilled sample with this type of charcoal. Therefore, Iwate kiln has high potential produce high quality charcoal that could provide safer for grilled meat.

Table 2 PAH contents on sirloin pork charcoal grilled samples with different types of charcoal.

PAHs (µg/kg)	LTC	HTC	CB
Light PAHs			
Naphthalene (Nap)^{ns}	1.65±1.23	1.29±1.23	2.91±1.75
Acenaphthylene (Ane)^{ns}	64.91±44.36	10.55±10.03	9.84±4.72
Acenaphthene (Anl)^{ns}	1.75±2.15	0.87±0.66	2.30±1.38
Fluorene (Flu)^{ns}	0.85±0.83	0.74±0.71	2.05±1.15
Phenanthrene (Phen)	4.51±4.35^{ab}	3.62±3.45^{b}	13.23±7.95^{a}
Anthracene (Ant)	3.38±1.52^{a}	2.23±1.75^{b}	2.64±0.93^{ab}
Fluroranthene (Flt)	6.57±6.19^{ab}	2.30±2.01^{b}	23.90±15.32^{a}
Pyrene (Pyr)	1.88±1.29^{a}	0.11±0.05^{b}	0.96±0.52^{ab}
Benzo[a]antharacene (BaA)	5.39±0.45^{a}	1.78±1.77^{b}	2.84±4.19^{b}
Chrysene (Chry)	11.83±1.78^{a}	1.62±1.75^{c}	2.29±4.49^{b}
Total Light PAHs	102.72±43.26^{a}	25.09±12.71^{b}	62.96±26.23^{b}
Heavy PAHs			
Benzo[b]fluoranthene (BbF)	1.06±0.09^{a}	0.26±0.33^{b}	0.16±0.24^{b}
Benzo[k]fluoranthene (BkF)^{ns}	3.67±3.84	0.18±0.21	0.23±0.38
Benzo[a]pyrene (BaP)	2.17±0.88^{a}	0.27±0.24^{b} (88%)*	0.44±0.84^{b}(79%)*
Indeno[1,2,3-cd]pirene (InP)^{ns}	1.52±1.64	0.45±0.48	0.09±0.19
Dibenzo[a,h]anthracene (DahA)^{ns}	5.72±6.04	3.40±4.05	4.41±7.47
Benzo[g,h,i]perylene (BghiP)^{ns}	0.27±0.29	0.05±0.06	0.06±0.10
Total Heavy PAHs	14.41±12.24^{a}	4.60±5.34^{b}	5.40±8.82^{ab}
PAH4	20.44±1.25^{a}	3.92±4.06^{b}(81%)*	5.94±9.76^{b}(71%)*
PAH16	117.13±33.28^{a}	29.70±8.18^{b}(75%)*	57.36±20.99^{ab}(51%)*

LTC: low-temperature refined traditional wood charcoal, HTC: high-temperature refined charcoal using Iwate kiln, CB: charcoal briquettes.

^{a,b,c} Mean values with different subscripts indicate a significant difference ($p<0.05$).

^{ns}No significant difference ($p > 0.05$).

PAH4; BaA; Chry; BbF and BaP.

PAH16; Nap; Anl; Ane; Flu; Phen; Ant; Flt; Pyr; BaA; Chry; BbF; BkF; BaP; InP; DahA and BghiP.

* (%); % Reduction as compared with LTC sample.

CONCLUSION

Sirloin pork with charcoal grilled treatments (HTC and CB) illustrated reduction effect on PAHs formation during charcoal grilling process in comparison to LTC. Sirloin pork grilled with HTC treatment showed the highest effect on reducing the generation of BaP (88%), PAH4 (81%) and PAH16 (75%). Thus, the results from our study provided useful information to reduce the level of PAHs in grilled meat products.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was partially supported by the Center for Advanced Studies for Agriculture and Food (CASAF) and Kasetsart University Research and Development Institute (KURDI). The authors would like to thank Assist. Prof. Dr. Nikhom Laemsak and Dr. Pongsak Hengniran from Department of Forest Products, Faculty of Forestry, Kasetsart University, Bangkok, Thailand for their helpful advice and providing charcoal samples for our study.

REFERENCES

Chotikhun, A. and N. Laemsak. 2009. Effects of various carbonization temperatures for closing wood-charcoal kiln on charcoal properties. **Thai Journal of Forestry**. 28(2): 73-80.

Chen, S., T.H. Kao, C.J. Chen, C.W. Huang and B.H. Chen. 2013. Reduction of carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons in meat by sugar-smoking and dietary exposure Assessment in Taiwan. **Journal of Agricultural and Food Chemistry.** 61(31): 7645-7653.

Duedahl-Olesen, L., M. Aaslyng, L. Meinert, T. Christensen, A.H. Jensen and M.L. Binderup. 2015. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) in Danish barbecued meat. **Food Control.** 57, 169-176.

European Union. 2011. Commission Regulation No 835/2011 of 19 August 2011 Amending Regulation (EC) No 1881/2006 as regards maximum levels for polycyclic aromatic hydrocarbons in foodstuffs. **Official Journal of the European**, L215, 4–8.

Lynam, K. and D. Smith. 2008. Polycyclic Aromatic Hydrocarbon (PAH) Analysis Using an Agilent J&W DB-5ms Ultra Inert Capillary GC Column. **LC GC Europe.** 1-8.

Rey-Salgueiro, L., M.S. Garcia-Falcon, E. Martinez-Carballo and J. Simal-Gandara. 2008. Effects of toasting procedures on the levels of polycyclic aromatic hydrocarbons in toasted bread. **Food Chemistry.** 108(2): 607-615.

Fabrication of Coir Microfibers by Acid Hydrolyses for Bio-Based Composites

Patra Chotiprayon[1] and Rangrong Yoksan[1,2*]

ABSTRACT

The objectives of the present work are to fabricate coir microfibers by sulfuric acid and hydrochloric acid hydrolyses and to compare the effect of different acid types on characteristics and properties of coir microfibers. Physical characteristics, morphological characteristics, size distribution, thermal decomposition and chemical structures of both sulfuric acid- and hydrochloric acid-hydrolyzed coir microfibers were discussed and compared with delignified coir fibers. Sulfuric acid could hydrolyze coir fibers and the length of the obtained fibers decreased from ~ 3000-7000 μm to ~ 100-250 μm; however hydrochloric acid could produce coir microfibers with the decreased diameter from ~ 100-120 μm to ~ 10 μm. Hydrochloric acid-hydrolyzed coir microfibers showed better appearance and greater thermal stability compared to sulfuric acid-hydrolyzed coir microfibers. Therefore, the obtained hydrochloric acid-hydrolyzed coir microfibers were suggested to be used as reinforcement for bio-based composite materials.

Key Words: coir, microfiber, bio-based composite, acid treatment

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

[1]Department of Packaging and Materials Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

[2]Center for Advanced Studies for Agriculture and Food (CASAF), Kasetsart University, Bangkok 10900

INTRODUCTION

Coconut industries have been growing fast with high volume of processed coconut products in Asia, particularly Thailand. Consequently, high amount of byproducts including coir fibers were generated. Coir fibers are renewable materials with lightweight (density of 1.2-1.5 g/cm^{-1}), low price (0.3-0.5 $/kg) (Väisänen *et al*., 2017), high abrasion resistance and high flexibility. Producing coir fiber composites with bio-based polymers is alternative way to increase the value of coir fibers. In addition, coir fibers have been reported to be used as a reinforcement for composite materials (Iovino *et al*., 2008; Nam *et al*., 2012).

However, in some cases coir fibers still give composites with low mechanical properties due to low interfacial adhesion between coir fibers and matrices. Previously, micro- and nanofiber-reinforced composites with improved properties have been reported (Niazi *et al*., 2017). Many researchers informed that sulfuric acid and hydrochloric acid could hydrolyze cellulosic-based materials (Bujang *et al*., 2013; Dhar et al., 2016). Dhar *et al.* (2016) reported that different types of acid hydrolysis including sulfuric acid, hydrochloric acid, nitric acid and phosphoric acid gave different characteristics of the obtained cellulose nanocrystals. However, there are only few reports about acid hydrolysis of coir fibers.

Therefore, the present research aims to fabricate coir microfibers by sulfuric acid and hydrochloric acid hydrolyses and to compare the effect of different acid types on characteristics and properties of coir microfibers. The obtained microfibers are expected to be used as reinforcement for bio-based composites.

MATERIALS AND METHODS

1. Delignification of coir fibers

Coir fibers (Local tree market) were cut into 3-7 mm in length using a hammer mill (TFS420B, Anyang GEMCO Energy Machinery Co., Ltd., China). Then, they were rinsed with ethanol (99.9% v/v, Chemipan Corporation Co., Ltd.) and dried at 50 °C for 24 h in a hot air oven before used.

Coir fibers were put into a beaker containing NaOH solution (1.8 M, Merck, Germany) with a ratio of 15:500 w/v. The mixture was stirred and heated at 100 °C. NaOH solution was changed every 2 h. Coir fibers were then washed with distilled water several times until neutral and dried at 50 ^{o}C in a hot air oven to obtain delignified coir fibers.

2. Fabrication of coir microfibers

Delignified coir fibers (1 g) were immersed in sulfuric acid or hydrochloric acid (10.6 M, 40 ml, Merck, Germany). Each mixture was stirred at room temperature with various times of 0.5, 1, 1.5 and 2 h. Deionized water (equal volume with acid solutions) was then added to stop the reaction at

the required times. The obtained fibers were dialyzed against deionized water until the medium was neutral. After that, the acid treated coir fibers were collected using centrifugation and dried at 50 °C in a hot air oven for 24 h.

3. Characterization of acid-treated coir fibers

Morphology of samples was studied by Scanning electron microscopy (SEM). Samples were attached on stub, then coated with a thin layer of gold by a mini sputter coater (SC7620, Palaron, UK). Their morphology was observed by a scanning electron microscope (Quanta 450, Crest, Malaysia).

Size distribution of samples was measured by Laser diffraction analysis. Samples were dispersed in deionized water and measured the size distribution using a laser diffraction (Mastersizer 3000, Malvern, UK) with a particle refractive index of 1.555 and dispersant refractive index of 1.330.

Thermal decomposition and thermal stability of samples were analyzed by Thermogravimetric analysis (TGA). Samples were weighed (approximately 7-15 mg) and analyzed by a thermogravimetric analyzer (Mettler Toledo TGA/DSC 3^{+}, Switzerland). Each sample was heated from 30 °C to 600 °C under nitrogen atmosphere (50 mL/min) with a heating rate of 10 °C/min.

Chemical structure of samples was analyzed using a Bruker Tensor 27 FTIR spectrometer (Bruker, Germany). FTIR measurement was performed in an attenuated total reflection (ATR) mode over a wavenumber range of 500-4000 cm^{-1} with 32 scans at resolution of 4 cm^{-1}.

RESULTS AND DISCUSSION

1. Physical characteristic of coir fibers and microfibers

Delignified coir fibers and acid-treated delignified coir fibers were observed by naked eyes. Delignified coir fibers had a brown-yellow color with a length in the range of 3-7 mm (Figure 1a). After hydrolysis by 10.6 M of sulfuric acid for 2 h, color of delignified coir fibers became darker (Figure 2b) and their sizes were smaller than delignified coir fibers. In addition, they looked hard and brittle fibers. On the other hand, fibers hydrolyzed by 10.6 M of hydrochloric acid for 2 h had pale brown-yellow color and soft like a kapok (Figure 1c)



(a) (b) (c)

Figure 1 Appearances of (a) delignified coir fibers and (b-c) acid hydrolyzed coir fibers by (b) sulfuric acid and (c) hydrochloric acid.

2. Morphological characteristic of coir fibers and microfibers

Sizes and surface appearances of delignified coir fibers and acid-hydrolyzed fibers were observed by SEM (Figure 2). The sizes of sulfuric acid-hydrolyzed coir fibers (Figure 2b-e) reduced as compared with that of delignified coir fibers (Figure 2a). Their sizes also slightly decreased with increasing hydrolysis times because sulfuric acid was more absorbed by porous structure of coir fibers and caused intensive coir fiber scission, resulting shorter length. However, the dimeters at cross section of sulfuric acid hydrolyzed coir fibers were not much different from delignified coir fibers, but their surfaces were rougher due to destruction by sulfuric acid. Narendar and Dasan (2014) also reported that the surfaces of coir piths became rough after hydrolysis with 64 %wt of sulfuric acid at 45 ^{o}C for 3 h. In contrast, hydrochloric acid-hydrolyzed coir fibers had smaller diameter (~ 10 μm, Figure 2f) than delignified coir fibers (~ 100-120 μm, Figure 2a) and sulfuric acid-hydrolyzed coir fibers (~ 50-80 μm, Figure 2e). Moreover, it is clearly seen that small fibrils were peeled from fibers. Although the length of hydrochloric acid-hydrolyzed coir microfibrils was shorter than that of delignified coir fibers, but longer than the one of sulfuric acid-hydrolyzed coir fibers. The smoothness of hydrochloric acid-hydrolyzed coir microfibrils was similar to that of delignified coir fibers, implying that hydrochloric acid provided less surface destruction of coir microfibril than sulfuric acid.

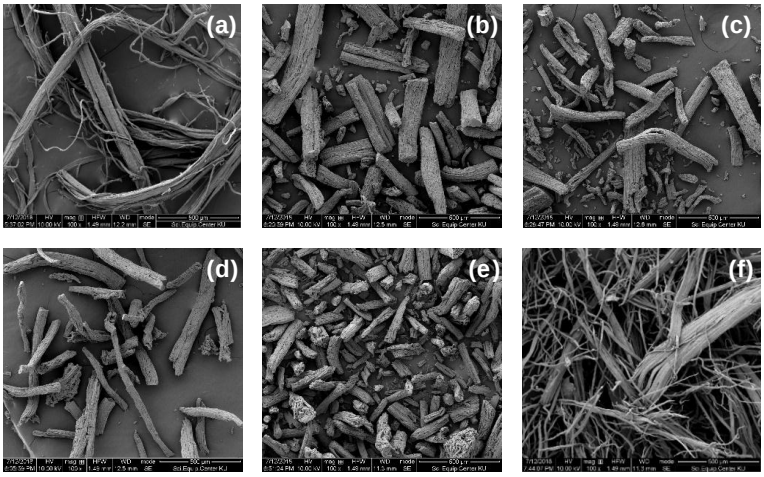


Figure 2 SEM images of (a) delignified coir fibers, (b)-(e) sulfuric acid-hydrolyzed coir fibers with various hydrolysis times: (b) 0.5 h, (c) 1.0 h, (d) 1.5 h and (e) 2 h and (f) hydrochloric acid-hydrolyzed coir fibers with hydrolysis time of 2 h.

3. Size distribution of microfibers

Figure 3 shows size distribution of sulfuric acid-hydrolyzed coir microfibers prepared using various hydrolysis times. Size of sulfuric acid-hydrolyzed coir microfibers were in the range of 0.87-

586 µm. Size distribution curves of sulfuric acid-hydrolyzed coir microfibers slightly moved to the smaller sizes with increasing hydrolysis times, implying the reduction of microfiber sizes. The size of coir microfibers with largest quantity was shown in Table 1. This result supported the information from SEM.

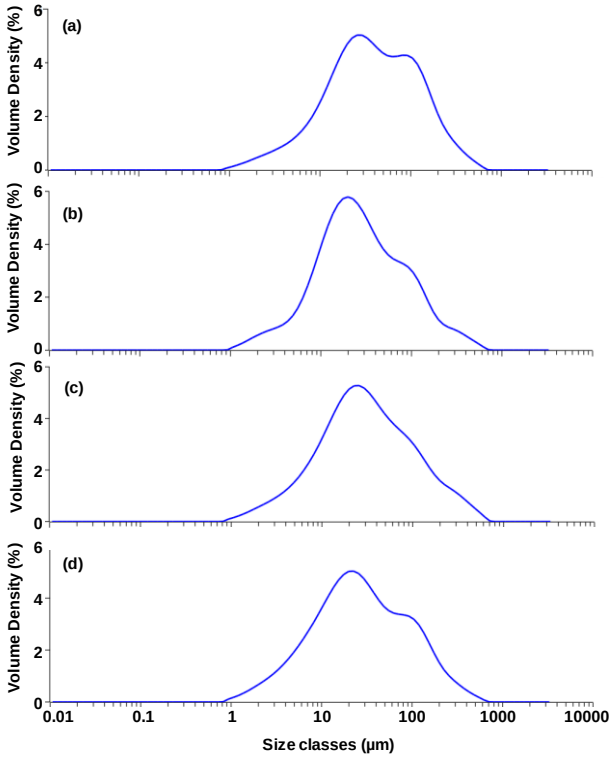


Figure 3 Size distribution of sulfuric acid-hydrolyzed coir fibers with various hydrolysis times: (a) 0.5 h, (b) 1 h, (c) 1.5 h and (d) 2 h.

Table 1 Size with largest quantity of sulfuric acid-hydrolyzed coir fiber prepared at various hydrolysis times.

	Hydrolysis times (h)			
	0.5	1	1.5	2
Size (µm)	24-27	21-24	18-21	16-21

5. Thermal decomposition and thermal stability of coir fibers and microfibers

Figure 4 shows thermal decomposition behavior of delignified coir fibers and acid-hydrolyzed coir microfibers. Delignified coir fibers had three-step weight loss; the first weight loss stating from 50 °C to 150 °C implying the evaporation of water. At higher temperatures ranges of 270-310 °C and 320-380 °C were due to the decomposition of hemicellulose and cellulose, respectively (Bujang *et al.*, 2013; Narendar and Dasan, 2014). The residue at 600 °C was 23.52 %, reflecting the remaining of inorganic compound (Figure 4Aa).

Sulfuric acid-hydrolyzed microfibers showed the same moisture evaporation temperature range as delignified coir fibers; however, decomposition temperatures of hemicellulose and cellulose appeared at 180-290 °C and 320-480 °C (Figure 4Ab). It should be noted that at 600 °C, the remaining mass of sulfuric acid-hydrolyzed microfibers was high as 55.50%. This might be due to high degree of destruction of fibers during sulfuric acid hydrolysis.

Although hydrochloric acid-hydrolyzed microfibers had water evaporation and cellulose decomposition at the temperature ranges of 50-150 °C and 300-380 °C, respectively (Figure 4Ac), lignin and hemicellulose decomposition temperatures were not found. This might be because lignin and hemicellulose could dissolve in hydrochloric acid solution (Bi *et al*., 2018). This result was in agreement with SEM image as microfibrils peeled away from coir fibers appeared. The residue of hydrochloric acid-hydrolyzed microfibers remained 18.82 % at 600 °C, which was lower than that of delignified coir fibers as a result of the removal of lignin.

Furthermore, hydrochloric acid-hydrolyzed microfibers showed better thermal stability than delignified coir fibers and sulfuric acid-hydrolyzed microfibers, but T_d of hydrochloric acid-hydrolyzed microfibers (365.33 °C, Figure 4Bc) was slightly lower than T_d of delignified coir fibers (368.00 °C, Figure 4Ba) and T_d of sulfuric acid-hydrolyzed microfibers (384.67 °C, Figure 4Bb).

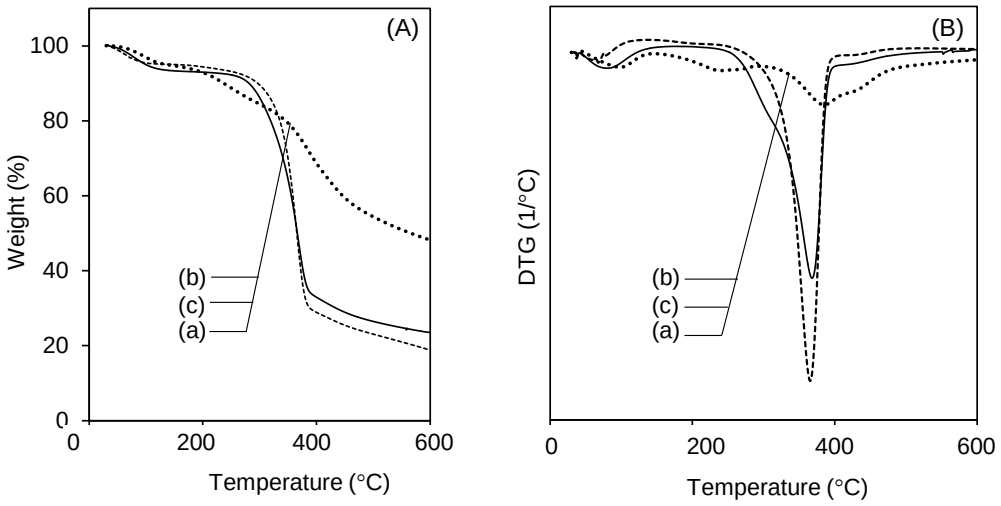


Figure 4 (A) Thermogravimetric (TG) curves and (B) Derivative TG curve of (a) delignified coir fibers, (b) sulfuric acid-hydrolyzed coir fibers and (c) hydrochloric acid-hydrolyzed coir fibers with hydrolysis time of 2 h.

6. Chemical structure of coir fibers and microfibers

Figure 5a shows that delignified coir fibers possessed the absorption peaks at 3330 cm^{-1} (O-H stretching), 2909 cm^{-1} (alkyl stretching), 1620 cm^{-1} (C=O stretching of lignin residue), 1106 cm^{-1} (glucose ring stretching of cellulose), 1026 cm^{-1} (C-O stretching) and 897 cm^{-1} (-C-O-C asymmetric bending of glucosidic linkages) (Rosa *et al*., 2010; Dhar *et al*., 2016)

Sulfuric acid-hydrolyzed coir fibers showed the absorption peaks at 3344-3403 cm^{-1}, 2937-2940 cm^{-1}, 1106-1119 cm^{-1}, 1026-1027 cm^{-1} and 913-914 cm^{-1} attributing to O-H stretching, alkyl stretching, glucose ring stretching of cellulose, C-O stretching and glucose ring stretching (C-H deformation) of cellulose or hemicellulose, respectively (Figure 5b-e). Although the result confirmed that the hydrolyzed products still be cellulose, new shoulder peak appeared at 1700 cm^{-1} belonging to C=O stretching. This might be due to the severe degradation of fibers.

In contrast, FTIR spectra of hydrochloric acid-hydrolyzed coir fibers (Figure 5f) was similar to that of delignified coir fibers (Figure 5a). This result indicated that chain scission of coir fibers by hydrochloric acid was less pronounced than that by sulfuric acid.

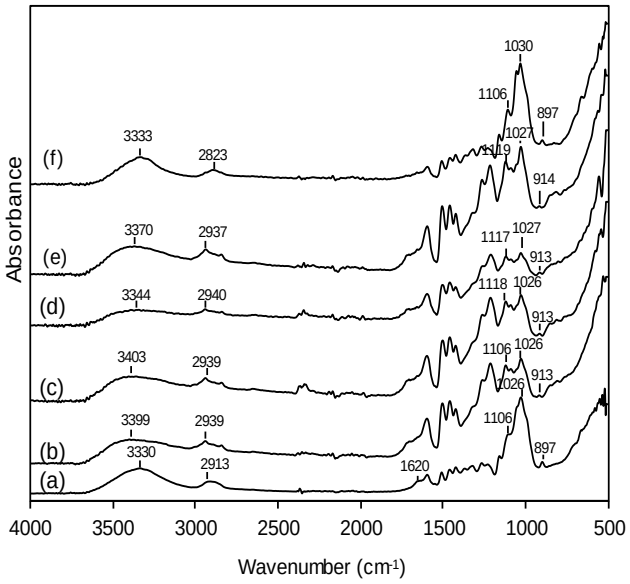


Figure 5 FTIR spectra of (a) delignified coir fibers, (b)-(e) sulfuric acid-hydrolyzed coir fibers with various hydrolysis times: (a) 0.5 h, (b) 1 h, (c) 1.5 h and (d) 2 h and (f) hydrochloric acid-hydrolyzed coir fibers with hydrolysis time of 2 h.

CONCLUSION

Acid treatment of coir fibers is an alternative to fabricate coir microfibers. The size of coir fibers decreased by both sulfuric acid and hydrochloric acid hydrolysis, but different size reduction mechanism. Sulfuric acid caused reduced coir fiber lengths from ~3000-7000 μm to ~ 100-250 μm, while hydrochloric acid could produce microfibrils with diameters of ~ 10 μm, reducing from ~ 100-120 μm. Acid hydrolysis of coir fibers with longer times also gave smaller sizes of microfibers. Hydrochloric acid-hydrolyzed coir microfibers had better appearance and thermal stability than sulfuric acid-hydrolyzed coir microfibers. Moreover, their chemical structures were not much

destroyed by hydrochloric acid hydrolysis. Therefore, hydrochloric acid was considered as a better choice to fabricate coir microfibers for bio-based composites in the future works.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors thank National Science and Technology Development Agency for partially financial support, the department of Farm Mechanics, Faculty of Agriculture, Kasetsart University for permission to use hammer mill and Mettler-Toledo (Thailand) Limited for TGA measurement support.

REFFERENCES

Bajang, N., M. N. M. Rodhi, M. Musa, F. Subari, N. Idris, N. S. M. Makhtar and K. H. K. Hamid. 2013. Effect of dilute sulfuric acid hydrolysis of coconut dregs on chemical and thermal properties. **Procedia Engineering** 68: 372-378.

Bi, Z., B. Lai, Y. Zhao and L. Yan. 2018. Fast Disassembly of Lignocellulosic Biomass to Lignin and Sugars by Molten Salt Hydrate at Low Temperature for Overall Biorefinery. **ASC Omega** 3: 2984-2993.

Dhar, P., S. M. Bhasney, A. Kumar and V. Katiyar. 2016. Acid funtionalized cellulose nanocrystals and its effect on mechanical, thermal, crystallization and surfaces properties of poly(lactic acid) bionanocomposites films: A comprehensive study. **Polymer** 101: 75-92.

Iovino, R., R. Zullo, M. A. Rao, L. Cassar and L. Gianfreda. 2008. Biodegradation of poly(lactic acid)/starch/coir biocomposites under controlled composting conditions. **Polymer Degradation and Stability** 93: 147-157.

Naerndar, R. and K. P. Dasan. 2014. Chemical treatments of coir pith: Morphology, chemical composition, thermal and water retention behavior. **Composites: Part B** 56: 770-779.

Nam, T. H., S. Ogihara and S. Kobayashi. 2012. Interfacial, Mechanical and Thermal Properties of Coir Fiber-Reinforced Poly(Lactic Acid) Biodegradable Composites. **Advanced Composite Materials** 21: 103-122.

Niazi, M. B. K., Z. Jahan, S. S. Berg and Ø. W. Gregersen. 2017. Mechanical, thermal and swelling properties of phosphorylated nanocellulose fibrils/PVA nanocomposite membranes. **Carbohydrate Polymers** 177: 258-268.

Rosa, M. F., E. S. Medeiros, J. A. Malmonge, K. S. Gregorski, D. F. Wood, L. H. C. Mattoso, G. Glenn, W. J. Orts and S. H. Imam. 2010. Cellulose nanowiskers from coconut husk fibers: Effect of preparation conditions on their thermal and morphological behavior. **Carbohydrate Polymers** 81: 83-92.

Väisänen, T., O. Das and L. Tomppo. 2017. A review on new bio-based constituents for natural fiber-polymer composites. **Journal of Cleaner Production** 149: 582-596.

Determination of AFB1, AFB2, AFG1, AFG2, Citrinin, OTA and Zearalenone in Thai Glutinous Rice

Thanapoom Maneeboon[1,2], Chananya Chuaysrinule[3], Chanram Roopkham[4] and Warapa Mahakarnchanakul[3*]

ABSTRACT

The objective of this study was to investigate the presence of 7 mycotoxins including aflatoxin B1 (AFB1), aflatoxin B2 (AFB2), aflatoxin G1 (AFG1) aflatoxin G2 (AFG2), citrinin, ochratoxin A (OTA) and zearalenone in polished and paddy glutinous rice samples. The HPLC analysis method for determination of each mycotoxin was validated. Performance parameters evaluated were linearity, limit of detection (LOD), limit of quantification (LOQ), accuracy and precision. All these parameters were found in accordance with the acceptance criteria of AOAC guidelines for single laboratory validation. Finally, a preliminary survey of mycotoxins contamination in polished and paddy glutinous rice samples collected from the Northeast region in Thailand was carried out using a validated method. The results found that polished glutinous rice samples were contaminated with AFB1 (93.33%) and citrinin (13.33%) whereas paddy glutinous rice samples were contaminated with OTA (26.67%) and zearalenone (20%). The concentration range of mycotoxins in contaminated samples were <LOQ-0.78 µg/kg for AFB1, <LOQ-3.15 µg/kg for citrinin, <LOQ-0.96 µg/kg for OTA and 19.79-25.52 µg/kg for zearalenone. No AFB2, AFG1 and AFG2 were found in this study. However, the concentrations of mycotoxins detected in glutinous rice samples were below the regulatory limits of 15 µg/kg for total aflatoxins, 5 µg/kg for OTA, 2,000 µg/kg for citrinin and 100 µg/kg for zearalenone.

Key Words: mycotoxin, glutinous rice, food safety, method validation

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

[1]Center for Agricultural Biotechnology, Kasetsart University, Kamphaeng Saen Campus, Nakhon Pathom 73140

[2]Center for Agricultural Biotechnology: (AG-BIO/PERDO-CHE), Bangkok 10900

[3]Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

[4]Scientific Equipment and Research Division, KURDI, Kasetsart University, Bangkok 10900

INTRODUCTION

Glutinous rice or sticky rice has long been a major rice grain cultivation in Greater Mekong Sub-region covering Southern China, Myanmar, Vietnam, Cambodia, Laos PDR, and Thailand. It is a staple food diet of people living in these area. Glutinous rice and glutinous rice flour have long been used for cooking deserts and making alcohol of the people in Asia (Sattaka *et al*., 2017). A total glutinous rice production in Thailand is 5,300,000 tons per year. For Thai people, an average per capita consumption of glutinous rice is 15 kilogram per head per year (Sattaka, 2016).

Mycotoxins are toxic secondary metabolites produced by several species of fungi found on agricultural commodities directly in the field or during storage. Significant mycotoxins mainly produced by fungi from the genera *Aspergillus*, *Fusarium* and *Penicillium*. Mycotoxins can cause serious human and animal health related problems as they may be carcinogenic, hepatotoxic, nephrotoxic and may impair immune responses resulting in an increased risk of secondary infection (Njobeh *et al*., 2012). The contamination of agricultural commodities with mycotoxins is a global concern due to their toxicity and impacts on animal health. The Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) estimated that 25% of the world's crops are affected by mycotoxins each year, leading to huge agricultural and industrial losses in the billions of dollars (Alshannaq and Yu, 2017). Aflatoxin, citrinin, ochratoxin A (OTA) and zearalenone are important mycotoxins that have been identified in rice (Tansakul *et al*., 2013, Iamtaweejaroen *et al*., 2015 and Majeed *et al*., 2018)

However, little information is available about mycotoxin contamination in Thai glutinous rice. Hence, the present study aim to investigate the occurrence of 7 mycotoxins; aflatoxin B1 (AFB1), aflatoxin B2 (AFB2), aflatoxin G1 (AFG1), aflatoxin G2 (AFG2), citrinin, OTA and zearalenone in glutinous rice sample collected in the Northeast region of Thailand to obtain an update information on food safety for Thai consumer.

MATERIALS AND METHODS

1. Validation method for AFB1, AFB2, AFG1, AFG2, citrinin, OTA and zearalenone in glutinous rice

Mycotoxins analytical method was validated according to AOAC guidelines for single laboratory validation of chemical methods (AOAC, 2002). The parameters selected for method validation were linearity, limit of detection (LOD), limit of quantification (LOQ), accuracy and precision. The linearity was determined by analysis of five replicates of each mycotoxin solution at five different concentrations. Accuracy and precision were obtained with recovery studies by spiking blank glutinous rice samples with each mycotoxin standard at three different levels. The spiked samples were analyzed in five replicates. Precision of the method was evaluated through the relative standard deviations (%RSDr) associated with mycotoxin measurements during recovery study. LOD and LOQ were calculated from results of seven blank glutinous rice samples, with LOD= x+3SD and LOQ

=X=10SD, where x was the average abundance of the background signal and the SD was the standard deviation of the background signal.

1.1 Standard and reagent

AFB1, AFB2, AFG1 and AFG2 analytical standards were purchased from Supelco Analytical (Bellefonte, PA, USA). Citrinin, OTA and zearalenone standards were purchased from Sigma-Aldrich (St. Louis, MO, USA). Mycotoxin stock solution was prepared in methanol (HPLC grade) and stored at 4°C. HPLC grade acetonitrile and methanol were obtained from Mallinckradt Baker Inc. (Philipsburg, NJ, USA). All other solvents and reagents used for extraction were analytical grade.

1.2 Extraction of AFB1, AFB2, AFG1, AFG2, OTA and zearalenone

Multi-mycotoxins extraction was conducted using method described by R-Biopharm Rhone Ltd (2014). Briefly, 25 g of ground glutinous rice sample and 1 g of NaCl were suspended in 100 ml of 80% (v/v) methanol and blended using a high speed blender for 2 min. The crude extract was filtered through Whatman No. 4 filter paper. A 10 ml of filtrate was diluted with 40 ml of phosphate buffered saline (PBS). Then, 20 ml of the diluted extract was applied to a multifunctional immunoaffinity column, AO ZON Prep® (R-Biopharm Rhone Ltd, Glasglow, Germany) and the column was then washed with 20 ml of PBS. Mycotoxins were eluted from the column by passing 1.5 ml of methanol (HPLC grade) followed by 1.5 ml of distilled water. The eluent was filtered by passing through a 0.45 µm syringe filter and then injected into the HPLC for analysis of each mycotoxin.

1.3 Extraction of citrinin

Citrinin extraction procedure was modified from the method of Huertas-Pérez *et al.* (2015). A 2 g of finely ground glutinous rice sample was suspended in 8 ml of distilled water and vortexed for 2 min. Then, 10 ml of acetonitrile containing 5% (v/v) formic acid was added and the tube was vortexed again for 2 min. The mixture of 4 g of $MgSO_4.7H_2O$, 1 g of NaCl and 1 g of tri-sodium citrate was added. The sample was mixed for 1 min and then centrifuged at 6,500 rpm for 5 min. A 2 ml of supernatant was filtered through a 0.45 µm syringe filter before injection into the HPLC.

1.4 HPLC analysis

Chromatographic separations were performed on a HPLC system, Waters Alliance System 2690/95 (Waters, Milford, MA, USA) equipped with fluorescence detector. All separations were performed using Symmetry® C18 (5 µm, 3.9 x 150 mm) (Waters, Milford, MA, USA). For post-column derivatization of aflatoxins analysis, PHRED® UV module (Aura Industries Inc. NY, USA) was placed between separation column and the fluorescence detector. The chromatographic conditions for each mycotoxin are summarized in Table 1.

Table 1 HPLC conditions for mycotoxins analysis

	AFB1, AFB2, AFG1, AFG2	Citrinin	OTA	Zearalenone
Mobile phase	Water:MeCN:MeOH 60:15:25 (1 ml/min)	MeCN:Water (pH2.5) 50:50 (1 ml/min)	MeCN:MeOH:6% Acetic acid 35:20:45 (1 ml/min)	MeCN:MeOH:Water 50:10:40 (1 ml/min)
Excitation wavelength	365 nm	331 nm	350 nm	276 nm
Emission wavelength	445 nm	500 nm	470 nm	460 nm
Column temperature	35°C	35°C	35°C	35°C
Run time	10 min	12 min	10 min	10 min

Remark: MeCN= acetonitrile, MeOH=methanol

2. Efficacy of validated method to detect 7 mycotoxins in naturally contaminated glutinous rice

Sample collection was done between January and May 2018. A total of 30 samples of glutinous rice consisted of 15 samples of polished glutinous rice and 15 samples of paddy glutinous rice was randomly collected in 5 provinces in the Northeast region of Thailand including Amnat charoen, Loei, Srisaket, Yasothorn and Ubonratchathani. Samples were stored at room temperature until processing. After sample collection, the primary sample was finely ground and thoroughly mixed. A sub-sample of 100 g was randomly taken and put in plastic bag kept at -20°C for further mycotoxins analysis.

RESULT AND DISCUSSION

HPLC method for determination of AFB1, AFB2, AFG1, AFG2, citrinin, OTA and zearalenone in glutinous rice was validated. Under the HPLC analysis condition of each mycotoxin, the retention time of AFB1, AFB2, AFG1, AFG2, citrinin, OTA and zearalenone were 7.940, 6.710, 5.991, 5.173, 9.534, 7.778 and 5.293 min, respectively. The linearity range, LOD and LOQ of each mycotoxin are showed in Table 2. The calibration curves obtained by analyzing of five replicates of five levels of each mycotoxin were linear over the concentration range of 0.125-20 ng/ml for AFB1, AFB2, AFG1 and AFG2, 2-80 ng/ml for citrinin, 0.25-10 for OTA and 5-500 ng/ml for zearalenone, with the correlation coefficient (R^2) higher than 0.998. The calculated LOD were 0.10, 0.15, 0.12, 0.08, 1.80, 0.23 and 4.71 µg/kg for AFB1, AFB2, AFG1, AFG2, citrinin, OTA and zearalenone, respectively. The LOQ values for same mycotoxins were found to be 0.40, 0.25, 0.40, 0.25, 3, 0.45 and 10 µg/kg, respectively.

Table 2 Linearity and sensitivity data for mycotoxins analysis by HPLC method.

Mycotoxins	Range (ng/ml)	R^2	LOD (µg/kg)	LOQ (µg/kg)
AFB1	0.125-20	0.999	0.10	0.40
AFB2	0.125-20	0.999	0.15	0.25
AFG1	0.125-20	0.999	0.12	0.40
AFG2	0.125-20	0.999	0.08	0.25
Citrinin	2 - 80	0.998	1.80	3.00
OTA	0.25 -10	0.999	0.23	0.45
Zearalenone	5 - 500	0.999	4.71	10.00

Remark: LOD = limit of detection, LOQ = limit of quantification

Table 3 Accuracy and precision of seven mycotoxins analysis for spiking glutinous rice samples (n=5).

Mycotoxins	Spiking level (µg/kg)	Recovery (%) (mean ± SD)	RSDr (%)
AFB1	0.5	85.02±10.75	10.39
	5	97.70±6.46	6.40
	10	90.48±7.44	7.59
AFB2	0.5	96.00±3.60	13.88
	5	105.28±12.67	12.54
	10	91.92±5.17	6.36
AFG1	0.5	101.40±11.72	12.64
	5	82.66±9.43	10.14
	10	96.04±6.37	7.11
AFG2	0.5	93.00±14.92	14.46
	5	88.72±8.07	8.33
	10	75.14±13.24	12.98
Citrinin	10	103.11±0.36	0.35
	50	100.05±3.53	3.52
	100	102.38±1.11	1.08
OTA	0.5	104.84±13.45	13.23
	5	87.51±11.94	12.22
	10	90.23±5.20	5.49
Zearalenone	100	104.34±6.45	6.27
	250	98.18±7.19	7.86
	500	99.46±8.98	9.96

Remark: RSDr = relative standard deviation

The result of accuracy and precision studies performed by spiking each mycotoxin standard at three different levels are shown in Table 3. The accuracy expressed as the recovery value ranged from 75.14 to 105.28%. The overall recovery was more than 70%. The precision was calculated through the determination of the relative standard deviation (RSDr). The result showed that the RSDr was less than 15% (ranging from 0.35 to 14.46%). The recovery and the RSDr values are within the limits set in AOAC guidelines for validation of chemical methods. HPLC chromatogram of glutinous rice spiked with each mycotoxin are shown in Figure 1. It can be concluded that the validated method was precise, accurate, and sensitive enough for the application in real glutinous rice sample.

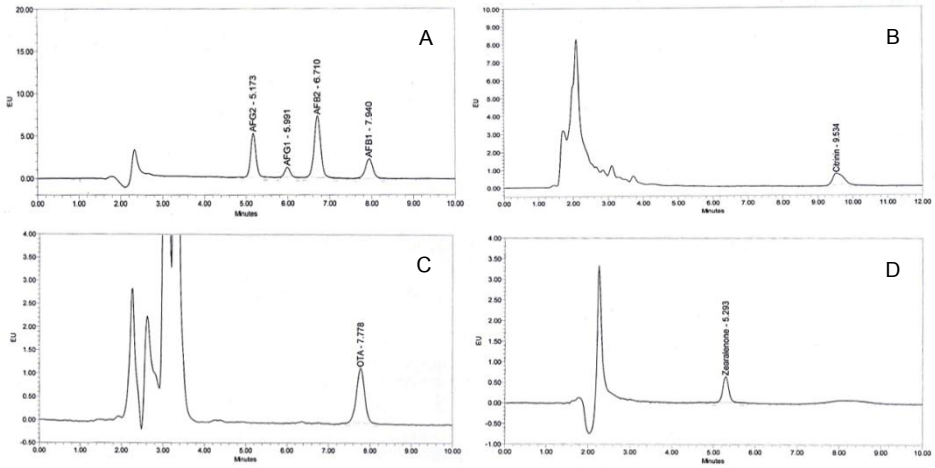


Figure 1 HPLC chromatograms of blank glutinous rice samples spiked with 5 µg/kg of each aflatoxin (A), 10 µg/kg of citrinin (B), 5 µg/kg of OTA (C) and 100 µg/kg of zearalenone (D).

The validated method was used for the determination of AFB1, AFB2, AFG1, AFG2, citrinin, OTA and zearalenone in polished glutinous rice sample (n=15) and paddy glutinous rice sample (n=15) collected from 5 provinces in the Northeast region of Thailand. A summary of the analysis results is shown in Table 4. It was observed that the most prevalence of mycotoxin in polished glutinous rice was AFB1 with 93.33% followed by citrinin with 13.33%, but the highest level was only 0.78 and 3.15 µg/kg, respectively. Almost of positive samples were contaminated with AFB1 and OTA at levels lower than LOQ value of 0.40 and 0.45 µg/kg, respectively. For paddy glutinous rice samples, 26.67 and 20% of samples contaminated with OTA and zearalenone, respectively. The maximum level for OTA and zearalenone found in paddy glutinous rice was 0.96 and 25.51 µg/kg, respectively. The co-occurrence of mycotoxins was also detected in samples. Co-contamination between AFB1 and citrinin was found in two samples of polished glutinous rice while two samples of paddy glutinous rice were contaminated with OTA and zearalenone. However none of analyzed samples exceeded the maximum level set by EU regulation and CODEX: 15 µg/kg for sum of AFB1, AFB2, AFG1 and AFG2; 5 µg/kg for OTA; 2,000 µg/kg for citrinin and 100 µg/kg for zearalenone (Commission of the European Communities, 2006 and CODEX Alimentarius Commission, 2013).

Table 4 Occurrence of AFB1, AFB2, AFG1, AFG2, citrinin, OTA and zearalenone in polished and paddy glutinous rice samples

Samples	Mycotoxins						
	AFB1	AFB2	AFG1	AFG2	Citrinin	OTA	Zearalenone
Polished glutinous rice (n=15)							
No. of positive	14	nd	nd	nd	2	nd	nd
% Positive	93.33	nd	nd	nd	13.33	nd	nd
Range (µg/kg)	<LOQ-0.78	nd	nd	nd	<LOQ-3.15	nd	nd
Mean (µg/kg)	0.68	nd	nd	nd	3.15	nd	nd
Paddy glutinous rice (n=15)							
No. of positive	nd	nd	nd	nd	nd	4	3
% Positive	nd	nd	nd	nd	nd	26.67	20.00
Range (µg/kg)	nd	nd	nd	nd	nd	<LOQ-0.96	19.79-25.51
Mean (µg/kg)	nd	nd	nd	nd	nd	0.47	24.4

Remark: LOQ = Limit of quantification, nd: non-detected

CONCLUSION

HPLC analysis method for determination of 7 mycotoxin in glutinous rice was validated. AFB1, AFB2, AFG1, AFG2, OTA and zearalenone were extracted and cleaned up simultaneously. Then, HPLC analysis of aflatoxins, OTA and zearalenone were performed using a chromatographic condition for individual mycotoxin. In addition, a modified method without clean-up step was used for citrinin analysis. All the validation parameters were found to be satisfactory accordance with the standard values. The validated method has also been successfully applied in polished and paddy glutinous rice samples collected in Thailand. In this preliminary study, low frequency and low level of analyzed mycotoxins in glutinous rice samples were observed and differences in mycotoxins contamination pattern from polished and paddy glutinous rice were found. Further research with a larger sample size number is necessary to estimate consumer exposure to mycotoxins contaminated in glutinous rice. Furthermore, study on mycotoxins-producing fungi in polished and paddy glutinous rice samples should be conducted to investigate the relationship between specific mycotoxins and glutinous rice and to explore the environmental conditions for growth and mycotoxins production.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors are grateful to the financial support of the Kasetsart University Research and Development Institute (KURDI), Kasetsart University.

REFERENCES

Alshannaq, A. and J.H. Yu. 2017. Occurrence, toxicity, and analysis of major mycotoxins in food. **International Journal of Environmental Research and Public Health**.14 (6):632.

AOAC. 2002. **AOAC Official Methods of Analysis**. Available online; http://www.aoac.org/Official_Methods/Collaborative_Study_Validation_Guidelines.pdf 21/7/2017.

CODEX Alimentarius Commission. 2013. **General standard for contaminants and toxins in food and feed CXS 193-1995**. Available online; http://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/sh-proxy/en/?lnk=1&url=https%253A%252F%252Fworkspace.fao.org%252Fsites%252Fcodex%252FStandards%252FCODEX%2BSTAN%2B193-1995%252FCXS_193e.pdf 10/10/2018.

Commission of the European Communities. 2006. Commission Regulation (EC) No. 401/2006 of 23 February 2006 laying down the methods of sampling and analysis for the official control of the levels of mycotoxins in foodstuffs. **Official Journal of the European Union**. L70: 12–34.

Huertas-Pérez, J.F., N. Arroyo-Manzanares, A.M. García-Campaña and L. Gámiz-Gracia. 2015. High-throughput determination of citrinin in rice by ultra-high performance liquid chromatography and fluorescence detection (UHPLC-FL). **Food Additives & Contaminants: Part A**. 32(8): 1352-1357.

Iamtaweejaroen, P., P. Kooprasertying, T. Maneeboon, N. Anukul and W. Mahakarnchanakul. 2015. Exposure to aflatoxin B1 in Thailand by consumption of brown and color rice. **Mycotoxin Research**. 32:19–25

Majeed, S., M. De Boevre, S. De Saeger, W. Rauf, A. Tawab, F.E. Habib, M. Rahman and M. Iqbal. 2018. Multiple Mycotoxins in Rice: Occurrence and Health Risk Assessment in Children and Adults of Punjab, Pakistan. **Toxins**. 10(2): 77.

Njobeh P.B., M.F. Dutton, A.T. Aberg and P. Haggblom. 2012. Estimation of multi-mycotoxin contamination in South African compound feeds. **Toxins.** 4(10): 836-848.

R-Biopharm Rhone Ltd. 2014. **AO ZON Prep® Immunoaffinity columns for use in conjunction with HPLC or LC-MS/MS**. Available online; https://food.r-biopharm.com/wp-content/uploads/sites/2/2014 /09/AO-ZON-PREP-IFU-P112V5.pdf. 15/6/2018.

Sattaka, P. 2016. Geographical Distribution of Glutinous Rice in the Greater Mekong Sub-region. **Journal of Mekong Societies** 12(3): 27-48.

_____, S. Pattaratuma and G. Attawipakpaisan. 2017. Agricultural extension services to foster production sustainability for food and cultural security of glutinous rice farmers in Vietnam. **Kasetsart Journal of Social Sciences**. 38: 74-80.

Tansakul, N, S. Limsuwan, J. Böhm, M. Hollmann and E. Razzazi-Fazeli. 2013. Aflatoxins in selected Thai commodities. **Food Additives & Contaminants: Part B**, 6(4): 254-259.

การศึกษาการใช้ไรซ์บัตเตอร์ในการผลิตอิมัลชัน

Study of the Production of Emulsion using Rice Butter

ปุญยวีร์ รุ่งประเสริฐผล[1*] และ โสภาค สอนไว[1]

Poonyawee Rungprasertphol[1*] and Sopark Sonwai[1]

บทคัดย่อ

ไรซ์บัตเตอร์ หรือ น้ำมันรำข้าวส่วนแข็ง เป็นผลพลอยได้ จากกระบวนการผลิตน้ำมันรำข้าว งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของไรซ์บัตเตอร์และสมบัติของอิมัลชันที่ผลิตโดยใช้ไรซ์บัตเตอร์เป็นส่วนผสม โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบกับสมบัติทางเคมีกายภาพของเชบัตเตอร์และสมบัติของอิมัลชันที่ผลิตโดยใช้เชบัตเตอร์เป็นส่วนผสม จากการศึกษาพบว่าสมบัติทางเคมีกายภาพของไรซ์บัตเตอร์มีความใกล้เคียงกับเชบัตเตอร์ กล่าวคือมีลักษณะเป็นไขมันค่อนข้างแข็งที่อุณหภูมิห้องและละลายได้ดีที่อุณหภูมิร่างกายทำให้ไม่ทิ้งคราบไขมันแข็งที่ผิวหลังทา ผลึกมีขนาดเล็กทำให้เนื้อสัมผัสอิมัลชันเรียบเนียน ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้ในการใช้ไรซ์บัตเตอร์เป็นส่วนผสมในการผลิตอิมัลชันแทนเชบัตเตอร์ จึงนำไปผลิตเป็นอิมัลชัน พบว่าอิมัลชันที่ผลิตโดยใช้ไรซ์บัตเตอร์เป็นส่วนผสม มีสมบัติไม่แตกต่างจากอิมัลชันที่ผลิตโดยใช้เชบัตเตอร์เป็นส่วนผสม คือเป็นอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำ (O/W) ที่มีความคงตัว ไม่พบการแยกชั้น และมีพฤติกรรมการไหลแบบ non-Newtonion แบบ shear-thinning ซึ่งเป็นพฤติกรรมของอิมัลชันประเภทครีมทั่วไป แสดงให้เห็นว่าไรซ์บัตเตอร์มีศักยภาพในการนำไปใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตเครื่องสำอางแบบครีมหรือโลชั่นได้

ABSTRACT

Rice butter or rice bran oil stearin is a by-product from rice bran oil production process. This work focused on characterizing the physicochemical properties of rice butter and the emulsion produced using rice butter compared with the properties of shea butter and the emulsion produced using shea butter. It was found that rice butter was solid-like at room temperature but melted almost completely at the body temperature (no greasy skin) and exhibited small crystal size which would provide the emulsion with a smooth texture. The physicochemical properties of the rice butter were very similar to those of shea butter. The properties of the emulsions produced using both fats were the same in terms of emulsion type (O/W emulsion), stability (no separation), flow behavior (shear-thinning). The results demonstrated that rice butter has a great potential to be used as an ingredient for the production of cosmetics such as creams or lotions.

Key Words: rice butter, shea butter, emulsion

[*] Corresponding author; e-mail address: p.rungprasertphol@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

เชบัตเตอร์ (shea butter) เป็นไขมันจากพืชที่ได้รับความนิยมในการนำมาใช้เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์ของอุตสาหกรรมอาหาร เครื่องสำอาง และด้านเภสัชกรรม (Warra, 2011) เนื่องจากมีลักษณะแข็งที่อุณหภูมิห้อง แต่สามารถหลอมเหลวได้เกือบหมดที่อุณหภูมิร่างกาย จึงช่วยทำให้เกิดความคงตัวของผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง โดยเฉพาะลิปสติก หรือ body butter และช่วยให้ผลิตภัณฑ์มีสมบัติในด้าน plastic และเนื้อสัมผัสที่ดี นอกจากนี้มีสรรพคุณที่ดีในการต้านการอักเสบ (anti-inflammatory) ให้ความชุ่มชื้น รักษารอยช้ำและโรคผิวหนัง รวมถึงการนวดบำบัด (Dennie, 2012) ด้วยองค์ประกอบสำคัญต่างๆ จึงเป็นเหตุผลสำคัญที่ shea butter ถูกนำมาใช้ในด้านอุตสาหกรรมเครื่องสำอางและเภสัชกรรม อย่างไรก็ตามต้องมีการนำเข้ามาจากต่างประเทศทำให้มีราคาแพง ทางบริษัท น้ำมันบริโภคไทย จำกัด เป็นผู้ผลิตน้ำมันรำข้าว และมีไรซ์บัตเตอร์ (rice butter หรือ rice bran oil stearin) เป็น by-product จากกระบวนการผลิตประมาณ 20 ตัน/เดือน ที่ได้จากกระบวนการทางกายภาพที่ไม่ใช้สารเคมี และไม่มีการเติมไฮโดรเจน จึงเป็นวัตถุดิบที่มีความปลอดภัย ไม่ก่อให้เกิดการระคายเคือง เนื้อสัมผัสมีลักษณะเป็นครีมสีขาวนวล มีจุดหลอมเหลวอยู่ระหว่าง 38-42 °C จึงคาดว่าจะเหมาะสำหรับใช้เป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางเช่น ลิปสติก ลิปบาล์ม ครีม และโลชั่น เช่นเดียวกับ shea butter จากการศึกษาของ Shi *et al.* (2016) พบว่า rice butter มีองค์ประกอบของกรดไขมันชนิดเดียวกันกับที่พบใน shea butter และมีสารต้านอนุมูลอิสระอยู่หลายชนิด อาทิ tocopherol, phytosterol และ oryzanol เป็นต้น (Ham *et al*., 2015) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ rice butter ทดแทน shea butter ในการผลิตอิมัลชัน โดยจะศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของ rice butter และสมบัติของอิมัลชัน (ความคงตัวของอิมัลชัน ชนิดของอิมัลชัน ลักษณะอนุภาคของอิมัลชัน และสมบัติกระแสวิทยา) ที่ผลิตโดยใช้ rice butter เป็นส่วนผสม ทำการศึกษาเปรียบเทียบกับทางเคมีกายภาพของ shea butter และสมบัติของอิมัลชันที่ผลิตโดยใช้ shea butter เป็นส่วนผสม

ครีมจัดเป็นอิมัลชันชนิด semi-solid มีหลากหลายรูปแบบ อาทิ cleansing & cold cream, vanishing & formulation cream, night & massage cream, hand & body cream, all purpose cream, moisturizing cream เป็นต้น (Kumar *et al*., 2014) ครีมที่ดีควรจะปาดเกลี่ยได้ง่าย และดูดซึมได้รวดเร็ว กระบวนการที่สำคัญในการพัฒนาสูตรครีมคือกระบวนการผลิตอิมัลชัน โดยทำการผสมระหว่างสองเฟสที่ต่างกันคือเฟสกระจายตัวและเฟสต่อเนื่อง และใช้แรงเฉือนที่เพียงพอ ทำให้วัฏภาคกระจายตัวมีขนาดเล็กที่เพียงพอกระจายตัวในวัฏภาคต่อเนื่อง (Smaoui *et al*., 2012) นอกจากนี้ความคงตัวของอิมัลชันขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของอิมัลซิไฟเออร์ (emulsifier) ที่เหมาะสม (Varka *et al*., 2012)

อุปกรณ์และวิธีการ

วัสดุ

Refined Rice Butter ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท น้ำมันบริโภคไทย จำกัด Refined Shea Butter ประเทศฝรั่งเศส ซื้อมาจากห้างหุ้นส่วนจำกัด เจเคเค เคมิคอล ซึ่งเป็นผู้นำเข้ามาจำหน่ายในประเทศ

การศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของ rice butter เปรียบเทียบกับ shea butter

ศึกษาสมบัติในการหลอมเหลวและการตกผลึก โดยใช้เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) รุ่น DSC 8000 PerkinElmer ตามวิธีของ AOCS (Cj 1-94) (AOCS, 1998) โดยให้ความร้อนกับตัวอย่างเพื่อหลอมเหลว (~80 ºC) แล้วชั่งตัวอย่างประมาณ 3-5 มิลลิกรัม ใส่ aluminium pan แล้วปิดฝาจากนั้นนำตัวอย่างใส่เครื่อง DSC ให้ความร้อนตัวอย่างที่ 80 ºC เป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้ผลึกหลอมเหลวอย่างสมบูรณ์ ลดอุณหภูมิลงมาที่ -40 °C ด้วยอัตรา 5 °C/min แล้วคงไว้ที่ -40 °C เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิไปที่ 80 °C ด้วยอัตรา 5 °C /min บันทึกผลเป็นกราฟ (thermogram) ของการหลอมเหลวและการตกผลึก

ศึกษาค่าเปอร์เซ็นต์การเป็นของแข็งในรูปผลึกที่อุณหภูมิต่างๆ ด้วย Pulsed-Nuclear Magnetic Resonance หรือ p-NMR ตามกรรมวิธีของ Fiebig and Luttke (2003) เพื่อให้ทราบว่าที่อุณหภูมิต่างๆ ตั้งแต่ 10-50 °C นั้น ตัวอย่างไขมัน มีของแข็งในรูปผลึกคิดเป็นกี่เปอร์เซ็นต์ของตัวอย่างทั้งหมดโดยน้ำหนัก และเพื่อให้ทราบพฤติกรรมหรือลักษณะการหลอมเหลวของตัวอย่างว่าที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น จาก 0 °C ไปยัง 50 °C นั้น ตัวอย่างเกิดการหลอมละลายอย่างรวดเร็วหรืออย่างช้าๆ

ศึกษาลักษณะปรากฏ ขนาด และจำนวนของผลึก ด้วยเทคนิค polarized-light microscopy (PLM) ร่วมกับกล้องถ่ายภาพดิจิตอล ประยุกต์ใช้วิธีของ Sonwai *et al*. (2014) โดยนำตัวอย่างไปหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 80 ºC พร้อมกวนผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้ผลึกหลอมเหลวอย่างสมบูรณ์ จากนั้นปิเปตตัวอย่างที่หลอมเหลวแล้วปริมาตร 10 µl หยดลงบนกระจกสไลด์และปิดด้วยกระจกปิดสไลด์นำไปเก็บในตู้ควบคุมอุณหภูมิที่ 25 ºC เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำมาส่องดูลักษณะรูปร่าง จำนวน และขนาดผลึกด้วยเครื่อง PLM ร่วมกับกล้องถ่ายภาพดิจิตอลที่กำลังขยายของเลนส์ใกล้วัตถุเท่ากับ 100

การเตรียมตัวอย่างอิมัลชัน

เตรียมตัวอย่างในบีกเกอร์ โดยแยกเป็น 2 เฟส คือ เฟสน้ำมันและเฟสน้ำ ตามสัดส่วนใน Table 1 แต่ละเฟสถูกเตรียมเป็นสารละลายที่อุณหภูมิ 80 °C แล้วลดอุณหภูมิลงมาที่ 60 °C เติมเฟสน้ำมันลงในเฟสน้ำเพื่อผสมเป็นอิมัลชัน ด้วยความเร็ว 10,000 rpm เป็นระยะเวลา 3 นาที จากนั้นกวนผสมต่อที่ความเร็ว 600 rpm จนอุณหภูมิตัวอย่างลดลงประมาณ 50 °C เพื่อเติมวัตถุกันเสีย (preservative) จากนั้นกวนผสมด้วยความเร็ว 50 rpm ตลอดเวลาจนเย็นลงที่อุณหภูมิประมาณ 35-40 °C นำไปบรรจุลงบรรจุภัณฑ์

การทดสอบสมบัติของอิมัลชัน

ศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมี โดยสังเกตการแยกชั้นด้วย creaming index และ วัดค่าความเป็นกรดด่างด้วย pH meter โดยอาศัยหลักการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า ที่เกิดขึ้นระหว่าง combination pH electrode (ยี่ห้อ Hanna Instruments รุ่น HI1053B) แล้วเปลี่ยนเป็นค่า pH

การทดสอบชนิดอิมัลชัน ด้วยวิธี Dye solubility test ประยุกต์ใช้วิธีของ Savrikar and Lagad (2016) โดยที่ผสมสีแดงเลือดนกผง, Carmoisine: E122, ซึ่งมีสมบัติ คือสามารถละลายในน้ำ ลงในตัวอย่าง แล้วนำตัวอย่างส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ ถ้าอนุภาคกระจายตัวไม่มีสี และเฟสต่อเนื่องมีสีแดง แสดงว่าเป็นอิมัลชันชนิด O/W ในทางกลับกันถ้าอนุภาคกระจายตัวมีสีแดง และเฟสต่อเนื่องไม่มีสี แสดงว่าเป็นอิมัลชันชนิด W/O

ศึกษาลักษณะอนุภาคของอิมัลชันภายใต้กล้องจุลทรรศน์ร่วมกับกล้องถ่ายภาพดิจิตอล

ศึกษาสมบัติกระแสวิทยา (rheological properties) ด้วยเครื่อง rheometer ประยุกต์ใช้วิธีของ Kwak *et al*. (2015) โดยศึกษา steady shear flow behavior หรือ steady rate sweep test โดยใช้หัววัดคือ Parallel-plate ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 mm; PP 25, gap หรือช่องว่างระหว่างตัวอย่างกับฐานวัด 2 mm ขณะที่อัตราเฉือน (shear rate) เพิ่มขึ้นแบบ ramp log จาก 0.02 ไปยัง 300 1/s ที่อุณหภูมิคงที่ที่ 37.5 °C ซึ่งเป็นการจำลองอุณหภูมิผิวหนังร่างกาย

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ศึกษาทดลอง 2 ตัวอย่าง โดยทดลองตัวอย่างละ 3 ซ้ำ วิเคราะห์ข้อมูลด้วยการทดสอบค่าที (t-test) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ด้วยโปรแกรม SPSS version 16.0

Table 1 Formulations for emulsion

	Ingredients	Wt. (%)	
		rice butter formula	shea butter formula
Oil phase	Rice butter	10.0	-
	Shea butter	-	10.0
	Rice bran oil	5.0	5.0
	Thickener 1	3.0	3.0
	Emollient 1	3.0	3.0
	Emollient 2	3.0	3.0
	Emulsifier 1	3.0	3.0
Water phase	Humectant 1	10.0	10.0
	Humectant 2	5.0	5.0
	Emulsifier 2	2.0	2.0
	Thickener 2	1.0	1.0
	Chelating agent	0.1	0.1
	Distilled water	53.9	53.9
Preservative		1.0	1.0

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

พฤติกรรมการตกผลึกและการหลอมเหลว

การศึกษาสมบัติในการตกผลึกและการหลอมเหลวของ rice butter เปรียบเทียบกับ shea butter ด้วยเทคนิค DSC ได้ผลการทดลองดังแสดงใน Figure 1 พบว่า rice butter และ shea butter มีช่วงการหลอมเหลวใกล้เคียงกันแต่ shea butter หลอมเหลวหมดช้ากว่า rice butter เล็กน้อย (ประมาณ 43 และ 42 °C ตามลำดับ) ซึ่งไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Figure 1a) และเมื่อพิจารณาพฤติกรรมการตกผลึกของ rice butter

พบว่าลักษณะของ thermogram โดยรวมมีความใกล้เคียงกับ shea butter มาก โดยที่ rice butter เริ่มตกผลึกก่อนที่อุณหภูมิประมาณ 33 °C ส่วน shea butter เริ่มตกผลึกประมาณ 26 °C ทั้งนี้เนื่องจาก rice butter มีส่วนที่มีจุดหลอมเหลวสูง (high melting fraction) อยู่จึงตกผลึกก่อน แต่มีปริมาณน้อยจึงปรากฏพีคขนาดเล็ก

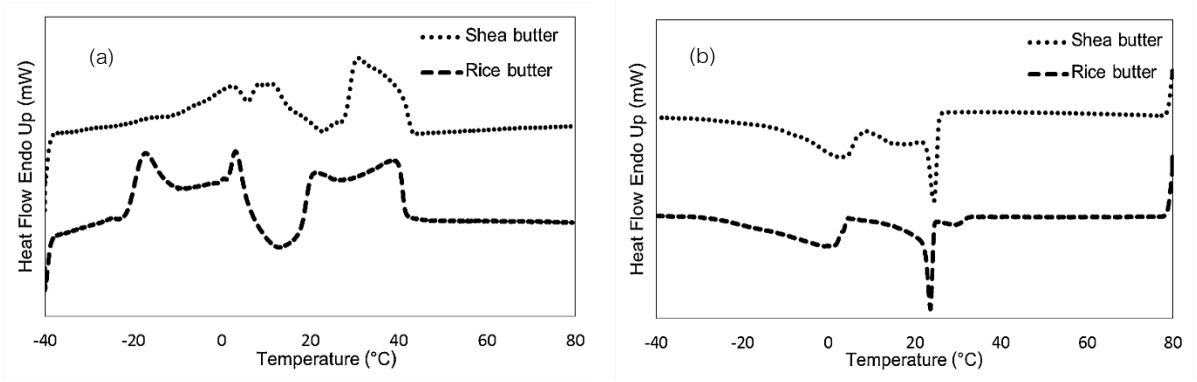


Figure 1 DSC thermograms of rice butter and shea butter (a) melting and (b) crystallization

การเปลี่ยนแปลงปริมาณไขมันที่เป็นของแข็งที่อยู่ในรูปผลึกตามอุณหภูมิ

การศึกษาค่าเปอร์เซ็นต์การเป็นของแข็งในรูปผลึก (solid fat content: %SFC) ที่อุณหภูมิต่างๆ (10-50 °C) ของ rice butter และ shea butter ด้วยเทคนิค p-NMR ให้ผลแสดงดัง Figure 2 จากผลการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิ 10 °C ค่า %SFC ของ shea butter สูงกว่า rice butter มากถึงประมาณ 24% และค่า %SFC ของทั้ง 2 ตัวอย่างลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และที่อุณหภูมิร่างกาย (37.5 °C) มีค่า %SFC ใกล้เคียงกัน โดยที่ shea butter และ rice butter มี SFC เหลืออยู่น้อยมากที่ประมาณ 5 และ 3% ตามลำดับ และหลอมเหลวหมดที่อุณหภูมิ 43 °C ค่า %SFC ที่ต่ำที่อุณหภูมิร่างกายทำให้เมื่อนำไปผลิตเป็นอิมัลชันแล้ว อิมัลชันไม่ทิ้งคราบไขมันแข็งบนผิวเมื่อทา

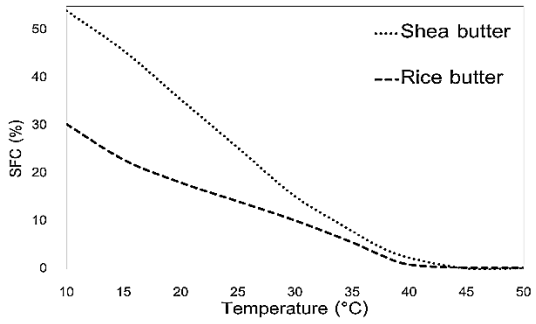


Figure 2 Solid fat content measured at 10-50 °C of rice butter and shea butter

ลักษณะปรากฏ ขนาด และจำนวนของผลึก

การศึกษาลักษณะปรากฏ ขนาด และจำนวนของผลึกของ rice butter และ shea butter ด้วยเทคนิค polarized-light microscopy (PLM) ร่วมกับกล้องถ่ายภาพดิจิตอล ที่กำลังขยาย 100 เท่า ที่อุณหภูมิคงที่ที่ 25 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ให้ผลดังแสดงใน Figure 3 ซึ่งพบว่า รูปร่างผลึกของ rice butter และ shea

butter มีลักษณะเป็นเม็ด (granular) เหมือนกัน แต่ขนาดของ shea butter เล็กกว่าและมีจำนวนผลึกมากกว่า rice butter ขนาดผลึกที่เล็กของทั้ง 2 ตัวอย่างจะทำให้เมื่อนำไปผลิตเป็นอิมัลชันแล้วได้เนื้อสัมผัสที่เรียบเนียน

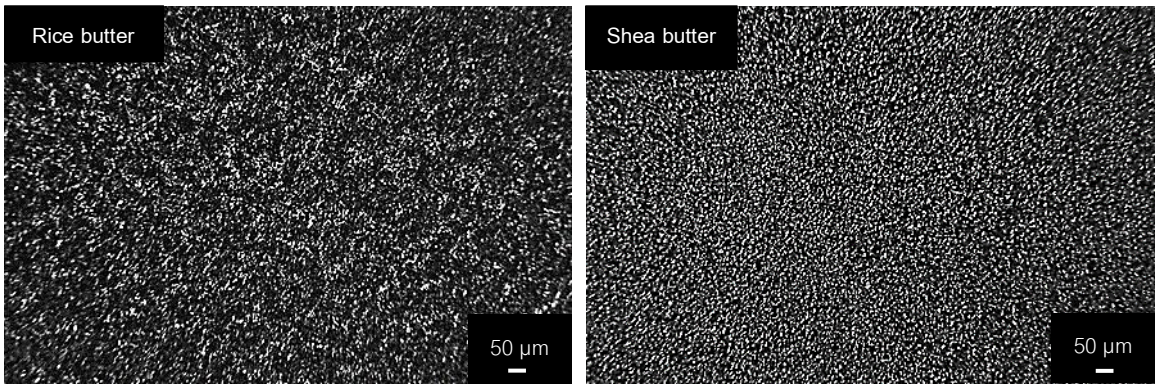


Figure 3 Morphology of rice butter and shea butter crystallized for 24 h at 25 °C captured with polarized light microscopy at magnification of 100x

สมบัติของอิมัลชัน

จากการนำ rice butter และ shea butter มาผลิตเป็นอิมัลชันดังสูตรที่แสดงใน Table 1 แล้วศึกษาลักษณะปรากฏ, ค่าความเป็นกรดด่าง (pH), ชนิดของอิมัลชัน, ลักษณะอนุภาคของอิมัลชัน และสมบัติกระแสวิทยา ได้ผลการศึกษาลักษณะปรากฏดังแสดงใน Figure 4 ซึ่งพบว่าอิมัลชันทั้ง 2 สูตรมีความเสถียร ไม่พบการแยกชั้น และมีค่า pH เฉลี่ยใกล้เคียงกันและไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) เฉลี่ยอยู่ที่ 4.69±0.01 ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อผิวหนัง เมื่อพิจารณาภาพถ่ายลักษณะอนุภาคกระจายตัว (droplet) ของอิมัลชัน ด้วยเทคนิค PLM (Figure 5) แสดงให้เห็นถึงอนุภาคกระจายตัวอยู่ในเฟสต่อเนื่อง ซึ่งบ่งบอกถึงสภาวะที่เป็นอิมัลชัน โดยจากการทดสอบพบว่าเป็นชนิดน้ำมันในน้ำ (O/W) และในส่วนของการศึกษา Steady shear flow behavior พบว่าอิมัลชันทั้ง 2 สูตร มีพฤติกรรมการไหลแบบ non-Newtonion shear-thinning behavior (Figure 6) ทั้งนี้เนื่องจากความหนืดลดลงโดยเปลี่ยนแปลงตามอัตราเฉือนที่เพิ่มขึ้น (Kwak *et al*., 2015)

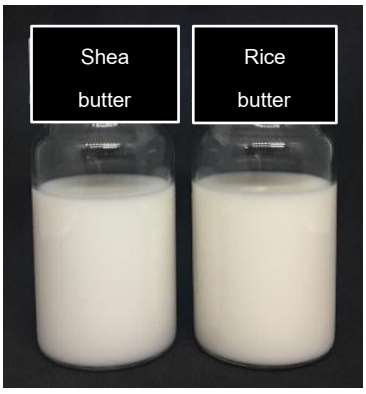


Figure 4 Emulsion of rice butter formula and shea butter formula

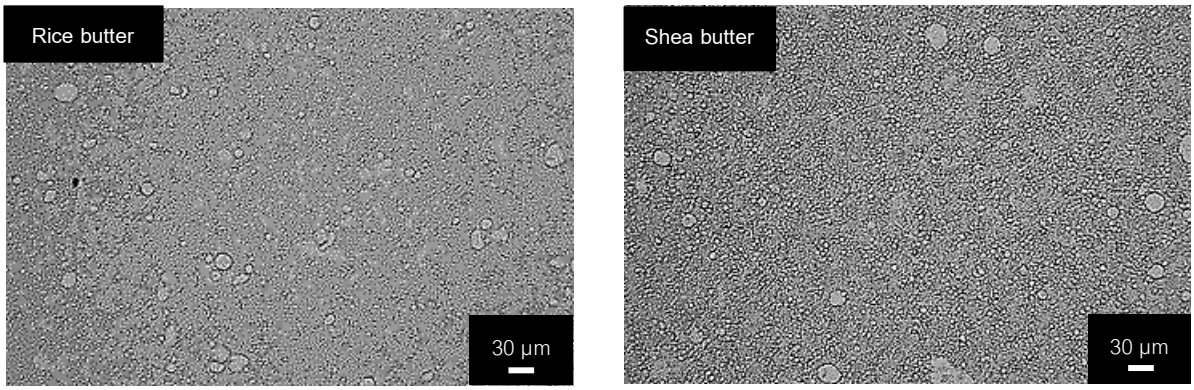


Figure 5 Droplet of rice butter and shea butter emulsion captured with polarized light microscopy at magnification of 200x

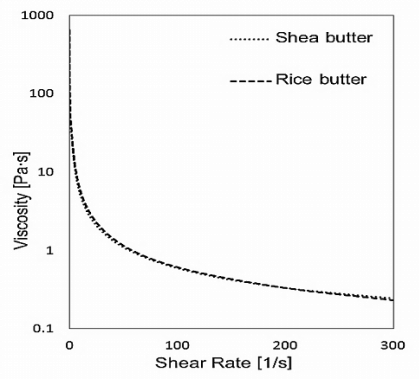


Figure 6 non-Newtonion shear-thinning behavior of rice butter and shea butter

สรุป

Rice butter มีพฤติกรรมการหลอมเหลวและตกผลึกใกล้เคียงกับ shea butter แต่มีค่า solid fat content ต่ำกว่าที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง อีกทั้งมีรูปร่างผลึกแบบ granular ที่คล้ายกัน จากการศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของไขมันพบว่ามีความเป็นไปได้ในการใช้น้ำมันรำข้าวส่วนแข็งเพื่อผลิตอิมัลชัน จึงนำไปผลิตเป็นอิมัลชัน แล้วนำไปทดสอบสมบัติด้านต่างๆ เทียบกับอิมัลชันที่ผลิตจาก shea butter พบว่ามีสมบัติด้านต่างๆ เหมือนกัน คือเป็นอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำ (O/W) ที่มีความคงตัวไม่แยกชั้น และมีพฤติกรรมการไหลแบบ non-Newtonion shear-thinning ซึ่งเป็นพฤติกรรมของอิมัลชันแบบครีมทั่วไป แสดงให้เห็นว่า rice butter มีศักยภาพในการนำไปใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตเครื่องสำอางแบบครีมหรือโลชั่นแทน shea butter ได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บริษัทน้ำมันบริโภคไทย จำกัด ที่สนับสนุนน้ำมันรำข้าวส่วนแข็ง (rice butter) และสนับสนุนทุนในการทำวิจัย และขอขอบคุณโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม ระดับปริญญาโท สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ที่สนับสนุนทุนในการวิจัย

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.

Dennie, M. N. 2012. **Medical Benefits of the Shea Nut Tree**. Biology Student Research in Biological sciences, Tennessee State University.

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.

Ham, H., J. Sung. and J. Lee. 2015. Effect of rice bran unsaponifiables on high-fat diet-induced obesity in mice. **Journal of Food Biochemistry** 39 (6): 673-681.

Kumar, K. K., K. Sasikanth, M. Sabareesh and N. Dorababu. 2014. Formulation and evaluation of diacerein cream. **International Journal of Pharmaceutical Research and Bio-Science** 3 (2): 990-1008.

Kwak, M. S., H. J. Ahn and K. W. Song. 2015. Rheological investigation of body cream and body lotion in actual application conditions. **Korea-Australia Rheology Journal** 27 (3): 241-251.

Savrikar, S. S. and C. E. Lagad. 2016. Study of preparation and standardization of *'Maadhutailika Basti'* with special reference to emulsion stability. **An International Quarterly Journal of Research in Ayurveda** 31 (1): 1-6.

Shi, C., R. Liu, M. Chang, Q. Jin and X. Wang. 2016. Composition of rice bran stearin from various refineries across china. **Journal of the American Oil Chemists' Society** 93 (6): 869-877.

Smaoui, S., H. B. Hlima, R. Jarraya, N. G. Kamoun, R. Ellouze and M. Damak. 2012. Cosmetic emulsion from virgin olive oil: Formulation and bio-physical evaluation. **African Journal of Biotechnology** 11 (40): 9664-9671.

Sonwai, S., P. Kaphueakngam and A. Flood. 2014. Blending of mango kernel fat and palm oil mid – fraction to obtain cocoa butter equivalent. **Journal of Food Science and Technology** 51 (10): 2357-2369.

Varka, E. M., E. Tsatsaroni, N. Xristoforidou and A. M. Darda. 2012. Stability study of o/w cosmetic emulsions using *Rosmarinus officinalis* and *Calendula officinalis* extracts. **Open Journal of Applied Sciences** 2: 139-145.

Warra, A. A. 2011. Cosmetic potentials of african shea nut (*Vitellaria paradoxa*) butter. **Current Research in Chemistry** 3 (2): 80-86.

Solvent Extraction and Antioxidant Capacity of Crude Extracts from White Mugwort (*Artemisia lactiflora*)

Nacha Udomwasinakun[1] and Tantawan Pirak[1*]

ABSTRACT

White mugwort (*Artemisia lactiflora*)—an edible medicinal plant in Artemisia genus, has been reported as traditional Chinese medicine and subjected of considerable attention because of their remarkable biological activities such as antimalarial, antiviral, antitumour, antianginal, and antioxidant activity. The aim of this study was to investigate the effect of different extraction conditions on antioxidant capacity of white mugwort. Chemical compositions of white mugwort were 89.10±0.19% moisture content, 1.21 ± 0.01% fat content, and 0.55±0.04% protein content. Fresh aerial part was dried and the optimum drying time was obtained. The moisture content of white mugwort reached equilibrium after drying at 45 ± 2°C for 11 h. Fresh aerial part and powder sample of white mugwort were extracted with two different solvents (water and 50% ethanol). The results showed that 50% ethanol extracts had higher DPPH scavenging activity (%) and total phenolic content (TPC) (%) than water extracts ($p \leq 0.05$). The ethanolic extract of powder sample had the highest DPPH scavenging activity (66.32±0.96 %), while the highest TPC was found in the ethanolic extract of both fresh sample (64.27±0.61 µg GAE equiv./ml) and powder samples (63.91±0.42 µg GAE equiv./ml) ($p \leq 0.05$). The forms of starting plant material significantly affected antioxidant capacity and TPC of the extracts ($p \leq 0.05$). The extracts obtained from the extraction of powder sample with 50%ethanol had higher DPPH scavenging activity (94.31±0.15 %) and TPC (103.25±2.71 µg GAE equiv. /ml) than the extract from fresh sample (TPC of 61.54±3.78 µg GAE equiv./ml and DPPH radical scavenging of 94.31±0.15 %) ($p \leq 0.05$).

Key Words: White mugwort, solvent extraction, antioxidant capacity, crude extracts

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

[1]Department of Product Development, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

INTRODUCTION

White mugwort (*Artemisia lactiflora*)—an edible medicinal plant from traditional Chinese medicine. This plant is widely grown as organic farming in the northern part of Thailand by the hill tribes and native Northern people. It is wildly consumed as food and folk medicine. Many Artemisia species have a high economic value in several fields. Over 260 species have been considered from their remarkable biological activities such as antimalarial, antitumor, antioxidant activity, etc. (Abad Martinez *et al*., 2012; Xiao *et al.,* 2014). Phenolic acids, flavonoids, mono- and sesquiterpene, coumarins, sterols, and essential oils were reported as the major bioactive compounds in this genus (Zhang *et al*., 2014). Some of its extracts and isolates are proven efficacy and officially recommended by WHO. Polyacetylene and phenol isolated from *A.lactiflora* showed cytotoxic activity against several tumor cell lines (Nahamura *et al*., 1998; Xiao *et al*., 2014). However, there are only a few researches investigating the chemical constituents of this plant. In order to investigate the potential of white mugwort extract as a main ingredient for the development of a healthy or functional food, extraction is the primary step needed the study of optimal condition. The objective of this study was to investigate the effect of the forms of plant materials and different extraction conditions on antioxidant capacity of white mugwort.

MATERIALS AND METHODS

1. Plant materials and chemical compositions analysis.

Fresh white mugwort was supplied by Save Life Products Co., Ltd, Thailand. Plant material was washed with running tap water. Chemical compositions of fresh white mugwort including moisture content, fat content and protein content were carried out follow AOAC (2003).

2. Drying procedure.

The cleaned-fresh aerial parts were spread on stainless steel trays and dried at 45±2 ^{o}C in a tray dryer. The samples were randomly taken every hour for analyzing for moisture content (AOCA, 2003) until reaching the constant weight (14 h.). After drying, the leaves were ground into powder by an electric blender and sieved trough 100 meshes in order to obtain the uniform particle size.

3. Effect of solvent extraction on total phenolic content (TPC) and antioxidant capacities of fresh and powder samples of white mugwort.

3.1 Extraction procedure.

The cleaned-fresh aerial parts were immediately pulverized with an electric blender for a minute, homogeneously mixed with two different solvents (water or 50% ethanol) and extracted under the controlled conditions (25±1°C, 60 minutes and ratio of plant materials (g dried weight) to the solvent (ml) at 1:30) (Hwang *et al*., 2011; Karabegovic *et al*., 2011). The mixture solutions were

filtered through 0.45µ*m* filter membranes using vacuum filtration in order to separate the plant materials. The filtrate were kept in dark color bottle at 4 °C prior to analyze for TPC and antioxidant capacity.

3.2 Analysis of total phenolic content (TPC).

Total phenolic content of white mugwort extracts were determined by the Folin Ciocalteu reagent using gallic acid as a standard (Karabegovic *et al*., 2011). The total phenols were expressed as mg gallic acid equivalents (GAE) per ml extract. 0.5 milliliters of white mugwort extracts (10%v/v) or gallic acid will be mixed with the Folin Ciocalteu reagent (2.5 ml) and an aqueous Na_2CO_3 solution (2 ml, 7ml.5%). The mixtures were allowed to stand at room temperature for 30 minutes, and the absorbance of the reaction mixture was measured at 760 nm, the assays were carried out in triplicate.

3.3 Analysis of antioxidant capacity.

The antioxidant capacity of white mugwort extracts were carried out using DPPH radical scavenging assay analyzed according to the modified method described by Hwang *et al.* (2011). Briefly, 1 ml of each extract was mixed with 1 ml of DPPH ethanolic solution (50 µ*M*). The reaction mixture was shaken well and incubated for 30 minutes at room temperature, the assay were carried out in triplicate. The absorbance of the resulting solution was read at 540 nm using a UV-Vis spectrophotometer against a blank. The inhibitory percentage of DPPH was calculated according to the following equation:

$$\text{DPPH scavenging activity (\%)} = \frac{A_C - A_S}{A_C} \times 100(\%)$$

Where A_c and A_s are the absorbance of the DPPH radical solution and the extract sample mixed with DPPH solution, respectively.

4. Comparison of plant material forms (fresh aerial part and dried powder) on TPC and antioxidant capacity under optimal extraction condition.

The cleaned aerial parts were immediately pulverized with an electric blender for a minute, homogeneously mixed with 50% ethanol and extracted under the optimum condition from preliminary study (25±1 °C, 2.5 minutes and ratio of plant materials (g dried weight) to the solvent (ml) at 1:30) (Hwang *et al*., 2011; Karabegovic *et al*., 2011). The mixture solutions were filtered through 0.45µ*m* filter membranes using vacuum filtration in order to separate the plant materials. The filtrate were kept in dark color bottle at 4 °C prior to analyze of TPC and antioxidant capacity as described in 3.2 and 3.3, respectively.

5. Statistical analysis

All data were expressed as mean±standard deviations of triplicate measurements. Pearson's bivariate correlation was performed to analysis the correlation coefficients (*r*) between antioxidant capacity and TPC. Statistical significance was evaluated using one-way analysis of variance (ANOVA) and level of significance was done using Duncan Multiple Rang Test (DMRT) at $p \leq 0.05$ (95% significance interval) of SPSS (12.0 for Windows, SPSS Inc., Thailand).

RESULTS AND DISCUSSION

1. Chemical composition of fresh white mugwort.

The chemical composition analysis results (Table 1) showed the percentage of moisture content at 89.10±0.19 %, fat content at 1.21 ± 0.01 %, and protein content at 0.55±0.04 %.

Table 1 Chemical composition of fresh white mugwort

	Moisture content (%)	Fat content (%)*	Protein content (%)*
Fresh white mugwort	89.10 ± 0.19	1.21 ± 0.01	0.55 ± 0.04

* based on dry basis

The high content of fat in this plant is in the form of essential oil. Some research also reported that aerial parts of *Artemisia annua* contented 0.3 - 0.7% essential oil (Padalia *et al*., 2011). Moreover, we also observed oil droplets in our extracts under microscopy (result not shown).

2. Drying of white mugwort.

Moisture content of fresh white mugwort was approximately 89.10±0.19 %. Drying was carried out to achieve the optimum time. Thus, the drying temperature (45±2°C) used in this study was to imitate the drying conditions in the industry.

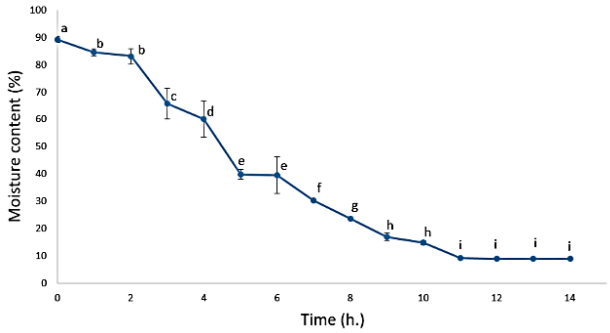


Figure 1 Moisture content of white mugwort during drying process. Different letters ($^{a-i}$) are significantly different ($p \leq 0.05$).

Figure 1 shows the significant decrease of moisture contents throughout the drying period (14 h). The moisture content reached equilibrium after 11 h (9.18% moisture content) indicated the optimum drying time of white mugwort at 45 ^{o}C.

3. Effect of different solvent extractions on TPC and antioxidant capacities of white mugwort.

In the present study (Table 2), the 50%ethanol extract had higher TPC in comparing with water extract ($p \leq 0.05$). The highest TPC was found in the ethanolic extract of both fresh sample (64.27±0.61 µg GAE equiv./ml) and powder sample (63.91±0.42 µg GAE equiv./ml) followed by the water extract of powder sample (38.61±0.39 µg GAE equiv./ml) and fresh sample (28.05±0.43 µg GAE equiv./ml), respectively ($p \leq 0.05$). Phenolic compounds are one of the phytochemicals found in white mugwort and other spices in its genus. Several studies reported the contribution of phenolic compounds on biological activities of these plants (Karabegovic *et al*., 2011; Khlifi *et al*., 2013; Zhang *et al*., 2014). In order to extract these compounds, the type of solvent is one of the most important factors. This phenomenon was depended on the molecular structure and solubility of extracted compounds in polar and weak polar solvents. Polyphenols are liable to dissolve in weak polar or nonpolar solvents (Zhang *et al*., 2014). Zhang *et al*. (2014) reported that the highest TPC (17.03±0.87 mg GAE equiv./g DM) was observed in 50% ethanol extract followed by water extract and ethanol extract, respectively. Xi *et al*. (2009) also reported that 50% ethanol was the most appropriate solvent for extracting phenolic compare to water, ethanol, acetone and methanol. Therefore, 50% ethanol is the suitable solvent for extracting phenolic compounds.

Table 2 Total phenolic content and antioxidant capacity of white mugwort extracts.

Samples	Solvent	TPC (µg GAE equiv./ml)	DPPH radical scavenging (%)
Fresh	Water	28.05±0.43^{c}	17.27±0.45^{d}
	50% Ethanol	64.27±0.61^{a}	58.17±0.47^{b}
Powder	Water	38.61±0.39^{b}	33.63±0.35^{c}
	50% Ethanol	63.91±0.42^{a}	66.32±0.96^{a}

$^{a-d}$ Means within the same column followed by different letters were significantly different ($p \leq 0.05$).

Free radical scavenging is the property indicating the capability of phytochemicals to prevent cancer and other chronic diseases (Iweala *et al*., 2015). In this study, antioxidant capacity of the extracts were carried out using DPPH radical scavenging assay. The results (Table 2) indicate the significant difference of antioxidant capacity of fresh and powder extracts. The higher DPPH scavenging activity was found in treatment extracted with 50% ethanol in compared to treatment

extracted with water ($p \leq 0.05$). This was depended on the extracted compounds, mainly phenolics. The correlation coefficients (*r*) between TPC and DPPH scavenging activity was 0.985 indicating a main contribution of phenolic compounds. Related studies also reported high correlation between antioxidant capacity and phenolic content of plants in Artemisia genus (Karabegovic *et al*., 2011; Zhang *et al*., 2014; Li *et al*., 2017). Overall, the 50% ethanol extract of powder sample had the highest DPPH scavenging activity (66.32±0.96 %) followed by 50% ethanol extract of fresh sample had DPPH scavenging (58.17±0.47 %). Antioxidant capacity of these extracts could be influenced by other bioactive compounds. Apart from phenolic compounds, other phytochemicals such as mono and sesquiterpene, sterols, and essential oils were also reported as the major bioactive compounds in this genus which mostly dissolve in weak polar or nonpolar solvents. (Abad Martinez *et al*., 2012).

4. Comparison on TPC and antioxidant capacities of the extract from fresh and powder samples extracted by optimum condition.

Solvent extraction is the procedure to extract the desired chemical components inside the plant cells. In this section, the extractions were performed using 50% ethanol as a solvent with the optimum extraction condition (2.5 minutes, 25°C) from preliminary experiments. The results showed that the extract from powder sample provided higher TPC (103.25±2.71 µg GAE equiv. /ml) and DPPH scavenging activity (94.31±0.15 %) than the extract from fresh sample that had TPC (61.54±3.78 µg GAE equiv./ml) and DPPH radical scavenging (94.31±0.15 %) ($p \leq 0.05$) (Table 3).

Table 3 Total phenolic content and antioxidant capacity of white mugwort extracts.

Samples	TPC (µg GAE equiv./ml)	DPPH radical scavenging (%)
Fresh	61.54 ± 3.78^{b}	90.40 ± 0.58^{b}
Powder	103.25 ± 2.71^{a}	94.31 ± 0.15^{a}

$^{a-b}$ Means within the same column followed by different letters were significantly different ($p \leq 0.05$).

Plant as a starting material is the basic parameters influencing the quality of an extract. Either fresh or dried plant materials can be utilized as a starting material for the extraction of secondary plant components. Most of the compounds found inside the cells are not permeable through the cell wall so the basic operation as drying of plant materials and grinding to obtain a homogenous sample are help improving the kinetics of analytic extraction and also increasing the contact of sample surface with the solvent system. Furthermore, plants are usually traditionally prepared by air drying to a constant weight before extraction (Sasidharan *et al*., 2011; Tiwati *et. al*., 2011). Therefore, these results confirm that powder sample is the appropriate form for extraction.

CONCLUSION

Fresh white mugwort leaves had 89.10±0.19%moisture content (%), 1.21±0.01 % fat content, and a very low protein content (0.55±0.04%). The moisture content of white mugwort reached equilibrium after drying at 45±2°C for 11 h. Solvent type and starting plant material affected antioxidant capacity and TPC of white mugwort extracts. The 50% ethanol was the optimal solvent and its extracts had highest DPPH scavenging activity (%) and TPC (µg GAE equiv./ml) ($p \leq 0.05$). TPC value of the extracts had the direct correlation with DPPH scavenging activity (r = 0.985), confirming the high contribution to the radical scavenging activity. The extract obtained from ethanol extraction of dried powder sample exhibited higher DPPH scavenging activity (94.31±0.15 %) and TPC (103.25±2.71 µg GAE equiv. /ml) than that of the extract from fresh sample (TPC at 61.54±3.78 µg GAE equiv./ml and DPPH radical scavenging at 94.31±0.15 %) ($p \leq 0.05$). These results showed the possibility of producing natural antioxidant from the aerial part of white mugwort.

ACKNOWLEDGEMENTS

Financial support from Thailand Researchers and Research for Industry Grants (RRi), Thailand Research Fund (TRF) and Save Life Products Co., Ltd, Thailand.

REFERENCES

Abad, M.J., L.M. Bedoya, L. Apaza and P. Bermejo. 2012. The Artemisia L. Genus: A Review of Bioactive Essential Oils. **Molecules**. 17(3): 2542-2566.

AOAC, 2003. Official methods of analysis of the association of official's analytical chemists, 17th edn. Association of official analytical chemists, Arlington, Virginia.

Hwang, K.-E., Y.-S. Choi, J.-H. Choi, H.-Y. Kim, H.-W. Kim, M.-A. Lee, H.-K. Chung and C.-J. Kim. 2011. Effect of Ganghwayakssuk (Artemisia Princeps Pamp.) on Oxidative Stability of Deep Fried Chicken Nuggets. **Food Science and Biotechnology**. 20(5): 1381.

Iweala, E., F.-F. Liu, R.-R. Cheng, Y. Li, C. Omonhinmin and Y.-J. Zhang. 2015. **Anti-Cancer and Free Radical Scavenging Activity of Some Nigerian Food Plants in Vitro.**

Karabegovic, I., M. Nikolova, D. Velickovic, S. Stojicevic, V. Veljkovic and M. Lazic. 2011. Comparison of Antioxidant and Antimicrobial Activities of Methanolic Extracts of the Artemisia Sp. Recovered by Different Extraction Techniques. **Chinese Journal of Chemical Engineering**. 19(3): 504-511.

Khlifi, D., R.M. Sghaier, S. Amouri, D. Laouini, M. Hamdi and J. Bouajila. 2013. Composition and Anti-Oxidant, Anti-Cancer and Anti-Inflammatory Activities of Artemisia Herba-Alba, Ruta Chalpensis L. And Peganum Harmala L. **Food Chem Toxicol**. 55(202-208).

Li, D.-l., X.-l. Zheng, L. Duan, S.-w. Deng, W. Ye, A.-h. Wang and F.-w. Xing. 2017. Ethnobotanical Survey of Herbal Tea Plants from the Traditional Markets in Chaoshan, China. **Journal of Ethnopharmacology**. 205(Supplement C): 195-206.

Nakamura, Y., Y. Ohto, A. Murakami, S. Jiwajinda and H. Ohigashi. 1998. Isolation and Identification of Acetylenic Spiroketal Enol Ethers from Artemisia Lactiflora as Inhibitors of Superoxide Generation Induced by a Tumor Promoter in Differentiated Hl-60 Cells. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. 46(12): 5031-5036.

Padalia, R.C., R.S. Verma, A. Chauhan, C.S. Chanotiya and A. Yadav. 2011. Variation in the Volatile Constituents of Artemisia Annua Var. Cim-Arogya During Plant Ontogeny. **Nat Prod Commun**. 6(2): 239-242.

Sasidharan, S., Y. Chen, D. Saravanan, K.M. Sundram and L. Yoga Latha. 2011. Extraction, Isolation and Characterization of Bioactive Compounds from Plants' Extracts. **Afr J Tradit Complement Altern Med**. 8(1): 1-10.

Tiwari, P., B. Kumar, M. Kaur, G. Kaur and H. Kaur. 2011. Phytochemical Screening and Extraction: A Review. **Internationale Pharmaceutica Sciencia**. 1(1): 98-106.

Xi, J., D. Shen, S. Zhao, B. Lu, Y. Li and R. Zhang. 2009. Characterization of Polyphenols from Green Tea Leaves Using a High Hydrostatic Pressure Extraction. **International Journal of Pharmaceutics**. 382(1): 139-143.

Xiao, M.-t., D.-w. Luo, Z. Ke, J. Ye and P.-F. Tu. 2014. A Novel Polyacetylene from the Aerial Parts of Artemisia Lactiflora. **Phytochemistry Letters**. 8(Supplement C): 52-54.

Zhang, L., Z.-c. Tu, T. Yuan, H. Wang, Z.-f. Fu, Q.-h. Wen and X.-q. Wang. 2014. Solvent Optimization, Antioxidant Activity, and Chemical Characterization of Extracts from Artemisia Selengnesis Turcz. **Industrial Crops and Products**. 56(Supplement C): 223-230.

การสกัดสารเพิ่มรสชาติและไลโคปีนจากมะเขือเทศ

Extraction of Flavor Enhancer and Lycopene from Tomato

อภิชญา แซ่เต๋ง[1*] ณัฏฐา เลาหกุลจิตต์[1] และ อรพิน เกิดชูชื่น[1]

Apichaya Sae-teng[1*], Nutta Laohakunjit[1] and Orapin Kerdchoechuen[1]

บทคัดย่อ

การเปรียบเทียบการสกัดสารเพิ่มรสชาติจากมะเขือเทศ โดยการสกัดด้วยน้ำเปรียบเทียบกับการสกัดด้วยน้ำร่วมกับวิธีอัลตร้าโซนิก ที่อุณหภูมิ 30 40 และ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 60 และ 90 นาที พบว่าการสกัดด้วยน้ำและการสกัดด้วยน้ำร่วมกับอัลตร้าโซนิก ได้ปริมาณโปรตีนสกัดหยาบ และโปรตีนรวมสูงสุด ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ที่เวลา 90 นาที มีปริมาณโปรตีนสกัดหยาบ เท่ากับ ร้อยละ 0.66 และ 0.67 ต่อกรัมสารสกัด ตามลำดับ และปริมาณโปรตีนรวม เท่ากับ 0.44 และ 0.49 กรัมต่อลิตรสารสกัด ตามลำดับ การสกัดด้วยน้ำและการสกัดด้วยน้ำร่วมกับอัลตร้าโซนิกนั้นได้ปริมาณโปรตีนสกัดหยาบและโปรตีนรวมไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p>0.05) และการสกัดสารเพิ่มรสชาติ ได้ปริมาณ adenosine monophosphate (AMP) และ guanosine monophosphate (GMP) สูงสุด เมื่อสกัดที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ทั้งการสกัดด้วยน้ำและการสกัดด้วยน้ำร่วมกับวิธีอัลตร้าโซนิก โดยหากอุณหภูมิในการสกัดที่เพิ่มสูงขึ้นนั้น พบว่าปริมาณ AMP และ GMP ที่สกัดได้มีปริมาณลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p\leq$0.05) และกากมะเขือเทศหลังจากสกัดสารเพิ่มรสชาติ ยังคงมีไลโคปีนอยู่ปริมาณ 114.78-208.17 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมของกากมะเขือเทศที่นำโปรตีนออกแล้ว

ABSTRACT

Comparison of flavor enhancer from tomato between water extraction and water combined with ultrasonic assisted extraction was performed. The extractions at temperature of 30, 40 and 50 ºC for 30, 60 and 90 minutes were conducted. Results showed that crude extracts obtained by both extraction methods at 50 ºC for 90 minutes contained the highest amount of crude protein as 0.66 and 0.67 % g/extract, respectively, and total protein as 0.44 and 0.49 g/L extract, respectively. Crude protein and total protein contents of the sample extracted by water extraction and water extraction combined with ultrasonic assisted were not significantly different (p>0.05). The optimum temperature and time for extraction of adenosine monophosphate (AMP) and guanosine monophosphate (GMP) of by water extraction and water combined with ultrasonic assisted extraction was 30 Cº for 30 minutes. The amount of AMP and GMP significantly decreased ($p\leq$0.05) when the extraction temperature increased. The tomato residue from the extraction of flavor enhancer contained lycopene ranging between 114.78 – 208.17 mg/kg of the residue.

Key Words: tomato, flavor enhancer, extraction, lycopene

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

[1]คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ 10150

[1]School of Bioresources and Technology, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10150

คำนำ

ปัจจัยสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการยอมรับอาหารของผู้บริโภคในผลิตภัณฑ์อาหาร ได้แก่ ลักษณะปรากฏ กลิ่น สี และรสชาติ เป็นต้น โดยที่รสชาติเป็นปัจจัยสำคัญมากในอาหาร โดยทั่วไปนั้นการปรับปรุงรสชาติของอาหารทำได้โดยการเติมสารเพิ่มรสชาติ (flavor enhancer) ลงในผลิตภัณฑ์อาหาร สารเพิ่มรสชาติ สามารถแบ่งออก ได้เป็น 3 ประเภท คือ สารจำพวกนิวคลีโอไทด์ เกลือของกรดอะมิโน และกรดอะมิโน สารเพิ่มรสชาติชนิดเกลือของกรดอะมิโนที่นิยมใช้ทั่วไป ได้แก่ โมโนโซเดียมกลูตาเมต (monosodium glutamate; MSG) แต่การบริโภคโมโนโซเดียมกลูตาเมตนั้น อาจทำให้เกิดอาการข้างเคียงต่างๆ เช่น อาการ Chinese Restaurant Syndrome (CRS) (Kwok, 1968) สารเพิ่มรสชาติชนิดนิวคลีโอไทด์ ได้แก่ กัวโนซีน 5' โมโน ฟอสเฟต อะดีโนซีน 5' โมโนฟอสเฟต เป็นต้น สารเพิ่มรสชาติชนิดกรดอะมิโน ได้แก่ กรดกลูตามิค เป็นต้น (Dzanic *et al.,* 1985) สารเพิ่มรสชาติสามารถพบได้ธรรมชาติ ได้แก่ เนื้อ เนื้อปลา และผักต่างๆ โดยผักนั้นเป็นแหล่งที่มีกลูตามิกปริมาณสูง เช่น กะหล่ำปลี ข้าวโพด ถั่วลันเตา มะเขือเทศ และหัวหอม เป็นต้น มะเขือเทศมีปริมาณกลูตามิกสูงที่สุดในอาหารประเภทผัก โดยมีปริมาณ 246 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ในขณะที่ปริมาณกรดกลูตามิกในกะหล่ำปลี ข้าวโพด ถั่วลันเตา และหัวหอม เท่ากับ 50 106 106 และ 51 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ (Ninomiya, 1998) มะเขือเทศมีสารเพิ่มรสชาติ (flavor enhancer) อื่นๆ อีก ได้แก่ 5' ribonucleotide คือ กัวโนซีน 5' โมโนฟอสเฟต ที่มีปริมาณ 295 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมเนื้อมะเขือเทศ (pulp) (Maria *et al.,* 2007) และอะดีโนซีน 5' โมโนฟอสเฟตที่พบได้ในอาหารจำพวกทะเล (Ninomiya, 1998) มะเขือเทศนอกจากจะมีกรดกลูตามิกเป็นกรดอะมิโนที่พบมากที่สุดในมะเขือเทศ แล้วยังมีกรดอะมิโนที่จำเป็นที่ร่างกายไม่สามารถผลิตได้อีกด้วย (George *et al.*, 1975) และมะเขือเทศยังมีสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ (bioactive compound) เช่น เบต้าแคโรทีน อัลฟ่าแคโรทีน และไลโคปีน เป็นต้น ซึ่งเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant) เป็นต้น มีรายงานการสกัดโปรตีนจากมะเขือเทศ เช่น การสกัดโปรตีนจากมะเขือเทศด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (George *et al*., 1995; Dongyan *et.al*, 2014) George, *et al.* (1995) ได้รายงานถึงสภาวะที่ดีในการสกัดโปรตีนที่พีเอช เท่ากับ 11.5 ซึ่งได้ปริมาณผลผลิตโปรตีนรวมร้อยละ 43.6 แต่ยังไม่มีรายงานการสกัดแยกสารเพิ่มรสชาติจากมะเขือเทศมากนัก แต่การสกัดน้ำเพียงอย่างเดียวอาจยังไม่มีประสิทธิภาพมากพอ ดังนั้นจึงมีการใช้วิธีอัลตร้าโซนิกร่วมด้วย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัด

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการศึกษาการสกัดสารเพิ่มรสชาติจากมะเขือเทศ โดยเปรียบเทียบการสกัดด้วยน้ำและการสกัดด้วยน้ำร่วมกับวิธีอัลตร้าโซนิก และหาปริมาณไลโคปีนที่ยังคงเหลืออยู่ในกากมะเขือเทศหลังการสกัดสารเพิ่มรสชาติแล้ว

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมมะเขือเทศ คุณลักษณะทางเคมีกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมีของมะเขือเทศ

มะเขือเทศท้อสดระยะสุก (มาจากสวนท้องถิ่น อ.แม่ริม จ.เชียงใหม่) นำมาล้างทำความสะอาด นำไปวิเคราะห์ วัดค่าสี L*, a*, b* (Hunter's scale) วัดปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำด้วยเครื่อง refractometer และปริมาณความชื้น ตามวิธี AOAC, 2000 นำมาลดความชื้นด้วยการอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ในตู้อบลมร้อน เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาลดขนาดด้วยเครื่องบด วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของมะเขือเทศอบแห้ง ได้แก่ ปริมาณความชื้น ปริมาณโปรตีน (AOAC, 2000)

การสกัดสารเพิ่มรสชาติ

นำมะเขือเทศที่เตรียมข้างต้นมาสกัดด้วยน้ำกลั่น (distilled water) และการสกัดด้วยน้ำร่วมกับอัลตร้าโซนิกในอัตราส่วนมะเขือเทศต่อน้ำกลั่น 1:30 w/v (George *et al*., 1995) โดยใช้อุณหภูมิสกัดที่ 3 ระดับ คือ 30 40 และ 50 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 3 ช่วงเวลา คือ 30 60 และ 90 นาที จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยง (centrifuge) ที่ 10,000xg แยกส่วนใสกับตะกอน นำส่วนใสไปวิเคราะห์ปริมาณอะดีโนซีน 5' โมโนฟอสเฟต (AMP) และกัวโนซีน 5' โมโนฟอสเฟต (GMP) โดยใช้เครื่อง High Performance Liquid Chromatography (HPLC) (Agilent, USA) โดยดัดแปลงจากวิธีของ Taylor *et al.* (1981) วิเคราะห์ปริมาณโปรตีนรวม (total protein) โดยวิธี Biuret test (Gornall *et al*., 1949) และปริมาณโปรตีนสกัดหยาบ (crude protein) โดยวิธี Kjeldahl (AOAC, 2000)

นำส่วนตะกอนหรือกากมะเขือเทศสดที่เหลือจากการสกัดสารเพิ่มรสชาติในการทดลองข้างต้นมาวิเคราะห์ปริมาณไลโคปีนตามวิธีของ Devinder *et al.* (2008) และ Alda *et al.* (2009) วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วย spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 503 นาโนเมตร คำนวณปริมาณไลโคปีนเป็นมิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จากสูตร Fish *et al*. (2002)

$$\text{ปริมาณไลโคปีน (มิลลิกรัมต่อ กิโลกรัม)} = \frac{\text{ค่าการดูดกลืนคลื่นแสง*} \times 31.2}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)}}$$

*ค่าสัมประสิทธิ์เอกซ์ทิงชันของโมเลกุลไลโคปีนในเฮกเซน (extinction coefficient; E 1%, 1 cm) เท่ากับ 17.2 x 104 mol cm-1 มวลโมเลกุล (536.9 กรัม)

ผลการทดลองและวิจารณ์

องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของมะเขือเทศ

จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของมะเขือเทศท้อสด พบว่า มีปริมาณความชื้น ร้อยละ 89.38 วิเคราะห์ค่าสี L* a* b* ดังแสดงใน Table 1 พบว่ามีค่าสี เท่ากับ 41.17 38.92 และ 35.07 ตามลำดับ และคำนวณได้ค่า hue เท่ากับ 39.07 น้อยกว่า 59.3 ซึ่งมีค่าสอดคล้องกับงานวิจัยของ López and Gómez (2004) ที่พบว่ามะเขือเทศระยะสุกเต็มที่จะมีค่า hue ต่ำกว่า 59.3 แสดงว่ามะเขือเทศที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นระยะที่สุกเต็มที่แล้ว ซึ่งระยะการสุกของมะเขือเทศมีผลต่อปริมาณของกรดกลูตามิก มีรายงานว่าปริมาณกรดกลูตามิกเพิ่มขึ้น 10 - 40 เท่าในระหว่างการสุกของมะเขือเทศ (Boggio *et al*., 2000; Oms-Oliu *et al*., 2011) และปริมาณ GMP เพิ่มขึ้นตามระยะการสุกของมะเขือเทศเช่นกัน (Ninomiya, 1998) เมื่อนำมะเขือเทศไปอบแห้งเป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่ามีปริมาณความชื้นได้ ร้อยละ 15.21 ปริมาณโปรตีนสกัดหยาบ ร้อยละ 14.76 แสดงว่ามีโปรตีนเป็นองค์ประกอบอยู่ ซึ่งโดยทั่วไปปริมาณโปรตีนของมะเขือเทศมีปริมาณร้อยละ 11.67 – 16.38 (OECD, 2008)

Table 1 The compositions of fresh tomato.

Chemical composition					
Brix	moisture (%)	color			
		L*	a*	b*	Hue
4.90±0.10	89.38±2.36	41.17±1.42	38.92±0.95	35.07±1.97	39.07±0.81

การสกัดสารเพิ่มรสชาติ

เมื่อนำตัวอย่างมาสกัดสารเพิ่มรสชาติ พบว่าสภาวะที่ดีที่สุดที่ได้ปริมาณโปรตีนสกัดหยาบและโปรตีนรวม ทั้งการสกัดด้วยน้ำและน้ำร่วมกับอัลตร้าโซนิก คือ สภาวะการสกัดที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส สอดคล้องกับผลการทดลองของ George et al. (1995) ที่รายงานว่าอุณหภูมิที่ดีที่สุดในการสกัดโปรตีนจากมะเขือเทศ คือ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที โดยสารสกัดที่ได้จากการสกัดด้วยน้ำและน้ำร่วมกับอัลตร้าโซนิก มีปริมาณโปรตีนสกัดหยาบ ร้อยละ 0.66 และ 0.67 ต่อกรัมสารสกัด ตามลำดับ และมีปริมาณโปรตีนรวม 0.49 และ 0.55 กรัมต่อลิตรสารสกัด ตามลำดับ (Table 2) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการสกัดขึ้น พบว่าปริมาณโปรตีนสกัดหยาบและโปรตีนรวมมีปริมาณเพิ่มขึ้นด้วย เพราะการค่าการละลาย (solubility) ของโปรตีนนั้นจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 40-50 องศาเซลเซียส (Guimarães and Moraes, 2008) แต่เวลาในการสกัดนั้นไม่มีผลต่อการปริมาณโปรตีนสกัดหยาบและโปรตีนรวม และพบว่าการสกัดด้วยน้ำและการสกัดด้วยน้ำร่วมกับอัลตร้าโซนิกนั้น ได้ปริมาณโปรตีนสกัดหยาบและโปรตีนรวมไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (p>0.05) ส่วนสภาวะที่ดีที่สุดในการสกัดสารเพิ่มรสชาติ เพื่อให้ได้ปริมาณ AMP และ GMP สูงที่สุด คือ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที (Table 3) ทั้งการสกัดด้วยน้ำเพียงอย่างเดียวและน้ำร่วมกับอัลตร้าโซนิก แต่เมื่ออุณหภูมิในการสกัดเพิ่มขึ้น พบว่าปริมาณ AMP และ GMP ที่สกัดได้มีปริมาณลดลงอย่างมีนัยสำคัญ (p≤0.05) เนื่องจากการใช้อุณหภูมิสูงขึ้นนั้น ทำให้สารไรโบนิวคลีโอไทด์ถูกเปลี่ยนเป็นนิวคลีโอไซด์ได้ (Erich and Herta, 2008)

เมื่อนำส่วนตะกอนหรือกากมะเขือเทศสดที่เหลือมาจากการสกัดสารเพิ่มรสชาติในข้างต้นมาวิเคราะห์ไลโคปีน พบว่ามีปริมาณเท่ากับ 114.78 – 208.17 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมของกากมะเขือเทศที่นำโปรตีนออกแล้ว (Table 4) ซึ่งตามปกติมะเขือเทศสดและผลิตภัณฑ์แปรรูปต่างๆ ของมะเขือเทศจะมีปริมาณไลโคปีนอยู่ 56-371 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักสด (Olajire *et al.,* 2007) ดังนั้น นอกจากนำมะเขือเทศมาสกัดสารเพิ่มรสชาติเพื่อเพิ่มมูลค่ามะเขือเทศได้แล้ว ยังสามารถใช้ประโยชน์จากกากส่วนที่เหลือ โดยนำมาสกัดไลโคปีนได้อีกด้วย

Table 2 The protein content of extracted at variety condition of extraction.

Temperature (ºC)	Time (mins.)	Total protein (g/l of extract)		Crude protein (% of g extracted)	
		Water extraction	Water combined with Ultrasonic assisted	Water extraction	Water combined with Ultrasonic assisted
30	30	0.41±0.09^{ab}	0.47±0.06^{ab}	0.50±0.03^{b}	0.46±0.03^{b}
	60	0.46±0.06^{ab}	0.45±0.08^{ab}	0.50±0.03^{b}	0.48±0.06^{b}
	90	0.47±0.04^{ab}	0.41±0.01^{b}	0.55±0.09^{ab}	0.57±0.06^{ab}
40	30	0.42±0.07^{ab}	0.44±0.02^{b}	0.46±0.03^{b}	0.53±0.02^{ab}
	60	0.33±0.11^{b}	0.49±0.03^{ab}	0.48±0.06^{b}	0.59±0.03^{ab}
	90	0.41±0.02^{ab}	0.41±0.07^{b}	0.44±0.00^{b}	0.66±0.06^{a}
50	30	0.44±0.06^{ab}	0.55±0.04^{a}	0.53±0.02^{ab}	0.57±0.06^{ab}
	60	0.49±0.06^{a}	0.46±0.00^{ab}	0.53±0.00^{ab}	0.57±0.00^{ab}
	90	0.44±0.01^{ab}	0.49±0.02^{ab}	0.66±0.06^{a}	0.67±0.06^{a}

* a, b, c…letter in the same column is significantly difference at p≤0.05.

Table 3 The 5'-Adenosine monophosphate and 5'-Guanosine monophosphate (GMP) content of extracted at variety condition of extraction.

Temperature (ºC)	Time (mins.)	AMP (mg/100 g of sample)		GMP (mg/100 g of sample)	
		Water extraction	Water combined with Ultrasonic assisted	Water extraction	Water combined with Ultrasonic assisted
30	**30**	132.11±4.98^{a}	72.25±0.01^{a}	27.65±0.86^{a}	13.66±3.81^{a}
	60	126.50±2.35^{a}	69.51±0.79^{a}	19.14±2.26^{b}	11.28±2.48^{ab}
	90	120.33±10.50^{ab}	67.20±2.47^{a}	19.31±1.41^{b}	10.01±0.64^{b}
40	**30**	106.96±6.12^{b}	67.89±6.36^{a}	15.92±0.97^{c}	8.50±0.17^{b}
	60	119.68±9.32^{ab}	70.05±2.63^{a}	15.42±0.98^{c}	9.29±0.01^{b}
	90	106.17±6.45^{b}	76.29±2.08^{a}	13.96±1.16^{cd}	9.74±0.17^{b}
50	**30**	90.57±3.31^{c}	52.08±8.23^{b}	11.71±0.63^{de}	8.73±0.16^{b}
	60	85.39±8.18^{c}	45.28±5.68^{b}	10.98±0.17^{e}	8.45±0.01^{b}
	90	85.31±5.89^{c}	47.52±4.30^{b}	10.50±0.34^{e}	8.04±0.22^{b}

a, b, c…letter in the same column is significantly difference at $p \leq 0.05$.

Table 4 The lycopene content of deproteined tomato powder.

Temperature (ºC)	Time (mins.)	Lycopene (mg/kg.)	
		Residue from water extraction	Residue from water combined with Ultrasonic assisted
30	30	197.68±4.24	114.78±0.57
	60	180.84±15.35	140.34±8.03
	90	205.92±9.53	143.19±2.87
40	30	197.68±4.24	162.24±6.88
	60	180.84±15.35	139.93±5.16
	90	205.92±9.53	167.92±5.74
50	30	189.07±7.94	137.09±10.32
	60	184.95±2.12	146.02±0.00
	90	208.17±2.12	148.04±2.87

* a, b, c…letter in the same column is significantly difference at $p \leq 0.05$.

สรุปผล

การสกัดด้วยน้ำและการสกัดด้วยน้ำร่วมกับอัลตร้าโซนิกนั้น ได้ปริมาณโปรตีนสกัดหยาบและโปรตีนรวมไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p>0.05) ดังนั้นสามารถเลือกวิธีใดวิธีหนึ่งในการสกัดสารเพิ่มรสชาติจากมะเขือเทศสุกได้ อุณหภูมิในการสกัดที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อปริมาณโปรตีนสกัดหยาบและโปรตีนรวมเพิ่มสูงขึ้น แต่ในทางกลับกันปริมาณ AMP และ GMP ที่ได้ในสารสกัดเพิ่มรสชาตินั้นลดลง เมื่ออุณหภูมิในการสกัดเพิ่มขึ้น และกากมะเขือเทศที่เหลือจากการสกัดสารเพิ่มรสชาติในข้างต้นนั้น ยังพบไลโคปีนอีกด้วย

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

Alda, L. M., I. Gogoasa, D. M. Bordean, I. Gergen, S. Alda, C. Moldovan and L. Nita. 2009. Lycopene content of tomatoes and tomato products. **Journal of Agroalimentary Processes and technologies** 15: 540-542.

AOAC, 2000, **Official Methods of Analysis**. Association of Official Analytical Chemists International, Arlington, Virginia.

Boggio, S. B., J. F. Palatnik, H. W. Heldt and E. M. Valle. 2000. Changes in amino acid composition and nitrogen metabolizing enzymes in ripening fruits of *Lycopersicon esculentum* Mill. **Plant Science** 159: 125-133.

Devinder, K., A. W. Ali, D. P. S. Oberoi and D. S. Sogi. 2008. Effect of extraction conditions on lycopene extractions from tomato processing waste skin using response surface methodology. **Journal of Food Chemistry** 108: 711-718.

Dongyan, S., G. Griffiths, P. Zhongli, Y. Tianli, Z. Ang and F. Zhiliang. 2014. Characteristics of isolation and functionality of protein from tomato pomace produced with different industrial processing methods. **Food Bioprocess Technology** 7: 532-541.

Dzanic, H., I. Mujic and V. Sudarski-Hack. 1985. Protein hydrolyzates from soy grits and dehydrated alfalfa flour. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 33(4), 683-685.

Erich, Z. and Z. Herta. 2008. **Flavourings: Production, Composition, Applications, Regulations**. Weinheim. Newyork

Fish, W. W., P. Perkins-Veazie and J. K. Collins. 2002. A quantitative assay for lycopene that utilizes reduced volumes of organic solvents. **Journal of Food Composition and Analysis** 15: 309-317.

George, C. T. and G. B. Dimitrios. 1975. Amino acid and mineral salt content of tomato seed and skin waste. **Journal of the Science of Food and Agriculture** 26: 421-423.

George, N. L., T. Constantina, O. Vassiliki and D. T. Christos. 1995. Protein Isolation from Tomato Seed Meal Extraction Optimization. **Journal of Food Science** 60: 477-482.

Gornall, A. G., C. J. Bardawill and M. M. David. 1949. Determination of serum proteins by means of the biuret reaction. **Journal of Biological Chemistry** 177: 751-766.

Guimarães Pelegrine, D. H. and M. T. de Moraes Santos Gomes. 2008. Whey proteins solubility curves at several temperatures values. **Ciência e Natura** 30; 1.

Kwok, R. H. M. 1968. Chinese-restaurant syndrome. **The New England Journal of Medicine**: 278-796.

López Camelo, A. F. and P. A. Gómez. 2004. Comparison of color indexes for tomato ripening. **Horticultura Brasileira** 22: 534-537.

Ninomiya, K. 1998. Natural occurrence. **Food Review International** 14: 177-212.

O.E.C.D. 2008. Consensus document on compositional considerations for new varieties of tomato: key food and feed nutrients, toxicants and allergens. **Pesticides and Biotechnology** 26: 16-21.

Olajire, A. A., A. O. Ibrahim, F. E. Adelowo-Imeokparia and M. Abdul-Hammed. 2007. Lycopene in tomato and tomato-based products: Levels and their contribution to dietary lycopene. **Pakistan Journal of Scientific and Industrial Research** 50: 18-21.

Oms-Oliu, G., M. L. A. T. M. Hertog, B. Van de Poel, J. Ampofo-Asiama, A. H. Geeraerd and B. M. Nicolaï. 2011. Metabolic characterization of tomato fruit during pre-harvest development, ripening, and postharvest shelf-life. **Postharvest Biology and Technology** 62: 7-16.

Taylor, M. W., R. A. Hershey, K. Coy and S. Olivelle.1981. Improved method of resolving nucleotides by reverse-phase high performance liquid chromatography. **Journal of Chromatography** 219: 133-139.

Stipanuk, M. H. and M. A. Caudill. 2018. **Biochemical, Physiological, and Molecular Aspects of Human Nutrition**. Elsevier Health Sciences.

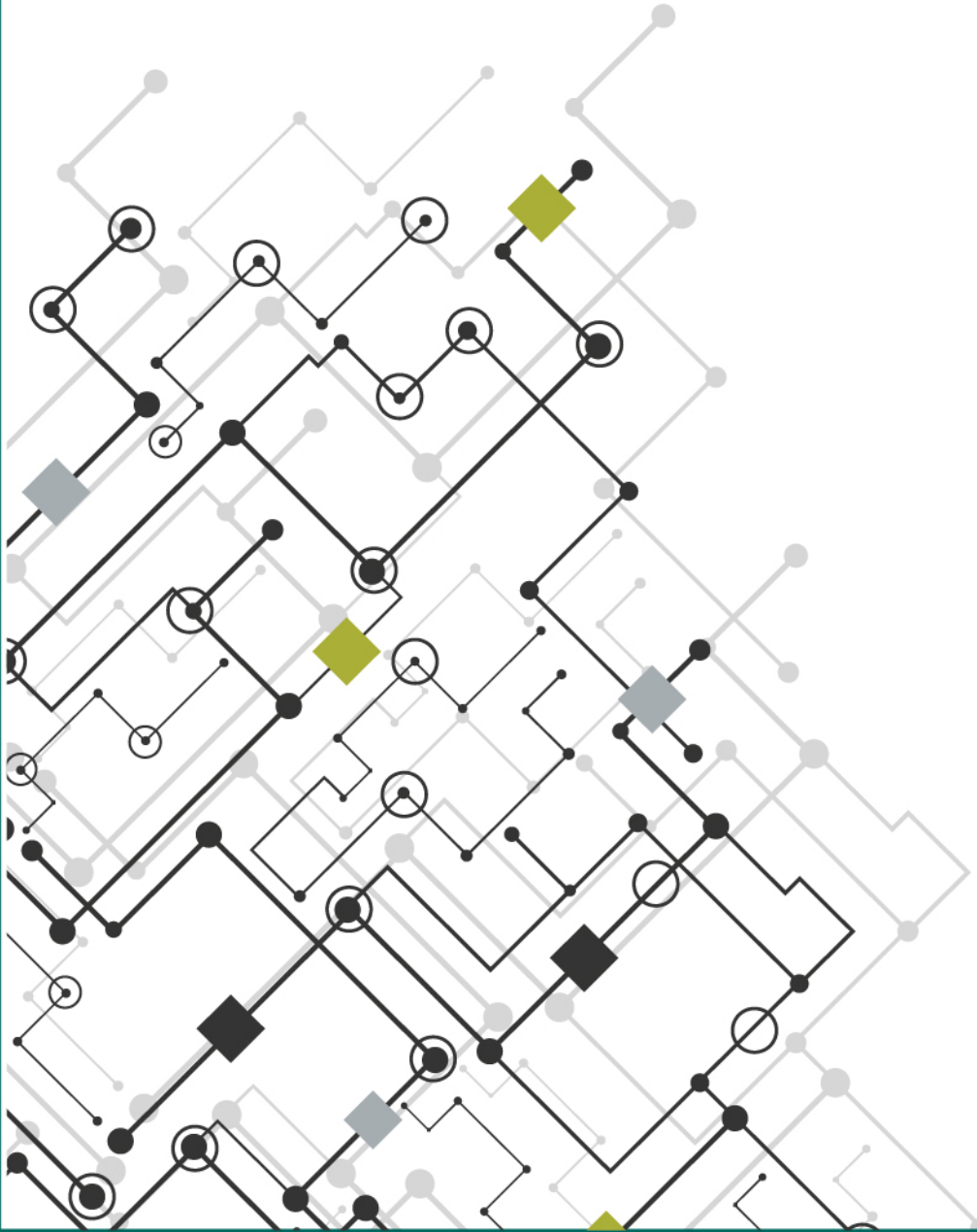
Zhang, Y., C. Venkitasamy, Z. Pan and W. Wang. 2013. Recent developments on umami ingredients of edible mushrooms-A review. **Trends in Food Science & Technology** 33: 78-92.

สาขาอุตสาหกรรมเกษตร

Subject: Agro-Industry

ภาคโปสเตอร์

Poster Presentation



KU
KASETSART
UNIVERSITY

การพัฒนาข้าวเกรียบปลาสำเร็จรูปทดแทนด้วยแป้งกล้วยบางส่วน

Development of Instant Fish Cracker Partial Substituted with Banana Flour

ศรันยา บุญมาเลิศ[1] และ เสาวณีย์ เลิศวรสิริกุล[1*]

Saranya Boonmalert[1] and Saowanee Lertworasirikul[1*]

บทคัดย่อ

ในประเทศไทย ผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบในท้องตลาดมีปริมาณน้ำมันสูงและคุณค่าทางโภชนาการต่ำ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบปลาสำเร็จรูปทดแทนด้วยแป้งกล้วยบางส่วนเพื่อลดปริมาณน้ำมันลงและเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการ ให้เป็นผลิตภัณฑ์ทางเลือกหนึ่งสำหรับผู้บริโภคที่ใส่ใจสุขภาพ โดยผลการพัฒนาผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบปลาสำเร็จรูปทดแทนด้วยแป้งกล้วยบางส่วน พบว่า เมื่อใช้แป้งกล้วยในปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีปริมาณน้ำมันลดลง เส้นใยเพิ่มขึ้น มีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นและอัตราการพองตัวลดลง สูตรที่พัฒนาได้ประกอบด้วยแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 20.83 แป้งข้าวเจ้าร้อยละ 0.83 แป้งกล้วยร้อยละ 20 โซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 0.38 โพแทสเซียมคลอไรด์ร้อยละ 0.56 ไกลซีนร้อยละ 0.56 พริกไทยร้อยละ 1.73 กระเทียมร้อยละ 1.91 รากผักชีร้อยละ 1.1 น้ำสะอาดที่อุณหภูมิ 80°C ร้อยละ 27.14 ผลิตภัณฑ์ที่พัฒนา มีปริมาณไขมันร้อยละ 23.17 และปริมาณเส้นใยหยาบร้อยละ 2.67 สำหรับคุณภาพทางด้านกายภาพ มีค่าสี L* a* b* เท่ากับ 39.38 14.16 และ 25.30 ตามลำดับ ค่า Hardness 89.81 นิวตัน ค่า Water activity 0.38 และอัตราการพองตัว 2.66 เท่า การวิเคราะห์ทางด้านปริมาณจุลินทรีย์พบว่ามีจุลินทรีย์ทั้งหมด 5.5×10^1 est. CFU/g. ยีสต์และรา 3.5×10^1 est. CFU/g. ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน 107/2546 จากการประเมินการยอมรับของผู้บริโภค มีคะแนนความชอบโดยรวมอยู่ที่ชอบเล็กน้อย (6.00)

ABSTRACT

In Thailand, crackers in the market have high oil and low nutritional values. The objective of this research was to develop a reduced oil and nutritional fish cracker partially substituted with banana flour to be an alternative product for health consumers. The results showed that when using higher amount of banana flour, the product had lower oil content, higher fiber content, higher hardness value and lower expansion ratio. The developed formula contained 20.83 % cassava starch, 0.83 % rice flour, 20 % banana flour, 0.38 % sodium chloride, 0.56 % potassium chloride, 0.56 % glycine, 1.73 % pepper, 1.91 % garlic, 1.1% celery root, 27.14 % water at 80°C. The developed product had 23.1 7 % fat and 2.67 % fiber. This product had L* 39.38, a* 14.16, b* 25.30, hardness 89.81 (N) water activity 0.38 and expansion ratio 2.66. Microbial analysis showed that total plate count was 5.5×10^1 est. CFU/g. and yeast and molds was 3.5×10^1 est. CFU/g. not more than community product standard 107/2546. From consumer acceptance, the overall liking of product was like little (6.00).

Key Words: fish cracker, banana flour, surimi, substitute, sodium chloride

* 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 ซึ่งปัจจุบันพบได้ในผลิตภัณฑ์อาหารสำเร็จรูปพร้อมบริโภคทันทีบางชนิด ได้แก่ มันฝรั่งทอดกรอบ ข้าวเกรียบ และข้าวโพดคั่ว เป็นต้น

ข้าวเกรียบ (Cracker) เป็นขนมขบเคี้ยวที่มีลักษณะเป็นแผ่นบาง พอง กรอบ มีรูพรุนเรียบสม่ำเสมอ ทำมาจากแป้งเป็นส่วนประกอบหลัก เช่น แป้งข้าวเจ้า แป้งมันสำปะหลัง แป้งสาลี เนื้อปลา เครื่องปรุงรสแล้วผสมให้เข้ากัน ทำให้สุกแล้วทำเป็นรูปร่างต่างๆ ทำให้แห้ง นำไปทอดหรืออบก่อนรับประทาน (นิรมล, 2527) นิยมบริโภคกันมานานจนถึงปัจจุบัน แต่ปัญหาของผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบที่พบคือ มีปริมาณน้ำมันสูง และมีคุณค่าทางโภชนาการต่ำ จากปัญหานี้ นักวิจัยพยายามที่จะปรับปรุงผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบให้มีปริมาณน้ำมันน้อยลง และคุณค่าทางโภชนาการสูงขึ้น โดยการใช้แป้งกล้วยทดแทนแป้งมันสำปะหลังบางส่วน ซึ่งแป้งกล้วยทำมาจากกล้วยน้ำว้าระยะดิบ มีคุณค่าทางโภชนาการสูงกว่าแป้งหลายชนิด เช่น แป้งข้าวโพด แป้งมันสำปะหลัง เป็นต้น เนื่องจากกล้วยน้ำว้าเป็นแหล่งที่อุดมไปสารอาหาร มีการศึกษาเกี่ยวกับองค์ประกอบทางเคมีของกล้วย พบว่ากล้วย 1 ผล สามารถให้พลังงานประมาณ 100 แคลอรี่ มีน้ำตาลธรรมชาติอยู่ 3 ชนิด คือ ซูโครส ฟรุกโทส และกลูโคส รวมไปถึงเส้นใยและกากอาหาร กล้วยอุดมด้วยวิตามินบี 6 ที่ช่วยกระตุ้นระบบภูมิต้านทาน แร่ธาตุอย่างแมกนีเซียมและโพแทสเซียม ที่ช่วยป้องกันโรคความดัน โปรตีนที่อยู่ในกล้วยมีกรดอะมิโนอาร์จินิน และฮีสติดีน ซึ่งมีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของทารก (นรินทร์, 2557) แป้งกล้วยจะช่วยป้องกันหรือลดสภาวะโรคอ้วน ลดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคไขมันอุดตันในเส้นเลือด โรคหัวใจ และโรคเบาหวาน เนื่องจากมีสมบัติการย่อยสลายในระบบทางเดินอาหารได้ช้า คือ แป้งกล้วยมี Resistant starch สูง และ Glycemic index ต่ำ เป็นผลให้ระดับน้ำตาลในเลือดอยู่ในสภาวะที่ควบคุมได้ โดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสูงขึ้นหรือต่ำลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นภาวะที่อันตรายสำหรับผู้ป่วยโรคเบาหวาน แป้งกล้วยทนต่อการย่อยด้วยเอ็นไซม์ ทำหน้าที่คล้ายเส้นใยอาหาร ปราศจาก Gluten และจากงานวิจัยของ Yingqiang et al. (2012) พบว่าการทดแทนแป้งกล้วยในแป้งมันสำปะหลังในผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวสามารถลดปริมาณน้ำมันลง โดยการลดระดับการพองตัว ด้วยการลดพื้นที่ผิวและจำนวนของรูพรุนหลังผ่านกระบวนการทอด ช่วยให้สามารถดูดซับน้ำมันได้น้อยลง นอกจากนี้ไฮโดรคอลลอยด์ช่วยให้คุณสมบัติของแป้งกล้วยหรือโปรตีนเป็นไปตามธรรมชาติ สามารถลดการดูดซึมของน้ำมันผ่านการสร้างฟิล์มที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเริ่มต้นที่เกิดขึ้นระหว่างการทอด และมีรายงานว่าแป้งกล้วยประกอบด้วยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่มีแป้ง 12 กรัม / 100 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ซึ่งอาจช่วยในการลดการดูดซึมของน้ำมันได้

ดังนั้นการพัฒนาผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบที่สามารถลดปริมาณน้ำมันและเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการโดยการใช้แป้งกล้วยทดแทนแป้งมันสำปะหลังบางส่วน จึงนับว่าเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีช่องทางจำหน่ายสำหรับผู้ที่ใส่ใจในสุขภาพทั่วไป ซึ่งแนวโน้มอาหารเพื่อสุขภาพกำลังเป็นที่นิยมในปัจจุบัน ดังนั้นการพัฒนาข้าวเกรียบปลาสำเร็จรูป ทดแทนด้วยแป้งกล้วยบางส่วนยังถือเป็นการเพิ่มช่องทางการตลาดของผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพอีกด้วย

อุปกรณ์และวิธีการ

การศึกษาสัดส่วนแป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวเจ้าและแป้งกล้วยที่มีผลต่อคุณภาพข้าวเกรียบปลา

การผลิตแป้งกล้วยดัดแปลงมาจากชุติมา และนิลศิริ (2548) ทำการคัดเลือกกล้วยน้ำว้าที่ระยะความแก่ร้อยละ 90 นับจากวันแทงปลี 17 สัปดาห์ หักออกจากหวีทีละลูก แล้วทำความสะอาด ลวกในน้ำเดือดที่อุณหภูมิ 80 ˚C เป็นเวลา 1 นาที แช่ในน้ำเย็น เป็นเวลา 3 นาที พร้อมสะเด็ดน้ำให้แห้ง ปอกเปลือกและหั่นเป็นแว่นตามขวางหนาประมาณ 1.5 มิลลิเมตร แช่ในสารละลายกรดแอสคอร์บิคความเข้มข้นร้อยละ 0.5 เป็นเวลา 20 นาที อบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 ˚C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง บดเป็นผง และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 mesh บรรจุในถุงอลูมิเนียมฟอยด์ เก็บรักษาในที่แห้ง

นำข้าวเกรียบสูตรลดเกลือ (ดัดแปลงจากศรันยา, 2561) ซึ่งประกอบด้วยแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 38.22 แป้งข้าวเจ้าร้อยละ 2.87 แป้งสาลีร้อยละ 0.57 ซูริมิร้อยละ 24.96 โซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 0.38 โพแทสเซียมคลอไรด์ร้อยละ 0.56 ไกลซีนร้อยละ 0.56 พริกไทยร้อยละ 1.73 กระเทียมร้อยละ 1.91 รากผักชีร้อยละ 1.1 น้ำสะอาดที่อุณหภูมิ 80˚C ร้อยละ 27.14 มาเป็นสูตรควบคุม (Control) และนำมาปรับสูตรโดยการทดแทนแป้งสาลีทั้งหมดด้วยแป้งมันสำปะหลัง จากนั้นศึกษาสัดส่วนแป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวเจ้าและแป้งกล้วย วางแผนการทดลองแบบผสม (Mixture design) ได้สิ่งทดลองทั้งหมด 5 สิ่งการทดลอง โดยทำการผันแปรอัตราส่วนปริมาณของแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 50-100 แป้งข้าวเจ้าร้อยละ 6-10 และแป้งกล้วยร้อยละ 0-50 ส่วนผสมอื่นคงที่ โดยดัดแปลงจากผลงานวิจัยของ Yingqiang et al. (2012); ชุติมา และนิลศิริ (2548) ทำการทดลอง 2 ซ้ำ ดัง Table 1 และใช้กระบวนการผลิตโดยนำซูริมิมาละลายที่อุณหภูมิ 4˚C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นึ่งให้สุกเป็นเวลา 30 นาที ผสมกับแป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวเจ้า แป้งสาลี โซเดียมคลอไรด์ โพแทสเซียมคลอไรด์ ไกลซีน พริกไทย กระเทียม รากผักชี และน้ำ นวดส่วนผสมจนเป็นเนื้อเดียวกัน หลังจากนั้นขึ้นรูปเป็นทรงกระบอก (เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว, ความยาวประมาณ 7-8 นิ้ว) นึ่งให้สุกเป็นเวลา 1 ชั่วโมง (เส้นผ่านศูนย์กลาง 1½ นิ้ว) แช่ในห้องเย็นที่อุณหภูมิ 5˚C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง หั่นเป็นชิ้นหนา 1 มิลลิเมตร จากนั้นอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60˚C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำมาทอดในน้ำมันปาล์มที่อุณหภูมิ 175-200 ˚C เป็นเวลา 4-5 วินาที บรรจุไว้ในถุงอลูมิเนียมฟอยด์ เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง โดยดัดแปลงวัตถุดิบมาจากการศึกษาของกัทลี (2551)

Table 1 Mixture design of fish cracker with different levels of banana flour

Treatment	Ratio cassava starch: rice flour: banana flour	Factors in experiment (%)		
		Cassava starch	Rice flour	Banana flour
1	98 : 2 : 0	40.83	0.83	0
2	90 : 10 : 0	37.5	4.16	0
3	50 : 10 : 40	20.83	4.16	16.67
4	50 : 2 : 48	20.83	0.83	20.00
5	70 : 5.5 : 24.5	29.16	2.29	10.21

จากนั้นนำสิ่งทดลองทั้ง 5 สิ่งทดลองที่ได้ทดสอบเปรียบเทียบกับสูตรควบคุม วิเคราะห์คุณภาพทางเคมี ได้แก่ ปริมาณไขมัน เส้นใยหยาบ (AOAC, 1995) วิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ ได้แก่ ค่าสี โดยนำข้าวเกรียบบดให้ละเอียดใส่ใน Petri dish วัดค่าสีด้วยเครื่อง Spectrophotometer ยี่ห้อ Minolta รุ่น CM-3500d ด้วยการวัด Reflectance (%R) โดยใช้แหล่งกำเนิดแสง D_{65}, Observer 10 องศา, ขนาด Aperture 30 มิลลิเมตร ค่าสีที่วัดได้แก่ ค่า L* (ความสว่าง), a* (ทิศทางของสีแดง) และb* (ทิศทางของสีเหลือง) ทดลอง 10 ซ้ำ และค่าเนื้อสัมผัสด้วยเครื่อง Texture analyser รุ่น TA.XT Plus หัววัดทรงกลม (Spherical probe) P/0.25s กดลงบนตรงกลาง

ตัวอย่าง หัวกดเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 2 มิลลิเมตรต่อวินาที แรงกด 5 กรัม ด้วยระยะทางการกดลงบนตัวอย่าง 5 มิลลิเมตร ทำการบันทึกค่า Hardness (ความแข็ง) มีหน่วยเป็นนิวตัน (N) ทดลอง 10 ซ้ำ และค่า Water activity (a_w) บดข้าวเกรียบให้ละเอียดใส่ในตลับพลาสติก วัดค่าด้วยเครื่อง Aqualab ทดลอง 3 ซ้ำ และอัตราการพองตัว (Expansion ratio) โดยวัดปริมาตรของข้าวเกรียบก่อนอบและหลังอบด้วยการแทนที่ของงา (อุบลรัตน์, 2549) ทดลอง 3 ซ้ำ วิเคราะห์คุณภาพทางจุลินทรีย์ ได้แก่ ปริมาณแบคทีเรีย ปริมาณยีสต์และรา และทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น ความกรอบ รสเค็ม รสชาติโดยรวมและความชอบโดยรวม โดยวิธีให้คะแนนความชอบแบบ 9-point hedonic scale และความพอดีด้านสีและความกรอบ แบบ 3-point just about right โดยใช้เกณฑ์ Meandrop น้อยกว่าร้อยละ 1,5 และมีจำนวนคนมากกว่าร้อยละ 70 จึงถือว่ามีความสำคัญในระดับมาก ต้องมีการปรับระดับลักษณะนั้นๆ ใช้ผู้บริโภคกลุ่มรักสุขภาพทั่วไปจำนวน 50 คน แล้ววิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS เวอร์ชั่น 12.0

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การศึกษาสัดส่วนแป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวเจ้าและแป้งกล้วยที่มีผลต่อคุณภาพข้าวเกรียบปลา

จากการศึกษาสัดส่วนแป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวเจ้าและแป้งกล้วยที่มีผลต่อคุณภาพข้าวเกรียบปลา ผลการทดสอบทางเคมีแสดงใน Table 2 พบว่าการวิเคราะห์ปริมาณไขมันของข้าวเกรียบทั้ง 5 สูตรเปรียบเทียบกับสูตรควบคุม มีปริมาณไขมันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) ซึ่งมีปริมาณไขมันน้อยกว่าสูตรควบคุม โดยสูตร 3 และสูตร 4 ที่มีแป้งกล้วยร้อยละ 40 และร้อยละ 48 ตามลำดับ มีปริมาณไขมันน้อยที่สุด ส่วนการวิเคราะห์ปริมาณเส้นใยหยาบ โดยสูตรควบคุมมีปริมาณเส้นใยหยาบไม่แตกต่างกับสูตร 1 สูตร 2 และสูตร 5 แต่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) กับสูตร 3 และสูตร 4 เนื่องจากสูตร 3 และสูตร 4 มีปริมาณแป้งกล้วยร้อยละ 40 และร้อยละ 48 ตามลำดับ มีปริมาณเส้นใยหยาบมาก จึงแตกต่างกับสูตร 5 ที่มีแป้งกล้วยร้อยละ 24.52 และมีปริมาณเส้นใยหยาบไม่แตกต่างกับสูตรควบคุม สอดคล้องกับงานวิจัยของ Yingqiang et al. (2012) ซึ่งรายงานว่า การใช้แป้งกล้วยทดแทนแป้งมันสำปะหลังบางส่วน ทำให้เพิ่มคุณค่าทางโภชนาการ เส้นใยอาหาร แร่ธาตุที่จำเป็น สารต้านอนุมูลอิสระ และสามารถลดปริมาณน้ำมันได้ที่อุณหภูมิแตกต่างกันขึ้นอยู่กับระดับการทดแทนแป้งมันสำปะหลัง ดังนั้นการทดแทนแป้งกล้วยบางส่วนมีผลต่อปริมาณไขมันและเส้นใยหยาบในผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบปลาสำเร็จรูปทดแทนด้วยแป้งกล้วยบางส่วน

Table 2 Chemical analysis of fish cracker with different levels of banana flour

Treatment	Fat (%)	Fiber (%)
Control	34.91±0.98^{a}	2.12±0.34^{c}
1	28.49±0.57^{c}	1.99±0.13^{c}
2	30.68±0.63^{b}	2.20±0.45^{bc}
3	22.02±0.51^{d}	2.98±0.23^{a}
4	23.17±0.76^{d}	2.67±0.27^{ab}
5	28.46±0.19^{c}	2.15±0.09^{bc}

Different letters (^{a}, ^{b}, ^{c}, ^{d}) with in the same column indicate significantly different ($P \leq 0.05$)

Control: Ratio cassava starch: rice flour: wheat flour (91.7:6.9:1.4), Treatment 1: Ratio cassava starch: rice flour: banana flour (98:2:0), Treatment 2: Ratio cassava starch: rice flour: banana flour (90:10:0), Treatment 3: Ratio cassava starch: rice flour: banana flour (50:10:40), Treatment 4: Ratio cassava starch: rice flour: banana flour (50:2:48), Treatment 5: Ratio cassava starch: rice flour: banana flour (70:5.5:24.52)

ผลการทดสอบทางกายภาพแสดงใน Table 3 พบว่าการวัดค่าสีของข้าวเกรียบทั้ง 5 สูตร เปรียบเทียบกับสูตรควบคุม มีค่า L* (ความสว่าง) ค่า a* (สีแดง) และค่า b* (สีเหลือง) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) โดยสูตรที่มีแป้งกล้วยจะมีค่า L* ต่ำ และ a* สูง เนื่องจากแป้งกล้วยจะเกิดสีน้ำตาลจากปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนของสารจำพวกฟีนอลหรือโพลีฟีนอล โดยมีเอนไซม์ฟีนอลออกซิเดส, ฟีนอลเลส, โพลีฟีนอลออกซิเดส และโพลีฟีนอลเลส เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อปอกเปลือกหรือหั่นกล้วยทิ้งไว้สัมผัสกับอากาศจะเกิดสีน้ำตาลหรือสีคล้ำขึ้น ซึ่งสามารถป้องกันการเกิดสีน้ำตาลหรือสีคล้ำได้โดยใช้สารเคมีทำลายเอนไซม์ ปรับค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ให้เป็นกรด เป็นวิธีการที่สะดวก ราคาถูก และไม่มีผลต่อคุณภาพของแป้งกล้วย (จุฑา และคณะ, 2554) และการวัดเนื้อสัมผัส สูตรควบคุมมีค่า Hardness ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P>0.05$) กับทุกสูตร แต่สูตร 1 และสูตร 2 แตกต่างกับสูตร 3 และสูตร 4 แต่ไม่แตกต่างกับสูตร 5 และสูตรควบคุมมีค่า Expansion ratio ไม่แตกต่างกับสูตร 2 และสูตร 3 แต่แตกต่างกับสูตร 3 สูตร 4 และสูตร 5 เนื่องจากแป้งกล้วยมีปริมาณแอมิโลสร้อยละ 15-23 และแอมิโลเพคตินร้อยละ 77-85 ซึ่งการที่แป้งกล้วยมีปริมาณแอมิโลเพคตินสูงทำให้ลักษณะเนื้อสัมผัสมีความแข็งเพิ่มขึ้น Expansion ratio ลดลง ซึ่งต่างกับแป้งมันสำปะหลังที่มีปริมาณแอมิโลเพคตินต่ำกว่าแป้งกล้วยทำให้ลักษณะเนื้อสัมผัสกรอบ มี Expansion ratio มาก (Yingqiang et al., 2012) ดังนั้นจึงระบุได้ว่าการมีปริมาณแป้งกล้วยมากจะทำให้ค่า Hardness สูงขึ้น และค่า Expansion ratio ลดลง ส่วนการวัดค่า a_w ของข้าวเกรียบทั้ง 5 สูตร เปรียบเทียบกับสูตรควบคุมไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P>0.05$) แสดงว่าการทดแทนแป้งกล้วยบางส่วนไม่มีผลต่อคุณภาพทาง a_w แต่มีผลทางด้านสี Hardness และ Expansion ratio

Table 3 Physical analysis of fish cracker with different levels of banana flour

Treatment	Color			Hardness	Water	Expansion
	L*	a*	b*	(N)	activity^{ns}	ratio
Control	60.53±0.26^{a}	7.33±0.05^{d}	29.15±0.12^{a}	87.15±0.82^{ab}	0.39±0.00	5.00±1.44^{a}
1	60.34±0.15^{a}	5.32±0.01^{f}	26.32±0.05^{d}	84.99±0.41^{b}	0.38±0.00	3.83±1.25^{ab}
2	60.37±0.01^{a}	5.73±0.09^{e}	28.54±0.19^{b}	84.45±4.16^{b}	0.38±0.00	4.16±1.44^{ab}
3	41.32±0.06^{c}	13.65±0.12^{b}	25.27±0.02^{e}	89.00±0.85^{a}	0.39±0.00	1.83±0.28^{c}
4	39.38±0.08^{d}	14.16±0.05^{a}	25.30±0.05^{e}	89.81±1.60^{a}	0.38±0.00	2.66±0.57^{bc}
5	50.18±0.06^{b}	10.92±0.04^{c}	27.66±0.05^{c}	86.19±0.23^{ab}	0.38±0.00	2.66±1.15^{bc}

Different letters (^{a}, ^{b}, ^{c}, ^{d}) with in the same column indicate significantly different ($P \leq 0.05$)

Letters (^{ns}) within the same column and row indicate not significantly different ($P>0.05$)

ผลการทดสอบทางจุลินทรีย์แสดงใน Table 4 พบว่าการวิเคราะห์จุลินทรีย์ทั้งหมด ยีสต์และรา ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน 107/2546 กำหนดให้มีจุลินทรีย์ไม่เกิน 1×10^{4} โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม ยีสต์และราไม่เกิน 100 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม เนื่องจากขั้นตอนการทำแป้งกล้วยและการทำข้าวเกรียบปลามีการผ่านกระบวนการให้ความร้อนสูง และทำให้แห้ง ความชื้นต่ำ ยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์

Table 4 Microbiological analysis of fish cracker with different levels of banana flour

Treatment	Total plate count (CFU/g.)^{ns}	Yeast and mold (CFU/g.)^{ns}
Control	3.5×10^{1} est.	3.0×10^{1} est.
1	1×10^{2} est.	4.0×10^{1} est.
2	2.0×10^{1} est.	1.0×10^{1} est.
3	<10 est.	1.5×10^{1} est.
4	5.5×10^{1} est.	3.5×10^{1} est.
5	1.5×10^{1} est.	5×10^{0} est.

ผลการทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคแสดงใน Table 5 พบว่าค่าคะแนนกลิ่น รสเค็ม รสชาติโดยรวม และความชอบโดยรวมไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P>0.05$) แต่มีค่าคะแนนลักษณะปรากฏ สี และความกรอบแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P\leq0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบด้านสี และลักษณะเนื้อสัมผัสโดยใช้เครื่องมือทางกายภาพ โดยทุกสูตรมีค่าคะแนนความชอบโดยรวมอยู่ที่ชอบเล็กน้อยถึงปานกลาง แต่สูตร 3 สูตร 4 และสูตร 5 ที่มีแป้งกล้วย จะทำให้คะแนนทางด้านลักษณะปรากฏ สี และความกรอบลดลง เนื่องจากแป้งกล้วยเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลมาจากเอนไซม์ เป็นปฏิกิริยา oxidation เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผลิตข้าวเกรียบ หลังนึ่งต้องโดนอากาศเพื่อให้เย็นตัวลง ทำให้เอนไซม์ สารที่ทำปฏิกิริยาและออกซิเจนเข้ามาสัมผัสกัน สาร monophenol จะถูกออกซิไดซ์เป็น diphenol และถูกออกซิไดซ์ต่อเป็น o-quinone ซึ่งจะทำปฏิกิริยาต่อกับกรดแอมิโนหรือโปรตีนได้เป็นสารสีน้ำตาล ส่งผลให้ข้าวเกรียบมีสีที่คล้ำขึ้น และจะรวมตัวกันเป็นพอลิเมอร์ที่มีโมเลกุลใหญ่และมีสีน้ำตาล ทำให้คะแนนด้านลักษณะปรากฏและสีลดลง การใช้แป้งกล้วยซึ่งมีปริมาณแอมิโลเพคตินสูง ทำให้ลักษณะเนื้อสัมผัสมีความแข็งเพิ่มขึ้น Expansion ratio ลดลง ส่งผลให้คะแนนด้านความกรอบลดลง เมื่อพิจารณา Just about right scale ด้านสี พบว่าผู้ทดสอบให้คะแนนความถี่ สูตรควบคุม สูตร 1 และสูตร 2 ในระดับสีที่พอดี สูตร 3 สูตร 4 และสูตร 5 ในระดับสีที่มากเกินไป จากนั้นวิเคราะห์ Penalty พบว่า สูตร 5 มีค่า TM ของ Meandrop น้อยกว่า 1.5 และมีจำนวนคนมากกว่าร้อยละ 20 จึงถือว่ามีความสำคัญในระดับปานกลาง สูตร 3 และสูตร 4 มีค่า TM ของ Meandrop น้อยกว่า 1.5 และมีจำนวนคนมากกว่าร้อยละ 70 จึงถือว่ามีความสำคัญในระดับมาก แต่เมื่อพิจารณาอุปสรรคและโอกาสจะพบว่า สูตร 5 มีอุปสรรคมากกว่าโอกาส ไม่ต้องมีการปรับระดับด้านสีแต่อย่างใด เพราะอาจจะมีความเสี่ยงต่อความชอบของผู้บริโภคได้ ส่วนสูตร 3 และสูตร 4 มีโอกาสมากกว่าอุปสรรค ต้องมีการปรับระดับด้านสีให้มีสีอ่อนลง และพิจารณา Just about right scale ด้านความกรอบ พบว่าผู้ทดสอบให้คะแนนความถี่ สูตรควบคุม สูตร 1 สูตร 2 และสูตร 5 ในระดับความกรอบที่พอดี สูตร 3 และสูตร 4 ในระดับความกรอบที่มากเกินไป จากนั้นวิเคราะห์ Penalty พบว่า สูตร 3 และสูตร 4 มีค่า TM ของ Meandrop น้อยกว่า 1.5 และมีจำนวนคนมากกว่าร้อยละ 20 จึงถือว่ามีความสำคัญในระดับปานกลาง เมื่อพิจารณาอุปสรรคและโอกาสจะพบว่า มีอุปสรรคมากกว่าโอกาส ไม่ต้องมีการปรับระดับด้านความกรอบแต่อย่างใด เพราะอาจจะมีความเสี่ยงต่อความชอบของผู้บริโภคได้ ดังนั้นจึงเลือกสูตร 4 ที่มีปริมาณแป้งกล้วยมากที่สุด ร้อยละ 48 เนื่องจากผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสมีค่าคะแนนความชอบโดยรวมไม่แตกต่างกับสูตรอื่น มีปริมาณไขมันต่ำและเส้นใยหยาบสูง โดยการทดสอบความพอดีของสูตร 4 แสดงใน Figure 1 พบว่าไม่ต้องมีการ

ปรับระดับความกรอบ ส่วนความพอดีด้านสีควรมีการปรับให้มีระดับสีที่อ่อนลง เนื่องจากมีโอกาสมากกว่าอุปสรรค หากมีการปรับจะทำให้ความชอบของผู้บริโภคชอบมากขึ้น

Table 5 Liking scores of fish cracker with different levels of banana flour

	Control	1	2	3	4	5
Appearance	6.93±1.06^{a}	7.04±1.00^{a}	7.06±0.97^{a}	6.22±1.15^{b}	6.14±0.98^{b}	6.29±1.11^{b}
Color	6.89±1.07^{a}	7.04±1.05^{a}	7.12±0.93^{a}	6.00±0.77^{b}	6.00±1.01^{b}	6.18±1.12^{b}
Odor^{ns}	6.20±1.45	6.77±1.17	6.25±1.26	6.20±0.87	6.25±0.86	6.10±1.05
Crispness	7.20±1.09^{a}	7.29±0.96^{a}	7.08±1.18^{ab}	6.56±1.10^{c}	6.68±0.90^{bc}	6.75±1.00^{bc}
Salty^{ns}	6.04±1.33	6.02±1.21	6.02±1.15	6.00±0.82	6.02±0.69	6.02±1.06
Overall taste^{ns}	6.16±1.31	6.14±1.28	6.02±1.10	6.04±0.87	6.02±0.86	6.06±0.88
Overall liking^{ns}	6.31±1.29	6.35±1.21	6.25±1.19	6.00±0.74	6.00±0.65	6.10±0.72

Different letters (^{a}, ^{b}, ^{c}, ^{d}) with in the same column indicate significantly different ($P \leq 0.05$)

Letters (^{ns}) within the same column and row indicate not significantly different ($P>0.05$)

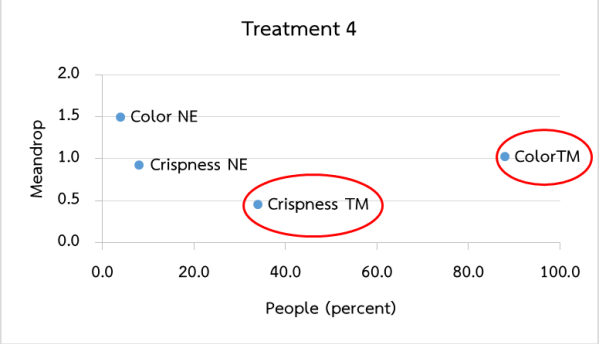


Figure 1 Penalty analysis from just about right scale of Treatment 4

สรุป

จากการศึกษาสัดส่วนแป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวเจ้าและแป้งกล้วยในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบปลาสำเร็จรูปทดแทนด้วยแป้งกล้วยบางส่วน พบว่าสูตรที่เหมาะสมมีปริมาณแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 20.83 แป้งข้าวเจ้าร้อยละ 0.83 แป้งกล้วยร้อยละ 20 มีคุณภาพทางด้านเคมีแตกต่างกับสูตรควบคุม โดยสูตรที่พัฒนาได้มีปริมาณไขมันร้อยละ 23.17 และปริมาณเส้นใยหยาบร้อยละ 2.67 คุณภาพทางด้านกายภาพ ดังนี้ ค่าสี L* a* b* เท่ากับ 39.38 14.16 และ 25.30 ตามลำดับ ค่า Hardness 89.81 นิวตัน ส่วนค่าอัตราการพองตัว 2.66 เท่า และมีค่า Water activity 0.38 ซึ่งไม่แตกต่างกับสูตรควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) คุณภาพทางด้านจุลินทรีย์มีจุลินทรีย์ไม่เกินมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน 107/2546 จากการประเมินการยอมรับของผู้บริโภค มีคะแนนความชอบโดยรวมอยู่ที่ชอบเล็กน้อยถึงปานกลาง แต่ควรมีการปรับในด้านสีให้มีระดับอ่อนลง ซึ่งงานวิจัยต่อเนื่องควรแก้ปัญหาด้านสี จากงานวิจัยนี้ผลิตภัณฑ์ที่พัฒนาได้สามารถลดปริมาณน้ำมันและเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการ เป็นทางเลือกหนึ่งให้กับคนที่รักสุขภาพทั่วไปเลือกรับประทาน และผลจากงานวิจัยนี้สามารถนำไปต่อยอดสำหรับผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวอื่นๆ ได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่สนับสนุนงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา

เอกสารอ้างอิง

กัทลี จันทร์เจนจบ. 2551. **การใช้โครงข่ายใยประสาทเทียมในการทำนายกระบวนการอบแห้งของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปรสกะเพรา**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

จุฑา พีรพัชระ, ธานี สุคนธะชาติ, อรอุมา มุ่งเจียกกลาง, ชนิดา ประจักษ์จิตร, เจนจิรา บ.ป.สูงเนิน และแสงแข สพันธุพงศ์. 2554. **การเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์แปรรูปจากกล้วย เพื่อใช้ประโยชน์เชิงพาณิชย์**. ศูนย์คลินิกเทคโนโลยีสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.

ชุติมา อัศวเสถียร และนิลศิริ นิลเนตร. 2548. **การทดแทนแป้งข้าวเจ้าด้วยแป้งกล้วยในก๋วยเตี๋ยวเส้นใหญ่**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นรินทร์ เจริญพันธ์. 2557. **การผลิตภัณฑ์คุ้กกี้ปราศจากกลูเตนจากแป้งกล้วยน้ำหว้า**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยบูรพา.

ศรันยา บุญมาเลิศ และ เสาวณีย์ เลิศวรสิริกุล. 2561. **ผลการทดแทนเกลือด้วยโพแทสเซียมคลอไรด์และไกลซีนต่อคุณภาพของข้าวเกรียบซูริมิ**, น. 601-608. ในรายงานการประชุมทาง วิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 56 (สาขาอุตสาหกรรมเกษตร). มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา กระทรวงสาธารณสุข. 2559. **“ประกาศกระทรวสาธารณสุข (ฉบับที่ 373) พ.ศ. 2559 เรื่อง การแสดงสัญลักษณ์โภชนาการบนฉลากอาหาร”**. ราชกิจจานุเบกษา ฉบับทั่วไปเล่ม 133 ตอนที่ 47ง กรุงเทพฯ

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2546. **มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน เรื่อง ข้าวเกรียบ**. มผช. 107/2546.

อุบลรัตน์ พรหมฟัง. 2549. **ผลิตภัณฑ์ข้าวแต๋นเสริมใยอาหารจากสับปะรดและการยอมรับของผู้บริโภค: กรณีศึกษาในเขตจังหวัดลำปาง**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

AOAC. 1995. **Official Method of analysis International**. 16th ed. The association of official analytical Chemists, Virginia: 1588.

Yingqiang, W., M. Zhang, and A.S. Mujumdar. 2012. **Influence of green banana flour substitution for Cassava starch on the nutrition, color, texture and sensory quality in two types of snacks**. Food science and technology. 47: 175-182.

การพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวที่มีส่วนผสมของเนื้อปลาด้วยแป้งกล้วย

Development of Fish Snack Product with Banana Flour

อารียา ปอเจริญ[1] และ เสาวณีย์ เลิศวรสิริกุล[1*]

Areeya Porcharoen[1] and Saowanee Lertworasirikul[1*]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของการใช้แป้งกล้วยทดแทนแป้งมันสำปะหลังในส่วนผสมของขนมขบเคี้ยวที่มีส่วนผสมของเนื้อปลา โดยตัวอย่างมีลักษณะแผ่นเรียบบางกรอบ ซึ่งวางแผนการทดลองแบบ Completely randomized design (CRD) ศึกษาอัตราส่วนของแป้งกล้วยทดแทนแป้งมันสำปะหลัง ที่ร้อยละ 100 75 50 25 และ 0 (ตัวอย่างควบคุม) รวมทั้งหมด 5 สิ่งทดลอง คัดเลือกสูตรที่เหมาะสมด้วยการประเมินคุณภาพทางกายภาพ เคมี และประสาทสัมผัส พบว่าการใช้แป้งกล้วยทดแทนการใช้แป้งมันสำปะหลังที่ร้อยละ 75 มีคะแนนความชอบเฉลี่ยในทุกคุณลักษณะทางประสาทสัมผัส (9 - point hedonic scales) มากที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$). และผลการประเมินคุณภาพทางกายภาพพบว่า ค่าL*, b* และความแข็ง (Hardness) มีความแตกต่างจากตัวอย่างควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เมื่อยิ่งใช้แป้งกล้วยในปริมาณที่มาก ส่งผลต่อค่า L* และค่า b* ลดลง ในขณะที่ค่าความแข็ง (Hardness) เพิ่มมากขึ้น ทางด้านคุณภาพทางเคมี แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างที่ใช้แป้งกล้วยทดแทนมากขึ้นจะมีปริมาณของเถ้าที่สูงขึ้น

ABSTRACT

This research studied the effect of banana flour to substitute cassava starch in the mixture of fish snack which the sample appearance is thin and crispy. The experimental design was a completely randomized design (CRD) which studied the percentage of the banana flour to substitute cassava starch at 100%, 75%, 50%, 25% and 0% (control) in fish snack. The samples were selected based on the analysis of physical, sensory and chemical qualities. Sensory evaluation showed that using banana flour to substitute cassava starch at 75% had the highest average liking scores (9 - point hedonic scales) in all sensory attributes with the overall liking scores statiscically different from the control treatment. The physical results revealed that the color (L* and b*) and hardness of the treatment were significantly different from the control. ($p \leq 0.05$) Using the higher banana flour in the formula, L * and b * values were decreased, while the hardness was increased. The results of chemical analysis showed that ash values was increased when the banana flour was increased.

Key Words: Fish snack, Banana flour

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

[1]ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Product Development, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok, 10900

บทนำ

กล้วยถูกจัดให้เป็นผลไม้ที่อยู่คู่กับชาวไทยมาอย่างยาวนาน สามารถเพาะปลูกไปทั่วภูมิภาคของประเทศไทย (เบญจมาศ, 2545) หาซื้อได้ง่ายและราคาถูก ถูกจัดให้เป็น 1 ใน 24 ชนิดของผลไม้ที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพมากที่สุด แต่กล้วยมีวงจรชีวิตที่สั้น เกิดการเสื่อมสภาพได้ง่าย ดังนั้นจะเห็นได้ว่ามีผลิตภัณฑ์แปรรูปจากกล้วยหลากหลายรูปแบบ เช่น กล้วยตาก กล้วยทอด เป็นต้น จะเห็นได้ว่าในปัจจุบันนี้ กล้วยน้ำว้าอยู่ในสภาวะล้นตลาด เนื่องจากมีผู้เพาะปลูกส่งสินค้าออกสู่ท้องตลาดเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้มีราคาจัดจำหน่ายถูกลงกว่าปีที่ผ่านมา โดยวางขายในราคาหวีละ 20 บาท จากเดิม 60-70 บาท (INN News, 2560) ดังนั้นหากนำกล้วยมาแปรรูปให้อยู่ในรูปของแป้งกล้วยนอกจากจะทำให้สามารถยืดอายุการเก็บโดยยังคงคุณค่าทางสารอาหารได้ครบถ้วน แป้งกล้วยยังมีคุณสมบัติทางกายภาพและเคมี ที่ใกล้เคียงกับแป้งมันสำปะหลัง เนื่องจากมีปริมาณอะไมโลสใกล้เคียงกัน มีความสามารถในการละลายน้ำ และการพองตัวใสเมื่อได้รับความร้อน ดังนั้นแป้งกล้วยจึงมีคุณสมบัติเหมาะที่จะนำมาทดแทนในผลิตภัณฑ์ขนมอบ (ญาณิศา และคณะ,2536) นอกจากนั้นยังมีงานวิจัยรายงานว่าแป้งกล้วยน้ำว้ามีปริมาณแคลเซียมสูงประมาณ 20 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ซึ่งสูงกว่าพืชหัว ผัก และผลไม้ชนิดอื่นๆ ที่สามารถนำมาผลิตเป็นแป้งได้ (ทวีเกียรติ ยิ้มสวัสดิ์, 2527; เบญจมาศ ศิลาย้อย, 2545; ดรุณี มูลโรจน์, 2550) รวมไปถึงในแป้งกล้วยมีค่าไกลซิมิคอินเดกซ์ต่ำ (Glycemic Index) และปริมาณคอเลสเตอรอส (LDL) ต่ำ ถือว่าเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจที่นำแป้งกล้วยมาทดแทนแป้งสาลีและแป้งมันสำปะหลัง เพื่อเพิ่มมูลค่าและสร้างความแตกต่างให้แก่ผลิตภัณฑ์

ขนมขบเคี้ยวที่มีส่วนผสมของเนื้อปลา หรืออาหารว่างจากเนื้อปลา (fish snack) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ใช้เนื้อปลาเป็นส่วนผสมหลัก คลุกเคล้าเข้ากับแป้งมันสำปะหลัง แป้งสาลี น้ำตาล เกลือ และผงปรุงรส จากนั้นนำผ่านกระบวนการผลิตด้วยความร้อน (ย่าง นึ่ง อบ ทอด)เพื่อขึ้นรูป (ศูนย์วิจัยกสิกรไทย, 2553) อีกทั้งยังนับว่าเป็นขนมที่มีสารอาหาร มีประโยชน์ต่อร่างกาย ถูกจัดลำดับให้เป็น 1 ใน 10 เทรนด์ตลาดอาหารและเครื่องดื่มในปี 2559 (New Nutrition Business, 2559) รวมทั้งมีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ อยู่ตลอดเวลา ประกอบกับความชอบของผู้บริโภคที่มุ่งเน้นขนมขบเคี้ยวที่ดีต่อสุขภาพและมีนวัตกรรมใหม่ ผู้ผลิตต้องทำการปรับเปลี่ยนสินค้าให้สอดคล้องกับความต้องการของผู้บริโภคด้วยการสร้างสินค้าระดับพรีเมียม ใช้วัตถุดิบจากธรรมชาติ รสชาติเป็นที่ถูกปากและดีต่อสุขภาพเพื่อให้เข้าถึงผู้บริโภคมากกว่าคู่แข่ง ทำให้เกิดความได้เปรียบในการขายสินค้าค่อนข้างมาก ประกอบกับขนมขบเคี้ยวมีส่วนผสมของแป้งมันสำปะหลัง เพื่อช่วยด้านการพองตัว ดังนั้นงานวิจัยนี้มีแนวคิดพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวด้วยการนำแป้งกล้วยมาทดแทนแป้งสำปะหลัง เพื่อเป็นผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวทางเลือกใหม่ที่มีคุณค่าทางโภชนาการจากเนื้อปลาและแป้งกล้วย

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมวัตถุดิบ

กระบวนการผลิตของปลาแผ่นอบกรอบ

นำเนื้อปลาบด และส่วนผสมอื่นตาม Table 1 มาปั่นผสมกัน ประมาณ 15 นาที แบ่งใส่กระดาษไขประมาณ 30 กรัมต่อแผ่น แล้วทำการขึ้นรูปผ่านเครื่องรีดด้วยลูกกลิ้ง ให้มีความหนาประมาณ 1.5 - 1.7 มิลลิเมตร เข้าเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที นำปลาแผ่นที่ได้จากการอบลมร้อนมาปิ้งบนเตา Infrared เป็นเวลา 1 นาที (ด้านละ 30 วินาที) นำแผ่นปลามาตัดให้ได้ขนาด กว้าง × ยาว (3.5 ซม.×

3.5 ซม.) นำ มาอบลมร้อนเพื่อไล่ความชื้น ที่ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชม. ดัดแปลงจาก (วันชัย และณัฐธร, 2551) ในส่วนของแป้งกล้วยเตรียมโดยดัดแปลงจาก (ชุติมา และนิลศิริ (2552) และปิยนุสร์ และปัทมา (2548)

การศึกษาอัตราส่วนของแป้งกล้วยทดแทนแป้งมันสำปะหลังในผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวที่มีส่วนผสมของเนื้อปลา

จากการศึกษาทัศนคติและพฤติกรรมการบริโภคขนมขบเคี้ยวที่มีส่วนผสมของ เนื้อปลา ด้วยการทำแบบสอบถามผู้บริโภคทั่วไปทั้งหมด 100 คน พบว่ารสชาติที่ผู้บริโภคส่วนใหญ่เลือกมากที่สุด ได้แก่ ต้มยำ ทำการพัฒนาสูตรจากสูตรพื้นฐาน เพื่อนำมาศึกษาต่อในอัตราส่วนของแป้งกล้วยทดแทนแป้งมันสำปะหลังในผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวที่มีส่วนผสมของเนื้อปลา ด้วยการวางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) ทำการปรับอัตราส่วนของแป้งกล้วยทดแทนแป้งมันสำปะหลัง เป็นร้อยละ 100 75 50 25 และ 0 (ตัวอย่างควบคุม) รวมทั้งหมด 5 สิ่งทดลอง อัตราส่วนผสมดัง Table 1 และวิธีการผลิตดังขั้นตอนการเตรียม

Table 1 Ratio of banana flour to substitute cassava starch in fish snack

	Replace with banana flour				
Ingredients	TRT1 (0%)	TRT2 (25%)	TRT3 (50%)	TRT4 (75%)	TRT5 100%)
Fish meat	65	65	65	65	65
Cassava starch	20	15	10	5	0
Banana flour	0	5	10	15	20
Powder Tom Yum	3	3	3	3	3
Maltitol	12	12	12	12	12

ดัดแปลงจาก : ประวีณา และอารีย์ (2546)

จากนั้นทำการคัดเลือกด้วยการประเมินคุณภาพทางกายภาพ ได้แก่ วัดค่าเนื้อสัมผัส โดยใช้เครื่อง TA-XI Texture Analyzer หัววัดทรงกลม (Spherical probe) P/0.25s กดลงบนตรงกลางของตัวอย่าง ความเร็วหัวกด (test speed) 2 มิลลิเมตรต่อวินาที แรงกด 5 กรัม เป็นระยะทาง 5 มิลลิเมตร บันทึกผลเป็นแรงกด ในหน่วยนิวตัน โดยวัดตัวอย่างๆละ 10 ซ้ำ ดัดแปลงจาก Salvador et al., (2009) วัดค่าสีด้วยเครื่อง Spectrophotometer ยี่ห้อ Minolta รุ่น CM-3500d ในระบบ CIE L* a* b* โดยวัดตัวอย่างๆละ 5 ซ้ำ และวัดค่า water activity (a_w) ตัวอย่างๆละ3 ซ้ำ ด้วยเครื่องวัดค่า water activity ยี่ห้อ Novasina (MS1-Aw, Switzerland) ควบคุมอุณหภูมิที่ (25 ± 2) องศาเซลเซียส ประเมินคุณภาพทางเคมี ได้แก่ ปริมาณความชื้น โปรตีน ไขมัน เส้นใยหยาบ และเถ้า (AOAC, 1995) และการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสใช้วิธีการให้คะแนนความชอบโดยใช้วิธี 9- point hedonic scales ด้วยผู้บริโภคทั่วไปอายุในช่วง 25 - 40 ปี จำนวน 50 คน เพื่อคัดเลือกสูตรที่ผู้บริโภคยอมรับมากที่สุด โดยมีคุณลักษณะที่ทดสอบคือ ลักษณะปรากฏ สี กลิ่นปลา ความกรอบ รสหวาน รสเค็ม และความชอบโดยรวม และ 3-point just about right (JAR) เพื่อศึกษาความพอดีของ สี รสหวาน รสเค็ม และความกรอบของผลิตภัณฑ์ โดยคำนวนค่า Mean drop และ % Risk เพื่อหาแนวทางในการปรับคุณลักษณะ ซึ่งหากค่า Opportunity มากกว่าค่า Risk ให้ปรับทิศทางตามค่า Total Penalty ที่มากที่สุด นำข้อมูลที่ได้จากการ

วัดค่าทางประสาทสัมผัสมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan โดยใช้โปรแกรม SPSS Version 12.0

วิธีการคำนวน Mean drop และ % Risk & Opportunity (ดัดแปลงจาก Meligaard *et al*., 1999)

Mean drop = คะแนนเฉลี่ยคนที่ตอบพอดี – คะแนนเฉลี่ยคนที่ตอบ(น้อย/มาก)เกินไป

Penalty = (จำนวนคนที่ตอบ(น้อย/มาก)เกินไป/จำนวนคนทั้งหมด) *100

Total Penalty (net effect) = (Penalty (net effect)/100) * Mean drop (net effect)

% Risk = (จำนวนคนที่ชอบคุณลักษณะ และผลิตภัณฑ์/(จำนวนคนที่ชอบคุณลักษณะ และผลิตภัณฑ์+จำนวนคนที่ไม่ชอบคุณลักษณะ แต่ชอบผลิตภัณฑ์))*100

% Opportunity = (จำนวนคนที่ไม่ชอบคุณลักษณะ และผลิตภัณฑ์/(จำนวนคนที่ชอบคุณลักษณะ แต่ไม่ชอบผลิตภัณฑ์+จำนวนคนที่ไม่ชอบคุณลักษณะ และไม่ชอบผลิตภัณฑ์))*100

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การศึกษาอัตราส่วนของแป้งกล้วยทดแทนแป้งมันสำปะหลังในผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวที่มีส่วนผสมของเนื้อปลา

จากการศึกษาอัตราส่วนของแป้งกล้วยทดแทนแป้งมันสำปะหลังในผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวที่มีส่วนผสมของเนื้อปลา ได้ผลคุณลักษณะทางกายภาพดัง Table 2 พบว่าค่าความสว่าง (L*) ของสูตรที่ 1 สูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในขณะที่ค่าใกล้สีแดง (a*) และค่าใกล้สีเหลือง (b*) ของ สูตรที่ 3 มากที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อดูค่า Hardness พบว่าสูตรที่ 4 และสูตรที่5 มีค่ามากกว่าสูตรที่ 1 สูตรที่ และสูตรที่3 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แต่ค่าปริมาณน้ำอิสระ (a_W) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าการทดแทนแป้งกล้วยเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ค่าความสว่างลดน้อยลง อาจเนื่องจากแป้งกล้วยที่ผลิตมีความสว่างของค่าสีน้อยกว่าแป้งมันสำปะหลัง (84.91 และ 95.13 ตามลำดับ) รวมทั้งกระบวนการผลิตของปลาแผ่นอบกรอบ ที่ต้องอาศัยพลังงานความร้อนสูงจากเตาอินฟาเรด อาจส่งผลให้น้ำตาลในแป้งกล้วยเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (maillard reaction) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ สุชาดา (2546) ที่พบว่าการทดแทนแป้งกล้วยในอัตราส่วนร้อยละ 15 ขึ้นไปในขนมปัง ค่าความสว่างจะลดน้อยลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่ค่าความแข็ง (Hardness) กลับเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากแป้งกล้วยมีอัตราการพองตัวน้อยกว่าแป้งมัน แต่ไม่ส่งผลกระทบต่อค่าปริมาณน้ำอิสระ (a_W)

Table 2 Physical analysis of fish snack with difference level of banana flour

Sample		TRT 1	TRT 2	TRT 3	TRT 4	TRT 5
Color	L*	75.36^{a}±0.14	67.87^{b}±0.30	64.41^{e}±0.42	67.03^{c}±1.12	65.66^{d}±0.52
	a*	6.32^{c}±0.09	8.72^{b}±0.56	10.06^{a}±0.47	6.38^{c}±0.31	6.60^{c}±0.11
	b*	23.82^{b}±0.07	25.58^{a}±0.13	25.62^{a}±0.28	21.16^{c}±0.29	21.12^{c}±0.13
Hardness (N)		37.77^{b}±3.17	35.24^{b}±1.44	37.10^{b}±1.22	44.72^{a}±1.20	42.5^{a}±4.56
a_w^{ns}		0.355±0.06	0.327±0.04	0.335±0.03	0.338±0.00	0.313±0.02
Degree Celsius (°C)		25.1	25	25.1	25.1	25.1

Different letters (a, b, c, d) with in the same column indicate significantly different ($p \leq 0.05$)

Letters (ns) within the same row indicate not significantly different ($p > 0.05$)

จากผลการทดลองตาม Table 3 พบว่า คะแนนความชอบโดยเฉลี่ยของทั้ง 5 ตัวอย่าง มีคะแนนไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่นปลา กลิ่นต้มยำ กลิ่นรสต้มยำ รสเค็ม และรสหวาน ในขณะที่ด้านความกรอบ และความชอบโดยรวมของสูตรที่ 4 มีคะแนนความชอบเฉลี่ยมากที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ชุตินันท์ และคณะ(2549) ที่ศึกษาอัตราส่วนการทดแทนแป้งข้าวเจ้าด้วยแป้งกล้วยในผลิตภัณฑ์เฟรนช์ฟราย พบว่าการใช้แป้งกล้วยทดแทนในอัตราส่วนร้อยละ 80 มีคะแนนความชอบด้านความกรอบมากที่สุด แต่คุณลักษณะด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่นรส และการยอมรับโดยรวมนั้น ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ รวมทั้งงานวิจัยของ มุทิตา (2548) ที่ศึกษาการทดแทนแป้งกล้วยร่วมกับการใช้ไมโครเวฟในการผลิตแครกเกอร์ พบว่าการใช้ปริมาณแป้งกล้วยที่ร้อยละ 20 โดยใช้เตาอบนาน 4 นาที และอบต่อด้วยไมโครเวฟนาน 5 นาที มีคะแนนความชอบทางประสาทสัมผัส และการยอมรับโดยรวมสูงที่สุด ในขณะที่งานวิจัยของ จุฑา (2547) ที่ศึกษาปริมาณการใช้แป้งกล้วยเพื่อทดแทนแป้งสาลีในผลิตภัณฑ์เบเกอรี่พบว่าปริมาณการทดแทนร้อยละ 25 เป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุด หากใช้ในปริมาณร้อยละ 50 พบว่าขนมปังไม่ขึ้นฟู ส่วนในผลิตภัณฑ์เค้ก คุกกี้ ปริมาณการทดแทนควรอยู่ที่ร้อยละ 25 และ 50 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าในกระบวนการผลิตปลาแผ่นอบกรอบกสามารถใช้แป้งกล้วยทดแทนแป้งมันสำปะหลังได้ถึงร้อยละ 75 โดยมีคะแนนความชอบด้านความกรอบและความชอบโดยรวมมากที่สุด ในขณะที่เกณฑ์ระดับความพอดีด้านกลิ่นต้มยำ รวมทั้งค่า total penalty ของ net effect มีค่ามากกว่า too much แสดงว่าควรปรับความเข้มข้นของกลิ่นต้มยำเพิ่มขึ้น แต่เมื่อนำมาวิเคราะห์ opportunity analysis โดยใช้เกณฑ์คะแนนตัดสินว่าคะแนนของคนที่ชอบมีคะแนน > 6 คะแนน ส่วนคะแนนคนที่ไม่ชอบมีคะแนน ≤ 6 คะแนน จะเห็นได้ว่ามีคนที่ตอบว่าชอบทั้งผลิตภัณฑ์และคุณลักษณะทั้งหมด 37 คน แต่คนที่ชอบผลิตภัณฑ์แต่ไม่ชอบคุณลักษณะทั้งหมด 11 คน เมื่อนำไปคำนวณค่า risk อยู่ที่ 77.08 % ในขณะที่คนที่ไม่ชอบผลิตภัณฑ์แต่ชอบคุณลักษณะทั้งหมด 1 คน แต่คนที่ไม่ชอบทั้งผลิตภัณฑ์และคุณลักษณะทั้งหมด 1 คน เมื่อนำไปคำนวณค่า opportunity อยู่ที่ 50 % ตาม Table 4 ดังนั้นจะเห็นได้ว่า ตัวอย่างที่ 4 มีร้อยละของความเสี่ยงมากกว่าร้อยละของโอกาสอยู่ที่ 77.08 และ 50 ตามลำดับ ดังนั้นจึงไม่ต้องทำการปรับคุณลักษณะด้านกลิ่นต้มยำเพิ่มขึ้น

Table 3 Likeness scores of fish snack with difference level of banana flour (1)

Characteristics	TRT 1	TRT 2	TRT 3	TRT 4	TRT 5
Appearance ^{ns}	7.42±0.99	7.48±0.74	7.44±0.86	7.50±1.02	7.46±0.86
Color ^{ns}	7.36±0.90	7.46±0.81	7.38±0.92	7.54±1.01	7.44±0.93
Odor - fish^{ns}	7.04±0.95	7.32±0.94	7.24±1.10	7.40±1.09	7.22±1.13
Odor tom yum^{ns}	6.92±0.88	7.08±0.88	7.14±0.90	7.18±1.04	6.98±0.94
Crispness	7.06^{b}±1.08	7.42^{b}±0.97	7.38^{b}±0.92	7.96^{a}±0.90	7.06^{b}±1.06
Tom Yum Flavor^{ns}	7.20±0.97	7.36±0.83	7.3±1.02	7.28±1.05	7.24±0.87

Table 3 Likeness scores of fish snack with difference level of banana flour (2)

Characteristics	TRT 1	TRT 2	TRT 3	TRT 4	TRT 5
Sweet^{ns}	7.26±0.90	7.32±0.98	7.52±0.84	7.58±0.86	7.36±0.83
Salty^{ns}	7.18±0.83	7.32±0.89	7.36±0.96	7.56±0.91	7.18±0.87
Overall liking	7.00^{c}±0.83	7.18^{bc}±0.77	7.44^{ab}±0.76	7.7^{a}±0.76	7.18^{bc}±0.83

Different letters (a, b, c) with in the same column indicate significantly different (p≤0.05)

Letters (ns) within the same column and row indicate not significantly different (p>0.05)

Table 4 Opportunity analysis of fish snack Replace with banana flour 75%

sample	attribute	intensity	%nonJar-Jar	mean drop	total penalty	%risk	%opportunity
TRT 4	Odor	net effect	36	0.72	0.26	77.08	50
	tom	just about right	56				
	yum	too much	8	0.75	0.06		

ผลของคุณภาพทางเคมีของปลาแผ่นอบกรอบสูตรแป้งกล้วยทดแทนแป้งมันสำปะหลัง จาก Table 5 พบว่าสิ่งทดลองทั้ง 5 ตัวอย่างมีปริมาณเส้นใย และโปรตีนไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่สูตรควบคุม สูตรที่ 2 สูตรที่ 3 และสูตรที่ 4 มีปริมาณของความชื้น ต่ำกว่าสูตรที่ 5 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p≤0.05) ในขณะที่ปริมาณไขมันสูตรควบคุมมีปริมาณไขมันน้อยที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ (p≤0.05) สำหรับปริมาณเถ้า พบว่าสูตรควบคุมและสูตรที่ 2 มีปริมาณเถ้าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ รวมทั้งสูตรที่ 3 ที่ไม่แตกต่างกับสูตรที่ 2 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ทั้ง 3 สูตรนั้นแตกต่างจากสูตรที่ 4 และสูตรที่ 5 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p≤0.05) โดยจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ยิ่งมีอัตราส่วนผสมของแป้งกล้วยเพิ่มมากขึ้น จะมีปริมาณของเถ้าที่สูงขึ้น เนื่องจากในเถ้าของแป้งกล้วยประกอบด้วยธาตุโปแตสเซียม แคลเซียม เหล็ก ฟอสเฟอรัส โซเดียม และแมกนีเซียม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ สุธาสินี (2552) ที่ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมต่อการแทนที่แป้งสาลีด้วยแป้งกล้วยในผลิตภัณฑ์แผ่นเกี๊ยวเสริมแคลเซียมพบว่า อัตราส่วนการแทนที่ของแป้งกล้วยร้อยละ 30 มีปริมาณแคลเซียมอยู่ที่ 31.68 มิลลิกรัมต่อ100 กรัม มากกว่าแผ่นเกี๊ยวที่ใช้แป้งสาลีคิดเป็นร้อยละ13.13 แป้งกล้วยมีแร่ธาตุมากกว่าแป้งมันสำปะหลังส่งผลให้มีปริมาณเถ้าที่มากกว่า ในขณะที่งานวิจัยของ Pongsawatmanit *et al.* (2002) ได้กล่าวว่า แป้งมันสำปะหลังมีปริมาณเถ้า เส้นใย โปรตีน และไขมัน อยู่ที่ร้อยละ 0.25, 0.12, 0.11 และ0.07 ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่าแป้งกล้วยที่มีอยู่ร้อยละ 2.03, 1.20, 3.06 และ 0.38 ตามลำดับ แต่ผลการทดลองจาก Table 5 กลับพบว่าปริมาณเส้นใยไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ อาจเป็นไปได้ว่ามีอัตราส่วนในการทดแทนแป้งกล้วยค่อนข้างน้อยในผลิตภัณฑ์ทำให้ผลไม่แตกต่างกัน แต่เมื่อพิจารณาร่วมกับผลคุณภาพทางประสาทสัมผัส จะเห็นได้ว่าสูตรที่ 4 (แป้งกล้วยร้อยละ 75) มีคะแนนความชอบโดยรวมสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p≤0.05)

Table 5 Chemical analysis of fish cracker with difference levels of banana flour

	TRT 1	TRT 2	TRT 3	TRT 4	TRT 5
Moisture	4.38^{b}±0.09	4.32^{b}±0.09	4.42^{b}±0.05	4.41^{b}±0.06	4.56^{a}±0.08
Ash	5.19^{c}±0.15	5.37^{bc}±0.10	5.49^{b}±0.16	5.86^{a}±0.03	5.93^{a}±0.06
Fiber^{ns}	1.07±0.22	1.49±0.67	1.09±0.15	1.02±0.021	1.25±0.07
Protein^{ns}	21.11±0.79	21.62±0.36	21.14±0.15	21.54±0.44	21.21±0.14
fat	0.43^{c}±0.08	1.10^{a}±0.14	0.77^{b}±0.03	0.85^{b}±0.23	1.17^{a}±0.13
Carbohydrate	67.82^{a}±0.80	65.77^{bc}±0.38	67.09^{ab}±0.24	65.45^{c}±1.53	65.46^{c}±0.65

Different letters (a, b, c) with in the same column indicate significantly different ($p \leq 0.05$)

Letters (ns) within the same column and row indicate not significantly different ($p > 0.05$)

สรุป

ในการผลิตขนมขบเคี้ยวที่มีส่วนผสมของเนื้อปลา สามารถใช้แป้งกล้วยทดแทนแป้งมันสำปะหลังโดยไม่ส่งต่อกระบวนการผลิต แต่ส่งผลต่อคุณภาพทางประสาทสัมผัส กายภาพ และเคมี โดยจะเห็นได้ว่าการใช้แป้งกล้วยทดแทนมากขึ้น ขนมขบเคี้ยวจะมีคุณลักษณะของสีที่คล้ำขึ้น เนื้อสัมผัสกรุบกรอบและแน่นมากขึ้น ซึ่งเป็นคุณลักษณะที่ผู้บริโภคต้องการในขนมขบเคี้ยว ซึ่งแป้งกล้วยควรเลือกใช้ในผลิตภัณฑ์ที่มีความกรอบมากกว่าผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะนุ่มฟู รวมทั้งผลิตภัณฑ์ได้แร่ธาตุที่สูงมากขึ้น จากงานวิจัยนี้ผู้บริโภคให้การยอมรับขนมขบเคี้ยวที่ใช้เนื้อปลาร้อยละ 65 แป้งกล้วยร้อยละ 15 แป้งมันสำปะหลังร้อยละ 5 มัลติทอลร้อยละ 12 และผงต้มยำร้อยละ 3 มากที่สุด ที่ระดับความชอบปานกลาง (7.18-7.96)

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ คณะอุตสาหกรรมเกษตรที่สนับสนุนงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา

เอกสารอ้างอิง

จุฑา พีระพัชระ. 2547. **ผลิตภัณฑ์ขนมอบจากแป้งกล้วย**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์.

ชุตินันท์ เพชรทอง, นางสาววาสนา กันโสม และนางสาววิไลพร โหมงโก้ว. 2549. **การพัฒนาผลิตภัณฑ์เฟรนช์ฟรายจากแป้งกล้วยน้ำว้าและแป้งข้าวเจ้า**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม.

ชุติมา อัศวเสถียร และนิลศิริ นิลเนตร. 2548. **การทดแทนแป้งข้าวเจ้าด้วยแป้งกล้วยในก๋วยเตี๋ยวเส้นใหญ่**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ญาณิศา รัตอาภา, วิภา สุโรจนะเมตกุล, มาฤดี ผ่องพิพัฒน์พงศ์, ตวิษา โลหะนะ, ไพลิน ผู้พิพัฒน์ และวารุณี ประดิษฐ์สรีกุล. 2536. การพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารจากแป้งกล้วย .**วารสารอาหาร**. 23(3): 197 - 200.

ดรุณี มูลโรจน์. 2550. **การพัฒนาการผลิตกล้วยน้ำว้าผงโดยวิธีการทำแห้งแบบโฟมแมท**. มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์.

ทวีเกียรติ ยิ้มสวัสดิ์. 2527. **กล้วย**. กรุงเทพฯ: ห้างหุ้นส่วนสามัญนิติบุคคลสหประชาพาณิชย์.

เบญจมาศ ศิลาย้อย. 2545. **กล้วย**. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ปิยนสรุ์ น้อยด้วง และปัทมา คล้ายจันทร์. 2548. การผลิตโยเกิร์ตกล้วยหอม. **วารสารเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยสยาม**. 1(1): 24-31.

มุทิตา ไทยวงศ์. 2548. **การทดแทนแป้งกล้วยและการประยุกต์ใช้ไมโครเวฟในการผลิตแครกเกอร์**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า-คุณทหารลาดกระบัง.

วันชัย วรวัฒน และณัฐธร อินทริวัฒน์. 2551. **เทคโนโลยีการผลิตขนมขบเคี้ยวที่มีส่วนผสมของเนื้อปลา**. ภาควิชาผลิตภัณฑ์ประมง คณะประมง. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ศูนย์วิจักสิกรไทย. 2553. **ขนมขบเคี้ยวปีเสือ: แข่งขันหนักรับบอลโลก...คาดตลาดโต 9.3%**. แหล่งที่มา: http://www.grad.ku.ac.th/download/stu-soc53-07-chap04/?wpdmdl=15474, 20 เมษายน 2560

สุชาดา ไม้สนธิ์. 2546. **การใช้ประโยชน์จากแป้งกล้วยน้ำว้าในผลิตภัณฑ์ขนมอบ**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สุธาสินี ชิ้นทอง. 2552. **การพัฒนาแผ่นเกี๊ยวเสริมแคลเซียมจากแป้งกล้วยน้ำว้า**. มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุสิต.

AOAC. 1995. **Official Method of analysis International**. 16th ed. The association of official analytical Chemists, Virginia: 1588.

INN News. 2560. **แม่ค้ากล้วยน้ำว้าอ่างทองครวญผลผลิตล้นทำราคาตก**. แหล่งที่มา: https://www.sanook.com/news/2202830, 20 เมษายน 2560.

Meilgaard, M., Civille, G.V., and Carr, B. T. 1999. Sensory evaluation techniques. 3rd ed. CRC press. Boca Raton. 387 p.

New Nutrition Business. 2559. **10 เทรนด์ตลาดอาหารและเครื่องดื่มในปี 2559**. แหล่งที่มา: http://fic.nfi.or.th/MarketOverviewWorldDetail.php?id=84, 20 เมษายน 2560

Pongsawatmanit, R., P. Thanasukarn and S. Ikeda. 2002. Effect of sucrose on RVA viscosity parameters, water activity and freezable water fraction of cassava starch suspensions. **Science Asia** 28 (2): 129-134.

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 (3): 763–767

Control of *Alicyclobacillus acidoterrestris* Spores by Okra (*Abelmoschus esculentus*) Beverage

Chatmanee Nampuak[1] and Kullanart Tongkhao[1*]

ABSTRACT

Spores of *Alicyclobacillus acidoterrestris* can survive during a pasteurization process, after that it can produce off-odor compounds, which cause spoilage of fruit juice and vegetable beverage. In this study, an antibacterial activity of okra (*Abelmoschus esculentus*) beverage against spores of *A. acidoterrestris* was investigated with an ultimate purpose to determine whether this can be used in beverage to control the growth of alicyclobacilli in beverage product. The antibacterial activity was assessed via broth dilution assay followed by spread plate technique; concentrations of okra beverage were ranged from 3.75 to 60 mg/ml. The greatest reduction was observed at 60 mg/ml, which reduced the spore population by 2.34 log CFU/ml. The present study demonstrated that the antibacterial efficacy of okra beverage against *A. acidoterrestris*, which can therefore be considered to have potential to apply in the beverage industry.

Key Words: okra, *Abelmoschus esculentus*, antimicrobial activity, *Alicyclobacillus acidoterrestris*, spore

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

[1]Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok, 10900

INTRODUCTION

Alicyclobacillus acidoterrestris is a Gram-positive, rod-shape, endospore-forming, thermoacidophilic, and non-pathogenic bacterium. This microorganism is an aerobic bacterium and can grow at 35-55 °C with an optimum temperature of 42-53 °C, and from pH 2.2-5.8 with an optimum pH around 4 (Costa *et al*., 2015). *A. acidoterrestris* produces offensive off-flavor as describe as "smoky, antiseptic, and disinfectant" (Huang *et al*., 2015). A wide range of food products are susceptible to spoilage by this microorganism: high-acid, shelf-stable fruit and vegetables, either hot-filled, pasteurized, canned, ultra-heat-treated or carbonated products (Huang *et al*., 2015). *A. acidoterrestris* is an important threat for the fruit and vegetable beverage industry as of the spore can survive the heat-treatment process, while the cell can grow in acidic condition (Costa *et al*., 2015). Therefore, the industry requires alternative methods to control this microorganism. A possibility is the use of bioactive compounds in plant as antibacterial.

Bioactive compounds are secondary metabolites produced by plants, animals, and microorganisms. Example of bioactive compounds include terpene, carotenoids, glucosinolates, lectin, polysaccharides, and polyphenolic compounds. They are being studied in the prevention of cancer, heart disease, bacterial infection and also used as antibacterial agents in beverage products (Shahidi and Ambigaipalan, 2015). The beverage that contains bioactive ingredients such as fiber, vitamins, minerals, fatty acids, and polyphenolic compounds, can be classified as a functional beverage. (Ye *et al*., 2018). One source of bioactive compounds is in plants especially in fruits and vegetables.

Okra (*Abelmoschus esculentus*), a plant of Malvaceae family is widely distributed in subtropical and tropical areas: India, Malaysia, Philippines, and Thailand. Okra pods are consumed as vegetables. This fruit is rich in micronutrients particularly vitamin C and vitamin K. They are good sources of fiber and polyphenolic content (Arapitsas, 2008). Polysaccharide is mainly macronutrient in okra that present in a form of mucilage (Lengsfeld *et al*., 2004). Okra extracts possess many bioactive activities including antioxidant activity, anti-carcinogen, immunomodulator, antidiabetic and antimicrobial activities (Sathish and Eswar, 2013). Therefore, as of its various bioactive activities, okra beverage could be a novel functional beverage itself or mixed with other beverages to promote their functionality. It was reported that okra extract has potential to use in food product such as stabilizer (Yuennan *et al*., 2014) and fat replacer (Romanchik-Cerpovicz *et al*., 2006). However, its application as a beverage to control bacterial growth has not been reported. Therefore, the objective of this study was to evaluate possibility of using okra beverage to inhibit *A. acidoterrestris* spores.

MATERIAL AND METHODS

1. Okra beverage preparation and its solubility property

Both of freeze-dried and spray-dried okra powder, were kindly provided by Assoc. Prof. Dr. Parichat Hongsprabhas, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok. The freeze-dried okra powder consists of 100% of okra mucilage water extract, while spray-dried okra powder consisted of 2 main ingredients including 80.78% of maltodextrin and 12.48% of okra mucilage water extract. Okra beverage was prepared by mixing the powders in sterilized water by a vortex mixture under aseptic condition. Each powder was tested for solubility prior to further analysis.

2. Microorganism and spore production

A. acidoterrestris ATCC 49025 was used as the tested microorganism in this study. Cells preparation and spore production methods were modified from Bevilacqua *et al.* (2013) and Molva and Baysal (2015). Cells of *A. acidoterrestris* were maintained at 4°C on Malt Extract Agar (MEA; Oxoid, Milan, Italy) acidified to pH 4.5 with a sterile solution of citric acid (the concentration of the acid in the solution was 50%); spores were produced on acidified MEA. Briefly,100 µL of the overnight culture grown at 43°C in Malt Extract Broth (MEB; Oxoid, Milan, Italy) were spread onto MEA pH 4.5. All inoculated plates were incubated at 43°C up to 5 days. After achieving more than 85-90% of cells sporulated as determined under phase-contrast microscope, spores were harvested by depositing 1-2 mL of cold sterile water onto the surface of plates and dislodged from the agar surface by mild agitation with a sterile glass spreader. The spore suspension was centrifuged at 4000 rpm for 10 min (4°C). The supernatant was discarded, and the pellet was resuspended in sterile water. The suspension was centrifuged again at 4000 rpm for 10 min (4°C). This step was repeated three times. The final pellet was resuspended in 1 mL of sterile water and mixed thoroughly. Then, spore suspension was heated at 80°C for 10 min to eliminate vegetative cells and stored at 4°C. Spore number was assessed through the spread plate count on acidified MEA, incubated at 43°C for 3 days and reported as log CFU/ml.

3. Determination of antibacterial activity by broth dilution assay

The antibacterial activity of okra beverage was tested with spores of *A. acidoterrestris*. The method used to evaluate the antibacterial activity was broth dilution assay, which was modified from Qaiyumi (2007) according to the interpreting property. Briefly, the series of 2-fold dilution of okra beverage were prepared to obtain concentrations of powder at 0, 3.75, 7.5, 15.0, 30.0 and 60.0 mg/ml which corresponded to concentration of okra mucilage of 0, 0.47, 0.94, 1.87, 3.74, 7.49, and 14.98 mg/ml, respectively. However, the application in this study was to apply as okra beverage from spray-dried okra powder, therefore, the concentration presented in this study was referred to the

concentration of spray-dried okra powder in the beverage. After the preparation of the series of okra beverage, spore suspensions were added into all test tubes in 1:1 ratio of okra beverage and spores to provide an equivalent volume between sample and spores (Andrews, 2001). The series of experiment were then incubated at 43°C for 24 hours. After incubation, the series of sample were spread-plated onto MEA (pH4.5). These plates were incubated for 3 days at 43°C and the survival spores were counted and reported as log CFU/ml.

4. Statistical analysis

Experimental data were compared by using one-way analysis of variance (ANOVA) followed by Tukey's test (p<0.05). All data were reported as means ± standard deviations and performed in three replications.

RESULTS AND DISCUSSION

1. Solubility of okra beverage powder

Generally, powdered beverage should be reconstituted on water or other liquid for further used in food processing or drinking directly. The powder with lower rehydration causes prolong processing time and increases the cost of production. Solubility is one of the important properties that refers to reconstitution property (Selomulya and Fang, 2013). Thus, the solubility of okra beverage powder from spray-drying and freeze-drying was compared. Results showed the higher solubility of spray-dried samples than the freeze-dried powder. The spray-dried powder dissolved within 7 min at the concentration of at 12 % (w/v) whereas the saturation in water of freeze-dried powder was achieved at a concentration of 1.44 % (w/v) and used more than 60 min for solubilizing in water.

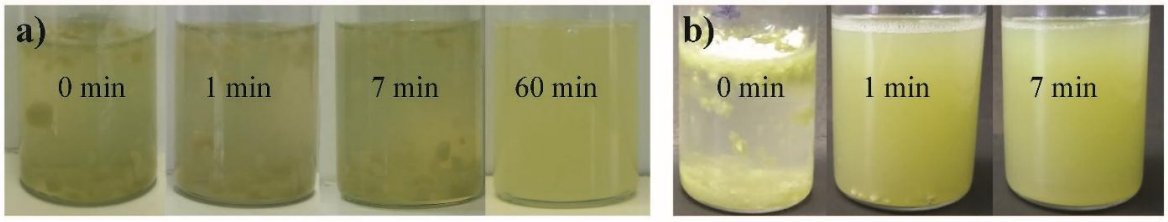


Figure 1 Solubility of freeze-dried okra powder (a) and spray-dried okra powder (b) in water.

These results were in agreement with de Souza *et al.* (2015) who reported that the powder from spray drying process with maltodextrin as carrier had higher solubility than the powder from freeze drying process. Moreover, Daza *et al.* (2016) and do Valle Calomeni *et al.* (2017) studied on the spray-dried Cagaita and peanut skin extract and found that increasing the maltodextrin concentration increased the solubility of the powder. The higher solubility of spray-dried okra extract in water may be related to the higher solubility of maltodextrin, which is a polar polymer with many

hydroxyl groups in water (Alvani *et al*., 2011). Since the spray-dried powder used less time for reconstituting than the freeze-dried powder, this powder was used in our further analysis on controlling the spore of *A. acidoterrestris*. The okra beverage was prepared from spray-dried okra powder at concentration of 12 % (w/v) which corresponded to 14.98 mg/ml of okra mucilage water extract. In this study, all results were reported as of antimicrobial activities of okra beverage which were prepared from spray-dried okra powder, the concentration presented in the following antimicrobial efficacy was a concentration of the spray-dried okra powder in the beverage tested.

2. Antibacterial efficiency of okra beverage

Since okra beverage was prepared from spray-dried okra powder that contained 2 main ingredients including maltodextrin and okra mucilage water extract. Thus, the effect of maltodextrin on the growth of *A. acidoterrestris* spores was also evaluated separately at the same concentration as in okra beverage. The results revealed that maltodextrin did not affected on growth of *A. acidoterrestris* spores (data not shown). This results concurred well with a report by Fernandes *et al.* (2014) that the adjuvant of spray drying process did not show growth inhibitory effect on bacteria and fungi.

The antibacterial activity of okra beverage on spores of *A. acidoterrestris* was evaluated by mixing spores with okra beverage at various concentrations. After incubation for 24 hours, the mixing sample was spread on MEA, pH 4.5 and the count of spores was shown in Figure 2. After 24 hours, the number of spore of control (non-added okra beverage) was 6.84 ± 0.13 log CFU/ml. Nonetheless, the number of spores in treated samples containing okra beverage at all tested concentration of 3.75, 7.5, 15, 30 and 60 mg/ml; were significantly lower ($p<0.05$) than control. The survivability of spores at the highest concentration was lower than the control by approximately 2.34 log CFU/ml. The pH of sample containing okra beverage at concentration of 0, 3.75, 7.5, 15, 30, and 60 mg/ml was 4.51, 4.68, 4.72, 4.83, 4.92, and 4.95, respectively. In these pH range, the growth of *A. acidoterrestris* did not appear to be inhibited due to its survival and growth between the pH 3.0-5.5 as demonstrated by Tokuda (2007) .Moreover, okra beverage exerted a concentration-dependent effect. Our results are also in agreement with Rana *et al.* (2014), who reported the strong antibacterial activity of methanol crude extract of okra on Gram-positive bacteria. The antibacterial activity of okra beverage may be attributed to catechins and quercetins derivatives which are the predominant polyphenolic compounds found in okra extracts (Arapitsas, 2008). The antibacterial activity of fruit beverage was also reported by Molva and Baysal (2015). They found that 100% of pomegranate juice presented an antibacterial activity on vegetative cells and spore of *A. acidoterrestris* DSM 3922 type strain. However, our results were in contrast with the experiment of Phonkhoonthod *et al.* (2015) expressed that water crude extract of okra promoted growth of lactic acid bacteria (LAB); *Lactobacillus johnsonii*, *Lactobacillus reuteri*, *Lactococcus lactis* and, *Weissella confusa*. Chan *et al*. (2018) also

reported that the phenolic compounds showed an antibacterial activity on food-borne pathogenic bacteria but not against LAB. A possible reason is that LAB could detoxify the phenolic compounds through their metabolism (Sánchez Maldonado *et al*., 2011). Therefore, okra extract rich in polyphenolic compounds showed better inhibition effect on pathogenic bacteria with no effect on LAB, nonetheless, this study is the first reported inhibition effect on gram-positive spores.

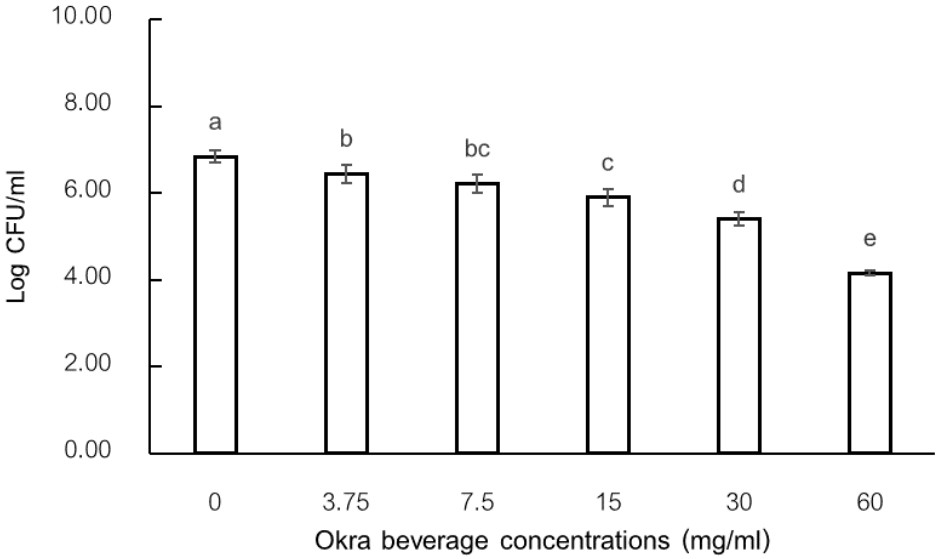


Figure 2 Count of *A. acidoterrestris* spores (log CFU/ml) on MEA pH4.5 after treatment with 3.75, 7.5, 15, 30 and 60 mg/ml of okra beverage for 24 hours and a sample without okra beverage was used as a control. a-e indicate significant differences between the samples ($p \leq 0.05$).

CONCLUSION

In the present study, antibacterial activity of okra beverage was investigated against spores of *A. acidoterrestris* ATCC 49025 which was the spoilage bacterium found in beverage products. The results showed that okra beverage possessed antibacterial activity on this spore. This study provides evidence of their potential as an antimicrobial beverage with selectively inhibiting the growth of spoilage bacteria in the beverage product. On the other hand, further research should be evaluated the antimicrobial activity of okra beverage on foodborne pathogenic bacteria and other pathogenic spore formers along with its antimicrobial mode of action.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported from graduate scholarship provided by the National Research Council of Thailand (NRCT) as of fiscal year 2017. The authors wish to thank Assoc. Prof. Dr. Parichart Hongsprabhas and Assist. Prof. Dr. Warapa Mahakarnchanakul for their kind suggestions.

REFERENCES

Alvani, K., X. Qi and R.F. Tester. 2011. Use of carbohydrates, including dextrins, for oral delivery. **Starch-Stärke**. 63: 424-431.

Andrews, J.M. 2001. Determination of minimum inhibitory concentrations. **Journal of Antimicrobial Chemotherapy**. 48: 5-16.

Arapitsas, P. 2008. Identification and quantification of polyphenolic compounds from okra seeds and skins. **Food Chemistry**. 110: 1041-1045.

Bevilacqua, A., D. Campaniello, B. Speranza, M. Sinigaglia and M.R. Corbo. 2013. Control of *Alicyclobacillus acidoterrestris* in apple juice by citrus extracts and a mild heat-treatment. **Food Control**. 31: 553-559.

Chan, C.L., R.Y. Gan, N.P. Shah and H. Corke. 2018. Polyphenols from selected dietary spices and medicinal herbs differentially affect common food-borne pathogenic bacteria and lactic acid bacteria. **Food Control**. 92: 437-443.

Costa, M.S.d., F.A. Rainey and L. Albuquerque. 2015. *Alicyclobacillus*, *In* W. B. Whitman*, et al.*, eds. **Bergey's manual of systematics of archaea and bacteria.** John Wiley & Sons, Inc.

Daza, L.D., A. Fujita, C.S. Fávaro-Trindade, J.N. Rodrigues-Ract, D. Granato and M.I. Genovese. 2016. Effect of spray drying conditions on the physical properties of cagaita (*Eugenia dysenterica* DC.) fruit extracts. **Food and Bioproducts Processing**. 97: 20-29.

de Souza, V.B., M. Thomazini, J.C.d.C. Balieiro and C.S. Fávaro-Trindade. 2015. Effect of spray drying on the physicochemical properties and color stability of the powdered pigment obtained from vinification by products of the bordo grape (*Vitis labrusca*). **Food and Bioproducts Processing**. 93: 39-50.

do Valle Calomeni, A., V.B. de Souza, F.L. Tulini, M. Thomazini, L.C. Ostroschi, S.M. de Alencar, A.P. Massarioli, J.C. de Carvalho Balieiro, R.A. de Carvalho and C.S. Favaro-Trindade. 2017. Characterization of antioxidant and antimicrobial properties of spray-dried extracts from peanut skins. **Food and Bioproducts Processing**. 105: 215-223.

Fernandes, M.R.V., A.L.T. Dias, R.R. Carvalho, C.R.F. Souza and W.P. Oliveira. 2014. Antioxidant and antimicrobial activities of *Psidium guajava* L. spray dried extracts. **Industrial Crops and Products**. 60: 39-44.

Huang, X.-C., Y.-H. Yuan, C.-F. Guo, V. Gekas and T.-L. Yue. 2015. *Alicyclobacillus* in the fruit juice industry: Spoilage, detection, and prevention/control. **Food Reviews International**. 31: 91-124.

Lengsfeld, C., F. Titgemeyer, G. Faller and A. Hensel. 2004. Glycosylated compounds from okra inhibit adhesion of *Helicobacter pylori* to human gastric mucosa. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. 52: 1495-1503.

Molva, C. and A.H. Baysal. 2015. Effects of pomegranate and pomegranate–apple blend juices on the growth characteristics of *Alicyclobacillus acidoterrestris* dsm 3922 type strain vegetative cells and spores. **International Journal of Food Microbiology**. 200: 52-56.

Phonkhoonthod, P., N. Pongsapipatana, K. Rumjuankiat and S. Nitisinprasert. 2015. Effect of okra extract on lactic acid bacteria, pp. 282-289. *In* **Proceedings of 53rd Kasetsart University Annual Conference**. Kasetsart University, Bangkok.

Qaiyumi, S. 2007. Macro-and microdilution methods of antimicrobial susceptibility testing. **Antimicrobial susceptibility testing protocols**. 75-81.

Rana, S.M., M.M. Billah, M.S. Hossain, A. Saifuddin, S.A. Islam, S. Banik, Z. Naim and G.S. Raju. 2014. Susceptibility of microorganism to selected medicinal plants in bangladesh. **Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine**. 4: 911-917.

Romanchik-Cerpovicz, J.E., A.C. Costantino and L.H. Gunn. 2006. Sensory evaluation ratings and melting characteristics show that okra gum is an acceptable milk-fat ingredient substitute in chocolate frozen dairy dessert. **Journal of the American Dietetic Association**. 106: 594-597.

Sánchez Maldonado, A.F., A. Schieber and M.G. Gänzle. 2011. Structure–function relationships of the antibacterial activity of phenolic acids and their metabolism by lactic acid bacteria. **Journal of Applied Microbiology**. 111: 1176-1184.

Sathish, D. and A. Eswar. 2013. A review on: *Abelmoschus esculentus* (okra). **International Research Journal of Pharmaceutical and Applied Science**. 3: 129-132.

Selomulya, C. and Y. Fang. 2013. Food powder rehydration, p. 379-408. *In* B. Bhandari*, et al*., eds. **Handbook of food powders**. Woodhead Publishing.

Shahidi, F. and P. Ambigaipalan. 2015. Phenolics and polyphenolics in foods, beverages and spices: Antioxidant activity and health effects – a review. **Journal of Functional Foods**. 18: 820-897.

Tokuda, H. 2007. Growth profile of *Alicyclobacillus* in fruit juices, p. 92-105. *In*, eds. **Alicyclobacillus**. Springer.

Ye, Q., N. Georges and C. Selomulya. 2018. Microencapsulation of active ingredients in functional foods: From research stage to commercial food products. **Trends in Food Science & Technology**. 78: 167-179.

Yuennan, P., T. Sajjaanantakul and H.D. Goff. 2014. Effect of okra cell wall and polysaccharide on physical properties and stability of ice cream. **Journal of Food Science**. 79: 1522-1527.

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจซื้อผลิตภัณฑ์เปลี่ยนสีผมเพื่อปิดผมขาวของผู้บริโภค

Factors Affecting Consumers' Purchase Decisions on Gray Hair Coloring Products

ณัฐนิช ดิษฐถาพร[1*] กรทิพย์ วัชรปัญญาวงศ์ เตชะเมธีกุล[1] และ รังสิมา ชลคุป[2]

Nuttanit Ditthapon[1*], Kornthip Watcharapanyawong Techametheekul[1] and Rungsima Chollakup[2]

บทคัดย่อ

การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสำรวจปัจจัยความต้องการของผู้บริโภค และศึกษาปัจจัยส่วนบุคคล พฤติกรรมการใช้ การตัดสินใจซื้อผลิตภัณฑ์เปลี่ยนสีผมเพื่อปิดผมขาวของผู้บริโภค โดยรวบรวมข้อมูลด้วยการสัมภาษณ์และใช้แบบสอบถามเก็บรวบรวมข้อมูลจากผู้บริโภคที่เคยและไม่เคยใช้ผลิตภัณฑ์เปลี่ยนสีผมเพื่อปิดผมขาวทั้งเพศชายและหญิง ช่วงอายุตั้งแต่ 30 – 60 ปีขึ้นไป ทำการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้สถิติเชิงพรรณนาและทดสอบสมมุติฐานด้วยสถิติ Chi-square ผลการศึกษาพบว่าปัจจัยด้านคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์มีระดับความสำคัญสูงสุด โดยกลุ่มตัวอย่างให้ความสนใจในเรื่องความไม่เป็นอันตรายต่อร่างกายมากที่สุด รองลงมาคือคุณสมบัติผมนุ่มสลวย ไม่แข็งกระด้าง และปัจจัยส่วนบุคคลเรื่องเพศและอายุ มีความสัมพันธ์ต่อวัตถุประสงค์ในการย้อม แหล่งข้อมูลที่ข่าวสารและค่าใช้จ่ายที่ยอมรับได้ในการเลือกซื้อ ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05

ABSTRACT

The purpose of this research was to survey consumers' needs factors and study personal factors affecting using behaviors and decision making behaviors of purchasing gray hair coloring products. The data were collected by interview and questionnaires from both male and female consumers who used and never used gray hair coloring products aged between 30 – 60 years and older. The data were analyzed by descriptive statistics and chi-square. From this study, it was found that property factors of products have the highest priority. The samples focused on the most harmless to the body. Secondly, features soft hair, not hard and personal factors are sex and age related with Purpose of dyeing, information source, and purchase price at the statistic significant level 0.05.

Key Words: Natural gray hair coloring product, Purchase Decision, Demographic

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

[1]ภาควิชาวิทยาการสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Textile Science, 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

ปัจจุบันผู้คนทุกเพศทุกวัยนิยมและให้ความสำคัญกับเรื่องความสวยความงาม การทำให้ตนเองมีบุคลิกภาพที่ดีขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งความต้องการให้ตนเองดูดี และคงความเป็นหนุ่มสาวอยู่เสมอ เนื่องจากประชาชนส่วนใหญ่ต้องออกไปประกอบอาชีพนอกบ้าน มีการเข้าสังคม ดังนั้นลักษณะภายนอกจึงเป็นสิ่งสำคัญ ปัจจัยสำคัญสำหรับการดูแลสุขภาพของผู้ที่มีอายุมากขึ้น การเกิดผมสีขาว หรือที่เรียกว่า “ผมหงอก” เป็นสิ่งที่ทุกคนต้องเผชิญ ซึ่งอาจเกิดจากปัจจัยเรื่อง วัย กรรมพันธุ์ ความเครียด การเปลี่ยนแปลงตามธรรมชาติ การได้รับสารเคมี หรือโรคภัยไข้เจ็บ (กุลธิดา สุดทิม, 2558) ดังนั้น ผู้ที่มีผมหงอกจึงพยายามหาทางปกปิดผมหงอกเพื่อเรียกความมั่นใจ การย้อมผมเป็นวิธีหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลายเพื่อช่วยในการปิดผมขาวหรือเปลี่ยนสีผม ซึ่งในปัจจุบันผลิตภัณฑ์สำหรับย้อมผมเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายและไม่ได้จำกัด

ผลิตภัณฑ์เปลี่ยนสีผมเป็นเครื่องสำอางเพื่อเสริมสร้างความสวยงาม ปกปิดผมขาว ที่มีการเปลี่ยนแปลงตามสมัยนิยม (กุลธิรา เกตุถิรกุล, 2553) ซึ่งมีหลากหลายประเภท เช่น ผลิตภัณฑ์เปลี่ยนสี ผมชั่วคราว กึ่งถาวร และถาวรในรูปแบบ แชมพูมูส เจล โลชั่น ครีม สเปรย์เป็นต้น ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่มาจากการสังเคราะห์ขึ้นมา สีที่ได้จากส่วนใหญ่มาจากการสังเคราะห์ นอกจากนี้น้ำยาบางชนิดยังมีสารที่อันตรายอยู่ เช่น ตะกั่ว ในรูปของ lead acetate เป็นโลหะหนักที่เมื่อสะสมในร่างกายจะก่อพิษที่ไม่สามารถรักษาได้ สีสังเคราะห์บางชนิด เช่น 1,4-phenylenediamine ทำให้เกิดการระคายเคือง การแพ้ต่อผิวหนัง ทำให้เกิดโรคหืด รวมทั้งเป็นอันตรายต่อตับ (สุทธิเวช แสงจันทร์, 2531)

ทั้งนี้ปัจจุบันแฟชั่นการทำสีผมเป็นเรื่องที่นิยมทำกันแพร่หลาย สังเกตได้จาก ผลิตภัณฑ์ทำสีผมมีหลากหลายยี่ห้อ และมูลค่าตลาดของผลิตภัณฑ์สำหรับเส้นผมในปี 2559 มีการขยายตัวร้อยละ 6.3 มีมูลค่าตลาดรวมอยู่ที่ประมาณ 29,000 ล้านบาท โดยมีสัดส่วนเป็นผลิตภัณฑ์ดูแลเส้นผมร้อยละ 83 ผลิตภัณฑ์จัดแต่งทรงผมร้อยละ 4 ผลิตภัณฑ์เปลี่ยนสีผมร้อยละ 11 และผลิตภัณฑ์ยืดดัดผมร้อยละ 1 (Euromonitor International, 2017) ปัจจุบันตลาดผลิตภัณฑ์เปลี่ยนสีผมมีมูลค่าไม่ต่ำกว่า 2 พันล้านบาท ส่วนตลาดผลิตภัณฑ์ปิดผมขาวมีมูลค่า 500 ล้านบาท จากข้อมูลเห็นได้ว่ามูลค่าตลาดผลิตภัณฑ์เปลี่ยนสีผมมีการขยายตัวเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มหรือเทรนด์ของธุรกิจที่เกาะไปกับกระแสเพื่อสุขภาพ อันเนื่องมาจากพฤติกรรมของผู้บริโภคที่หันมาใส่ใจดูแลสุขภาพและความงามกันมากขึ้น (ศูนย์วิจัยกสิกรไทย, 2560)

จากข้อมูลดังกล่าวจะเห็นว่ามูลค่าของตลาดผลิตภัณฑ์ความงามมีการเติบโตสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง และแนวโน้มกระแสสุขภาพและความงามที่ขยายตัว ในขณะที่ผลิตภัณฑ์ในท้องตลาดยังมีความอันตรายจากสารสังเคราะห์ต่างๆ อีกทั้งจากงานวิจัยการศึกษาพฤติกรรมผู้บริโภคของ วรพรรณ จันทรากุลศิริ (2547) และ เรวดี ธรรมธัชอารี (2555) พบว่าปัญหาที่พบมากที่สุดภายหลังการเปลี่ยนสีผมคือ สารเคมีอันตรายและผลข้างเคียง และผู้บริโภคให้ความสำคัญในเรื่องความปลอดภัยเป็นอย่างมาก ดังนั้นในการจะพัฒนาผลิตภัณฑ์เปลี่ยนสีผมเพื่อให้ตรงกับความต้องการผู้บริโภค ต้องทำการหาข้อมูลต่างๆสนับสนุนในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการใช้ผลิตภัณฑ์สีย้อมปิดผมขาว พฤติกรรมการใช้และการตัดสินใจซื้อผลิตภัณฑ์เปลี่ยนสีผมเพื่อปิดผมขาวของผู้บริโภค เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาเทคโนโลยีและนวัตกรรมผลิตภัณฑ์ให้มีความเป็นธรรมชาติ ซึ่งจากการศึกษาสามารถนำไปใช้ประโยชน์สำหรับเป็นแนวทางในการปรับปรุงพัฒนาผลิตภัณฑ์เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคอย่างแท้จริง

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. สำรวจปัจจัยความต้องการของผู้บริโภคต่อการตัดสินใจเลือกซื้อผลิตภัณฑ์เปลี่ยนสีผมเพื่อปิดผมขาวของผู้บริโภค
2. ศึกษาปัจจัยส่วนบุคคล พฤติกรรมการใช้และปัจจัยความต้องการที่มีผลต่อการตัดสินใจซื้อผลิตภัณฑ์เปลี่ยนสีผมเพื่อปิดผมขาว

สมมุติฐานของงานวิจัย

1. ปัจจัยส่วนบุคคล (เพศ, อายุ, การศึกษา, รายได้และสถานภาพ) มีความสัมพันธ์กับพฤติกรรมการตัดสินใจซื้อผลิตภัณฑ์เปลี่ยนสีผมเพื่อปิดผมขาว

วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยในครั้งนี้ ผู้วิจัยใช้การศึกษาวิจัย 2 รูปแบบประกอบไปด้วย การวิจัยเชิงคุณภาพ (Qualitative research) และการวิจัยเชิงปริมาณ (Quantitative research) เป็นแนวทางในการศึกษาวิจัย โดยการวิจัยเชิงคุณภาพใช้วิธีการเก็บข้อมูลโดยการสัมภาษณ์ (Interview) เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาทำการวิจัยเชิงปริมาณใช้วิธีการเก็บข้อมูลด้วยแบบสอบถาม (Questionnaire) ซึ่งผู้วิจัยได้ดำเนินการวิจัยตามลำดับ ดังนี้

การกำหนดประชากรและการเลือกกลุ่มตัวอย่าง

กลุ่มประชากรที่ใช้ในการเก็บข้อมูลครั้งนี้ คือ ผู้บริโภคเพศชายและหญิงที่เคยและไม่เคยใช้ผลิตภัณฑ์เปลี่ยนสีผมเพื่อปิดผมขาว ช่วงอายุตั้งแต่ 30 – 60 ปีขึ้นไป การเลือกกลุ่มตัวอย่างในการสัมภาษณ์ ทำการสุ่มตัวอย่างโดยไม่ใช้ความน่าจะเป็นแบบเจาะจง (Purposive sampling) ได้ทำการเลือกผู้ที่ใช้ผลิตภัณฑ์เปลี่ยนสีผมเพื่อปิดผมขาวที่ใช้บริการในร้านเสริมสวยเป็นประจำจำนวน 25 คนเป็นตัวแทนผู้บริโภค และการเลือกกลุ่มตัวอย่างสำหรับแบบสอบถาม ใช้วิธีการสุ่มตัวอย่างประชากรโดยไม่ใช้ความน่าจะเป็นแบบบังเอิญ (Accidental sampling) เนื่องจากไม่ทราบกลุ่มจำนวนประชากร จึงใช้หลักการคำนวณของ Cochran (1963) จากการคำนวณจะได้ขนาดกลุ่มตัวอย่างจำนวน 384 หน่วย จึงทำการเก็บข้อมูลกลุ่มตัวอย่างจำนวน 400 คน ด้วยแบบสอบถามออนไลน์ในช่วงเดือนมิถุนายน 2560

การเก็บรวบรวมข้อมูล

การเก็บรวบรวมข้อมูลได้มาจากการสัมภาษณ์กลุ่มตัวอย่างจำนวน 25 คน โดยใช้แบบสัมภาษณ์เป็นเครื่องมือในการสำรวจปัจจัยความต้องการของผู้บริโภค (Griffen and Hauser, 1993) ต่อผลิตภัณฑ์เปลี่ยนสีผมเพื่อปิดผมขาวและใช้แบบสอบถามถามกลุ่มตัวอย่างจำนวน 400 ชุด เป็นเครื่องมือในการศึกษาเชิงสำรวจ เพื่อเก็บรวบรวมข้อมูลส่วนบุคคล พฤติกรรมการใช้และระดับความสำคัญของปัจจัยความต้องการที่มีผลต่อการตัดสินใจซื้อผลิตภัณฑ์เปลี่ยนสีผมเพื่อปิดผมขาว โดยใช้แบบสอบถามออนไลน์เก็บข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่างจำนวน 400 ชุดและได้รับกลับมาเป็น 100 เปอร์เซ็น

การวิเคราะห์ข้อมูล

ผู้ศึกษาได้ใช้สถิติเชิงพรรณนา ในการวิเคราะห์ข้อมูล ได้แก่ การแจกแจงความถี่ (Frequency) การหาค่าร้อยละ (Percentage) ค่ามัชฌิมเลขคณิต (Arithmetic Means) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard

Deviation) ในการวิเคราะห์สภาพปัจจัยส่วนบุคคล พฤติกรรมการใช้และปัจจัยความต้องการที่มีผลต่อการตัดสินใจซื้อผลิตภัณฑ์เปลี่ยนสีผมพื่อปิดผมขาว การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงอนุมานในการทดสอบสมมุติฐาน ผู้วิจัยได้ใช้สถิติ Chi-square เพื่อหาความสัมพันธ์ของปัจจัยส่วนบุคคลและพฤติกรรมใช้ผลิตภัณฑ์เปลี่ยนสีผมเพื่อปิดผมขาว

ผลการทดลองและวิจารณ์

ผลการสำรวจปัจจัยความต้องการของผู้บริโภคต่อการตัดสินใจเลือกซื้อผลิตภัณฑ์เปลี่ยนสีผมเพื่อปิดผมขาวของผู้บริโภค

จากการเก็บข้อมูลโดยใช้วิธีการสัมภาษณ์ เพื่อสำรวจปัจจัยความต้องการของผู้บริโภคจำนวน 25 ราย โดยทำการรวบรวมคำสำคัญที่ผู้บริโภคพูดซ้ำๆเกี่ยวกับประเด็นความต้องการมาทำการนับจำนวน จากนั้นทำการจัดหมวดหมู่ความต้องการออกเป็น 4 กลุ่ม นำข้อมูลที่ได้มาทำการเรียบเรียงและตีความให้เป็นภาษาที่เข้าใจง่าย

Table 1 Consumer requirement for gray hair coloring products.

Consumer requirement		
Category	Description	Percentage (%)
Property	Long-lasting color.	21
	Variety of colors	12
	Products are natural.	19
	No odor	22
	Hair soft, not hard.	16
	Not harmful to the body.	10
Feature	Cream hair color	42
	Shampoo hair color	37
	Spray hair color	21
Usability	Reduce the time to use.	20
	Ready-to-use	4
Packaging	Provide data and details clearly.	28
	Beautiful packaging designs	12
	Packaging plastic bag	20
	Packaging Plastic Bottle	20
	Packaging tubes	12

จะเห็นว่าสามารถจัดหมวดหมู่ด้านความต้องการของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์เปลี่ยนสีผมเพื่อปิดผมขาวออกเป็น 4 กลุ่ม คือ ด้านคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ ด้านรูปลักษณะของผลิตภัณฑ์ ด้านการใช้งานผลิตภัณฑ์ และด้านบรรจุภัณฑ์ โดยในแต่ละด้านจะแบ่งความต้องการออกเป็นข้อๆดัง Table 1 จากผลการสำรวจปัจจัยความต้องการของผู้บริโภค ได้ทำการนำปัจจัยในแต่ละด้านไปใช้ในการจัดทำแบบสอบถามเพื่อศึกษาปัจจัยความต้องการที่มีผลต่อการตัดสินใจซื้อผลิตภัณฑ์เปลี่ยนสีผมเพื่อปิดผมขาวต่อไป

ผลการศึกษาปัจจัยส่วนบุคคล พฤติกรรมการใช้ และปัจจัยความต้องการของผู้บริโภคที่มีผลต่อการตัดสินใจซื้อผลิตภัณฑ์เปลี่ยนสีผมเพื่อปิดผมขาว

จากการเก็บรวบรวมข้อมูลโดยใช้แบบสอบถามจำนวน 400 ชุดเพื่อศึกษาปัยจัยส่วนบุคคล พฤติกรรมการใช้ และปัจจัยความต้องการที่มีผลต่อการตัดสินใจซื้อผลิตภัณฑ์เปลี่ยนสีผมเพื่อปิดผมขาว สามารถวิเคราะห์

ข้อมูลโดยใช้สถิติเชิงพรรณนา โดย Table 2 จะแสดงข้อมูลปัจจัยส่วนบุคคล และ พฤติกรรมการใช้ของผู้บริโภค วิเคราะห์โดยการแจกแจงความถี่และค่าร้อยละ

Table 2 Characteristics and Percentage of consumer who used hair coloring products.

Characteristics	Number (persons)	Percentage (%)	Characteristics	Number (persons)	Percentage (%)
Demographic			**Buying behavior**		
Gender			**Method of dyeing**		
Male	130	32.5	Dye hair by yourself	178	43.1
Female	270	67.6	Dye hair by others	79	19.1
Age			Dye hair at salon	156	37.8
30-39 years	124	31.1	**Frequency of dyeing**		
40-49 years	145	36.3	Every week	2	0.7
50-59 years	105	26.3	2-3 week/times	26	8.5
60 years above	25	6.3	1 month/times	82	26.8
Education			2 months/times	50	16.3
Lower than diploma	23	5.8	For longer than 2 months	146	47.7
Diploma/associate degree.	30	7.5	**Feature of product**		
Bachelor degree	189	47.3	Cream hair color	220	71.2
Master degree	110	27.5	Shampoo hair color	54	17.5
Higher than master's degree	48	12.0	Foam hair color	21	6.8
Income			Powder hair color	10	3.2
Less than 10,000 baht	27	6.8	**Brand for usage**		
10,001-20,000 baht	55	13.8	Loreal	88	22.0
20,001-30,000 baht	72	18.0	Schwarzkopf	33	8.3
30,001-40,000 baht	66	16.5	Poom Puksa	32	8.0
40,001-50,000 baht	63	15.8	**Popular of color**		
More than 50,000 baht	116	29.1	Natural black	127	31.8
Marital status			Natural brown	203	50.8
Single	144	36	**Information source**		
Married	227	56.8	Advisor	195	28.6
Others	29	7.3	Salon staff	117	17.1
Buying behavior			TV Commercial	129	18.9
Purpose of dyeing			Internet	84	12.3
Close the gray hair	202	41.7	**Purchase price**		
For social intercourse	32	6.6	Less than 200 baht	174	43.5
For beauty and fashion	123	25.4	201-500 baht.	174	43.5
To strengthen the personality.	124	25.6	501-1000 baht	40	10.0

การวิเคราะห์ข้อมูลด้านปัจจัยส่วนบุคคลกลุ่มตัวอย่างที่ทำการศึกษา โดยสัดส่วนทั้งหมดพบว่ากลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่เป็นเพศหญิงร้อยละ 67.5 กลุ่มช่วงอายุของกลุ่มตัวอย่างมากที่สุดอยู่ในช่วง 40-49 ปี คิดเป็นร้อยละ 36.3 โดยกลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่สมรส ร้อยละ 56.8 ระดับการศึกษากลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่จบการศึกษาระดับปริญญา ปริญญาตีร้อยละ 47.3 รายได้ของกลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่มีรายได้อยู่ในช่วง 20,000-50,000 บาท ร้อยละ 50.3

จากการเก็บข้อมูลกลุ่มตัวอย่างในด้านพฤติกรรมการใช้และการตัดสินใจซื้อ พบว่าจากกลุ่มตัวอย่างทั้งหมด 400 คน วัตถุประสงค์ในการย้อมสีผมของกลุ่มตัวอย่าง จากสัดส่วนผู้ที่ย้อมผม พบว่ากลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่ย้อมสีผมเพื่อปิดผมขาว ร้อยละ 41.7 ในด้านวิธีการย้อมกลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่ทำการย้อมด้วยตนเอง ร้อยละ 43.1 ความถี่ในการย้อมสีผมของกลุ่มตัวอย่าง นิยมย้อมผมนานกว่า 2 เดือนต่อครั้ง ร้อยละ 47.7 ในส่วนของลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ใช้ส่วนใหญ่ร้อยละ 71.2 ใช้ผลิตภัณฑ์ในรูปแบบของครีมเปลี่ยนสีผม ยี่ห้อของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนสีผมที่กลุ่มตัวอย่างนิยมใช้มากที่สุด คือ ยี่ห้อ ลอรีอัล คิดเป็นร้อยละ 22 ส่วนเฉดสีที่กลุ่มตัวอย่างสนใจมากที่สุดมี 2 เฉดสี คือ เฉดสีน้ำตาลธรรมชาติและเฉดสีดำธรรมชาติ คิดเป็นร้อยละ 50.8 และ 31.8 ตามลำดับ กลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่รับรู้ข่าวสารเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์เปลี่ยนสีผมจากการแนะนำของผู้อื่น ร้อยละ 28.6 ในส่วน

ของราคาผลิตภัณฑ์เปลี่ยนสีผมที่กลุ่มตัวอย่างยอมรับได้ในการซื้ออยู่ใน 2 ช่วงราคา คือ ราคาต่ำว่า 200 บาท และราคา 200-500 บาท ซึ่งคิดเป็นสัดส่วนเท่ากันที่ร้อยละ 43.5

Table 3 Analysis of consumer requirement factors purchase decisions on gray hair coloring products

Category	$\overline{x}$	S.D.	Result
Property	4.16	1.03	much
Feature	3.26	1.006	medium
Usability	3.97	1.001	much
Packaging	3.48	0.902	medium

จากผลการสำรวจปัจจัยความต้องการของผู้บริโภคข้างต้น (Table 1) ได้นำผลที่ได้มาทำการสอบถามระดับความสำคัญของปัจจัยในแต่ละด้าน เพื่อศึกษาปัจจัยความต้องการของผู้บริโภคที่มีผลต่อการตัดสินใจซื้อผลิตภัณฑ์เปลี่ยนสีผมเพื่อปิดผมขาว ซึ่งจากการวิเคราะห์ใน Table 3 โดยภาพรวมจะเห็นว่าปัจจัยด้านคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์และปัจจัยด้านการใช้งานมีระดับความสำคัญในระดับมาก มีค่าเฉลี่ย 4.16 และ 3.97 ตามลำดับ

Table 4 Result, mean and standard deviation of consumer requirement factors purchase decisions on gray hair coloring products.

Category	Description	$\overline{x}$	S.D.	Result
Property	Long-lasting color.	4.24	0.936	much
	Variety of colors	3.51	1.033	much
	Products are natural.	4.31	0.969	much
	No odor	4.18	1.128	much
	Hair soft, not hard.	4.32	1.022	much
	Not harmful to the body.	4.39	1.104	much
Feature	Cream hair color	3.49	0.936	medium
	Shampoo hair color	3.60	1.001	much
	Foam hair color	2.69	1.081	medium
Usability	Reduce the time to use.	3.96	1.031	much
	Ready-to-use	3.98	0.970	much
Packaging	Provide data and details clearly.	4.37	0.920	much
	Beautiful packaging designs	3.49	0.893	medium
	Packaging plastic bag	3.03	0.861	medium
	Packaging Plastic Bottle	3.20	0.881	medium
	Packaging tubes	3.30	0.953	medium

จาก Table 4 แสดงผลระดับความสำคัญของแต่ละด้านในทุกๆปัจจัย โดยปัจจัยด้านคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์จะเห็นว่าปัจจัยเรื่องความไม่เป็นอันตรายต่อร่างกายมีระดับความสำคัญมากที่สุด มีค่าเฉลี่ย 4.39 สอดคล้องกับงานวิจัยของเรวดี ธรรมธัชอารี (2555) ที่กล่าวว่าผู้บริโภคให้ความสำคัญในเรื่องความปลอดภัย รองลงมาคือ คุณสมบัติผมนุ่มสลวย ไม่แข็งกระด้าง มีค่าเฉลี่ย 4.32 ปัจจัยด้านคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์พบว่าคุณลักษณะที่กลุ่มตัวอย่างให้ระดับความสำคัญมากที่สุด มีค่าเฉลี่ย 3.6 คือแชมพูเปลี่ยนสีผม ปัจจัยด้านการใช้งานผลิตภัณฑ์ กลุ่มตัวอย่างให้ระดับความสำคัญของปัจจัยการใช้งานแบบสำเร็จรูปและการลดระยะเวลาการใช้งานในระดับความสำคัญที่ใกล้เคียงกัน คือที่ระดับมากทั้งสองปัจจัย มีค่าเฉลี่ย 3.98 และ 3.96 ตามลำดับ ปัจจัยด้านบรรจุภัณฑ์ผลิตภัณฑ์ พบว่าปัจจัยเรื่องการให้ข้อมูลและรายละเอียดที่ชัดเจนมีระดับความสำคัญมากที่สุด มีค่าเฉลี่ย 4.37 รองลงมาคือ ความสวยงามของบรรจุภัณฑ์ มีค่าเฉลี่ย 3.49

ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยส่วนบุคคลและพฤติกรรมการใช้ผลิตภัณฑ์สีย้อมปิดผมขาวของผู้บริโภค

จากการเก็บข้อมูลของกลุ่มตัวอย่างจำนวน 400 ชุด ข้อมูลด้านปัยจัยส่วนบุคคลและข้อมูลพฤติกรรมการใช้ผลิตภัณฑ์สีย้อมปิดผมขาวของผู้บริโภค เพื่อใช้ในการทดสอบสมมุติฐานผ่านการวิเคราะห์สถิติ โดยได้ใช้สถิติ Chi-square ในการหาความสัมพันธ์ของปัจจัยส่วนบุคคลและพฤติกรรมการใช้ผลิตภัณฑ์เปลี่ยนสีผมประเภทปิดผมขาว (Table 5)

Table 5 The relationship between personal factors and decision making behavior of a gray hair coloring purchasing products.

Variable	Factors influencing buying behavior							
	Purpose of dyeing	Method of dyeing	Frequency of dyeing	Feature of product	Brand for usage	Popular of color	Information source	Purchase price
Gender	39.688*	20.650*	6.639	4.322	45.883*	84.611*	24.159*	13.574*
Age	110.204*	7.249	52.729*	28.083*	58.739	16.273	54.360*	23.488*
Education	33.695	17.942	28.838*	26.773*	60.173	22.881	40.954	20.621
Income	29.004	37.875*	24.042	20.314	125.593*	29.258	37.374	36.890*
Marital status	16.473	2.719	13.007	7.333	41.255	19.030*	20.779	9.486

Remark:* significant at a statistical level of 0.05

จาก Table 5 แสดงค่า Chi-square เพื่อหาความสัมพันธ์ของปัจจัยส่วนบุคคลและพฤติกรรมการใช้ผลิตภัณฑ์เปลี่ยนสีผมเพื่อปิดผมขาว พบว่าปัจจัยส่วนบุคคลด้านเพศ มีความสัมพันธ์กับวัตถุประสงค์ในการย้อม วิธีการย้อม ยี่ห้อของผลิตภัณฑ์ที่บริโภค เฉดสีที่นิยมในการบริโภค แหล่งข้อมูลที่ข่าวสารและค่าใช้จ่ายที่ยอมรับได้ในการเลือกซื้อ ด้านอายุมีความสัมพันธ์กับวัตถุประสงค์ในการย้อม ความถี่ในการย้อม ลักษณะผลิตภัณฑ์ที่บริโภค แหล่งข้อมูลที่ให้ข่าวสาร แหล่งข้อมูลที่ให้ข่าวสาร ในขณะที่ปัยจัยด้านการศึกษา มีความสัมพันธ์กับความถี่ในการย้อมและลักษณะผลิตภัณฑ์ที่บริโภค ด้านรายได้ มีความสัมพันธ์กับความถี่ในการย้อม ลักษณะผลิตภัณฑ์ที่บริโภค และสถานภาพมีความสัมพันธ์กับเฉดสีที่นิยมบริโภค อย่างมีนัยยะสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

สรุป

ผลการศึกษาการสำรวจปัจจัยความต้องการของผู้บริโภค สามารถแบ่งปัญหาและความต้องการของผู้บริโภคจากการสัมภาษณ์ได้เป็นปัจจัยทั้งสิ้น 4 ด้าน คือ ด้านคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ ด้านรูปลักษณะของผลิตภัณฑ์ ด้านการใช้งานผลิตภัณฑ์ และด้านบรรจุภัณฑ์ ซึ่งผู้วิจัยสามารถนำรายละเอียดแต่ละด้านไปทำการศึกษาต่อโดยนำไปประยุกต์ใช้ในการตั้งข้อคำถามในแบบสอบถาม เพื่อศึกษาปัจจัยความต้องการที่มีผลการตัดสินใจซื้อผลิตภัณฑ์เปลี่ยนสีผมเพื่อปิดผมขาว

การศึกษาปัจจัยความต้องการที่มีผลการตัดสินใจซื้อผลิตภัณฑ์เปลี่ยนสีผมเพื่อปิดผมขาว เมื่อพิจารณาระดับความสำคัญปัจจัยในแต่ละด้าน พบว่าปัจจัยด้านคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์มีระดับความสำคัญสูงสุด โดยกลุ่มตัวอย่างให้ความสนใจในเรื่องความไม่เป็นอันตรายต่อร่างกายมากที่สุด รองลงมาคือคุณสมบัติผมนุ่มสลวยไม่แข็งกระด้าง

การศึกษาปัจจัยส่วนบุคคล และพฤติกรรมการใช้ที่มีผลการตัดสินใจซื้อผลิตภัณฑ์เปลี่ยนสีผมเพื่อปิดผมขาว เมื่อวิเคราะห์ผลการศึกษาจากค่าสถิติ Chi-square แสดงให้เห็นว่า ปัจจัยส่วนบุคคลด้านเพศ มี

ความสัมพันธ์กับพฤติกรรมการใช้มากที่สุด โดยมีความสัมพันธ์กับวัตถุประสงค์ในการย้อม วิธีการย้อม ยี่ห้อของผลิตภัณฑ์ที่บริโภค เฉดสีที่นิยมในการบริโภค แหล่งข้อมูลที่ข่าวสารและค่าใช้จ่ายที่ยอมรับได้ในการเลือกซื้อ

ข้อเสนอแนะในงานวิจัย

งานวิจัยในอนาคตนักวิจัยอาจกำหนดกลุ่มเป้าหมายในการศึกษาให้ชัดเจนมากขึ้น เพื่อจะได้ผลการศึกษาที่ตรงตามความต้องการของกลุ่มเป้าหมายอย่างแม่นยำต่อการนำไปพัฒนาผลิตภัณฑ์

เอกสารอ้างอิง

กุลธิดา สุดทิม. 2558. “การสำรวจการปฏิบัติตามกฎหมายของผลิตภัณฑ์ย้อมผมที่ใช้ในร้านเสริมสวย: กรณีศึกษาเขตตลิ่งชัน กรุงเทพมหานคร.” **วารสารอาหารและยา** 22 (1): 51-60.

กุลธิรา เกตุถิรกุล. 2553. **ทัศนคติและพฤติกรรมของวัยรุ่นต่อการใช้สเปรย์เปลี่ยนสีผม**. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์เครื่องสำอาง, มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง.

เรวดี ธรรมธัชอารี. 2555. **พฤติกรรมการเลือกซื้อผลิตภัณฑ์ครีมปิดขาวสมุนไพรในกรุงเทพมหานคร**. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์เครื่องสำอาง, มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง.

วรพรรณ จันทรากุลศิริ. 2547. **พฤติกรรมผู้บริโภคผลิตภัณฑ์เปลี่ยนสีผมในเขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร**. การค้นคว้าอิสระ ปริญญาบริหารธุรกิจมหาบัณฑิต สาขาบริหารธุรกิจ, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ศูนย์วิจัยกสิกรไทย. 2560. **เกาะกระแสสินค้าสุขภาพ สร้างโอกาสธุรกิจ**. ธนาคารกสิกรไทย

สุทธิเวช แสงจันทร์. 2531. “ยาย้อมผม.” **วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ**. (120): 7-12.

Cochran, W. G. 1963. **Sampling Technique**. 2nd Edition, John Wiley and Sons Inc., New York.

Euromonitor International. 2017. **Hair Care in Thailand Report**.

Griffen, A. and J. R. Hauser. 1993. **The voice of customers**. Marketing Science, pp: 1-27.

ผลของการเติมหัวเชื้อซาวร์โดต่อสมบัติทางกายภาพของขนมปังที่มีแป้งข้าวเจ้าเป็นส่วนผสมหลัก

Effect of Sourdough Culture Addition on Physical Properties of Rice Flour-based Bread

ปวีณ์สุดา ขีปนวัฒนา[1] นันทวัน เทอดไทย[1] และ วลัยรัตน์ จันทรปานนท์[1*]

Paweesuda Keepanawattana[1], Nantawan Therdthai[1] and Walairut Chantarapanont[1*]

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการเติมหัวเชื้อซาวร์โดต่อคุณสมบัติทางกายภาพของขนมปังที่มีแป้งข้าวเจ้าเป็นส่วนประกอบหลัก ทำการศึกษาปริมาณการเติมหัวเชื้อซาวร์โดในขนมปังที่มีแป้งข้าวเจ้าเป็นส่วนประกอบหลักจำนวน 3 ระดับ คือ 10% 15% และ 20% พบว่าเมื่อเติมปริมาณหัวเชื้อซาวร์โดมากขึ้น สีที่ผิวขนมปังมีค่าความสว่าง (L*) ลดลง ค่าความเข้มสี (C*) เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุมที่ระดับการเติมหัวเชื้อซาวร์โด 15% และ 20% ($p \leq 0.05$) ค่าเฉดสี (h) อยู่ในช่วงที่เป็นสีส้มและมีค่าลดลงในทุกสิ่งทดลองเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม ($p \leq 0.05$) ส่วนสีของเนื้อขนมปังมีค่าความสว่าง (L*) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเติมหัวเชื้อซาวร์โดที่ 15% และ 20% ($p \leq 0.05$) ความเข้มสี (C*) ลดลงเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม ($p \leq 0.05$) เฉดสี (h) อยู่ในเฉดสีเหลืองและไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ในส่วนของเนื้อสัมผัสเมื่อเติมปริมาณของหัวเชื้อ ซาวร์โดเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็ง ค่าความเหนียวเป็นกาวหรือยางและค่าความยากในการเคี้ยวมีค่าลดลง แต่ค่าความยืดหยุ่น และค่าความสามารถในการเกาะรวมตัวกันมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ค่าปริมาตรจำเพาะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ค่าความชื้นที่ผิวขนมปังมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม ($p \leq 0.05$) แต่ที่เนื้อขนมปังการเติมหัวเชื้อซาวร์โดส่งผลให้ความชื้นลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเติมหัวเชื้อซาวร์โดที่ 15% และ 20% ($p \leq 0.05$) นอกจากนี้การเติมหัวเชื้อซาวร์โดไม่มีผลต่อค่า Aw ทั้งที่ผิวและเนื้อขนมปัง ($p > 0.05$)

ABSTRACT

The objective of this research was to study effect of sourdough culture addition on physical properties of rice flour-based bread. Three levels of sourdough culture were added to rice flour-based bread; 10%, 15% and 20%. Results showed that when level of sourdough culture addition increased, lightness (L*) of bread crust decreased, chroma (C*) increased which differed significantly at 15% and 20% sourdough culture addition ($p \leq 0.05$) and hue (h) which showed in orange color range decreased significantly after adding sourdough culture compared with control ($p \leq 0.05$). Bread crumb showed lightness (L*) decreased significantly when adding 15% and 20% sourdough culture ($p \leq 0.05$), chroma (C*) decreased significantly in all treatments when compared with control ($p \leq 0.05$) and hue (h) which showed in yellow color range were insignificant difference in all samples ($p > 0.05$). When adding more sourdough culture leading to increase in hardness, gumminess and chewiness but decrease significantly in springiness and cohesiveness compared with control ($p \leq 0.05$). The specific volume of sourdough bread increased significantly ($p \leq 0.05$). The moisture content of bread crust increased significantly when adding more sourdough culture ($p \leq 0.05$), but showed decreasing significantly in bread crumb when adding 15% and 20% sourdough culture ($p \leq 0.05$). Moreover, addition of sourdough culture did not show significant difference in Aw of bread crust and crumb ($p > 0.05$).

Key Words: rice flour, sourdough, rice bread

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

[1]ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Product Development, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

ขนมปังเป็นอาหารหลักในหลายประเทศทั่วโลก เนื่องจากเป็นแหล่งคุณประโยชน์สำคัญต่อร่างกาย ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน แร่ธาตุ และวิตามิน (Altamirano-Fortoul *et al*., 2012) ซึ่งโดยทั่วไปขนมปังมักจะผลิตโดยการใช้แป้งสาลีผสมกับน้ำในอัตราส่วนที่เหมาะสมและนวดจนกลายเป็นแป้งโด (dough) ภายในโดเกิดการสร้างตัวของโปรตีนกลูเตน (gluten) ทำให้ขนมปังที่ได้มีลักษณะขึ้นฟู ให้เนื้อสัมผัสที่เหนียวนุ่มและยืดหยุ่น ในปัจจุบันแนวโน้มการบริโภคผลิตภัณฑ์เบเกอรีเพิ่มสูงขึ้น จึงได้รับการการสนับสนุนจากรัฐบาลให้ผลิตงานวิจัยที่สามารถใช้ประโยชน์จากแป้งข้าวซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทยเพื่อทดแทนการนำเข้าข้าวสาลี (ฐิติมา, 2557) ด้วยคุณประโยชน์แป้งข้าวได้รับการยอมรับว่าเป็นแป้งที่มีคุณค่าทางโภชนาการ เช่น มีคาร์โบไฮเดรต และโปรตีนที่ย่อยง่าย อีกทั้งยังไม่มีโปรตีนกลูเตนที่ก่อให้เกิดอาการแพ้ (สำนักวิจัยและพัฒนาข้าว กรมการข้าว, ม.ป.ป.) แต่ในการผลิตขนมปังจากแป้งข้าวที่ไม่มีองค์ประกอบของโปรตีนกลูเตนในการสร้างโครงสร้างเพื่อกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการผลิตของยีสต์ จึงต้องมีการเติมสารทดแทนชนิดอื่นเพื่อให้ขนมปังที่ได้มีคุณภาพใกล้เคียงกับขนมปังทั่วไปที่ผลิตจากแป้งสาลี เช่น การเติมโปรตีนจากถั่วเหลือง และสารไฮโดรคอลลอยด์อย่าง Hydroxypropyl Methylcellulose (HPMC) เป็นต้น นอกจากนี้การใช้หัวเชื้อซาวร์โด (sourdough) ซึ่งได้จากการหมักของเชื้อจุลินทรีย์ 2 กลุ่ม ได้แก่ แบคทีเรียที่ผลิตกรดแลคติก (lactic acid bacteria: LAB) และยีสต์ (yeast) เป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับกระบวนการผลิตขนมปังจากแป้งข้าว โดยหัวเชื้อซาวร์โดทำหน้าที่เพิ่มการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากยีสต์ในระบบการหมักช่วยเพิ่มรูพรุนและปริมาตรให้แก่ขนมปัง ส่งผลให้ใช้เวลาในกระบวนการหมักลดลง ส่วน LAB ช่วยเพิ่มความเป็นกรดให้กับโดจึงเป็นการส่งเสริมคุณภาพด้านกลิ่นรสขนมปัง (Martinez-Anaya, 2003) และเพิ่มประสิทธิภาพในการเก็บรักษา เช่น ชะลอการเกิดกระบวนการรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) หรือการคืนตัวของสตาร์ช ทำให้ขนมปังนุ่มฟูได้นานยิ่งขึ้น นอกจากนี้ในแง่สุขภาพขนมปังซาวร์โดเป็นอาหารที่ย่อยง่าย ดูดซึมได้ง่าย และยังมีค่าดัชนีการปลดปล่อยน้ำตาล (glycemic index) ต่ำ ทำให้ลดความเสี่ยงต่อโรคอ้วนและเบาหวาน (Catzaddu, 2011) ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายในการศึกษาผลการเติมหัวเชื้อซาวร์โดต่อคุณสมบัติทางกายภาพของขนมปังที่มีแป้งข้าวเจ้าเป็นส่วนผสมหลัก เพื่อนำไปใช้ในการพัฒนาคุณภาพของขนมปังที่มีแป้งข้าวเจ้าเป็นส่วนผสมหลักต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

1. เตรียมหัวเชื้อซาวร์โดและวิเคราะห์คุณภาพ

นำหัวเชื้อซาวร์โดทางการค้าแบบแห้ง (Edwood, ประเทศสหรัฐอเมริกา) 1 ซอง (28 กรัม) แป้งสาลีไม่ฟอกสี (Bob's red mill, ประเทศสหรัฐอเมริกา) 78 กรัม และน้ำอุ่น 240 กรัม ผสมให้เข้ากัน บรรจุลงในขวดโหลแก้วมีฝาปิดแล้วนำไปบ่มในตู้บ่ม (B 40, Mammert, ประเทศเยอรมนี) ที่อุณหภูมิ 35°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการเติมแป้ง 104 กรัม และน้ำ 120 กรัม นำไปบ่มในตู้บ่ม (MIR-153, Sanyo, ประเทศญี่ปุ่น) ที่อุณหภูมิ 21-22°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำการตักหัวเชื้อที่ได้ออกใส่ขวดโหลใหม่ให้มีความสูงจากฐานขวดประมาณ 1-1.5 นิ้ว เติมแป้งและน้ำตามอัตราส่วนเดิมทุกๆ 12 ชั่วโมง และบ่มในตู้บ่มที่อุณหภูมิ 25°C ทำซ้ำจนกว่าโดจะเพิ่มขนาดจนมีความสูงเพิ่มขึ้นจากเดิม 1-2 นิ้ว จึงจะนำไปทำการศึกษาต่อ (ดัดแปลงจาก Sourdoughs International, 2018) และทำการวัดค่าคุณภาพ ดังนี้

1.1 วิเคราะห์ค่าความเป็นกรดเบส (pH)

นำตัวอย่างหัวเชื้อซาวร์โดที่ได้ผสมกับน้ำกลั่นในอัตราส่วน 1 ต่อ 10 โดยน้ำหนัก ผสมให้เข้ากัน จากนั้นหาค่าความเป็นกรดเบสเครื่อง pH meter (C830p, Consort, ประเทศเบลเยียม)

1.2 วิเคราะห์ปริมาณกรด

ชั่งตัวอย่างหัวเชื้อซาวร์โดด้วยเครื่องชั่ง (Practum 3102-1s, Satorius, ประเทศเยอรมนี) จำนวน 10 กรัม ผสมกับน้ำกลั่น 90 มิลลิลิตร หยดสารฟีนอล์ฟทาลีน 2-3 หยด นำมาไทเทรตกับสารละลายมาตรฐาน 0.1 N NaOH (Merck, ประเทศเยอรมนี) จนถึงจุดยุติของสารละลายจะมีสีชมพูนานประมาณ 30 วินาที บันทึกปริมาตร NaOH ที่ใช้และคำนวณหาปริมาณกรดในตัวอย่างโดยพิจารณาน้ำหนักสมมูลของกรดแลคติกเท่ากับ 90.08 ตามวิธีมาตรฐาน AOAC (2000)

1.3 วิเคราะห์ปริมาณ Lactic acid bacteria (LAB) และยีสต์ราในซาวร์โด

ชั่งตัวอย่างโด 25 กรัม ด้วยวิธี aseptic technique ใส่ในถุง stomacher จากนั้นเติม 0.1% peptone (Difco, ประเทศสหรัฐอเมริกา) ที่ผ่านการฆ่าเชื้อปริมาตร 225 มิลลิลิตร ก่อนไปตีปั่นด้วยเครื่อง stomacher (BA 7021, Seward, ประเทศอังกฤษ) เป็นเวลา 60 วินาที เจือจางตัวอย่างครั้งละ10 เท่า โดยใช้ 0.1% peptone จนได้ตัวอย่างที่มีระดับความเจือจางเหมาะสม วิเคราะห์หา LAB ด้วยวิธี spread plate technique ลงบนอาหารเลี้ยงเชื้อ DeMan, Rogosa and Sharpe Agar (MRS) (Difco, ประเทศฝรั่งเศส) นำไปบ่มในตู้บ่ม (2771, Kottermann, ประเทศเยอรมนี) ที่อุณหภูมิ 35°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง และวิเคราะห์หายีสต์ราด้วยวิธี pour plate technique โดยใช้อาหารเลี้ยงเชื้อ Dichloran Rose-Bengal Chloramphenicol Agar (DRBC) (Difco, ประเทศฝรั่งเศส) แล้วนำไปบ่มในตู้บ่มที่อุณหภูมิ 25°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง (ดัดแปลงจาก Aplevicz *et al*., 2014)

2. ศึกษาผลของการเติมซาวร์โดต่อคุณสมบัติทางกายภาพของขนมปังจากแป้งข้าว

ศึกษาปริมาณการเติมหัวเชื้อซาวร์โดที่ผ่านการกระตุ้นในปริมาณที่แตกต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ 10% 15% และ 20% วางแผนการทดลองแบบสุ่มตลอด (completely randomized design: CRD) เตรียมโดขนมปังโดยนำส่วนผสม ได้แก่ แป้งข้าวหอมมะลิ (เพชรพานทอง, ประเทศไทย) ยีสต์แห้ง (Bruggeman, ประเทศเบลเยียม) เกลือ (ปรุงทิพย์, ประเทศไทย) HPMC (บริษัท วิคกี้ เอ็นเตอร์ไพรส์ จำกัด, ประเทศไทย) และโปรตีนถั่วเหลือง (บริษัท วิคกี้ เอ็นเตอร์ไพรส์ จำกัด, ประเทศไทย) ตามปริมาณที่ระบุใน Table 1 มาผสมเข้าด้วยกัน จากนั้นเติมน้ำและหัวเชื้อซาวร์โดในปริมาณที่ระบุ ผสมส่วนผสมให้เข้ากันโดยใช้เครื่องผสม (5K5SS, Kitchen Aid, ประเทศสหรัฐอเมริกา) ที่ความเร็วต่ำ (ความเร็วระดับ 2 จาก 10 ระดับ) นาน 2 นาที และปรับเป็นความเร็วปานกลาง (ความเร็วระดับ 4 จาก 10 ระดับ) นาน 3 นาที เมื่อส่วนผสมเข้ากันเติมเนยจืดละลาย (Allowrie, ประเทศไทย) แล้วผสมต่อที่ความเร็วปานกลางเช่นเดิม นาน 3 นาที แบ่งส่วนผสมลงในแม่พิมพ์ขนมปัง (ขนาด 5.4x9.8x5.6 เซนติเมตร) ปริมาณ 200 กรัม ต่อพิมพ์ ก่อนนำเข้าตู้บ่ม (SIH 288 AEH, บริษัท สยามอินคูเบเตอร์ซิสเต็ม จำกัด, ประเทศไทย) ที่อุณหภูมิ 30°C ความชื้นสัมพัทธ์ 80% เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำไปอบในตู้อบลมร้อน (DH4B-B, บริษัท กล้วยน้ำไทยเตาอบ จำกัด, ประเทศไทย) ที่อุณหภูมิ 190°C เป็นเวลา 40 นาทีปิดสนิทในถุงพลาสติก polypropylene เก็บที่อุณหภูมิห้อง 1 วัน หลังจากนั้นวิเคราะห์คุณภาพดังต่อไปนี้

2.1 การวิเคราะห์สี

วัดค่าสีในระบบ CIE L*C*h ของผิวขนมปัง (crust) และเนื้อขนมปัง (crumb) ด้วยเครื่อง

Table 1 Percentage of ingredients in bread making

Ingredients	Control	SD 10%	SD 15%	SD 20%
Rice flour	43.2	39.0	36.8	34.6
Dried yeast	0.6	0.5	0.5	0.5
Salt	0.3	0.2	0.2	0.2
HPMC	2.0	1.8	1.7	1.6
Soy Protein	2.0	1.8	1.7	1.6
Water	49.7	44.8	42.3	39.8
Butter	2.2	1.9	1.8	1.7
Sourdough	-	10.0	15.0	20.0

Modified from: Zhang *et al.* (2018)

Spectrophotometer (CM-3500d, Konica Minolta, ประเทศญี่ปุ่น) โดยสุ่มตำแหน่งบนผิวและเนื้อขนมปังเพื่อวัดค่า 5 ครั้ง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย จากนั้นคำนวณค่าความแตกต่างของสีเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม (ΔE^*) โดยตัวอย่างควบคุมที่ใช้คือขนมปังที่มีแป้งข้าวเจ้าเป็นส่วนผสมหลักและไม่เติมหัวเชื้อซาวร์โด (ดัดแปลงจาก Almeida *et al*., 2013)

2.2 การวิเคราะห์เนื้อสัมผัส

การวัดค่าเนื้อสัมผัส (texture profile) ของเนื้อขนมปัง ด้วยเครื่อง texture analyzer (TA.XT Plus, Satable Micro systems, ประเทศอังกฤษ) ทำการปรับมาตรฐานเครื่องจากนั้นนำตัวอย่างเนื้อขนมปังบริเวณใจกลางแผ่นขนมปังขนาด 20x20x20 มิลลิเมตร วัดค่าคุณภาพเนื้อสัมผัสด้วย cylinder Probe ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร (P50) กำหนดให้หัวกดเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว (test speed) 2 มิลลิเมตรต่อวินาที ที่ deformation 60% ทำการวัดค่าจำนวน 12 ซ้ำ บันทึกผลเป็นค่าความแข็ง (hardness) ความยืดหยุ่น (springiness) ความสามารถในการเกาะรวมตัวกัน (cohesiveness) ความเหนียวเป็นกาวหรือยาง (gumminess) และความยากในการเคี้ยว (chewiness) (ดัดแปลงจากสุภรัตน์, 2558)

2.3 การวิเคราะห์ปริมาตรจำเพาะ

ชั่งน้ำหนักตัวอย่างขนมปังที่เย็นแล้วและหาปริมาตรขนมปังโดยใช้วิธีการแทนที่ด้วยเมล็ดงา (Sesame seed displacement) ใช้ทำการวัดค่าจำนวน 3 ซ้ำ จากนั้นคำนวณหาปริมาตรจำเพาะ (Julianti *et al*., 2017)

2.4 การวิเคราะห์ความชื้น

ใช้วิธี Oven method ด้วยเครื่องอบลมร้อน (FD115, Scientific Promotion, ประเทศเยอรมนี) วิเคราะห์หาปริมาณความชื้นของผิวและเนื้อของขนมปัง ในหน่วยร้อยละ ตามวิธีมาตรฐาน AOAC (2000)

2.5 การวิเคราะห์ปริมาณน้ำอิสระ (water activity: Aw)

วัดค่า Aw ของตัวอย่างผิวและเนื้อของขนมปังด้วยเครื่อง AquaLab (3TE, Meter Group, Inc, ประเทศสหรัฐอเมริกา)

3. วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วางแผนการทดลองทางสถิติโดยใช้ Completely Randomized Design (CRD) นำผลการทดลอง

ที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรรวน (ANOVA) เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยค่าคุณภาพของตัวอย่าง โดยใช้วิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และทำการทดลองทั้งหมด 2 ซ้ำ

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. การเตรียมหัวเชื้อซาวร์โดและวิเคราะห์คุณภาพ

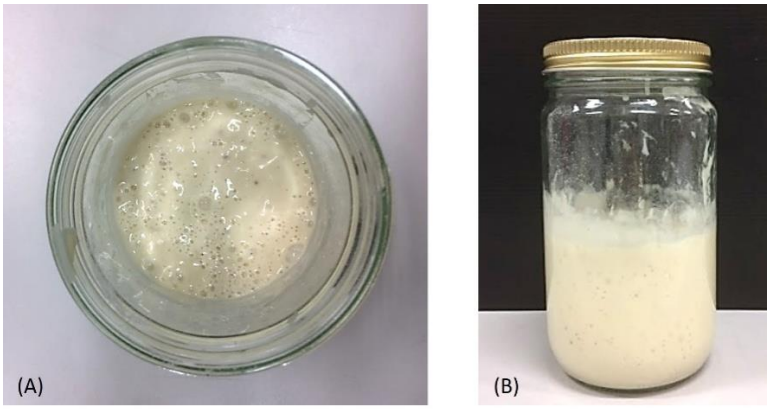


Figure 1 Appearance of activated sourdough starter; top view (A) and side view (B)

หลังจากกระตุ้นหัวเชื้อซาวร์โด พบว่าหัวเชื้อซาวร์โดที่ได้มีความสูงเพิ่มขึ้นจากก่อนบ่มประมาณ 1-2 นิ้ว มีฟองก๊าซกระจายตัวอยู่รอบขวด โดมีความข้นหนืด สามารถไหลได้ปานกลาง มีกลิ่นเปรี้ยว และกลิ่นแอลกอฮอล์เล็กน้อย หัวเชื้อซาวร์โดที่มีความชื้นตั้งต้น 56% ค่าความเป็นกรดเบสอยู่ในช่วง 3.61-3.70 ปริมาณกรดแลคติกเป็นร้อยละ 0.93 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Aplevicz *et al.* (2014) ที่ได้ค่า pH ของหัวเชื้อซาวร์โดมีค่าประมาณ 3.5-4.3 แต่น้อยกว่าในงานวิจัยของ Novotni *et al.* (2012) ที่ได้ค่า pH ของหัวเชื้อซาวร์โด 4.01 อาจมีสาเหตุมาจากความแตกต่างของสายพันธุ์หัวเชื้อตั้งต้นธรรมชาติของกระบวนการหมักและชนิดของแป้งที่ใช้กระตุ้นส่งผลให้มีประสิทธิภาพการผลิตกรดแตกต่างกัน นอกจากนี้พบว่ามีปริมาณเชื้อ LAB อยู่ 8.15×10^{8} CFU ต่อกรัม ปริมาณยีสต์รา 4.45×10^{7} CFU ต่อกรัม ซึ่งสอดคล้องกับ Aplevicz *et al.* (2014) ที่พบ LAB ในหัวเชื้อซาวร์โดโดยประมาณ 10^{8} CFU ต่อกรัม และพบยีสต์ในสกุล *Saccharomyces* และ *Candida* ประมาณ 10^{7} CFU ต่อกรัม

2. การศึกษาผลของการเติมหัวเชื้อซาวร์โดต่อคุณสมบัติทางกายภาพของขนมปังจากแป้งข้าว

ลักษณะปรากฏของขนมปังจากแป้งข้าวที่มีการเติมหัวเชื้อซาวร์โดที่แตกต่างกันแสดงดัง Figure 2 แสดงให้เห็นว่าขนมปังที่ไม่เติมซาวร์โดหรือสูตรควบคุม (A) มีผิวสีขาว สว่าง ผิวหน้าแห้ง แข็ง มีรอยแตกจากการขยายตัวของโด ภายในเนื้อขนมปังค่อนข้างแน่น และมีรูพรุนกระจายตัวทั่ว ส่วนขนมปังซาวร์โดที่ระดับความเข้มข้นซาวร์โด 10% (B), 15% (C) และ 20% (D) มีผิวสีน้ำตาล ผิวหน้าแห้ง มีรอยแตกจากการขยายตัวของโด ภายในเนื้อขนมปังโปร่งกว่าสูตรควบคุม และมีรูพรุนกระจายตัวทั่วขนมปัง โดยพบรูพรุนจำนวนมากและมีขนาดใหญ่ในสูตรเติมซาวร์โด 15 และ 20% เนื่องจากระดับการเติมซาวร์โดมีความเหมาะสมกับปริมาณส่วนประกอบอื่นๆ จึงช่วยเพิ่มความสามารถในการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของโดได้อย่างเหมาะสม

จากการศึกษาค่าสีในระบบ CIE L*C*h ที่บริเวณผิวขนมปัง (bread crust) และเนื้อขนมปัง (bread crumb) พบว่าการเติมหัวเชื้อซาวร์โดในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลให้ค่าสีของผิวขนมปังมีค่าความสว่าง (L*) มีค่า

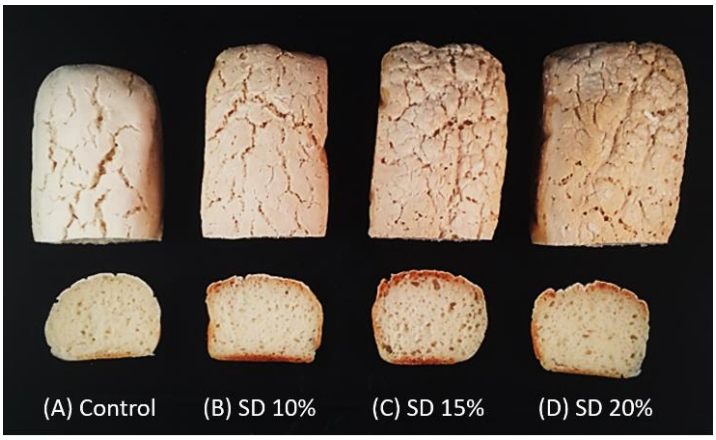


Figure 2 Effect of different levels of sourdough added in rice bread; A: control or without sourdough, B: 10% sourdough (SD), C: 15% sourdough (SD), and D: 20% sourdough (SD)

ลดลง ค่าความเข้มสี (C*) ที่ระดับการเติมหัวเชื้อซาวร์โดที่ 15 และ 20% เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ส่วนค่าเฉดสี (h) ของผิวขนมปังมีค่าอยู่ในช่วง 76.53-86.54 ซึ่งอยู่ในช่วงโทนสีส้ม การเติมหัวเชื้อซาวร์โดทำให้ค่าเฉดสีของผิวขนมปังลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) กล่าวคือการเติมหัวเชื้อซาวร์โดในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้ผิวขนมปังมีโทนสีส้มมากขึ้นและมีค่าเข้าใกล้สีแดงมากขึ้นเช่นกัน เมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม ค่าความแตกต่างของสีโดยรวม (ΔE^*) แตกต่างจากตัวอย่างควบคุมมากขึ้น ในส่วนของค่าสีของเนื้อขนมปังเมื่อเติมหัวเชื้อซาวร์โดในปริมาณที่มากขึ้น ค่าความสว่าง (L*) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเติมหัวเชื้อซาวร์โดที่ระดับ 15 และ 20% ($p \leq 0.05$)ค่าความเข้มสี (C*) มีค่าลดลงในตัวอย่างที่มีการเติมหัวเชื้อซาวร์โดเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม ($p \leq 0.05$) แต่ปริมาณการเติมหัวเชื้อซาวร์โดไม่มีผลต่อค่าความเข้มของสี ($p > 0.05$) ส่วนค่าเฉดสี (h) ของเนื้อขนมปังมีค่าอยู่ในช่วง 90.81-91.45 ซึ่งอยู่ในช่วงโทนสีเหลือง การเติมหัวเชื้อซาวร์โดในปริมาณที่มากขึ้นไม่ส่งผลให้สีเนื้อขนมปังเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม ($p > 0.05$) ค่าความแตกต่างของสีโดยรวม (ΔE^*) แตกต่างจากตัวอย่างควบคุมน้อยลง ทั้งนี้ในตัวอย่างที่มีการเติมหัวเชื้อซาวร์โดจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของบริเวณผิวขนมปังมากกว่าในเนื้อขนมปังเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรควบคุม มีสาเหตุมาจาก LAB ในหัวเชื้อซาวร์โดทำให้เกิดการสร้างเอนไซม์ในการย่อยสลายโมเลกุลแป้งให้เป็นน้ำตาลในกลุ่ม exopolysaccharide oligosaccharide ราฟฟิโนส เป็นต้น (Houben *et al.*, 2012) และมีการย่อยสลายโปรตีนเป็นกรดอะมิโนในช่วงกระบวนการหมัก เมื่อโดได้รับความร้อนในช่วงกระบวนการอบทำให้เกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) ที่บริเวณผิวขนมปัง จึงเกิดสีน้ำตาลมากกว่าเนื้อขนมปัง และเกิดปฏิกิริยามากขึ้นตามปริมาณหัวเชื้อซาวร์โดที่เติมลงไป ส่งผลให้มีความสว่าง (L*) ลดลง และความเข้มของสี (C*) สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงใน Table 2

ในส่วนของเนื้อสัมผัสเมื่อเติมปริมาณของหัวเชื้อซาวร์โดเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็ง ค่าความเหนียว เป็นกาวหรือยาง และค่าความยากในการเคี้ยวมีค่าลดลง แต่ค่าความยืดหยุ่น และค่าความสามารถในการเกาะรวมตัวกันมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรควบคุม ($p \leq 0.05$) ดังแสดงใน Table 2 ซึ่งผลที่ได้ใกล้เคียงงานวิจัยของของ สุภรัตน์ (2558) เนื่องจากหัวเชื้อซาวร์โดช่วยเพิ่มความสามารถในการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของโด เพิ่มรูพรุนในขนมปัง ทำให้ขนมปังที่ได้มีความอ่อนนุ่มและยืดหยุ่น (Mert *et al.*, 2014) นอกจากนี้การเติมซาวร์โดร่วมกับการเติม HPMC และโปรตีนถั่วเหลืองจะช่วยสร้างความข้นหนืด

Table 2 Quality parameters of rice flour-based bread (control) compare with sourdough culture added rice flour-based bread

Quality parameters	Control	SD 10%	SD 15%	SD 20%
Bread crust				
Color				
L*	83.38±0.51^{a}	81.34±1.05^{b}	77.32±1.01^{c}	75.46±0.87^{d}
C*	13.37±0.79^{b}	14.22±1.00^{b}	16.68±0.90^{a}	17.51±0.79^{a}
h	86.54±0.52^{a}	80.37±0.18^{b}	77.60±0.87^{c}	76.53±0.75^{c}
ΔE*	-	2.26±1.33^{b}	5.54±1.26^{a}	6.55±1.12^{a}
Moisture (%)	25.72±0.13^{c}	27.82±0.06^{b}	28.83±0.31^{a}	27.48±0.37^{b}
Aw ^{ns}	0.95±0.01	0.94±0.01	0.93±0.01	0.93±0.01
Bread crumb				
Color				
L*	75.62±0.92^{a}	75.42±0.93^{a}	73.61±0.36^{b}	71.59±0.97^{c}
C*	13.55±0.18^{a}	11.95±0.49^{b}	11.46±0.81^{b}	11.42±1.05^{b}
h ^{ns}	91.37±0.26	91.32±0.27	91.45±0.86	90.81±0.46
ΔE*	-	4.23±0.96^{a}	2.91±0.36^{b}	1.43±0.54^{c}
Texture profile				
Hardness (N)	26.28±0.93^{a}	14.10±1.76^{b}	9.04±0.58^{c}	7.43±0.73^{d}
Springiness	0.61±0.04^{b}	0.81±0.03^{a}	0.81±0.02^{a}	0.80±0.05^{a}
Cohesiveness	0.45±0.02^{c}	0.57±0.02^{b}	0.62±0.07^{a}	0.59±0.03^{ab}
Gumminess	11.88±0.47^{a}	8.01±1.11^{b}	5.63±0.80^{c}	4.38±0.35^{d}
Chewiness	7.27±0.59^{a}	6.45±0.71^{b}	4.57±0.71^{c}	3.48±0.20^{d}
Moisture (%)	52.20±0.61^{a}	51.71±0.23^{ab}	50.99±0.44^{b}	51.12±0.26^{b}
Aw ^{ns}	0.98±0.00	0.98±0.00	0.97±0.00	0.98±0.00
Whole bread				
Specific volume (ml/g)	1.11±0.08^{c}	1.39±0.08^{b}	1.76±0.11^{a}	1.85±0.02^{a}

$^{a-d}$ Means within the same row followed by different letters were significantly different ($p \leq 0.05$)

^{ns} Means within the same row followed by different letters were not significantly different ($p > 0.05$)

ความสามารถในการยืดเกาะให้กับโด และเพิ่มเนื้อสัมผัสให้กับขนมปังด้วยเช่นกัน (Houben *et al*., 2012)

นอกจากนี้การเติมปริมาณหัวเชื้อซาวร์โดที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลให้ค่าปริมาตรจำเพาะเพิ่มขึ้นและแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับสูตรควบคุม ($p \leq 0.05$) เนื่องจากยีสต์ในหัวเชื้อซาวร์โดมีส่วนช่วยให้เกิดฟองก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และฟองก๊าซนั้นสามารถทำให้โดขยายตัวได้มากกว่าสูตรควบคุม ส่งผลให้มีปริมาตรจำเพาะเพิ่มขึ้น (Mert *et al*., 2014)

เมื่อมีการเติมหัวเชื้อซาวร์โดส่งผลให้ค่าความชื้นที่ผิวขนมปังเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม ($p \leq 0.05$) ส่วนที่เนื้อขนมปังการเติมหัวเชื้อซาวร์โดที่ระดับ 15 และ 20% ทำให้ความชื้นที่เนื้อขนมปังลดลงเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม ($p \leq 0.05$) นอกจากนี้ปริมาณการเติมหัวเชื้อซาวร์โดในระดับที่

แตกต่างกันไม่มีผลต่อค่า Aw ที่ผิวและเนื้อขนมปังเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรควบคุม ($p>0.05$) โดยพบว่าที่ผิวมีค่า Aw ต่ำกว่าที่เนื้อของขนมปัง เช่นเดียวกับค่าความชื้นที่พบว่าที่ผิวมีค่าน้อยกว่าที่เนื้อ แต่ค่าความชื้นที่ผิวมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับตัวอย่างควบคุม ($p\leq0.05$) สุภรัตน์ (2558) และ Rinaldi (2017) ได้กล่าวไว้ว่า กระบวนการอบขนมปังด้วยลมร้อนทำให้ผิวขนมปังเกิดขึ้นเร็ว การระเหยน้ำจากภายในสู่ภายนอกเกิดได้น้อยลง และส่งผลให้มีความชื้นสะสมในเนื้อขนมปังมากขึ้น รวมถึงขั้นตอนการเก็บรักษาขนมปังก่อนที่จะทำการวิเคราะห์ความชื้นภายในเนื้อขนมปังเคลื่อนที่มาบริเวณเนื้อขนมปังส่วนนอกใกล้กับผิวขนมปังแต่ไม่สามารถระเหยออกไปได้ด้วยโครงสร้างผิวที่แห้งและแข็ง ทำให้ความชื้นสะสมบริเวณผิวมากขึ้น ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงความชื้นในขนมปังส่วนหนึ่งมาจากเติมหัวเชื้อซาวร์โดที่มีความชื้นตั้งต้น 56% ทำให้ความชื้นที่ผิวมากกว่าตัวอย่างควบคุม ส่วนค่า Aw หรือปริมาณน้ำอิสระที่ไม่แตกต่างกันในขนมปังซาวร์โดและตัวอย่างควบคุม อาจเกิดจากการที่หัวเชื้อซาวร์โดช่วยให้มีการย่อยสลายของสารอาหารต่างๆ ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน หรือไขมัน น้ำในกระบวนการส่วนหนึ่งเข้าไปอยู่รวมตัวกับโมเลกุลสารอาหารด้วยพันธะไฮโดรเจนมากขึ้น (bound water) ทำให้ค่า Aw ไม่เปลี่ยนแปลง (สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.), ม.ป.ป.)

สรุป

การเติมหัวเชื้อซาวร์โดมีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของขนมปังที่มีแป้งข้าวเจ้าเป็นส่วนประกอบหลัก พบว่าการเติมหัวเชื้อซาวร์โดจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสีบริเวณผิวขนมปังมากกว่าในเนื้อขนมปัง ทำให้มีความแข็ง ค่าความเหนียวเป็นกาวหรือยางและค่าความยากในการเคี้ยวลดลง แต่ให้ค่าการเกาะตัวรวมกันและความยืดหยุ่นสูงขึ้น ช่วยเพิ่มการขึ้นฟูโดยให้ปริมาตรจำเพาะของขนมปังสูงขึ้น ค่าความชื้นที่ผิวขนมปังมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ทำให้ค่าความชื้นที่เนื้อขนมปังลดลง ทั้งนี้การเติมหัวเชื้อซาวร์โดไม่มีผลต่อค่า Aw ทั้งที่ผิวและเนื้อขนมปัง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัท วิคกี้ เอ็นเตอร์ไพรส์ จำกัด (ประเทศไทย) ที่สนับสนุนแหล่งวัตถุดิบ ได้แก่ HPMC และโปรตีนถั่วเหลืองในการวิจัย และขอขอบคุณคณะอุตสาหกรรมเกษตรที่สนับสนุนทุนในการนำเสนอผลงานในการประชุมวิชาการ ครั้งที่ 57 ณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารอ้างอิง

ฐิติมา ธันวราคม. 2557. **ผลของโปรตีนและสภาวะการอบต่อคุณภาพของขนมปังแป้งข้าว**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สุภรัตน์ จิตรรักษ์บำรุง. 2558. **ผลของซาวโดและสภาวะการอบต่อคุณภาพของขนมปังปราศจากกลูเตน**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.). ม.ป.ป. **เคมีอาหาร (food chemistry)**. แหล่งที่มา: http://www.scimath.org/lesson-chemistry/item/7185-food-chemistry, 28 พฤศจิกายน 2561.

สำนักวิจัยและพัฒนาข้าว กรมการข้าว. ม.ป.ป. **กลุ่มผลิตภัณฑ์จากแป้งข้าวทดแทนข้าวสาลี**. แหล่งที่มา: http://www.ricethailand.go.th/Rkb/product/index.php-file=content.php&id=12.htm, 15 กุมภาพันธ์ 2561.

Almeida, E.L., Y.K. Chang and C.J. Steel. 2013. Dietary fibre sources in bread: Influence on technological quality. LWT - Food Science and Technology. 50: 545-553.

Altamirano-Fortoul, R., R. Moreno-Terrazas, A. Quezada-Gallo and C.M. Rosell. 2012. Viability of some probiotic coatings in bread and its effect on the crust mechanical properties. Food Hydrocolloids. 29: 166-174.

AOAC. 2000. **Official Methods of Analysis**. 17th ed. Association of Official Analytical Chemists. Gaithersburg, Md, USA.

Aplevicz, K.S., J.Z. Mazo, N.K.S. Neto, F.S. Nalevaiko and E.S. Sant'Anna. 2014. Evaluation of sourdoughs for the production of bread using spontaneous fermentation technique. **Acta Scientiarum Technology**. 36: 713-719.

Catzeddu, P. 2011. Sourdough breads, pp. 37–46. *In* V. Preedy*, et al*., eds. **Flour and breads and their fortification in health and disease prevention**. Elseveir Inc., USA.

Gómez, M., F. Ronda, P.A. Caballero, C.A. Blanco and C.M. Rosell. 2007. Functionality of different hydrocolloids on the quality and shelf-life of yellow layer cakes. Food Hydrocolloids. 21: 167-173.

Houben, A., A. Höchstötter and T. Becker. 2012. Possibilities to increase the quality in gluten-free bread production: An overview. European Food Research and Technology. 235: 195–208.

Julianti, E., H. Rusmarilin, Ridwansyah and E. Yusraini. 2017. Functional and rheological properties of composite flour from sweet potato, maize, soybean and xanthan gum. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**. 16: 171-177.

Martinez-Anaya, M.A. 2003. Associations and interactions of microorganisms in dough fermentations: Effects on dough and bread characteristics, pp. 63-96. *In* K. Kulp and K. Lorenz, eds. **Handbook of dough fermentation**. Marcel Dekker, Inc, USA.

Mert, I.D., O.H. Campanella, G. Sumnu and S. Sahin. 2014. Gluten free sourdough bread prepared with chestnut and rice flour. pp. 239-242. *In* **Proceedings of the 9th Baltic Conference on Food Science and Technology**. 8-9 May 2014, LLU, Jelgava, Latvia.

Novotni, D., N. Cukelj, B. Smerdel, M. Bituh, F. Dujmic and D. Curic. 2012. Glycemic index and firming kinetics of partially baked frozen gluten-free bread with sourdough. **Journal of Cereal Science**. 55: 120-125.

Rinaldi, M., M. Paciulli, A. Caligiani, F. Scazzina and E. Chiavaro. 2017. Sourdough fermentation and chestnut flour in gluten-free bread: A shelf-life evaluation. **Food Chemistry**. 224: 144-152.

Sourdoughs International. 2018. **Activation instructions – english**. Available Source: http://www.sourdo.com/activation-instructions/activation-instructions-english, February 1, 2018.

Zhang, Y., L. Guo, D. Xu, D. Li, N. Yang, F. Chen, Z. Jin and X. Xu. 2018. Effects of dextran with different molecular weights on the quality of wheat sourdough breads. **Food Chemistry**. 256: 373-379.

ผลของการควบคุมสภาพบรรยากาศต่อคุณภาพของเมล่อนตัดแต่งพร้อมบริโภค

The Effect of Controlled Atmosphere Storage on the Quality Changes of Fresh-Cut Melon

ปฐมาวดี น่วมด้วง[1] และ ภัทรินทร์ ลีลาภิวัฒน์[1*]

Pathamawadee Nuamduang[1] and Pattarin Leelaphiwat[1*]

บทคัดย่อ

ศึกษาผลของการบรรจุแบบควบคุมสภาพบรรยากาศต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของเมล่อนตัดแต่งพร้อมบริโภค โดยวัดอัตราการหายใจของเมล่อนตัดแต่งพร้อมบริโภคน้ำหนัก 250 กรัม ด้วยระบบปิด และศึกษาหาองค์ประกอบแก๊สที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษาคุณภาพด้วยการเก็บรักษาเมล่อนตัดแต่งพร้อมบริโภคภายใต้ระบบการบรรจุแบบสภาพบรรยากาศควบคุมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 10 และแก๊สออกซิเจนร้อยละ 5 (MC10) กับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 15 และแก๊สออกซิเจนร้อยละ 5 (MC15) เปรียบเทียบกับบรรยากาศปกติ (MC) ที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส นาน 8 วัน ทำการวัดค่าคุณภาพด้านต่างๆ ของเมล่อนตัดแต่งพร้อมบริโภคดังนี้ การสูญเสียน้ำหนัก ความแน่นเนื้อ ปริมาณเอทานอลและของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด รวมถึงการวิเคราะห์คุณภาพทางประสาทสัมผัส จากผลการศึกษาพบว่า เมล่อนตัดแต่งพร้อมบริโภคมีอัตราการหายใจเท่ากับ 14 มก.CO_2/กก.ชม. ซึ่งจัดอยู่ในผลไม้กลุ่มหายใจต่ำ องค์ประกอบแก๊สที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษาคุณภาพของเมล่อนตัดแต่งพร้อมบริโภค คือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สออกซิเจนร้อยละ 15 และ 5 โดยองค์ประกอบแก๊สดังกล่าวเหมาะสำหรับการเก็บรักษาคุณภาพของเมล่อนตัดแต่งพร้อมบริโภคดีที่สุดทั้งในด้านลักษณะปรากฏ ความหวานและเนื้อสัมผัส รวมถึงคุณภาพด้านประสาทสัมผัส

ABSTRACT

The study on the effect of controlled atmosphere (CA) system on the quality changes of fresh-cut melon. Two hundred-fifty grams of fresh-cut melon was placed in the jars with the different controlled atmospheres. There were the normal atmospheric condition, 5% oxygen (O_2) with 10% carbon dioxide (CO_2) and 5% oxygen (O_2) with 15% carbon dioxide (CO_2) stored at 5 °C for 8 days. The quality changes of fresh-cut melon were evaluated which are the respiration rate, weight loss, firmness, total soluble solids and ethanol content. Moreover, the sensory qualities was also determined in fresh-cut melon. The fresh-cut melon is the low respiration rate fresh produce having the measured respiration rate at 14 $mgCO_2.kg^{-1}.h^{-1}$. The good quality of fresh-cut melon in appearance, total soluble solid and firmness were found in controlled atmosphere at 5% O_2 and 15% CO_2.

Key Words: controlled atmosphere, fresh-cut, melon, oxygen, carbon dioxide

* Corresponding author; e-mail address: **pattarin.le@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

เมล่อนเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีศักยภาพทางการตลาดของไทย ที่ได้รับการพัฒนาและศึกษาจากเกษตรกรไทยจนประเทศไทยกลายเป็นแหล่งปลูกเมล่อนที่ให้ผลผลิตที่มีคุณภาพและรสชาติดี ขายได้ราคาสูงทั้งในรูปแบบผลเมล่อนสดและแช่แข็ง แต่ในปัจจุบันผู้บริโภคมีความใส่ใจด้านสุขภาพและเน้นความสะดวกสบายมากยิ่งขึ้น ผลไม้ตัดแต่งพร้อมบริโภคจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ แต่เนื่องด้วยการเสื่อมเสียคุณภาพและอายุการเก็บรักษาที่สั้นของเมล่อนเมื่อถูกตัดแต่ง เมล่อนจึงถูกขายทั้งผลมากกว่าที่จะอยู่ในรูปตัดแต่งพร้อมบริโภค ทำให้ขาดโอกาสทางการตลาด ดังนั้นหากมีศึกษาผลของการบรรจุแบบควบคุมสภาพบรรยากาศต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของเมล่อนตัดแต่งพร้อมบริโภค เพื่อทำให้เกิดการพัฒนาหรือเลือกบรรจุภัณฑ์สำหรับเมล่อนตัดแต่งพร้อมบริโภคให้มีสมบัติและโครงสร้างที่เหมาะสม ก็จะเป็นการเพิ่มมูลค่าทางการตลาด เพิ่มช่องทางการจัดจำหน่าย รวมไปถึงการเก็บรักษาคุณภาพเมล่อนได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

การบรรจุแบบควบคุมสภาพบรรยากาศ (controlled atmosphere, CA) เป็นระบบเทคโนโลยีการบรรจุที่มีการควบคุมสภาพบรรยากาศภายในระบบบรรจุให้แตกต่างจากบรรยากาศปกติ เพื่อเก็บรักษาผลิตผลในสภาพบรรยากาศดังกล่าวตลอดอายุการเก็บรักษา ซึ่งสภาพบรรยากาศที่ถูกควบคุมนี้จะเป็นสภาพบรรยากาศที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษาผลิตผล ช่วยชะลอปฏิกิริยาทางชีวเคมีของพืช ลดอัตราการหายใจและการผลิตแก๊สเอทิลีน เป็นการช่วยลดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพและยืดอายุการเก็บรักษาผลิตผลสด อย่างไรก็ตามผลิตผลสดแต่ละชนิดจะมีการตอบสนองต่อองค์ประกอบแก๊สที่แตกต่างกัน จึงต้องทำการศึกษาหาองค์ประกอบแก๊สที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษาผลิตผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพที่เกิดขึ้น เพื่อนำข้อมูลนี้ไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบบรรจุภัณฑ์แบบดัดแปรสภาพบรรยากาศ (Modified atmosphere packaging, MAP) ต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมวัตถุดิบ

เมล่อน (*Cucumis melo l.*) สีเขียว จากฟาร์มในจังหวัดพระนครศรีอยุธยา ประเทศไทย นำมาทดสอบวัดอัตราการหายใจ โดยทำความสะอาดด้วยน้ำสะอาด และแช่ในสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ (NaOCl) ความเข้มข้น 100 ppm เป็นเวลานาน 2 นาที ทิ้งไว้ให้แห้ง จากนั้นตัดแต่งเมล่อนเป็นชิ้นพร้อมบริโภครวมเปลือกขนาดกว้าง 4.5 ± 0.17 เซนติเมตร ยาว 18 เซนติเมตร และสูง 8 เซนติเมตร ที่มีน้ำหนักประมาณ 250 กรัมต่อชิ้น ทั้งนี้อุปกรณ์ที่ใช้ในการตัดแต่งรวมถึงภาชนะที่บรรจุถูกทำความสะอาดด้วยแอลกอฮอล์ความเข้มข้นร้อยละ 70

การวัดอัตราการหายใจของเมล่อนตัดแต่งพร้อมบริโภค

ทำการวัดอัตราการหายใจของเมล่อนตัดแต่งพร้อมบริโภคด้วยระบบปิด โดยบรรจุชิ้นเมล่อนที่ตัดแบ่งตามยาวของผลเป็นชิ้นปลายแหลมน้ำหนัก 250 กรัม ในโหลแก้วปริมาตร 3.25 ลิตร ปิดฝาโหลแก้วด้วยจุกยางให้สนิท (Figure 1) และนำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส จากนั้นเก็บตัวอย่างแก๊สบริเวณช่องว่างเหนือผลิตผลในโหลแก้วปริมาตร 5 มิลลิลิตร เพื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีรุ่น 6890 (Gas chromatography equipped with a thermal conductivity detector, GC-TCD)(Column Haye Sep Q. (1.8 m. x 1/18 in) และ Mol.Seive. (1.8 m. x 1/18 in), oven temperature 60 °C ;CO_2 and O_2 (Method MIX.M, 4.5 min), detector temperature 200 °C) (Hewlett-Packard, USA) ณ

เวลาการเก็บรักษา 1, 3, 6 และ 9 ชั่วโมง แล้วทำการวัดปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อไป ทุกๆ 24 ชั่วโมง เป็นระยะเวลา 8 วัน บันทึกค่าร้อยละของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แล้วนำมาคำนวณหาอัตราการหายใจจากสมการที่ 1

$$\text{อัตราการหายใจ} = \frac{(\text{ร้อยละ } CO_2 \text{ ชั่วโมงสุดท้าย} - \text{ร้อยละ } CO_2 \text{ ชั่วโมงเริ่มต้น}) \times \text{ปริมาตรอิสระ (มล.)}^*}{100 \times \text{น้ำหนักผลิตผล (กก.)} \times (\text{ชั่วโมงสุดท้าย} - \text{ชั่วโมงเริ่มต้น})} \quad (1)$$

* ปริมาตรอิสระ = ปริมาตรของ Respiratory chamber – ปริมาตรของเมล่อน



Figure 1 Respiration rate measurement of fresh-cut melon in close system stored at 5 °C.

การศึกษาหาองค์ประกอบแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษาเมล่อนตัดแต่งพร้อมบริโภค

บรรจุเมล่อนตัดแต่งพร้อมบริโภคน้ำหนัก 250 กรัม ลงในโหลแก้วปริมาตร 3.25 ลิตร โดยทำการควบคุมสภาพบรรยากาศภายในโหลที่แตกต่างกัน 3 ทรีทเมนต์ ดังนี้

1) บรรยากาศปกติ คือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 0.03 และแก๊สออกซิเจนร้อยละ 20.9 (MC)

2) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 10 และแก๊สออกซิเจนร้อยละ 5 (MC10)

3) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 15 และแก๊สออกซิเจนร้อยละ 5 (MC15)

ทำการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลานาน 8 วัน โดยตรวจวัดคุณภาพด้านต่างๆ ของเมล่อนตัดแต่งพร้อมบริโภค ทุกๆ 2 วัน ทำการทดลองตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

การวัดการสูญเสียน้ำหนัก

วัดค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก ด้วยการชั่งน้ำหนักของเมล่อนตัดแต่งพร้อมบริโภคที่บรรจุในขวดโหลแก้วระหว่างการเก็บรักษาเปรียบเทียบกับน้ำหนักเริ่มต้น และคำนวณค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก

การวัดความแน่นเนื้อ

วัดค่าความแน่นเนื้อของเมล่อนตัดแต่งพร้อมบริโภคด้วยเครื่อง Testometric micro 350 (Testometric, England) ด้วยหัวกดทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.47 มิลลิเมตร กดลงบนเนื้อเมล่อน 2 บริเวณ ได้แก่ ด้านบน (ผิวที่ติดกับเมล็ด) และด้านข้าง (ผิวที่ติดกับเปลือก) แนวนอนลึก 5 มิลลิเมตร ด้วยอัตราเร็ว 90.0 มิลลิเมตร/นาที บันทึกค่าที่ได้ในหน่วย นิวตัน

การวัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (Total soluble solid, TSS)

วัดปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดจากน้ำคั้นของเมล่อนตัดแต่งพร้อมบริโภคด้วยเครื่อง Refractometer รุ่น ATAGO N-∝ (0-32 °Brix)

การวัดปริมาณเอทานอล

วัดปริมาณเอทานอลจากน้ำคั้นของเมล่อนตัดแต่งพร้อมบริโภค โดยเก็บตัวอย่างน้ำคั้นปริมาตร 10 มิลลิลิตร ในขวดทดลองปริมาตร 20 มิลลิลิตร จากนั้นนำขวดตัวอย่างน้ำคั้นมาอุ่นด้วยอ่างน้ำร้อนที่ระดับอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลานาน 20 นาที เก็บตัวอย่างแก๊สจากบริเวณช่องว่างเหนือน้ำคั้น (headspace) ในขวดทดลองปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร (Larsen and Watkins, 1995) วิเคราะห์ตัวอย่างแก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีรุ่น 6820 (Gas chromatography-Flame Ionization Detector, GC-FID) (column DB-WAX 30 m. × 0.25 mm., injection temperature 100 °C; oven temperature 50 °C; detector temperature 150 °C) บันทึกค่าพื้นที่ใต้กราฟ เพื่อนำไปคำนวณหาค่าความเข้มข้นของเอทานอล โดยเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของเอทานอล

การทดสอบคุณภาพทางด้านประสาทสัมผัส

วัดคุณภาพทางด้านประสาทสัมผัสของเมล่อนตัดแต่งพร้อมบริโภคที่เก็บรักษาในสภาพบรรยากาศควบคุม ที่แตกต่างกัน 3 ระดับ ที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ประเมินลักษณะปรากฏโดยผู้ทำการทดลอง และเกณฑ์ในการประเมินคือใช้การถ่ายภาพติดตามลักษณะปรากฏที่เปลี่ยนไปในแต่ละวันของเมล่อนตัดแต่งพร้อมบริโภค เนื่องจากเมล่อนมีการสูญเสียน้ำหนักในระหว่างการเก็บรักษาทำให้เนื้อสัมผัสของเมล่อนตัดแต่งมีลักษณะแห้งลงดังนั้นถ้าลักษณะปรากฏของเมล่อนตัดแต่งมีลักษณะชุ่มชื้นไม่แตกต่างจากวันแรกของการเก็บรักษาถือเป็นลักษณะปรากฏที่ดีที่สุด โดยทดลองทุกซ้ำของสภาพบรรยากาศควบคุมที่แตกต่างกันทั้ง 3 ระดับ

การวิเคราะห์ผลการทดลอง

นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) และความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS 11.5 for Windows

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

อัตราการหายใจของเมล่อนตัดแต่งพร้อมบริโภค

อัตราการหายใจของเมล่อนตัดแต่งพร้อมบริโภคมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงแรกของการเก็บรักษา และเริ่มมีอัตราการหายใจคงที่เมื่อเข้าสู่วันที่ 2 หรือ 48 ชั่วโมงของการเก็บรักษา โดยมีค่าอัตราการหายใจที่คงที่เท่ากับ 14 มก.CO_2/กก.ชม. หรือ 7.2 มล.CO_2/กก.ชม. (Figure 2) ซึ่งอยู่ในระดับเดียวกับผลิตผลสดที่มีอัตราการหายใจต่ำ คือ 5-20 มก.CO_2/กก.ชม. เช่น ส้ม กะหล่ำปลีและหอมหัวใหญ่ เป็นต้น และมีค่ามากกว่าอัตราการหายใจของเมล่อนทั้งผล (4-5 มล.CO_2/กก.ชม.) ที่อุณหภูมิการเก็บรักษาเดียวกัน โดยอัตราการหายใจนี้ประกอบด้วยปฏิกิริยาชีวเคมีหลายอย่างเกิดขึ้นต่อเนื่องหรือพร้อมๆ กัน และเป็นกระบวนการสำคัญของการเสื่อมเสียของผลิตผลสด ซึ่งอัตราการหายใจนี้จะขึ้นอยู่กับสภาวะในการเก็บรักษา องค์ประกอบแก๊ส ความชื้นสัมพันธ์และอุณหภูมิ (จริงแท้, 2549) ดังนั้นการเก็บในสภาพบรรยากาศและอุณหภูมิที่เหมาะสม ก็จะเป็นการช่วยชะลออัตราการหายใจและการเสื่อมเสียด้วยเช่นกัน

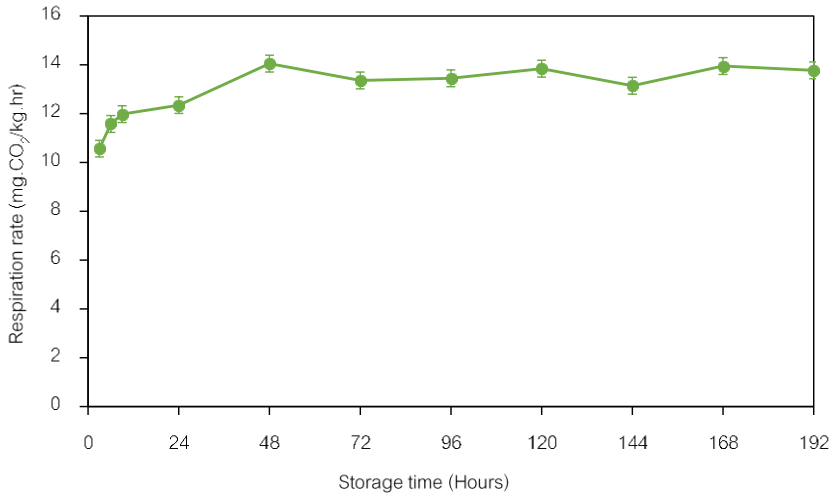


Figure 2 Respiration rate of fresh-cut melon in close system stored at 5 °C.

องค์ประกอบแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษาเมล่อนตัดแต่งพร้อมบริโภค

จากการเก็บรักษาเมล่อนตัดแต่งพร้อมบริโภคในสภาพบรรยากาศควบคุม 3 ระดับ ได้แก่ บรรยากาศปกติ คือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 0.03 และแก๊สออกซิเจนร้อยละ 20.9 (MC) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 10 และแก๊สออกซิเจนร้อยละ 5 (MC10) และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 15 และแก๊สออกซิเจนร้อยละ 5 (MC15) ให้ผลการวัดคุณภาพด้านต่างๆ ดังต่อไปนี้

การสูญเสียน้ำหนัก

การสูญเสียน้ำหนักของเมล่อนตัดแต่งพร้อมบริโภคมีค่าเพิ่มขึ้นในทุกทรีทเมนต์ในระหว่างการเก็บรักษา แต่ในวันที่ 8 ของการเก็บรักษาการสูญเสียน้ำหนักของเมล่อนตัดแต่งพร้อมบริโภคมีแนวโน้มไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) (Figure 3) โดยเมล่อนตัดแต่งพร้อมบริโภคที่เก็บรักษาภายใต้สภาพบรรยากาศควบคุม MC10 เกิดการสูญเสียน้ำหนักมากที่สุด รองลงมาคือ MC15 และ MC ตามลำดับในวันที่ 6 ของการเก็บรักษา

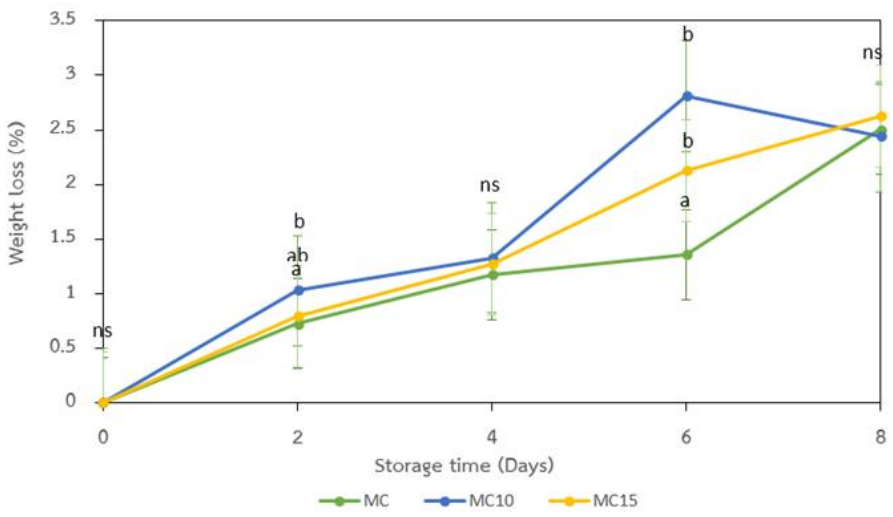


Figure 3 Weight loss of fresh-cut melon in different atmospheres stored at 5 °C.

ความแน่นเนื้อ

เมล่อนตัดแต่งพร้อมบริโภคมีค่าความแน่นเนื้อไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p>0.05) ในวันสุดท้ายการเก็บรักษา แต่จากข้อมูลในวันที่ 2 ของการเก็บรักษา ที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ค่าความแน่นเนื้อของเมล่อนตัดแต่งพร้อมบริโภคมีค่าลดลงโดยเมล่อนตัดแต่งพร้อมบริโภคในสภาพบรรยากาศควบคุม MC มีค่าความแน่นเนื้อมากที่สุดซึ่งมีค่าแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนในวันที่ 4 ของการเก็บรักษา ค่าความแน่นเนื้อบริเวณด้านบน (ผิวติดเมล็ด) ของเมล่อนตัดแต่งพร้อมบริโภคในสภาพบรรยากาศ MC10 มีค่าสูงที่สุดและมีค่าแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ค่าความแน่นเนื้อแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงระดับความสุกหรือความแก่ของเมล่อน (Maturity class) ที่เพิ่มขึ้น (Kader, 1992) โดยค่าความแน่นเนื้อบริเวณด้านข้าง (ผิวที่ติดกับเปลือก) มีค่าสูงกว่าของบริเวณด้านบน (ผิวที่ติดกับเมล็ด) (Figure 4) ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับการเพิ่มการสูญเสียน้ำหนัก โดยเมื่อเนื้อเยื่อถูกดึงน้ำออกจะส่งผลให้เนื้อเยื่อจะมีเยื่อใยเพิ่มมากขึ้นทำให้มีค่าแรงกดสูงขึ้น (Serrano *et al.*, 2006) ซึ่งสอดคล้องกับค่าการสูญเสียน้ำหนักที่เพิ่มมากขึ้น เมื่อเก็บรักษาไว้นานขึ้นเช่นเดียวกัน คณะวิจัยของ Amaro (2018) พบว่าความแตกต่างของอุณหภูมิส่งผลต่อค่าความแน่นเนื้อของเมล่อนตัดแต่ง โดยแคนตาลูปเมล่อนตัดแต่งสามารถรักษาความแน่นเนื้อได้สูงที่สุดเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียสตลอดระยะเวลาการเก็บที่ 14 วัน รองลงมาคืออุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสแคนตาลูปเมล่อนตัดแต่งสามารถรักษาความแน่นเนื้อได้ถึงวันที่ 6 และที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสแคนตาลูปเมล่อนมีค่าความแน่นเนื้อลดลงตั้งแต่วันที่ 2 ของการเก็บรักษา

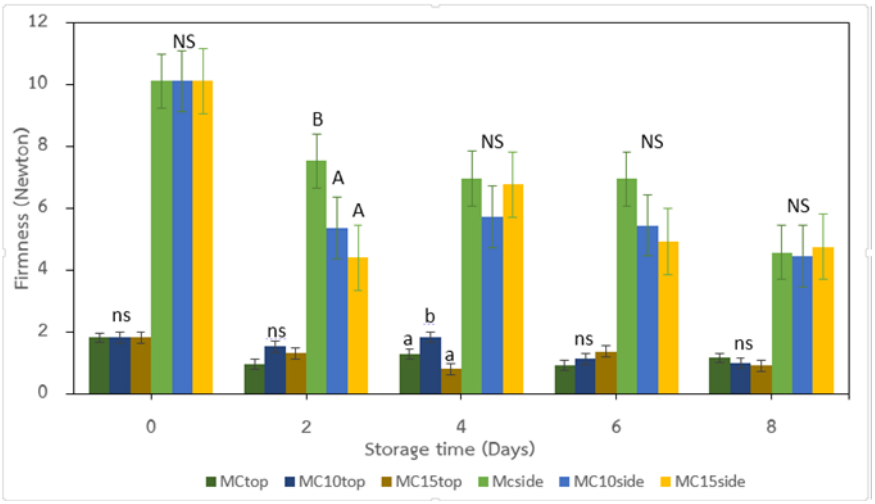


Figure 4 Firmness of fresh-cut melon in different atmospheres stored at 5 °C.

ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้

จากผลการวัดค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของเมล่อนตัดแต่งพร้อมบริโภค พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ (p > 0.05) โดยปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดในทุกทรีทเมนต์มีค่าเพิ่มขึ้นในวันที่ 2 ของการเก็บรักษา และมีแนวโน้มที่มีค่าใกล้เคียงกันตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา ที่ระดับ 10-11 °บริกซ์ (Figure 5) ซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงระดับความสุกหรือความแก่ของเมล่อน (Maturity class) ที่เพิ่มขึ้น (Kader,1992) เช่นเดียวกับค่าความแน่นเนื้อ จากผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับการศึกษาของ Pei *et al.* (2016) ที่ศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของแคนตาลูปตัดแต่งที่มีลักษณะการตัดแต่งแตกต่างกันโดยใช้ Pulsed Light ที่มีพลังงานกระตุ้นแตกต่างกันเป็นทรีทเมนต์ เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส พบว่าค่า

ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้อยู่ที่ระดับ 10.08-11.03 °บริกซ์ และมีค่าใกล้เคียงกันตลอดระยะเวลาการเก็บและระหว่างทรีทเมนต์ ซึ่งค่านี้แสดงถึงค่าความหวานที่เหมาะแก่การบริโภค จึงถูกกำหนดค่าไว้ที่ประมาณ 8 ° บริกซ์ สำหรับเมล่อนทั้งผลที่เก็บมาจากฟาร์มก่อนทำการตัดแต่ง เพื่อให้ค่าความหวานของเมล่อนตัดแต่งมีค่าเพิ่มขึ้นอยู่ในระดับที่เหมาะสมกับการบริโภค

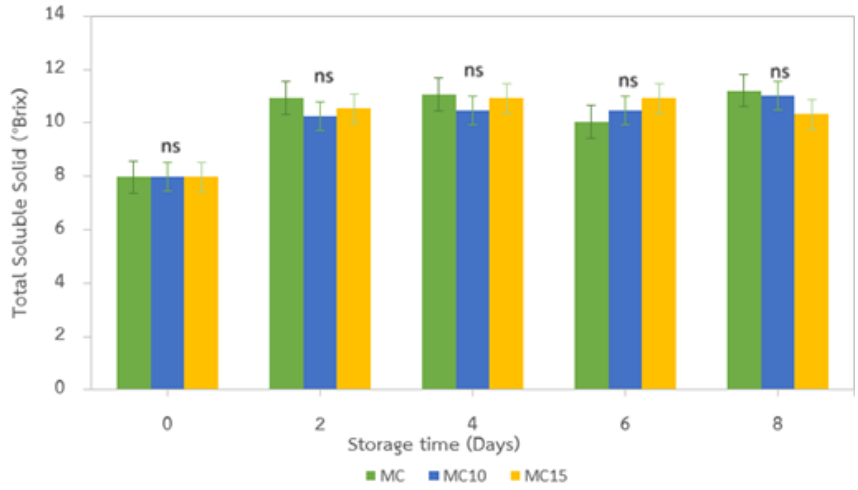


Figure 5 Total soluble solid of fresh-cut melon in different atmospheres stored at 5 °C.

ปริมาณเอทานอล

ปริมาณเอทานอลจากน้ำคั้นของเมล่อนตัดแต่งพร้อมบริโภคมีค่าสูงขึ้นในทุกทรีทเมนต์ เมื่อเก็บรักษาไว้นานขึ้น โดยปริมาณเอทานอลมีค่ามากที่สุดในสภาพบรรยากาศปกติ (Figure 6) ซึ่งอาจเกิดจากการเสื่อมสภาพของเซลล์ ทำให้เกิดการปลดปล่อยสารที่ให้กลิ่นเหม็นหมักสูงขึ้น ส่งผลต่อการไม่ยอมรับทางด้านประสาทสัมผัสของผู้บริโภค

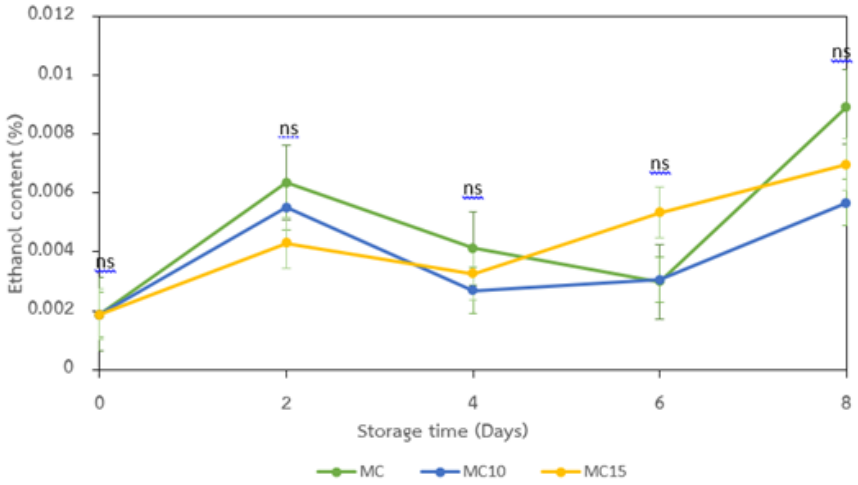


Figure 6 Ethanol content of fresh-cut melon in different atmospheres stored at 5 °C.

คุณภาพทางด้านประสาทสัมผัส

จากการประเมินคุณภาพทางด้านลักษณะปรากฏ พบว่าเมล่อนตัดแต่งพร้อมบริโภคที่เก็บรักษาในสภาพบรรยากาศควบคุม MC15 มีลักษณะปรากฏที่ดีที่สุด คือยังคงมีลักษณะความชุ่มชื้น ในขณะที่เมล่อนในอีก 2

ทรีทเมนต์มีลักษณะปรากฏที่ให้สัมผัสที่แห้งกว่า และมองเห็นเยื่อใยชัดเจนขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับวันแรกของการเก็บรักษา

จากผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพด้านต่างๆ ของเมล่อนตัดแต่งพร้อมบริโภคที่เก็บรักษาในสภาพบรรยากาศควบคุมที่แตกต่างกัน 3 ระดับ ที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส จะพบว่าองค์ประกอบแก๊สที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษาคุณภาพของเมล่อนตัดแต่งพร้อมบริโภค คือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 15 และแก๊สออกซิเจนร้อยละ 5 (MC15) เนื่องจากลักษณะปรากฏที่ดีมีความชุ่มชื้น รวมทั้งมีค่าความแน่นเนื้อและค่าความหวานมากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาการเก็บรักษาแคนตาลูปภายใต้สภาพบรรยากาศควบคุมด้วยปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 15 จะช่วยชะลอการสูญเสียคุณภาพและลดอัตราการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์บนแคนตาลูปได้ แต่แก๊สจะส่งผลต่อค่าความแน่นเนื้อและปริมาณของแข็งที่ละลายได้แตกต่างกัน (Bruce *et al*., 2006) และยังมีการรายงานว่าองค์ประกอบแก๊สที่ช่วยชะลออัตราการหายใจของเมล่อนได้ คือปริมาณแก๊สออกซิเจนช่วงร้อยละ 3-6 และแก๊สคาร์บอนได้ออกไซด์ช่วงร้อยละ 6-15 (Conte *et al*., 2009) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้จากการศึกษานี้

สรุป

เมล่อนตัดแต่งพร้อมบริโภคน้ำหนัก 250 กรัม เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส มีอัตราการหายใจประมาณ 14 มก.CO_2/กก.ชม ซึ่งจัดอยู่ในผลไม้กลุ่มหายใจต่ำ องค์ประกอบแก๊สที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษาคุณภาพของเมล่อนตัดแต่งพร้อมบริโภค คือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สออกซิเจนร้อยละ 15 และ 5 ตามลำดับ โดยดัชนีชี้วัดคุณภาพในการทดลองครั้งนี้ ได้แก่ ลักษณะปรากฏ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัท นาวิต้าฟู้ดส์ จำกัด สำหรับการสนับสนุนตัวอย่างเมล่อนในการวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

จริงแท้ ศิริพานิช. 2549. **สรีรวิทยาและเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้**. พิมพ์ครั้งที่ 6. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

Amaro, A.L., N. D. Spadafora, M. J. Pereira, R. Dhorajiwala, R. J. Herbert, C. T. Müller, H. J. Rogers and M. Pintado. 2018. Multitrait analysis of fresh-cut cantaloupe melon enables discrimination between storage times and temperatures and identifies potential markers for quality assessments. **Food Chemistry** 241: 222-231.

Bruce A. Welt, B. B. Boynton, C. A. Sims, J. K. Brecht, M. R. Marshall and M. O. Balaban. 2006. Effects of low-dose electron beam irradiation on respiration, microbiology, texture, color, and sensory characteristics of fresh-cut cantaloupe stored in modified- atmosphere packages. **Journal of Food Science** 71: 149-155.

Conte, A., C. Scrocco, I. Brescia and M. A. D. Nobile. 2009. Different packaging strategies for fresh-cut 'barattiere' melon cultivar (*cucumis melo* L.). **International Journal of Food Science and Technology** 44: 1422-1428.

Kader, A.A., 1992. Maturation and maturity indices. **Postharvest technology of horticultural crops**. Division of Agriculture and Natural Resources University of California. United State of America.

Larsen, M. and C.B. Watkins. 1995. Firmness and concentrations of acetaldehyde, ethyl acetate and ethanol in strawberries stored in controlled and modified atmospheres. **Postharvest Biology and Technology** 5: 39–50.

Pei, C.K., M.A. Noranizan, R. Karim and Z.A.N. Hanani. 2016. Microbiological stability and quality of pulsed light treated cantaloupe (*Cucumis melo* L. *reticulatus* cv. Glamour) based on cut type and light fluence. **Journal Food Science Technology** 53(4): 1798-1810.

Serrano, M., D. Martinez-Romero, F. Guillen, S. Castillo and D. Valero. 2006. Maintenance of broccoli quality and functional properties during cold storage as affected by modified atmosphere packaging. **Postharvest Biology and Technology** 39: 61–68.

ผลของไขมันแข็งต่อโดขนมปังแช่แข็งที่ใช้ยีสต์ก่อนและหลังการอบ

Effect of Hard Stock Fat on Frozen Yeast Dough Before and After Baking

รัชชดา ลตวรรณ์[1] และ ปาริฉัตร หงสประภาส[1*]

Ratchada Latawan[1] and Parichat Hongsprabhas[1*]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาองค์ประกอบของกรดไขมัน สมบัติทางความร้อน และสมบัติวิทยากระแสของไขน้ำมันรำข้าวชนิดอ่อน เรียกโดยย่อว่า RBW ที่ได้จากขั้นตอนการกำจัดไขโดยการลดอุณหภูมิในระหว่างการผลิตน้ำมันรำข้าวบริโภค เปรียบเทียบกับเนยจืด พบว่า แม้ว่า RBW จะมีกรดไขมันไม่อิ่มตัวเกือบ 66% แต่องค์ประกอบที่ไม่ใช่ไตรกลีเซอไรด์อาจเป็นตัวกำหนดช่วงจุดหลอมเหลวของ RBW เป็น 2 ช่วง คือในช่วงการหลอมเหลวของของไตรกลีเซอไรด์น้ำมันรำข้าว และระหว่าง 7 – 38 °ซ ของไขรำข้าว นอกจากนั้น RBW ยังมีค่ามอดุลัสสะสม (G') ค่อนข้างสูงที่อุณหภูมิต่ำ เกือบใกล้เคียงกับค่ามอดุลัสสะสมของเนยจืด ซึ่งมีกรดไขมันอิ่มตัวสูงถึง 68 % และมีช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวแคบกว่าของ RBW การใช้ RBW ในยีสต์โดแช่แข็งที่เก็บไว้เป็นเวลา 1 เดือนสามารถรักษากิจกรรมยีสต์ได้หลังจากการละลายน้ำแข็ง และขนมปังที่ได้มีปริมาตรใหญ่กว่าขนมปังที่ได้จากยีสต์โดที่ใช้ไขมันผสมระหว่างไขน้ำมันรำข้าวกับเนยจืด คุณลักษณะของของไหลในช่วงอุณหภูมิที่กว้างของ RBW นี้ อาจจะเป็นตัวกำหนดความอยู่รอดของยีสต์ที่อุณหภูมิแช่แข็งและคุณสมบัติของยีสต์โดหลังจากละลายน้ำแข็งและการหมักก่อนอบ

ABSTRACT

This study investigated fatty acid composition, thermal properties and rheological properties of soft wax from winterizing step of rice bran oil refining process, designated as rice bran wax (RBW), in comparison with unsalted butter. It was found that although RBW contained unsaturated fatty acids for almost 66%, the non-triacyl glycerol fraction may be responsible for 2 separated melting point ranges of triacyl glycerol of rice bran oil and of the wax fraction between 7 and 38 °C. In addition, the RBW had relatively high storage modulus (G') at low temperature, which was slightly below those of unsalted butter. The latter contained 68% saturated fatty acid and had narrower melting point range compared to that of RBW. Use of RBW in frozen yeast dough stored for 1 month was able to better retain yeast activities after thawing and resulted in large bread volume than using RBW-butter fat blend. The fluid characteristics over the wide range of temperature of RBW may be responsible for yeast survival at freezing temperature and dough qualities after thawing and proofing before baking.

Key Words: bread, dough, rice, wax, yeast

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

[1]ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมขนมอบมีการเติบโตสูงและมีการบริโภคเพิ่มมากขึ้นในประเทศไทย การพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมปังส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นการศึกษาโปรตีนกลูเตน (gluten) ซึ่งมีส่วนรับผิดชอบต่อการเกิดโครงสร้างและการอุ้มอากาศระหว่างกระบวนการหมักและการอบ อย่างไรก็ตาม ไขมันที่ใช้ในสูตรขนมปังยังมีบทบาทในการทำให้ขนมปังมีความอ่อนนุ่มและกลิ่นรสที่ดี ช่วยกักเก็บก๊าซที่เกิดขึ้น และช่วยหล่อลื่นกลูเตนให้มีความยืดหยุ่นที่ดีขึ้นระหว่างการขยายตัวของผนังเซลล์อากาศขณะอบ รวมถึงมีผลต่อการเพิ่มปริมาตรของขนมปัง ไขมันที่นิยมใช้ในการผลิตขนมปังส่วนมากได้แก่ เนยสด เนยขาว และมาร์การีน อย่างไรก็ตาม ในการผลิตโดขนมปังแช่แข็ง (frozen yeast dough) ที่จะประสบความสำเร็จในระดับอุตสาหกรรม จำเป็นต้องรักษาความสามารถในการรอดชีวิตของยีสต์ระหว่างกระบวนการแช่แข็ง (freezing) การเก็บรักษาที่อุณหภูมิแช่แข็ง (frozen storage) และการละลายน้ำแข็ง (thawing) เพื่อให้ยีสต์คงความสามารถในการเพิ่มจำนวนและผลิตก๊าซ CO_2 เพื่อเพิ่มปริมาตรก่อนนำเข้าอบ

Nukit et al. (2014) รายงานวิธีการขึ้นรูปน้ำมันรำข้าวให้เป็นของแข็งที่เรียกโอลิโอเจล (oleogel) ที่อุณหภูมิประมาณ 25 °ซ โดยใช้สัดส่วนของน้ำมันรำข้าว ไขมันเนย และสารลดแรงตึงผิวที่เหมาะสม นอกจากนั้นแล้ว Limpimwong et al. (2017) ยังได้รายงานว่าเมื่อนำน้ำมันรำข้าวผสมกับไขรำข้าวบริสุทธิ์มาใช้ในรูปของโอลิโอเจลในผลิตภัณฑ์ขนมเค้กเพื่อทดแทนไขมันทรานส์ พบว่าการใช้ของผสมดังกล่าวสามารถลดไตรกลีเซอไรด์ในซีรัมและในตับ รวมทั้งเพิ่มปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ที่ถูกขับออกทางอุจจาระของหนูทดลองได้

งานวิจัยนี้จึงจะศึกษาแนวทางการใช้ประโยชน์จากไขรำข้าวเพิ่มเติม โดยนำมาใช้เป็นแหล่งของไขมันแข็ง (hard stock) ในยีสต์โดแช่แข็ง (frozen yeast dough) โดยมีสมมติฐานว่าไขมันที่มีองค์ประกอบแตกต่างกันจะมีผลต่ออุณหภูมิในการหลอมเหลว (melting characteristics) และคุณสมบัติเชิงกล (mechanical properties) ของไขมันระหว่างการเพิ่มอุณหภูมิเลียนแบบการละลายน้ำแข็งและการหมักหลังการแช่แข็งและละลายน้ำแข็ง รวมถึงการรอดชีวิตและกิจกรรมของยีสต์หลังการละลายน้ำแข็งในโด งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาผลของไขชนิดอ่อน (soft wax) จากขั้นตอนการกำจัดไขด้วยการลดอุณหภูมิ (winterizing step) ของกระบวนการผลิตน้ำมันรำข้าวบริโภค ต่อการเปลี่ยนแปลงของโดที่ผ่านการละลายน้ำแข็ง (thawing) การหมักสร้าง CO_2 (proofing) โดยยีสต์ และการอบ (baking) ความรู้จากการวิจัยนี้จะช่วยให้สามารถเข้าใจบทบาทของไขมันต่อคุณสมบัติของยีสต์โดแช่แข็งก่อนและหลังการอบขนมปังมากขึ้น

อุปกรณ์และวิธีการ

วัตถุดิบ

ไขน้ำมันรำข้าวชนิดอ่อน (soft rice bran wax, RBW) จากขั้นตอนการกำจัดไขโดยการลดอุณหภูมิในการผลิตน้ำมันรำข้าวบริโภคของโรงงานน้ำมันรำข้าวสุรินทร์ จำกัด ได้รับอนุเคราะห์เมื่อเดือนกุมภาพันธ์ 2561 เนยจืดทางการค้า (butter) ยีสต์ แป้งสาลีสำหรับทำขนมปัง น้ำตาล ไข่ เกลือ และน้ำบริโภคซื้อจากร้านจำหน่ายวัตถุดิบสำหรับทำเบเกอรีในเขตพญาไท กรุงเทพมหานคร วิเคราะห์องค์ประกอบของกรดไขมันในไขน้ำมันรำข้าวและเนยจืดโดยใช้ Gas Chromatography ตามวิธีของ TMC-05 in Thai Compendium of Methods for Food Analysis

คุณสมบัติเชิงความร้อนของเนยและไขน้ำมันรำข้าว

ชั่งตัวอย่างเนยจืด (butter) และไขน้ำมันรำข้าว (RBW) 15 กรัมในบีกเกอร์ หลอมเหลวที่อุณหภูมิ 95°ซ บน hot plate จนผลึกของของแข็งหลอมเหลว วัดคุณสมบัติเชิงความร้อนของตัวอย่างโดยใช้เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (Pyris 1; PerkinElmer, Norwalk, CT, USA) โดยทำการชั่งตัวอย่างที่หลอมเหลวประมาณ 10 – 15 มิลลิกรัมลงใน stainless steel pan ปิดผนึก (hermetically sealed) ให้ความร้อนตัวอย่างใน pan จากอุณหภูมิ 25 °ซ ถึง 90 °ซ โดยใช้อัตราการให้ความร้อน 10 °ซ/นาที คงอุณหภูมิที่ 90 เป็นเวลา 3 นาที เพื่อให้ตัวอย่างหลอมเหลวในแบบแผนเดียวกันทุกตัวอย่าง จากนั้น ลดอุณหภูมิของตัวอย่างใน pan จาก 90 °ซ ไปที่ –60 °ซ ใช้อัตราการลดอุณหภูมิ 10 °ซ/นาที เพื่อเปลี่ยนสถานะของตัวอย่างไขมันในแบบแผนเดียวกันทุกตัวอย่าง คงอุณหภูมิไว้ที่ –60 °ซ เป็นเวลา 3 นาที จากนั้นหลอมเหลวตัวอย่างจากอุณหภูมิ –60 °ซ จนถึง 90 °ซ โดยใช้อัตราการให้ความร้อน 10 °ซ/นาที รายงานอุณหภูมิ onset temperature (*To*, °ซ), end temperature of melting (*Te*, °ซ) และเอนทัลปีในการหลอมเหลว (ΔH, J/g) ระหว่างการเพิ่มอุณหภูมิจาก –60 °ซ จนถึง 90 °ซ นี้

คุณสมบัติด้านวิทยากระแสของเนยและไขน้ำมันรำข้าว

ชั่งตัวอย่างเนยจืด (butter) และไขน้ำมันรำข้าว (RBW) 15 กรัมในบีกเกอร์ หลอมเหลวที่อุณหภูมิ 95°ซ บน hot plate จนผลึกของของแข็งหลอมเหลว เก็บตัวอย่างที่อุณหภูมิ 25 °ซ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง วัดคุณสมบัติด้านวิทยากระแสแบบเป็นรอบ (dynamic rheological testing) ของตัวอย่างเมื่อเพิ่มอุณหภูมิโดยใช้เครื่อง Modular Compact Rheometer (MCR300), PP-50 geometry (Anton Paar, Stuttgart,Germany) ตั้งระยะห่างของ gap เป็น 1 มิลลิเมตร กำหนดความเครียด 0.01% และความถี่เป็น 1 เฮิร์ตส์ ทำการลดอุณหภูมิตัวอย่างจาก 25 °ซ ไปที่ 0 °ซ โดยใช้อัตราการลดอุณหภูมิ 1 °ซ/นาที เพื่อเปลี่ยนสถานะของตัวอย่างให้เป็นของแข็งโดยใช้แบบแผนการลดอุณหภูมิเหมือนกันทุกตัวอย่าง คงอุณหภูมิไว้ที่ 0 °ซ เป็นเวลา 10 นาที เพิ่มอุณหภูมิจาก 0 °ซ ไปที่ 50 °ซ โดยใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 1 °ซ/นาทีเพื่อหลอมเหลวตัวอย่าง เลียนแบบช่วงอุณหภูมิระหว่างการละลายโดแช่แข็ง (thawing) ก่อนการหมักของยีสต์ บันทึกการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของของไหล (viscous behavior) และของแข็ง (solid behavior) ระหว่างการเพิ่มอุณหภูมิ และรายงานเป็นค่ามอดุลัสสูญเสีย (loss modulus, G") ซึ่งบ่งชี้ความสามารถในการกระจายแรงที่มากระทำของตัวอย่างไขมันแข็ง มอดุลัสกักเก็บ (storage modulus, G') ซึ่งบ่งชี้ความสามารถในการกักเก็บพลังงานของไขมันแข็งเมื่อได้รับแรงมากระทำ และสัดส่วนของการแสดงสมบัติการไหลต่อสมบัติยืดหยุ่น (G"/G', tan δ) ของไขมันแข็งที่มีการเปลี่ยนแปลงจากคุณสมบัติของของแข็งเป็นของไหล ณ อุณหภูมิใดๆ ระหว่างการหลอมเหลวจาก 0 °ซ ไปที่ 50 °ซ

การเตรียมโดขนมปังแช่แข็ง การละลายน้ำแข็ง และการอบ

เตรียมยีสต์โดโดยการผสมแป้งขนมปัง 500 กรัม น้ำตาล 100 กรัม เกลือ 10 กรัม ยีสต์ 10 กรัม ไข่ไก่ 100 กรัม น้ำ 210 กรัม ไขมัน 100 กรัม (สูตรที่ 1 ใช้ไขน้ำมันรำข้าว (RBW) 100 กรัม และสูตรที่ 2 ใช้เนยผสมไขน้ำมันรำข้าวในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก) ผสมในเครื่องผสม นวด หลังจากนั้นปั้นโดเป็นก้อนขนาดประมาณ 100 กรัม ใส่พิมพ์เทฟลอน แช่แข็งด้วยเครื่อง Air blast freezer อุณหภูมิ –30°ซ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นเก็บที่ –10 °ซ เป็นเวลา 33 วันเลียนแบบชั้นช่องแข็งของตู้เย็นระดับครัวเรือนของผู้บริโภค ตามวิธีของปาริฉัตร (2561) เมื่อครบกำหนด นำยีสต์โดแช่แข็งมาละลายน้ำแข็งที่อุณหภูมิ 45 °ซ เป็นเวลา 15 นาที นวด และปล่อยให้ยีสต์ดำเนิน

กิจกรรมการหมักต่ออีก 1 ชั่วโมง อบที่ 180 °ซ เป็นเวลา 20 นาที บันทึกการเปลี่ยนแปลงลักษณะปรากฏของยีสต์โดและขนมปังที่ได้

การวิเคราะห์ทางสถิติ

ทำการทดลอง 2 ครั้ง (trials) ในแต่ละครั้งวัด 3 ซ้ำ (replicates) และวิเคราะห์ผลการศึกษาโดยใช้ paired t-test และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's multiple range test (DMRT) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS (Statistical Package for the Social Sciences, V. 12)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

เนยและไขน้ำมันรำข้าวประกอบด้วยกรดไขมันที่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) Table 1 แสดงกรดไขมันหลักในเนยคือ กรดปาลมิติก กรดโอเลอิก และกรดสเตียริกตามลำดับ ปริมาณของกรดไขมันในเนยส่วนใหญ่เป็นกรดไขมันอิ่มตัวถึง 67.83% ของปริมาณกรดไขมันทั้งหมด ซึ่งแตกต่างจากกรดไขมันในไขน้ำมันรำข้าวจากกระบวนการกำจัดไข ซึ่งมีกรดโอเลอิก กรดลิโนเลอิก และกรดปาลมิติกเป็นกรดไขมันตามลำดับ ซึ่งปริมาณกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบของไขรำข้าวจะมีปริมาณของกรดไขมันไม่อิ่มตัว 65.23% ของปริมาณกรดไขมันทั้งหมด

Table1 Fatty acid composition in butter and rice bran wax (RBW) from winterizing step

Fatty acid	Butter	RBW from winterizing step
Saturated fatty acid		
Caprylic acid	0.35 ^{a}± 0.20	0.00^{b}± 0.00
Capric acid	2.37^{a}± 0.20	0.00^{b}± 0.00
Lauric acid	4.38^{a}± 0.05	0.00^{b}± 0.00
Myristic acid	12.84^{a}± 0.18	0.33^{b}± 0.01
Pentadecanoic acid	1.41 ^{a}± 0.01	0.00^{b}± 0.00
Palmitic acid	30.77^{a}± 0.17	24.81^{b}± 0.15
Heptadecanoic acid	0.88^{a}± 0.01	0.07^{b}± 0.00
Stearic acid	13.34 ^{a}± 0.04	3.16^{b}± 0.01
Arachidic acid	0.15 ^{b}± 0.01	1.15 ^{a}± 0.01
Heneicosanoic acid	1.16^{a}± 0.23	0.00^{b}± 0.00
Behenic acid	0.00^{b}± 0	0.36^{a}± 0.00
Lignoceric acid	0.00^{b}± 0	0.59^{a}± 0.01
Total saturated fatty acid	67.83^{a}± 0.25	27.77^{b}± 0.25

Table 1 (continued)

Fatty acid	Butter	RBW from winterizing step
Unsaturated fatty acid		
Myristoleic acid	0.81[a]± 0.02	0.00[b]± 0.00
Palmitoleic acid	1.63[a]± 0.01	0.20[b]± 0.01
cis-10-Heptadecenoic acid	0.32[a]± 0.01	0.00[b]± 0.00
cis-9-Oleic acid	22.86[b]± 0.13	37.96[a]± 0.23
Linoleic acid	1.22 [b]± 0.09	25.65[a]± 0.07
alpha-Linolenic acid	0.99[a]± 0.14	0.77[b]± 0.01
Eicosapentaenoic acid	0.12 [a]± 0.00	0.00[b]± 0.00
cis-11-Eicosenoic acid	0.00[a]± 0	0.00[a]± 0.00
gamma-Linolenic acid	0.00[b]± 0	0.09 [a]± 0.00
Total unsaturated fatty acid	30.38[b]± 0.13	65.60[a]± 0.13
Total fatty acid	95.60[a]± 0	95.60[a]± 0.00

Means ± s.d. followed by different superscripts in the same row are significantly different ($p<0.05$)

ความแตกต่างของกรดไขมันในเนยและไขน้ำมันรำข้าวนี้มีผลต่อรูปแบบการหลอมเหลวไขมันแข็ง แสดงใน Figure 1 ผลึกไขมันของทั้งสองตัวอย่างถูกหลอมเหลวจนหมดที่อุณหภูมิ 38 °ซ อย่างไรก็ตาม thermogram ของตัวอย่างมีแบบแผนการหลอมเหลวและสถานะที่อุณหภูมิ –60 °ซ ถึง 38 °ซ ที่แตกต่างกันเนื่องจากไขน้ำมันรำข้าวประกอบด้วยไตรกลีเซอไรด์ซึ่งมีกรดไขมันหลักแสดงใน Table 1 และแอลกอฮอลสายยาว (long chain alcohol) หรือพอลิโคซานอล (policosanol) ส่วนของไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมันรำข้าว ทำให้น้ำมันรำข้าวโดยทั่วไปมีช่วงอุณหภูมิในการหลอมเหลวประมาณ –20 °ซ ถึง 5 °ซ (Nukit et al., 2014) ซึ่งปรากฏใน Figure1 ในช่วง –25 ถึง 5 °ซ แต่การหลอมเหลวของผลึกของแข็งอื่นในไขน้ำมันรำข้าวที่ช่วงอุณหภูมิ 7 °ซ ถึง 38 °ซ น่าจะเกิดจากสัดส่วนของพอลิโคซานอลจากไขรำข้าว นอกจากนั้น องค์ประกอบที่แตกต่างกันระหว่างเนยและไขน้ำมันรำข้าวยังมีผลต่อพลังงานที่ต้องการใช้ในการทำลายผลึก เอนทัลปีรวมของการหลอมเหลวเนยมีค่า เท่ากับ 75.36 จูลต่อกรัม ในขณะที่ เอนทัลปีรวมของการหลอมเหลวไขน้ำมันรำข้าวมีค่าเท่ากับ 55.33 จูลต่อกรัม ($p<0.05$)

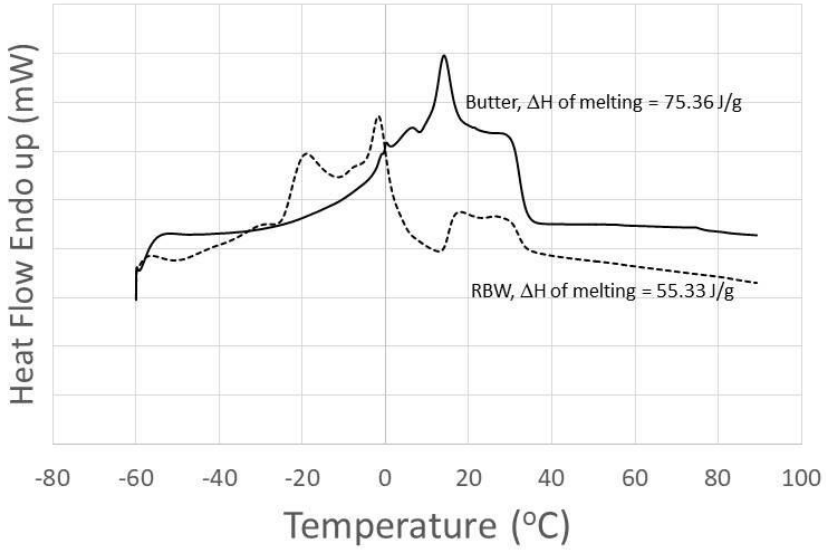


Figure 1 Thermograms of butter and rice bran wax during melting of frozen fat hard stock from -60 °C to 90 °C

คุณสมบัติด้านวิทยากระแสของเนยและไขน้ำมันรำข้าวเมื่อได้รับความร้อนแสดงใน Figure 2 บ่งชี้ว่า ณ อุณหภูมิเดียวกันเนยมีค่ามอดุลัสกักเก็บ (G') (Figure 2a) และมอดุลัสสูญเสีย (loss modulus, G") (Figure 2b) สูงกว่าไขน้ำมันรำข้าว สัดส่วนของการแสดงสมบัติการไหลต่อสมบัติยืดหยุ่น (G"/G', tan δ) ของไขมันแข็งในเนยและน้ำมันรำข้าว มีค่าต่ำกว่า 1 ในช่วงอุณหภูมิ 0 – 36 °ซ (Figure 2c) แสดงให้เห็นว่า ผลึกไขมันยังคงรับผิดชอบต่อความสามารถในการกักเก็บพลังงานของไขมันแข็งเมื่อได้รับแรงมากระทำมากกว่าการกระจายพลังงานในช่วงอุณหภูมิดังกล่าว อย่างไรก็ตาม ที่อุณหภูมิ 36 – 38 °ซ ซึ่งผลึกไขมันในตัวอย่างทั้งสองชนิดหลอมเหลวหมด ไม่พบความแตกต่างเชิงกลของเนยเหลวและไขน้ำมันรำข้าว

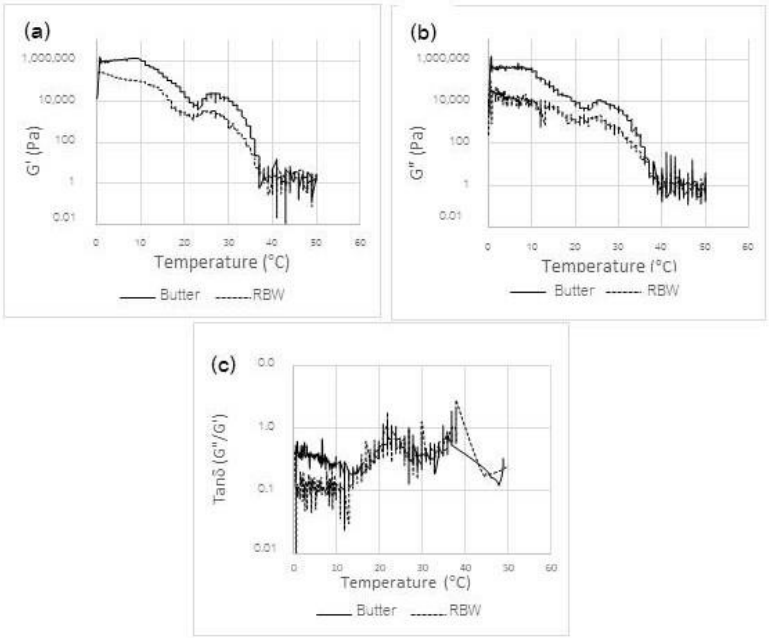


Figure 2 Moduli of butter and rice bran wax during temperature sweep from 0 to 50°C: (a) storage modulus (G'), (b) loss modulus (G") and (c) tan δ of butter and rice bran wax (RBW)

จากคุณสมบัติเชิงความร้อนและคุณสมบัติด้านวิทยากระแสของไขมันแข็งทั้งสองชนิด ซึ่งแสดงว่าไขน้ำมันรำข้าวจะยังคงสภาวะผลึกและของแข็งในช่วงอุณหภูมิกว้างถึง 38 °ซ คณะผู้วิจัยจึงเลือกผสมเนยกับไขน้ำมันรำข้าวในสัดส่วน 1:1 เพื่อนำไปใช้ในยีสต์โดแช่แข็งเปรียบเทียบกับการใช้ไขรำข้าวเพียงอย่างเดียวพบว่า โดที่ใช้ไขน้ำมันรำข้าวเพียงอย่างเดียว (RBW) สามารถขึ้นรูปเป็นก้อนกลมขนาดเล็ก ผิวสัมผัสมีความหนืดติดมือ (stickiness) น้อยกว่าสูตรที่ใช้ RBW-Butter ก่อนการแช่แข็ง ยีสต์โดที่มีไขมันแตกต่างกันเริ่มกระบวนการสร้างก๊าซและขยายขนาดได้ใกล้เคียงกัน การแช่แข็งที่ –30 °ซ โดยใช้ air-blast freezer ทำให้ยีสต์โดหดตัวเล็กน้อย ปรากฏผิวย่น (Figure 3b, 3e) เนื่องจากฟองอากาศมีปริมาตรลดลงที่อุณหภูมิต่ำ อย่างไรก็ตาม การละลายน้ำแข็ง 15 นาทีและนวดที่อุณหภูมิ 45 °ซ ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของไขมันทั้งสองชนิด พบว่ายีสต์ยังสามารถดำเนินกิจกรรมหลังจากเก็บรักษามาเป็นเวลาประมาณ 1 เดือนและละลายน้ำแข็งได้ อย่างไรก็ตาม พบว่ายีสต์โดที่เตรียมโดยใช้ RBW เป็นแหล่งไขมันเพียงอย่างเดียวมีปริมาตรมากกว่าเมื่อใช้ RBW-Butter เป็นแหล่งไขมัน ทั้งก่อนการอบ (Figure 3c,3f) และหลังการอบ (Figure 4)



Figure 3 Effect of RBW (a, b, c) and mixed RBW-butter (d. e, f) on appearance of yeast dough after shaping (a, d), freezing at -30 °C for 1 h (b, d), thawing after 33 d frozen storage and proofing at 45 °C for 45 min (c, f)

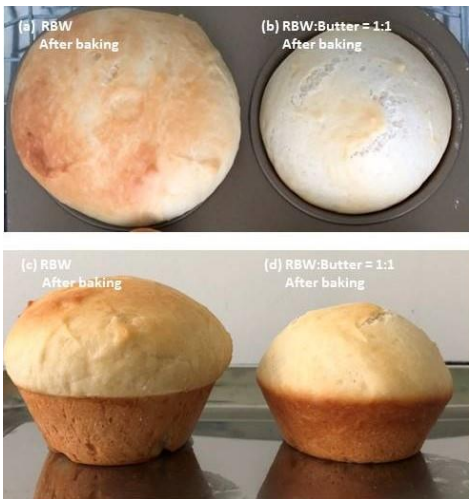


Figure 4 Appearance of bread using RBW (a, c) and mixed RBW and butter (b, d) after baking. The doughs were frozen at -30 °C and storage at -10 °C for 33 days.

สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการรายงานครั้งแรกของการใช้ไขน้ำมันรำข้าวเพื่อทำให้เกิดโครงสร้างของไขมันแข็งในการรักษาการรอดชีวิตของยีสต์ที่ผ่านกระบวนการแช่แข็งและเก็บรักษายีสต์โดในสภาวะการผลิตที่สามารถทำได้สำหรับอุตสาหกรรมขนาดย่อม อย่างไรก็ตาม กลไกของไขมันในการรักษาการรอดชีวิตของยีสต์ และการคงความยืดหยุ่นของกลูเตนระหว่างการแช่แข็ง การเก็บรักษา การละลายน้ำแข็ง และการอบ ควรได้รับการศึกษาเพิ่มเติมในรายละเอียดต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณโครงการ Innovation Hub-Agriculture & Food เพื่อสร้างเศรษฐกิจฐานนวัตกรรมของประเทศตามนโยบายประเทศไทย 4.0 ที่ได้สนับสนุนทุนวิจัยและบริษัทรวมของโปรด จำกัดในโครงการ รวมทั้งบริษัทน้ำมันรำข้าวสุรินทร์ ที่อนุเคราะห์ไขน้ำมันรำข้าวในการศึกษาผลของไขมันผสมในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

ปาริฉัตร หงสประภาส. 2561. **การพัฒนาการผลิตโดขนมปังและเพสตรีแช่เยือกแข็ง** รายงานเสนอต่อโครงการ Innovation Hub-Agriculture & Food เพื่อสร้างเศรษฐกิจฐานนวัตกรรมของประเทศตามนโยบายประเทศไทย 4.0, 29 หน้า มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร

Limpimwong, W., T. Kumrungsee, N. Kato and M. Thongngam. 2017. Rice bran wax oleogel: A potential margarine replacement and its digestibility effect in rats fed a high-fat diet. **Journal of Functional Foods** 39: 250-256.

Nukit, N., P. Setwipattanachai, S. Chaiseri and P. Hongsprabhas. 2014. Surfactant and aging effects on liquid oil-holding capacity of solidified rice bran oil. **Journal of Oleo Science** 63:1099-10.

TMC-05, Thai Compendium of Methods for Food Analysis, Thailand, 1st ed. 2003, p.2-33 to 2-36

A Study on Spore Hydrophobicity and Spore Survivability of *Clostridium sporogenes* at Various Temperatures on Model Food Contact Surfaces

Anandu Chandra Khanashyam[1] and Pathima Udompijitkul[1*]

ABSTRACT

The hydrophobicity of vegetative cells and spores of *C. sporogenes* PA3679, TISTR1452, ATCC3584 and TISTR1481 were determined by Microbial Adhesion to Hydrocarbon (MATH) assay. Although the % spore hydrophobicity of *C. sporogenes* varied among the strains, spores showed a much higher (13-33 fold increases) in % hydrophobicity than their vegetative counterparts. In this study, experiments were also conducted to determine the survivability of various strains of *C. sporogenes* spores on stainless steel (SS) and plastic chopping board (PB) as model food contact surfaces. The results from individual and 4-strain cocktail mixture of *C. sporogenes* spores inoculated to the surfaces and stored at 10°C, 30°C, and 37°C showed that attached spores of *C. sporogenes* were capable of surviving on both surfaces up to 72 h of aerobic incubation with only slightly changing in population numbers. The survivability of tested *C. sporogenes* spores was also irrespective of temperature or strain tested.

Key Words: *Clostridium sporogenes* spores, cell hydrophobicity, spore survival, food contact surfaces

* Corresponding author; e-mail address: **Pathima.u@ku.th**

[1]Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

INTRODUCTION

Clostridium botulinum, *C. perfringens*, and *C. difficile* are major anaerobic spore formers of public health concerns. *C. sporogenes* is an important food spoiler, particularly for meat and dairy products (McClure, 2006; Storari *et al*., 2016), and considered as a closely-related microbe to proteolytic *C. botulinum* (Bradbury. *et al*., 2012). Although vegetative cells of these anaerobic spore formers are generally inactivated during processing and sanitizing steps, the spores could survive these measures and later compromise food safety and quality. Surface-derived contamination is one of the major causes of cross-contamination in food industry (Kusumaningrum *et al*., 2003).

The efficiency of the spore decontamination process is often dependent on the equipment and spore properties. Spores generally attach to surfaces at a greater rate than vegetative cells due to their relatively high hydrophobicity and the presence of hair-like structures on their surface (Andersson and Rönner, 1998). In addition, studies on adhered spores revealed that the mechanical rinsing alone cannot effectively remove the attached spores, and the success of spore decontamination by chemical sanitizer is influenced by the surface properties of the spores (Faille *et al*., 2013; Eschlbeck *et al*., 2018). Therefore, reducing the attachment of spores in processing line and effective removal of attached spores during cleaning remain a major challenge in food industry. To overcome these burdens, a clear idea of spore surface properties and its survivability pattern is necessary. In this study, *C. sporogenes* was employed as a model food-related spore-forming bacterium owing to its widely used as a common surrogate for proteolytic *C. botulinum.* Our study presents the hydrophobicity of vegetative cells and spores of 4 different strains of *C. sporogenes* and their survivability at various temperatures upon attached to SS and PB surfaces, which serve as model food contact surfaces typically used in food industries and household settings.

MATERIALS AND METHODS

1. Bacterial strains and growth conditions

C. sporogenes strains used in this study include PA3679, ATCC3584, TISTR1452, and TISTR 1481. PA3679 and ATCC3584 strains were provided by Prof. Dr. Mahfuzur R. Sarker (Oregon State University, USA). TISTR1452 and TISTR1481 were purchased from Thailand Institute of Scientific and Technology Research. The actively-growing cultures were prepared by inoculating 0.2 mL of stock culture into 10 mL Fluid Thioglycollate Medium (FTG) (Difco) followed by overnight incubation at 37°C.

2. Preparation and purification of *C. sporogenes* spores

C. sporogenes spores were prepared by a previously published protocol with some modifications (Paredes-Sabja *et al*., 2007). Briefly, an actively-growing FTG culture was transferred to 10 mL- Duncan Strong (DS) medium, and incubated for 5 days at 37°C. The vegetative cells were grown in Tryptone Glucose Yeast extract (TGY) broth for 24 h at 37°C. Both spores and cells were harvested by repeated centrifugation at 3300 x g at 4°C for 10 min.

3. Determination of degree of cell surface hydrophobicity

The percent hydrophobicity of *C. sporogenes* spores was measured by Microbial Adherence To Hydrocarbon (MATH) assay as previously described with some modifications (Rosenberg, 1984;

Wiencek *et al.*, 1990). Briefly, spore suspension was suspended in sterile distilled water and adjusted to an absorbance at 440 nm (A_{440}) of 0.8-1.0. Then, 3-mL spore suspension was incubated at 35°C for 15 min prior to mixing with 1 mL of hexadecane (Sigma-Aldrich). The mixture was left for 15 min to allow the partition of spores between the aqueous phase and hexadecane phase. Then, carefully remove the aqueous phase and measured the A_{440} with a spectrophotometer (SunTech). The results were expressed as % hydrophobicity calculated by the following formula: $100 \times [(A_i-A_f)/A_i]$, where A_i and A_f were absorbance at A_{440} for the initial spore suspension and final absorbance at A_{440} for the aqueous phase after partition, respectively. For vegetative cells, cell hydrophobicity was measured by the method described by Wiencek *et al.* (1990) with slight modifications. Briefly, purified cells were resuspended in 25 mM Na_2HPO_4 buffer (pH 7.5), and then adjusted cell density to A_{440} of 0.8-1.0. Subsequently, MATH assay was performed with aforementioned procedure. The hydrophobicity assay was performed in duplicate with 2 independent spore preparations.

4. Preparation of food contact surfaces

A 5 x 5 cm^2 grade 304, 2B finish SS coupons were rinsed thoroughly with tap water and treated with 5% (v/v) Extran® MA 01 (Merck) for 2h, and wrapped with aluminum foil before sterilizing at 121°C for 15 min. The polypropylene plastic boards (New Star Foodservice) were cut into of 5x5 cm^2 pieces and washed with 5% (v/v) Extran® MA 01, and then dipped in hot distilled water at 90°C for 20 min followed by dipping in 70% ethanol for 5 min prior to drying inside a class II biosafety cabinet for 30 min.

5. Survival of *C. sporogenes* on food contact surface

0.1 mL of standardized spore suspension (OD_{600} ~ 6) were heat shocked at 80 °C for 10 min before inoculated onto the SS or PB coupons and spread uniformly throughout the surface by a sterile bent glass rod. The contaminated SS or PB coupons were dried in a class II biosafety cabinet for 1 h. Dried SS or PB coupons were transferred to sterilized plastic petri plates and stored under aerobic conditions at 10, 30, and 37°C. The number of survived cells was determined after 0, 1, 2, 4, 6, 8, 12, 24, 48, and 72 h of incubation. The enumeration of *C. sporogenes* spores are performed by a swab method and plated on Brain Heart Infusion agar (Merck). Colonies were counted after 48 h of anaerobic incubation at 37°C. The spore survivability experiments were performed in triplicate with 3 independent spore preparations.

6. Statistical analysis

Data were analysed by Analysis of Variance (ANOVA) using SPSS statistical software package version 22 (IBM Corp.). Multiple comparisons among mean values were performed with Duncan's Multiple Range Test at the significant level of 0.05.

RESULTS AND DISCUSSION

1. % Hydrophobicity of *C. sporogenes* spores and vegetative cells

In the current work, all 4 tested strains of *C. sporogenes* spores had a significantly higher % hydrophobicity compared with their vegetative counterparts ($p < 0.05$) (Fig. 1). There was no significant difference in % hydrophobicity among vegetative cells of different strains. The fold-increase in the % hydrophobicity of spores verses vegetative cells ranged from 13 – 33 times

depending on the bacterial strain. Spores of TISTR1481 showed the highest %hydrophobicity of 75%, followed by ATCC3584 and TISTR1452 with 69% and 63%, respectively. PA3679 showed the least % hydrophobicity of 43%. The % hydrophobicity of PA3679 and ATCC3584 cells was 13 and 20 times, respectively, lower than that of spores, with 3.3 % and 3.4% respectively. Overall, these results indicate that spores of *C. sporogenes* are highly hydrophobic and the spore hydrophobicity is strain-specific ($p < 0.05$).

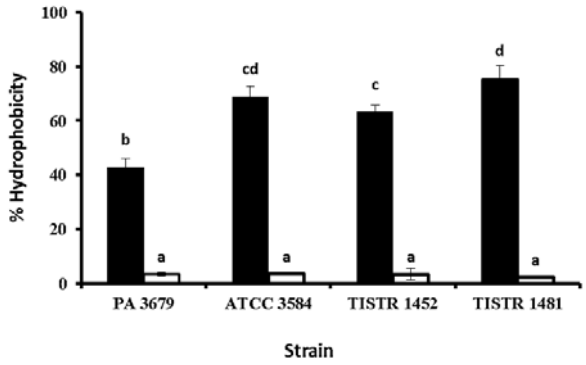


Figure 1 % Hydrophobicity of various strains of *C. sporogenes* spores (black bars) and vegetative cells (white bars). Different letters above bars represent a significant difference ($p < 0.05$) among various strains.

As previous studies suggest that degree of surface hydrophobicity is one of the important factors affecting the adherence of bacterial cells on solid surfaces (Faille *et al*., 2007; Shakerifard *et al*., 2009). A high variability on hydrophobicity between spores and cells was also reported among various strains of *Bacillus* spp. (Husmark and Rönner, 1992; Simmonds *et al*., 2003). This is because vegetative cells do not possess a significant amount of surface protein as compared to spores. Conversely, a spore structure consists of proteinaceous spore coats and exosporium. The high diversity in degree of hydrophobicity among tested strains may link to different protein compositions in the exosporium (Todd *et al*., 2003). Recent proteomic studies on *C. difficile* demonstrated that exosporium is a proteinaceous layer (Diaz-Gonzalez *et al*., 2015; Mora-Uribe *et al*., 2016), that can be removed by enzymatic or mechanical treatments and contributes to the hydrophobicity of the spore surface (Escobar-Cortes *et al*., 2013). Additionally, decoated *C. perfringens* spores showed a dramatical reduction in the degree of spore hydrophobicity compared with intact spores indicating a strong relationship between coat protein and hydrophobicity (Alzubeidi *et al*., 2018).

2. Survival of *C. sporogenes* spores on food contact surface

It was evident from Fig. 2 that all 4 tested strains of *C. sporogenes* spores were able to survive on SS surfaces up to 72 h under aerobic conditions, with negligible difference in the log CFU/cm^2 among strains and tested temperatures. Temperature had no influence on the spore survivability on SS surface. At 37°C, an insignificant increase in cell count ($p > 0.05$) was observed at 72 h for strains of PA3679, TISTR1452 and ATCC3584, whereas no change in cell number was achieved for TISTR 1481. An insignificant increase from 5.23 log CFU/cm^2 to 5.29 log CFU/cm^2 was also found for TISTR1452 at 10°C after 72-h incubation. The maximum reduction in adhered spores after 72 h was 0.26 log CFU/cm^2 as observed for PA3679 at 10°C.

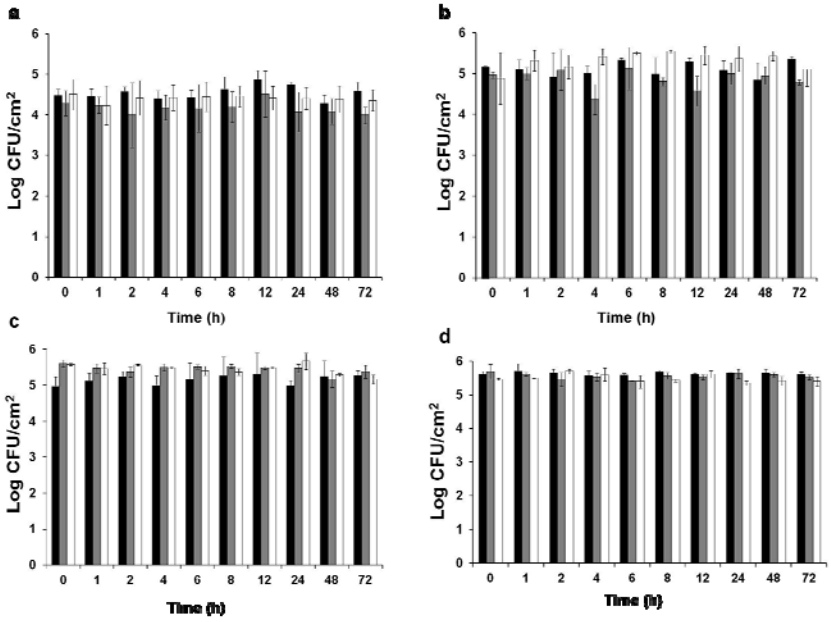


Figure 2 Survivability of spores of *C. sporogenes* PA3679 (a), TISTR1452 (b), ATCC3584 (c), TISTR1481(d) at 37°C (black bars), 30°C (grey bars) and 10°C (white bars) on stainless steel surfaces.

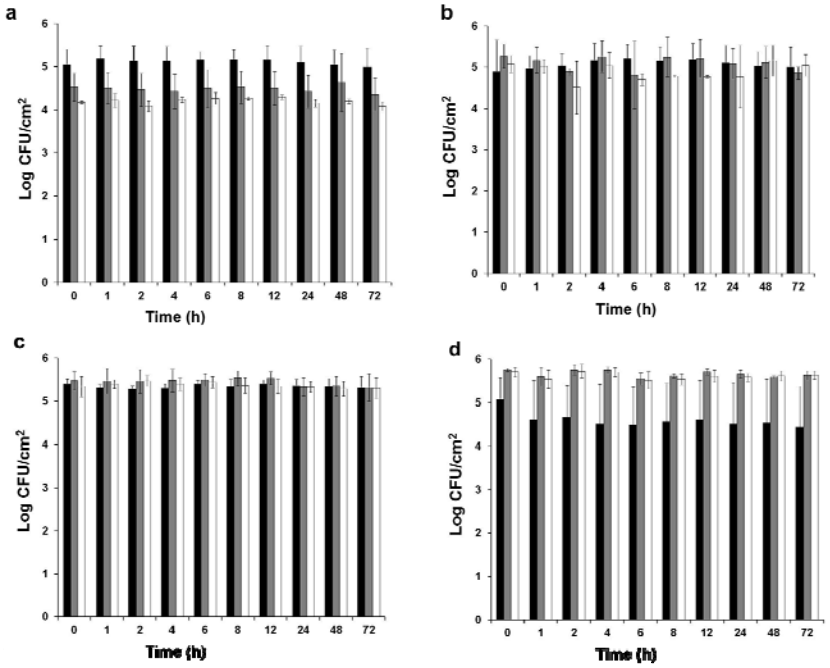


Figure 3 Survivability of spores of *C. sporogenes* PA3679 (a), TISTR1452 (b), ATCC3584 (c), TISTR1481 (d) at 37°C (black bars), 30°C (grey bars) and 10°C (white bars) on plastic cutting board surfaces.

Similar results were also observed for PB surfaces. Spores of 4 *C. sporogenes* strains attached to PB survived throughout the experimental period regardless of time and temperature tested (Fig 3). The maximum reduction after 72 h incubation for PB was at 30°C for TISTR 1452 with 0.42 log CFU/cm^2 reductions. A similar survivability pattern was also found for the 4-strain cocktail spore mixture that was stored on different temperatures for both SS and PB coupons (data not shown). These results indicates that spores of *C. sporogenes* attached to food contact surfaces

were able to retain their survivability under different temperatures that might encounter in food processing lines or household settings.

A previous study reported that *Pseudomonas* spp. and *Acinetobacter calcoaceticus* isolated from canning industry and *Staphylococcus aureus*, shows the maximum survivability of adhered cells at 4°C on dried surfaces (McEldowney and Fletcher, 1988). This study also suggested that a temperature above 24°C decreases the survivability of adhered cells. Conversely, our results showed that temperatures did not play a major role on survivability of *C. sporogenes* spores. This study also reveals that *C. sporogenes* spores remain viable over the extended period of routine operating hours in food processing plants. This clearly emphasizes the importance of applying the effective sanitization procedure with equal importance on different surfaces in food manufacturing environment. A recent study was performed on survivability of vegetative cells and spores of *C. perfringens* strains SM101 and F4969 on SS chips at room temperature and at 4°C . The results showed that vegetative cells of *C. perfringens* were not able to survive on the SS surfaces after 30 min of aerobic incubation. However spores of both strains survived on the SS coupon for up to 48 h. These extended survivability of spores might be due to their highly resistant properties to a variety of environmental insults and processing measures, which is accomplished by its well structured multilayer morphology, the impermeability of spore inner membrane, the presence or dipicolinic acid in the spore core, spore mineral content, and the protection of the spore DNA by its saturation with a group of α/β – type small, acid soluble spore protein (Setlow, 2016).

CONCLUSION

In conclusion, the *C. sporogenes* spores adhered to SS and PB surfaces are capable of surviving even after 72 h of aerobic incubation at various temperatures. The temperature did not significantly affect the survivability of *C. sporogenes* spores on model food contact surfaces. The spores also showed an enhanced hydrophobicity index which was significantly higher than the vegetative counterparts.

ACKNOWLEDGEMENTS

This study was funded by the grant form Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University for a new faculty member. This research is supported in part by the Graduate Program Scholarship from the Graduate School, Kasetsart University.

REFERENCES

Alzubeidi, Y.S., P. Udompijitkul, P.K. Talukdar, and M.R. Sarker. 2018. Inactivation of *Clostridium perfringens* spores adhered onto stainless steel surfaces by agents used in a clean-in-place procedure. **International Journal of Food Microbiology**. 277: 26-33.

Andersson, A. and U. Rönner. 1998. Adhesion and removal of dormant, heat-activated, and germinated spores of three strains of *Bacillus cereus*. **Biofouling**. 13: 51-67.

Bradbury., M., P. Greenfield., D. Midgley., D. Li., N. Tran-Dinh., F. Vriesekoop., and J.L. Browna. 2012. Draft genome sequence of *Clostridium sporogenes* PA 3679, the common nontoxigenic surrogate for proteolytic *Clostridium botulinum*. **Journal of Bacteriology**. 194: 1631-1632.

Diaz-Gonzalez, F.M. Milano, V. Olguin-Araneda, J. Pizarro-Cerda, P. Castro-Cordova, S.C. Tzeng, C.S. Maier, M.R. Sarker, and D. Paredes-Sabja. 2015. Protein composition of the outermost exosporium-like layer of *Clostridium difficile* 630 spores. **Journal of Proteomics**. 123: 1-13.

Eschlbeck, E., C. Seeburger, and U. Kulozik. 2018. Influence of spore and carrier material surface hydrophobicity on decontamination efficacy with condensing hydrogen peroxide vapour. **Journal of Applied Microbiology**. 124: 1071-1081.

Escobar-Cortes, K., J. Barra-Carrasco, and D. Paredes-Sabja. 2013. Proteases and sonication specifically remove the exosporium layer of spores of Clostridium difficile strain 630. **Journal of Microbiological Methods**. 93: 25-31.

Faille, C., G. Tauveron, C. Le Gentil-Lelievre, and C. Slomianny. 2007. Occurrence of *Bacillus cereus* spores with a damaged exosporium: Consequences on the spore adhesion on surfaces of food processing lines. **Journal of Food Protection**. 70: 2346-2353.

Faille, C., T. Bénézech, W. Blel, A. Ronse, G. Ronse, M. Clarisse, and C. Slomianny. 2013. Role of mechanical vs. chemical action in the removal of adherent *Bacillus* spores during CIP procedures. **Food Microbiology**. 33: 149-157.

Husmark, U. and U. Rönner. 1992. The influence of hydrophobic, electrostatic and morphologic properties on the adhesion of *Bacillus* spores. **Biofouling**. 5: 335-344.

Kusumaningrum, H.D., G. Riboldi, W.C. Hazeleger, and R.R. Beumer. 2003. Survival of foodborne pathogens on stainless steel surfaces and cross-contamination to foods. **International Journal of Food Microbiology**. 85: 227-236.

McClure, P. 2006. "Spore-forming bacteria." In C. W. Blackburn. (ed.). **Food Spoilage Microorganisms**. Cambridge, England: Woodhead Publishing Limited, 579-623.

McEldowney, S. and M. Fletcher. 1988. The effect of temperature and relative humidity on the survival of bacteria attached to dry solid surfaces. **Letters in Appied Microbiology**. 83-86.

Mora-Uribe, P., C. Miranda-Cardenas, P. Castro-Cordova, F. Gil, I. Calderon, J.A. Fuentes, P.I. Rodas, S. Banawas, M.R. Sarker, and D. Paredes-Sabja. 2016. Characterization of the adherence of *Clostridium difficile* spores: The integrity of the outermost layer affects adherence properties of spores of the epidemic strain R20291 to components of the intestinal mucosa. **Frontiers in Cellular Infection Microbiology**. 6: 1-6.

Paredes-Sabja, D., M. Gonzalez, M.R. Sarker, and J.A. Torres. 2007. Combined effects of hydrostatic pressure, temperature and pH on the Inactivation of spores of *Clostridium perfringens* type A and *Clostridium sporogenes* in buffer solutions. **Journal of Food Science**. 72: M202-M206.

Rosenberg, M. 1984. Bacterial adherence to hydrocarbons: A useful technique for studying cell surface hydrophobicity. **FEMS Microbiology Letters**. 22: 289-295.

Setlow, P. 2016. "Spore resistance properties." In A. Drinks and P. Eichenberger. (ed.). **The Bacterial Spore: From Molecules to Systems**. Washington, DC: American Society of Microbiology, 201-215.

Shakerifard, P., F. Gancel, P. Jacques, and C. Faille. 2009. Effect of different *Bacillus subtilis* lipopeptides on surface hydrophobicity and adhesion of *Bacillus cereus* 98/4 spores to stainless steel and Teflon. **Biofouling**. 25: 533-541.

Simmonds, P., B. Mossel, T. Intaraphan, and H. Deeth. 2003. Heat resistance of *Bacillus spores* when adhered to stainless steel and its relationship to spore hydrophobicity. **Journal of Food Protection**. 66: 2070-2075.

Storari, M., S. Kulli, D. Wüthrich, R. Bruggmann, H. Berthoud, and E. Arias-Roth. 2016. Genomic approach to studying nutritional requirements of *Clostridium tyrobutyricum* and other Clostridia causing late blowing defects. **Food Microbiology**. 59: 213-223.

Todd, S.J., A.J. Moir, M.J. Johnson, and A. Moir. 2003. Genes of *Bacillus cereus* and *Bacillus anthracis* encoding proteins of the exosporium. **Journal of Bacteriology**. 185: 3373-3378.

Wiencek, K.M., N.A. Klapes, and P.M. Foegeding. 1990. Hydrophobicity of *Bacillus* and *Clostridium* spores. **Applied and Environmental Microbiology**. 56: 2600-2605.

การเปรียบเทียบผลของวิธีการทำให้เกิดการกลายพันธุ์ทางกายภาพและเคมีต่อการผลิตสารซิตรินินของเชื้อรา *Monascus purpureus* KUPM5

Comparison the Effect of Physical and Chemical Mutagenesis on Citrinin Production by *Monascus purpureus* KUPM5

สิทธิโชค เกตุแก้ว[1] วีระสิทธิ์ สรรพมงคลไชย[1] มาซาโตชิ โกโต[2] และ สุมัลลิกา โมรากุล[1*]

Sittichoke Ketkaeo[1], Werasit Sanpamongkolchai[1], Masatoshi Goto[2] and Sumallika Morakul[1*]

บทคัดย่อ

Monascus purpureus เป็นเชื้อราชนิดหนึ่งที่นิยมนำมาผลิตข้าวแดง (Red koji) มีประโยชน์ต่อร่างกาย ช่วยลดระดับคลอเรสเตอรอลในกระแสเลือด อย่างไรก็ตามราแดงยังผลิตสารซิตรินิน (Citrinin) ซึ่งเป็นสารพิษและมีความเป็นพิษต่อไต ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาวิธีการทำให้เกิดการกลายพันธุ์ของเชื้อรา *Monascus purpureus* KUPM5 เพื่อลดการผลิตสารซิตรินินโดยการใช้วิธีทางกายภาพด้วยรังสียูวี ทางเคมีด้วยสารเคมี *N*-methyl-*N'*-nitro-*N*-nitrosoguanidine (NTG) และการใช้รังสียูวีร่วมกับสารเคมี NTG ทำการทดสอบการผลิตสารซิตรินินด้วย *Bacillus subtilis* แล้วคัดเลือกสายพันธุ์กลายที่มีวงใส (Clear zone) เล็กกว่าสายพันธุ์ดั้งเดิม จากนั้นนำเชื้อราสายพันธุ์กลายไปผลิตข้าวแดงและสกัดสารซิตรินิน วิเคราะห์ปริมาณสารซิตรินินด้วยเครื่อง HPLC พบว่ามีสายพันธุ์กลายทั้งหมด 6 ไอโซเลตที่มีปริมาณสารซิตรินินลดลง โดยสายพันธุ์กลายที่ได้จากการฉายรังสียูวี 2 ไอโซเลต สามารถลดการผลิตสารซิตรินินได้ร้อยละ 80-87 และสายพันธุ์กลายที่ได้จากการฉายรังสียูวีร่วมกับสารเคมี NTG 4 ไอโซเลต สามารถลดการผลิตสารซิตรินินได้สูงถึงร้อยละ 94-100

ABSTRACT

Monascus purpureus have been used extensively as red koji. It is reported that red koji can prevent cancer and decrease blood cholesterol level. However, *Monascus purpureus* also produced Citrinin which is mycotoxin that can cause human kidney damage. Thus, the objective of this research was to compare the effect of physical mutagenesis (UV irradiation), chemical mutagenesis (*N*-methyl-*N'*-nitro-*N*-nitrosoguanidine, NTG) and combination of UV with NTG on Citrinin production to improve the mutant strains with low citrinin productivity. Mutant strains were screened by plate bioassay base on inhibition zone of bacteria *Bacillus subtilis*. Citrinin was extracted from the red koji to measure using HPLC. The Citrinin production in 2 isolates by UV irradiation and 4 isolates by the combination of UV and NTG are reduced by 80-87% and 94-100% respectively as compared to the parental strain.

Key Words: citrinin, *Monascus purpureus,* mutagenesis, UV irradiation, NTG chemical treatment

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

[1]ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Biotechnology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

[2]ภาควิชาชีวเคมีประยุกต์และวิทยาศาสตร์การอาหาร คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยซากะ ประเทศญี่ปุ่น 840-8502

[2]Department of Applied Biochemistry and Food Science, Faculty of Agriculture, Saga University, Saga, Japan 840-8502

คำนำ

เชื้อรา *Monascus purpureus* นิยมนำมาผลิตและแปรรูปเป็นข้าวแดงหรือโคจิ (red koji) เพื่อใช้เป็นอาหารเสริมในการลดคอเลสเตอรอล มีสารโมนาโคลินเค (monacolin K) ที่มีผลในการลดไขมันในเลือด (Klimek *et al*., 2009) ตลอดจนนำมาใช้ทดแทนไนเตรทในการปรุงแต่งอาหารและเป็นสีผสมอาหารธรรมชาติเพื่อใช้ทดแทนสีสังเคราะห์ โดยใช้กันอย่างแพร่หลายในแถบทวีปเอเชีย และเป็นที่ยอมรับในระดับสากลว่าเป็นหนึ่งในสารสีที่มีคุณภาพ อย่างไรก็ตามเชื้อรา *Monascus purpureus* ก็ยังสร้างสารซิตรินิน (citrinin) ซึ่งเป็นสารเมตาบอไลต์ทุติยภูมิ มีคุณสมบัติเป็นสารต้านจุลชีพ (antibacterial agent) (Wong *et al*. 1977) มีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตทั้งคนและสัตว์โดยมีผลต่อตับ ไต ไขกระดูกและกระบวนการเมตาบอลิซึมภายในเซลล์โดยจะแทรกเข้าไปในไมโทคอนเดรียแล้วเปลี่ยนแปลงสมดุลแคลเซียมทำให้เซลล์เกิดความผิดปกติ (Chagas *et al*., 1995) ในปัจจุบันได้มีการตระหนักถึงความเป็นอันตรายของสารซิตรินินเป็นอย่างมากเนื่องจากสามารถพบได้ในผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากข้าวแดง จึงทำให้หน่วยงานความปลอดภัยอาหารแห่งสหภาพยุโรปหรือ European Food Safety Authority (EFSA) ได้มีการกำหนดปริมาณสารซิตรินินที่ปนเปื้อนในผลิตภัณฑ์อาหารที่ผลิตหรือมีส่วนประกอบจากข้าวแดงได้ไม่เกิน 2,000 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม (European Food Safety Authority, 2014)

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์ในการปรับปรุงสายพันธุ์เชื้อรา *Monascus purpureus* KUPM5 ให้มีการผลิตสารซิตรินินลดลงโดยเปรียบเทียบผลของวิธีการทำให้เกิดการกลายพันธุ์โดยทางกายภาพด้วยรังสียูวี ทางเคมีด้วยสารเคมี *N*-methyl-*N'*-nitro-*N*-nitrosoguanidine (NTG) และการใช้รังสียูวีร่วมกับสารเคมี NTG เพื่อให้ได้สายพันธุ์กลายที่มีการผลิตสารซิตรินินต่ำลงเมื่อเปรียบเทียบกับสายพันธุ์ดั้งเดิม (KUPM5) เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิตข้าวแดงที่มีความปลอดภัยและลดโอกาสการเกิดผลข้างเคียงจากสารซิตรินินที่อยู่ในข้าวแดง

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมเชื้อราบริสุทธิ์

ถ่ายกล้าเชื้อราบริสุทธิ์ *Monascus purpureus* KUPM5 โดยใช้เข็มเขี่ยเชื้อเขี่ยเอาเส้นใยเชื้อราบริเวณปลายด้านนอกของโคโลนีมาวางบนอาหารเลี้ยงเชื้อ Potato Dextrose Agar (PDA) บ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 7 วัน จากนั้นนำไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสเพื่อใช้ในการทดลองต่อไป

การเตรียมสารแขวนลอยสปอร์

เลี้ยงเชื้อรา *Monascus purpureus* KUPM5 บนอาหารแข็ง PDA ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน จากนั้นเติมน้ำกลั่นที่มีส่วนประกอบของ tween 80 ความเข้มข้นร้อยละ 0.01 ปริมาตร 10 มิลลิลิตร เกลี่ยเชื้อราให้กระจายตัวแล้วกรองผ่านผ้าขาวบางที่ผ่านการฆ่าเชื้อ นำส่วนใสที่ได้ใช้เป็นสารแขวนลอยสปอร์ โดยต้องมีจำนวนสปอร์มากกว่าหรือเท่ากับ 10^6 สปอร์ต่อมิลลิลิตร

การทำให้เกิดการกลายพันธุ์

การทำให้เกิดการกลายพันธุ์ด้วยรังสียูวี

นำสารแขวนลอยสปอร์ของเชื้อรา *Monascus purpureus* KUPM5 ปริมาตร 4 มิลลิลิตร เทลงบนจานเพาะเชื้อแล้วเกลี่ยให้ทั่วเสมอกัน จากนั้นฉายรังสียูวีโดยให้ระยะห่างระหว่างจานเพาะเชื้อกับหลอดไฟเท่ากับ 55 เซนติเมตร เป็นเวลา 30 และ 40 นาที (โดยที่ชุดควบคุมจะไม่มีการฉายรังสี) นำตัวอย่างหลังจากฉายรังสีไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 1,800 x g เป็นเวลา 3 นาที เพื่อแยกสปอร์ จากนั้นถ่ายสปอร์ลงในอาหารเหลว Potato

Dextrose Broth (PDB) ปริมาตร 10 มิลลิลิตร แล้วบ่มในที่มืดเป็นเวลา 6-8 ชั่วโมง นำสารแขวนลอยสปอร์ปริมาตร 100 ไมโครลิตร มา spread ลงบน PDA plate แล้วบ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วัน คัดเลือกโคโลนีที่เจริญบนจานเพาะเชื้อที่แสดงอัตราการอยู่รอดน้อยกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 10 (ดัดแปลจากวิธีของ Wang *et al*., 2004)

การทำให้เกิดการกลายพันธุ์ด้วยสารเคมี NTG

นำสารแขวนลอยสปอร์มาปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 1,800 x g เป็นเวลา 5 นาที เก็บเกี่ยวสปอร์แล้วปรับจำนวนสปอร์ให้มากกว่าหรือเท่ากับ 10^6 สปอร์ต่อมิลลิลิตร ด้วยซิเตรตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.1 โมล พีเอช 5.0 จากนั้นเติมสารเคมี *N*-methyl-*N'*-nitro-*N*-nitrosoguanidine (NTG) ความเข้มข้น 50 100 และ 150 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ลงในสารแขวนลอยสปอร์ (ที่ละลายในซิเตรตบัฟเฟอร์) ปริมาตร 2 มิลลิลิตร แล้วบ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เก็บเกี่ยวเซลล์โดยการปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกส่วนใสและล้างเซลล์จำนวน 3 ครั้งด้วยน้ำกลั่นที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้ว ดูดสารแขวนลอยสปอร์ปริมาตร 100 ไมโครลิตร นำมา spread ลงบน PDA plate แล้วบ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 วัน คัดเลือกโคโลนีที่เจริญบนจานเพาะเชื้อที่แสดงอัตราการอยู่รอดน้อยกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 10 (ดัดแปลจากวิธีของ Wang *et al*., 2004; Putri *et al.,* 2005)

การทำให้เกิดการกลายพันธุ์ด้วยรังสียูวีร่วมกับสารเคมี NTG

เติมสารเคมี NTG ความเข้มข้น 100 ไมโครกรัมต่อ ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ลงในสารแขวนลอยสปอร์ของเชื้อรา *Monascus purpureus* KUPM5 ปริมาตร 2 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปฉายรังสียูวีเป็นเวลา 10 นาที เก็บเกี่ยวเซลล์โดยการปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกส่วนใสทิ้ง และล้างเซลล์จำนวน 3 ครั้งด้วยน้ำกลั่นที่ฆ่าเชื้อแล้ว จากนั้นถ่ายสปอร์เชื้อราลงในอาหารเหลว PDB ปริมาตร 10 มิลลิลิตร แล้วบ่มในที่มืดเป็นเวลา 6-8 ชั่วโมง แล้วดูดสารแขวนลอยสปอร์ปริมาตร 100 ไมโครลิตร นำมา spread ลงบน PDA plate แล้วบ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วัน คัดเลือกโคโลนีที่เจริญบนจานเพาะเชื้อที่แสดงอัตราการอยู่รอดน้อยกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 10

การคัดเลือกเชื้อรากลายพันธุ์ด้วยเทคนิค Plate bioassay

เลี้ยงเชื้อ *Bacillus subtilis* ในอาหาร PDB ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นเติมเชื้อ *B. subtilis* ปริมาตร 100 ไมโครลิตรลงในอาหารเลี้ยงเชื้อ Soft LB agar medium ปริมาตร 8 มิลลิลิตร แล้วเทลงบนจานเพาะเชื้อที่มีเชื้อรา *Monascus purpureus* สายพันธุ์กลายที่ได้คัดเลือกไว้อย่างทันที จากนั้นบ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ศึกษาวงใส (clear zone) ที่เกิดขึ้น คัดเลือกโคโลนีเชื้อรา *M. purpureus* สายพันธุ์กลายที่มีการลดการผลิตสารซิตรินิน โดยสังเกตุจากการเกิดวงใสที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่าสายพันธุ์ดั้งเดิม การคัดเลือกโคโลนีเชื้อรา *M. purpureus* สายพันธุ์กลาย จะถูกกำหนดโดยต้องมีอัตราการยับยั้ง (Inhibition ratio) มากกว่าร้อยละ 90 (Wang *et al*., 2004) ซึ่งคำนวณจากสมการ

$$(\%)\ \text{Inhibition ratio} = [(C - E)/C] \times 100$$

โดยที่ C คือ ค่าเฉลี่ยโซนที่มีการยับยั้งของเชื้อต้นแบบ (parental strain)

E คือ ค่าเฉลี่ยโซนที่มีการยับยั้งของเชื้อกลายพันธุ์ (mutant)

การผลิตข้าวโคจิ (Tane koji)

ชั่งข้าวสาร 50 กรัม นำไปแช่น้ำเป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นสะเด็ดน้ำออก บรรจุข้าวลงในฟลาสก์ปริมาตร 500 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำ 15 มิลลิลิตร ปิดจุกสำลีแล้วนำไปฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นแล้วถ่ายสารแขวนลอยสปอร์ของเชื้อรา *Monascus purpureus* KUPM5 ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ลงบนข้าว บ่มไว้ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน (นภา, 2535)

การวิเคราะห์ปริมาณสารซิตรินินด้วยเครื่อง HPLC

สกัดสารซิตรินินโดยเติมเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 70 ปริมาตร 40 มิลลิลิตร เติมลงในโคจิแห้งที่บดแล้ว 1 กรัม สกัดในสภาวะเขย่าที่ความเร็วรอบ 80 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง กรองส่วนใสแล้วนำไปวิเคราะห์ HPLC (Shimadzu, Kyoto, Japan) ใช้คอลัมน์ชนิด C_{18} (250 mm × 4.6 mm × 5.0 µm) เฟสเคลื่อนที่ประกอบด้วย 80% acetonitrile : 0.1% phosphoric acid (70:30) อัตราการไหล (flow rate) 1 มิลลิลิตรต่อนาที ใช้ตัวตรวจวัด (detector) ชนิดฟลูออเรสเซนต์ที่มีความยาวคลื่นกระตุ้น (excitation) และความยาวคลื่นที่คายพลังงาน (emission) เท่ากับ 330 และ 500 นาโนเมตร ตามลำดับ (ดัดแปลจากวิธีของ Wang *et al*., 2004)

การวิเคราะห์อัตราการลดลงของสารซิตรินิน

วิเคราะห์อัตราการลดลงของสารซิตรินินจากสมการ

$$(\%)\ \text{Citrinin reduction} = [(C_{wt} - C_{mt})/C_{wt}] \times 100$$

โดยที่ C_{wt} คือ ความเข้มข้นของสารซิตรินิน (ng/g) ของเชื้อรา *M. purpureus* KUPM5 (wild type)

C_{mt} คือ ความเข้มข้นของสารซิตรินิน (ng/g) ของเชื้อรา *M. purpureus* สายพันธุ์กลาย (mutant)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การคัดเลือกเชื้อราสายพันธุ์กลายที่มีการผลิตสารซิตรินินลดลง

จากการศึกษาวิธีการทำให้เกิดการกลายพันธุ์โดยวิธีทางกายภาพด้วยรังสียูวี ทางเคมีด้วยสารเคมี NTG และการฉายรังสียูวีร่วมกับสารเคมี NTG และทำการคัดเลือกโคโลนีเชื้อราสายพันธุ์กลายที่เจริญบนจานเพาะเชื้อที่แสดงอัตราการอยู่รอดน้อยกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 10 พบว่า การฉายรังสียูวีเป็นเวลา 30 และ 40 นาที แสดงอัตราการอยู่รอด (survival rate) เท่ากับร้อยละ 10 และ 7 ตามลำดับ ได้เชื้อรากลายพันธุ์ที่มีการลดลงของสารซิ-ตรินินทั้งหมด 2 ไอโซเลต คือ UV-01 และ UV-02 ในขณะที่ทำให้เกิดการกลายพันธุ์ด้วยสารเคมี NTG ที่มีความเข้มข้น 50 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร แสดงอัตราการอยู่รอดมากกว่าร้อยละ 50 ที่ความเข้มข้น 100 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร แสดงอัตราการอยู่รอดน้อยกว่าร้อยละ 10 และที่ความเข้มข้น 150 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร แสดงอัตราการอยู่รอดเท่ากับร้อยละ 0 อย่างไรก็ตามการทำให้เกิดการกลายพันธุ์โดยใช้สารเคมี NTG กลับไม่สามารถทำให้เกิดสายพันธุ์กลายที่มีการลดลงของการผลิตสารซิตรินิน แต่การฉายรังสียูวีเป็นเวลา 10 นาที ร่วมกับการใช้สารเคมี NTG ที่ความเข้มข้น 100 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร แสดงอัตราการอยู่รอดน้อยกว่าร้อยละ 10

หลังจากการคัดเลือกได้เชื้อราสายพันธุ์กลายทั้งหมด 6 ไอโซเลต ที่มีการผลิตสารซิตรินินต่ำกว่าสายพันธุ์ดั้งเดิม (KUPM5) ทำการวัดขนาดของวงใสเพื่อศึกษาอัตราการยับยั้งโดยเปรียบเทียบกับสายพันธุ์ดั้งเดิม

(0.24 เซนติเมตร) พบว่า ไอโซเลต UV-01 UV-02 COM-01 และ COM-02 มีขนาดของวงใสเท่ากับ 0.15 0.16 0.07 0.02 เซนติเมตร ซึ่งมีอัตราการยับยั้งเท่ากับร้อยละ 37.5 33.0 70.8 และ 92.0 ตามลำดับ และไอโซเลต COM-03 และ COM-04 ไม่มีวงใสเกิดขึ้น มีอัตราการยับยั้งเท่ากับร้อยละ 100 ดังแสดงใน Table 1 ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Wang *et al*. (2004); Kalaivani *et al*. (2014) ที่ทำการศึกษาความสัมพันธ์ขนาดของวงใสต่อปริมาณสารซิตรินิน ถ้าขนาดของวงใสมีขนาดใหญ่ปริมาณสารซิตรินินก็จะมาก แต่ถ้าหากขนาดของวงใสมีขนาดเล็กปริมาณสารซิตรินินก็จะน้อย และจากผลการทดลองนี้ทำให้ยืนยันได้ว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวงใสมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณสารซิตรินิน และวิธีการคัดเลือกเชื้อรากลายพันธุ์ด้วยเทคนิค plate bioassay นั้นมีประสิทธิภาพและมีความแม่นยำน่าเชื่อถือ

Table 1 Diameter of inhibition zone and inhibition ratio of *Monascus* mutant strains by plate bioassay.

Isolate	Size of inhibition zone (cm)	Inhibition ratio (%)
KUPM5 (wild type)	0.24	-
UV-01	0.15	37.5%
UV-02	0.16	33.0%
COM-01	0.07	70.8%
COM-02	0.02	92.0%
COM-03	0	100%
COM-04	0	100%

ผลของวิธีการทำให้เกิดการกลายพันธุ์ต่อปริมาณสารซิตรินินของเชื้อราสายพันธุ์กลาย

ทำการศึกษาปริมาณของสารซิตรินินจากเชื้อราสายพันธุ์กลายที่คัดเลือกมาทั้งหมด 6 ไอโซเลต โดยเลี้ยงเชื้อราบนข้าวที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน จากนั้นสกัดสารซิตรินินแล้ววิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC เปรียบเทียบกับปริมาณสารซิตรินินของสายพันธุ์ดั้งเดิม (KUPM5) พบว่าไอโซเลต UV-01 และ UV-02 จากวิธีการฉายรังสียูวีมีการลดลงของการผลิตซิตรินินเหลือเพียง 32.0 และ 33.2 นาโนกรัม (ต่อข้าวแดงแห้ง 1 กรัม) มีอัตราการผลิตสารซิตรินินลดลงร้อยละ 81.2 และ 80.5 ตามลำดับ ในขณะที่การฉายรังสียูวีร่วมกับการใช้สารเคมี NTG กลับให้ผลที่ดีกว่า โดยทั้ง 4 ไอโซเลต (COM-01 COM-02 COM-03 และ COM-04) มีอัตราการลดลงของสารซิตรินินมากกว่าร้อยละ 90 โดยเฉพาะอย่างยิ่งไอโซเลต COM-03 และ COM-04 ที่มีอัตราการลดลงของสารซิตรินินร้อยละ 100 กล่าวคือไม่มีการผลิตสารซิตรินิน ดังแสดงใน Table 2

จากการทดลองแสดงให้เห็นว่า การทำให้เกิดการกลายพันธุ์โดยการใช้รังสียูวี และการใช้รังสียูวีร่วมกับสารเคมี NTG สามารถลดการผลิตสารซิตรินินมากกว่าร้อยละ 80 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Fukuda *et al*. (1992) ที่ได้ศึกษาการใช้รังสียูวีร่วมกับการใช้สารเคมี *N*-methyl-*N'*-nitro-*N*-nitrosoguanidine (MNNG) ในการปรับปรุงสายพันธุ์เชื้อรา *Aspergillus awamori* var. *kawachi* เพื่อลดการผลิตเอนไซม์โปรติเอส พบว่าการฉายรังสียูวีเป็นเวลา 20 นาที ร่วมกับใช้สารเคมี MNNG ที่ความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร สามารถชักนำให้เกิดสายพันธุ์กลายที่มีการผลิตเอนไซม์โปรติเอสลดลงถึงร้อยละ 93

Table 2 Citrinin concentration and reduction of citrinin production compared with the wild type by mutant strains.

Isolate	Citrinin concentration (ng/g)	Citrinin reduction (%)
KUPM5 (wild type)	170	0
UV-01	32.0	81.2
UV-02	33.2	80.5
COM-01	0.8	99.5
COM-02	10.0	94.1
COM-03	0	100
COM-04	0	100

สรุป

การศึกษาและเปรียบเทียบผลของการทำให้เกิดการกลายพันธุ์โดยวิธีทางกายภาพด้วยรังสียูวี ทางเคมีด้วยสารเคมี NTG และการใช้รังสียูวีร่วมกับสารเคมี NTG ต่อการผลิตสารซิตรินินของเชื้อรา *Monascus purpureus* KUPM5 พบว่าการฉายรังสียูวีที่เวลา 30 นาที และการฉายรังสียูวีเป็นเวลา 10 นาทีร่วมกับการใช้สารเคมี NTG ที่ความเข้มข้น 100 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร มีประสิทธิภาพและส่งผลให้เกิดสายพันธุ์กลายทั้งหมด 6 ไอโซเลต ที่มีการลดลงของสารซิตรินิน โดยเฉพาะไอโซเลต COM-03 และ COM-04 ที่ไม่มีการผลิตสารซิตรินิน จึงทำให้เป็นตัวเลือกที่ดีที่สุดในการใช้ในการศึกษา วิจัยหรือนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร ทั้งนี้ในการปรับปรุงสายพันธุ์ในแต่ละวิธีทั้งทางกายภาพและทางเคมี มีความเป็นไปได้ในการก่อให้เกิดสายพันธุ์ใหม่ทั้งที่ดีและไม่ดี ขึ้นอยู่กับสภาวะและสิ่งแวดล้อม จึงควรศึกษาและปรับใช้ให้เหมาะสมกับการทดลองเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพและประโยชน์สูงสุด

เอกสารอ้างอิง

นภา โล่ห์ทอง. 2535. **กล้าเชื้ออาหารหมักและเทคโนโลยีการผลิต**. ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ. 159 น

Chagas, G. M., M. B. M. Oliveira, A. P. Campello and M. L. W. Kluppel. 1995. Mechanism of citrinin-induced dysfunction of mitochondria. 4 Effect on Ca2+ transport. **Cell Biochem Funct**. 13: 53–59.

European Food Safety Authority. 2014. **Amending Regulation (EC) No 1881/2006 as regards maximum levels of the contaminant citrinin in food supplements based on rice fermented with red yeast *Monascus purpureus***. Available Source: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2014/212/oj, October 15, 2018.

Fukuda, K., Y. Teramoto and S. Hayashida. 1992. The Hyperdigestion of Raw Starch by a Carbohydrate-Rich Glucoamylase from a Protease- and Glycosidase-Negative Mutant of *Aspergillus awamori* var. *kawachi* F-2035. **Biosci. Biotech. Biochem.** 56(1): 8-12.

Kalaivani, M. and A. Rajasekaran. 2014. Improvement of monacolin K/citrinin production ratio in *Monascus purpureus* using UV mutagenesis. **Nutrafoods** 13: 79-84.

Klimek, M., S. Wang and A. Ogunkanmi. 2009. Safety and efficacy of red yeast rice (*Monascus purpureus*) as an alternative therapy for hyperlipidemia. **Pharmacy and Therapeutics** 34(6): 313-327.

Putri, S. P., H. Kinoshita and T. Nihira. 2005. Mutagenesis of *Monascus purpureus* for higher/reduced red pigment production, and phenotypic/genetic analyses on the relevant mutants. **Annu. Rep. ICBiotech**. 27: 745–754.

Wang, J.J., C.L. Lee and T.M. Pan. 2004. Modified Mutation Method for Screening Low Citrinin-Producing Strains of *Monascus purpureus* on Rice Culture. **J. Agric. Food Chem**. 52: 6977-6982.

Wong, H. C., and Y. S. Bau. 1977. Pigmentation and Antibacterial Activity of Fast Neutron- and X-Ray-induced Strains of *Monascus purpureus* Went. **Plant Physiol**. 60: 578–581.

การพัฒนาซองบริโภคได้ต้านออกซิเดชันสำหรับผลิตภัณฑ์น้ำมัน

Development of Antioxidant Edible Pouch for Oil Product

อัจฉราวรรณ ศรีษา[1] กฤตภาส พฤกษ์ภานุกร[1] สาธิตา หงษ์ลอย[1] ภัทรานิษฐ์ กลิ่นมาลัย[2] และ ณัฐดนัย หาญการสุจริต[1*]

Atcharawan Srisa[1], Kittapast Prukpanukorn[1], Satita Hongloy[1], Phatthranit Klinmalai[2] and Nathdanai Harnkarnsujarit[1*]

บทคัดย่อ

ปฏิกิริยาลิพิดออกซิเดชันในผลิตภัณฑ์น้ำมันเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้คุณภาพเสื่อมเสีย โดยเฉพาะเกิดการเปลี่ยนสี และมีกลิ่นเหม็นหืน การพัฒนาซองบรรจุน้ำมันจากฟิล์มบริโภคได้ผสมสารต้านอนุมูลอิสระจากธรรมชาติจึงอาจช่วยลดการเกิดออกซิเดชันได้ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาบรรจุภัณฑ์บริโภคได้ที่มีการเติมสารสกัดจากพืชเพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชันในผลิตภัณฑ์น้ำมัน เตรียมฟิล์มอาการ์ผสมคาร์ราจีแนนที่มีสารสกัดชาเขียวและสารสกัดจากเปลือกสนร้อยละ 0.25 แล้วบรรจุน้ำมันปาล์มและน้ำมันมะกอก และวัดการเกิดออกซิเดชันของน้ำมันด้วยวิธี TBARS จากการทดลองพบว่า น้ำมันปาล์มที่บรรจุในซองที่มีสารสกัดจากเปลือกสนมีแนวโน้มจะเกิดออกซิเดชันต่ำที่สุด ตามด้วยซองที่ผสมสารสกัดจากชาเขียวและซองที่ไม่เติมสารสกัดตามลำดับ อย่างไรก็ตามสารสกัดจากชาเขียวจะช่วยชะลอการเกิดออกซิเดชันของไขมันในน้ำมันมะกอกได้ดีกว่าสารสกัดจากเปลือกสน นอกจากนี้สารสกัดจากชาเขียวและเปลือกสนมีผลทำให้ค่าการซึมผ่านของไอน้ำลดลง สารสกัดจากเปลือกสนจะทำให้ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำบนผิวฟิล์มเพิ่มขึ้น ในขณะที่สารสกัดจากชาเขียวจะทำให้ค่ามุมสัมผัสลดลง นอกจากนี้พบว่า สารสกัดเปลือกสนและชาเขียวมีแนวโน้มช่วยเพิ่มความแข็งแรงของรอยปิดผนึกของฟิล์ม ดังนั้นการใส่สารสกัดจากเปลือกสนและสารสกัดจากชาเขียวลงในฟิล์มอาการ์คาร์ราจีแนนจะส่งผลต่อสมบัติของฟิล์ม และสามารถยับยั้งการเกิดลิพิดออกซิเดชันได้ โดยจะขึ้นอยู่กับทั้งชนิดของน้ำมันและสารสกัดจากธรรมชาติ

ABSTRACT

Lipid oxidation in oil product is the main caused quality deterioration, especially colored change and rancidity. Several researchers have developed the edible film mixed with natural antioxidant compound which possibly minimize oxidation. The purpose of this research was to develop the edible pouch containing plant extracts to prevent lipid oxidation in oil product. Agar-Carrageenan edible film (AC) were prepared by containing 0.25% pine bark extract (AC-PB) and green tea extract (AC-GT). Palm oil and olive oil were packed in the different pouches and determined lipid oxidation by Thiobarbituric acid reactive substance (TBARS) method. The results showed that the palm oil packed in AC-PB pouch had a tendency of the lowest lipid oxidation followed by AC-GT and AC systems, respectively. However, the AC-GT gave lower TBARS for olive oil than AC-PB. The green tea and pine bark decreased water vapor permeability. The pine bark increased contact angle while green tea extract decreased contact angle. Furthermore, both extracts slightly increased seal strength of the films. Therefore, incorporation of pine bark and green tea extract effectively inhibited lipid oxidation depending on both types of oil and natural extracts.

Key Words: Antioxidant edible film, Lipid oxidation, Oil product, Plant extract, Water soluble pouch

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

[1]ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Packaging and Materials Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

[2] วิทยาลัยการศึกษาและการจัดการทางทะเล มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ สมุทรสาคร 74000

[2]College of Maritime Studies and Management, Chiang Mai University, Samutsakhon 74000

คำนำ

เทคโนโลยีการบรรจุโดยการใส่สารต้านออกซิเดชัน (antioxidant agents) ลงในบรรจุภัณฑ์ เป็นหนึ่งในนวัตกรรมทางเลือกในการพัฒนาการบรรจุแบบต้านออกซิเดชัน (antioxidant packaging) ซึ่งช่วยรักษาคุณภาพและชะลอการเสื่อมเสียของผลิตภัณฑ์ในระหว่างการเก็บรักษาได้ (Gómez-Estaca et al., 2016) ปัจจุบันการพัฒนาบรรจุภัณฑ์สำหรับบริโภคได้มีการศึกษากันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากสามารถช่วยอำนวยความสะดวกแก่ผู้บริโภค อีกทั้งยังช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมเนื่องจากการย่อยสลายได้ยากของบรรจุภัณฑ์แบบเดิม การพัฒนาฟิล์มที่ผลิตจากธรรมชาติที่ย่อยสลายได้โดยใช้พอลิแซ็กคาไรด์ เช่น อาการ์ (agar) และคาร์ราจีแนน (carrageenan) จะทำให้ฟิล์มที่ได้มีโครงสร้างที่ยืดหยุ่น สามารถฟอร์มตัวเป็นเจลได้เหมาะสำหรับนำมาใช้กับผลิตภัณฑ์อาหาร (Rhim, 2012) ฟิล์มบริโภคได้ที่มีส่วนประกอบของสารสกัดจากธรรมชาติพบว่าสามารถชะลอการเกิดลิพิดออกซิเดชัน (Ganiari et al., 2017) ฟิล์มบริโภคได้ที่ทำจากแอลจิเนต (alginate) และน้ำมันพืชผสมสารสกัดจากชาเขียว (Fabra et al., 2018) รวมทั้งฟิล์มบริโภคได้ที่ทำจากเจลาติน (gelatin)และโซเดียมแอลจิเนต (sodium alginate) ผสมทีโพลีฟีนอล(Tea polyphenols) (Dou et al., 2018) พบว่ามีคุณสมบัติในการต้านออกซิเดชัน นอกจากนี้ยังพบว่ามีงานวิจัยมากมายที่พัฒนาและศึกษาฟิล์มต้านออกซิชันบริโภคได้สำหรับอาหารที่มีลิพิดเป็นองค์ประกอบ (lipid foods) เช่น เนื้อสัตว์ (Domínguez et al., 2018), ชีส (Costa et al., 2018), และอาหารทะเล (Dehghani et al., 2018) เป็นต้น อย่างไรก็ตามพบว่าบรรจุภัณฑ์บริโภคได้สำหรับผลิตภัณฑ์น้ำมันยังไม่มีการศึกษามากนัก น้ำมันเป็นส่วนประกอบที่ถูกพบอยู่ในเครื่องปรุงรสต่างๆ ในอาหารสำเร็จรูปและอาหารกึ่งสำร็จรูป โดยเฉพาะอย่างยิ่งบะหมี่กึ่งสำเร็จรูป ผู้บริโภคมักจะพบซองบรรจุเครื่องปรุง เช่น น้ำมัน น้ำพริกเผา มาในผลิตภัณฑ์ ปัญหาที่พบในเครื่องปรุงรูปแบบเดิม คือผู้บริโภคไม่สามารถฉีกซองได้หรือไม่สะดวกเนื่องจากเครื่องปรุงในซองอาจเปื้อนมือผู้บริโภคได้ การผลิตซองบริโภคได้นี้จะช่วยทำให้ผู้บริโภคมีความสะดวกสบายมากขึ้น โดยซองบริโภคได้จะต้องมีสมบัติการละลายน้ำได้ดีและสามารถปิดผนึกได้ด้วยความร้อน นอกจากความสะดวกสบายของบรรจุภัณฑ์ที่สามารถบริโภคได้แล้ว อีกหนึ่งปัจจัยสำคัญที่ต้องคำนึงถึง คือการเกิดกลิ่นหืนจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันในผลิตภัณฑ์น้ำมัน ซึ่งจะส่งต่อการยอมรับของผู้บริโภคและทำให้อายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ลดลง

สารสกัดสำคัญที่พบในชาเขียว คือ สารพอลิฟีนอลกลุ่มแคเทชิน (catechin) (Senanayake, 2013) และพิกโนจีนอล (Pycnogenol) เป็นสารสกัดพบในเปลือกสน (Devaraj et al., 2002) สารสกัดจากพืชทั้ง 2 ชนิด มีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant) มีฤทธิ์ชะลอการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน (lipid oxidation) (Huang and Frankel, 1997; Senanayake, 2013; Nakayama et al., 2015) คณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะนำสารสกัดจากธรรมชาติที่มีสมบัติชะลอการเกิดออกซิเดชันของไขมันนี้มาผสมกับฟิล์มบริโภคได้ที่ผลิตจากอาการ์ (agar) และคาร์ราจีแนน (carrageenan) เพื่อใช้ลดปัญหาการเกิดออกซิเดชันของไขมันในผลิตภัณฑ์น้ำมัน โดยทดลองใช้กับน้ำมันปาล์มและน้ำมันมะกอก ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อผลิตซองบรรจุภัณฑ์บริโภคได้ต้านออกซิเดชันสำหรับผลิตภัณฑ์น้ำมัน นำมาใช้ในการรักษาคุณภาพ ยืดอายุการเก็บรักษา และเป็นองค์ความรู้ใหม่ในการประยุกต์ใช้บรรจุภัณฑ์นี้กับผลิตภัณฑ์อาหารที่มีน้ำมันเป็นส่วนประกอบ

อุปกรณ์และวิธีการ

การขึ้นรูปฟิล์มอาการ์-คาร์ราจีแนน (AC; ตัวอย่างควบคุม)

เตรียมสารละลายอาการ์ 2% โดยน้ำหนัก ที่มีกลีเซอรอล 50% โดยน้ำหนักของอาการ์ ด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Yellow line, Germany) เป็นเวลา 10 นาที แล้วให้ความร้อนจนสารละลายมีอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที เตรียมสารละลายคาราจีแนน 2% โดยน้ำหนัก ที่มีกลีเซอรอล 50% โดยน้ำหนักของ

คาราจีแนน (ไทยฟู้ดแอนด์เคมิคอม, ประเทศไทย) ด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า กวนให้เข้ากันเป็นเวลา 5 นาที หลังจากนั้นให้ความร้อนจนสารละลายมีอุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที เทสารละลายอาการ์และคาราจีแนน อัตราส่วน 3:1 กวนผสมให้เป็นสารละลายเนื้อเดียวกัน แล้วนำไป Sonicate (Crest, Malaysia) เพื่อไล่ฟองอากาศเป็นเวลา 2 นาที เทสารละลาย 180 กรัม ลง acrylic plate ขนาด 25 x 25 เซนติเมตร วางบนแท่นปรับระดับให้สารละลายเย็นลงและฟอร์มตัวเป็นเจล และนำเข้าตู้อบ (Contherm, New Zealand) ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 16 ชั่วโมง เก็บในตู้ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ (HiPoint, Taiwan) ที่ร้อยละ 50 เป็นเวลา 48 ชั่วโมงก่อนการทดสอบคุณสมบัติในด้านต่างๆ

การขึ้นรูปฟิล์มอาการ์คาร์ราจีแนนผสมสารสกัดจากเปลือกสน (AC-PB) หรือผสมสารสกัดจากชาเขียว (AC-GT)

ชั่งสารสกัด (เปลือกสนหรือชาเขียว) 0.25% โดยน้ำหนัก นำมาละลายกับน้ำกลั่นจนเป็นเนื้อเดียวกัน นำไป Sonicate เพื่อให้สารละลายมีความสามารถในการละลายได้ดีขึ้นเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำไปเตรียมฟิล์มซึ่งมีขั้นตอนการเตรียมฟิล์มเช่นเดียวกับการเตรียมฟิล์มอาการ์-คาร์ราจีแนน

การทดสอบความแข็งแรงของรอยผนึก (Seal Strength)

ตัดตัวอย่างฟิล์มกว้าง 1.5 เซนติเมตร ปิดผนึกด้วยความร้อนโดย bar sealer แล้วนำไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงต้านทานการดึง ความยาวระหว่างปากจับเป็น 5 เซนติเมตร ใช้ความเร็วในการทดสอบ 200 มิลลิเมตรต่อนาที ทดสอบตัวอย่างละ 5 ชิ้น ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM F88 (ASTM, 2009)

การศึกษาอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor Transmission Rate)

ตัดตัวอย่างฟิล์มเพื่อทำเป็นซองแบบ 3-Side-sealed ขนาด 5x10 เซนติเมตร บรรจุ Silica gel ลงในซองตัวอย่างละ 5 ซ้ำ ตามมาตรฐาน ASTM D3079-72 (ASTM, 1999) และ E 96-00 (ASTM, 2000) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมผัสร้อยละ 50 ชั่งน้ำหนักเริ่มต้น และชั่งน้ำหนักทุกชั่วโมงจนกว่าน้ำหนักจะคงที่ วัดค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำนำไปคำนวณหาค่าความสามารถการให้ซึมผ่านของไอน้ำจากสูตร

$$WVP = (WVTR \times L)/\Delta p$$

โดย WVP คือความสามารถการให้ซึมผ่านของไอน้ำ L คือ ความหนาของฟิล์ม (m) และ Δp คือ vapor pressure difference in Hg จากสูตร $\Delta p = S(\Delta R)$ S คือ1.333 x 102 Pa และ ΔR คือ ความแตกต่างระหว่างความชื้นสัมผัสภายในกับภายนอก

การศึกษาอัตราการซึมผ่านของออกซิเจน (Oxygen Transmission Rate)

ตัดตัวอย่างฟิล์มแปะลงบนกระดาษเงินลายขนแมวเส้นผ่านศูนย์กลางวงใน 6 เซนติเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางวงนอก 13 เซนติเมตร ใช้เครื่อง Oxygen permeation Tester รุ่น Model 8501 วัดอัตราการซึมผ่านของออกซิเจน

การวัดค่าสี

นำฟิล์มตัวอย่างขนาด 20x20 เซนติเมตร วัดสีด้วยเครื่องวัดสี (CR-310 Minolta Chroma Meter, Japan) เป็นจำนวน 10 จุดต่อตัวอย่าง รายงานผลเป็นค่า L* a* และ b* บอกค่าความสว่าง, ค่าสีแดง-สีเขียว และค่าสีเหลือง-สีน้ำเงิน ตามลำดับ

การวัดค่ามุมสัมผัส (Contact angle) และการทดสอบการละลาย (Solubility)

ตัดตัวอย่างฟิล์มขนาด 1x5 เซนติเมตร วัดด้วยเครื่องวัดค่ามุมสัมผัส Contact Angle Meter OCAR 535 ขนาดหยด 3 ไมโครลิตร ในการทดสอบการละลาย ทำโดยชั่งน้ำหนักตัวอย่างฟิล์มหลังอบ (ขนาด 2x2 เซนติเมตร) และกระดาษกรอง (Whatman No.1) ที่อบ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ให้ความร้อนน้ำ 100 มิลลิลิตรจนมีอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส และนำฟิล์มใส่ลงในน้ำ ปิดด้วยแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์เป็นเวลา 3 นาที กรองสารละลายด้วยกระดาษกรอง และอบแห้งที่ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และชั่งน้ำหนักกระดาษกรองหลังอบเพื่อหาน้ำหนักฟิล์มที่เหลือ โดยคำนวณจากสูตร

$$\%FS = ((W_{\text{ฟิล์มเริ่มต้น}} - W_{\text{ฟิล์มที่เหลือ}}) / W_{\text{ฟิล์มเริ่มต้น}}) \times 100$$

การทดสอบการกันน้ำมัน

ตัดตัวอย่างฟิล์มและปิดผนึกด้วยความร้อนแบบ 3-side-sealed โดยมีพื้นที่สัมผัสกับน้ำมันเป็น 5x10 เซนติเมตร ใส่น้ำมันปริมาตร 2 มิลลิลิตร วางบนกระดาษซับมันเป็นเวลา 2 สัปดาห์ แล้วสังเกตการเปลี่ยนแปลงของกระดาษซับมัน

การศึกษาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมัน

ตัดตัวอย่างฟิล์มและปิดผนึกด้วยความร้อนแบบ 3-side-sealed พื้นที่สัมผัสกับน้ำมันเป็น 4x7 เซนติเมตร บรรจุน้ำมันปริมาตร 2 มิลลิลิตร (Figure 1) และเก็บไว้ในตู้ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 เป็นเวลา 54 วัน ทดสอบการเกิดออกซิเดชันของไขมันด้วยวิธี Thiobarbituric acid reactivesubstance (TBARS) ในวันที่ 6, 12, 18, 30 และ 54 วันของการเก็บตัวอย่าง การวิเคราะห์ทำโดยชั่ง 2-Thiobarbituric acid (Sigma-Aldrich, German) 0.2%โดยน้ำหนักต่อปริมาตรใน iso-butanol (AR. RCI Labscan) และนำไปหมุนเหวี่ยงแยก (Hettich, EBA 20, Germany) ด้วยความเร็วรอบ 4000 rpm เป็นเวลา 10 นาที นำสารละลายส่วนที่ใส 9.9 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลอง ใส่น้ำมันที่บรรจุในซองมาตัวอย่างละ 0.1 มิลลิลิตร ปิดปากหลอดทดลองด้วยแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์และผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องผสม (Vortex mixer CTL 107, Canada) บ่มในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Memmert, WNB 7) เป็นเวลา 120 นาที ทำให้เย็นโดยการนำหลอดทดลองผ่านน้ำเป็นเวลา 15 นาที และผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องเขย่าสารอีกครั้งหนึ่งจากนั้นนำสารละลายมาวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer (Genesys 10 series, USA) ที่ความยาวคลื่น 530 นาโนเมตร โดยใช้ blank เป็นน้ำกลั่น คำนวณปริมาณ TBARS ในรูปของ Malonaldehyde (MDA) เปรียบเทียบกราฟมาตรฐานจากสาร 1,1,3,3-Tetramethoxypropane ที่ 0, 2, 4, 6, 8, 10 ppm รายงานค่า TBARS เป็นมิลลิกรัมของ MDA ต่อกิโลกรัมตัวอย่าง

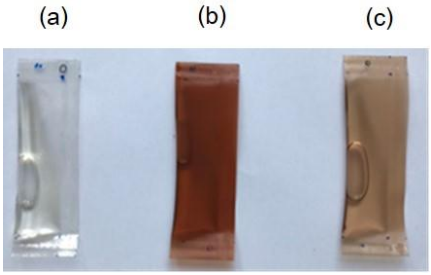


Figure 1 Edible Pouch containing palm oil: (a) AC pouch, (b) AC-PB pouch, (c) AC-GT pouch.

การวิเคราะห์ทางสถิติ

คำนวณทางสถิติโดยโปรแกรม SPSS version 23 โดยวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติด้วยวิธี Analysis of variance (ANOVA) และวิเคราะห์ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ด้วยวิธี Duncan's new multiple range test (DMRT)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ความแข็งแรงของรอยผนึก (Seal Strength)

สารสกัดจากเปลือกสนและชาเขียวมีแนวโน้มทำให้ความแข็งแรงของรอยปิดผนึกเพิ่มขึ้น (Table 1) อย่างไรก็ตามค่าความแข็งแรงรอยปิดผนึกของฟิล์มอาการ์-คาร์ราจีแนน (AC; ไม่เติมสารสกัด) ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) กับ AC-PB (เติมสารสกัดจากเปลือกสน) แต่ค่าความแข็งแรงของรอยปิดผนึกจะสูงขึ้น ($p \leq 0.05$) เมื่อเทียบกับ AC-GT (เติมสารสกัดชาเขียว) Abdorreza et al. (2011) พบว่าความแข็งแรงของรอยปิดผนึกฟิล์มสตาร์ชขึ้นกับการกระจายความร้อนในช่วงการปิดผนึกด้วยความร้อนของฟิล์ม และอันตรกิริยาระหว่างหิล์มกับพลาสติไซไซเอร์ซึ่งเป็นสารเติมแต่ง นอกจากนี้การเติมสารสกัดใบพลู (betel leave) สูงถึงร้อยละ 20 จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงรอยปิดผนึกของฟิล์มสตาร์ชเนื่องจากการเพิ่มพันธะไฮโดรเจนของฟิล์ม (Nouri & Nafchi, 2014) จากการทดลองจึงบ่งชี้ว่าการเติมสารสกัดจากชาเขียวซึ่งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลซึ่งสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับฟิล์มอาการ์-คาราจีแนน และทำให้ความแข็งแรงรอยปิดผนึกเพิ่มขึ้น

ความสามารถการซึมผ่านของไอน้ำและออกซิเจน

ค่าการซึมผ่านของไอน้ำ พบว่าฟิล์มอาการ์-คาร์ราจีแนน (AC) มีอัตราการซึมผ่านของไอน้ำสูงสุด รองลงมาคือ ฟิล์มที่เติมสารสกัดจากเปลือกสน (AC-PB) และชาเขียว (AC-GT) ตามลำดับ เนื่องจากโมเลกุลของสารสกัดจากเปลือกสนและชาเขียวอาจเกิดอันตรกิริยากับโครงสร้างพอลิเมอร์ของฟิล์ม และทำให้เกิดการจัดเรียงโครงสร้างแน่นขึ้นจึงขัดขวางการซึมผ่านของโมเลกุลไอน้ำ (Giménez et al., 2013) López de Dicastillo et al. (2011) พบว่าการเติมสารสกัดชาเขียวร้อยละ 5 ในฟิล์มเอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพต้านทานไอน้ำของฟิล์มที่เก็บรักษาในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 และร้อยละ 75 ดังนั้นการใส่สารสกัดจากเปลือกสนหรือชาเขียวทำให้การซึมผ่านของไอน้ำลดลง ในขณะที่ค่าการซึมผ่านของออกซิเจนของ AC, AC-PB และ AC-GT พบว่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)

การวัดสี

ฟิล์มอาการ์-คาร์ราจีแนน (AC) มีค่าความสว่าง (L*) มากที่สุด ค่าความเป็นสีเหลือง (b*) และสีแดง (a*) น้อยที่สุดจึงทำให้ฟิล์มที่ได้มีลักษณะที่ใสมากที่สุด (Figure 1a) ฟิล์มที่เติมสารสกัดจากเปลือกสนมีค่าความเป็นสีแดง (a*) และสีเหลือง (b*) มากที่สุด ค่าความสว่างน้อยที่สุด (L*) ฟิล์มที่ได้จึงมีสีเข้ม ทึบแสงที่สุด (Figure 1b) ในขณะที่ฟิล์มที่เติมสารสกัดจากชาเขียวมีค่าสีค่อนไปทางสีเหลือง (b*) แต่ค่าความสว่าง (L*) มากกว่าฟิล์มที่เติมสารสกัดจากเปลือกสน ฟิล์มที่ได้จึงมีลักษณะใสกว่าฟิล์มที่เติมสารสกัดจากเปลือกสน (Figure 1c) ทั้งนี้ ตารางที่ 1 แสดงค่า L*, a* และ b* จากการวิเคราะห์ฟิล์มที่ปราศจากน้ำมัน

การวัดค่ามุมสัมผัส (Contact angle) และการทดสอบการละลาย (Solubility)

เมื่อเปรียบเทียบมุมสัมผัสของหยดน้ำบนผิวฟิล์มอาการ์-คาร์ราจีแนน (AC) กับฟิล์มที่เติมสารสกัดจากเปลือกสน (AC-PB) และสารสกัดชาเขียว (AC-GT) จาก Table 1 พบว่า การเติมสารสกัดจากเปลือกสนทำให้ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำบนผิวฟิล์มมีค่าสูงที่สุด โดยจะเข้าใกล้ 90 องศา เนื่องจากน้ำที่เป็นโมเลกุลที่มีขั้วยึดกับฟิล์มได้ลดลง โดยสารสกัดเปลือกสนประกอบด้วยสารประกอบฟีนอลและคาร์โบไฮเดรตอื่นๆ จึงอาจทำให้ความมีขั้วมีขั้วบริเวณผิวหน้าฟิล์มลดลง ส่วนฟิล์มที่เติมสารสกัดชาเขียวจะมีมุมสัมผัสของหยดน้ำลดลงเนื่องจากฟิล์มมีความเป็นขั้วเพิ่มขึ้น และแรงตึงผิวฟิล์มสูงขึ้น จึงสามารถยึดเกาะกับน้ำได้ดี และชอบน้ำมากที่สุด ในส่วนของการละลายนั้นพบว่าไม่มีความแตกต่างกัน ดังนั้นการใส่สารสกัดจากธรรมชาติเพียงปริมาณ 0.25% น้ำหนักต่อน้ำหนักจึงไม่มีผลต่อสมบัติการละลายของฟิล์ม

Table 1 Characterization and properties of films

Parameters	AC	AC-PB	AC-GT
Seal Strength (MPa)	1.2038 ± 0.0635^{a}	1.5046 ± 0.3313^{ab}	1.6432 ± 0.0763^{b}
Oxygen Permeability ($cc \cdot mm/m^2 \cdot day \cdot atm$)	5.40 ± 1.00^{ns}	5.17 ± 0.07^{ns}	5.35 ± 0.04^{ns}
Water vapor permeability ($g \cdot mm/m^2 \cdot h \cdot mmHg$)	0.0330 ± 0.0034^{c}	0.0263 ± 0.0021^{b}	0.0167 ± 0.0016^{a}
L*	89.173 ± 0.636^{c}	62.960 ± 0.679^{b}	78.263 ± 0.377^{a}
a*	2.833 ± 0.407^{a}	9.776 ± 0.304^{c}	4.277 ± 0.115^{b}
b*	-3.680 ± 0.466^{a}	32.260 ± 0.503^{c}	12.473 ± 0.320^{b}
Contact angle (Mean)	70.64 ± 3.46^{b}	82.77 ± 2.39^{c}	56.79 ± 0.92^{a}
% Solubility	75.516 ± 3.639^{ns}	74.849 ± 5.636^{ns}	80.907 ± 5.529^{ns}

Value expressed are mean ± standard deviation.

^{a,b,c} in the same row followed by different letters are significantly different ($p \leq 0.05$)

ns is non-significant different ($p > 0.05$)

การทดสอบการกันน้ำมัน

เมื่อทำการสังเกตการเปลี่ยนแปลงของกระดาษซับมัน โดยวางฟิล์มซองที่บรรจุน้ำมันทิ้งไว้บนแผ่นกระดาษซับมันเป็นเวลา 14 วัน พบว่า ไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆเกิดขึ้นบนกระดาษซับมัน (Figure 2) เนื่องจากฟิล์มมีความเป็นขั้ว จึงสามารถกันการซึมผ่านของน้ำมันได้ แสดงว่าตัวอย่างฟิล์มทั้ง 3 ชนิด (AC, AC-PB และ AC-GT) สามารถกันน้ำมันได้

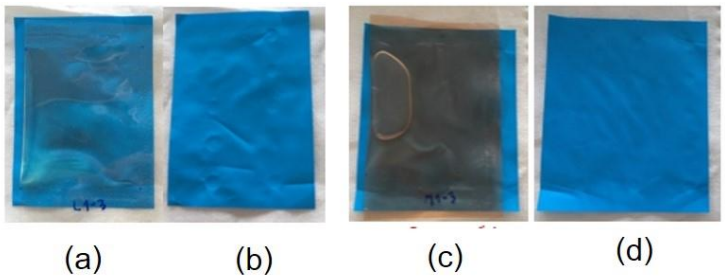


Figure 2 Oil resistance test: (a) AC pouch before test, (b) AC pouch after 2 weeks, (c) AC-GT pouch before test, (d) AC-GT pouch after 2 weeks.

การศึกษาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมัน

การศึกษาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยวิธีการวิเคราะห์ TBARS เป็นการประเมินการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขั้นทุติยภูมิ โดยเป็นการวัดปริมาณผลิตภัณฑ์ประเภทแอลดีไฮด์หรือคีโตนที่ เกิดขึ้น ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับระดับของแอลดีไฮด์ในน้ำมัน กรดไทโอบาบิทูริกจะทำปฏิกิริยาเฉพาะกับมาโลนาลดีไฮด์ ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่า TBA ของน้ำมันในฟิล์มซอง AC, AC-PB, AC-GT จากการทดลองนำฟิล์มซองทั้ง 3 ชนิด มาบรรจุน้ำมันปาล์มและน้ำมันมะกอกเก็บรักษาเป็นเวลา 54 วัน (Figure 3) พบว่าในช่วง 18 วันแรกจะไม่พบการเปลี่ยนแปลงของค่า TBA อย่างชัดเจน ซึ่งบ่งชี้ระยะเหนี่ยวนำของการเกิดลิพิดออกซิเดชัน และการเพิ่มขึ้นของค่า TBA จะสูงขึ้นอย่างชัดเจนภายหลังการเก็บรักษา 18 วัน ซึ่งบ่งชี้ช่วงเวลาการเกิดกลิ่นหืนเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษานานขึ้น ค่า TBA จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาจนถึงวันที่ 54 พบว่าในซองที่บรรจุน้ำมันปาล์ม ค่า TBA จะไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่ซองบรรจุน้ำมันมะกอก ซองที่เติมชาเขียว (AC-GT) มีค่า TBA น้อยที่สุด บ่งชี้ประสิทธิภาพการต้านออกซิเดชันของชาเขียวที่สูงกว่าเปลือกสน สารสกัดจากชาเขียวมีสารประกอบพอลีฟีนอลที่สำคัญ ได้แก่ คาเทคิน ในขณะที่สารสกัดจากเปลือกสน ประกอบด้วยพิคโนจีนอล (pycnogenol) ซึ่งเป็นสารผสมกลุ่มโพรไซยานิดิน (Packer et al., 1999) ทั้งนี้ de la Luz Cádiz-Gurrea et al. (2014) พบว่าสารสกัดจากชาเขียวมีประสิทธิภาพต้านทานออกซิเดชันสูงกว่าสารสกัดจากเปลือกสน สารประกอบฟีนอลิกที่มีความเสถียรสูงจะไปจับกับอนุมูลอิสระที่เป็นสาเหตุของปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้ปฏิกิริยาลูกโซ่หยุดลง ดังนั้นการใส่สารสกัดจากธรรมชาติจึงช่วยลดการเกิดออกซิเดชันในน้ำมันได้ นอกจากนี้พบว่าสารสกัดจากเปลือกสนสามารถชะลอการเกิดลิพิดออกซิเดชันในช่วง 30 วันแรกของการทดสอบน้ำมันปาล์ม ในขณะที่สารสกัดจากชาเขียวมีแนวโน้มลดการเกิดลิพิดออกซิเดชันภายหลังการเก็บรักษาเป็นเวลา 54 วันของน้ำมันทั้งสองชนิด

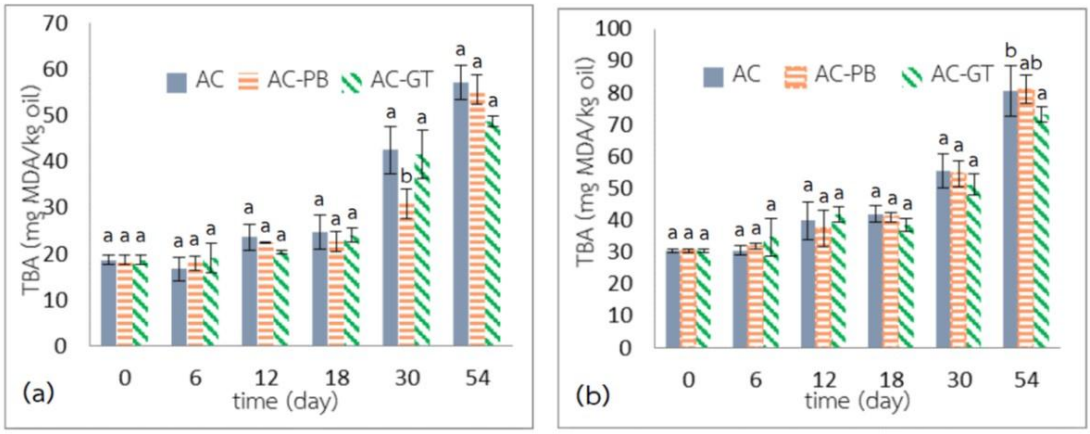


Figure 3 Correlation between TBA and Time; (a) palm oil and (b) olive oil in AC, AC-PB and AC-GT pouch.

สรุป

การเติมสารสกัดจากชาเขียวและเปลือกสนส่งผลให้ค่าการซึมผ่านของไอน้ำลดลง สารสกัดจากเปลือกสนจะทำให้ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำบนผิวฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่สารสกัดจากชาเขียวจะทำให้ค่ามุมสัมผัสลดลง ในด้านลักษณะปรากฏ พบว่าซองฟิล์มที่สกัดจากพืชต่างชนิดกันจะให้สีต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของพืชที่นำมาสกัด นอกจากนี้พบว่า สารสกัดจากชาเขียวมีแนวโน้มชะลอการเกิดออกซิเดชันในน้ำมันมะกอกที่บรรจุในซองบริโภคได้จากวัสดุฟิล์มที่มีขั้ว ในขณะที่ซองเติมสารสกัดจากเปลือกสนยับยั้งการเกิดออกซิเดชันในน้ำมันปาล์มในช่วง 30 วันแรก ดังนั้นการเลือกใช้สารสกัดจากธรรมชาติเพื่อยับยั้งการเกิดลิพิดออกซิเดชันของซองจากฟิล์มบริโภคได้ควรพิจารณาปัจจัยด้านความเหมาะสมระหว่างชนิดของน้ำมันและสารสกัด และช่วงระยะเวลาเก็บรักษาที่สามารถยับยั้งการเกิดลิพิดออกซิเดชัน

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่สนับสนุนทุนในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

Devaraj, S., S. Vega-López, N. Kaul, F. Schönlau, P. Rohdewald and I. Jialal. 2002. Supplementation with a pine bark extract rich in polyphenols increase plasm antioxidant capacity and alters the plasma lipoprotein profile **Lipids** 37: 931-934.

Huang, S. W. and E. N. Frankel. 1997. Antioxidant activity of tea catechins in different lipid systems. **Journal of Agricultural and Food Chemistry** 45: 3033-3038.

Nakayama, S., Y. Kishimoto, E. Saita, N. Sugihara, M. Toyozaki, C. Taguchi, M. Tani, T. Kamiya and K. Kondo. 2015. Pine bark extract prevents low-density lipoprotein oxidation and regulates monocytic expression of antioxidant enzymes. **Nutrition Research** 35: 56-64.

Rhim, J. W. 2012. Physical-mechanical properties of agar/k-carrageenan blend film and derived clay nanocomposite film. **Journal of Food Science** 77: 66-73.

Senanayake, S. P. J. N. 2013. Green tea extract: chemistry, antioxidant properties and food applications-a review. **Journal of Functional Foods** 5: 1529-1541.

Packer, L., Rimbach, G., & Virgili, F. (1999). Antioxidant activity and biologic properties of a procyanidin-rich extract from pine (Pinus maritima) bark, pycnogenol. Free Radical Biology and Medicine, 27(5-6), 704-724.

de la Luz Cádiz-Gurrea, M., Fernández-Arroyo, S., & Segura-Carretero, A. (2014). Pine bark and green tea concentrated extracts: antioxidant activity and comprehensive characterization of bioactive compounds by HPLC–ESI-QTOF-MS. International journal of molecular sciences, 15(11), 20382-20402.

ASTM E96-00. 2000. Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA

ASTM F88. 2009. Standard Test Method for Seal Strength of Flexible Barrier Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA

ASTM D3079-94. 1999, Standard Test Method for Water Vapor Transmission of Flexible Heat-Sealed Packages for Dry Products, ASTM International, West Conshohocken, PA

Giménez, B., de Lacey, A. L., Pérez-Santín, E., López-Caballero, M. E., & Montero, P. (2013). Release of active compounds from agar and agar–gelatin films with green tea extract. Food Hydrocolloids, 30(1), 264-271.

López de Dicastillo, C., Nerin, C., Alfaro, P., Catalá, R., Gavara, R., & Hernández-Munoz, P. (2011). Development of new antioxidant active packaging films based on ethylene vinyl alcohol copolymer (EVOH) and green tea extract. Journal of agricultural and food chemistry, 59(14), 7832-7840.

Abdorreza, M. N., Cheng, L. H., & Karim, A. A. (2011). Effects of plasticizers on thermal properties and heat sealability of sago starch films. Food Hydrocolloids, 25(1), 56-60.

Nouri, L., & Nafchi, A. M. (2014). Antibacterial, mechanical, and barrier properties of sago starch film incorporated with betel leaves extract. International journal of biological macromolecules, 66, 254-259.

Fabrication of Chitosan-Coated Ascorbyl Dipalmitate Nanoparticles by Rapid Expansion of Subcritical Solutions Coupled with Ionic Gelation

Yuntia Astutisari[1], Rangrong Yoksan[1,2,3] and Amporn Sane[1,2,3*]

ABSTRACT

Chitosan-coated ascorbyl dipalmitate (ADP) nanoparticles were successfully produced by RESOLV process followed by ionic gelation of chitosan (CTS) with sodium tripolyphosphate (TPP) as crosslinking agent. The effect of coating parameters, i.e. TPP concentration, volume and concentration of CTS solution, on particle size and loading capacity were studied. ADP NPs were spherical and rectangular in shape with a size range of 10–100 nm and average size of 35±22 nm produced by RESOLV process. After coated with CTS crosslinked with TPP, size range of particles and average size increased to 20–150 nm and 46–63 nm, respectively. Loading capacity of CTS-coated ADP NPS ranged between 22 and 47%. Increasing TPP concentration resulted in larger particle size with lower loading capacity, possibly due to increased crosslink density or amount of CTS crosslinked with TPP on the surface of ADP NPs. In conclusion, a combination of RESOLV process and ionic gelation of CTS could be an alternative to produce small size particles with relatively high loading capacity.

Key Words: ascorbyl dipalmitate, nanoparticles, encapsulation, RESOLV, chitosan

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

[1]Department of Packaging and Materials Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

[2]Center for Advanced Studies in Nanotechnology for Chemical, Food and Agricultural Industries, KU Institute for Advanced Studies, Kasetsart University, Bangkok 10900

[3]Center of Nanotechnology, Kasetsart University Research and Development Institute, Kasetsart University, Bangkok 10900

INTRODUCTION

Ascorbyl dipalmitate (ADP) is a fatty ester derivative of ascorbic acid with extremely low water solubility (Moribe *et al*., 2010). ADP has antioxidant activity (Sonkeaw *et al*., 2012) and it is widely used in pharmaceutical, cosmetic, and food industries. For industrial application, it is necessary to maintain the stability and activity of ADP. Encapsulation can be used to increase the stability as well as prolong the release of active compounds. Current encapsulation techniques include spray drying, fluid bed coating, coacervation, supercritical fluids, and ionic gelation (Munin and Edwards-Lévy, 2011). Ionic gelation is one of favorable techniques for encapsulating bioactive compounds due to no heat and toxic crosslinking agents required. Chitosan crosslinked with tripolyphosphate has been used for encapsulating various compounds, e.g., antioxidants, drugs, vitamins, and essential oils (Ajun *et al*., 2009; Yoksan *et al*., 2010; Woranuch and Yoksan. 2013). Conventional encapsulation techniques have some disadvantages such as high residual solvent, low drug loading, drug denaturation, ineffective drug release and unsuitable physical and morphological properties (Caliceti *et al*., 2004). A combination of nanoparticles production followed by coating process could be a method to improve loading capacity and size distribution of nanocapsules. Nanocapsules with small size and high loading capacity are required in drug delivery in order to increase the solubility of bioactive compound and reduce the quantity of nanocapsules (Mozafari *et al*., 2008). A promising technique to produce nanoparticles or nanocapsules with narrow size distribution is rapid expansion of supercritical fluid into liquid solvents (RESOLV) (Songtipya and Sane, 2013). In RESOLV, sub- and supercritical solutions (mixtures of a solute and a solvent) is expanded through a nozzle into a liquid receiving solution (Sane and Limtrakul, 2011; Songtipya and Sane, 2013). RESOLV has ability to produce nanoparticles from various compounds as organic co-solvents could be added to increase the solubility of different solutes in supercritical carbon dioxide. RESOLV process with pre-expansion pressure of 173 bar and pre-expansion temperature of 80 °C have been employed to produce spherical ADP nanoparticles with a size range of 32–160 nm and an average diameter of 77 nm (Sonkeaw *et al*., 2012).

A combination of RESOLV process to produce ADP nanoparticles followed by ionic gelation of chitosan could be a method to produce nanocapsules with narrow size distribution and high loading capacity. In the current study, the influence of ionic gelation conditions, i.e., CTS concentration and solution volume, and TPP concentration, on the size of encapsulated nanoparticles and loading capacity of ADP was investigated.

MATERIALS AND METHODS

1. Materials

Ascorbyl dipalmitate (ADP) was purchased from Sigma Aldrich (Germany). Chitosan with a degree of deacetylation of 0.85 and molecular weight of ~500 kDa was purchased from Seafresh Chitosan (Lab) (Thailand). Sodium tripolyphosphate (TPP) was supplied by Sigma-Aldrich (Germany).

Carbon dioxide (CO_2) (≥99.98%) was obtained from Chattakorn Lab Center (Thailand). Ethanol (99.9%) was purchased from Merck (Germany).

2. Preparation of ADP nanoparticles by RESOLV process

A schematic diagram of the apparatus used to produce ADP nanoparticles by RESOLV process is shown in Figure 1. Experimentally, a variable-volume view cell was charged with 0.32 g of ADP, 16 g of ethanol, and 16 g of CO_2. The view cell was placed inside an isothermal bath and the mixture was heated to ~55 °C and pressurized to 275.8 bar, using CO_2 from the syringe pump, under continuous stirring using a horseshoe magnet until ADP was completely dissolved. CO_2 was allowed to flow from the syringe pump, bypassing the high-pressure cell, and expanded across the nozzle (50 μm dia, L/D = 4) under heating until constant pre-expansion pressure of 275.8 bar and pre-expansion temperature of 80 °C were obtained. Next, CO_2 from the syringe pump was redirected to the back of view cell and indirectly pushing the homogenous solution of ADP by moving the piston inside the view cell. The homogenous solution (~22 g) was expanded across the nozzle into 60 mL of aqueous solution of TPP (1 and 2% w/v).

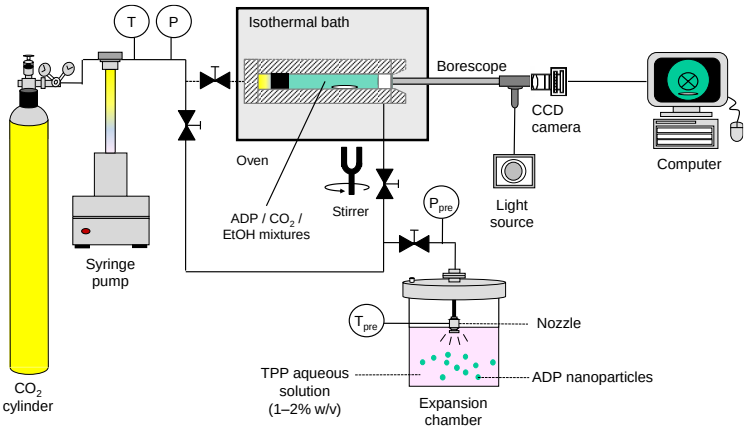


Figure 1 Schematic diagram of RESOLV apparatus

3. Preparation of CTS-coated ADP nanoparticles by ionic gelation process

Dispersion of NPs in TPP solution obtained from RESOLV experiments was incubated in a refrigerator (4 °C) for 24 h in order to let TPP adsorbed on the surface of ADP NPs. Coating of ADP NPs was then performed by crosslinking CTS with TPP adsorbed on the surface of ADP particles, according to a method modified from Woranuch and Yoksan (2013). Briefly, the ADP suspension (10 mL) was centrifuged at 10,000 rpm for 20 min at 10 °C to remove ADP particles saturated with TPP on the surface from the receiving TPP solution. Next, a CTS solution in an aqueous acetic acid (1%, v/v) was added drop wise into ADP sample under vigorously stirring for 1 h to crosslink with TPP adsorbed on the surface of ADP particles. Crosslinking was carried out with different concentrations of TPP (1 and 2 % w/v) and CTS (0.5 and 1.0 % w/v) and amounts of CTS solution (5 and 10 mL). The obtained CTS-coated ADP particles were collected by centrifugation at 10,000 rpm for 20 min at 10 °C and the particles were washed with 10 mL of distilled water before drying using a freeze dryer at

1.5 Pa and –54 °C for 6 h. The sample codes and parameters used for crosslinking are summarized in Table 1.

4. Characterization

The size and shape of CTS-coated ADP particles were determined by a transmission electron microscope (TEM) (JEOL, JEM-1400, Japan) at an accelerating voltage of 100 kV. To prepare a sample, the nanoparticles were re-dispersed in distilled water and the obtained suspension was dropped onto a carbon-coated copper grid before drying under vacuum for 2 d. The particle sizes were determined using Image-Pro Plus image analysis software (version 6.0). The quantity of ADP in CTS-coated particles was determined via UV-Vis spectrophotometry at a wavelength of 254 nm. Attenuated total reflectance–Fourier transform infrared (ATR-FTIR) spectroscopic analysis was also performed with the dried sample powders of CTS-coated ADP particles using a Bruker spectrometer (Tensor 27; Bruker, USA) over a wavenumber range of 4,000–400 cm^{-1} with 32 scans at a resolution of 4 cm^{-1} in order to ensure the success of coating of ADP with CTS crosslinked with TPP.

All results were expressed as means ± SD (n=3). The differences between encapsulation conditions were determined using one way analysis of variance (ANOVA) with the significant difference ($p \leq 0.05$) followed by Duncan multiple comparison for mean values (SPSS Statistics version 10.0).

RESULTS AND DISCUSSION

1. Particle size and loading capacity of CTS-coated ADP particles

The influence of crosslinking conditions, i.e. volume and concentration of CTS solution, and TPP concentration, on the morphology and size of CTS-coated ADP particles was analyzed using TEM. Both uncoated and coated ADP particles were spherical and rectangular in shape consisting individual and aggregated particles (Figure 2). The size ranges of uncoated ADP NPs were ~11–100 nm with an average diameter of 35 nm and ~10–100 nm with an average diameter of 37 nm prepared by 1 and 2% w/v TPP solution (Table 1), respectively. The reported particle sizes were determined from the dimensions of individual or primary particles. After coated in CTS, the particle size of ADP NPs increased to 20–150 nm. Moreover, the diameter of ADP NPs shifted to larger particles size compared to that of ADP NPs. The increase in particle size of ADP NPs after coating with CTS, indicating ionic gelation of with TPP occurring on the surface of ADP NPs. It was found that more than 90% of CTS-coated ADP NPs were smaller than 100 nm.

Table 1 Particle size and loading capacity CTS-coated ADP nanoparticles

Samples	TPP (%w/v)	CTS (%w/v)	Vol. of CTS soln. (mL)	Particle size		LC (%)
				Size range (nm)	Average size (nm)	
Initial ADP	–	–	–	–	–	–
ADP / TPP (1%)	1.0	–	–	11 – 100	35 ± 22[a]	–
ADP / TPP (2%)	2.0	–	–	10 – 101	37 ± 25[a]	–
ADP / TPP (1%) / CTS (0.5%, 5 mL)	1.0	0.5	5	20 – 110	46 ± 19[b]	47 ± 8[a]
ADP / TPP (1%) / CTS (0.5%, 10 mL)			10	21 – 125	48 ± 19[bc]	47 ± 6[a]
ADP / TPP (1%) / CTS (1%, 5 mL)		1.0	5	22 – 140	46 ± 25[b]	38 ± 5[ab]
ADP / TPP (1%) / CTS (1%, 10 mL)			10	24 – 150	48 ± 23[bc]	37 ± 4[ab]
ADP / TPP (2%) / CTS (0.5%, 5 mL)	2.0	0.5	5	20 – 110	47 ± 19[bc]	37 ± 3[ab]
ADP / TPP (2%) / CTS (0.5%, 10 mL)			10	24 – 120	49 ± 18[bc]	32 ± 8[b]
ADP / TPP (2%) / CTS (1%, 5 mL)		1.0	5	23 – 140	53 ± 20[c]	29 ± 6[bc]
ADP / TPP (2%) / CTS (1%, 10 mL)			10	28 – 150	63 ± 25[d]	22 ± 5[c]

When encapsulation was performed with a constant concentration of TPP at 1.0% w/v, increasing CTS solution volume from 5 to 10 mL had no significant effect on the size of encapsulated ADP NPs and loading capacity of ADP. However, the effect of CTS solution volume was more noticeable when encapsulation of ADP was carried out by using 2% TPP solution. At a constant CTS concentration of 0.5% w/v, increasing CTS solution volume from 5 to 10 mL resulted in decreasing loading capacity from 37±3% to 32±8%. For encapsulated ADP prepared by using 1% w/v CTS solution, increasing CTS solution volume increased average size from 53±20 nm to 63±25 nm and decreased loading capacity from 29±6% to 22±5%. When ionic gelation was performed with 1% w/v TPP solution and 5 mL CTS solution, increasing CTS concentration from 0.5 to 1% w/v had no effect on the particle size while decreased the loading capacity from 47±8% to 38±5%. The results suggest that increase in CTS concentration provided more amino groups to crosslink with TPP, forming denser CTS layer and decreased loading capacity (Gan *et al.*, 2005).

The effect of TPP concentration on particle size and loading capacity was also observed. When ionic gelation was carried out by using 0.5% w/v CTS solution, increasing TPP concentration from 1 to 2% w/v slightly increased the average particle size from 46–48 nm to 47–63 nm while decreased the loading capacity from 37–47% to 22–37% (Table 1). When encapsulation was performed using 0.5% w/v CTS and 10 mL CTS solution, increasing TPP concentration resulted in decreased ADP loading capacity from 47±6% to 32±8%, without significant effect on the particle size. This implies that increasing TPP concentration at low CTS concentration provides denser CTS layer (Luo *et al.*, 2010). The effect of TPP concentration on particle size and ADP loading capacity

became more noticeable when ionic gelation was performed at high concentration of CTS (i.e., 1% w/v). Increasing TPP concentration from 1 to 2% w/v increased the average particle size from 48±23 nm to 63±25 nm and decreased loading capacity from 37±4% to 22±5%.

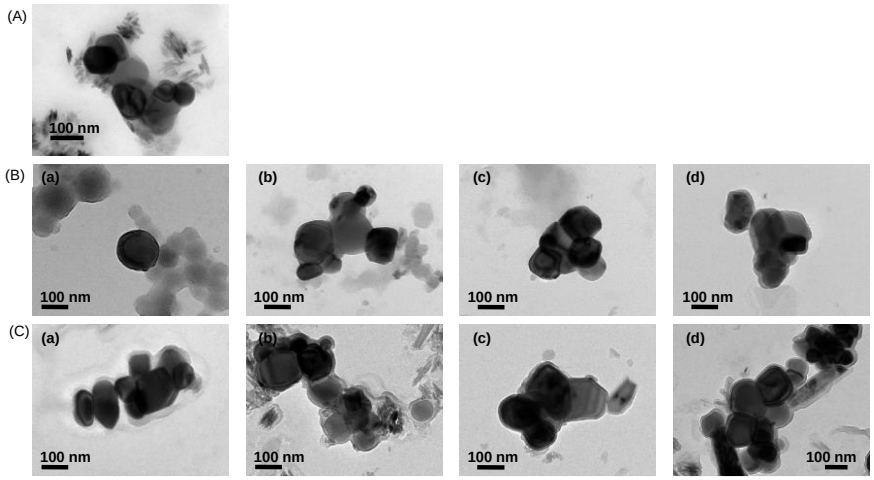


Figure 2 TEM images of ADP NPs (A) and CTS-coated ADP NPs prepared by using 1 (B) and 2% (C) of TPP solution with a different CTS concentration and volume of CTS solution: (a) CTS(0.5%, 5 mL), (b) CTS(0.5%, 10 mL), (c) CTS (1%, 10 mL), and (d) CTS (1%, 10 mL).

2. FTIR spectroscopy of CTS-coated ADP nanoparticles

Figure 3 shows FTIR spectra of ADP and CTS-coated ADP NPs, in comparison with those of TPP, CTS, CTS crosslinked with TPP. For TPP, major peaks occurred at wavenumbers of 1134 cm^{-1} (P=O stretching) and at 886 cm^{-1} (P–O and P–O–P) (Antoniou *et al.*, 2015). CTS showed a broad band at 3358 cm^{-1}(O–H, and N–H from primary amide and type II amide) and peak at 2988–2901 cm^{-1} (C–H),

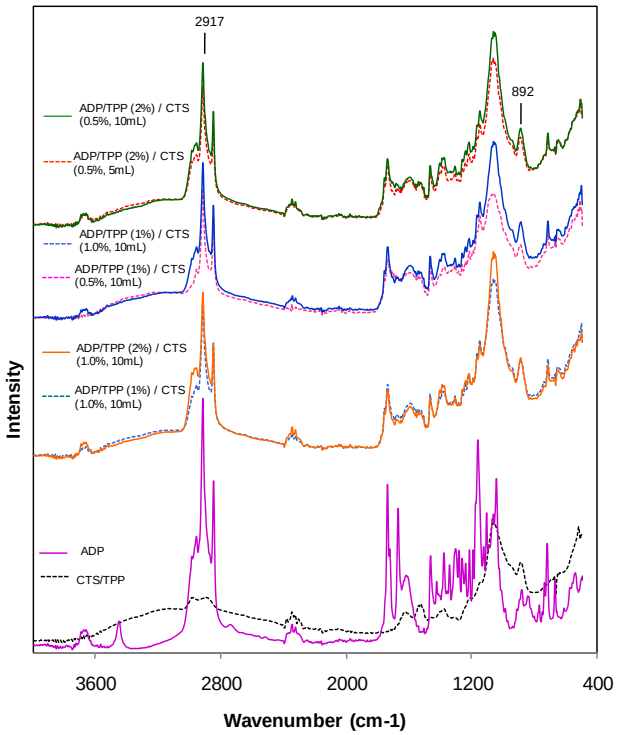


Figure 3 FTIR of CTS-coated ADP nanoparticles prepared by using 1% and 2% TPP solutions.

1639 cm^{-1} (C–O from amide I), 1580 cm^{-1} (N–H from amide II), 1149–1421 cm^{-1} (C–O–C in glycosidic linkage), 1035–1078 cm^{-1} (C–O–C) and 892 cm^{-1} (pyranose ring) (Woranuch and Yoksan, 2013; Antoniou *et al*., 2015). Crosslinking CTS with TPP resulted in shift of amide II peak from1580 to 1528 cm^{-1}, due to electrostatic interaction between amino groups of CTS and phosphate groups of TPP (Yoksan *et al*., 2010; Vimal *et al*., 2013; Antoniou *et al*., 2015). Initial ADP and ADP NPs (Figure 3) showed major bands at 2917 cm^{-1} (C–H stretching), 1740 cm^{-1} (C=O stretching), and 1678 cm^{-1} (C=C ring stretching). Several vibrational bands were observed in the region of 1200–1500 cm^{-1} relating to CH_2 scissoring, twisting, and wagging and C–H deformation modes. The bands at 1170, 1152, 1077, 1066, and 1051 cm^{-1} correspond to C–O–C stretching. The band at 892 cm^{-1} is attributed to C–C ring stretching.

CONCLUSIONS

The present study showed the potential of chitosan to coat ADP nanoparticles by combination of RESOLV process and ionic gelation process. The obtained particles were spherical and rectangular in shape with average individual particle diameter of 46–63 nm. CTS-coated ADP nanoparticles showed loading capacity of 22–47%. Increasing TPP concentration decreased loading capacity of ADP. A combination of RESOLV and ionic gelation processes could be used as a versatile technique to nanoencapsulate active compounds in ionic polymers to produce uniform-sized nanoparticles with high loading capacity.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work is supported in part by grants from: (i) the Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, (ii) Graduate Scholarship as of Fiscal Year 2013 from the Graduate School, Kasetsart University, and (iii) the National Nanotechnology Center (NANOTEC), the National Science and Technology Development Agency (NSTDA).

REFERENCES

Ajun, W., S. Yan, G. Li and L. Huili. 2009. Preparation of aspirin and probucol in combination loaded chitosan nanoparticles and in vitro release study. **Carbohydrate Polymers**. 75: 566-574.

Antoniou, J., F. Liu, H. Majeeda, J. Qia, W. Yokoyama and F. Zhong. 2015. Physicochemical and morphological properties of size-controlled chitosan–tripolyphosphate nanoparticles. **Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects**. 465: 137-146.

Caliceti, P., S. Salmaso, N. Elvassore and A. Bertucco. 2004. Effective protein release from PEG/PLA nano-particles produced by compressed gas anti-solvent precipitation techniques **Journal of Controlled Release**. 94: 195-205.

Castelló, J., M. Gallardo, M.A. Busquets and J. Estelrich. 2015. Chitosan (or alginate)-coated iron oxide nanoparticles: A comparative study. **Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects**. 468: 151-158.

Gan, Q., T. Wang, C. Cochrane and P. McCarron. 2005. Modulation of surface charge, particle size and morphological properties of chitosan-TPP nanoparticles intended for gene delivery. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**. 44: 65-73.

Luo, Y., B. Zhang, W.H. Cheng and Q Wang. 2010. Preparation, characterization and evaluation of selenite-loaded chitosan/TPP nanoparticles with or without zein coating. **Carbohydrate Polymers**. 82: 942-951.

Mozafari, M.R., K. Khosravi-Darani, G.G. Borazan, J. Cui, A. Pardakhty and S. Yurdugul. 2008. Encapsulation of food ingredients using nanoliposome technology. **International Journal of Food Properties**. 11: 833-844.

Moribe, K., S. Maruyama, Y. Inoue, T. Suzuki, T. Fukami, K. Tomono, K. Higashi, Y. Tozuka and K. Yamamoto. 2010. Ascorbyl dipalmitate/PEG-lipid nanoparticles as a novel carrier for hydrophobic drugs. **International Journal of Pharmaceutics**. 387: 236-243.

Munin, A., F. Edwards-Lévy. 2011. Encapsulation of natural polyphenolic compounds: a review. **Pharmaceutics**. 3: 793-829.

Sane, A. and J. Limtrakul. 2011. Co-precipitation of asiatic acid and poly(L-Lactide) using rapid expansion of subcritical solution into liquid solvents. **Journal of Nanoparticle Research**. 13: 4001–4013.

Sonkeaw, P., A. Sane and P. Suppakul. 2012. Antioxidant activities of curcumin and ascorbyl dipalmitate nanoparticles and their activities after incorporation into cellulose-based packaging films. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. 60: 5388-5399.

Songtipya, L. and A. Sane. 2013. Effect of concentration and degree of saturation on co-precipitation of catechin and poly(L-Lactide) by the RESOLV process. **Journal of Supercritical Fluids**. 75: 72-80.

Vimal, S., S.A. Majeed, G. Taju, K.S.N. Nambi, N.S. Raj, N. Madan, M.A. Farook, T. Rajkumar, D. Gopinath and A.S. Sahul Hameed. 2013. Chitosan tripolyphosphate (CS/TPP) nanoparticles: Preparation, characterization and application for gene delivery in shrimps. **Acta Tropica**. 128: 486- 493.

Woranuch, S. and R. Yoksan. 2013. Eugenol-loaded chitosan nanoparticles: I. thermal stability improvement of eugenol through encapsulation. **Carbohydrate Polymers**. 96: 578-585.

Yoksan R., J. Jirawutthiwongchai and K. Arpo. 2010. Encapsulation of ascorbyl palmitate in chitosan nanoparticles by oil-in-water emulsion and ionic gelation processes. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**. 76: 292-297.

ผลของสารละลายเบสต่อคุณภาพทางกายภาพและทางเคมีของแป้งข้าวเจ้าและลักษณะเนื้อสัมผัสของตัวลอดช่องไทย

Effect of Alkaline Solutions on Physical and Chemical Properties of Rice Flour and Textural Property of Thai Lod-Chong

กาญจนา เจริญพิริยะ[1] กมลวรรณ แจ้งชัด[1*] อนุวัตร แจ้งชัด[1] และ ศิวาพร โอเจริญ[1]

Kanjana Jalernpiriya[1], Kamolwan Jangchud[1*], Anuvat Jangchud[1] and Siwaporn O'Charoen[1]

บทคัดย่อ

ลอดช่องไทย เป็นขนมไทยที่มีแป้งข้าวเจ้าเป็นส่วนผสมหลักและมีส่วนผสมของน้ำปูนใสส่งผลต่อคุณภาพเนื้อสัมผัสของตัวลอดช่องไทย งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของชนิดและความเข้มข้นของสารละลายเบสต่อคุณภาพทางกายภาพและทางเคมีของแป้งข้าวเจ้า และศึกษาผลของสารละลายเบสต่อคุณภาพทางกายภาพของตัวลอดช่องไทย โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มตลอด นำแป้งข้าวเจ้าแช่ในสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ที่ระดับความเข้มข้น 0.02 และ 0.04 M น้ำปูนใสซึ่งมีส่วนประกอบของแคลเซียมไอออน และน้ำปราศจากไอออน (สภาวะควบคุม) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่า แป้งข้าวเจ้าที่แช่ในสารละลาย Na_2CO_3 และน้ำปูนใส มีปริมาณโปรตีน เถ้าและไขมันแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) แต่มีค่า pH และกำลังการพองและการละลายสูงกว่าสภาวะควบคุม ผลการวิเคราะห์สมบัติความหนืดด้วย RVA พบว่าอุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด ความหนืดสูงสุด และค่าความสามารถทนต่อการกวนลดลงจากสภาวะควบคุม สารละลายเบสทำให้มีค่าความเป็นสีเขียว และค่าความแน่นเนื้อสูงกว่าตัวลอดช่องไทยที่สภาวะควบคุม น้ำปูนใสให้ลักษณะเนื้อสัมผัสที่มีความแน่นเนื้อเหมาะสมสำหรับตัวลอดช่องไทย

ABSTRACT

Thai Lod-Chong is a Thai dessert containing rice flour as a main ingredient and limewater which affect its textural property.The objectives of this study were to evaluate the effect of types and concentrations of alkaline solutions on physical and chemical properties of rice flour and physical properties of Thai Lod-Chong. The Completely Randomized Design was used in this study. Rice flour was soaked in sodium carbonate (Na_2CO_3) at concentrations of 0.02 and 0.04 M, limewater containing calcium ion and deionized water (control) for 1 hour. The results showed that protein, ash and fat contents were not different significantly ($p>0.05$) but pH value, swelling power and solubility of rice flour soaked in Na_2CO_3 and limewater increased. RVA viscosity analysis showed that pasting temperature, peak viscosity and the ability of shear resistance decreased when compared with control. The bright greenness and firmness of Thai Lod-Chong made from alkaline solutions increased. Limewater gave firmness texture appropriate to Thai Lod-Chong.

Key Words: Thai Lod-Chong, alkaline solution, rice flour, rice products

* 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

ลอดช่องไทย เป็นขนมไทยที่มีมาตั้งแต่สมัยโบราณ และเป็นที่นิยมบริโภคอย่างแพร่หลาย จากผลการวิจัยของสถาบันค้นคว้าวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร ในโครงการพัฒนานวัตกรรมชุดตำรับอาหารไทยเพื่อสุขภาพเชิงพาณิชย์ (2556) สำรวจความนิยมรับประทานอาหารหวานจำนวน 10 ชนิด กับผู้บริโภคจำนวน 200 คน พบว่า ผู้บริโภคเลือกรับประทานอาหารหวาน อันดับที่ 1 คือ ลอดช่องน้ำกะทิ คิดเป็นร้อยละ 14.4 อันดับที่ 2 คือ ทับทิมกรอบ คิดเป็น ร้อยละ 13.7 และอันดับที่ 3 คือ เต้าหู้นมสด คิดเป็นร้อยละ 13.3 ลอดช่องไทยประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ตัวลอดช่องซึ่งมีแป้งข้าวเจ้าเป็นส่วนผสมหลักและน้ำกะทิ ส่วนใหญ่รับประทานพร้อมกับน้ำแข็ง นอกจากนี้ยังสามารถรับประทานคู่กับแตงไทย เผือกนึ่ง หรือข้าวเหนียวดำนึ่ง น้ำปูนใสเป็นส่วนผสมที่สำคัญของตัวลอดช่อง ซึ่งมีผลต่อคุณภาพของตัวลอดช่อง โดยเฉพาะคุณภาพทางด้านเนื้อสัมผัส ดังนั้นการนำแป้งข้าวเจ้ามาแช่ในน้ำปูนใสและสารละลายเบสชนิดอื่นจึงมีผลต่อสมบัติทางเคมี กายภาพและทางเคมีกายภาพของแป้ง ในด้านความเป็นผลึก ลักษณะการพองตัว การเปลี่ยนแปลงความหนืด (Bryant and Hamaker, 1997; Lai *et al*.,2004; Karim *et al*., 2008) และส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ สารละลายเบสที่นำมาใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารที่มีแป้งเป็นส่วนผสม ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมคาร์บอเนต แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทั้งนี้การใช้สารละลายเบสในผลิตภัณฑ์อาหารนั้นมีวัตถุประสงค์เพื่อให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค เช่น ให้สีเหลืองของเส้นบะหมี่ (Fu, 2008) ให้กลิ่นและกลิ่นรส อีกทั้งการมีเนื้อสัมผัสที่อยู่ตัวและยืดหยุ่นของขนมเปียกปูน ขนมน้ำดอกไม้ และลอดช่อง (สุปราณี, 2553)

การเปลี่ยนแปลงคุณภาพของแป้งที่เกิดขึ้นในระหว่างการแช่ในสารละลายที่มีฤทธิ์เป็นเบสนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของสารละลายเบส ความเข้มข้นของสารละลายเบส ระยะเวลาในการแช่สารละลายเบส และชนิดของแป้งที่ใช้ (Nadiha *et al*., 2010) อย่างไรก็ตามผลของชนิดของสารละลายเบสและความเข้มข้นที่แตกต่างกันอาจจะมีผลต่อคุณภาพทางกายภาพและทางเคมีของแป้งข้าวเจ้าและผลิตภัณฑ์ที่มีแป้งข้าวเจ้าเป็นองค์ประกอบหลัก ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ เพื่อศึกษาผลของชนิดและความเข้มข้นของสารละลายเบสต่อคุณภาพทางกายภาพและทางเคมีของข้าวแป้งข้าวเจ้า และศึกษาผลของสารละลายเบสต่อคุณภาพทางกายภาพของตัวลอดช่องไทย เพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นและเป็นความรู้พื้นฐานในการนำไปใช้ประโยชน์ในลอดช่องไทยและขนมไทยชนิดอื่นๆที่มีแป้งข้าวเจ้าเป็นส่วนผสมหลักต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

1. วัตถุดิบ

แป้งข้าวเจ้า (ตราช้างสามเศียร) ปูนแดง (ตลาดบางเขน) และโซเดียมคาร์บอเนต เกรดอาหาร (Solvay Chemicals International, Belgium) น้ำปูนใส (limewater) เตรียมโดยนำปูนแดง (มีส่วนประกอบของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ขมิ้น และเกลือ) ละลายในน้ำกลั่น โดยใช้อัตราส่วนของปูนแดงต่อน้ำกลั่นเท่ากับ 1 ต่อ 6 ผสมให้เข้ากัน พักไว้จนสารละลายอิ่มตัว (ค่า pH เท่ากับ 12.50) และนำสารละลายส่วนใสไปใช้ในการศึกษา (จากการวิเคราะห์มีปริมาณแคลเซียม 81.56 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมโดยน้ำหนักเปียก)

2. การเตรียมตัวอย่างแป้งข้าวเจ้า

นำแป้งข้าวเจ้าแช่ในสารละลายต่างๆ มาศึกษาโดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มตลอด (Completely Randomized Design, CRD) มีทั้งหมด 4 สิ่งทดลอง ได้แก่ สารละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ที่ระดับ

ความเข้มข้น 2 ระดับ คือ 0.02 M และ 0.04 M น้ำปูนใส และน้ำปราศจากไอออน (สภาวะควบคุม) วิธีการเตรียมตัวอย่างแป้งข้าวเจ้า ดัดแปลงจาก Reepholkul and Charoenrein (2011); Hedayati *et al*. (2016) โดยใช้อัตราส่วนแป้งข้าวเจ้าต่อสารละลาย เท่ากับ 1 ต่อ 1.5 (น้ำหนัก/ปริมาตร) คนให้เข้ากัน แล้ววางไว้ที่อุณหภูมิห้อง 30±2 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง นำส่วนใสและของแข็งทั้งหมดมาเทบนถาด โดยน้ำแป้งข้าวเจ้ามีความหนา 2 มิลลิเมตร อบให้แห้งด้วยตู้อบลมร้อนแบบถาด ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างแป้งข้าวเจ้าที่ได้บดให้ละเอียดผ่านตะแกรงร่อนขนาด 100 เมช เก็บรักษาในถุงพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนปิดผนึกให้สนิทเก็บที่อุณหภูมิห้อง (30±2 องศาเซลเซียส)

3. การวิเคราะห์คุณภาพของแป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการแช่สารละลายเบส

3.1 คุณภาพทางเคมี

3.1.1 ค่า pH ของสารละลายและแป้งข้าวเจ้าหลังแช่สารละลาย ด้วยเครื่องวัดค่า pH (รุ่น Docu-pHยี่ห้อ Sartorius, Germany) ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

3.1.2 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณ ได้แก่ ความชื้น เถ้า ไขมัน และโปรตีน ตามวิธีการของ AOAC (2000) ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

3.2 คุณภาพทางกายภาพ

3.2.1 วิเคราะห์ค่ากำลังการพองและการละลาย ซึ่งวิธีการวิเคราะห์ดัดแปลงมาจากวิธีของกล้าณรงค์และเกื้อกูล (2546) ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

3.2.2 วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความหนืด โดยใช้เครื่อง Rapid Viscosity Analyzer (RVA) รุ่น 4D ยี่ห้อ Newport ประเทศออสเตรเลีย ตามวิธีการของ ICC. Standard method NO. 162 (1996) โดยวิธีมาตรฐาน 61.02 AACC (2000) ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

4. การเตรียมตัวลอดช่องไทย

เตรียมตัวลอดช่องไทยที่มีส่วนผสมของแป้งข้าวเจ้า วิธีการผลิตดัดแปลงจากภวิษา (2558) โดยนำแป้งข้าวเจ้าผสมสารละลายที่ศึกษา และน้ำใบเตย (อัตราส่วนใบเตย:น้ำ เท่ากับ 1 ต่อ 2.5) ผสมให้เข้ากัน เทส่วนผสมทั้งหมดลงในกระทะทองเหลือง กวนด้วยไฟปานกลาง (อุณหภูมิประมาณ 70 องศาเซลเซียส) นาน 8 นาที จากนั้นนำเนื้อแป้งสุกเทใส่ในกระบอกบีบเส้นลอดช่อง และบีบลงในน้ำเย็นจัด (อุณหภูมิประมาณ 10 องศาเซลเซียส) ตักตัวลอดช่องสะเด็ดน้ำ 5 นาที เก็บตัวลอดช่องในภาชนะที่มีฝาปิด

5. การศึกษาผลของสารละลายเบสต่อคุณภาพทางกายภาพของตัวลอดช่องไทย

ศึกษาผลของชนิดของสารละลายโดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มตลอด โดยนำแป้งข้าวเจ้ากวนในสารละลาย 4 ชนิด ได้แก่ สารละลาย Na_2CO_3 ที่ระดับความเข้มข้น 2 ระดับ คือ 0.02 M และ 0.04 M น้ำปูนใส และน้ำปราศจากไอออน (สภาวะควบคุม) จากนั้นนำไปวิเคราะห์คุณภาพ ดังนี้

5.1 ค่าสีของตัวลอดช่องไทยในระบบ CIE L a b ด้วยเครื่องวัดค่าสี (รุ่น CM-3500d ยี่ห้อ Minolta spectrophotometer บริษัท Minolta Co., Ltd, ประเทศญี่ปุ่น) และบันทึกค่าสี L* a* และ b* ทำการวัด 3 ซ้ำ

5.2 ค่าเนื้อสัมผัสของตัวลอดช่องไทย โดยวัดค่าความแน่นเนื้อของตัวลอดช่องไทย ด้วยเครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส (รุ่น TA.XT plus ยี่ห้อ Texture analyzer บริษัท Vienna Court, ประเทศอังกฤษ) โดยวิธี Backward extrusion ใช้หัววัดแบบ Spherical plate plunger เส้นผ่านศูนย์กลาง 40 มิลลิเมตร นำตัวลอดช่อง

ไทยใส่ลงในถ้วยทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 มิลลิเมตร สูง 75 มิลลิเมตร ให้มีความสูง 25 มิลลิเมตร โดยมีระยะกดร้อยละ 50 ของความสูงของตัวอย่าง ทำการวัดจำนวน 10 ซ้ำ

6. การวิเคราะห์ทางสถิติ

วิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวน และทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของสิ่งทดลองด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางสถิติ XLSTAT® version 2012

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. ผลของสารละลายเบสต่อคุณภาพของแป้งข้าวเจ้า

1.1 คุณภาพทางเคมี

1.1.1 ค่า pH ของสารละลายสภาวะควบคุม สารละลาย Na_2CO_3 ความเข้มข้น 0.02 M, 0.04M และน้ำปูนใส เท่ากับ 6.08, 10.96, 11.09 และ 12.50 ตามลำดับ ค่า pH ของแป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการแช่สารละลายชนิดต่างกัน (Table 1) มีความแตกต่างกันอย่างนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แป้งข้าวเจ้าที่แช่ในสารละลาย Na_2CO_3 ความเข้มข้น 0.02 M, 0.04M และน้ำปูนใส มีฤทธิ์เป็นเบส โดยมีค่า pH เท่ากับ 9.28, 9.72 และ 8.00 ตามลำดับ

1.1.2 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการแช่สารละลายต่างชนิดกัน แสดงใน Table 1 พบว่ามีปริมาณความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 10.06-10.90 ปริมาณเถ้า โปรตีน และไขมันของแป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการแช่สารละลายต่างชนิดกันมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) เนื่องจากในการศึกษานี้ไม่ได้นำส่วนของสารละลายใสด้านบนทิ้งก่อนนำไปอบให้แห้ง องค์ประกอบทางเคมีจึงมีค่าใกล้เคียงกัน โดยปริมาณโปรตีนอยู่ในช่วงร้อยละ 6.01-6.83 โดยน้ำหนักแห้ง ปริมาณเถ้ามีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 0.60-0.63 โดยน้ำหนักแห้ง และปริมาณไขมันมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 0.14-0.18 โดยน้ำหนักแห้ง

Table 1 pH and chemical compositions of rice flour soaked in different solutions

Sample	pH	Moisture (% wet basis)	Ash ^{ns} (% dry basis)	Protein ^{ns} (% dry basis)	Fat ^{ns} (% dry basis)
Control	5.62±0.01^{d}	10.65±0.27^{a}	0.60±0.00	6.52±0.22	0.18±0.01
0.02M Na_2CO_3	9.28±0.01^{b}	10.21±0.16^{b}	0.62±0.01	6.18±0.00	0.14±0.01
0.04M Na_2CO_3	9.72±0.01^{a}	10.06±0.18^{b}	0.63±0.01	6.01±0.21	0.15±0.01
Limewater	8.00±0.01^{c}	10.90±0.05^{a}	0.62±0.01	6.45±0.10	0.14±0.01

Note $^{a-c}$ Means with different letters within the same column are significantly different ($p \leq 0.05$).

1.2 คุณภาพทางกายภาพ

1.2.1 กำลังการพองและการละลาย

จากการวิเคราะห์ค่ากำลังการพองตัวและการละลายของแป้งข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการแช่สารละลาย พบว่า มีค่ากำลังการพองตัวเท่ากับ 7.96 และการละลายร้อยละ 3.23 เมื่อพิจารณาแป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการแช่ในสารละลายต่างชนิด พบว่า แป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการแช่สารละลาย Na_2CO_3 ทั้ง 2 ระดับความเข้มข้นและ

น้ำปูนใส มีค่ากำลังการพองตัวและการละลายมากกว่าสภาวะควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย Na_2CO_3 ค่ากำลังการพองตัวและการละลายของแป้งข้าวเจ้ามีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงใน Table 2 อาจเป็นเพราะสารละลาย Na_2CO_3 และน้ำปูนใสมีฤทธิ์เป็นเบส ซึ่งสารละลายเบสจะเข้าไปในโครงสร้างส่วนที่ไม่เป็นระเบียบ (amorphous regions) ของเม็ดแป้ง ทำให้พันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลสตาร์ชถูกทำลาย โมเลกุลของน้ำสามารถเข้ามาจับกับหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งได้ง่าย แป้งจึงเกิดการพองได้ดี (Karim *et al*., 2008) และมีการละลายเพิ่มขึ้น สำหรับแป้งที่แช่ในสารละลาย Na_2CO_3 มีกำลังการพองตัวและการละลายมากกว่าน้ำปูนใส โดย Zhou *et al*. (2014) ได้ศึกษาผลของเกลือต่างชนิดกันต่อคุณภาพสตาร์ชมันฝรั่ง พบว่า สตาร์ชมันฝรั่งที่เตรียมโดยละลายในสารละลายเกลือมีค่ากำลังการพองตัวและการละลายต่ำกว่าสตาร์ชมันฝรั่งที่ไม่ผ่านสารละลายเกลือ สามารถเรียงลำดับไอออนของสารละลายเกลือที่ให้ค่ากำลังการพองตัวและการละลายจากมากไปน้อย ได้ดังนี้ Li^+, Na^+, K^+ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นร่วมด้วย เช่น ชนิดของพืชที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบ ปริมาณแอมิโลสและแอมิโลเพคติน และปริมาณไขมัน (Singh *et al*., 2007)

Table 2 Swelling power and solubility of rice flour soaked in different solutions

Sample	Swelling power (g/g)	Solubility (%)
Control	8.49±0.12[d]	2.63±0.04[d]
0.02M Na_2CO_3	11.83±0.08[b]	7.39±0.48[b]
0.04M Na_2CO_3	12.95±0.01[a]	9.54±0.47[a]
Limewater	9.52±0.17[c]	6.04±0.26[c]

Note [a-d] Means with different letters within the same column are significantly different ($p \leq 0.05$).

1.2.2 การเปลี่ยนแปลงความหนืด

เมื่อนำแป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการแช่ในสารละลายต่างชนิดกันมาวิเคราะห์ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนืดด้วยเครื่อง RVA ได้ผลดังแสดงใน Table 3 พบว่า อุณหภูมิที่เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืด (pasting temperature) หรืออุณหภูมิต่ำสุดที่ต้องใช้ในการทำให้แป้งสุก (Newport Scientific, 1995) ของแป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการแช่สารลาย Na_2CO_3 ทั้ง 2 ระดับความเข้มข้นและน้ำปูนใสอยู่ในช่วง 78.98-83.28 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าต่ำกว่าสภาวะควบคุม (90.80 องศาเซลเซียส) เนื่องจากสารละลาย Na_2CO_3 และน้ำปูนใสเป็นสารละลายที่มีฤทธิ์เป็นเบส และ Lai *et al*. (2004) ได้ทำการศึกษาผลของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และ Na_2CO_3 ต่อคุณภาพของสตาร์ชจากข้าวโพด ข้าวเจ้า และข้าวสาลี พบว่า สารละลายเบสไปเร่งการพองตัวของเม็ดแป้งทั้ง 3 ชนิดนี้ ทำให้เม็ดแป้งเกิดการพองตัวได้เร็วขึ้น โดยมีอุณหภูมิในการเกิดเจลาทิไนเซชันลดลง

ค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) เป็นค่าที่มีความสัมพันธ์กับคุณภาพของผลิตภัณฑ์สุดท้าย และเป็นค่าที่บอกถึงความสามารถของแป้งในการจับตัวกับน้ำและแรงที่ต้องใช้ในการกวนหรือผสมในอาหาร (Newport Scientific, 1995) พบว่าค่าความหนืดสูงสุดของทุกสิ่งทดลองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการแช่สารละลาย Na_2CO_3 ทั้ง 2 ระดับความเข้มข้นและน้ำปูนใส ซึ่งสารละลายมีฤทธิ์เป็นเบส มีค่าความหนืดสูงสุดลดลงจากสภาวะควบคุม จากการศึกษาของ Nadiha *et al.*

(2010) พบว่า สตาร์ชสาคูที่แช่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 มีค่าความหนืดสูงสุดลดลงจากสภาวะควบคุม เนื่องจากแอมิโลสที่กระจายอยู่ในส่วนอสัณฐาน (amorphous regions) ถูกสารละลายเบสรบกวนอย่างมาก จึงส่งผลให้เม็ดแป้งมีความแข็งแรงลดลง

ค่าความหนืดต่ำสุด (trough) บอกถึงค่าความหนืดต่ำสุดของแป้งที่เกิดจากการให้ความร้อน และแรงกวนที่ใช้ในการผสม (Newport Scientific, 1995) พบว่าแป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการแช่ในสารละลาย Na_2CO_3 ทั้ง 2 ระดับความเข้มข้นและน้ำปูนใสมีค่าความหนืดต่ำสุดลดลงจากสภาวะควบคุม สำหรับค่าความแตกต่างระหว่างค่าความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุด (breakdown) บอกถึงความสามารถในการคงทนต่ออุณหภูมิและการกวน (Newport Scientific, 1995) พบว่า แป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการแช่ในสารละลาย Na_2CO_3 ทั้ง 2 ระดับความเข้มข้นและน้ำปูนใสมีค่าความแตกต่างระหว่างค่าความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุดเพิ่มขึ้นจากสภาวะควบคุม แสดงว่าแป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการแช่ในสารละลาย Na_2CO_3 ทั้ง 2 ระดับความเข้มข้นและน้ำปูนใสมีความคงทนต่ออุณหภูมิและการกวนต่ำกว่าสภาวะควบคุม และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย Na_2CO_3 ค่าความแตกต่างระหว่างค่าความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุดจะมีค่าสูงขึ้น ค่าความหนืดสุดท้าย (final viscosity) บอกถึงคุณภาพของแป้งและบ่งชี้ถึงลักษณะของแป้งหรือผลิตภัณฑ์ว่ามีลักษณะเป็นแป้งเปียกหรือเจลเมื่อผ่านการให้ความร้อน และทำให้เย็น (Newport Scientific, 1995) โดยแป้งที่ผ่านการแช่สารละลาย Na_2CO_3 จะได้เจลที่แข็งกว่าสภาวะควบคุมและน้ำปูนใส

ค่าการคืนตัว (setback) สามารถวิเคราะห์ได้จากผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดต่ำสุด ซึ่งค่าการคืนตัวนี้จะมีความสัมพันธ์กับลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ (Newport Scientific, 1995) โดยถ้ามีค่าคืนตัวมากจะมีการเกิดรีโทรเกรเดชันได้มาก และมีแนวโน้มที่จะให้เจลแป้งที่แข็งขึ้น จากผลการทดลองพบว่า การคืนตัวของแป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการแช่สารละลาย Na_2CO_3 มีค่ามากที่สุด (249.92-263.50 RVU) รองลงมาคือแป้งข้าวเจ้าที่สภาวะควบคุม (174.67 RVU) และการคืนตัวน้อยที่สุด คือ แป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการแช่น้ำปูนใส (142.36 RVU) สำหรับแป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการแช่สารละลาย Na_2CO_3 ทั้ง 2 ระดับความเข้มข้น มีค่าการคืนตัวสูงกว่าแป้งข้าวเจ้าในสภาวะควบคุม แสดงว่า การเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งข้าวเจ้าที่แช่สารละลาย Na_2CO_3 จะเกิดได้ดีกว่าสภาวะควบคุม น้ำปูนใสทำให้แป้งข้าวเจ้ามีค่าการคืนตัวต่ำที่สุด ซึ่งส่งผลให้แป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการแช่น้ำปูนใสเกิดรีโทรเกรเดชันได้น้อยกว่าสารละลายชนิดอื่น

Table 3 Pasting properties of rice flour soaked in different solutions

Sample	Pasting temperature (°C)	Viscosity (RVU)				
		Peak viscosity	Trough	Breakdown	Final viscosity	Setback
Control	90.80±0.57[a]	177.80±0.88[a]	141.75±1.77[a]	36.05±2.65[d]	316.41±4.01[c]	174.67±5.78[c]
0.02M Na_2CO_3	80.18±0.60[c]	160.25±0.59[c]	81.83±1.77[c]	78.42±2.35[b]	345.33±0.35[a]	263.50±1.41[a]
0.04M Na_2CO_3	78.98±0.04[d]	165.04±0.76[b]	73.42±0.59[d]	91.63±1.35[a]	323.34±2.71[b]	249.92±2.12[b]
Limewater	83.28±0.45[b]	153.97±1.20[d]	107.53±0.43[b]	46.44±0.84[c]	249.89±1.83[d]	142.36±2.17[d]

Note [a-d] Means with different letters within the same column are significantly different ($p \leq 0.05$).

ดังนั้นจากการศึกษา พบว่า สารละลายเบสมีผลต่อโครงสร้างของแป้งข้าวเจ้า โดยสารละลายเบสจะเข้าไปทำลายส่วนอสัณฐานของเม็ดแป้ง (Nadiha *et al.*, 2010) จึงส่งผลต่อกำลังการพองและการละลาย และค่าการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งข้าวเจ้า สำหรับความเข้มข้นของสารละลายเบสมีผลต่อกำลังการพองและการละลายของแป้งข้าวเจ้า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายเบสค่ากำลังการพองตัวและการละลายมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย นอกจากนี้ชนิดของสารละลายเบสมีผลต่อค่าการคืนตัวของแป้งข้าวเจ้า โดยสารละลายเบสที่ประกอบด้วยโซเดียมไอออนจะส่งผลมากกว่าสารละลายเบสที่มีแคลเซียมไอออน

2. ผลของสารละลายเบสต่อคุณภาพทางกายภาพของตัวลอดช่องไทย

จากการนำตัวลอดช่องไทยที่ได้จากการกวนในน้ำปราศจากไอออน (สภาวะควบคุม) สารละลาย Na_2CO_3 ความเข้มข้น 0.02 และ 0.04 M และน้ำปูนใส มาวิเคราะห์ค่าสีด้วยระบบ CIE L a b และค่าความแน่นเนื้อ (firmness) จากผลการวิเคราะห์ค่าสี ดังแสดงใน Table 4 พบว่า การใช้สารละลาย Na_2CO_3 ทั้ง 2 ระดับความเข้มข้นและน้ำปูนใส มีผลให้ตัวลอดช่องไทยมีค่าความสว่าง (L*) ลดลง ค่าความเป็นสีเขียว (-a*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b*) เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะควบคุม

เมื่อพิจารณาค่าความเป็นสีเขียวของตัวลอดช่องไทยที่ได้จากน้ำใบเตยที่เป็นส่วนผสม พบว่า ตัวลอดช่องไทยที่ใช้สารละลายในสภาวะควบคุมมีค่า pH เป็นกรดอ่อน (6.08) สีของตัวลอดช่องไทยจึงมีสีเขียวปนเหลือง เนื่องจากค่า pH ของสารละลายมีผลต่อคลอโรฟิลล์ โดย H^+ สามารถเปลี่ยนคลอโรฟิลล์ให้กลายเป็นฟีโอไฟติน (pheophytins) โดยเข้าไปแทนที่ Mg^{2+} ในวงแหวนฟีโอไฟติน ส่งผลให้สีเขียวสดกลายเป็นสีเขียวอมเหลือง (Andres-Bello *et al*., 2013) ส่วนตัวลอดช่องไทยที่กวนในสารละลาย Na_2CO_3 และน้ำปูนใส ซึ่งสารละลายมีฤทธิ์เป็นเบส ค่าความเป็นสีเขียวของตัวลอดช่องเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะควบคุม เพราะเมื่อค่า pH เพิ่มขึ้น การทำลายคลอโรฟิลล์ที่เป็นรงควัตถุลดลง นอกจากนี้ยังสามารถรักษาความเป็นสีเขียวได้ (Koca *et al*., 2006)

สำหรับค่าความแน่นเนื้อของตัวลอดช่องไทยที่ใช้สารละลายต่างชนิดกัน พบว่า ตัวลอดช่องไทยที่ใช้สารละลาย Na_2CO_3 และน้ำปูนใส มีค่าความแน่นเนื้อเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะควบคุม จากการทดลองการเปลี่ยนแปลงความหนืด ค่าการคืนตัวมีความสัมพันธ์กับเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ แป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการแช่สารละลาย Na_2CO_3 มีค่าการคืนตัวมากกว่าแป้งในสภาวะควบคุม ดังนั้นจึงทำให้ค่าความแน่นเนื้อของตัวลอดช่องที่กวนด้วย Na_2CO_3 มีค่ามากกว่าตัวลอดช่องในสภาวะควบคุม สำหรับค่าความแน่นเนื้อของตัวลอดช่องไทยที่ใช้น้ำปูนใสเป็นส่วนผสมมีค่าความแน่นเนื้อสูงสุด (10.64 N) ในขณะที่ค่าการคืนตัวต่ำที่สุด อาจอธิบายได้ว่า สตาร์ชสามารถเกิดพันธะกับ Ca^{2+} ได้ โดยที่ Ca^{2+} จะเกิดพันธะกับ OH^- ของสตาร์ช ทำให้เกิดโครงสร้างระหว่างระหว่าง Ca^{2+} กับสตาร์ช ซึ่งอาจเป็นโครงสร้างที่เกิดจากพันธะข้าม (crosslink) (Bryant and Hamaker, 1997; Israkarn and Hongsprabhas, 2017) และจากการศึกษาของ Han *et al.* (2012) พบว่า เส้นก๋วยเตี๋ยวที่ผลิตจากแป้งบักวีต (buckwheat) ผสมกับสารละลาย $Ca(OH)_2$ ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0.4 มีค่าความแน่นเนื้อสูงกว่าเส้นก๋วยเตี๋ยวที่ไม่มีส่วนผสมของ $Ca(OH)_2$ ทั้งนี้น่าจะเกิดจากโครงสร้างตาข่ายของเจลที่แน่นและสม่ำเสมอภายใต้สภาวะที่เป็นเบสโดยมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสตาร์ชกับ Ca^{2+}

Table 4 Color and texture measurement of Thai Lod-Chong

Sample	L*	a*	b*	Firmness (N)
Control	40.58±0.80[a]	-4.21±0.07[c]	30.41±0.11[c]	7.98±0.08[d]
0.02M Na_2CO_3	38.93±0.43[b]	-16.71±0.19[b]	32.62±0.53[b]	9.16±0.37[c]
0.04M Na_2CO_3	36.60±0.77[c]	-18.03±0.14[a]	32.77±0.03[b]	9.79±0.17[b]
Limewater	39.47±0.33[b]	-17.85±0.29[a]	34.66±0.54[a]	10.64±0.46[a]

Note [a-d] means with different letters within the same column are significantly different ($p \leq 0.05$).

สรุป

จากการศึกษาพบว่าสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแป้งและเจลแป้งข้าวเจ้าขึ้นอยู่กับค่า pH ของสารละลาย ความเข้มข้นของสารละลาย และชนิดของสารละลายที่ใช้แช่แป้งข้าวเจ้า ส่งผลให้แป้งข้าวเจ้าที่แช่ในสารละลาย Na_2CO_3 มีฤทธิ์เป็นเบสมากกว่าแป้งข้าวเจ้าที่แช่ในน้ำปราศจากไอออนและน้ำปูนใส และยังมีค่ากำลังการพองและการละลาย และค่าการคืนตัวสูงกว่า แต่อุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด และความหนืดสูงสุดมีค่าต่ำกว่า เมื่อนำแป้งข้าวเจ้ามากวนในสารละลายต่างๆ เพื่อผลิตตัวลอดช่องไทย พบว่า ตัวลอดช่องไทยจากแป้งข้าวเจ้าที่กวนในสารละลายเบสให้ความแน่นเนื้อสูงกว่าสภาวะควบคุม น้ำปูนใสเป็นสารละลายเบสที่ให้ลักษณะเนื้อสัมผัสด้านความแน่นเนื้อที่เหมาะสมและยังให้กลิ่นรสที่ดีสำหรับการผลิตตัวลอดช่องไทยที่มีคุณภาพ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณโครงการเมืองนวัตกรรมอาหารภาคกลาง และขอขอบคุณคณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่สนับสนุนทุนในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

กล้าณรงค์ ศรีรอต และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ. 2546. **เทคโนโลยีของแป้ง**. พิมพ์ครั้งที่ 3. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ภวิษา ภู่กิดาการ. 2558. **การพัฒนาลอดช่องไทยแช่เยือกแข็งลดน้ำตาลและไขมัน**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สถาบันค้นคว้าวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2556. **โครงการพัฒนานวัตกรรมชุดตำรับอาหารไทยเพื่อสุขภาพเชิงพาณิชย์**. 254 น.

สุปราณี แพรศิริ. 2553. **ขนมไทย**. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์เอ็มไอเอส, กรุงเทพฯ.

AACC. 2000. **Approved Methods of American Association of Cereal Chemistry**. 10th ed. St. Paul, Minnesota.

Andres-Bello, A., V. Barreto-Palacios, P. Garcia-Segovia, J. Mir-Bel and J. Martinez-Monzo. 2013. Effect of pH on color and texture of food products. **Food Engineering Reviews** 5: 158-170.

AOAC, 2000, **Official Method of Analysis of AOAC International**, 17th edition. The Association of Official Analytical Chemists. Gaithersburg. Maryland.

Bryant, C.M. and B.R. Hamaker. 1997. Effect of lime on gelatinization of corn flour and starch. **Cereal Chemistry** 74(2): 171-175.

Fu, B.X. 2008. Asian noodles: History, classification, raw materials, and processing. **Food Research International**. 41: 888-902.

Han, L., Z. Lu, X. Hao, Y. Cheng and L. Li. 2012. Impact of calcium hydroxide on the textural properties of buckwheat noodles. Journal of Texture Studies 43: 227-234.

Hedayati, S., M. Majzoobi, F. Shahidi, A. Koocheki and A. Farahnaky. 2016. Effect of NaCl and $CaCl_2$ on physicochemical properties of pregelatinized and granular cold-water swelling corn starches. **Food chemistry** 213: 602-608.

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.

Israkarn, K. and P. Hongsprabhas. 2017. Effect of $CaCl_2$ on the formation of Ca-induced starch aggregates and spherulitic structure in dried starch film. **Drying Technology** 35: 1552-1560.

Karim, A.A., M.Z. Nadiha, F.K. Chen, Y.P. Phuah, Y.M. Chui and A. Fazilah. 2008. Pasting and retrogradation properties of alkaline-treated sago (*Matroxylon sagu*) starch. **Food Hydrocolloids** 22: 1044-1053.

Koca, A., F. Karadeniz and H.S. Burdurlu. 2006. Effect of pH on chlorophyll degradation and colour loss in blanched green peas. **Food Chemistry** 100: 609-615.

Lai, L.N., A.A. Karim, M.H. Norziah and C.C. Seow. 2004. Effects of Na_2CO_3 and NaOH on pasting properties of selected native cereal starches. **Journal of Food Science** 69: 4 249-256.

Nadiha, M.Z., A. Fazilah, R. Bhat and A.A. Karim. 2010. Comparative susceptibilities of sago, potato and corn starches to alkali treatment. **Food Chemistry** 121: 1053-1059.

Newport Scientific Pty, Ltd. 1995. Operation Manual for the series 4 Rapid Visco Analyzer. Australia. 93 p.

Reepholkul K. and S. Charoenrein. 2011. The effect of alkali treatment on the granular morphology and pasting properties of rice flour, pp. 224-229. *In* **Starch Update 2011 The 6th International Conference on Starch Technology.** 13-14 February 2011, Bangkok. Thailand.

Singh, J., O.J. McCarthy, H. Singh, P.J. Moughan and L. Kaur. 2007. Morphological, thermal and rheological characterization of starch isolated from New Zealand Kamo Kamo (Cucurbita pepo) fruit. **Carbohydrate Polymers** 67 (2): 233-244.

Zhou, H., C. Wang, L. Shi, T. Chang, H. Yang and M. Cui. 2014. Effects of salts on physiochemical, microstructural and thermal properties of potato starch. **Food Chemistry** 156: 137-143.

อิทธิพลของการดึงยืดสองทิศทางและการเติมสารเสริมสภาพพลาสติกต่อสมบัติทางกายภาพของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมพอลิเอทิลีนไกลคอล

Influences of Biaxial Stretching and Plasticizer Addition on Improved Physical Properties of Poly(Lactic Acid)/Poly(Ethylene Glycol) Film

ณัฏฐพล โรจนตัณฑ์[1] นพดล เกิดดอนแฝก[2] และ ปิยะวณี จริยะสกุลโรจน์[1*]

Nattapon Rojanatan[1], Noppadon Kerddonfag[2] and Piyawanee Jariyasakoolroj[1*]

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้คอมพาวนด์ของพอลิแลคติกแอซิดผสมพอลิเอทิลีนไกลคอล (PLA/PEG) ได้ถูกขึ้นรูปเป็นฟิล์มบางด้วยเทคนิคการดึงยืดสองทิศทาง เพื่อให้ได้ฟิล์มจากพลาสติกแตกสลายได้ทางชีวภาพที่มีความใส และความยืดหยุ่นสูง สำหรับการใช้งานเป็นบรรจุภัณฑ์อ่อนตัว โดยคณะวิจัยได้ศึกษาผลของความแตกต่างของน้ำหนักโมเลกุลของPEG (6,000 และ35,000 ดาลตัน) ภายใต้สภาวะการดึงยืดสองทิศทาง ที่มีการผันแปรอุณหภูมิ (80 และ90 องศาเซลเซียส) และระยะเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน (0, 30, 60 และ120 วินาที) ซึ่งพบว่าฟิล์มของคอมพาวนด์ PLA/PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุลของ PEG สูง หลังจากผ่านกระบวนการดึงยืดสองทิศทางที่อุณหภูมิการดึงยืด 80 องศาเซลเซียส และอบอ่อนเป็นระยะเวลา 120 วินาที ได้มีความเหนียวสูง (ค่าความต้านทานการดึงยืด 75 MPa และร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด เท่ากับ 85) นอกจากนี้คณะวิจัยยังพบว่าแผ่นฟิล์มดังกล่าว ที่มีองค์ประกอบของ PEG น้ำหนักโมเลกุลสูง 10%wt ยังมีค่าความต้านทานการซึมผ่านของไอน้ำ (WVP) และแก๊สออกซิเจน (OP) ลดลงเท่ากับ 180 g.μm/m^2.hr.atm และ 1,268 cc.mil/m^2.day.atm ตามลำดับ เมื่อเทียบกับฟิล์ม PLA/PEG ชนิดเดียวกันที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการเป่าและไม่ผ่านกระบวนการดึงยืดสองทิศทาง (WVP 266 g.μm/m^2.hr.atm และ OP 1,586 cc.mil/m^2.day.atm) ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการเติมสารเสริมสภาพพลาสติกที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงและกระบวนการดึงยืดสองทิศทางได้เหนี่ยวนำให้โมเลกุลเกิดการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ ทำให้ฟิล์มของ BO-PLA/PEG มีความเหนียวเพิ่มขึ้น และยังคงรักษาความใสของฟิล์มไว้ได้

ABSTRACT

In this study, poly(lactic acid) was blended with poly(ethylene glycol) to prepare PLA/PEG compound, and consequently, processed to form a thin film by biaxial stretching (BO-PLA/PEG film). The biodegradable film obtained was clear and highly flexible which can be further applied for flexible packaging. Molecular weights (MW) of PEG and biaxial stretching conditions were systematically varied (i.e. MW 6,000 and 35,000 Da; biaxial stretching temperatures at 80°C and 90°C; and annealing time after biaxial stretching for 0, 30, 60, and 120 sec). The toughness of BO-PLA/PEG film was improved (tensile strength of 75 MPa and %elongation at break of 85%) when the film was blended with high MW PEG, and then produced by biaxial stretching at 80°C with annealing for 120 sec. Additionally, water vapor and oxygen permeation (WVP and OP) values of this film were decreased to 180 g.μm/m^2.hr.atm and 1,268 cc.mil/m^2.day.atm, respectively; as compared to PLA/high MW PEG film by blown film extrusion which showed WVP of 266 g.μm/m^2.hr.atm, and OP of 1,586 cc.mil/m^2.day.atm. These indicated that addition of high MW plasticizer and biaxial stretching process successfully induced highly-ordered structure, resulting in toughness improvement with remained clarity of the BO-PLA/PEG.

Key Words: Poly(lactic acid), Poly(ethylene glycol), biaxial orientation, Stretching processes, Thermal property, Mechanical property

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

[1]ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Packaging and Materials Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

[2]ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ปทุมธานี 12120

[2]National Metal and Materials Technology Center, National Science and Technology Development Agency, Ministry of Science and Technology, Pathumthani 12120

คำนำ

ปัจจุบันประเทศไทยมีปริมาณพลาสติกมากถึง 2.7 ล้านตัน หรือเฉลี่ย 7,000 ตันต่อวัน แบ่งเป็นถุงพลาสติกร้อยละ 80 หรือ 5,300 ตันต่อวัน หรือประมาณ 2 ล้านตัน (พลเอกดาว์พงษ์ รัตนสุวรรณ, 2558: องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก) อย่างไรก็ดีกำลังการผลิตที่สูงขึ้นในอุตสาหกรรมส่งผลให้เกิดการสะสมปริมาณบรรจุภัณฑ์พลาสติกหลังการใช้งานอย่างรวดเร็ว ก่อให้เกิดปัญหาด้านมลพิษทางสิ่งแวดล้อมที่มาจากการจัดการขยะด้วยวิธีต่างๆ ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาพลาสติกแตกสลายได้ทางชีวภาพขึ้นเพื่อแก้ไขปัญหาขยะพลาสติกได้อย่างมีประสิทธิภาพ อาทิเช่น พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid; PLA) พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Poly butylene succinate; PBS) พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเรต (Poly butylene adipate-co-terephthalate; PBAT) เป็นต้น

โดยในปัจจุบันเรซิน PLA เป็นหนึ่งในพลาสติกแตกสลายได้ทางชีวภาพที่มีกำลังการผลิตในระดับอุตสาหกรรมและนำไปใช้ในทางบรรจุภัณฑ์ที่หลากหลายเนื่องจาก PLA มีสมบัติทางกายภาพที่โดดเด่น ได้แก่ ความใสและความต้านทานต่อแรงดึงสูง (high tensile strength) แต่อย่างไรก็ตามฟิล์มจาก PLA มีลักษณะเปราะแตกหักง่าย ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิการเปลี่ยนเปลี่ยนสภาพแก้วของ PLA สูงกว่าอุณหภูมิห้อง (T_g~ 60 องศาเซลเซียส) และมีอัตราเร็วในการตกผลึกช้า เนื่องด้วยโครงสร้างทางเคมีของ PLA ที่มีหมู่เมทิล ($-CH_3$) เป็นหมู่ข้างเคียงของสายโซ่หลัก (side group) และมีการปนเปื้อนของไอโซเมอร์เชิงแสง (optical isomer) ที่เป็นอุปสรรคต่อการพันเกลียว (helical structure formation) เพื่อตกผลึก

ที่ผ่านมาได้มีการศึกษาและมีการพัฒนาสมบัติของฟิล์ม PLA เพื่อเร่งการตกผลึกและปรับปรุงความเหนียว ซึ่งโดยส่วนใหญ่ได้ทำการเติมสารเร่งตกผลึก (nucleating agent) เช่น ทัลคัม (talc) นาโนเคลย์ (nanoclay) ,แคลเซียมแลคเทต (calcium lactate) และโซเดียมสเตียเรต (sodium stearate) เป็นต้น แต่อย่างไรก็ดีฟิล์มจะมีลักษณะขุ่น นอกจากนี้ยังได้มีการเติมสารเสริมสภาพพลาสติก (plasticizer) เช่น พอลิเอทิลีนไกลคอล (polyethylene glycol/ PEG) พอลิพอพิลีนไกลคอล (polypropylene glycol/ PPG) และ พอลิเอสเทอร์ไดออล (polyester diol/ PED) เป็นต้น ซึ่งสามารถปรับปรุงความยืดหยุ่นและยังคงความใสของฟิล์ม PLA ได้

จากการพิจารณารายงานวิจัยของ Y. H และคณะ (2003) พบว่า PEG เป็นสารเสริมสภาพพลาสติกที่มีประสิทธิภาพสูงในการผสมเข้ากับ PLA เนื่องจาก PEG ไม่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต และอยู่ในสภาวะกึ่งผลึก (semi-crystalline) ที่เสถียร แต่อย่างไรก็ตามพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA/PEG จะพบปัญหาการแยกเฟส (phase separation) เนื่องจาก PEG มีความเป็นขั้วสูงจึงสามารถดูดความชื้นได้เร็วกว่า PLA และมีอัตราการตกผลึกเร็วกว่า PLA อย่างชัดเจนจึงทำให้ PEG สามารถตกผลึกและแยกเฟสออกมาจากเมทริกซ์ของ PLA

ที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาพอลิเมอร์ร่วม (copolymer) ของ PLA และPEG เพื่อปรับปรุงความเข้ากันได้ Y. Lemmouchi และคณะ (2009) ได้เตรียมพอลิเมอร์ร่วมแบบกลุ่ม (block copolymer) ของ PLA และ PEG (PLA-b-PEG) โดยทำการผันแปรน้ำหนักโมเลกุลของ PEG ซึ่งพบว่า PLA-b-PEG ได้ช่วยเสริม PLA และ PEG มีความเข้ากันได้มากขึ้น เนื่องจากสารเติมแต่ง PLA-b-PEG มีโครงสร้างทางเคมีที่คล้ายกับเมทริกซ์ของ PLA และ PEG

ปัจจุบันได้มีการใช้เทคโนโลยีในกระบวนการขึ้นรูปเพื่อปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของฟิล์ม หนึ่งในเทคโนโลยีที่เริ่มมีบทบาทมากขึ้นในอุตสาหกรรมฟิล์มบางคือ เทคนิคการดึงยืด ซึ่งช่วยทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น และฟิล์มยังคงความใส รวมไปถึงการกันการซึมผ่านได้ของไอน้ำ ที่ผ่านมาได้มีการนำเทคนิคการดึงยืดสองทิศทาง (biaxial orientation process) มาใช้กับการผลิต PLA โดยฟิล์ม PLA ที่จัดเรียงตัวสองทิศทาง (BOPLA) (Jyh *et al.,* 2012) จะมีความเหนียวสูง และใส แต่ฟิล์ม BOPLA ยังมีข้อจำกัดในความแข็งแกร่ง (stiffness) ทำให้ฟิล์มไม่อ่อนตัว และมีเสียงดัง เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิเอทิลีนที่ใช้ในบรรจุภัณฑ์อ่อนตัวทั่วไป

ในที่นี้ได้ทำการคอมพาวนด์ PLA กับ PEG และขึ้นรูปเป็นฟิล์มด้วยเทคนิคการดึงยืดสองทิศทาง โดยทำการผันแปรน้ำหนักโมเลกุลของ PEG 2 ระดับ และทำการผันแปรสภาวะที่ใช้ในการดึงยืด (อุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ในการอบอ่อนหลังการดึงยืด) เพื่อศึกษาการปรับปรุงสมบัติเชิงกล และเชิงความร้อนของฟิล์ม BO-PLA/PEG รวมไปถึงการซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจน และไอน้ำ

อุปกรณ์และวิธีการ

1.วัสดุและสารเคมี

พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid; PLA) เกรด 2003D ผลิตโดยบริษัท Nature Works LLC และ พอลิเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol; PEG) น้ำหนักโมเลกุล 6,000 และ 35,000 ดาลตัน ผลิตโดยบริษัท Sigma-Aldrich

2.การเตรียมคอมพาวนด์ของ PLA/PEG และฟิล์ม BO-PLA/PEG

2.1 การเตรียมคอมพาวนด์ของPLA/PEG

ทำการผสม PLA และ PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 6,000 ดาลตัน (PLA/PEG(L)) และ 35,000 ดาลตัน (PLA/PEG(H)) และนำมาเทียบกับ PLA บริสุทธิ์ ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ รุ่น LTE 20-40 (Labtech Engineering Co., Ltd., Thailand) ในช่วงอุณหภูมิ 165-170 องศาเซลเซียส และถูกตัดเป็นเม็ดพลาสติกผสมด้วยเครื่อง Labtech Engineering LZ-120 Cutter

2.2 การขึ้นรูปแผ่นชีทของคอมพาวนด์ของ PLA/PEG

อบเม็ดพลาสติกพอลิเมอร์ผสมของ PLA และ PEG ก่อนการขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสด้วยตู้อบลมร้อน รุ่น FD53 (BINDER, Germany) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และเตรียมแผ่นชีทจากเม็ดพลาสติกพอลิเมอร์ผสมที่ได้จากข้อ 2.1) ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว (Single screw extruder) รุ่น SE-D30L30 ต่อกับสายการหล่อเป็นแผ่นชีท (Cast flim line) รุ่น CF-W400 (CHAREON TUT Co., Ltd., Thailand) ที่อุณหภูมิ 180,180,175,175,170,180 และ180 องศาเซลเซียส ตามลำดับ winding roll, nip roll และ middle roll ที่มีความเร็วรอบเท่ากับ 20,17 และ 7.6 รอบต่อนาทีตามลำดับ

2.3 การดึงยืดแผ่นชีทสองทิศทาง

แผ่นชีทที่ได้จาก Cast film line นำมาตัดขนาด 9.6×9.6 ตารางเซนติเมตร จากนั้นนำไปเข้าเครื่อง Bruckner KARO IV laboratory biaxial stretcher โดยใช้สัดส่วนระยะดึงยืดเมื่อเทียบกับแผ่นชีทก่อนดึงเท่ากับ 3×3 จากนั้นควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในการดึงยืดที่ 80 และ90 องศาเซลเซียส และควบคุมเวลาที่ใช้ในการอบอ่นหลังการดึงยืดที่ 0,30,60 และ120 วินาที ตามลำดับ

Table 1 Experiment working conditions in this study

Sample	PLA (%wt)	Mw of PEG (Dalton)	PEG (%wt)	Stretching temperature (℃)	Annealing time (second)
PG(L') (Unstretched)				-	-
PG(L') 80c NOAN				80	0
PG(L') 80c AN120s	90	6,000	10	80	120
PG(L') 90c NOAN				90	0
PG(L') 90c AN120s				90	120
PG(H') (Unstretched)				-	-
PG(H') 80c NOAN				80	0
PG(H') 80c AN120s	90	35,000	10	80	120
PG(H') 90c NOAN				90	0
PG(H') 90c AN120s				90	120
PLA (Unstretched)				-	-
PLA 80c NOAN				80	0
PLA 80c AN120s	100	-	-	80	120
PLA 90c NOAN				90	0
PLA 90c AN120s				90	120

3.การทดสอบสมบัติของฟิล์ม BO-PLA/PEG

3.1. การทดสอบสมบัติเชิงความร้อน

ทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของฟิล์ม BO-PLA/PEG โดยอาศัยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC) ด้วยเครื่อง DSC 1 STAR^e System เตรียมตัวอย่างโดยตัดแผ่นฟิล์มขนาด 2×2 มิลลิเมตร บรรจุลงในถ้วยอะลูมิเนียม ชั่งน้ำหนักประมาณ 3 มิลลิกรัม ด้วยเครื่องชั่งแบบละเอียด 5 ตำแหน่ง (METTLER TOLEDO Co., Ltd., Thailand) และใช้ถ้วยอะลูมิเนียมเปล่าเป็นตัวอ้างอิง จากนั้นให้ความร้อนตัวอย่างตั้งแต่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียสถึง 250 องศาเซลเซียส และคำนวณปริมาณผลึก (%crystallinity) โดยใช้สมการที่ 3.1

$$\% \text{ Crystallinity} = \frac{\Delta H_{melting} - \Delta H_{cold\ crystallization}}{\Delta H_f \times W_f} \times 100 \quad (3.1)$$

ΔH_f คือ พลังงานที่ใช้ในการหลอมเหลวพอลิเมอร์ที่มีความเป็นผลึก 100% สำหรับ PLA มีค่าเท่ากับ 93 J/g อ้างอิงจาก ASTM D3418

$\Delta H_{cold\ crystallization}$ คือ พลังงานที่ใช้ในการเกิดผลึกเย็นของพอลิเมอร์ตัวอย่าง (J/g)

$\Delta H_{melting}$ คือ พลังงานที่ใช้ในการหลอมเหลวพอลิเมอร์ตัวอย่าง (J/g)

W_f คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของ *PLA* ที่เป็นองค์ประกอบของคอมพาวนด์ของ PLA/PEG

3.2. การทดสอบสมบัติเชิงกล

การทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มโดยตัดตัวอย่างความยาว 15 ซม. และกว้าง 1 นิ้ว ทั้งในแนวตามเครื่องจักร (MD) และแนวขวางเครื่องจักร (CD) สูตรละ 10 ซ้ำ โดยตัวอย่างถูกเก็บในตู้ควบคุมสภาวะที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 52 เป็นเวลา 24 ชั่วโมงก่อนทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง

Instron Universal Testing Machine (Testometric Co. LTD., England) โหลดเซลล์ขนาด 1 กิโลนิวตัน โดยใช้การทดสอบแรงดึงแบบอัตราเร็วในการยืดตัวคงที่ 12.5 มิลลิเมตร/นาที และระยะทดสอบเริ่มต้น 5 เซนติเมตรที่อุณหภูมิห้อง ตามมาตรฐาน ASTM D882-12

3.3. การทดสอบความสามารถในการผ่านได้ของแก๊สออกซิเจน

ตัดตัวอย่างฟิล์มรัศมี 7 เซนติเมตร สูตรละ 3 ซ้ำเพื่อทดสอบความสามารถในการผ่านได้ของแก๊สออกซิเจน (Oxygen transmission rate, OTR) ตามวิธี ASTM D 3985 ตัวอย่างถูกปรับสภาวะด้วยตู้ควบคุมความชื้นที่ควบคุมสภาวะ 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 52 เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และนำตัวอย่างมาทดสอบ ด้วยเครื่อง Oxygen permeation analyzer ค่าการซึมผ่านของออกซิเจน (Oxygen permeability; OP) คำนวณตามสมการที่ 3.2

$$OP = OTR \times Thickness \qquad (3.2)$$

OTR คือ อัตราการซึมผ่านของออกซิเจนผ่านแผ่นฟิล์มตัวอย่าง ($cc/m^2.day.atm$)

OP คือ การซึมผ่านได้ของออกซิเจนผ่านแผ่นฟิล์มตัวอย่าง ($cc.mil/m^2.day.atm$)

3.4. การทดสอบความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำ

ทดสอบความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำของแผ่นฟิล์มด้วยวิธี Desiccant Method ตาม ASTM E96 ซึ่งดำเนินการทดสอบตามมีขั้นตอนต่อไปนี้

3.4.1.ตัดตัวอย่างฟิล์มเป็นวงกลมรัศมี 3.5 เซนติเมตร ตัวอย่างละ 5 ซ้ำ

3.4.2. นำซิลิกาเจลที่ผ่านการอบแห้งซึ่งมีร้อยละของความชื้นสัมพัทธ์ เท่ากับ 0 บรรจุลงในถ้วยทดสอบ และนำตัวอย่างฟิล์มมาวางปิดปากถ้วยผนึกรอบปากถ้วยด้วยขี้ผึ้งพาราฟิน โดยไม่ให้มีรอยรั่ว

3.4.3. นำไปชั่งน้ำหนักอย่างละเอียดด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง รุ่น BP110S (Sartorius, Germany) จากนั้นนำไปวางที่ตู้ควบคุมสภาวะที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 52 พร้อมบันทึกผลการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักทุกๆหนึ่งชั่วโมงในวันแรก หลังจากนั้นชั่งน้ำหนักทุก 24 ชั่วโมงเป็นเวลา 14 วัน

4. การวิเคราะห์ทางสถิติ

ใช้โปรแกรม SPSS Statistics (V.23) ในการวิเคราะห์ทางสถิติเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยวิธี Duncan's New Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

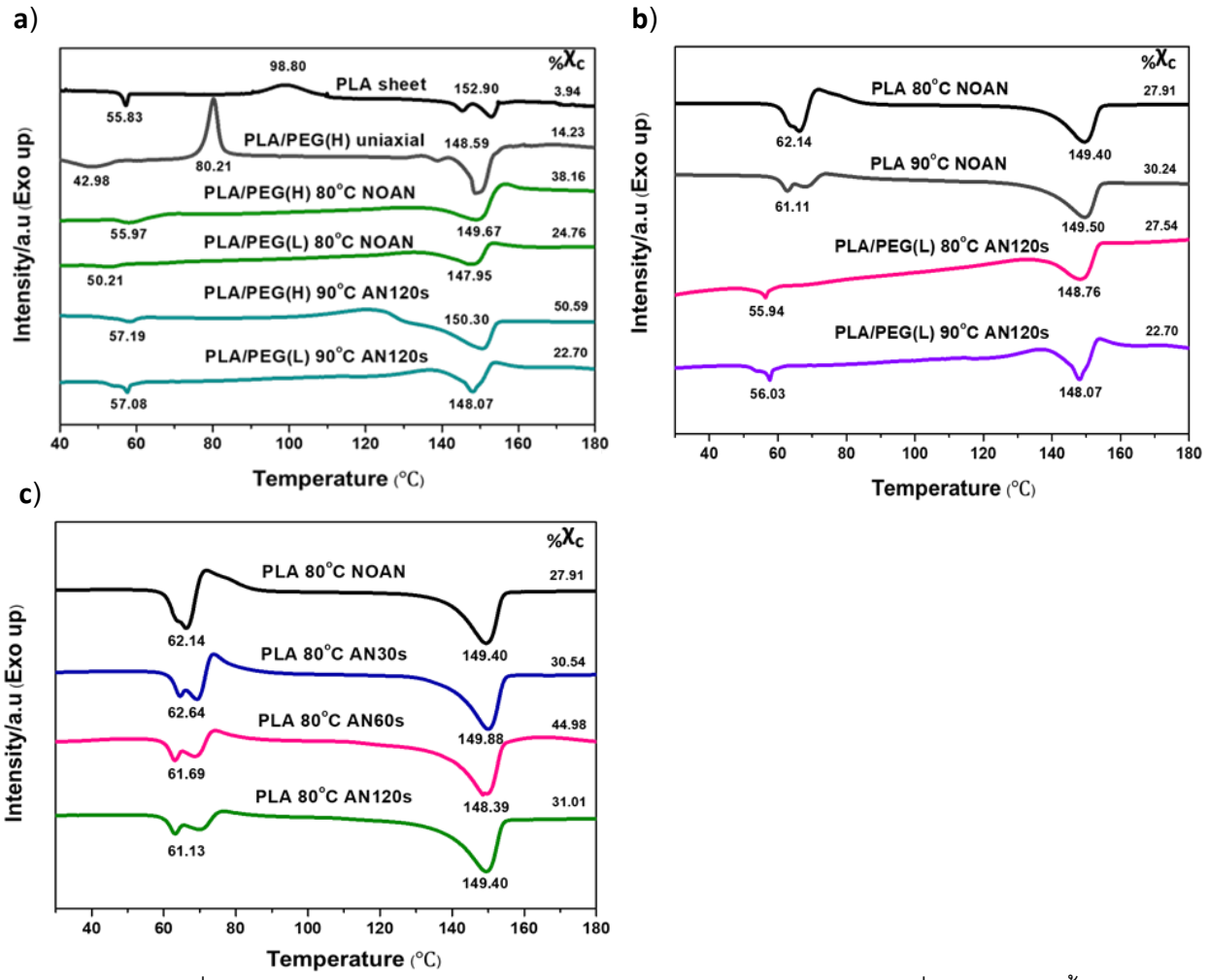
1.สมบัติเชิงความร้อนของฟิล์ม PLA/PEG

1.1 อุณหภูมิสภาวะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature ,T_g)

กราฟ DSC thermogram ดังปรากฏใน Figure ที่ 1a) พบว่า T_g ของ PLA ที่ไม่ผ่านการดึงยืดสองทิศทางมี T_g เท่ากับ 55.83 ℃ โดยเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มคอมพาวนด์ PLA/PEG ที่ไม่ผ่านการดึงยืดสองทิศทาง พบว่าเมื่อเติม PEG น้ำหนักโมเลกุลสูงลงไปส่งผลให้ T_g ของฟิล์มลดลงเหลือ 42.98 ℃ และเมื่อ

เปรียบเทียบปัจจัยด้านน้ำหนักโมเลกุลหลังผ่านการดึงยืดสองทิศทางแล้ว พบว่า ฟิล์มของคอมพาวนด์ PLA/PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุลของ PEG สูงจะมี T_g สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่มีน้ำหนักโมเลกุลของ PEG ต่ำกว่าเล็กน้อย

เมื่อวิเคราะห์อิทธิพลของเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน และอุณหภูมิที่ใช้ในการดึงยืด ดังปรากฏใน Figure ที่ 1b),1c) พบว่า เมื่อเพิ่มเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน(120 วินาที) และอุณหภูมิที่ใช้ในการดึงยืด(90℃) ส่งผลให้เอนทาลปี ณ อุณหภูมิสภาวะคล้ายแก้วมีแนวโน้มลดลงสังเกตได้จากพื้นที่ได้กราฟการดูดพลังงานของสายโซ่ mesophase ที่เกิดขึ้นโดยลดส่วน intermediate phase ของ PLA ลง ซึ่งชี้ให้เห็นว่าฟิล์มที่ผ่านการดึงยืด



สองทิศทางเหนี่ยวนำให้เกิดการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ และเกิดความเป็นผลึกที่สมบูรณ์มากขึ้น

Figure1 : DSC thermograms of BO_PLA/PEG film with varied PEG a) molecular weights, b) stretching temperature and c) annealing time

1.2 อุณหภูมิการเกิดผลึกเย็น (Cold crystallization , T_{cc})

ลักษณะของพีค ณ อุณหภูมิการเกิดผลึกเย็นของ PLA ดังปรากฏใน Figure ที่ 1a) พบว่า PLA Sheet และ PLA/PEG(H) uniaxial ที่ไม่ได้ผ่านการดึงยืดสองทิศทางจะพบพีคลักษณะฐานกว้างที่อุณหภูมิ 98.80 และ

80.21 ℃ ตามลำดับ เนื่องจากการเกิด recrystallization ของผลึกรูปแบบ δ-form ของPLA และเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่ผ่านการดึงยืดสองทิศทาง ดังปรากฏใน Figure ที่ 1b),1c) จะไม่พบ T_{cc} ของPLA ซึ่งชี้ให้เห็นถึงการปรับปรุงความเสถียรทางความร้อนในฟิล์ม BO-PLA/PEG

1.3 อุณหภูมิการหลอมเหลว (Melting point temperature ,T_m)

ลักษณะของพีค ณ อุณหภูมิการหลอมเหลวของ PLA ดังปรากฏใน Figure ที่ 1a) พบว่า PLA Sheet และ PLA/PEG(H) uniaxial ที่ไม่ได้ผ่านการดึงยืดสองทิศทางจะพบพีคที่เกิดขึ้น ณ อุณหภูมิ 152.90 และ 148.59 ℃ ตามลำดับ ซึ่งลักษณะของพีค 2 ตำแหน่งที่เกิดขึ้นแสดงถึงผลึกของ PLA ที่เกิดขึ้น 2 รูปแบบ ได้แก่ δ-form และ α-form โดยหลังผ่านการดึงยืดสองทิศทางแล้วจะสังเกตได้ว่าลักษณะของพีคที่เกิดขึ้นจะเป็นพีคที่เกิดขึ้นเพียงตำแหน่งเดียวฐานกว้างซึ่งสามารถบ่งบอกถึงความสมบูรณ์ของผลึก (Perfection of crystals) ที่เพิ่มขึ้น และเมื่อวิเคราะห์อิทธิพลด้านน้ำหนักโมเลกุลของ PEG ที่ใช้หลังผ่านการดึงยืดสองทิศทาง พบว่าการใช้ PEG น้ำหนักโมเลกุลสูงส่งผลให้อุณหภูมิการหลอมเหลวเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ PEG น้ำหนักโมเลกุลต่ำ

จาก Figure ที่ 1b),1c) เมื่อวิเคราะห์อิทธิพลของเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน และอุณหภูมิที่ใช้ในการดึงยืด พบว่า อุณหภูมิการหลอมเหลวมีค่าอยู่ในช่วงเดียวกัน (~149 ℃) และพบลักษณะของพีคที่เกิดขึ้น ณ อุณหภูมิการหลอมเหลวเพียงตำแหน่งเดียว

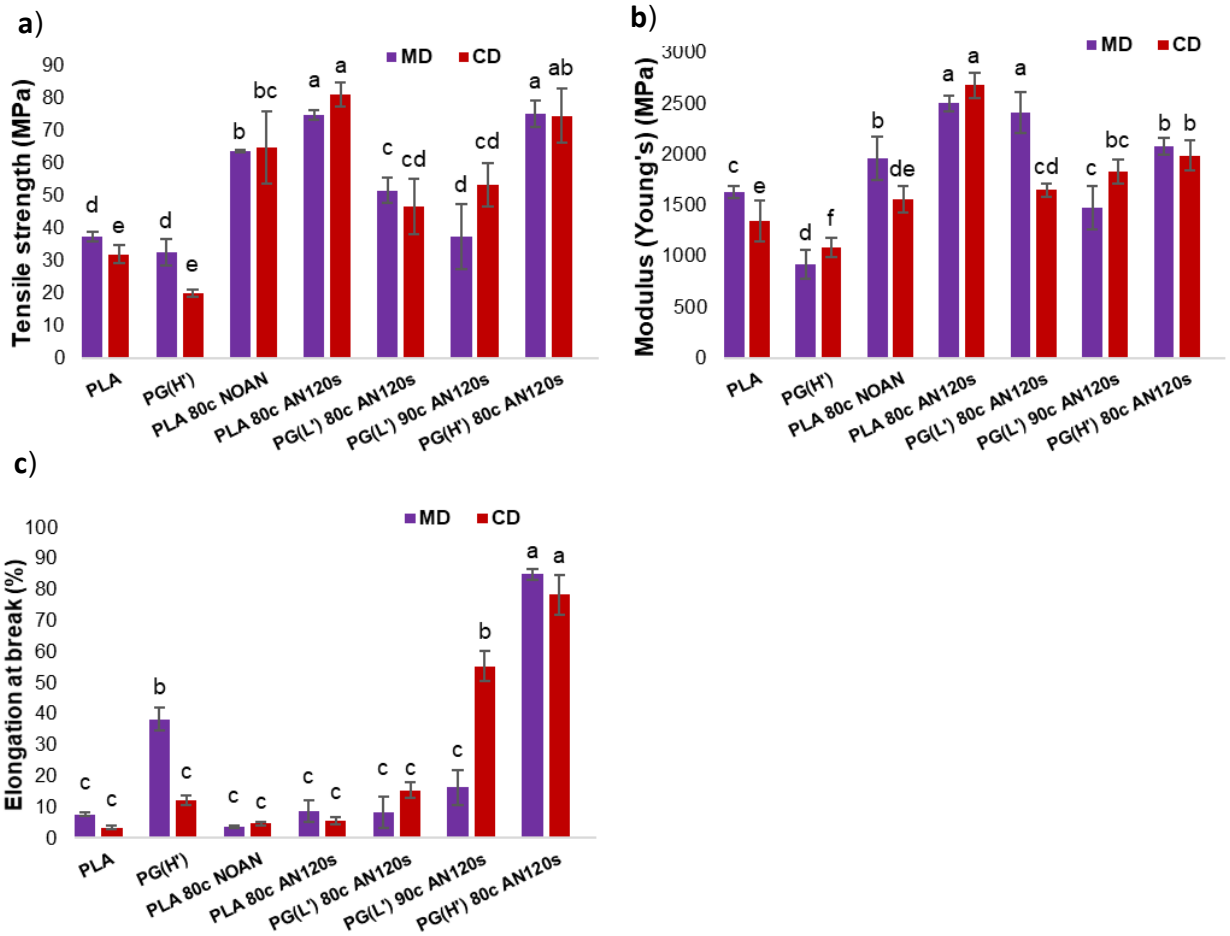
1.4 ปริมาณผลึก (Percent of crystallinity)

ปริมาณผลึกที่เกิดขึ้นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเติม PEG ลงไปสังเกตได้จาก Figure ที่ 1a) PLA Sheet และ PLA/PEG(H) uniaxial มีค่าเท่ากับ 3.94% และ 14.23% ตามลำดับ โดยเมื่อผ่านการดึงยืดสองทิศทางแล้วจะสังเกตได้ว่าปริมาณผลึกจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด และเมื่อวิเคราะห์อิทธิพลด้านน้ำหนักโมเลกุลของ PEG ที่ใช้หลังผ่านการดึงยืดสองทิศทาง ฟิล์มคอมพาวนด์ PLA/PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุลของ PEG สูง (38.16%) ส่งผลให้ปริมาณผลึกเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักโมเลกุลที่ต่ำกว่า (24.76%)

2.สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม PLA/PEG

จากการทดสอบแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม BOPLA/PEG พบว่า ค่าความต้านทานแรงดึง และมอดุลัสของยังส์ดังปรากฏใน Figure ที่ 1a),1b) พบว่า เมื่อเติม PEG ลงไปส่งผลให้ช่วยลดความแข็งเปราะของ PLA ได้ โดยฟิล์มหลังผ่านการดึงยืดสองทิศทางแล้ว พบว่า ค่าความต้านทานแรงดึง และมอดุลัสของยังส์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างสมดุลทั้งด้าน MD และCD เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุชนิดเดียวกันที่ไม่ได้ผ่านการดึงยืดสองทิศทาง และเมื่อวิเคราะห์อิทธิพลด้านน้ำหนักโมเลกุลของ PEG ที่ใช้ พบว่าฟิล์มคอมพาวนด์ PLA/PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุลของ PEG สูงกว่าส่งผลให้แนวโน้มของค่าความต้านทานแรงดึง และมอดุลัสของยังส์เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่มีน้ำหนักโมเลกุลของ PEG ที่ต่ำกว่า อีกทั้งเมื่อวิเคราะห์ปัจจัยด้านเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน พบว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการอบอ่อนส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึง และค่ามอดุลัสของยังส์เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (เปรียบเทียบได้จาก PLA 80c NOAN และ PLA 80c AN120s)

จากกราฟการยืดตัว ณ จุดขาดดังปรากฏใน Figure ที่ 1c) พบว่า เมื่อเติม PEG ลงไปส่งผลให้ช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นและความเหนียวมากยิ่งขึ้นเมื่อเทียบกับ PLA ที่ไม่ได้ผ่านการดึงยืดสองทิศทาง โดยฟิล์มหลังผ่านการดึงยืดสองทิศทางแล้ว พบว่าค่าการยืดตัว ณ จุดขาดขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุลของ PEG ที่ใช้ โดยฟิล์มคอมพาวนด์ PLA/PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุลของ PEG สูงกว่าส่งผลให้แนวโน้มของค่าการยืดตัว ณ จุดขาดเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่มีน้ำหนักโมเลกุลของ PEG ที่ต่ำกว่า อีกทั้งปัจจัยของอุณหภูมิที่ใช้ในการดึงยืดที่เพิ่มขึ้น (90℃) ส่งผลให้แนวโน้มของค่าการยืดตัว ณ จุดขาดเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับอุณหภูมิที่ 80 ℃ ทั้งด้าน MD



และ CD

Figure2 : Tensile strength, Modulus (Young's) and Elongation at break of BO_PLA/PEG films

3.ความสามารถในการผ่านได้ของแก๊สออกซิเจนของฟิล์ม PLA/PEG

ค่าการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน (Oxygen Permeability) ดังปรากฏใน Figure3 พบว่าเมื่อเติม PEG น้ำหนักโมเลกุลต่ำลงไป (1,496.25 cc.mil/m^2.day.atm) ส่งผลให้ค่า OP มีแนวโน้มลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับ PLA ที่ไม่ได้ผ่านการดึงยืดสองทิศทาง (1,667.07 cc.mil/m^2.day.atm) โดยฟิล์มหลังผ่านการดึงยืดสองทิศทางแล้ว พบว่าฟิล์มคอมพาวนด์ PLA/PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุลของ PEG ต่ำกว่าส่งผลให้ค่าการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่มีน้ำหนักโมเลกุลของ PEG ที่สูงกว่า (885.87 และ 1,267.78

cc.mil/m^2.day.atm ตามลำดับ) จึงสรุปได้ว่าการใช้ PEG เป็นสารเสริมพลาสติกพร้อมกับกระบวนการดึงยืดสองทิศทางสามารถพัฒนาสมบัติการป้องกันการซึมผ่านของออกซิเจนของฟิล์ม BO-PLA/PEG ให้สามารถเป็นฟิล์มที่มี Barrier ที่ดียิ่งขึ้น

4.ความสามารถในการผ่านได้ของไอน้ำของพอลิเมอร์ผสม PLA/PEG

จากผลการทดลองความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำ (Water Vapor Permeability) ด้วยวิธี Desiccant method ดังปรากฏใน Figure3 พบว่าเมื่อเติม PEG น้ำหนักโมเลกุลต่ำและสูงที่ไม่ได้ผ่านการดึงยืดสองทิศทางลงไป (246.85 และ 265.35 g.µm/m^2.hr.atm ตามลำดับ) ส่งผลให้ค่า WVP มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ PLA ที่ไม่ได้ผ่านการดึงยืดสองทิศทาง (177.79 g.µm/m^2.hr.atm) เนื่องจากความเป็นขั้วของ PEG ที่ประกอบไปด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (–OH group) จึงทำให้วัสดุมีความชอบน้ำมากยิ่งขึ้น และพบว่าฟิล์มหลังผ่านการดึงยืดสองทิศทางแล้วค่าWVP มีแนวโน้มที่เปลี่ยนแปลงไม่มากนัก ยกเว้นฟิล์มของคอมพาวนด์ PLA/PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุลของ PEG ต่ำ หลังจากผ่านกระบวนการดึงยืดสองทิศทางที่อุณหภูมิการดึงยืด 80 องศาเซลเซียส พบว่ามีค่า WVP ที่ลดลงอย่างมีประสิทธิภาพ (163.51 g.µm/m^2.hr.atm) และสามารถเปรียบเทียบกับ ฟิล์ม PLA หลังผ่านการดึงยืด 2 ทิศทางได้ (138.23 g.µm/m^2.hr.atm)

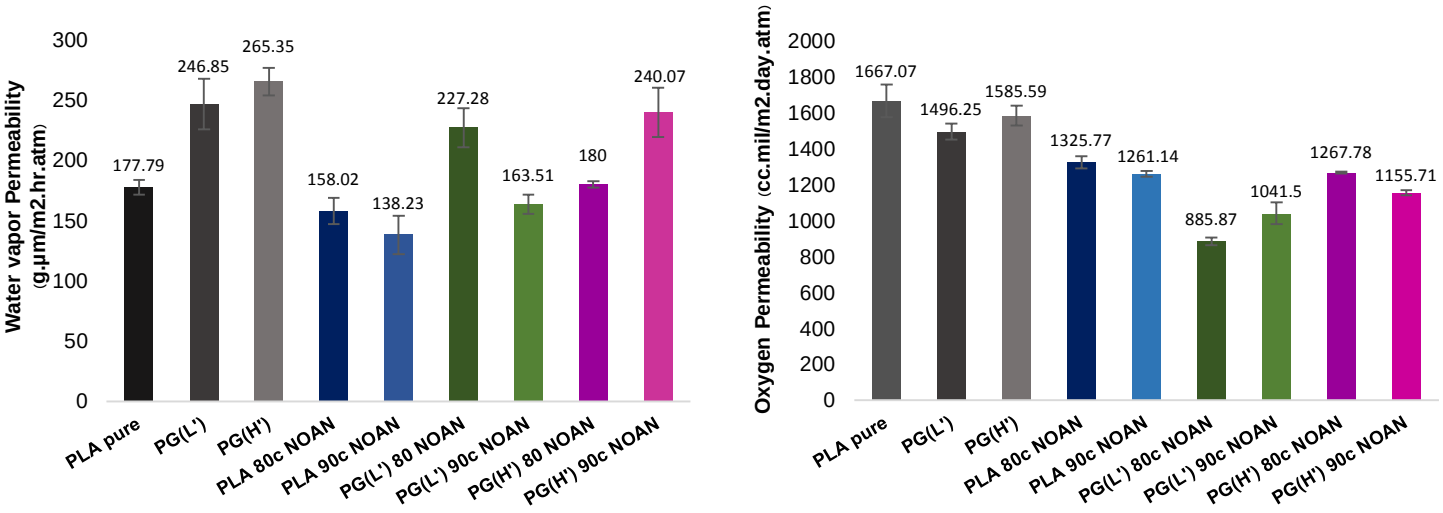


Figure3 : Water vapor permeability(WVP) and Oxygen permeability(OP) of BO_PLA/PEG film with varied process of stretching.

สรุป

การพัฒนาฟิล์มของคอมพาวนด์ PLA/PEG ที่ 10% wt PEG ที่ผ่านกระบวนการดึงยืดสองทิศทาง โดยศึกษาผลของความแตกต่างของน้ำหนักโมเลกุลของ PEG (6,000 และ35,000 ดาลตัน) ที่มีการผันแปรอุณหภูมิ (80 และ 90 องศาเซลเซียส) และระยะเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน (0, 30, 60 และ120 วินาที) ซึ่งพบว่าฟิล์มของคอมพาวนด์ PLA/PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุลของ PEG สูง หลังจากผ่านกระบวนการดึงยืดสองทิศทางที่อุณหภูมิการดึงยืด 80 องศาเซลเซียสจะมีความเหนียวและยืดหยุ่นมากยิ่งขึ้นทั้งตามแนว MD และ CD รวมไปถึงสมบัติทางความร้อน, การป้องกันการซึมผ่านของแก๊ส และไอน้ำที่ดี จึงสรุปได้ว่า ผลของงานวิจัยนี้สามารถปรับปรุง

ข้อจำกัดของ PLA โดยยังคงความใสของฟิล์มไว้ได้เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นฟิล์มอ่อนตัวสำหรับการใช้แล้วทิ้งจากพลาสติกชีวภาพ และฟิล์มบรรจุอาหารที่สามารถป้องกันการซึมผ่านของแก๊สได้ เพื่อให้เป็นที่ยอมรับในอุตสาหกรรมพลาสติกมากขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ที่เอื้อเฟื้อสำหรับเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

พลเอกดาว์พงษ์ รัตนสุวรรณ. 2558. ประเทศไทยมีปริมาณขยะพลาสติกและโฟมมากถึง 2.7 ล้านตันซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งของภาวะโลกร้อน. แหล่งที่มา: www.tgo.or.th/2015/thai/news_detail.php?id=641 3 ธันวาคม 2561

Hassouna F., J. Raquez., F. Addiego., P. Dubois., V. Toniazzo and D. Ruch. 2011. New approach on the development of plasticized polylactide (PLA) : Grafting of poly(ethylene glycol) (PEG) via reactive extrusion. **European Polymer Journal**. 47: 2134-2144

Jyh W., M. Yen., C. Wu., C. Li and M. Kuo. 2012. Effect of biaxial stretching on thermal properties, shrinkage and mechanical properties of poly (lactic acid) films. 21:303-311

Lui J., S. Zhang., L. Zhang., L. Liu and Y. Bai. 2014. Uniaxial stretching of polylactide with different initial crystalline morphologies and temperature effect. **European Polymer Journal**. 61: 83-92

Pluta M. and E. Piorkowska. 2015. Tough and transparent blends of polylactide with block copolymer of ethylene glycol and propylene. **Polymer Testing**. 41: 209-218

Yahia L., M. Murariu., A. Santos., A. Amass., E. Schacht and P. Dubois. 2009. Plasticization of poly(lactide) with blends of tributyl citrate and low molecular weight poly(D,L-lactide)-b-poly(ethylene glycol) copolymers. **European Polymer Journal**. 45: 2839-2848

Y. H., Y.S. Hu., V. Topolkaraev., A. Hiltner and E. Baer. 2003. Crystallization and phase separation in blends of high stereoregular poly(lactide) with poly(ethylene glycol). **Polymer**. 44: 5681-5689

Z. K. and E. Piorkowska. 2005. Crystallization, structure and properties of plasticized poly(L-lactide). **Polymer**. 46:10290-10300

การประเมินปริมาณโปรตีนในแป้งฟลาวและสตาร์ชมันสำปะหลังด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี

Evaluation of Protein Content of Cassava Flour and Starch using Near Infrared Spectroscopy

อรวรรณ จิตต์ธรรม[1*] และ จารุวรรณ บางแวก[1]

Orawan Jittham[1*] and Charuwan Bangwaek[1]

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยเพื่อศึกษาการนำเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี มาใช้ในการประเมินปริมาณโปรตีนในแป้งฟลาวและสตาร์ชมันสำปะหลัง โดยรวบรวมมันสำปะหลังที่อายุเก็บเกี่ยวและสายพันธุ์ต่างๆกัน นำไปทำแป้งฟลาวและแป้งสตาร์ช จำนวน 240 ตัวอย่าง จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 800-2500 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง Near Infrared Spectrophotometer(NIRS) และวิเคราะห์หาปริมาณโปรตีนด้วยวิธีมาตรฐานในห้องปฏิบัติการกองวิจัยและพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตร กรมวิชาการเกษตร ในปี 2560-2561 หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงของแป้งมันสำปะหลังกับปริมาณโปรตีนและสมการถดถอยเชิงสมการเส้นด้วยวิธี Partial Least Square (PLS) Regression โดยใช้โปรแกรม The Unscrambler ผลการทดลองพบว่าสมการประเมินปริมาณโปรตีนในแป้งฟลาวและสตาร์ชมันสำปะหลังมีค่าสัมประสิทธ์สหสัมพันธ์สูง(R) = 0.98 และค่าความคลาดเคลื่อนในการประเมินต่ำ (Standard Error of Prediction, SEP)=0.15% จากการทดลองสรุปได้ว่าสมการที่ได้สามารถนำไปใช้ประเมินปริมาณโปรตีนในแป้งฟลาวและสตาร์ชมันสำปะหลังได้

ABSTRACT

The aim of this research was to evaluate the protein contents in cassava flour and starch by using Near Infrared Spectroscopy (NIRS). Two hundred and forty samples of cassava flour and starch obtained from different varieties of cassava and harvested at different time intervals were collected. Samples were analyzed for protein contents by reference method and by scanning with NIRS at wave length 800-2500 nanometer. Current study was conducted at Postharvest and Product Processing Research Development Division, Department of Agriculture during the year 2016-2017. The Unscrambler software was used for Partial Least Squares regression. Results of modeling showed a high correlation coefficient (R=0.98) and low standard error of prediction (SEP=0.15%). Results suggested that NIRS technique is effective to evaluate protein contents in cassava flour starch.

Key Words: Near Infrared Spectroscopy, Protein, cassava flour, Starch

* Corresponding author; e-mail address: oji036@hotmail.com

[1]กองวิจัยและพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตร กรมวิชาการเกษตร กรุงเทพฯ 10900

[1]Postharvest and Processing Research and Development Division, Department of Agriculture, Bangkok 10900

คำนำ

แป้งเป็นหนึ่งในผลิตภัณฑ์จากพืชที่สำคัญต่อมนุษย์ แหล่งที่มาหลักของแป้งคือธัญพืช เช่น ข้าว ข้าวโพด ข้าวสาลี และพืชหัว เช่น มันฝรั่ง และมันสำปะหลังเป็นต้น มันสำปะหลังเป็นพืชหัวชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของไทยโดยใช้บริโภคเป็นอาหาร และแปรรูปเป็นวัตถุดิบในภาคอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมแป้งแปรรูปเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆได้หลากหลาย เช่น แป้งที่ใช้ทำอาหาร ขนม และเครื่องปรุง นอกจากนี้ยังนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการทอผ้า กระดาษ และแอลกอฮอล์ เป็นต้น (สุภัทร, 2561) อุตสาหกรรมแป้งจึงมีความสำคัญ โดยแป้งแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ แป้งฟลาวและแป้งสตาร์ช แป้งฟลาว คือคาร์โบไฮเดรตที่มีส่วนประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนเป็นส่วนใหญ่ โดยยังมีส่วนประกอบอื่นๆ เช่น โปรตีน ไขมัน ใยอาหาร และความชื้นรวมทั้งส่วนประกอบอื่นๆอยู่รวมอยู่ในปริมาณมาก ส่วนแป้งสตาร์ช (starch) คือแป้งที่สกัดเอาโปรตีน ไขมัน สารสีและเกลือแร่ออกให้เหลือน้อยที่สุด (กล้าณรงค์ และ เกื้อกูล, 2550) องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของแป้งเป็นสิ่งสำคัญ ซึ่งจะแตกต่างกันขึ้นกับสายพันธุ์ สภาพแวดล้อมในการเพาะปลูก อายุการเก็บเกี่ยว กระบวนการผลิตแป้งและการเก็บรักษา เป็นต้น (Noda *et al*., 2003; Tester and Kakalas, 2001; Sriroith *et al*.,1998; Sriroith *et al*.,1999*)* คุณสมบัติเหล่านี้ส่งผลต่อคุณลักษณะและคุณภาพของแป้งรวมทั้งการนำไปใช้ประโยชน์ การวิเคราะห์คุณภาพและองค์ประกอบทางเคมีของแป้งก่อนการบริโภคหรือการนำไปทำผลิตภัณฑ์จึงเป็นสิ่งจำเป็น โปรตีนเป็นองค์ประกอบทางเคมีหนึ่งของแป้งที่มีผลต่อคุณภาพแป้ง โดย มาตรฐาน มอก. 274-2521 กำหนดคุณภาพแป้งสตาร์ชมันสำปะหลังชั้นที่ 1-3 ต้องมีปริมาณโปรตีนไม่เกิน 0.3% (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2535) ปัจจุบันการวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนด้วยวิธีมาตรฐานในห้องปฏิบัติการต้องใช้เครื่องมือและสารเคมีหลายชนิด ใช้เวลานาน และผู้ดำเนินการต้องมีความชำนาญ

Near Infrared Spectroscopy (NIRS) เป็นเทคนิคการประเมินที่ไม่ทำลายตัวอย่าง สามารถตรวจวิเคราะห์รวดเร็ว ปลอดภัย และไม่ใช้สารเคมี และใช้กันอย่างแพร่หลาย เช่น ประเมินปริมาณโปรตีนในข้าว (Jittham and Bangwaek, 2010) ปริมาณโปรตีน Tryptophaneและ lycene ในข้าวโพด (Rosales *et al*., 2011) ความหนืดของแป้งสตาร์ชมันสำปะหลัง (จารุวรรณ และคณะ, 2552) และใช้ในอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ เช่น อาหาร ยา และเครื่องสำอาง (Blanco *et al*., 2007; Bock and Conelly, 2008; Sakudo, 2016) เป็นต้น ซึ่งเทคนิคNIRS ใช้หลักการการสร้างสมการจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Coefficient of correction) หรือ R ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงเนียร์อินฟราเรดที่ส่องผ่านวัตถุที่ต้องการวิเคราะห์และค่าที่วิเคราะห์จากห้องปฏิบัติการ เมื่อได้สมการที่มีค่าความสัมพันธ์สูง ค่าความคลาดเคลื่อนในการประเมิน (Standard Error of Prediction, SEP) ต่ำ สามารถนำสมการที่ได้ใช้ทำนายค่าของตัวอย่างแทนการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการได้ วัตถุประสงค์ของการทดลองเพื่อศึกษาการนำเทคนิค NIRS ไปใช้ในการประเมินความปริมาณโปรตีนในแป้งฟลาวและแป้งสตาร์ชมันสำปะหลังโดยไม่ทำลายตัวอย่างแทนการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมตัวอย่าง

รวบรวมมันสำปะหลังที่อายุการเก็บเกี่ยวและสายพันธุ์ต่างๆกันมาผลิตแป้งฟลาวและสตาร์ช จำนวน 240 ตัวอย่าง โดยนำหัวมันสำปะหลังมาล้างทำความสะอาด ปอกเปลือก นำไปผลิตแป้งฟลาวโดยหั่นเป็นชิ้นบางๆ

นำไปตากแดดให้แห้ง นำมาบดให้ละเอียดและร่อนด้วยตะแกรงขนาด 150 ไมโครเมตร ผลิตแป้งสตาร์ชโดยการนำหัวมันสำปะหลังมาสับให้เป็นชิ้นเล็กๆ ใช้เครื่องปั่นชิ้นมันให้ละเอียดโดยเติมน้ำในขณะปั่นจะได้น้ำแป้งที่มีลักษณะข้น จากนั้นนำไปกรองกากและสลัดน้ำออก นำแป้งหมาดไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จนแป้งมีความชื้นประมาณ 14% จากนั้นนำไปร่อนด้วยตะแกรงขนาด 150 ไมโครเมตร วัดการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง Near Infrared Spectrometer รุ่น 6500 โดยบรรจุตัวอย่างแป้งประมาณ 5 กรัมลงในอุปกรณ์บรรจุตัวอย่าง ใช้หลักการสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่น 800-2500 นาโนเมตร

ประเมินปริมาณโปรตีน

วิเคราะห์หาปริมาณโปรตีน ด้วยวิธี Nitrogen combustion (AOAC, 2006) ด้วยเครื่อง Nitrogen combustion รุ่น CN628 คำนวณปริมาณโปรตีน(%) = %N x 6.25

สร้างสมการประเมินโปรตีนในแป้งฟลาวและสตาร์ช

นำข้อมูลค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 800-2500 นาโนเมตร และค่าการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ มาทำสมการโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปสร้างสมการโดยใช้หลักสถิติ Partial Least Square (PLS) regression แบบ Full cross validation จากโปรแกรม The Unscrambler® version 9.7 (Camo, Oslo, Norway) เลือกสมการที่มีประสิทธิภาพในการประเมิน โดยดูจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient: R) ให้ใกล้เคียง 1 ค่าความคลาดเคลื่อนในการวิเคราะห์ (Standard Error of Calibration: SEC) ค่าความคลาดเคลื่อนในการประเมิน (Standard Error of Prediction: SEP) และค่าเฉลี่ยของผลต่างระหว่างค่าที่ได้จากวิธีอ้างอิงกับค่าที่ได้จาก NIRS(Averages of difference between actual and NIR values, Bias) ต่ำ

การประเมินความถูกต้องแม่นยำของสมการ

ทดสอบความแม่นยำของสมการโดยนำสมการที่ได้ไปใช้ประเมินปริมาณโปรตีนในตัวอย่างแป้งฟลาวและสตาร์ชมันสำปะหลังที่ไม่อยู่ในชุดการสร้างสมการ เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของวิธีการที่ประเมินด้วยเทคนิค NIRS และวิธีมาตรฐานที่วิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ โดยใช้สถิติ t-test

ผลและวิจารณ์การทดลอง

นำตัวอย่างแป้งฟลาวและแป้งสตาร์ชมันสำปะหลังจำนวน 240 ตัวอย่างไปวัดค่าการดูดกลืนแสงในย่าน Near Infrared ที่ความยาวคลื่น 800-2500 นาโนเมตร พบว่าแป้งสตาร์ชสามารถดูดกลืนแสงได้ดีกว่าแป้งฟลาว และที่ความยาวคลื่น 1450 1920 และ 2050 นาโนเมตร (Figure1) มีความสัมพันธ์กับปริมาณแป้งและโปรตีนในตัวอย่าง (Osborne *et al*., 1993) ใกล้เคียงกันกับแป้งสาลีที่ดูดกลืนแสงได้ดีที่ความยาวคลื่น 2056 นาโนเมตร ซึ่งเป็น Absorption band ของสารกลุ่มโปรตีน (ณรงค์พันธ์, 2009) จากนั้นนำตัวอย่างแป้งทั้ง 2 ชนิดมาวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนในห้องปฏิบัติการ โดยวิธี Nitrogen combustion พบว่า แป้งฟลาวและแป้งสตาร์ชมันสำปะหลังมีปริมาณโปรตีนอยู่ในช่วง 0.18-2.78% (Table1)

การสร้างสมการประเมินโปรตีนในแป้งฟลาวและสตาร์ชด้วยเทคนิค NIRS

สร้างสมการประเมินปริมาณโปรตีนในแป้งฟลาวและสตาร์ชมันสำปะหลังจำนวน 240 ตัวอย่าง ด้วยวิธี PLS regression แบบ Full cross validation โดยใช้ความยาวคลื่น 800-2500 นาโนเมตร พบว่า สมการโปรตีนมีค่า

ความสัมพันธ์สูง โดยมีค่าสัมประสิทธ์สหสัมพันธ์ (R) เท่ากับ 0.98 ซึ่งค่า R ที่อยู่ในช่วง ± 0.96-0.98 หมายถึง สมการสามารถใช้ในการประยุกต์ใช้และการประกันคุณภาพได้ (William, 2007) นอกจากนี้จากผลการทดลองมีค่า SEC และค่า SEP ต่ำ เท่ากับ 0.13% และ 0.15% ตามลำดับ Bias เท่ากับ 0.0007% มีปัจจัยที่เกี่ยวข้องในสมการ (Factor, F) จำนวน 9 ปัจจัย และค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานจากค่าเฉลี่ยของการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ(SD)เท่ากับ 0. 83% (Table2) Chen และคณะ (2008) ใช้เทคนิค NIRS ในการประเมินปริมาณโปตีนในแป้งฟลาวของข้าว พบว่ามีค่าสัมประสิทธ์การพิจารณา (Coefficient of determination, R^2) สูง คือ 0.99 เช่นเดียวกันกับการประเมินโปรตีนในแป้งสาลีที่มีค่า R^2 เท่ากับ 0.99 (Vasquez *et al.,* 2007) และเทคนิค NIRS สามารถใช้ในการควบคุมคุณภาพแป้งฟลาว โดยประเมินปริมาณโปรตีน ความชื้น สี ขนาดอนุภาค และความเสียหายของแป้งได้อย่างรวดเร็วและถูกต้องแม่นยำ (Osbone *et al.,* 2007)

ค่า Regression coefficient

ค่า Regression coefficient จากสมการที่วิเคราะห์ทางสถิติด้วยโปรแกรม The Unscrambler พบว่าสมการประเมินปริมาณโปรตีนในแป้งฟลาวและสตาร์ชมันสำปะหลังมีค่า Regression coefficient สูงที่ความยาวคลื่น 970 1960 2000 2200 และ 2294 นาโนเมตร (Figure 2) ซึ่งที่ความยาวคลื่น 1980 และ 2180 นาโนเมตร มีความสำพันธ์กับปริมาณโปรตีน (William and Norris, 2001) ในแป้งฟลาวและสตาร์ชมันสำปะหลัง

การประเมินความถูกต้องแม่นยำของสมการ

จากการนำสมการที่ได้มาใช้ประเมินปริมาณโปรตีนในตัวอย่างแป้งฟลาวและสตาร์ชมันสำปะหลัง พบว่ามีค่า SEP และ Bias ต่ำ เท่ากับ 0.15% และ 0.0007% ตามลำดับ (Figure 3) เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการประเมินโดยใช้เทคนิค NIRS กับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ มีค่าความแตกต่างเท่ากับ -0.16-0.20 (Table 3) ทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของทั้ง 2 วิธี ด้วยสถิติ t-test พบว่า ค่าที่ได้จากการประเมินด้วยเทคนิค NIRS กับค่าวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ดังนั้นสามารถนำเทคนิค NIRS มาให้ประเมินปริมาณปริมาณโปรตีนในแป้งฟลาวและสตาร์ชได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ใช้เวลารวดเร็วและไม่ทำลายตัวอย่าง

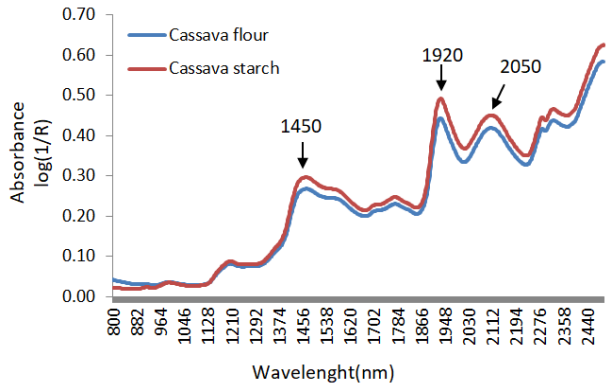


Figure 1 The original NIR spectra of cassava flour and starch at wavelength region 800-2500 nm

Table 1 The characteristics of samples used in model for protein content of cassava flour and starch

Items	Protein content
Min-Max	0.18-2.78
Mean	0.92
SD	0.83
Number	240
Unit	%

Table 2 The statistical analysis of NIRS models to predict protein content of cassava flour and starch by the Unscrambler program

Quality	Wavelength (nm)	R	SEC	SEP	Bias	F	N	SD
Protein content	800-2500	0.98	0.13	0.15	0.0007	9	240	0.83

R: Coefficient of correlation, SEC: Standard error of calibration, SEP: Stand error of prediction; Bias: The average difference between actual value and NIRS value, F: The number of factors used in the calibration equation, N: Number of sample SD: Standard deviation of average

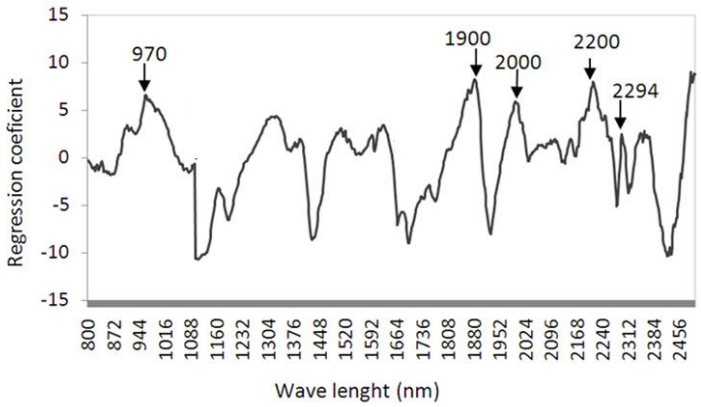


Figure 2 Regression coefficient plots to evaluate protein content in cassava flour and starch

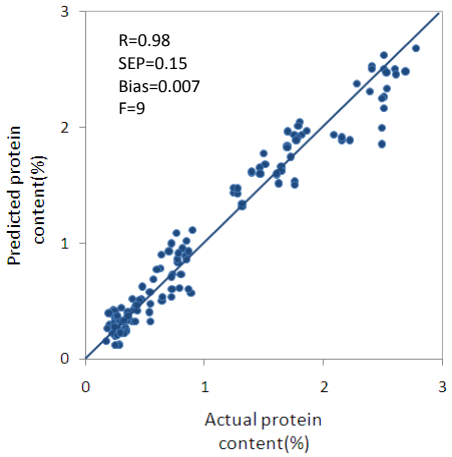


Figure 3 The relationship between actual protein content (%) and predicted protein content (%) from NIRS.

Table3 The validation of protein content (%) in cassava flour and starch by using NIRS

Sample	Actual value	Prediction value	Differentiation
Starch1	0.28	0.22	0.06
Starch2	0.22	0.19	0.02
Starch3	0.20	0.37	-0.17
Starch4	0.23	0.10	0.12
Starch5	0.20	0.31	-0.11
Starch6	0.23	0.21	0.02
Starch7	0.40	0.43	-0.02
Starch8	0.34	0.26	0.08
Starch9	0.24	0.40	-0.16
Starch10	0.24	0.40	-0.16
Flour1	0.80	0.74	0.07
Flour2	0.78	0.86	-0.09
Flour3	2.61	2.46	0.15
Flour4	2.69	2.49	0.20
Flour5	1.82	1.94	-0.12

สรุป

เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโคปีสามารถใช้ประเมินปริมาณโปรตีนของแป้งฟลาวและสตาร์ชมันสำปะหลังได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีความถูกต้องแม่นยำ ใช้เวลาสั้นเพียง 2-3 นาที ไม่ทำลายตัวอย่าง และไม่ใช้

สารเคมี ซึ่งปริมาณโปรตีนที่ประเมินได้อยู่ในช่วง 0.18-2.78% โดยใช้หลักการสะท้อนแสง (reflection) ที่ความยาวคลื่น 800-2500 นาโนเมตร

เอกสารอ้างอิง

กระทรวงอุตสาหกรรม. 2535. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง. เอกสาร มอก. ที่ 274-2521, สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ.

กล้าณรงค์ ศรีรอต และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ. 2550. เทคโนโลยีแป้ง. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ. 303 หน้า.

จารุวรรณ บางแวก อรวรรณ จิตต์ธรรม อรณิชา สุวรรณโฉม และจารุรัตน์ พุ่มประเสริฐ. 2552. การประเมินคุณภาพผลผลิตเกษตรโดยใช้เทคนิค Near Infrared Spectroscopy. หน้า 256-272. ใน: รายงานผลงานวิจัยเรื่องเต็ม ประจำปี 2552 สำนักวิจัยและพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตร. กรมวิชาการเกษตร. กรุงเทพฯ.

ณรงค์พันธ์ รัตนปนัดดา. 2009. การใช้เทคนิค Near Infrared Spectroscopy(NIRS) ในการหาความชื้นและโปรตีนในแป้งสาลี. SDU res J.2(1). 1-14

Blanco, M., Alcalá, M., Planells, J. and Mulero, R. 2007.Quality control of cosmetic mixtures by NIR spectroscopy. Analytical and bioanalytical chemistry, 389(5), 1577-1583.

Bock, JE. and RK. Conelly. 2008. Innovative uses of near-infrared spectroscopy in food processing. J food Sci., Sep73(7) R91-8. doi: 10.1111/j.1750-3841.2008.00870.

Chen, J. Y., Miao, Y., Sato, S., Zhang, H. 2008. Near infrared spectroscopy for determination of the protein content composition of rice flour. Fod Sci. Technol. Res. 14(2),132-138.

Jittham, O. and C. Bangwaek. 2010. The 2nd Asian Symposium on Near Infrared Spectroscopy. 15-18 October 2010, Shanghai, China. 99.

Noda, T., S. Tsuda, M. Mori, S. Takigawa, C. Matsuura-Endo, K. Saito, W. H. A. Mangalika, A .Hanaoka, Y. Suzuki, H. Yamauchi. 2004. The effect of harvest dates on the starch properties of various potato cultivars. Food and Chemistry. 86(1), 119-125.

Official Methods of Analysis. 2005. 18th ed., AOAC International, Maryland, USA.

Osborne, B.G., Dougls, S., Fearn, T. 2007. The application of near infrared reflectance analysis to rapid flour testing. Int. J. Food Sci. Technol. 355-363.

Osborne, B.G., T. Fearn, P.H. Hindle. 1993. “Practical NIR Spectroscopy with applications in food and beverage analysis”, 2nd Edition. Longman Scientific and Technical, Singapore. 227 .

Rosales A., L. Galicia, E. Oviedo, C. Islas and N. Palacios-Rojas. 2011. Near-Infrared Reflectance Spectroscopy (NIRS) for Protein, Tryptophan, and Lysine Evaluation in Quality Protein Maize (QPM) Breeding Programs.Journal of Agricultural and food chemistry. dx.doi.org/10.1021/jf201468x.

Sakudo, A., 2016. Near-infrared spectroscopy for medical applications: Current status and future perspectives Citation data: Clinicachimicaacta; international journal of clinical chemistry, 455, 8-181.

Sriroth, K., S. Wanlapatit, K. Piyachomkwan, and C.G. Oates. 1999. Improved cassava starch granule stability in the presence of sulfur dioxide. Starch/Starke 50(11-12), 466-473.

Sriroth, K., V. Santisopasri, K. Kurotjanwong K. Piyachomkwan, and C.G. Oates. 1998. Comparison of varieties and harvesting time on changes in extracted starch from cassava root *In* P. J. Larkin (Ed.). Agricultural Biotechnology: Laboratory, field and market. Proceeding of the 4th Asia Pacific Conference on Agricultural Biotechnology. 13-16 July 1998. Darwin Australia. Canbera, UTC Publishing. 391-394.

Tester, R. F. and J. Kakalas, 2001. Starch: The Effects of Environmental Conditions on the Structural Features and Physico-chemical Properties of Starches. *Starch/Stärke* 53. 513–519.

Vasquez, D., William, P. C., Watts, B. 2007. NIRS as a tool for quality screening. In wheat production in stress environment, Buck, H. T. Eds: Springer: New York. 527-533.

Williams, P. 2007. Application to agricultural and marine products. In Near-Infrared Spectroscopy in Food Science and Technology. (eds. Y. Ozaki, W. F. McClure and A. A. Christy), New Jersey: John Wiley and Sons, Inc. Publication.165-218.

Williams, P. and K. Norris. 2001. Near Infrared Technology in the Agricultural and Food Industries. Inc.: St Paul, Minesota. 312.

การพัฒนาผลิตภัณฑ์กล้วยกวนโดยใช้สับปะรด สตรอว์เบอร์รี และโปรตีนถั่วเหลืองสกัด

Development of Banana Paste Product using Pineapple, Strawberry and Soy Protein Isolate

นัฐวุฒิ วิเศษโสภา[1*] และ ปิ่นมณี ขวัญเมือง[1]

Natthawut Wisetsopa[1*] and Pinmanee Kwanmuang[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนากล้วยกวน โดยปรับอัตราส่วนการใช้สับปะรด สตรอว์เบอร์รี โปรตีนถั่วเหลืองสกัด และรีบาวดีโอไซด์ วิเคราะห์คุณลักษณะทางเคมีกายภาพ คุณค่าทางโภชนาการ อายุการเก็บรักษา จุลินทรีย์ และทดสอบการยอมรับของผู้บริโภค ผลการศึกษาพบว่า สูตรกล้วยกวนที่ผู้บริโภคยอมรับประกอบด้วยกล้วยน้ำว้า 48% สับปะรด15.67% สตรอว์เบอร์รี 9.40% น้ำกระเจี๊ยบแดงเข้มข้น 6.27% น้ำตาลทรายขาว 2.35% น้ำตาลมะพร้าว 0.78% น้ำกะทิ 18.81% กลูโคสไซรัป 1.57% โปรตีนถั่วเหลืองสกัด 1.07% รีบาวดีโอไซด์ 0.012% และเกลือ 0.19% ค่าเฉลี่ยการยอมรับของผู้บริโภคด้วยวิธีทดสอบแบบ 9 ระดับ เท่ากับ 6.22±1.67 ค่าสี L* a* และ b* ความแข็ง(N) ค่าความเป็นกรด-ด่าง และปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด(°Brix) เท่ากับ 29.72±0.10 5.97±0.09 5.92±0.06 4.56±0.15 4.38±0.01และ 53.33±0.58 ตามลำดับ คุณค่าทางโภชนาการของกล้วยกวน 100 กรัม ให้พลังงาน 316 กิโลแคลอรี มีคาร์โบไฮเดรต 58.2% โปรตีน 4.57% และไขมัน 7.17% และมีอายุการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องได้ไม่น้อยกว่า 90 วัน

ABSTRACT

This research was to develop banana paste by varying ratio of pineapple, strawberry, soy protein isolate and rebaudioside, the physiochemical properties, nutritional value, shelf- life and microbial and consumer acceptability were analyzed. The results showed that final product formula that consisted of 43.88% namwa banana, 15.67% pineapple, 9.40% strawberry, 6.27% concentrated red roselle juice, 2.35% white sugar, 0.78% coconut sugar, 18.81% coconut milk, 1.57% glucose syrup, 1.07% soy protein isolate, 0.012% rebaudioside and 0.19% salt. The acceptance score by using 9-point hedonic scales was 6.22±1.67. The L* a* b* values, hardness (N), pH and total soluble solid (°Brix) were 29.72±0.10 5.97±0.09 5.92±0.06 4.56±0.15 4.38±0.01 and 53.33±0.58, respectively. This banana paste was provided 316 kcal/100 g energy, 58.8% carbohydrate, 4.57% protein, and 7.17% fat. Shelf life was more than 90 days at room temperature.

Key Words: Banana paste product, Product Development, Strawberry

* Corresponding author; e-mail address: 59030428@kmitl.ac.th

[1]คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

[1]Faculty of Industrial Education and Technology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520

คำนำ

กล้วยกวน (Banana paste) เป็นผลิตภัณฑ์พื้นบ้านของไทย ผลิตโดยนำเอากล้วยที่มีลักษณะสุกงอม เปลือกมีสีดำมาแปรรูปโดยกวนผสมกับน้ำตาลหรืออาจมีกะทิเป็นส่วนผสม กวนจนมีลักษณะตามที่ต้องการ (กลุ่มส่งเสริมและพัฒนาผลิตภัณฑ์เกษตร, 2547) ผลิตภัณฑ์กล้วยกวนที่ดีควรใช้วัตถุดิบที่อยู่ในสภาพดี ไม่เน่าเสีย ผลิตภัณฑ์จะต้องมีลักษณะเนื้อสัมผัสตามชนิดของผลไม้ มีสีสม่ำเสมอ ปราศจากกลิ่นรสอื่นที่ไม่พึงประสงค์ และจะต้องไม่พบสิ่งแปลกปลอม (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2558: มผช. 35/2558) จากการวิจัยของ สุพร ชุ่มจิตต์ (2554) พบว่า ผู้บริโภคส่วนใหญ่มีความต้องการกล้วยกวนที่มีสีไม่ดำเข้ม มีความเหนียวปานกลาง ไม่แข็งกระด้าง มีรสชาติที่ไม่หวานเกินไป ซึ่งจากผลการวิจัยดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า ผลิตภัณฑ์กล้วยกวนตามท้องตลาดมีลักษณะที่ไม่สอดคล้องและตรงตามความต้องการของผู้บริโภค

การศึกษาครั้งนี้ได้นำแนวทางการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารในกลุ่มอาหารฟังก์ชันที่เรียกว่า ฟอร์ทิฟิเคชัน (Food Fortification) ซึ่งเป็นการเสริมวัตถุดิบอื่นที่มีสารอาหารที่ต้องการบางอย่างซึ่งแต่เดิมไม่มีลงในผลิตภัณฑ์ที่ต้องการพัฒนา (Barbara and Francesco, 2013) และมีการนำสับปะรด สตรอว์เบอร์รี และน้ำกระเจี๊ยบแดงเข้มข้น มาใช้เพื่อช่วยพัฒนาคุณลักษณะทางประสาทสัมผัส เนื่องจากสับปะรดเป็นผลไม้ที่มีเส้นใยอาหารสูง (Joy, 2010) สตรอว์เบอร์รีมีสารอาหารที่มีประโยชน์หลายชนิด รวมไปถึงมีกลิ่นและรสชาติที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัว (Ayub et al., 2010) กระเจี๊ยบแดง มีรสเปรี้ยวเป็นเอกลักษณ์เนื่องจากมีกรดซิตริกเป็นส่วนประกอบ (Pacome et al., 2014) และยังให้สีแดงจากธรรมชาติซึ่งสามารถนำมาใช้ทดแทนสีสังเคราะห์ในอาหารได้ (Delgado and Parcedes, 2003) และโปรตีนถั่วเหลืองสกัดเพื่อเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการ เนื่องจากเป็นโปรตีนบริสุทธิ์ ซึ่งผ่านกระบวนการสกัดเอาสารอาหารอื่นออกจนได้โปรตีนสกัดที่มีความเข้มข้นถึงร้อยละ 90 (Joseph, 2001) รวมถึงใช้รีบาวดีโอไซด์เพื่อลดการใช้น้ำตาลในผลิตภัณฑ์

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมส่วนผสมในการผลิตกล้วยกวน

1. เตรียมกล้วยน้ำว้าและสับปะรด โดยนำกล้วยน้ำว้าสุกงอมหรือกล้วยน้ำว้าที่ความสุกระดับสุดท้ายเปลือกมีสีดำเกือบทั้งผล และสับปะรดมาปอกเปลือก แล้วจึงนำมาหั่นเป็นชิ้นเล็ก ๆ ตามแนวขวาง

2. เตรียมสตรอว์เบอร์รี โดยนำสตรอว์เบอร์รีมาเด็ดขั้วผล ล้างด้วยน้ำเกลือความเข้มข้น ร้อยละ 3 แล้วหั่นเป็นชิ้นเล็กๆ ตามแนวขวาง เพื่อนำไปเป็นส่วนผสมต่อไป

3. เตรียมน้ำกระเจี๊ยบแดงเข้มข้น โดยการนำกระเจี๊ยบแดงแห้งมาต้มในน้ำสะอาดโดยใช้อัตราส่วนเท่ากับ 1: 5 ต้มนาน 30 นาที จนได้น้ำกระเจี๊ยบแดงที่เข้มข้น หลังจากนั้นกรองผ่านผ้าขาวบางเอาเฉพาะส่วนน้ำเพื่อนำมาใช้เป็นส่วนผสมต่อไป ซึ่งน้ำกระเจี๊ยบที่ได้มีค่า pH เท่ากับ 3.5 และปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดเท่ากับ 30 องศาบริกซ์

การผลิตกล้วยกวน

นำส่วนผสมที่เตรียมไว้มาปั่นรวมให้ละเอียด แล้วผสมกับน้ำตาลทราย น้ำตาลมะพร้าว กะทิ และเกลือ กวนในหม้อสแตนเลท ใช้อุณหภูมิในการกวน 80-85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง หลังจากนั้นเติมกะทิที่เคี่ยวจนแตกมัน และกลูโคสไซรัปแล้วกวนต่ออีกประมาณ 1 ชั่วโมง จนมีลักษณะเหนียว แล้วนำมาใส่ถาดขนาด

กว้าง 28 เซนติเมตร ยาว 32 เซนติเมตร ลึก 1 เซนติเมตร เกลี่ยให้ได้ความหนาเสมอขอบถาดหรือประมาณ 1 เซนติเมตร จากนั้นปล่อยให้เย็นแล้วจึงตัดเป็นชิ้นขนาดกว้าง 2 เซนติเมตร ยาว 4 เซนติเมตร หนา 1 เซนติเมตร แล้วนำไปบรรจุใส่ถุงพลาสติกซีลชนิด HDPE ขนาดกว้าง 4 เซนติเมตร ยาว 9.5 เซนติเมตร

การพัฒนาผลิตภัณฑ์

1. การคัดเลือกอัตราส่วนของสับปะรดและสตรอว์เบอร์รีที่ผู้บริโภคยอมรับ ซึ่งดัดแปลงจากสูตรของณัฐชยา ทองแตง และ ธนัชพร อินสว่าง (2559) ทำการศึกษาโดยกำหนดอัตราส่วนสับปะรดต่อสตรอว์เบอร์รีเท่ากับ 1 : 1 1.5 : 1 และ 3 : 1 เป็นสูตรที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ (Table1)

Table 1 The ingredients of Banana Paste

Ingredient	Treatment 1	Treatment 2	Treatment 3
Namwa banana (g)	700	700	700
Pineapple (g)	200	250	300
Strawberry (g)	200	150	100
Concentrate Roselle calyx juice (ml)	100	100	100
Sugar (g)	150	150	150
Coconut sugar (g)	50	50	50
Coconut milk (ml)	300	300	300
Glucose syrup (g)	25	25	25
Salt (g)	3	3	3
Total (g)	1728	1728	1728

2. ศึกษาปริมาณโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มปริมาณโปรตีนในผลิตภัณฑ์ โดยศึกษาปริมาณการใช้ 3 ระดับ ได้แก่ ร้อยละ 0.5 1.0 และ 1.5 ตามลำดับ

3. ศึกษาการใช้รีบาวดีโอไซด์ทดแทนการใช้น้ำตาลในผลิตภัณฑ์ โดยใช้รีบาวดีโอไซด์ทดแทนน้ำตาลร้อยละ 0 50 75 โดยระดับความหวาน

4. ศึกษาคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์กล้วยกวนที่ได้พัฒนา

5. ศึกษาอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์ที่เป็นถุงพลาสติกชนิด HDPE โดยเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องและศึกษาเกณฑ์คุณภาพทางจุลินทรีย์ของกล้วยกวน โดยดำเนินการตามวิธีของกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ (2557)

การทดสอบคุณลักษณะทางกายภาพและเคมี

การทดสอบคุณลักษณะทางกายภาพ ดำเนินการวัดค่าสี รายงานผลเป็นค่า L* a* b* ทดสอบความแข็ง รายงานผลในหน่วยนิวตัน วัดค่าความเป็นกรด-ด่าง และปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดรายงานผลในหน่วยองศาบริกซ์ ซึ่งการวัดความเป็นกรด-ด่าง และปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด เตรียมตัวอย่างโดยนำกล้วยกวนมาเจือจางในน้ำกลั่นจนได้ระดับความเจือจาง ร้อยละ 10

การทดสอบคุณลักษณะทางประสาทสัมผัส

ทดสอบคุณลักษณะทางประสาทสัมผัส ด้านสี กลิ่น เนื้อสัมผัส ความหวาน ความเปรี้ยว รสชาติโดยรวม และความชอบโดยรวม ตามลำดับ โดยใช้แบบทดสอบความชอบแบบ 9 ระดับ (9-point hedonic scales) ทดสอบกับผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝน จำนวน 65 คน

สถิติที่ใช้ในการวิจัย

การวิเคราะห์ผลการทดสอบคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสเพื่อคัดเลือกสูตรที่ดีที่สุด 1 สูตร ใช้การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยใช้วิธีหาความแปรปรวนทางเดียว (One-Way ANOVA) และใช้การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของข้อมูลด้วยวิธี DMRT (Duncan new multiple range test) ที่ระดับความเชื่อมั่น ร้อยละ 95 ($P \leq 0.05$)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การคัดเลือกอัตราส่วนของสับปะรดและสตรอว์เบอร์รีที่ผู้บริโภคยอมรับ

การคัดเลือกอัตราส่วนของสับปะรดและสตรอว์เบอร์รีที่ผู้บริโภคยอมรับ โดยทำการคัดเลือกจากการทำการทดลอง 3 สูตร ซึ่งกำหนดอัตราส่วนสับปะรดต่อสตรอว์เบอร์รี คือ 1:1 1.5:1 และ 3:1 (Table 1) พบว่า จากการใช้อัตราส่วนของสับปะรดและสตรอว์เบอร์รีที่แตกต่างกันไม่มีผลต่อระดับความชอบในทุกด้าน (Table 2) ผู้วิจัยจึงเลือกสูตรที่ใช้อัตราส่วน 1:1 และ 1.5:1 มาทดสอบทางประสาทสัมผัสอีกครั้งโดยการใช้แบบทดสอบแบบเปรียบเทียบตัวอย่างคู่ โดยใช้ผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝน จำนวน 65 คน ผลการทดสอบพบว่า มีจำนวนผู้ทดสอบที่เลือกสูตรที่ใช้อัตราส่วน 1:1 และ 1.5:1 เท่ากับ 40 และ 25 คน ตามลำดับ เมื่อพิจารณาตามเกณฑ์ปราณี อ่านเปรื่อง (2547) พบว่า ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ จากผลการทดลองดังที่กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยจึงใช้วิธีการประเมินต้นทุนการผลิตของกล้วยกวนแต่ละสูตร ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกสูตรที่ใช้อัตราส่วน 1.5:1 เนื่องจากมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่าแต่ผู้บริโภคยอมรับในระดับเดียวกัน

Table 2 Sensory evaluation of Banana paste with different ratio of Pineapple and Strawberry

	Average acceptance score of the sensory evaluation						
Ratio	Color	Odor	Sweet	Sour	Taste	Texture	Overall
1 : 1	6.77±1.24[a]	6.87±1.22[a]	6.82±1.48[a]	6.33±1.72[a]	6.95±1.34[a]	7.08±1.15[a]	7.15±1.15[a]
1.5 : 1	6.83±1.29[a]	6.75±1.56[a]	6.74±1.48[a]	6.41±1.69[a]	6.98±1.50[a]	6.97±1.37[a]	7.15±1.32[a]
3 : 1	6.80±1.26[a]	6.73±1.33[a]	6.62±1.44[a]	6.54±1.53[a]	6.88±1.28[a]	7.02±1.17[a]	7.20±1.17[a]

[a] Means with the same letter in the same columns are not statistically different ($P>0.05$)

ศึกษาปริมาณโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มปริมาณโปรตีนในผลิตภัณฑ์

การศึกษาปริมาณการใช้โปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่แตกต่างกัน โดยใช้กล้วยกวนสูตรที่ใช้อัตราส่วนของสับปะรดและสตรอว์เบอร์รีเท่ากับ 1.5:1 มาศึกษาต่อโดยศึกษาปริมาณการใช้ 3 ระดับ ได้แก่ ร้อยละ 0.5 1.0 และ 1.5 ของส่วนผสมทั้งหมด เป็นสูตรที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่า การใช้โปรตีนถั่วเหลืองสกัดปริมาณที่แตกต่างกันในกล้วยกวนทั้ง 3 สูตร มีระดับความชอบของผู้ทดสอบที่ไม่แตกต่างกันทางสถิติ

(Table 4) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาวัตถุประสงค์การใช้โปรตีนถั่วเหลืองสกัด เพื่อเพิ่มปริมาณโปรตีนในกล้วยกวนในปริมาณที่เหมาะสมและผู้บริโภคยอมรับได้ และจากการศึกษายังพบว่าการใช้ปริมาณโปรตีนถั่วเหลืองสกัดมากเกินไปส่งผลให้ลักษณะเนื้อสัมผัสของกล้วยกวนมีความนิ่มมากขึ้น จะเห็นได้จากค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์ที่ลดลง (Table 3) ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกกล้วยกวนสูตรที่ใช้โปรตีนถั่วเหลืองสกัด ร้อยละ 1.0 เพื่อใช้เป็นสูตรในการพัฒนาขั้นต่อไป

Table 3 The physiochemical of Banana paste with different Soy protein isolate

SPI	Color			Hardness	pH	TSS
(%)	L*	a*	b*	(N)		(°Brix)
0.5	25.91±0.66[a]	5.27±0.11[a]	4.46±0.03[c]	4.41±0.33[a]	4.01±0.00[c]	69.00±1.00[a]
1.0	26.21±0.19[a]	5.08±0.04[b]	5.39±0.00[a]	3.96±0.17[c]	4.31±0.00[b]	63.00±1.00[b]
1.5	25.05±0.05[b]	4.32±0.04[c]	4.78±0.01[b]	3.62±0.24[b]	4.38±0.00[a]	60.67±0.58[c]

[a,b,c] Means with the same letter in the same columns are not statistically different (P>0.05)

Table 4 Sensory evaluation of Banana paste with different Soy protein isolate

SPI	Average acceptance score of the sensory evaluation						
(%)	Color	Odor	Sweet	Sour	Taste	Texture	Overall
0.5	6.77±1.24[a]	6.87±1.22[a]	6.82±1.48[a]	6.33±1.72[a]	6.95±1.34[a]	7.08±1.15[a]	7.15±1.15[a]
1.0	6.83±1.29[a]	6.75±1.56[a]	6.74±1.48[a]	6.41±1.69[a]	6.98±1.50[a]	6.97±1.37[a]	7.15±1.32[a]
1.5	6.80±1.26[a]	6.73±1.33[a]	6.62±1.44[a]	6.54±1.53[a]	6.88±1.28[a]	7.02±1.17[a]	7.20±1.17[a]

[a] Means with the same letter in the same columns are not statistically different (P>0.05)

การศึกษาการใช้รีบาวดีโอไซด์ทดแทนการใช้น้ำตาลในผลิตภัณฑ์

การศึกษาการใช้รีบาวดีโอไซด์ทดแทนการใช้น้ำตาลในปริมาณที่แตกต่างกัน โดยนำกล้วยกวนสูตรที่ผู้ทดสอบยอมรับจากขั้นตอนการศึกษาปริมาณการใช้โปรตีนถั่วเหลืองสกัดมาทำการศึกษาต่อ ปรับสูตรการผลิตโดยใช้รีบาวดีโอไซด์ทดแทนน้ำตาล ร้อยละ 0 50 และ 75 จากการศึกษาพบว่า ปริมาณรีบาวดีโอไซด์ทดแทนน้ำตาลมีผลต่อคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ในทุกด้าน แต่เมื่อใช้รีบาวดีโอไซด์ทดแทนน้ำตาลร้อยละ 50 และ 75 โดยระดับความหวาน พบว่า ไม่มีความความแตกต่างกันทางสถิติในทุกด้าน (Table 5)

Table 5 Sensory properties evaluation of Banana paste with different sugar

instead	Average acceptance score of the sensory evaluation						
(%)	Color	Odor	Sweet	Sour	Taste	Texture	Overall
0	6.58±1.66[a]	6.58±1.75[a]	6.70±1.75[a]	6.70±1.70[a]	7.12±1.59[a]	7.00±1.67[a]	7.00±1.58[a]
50	5.84±1.38[b]	6.06±1.50[a]	6.00±1.62[b]	5.64±1.75[b]	5.86±1.74[b]	5.54±1.85[b]	5.74±1.77[b]
75	6.42±1.47[b]	6.44±1.50[a]	6.38±1.50[ab]	6.16±1.81[ab]	6.14±1.71[b]	6.12±1.83[b]	6.22±1.67[b]

[a,b,] Means with the same letter in the same columns are not statistically different (P>0.05)

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาวัตถุประสงค์ของการใช้รีบาวดีโอไซด์เพื่อลดปริมาณการใช้น้ำตาลในผลิตภัณฑ์กล้วยกวน ผู้วิจัยจึงเลือกสูตรที่ใช้รีบาวดีโอไซด์แทนน้ำตาลร้อยละ 75 ไปศึกษาในขั้นตอนต่อไป เนื่องจากมีปริมาณการใช้น้ำตาลที่น้อยกว่า แต่มีระดับความชอบและการยอมรับในระดับเดียวกัน

การศึกษาคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์กล้วยกวน

การศึกษาคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์ ดำเนินการโดยนำกล้วยกวนสูตรที่ผู้ทดสอบยอมรับมาศึกษาคุณค่าทางโภชนาการกล้วยกวน จากการศึกษา พบว่าในกล้วยกวน 100 กรัม ให้พลังงานทั้งหมด 316 กิโลแคลอรี มีปริมาณคาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน เท่ากับ 58.2 4.57 และ 7.17 กรัม ตามลำดับ (Table 6) อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่ากล้วยที่ผ่านการแปรรูปเป็นกล้วยกวนสามารถคงคุณค่าทางโภชนาการของกล้วยไว้ได้

Table 6 Nutritional value of Banana paste (100 gram)

Nutrition	Result	Nutrition	Result
Energy (kcal)	316	Beta-carotene (µg)	36.1
Carbohydrate (g)	58.2	Calcium (mg)	31.2
Protein (g)	7.17	Magnesium (mg)	63.3
Fat (g)	4.57	Potassium (mg)	690
Fiber (g)	3.81	Phosphorus (mg)	85.9
Total sugar (g)	43.6	Moisture (g)	28.1
Glucose (g)	14.2	Ash (g)	2.00
Fructose (g)	14.5		
Sucrose (g)	14.9		

การศึกษาอายุการเก็บรักษาและเกณฑ์คุณภาพทางจุลินทรีย์ของกล้วยกวน

การศึกษาอายุการเก็บรักษาและเกณฑ์คุณภาพทางจุลินทรีย์ของกล้วยกวน ทำการทดลองโดยนำกล้วยกวนที่เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 0 30 60 และ 90 วัน ตามลำดับ มาทำการวิเคราะห์หาจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด รวมถึงยีสต์และราได้ผลดังตาราง (Table 7)

Table 7 Microbiological qualities of Banana paste during storage 90 days

Storage times	Total (CFU/g)	Yeast and Mold (CFU/g)
0 day	-	-
30 day	$1.00x10^2$	$1.50x10^1$
60 day	$2.50x10^2$	$2.00x10^1$
90 day	$4.00x10^2$	$1.00x10^2$

จากการศึกษา พบว่า กล้วยกวนที่มีอายุเก็บรักษา 0 วันไม่พบเชื้อทั้งแบคทีเรีย ยีสต์ และรา แต่มีการตรวจพบเชื้อจุลินทรีย์ในกล้วยกวนเมื่อมีอายุการเก็บรักษา 30 60 และ 90 วัน (Table 7) ซึ่งกล้วยกวนที่มีอายุการเก็บรักษา 30 วัน พบเชื้อจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด รวมถึงจำนวนยีสต์และรา เท่ากับ $1.00x10^2$ และ $1.50x10^1$

CFU/g ตามลำดับ กล้วยกวนที่มีอายุการเก็บรักษา 60 วัน มีจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด รวมถึงจำนวนยีสต์และรา เท่ากับ $2.50x10^2$ และ $2.00x10^1$ CFU/g ตามลำดับ และที่อายุการเก็บรักษา 90 วัน พบจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด รวมถึงจำนวนยีสต์และรา เท่ากับ $4.00x10^2$ และ $1.00x10^2$ CFU/g ตามลำดับ

ดังนั้นเมื่อพิจารณาจะเห็นว่าตลอดอายุการเก็บรักษา 90 วัน มีจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด รวมถึงจำนวนยีสต์และราเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ผักและผลไม้กวน (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2558: มผช. 35/2558) และเกณฑ์คุณภาพด้านจุลินทรีย์ในอาหารตามประกาศของกรมการแพทย์ (2560) ซึ่งมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน กำหนดจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด รวมถึงจำนวนยีสต์และราในผลิตภัณฑ์ ต้องน้อยกว่า $1x10^6$ CFU/g และเกณฑ์ตามประกาศของกรมการแพทย์ (2560) กำหนดจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด รวมถึงจำนวนยีสต์และรา ต้องน้อยกว่า $1x10^5$ และ $1x10^3$ CFU/g ตามลำดับ

สรุป

จากการพัฒนาผลิตภัณฑ์กล้วยกวนผสมสับปะรด สตรอว์เบอร์รี และเสริมโปรตีนถั่วเหลืองสกัด พบว่าสูตรที่ผู้บริโภคยอมรับ มีส่วนผสม คือ กล้วยน้ำว้า สับปะรด สตรอว์เบอร์รี น้ำกระเจี๊ยบแดงเข้มข้น น้ำตาลทรายขาว น้ำตาลปี๊บ กะทิ กลูโคสไซรัป โปรตีนถั่วเหลืองสกัด รีบาวดีโอไซด์ และเกลือ ร้อยละ 43.88 15.67 9.40 6.27 2.35 0.78 18.81 1.57 1.07 0.012 0.19 ตามลำดับ มีคุณลักษณะทางเคมีกายภาพ คือ ค่าสี L* a* และ b* ความแข็ง(N) ค่าความเป็นกรด-ด่าง และปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด(°Brix) เท่ากับ 29.72±0.10 5.97±0.09 5.92±0.06 4.56±0.15 4.38±0.01และ 53.33±0.58 ตามลำดับ ในกล้วยกวน 100 กรัม ให้พลังงาน 316 กิโลแคลอรี มีคาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน เท่ากับ ร้อยละ 58.2 4.57 และ 7.17 ตามลำดับ และสามารถเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องได้อย่างน้อย 90 วัน ดังนั้นงานวิจัยนี้สามารถพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ผลไม้กวนทางเลือกที่มีลักษณะทางประสาทสัมผัสสอดคล้องกับความต้องการของผู้บริโภค มีปริมาณน้ำตาลน้อยลง และคุณค่าทางโภชนาการครบถ้วน รวมถึงสามารถพัฒนาและต่อยอดสู่เชิงพาณิชย์ได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณอาจารย์ รศ.ดร.ปิ่นมณี ขวัญเมือง ที่คอยให้คำปรึกษา และให้คำแนะนำในการวิจัยเสมอมา ขอบคุณนายพรเลิศ ปังศรี ที่ให้คำแนะนำด้านกระบวนการผลิต ขอบคุณนายโมไนย์ ทรัพย์สินกีรติ ที่ให้ความช่วยเหลือในขั้นตอนการผลิต และขอบคุณภาควิชาครุศาสตร์เกษตรที่เอื้อเฟื้อด้านอุปกรณ์วิทยาศาสตร์และสถานที่ในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

กลุ่มส่งเสริมและพัฒนาผลิตภัณฑ์เกษตร. 2547. **ผลิตภัณฑ์กล้วย**. กรุงเทพ : สำนักพัฒนาการถ่ายทอดเทคโนโลยีกรมส่งเสริมการเกษตร

กรชนก แก้วประเสริฐสม. 2556. **การพัฒนาผลิตภัณฑ์กล้วยและมะละกอกวน**. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีการอาหาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 97 หน้า

กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ กระทรวงสาธารณสุข. 2557. **วิธีมาตรฐานสำหรับวิเคราะห์อาหาร เล่มที่ 2**. สำนักงานพระพุทธศาสนาแห่งชาติ. กรุงเทพฯ

กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ กระทรวงสาธารณสุข. 2560. **ประกาศกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ เรื่อง เกณฑ์คุณภาพทางจุลชีวิทยาของอาหารและภาชนะสัมผัส ฉบับที่ 3**.

ณัฐชยา ทองแตง และ ธนัชพร อินสว่าง. 2559. **การศึกษาผลของสับปะรดและสารให้ความเปรี้ยวจากผลไม้ต่อคุณสมบัติทางกายภาพและต่อประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์กล้วยกวน**. ปัญหาพิเศษปริญญาตรี สาขาวิชาครุศาสตร์เกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 50 หน้า

ปราณี อ่านเปรื่อง. 2547. **หลักการวิเคราะห์อาหารด้วยประสาทสัมผัส**. กรุงเทพมหานคร : จุฬาลงการณ์มหาวิทยาลัย

สุพร ชุ่มจิตต์. 2554. **การพัฒนาผลิตภัณฑ์กล้วยกวนเพื่อตลาดนักท่องเที่ยว**. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาวิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์อุสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 85 หน้า.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2558. **มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนผลไม้กวน (มผช.35/2558)**. กรุงเทพฯ : กระทรวงอุตสาหกรรม.

Ayub, M., Javid U., A. Muhammad and A. Zeb. 2010. **Evaluation of strawberry juice preserved with chemical preservatives at refrigeration temperature**. Inter. J. Nutri. and Metabol.

Barbara Bigliardi and Francesco Galati. 2013. **Innovation trends in the food industry: The case of functional foods**. Trends in Food Science & Technology. 31 (2) : 118-129

Delgado, V. F. and L. O. Parcedes. 2003. **Natural colourants for food and nutraceutical uses**. CRC Press, LLC: Boca Raton, FL, p.327.

Joseph G.E. 2001. **Soy Protein Products Characteristics, Nutritional Aspects, and Utilization**. AOCS Press and the Soy Protein Council

Joy, P. P. 2010. **Benefits and Uses of Pineappie**. Pineapple Rearch Station (Kerala AgriculturalUniversity)

Pacome, O. A., D. N. Bernard, D. Sekou, D. A. Joseph, N. D. David, K. Mongomake and K. T. Hilaire. 2014. **Phytochemical and antioxidant activity of Roselle (*Hibiscus Sabdariffa* L.) petal extracts**. Res. J. Pharm. Biol. Chem. Sci., 5(2) : 1453-1465

การศึกษาสมบัติทางกลและกายภาพของกระดาษหัตถกรรมจากเยื่อทะลายปาล์มและเยื่อปอสาเคลือบด้วยกลูโคแมนแนน

Comparative Study on Mechanical and Physical Properties of Handmade Paper from Oil Palm Empty Fruit Bunches and Mulberry Coated with Glucomannan

วุฒินันท์ คงทัด[1] สุธีรา วิทยากาญจน์[1] จิรชยา บุญญฤทธิ์[1] และ **รังสิมา ชลคุป**[1*]

Wuttinant Kongtud[1], Suteera Witayakran[1], Jirachaya Boonyarit[1]and Rungsima Chollakup[1*]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาการใช้ประโยชน์จากทะลายปาล์มน้ำมันเปล่าเพื่อการผลิตกระดาษหัตถกรรม เส้นใยทะลายปาล์มถูกนำมาตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา และศึกษากระบวนการฟอกเส้นใยเพื่อผลิตเยื่อสำหรับทำกระดาษที่เหมาะสม รวมทั้งพัฒนาสมบัติเชิงกลของกระดาษจากเยื่อทะลายปาล์มด้วยการผสมกับเยื่อปอสาในขั้นตอนการขึ้นรูปกระดาษ จากนั้นจึงเคลือบด้วยสารละลายกลูโคแมนแนน ลักษณะสัณฐานของเส้นใยทะลายปาล์มพบว่ามีความยาวเฉลี่ย 1.50 มม. เส้นใยกว้างเฉลี่ย 0.0300 มม. ขนาดลูเมนเฉลี่ย 0.0190 มม. และผนังเส้นใยหนาเฉลี่ย 0.0052 มม. วิธีการผลิตเยื่อที่เหมาะสมคือ ต้มเส้นใยด้วยสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 40% เวลา 10 ชั่วโมง แล้วฟอกด้วยสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 80% ร่วมกับสารโซเดียมไฮ ดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 25% และสารโซเดียมซิลิเกตที่ความเข้มข้น 2% ของน้ำหนักแห้ง อุณหภูมิ 80-90 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง จะได้ปริมาณเยื่อเฉลี่ย 69.82% การปรับปรุงคุณภาพของกระดาษโดยใช้เยื่อทะลายปาล์มน้ำมันผสมเยื่อปอสาในสัดส่วน 70:30 โดยน้ำหนัก และเคลือบด้วยสารละลายกลูโคแมนแนนที่ความเข้มข้น 0.4% ให้สมบัติเชิงกลดีกว่ากระดาษเยื่อปอสา

ABSTRACT

This research aims to study the utilization of oil palm empty fruit bunches (EFB) for handmade paper production. EFB was analyzed for fiber morphology. Then, the optimal bleaching process to produce pulp from EFB was investigated. The mechanical properties of the obtained paper was improved by mixing EFB pulp with paper mulberry pulp in paper forming process, and then coated with a solution of glucomannan. The morphology of EFB was 1.50 mm long and 0.03 mm wide with 0.0190 mm in lumen size and 0.0052 mm in cell wall thickness. The optimal process to produce EFB pulp was treated EFB with 40% sodium hydroxide for 10 h and then bleached with 80% hydrogen peroxide, 25% sodium hydroxide and 2% sodium silicate (% by weight of pulp) at 80-90 $^{\circ}$C for 2 h. The average pulp yield was 69.82%. The improvement of paper quality using EFB pulp mixed with paper mulberry pulp in ratio of 70:30 and coated with 0.4% glucomannan was carried out to obtain the handmade paper with better mechanical properties than 100% mulberry pulp paper.

Key Words: oil palm bunch, handmade paper, glucomannan and pulp bleaching

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

[1]สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

คำนำ

ปาล์มน้ำมัน เป็นพืชเศรษฐกิจของไทย โดยปริมาณที่ปลูกในประเทศไทยคิดเป็น 3.80 % ของผลผลิตทั่วโลก (เชฐชุดา, 2561) ปาล์มน้ำมันสามารถให้เส้นใยจากส่วนของลำต้น ทางใบ เปลือกของผล และทะลายปาล์ม โดยพบว่าศักยภาพการใช้เส้นใยจากทะลายปาล์มน้ำมันจะมีมากถึง 73 % (Wirjosentono et al., 2004) สำหรับในประเทศไทย ในแต่ละปีจะมีทะลายปาล์มเปล่าแห้งประมาณ 339,373.94 ตัน ที่นำไปใช้ประโยชน์เป็นเพียงเชื้อเพลิงและวัสดุทางการเกษตร การนำทะลายปาล์มเปล่ามาผลิตเป็นเยื่อเพื่อใช้ทำกระดาษพื้นบ้าน หรือกระดาษทำด้วยมือแบบไทย เป็นอีกช่องทางหนึ่งที่สามารถใช้ประโยชน์ และสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับทะลายปาล์มเปล่าได้ เนื่องจากการจำหน่ายกระดาษหัตถกรรมในแต่ละปีสามารถทำรายได้ให้กับประเทศได้มากกว่า 500 ล้านบาท ซึ่งในขณะนี้วัตถุดิบโดยเฉพาะเปลือกปอสามีน้อยมาก จำเป็นต้องนำเข้าจากประเทศเพื่อนบ้านประมาณ 80% ส่วนการนำพืชอื่น ๆ มาใช้เป็นวัตถุดิบได้มีอยู่บ้างแต่ก็มีข้อจำกัดของปริมาณที่น้อย ดังนั้นทะลายปาล์มจะเป็นวัตถุดิบที่มีประโยชน์เป็นอย่างมากทั้งปัจจุบันและอนาคต (Kaddami et al., 2006) ในการนำเส้นใยจากทะลายปาล์มเปล่ามาใช้ประโยชน์ในการทำกระดาษ จำเป็นต้องผ่านกระบวนการเตรียมเส้นใยด้วยการกำจัดสารประกอบประเภทลิกนิน สารแทรก และเฮมิเซลลูโลสออกก่อนการใช้ประโยชน์จากเยื่อซึ่งเป็นองค์ประกอบประเภทเซลลูโลส การเตรียมเส้นใยส่วนมากจะใช้วิธีการต้มด้วยด่าง (Alawar et al ., 2009) และฟอกขาวด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารประกอบลิกนินในสภาวะเบส และสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ จึงมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมสูง

ในการผลิตกระดาษหัตถกรรมโดยส่วนใหญ่แล้วจะใช้เยื่อจากปอสาในการขึ้นรูปเป็นหลัก เนื่องจากเป็นเส้นใยยาวที่มีความแข็งแรงและเหนียวกว่าเส้นใยชนิดสั้น สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นกระดาษได้ด้วยตัวเอง จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำมาเสริมกับเยื่อทะลายปาล์ม ซึ่งเป็นเยื่อชนิดสั้น เพื่อการพัฒนาคุณภาพกระดาษทะลายปาล์มให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น นอกจากนี้ การเคลือบกระดาษด้วยสารประกอบกลูโคแมนแนน (Glumannan) หรือผงบุก จะช่วยทำให้กระดาษที่ได้มีคุณสมบัติทนน้ำ และเสริมความแข็งแรงให้แก่เยื่อกระดาษได้อีกทางหนึ่ง (Chaobo et al., 2001)

การศึกษานี้ สนใจศึกษาลักษณะสัณฐานของเยื่อจากเส้นใยทะลายปาล์มน้ำมัน เพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการนำมาผลิตกระดาษหัตถกรรม จากนั้นจึงศึกษากระบวนการผลิตเยื่อจากทะลายปาล์มและการฟอกสีเยื่อ ด้วยการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เพื่อหาความเข้มข้นของสารละลายทั้ง 2 ชนิดที่เหมาะสมต่อการผลิตเยื่อ และปรับปรุงคุณภาพของกระดาษหัตถกรรมจากเยื่อทะลายปาล์มด้วยการผสมเยื่อปอสา รวมทั้งการเคลือบกระดาษด้วยสารละลายกลูโคแมนแนนเพื่อทำให้กระดาษจากเส้นใยทะลายปาล์มมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น

อุปกรณ์และวิธีการ

วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง

ทะลายปาล์มน้ำมันเปล่า ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทสุขสมบูรณ์ ปาล์มน้ำมัน จำกัด นำเข้าสู่เครื่องตีเส้นใยเพื่อแยกเส้นใยออกจากทะลายปาล์ม และล้างทำความสะอาดด้วยน้ำเปล่า

การเตรียมตัวอย่างเส้นใยจากทะลายปาล์ม

เพื่อทำความสะอาดเส้นใยทะลายปาล์มที่ผ่านการตีแยกด้วยเครื่อง จำเป็นต้องกำจัดสารประกอบประเภทลิกนินและเฮมิเซลลูโลสออกจากเส้นใย โดยอาศัยสารละลายด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 40% ของน้ำหนักเส้นใยอบแห้ง ในอัตราส่วนสารละลายต่อเส้นใยเท่ากับ 10:1 โดยน้ำหนัก ร่วมกับการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง จากนั้นล้างด้วยน้ำสะอาด อบเส้นใยให้แห้งเก็บไว้ศึกษาทดลองต่อไป (วิชัยและคณะ, 2545)

วิเคราะห์สัณฐานของเส้นใยทะลายปาล์มน้ำมันเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการทำแผ่นกระดาษ

การวิเคราะห์สัณฐานของเส้นใยทะลายปาล์มน้ำมัน ตามวิธีของ Franklin (1945) นำตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์ความยาวของเส้นใย ความกว้างของเส้นใย ขนาดของลูเมน และความหนาของผนังเส้นใย ภายใต้กล้องจุลทรรศน์ Carl zeiss Axiostar Plus Microscope นำค่าที่วัดได้มาวิเคราะห์ความเหมาะสมและคุ้มค่าที่จะนำมาผลิตกระดาษ ด้วยการคำนวณค่า Runkel ratio ซึ่งบ่งบอกถึงความสามารถในการสานตัวของเส้นใย (Runkel ratio = (2 x ความหนาของผนังเส้นใย)/ขนาดของลูเมน) คำนวณค่าดัชนีแรงดันทะลุ (Flexibility coefficient = ขนาดของลูเมน / ความหนาของผนังเส้นใย) คำนวณค่าดัชนีแรงฉีกของกระดาษ (Slenderness ratio = ความยาวของเส้นใย / ความกว้างของเส้นใย) และวิเคราะห์ความเหมาะสมของเยื่อที่จะใช้ทำกระดาษจากการคำนวณ % Wall fraction (%Wall fraction = 100 x ขนาดของลูเมน/ความกว้างของเส้นใย)

การศึกษาวิธีการฟอกสีเยื่อที่เหมาะสม

นำตัวอย่างเส้นใยทะลายปาล์มน้ำมันที่ผ่านกระบวนการเตรียมเส้นใยโดยการทำความสะอาดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ มาศึกษาวิธีการฟอกสีเยื่อที่เหมาะสมด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ร่วมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่ความเข้มข้น 2% โดยวางแผนการทดลองแบบ Factorial in CRD ที่ 2 ปัจจัยๆ ละ 3 ระดับ ประกอบด้วยปัจจัยที่ 1 คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ใช้ ที่ 3 ระดับ ได้แก่ 20, 25 และ 30% และปัจจัยที่ 2 คือ ความเข้มข้นของสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 3 ค่า ได้แก่ 60, 80 และ 100 % ร่วมกับการใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตความเข้มข้น 2% โดยน้ำหนักเส้นใย และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 - 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ตามวิธีของ วิชัย และคณะ(2545) ล้างทำความสะอาดเยื่อด้วยน้ำ ทำให้แห้ง จากนั้นคัดแยกเยื่อที่มีขนาดใหญ่ออกจากเยื่อละเอียด และคำนวณผลได้ของเยื่อละเอียด และเยื่อรวมที่ไม่คัดแยกเยื่อ โดยการเปรียบเทียบกับน้ำหนักทะลายปาล์มก่อนการฟอกสี

นำเยื่อที่ได้เข้าเครื่องกระจายเยื่อที่ 1,000 รอบ และนำมาขึ้นรูปทำแผ่นกระดาษด้วยมือแบบไทยน้ำหนักมูลฐาน 70±5 g/m^2 วิเคราะห์ค่าความขาวสว่างตามวิธีมาตรฐานของ TAPPI T452 om-87 ด้วยเครื่อง Hunter Lab รุ่น MiniScan EZ ของบริษัท Color global co., LTD ดูความแตกต่างของความขาวกระดาษเพื่อหาสภาวะการฟอกที่เหมาะสม

ปรับปรุงคุณภาพของกระดาษเยื่อทะลายปาล์ม ด้วยการผสมเยื่อปอสาที่อัตราส่วนต่างๆ และการเคลือบด้วยกลูโคแมนแนนที่ความเข้มข้นต่างๆ

นำเยื่อปอสาปริมาณ 10, 20, 30, 40 และ 50% ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ผสมกับเยื่อทะลายปาล์มที่ผ่านวิธีการฟอกสีเยื่อที่เหมาะสม ในสัดส่วนที่เหลือ โดยศึกษาทั้งการใช้เยื่อละเอียดและเยื่อรวมที่ไม่แยกเยื่อที่มีขนาดใหญ่ออกไปด้วย เนื่องจากต้องการเปรียบเทียบคุณภาพของกระดาษที่ได้ว่ามีความแตกต่างกันหรือไม่ จากนั้นทำ

การขึ้นรูปแผ่นกระดาษด้วยมือแบบไทย ใช้น้ำหนักมูลฐาน 70±5 g/m^2 ทดสอบสมบัติเชิงกลของกระดาษตามมาตรฐาน TAPPI ได้แก่ น้ำหนักมูลฐานตามวิธีมาตรฐานของ TAPPI T410 om-88 ดัชนีแรงดึงด้วยเครื่อง Schopper tensile tester, (Kumagai Riki Kogyo, CO., Ltd.) ตามวิธีมาตรฐานของ TAPPI T404 om-92 ดัชนีแรงฉีกด้วยเครื่อง Tearing strength tester, (Kumagai Riki Kogyo, CO., Ltd.) ตามวิธีมาตรฐานของ TAPPI T414 om-98 ความทนต่อการพับขาดด้วยเครื่อง MIT folding endurance tester, (Kumagai Riki Kogyo, CO., Ltd.) ตามวิธีมาตรฐานของ TAPPI T511 om-94 ความเรียบด้วยเครื่อง Bekk smoothness tester, Hp type, (Kumagai Riki Kogyo, CO., Ltd.) ตามวิธีมาตรฐานของ TAPPI T476 om-91ดัชนีแรงดันทะลุด้วยเครื่อง Mullen bursting strength tester, (Kumagai Riki Kogyo, CO., Ltd.) ตามวิธีมาตรฐานของ TAPPI T403 om-97 นำข้อมูลมาวิเคราะห์ทางสถิติด้วยโปรแกรม SPSS เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's New multiple rang test: (DMRT)

เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับกระดาษทำมือของเยื่อทะลายปาล์ม จึงศึกษาการเพิ่มการเคลือบกลูโคแมนแนนบนกระดาษผสมระหว่างเยื่อละเอียดและเยื่อหยาบของเส้นใยทะลายปาล์มกับเยื่อปอสา ที่อัตราส่วน 70:30 โดยน้ำหนัก โดยแปรผันความเข้มข้นของสารละลายกลูโคแมนแนนเท่ากับ 0.2, 0.4, 0.6 และ 0.8% โดยปริมาตร โดยใช้กระดาษสาเป็นชุดการทดลองเปรียบเทียบ ทดสอบสมบัติเชิงกลของกระดาษตามมาตรฐาน TAPPI

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลของการวิเคราะห์สัณฐานของเส้นใยทะลายปาล์มน้ำมัน เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการทำแผ่นกระดาษ

Table 1 แสดงค่าความยาวและความกว้างของเส้นใย รวมทั้งขนาดลูเมนหรือช่องว่างภายในเส้นใย และความหนาของผนังเส้นใย และเมื่อนำค่าที่ได้มาคำนวณความสามารถในการสานตัวของเส้นใย ซึ่งพิจารณาจากค่า Runkel Ratio ที่มีค่า 0.54 ซึ่งเป็นค่าที่น้อยกว่า 1 แสดงถึงความสามารถที่ใช้ทำกระดาษได้ เนื่องจากค่า Runkel ratio มากกว่า 1 เกิดจากเส้นใยมีผนังหนาจะทำให้เส้นใยแข็งตึง เส้นใยจะมีการสานตัวกันได้น้อย (Casey, 1980) ส่วนค่าความต้านทานแรงดึงและแรงดันทะลุของกระดาษ (Flexibility coefficient) ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าที่เหมาะสม แสดงให้ทราบว่ากระดาษที่ได้จะมีความคงทนต่อแรงดึง แรงดันให้ปริแตก และความทนต่อการพับได้ดี ในขณะที่ค่าดัชนีของแรงฉีกของกระดาษ มีค่าต่ำกว่ามาตรฐานที่กำหนด บ่งชี้ว่ากระดาษจากเส้นใยทะลายปาล์มจะมีความคงทนต่อแรงฉีกได้ต่ำกว่าเท่าที่ควร ในขณะที่ค่า Wall fraction ที่มีค่า 63.33% ซึ่งสูงกว่า 50% แสดงว่าเส้นใยสามารถใช้ผลิตกระดาษได้ แต่อาจจะไม่เหมาะสมมากนักเพราะถ้าค่า Wall fraction น้อยกว่า 50% จะแสดงถึงเส้นใยดี มีความเหมาะสมที่จะใช้ผลิตกระดาษในระบบอุตสาหกรรม (Rydolm 1967) ค่าดังกล่าวได้จากเส้นใยจากเนื้อไม้ แต่ในการผลิตกระดาษหัตถกรรมอาจจะมีค่า Wall fraction ที่สูงกว่านี้ เนื่องจากเป็นเยื่อที่ผลิตจากส่วนที่ไม่ใช่เนื้อไม้และต้องการเส้นใยยาวมากกว่าเส้นใยสั้น

ผลการศึกษาวิธีการผลิตเยื่อที่เหมาะสม

Table 2 แสดงผลผลิตเยื่อรวม เยื่อละเอียด และปริมาณเยื่อหยาบจากเส้นใยทะลายปาล์ม หลังผ่านกระบวนการผลิตเยื่อด้วยกระบวนการฟอกที่แปรผันความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮอรอกไซด์ และสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์พบว่า เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 25%

ปริมาณผลผลิตของเยื่อรวมและเยื่อละเอียดมีแนวโน้มสูงกว่าการใช้ที่ความเข้มข้น 20% แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายด่างเป็น 30% ผลผลิตเยื่อกลับลดลง โดยมีค่าต่ำกว่าที่ความเข้มข้น 25% ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากสารละลายด่างที่ความเข้มข้นสูงส่งผลทำให้เกิดการย่อยสลายองค์ประกอบของเส้นใยประเภทเซลลูโลสได้มากกว่าที่ความเข้มข้นอื่นๆ ปริมาณเยื่อที่ได้จึงลดลง ส่วนกระบวนการที่ก่อให้เกิดผลผลิตของเยื่อสูงที่สุด คือ การใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 25% และสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 80% และ 100% (แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%) โดยการใช้สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 80% ทำให้มีปริมาณผลผลิตเยื่อสูงกว่าเล็กน้อย ในส่วนของเยื่อคัดออกจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายด่างเพิ่มขึ้น ซึ่งตรงกันข้ามกับเยื่อละเอียดที่ได้ อาจเนื่องสารละลายด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นสูง ก่อให้เกิดการละลายของเฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลสเพิ่มมากขึ้น (Kihlman, 2012) เซลลูโลสในส่วนที่เกิดการละลายจึงรวมตัวเป็นก้อนของส่วนของเยื่อหยาบเป็นปริมาณที่สูงขึ้น ส่วนค่าความขาวของแผ่นกระดาษจากเยื่อที่ได้ พบว่าแต่ละสภาวะการทดลอง ได้ผลผลิตเยื่อที่มีความขาวใกล้เคียงกัน โดยเยื่อที่ได้จากการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 20% มีแนวโน้มให้ผลผลิตเยื่อที่มีความขาวสว่างสูงที่สุด ในขณะที่การใช้สารละลายด่างที่ความเข้มข้น 25% และสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ 100% ให้เยื่อที่มีความขาวใกล้เคียงกับการใช้สารละลายด่างที่ความเข้มข้น 20% อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาเฉพาะปริมาณเยื่อที่ใช้ได้ ควรเลือกการผลิตเยื่อทะลายปาล์มน้ำมันโดยใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 25% และสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 80% เพื่อลดปริมาณการใช้สารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ผลของการปรับปรุงคุณภาพของกระดาษเยื่อทะลายปาล์ม ด้วยการผสมเยื่อปอสาที่อัตราส่วนต่าง ๆ และการเคลือบด้วยกลูโคแมนแนนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

เพื่อพัฒนาคุณภาพของกระดาษจากเยื่อทะลายปาล์ม ซึ่งยังมีคุณภาพสำหรับการผลิตกระดาษได้ไม่ดีพอ จึงจำเป็นต้องผสมเยื่อเส้นใยยาวจากปอสา เพื่อช่วยเสริมความแข็งแรงให้แก่กระดาษจากเยื่อทะลายปาล์ม โดยเปรียบเทียบระหว่างการใช้เยื่อละเอียดและเยื่อรวมจากเส้นใยทะลายปาล์ม (Table 3) พบว่า น้ำหนักมูลฐานของกระดาษที่ได้จากเยื่อละเอียดมีแนวโน้มให้ค่าที่ต่ำกว่ากระดาษจากเยื่อรวม ทั้งนี้อาจเกิดจากการหายไปของเยื่อละเอียดระหว่างกระบวนการขึ้นรูป เพื่อพิจารณาค่าสมบัติเชิงกลของกระดาษที่ได้ พบว่ากระดาษเยื่อละเอียดที่มีส่วนผสมของเยื่อปอสาตั้งแต่ 30% ขึ้นไป และกระดาษเยื่อรวมที่มีเยื่อปอสา 20% ขึ้นไป จึงจะมีความแข็งแรงต่อการหักพับ โดยที่กระดาษเยื่อปอสามีความแข็งแรงต่อแรงหักพับมากกว่ากระดาษที่ประกอบด้วยเยื่อทะลายปาล์ม 50% และเยื่อปอสา 50% ถึง 4 เท่า ในส่วนของความแข็งแรงต่อแรงดึง พบว่ากระดาษเยื่อทะลายปาล์มที่ผสมเยื่อปอสาในปริมาณ 40 – 50% มีดัชนีแรงดึงที่ไม่แตกต่างจากกระดาษสาที่ใช้เปรียบเทียบ โดยที่กระดาษเยื่อละเอียดมีค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงที่สูงกว่าเยื่อรวมเมื่อผสมกับเยื่อปอสาที่อัตราส่วนเดียวกัน ส่วนค่าดัชนีแรงฉีกของกระดาษ จะสามารถวิเคราะห์ได้เมื่อมีอัตราส่วนของเยื่อทะลายปาล์มน้ำมันตั้งแต่ 10% ขึ้นไป โดยที่เยื่อละเอียดและเยื่อรวมของทะลายปาล์มน้ำมันไม่มีอิทธิพลต่อค่าแรงฉีกของกระดาษมากนัก ในกรณีของดัชนีแรงดันทะลุของกระดาษเยื่อทะลายปาล์ม จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของเยื่อปอสาที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าใกล้เคียงกันระหว่างกระดาษที่ผลิตด้วยเยื่อละเอียดและเยื่อรวมของทะลายปาล์ม สมบัติเชิงกลของกระดาษเยื่อทะลายปาล์มมีแนวโน้มพัฒนาขึ้นตามปริมาณเยื่อปอสาที่สูงขึ้น เนื่องจากเยื่อปอสาเป็นเส้นใยยาว จึงเสริมให้เยื่อทะลายปาล์มซึ่งเป็นเส้นใยสั้น เกิดการยึดเกาะระหว่างกันได้ดีขึ้น รวมทั้งก่อให้เกิดการกระจายตัวของเยื่อทะลายปาล์ม

ในบริเวณต่างๆ ได้อย่างสม่ำเสมอ และทำให้การจัดเรียงตัวของเยื่อปาล์มเป็นไปในทิศทางเดียวกัน (Anonymous, 2018) และเมื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลต่อค่าน้ำหนักของกระดาษทำมือที่ผลิตได้ พบว่า สมบัติเชิงกลของกระดาษเยื่อทะลายปาล์มน้ำมันยังไม่สามารถเทียบได้กับกระดาษสา จึงนำไปสู่การทดลองเคลือบกระดาษเยื่อทะลายปาล์มด้วยสารละลายกลูโคแมนแนนที่ความเข้มข้นต่างๆ เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้แก่กระดาษจากเยื่อทะลายปาล์ม โดยใช้กระดาษที่มีอัตราส่วนของเยื่อทะลายปาล์มต่อเยื่อปอสาเท่ากับ 70: 30 ในการทดสอบเนื่องจากเป็นอัตราส่วนที่มีเยื่อทะลายปาล์มอยู่ในระดับที่เหมาะสม หากมีสัดส่วนของเยื่อทะลายปาล์มสูงกว่าสัดส่วนนี้ จะส่งผลให้ความแข็งแรงของกระดาษที่ได้ลดลง และหากใช้สัดส่วนของเยื่อทะลายปาล์มที่ต่ำกว่านี้ จะได้รับอิทธิพลจากความแข็งแรงของเยื่อปอสามากเกินไป

Table 1 Fiber morphology and mechanical properties of oil palm empty fruit branch fiber.

Properties	Analytical value	Appropriate value
Fiber length (mm).	1.50±0.07	
Fiber width (mm)	0.0300±0.0015	
Lumen size, mm	0.0190±0.0009	
Fiber thickness, mm	0.0052±0.0002	
Runkel ratio	0.54±0.02	<1
Flexibility coefficient	0.63±0.03	>0.5
Slenderness ratio	50.00±2.50	>75
Wall fraction (%)	63.33±3.06	<50

Table 2 Pulp yield, pulp waste and whiteness of pulp from EFB pulp treated with different concentrations of NaOH and H_2O_2.

Treatment	NaOH (%)	H_2O_2 (%)	Total pulp yield (%)	Fine pulp yield (%)	Rough pulp yield (%)	Whiteness (%)
1	20	60	63.40 ± 3.16^{d}	56.56±2.82^{ef}	6.84±0.34^{bcd}	66.96±3.34^{b}
2	20	80	72.48 ± 3.61^{b}	64.72±3.23^{bc}	7.76±0.38^{bcd}	66.69±3.33^{b}
3	20	100	69.70 ± 3.48^{c}	63.48±3.17^{cd}	6.22±0.31^{bcd}	67.92±3.39^{a}
4	25	60	69.50 ± 3.47^{c}	60.08±3.00^{de}	9.42±0.47^{bc}	62.27±3.11^{e}
5	25	80	76.86 ± 3.84^{a}	69.82±3.49^{a}	7.04±0.35^{bcd}	65.11±3.25^{c}
6	25	100	72.40 ± 3.61^{b}	67.14±3.35^{ab}	5.26±0.26^{d}	67.74±3.38^{a}
7	30	60	70.88 ± 3.54^{b}	57.08±2.85^{ef}	13.80±0.69^{a}	61.14±3.05^{f}
8	30	80	64.32 ± 3.21^{d}	54.32±2.71^{f}	10.00±0.50^{b}	60.90±3.04^{f}
9	30	100	63.09 ± 3.51^{d}	57.20±2.86^{ef}	5.89±0.29^{cd}	64.41±3.22^{d}

Different letters in the same column (a, b, c, d, e and f) mean that the results are significantly different at $p \leq 0.05$ by Duncan's Multiple-Range Test.

Table 3 Mechanical properties of paper made from EFB pulp (A : fine pulp, B: Total pulps of fine and rough pulp) and mulberry pulp (M) at 70:30

Compositions of paper (EFB pulp : mulberry pulp)	Basis weight of paper (g/m^2)	Folding resistance index	Tensile index (N.m/g)	Tear index ($mN.m^2/g$)	Burst index ($kPa.m^2/g$)	Ratio of total mechanical properties/ basic weight
A100 : M0	80.97±4.04^{ab}	0	4.35±0.21^{e}	0	0.36±0.01^{h}	0.058
A90 : M10	80.85±4.04^{ab}	0	7.38±0.36^{d}	14.80±0.71^{ef}	0.82±0.04^{fg}	0.284
A80 : M20	79.74±3.08^{ab}	0	9.64±0.48^{c}	17.71±0.88^{e}	0.93±0.04^{f}	0.354
A70 : M30	80.03±4.00^{ab}	3±1^{bc}	11.63±0.58^{bc}	23.55±1.17^{d}	1.09±0.05^{e}	0.490
A60 : M40	78.99±3.94^{b}	6±1^{bc}	14.77±0.73^{a}	31.34±1.56^{c}	1.42±0.07^{cd}	0.678
A50 : M50	79.85±3.99^{ab}	11±1^{b}	16.38±0.81^{a}	35.09±1.75^{bc}	1.58±0.07^{bc}	0.802
B100 : M0	81.72±4.08^{a}	0	3.60±0.18^{e}	0	0.42±0.02^{h}	0.049
B90 : M10	81.19±4.05^{ab}	0	6.36±0.31^{d}	10.80±0.54^{f}	0.68±0.03^{g}	0.220
B80 : M20	81.44±4.07^{ab}	1±1^{c}	7.14±0.35^{d}	17.30±0.86^{e}	0.89±0.04^{f}	0.323
B70 : M30	81.18±4.05^{ab}	4±1^{bc}	9.80±0.40^{c}	22.34±1.11^{d}	1.22±0.06^{e}	0.460
B60 : M40	81.01±4.05^{ab}	5±1^{bc}	10.32±0.51^{bc}	25.72±1.28^{d}	1.33±0.06^{dc}	0.523
B50 : M50	80.95±4.04^{ab}	10±1^{b}	12.38±0.61^{b}	36.90±1.84^{b}	1.68±0.08^{b}	0.753
M100	81.88±4.09^{a}	41±2^{a}	15.84±0.79^{a}	46.53±2.52^{a}	2.76±0.13^{a}	1.296

Different letters in the same column (a, b, c, d, e and f) mean that the results are significantly different at $p \leq 0.05$ by Duncan's Multiple-Range Test.

ภายหลังการทดลองเคลือบกระดาษเยื่อทะลายปาล์ม ทั้งกรณีการใช้เยื่อละเอียดหรือเยื่อหยาบ ผสมกับเยื่อปอสาในอัตราส่วน 70:30 ด้วยสารละลายกลูโคแมนแนน เปรียบเทียบกับคุณสมบัติของกระดาษจากเยื่อปอสา 100% ได้ผลดังแสดงใน Table 4 ทั้งนี้ กลูโคแมนแนนมีลักษณะเป็นเส้นใยธรรมชาติในพืชที่มีความยืดหยุ่นสูง (Santos and Grenha, 2015) จึงมีอิทธิพลต่อสมบัติเชิงกลของกระดาษเยื่อทะลายปาล์ม โดยเฉพาะอย่างยิ่งความสามารถในการต้านทานแรงหักพับ ความต้านทานต่อแรงดึง และความต้านต่อแรงดันทะลุ ที่มีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของกลูโคแมนแนนที่สูงขึ้น ยกเว้นค่าดัชนีแรงฉีกของกระดาษที่ไม่ได้รับอิทธิพลจากความเข้มข้นของกลูโคแมนแนนที่ใช้เคลือบ และยังคงมีค่าต่ำกว่าดัชนีแรงฉีกของกระดาษสาซึ่งเป็นเยื่อใยยาว สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์สัณฐานของเส้นใยทะลายปาล์มน้ำมันเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตเป็นแผ่นกระดาษ ที่พบว่ากระดาษเยื่อทะลายปาล์มที่ได้จะทนต่อแรงฉีกได้ไม่ดีเท่าที่ควร หรือกล่าวได้ว่า การจัดเรียงตัวของเส้นใยยาวของเยื่อปอสา มีอิทธิพลต่อดัชนีแรงฉีกมากกว่าการพัฒนากระดาษด้วยการเคลือบกลูโคแมนแนน ในส่วนของความละเอียดของเยื่อทะลายปาล์มไม่มีอิทธิพลต่อสมบัติเชิงกลของกระดาษมากนัก เมื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลรวมต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักมูลฐานพบว่ากระดาษจากเยื่อละเอียดและเยื่อรวมของทะลายปาล์มน้ำมันที่เคลือบด้วยสารละลายกลูโคแมน แนนที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 0.4% มีสมบัติเชิงกลโดยรวมที่ดีกว่ากระดาษเยื่อปอ

สา 100% จึงมีความเป็นไปได้ในการพัฒนากระดาษเยื่อทะลายปาล์มด้วยการเคลือบด้วยกลูโคแมนแนนที่ความเข้มข้น 0.4%

Table 4 Mechanical properties of mulberry paper, paper of oil palm empty fruit bunch pulp (A : fine pulp, B: Total pulps of fine and rough pulps) and mulberry pulp (M) at 70:30 and coated with glucomannan at different concentrations.

Paper compositions and concentration of glucomannan (%)	Basis weight of paper (g/m^2)	Folding resistance index	Tensile index (N.m/g)	Tear index ($mN.m^2/g$)	Burst index ($kPa.m^2/g$)	Ratio of total mechanical properties/ basic weight
M100, 0%	81.88±4.09^{d}	41±2^{e}	15.84±0.79^{c}	45.53±2.27^{a}	2.76±0.13^{a}	1.290
A70:M30, 0%	80.03±4.00^{ab}	3±1^{bc}	11.63±0.58^{bc}	23.55±1.17^{d}	1.09±0.05^{e}	0.490
A70:M30, 0.2%	78.71±3.93^{d}	8±1^{e}	15.13±0.75^{c}	30.86±1.54^{b}	1.60±0.08^{d}	0.700
A70:M30, 0.4%	80.61±4.03^{d}	155±7^{d}	25.33±1.26^{b}	28.90±1.44^{bc}	2.10±0.10^{c}	2.620
A70:M30, 0.6%	83.43±4.17^{cd}	272±13^{c}	29.98±1.49^{a}	21.95±1.09^{de}	2.37±0.11^{bc}	3.910
A70:M30, 0.8%	89.19±4.45^{ab}	658±32^{a}	31.03±1.55^{a}	22.40±1.12^{de}	2.61±0.13^{ab}	8.000
B70:M30, 0%	81.18±4.05^{ab}	4±1^{bc}	9.80±0.40^{c}	22.34±1.11^{d}	1.22±0.06^{e}	0.460
B70:M30, 0.2%	82.25±4.11^{cd}	24±1^{e}	16.54±0.82^{c}	25.97±1.29^{cd}	1.46±0.07^{d}	0.820
B70:M30, 0.4%	82.35±4.11^{cd}	145±7^{d}	24.05±1.20^{b}	25.72±1.28^{cd}	2.01±0.10^{c}	2.380
B70:M30, 0.6%	86.94±4.34^{bc}	264±13^{c}	26.94±1.34^{ab}	24.68±1.23^{cd}	2.33±0.11^{bc}	3.650
B70:M30, 0.8%	91.87±4.59^{a}	405±20^{b}	30.22±1.51^{a}	19.72±0.98^{e}	2.77±0.13^{a}	4.980

Different letters in the same column (a, b, c, d, e and f) mean that the results are significantly different at $p \leq 0.05$ by Duncan's Multiple-Range Test.

สรุป

จากการวิเคราะห์สัณฐานของเยื่อทะลายปาล์มน้ำมัน พบว่าเยื่อที่ได้เป็นเยื่อสั้น แต่มีศักยภาพเพียงพอที่จะใช้ในการผลิตกระดาษทำมือ โดยคุณภาพของกระดาษที่ได้น่าจะมีปัญหาในเรื่องความไม่คงทนต่อแรงฉีก เพื่อพัฒนาคุณภาพของกระดาษทำมือจากเยื่อทะลายปาล์ม จึงทำการผสมเยื่อปอสาซึ่งเป็นเยื่อเส้นใยยาว ซึ่งจะช่วยเสริมในเรื่องของสมบัติเชิงกลได้ โดยอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการเสริมในกระดาษเยื่อทะลายปาล์มคือ ที่ 30% โดยน้ำหนัก อย่างไรก็ตามยังพบว่ากระดาษที่ได้ยังมีสมบัติเชิงกลที่แตกต่างจากกระดาษสา การเคลือบกระดาษด้วยสารละลายกลูโคแมนแนนที่ 0.4% จะทำให้สมบัติเชิงกลโดยรวมของกระดาษเยื่อทะลายปาล์มพัฒนาขึ้น แต่ความคงทนต่อแรงฉีกและความทนต่อแรงดัน ยังคงมีค่าต่ำกว่ากระดาษสา ดังนั้น หากต้องการเน้นให้กระดาษจากเยื่อทะลายปาล์มมีความแข็งแรงต่อแรงฉีกได้ดียิ่งขึ้น ควรเพิ่มปริมาณเยื่อปอสามากกว่า 30% แล้วเคลือบด้วยสารละลายกลูโคแมนแนนตั้งแต่ 0.4% ขึ้นไป ซึ่งมีความน่าจะเป็นที่จะนำมาผลิตบรรจุภัณฑ์สำหรับวัสดุต่างๆ เช่น ถึงกระดาษได้ แต่หากไม่เน้นที่การพัฒนาดัชนีแรงฉีกของกระดาษ สามารถผลิตโดยใช้เยื่อ

ทะลายปาล์มน้ำมันทั้งเยื่อละเอียดและเยื่อรวมผสมเยื่อปอสาในอัตราส่วน 70:30 โดยน้ำหนักแห้ง เคลือบด้วยสารละลายกลูโคแมนแนนที่ความเข้มข้น 0.4% ซึ่งสามารถใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ประเภทการ์ดอวยพร หรือป้ายต่างๆ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับการสนับสนุนทุนวิจัยในครั้งนี้ และบริษัทสุขสมบูรณ์ น้ำมันปาล์ม จำกัด สำหรับการอนุเคราะห์วัตถุดิบทะลายปาล์มน้ำมันที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

เอกสารอ้างอิง

เชฐชุดา เชื้อสุวรรณ. 2561. อุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม. **แนวโน้มธุรกิจ/อุตสาหกรรม ปี 2561-63 ธนาคารกรุงศรีอยุธยา**. แหล่งที่มา: https://www.krungsri.com/bank/getmedia/ac57ec39-c8ab-4546-8c48-5dfde9e45328/IO_Oil_Palm_2018_TH.aspx. 27 พฤศจิกายน 2561.

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.

Alawar, A., A. M. Hamed and K . Al-Kaabi. 2009. Characterization of treated date palm tree fiber as composite reinforcement. **Composites Part B: Engineering**. 40(7): 601-606.

Anonymous. 2018. **Pulp paper mill**. Available source: http://www.pulppapermill.com/tear-strength-of-paper. December 3, 2018.

Casey, J. P. 1980. **Pulp and Paper Chemistry Technology**. Vol 1, 3rd ed., John Wiley & Sons, New York. 820 p.

Chaobo, X., Y. Lu and L. Zhang. 2001. Preparation and physical properties of konjac glucomannan-polyacrylamide blend films, **Journal of Applied Polymer Science**. 81(4): 882.

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.

Kaddami, H., A. Dufresne, B., Khelifi, A. Bendahou, M. Taourirte, M. Raihane, N. Issartel, H. Sautereau and J.F. Gerard. 2006. Short palm tree fibers-Thermoset matrices composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**. 37: 1413-1422.

Kihlman, M. 2012. **Dissolution of cellulose for textile fibre applications**. Universitetstryckeriet, Karlstad.

Rydholm, S. 1967. **Pulping Processes**. New York, Interscience Publishers. 1269p.

Wirjosentono, B., P. Guritno and H. Ismail. 2004. Oil palm empty fruit bunch filled polypropylene composites. **International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials**, 53: 295-306.

Santos, M.A. and A. Grenha. 2015. Protein and Peptide Nanoparticles for drug delivery. **Advances in Protein Chemistry and Structural Biology**. 98: 223-261.

Effect of Emulsifiers on Pasting Properties of Rice Flour and Alkaline Rice Noodle Qualities

Adisa Khachadpai[1] and Masubon Thongngam[1*]

ABSTRACT

The main structure of rice alkaline noodles is amylose network, responsible for noodle strength. Unlike gluten, the amylose network, which forms by amylose association, is lack of elasticity and extensibility. In the present study, the effect of emulsifiers, sodium steroyl-2-lactate (SSL) and sucrose monostearate (SEs), at various concentrations (0.10 0.25 0.50 and 1.00% based on flour weight) on the pasting properties of rice flour and alkaline rice noodle qualities were investigated. The results showed that the pasting temperature, final viscosity and setback of rice flour with the addition of SSL and SEs significantly increased, especially at higher emulsifier concentration. For the cooking properties of alkaline rice noodle, cooking time and cooking loss were increased, while the cooking yield was decreased with increasing emulsifier concentration. The stress and strain of alkaline rice noodle with SEs were lower than SSL. However, when increasing the emulsifier concentration, the strain value of alkaline rice noodle decreased.

Key Words: Alkaline Rice Noodle, Cooking quality, Emulsifier, Rice Flour, Texture

* Corresponding author; e-mail address: **Masubon.t@ku.th**

[1]Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

INTRODUCTION

Generally, alkaline noodle, a staple food among Asian country, made from three major ingredients such as wheat flour, water and salt. Gluten in wheat flour consists of two proteins called gliadin (responsible for viscosity and extensibility) and glutenins (responsibility for elasticity and cohesiveness). Even wheat gluten is important for textural quality of products, there are patients who are intolerance for wheat protein, celiac disease and wheat allergy (Padalino *et al*., 2016).

Nowadays, the number of the celiac patient is increasing, causing the increasing demand of gluten-free products (Foschia *et al*., 2016). Rice flour is commonly used as gluten-free ingredient because it has soft taste, low levels of sodium and hypoallergenic properties (Marco and Rosell, 2008). Due to the lack of protein, the main structure of alkaline rice noodle is from starch network (amylose network) (Chaichaw *et al*., 2011). Therefore, the alkaline rice noodle is weak, rigid and gives poor eating quality.

From previous research it was found that the mix rice flour between high and medium amylose could improve alkaline rice noodle quality. However, it was still lack of elastic properties. In this research, it was hypothesized that emulsifiers might weaken the amylose network and increase the extensibility of noodle strands. The objective of the study was to investigate the effect of emulsifiers on the textural properties of alkaline rice noodle.

MATERIALS AND METHODS

Materials

Two rice varieties; KhaoDawkMali105 and KhaoTahHaeng were selected for rice flour production. Commercial pregelatinized flour was obtained from Siam Modified Starch Co., Ltd. Commercial wheat flour was used as a control. Sodium steroyl-2-lactate and sucrose monostearate, HLB 11 and 15, respectively were purchased from Questex Co., Ltd. Thailand.

Rice flour preparation

Rice flour was prepared by followed Chaichaw *et al*., (2011) method. Rice grains were soaked in water for 4 h and then wet milled using colloid mill. Rice flour slurry was then centrifuged by basket centrifuge and dried in a tray dryer at 45 °C until the moisture content was below 12%. After that the dried rice flour cake was milled, sieved and packed in polyethylene plastic bag and stored at -18 °C for further use.

Emulsifiers preparation

Sodium steroyl-2-lactate and sucrose monostearate at 0.10 0.25 0.50 and 1.00% (based on flour weight) were prepared by followed Shiau, (2004). Both emulsifiers were dissolved in water at 45 °C and 65 °C for sodium steroyl-2-lactate and sucrose monostearate, respectively and then, cooled at room temperature before adding into the starch suspension.

Pasting properties

The pasting properties of rice flour with and without emulsifiers were determined following AACC method 61-02 (AACC, 2000) using Rapid Visco Analyzer (RVA).

Alkaline rice noodle preparation

Alkaline rice noodle was prepared by followed Chomchoey and Thongngam (2018). Mixed rice flour was mixed with commercial pregelatinized flour, emulsifiers, sodium chloride, sodium carbonate, oil and distilled water and then kneaded to form a dough. The dough was rested in a plastic bag at room temperature for 20 min. Then, the dough was passed through the sheeting rollers and cut into the noodle strands. Finally, the noodles were dried at 35 °C for 4h.

Cooking properties

Cooking properties were determined according to AACC method (AACC, 2000). The dried alkaline rice noodles (15g) were boiled in boiling water (300ml) until the white core was not present then recorded as a cooking time. Then, the alkaline rice noodles were drained and rinsed with distilled water before weighing and determining for a cooking yield. The cooking and rinsing water were collected and dried at 105 °C until the weight in constant to determine a cooking loss.

Textural properties

Alkaline rice noodle was cooked with optimum cooking time, immersed in cool water for 1 min to stop cooking, drained and placed in a covered container before a measurement. The tensile test of all alkaline rice noodle was measured using Texture Analyzer with a spaghetti tensile grips (A/SPR) probe and 5 kg load cell. The maximum tensile stress (maximum tensile force for noodle breaking/initial area of noodle, kPa) and the maximum tensile strain (maximum extension/original length of noodle) were recorded.

Statistical analysis

Result were analyzed using analysis of variance (ANOVA) and Duncan's multiple range test was used to determine significant ($p \leq 0.05$) differences among the treatment means using the SPSS software.

RESULTS AND DISSCUSSION

Pasting properties of rice flour

Since the interaction between starch molecule and emulsifier might be responsible to the strength of noodle strands therefore the change of starch in the presence of emulsifier was studied. The pasting properties of flour were correlated to the eating quality of noodles (Li *et al*., 2018). The pasting properties of mixed rice flour with or without emulsifiers were determined using RVA and shown in Table1. The results showed that the pasting temperature of rice flour has increased significantly when emulsifiers were presence in the mixture. Moreover, when the concentrations of

emulsifier increased, the pasting temperature also increased. This might possibly due to the fact that the emulsifiers may interact with starch molecule to form amylose-emulsifier complex and caused the delay starch swelling ability leading to increasing the pasting temperature (Gunaratne *et al*., 2007; Azzi and Rao, 2005). Moreover, the addition of sucrose monostearate has significantly increased the pasting temperature higher than SSL (Table 1) because the SEs has longer carbon chains to form strong complex than SSL (Moorthy, 1985).

Table 1 Effect of emulsifiers on pasting properties of rice flour.

	Pasting Properties (cP)					
Sample	Pasting Temp (°C)	Peak viscosity	Trough	Breakdown	Final viscosity	Setback
WF	81.48^{b}	2121.00^{d}	1215.00^{e}	906.00^{c}	2576.00^{f}	1361.00^{h}
RF	76.33^{f}	4179.00^{c}	1662.50^{d}	2516.50^{ab}	3514.50^{e}	1852.00^{g}
RF+SSL0.10	78.35^{de}	4289.50^{c}	1998.00^{c}	2291.50^{b}	4032.50^{d}	2034.50^{f}
RF+SSL0.25	79.75^{cd}	4419.00^{c}	2079.00^{bc}	2340.00^{b}	4499.00^{c}	2420.00^{d}
RF+SSL0.50	80.93^{bc}	4462.00^{bc}	2085.00^{bc}	2377.00^{b}	4697.00^{b}	2612.00^{c}
RF+SSL1.00	82.10^{b}	4497.50^{bc}	2132.00^{b}	2365.50^{b}	5161.00^{a}	3029.00^{a}
RF+SEs0.10	78.10^{e}	4517.00^{bc}	2013.50^{c}	2503.50^{ab}	4031.00^{d}	2017.50^{f}
RF+SEs0.25	78.53^{de}	4794.00^{ab}	2075.50^{bc}	2718.50^{a}	4190.00^{d}	2114.50^{f}
RF+SEs0.50	79.73^{cd}	4778.00^{ab}	2122.50^{b}	2655.50^{a}	4399.50^{c}	2277.00^{e}
RF+SEs1.00	85.08^{a}	4861.50^{a}	2309.50^{a}	2552.00^{ab}	5087.50^{a}	2778.00^{b}

Values are expressed as means ± SD

Different letters in the same column indicate significant difference at $p \leq 0.05$.

Peak viscosity is the maximum swelling of the starch granule before disintegration and often correlated to the quality of final products (Meng *et al*., 2014). From Table 1, the peak viscosity and final viscosity of mixed rice flour were 4179 cP and 3514 cP respectively, which is higher than those of wheat flour, and the results were similar to those of Chomchoey and Thongngam, (2018; unpublished data). In the presence of emulsifiers, the results show that the peak viscosity was higher than control (rice flour) sample. When compare the effect of emulsifier types, the results showed that the peak viscosity and breakdown of rice flour with SEs were higher than those of rice flour with SSL. In addition, the results showed that the concentration has slight effect on peak viscosity and breakdown. Moreover, in Table 1, the results showed that the final viscosity and setback of rice flour with the addition of emulsifiers were higher than rice flour with no emulsifier. Furthermore, both emulsifiers showed the similar results which are the final viscosity and setback increased with increasing temperature. This might be due to the fact that the amylose molecules or emulsifiers may associate during the cooling stage and form single helical conformation of amylose (V-amylose) insteads of double helical conformation (Ali and Hasnain, 2013).

The textural properties of alkaline rice noodle

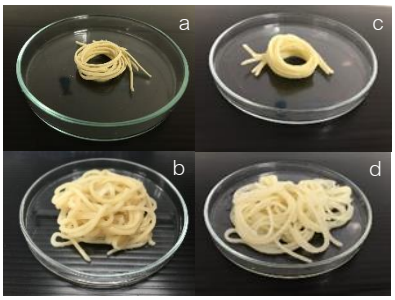


Figure 1 Uncooked and cooked of alkaline noodles made from wheat (a,b) and rice flour (c,d).

(A)

(B)

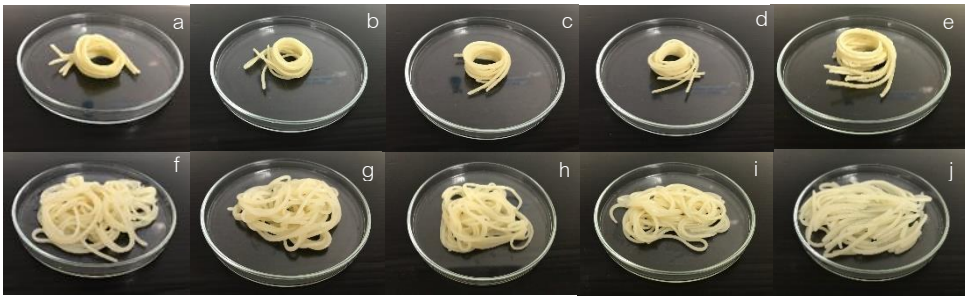


Figure 2 (A) Uncooked alkaline rice noodle without SSL (a), uncooked alkaline rice noodle with SSL at 0.10, 0.25, 0.50 and 1.00% (b-e) respectively. (B) Cooked alkaline rice noodle without SSL (f), cooked alkaline rice noodle with SSL at 0.10 0.25 0.50 and 1.00% (g-j) respectively.

(A)

(B)

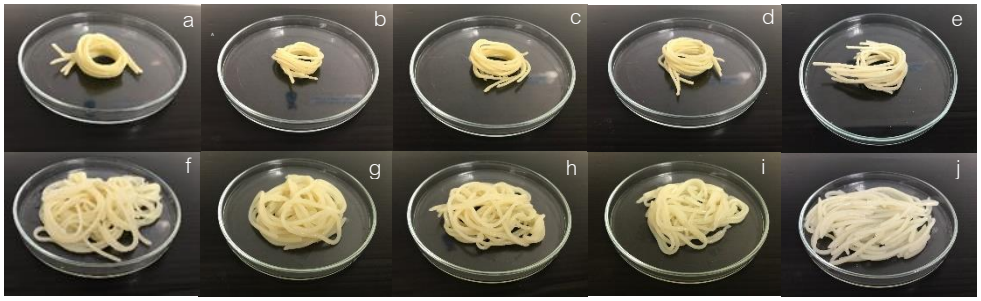


Figure 3 (A) Uncooked alkaline rice noodle without SEs (a), uncooked alkaline rice noodle with SEs at 0.10 0.25 0.50 and 1.00% (b-e) respectively. (B) Cooked alkaline rice noodle without SEs (f), cooked alkaline rice noodle with SEs at 0.10 0.25 0.50 and 1.00% (g-j) respectively.

Figure 1 shows the visual appearance of uncooked and cooked alkaline noodle made from wheat and rice flour. The alkaline noodle made from wheat flour was more yellowish and had smoother surface than the alkaline noodle made from rice flour. When adding the emulsifiers, the uncooked of alkaline rice noodles was brighter than control. (Figure 2 and 3).

Cooking properties

Cooking yield and cooking loss are two important factors related to the noodle quality (Hormdok and Noomhorm, 2007). In table 2, the results showed that the optimum cooking time of wheat alkaline noodle was shorter than alkaline rice noodles. When compared the effect of emulsifiers, the result

showed that in the presence of emulsifier, the cooking time become longer. This might be because of the formation of the amylose-emulsifier complex (Ali and Hasnain, 2013). When adding the emulsifiers, the cooking yield and cooking loss of alkaline rice noodles were increased. This may be attributed to the higher breakdown (Table 1) that means lower resistance to disintegration in response to heat and shear leads to sticky noodle texture (Figure 2 and 3).

Table 2 Effect of emulsifiers on cooking properties of alkaline rice noodles.

Sample	Cooking properties		
	Cooking time (min)	Cooking yield (%)	Cooking loss (%)
WF	4.30 ± 0.00	185.65 ± 6.45^{a}	8.49 ± 0.95^{f}
RF	6.45 ± 0.00	142.43 ± 5.04^{c}	11.85 ± 1.24^{e}
RF + 0.10 SSL	7.15 ± 0.00	160.69 ± 1.48^{b}	14.12 ± 0.52^{d}
RF + 0.25 SSL	7.30 ± 0.00	153.45 ± 6.49^{bc}	15.94 ± 0.76^{c}
RF + 0.50 SSL	7.30 ± 0.00	148.76 ± 0.26^{bc}	17.59 ± 0.62^{b}
RF + 1.00 SSL	9.00 ± 0.00	146.56 ± 3.96^{bc}	22.56 ± 0.49^{a}
RF + 0.10 SEs	7.30 ± 0.00	161.49 ± 2.27^{b}	15.32 ± 0.20^{cd}
RF + 0.25 SEs	7.45 ± 0.00	156.07 ± 4.88^{b}	16.44 ± 0.63^{bc}
RF + 0.50 SEs	8.00 ± 0.00	153.48 ± 3.96^{bc}	20.63 ± 0.25^{a}
RF + 1.00 SEs	9.00 ± 0.00	151.87 ± 4.95^{bc}	23.48 ± 0.86^{a}

Values are expressed as means ± SD

Different letters in the same column indicate significant difference at $p \leq 0.05$.

Textural properties

The texture of cooked noodle is the most critical characteristic that determines consumer acceptance of the product (Hormdok and Noomhorm, 2007). In table 3, the stress of alkaline rice noodle with both emulsifiers decreased significantly except for the SSL at 0.25 and 0.50%. Moreover, with the addition of 1% SSL and SEs, the noodles become brittle and cannot be measured (Table3). Satmalee and Charoenrein (2009) reported that the hardness and tensile strength of rice noodles related to the degree of starch retrogradation. Therefore, the decrease in the tensile strength of alkaline rice noodle with both emulsifiers may be attributed to the formation of amylose-emulsifier complex led to the decrease of starch reassociation to form strong network in noodle (Table 3). The strain values of the alkaline rice noodle with SSL and SEs decreased and they also decrease when the concentration of emulsifiers increased. This may be because the emulsifiers may decrease the polymer mobility.

Table 3 Effect of emulsifiers on textural properties of alkaline rice noodles.

Sample	Texture	
	Stress (kPa)	Strain
WF	89.45 ± 9.69[a]	0.76 ± 0.11[a]
RF	35.20 ± 1.36[b]	0.62 ± 0.04[b]
RF + SSL 0.10	30.49 ± 3.25[c]	0.54 ± 0.06[bc]
RF + SSL 0.25	34.78 ± 2.69[b]	0.50 ± 0.06[cd]
RF + SSL 0.50	33.59 ± 1.01[b]	0.43 ± 0.03[de]
RF + SSL 1.00	ND	ND
RF + SEs 0.10	20.43 ± 1.72[d]	0.50 ± 0.07[cd]
RF + SEs 0.25	19.37 ± 1.57[d]	0.37 ± 0.07[e]
RF + SEs 0.50	18.61 ± 2.92[d]	0.38 ± 0.07[e]
RF + SEs 1.00	ND	ND

Values are expressed as means ± SD

Different letters in the same column indicate significant difference at $p \leq 0.05$.

ND: not determined

CONCLUSION

This work showed that the type of emulsifier has more effect on pasting temperature, final viscosity and setback of rice flour with emulsifier than concentration. The cooking time and cooking loss of alkaline rice noodles with emulsifiers were increased, while decreased in cooking yield. However, the concentration of emulsifier has slightly effect on cooking yield than the type of emulsifier. The stress and strain of alkaline rice noodle with both emulsifiers were decreased with the increasing concentration emulsifier.

REFERENCES

Ali, T.M. and A. Hasnain. 2013. Effect of Emulsifiers on Complexation and Functional Properties of Oxidized White Sorghum (*Sorghum bicolor*) Starch. **Journal of Cereal Science** 57(1): 107-114.

Ashwini, A., Jyotsna, R., and Indrani, D. 2009. Effect of Hydrocolloids and Emulsifiers on the Rheological, Microstructural and Quality Characteristics of Eggless Cake. **Food Hydrocolloids** 23: 700-707.

Azizi, M.H. and G.V. Rao. 2005. Effect of Surfactant in Pasting Characteristics of Various Starches. **Food Hydrocolloids** 19(4): 739-743.

Chaichaw, C., O. Naivikul and M. Thongngam. 2011. Effect of Heat-Moisture Treatment on Qualities of Gluten-Free Alkaline Rice Noodles from Various Rice Flour Varieties. **Kasetsart Journal** 45: 490-499.

Chomchoey, S., and M. Thongngam. 2018. Effect of Pea Protein Isolate and Egg White Powder on the Properties of Alkaline Rice Noodles. **Proceedings of the 57st Kasetsart University Annual Conference**, Kasetsart University, Bangkok, Thailand.

Foschia, M., S. Horstmann, E.K. Arendt and E. Zannini. 2016. Nutritional Therapy – Facing the Gap between Coeliac Disease and Gluten-Free Food. **International Journal of Food Microbiology** 239: 113-124.

Gunaratne, A., S. Ranaweera and H. Corke. 2007. Thermal, Pasting, and Gelling Properties of Wheat and Potato Starches in the Presence of Sucrose, Glucose, Glycerol, and Hydroxypropyl B-Cyclodextrin. **Carbohydrate Polymers** 70(1): 112-122.

Hormdok, R., and A. Noomhorm. 2007. Hydrothermal Treatments of Rice Starch for Improvement of Rice Noodle Quality. **Journal of Food Science and Technology** 40(10): 1723-1731.

Li, M., Q.J. Sun, C.W. Han, H.H. Chen and W.T. Tang. 2018. Comparative Study of The Quality Characteristics of Fresh Noodles with Regular Salt and Alkali and The Underlying Mechanisms. **Food Chemistry** 246: 335-342.

Marco, C. and C.M. Rosell. 2008. Breadmaking Performance of Protein Enriched, Gluten-Free Breads. **European Food Research and Technology** 227(4): 1205-1213.

Meng, Y.C., M.H. Sun, S. Fang, J. Chen and Y.H. Li. 2014. Effect of Sucrose Fatty Acid Esters on Pasting, Rheological Properties and Freeze-Thaw Stability of Rice Flour. **Food Hydrocolloids** 40: 64-70.

Moorthy, S.N. 1985. Effect of Different Types of Surfactants on Cassava Starch Properties. **Food Chemistry** 33: 1227-1232.

Padalino L., A. Conte and M.A.D. Nobile. 2016. Overview on the General Approaches to Improve Gluten-Free Pasta and Bread. **Journal of Food Science** 5: 87.

Satmalee, P., and S. Charoenrein. 2009. Acceleration of Ageing in Rice Stick Noodle Sheets using Low Temperature. **Journal of Food Science and Technology** 44: 1367-1372.

Shiau, S.Y. 2004. Effects of Emulsifiers on Dough Rheological Properties and the Texture of Extruded Noodles. **Journal of texture studies** 35(1): 93-103.

Wani, A.A., P. Singh, M.A. Shah, U.S. Weisz and K. Gul. 2012. Rice Starch Diversity: Effects on Structural, Morphological, Thermal, and Physicochemical Properties—A Review. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety** 11(5): 417-436.

ผลของกระบวนการเปิดเจาะลูกมะพร้าว และสารโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของน้ำมะพร้าวในระหว่างการเก็บรักษา

Influence of Opening Coconut Fruit and Sodium Metabisulphite on Quality Changes of Coconut Water During Storage

สุธาทิพย์ ชูศักดิ์[1] และ พิสิฏฐ์ ธรรมวิถี[1*]

Suthatip Chusak[1] and Pisit Dhamvithee[1*]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาผลของกระบวนการเปิดเจาะลูกมะพร้าว และสาร โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของน้ำมะพร้าวในระหว่างการเก็บรักษา โดยทำการทดสอบการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของน้ำมะพร้าวที่ผ่านการเปิดเจาะแบบดั้งเดิม (Control) และ วิธีการปลอดเชื้อ (Aseptic) ร่วมกับการใช้สารโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ (SMBS) ร้อยละ 0.005 (โดยน้ำหนัก) ในระหว่างการเก็บรักษา 2, 4, 6 และ 8 วัน ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส พบว่าน้ำมะพร้าวที่ใช้วิธีการเปิดเจาะลูกแบบ Aseptic มีปริมาณเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้น ปริมาณกรดที่ไตเตรทได้ และค่าความขุ่นน้อยกว่าการเปิดเจาะแบบวิธีดั้งเดิมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยทั้งสองวิธีมีแนวโน้มของค่า pH และปริมาณสารประกอบฟีนอลิกลดลง ตามระยะเวลาการเก็บรักษา ซึ่งค่าการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของน้ำมะพร้าวที่ผ่านการเปิดเจาะแบบ Aseptic (ไม่เติม SMBS) ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) กับน้ำมะพร้าวที่เติมสาร SMBS ดังนั้นน้ำมะพร้าวที่ผ่านการเปิดเจาะโดยวิธี Aseptic เพียงพอต่อการรักษาคุณภาพ และยืดอายุการเก็บได้ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส โดยไม่จำเป็นต้องใช้สาร SMBS อย่างไรก็ตามการเปิดเจาะแบบ Aseptic จะช่วยลดปริมาณเชื้อเริ่มต้น และช่วยยืดอายุการเก็บรักษาของน้ำมะพร้าวได้

ABSTRACT

The aims of this research were to studied about the influence of opening coconut fruit methods and sodium metabisulphite on quality changes of coconut water during storage. The traditional opening method (Control) and aseptic opening method (Aseptic) were used then 0.005% (by wt.) Sodium metabisulphite (SMBS) were added to coconut water as preservative to analyze the quality changes of coconut water during storage times at 4ºC for 2, 4, 6 and 8 days. The result showed that coconut water (Aseptic) could reduce the initial microbial load than control. The value of acidity and turbidity of aseptic were significantly ($p \leq 0.05$) lower than control. During storage of coconut water, the pH and total phenolic compound decreased for all of samples. The quality changes of coconut water (Aseptic and non-adding SMBS) and coconut water (added SMBS) were not significantly different ($p>0.05$) in term of microorganism. Thus, coconut water from aseptic was gradually good quality during storage at 4 ºC without the need to use SMBS. However, aseptic opening method could reduce initial microbial load and extend the shelf life of coconut water.

Key Words: Coconut water, Pre-processing, Sodium metabisulphite

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

[1]ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Product Development, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

มะพร้าว (*Cocos nucifera* Linn.) เป็นพืชที่สำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศไทย โดยผลิตภัณฑ์จากมะพร้าวเป็นสินค้าที่มีศักยภาพ และมีแนวโน้มที่จะเติบโต นอกจากนี้มะพร้าวยังถูกจัดให้เป็น Super food ที่เชื่อว่าเป็นอาหารที่ให้ผลดีต่อสุขภาพ ได้รับความนิยมตามกระแสการรักษาสุขภาพ (ศูนย์วิจัยกสิกรไทย, 2560) โดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำมะพร้าวเป็นเครื่องดื่มเกลือแร่ (mineral water) จากธรรมชาติ ใช้เป็นเครื่องดื่มเพื่อเพิ่มความสดชื่น จัดเป็น Sport drink สามารถดื่มหลังการสูญเสียเหงื่อจากการเล่นกีฬาหรือออกกำลังกาย และยังมีคุณสมบัติเป็นสารละลายไอโซโทนิก (สารละลายที่มีความเข้มข้นเท่ากับภายในเซลล์) สามารถลดอาการขาดน้ำได้ดี ลดอาการมึนเมาหลังดื่มเครื่องดื่มแอลกอฮอลล์ จากการศึกษาของ Ismail *et al.* (2007) การดื่มน้ำมะพร้าวผสมเกลือสมุทรสามารถช่วยปรับสมดุลน้ำในร่างกายผ่านกลไกการแลกเปลี่ยนประจุไอออน ช่วยเพิ่มปริมาณโซเดียมและลดการขาดน้ำจากการเสียเหงื่อหลังออกกำลังกายได้ดี

อย่างไรก็ตามในเชิงเศรษฐกิจน้ำมะพร้าวสดจากมะพร้าวต้นสูงยังมีราคาขายที่มีมูลค่าต่ำ โดยอ้างอิงจากล้งรับน้ำมะพร้าวในพื้นที่อำเภออัมพวา จังหวัดสมุทรสงคราม ราคาขายน้ำมะพร้าวสดอยู่ที่ 4-6 บาทต่อกิโลกรัม (พฤศจิกายน 2561) การเพิ่มมูลค่าให้กับน้ำมะพร้าวจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งที่จะช่วยยกระดับสินค้าให้สูงขึ้น ซึ่งต้องเริ่มจากการจัดการต้นน้ำ กลางน้ำให้มีมาตรฐานที่ชัดเจน ทั้งในเรื่องคุณภาพของวัตถุดิบน้ำมะพร้าวที่มักพบปัญหาคุณภาพที่ไม่ได้มาตรฐาน ในส่วนของมะพร้าวต้นสูงจะแยกขายน้ำมะพร้าวสดจากล้งที่มีการรับน้ำมะพร้าวสู่โรงงานแปรรูป เนื่องจากไม่มีมาตรฐานในการจัดการวัตถุดิบที่ดี (best practice) ทำให้เกิดการเสื่อมเสียได้ง่าย ผู้ผลิตส่วนใหญ่แก้ไขปัญหาเหล่านี้ด้วยการเติมวัตถุกันเสีย (preservative) เช่น สารกลุ่มสารประกอบซัลไฟต์ ที่มีคุณสมบัติช่วยลด Redox potential ได้โดยตรง เพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดการเสื่อมเสีย (Luck, 1997) แม้ว่าสารกลุ่มนี้จะถูกเอนไซม์ซัลไฟต์ออกซิเดส ออกซิไดส์ และขับออกทางปัสสาวะ หากได้รับในปริมาณมากร่างกายไม่สามารถขับออกหมด อาจทำให้เกิดอันตรายต่อร่างกาย เกิดปัญหาเกี่ยวกับระบบทางเดินหายใจได้ (Kisker, 2001) โดยจากรายงานในสหรัฐอเมริกาผู้ที่เป็นโรคหอบหืดจะมีอาการแพ้สารซัลไฟต์ร้อยละ 5 และในผู้ที่ปกติจะมีอาการแพ้สารซัลไฟต์ร้อยละ 1 (Knodel, 1997)

The World Health Organization (WHO) ได้กำหนดค่าความปลอดภัยของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (sulfur dioxide) ที่ใช้เป็นวัตถุเจือปนอาหาร (food additive) ปริมาณที่ได้รับต่อวัน ไม่เกิน 0.7 $mg.kg^{-1}$ ของน้ำหนักตัว (Queiroz *et al.*, 2008) และในประเทศไทย ประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 356) พ.ศ. 2556 เรื่อง เครื่องดื่มในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท กำหนดให้ใช้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ไม่เกิน 70 มิลลิกรัม ต่อ 1 กิโลกรัมเครื่องดื่ม นอกจากนี้กฎหมายบัญญัติของบราซิล (Brazilian legislation RDC 08/2013) กำหนดให้มีการตกค้างของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้ไม่เกิน 0.005 กรัม ใน 100 มิลลิลิตรของน้ำมะพร้าว (Brasil, 2013) ดังนั้นวัตถุประสงค์ในการศึกษาเพื่อศึกษาผลของกระบวนการเปิดเจาะลูกมะพร้าวและสารโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของน้ำมะพร้าวในระหว่างการเก็บรักษา โดยทำการทดสอบการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของน้ำมะพร้าวที่ผ่านการเปิดเจาะแบบดั้งเดิม (Control) และ วิธีการปลอดเชื้อ (Aseptic) ร่วมกับการใช้สารโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ (SMBS) ร้อยละ 0.005 ในระหว่างการเก็บรักษา 2, 4, 6 และ 8 วัน ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมวัตถุดิบ

- มะพร้าวผลสด

คัดเลือกมะพร้าวที่ใช้ในการศึกษา มะพร้าวพันธุ์ต้นสูง เปลือกสีเขียว อายุช่วง 6-7 เดือน ทั้งนี้การคัดเลือกผลมะพร้าวตามระยะแก่-อ่อน ได้ใช้ประสบการณ์ และความเชี่ยวชาญของชาวสวนในเขตจังหวัดสมุทรสงคราม ทำการเก็บรักษามะพร้าวทั้งลูกที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 3 องศาเซลเซียส) เป็นเวลาไม่เกิน 24 ชั่วโมง ก่อนทำการประเมินคุณภาพในด้านต่าง ๆ

- โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ (Food grade) ประเทศเยอรมนี จากบริษัทเคมีภัณฑ์ จำกัด

ศึกษาผลของกระบวนการเปิดเจาะลูกมะพร้าวและสารโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ (SMBS) ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของน้ำมะพร้าวในระหว่างการเก็บรักษา

ผลมะพร้าวพันธุ์ต้นสูง เปลือกเขียว อายุ 6-7 เดือนหลังติดจั่น จากพื้นที่อำเภออัมพวา จังหวัดสมุทรสงคราม เป็นวัตถุดิบที่ใช้ในการศึกษา ทำการปอกเปลือก และเปิดเจาะมะพร้าว 2 วิธี คือ วิธีการเปิดเจาะแบบดั้งเดิม (Traditional) และวิธีการปลอดเชื้อ (Aseptic) ซึ่งเป็นการลดการสัมผัสของน้ำมะพร้าวกับเครื่องมือที่ใช้ในการเปิดเจาะลูก ร่วมกับการเติมสารโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ ($Na_2S_2O_5$) ความเข้มข้นร้อยละ 0.005 (เจนจิรา , 2558) เป็นวัตถุกันเสีย ทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงคุณภาพในระหว่างการเก็บรักษา 2, 4, 6 และ 8 วัน ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

Table 1 Treatments used in this study.

Treatment	Opening Method	Preservative
1 (Control)	Traditional	Non-adding SMBS
2 (C + Preservative)	Traditional	Adding 0.005% SMBS
3 (Aseptic)	Aseptic	Non-adding SMBS
4 (A + Preservative)	Aseptic	Adding 0.005% SMBS

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงคุณภาพของน้ำมะพร้าว

1. การวิเคราะห์ค่าทางกายภาพ

1.1 ค่าความขุ่น (Turbidity) และร้อยละการส่องผ่าน (%Transmittance) ของน้ำมะพร้าว

การวิเคราะห์ร้อยละการส่องผ่าน (%Transmittance) วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 610 นาโนเมตร (Kwiatkowski *et al*., 2008) แหล่งกำเนิดแสง D_{65} ที่ 10 องศา ด้วยเครื่อง Spectrophotometer (UV-160A, SHIMADZU, Japan)

การคำนวณค่าความขุ่น (Turbidity) และร้อยละการส่องผ่าน (%Transmittance)

ร้อยละการส่องผ่าน (%Transmittance) = 100 x (10-ค่าการดูดกลืนแสง)

ค่าความขุ่น (Turbidity) = 100 – ค่าการส่องผ่าน (Transmittance)

2. การวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี

2.1 การวิเคราะห์ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (Total Soluble Solid: TSS) ใช้เครื่อง Hand Refractometer ขนาด 0-32 บริกซ์ ประเทศญี่ปุ่น รายงานผลเป็น องศาบริกซ์ (ºBrix) ตามวิธีของ AOAC (2000)

2.2 การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-เบส โดยใช้เครื่อง pH meter (Lab 855, SI Analytic, Germany) ตามวิธีการ AOAC (2000)

2.3 การวิเคราะห์ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ (Titratable acidity: TA ตามวิธีของ AOAC (2000)

คำนวณหาปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ (เทียบกับกรดซิตริก) เมื่อถึงจุดยุติตามสูตร ดังนี้

$$\text{ร้อยละของกรดที่ไตเตรทได้} = \frac{V \times N \times Mez_{wt} \times 100}{Y}$$

V = ปริมาตรของโซเดียมคลอไรด์ที่ใช้ไตเตรทหน่วยเป็นมิลลิลิตร

N = ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (0.1 นอร์มอล)

Mez_{wt} = มิลลิอิควิวาเลนท์ของกรด (กรดซิตริก 0.064 มิลลิอิควิวาเลนท์)

Y = ปริมาตรของน้ำคั้นหน่วยเป็นมิลลิลิตรหรือน้ำหนักเป็นกรัม

2.4 การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (Total phenolic compound)

วิธี Folin-Ciocalteu (ดัดแปลงจาก Singleton and Rossi, 1965) ทำการเจือจางตัวอย่าง อัตราส่วนของตัวอย่างต่อน้ำกลั่น 1:10 จากนั้นปิเปตตัวอย่างที่เจือจาง 0.4 มิลลิลิตร เติม Folin-Ciocalteu Reagent (10%) 2 มิลลิลิตร และ โซเดียมคาร์บอเนต (7.5%) 1.6 มิลลิลิตร ในหลอดทดลอง ผสมให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ในที่มืด 30 นาที สารละลายเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง Spectrophotometer (UV-160A, Shimadzu, Japan) ที่ความยาวคลื่น 765 นาโนเมตร จากนั้นคำนวณหาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดจากกราฟมาตรฐานของกรดแกลลิกในช่วง 10-60 ไมโครกรัม โดยรายงานในหน่วยมิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อปริมาตรตัวอย่าง 1 มิลลิลิตร (mg GAE/ml)

3. การวิเคราะห์คุณภาพทางจุลชีววิทยา

3.1 การตรวจวิเคราะห์ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดโดยวิธีการ Pour plate, BAM (1995)

โดยใช้วิธี Standard Plate count Method (SPC) บนอาหาร Plate count agar (PCA) นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 35-37 องศาเซลเซียส 48±3 ชั่วโมง และนับโคโลนีในจานเพาะเชื้อที่มีจำนวน 25-250 โคโลนี

3.2 การตรวจวิเคราะห์จำนวนยีสต์และราทั้งหมดโดยวิธีการ Pour plate, BAM (1995)

โดยใช้วิธี Standard Plate count (SPC) บนอาหาร Potato dextrose agar (PDA) ปรับ pH ด้วย 10% กรดทาร์ทาริก จากนั้นนำไปบ่มไว้ที่อุณหภูมิ 20-25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง และนับจำนวนโคโลนีในจานเพาะเชื้อที่มีจำนวนโคโลนีประมาณ 10-200 โคโลนี

การวิเคราะห์ทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบ 2x2 Factorial in CRD ทำการทดลอง 3 ซ้ำ วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรม SPSS® เวอร์ชั่น 12 นำข้อมูลมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกลุ่มด้วยวิธี Duncan's multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ผลการทดลองและวิจารณ์

การศึกษาผลของกระบวนการเปิดเจาะลูกมะพร้าวและสารโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของน้ำมะพร้าวในระหว่างการเก็บรักษาด้านกายภาพ

จากการวิเคราะห์ค่าความขุ่นและค่าการส่องผ่านของน้ำมะพร้าวที่มีวิธีการเปิดเจาะต่างกัน พบว่า (Figure 1) ความขุ่นที่เกิดขึ้นในน้ำมะพร้าวที่มีวิธีการเปิดเจาะแบบดั้งเดิม (Control) มีค่าสูงกว่าน้ำมะพร้าวที่ผ่านการเปิดเจาะแบบปลอดเชื้อ (Aseptic) คือ 34.89% และ 15.67% ตามลำดับ เนื่องจากการสัมผัสของอุปกรณ์เปิดเจาะกับเนื้อมะพร้าวทำให้องค์ประกอบอื่นๆ เช่น โปรตีน ไขมัน ในเนื้อมะพร้าวเกิดปะปนในน้ำมะพร้าว ซึ่งค่าความขุ่นของน้ำมะพร้าวสามารถสังเกตได้อย่างชัดเจนเมื่อน้ำมะพร้าวมีอายุการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น ค่าร้อยละของความขุ่นจะเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ค่าร้อยละการส่องผ่านของแสงลดลงตามระยะเวลาการเก็บรักษา ซึ่งความขุ่นของน้ำมะพร้าวอาจเกิดได้จากจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดการเสื่อมเสีย (spoilage microorganisms) ได้แก่ แบคทีเรีย ยีสต์ และรา ที่มาจากการปนเปื้อนในระหว่างกระบวนการผลิต และมีการเพิ่มจำนวน เมื่อแบคทีเรียเจริญเพิ่มจำนวนมากขึ้นทำให้เกิดลักษณะเป็นเมือก (slime) เหนียวยืด เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพ ค่าความขุ่นเพิ่มขึ้น และค่าร้อยละการส่องผ่านลดลง (Prades *et al.*, 2012)

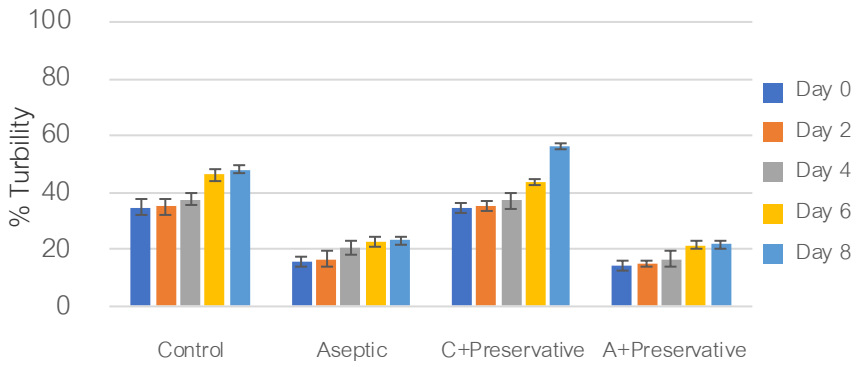


Figure 1 Turbidity (%) of coconut water stored at 4 ˚C in different storage time

การศึกษาผลของกระบวนการเปิดเจาะลูกมะพร้าวและสารโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของน้ำมะพร้าวในระหว่างการเก็บรักษาด้านเคมี

เมื่อพิจารณาคุณภาพทางเคมีของน้ำมะพร้าวที่ผ่านการเปิดเจาะทั้งสองวิธี พบว่า ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดของน้ำมะพร้าวทุกตัวอย่างไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) และไม่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา (ประมาณ 5.4 ˚Brix) สำหรับค่า pH (5.4-5.6) เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นค่าความเป็นกรด-ด่าง มีแนวโน้มลดลงในทุกสิ่งทดลอง ในขณะเดียวกันค่าความเป็นกรดเทียบกับร้อยละของกรดซิตริกมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น (Figure 3) ซึ่งอาจเป็นผลมาจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ โดยน้ำมะพร้าวเกิดการเสื่อมเสียทางจุลินทรีย์ได้ง่าย เนื่องจากไม่เหมือนกับน้ำผลไม้ชนิดอื่นที่มีค่า pH แนวโน้มมีความเป็นกรด ซึ่งค่า pH โดยเฉลี่ยของน้ำมะพร้าวอยู่ที่ประมาณ 5-6 (Prades *et al.*, 2012) เนื่องจากสารประกอบประเภทซัลไฟต์นั้นจะมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นกรด ที่ pH 4.5 จะมีการแตกตัวให้ไบซัลไฟต์ไอออน และ pH 3 จะมีกรดซัลฟิวริกในสภาวะที่ไม่แตกตัวสูงสุด โดยส่วนนี้จะมีการซึมผ่านผนังเซลล์ของเชื้อจุลินทรีย์เข้าไปรบกวนการทำงานของเซลล์ (ศิวาพร, 2535) แต่น้ำมะพร้าวมีค่าความเป็นกรดต่ำ ดังนั้น

การเติมโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ในน้ำมะพร้าวอาจจะมีประสิทธิภาพไม่มากนักในการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียและยีสต์ และเมื่อพิจารณาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (Figure 4) พบว่า มีปริมาณลดลงเมื่อเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น ซึ่งการลดลงของสารประกอบฟีนอลิกอาจเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยมีปัจจัยแสงและออกซิเจนเข้ามาเกี่ยวข้อง (Chaikham *et al*., 2016) และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yangthong and Hutadilok-Towatana (2014) ได้กล่าวไว้ว่าการลดลงของสารประกอบฟีนอลิกสัมพันธ์กับกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ

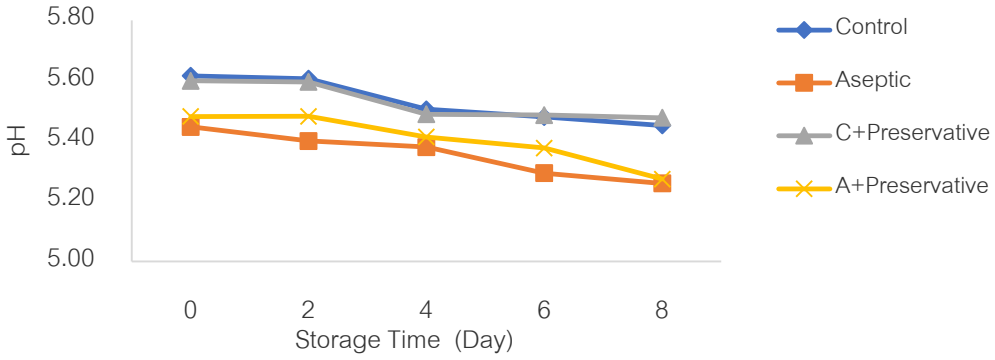


Figure 2 pH of coconut water stored at 4 ˚C in different timing.

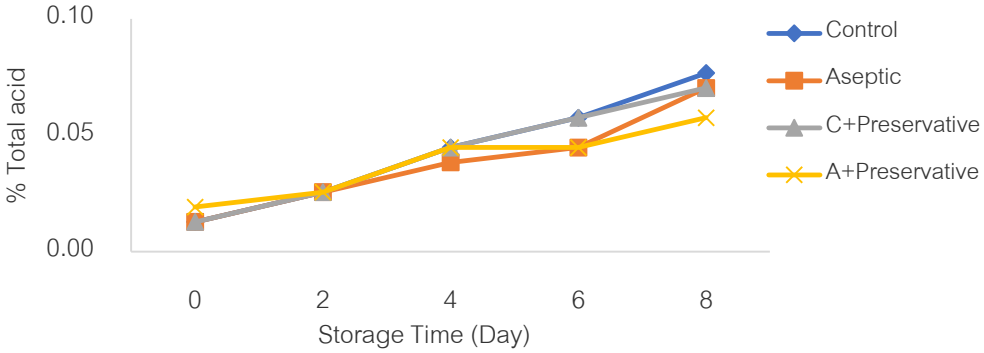


Figure 3 Total acid of coconut water stored at 4 ˚C in different timing.

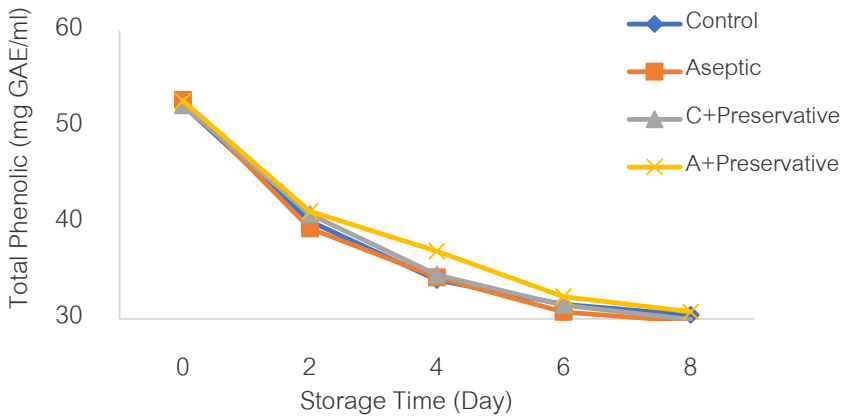


Figure 4 Total Phenolic compound of coconut water stored at 4 ˚C in different timing.

การศึกษาผลของกระบวนการเปิดเจาะลูกมะพร้าวและสารโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของน้ำมะพร้าวในระหว่างการเก็บรักษาด้านจุลชีววิทยา

จากค่าวิเคราะห์คุณภาพทางจุลชีววิทยา พบว่า ค่าปริมาณจุลินทรีย์เริ่มต้นของน้ำมะพร้าวที่ผ่านการเปิดเจาะแบบวิธีดั้งเดิมมีปริมาณจุลินทรีย์สูงกว่าน้ำมะพร้าวที่ผ่านการเปิดเจาะแบบวิธีปลอดเชื้อ คือ 4.15×10^2 CFU/g และ 1.1×10^2 CFU/g ตามลำดับ ซึ่งสามารถลดปริมาณจุลินทรีย์เริ่มต้นได้ประมาณ 4 เท่า เช่นเดียวกับปริมาณยีสต์และรา อาจเกิดการปนเปื้อนจากการสัมผัสโดยตรงของอุปกรณ์และมือของผู้ปฏิบัติในระหว่างการเปิดเจาะมะพร้าว ซึ่งเป็นการเพิ่มปริมาณจุลินทรีย์เริ่มต้น โดยตามข้อกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชุนของน้ำมะพร้าว (มผช. 340/2554) กำหนดปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดต้องไม่เกิน 1×10^4 CFU/ml และ ยีสต์และราต้องไม่เกิน 100 CFU/ml (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2554) ดังนั้นน้ำมะพร้าวที่ผ่านการเปิดเจาะแบบวิธีปลอดเชื้อ (Aseptic) สามารถยืดอายุการเก็บรักษาได้ประมาณ 2 วัน ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ซึ่งนานกว่าน้ำมะพร้าวที่ผ่านการเปิดเจาะแบบวิธีดั้งเดิม (Control) (Figure 5, 6)

เมื่อพิจารณาน้ำมะพร้าวที่ผ่านการเปิดเจาะแบบปลอดเชื้อที่ไม่เติมโซเดียมเมตาไบซัลไฟล์ และน้ำมะพร้าวที่เติมโซเดียมเมตาไบซัลไฟล์ พบว่าค่าปริมาณจุลินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นในระหว่างการเก็บรักษา มีค่าไม่แตกต่างกัน ($p>0.05$) เนื่องจากซัลเฟอร์ไดออกไซด์มีคุณสมบัติเป็นสารฟอกขาว และสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ โดยซัลเฟอร์ไดออกไซด์มีคุณสมบัติเป็นสารรีดิวซ์ที่ไปลดค่าแรงตึงของออกซิเจนในเนื้อเยื่ออาหารหรือในเครื่องดื่มลงในระดับที่ต่ำสุดที่จุลินทรีย์ต้องการออกซิเจนใช้ในการเจริญเติบโต หรือเมื่อซัลเฟอร์ไดออกไซด์ทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็นกรดซัลฟูริกและแตกตัวต่อไปให้ไอออนต่างๆ กรดจะซึมผ่านผนังเซลล์ของจุลินทรีย์เข้าไปรบกวนการทำงานของเซลล์ดังกล่าว (ศิวาพร, 2535) แต่ด้วยปัจจัยด้าน pH ของน้ำมะพร้าวทำให้ประสิทธิภาพของโซเดียมเมตาไบซัลไฟล์อาจจะไม่ดีเท่ากับการใช้ในเครื่องดื่มที่มีความเป็นกรดสูง

ในขณะที่ยีสต์เป็นจุลินทรีย์สำคัญอีกชนิดหนึ่งที่สามารถพบได้ในน้ำผลไม้ เนื่องจากความทนต่อกรดสูงและการเจริญเติบโตในแบบใช้และไม่ใช้อากาศ มีส่วนทำให้เกิดการปนเปื้อนในน้ำผลไม้ เป็นผลมาจากสุขอนามัยของโรงงานที่ไม่ดี (Stratford *et al.*, 2000) ซึ่งจะเห็นได้ว่าหากมีการใช้วิธีการเปิดเจาะแบบวิธีปลอดเชื้อ ลดการสัมผัสของอุปกรณ์เปิดเจาะกับน้ำมะพร้าว ส่งผลต่อการลดลงของเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้น สามารถลดจำนวน log cycle ของเชื้อจุลินทรีย์ รักษาคุณภาพและยืดอายุการเก็บได้ ดังนั้นจึงไม่มีความจำเป็นในการใช้วัตถุกันเสียในการแก้ไขปัญหาการเสื่อมเสียของน้ำมะพร้าวหากมีระบบการจัดการวิธีปฏิบัติที่ดี

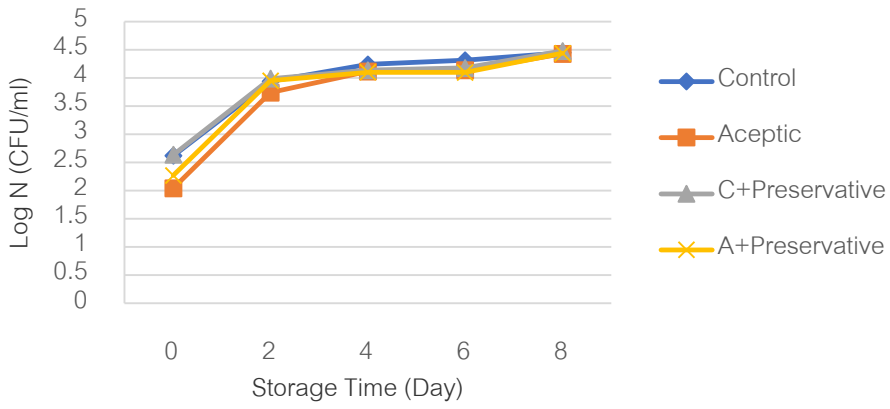


Figure 5 Total plate count in coconut water during storage at 4 °C

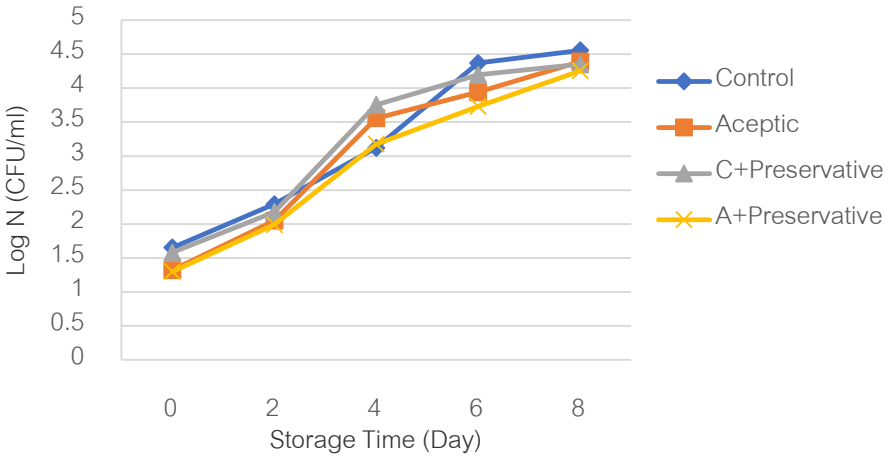


Figure 6 Yeasts and molds (YMC) in coconut water during storage at 4 °C

สรุปผลและเสนอแนะ

น้ำมะพร้าวที่ผ่านการเปิดเจาะแบบปลอดเชื้อ (ไม่เติมวัตถุกันเสีย) มีการเปลี่ยนแปลงคุณภาพด้านกายภาพและเคมีช้ากว่า มีอายุการเก็บรักษานานกว่าน้ำมะพร้าวที่ผ่านการเปิดเจาะแบบดั้งเดิม และน้ำมะพร้าวที่เติมสารโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ (SMBS) ดังนั้นน้ำมะพร้าวที่ผ่านการเปิดเจาะโดยวิธีปลอดเชื้อเพียงพอต่อการรักษาคุณภาพและยืดอายุการเก็บน้ำมะพร้าวได้ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส โดยไม่จำเป็นต้องใช้วัตถุกันเสีย ทั้งนี้การเปิดเจาะแบบปลอดเชื้อจะช่วยลดปริมาณเชื้อเริ่มต้นและช่วยยืดอายุการเก็บรักษาของน้ำมะพร้าวได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่สนับสนุนเครื่องมือ อุปกรณ์ และสถานที่ในการวิจัย และขอขอบคุณห้างหุ้นส่วนจำกัดโชคอุดมทรัพย์โคโคนัทชิพ และสวนมะพร้าวทรัพย์ประภา ที่เอื้อเฟื้อวัตถุดิบในการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

กระทรวงสาธารณสุข. 2556. **ประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 356) พ.ศ. 2556 เรื่อง เครื่องดื่มในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท**. 24 กรกฎาคม 2556.

เจนจิรา จันทร์มี. 2558. **ผลของกระบวนการลดการเกิดสีน้ำตาลต่อคุณภาพของน้ำมะพร้าวยูเอชที**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ศูนย์วิจัยกสิกรไทย. 2560. เกาะกระแส Super food: โอกาสของมะพร้าวไทยในตลาดโลก. **วรสารศูนย์วิจัยกสิกรไทย**. 23(2845): 1-5.

ศิวาพร ศิวเวช. 2535. **วัตถุเจือปนอาหารในผลิตภัณฑ์อาหาร**. ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2554. **มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนผลิตภัณฑ์น้ำมะพร้าว**. มผช. 340/2554.

AOAC. 2000. **Official Method of Analysis**. 17th ed. The Association of Official Analytical Chemists Gaithersburg, Maryland.

BAM. 1995. **Food and Drug Administration Bacteriological Analytical Manual**. 8 ed., AOAC International, USA.

Brasil, Ministério da Saúde. 2013. **ANVISA, Brazilian legislation RDC 8/2013.** Dispõe sobre a aprovação de uso de aditivos alimentares para produtos de frutas e de vegetais e geleia de mocotó. Diário Oficial da União Seção 1, p.68–75. Brasil.

Chaikham, P., V. Kemsawasd, and A. Apichartsrangkoon. 2016. Effects of conventional and ultrasound treatments on physicochemical properties and antioxidant capacity of floral honeys from Northern Thailand. **Food Bioscience**. 15: 19-26.

Ismail, I., R. Singh and R.G. Sirisinghe. 2007. Rehydration with sodium-enriched coconut water after exercise-induced dehydration. **Southeast Asian Journal of Tropical Medicine and Public Health**. 38(4): 769-85.

Kisker, C. Sulfite oxidase. 2001. *In* Messerschmidt A, Huber R, Poulos T, Wieghardt K, eds. **Handbook of metalloproteins**, pp.1121-35. John Wiley & Sons, New York.

Knodel, LC. 1997. Current issues in drug toxicity: potential health hazards of sulfites. **Toxic Substance Mechanisms**. 16(3): 309-11.

Kwiatkowski, A., E. Clemente and B.V. Scarcelli. 2008. Quality of Coconut Water 'in Natura' Belonging to Green Dwarf Fruit Variety in Different Stages of Development, in Plantation on the Northwest Area of Parana, Brazil. **Journal of Food, Agriculture & Environment**. 6 (1): 4.

Luck, E. and M. Jager. 1997. .**Antimicrobial food additives: characteristics, users, effects**. 2nd ed. Springer Verlag, New York.

Prades A., M. Dornier, N. Diop and J.P. Pain. 2012. Coconut water uses, composition and properties: a review. **Fruits**. 67: 87–107

Queiroz C., M. L. Mendes, E. V. Fialho and L. Valente-Mesquita. 2008. Polyphenol Oxidase: Characteristics and mechanisms of browning control. **Food Reviews International**. 4(361): 375.

Singleton, V. L., and J. A. Rossi. 1965. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic phosphotungstic acid reagents. **American Journal of Enology and Viticulture**. 16: 144-158.

Stratford, M., P.D. Hofman and M.B. Cole. 2000. Fruit juices, fruit drinks, and soft drinks, pp. 836-869. *In*: Lund, B.M., Baird Parker, T.C., Gould, G.M., eds. **The Microbiological Safety and Quality of Food**. Aspen Publishing, Gaithersburg, MD.

Yangthong, M. and N. Hutadilok-Towatana. 2014. Total phenolic contents, DPPH radical-scavenging activities of six seaweeds from the southern coast of Thailand. **Journal of Fisheries Technology Research**. 8(1): 93-104.

ผลของการเติมเนื้อตาลผงต่อคุณภาพของชูครีม

Effects of Adding Palmyra Palm (*Borassus abellifer* L.) Powder on Qualities of Choux Cream

ลินจง สุขลำภู[1*] จุฑามาศ เพชรรอด[1] และ ปณิธาน มูฮัมหมัด[1]

Linchong Suklampoo[1*], Jutamas Phetrod[1] and Panitarn Mummud[1]

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์การศึกษาครั้งนี้เพื่อศึกษาผลของการเติมเนื้อตาลผงต่อคุณภาพของชูครีม โดยเตรียมเนื้อตาลผงด้วยวิธีอบแห้งที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง จากนั้นนำเนื้อตาลผงที่ได้มาทดแทนแป้งสาลีบางส่วนในการทำแป้งชูว์ และทดลองนำมาผสมในไส้คัสตาร์ดครีมในปริมาณร้อยละ 0 (สูตรควบคุม), 6, 10 และ 14 โดยน้ำหนัก ผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มระดับเนื้อตาลผงในแป้งชูว์ส่งผลให้ค่าความแข็ง ปริมาณเบต้าแคโรทีน และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระมีค่าเพิ่มขึ้น และผลการทดสอบคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสพบว่า การเติมเนื้อตาลผงที่ระดับ 14 เปอร์เซ็นต์ให้คุณลักษณะทางประสาทสัมผัสดีที่สุดในด้านสี กลิ่น และ ความกรอบ สำหรับไส้คัสตาร์ดครีม พบว่าผลการยอมรับทางประสาทสัมผัสของคัสตาร์ดครีมมีค่าลดลงเมื่อเติมเนื้อตาลผงในปริมาณที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามคัสตาร์ดครีมที่ผสมเนื้อตาลผงที่ 6 เปอร์เซ็นต์มีคะแนนความชอบทางประสาทสัมผัสสูงสุดทุกคุณลักษณะที่ทดสอบ

ABSTRACT

The aim of this study was to determine the effect of adding palmyra palm powder on qualities of choux cream. Palmyrah palm powder was prepared by the method of drying at 65°C for 10 hours. Then, wheat flour was partially substituted with the palmyra palm powder. The palmyra palm powder was also mixed in custard cream filling at 0 (control), 6, 10 and 14 percent (w/w). The results showed that an increasing palmyra palm powder level in choux shell resulted in significantly increased hardness, beta-carotene and antioxidant activity. The results from sensory evaluation showed that the addition of 14% of palmyra palm powder gave the best sensory properties in terms of color, odor and crispiness. For the custard cream filling, sensory acceptance of custard cream decreased with increased addition level of palmyra palm powder. However, custard cream at 6% palmyra palm powder had the highest sensory score for all attributes.

Key Words: choux cream, palmyra palm powder, beta-carotene, antioxidant activity

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

[1]ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

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

คำนำ

ตาลโตนดมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Borassus abellifer* L. มีชื่อสามัญภาษาอังกฤษว่า Palmyra palm หรือ Lontar หรือ Fan palm เป็นพืชตระกูลปาล์มใบพัดชนิดหนึ่งอยู่ในกลุ่มเดียวกับมะพร้าว สละ สาคู ระกำ และอินทผลัม ซึ่งพบมากในพื้นที่เขตภาคกลางในแถบจังหวัดเพชรบุรี สุพรรณบุรี นครปฐม และภาคใต้แถบจังหวัดสงขลาจังหวัดยะลา ปัตตานี ผลของตาลเมื่อโตเต็มที่ผิวที่มีสีเหลืองจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลจนถึงสีดำ บริเวณก้นเป็นปุ่มเล็กน้อยมีสีเหลืองจนถึงสีส้ม และเมื่อแกะเอาเปลือกสีดำออกจะพบเส้นใยและเนื้อสีเหลืองจนถึงสีส้มหุ้มเมล็ดไว้ 3-4 เมล็ด ตรงกลางระหว่างเมล็ดจะมีแกนกลางเป็นเส้นใยรวมกันเป็นกลุ่มทำหน้าที่เชื่อมระหว่างขั้วและผลตาล ชาวบ้านมักเรียกว่าดีตาล มีรสขมจะต้องกำจัดออกก่อนใช้ ในส่วนของเนื้อตาลสุกที่ยีแล้วพบว่ามีปริมาณความชื้น โปรตีน ไขมัน เถ้า ใยอาหาร และคาร์โบไฮเดรตประมาณ 93.00, 0.14, 0.32, 0.38, 2.73 และ 3.43 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ มีวิตามินซี แคลเซียมและ ฟอสฟอรัส 41.84, 1.40 และ 11.20 มิลลิกรัมต่อเนื้อลูกตาลที่ยีแล้ว 100 กรัมตามลำดับ และมีปริมาณเบต้าแคโรทีน 615 ไมโครกรัมต่อเนื้อตาลสุกที่ยีแล้ว 100 กรัม (มนัสนันท์ และคณะ, 2541)

จากการที่เนื้อตาลสุกมีคุณค่าทางโภชนาการซึ่งประกอบด้วย คาร์โบไฮเดรต ใยอาหาร แร่ธาตุและวิตามิน รวมทั้งมีสารสีเหลืองของเบต้าแคโรทีน และมีกลิ่นหอมเฉพาะตัว จึงมีการนำเนื้อตาลสุกไปเป็นส่วนผสมในการทำผลิตภัณฑ์ขนมต่างๆ เพื่อเพิ่มความหลากหลาย เช่น ขนมตาล ขนมขี้หนูเนื้อตาล ขนมบัวลอยเนื้อตาล เค้กเนื้อตาล เป็นต้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะนำเนื้อตาลสุกมาผสมในผลิตภัณฑ์ชูครีม (Choux cream) ซึ่งเป็นขนมเนื้อฟู กลวงเบาใส่ไส้ด้วยวิปครีม และผลไม้ หวานไม่มาก เหมาะสำหรับเป็นขนมรับประทานเล่นหรือระหว่างมื้อ โดยนำเนื้อตาลสุกมาผ่านกระบวนการอบแห้งก่อนทำเป็นผง จากนั้นนำเนื้อตาลผงที่ได้มาทดแทนแป้งสาลีบางส่วนในการทำแป้งชูว์และทดลองผสมในส่วนของไส้คัสตาร์ดครีมในการทำผลิตภัณฑ์ชูครีม นอกจากเป็นการเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการ ยังเป็นการเพิ่มความหลากหลายให้กับผลิตภัณฑ์ชูครีม

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมเนื้อตาลผง (ชไมพร และสุธาสินี, 2557)

นำเนื้อตาลสุกพันธุ์ตาลหม้อที่ผ่านการยีแล้วมีแหล่งเพาะปลูกในจังหวัดเพชรบุรีมาทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาด (Tray dryer) ใช้อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง จากนั้นนำเนื้อตาลแห้งมาบดด้วยเครื่องบด แล้วไปผ่านตะแกรงร่อนขนาด 400 เมช เก็บรรจุในถุงพลาสติกที่ปิดสนิท นำเนื้อตาลผงมาวิเคราะห์คุณภาพได้แก่ วิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) โดยละลายเนื้อตาลผงในน้ำกลั่น จากนั้นนำมาวัดความเป็นกรด-ด่างโดยใช้เครื่องดิจิตอล pH meter (Mettler Toledo,seven compact)

ปริมาณเบต้าแคโรทีน ดัดแปลงจากวิธีการของ Nagata และ Yamashita (1992) ซึ่งมีวิธีการดังนี้ ชั่งตัวอย่างผงแห้ง 1 กรัมทำการสกัดเบต้าแคโรทีนด้วยตัวทำละลายผสมระหว่างอะซีโตนและเฮกเซน (อัตราส่วน 4:6) ปริมาตร 20 มิลลิลิตร ทำการสกัดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที นำส่วนใสที่ได้มาวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง Spectrophotometer (Thermo

Scientific, Genesys 10S) ที่ความยาวคลื่น 663, 645, 505 และ 453 นาโนเมตร และนำค่าที่วัดได้ไปคำนวณหาปริมาณสารเบต้าแคโรทีน ดังสมการ

$$\text{Beta-carotene carotene } (\mu g/100g \text{ sample}) = 0.216A_{663} - 1.220A_{645} - 0.304A_{505} + 0.452A_{453}$$

วิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH radical scavening capacity ดัดแปลงจากวิธีการของ Mohd Zain และคณะ (2017) ทำการเตรียมสารสกัดโดยนำตัวอย่าง 1 กรัมมาสกัดด้วยตัวทำละลายเมทานอลความเข้มข้น 80 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำสารสกัดมากรองแล้วระเหยเอาตัวทำละลายออกด้วยเครื่องระเหยแบบลดความดัน (Rotary vaccum evaporator ยี่ห้อ Heidolph) เตรียมสารสกัดที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตรในสารละลายเมทานอลความเข้มข้น 80 เปอร์เซ็นต์ มาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร โดยเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานบิวทิวไฮดรอกซีโทลูอีน (Butyl hydroxytoluene, BHT) คำนวณหาเปอร์เซ็นต์การยับยั้งอนุมูลอิสระ DPPH จากสูตร % inhibition = $A_{control} - A_{sample} / A_{control} X100$

โดย $A_{control}$ คือค่าดูดกลืนแสงของ DPPH

A_{sample} คือค่าดูดกลืนแสงของตัวอย่างหรือสารมาตรฐานที่ทำปฏิกิริยากับ DPPH

คุณภาพด้านสีในระบบ CIE L* a* b* โดยใช้เครื่องวัดสียี่ห้อ Hunter Lab รุ่น Mini Scan EZ โดยที่ค่า L* หมายถึงความสว่าง มีค่าตั้งแต่ 0-100 (ดำ-สว่าง) a* หมายถึงสีแดง (+), สีเขียว (-) และ b* หมายถึงสีเหลือง (+), สีน้ำเงิน (-)

การศึกษาปริมาณเนื้อตาลผงที่เหมาะสมในการผลิตแป้งชูว์

นำเนื้อตาลผงไปใช้ทดแทนแป้งสาลีที่ระดับ 0, 6, 10 และ 14 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแป้งในการทำแป้งชูว์ โดยมีแป้งชูว์ที่ทำจากแป้งสาลีล้วนเป็นตัวอย่างควบคุม (สิริรักษ์, 2556) ซึ่งในสูตรประกอบด้วยแป้งสาลีอเนกประสงค์ 120 กรัม นมสด 50 กรัม น้ำ 50 กรัม เนยจืด 45 กรัม ไข่ไก่ 100 กรัม และเกลือป่น 0.4 กรัม เตรียมแป้งชูว์โดยร่อนแป้งกับเนื้อตาลผง และเกลือป่น พักไว้ นำน้ำ นมสด และเนยใส่หม้อตั้งไฟอ่อนจนเนยละลายและเดือดเล็กน้อยเป็นเวลา 1 นาที ยกลงจากเตา นำส่วนผสมของแป้งเทลงในหม้อ กวนผสมให้แป้งและของเหลวเข้ากัน นำส่วนผสมที่ได้ขึ้นตั้งไฟอ่อนจนแป้งสุกและยกลงจากเตา ตีไข่ไก่ให้ไข่ขาวและไข่แดงเข้ากัน จากนั้นเทลงในตัวแป้งทีละน้อย คนให้เข้ากันจนหมดได้แป้งที่มีเนื้อเนียน นำส่วนผสมที่ได้ใส่ลงในถุงบีบโดยใช้หัวบีบเบอร์ 32 บีบลงในแผ่นซิลิโคนรองอบ อบที่อุณหภูมิ 165 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25 นาที พักให้เย็นประมาณ 30 นาทีและเก็บใส่กล่องพลาสติกที่ปิดสนิท เพื่อใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพ ได้แก่

คุณภาพด้านสี นำแป้งชูว์มาทำให้มีขนาดเล็กลงโดยใช้โถปั่นแล้วนำไปวัดค่าสีในระบบ CIE L* a* b* คุณภาพด้านเนื้อสัมผัสด้วยเครื่อง texture analyzer (Lloyd Instruments, TA plus) ใช้หัววัดชนิดหัวลูกบอลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร กดลงบนตัวอย่างด้วยอัตราเร็ว 20 มิลลิเมตรต่อนาที เป็นระยะทาง 40 เปอร์เซ็นต์ของความสูงตัวอย่าง บันทึกค่าความแข็ง (Hardness) ปริมาณเบต้าแคโรทีน ตามวิธีการ Nagata และ Yamashita (1992) วิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH radical scavening capacity ดัดแปลงจากวิธีการของ Mohd Zain และคณะ (2017) โดยใช้ความเข้มข้นของสารสกัด 100 มิลลิกรัม

ต่อมิลลิลิตร และการทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสโดยใช้วิธีการให้คะแนนความชอบแบบ 7-point hedonic scale (1คะแนน หมายถึง ไม่ชอบมากที่สุด 7 คะแนน หมายถึง ชอบมากที่สุด) กับผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝน จำนวน 20 คน ประเมินความชอบที่มีต่อตัวอย่างในด้านสีของแป้งชูว์ กลิ่นเนื้อตาล ความกรอบของแป้งชูว์ และความชอบโดยรวม

คัดเลือกสูตรแป้งชูว์ผสมเนื้อตาลผงที่มีลักษณะกรอบ ขึ้นฟู ด้านในตัวเปลือกเกิดโพรง และมีคุณภาพด้านประสาทสัมผัสเป็นที่ยอมรับของผู้ทดสอบมากที่สุด เพื่อใช้ในการทดลองต่อไป

การศึกษาระดับการเติมเนื้อตาลผงที่เหมาะสมในส่วนผสมของไส้คัสตาร์ดครีม

ทดลองนำเนื้อตาลผงมาเติมในส่วนผสมของไส้คัสตาร์ดครีมที่ระดับ 6, 10 และ 14 เปอร์เซ็นต์ของผงคัสตาร์ด โดยในสูตรไส้คัสตาร์ดครีมชุดควบคุม (0 เปอร์เซ็นต์) ดัดแปลงจากสูตรของผลิตภัณฑ์ครีมมี่คัสตราอิมพรีเรียล ที่มีส่วนผสมประกอบด้วย ผงคัสตาร์ด 120 กรัม น้ำเย็น 250 กรัม นมข้นจืด 100 กรัม น้ำตาลไอซิ่ง 26 กรัม วิปปิ้งครีม 100 กรัม โดยนำผงคัสตาร์ด (และเนื้อตาลผง) ผสมกับน้ำเย็นและนมข้นจืด คนส่วนผสมให้เข้ากันและพักไว้ ตีวิปปิ้งครีมผสมน้ำตาลไอซิ่งให้มีลักษณะตั้งยอดแข็ง จากนั้นนำไปผสมกับส่วนของคัสตาร์ดที่เตรียมไว้ นำคัสตาร์ดครีมที่ผสมเนื้อตาลผงมาประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส โดยให้คะแนนความชอบแบบ 7-point hedonic scale กับผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 20 คน โดยประเมินคุณภาพทางด้านลักษณะที่ปรากฏ สีของคัสตาร์ดครีม กลิ่นของคัสตาร์ดครีม รสชาติ ความข้นหนืด และความชอบโดยรวมเมื่อรับประทานเป็นผลิตภัณฑ์ชูครีมผสมเนื้อตาล

การวิเคราะห์ทางสถิติ

ทำการทดลอง 3 ซ้ำ นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล (Analysis of Variance) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างทรีทเมนต์ตามวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ SPSS Version 22

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

คุณภาพของเนื้อตาลผง

ผลการศึกษาคุณภาพของเนื้อตาลผง (Table 1) พบว่า เนื้อตาลผงที่ได้มีลักษณะเป็นผงละเอียด มีสีเหลืองคล้ายผงขมิ้น โดยมีค่า L* เท่ากับ 86.35 ค่า a* เท่ากับ 12.28 และค่า b* เท่ากับ 40.55 แต่คุณภาพด้านกลิ่นของเนื้อตาลผงที่ได้พบว่ามีกลิ่นเนื้อตาลลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อตาลสด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการผ่านขั้นตอนการอบแห้งเป็นเวลานานจึงมีผลทำให้เกิดการสูญเสียกลิ่นไปบางส่วน และมีค่าความเป็นกรด-ด่าง โดยมีค่าเท่ากับ 3.27 ซึ่งทำให้เนื้อตาลผงมีรสเปรี้ยวเล็กน้อย ซึ่งจินตนา และ พรชนก (2560) ได้รายงานว่าโดยทั่วไปก่อนการยีตาล ผลตาลจะมีค่าความเป็นกรด-ด่างสูงกว่า 3.8 แต่เนื่องจากระหว่างกระบวนการยีตาล จุลินทรีย์จำพวกแบคทีเรียแลคติกและยีสต์มีการเจริญเติบโต ทำให้เกิดการหมักและได้กรดอินทรีย์ชนิดต่างๆ เป็นผลทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างลดลง

Table 1 Physical and chemical properties of palmyra palm powder

Physical and chemical properties	Values
Color value	
L*	86.35 ±0.43
a*	12.28 ±0.05
b*	40.55 ±0.65
pH	3.27±0.01
Beta carotene (μg/100g sample)	619.70±6.79
DPPH radical scavenging activity (%inhibition)	58.84 ± 3.05

จากการวิเคราะห์ปริมาณเบต้าแคโรทีนของเนื้อตาลผงพบว่า มีปริมาณเบต้าแคโรทีนเท่ากับ 619.70 ไมโครกรัมต่อผงเนื้อตาล 100 กรัม และเมื่อศึกษาความสามารถในการยับยั้งอนุมูลอิสระ DPPH ของเนื้อตาลผงที่ความเข้มข้นของสารสกัด 10 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตรพบว่า มีเปอร์เซ็นต์การยับยั้งอนุมูลอิสระ DPPH เท่ากับ 58.84 ในขณะที่เปอร์เซ็นต์การยับยั้งอนุมูลอิสระ DPPH ของสารมาตรฐาน BHT ที่ 1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตรมีค่าเท่ากับ 70.71 ซึ่งมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระสูงกว่าเนื้อตาลผงประมาณ 12 เท่า

ผลของการทดแทนแป้งสาลีบางส่วนด้วยเนื้อตาลผงต่อคุณภาพของแป้งชูว์

การทดแทนแป้งสาลีด้วยเนื้อตาลผงในการผลิตแป้งชูว์ส่งผลทำให้แป้งชูว์ที่ได้มีสีเหลืองและมีความข้นหนืดเพิ่มมากขึ้นมากขึ้นตามระดับการทดแทนที่เพิ่มขึ้น และเมื่อนำแป้งชูว์ไปผ่านการอบพบว่า การเพิ่มปริมาณของเนื้อตาลผงมีผลต่อสีบริเวณผิวของเปลือกชูครีมมีสีเหลืองเข้มขึ้น รวมทั้งผิวของแป้งชูว์มีความกรอบและมีกลิ่นของผงเนื้อตาลที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงใน Figure 1

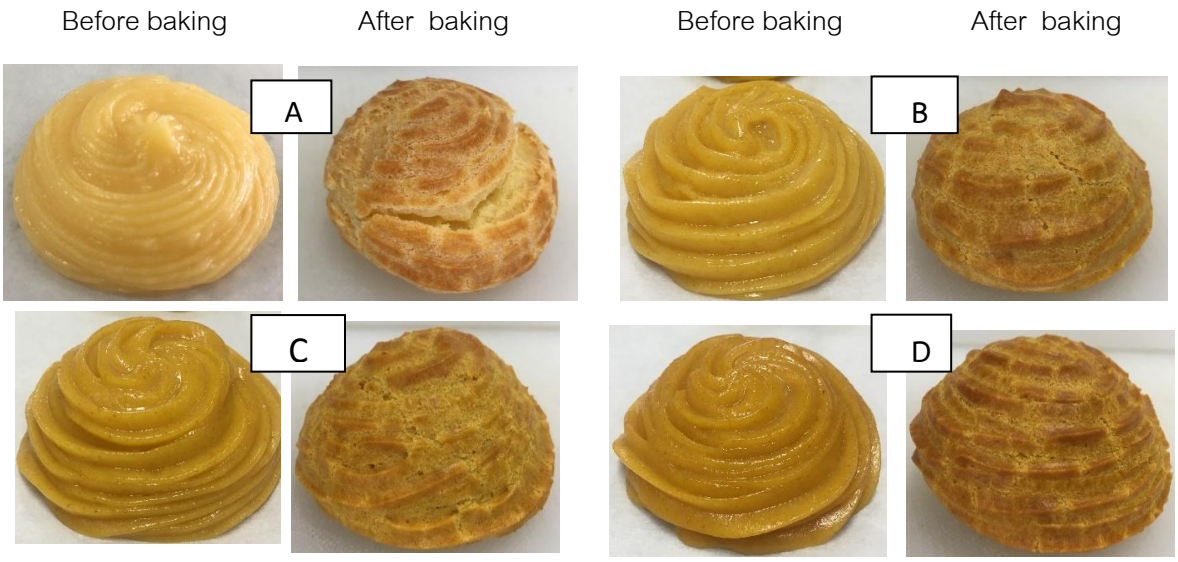


Figure 1 Characteristics of choux shell prepared by the substitution of wheat flour at 0 % (A), 6% (B), 10% (C) and 14% (D) with palmyra palm powder



A B C D

Figure 2 Cross-section of choux shell prepared by the substitution of wheat flour at 0 % (A), 6% (B), 10% (C) and 14% (D) with palmyra palm powder

และยังพบว่าการเพิ่มปริมาณของเนื้อตาลผงทำให้แป้งชูว์ที่ได้มีลักษณะการขึ้นฟูที่ลดลงสังเกตได้จากความเป็นโพรงของแป้งชูครีม ดังแสดงใน Figure 2 ซึ่งมีสาเหตุมาจากการลดลงของปริมาณกลูเตนในส่วนผสมของแป้งชูว์ ทำให้ความสามารถในการกักเก็บแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ไว้ในโครงสร้างลดลง ส่งผลทำให้การขึ้นฟูลดลง การเกิดโพรงในแป้งชูว์จึงลดลง

ผลการวิเคราะห์ทางเคมีกายภาพของแป้งชูว์ที่เติมเนื้อตาลผงที่ระดับต่างๆ ดังแสดงใน Table 2 พบว่าค่า L* a* และ b* มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) พบว่า ค่า L* a* และ b* มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยแป้งชูว์ที่มีระดับการทดแทนเนื้อตาลผงที่ระดับสูงขึ้น ค่า L* มีแนวโน้มลดลง ในขณะที่ค่าความเป็นสีแดง (a*) และสีเหลือง (b*) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

Table 2 Physical and chemical properties of choux shell at difference of substitued wheat flour with palmyra palm powder

Physical and chemical properties	Substitution levels (%)			
	0	6	10	14
	Color value			
L*	$80.93^{a}\pm0.72$	$70.48^{b}\pm0.25$	$68.00^{c}\pm1.03$	$61.42^{d}\pm0.23$
a*	$19.41^{b}\pm0.22$	$22.56^{ab}\pm2.11$	$23.33^{a}\pm0.15$	$24.26^{a}\pm0.21$
b*	$50.96^{c}\pm1.47$	$54.44^{c}\pm1.28$	$62.89^{b}\pm0.45$	$68.71^{a}\pm2.17$
Hardness (N)	$3.20^{d}\pm0.10$	$6.44^{c}\pm 0.30$	$9.50^{b}\pm0.21$	$11.96^{a}\pm0.41$
DPPH radical scavenging activity (% inhibition)	$15.44^{c}\pm 1.15$	$30.71^{b}\pm2.11$	$33.31^{b}\pm0.58$	$52.99^{a}\pm1.69$
Beta carotene (μg/100g sample)	$11.57^{d}\pm3.45$	$87.41^{c}\pm4.18$	$109.41^{b}\pm2.11$	$143.50^{a}\pm3.01$

Means with difference superscript letters in the same row are significant difference ($p \leq 0.05$)

ทั้งนี้ เนื่องจากเนื้อตาลมีเบต้าแคโรทีนเป็นองค์ประกอบทำให้มีสีเหลือง ส้ม แดง (นิธิยา, 2545) เมื่อนำมาทดแทนในปริมาณที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ผลิตภัณฑ์มีค่าสีแดงและสีเหลืองเพิ่มขึ้น และผลการวิเคราะห์ปริมาณเบต้าแคโรทีนพบว่าปริมาณเบต้าแคโรทีนมีค่าเพิ่มขึ้นตามระดับการแทนที่ด้วยเนื้อตาลผงที่เพิ่มขึ้น

จากการวัดเนื้อสัมผัสของแป้งชูว์พบว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณเนื้อตาลผงมีผลทำให้ค่าความแข็ง (Hardness) ของแป้งชูว์ที่ผ่านการอบแล้วมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยมีค่าความแข็งอยู่ในช่วง 3.20-11.96 นิวตัน และผลการทดสอบความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH ของแป้งชูว์พบว่ามีเปอร์เซ็นต์การยับยั้งอนุมูลอิสระ DPPH เพิ่มขึ้นตามปริมาณของเนื้อตาลผงที่เพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณเบต้าแคโรทีนที่มีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระธรรมชาติ (Sies and Stahl, 1995)

ผลการทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัส พบว่า คะแนนความชอบทางด้านสีของแป้งชูว์ทั้ง 3 ระดับการทดแทนไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ดังแสดงใน Table 3 คะแนนความชอบทางด้านกลิ่น ความกรอบ และความชอบโดยรวมของแป้งชูว์มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเนื้อตาลผงที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามคะแนนความชอบโดยรวมของแป้งชูว์เมื่อทดแทนแป้งสาลีด้วยเนื้อตาลผง 10 และ 14 เปอร์เซ็นต์ พบว่า ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ดังนั้นจึงสามารถเติมเนื้อตาลผงทดแทนแป้งสาลีในการผลิตแป้งชูว์ได้ถึง 14 เปอร์เซ็นต์

Table 3 Sensory evaluation scores of choux shell as affected by the wheat flour substitution with palmyra palm powder

Substitution levels (%)	Attributes			
	Color	Odor	Crispiness	Overall liking
6	5.60^{a}±0.82	5.10^{b}±0.97	5.00^{b}±0.92	5.55^{b}±1.15
10	5.50^{a}±1.13	5.65^{ab}±1.09	5.55^{ab}±1.10	5.60^{a}±0.08
14	5.60^{a}±1.10	6.00^{a}±1.17	5.95^{a}±1.00	5.66^{a}±1.14

Means with difference superscript letters in the same column are significant difference ($p \leq 0.05$)

การพัฒนาไส้คัสตาร์ดครีมผสมผงเนื้อตาลสุก

การผสมผงเนื้อตาลในปริมาณที่เพิ่มขึ้นทำให้ไส้คัสตาร์ดมีสีเหลือง ความข้นหนืดและมีกลิ่นของเนื้อตาลผงมากขึ้นส่งผลทำให้คะแนนความชอบทุกคุณลักษณะทางด้านประสาทสัมผัสของไส้คัสตาร์ดครีมมีแนวโน้มลงลด ดังแสดงใน Table 4

Table 4 Sensory evaluation scores of custard cream filling with different level of palmyra palm powder

Adding levels (%)	Attributes					
	Appearance	color	Odor	Taste	Viscosity	Overall lilking when eating as choux cream
6	6.25^{a}±0.85	6.40^{a}±0.75	5.95^{a}±0.69	6.25^{a}±0.72	5.75^{a}±0.85	5.90^{a}±0.85
10	5.85^{a}±1.18	5.65^{b}±1.14	5.25^{b}±1.07	4.80^{b}±1.79	5.10^{a}±1.55	5.55^{b}±1.19
14	5.10^{b}±1.17	4.95^{c}±1.00	4.95^{b}±1.19	4.40^{b}±1.50	4.90^{b}±1.33	5.30^{b}±1.22

Means with difference superscript letters in the same column are significant difference ($p \leq 0.05$)

ดังนั้นเมื่อพิจารณาความชอบโดยรวมของไส้คัสตาร์ดที่มีการเติมเนื้อตาลผงทั้ง 3 ระดับ พบว่าการผสมเนื้อตาลผงที่ 6 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักผงคัสตาร์ด เป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุดจากการที่ผู้ทดสอบให้คะแนนความชอบทางด้านประสาทสัมผัสทุกคุณลักษณะที่ทดสอบสูงสุด

สรุป

จากการศึกษาการเตรียมเนื้อตาลผงโดยใช้วิธีอบแห้ง พบว่าเนื้อตาลผงที่ได้มีสีเหลือง มีเบต้าแคโรทีนสูงเท่ากับ 619.70 ไมโครกรัมต่อเนื้อตาลผง 100 กรัม เมื่อนำไปทดแทนแป้งสาลีในแป้งชูว์พบว่า แป้งชูว์ที่ได้มีสีเหลือง ค่าความแข็ง ปริมาณเบต้าแคโรทีนและความสามารถในการยับยั้งอนุมูลอิสระ DPPH มีค่าเพิ่มขึ้นตามระดับการทดแทนที่เพิ่มขึ้น ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสพบว่าสามารถทดแทนแป้งสาลีด้วยเนื้อตาลผงได้ถึง 14 เปอร์เซ็นต์เนื่องจากแป้งชูว์ที่ได้มีกลิ่นของเนื้อตาลผงที่ชัดเจน และมีความกรอบมากกว่าระดับอื่นๆ การเติมเนื้อตาลผงในปริมาณที่สูงขึ้นทำให้ไส้คัสตาร์ดครีมมีสีเหลืองและมีความข้นหนืดมากขึ้น ส่งผลทำให้ไส้คัสตาร์ดครีมที่ผสมเนื้อตาลผงที่ 6 เปอร์เซ็นต์เป็นระดับที่เหมาะสมจากการที่มีคะแนนทางด้านประสาทสัมผัสทุกคุณลักษณะที่ทดสอบสูงสุด

เอกสารอ้างอิง

จินตนา วิบูลย์ศิริกุล และพรชนก ชัยชนะ. 2560. **คุณภาพเนื้อตาลสุกที่ผ่านการให้ความร้อน**. การประชุมวิชาการ เสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาครั้งที่ 2. มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

ชไมพร เพ็งมาก และสุธาสินี ศรีวิไล. 2557. **การพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมไทยจากแป้งตาลโตนด**. วารสารวิชาการ และวิจัย มทร.พระนคร. 5(1) : 93-105.

นิธิยา รัตนาปนนท์. 2545. **เคมีอาหาร**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.

มนัสนันท์ บุญทราพงศ์, กมลวรรณ แจ้งชัด, อนุวัตร แจ้งชัด และ วิชัย หฤทัยธนาสันติ์. 2544. **การศึกษาคุณภาพของเนื้อตาลสุกและขนมตาลที่ผลิตจากเนื้อตาลสุกผ่านกระบวนการพาสเจอไรเซชัน**. การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์บางเขนครั้งที่ 39. สาขาอุตสาหกรรมเกษตร.

สิริรักษ์ บางสุด. 2556. **เดซาโตะ Favorite Japanese Cake and Desserts**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ แสงแดด. 31-34.

Mohd Zain, M.Z., A.S. Baba and A.B. Shori. 2017. Effect of polyphenols enriched from green coffee bean on antioxidant activity and sensory evaluation of bread . **Journal of King Saud University**. 30(2) : 278-282.

Nagata, M. and I. Yamashita. 1992. Simple method for simultaneous determination of chlorophyll and carotenoids in tomato fruit. **Journal The Japanese Society for Food Science and Technolog**. 39: 925-928.

Sies, H. and W. Stahl. 1995. Vitamins E and C, beta-carotene, and other carotenoids as antioxidants. **The American Journal of Clinical Nutrition**. 62(6): 1315S-1321S.

Volatile Compounds in Robusta Instant Coffee

Yatip Puttatananun[1] and Sasitorn Tongchitpakdee[1*]

ABSTRACT

The objective of this study was to determine volatile compounds profile of Robusta instant coffee (agglomerated coffee powder) in comparison with volatile compounds profile of coffee powder (spray dried coffee) and coffee extract. All samples were collected from commercial production facility. Volatile compounds were extracted using headspace-solid phase microextraction (HS-SPME) with DVB/CAR/PDMS fiber and were identified using gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). The results showed profile of volatile compounds in coffee extract, coffee powder and instant coffee were similar. These profiles consisted of volatile compounds including aldehyde, furans, phenols, pyrazines, pyridines, and pyrroles. Among various volatile compounds, furans are the predominant compounds in all samples, especially furfural (325.93 µg/g in coffee extract, 57.02 µg/g in coffee powder and 35.29 µg/g in instant coffee solution). The results also showed that spray drying resulted in loss of volatile compounds in coffee extract approximately 79-100%, while agglomeration resulted in loss of volatile compounds in coffee powder approximately 28-52%.

Key Words: Robusta instant coffee, spray drying, volatile compounds profile

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

[1]Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

INTRODUCTION

Coffee has been the most commercialized food product and the most widely consumed beverage in the world for decade (Clarke, 2001). Robusta coffee is one of the two cultivars which are economically important in coffee market. It is easy to grow with higher yield when compared Arabica coffee. Robusta coffee is widely grown in the Southern Part of Thailand and commercially used for instant coffee production. The volatile compounds of coffee are largely due to for aroma. More than 950 compounds have been identified. Most of compounds increase during the roasting process. The aroma profile of Arabica and Robusta coffee brews are different (Vitzthum *et al*., 1990). The roasty, earthy and smoky /phenolic notes are more intense in the Robusta coffee. In coffee processing, green bean is roasted to produce the characteristic flavor and associated with coffee beverage (Vincent, 1987). The coffee aroma during roasting is formed by pyrolysis, Strecker degradation, and Maillard reaction (Vitzthum *et al*., 1990). The aroma of coffee is critical for consumer perception. Therefore, during the several steps of instant coffee manufacturing process including extraction, evaporation, spray drying and agglomeration, volatile compounds maybe lost. There is very little of information on effect of processing on volatile compounds in Robusta instant coffee. The objective of this study was to determine the flavor profile compounds in Robusta instant coffee (agglomerated coffee powder) in comparison with volatile compounds profile of coffee powder (spray dried coffee) and coffee extract in order to obtain information for improving product quality.

MATERIALS AND METHODS

1. Robusta instant coffee processing

Ground roasted coffee was extracted using hot water at 178 ˚C with pressure 12.7 bar in extraction tank. Coffee extract samples were collected before spray drying, while coffee powder samples were collected after spray drying at inlet temperature of 200˚C and outlet temperature of 117˚C. Instant coffee samples were collected after agglomeration process at 65˚C. All samples were stored at -40 ˚C for further analysis.

2. Extraction volatile compounds by headspace-solid phase micro extraction (HS-SPME)

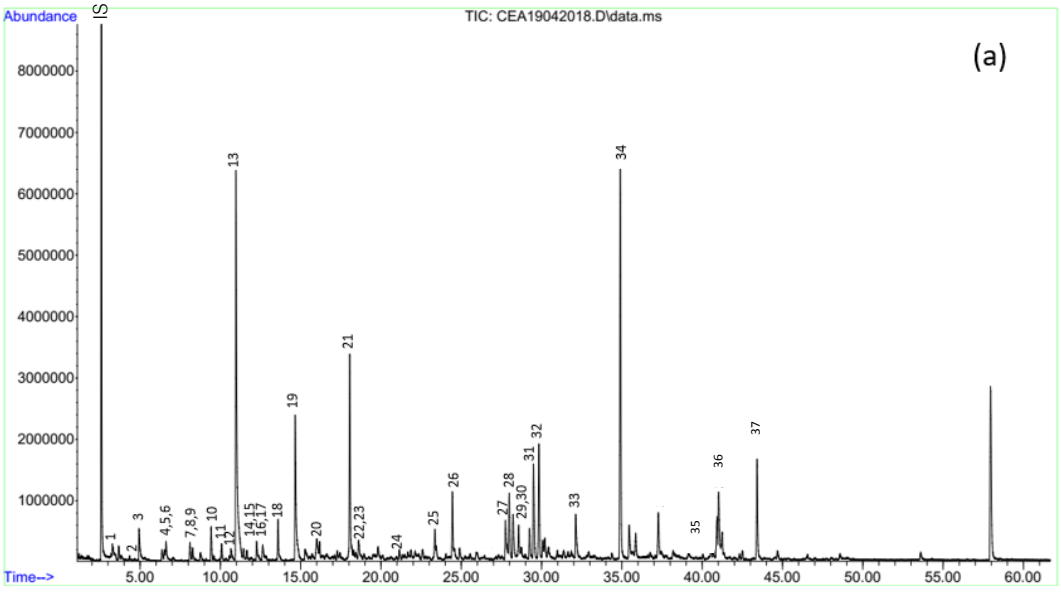
Coffee powder and instant coffee solutions were prepared using the manufacturer's instructions, by mixing 2 g of coffee with 120 mL of hot water. 25 µL of 5-Methyl-2-hexanone (conc.83.0 mg/mL) was added to 5 g of each samples as internal standard. Then samples were incubated for 15 minutes at 60 °C before exposed to headspace-solid phase micro extraction (HS-SPME) with DVB/CAR/PDMS fiber for 30 minutes. SPME was injected into GC by direct thermal desorption.

3. Analysis the volatile compounds profile

The aroma volatile compounds analysis was performed in Gas Chromatography (model 6890, Agilent) and using HP 5975 mass spectrometer. Compounds were separated on a capillary column (CP-FFAP with 25m x 0.32 x 0.30 µm). Helium was used as carrier gas at a flow rate of 1.6 mL min^{-1}. Sample were injected with headspace-solid phase micro extraction (HS-SPME) in splitless mode. The initial temperature column was as 50 °C hold for 2 minutes rising to 220 °C at a rate of 3 °C min^{-1} and hold for 20 minutes. The mass spectrometer operated in the electron ionization mode with an ion source temperature 230 ˚C and a quad temperature of 150 °C. The mass range of m/z 40–400 amu run in. The aroma volatile compounds were identified by comparing the mass spectra with those known the compounds in the library with NIST library v.2.0g (2011) database and comparison with retention index (RI) of standard alkane n-Alkane (C_1-C_{28}) with same column and condition (modified from Akiyama *et al*., 2003).

RESULTS AND DISCUSSIONS

GC chromatograms showed that Robusta coffee extract, coffee powder (spray-dried) and instant coffee (agglomerated) contained similar volatile compounds profiles (Fig 1). However, a number of compounds were lost during instant coffee processing. The volatile compounds in each sample were list in Table 1. The volatile compounds detected in the samples included aldehyde, furans, phenols, pyrazines, pyridine and pyrroles. The results also showed that spray drying resulted in loss of volatile compounds in coffee extract approximately 79 -100 %, while agglomeration resulted in loss of volatile compounds in coffee powder approximately 28-52%.



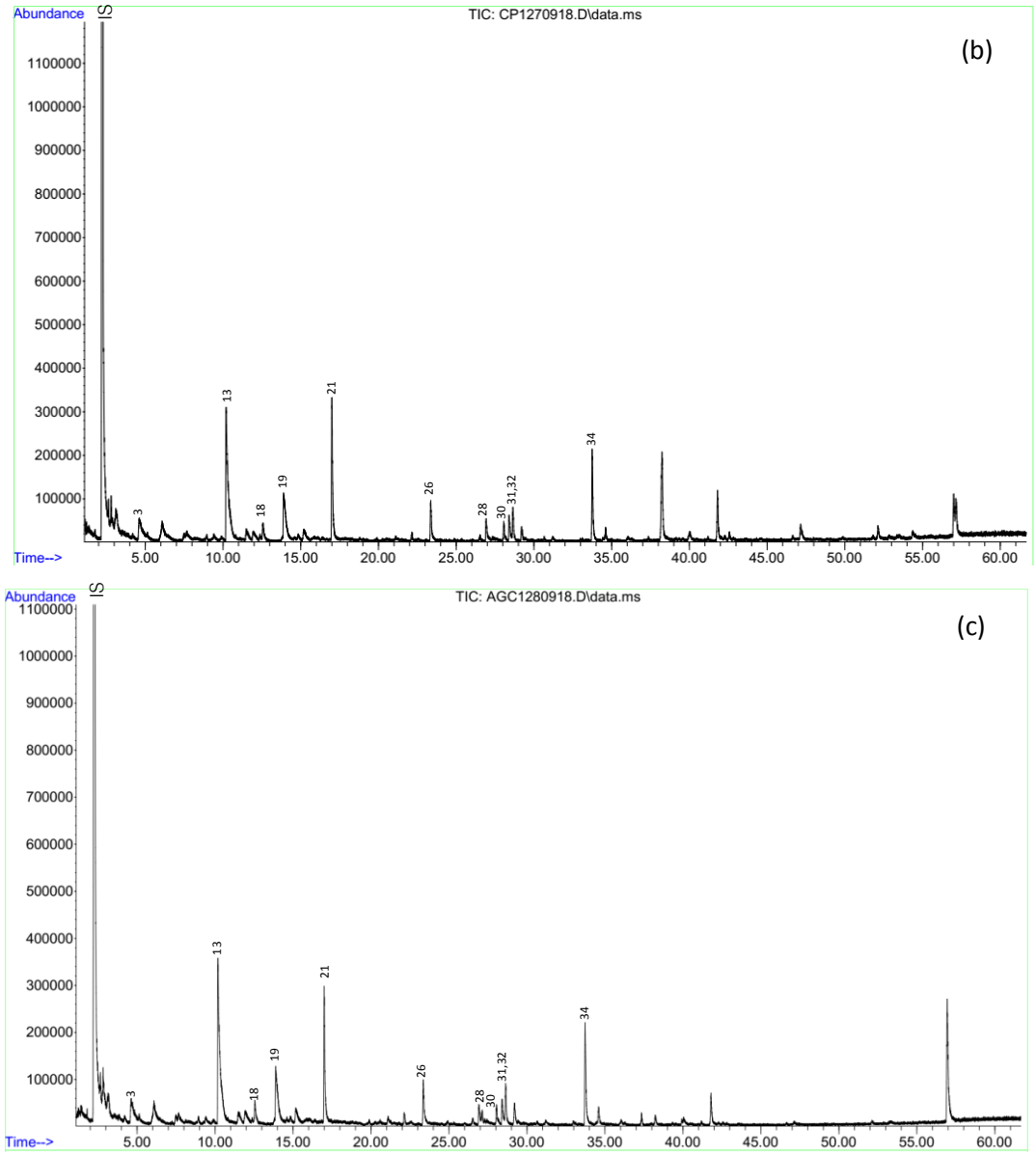


Figure 1 Chromatogram of volatile compounds (a) coffee extracts (b) coffee powder (c) instant coffee (1) Pyridine (2) 2-methoxymethylfuran (3) 2-methylpyrazine (4) 2,5-dimethylpyrazine (5) 2,6-dimethylpyrazine (6) ethylpyrazine (7) 2-ethyl-6-methylpyrazine (8) 2-ethyl-5-methyl-yrazine (9) 2-ethyl-3-methyl-pyrazine (10) 2,6-diethylpyrazine (11) 3-ethyl-2,5-dimethylpyrazine (12) 2-ethyl-3,5-dimethylpyrazine (13) Furfural (14) 2-(methylsulfanylmethyl)furan (15) 3,5-diethyl-2-methylpyrazine (16) 2acetylfuran (17) Benzaldehyde (18) 2-Furanmethanol, acetate (19) 5-ethyl-2-Furancarboxaldehyde, (20) 2-acetyl-1-methyl pyrrole (21) 2-Furanmethanol (22) 2-furfuyl-5-methyl furan (23) 2-Acetyl-3-methylpyrazine (24) Methyl salicylate (25) N-furfurylpyrrole (26) 2-methoxyphenol (27) Maltol (28) 2-acetyl pyrrole (29) Difufurylether (30) Phenol (31)1H-Pyrrole-2-carboxaldehyde (32) 4-ethyl-2-methoxyphenol (33) 1-methyl,1H-Pyrrole-2-carboxaldehyde (34) 2-Methoxy-4-vinylphenol (35) Homosalate (36) Indole (37) 5-Hydroxymethylfurfural

Table 1 Volatile compounds identified in coffee extracts, coffee powder and Instant coffee

RI[a]	Compounds	Concentration(µg/g) Coffee extracts	Coffee powder	Instant coffee	Odor Description [b]
	Aldehyde				
1496	benzaldehyde	14.28	-	2.58	Sweet, cherry-almond, anisic odor,
	Furans				
1478	2-acetylfuran	16.30	-	-	Sweet, almond, nutty, toasted, milky
1641	2-furanmethanol	143.12	29.99	14.99	Sulfuraceous, ester, chemical sweet, brown caramellike, bready
1512	2-furanmethanol, acetate	28.17	4.79	2.27	Sweet fruity
1665	2-furfuyl-5-methyl-furan	5.74	-	-	-
1217	2-(methoxymethyl)-furan	2.37	-	-	Coffee roasted
1459	2-(methylsulfanylmethyl) furan	8.64	-	-	Onion, garlic, sulfurous, pungent, vegetable
1533	5-methyl-2-furancarboxaldehyde	115.62	17.01	11.00	Sweet, caramellike, bread, coffee
1450	Furfural	325.93	57.02	35.29	Sweet, brown, woody, bready, with a slight phenolic nuance, caramellike
>1700	Difufurylether	28.72	-	-	Fruity, green, nut
>1700	5-hydroxymethylfurfural	83.56	-	-	Fatty, buttery, musty, waxy, caramel-like
	Phenol				
>1700	Phenol	20.63	3.66	2.2	Spicy, burnt, smoky, phenolic
>1700	2-methoxyphenol	42.36	8.01	5.01	Phenolic, smoky, spicy, medicinal,

>1700	2-methoxy-4-vinylphenol	255.78	19.48	14.02	Strong, spicy, dry, pungent, smoky
>1700	4-ethyl-2-methoxy-phenol	75.55	5.33	2.53	Sweet, spicy, phenolic medicinal
	Pyrazines				
1669	2-acetyl-3-methylpyrazine	20.12	-	-	Nutty, hazelnut, grain
1264	2,5-dimethylpyrazine	7.76	-	-	Chocolate, roasted nuts, earthy
1319	2,6-dimethylpyrazine	6.13	-	-	Chocolate, roasted nuts,
1415	2,6-diethylpyrazine	3.09	-	-	Chocolate, roasted, nuts, earthy
1240	2-methylpyrazine	26.25	8.12	6.9	Green, nutty, cocoa, musty
1380	2-ethyl-3-methyl-pyrazine	7.50	-	-	
1327	2-ethyl-6-methyl-pyrazine	11.95	-	-	Roasted potato
1375	2-ethyl-5-methyl-pyrazine	10.46	-	-	Green, earthy-musty, nutty, cocoa
1434	2-ethyl-3,5-dimethylpyrazine	3.42	-	-	Cocoa, chocolate, nutty
1420	3-ethyl-2,5-dimethyl-pyrazine	12.91	-	-	Potato, cocoa, roasted, nutty
1472	3,5-diethyl-2-methyl-pyrazine	7.05	-	-	Nutty, meaty
1324	ethylpyrazine	15.81	-	-	Nutty, musty, fermented, coffee,
	Pyridine				
<1200	Pyridine	10.57	-	-	Grassy-green leaf, green herbal
	Pyrroles				
>1700	1H-pyrrole2-carboxaldehyde	64.81	4.88	2.53	Musty, beefy, coffee
>1700	1-methyl,1H-Pyrrole-2-carboxaldehyde	37.41	-	2.68	Roasty, nutty
>1700	2-acetylpyrrole	46.63	4.61	2.21	Musty, nutty-like with a coumarin
>1700	2-acetyl 1-methlypyrrole	5.75	-	-	Nutty, floral, fruity, smoky, musty

>1700	N-furfurylpyrrole	18.49	-	-	Pungent,earthy,smoky
	Others				
>1700	Homosalate	22.26	-	-	Mild menthol
>1700	Indole	15.92	-	-	Floral
>1700	Maltol	39.61	-	-	Sweet, caramel, cotton candy, burnt bready
>1700	Methyl salicylate	6.71	-	-	Sweet, root beer, wintergreen phenolic, camphoreous

[a]Retention index calculated for the CP-FFAP capillary column

[b]odor description from Flavor-base Pro 10th edition (2006)

Among various group of volatile compounds, furan groups are the most abundant volatile compounds in highest in all samples. These results agreed with Budryn *et al.* (2011) who reported that furans were the predominant volatile compounds in Robusta coffee. In general furans flavor characteristic were known as sweet and caramellike. The furfural content is the most abundant volatile compounds in coffee extract and coffee powder, although approximately 82.5% was decreased during spray drying process. Chaichi *et al*., (2015) reported furfural concentrations were decreased after coffee brewing with the boiling method and preparation of instant coffee.

Phenols also decreased approximately 92% after spray drying and agglomeration. Among different phenols, 2-methoxy-4-vinylphenol was the most abundant in phenols group in all sample. This compound presented with a smoky note. Puvipirom (2003) reported that 2-methoxy-4-vinylphenol increased during roasting at 240 – 260 ˚C.

Other phenols detected included, 4-ethyl-2-methoxy-phenol and 2-methoxyphenol. 4-ethyl-2-methoxy-phenol was predominant volatile compound in the Robusta coffee with spicy and earthy-roasty perception (Blank *et al*., 1991). Similar to our results, Puvipirom (2003) also reported detection of other volatile compounds in Robusta coffee such as 5-methy-2furancarboxaldehyde, 2-furanmethanol, and 2-methoxyphenol, which gave greeny, nutty and roasted chili odor respectively. The phenol groups are represented the smoky, astringent, spicy and phenolic like and also contribute to the aroma of a cup of coffee (Clarke *et al*., 2001).

CONCLUSION

Robusta coffee extract, coffee powder (spray-dried) and instant coffee (agglomerated) contained similar volatile compounds profiles. However, significant loss of some volatile compounds was observed during spray drying process, while agglomeration resulted in reduction of all volatile compounds detected in coffee powder. Therefore, this instant coffee processing could be adjusted maintain more volatile compounds.

REFERENCE

Akiyama, M., K. Murakami, N. Ohtani, K. Iwatsuki, K. Sotoyama, A. Wada, K. Tokuno, H. Iwabuchi and K. Tanaka. 2003. Analysis of Volatile Compounds Released During the Grinding of Roasted Coffee Beans Using Solid-Phase Microextraction. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. 51(7): 1961-1969.

Blank, I., A. Sen and W. Grosch. 1991. Aroma impact compounds of Arabica and Robusta coffee. Qualitative and quantitative investigations, ***In*** **14th International Conference on Coffee Science. July 1991,** San Francisco, United States of America.

Budryn, G., E. Nebesny, J. Kula, T. Majda and W. Krysiak. 2011. HS-SPME/GC/MS Profiles of convectively and microwave roasted Ivory Coast Robusta coffee brews. **Czech Journal Food Science**. 29: 151-160.

Chaichi, M., V. Ghasemzadeh-Mohammadi, M. Hashemi and A. Mohammadi. 2015. Furanic compounds and furfural in different coffee products by Headspace Liquid-Phase Micro-Extraction followed by Gas Chromatography–Mass Spectrometry: Survey and effect of brewing procedures. **Food Additives & Contaminants: Part B**. 8: 73-80.

Clarke, R.J. and O.G. Vitzthum. 2001. **Coffee Recent Developments**. Blackwell Science Ltd, United Kingdom.

L***é***effingwell, J.C. 2006. Flavor-base Pro 10th edition. **Flavor base database software**, version 2006.

Puvipirom, J. 2003. **Production Factors Affecting Flavor Compounds in Thai coffee.** M.S. Thesis, Kasetsart University.

Vincent, J.C. 1987. Green coffee processing, pp1-333 In R.J. Clarke and R. Macrae., eds. **Coffee Volume 2. Technology**. Springer, Switzerland.

Vitzthum O.G., C. Weisemann, R. Beckar and H.S. Kohler. 1990. Identification of an aroma key compound in Robusta coffees. **Café, Cocao, Thé**. 34: 27-33.

ผลของสารละลายเบสต่อสมบัติทางเคมีเชิงกายภาพของแป้งข้าวเจ้า

Effect of Alkaline Solutions on Physicochemical Properties of Rice Flour

วาสนา นาราศรี[1] กมลวรรณ แจ้งชัด[1*] อนุวัตร แจ้งชัด[1] และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ[2]

Wassana Narasri[1], Kamolwan Jangchud[1*], Anuvat Jangchud[1] and Kuakoon Piyachomkwan[2]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของสารละลายเบสต่อคุณภาพทางเคมีเชิงกายภาพของแป้งข้าวเจ้า ทำการศึกษาผลของการแช่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 0.06 M, 0.12 M และน้ำปูนใส ที่อุณหภูมิห้อง (30±2 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ต่อสมบัติของแป้งข้าวเจ้า เปรียบเทียบกับสภาวะควบคุม พบว่า การเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางเคมีเชิงกายภาพของแป้งข้าวเจ้า ขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของสารละลาย รวมถึงค่า pH ของสารละลาย โดยแป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการแช่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น 0.12 M มีค่า pH สูงที่สุด (9.51) ตามด้วยที่ความเข้มข้น 0.06 M (8.61) น้ำปูนใส (7.91) และสภาวะควบคุม (control) มีค่า pH 5.62 ตามลำดับ แป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการแช่สารละลายเบสมีค่ากำลังการพองตัวและการละลายสูงขึ้น และมีอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนืดลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะควบคุม โดยแป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการแช่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.12 M มีค่าความหนืดสูงสุดและการคืนตัวสูงที่สุด ส่วนแป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการแช่น้ำปูนใส พบว่า ค่าความหนืดสูงสุด และค่าการคืนตัวมีค่าต่ำสุด

ABSTRACT

The objective of this research was to study the effect of alkaline solution on physicochemical properties of rice flour. The effect of soaking solution of sodium hydroxide (NaOH) at two concentrations (0.06 M and 0.12 M) and limewater at 30±2 °C for 1 h on the properties of rice flour were studied compared to control. The results showed that the changes in physicochemical properties of rice flour depended on the type, concentration and pH value of alkaline solution. Rice flour treated with 0.12 M NaOH had the highest pH value (9.51), followed by rice flour treated with 0.06 M NaOH (8.61), limewater (7.91) and the control (5.62), respectively. Rice flour treated with alkaline solution gave a significant increase ($p \leq 0.05$) in swelling power and solubility but decrease in pasting temperature compared with control. Rice flour treated with 0.12 M NaOH had the highest peak viscosity and setback. Whereas that treated with limewater had the lowest peak viscosity and setback.

Key Words: rice flour, alkaline solution, sodium hydroxide, limewater, physicochemical properties

* 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]ศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ ปทุมธานี 12120

[2]National Center for Genetic Engineering and Biotechnology, Pathum Thani 12120

คำนำ

ผลิตภัณฑ์อาหารที่ทำจากแป้งเป็นองค์ประกอบหลักหลายชนิดใช้สารละลายเบสต่างๆ เพื่อช่วยปรับปรุงคุณภาพในด้านสี กลิ่น กลิ่นรส เนื้อสัมผัสที่ยืดหยุ่น และความคงตัวของผลิตภัณฑ์ให้เป็นที่ยอมรับจากผู้บริโภค (Lai *et al*., 2004; Nadiha *et al*., 2010) เช่น การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการทำติ่มซำจากแป้งข้าวเหนียว และบะหมี่เหลืองจากแป้งสาลี เพื่อให้มีเนื้อสัมผัสที่เหนียว และยืดหยุ่น (Lai *et al*., 2004) การใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในกระบวนการผลิตแป้งข้าวโพด เพื่อทำให้ง่ายในการบด มีผลทำให้ผลิตภัณฑ์ทอทิลล่า (tortilla) ที่ทำจากแป้งดังกล่าวมีสีและเนื้อสัมผัสดี (Suhendro *et al*., 1998) การใช้น้ำปูนใส (สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์) เป็นส่วนผสมสำคัญในการทำขนมไทย ได้แก่ ขนมเปียกปูน ลอดช่อง และขนมน้ำดอกไม้ เพื่อทำให้ผลิตภัณฑ์มีเนื้อสัมผัสเหนียว ยืดหยุ่น และคงตัว (สุปราณี, 2553) ซึ่งให้ความเป็นเอกลักษณ์ด้านเนื้อสัมผัสของขนมไทยชนิดนั้น

การนำแป้งที่แช่ในสารละลายเบสต่างๆ มาเป็นส่วนผสมในอาหารจะมีผลต่อคุณภาพอาหาร ทั้งคุณภาพด้านสี และเนื้อสัมผัส มีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงภายในโครงสร้างของแป้ง และคุณสมบัติทางเคมีเชิงกายภาพของแป้ง เช่น การใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น 0.2-2.0 เปอร์เซ็นต์ (0.03-0.30 M) ในกระบวนการผลิตแป้งข้าวโพด พบว่า OH^- ของสารสะลายชนิดนี้สามารถแทรกซึมเข้าไปในเม็ดแป้งข้าวโพดได้ง่าย ทำให้พันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของแป้งข้าวโพดถูกทำลาย แป้งข้าวโพดจึงเกิดการพองตัวได้มาก และเริ่มกระบวนการเจลาติไนซ์เซชั่นได้เร็ว (Santiago *et al*., 2015) จึงมีอุณหภูมิที่เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงความหนืดต่ำ นอกจากนี้การใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น 0.67 เปอร์เซ็นต์ (0.09 M) ในการผลิตแป้งข้าวโพด พบว่า Ca^{2+} ของสารละลายเข้าไปในเม็ดแป้งข้าวโพด ทำให้แป้งข้าวโพดมีปริมาณแคลเซียม และค่าความหนืดสูงสุดสูงขึ้น (Fernandez *et al*., 2011) โดยการเปลี่ยนแปลงต่างๆ จะขึ้นอยู่กับชนิดของสารละลายเบส ความเข้มข้น ระยะเวลาในการแช่ และชนิดของแป้ง (Nadiha *et al*., 2010) ซึ่งน้ำปูนใสที่ใช้เป็นส่วนผสมของขนมไทย โดยเฉพาะขนมเปียกปูนนั้น น้ำปูนใสมีค่า pH ประมาณ 12.3 ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงคุณภาพของแป้งข้าวเจ้าที่เกิดขึ้นจากผลของน้ำปูนใสที่ใช้ในส่วนผสม ยังไม่มีข้อมูลการศึกษาวิจัยเพื่ออธิบายกลไกของน้ำปูนใสต่อคุณภาพของเม็ดแป้ง และเจลแป้ง เปรียบเทียบกับผลของสารละลายโซเดียม ไฮดรอกไซด์ที่มีค่า pH เป็นเบสใกล้เคียงกับน้ำปูนใส

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของน้ำปูนใส และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อค่า pH องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณ กำลังการพองตัว การละลาย และการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งข้าวเจ้า รวมถึงลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของเม็ดแป้งข้าวเจ้า เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปอธิบายการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น และปรับปรุงคุณลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์อาหารจากแป้งข้าวต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

1. วัตถุดิบ

แป้งข้าวเจ้าเชิงการค้า (ตรา ช้างสามเศียร), ปูนแดง (มีส่วนประกอบของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ขมิ้น และเกลือ) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (เกรดอาหาร)

น้ำปูนใส (Limewater) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เตรียมโดยนำปูนแดง (จากการวิเคราะห์ พบว่า มีปริมาณความชื้น ร้อยละ 56.10 และมีปริมาณแคลเซียม 16,634 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม โดยน้ำหนักเปียก) มาละลายกับ

น้ำกลั่น ในอัตราส่วนของปูนแดงต่อน้ำกลั่น เท่ากับ 1:10 แล้วพักไว้ให้สารละลายอิ่มตัว (pH 12.31) จากการวิเคราะห์ พบว่า มีปริมาณแคลเซียม 77.82 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม โดยน้ำหนักเปียก

2. การเตรียมตัวอย่างแป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการแช่สารละลาย

นำแป้งข้าวเจ้าแช่ในสารละลายต่างๆ มาศึกษาโดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มตลอด (Completely Randomized Design; CRD) มีทั้งหมด 4 สิ่งทดลอง ได้แก่ น้ำ (สภาวะควบคุม) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้น 2 ระดับ คือ 0.06 M และ 0.12 M และน้ำปูนใส (Limewater) โดยใช้อัตราส่วนของแป้งข้าวเจ้าต่อสารละลาย เท่ากับ 1 ต่อ 1.5 (น้ำหนัก/ปริมาตร) คนให้เข้ากัน แล้ววางไว้ที่อุณหภูมิห้อง (30±2 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ดัดแปลงมาจากวิธีการของ Reepholkul and Charoenrein (2011) และ Hedayati *et al.,* (2016) จากนั้นนำตัวอย่างเทใส่ถาดให้มีความหนา 2 มิลลิเมตร อบให้แห้งด้วยตู้อบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส นาน 16 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างแป้งที่ได้มาบดให้ละเอียดผ่านตะแกรงร่อน ขนาด 100 เมช เก็บตัวอย่างในถุงพลาสติก ชนิด Polyethylene (PE) ปิดผนึกให้สนิท เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง (30±2 องศาเซลเซียส) โดยทำการทดลอง 2 ซ้ำ

3. การวิเคราะห์คุณภาพ

3.1 คุณภาพทางเคมี

3.1.1 ค่า pH ของสารละลาย และแป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการแช่สารละลาย ด้วยเครื่อง pH meter (Sartorius รุ่น Docu-pH, Germany) ตามวิธีการ 02-52 AACC (2000)

3.1.2 องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณ ได้แก่ ความชื้น, โปรตีน (คำนวณโปรตีน (%) จากไนโตรเจน (%) x 5.95), ไขมัน และเถ้า ตามวิธีการ AOAC (2000)

3.2 คุณภาพทางเคมีเชิงกายภาพ

3.2.1 วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของแป้งข้าวเจ้า โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงส่องผ่าน (Light Microscope, Leica รุ่น DME, Germany) ดัดแปลงจากวิธีการของ Montealvo *et al.,* (2007) โดยนำไปตรวจสอบขนาดและรูปร่างเม็ดแป้ง ด้วยกำลังขยาย 40 เท่า ที่อุณหภูมิห้อง (30±2 องศาเซลเซียส) และศึกษาลักษณะไบรีฟรินเจนซ์ของเม็ดแป้งภายใต้แสงโพลาไรซ์

3.2.2 กำลังการพองตัว และการละลาย ดัดแปลงจากวิธีการของ กล้าณรงค์ และเกื้อกูล (2546)

3.2.3 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการแช่สารละลายต่างๆ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว (Rapid Visco Analyzer, รุ่น RVA4D, Newport Scientific Instrument & Engineering, Australia) ตามวิธีการ 61.02 AACC (2000) โดยทำการวิเคราะห์ สิ่งทดลองละ 3 ซ้ำ

4. การวิเคราะห์ทางสถิติ

วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล (ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS for Windows Ver.12.0 (SPSS Inc., Thailand)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. คุณภาพทางเคมี

1.1 ค่า pH

ค่า pH ของสารละลายต่างๆ ที่ใช้ในการแช่แป้งข้าวเจ้า ได้แก่ น้ำ (สภาวะควบคุม), สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.06 M, 0.12 M และน้ำปูนใส มีค่าเท่ากับ 6.08, 12.34, 12.60 และ 12.31 ตามลำดับ โดยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.12 M เป็นเบสแก่ที่มีค่า pH สูงที่สุด ซึ่งสารละลายต่างๆ มีบทบาทต่อค่า pH ของแป้งข้าวเจ้า ดังนั้นแป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.12 M จึงมีค่า pH สูงที่สุด (9.51) ตามด้วยที่ความเข้มข้น 0.06 M (8.64) น้ำปูนใส (7.91) และสภาวะควบคุม (5.62) ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 1

1.2 องค์ประกอบทางเคมี

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการแช่สารละลาย พบว่า มีปริมาณความชื้นร้อยละ 11.53 ปริมาณโปรตีน ไขมัน และเถ้าร้อยละ 6.35, 0.12 และ 0.60 โดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ส่วนแป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการแช่ในสารละลายต่างๆ มีองค์ประกอบทางเคมี ดังแสดงใน Table 1 พบว่า มีปริมาณความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 10.54-11.09 มีปริมาณโปรตีน ไขมัน และเถ้าอยู่ในช่วงร้อยละ 6.62-6.76, 0.13-0.18 และ 0.59-0.63 โดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ โดยปริมาณโปรตีน ไขมัน และเถ้าของแป้งที่ผ่านการแช่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ น้ำปูนใส และสภาวะควบคุมไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) เนื่องจากการเตรียมตัวอย่างแป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายได้นำของเหลวข้นทั้งหมดอบให้แห้ง โดยไม่ได้แยกสารละลายส่วนใสออก ดังนั้นตัวอย่างที่ได้จึงยังคงมีองค์ประกอบทางเคมีต่างๆ ใกล้เคียงกัน

Table 1 pH value and chemical composition of control and alkali treated flour

Treatment	pH	Moisture (%wet basis)	Protein^{ns} (%dry basis)	Fat^{ns} (%dry basis)	Ash^{ns} (%dry basis)
Control	5.62±0.01^{d}	10.65±0.27^{b}	6.76±0.09	0.18±0.01	0.60±0.00
0.06 M NaOH	8.64±0.00^{b}	10.68±0.22^{b}	6.69±0.06	0.16±0.01	0.62±0.01
0.12 M NaOH	9.51±0.01^{a}	10.54±0.24^{b}	6.71±0.09	0.13±0.04	0.63±0.01
Limewater	7.91±0.00^{c}	11.09±0.10^{a}	6.62±0.11	0.13±0.01	0.59±0.03

Note $^{a-d}$ means with different letters within the same column are significantly different ($p\leq0.05$).

^{ns} not significant.

2. คุณภาพทางเคมีเชิงกายภาพ

2.1 โครงสร้างระดับจุลภาคของเม็ดแป้งข้าวเจ้า

ขนาด รูปร่าง และลักษณะไบรีฟรินเจนซ์ของเม็ดแป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการแช่สารละลายต่างๆ ดังแสดงใน Figure 1 พบว่า เม็ดแป้งของทุกสิ่งทดลองมีองค์ประกอบอื่นปะปน เนื่องจากแป้งข้าวเจ้ามีโปรตีน และไขมัน ซึ่งไม่ได้ถูกแยกออกในระหว่างการเตรียมตัวอย่าง แต่ทั้งนี้สามารถสังเกตเห็นได้ว่าเม็ดแป้งโดยส่วนใหญ่ใน

สภาวะควบคุมมีรูปร่างเป็นลักษณะหลายเหลี่ยม ส่วนเม็ดแป้งที่ผ่านการแช่สารละลายเบสมีมุมเหลี่ยมหายไป โดยเฉพาะแป้งที่ผ่านการแช่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น 0.12 M และยังมีผลทำให้เม็ดแป้งส่วนหนึ่งมีขนาดเล็กลง เมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะควบคุม เป็นเพราะในระหว่างการแช่แป้งในสารละลายเบสทำให้เม็ดแป้งบริเวณผิวถูกทำลาย (Thys *et al*., 2008) เม็ดแป้งจึงมีขนาดเล็กลง

เมื่อพิจารณาลักษณะไบรีฟริงเจ้นซ์ที่แสดงด้วยเครื่องหมายกากบาท พบว่า ทุกสิ่งทดลองมีลักษณะ ไบรีฟริงเจ้นซ์ เพราะอุณหภูมิที่ใช้ในการศึกษาทดลอง ที่อุณหภูมิห้อง (30±2 องศาเซลเซียส) ต่ำกว่าอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนซ์ ซึ่งแป้งที่ผ่านการเจลาติไนซ์จะมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติแบบไม่ผันกลับ ได้แก่ การขยายขนาดของเม็ดแป้ง การหลอมละลายผลึก และการสูญเสียไบรีฟริงเจ้นซ์ (Whistler and Bemiller, 1999)

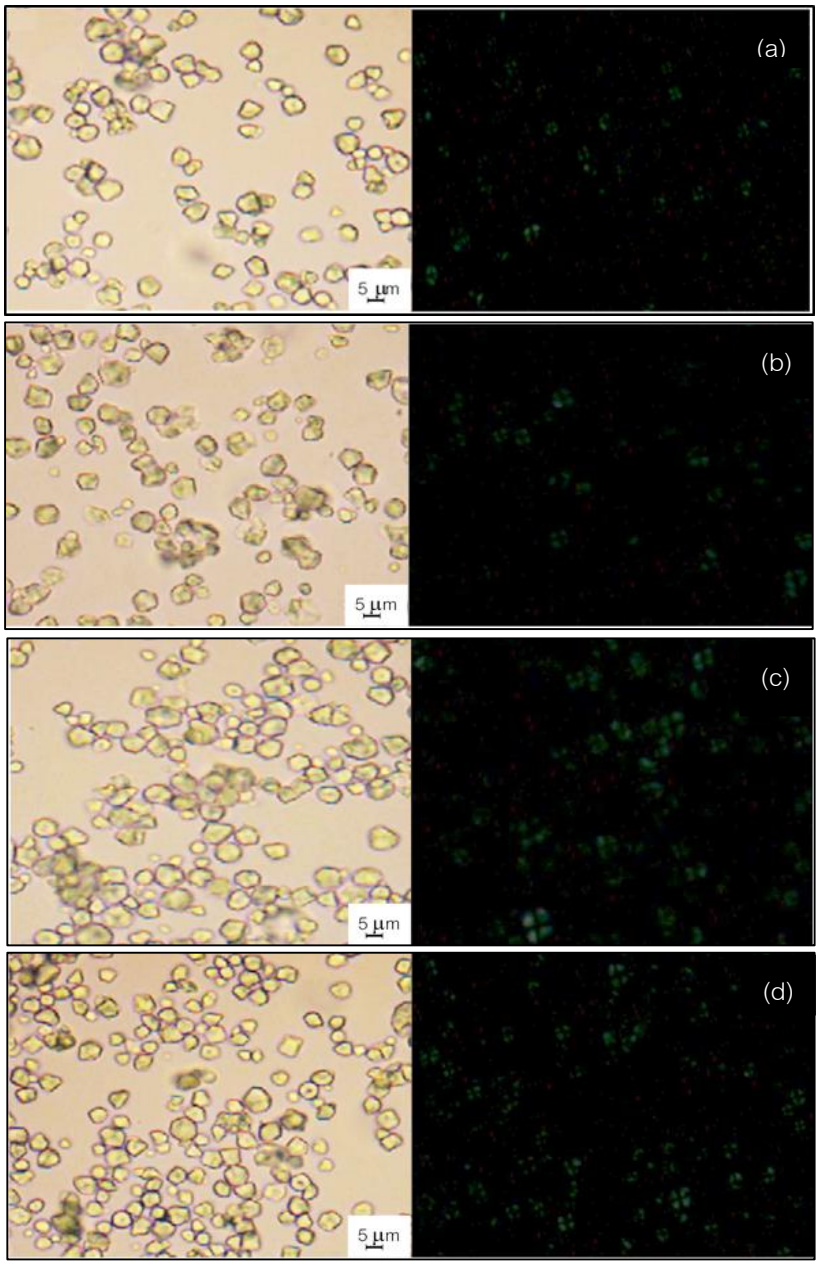


Figure 1 Light micrographs (left) and polarized light micrographs (right) of control and alkali treated flour granules at room temperature (30±2°C). Control (a), 0.06 M NaOH treated flour (b), 0.12 M NaOH treated flour (c) and Limewater treated flour (d) (40x, Bar = 5 μm)

2.2 กำลังการพองตัวและการละลาย

จากการศึกษากำลังการพองตัวและการละลายของแป้งข้าวเจ้า ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส พบว่า แป้งข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการแช่สารละลาย มีกำลังการพองตัว ร้อยละ 7.96 และการละลาย ร้อยละ 3.23 ส่วนแป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการแช่ในสารละลายต่างๆ มีกำลังการพองตัวและการละลาย ดังแสดงใน Figure 2 ซึ่งแป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการแช่สารละลายในสภาวะควบคุม และแป้งข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการแช่สารละลายไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)

ส่วนแป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น 0.06 M, 0.12 M และน้ำปูนใส มีกำลังการพองตัว (10.72,11.76 และ 9.26 ตามลำดับ) และการละลาย (ร้อยละ 5.06, 7.94 และ 5.58 ตามลำดับ) สูงกว่าสภาวะควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq0.05$) ที่สภาวะควบคุมมีกำลังการพองตัว 8.49 และการละลาย ร้อยละ 2.63 โดยกำลังการพองตัวและการละลายของแป้งข้าวเจ้ามีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อสารละลายเบสมีค่า pH สูงขึ้น ซึ่งจากรายงานผลการศึกษาของ Cardoso *et al.*,(2006) พบว่า สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้นสูงกว่า 0.24 เปอร์เซ็นต์ (0.06 M) มีผลให้เม็ดแป้งสูญเสียโครงสร้างระดับจุลภาค เพราะสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์แทรกซึมเข้าไปในเม็ดแป้งได้ง่าย และทำลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของแป้ง แล้วเริ่มเกิดการเจลาติไนซ์

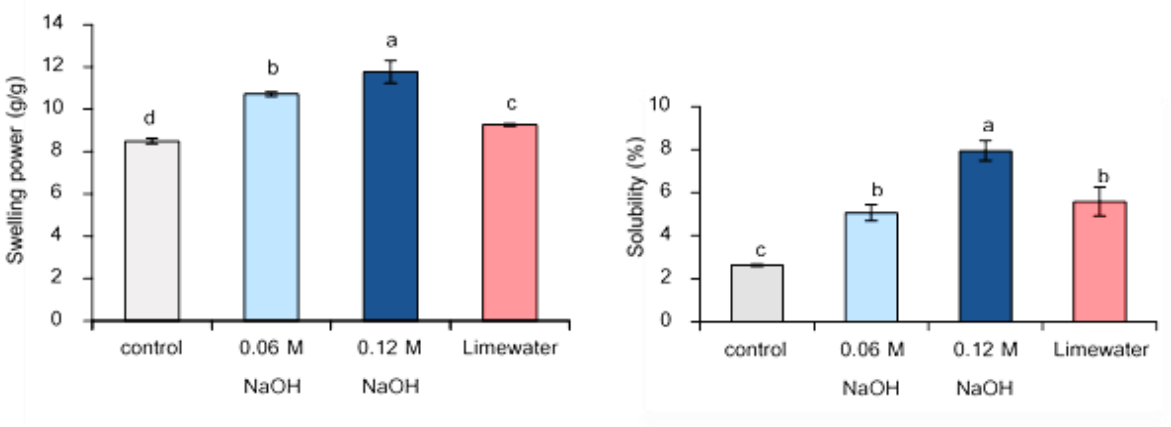


Figure 2 Swelling power and solubility of control and alkali treated flour. Different letters indicated the mean values were significantly different ($p\leq0.05$).

2.3 การเปลี่ยนแปลงความหนืด

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการแช่สารละลาย มีอุณหภูมิที่เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงความหนืด (Pasting Temperature) ค่าความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) ค่าความหนืดต่ำสุด (Trough viscosity) และความหนืดสุดท้าย (Final viscosity) และค่าการคืนตัว (Setback from trough) เท่ากับ 89.6°C, 160.87, 133.13, 332.50 RVU และ 199.37 RVU ตามลำดับ ส่วนแป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการแช่สารละลายเบส พบว่า มีผลการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งข้าวเจ้า ดังแสดงใน Table 2 โดยในสภาวะที่มีความเป็นเบสสูง เบสทำให้โปรตีนบางส่วนเกิดการละลาย และทำลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของแป้ง เกิดหมู่ OH^- ทำให้โมเลกุลของแป้งเป็นขั้วลบ เกิดแรงผลักระหว่างขั้วที่เหมือนกันของแป้ง ทำให้โครงสร้างเม็ดแป้งเปิดออก และเกิดการพองตัวของเม็ดแป้งเร็วขึ้น (Han and Lim, 2004 และ Lai *et al.*, 2004) และแอมิโลสละ

ลายออกมาในสารละลาย (Morris, 1990) ทั้งนี้แป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการแช่สารละลายเบส จึงมีค่าอุณหภูมิที่เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงความหนืดต่ำกว่าสภาวะควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ค่าความหนืดสูงสุดของแป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการแช่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น 0.06 M และน้ำปูนใส พบว่า มีค่าความหนืดสูงสุดลดลง โดยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้นนี้ เม็ดแป้งไม่แข็งแรง (หรือโมเลกุลของแอมิโลเพคตินอ่อนแอมากต่อการถูกย่อยสลาย) โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อให้ความร้อนภายใต้แรงกวน ซึ่งโมเลกุลของแอมิโลเพคตินถูกทำลายสามารถยืนยันได้ ด้วยค่าความหนืดต่ำสุดมีค่าลดลง และค่า breakdown มีค่าเพิ่มขึ้น (Wang *et al*., 2014) ส่วนน้ำปูนใสทำให้เม็ดแป้งเกิดการสูญเสียโครงสร้างผลึกและหมู่ไฮดรอกซิล (OH^-) ของสตาร์ชเชื่อมจับกับ Ca^{2+} จึงเกิดการครอสลิง (Ca-starch crosslinks) ทำให้เม็ดแป้งมีโครงสร้างที่แข็งแรงขึ้น (Bryant and Hamaker., 1997) สำหรับแป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการแช่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น 0.12 M มีค่าความหนืดสูงสุดเพิ่มขึ้นนั้น อาจเป็นเพราะที่ความเข้มข้นสูงนี้ทำให้โปรตีนในเม็ดแป้งละลายออกมาได้มาก ส่งผลให้เม็ดแป้งพองตัวมาก (Lai *et al*., 2004 และ Paraginski *et al*., 2014)

ค่าความหนืดต่ำสุด แสดงถึงค่าความหนืดต่ำสุดของแป้งที่เกิดจากการให้ความร้อน และแรงกวนที่ใช้ในการผสม (Newport Scientific,1995) พบว่า แป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการแช่สารละลายเบสมีค่าความหนืดต่ำสุดลดลง เนื่องจากสารละลายเบสมีผลทำให้โครงสร้างของเม็ดแป้งถูกทำลาย จึงมีความคงทนต่อแรงกวนได้น้อย ส่วนค่าความหนืดสุดท้าย แสดงถึงลักษณะของแป้ง หรือผลิตภัณฑ์ว่าเป็นแป้งเปียก เมื่อผ่านการให้ความร้อนและทำให้เย็น (น้ำฝน, 2557) พบว่า สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น 0.12 M มีผลทำให้ค่าความหนืดสุดท้ายของแป้งข้าวเจ้าสูงที่สุด ส่วนน้ำปูนใสมีผลทำให้แป้งข้าวเจ้ามีค่าความหนืดสุดท้ายลดลง

ค่าการคืนตัว แสดงถึงความสามารถในการคงตัวของเจล และความสามารถในการเกิดรีโทรเกรเดชัน พบว่า แป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการแช่ด้วยน้ำปูนใสมีค่าการคืนตัวลดลง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะควบคุม น่าจะเป็นเพราะพันธะไฮโดรเจนไม่เสถียรในสารละลายเบส จึงทำให้การจัดเรียงตัวกันใหม่ระหว่างโมเลกุลได้ยากขึ้น เช่นเดียวกับผลการศึกษาของ Han *et al*., (2012) ที่พบว่า แป้งบัควีทที่ผสมสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.1-0.8 เปอร์เซ็นต์ มีค่าการคืนตัวต่ำกว่าสภาวะควบคุม

Table 2 Pasting properties of control and alkali treated flour

Treatment	Pasting Temp. (°C)	Viscosity (RVU)				
		Peak viscosity	Trough	Break down	Final viscosity	Set back
Control	90.38±0.04^{a}	175.33±4.36^{b}	138.59±2.71^{a}	36.75±1.65^{d}	316.88±3.36^{b}	178.29±0.65^{c}
0.06 M NaOH	81.38±0.04^{c}	170.25±0.47^{bc}	96.17±0.12^{c}	74.08±0.35^{b}	316.38±18.45^{b}	220.21±18.33^{b}
0.12 M NaOH	80.58±0.04^{d}	183.63±1.48^{a}	85.91±0.83^{d}	97.70±2.30^{a}	362.09±1.65^{a}	276.17±2.47^{a}
Limewater	82.23±0.04^{b}	167.17±2.24^{c}	114.46±2.77^{b}	52.71±0.53^{c}	253.83±0.00^{c}	139.38±2.76^{d}

Note $^{a-d}$ means with different letters within the same column are significantly different ($p \leq 0.05$).

สรุป

จากการศึกษา พบว่า ชนิด และความเข้มข้นของสารละลาย รวมถึงค่า pH ของสารละลาย มีผลต่อสมบัติทางเคมีเชิงกายภาพของแป้งข้าวเจ้า โดยแป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการแช่สารละลายเบสมีกำลังการพองตัวและการละลายของแป้งข้าวเจ้าสูงขึ้น และมีอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนืดที่อุณหภูมิต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะควบคุม โดยแป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการแช่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น 0.12 M มีค่าความหนืดสูงสุด และค่าการคืนตัวมีค่าสูงที่สุด ส่วนน้ำปูนใสมีผลทำให้แป้งข้าวเจ้ามีค่าความหนืดสูงสุดและค่าการคืนตัวมีค่าต่ำที่สุด ซึ่งจะทำให้เกิดการรีโทรเกรเดชันได้ช้าลง ดังนั้นน้ำปูนใสจึงเป็นสารละลายเบสที่เหมาะสำหรับการทำขนมไทย เช่น ขนมเปียกปูน ลอดช่องไทย และขนมน้ำดอกไม้ เพื่อทำให้ผลิตภัณฑ์มีเนื้อสัมผัสเป็นเจลแป้งสุกที่คงตัว และไม่มีลักษณะของน้ำที่ถูกบีบออกมานอกเจล

เอกสารอ้างอิง

กล้าณรงค์ ศรีรอต และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ. 2546. **เทคโนโลยีของแป้ง**. พิมพ์ครั้งที่ 3. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

น้ำฝน ลำดับวงศ์. 2557. **การวิเคราะห์แป้งและแป้งดัดแปร**. สำนักพิมพ์เอเชียดิจิตอลการพิมพ์ จำกัด, กรุงเทพฯ.

สุปราณี แพรศิริ. 2553. **ขนมไทย**. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์เอ็มไอเอส, กรุงเทพฯ.

AACC. 2000. **Approved Methods of American Association of Cereal Chemists**, 10th Edn, Amarican Association of Cereal Chemists, St. Paul, MN.

AOAC, 2000, **Official Method of Analysis of AOAC International**, 17th edition. The Association of Official Analytical Chemists. Gaithersburg. Maryland.

Bryant, C.M. and B.R. Hamaker. 1997. Effect of lime on gelatinization of corn flour and starch. **Cereal Chem.** 74: 171-175

Cardoso, M.B., D. Samios. and N.P. Silveira. 2006. Study of protein detection and ultrastructure of Brazilian rice starch during alkaline extraction. **Starch/Starke.** 58: 345-352.

Fernandez, M.J.L., Acosta, O.A.A., Zelaya, A.O. and Rodriguez, G.M.E. 2011. Effect of calcium content in the corn flour on RVA profiles. **J. Food Eng.** 102: 100-103

Han, J. and S.T. Lim. 2004. Structural changes in corn starch during alkaline dissolution by vortexing. **Carbohydr. Polym.** 55(2): 193-199

Han, L., Z. LU., X. Hao., Y. Cheng and L. Li. 2012. Impact of calcium hydroxide on the textural properties of buckwheat noodles. **J. Text Stud.** 43: 227-234.

Hedayati, S., M. Majzoobi, F. Shahidi, A. Koocheki and A. Farahnaky. 2016. Effects of NaCl and $CaCl_2$ on physicochemical properties of pregelatinized and granular cold-water swelling corn starches. **Food Chem.** 213: 602-608.

Karim, A. A., M.Z. Nadiha, F.K. Chen, Y.P. Phuah, Y.M. Chui and A. Fazilah. 2008. Pasting and retrogradation properties of alkaline-treated sago (*Metroxylon Sagu*) starch. **Food Hydrocolloid**. 22: 1044-1053.

Lai, L.N., A.A. Karim, M.H. Norziah and C.C. Seow. 2004. Effects of Na_2CO_3 and NaOH on pasting properties of selected native cereal starches. **J. Food Sci.** 69: 249-256.

Montealvo, G.M., J.T. Espino., O. P. Lopez. and L.B. Perez. 2007. Physicochemical and morphological characteristics of nixtamalized maize starch. **Starch/Starke.** 59: 277-283.

Morris, V.J. 1990. Starch gelation and retrogradation. **Trends Food Sci Technol.** 7: 2-6.

Nadiha, M.Z., A. Fazilah, R. Bhat and A.A. Karim. 2010. Comparative susceptibilities of sago, potato and corn starches to alkali treatment. **Food Chem.** 121: 1053-1059.

Newport Scientific. 1995. **Operation Manual for the series 4 Rapid Visco Analyser**. Warriewood, New South Wales. 93 p.

Paraginski, R.T., J.A. Evangelho., R. Colussi., R.M. Silva., E.R. Zavareze., M. Oliveira., M.C. Elias. and A.R.G. Dias. 2014. Starch and flour from defective rice kernels and their physicochemical properties. **Starch/Starke.** 66: 729-737

Reepholkul, K. and S. Charoenrein, 2011. The effect of alkali treatment on the granular morphology and pasting properties of rice flour. p. 224-229. **Starch Update 2011 The 6th International conference on starch technology. February 13th-14th**, Bangkok, Thailand.

Reepholkul, K. and S. Charoenrein, 2012. Effect of sodium carbonate on appearance and textural properties of glutinous rice cake. **Int. J. Food Sci. Technol.** 48: 2185-2192.

Santiago, D.R., J.D.C. Figueroa, J.J.M. Veles, R.C. Reynoso, M.G. Ramos, M.M. Gaytan and E.S. Morales. 2015. Effects of annealing and concentration of calcium salts on Thermal and Rheological properties of maize starch during an ecological nixtamalization process. **Cereal Chem.** 92 (5): 475-480.

Suhendro, E., H. Almeida., L. Rooney and R. Waniska. 1998. Objective rollability method for corn tortilla texture measurement. **Cereal Chem.** 75 (3): 320-324

Thys, R.C.S., H. Westfahl, C.P.Z. Norena, L.D.F. Marczak, N.P. Silveira and M.B. Cardoso. 2008. Effect of the alkaline treatment on the ultrastructure of C-type starch granules. **Biomacromolecule.** 9: 1894-1901.

Wang, S., H. Luo., J. Zhang., Y. Zhang., H. Zhonghu and S. Wang. 2014. Alkali-Induced Changes in Functional Properties and *in Vitro* Digestibility of Wheat Starch: The Role of Surface Proteins and Lipids. **J. Agric. Food Chem.** 62: 3636-3643

Whistler, L.R. and J.N. Bemiller. 1999. **Carbohydr. Chem. Food Sci.** Eagan Press, U.S.A.

Reduction of Diacetyl Content in Lager Beer Affected by Valine Supplementation

Sreymom Tith[1], Ulaiwan Withayagiat[2], Yaowapa Lorjaroenphon[1] and Siree Chaiseri[1*]

ABSTRACT

Diacetyl in a beer product produces a recognizable undesirable (buttery) off-flavor. The wort composition is important for yeast growth and determines beer quality; furthermore, valine is an essential amino acid known to reduce off-flavor compounds such as diacetyl. Thus, supplementation with standard valine (SV), defatted soybean seed (DSB) and defatted sunflower seed (DSF) was used to minimize diacetyl in 30% rice grit lager beer fermented with the newly isolated yeast, *Saccharomyces cerevisiae* LPST01. The four worts were prepared using 30% Khao Dowk Mali 105 with 70% malt (CW), CW with 300mg/L of standard valine (SVW), CW with 17.92 g /L of DSB (DSBW), and CW with 28.74 g/L of DSF (DSFW). The results showed that SVW had more valine (463.20 mg/L) than that found in CW, DSBW, and DSFW (113.9 mg/L, 109.0 mg/L, and 115.7 mg/L, respectively). Moreover, the tendency of free amino nitrogen (FAN) content in wort was similar with the valine content, SVW (176.712 mg/L) had more FAN than those found in CW (146.451 mg/L), DSBW (139.896 mg/L), and DSFW (154.426 mg/L). After fermentation at 10°C for 13 days, SVW reduced the diacetyl content in finished beer to 0.722 mg/L which was significantly ($p < 0.05$) lower than that found in CW (1.955 mg/L), DSBW (2.086 mg/L), and DSFW (2.219 mg/L). Thus, supplementation of valine resulted in a significantly lower diacetyl content in the green beer. Furthermore, the poor diacetyl reduction ability with defatted protein supplementation in sweet wort was due to low valine and FAN liberated from their structure.

Key Words: defatted proteins (soybean protein and sunflower seed), diacetyl, lager beer, rice adjunct, wort valine

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

[1]Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

[2]Department of Biotechnology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

INTRODUCTION

Diacetyl (2, 3 butanedione) is a known flavor (butter-like and toffee-like) compound in many food products including popcorn, cheese, wine, spirits, and beer (Choi et al., 2015). However, diacetyl is also a factor affecting lung disease following high exposure above 900 μg/kg body weight per day (Clark and Winter, 2015). Furthermore, the flavor of diacetyl can impact negatively in the mouth, in quality of alcoholic beverages, especially lager beer (Shi et al., 2015; Yamauchi et al., 1995). Therefore, the control of the diacetyl content is one of the main purposes in each step of beer brewing in all breweries.

Krogerus and Gibson (2013) reported that diacetyl is formed as an indirect by-product of valine biosynthesis in yeast and the amount formed during fermentation varies greatly, depending on the wort valine content. The valine is known to be involved in the feedback inhibition of the enzyme acetohydroxy acid synthase (AHAS) which catalyzes both the irreversible conversions of pyruvate to alpha-acetolactate and alpha-ketobutyrate to alpha-acetohydroxybutyrate and is important regarding VDK production (Barton and Slaughter, 1992; Krogerus and Gibson, 2013). In summary, a diacetyl precursor (alpha-acetolactate) and the diacetyl content are linked with the amount of valine in the wort. Moreover, presenting natural valine sources was the primary focus of the current investigation. Thus, soybean (*Glycine max*) and sunflower (*Helianthus Annuus* L) seeds were not only known as oil sources, but they also contained high amounts of proteins (20%-40%). In addition, a primary nutrition strategy should focus on improving the quality of food, and in particular, essential amino acids are present in these natural protein sources (Aleem et al., 2012; Gandhi and Srivastava, 2007). Furthermore, in beer brewing, brewers and breweries also want to maximize their profit from brewing. Therefore, rather than choosing 100% of malted barley, rice grain can be commonly used as an adjunct in brewing. Depending on the advantage of using rice in terms of product cost (local product and cheaper than malt), it is a source of carbohydrate, with its own flavor and a lower oil content (Ceppi and Brenna, 2010).

Finally, without the off-flavor from the diacetyl content linked with newly rice beer, the high valine supplementation includes defatted soybean seed (DSB) and defatted sunflower seed (DSF) are natural sources, and synthesis valine (SV), can be used to minimize the diacetyl content in 30% rice grit lager beer fermented with a newly isolated yeast *Saccharomyces cerevisiae* LPST01.

MATERIALS AND METHODS

1. Materials

Two malts, based malts (BM) and Carapil malts (CM) were purchased by the Company of Master Brewing Thailand (CMBT). DSB and DSF sources were supplied by Thanakorn Vegetable Oil

Products Co., Ltd., broken rice (Khao Dowk Mali 105) was purchased at Senanikum market, Thailand. Valine standard (L-valine) was from Sigma-Aldrich Inc., PO, USA. The amounts of the two natural sources were adjusted to achieve 300 mg/L of valine in the dry matter. Otherwise, the valine content of DSB (1.674g valine/100g dried weight) and DSF (1.044g valine/100g dried weight) were analyzed using UHPLC at the Kasetsart University Research and Development Institute (KURDI), Thailand. The batch fermentation treatments commenced with the mashing step (Table 1). All experimental batches and responsible parameters were done with triplicate.

Table 1 The composition of main ingredient for wort preparation.

Treatments	Total grain solid			Total liquid	Valine source /amount (g)
	KDML105	Malts (BM)	Malts (CM)	Drinking water	
Control (CW)	60 g	120 g	20 g	1000 mL	0
VSW	60 g	120 g	20 g	1000 mL	standard valine/ 300 mg
DSBW	60 g	120 g	20 g	1000 mL	defatted soybean seed/17.92 g
DSFW	60 g	120 g	20 g	1000 mL	defatted sunflower seed/28.74 g

2. Determination of proximate compositions of raw materials

The proximate analysis of main ingredient shown in table 1 was carried out in triplicate. They were analyzed in terms of protein content using the Kjeldahl method according to method described by European Brewing Convention (EBC 8.9.1) (Pliansrithong et al., 2013) and fat content (Soxhlet extraction with diethyl ether for 2 hrs), ash content and dry matter were determined according to AOAC official methods (AOAC, 2012). All assays were performed in triplicate and the contents were expressed on a dry weight basis (% dw).

3. Mashing procedure

All raw materials were milled and ground using a hammer mill (diameter <1.00 mm). Initially, 30% rice (60 g (KDML105) was prepared for individual cooking with a ratio of 1:5 with drinking water (300 mL) + 100 ppm of $CaCl_2$ at pH 5.2. The rice was added to the water at 70°C. Then, the temperature was increased to 90°C for 20 min. The mixture was cooled to 65°C and allowed to adjust before adding malt in the next step. Two milled malts and DSB or DSF as indicated in Table 1 were mixed with 700 mL drinking water (+ 100 ppm of $CaCl_2$ at pH 5.2) at a ratio of 1:5. The temperature at the

commencement of mashing was 35°C (held for 5 min) and increased to 52°C (held for 30 min), 63°C with the addition of the cooked rice and held for 60 min, and 73°C (held for 20 min). Finally, the enzymes were inactivated by heating to 85°C for 5 min. The wort was filtered using cotton and a paper filter (N°4, Whatman, Dassel, Germany). The prepared 12°B wort was boiled for 60 min and hops were added to provide the aroma, flavor, and bitterness of the beer as 25 international beer units (IBU). The two hops: Hersbruck (alpha-acid 4.0%) and Saaz pellets (alpha-acid 2.6%) were added. Finally, the spent hop was removed quickly from the wort and subsequently cooled dawn to 20°C prior to the fermentation step. Each wort was analyzed of FAN and free valine content.

4. Fermentation procedure

The yeast density was approximately 1.5 x 10^6cell/mL/°B in each flask of 100 mL of each 12°B wort for bottom fermentation at 10°C for 13 days without shaking until no noticeable changes in total soluble solid (Brix) were recorded. During this fermentation, every day until the end of fermentation, a 100 mL sample was taken from the flask (150 mL) to measure yeast growth, and then separated using a centrifuge (Centrifuge 5804R, Germany) at 4°C, 4000 rpm and held for 10 min. The supernatants were tested other quality control parameters such as total soluble solid, pH, ethanol, FAN, free valine, and diacetyl content. The fermentation batches and measurements were done in triplicate.

5. Free valine analysis in wort and beer using an amino acid analyzer

Each wort before fermentation and at the end of fermentation (green beer) were analyzed the free valine content using an amino acid analyzer (Biochrom 30+, USA) with a column of oxidized high-performance type sodium and single flow cell with optical beam splitter with detection at 440 nm and 570 nm at the Central Lab Thai laboratory, Thailand. For reference, the in-house method based on the Official Journal of European communities, L257/16 was applied.

6. Total soluble solids (TSS), pH, ethanol content, yeast viability, and specific growth rate

The total soluble solid of worts was determined using a refractometer (Master-M, ATAGO manual, Japan) as followed Choi et al. (2015). The pH was measured using a pH/reference electrode system (Medina et al., 2012). All four green beers were analyzed for their ethanol content (%) using gas chromatography with a flame ionization detector (GC-FID), Agilent 78908, USA, with an autosampler following the European Brewing Convention Method 9.2.4 (EBC) (Rio et al., 1995). Yeast cells were analyzed each day of fermentation with a hemocytometer and microscopy (model CH30RF 200, Japan) (Choi et al., 2015). And the specific growth rate was determined using the correlation of yeast growth within one days of fermentation.

7. Free amino nitrogen (FAN) analysis

FAN content was analyzed in wort and beer using the Ninhidrin method (Choi et al., 2015). An average reading was based on each set of triplicates. The FAN was determined as:

$$FAN = \frac{(A_{570} - A_{blank}) \times 2 \times dilution}{(A_{st} - A_{blank})}$$

where: FAN was free amino nitrogen (mg/L), A_{570} is the λ absorbance solution of the sample, A_{blank} is the λ absorbance of the blank and A_{st} is the λ absorbance of the standard.

8. Diacetyl analysis

Diacetyl compounds were analyzed using headspace solid-phase micro-extraction gas chromatography of electron capture detector (HS-SPME-GC-ECD, Agilent 78908, USA) following the method of European Brewing Convention (EBC 9.24.2) (Pacheco et al., 2010). The result was calculated using the standard curve of the external standard 2,3-butanedione.

Thus, slope = F_d (factor for diacetyl)

$C_{diacetyl}$ (mg/L) = RPA_d * F_d

where: RPA_d was relative peak area, F_d was factor for diacetyl, $C_{diacetyl}$ was diacetyl concentration (mg/L)

9. Statistical analysis

The statistical analyses and completely randomized design were analyzed using the SPSS program (version 20.0; License Authorization Wizard; Statsoft Inc., Tulsa, OK, USA).

RESULTS AND DISCUSSION

1. Profitability of raw materials of brewing

Proximate composition of all materials of beer (malts, rice, DSB, and DSF) were determined to signify their suitability for beer brewing. The summary results were illustrated in Table 2. Two kinds of malts (BM and CM) and rice KDML105 contained among 13% and 10.73% of crude protein while 60.72% and 40.54% of defatted soybean seed (DSB) and defatted sunflower seed (DSF) contained higher, as respectively. The rich protein content in DSB and DSF could justify their utilization as a novel ingredient in nutritional food preparations (Gorinstein et al., 1999). Furthermore, valine content was also higher in DSB and DSF than that found in BM, CM, and KDML105. The moisture content, total ash content, and crude fat content of each raw material were in the same range reported by Goode and Arendt (2006), Aleem et al. (2012) and Gandhi et al. (2008).

Table 2 Chemical composition of main ingredient for wort preparation

Raw materials	Mass percentage (%,w/w)				
	Moisture	Ash	Crude fat	Crude protein	Valine
BM	7.75±0.31[a]	1.71 ±0.01[b]	1.54 ±0.02[d]	12.95 ±0.22[b]	0.38± 0.02[b]
CM	10.26 ±0.0[c]	1.81±0.01[c]	1.69 ±0.01[e]	13.44 ±0.88[b]	0.40± 0.01[b]
KDML105	11.98 ±0.01[e]	0.31 ±0.00[a]	0.27 ±0.01[a]	10.73±0.53[a]	0.27± 0.04[a]
DSB	11.18 ±0.02[d]	6.00 ±0.01[d]	0.33 ±0.01[b]	60.72 ±0.48[d]	1.67± 0.05[d]
DSF	9.93 ±0.03[b]	5.96 ±0.05[d]	1.12±0.01[c]	40.54 ±1.19[c]	1.04± 0.07[c]

2. Wort composition including valine content and free amino nitrogen (FAN) content

In each wort sample after boiling was determined free valine and FAN content using the amino acid analyzer and the color reaction method, respectively. The results indicated that SVW supplied more valine (463.20 mg/L) than the other worts CW, DSBW, and DSFW (113.90 mg/L, 109.00 mg/L, and 115.70 mg/L respectively) as shown in Table 3. Moreover, the FAN was also correlated with the valine content since the FAN content rin SVW (176.712 mg/L) being higher than found in CW (146.451 mg/L), DSBW (139.896 mg/L), and DSFW (154.426 mg/L). Boulton (2006) found that the minimal FAN content to achieve satisfactory yeast growth was130 mg/L, and rapid total soluble solid results in a higher alcohol contents (FAN 170-190 mg/L). Thus, after mashing to get sweet wort, each wort valine supplementation contained sufficient FAN for fermentation. Otherwise, DSB and DSF were also two natural defatted valine sources whose critical structure made them hard to be degraded. However, the valine and FAN contents of worts were noted and discussed later.

Table 3 Valine and FAN contents in worts

Type of worts	Valine content (mg/L)	FAN content (mg/L)
CW (control)	113.90 ±10.30[a]	146.451±6.29[a]
SVW	463.20 ±47.40[b]	176.712 ±15.61[b]
DSBW	109.00 ±16.30[a]	139.896 ±1.60[a]
DSFW	115.70 ±24.55[a]	154.424 ±8.2[a]

[a-b] Means within the same column followed by different letters were significantly different ($p \leq 0.05$)

3. Quality profile of beer fermentation (total soluble solids, pH, alcohol content, and specific growth rate and yeast growth)

Quality profile of beer production was remained checking every day during fermentation. The total soluble solids (Figure 1) remained stable for around 10-13 days of fermentation, 6.5°B. The stable sugar content for 72 hrs indicated the end of fermentation (Agu, 2002; Krogerus and Gibson, 2013). The results of pH, ethanol, and specific growth rate shown in Table 4 were indicated that each fermentation occurred without any contamination when the pH of fermentation contained 4-5.3 during fermentation (Agu, 2002; Krogerus and Gibson, 2013). The high yield of ethanol was not significantly higher in the each green beer of SVW, CW, DSBW, and DSFW. The result of yeast strain growth was demonstrated that being higher and faster in soybean (DSBW) and sunflower (DSFW) wort and slower in the control and SVW (Figure 2). The ability of yeast growth during fermentation was noted by specific growth rate which was not significantly higher for DSBW (0.47 h^{-1}) than DSFW (0.36 h^{-1}), SVW (0.34 h^{-1}), and the control (0.33 h^{-1}), respectively (Table 4). Commonly, yeast viability was depended on wort composition including higher free amino nitrogen, and other amino acid profile which all could support cell multiplication and hence beer quality will be stable (Lei et al., 2013; Lekkas, 2010).

Table 4 pH and ethanol of green beer and specific growth rate.

Type of worts	pH of beer	Ethanol content (%,v/v)	Specific growth rate (h^{-1})
CW (control)	4.20 ± 0.04[a]	3.857 ± 0.28[a]	0.33 ± 0.07[a]
SVW	4.20 ± 0.04[a]	4.407 ± 0.43[a]	0.34 ± 0.12[a]
DSBW	4.54 ± 0.02[b]	4.061 ± 0.14[a]	0.47 ± 0.02[a]
DSFW	4.41 ± 0.05[b]	4.173 ± 0.13[a]	0.36 ± 0.04[a]

[a-b] Means within the same column followed by different letters were significantly different ($p \leq 0.05$)

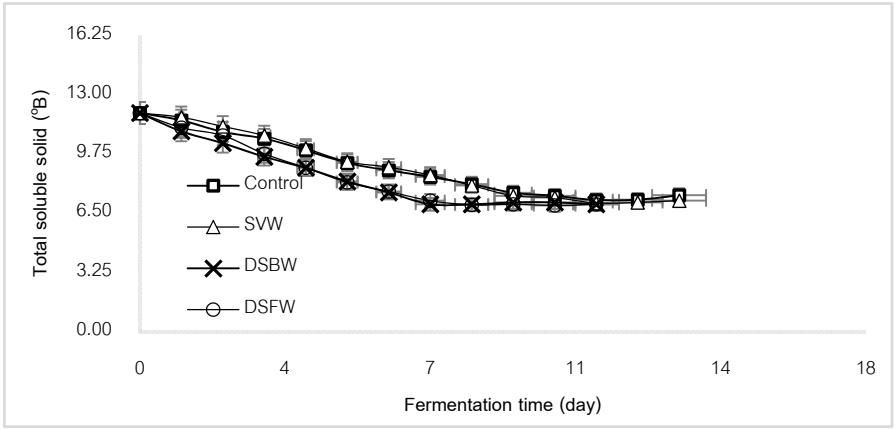


Figure 1 Total soluble solid content for each valine supplementation and the control as a function of fermentation time. Values were means and standard deviation from three independent fermentations.

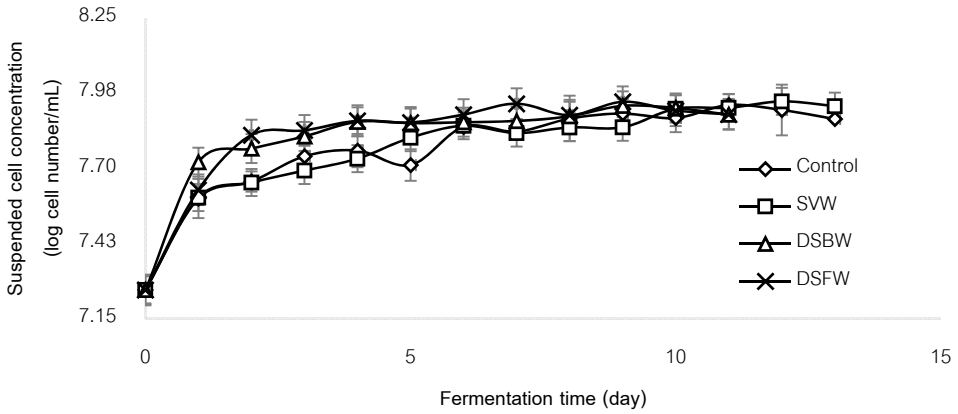


Figure 2 Suspended cell number counted in worts as a function of fermentation time. Values were means and standard deviation from three independent fermentations.

4. Interaction of free valine, FAN consumption, and diacetyl reduction in green beer

At the end of beer fermentation, the results for yeast utilization of the valine and the FAN content were shown in Table 5. While the valine consumption was highest for SVW, there were no significant differences in FAN consumption among the samples with valine supplementation (SVW, DSBW, and DSFW) and the control (CW). Importantly, the result of diacetyl (butterscotch like) reduction was summarized in Table 5 and showed that SVW reduced the diacetyl concentration to 0.722 mg/L which was lower than those found in the other natural valine supplementations of DSBW (2.086 mg/L) and DSFW (2.219 mg/L), and the control CW (1.925 mg/L). These indicated that standard valine was utilized by yeast and could suppress the diacetyl synthesis pathway. Whereas the FAN concentration in wort and FAN consumption reported in this research were not significant reduction of diacetyl. Therefore, valine was the main amino acid controlled the diacetyl content in finish product whereas free amino nitrogen played important role for yeast growth and metabolism. This result was consistent with Krogerus and Gibson (2013) who reported that 300 mg/L of valine synthesis supplied in wort could decrease the diacetyl content. Furthermore, other amino acids or branched-chain amino acids can indirectly affect diacetyl production (Barton and Slaughter, 1992; Krogerus and Gibson, 2013).

Table 5 The content of valine and FAN consumption and diacetyl concentration in green beer

Sample	Valine consumption (mg/L)	FAN consumption (mg/L)	Diacetyl (mg/L)
Control	65.20 ±10.30[a]	88.022±8.36[a]	1.925 ± 0.09[b]
SVW	221.10 ±47.40[b]	85.975±9.31[a]	0.722± 0.29[a]
DSBW	92.70±16.30[a]	90.998±7.02[a]	2.086 ± 0.60[b]
DSFW	71.95±24.55[a]	94.717±8.93[a]	2.219 ± 0.22[b]

[a-b] Means within the same column followed by different letters were significantly different ($p \leq 0.05$)

CONCLUSIONS

Valine supplementation in wort could directly reduce diacetyl production in the beer fermentation using synthesis valine among 300 mg/L. However, natural valine sources, DSB and DSF had high amount of amino acid valine (1.674 g valine/100 g dried weight and 1.044 g valine/100 g dried weight, respectively), these two natural valine sources were critically utilized and liberated additional valine for yeast metabolism. Thus a suggestion for future work is to use another enzymes to catalyze all the proteins of DSB and DSF to supply more valine and FAN into the wort. Moreover, even though the amounts of diacetyl in the green beers were higher than the threshold concentration found in lager beer (0.1 mg/L), all sample must be further maturated to minimize the off-flavor compounds and improve the taste quality before sale.

ACKNOWLEDGMENT

The authors acknowledge funding support from an Agro-Industrial Research Grant 2015, from Research Institute of Kasetsart University (KURDI) Grant no. 55.59 and from the Graduate School, Kasetsart University, Bangkok, Thailand through a scholarship.

REFERENCES

Agu, R. 2002. A comparison of maize, sorghum and barley as brewing adjuncts. **Journal of the Institute of Brewing**. 108(1): 19-22.

Aleem, Z., T. Genitha and S.I. Hashmi. 2012. Effects of defatted soy flour incorporation on physical, sensorial and nutritional properties of biscuits. **Journal of Food Processing and Technology**. 3(4):

Barton, S. and J. Slaughter. 1992. Amino acids and vicinal diketone concentration during fermentation. **Technical quarterly Master Brewers Association of the Americas**.

Boulton, C. 2006. Fermentation of beer, p. 228-253. *In*, eds. **Brewing: New technologies**. Elsevier.

Ceppi, E. and O. Brenna. 2010. Brewing with rice malt a gluten-free alternative. **Journal of the Institute of Brewing**. 116(3):

Choi, E.J., H.W. Ahn and W.J. Kim. 2015. Effect of **α**-acetolactate decarboxylase on diacetyl content of beer. **Food Science and Biotechnology**. 24(4): 1373-1380.

Clark, S. and C.K. Winter. 2015. Diacetyl in foods: A review of safety and sensory characteristics. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**. 14(5): 634-643.

Gandhi, A., K. Jha and V. Gupta. 2008. Studies on the production of defatted sunflower meal with low polyphenol and phytate contents and its nutritional profile. **Asean Food Journal**. 15(1): 97-100.

Gandhi, A.P. and J. Srivastava. 2007. Studies on the production of protein isolates from defatted sesame seed (sesamum indicum) flour and their nutritional profile. **Asean Food Journal**. 14(3): 175-180.

Goode, D. and E. Arendt. 2006. Developments in the supply of adjunct materials for brewing, p. 30-67. *In*, eds. **Brewing: New technologies**. Elsevier.

Gorinstein, S., M. Zemser, F. Vargas-Albores, J. Ochoa, O. Paredes-Lopez, C. Scheler, J. Salnikow, O. Martin-Belloso and S. Trakhtenberg. 1999. Proteins and amino acids in beers, their contents and relationships with other analytical data. **Food Chemistry**. 67(1): 71-78.

Krogerus, K. and B.R. Gibson. 2013. Influence of valine and other amino acids on total diacetyl and 2,3-pentanedione levels during fermentation of brewer's wort. **Applied Microbiology and Biotechnology**. 97(15): 6919-6930.

Lei, H., L. Zheng, C. Wang, H. Zhao and M. Zhao. 2013. Effects of worts treated with proteases on the assimilation of free amino acids and fermentation performance of lager yeast. **International Journal of Food Microbiology**. 161(2): 76-83.

Lekkas, C. 2010. **Metabolism of nitrogenous wort components by brewers' yeast**. Heriot-Watt University.

Medina, V., Oscar J, C. Pardo , Oscar H and C.A. Ortiz. 2012. Modified arracacha starch films characterization and its potential utilization as food packaging. **Vitae**. 19(2): 186-196.

Pacheco, J.G., I.M. Valente, L.M. Gonçalves, P.J. Magalhães, J.A. Rodrigues and A.A. Barros. 2010. Development of a membraneless extraction module for the extraction of volatile compounds: Application in the chromatographic analysis of vicinal diketones in beer. **Talanta**. 81(1-2): 372-376.

Pliansrithong, P., U. Usansa and C. Wanapu. 2013. Increasing of nitrogenous substances in wort by using commercial enzymes and modifying mashing method. **International Journal of Bioscience, Biochemistry and Bioinformatics**. 3(4): 404.

Rio, C.D., C. Prada and F.J. Alvarez. 1995. Beverage effects on patterns of alcohol consumption. **Alcoholism: clinical and experimental research**. 19(6): 1583-1586.

Shi, T.-T., X.-W. Guo, P. Li, Z. Zhou and D.-G. Xiao. 2015. Diacetyl content reduction in industrial brewer's yeast through ilv2 disruption and bdh1 expression. **European Food Research and Technology**. 242(6): 919-926.

Yamauchi, Y., T. Okamoto, H. Murayama, K. Kajino, A. Nagara and K. Noguchi. 1995. Rapid maturation of beer using an immobilized yeast bioreactor. 2. Balance of total diacetyl reduction and regeneration. **Journal of Bacteriology**. 38(2): 109-116.

Effect of Rice Bran Wax Oleogel as Fat Replacement on Cake Quality

Thipsuda Suvannan[1] and Masubon Thongngam[1*]

ABSTRACT

In cake, solid fat content in baking fat plays an important role in air formation and stabilization, which provides good texture quality. Rice bran wax (RBW), a by-product of rice bran oil production, was used in this study to produce oleogel. The objective of this study was to investigate the effect of fat types including margarine, shortening, oleogel and rice bran oil; and the effect of RBW concentrations (1.0, 2.5, 5.0 and 7.5%) in RBW-RBO oleogel to replace margarine in cake without the addition of emulsifier. The results showed that the viscosity and specific gravity of batters made with margarine and shortening were not significantly different ($p>0.05$) but were higher than those of batters made with oleogel and rice bran oil. The cake crumb of margarine and shortening cakes had compact and dense structure with low specific volume and cake height. On the other hand, the cake crumb of oleogel and rice bran oil cake had a coarse crumb structure with the higher specific volume and cake height. For the textural property, the cake made with shortening had the highest firmness (N) and chewiness ($p\leq0.05$), followed by margarine, oleogel and rice bran oil respectively. In addition, the results showed that the viscosity of RBW-RBO oleogel batter increased with the increase of RBW concentrations, but the specific volume and cake height were not significantly different ($p>0.05$). The firmness (N) and chewiness of oleogel cakes were significantly increased ($p\leq0.05$) while the springiness and cohesiveness decreased ($p\leq0.05$) with the increase of RBW concentrations. This results suggested that RBW-RBO oleogel can replace baking fat in cake without the addition of emulsifier to improve the volume and soften the texture of cake.

Key Words: rice bran wax, rice bran oil, oleogel, cake, margarine, shortening

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

[1]Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

INTRODUCTION

Nowadays, many researches were investigated on the alternative strategy for structuring edible liquid oils into semi-solid fats called oleogelation to replace saturated and *trans*-fat in food products (Kim *et al*., 2017; Patel *et al*., 2014; Pandolsook and Kupongsak, 2017; Limpimwong, 2018). Wax based oleogels have potential to be the structural fat for margarine or shortening replacement in bakery products because of its good functional properties, for example, low cost and low critical gelling concentration (0.5% w/w) (Dassanayake *et al*., 2011). Wax type is one of the key factors to provide desirable properties of food applications such as aeration, spreadability, texture and mouthfeel (Patel *et al*., 2014; Doan *et al*., 2018).

Rice bran wax (RBW) is a by-product of rice bran oil production. It mainly consists of wax ester of long chain fatty acids esterified to fatty alcohols and has high melting point, around 78 to 82°C (Dassanayake *et al*., 2011). RBW is a high efficiency gelator to form oleogel with long needle-like shape and β' polymorph fat crystals (Pandolsook and Kupongsak, 2017; Limpimwong, 2018). In cake, fat crystal in shortening plays an important role in air formation and stabilization, which provides good texture quality (Wilderjans *et al*., 2013). The β' polymorph and needle-like shape crystal is the best form of fat for cake since it could absorbed onto the air-water interface and prevent the coalescence of air bubbles in batter, leading to the increase of batter stability and the greater volume (Brooke, 1993). Moreover, Limpimwong (2018) found that RBW-RBO oleogels could replace margarine in a batter-type cake and also improve the cake quality including specific volume and soften crumb texture. In this research, it was aimed to study the effect of fat types (varying in solid fat content) and fat (RBW) crystals (varying rice bran wax concentrations in oleogel) on the cake quality without the addition of emulsifier.

MATERIALS AND METHODS

Oleogel preparation

RBW-RBO oleogel was prepared by varying the RBW concentrations (1.0, 2.5, 5.0 and 7.5%) to RBO and heating to 90-100°C for 30 min to melt all fat crystals. Then, the mixture was cooled to 25°C using circulating water bath and stored overnight at 25°C before used (Limpimwong, 2018).

Cake production

The control formulation of cake consisted of wheat flour, sugar, whole egg, water, margarine, milk powder and salt. The batter was prepared by a single stage mixing using a cake mixer (KitchenAid model K5SS, USA). Then the batter was filled into a Cream Whipper (Mosa, Taiwan) and shaken well (Jongsutjarittam and Charoenrein, 2013) prior to place in a fat coated pan and bake in an electric oven at 170°C for 40 min. After baking, the cake was removed from the pan and cooled at the

room temperature for an hour. For the used amount of RBW-RBO oleogel, rice bran oil and shortening was calculated to have the equal amount of fat and salt to the margarine (consisting of 82%fat and 1.7%salt) used in the recipe.

Cake Batter property

The specific gravity of cake batter was determined.

The batter viscosity was measured by a HBDVII+ viscometer (Brookfield Eng Labs Inc., MA, USA) equipped with spindle No.21 revolving at 100 rpm for 30 s (Jongsutjarittam and Charoenrein, 2013).

Cake property

Cake volume was measured by sesame seed replacement and the specific volume was calculated as the ratio of the cake volume to its mass (Limpimwong, 2018).

The cake height was measured at three different locations and calculated average height.

The color of cake crumb was measured by colorimeter (Ultra Scan Pro, Hunter Lab, USA) in L*, a* and b* values of the CIE system.

The textural property of cakes was determined by the texture analyzer (TA-XT plus, Stable Micro System, Surrey, UK) equipped with a 100 mm probe (P100) according to the texture profile analysis (TPA) procedure. The samples were cut into 20mm x 20mm x 20mm and compressed 50% of cake height with pre-test speed 1 mm s^{-1}; test speed 2 mm s^{-1}; post-test speed 2 mm s^{-1}; trigger type auto 10g and time 10s (Kim *et al*, 2017)

Statistical analysis

Batter and cake characteristic were statistically analyzed using SPSS software (version 17.0, SPSS Inc., IL, USA). Analysis of variance (ANOVA) was carried out and followed by Duncan's multiple range test with significance at $p \leq 0.05$.

RESULTS AND DISCUSSION

The effect of fat types on quality of cake without emulsifier

The solid fat contents in baking fats plays an important role for air incorporation in cake batter during mixing and can stabilize the air bubbles from coalescence led to the improvement of the cake volume (Brooke, 1993; Wilderjans *et al*., 2013). The fat crystal network in oleogel could provide desirable properties of food applications such as aeration, spreadability, texture and mouthfeel (Patel *et al*., 2014). Therefore, the study of fat types with different solid fat content, including margarine, shortening, 5%RBW-RBO oleogel and rice bran oil was carried out. In order to compare the effect of solid fat content on the air incorporation, the emulsifier was omitted from the cake formula.

Table 1 Effect of fat types on batter and cake characteristics.

Fat types	Batter		Cake				
	Viscosity (Pa.s)	Specific gravity (g/cm^3)	Specific volume (cm^3/g)	Height (cm)	Color parameters		
					L*	a*	b*
Margarine	2.97±0.02^{a}	0.79±0.03^{a}	2.03±0.04^{c}	5.22±0.32^{bc}	65.98±0.55^{b}	4.17±0.22^{a}	35.57±0.56^{a}
Shortening	2.96±0.02^{a}	0.76±0.00^{b}	2.02±0.02^{c}	4.87±0.46^{c}	67.16±1.12^{a}	3.09±0.63^{b}	28.69±0.56^{c}
Oleogel	1.75±0.07^{c}	0.52±0.03^{d}	2.20±0.06^{b}	5.57±0.23^{b}	65.83±0.62^{b}	4.14±0.76^{a}	30.31±0.68^{b}
RBO*	1.85±0.03^{b}	0.62±0.01^{c}	2.55±0.05^{a}	6.13±0.20^{a}	66.31±0.47^{b}	2.14±0.24^{c}	27.22±1.76^{d}

Mean values with different superscripts within the same column are significantly different ($p \leq 0.05$)

* RBO: Rice Bran Oil

Batter viscosity and specific gravity are parameter relating to the incorporation and stabilization of air bubbles in cake batter, consequently affecting the volume and texture of final products. From Table1, when compare the viscosity and specific gravity of batters made with different types of fat, the result showed that the viscosity and specific gravity of batters made with margarine and shortening were not significantly different; while those of batters made with oleogel and RBO were slightly different. The results indicated that cake made with 5%RBW oleogel has greater air stabilization effect in the batter, resulting in high specific volume and cake height when compared with margarine and shortening (Table 1). The specific gravity of batter made from margarine and shortening was similar to other research, which has the batter specific gravity around 0.80-0.85 g/cm^3 (Stauffer, 1996). However, the specific gravity of batter made from rice bran oil and oleogel was lowered, might be due to the fact that at the mixing temperature, the viscosity of batter made from RBO and oleogel was lower than that of batter made from margarine and shortening led to the ease of air incorporation.

After baking, the appearance of cake and cake characteristics were presented in Figure1 and Table1. The appearance of cake crumbs made with different fat types were presented in Figure 1. It showed that cakes made with margarine and shortening looked similar, but cakes made with 5%RBW oleogel and rice bran oil were similar. Due to the higher air incorporation, the specific volume and cake height of cake made with oleogel and RBO were higher than those of cake made with margarine and shortening. From Figure1, the crumb structure of cake made with margarine and shortening appeared denser than that of cake made with oleogel and RBO. Margarine and shortening cakes had high solid fat content led to dense adsorbed at air-water interface caused compact and dense structure (Figure 1). On the other hand, cake made with rice bran oil has the highest specific volume and cake height because the oil droplet could be distributed thoroughly in the batter and might help stabilizing air bubble in the batter (Brooker, 1993; Patel *et al*., 2014), resulting in a high distribution of air cells in crumb structure (Figure 1).

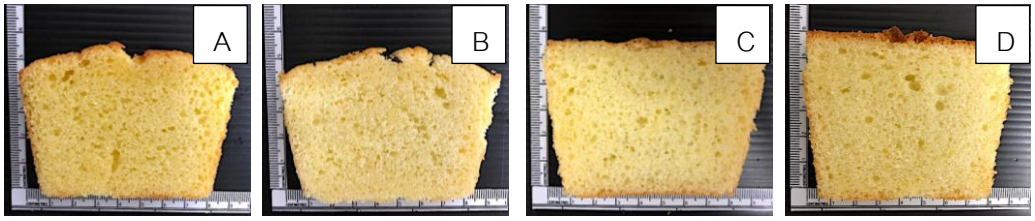


Figure 1 The appearance of cake made from margarine (A), shortening (B), 5%RBW-RBO oleogel (C) and rice bran oil (D).

For the crumb color (Table 1), the results showed that L* (lightness), a* (redness) and b* (yellowness) values of cake crumb were slightly different when cake made with different fat types. As a result, it could suggest that the color of cake crumb maybe affected by the natural color of fat (Patel *et al*., 2014).

The textural property of cakes was presented in Table 2. The cake made with shortening gave cake with the highest firmness and chewiness, followed by margarine, oleogel and rice bran oil respectively. The results indicated that a cake had firmer texture when made with shortening and margarine due to the low volume and dense structure of cake; while had softer texture when made with oleogel and rice bran oil (Table 1). But cake made with rice bran oil had the highest cohesiveness value.

Table 2 Effect of fat types on texture parameters of cakes

Fat types	Firmness (N)	Chewiness	Adhesiveness	Springiness	Cohesiveness
Margarine	8.54±0.98^{b}	5.07±0.56^{b}	-0.52±0.45^{a}	0.94±0.01^{c}	0.63±0.01^{c}
Shortening	10.20±0.93^{a}	5.61±0.46^{a}	-0.21±0.53^{ab}	0.92±0.01^{d}	0.60±0.02^{d}
5%RBW oleogel	4.18±0.36^{c}	2.97±0.24^{c}	-0.35±0.68^{b}	0.98±0.01^{b}	0.73±0.01^{b}
Rice bran oil	4.10±0.43^{c}	3.05±0.29^{c}	-0.26±0.43^{ab}	0.99±0.01^{a}	0.75±0.01^{a}

Mean values with different superscripts within the same column are significantly different ($p \leq 0.05$)

The effect of RBW concentrations in oleogel on cake quality without emulsifier

The appearance of RBW-RBO oleogel was showed in Figure 2. The oleogel has light yellow compared to margarine; moreover, the hardness of oleogel was increased with the increase of RBW concentrations.

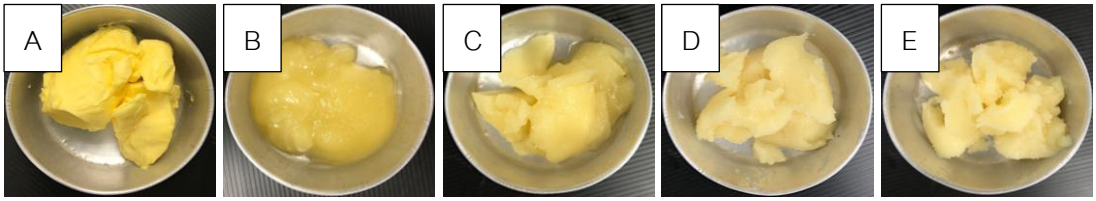


Figure 2 The appearance of (A) margarine and (B-E) RBW-RBO oleogel at 1.0, 2.5, 5.0 and 7.5%RBW.

The viscosity of batter is a factor for controlling the incorporation and stabilization of air bubbles in cake batter, consequently affecting the volume and texture of final products. The higher viscosity could incorporate and stabilize more air bubbles in the batter led to the lower specific gravity, a factor related to the amount of air in the batter (Patel *et al*., 2014; Kim *et al*., 2017). As shown in Table 3, the RBW-RBO oleogel batter had higher batter viscosity and lower specific gravity when compared with margarine batter.

Table 3 Effect of RBW concentrations in RBO oleogels on batter and cake characteristics.

%RBW in oleogel	Batter		Cake				
	Viscosity (Pa.s)	Specific gravity (g/cm^3)	Specific volume (cm^3/g)	Height (cm)	Color parameters		
					L^{*ns}	a*	b*
Control (MG)	2.99±0.01^{a}	0.73±0.01^{a}	2.16±0.02^{d}	4.73±0.67^{b}	65.53±0.69	4.76±0.32^{a}	32.71±0.97^{a}
1.0%RBW	1.55±0.00^{e}	0.55±0.01^{b}	2.41±0.06^{a}	5.87±0.37^{a}	65.47±0.51	3.82±1.14^{bc}	28.13±1.52^{b}
2.5%RBW	1.63±0.01^{d}	0.55±0.01^{b}	2.39±0.07^{ab}	5.75±0.19^{a}	65.75±0.76	3.70±0.38^{bc}	28.20±0.75^{b}
5.0%RBW	1.73±0.00^{c}	0.55±0.01^{b}	2.34±0.06^{bc}	5.70±0.24^{a}	65.48±0.87	4.14±0.77^{b}	28.66±1.22^{b}
7.5%RBW	1.86±0.01^{b}	0.55±0.00^{b}	2.31±0.05^{c}	5.58±0.21^{a}	65.94±0.38	3.33±0.26^{c}	27.82±0.68^{b}

Mean values with different superscripts within the same column are significantly different ($p \leq 0.05$)
ns means not significance

In figure 3, cakes made from RBW-RBO oleogel have flat top with the higher height and coarser grain than cake made from margarine. This might be due to the fact that the RBW-RBO oleogel also help stabilizing air bubble caused the higher volume and cake height (Table 3 and Figure 3). However, the effect of RBW concentration on batter viscosity and cake specific volume was not significantly different as shown in Table 3. The result also showed that the crumb color was different ($p \leq 0.05$) between margarine cake and oleogel cake but was not significantly different among oleogel cake.

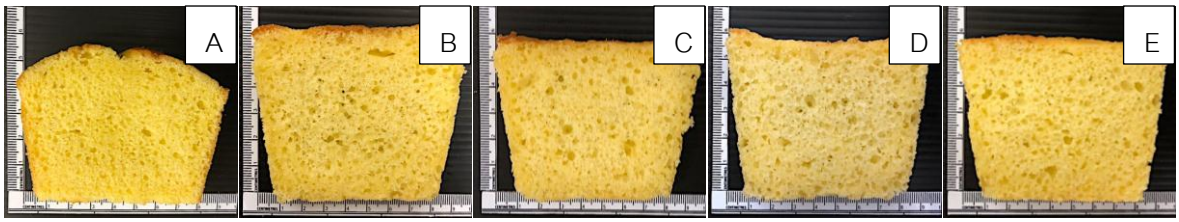


Figure 3 The appearance of cake crumbs made from margarine (A) and RBW-RBO oleogel at 1.0 (B), 2.5 (C), 5.0 (D) and 7.5 (E)%RBW.

The texture properties of cakes were presented in Table 4. The RBW-RBO oleogel had significantly lower ($p \leq 0.05$) the firmness and chewiness values but higher the springiness and cohesiveness values when compared with the margarine cake. As compare the effect of RBW concentrations, the results showed that the firmness and chewiness of oleogel cake increased with the increase of RBW concentration (Table 4).

Table 4 Effect of RBW concentrations in RBW-RBO oleogel on texture parameters of cakes

%RBW in oleogel	Firmness (N)	Chewiness	Adhesiveness^{ns}	Springiness	Cohesiveness
Control (MG)	7.25 ±0.85^{a}	4.35±0.40^{a}	-0.38±0.62	0.94±0.01^{c}	0.64±0.02^{d}
1.0%RBW	3.10±0.50^{d}	2.27±0.39^{c}	-0.15±0.43	0.99±0.01^{a}	0.74±0.02^{a}
2.5%RBW	3.37±0.49^{cd}	2.43±0.36^{c}	-0.07±0.18	0.98±0.01^{ab}	0.73±0.01^{ab}
5.0%RBW	3.62±0.47^{c}	2.55±0.37^{c}	-0.28±0.56	0.97±0.01^{b}	0.72±0.01^{b}
7.5%RBW	4.44±0.47^{b}	3.08±0.35^{b}	-0.31±0.59	0.98±0.01^{b}	0.71±0.01^{c}

Mean values with different superscripts within the same column are significantly different ($p \leq 0.05$)

ns means not significance

CONCLUSION

The fat types had a significant effect on viscosity, specific gravity, volume and textural properties of cakes because it contains different solid fat content. When cake made with fat which high solid fat content, it had more compact and dense structure with low volume like margarine or shortening; while cake made with low solid fat content, it had coarse crumb structure with the higher volume like oleogel or rice bran oil. Thus, the solid fat content is the important factor to control the air incorporation, volume and texture of final products. The RBW-RBO oleogel cake have flat top with the higher height, coarser grain and softer texture when compare with margarine cake. However, RBW concentrations in oleogel was slightly effect on batter and cake characteristics. It was found that the RBW-RBO oleogel has a potential application as a semi-solid fat replacer in cake without the addition of emulsifier.

REFERENCE

Brooker, B.E. 1993. The stabilisation of air in foods containing fat - a review. **Food Structure**. 12: 115-122.

Doan, C.D., I. Tavernier, P.K. Okuro and K. Dewettinck. 2018. Internal and external factors affecting the crystallization, gelation and applicability of wax-based oleogels in food industry. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**. 45: 42-52.

Dassanayake, L.S.K., D.R. Kodali, S. Ueno and K. Sato. 2011. Chapter 7 Physical properties of organogels made of rice bran wax and vegetable oils, pp. 149-172. *In* A.G. Marangoni and N. Garti, ed. **Edible Oleogels: Structure and Health Implications**. AOCS Press.

Kim, J.Y., J. Lim, J. Lee, H. Hwang and S. Lee. 2017. Utilization of oleogels as a replacement for solid fat in aerated baked goods: physicochemical, rheological, and tomographic characterization. **Journal of Food Science**. 82(2): 445-452.

Limpimwong, W. 2018. **Rice bran wax oleogel: its characteristics, application and lipid digestibility.** M.E. Thesis, Kasetsart University.

Pandolsook, S. and S. Kupongsak. 2017. Influence of bleached rice bran wax on the physicochemical properties of organogels and water-in-oil emulsions. **Journal of Food Engineering**. 214: 182-192.

Patel, A.R., P.S. Rajarethinem, A. Gredowska, O. Turhan, A. Lesaffer, W.H. De Vos, D. Van de Walle and K. Dewettinck. 2014. Edible applications of shellac oleogels: spreads, chocolate paste and cakes. **Food & function**. 5(4): 645-652.

Stauffer, C.E. (1996). Chapter 5 Bakery product applications, pp. 66-69. *In* C.E. Stauffer, ed. **Fats and Oils.** Eagan Press.

Wilderjans E., A. Luyts, K. Brijs and J.A. Delcour. 2013. Ingredient functionality in batter type cake making. **Trends in Food Science & Technology.** 30: 6-15.

การทดแทนแป้งสาลีด้วยผงฟักทองญี่ปุ่นต่อสมบัติทางกายภาพและเคมีของขนมปัง

Substitution of Wheat Flour with Japanese Pumpkin Powder on Physical and Chemical Properties of Bread

ธิดารัตน์ หน่อสุวรรณ[1*] จุรารัตน์ ธรรมศรี[1] ธนพร แซ่ลิ้ว[1] และ กัญจน์พัชร์ อุปลศิลป์[1]

Tidarat Norsuwan[1*], Jurarat Thammasri[1], Thanaporn Saelil[1] and Kanjapach Upalasin[1]

บทคัดย่อ

การทดแทนแป้งสาลีด้วยผงฟักทองญี่ปุ่นต่อสมบัติทางกายภาพและเคมีของขนมปัง โดยแปรผันอัตราส่วนระหว่างแป้งสาลีและผงฟักทองญี่ปุ่น เท่ากับ 100:0, 90:10, 80:20 และ 70:30 ตามลำดับ พบว่าขนมปังที่มีการทดแทนแป้งสาลีด้วยผงฟักทองญี่ปุ่นมากขึ้น ค่าการต้านแรงกดของโดและค่าความแข็งของขนมปังเพิ่มขึ้น แต่ค่าความยืดหยุ่นของขนมปังลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) นอกจากนี้ ค่าสีเหลือง (b*) ค่าเส้นใยอย่างหยาบ (%) และค่าเถ้า (%) ของขนมปังที่มีการทดแทนแป้งสาลีด้วยผงฟักทองญี่ปุ่นมากขึ้น มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) อย่างไรก็ตาม ค่าปริมาณโปรตีนและไขมันของขนมปังมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ABSTRACT

The substitution of wheat flour with Japanese pumpkin powder on physical and chemical properties of bread. The wheat flour to Japanese pumpkin powder ratios were 100:0, 90:10, 80:20 and 70:30 respectively. It was found that the increasing of Japanese pumpkin powder ratio in the wheat flour substituted bread, the compression resistance of dough and the hardness (N) of bread were significantly increased ($p \leq 0.05$), but the springiness (N) of bread was significantly decreased ($p \leq 0.05$). In addition, the yellowness (b*), crude fiber (%) and ash (%) of wheat flour substituted bread were significantly increased ($p \leq 0.05$). However, there were a significant decreasing ($p \leq 0.05$) in protein and fat contents of bread.

Key Words: substitution, wheat flour, Japanese pumpkin powder, bread

* 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

การบริโภคขนมปังในปัจจุบันมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่องในประเทศไทยเนื่องจากได้รับอิทธิพลมาจากวัฒนธรรมตะวันตกและการขยายตัวของสังคมเมืองซึ่งกระทบต่อพฤติกรรมการบริโภคของคนไทย ดังนั้นข้าวสาลีหรือแป้งสาลีจึงเป็นที่ต้องการสำหรับการผลิตขนมปัง และมีความจำเป็นต้องนำเข้าข้าวสาลีหรือแป้งสาลีจากต่างประเทศ เนื่องจากสภาวะทางภูมิประเทศและดินของประเทศไทยไม่เหมาะสมในการปลูก ทำให้ข้าวสาลีที่ปลูกในประเทศไทยนั้นให้ผลผลิตได้ไม่เพียงพอ และมีคุณภาพไม่เหมาะสมสำหรับใช้ทำขนมปัง (Wongsagonsup *et al.,* 2015) นอกจากนี้แป้งสาลียังเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตขนมปัง โดยในแป้งสาลีมีโปรตีนที่ชื่อว่า กลูเตน (Gluten) ซึ่งเป็นโปรตีนที่ทำให้เกิดโครงสร้างยืดหยุ่นที่ดี แต่สำหรับผู้บริโภคบางคนอาจเกิดอาการแพ้ได้ (See *et al*., 2007)

ฟักทองญี่ปุ่น (Kabocha or Japanese pumpkin) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ คือ *Cucurbita maxima* อยู่ในวงศ์ *Cucurbitaceae* เป็นผักที่บริโภคเพื่อการส่งเสริมสุขภาพ เนื่องจากฟักทองญี่ปุ่นอุดมไปด้วยวิตามินที่หลากหลาย และสารประกอบที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในปริมาณสูง ได้แก่ แคโรทีนอยด์ และสารประกอบฟีนอลิค ฟักทองญี่ปุ่นที่ปลูกในจังหวัดเชียงใหม่ ที่มีอายุการเก็บเกี่ยวผลผลิตที่ 50 วัน ซึ่งเป็นช่วงอายุการเจริญเติบโตที่เหมาะสม และมีคุณภาพเป็นที่ยอมรับของตลาดและผู้บริโภค ซึ่งจากงานวิจัยพบว่า ฟักทองญี่ปุ่นดังกล่าวมีปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมด สตาร์ช และเส้นใยอย่างหยาบ เท่ากับ 16.0-23.55 mg/g, 12.56-49.42 mg/100g และ 1.56-2.54% ตามลำดับ (Muenmanee *et al.,* 2016) นอกจากนี้แป้งฟักทอง (Pumpkin flour) ยังสามารถนำไปใช้เสริมร่วมกับแป้งธัญพืชในผลิตภัณฑ์ขนมอบ ซุป และบะหมี่กึ่งสำเร็จรูปเพื่อปรับปรุงคุณภาพด้านโภชนาการ ด้านกายภาพ และด้านประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ ซึ่งการทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งฟักทอง 5% ในขนมปัง ทำให้ปริมาตรขนมปังสูงขึ้นและค่าการยอมรับของผลิตภัณฑ์โดยรวมอยู่ในระดับดี (Wongsagonsup *et al.,* 2015) หรือการประเมินค่าทางประสาทสัมผัสของขนมปังที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยผงฟักทอง 5% มีค่าการยอมรับสูงที่สุดและไม่แตกต่างจากขนมปังสูตรไม่เติมผงฟักทอง (See *et al*., 2007)

กระบวนการผลิตฟักทองญี่ปุ่นตัดแต่งหรือการแปรรูปผลิตภัณฑ์จากฟักทองญี่ปุ่น มีวัตถุดิบเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตเป็นจำนวนมาก ซึ่งยังคงมีคุณค่าทางโภชนาการอยู่ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจศึกษาการเพิ่มมูลค่าให้กับเนื้อฟักทองญี่ปุ่นที่เป็นวัตถุดิบเหลือทิ้งจากกระบวนการตัดแต่งของฟักทองญี่ปุ่น โดยนำมาผลิตเป็นผงฟักทองญี่ปุ่น แล้วศึกษาสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของผงฟักทองญี่ปุ่น จากนั้นศึกษาการนำไปทดแทนแป้งสาลีในการผลิตขนมปัง ตลอดจนศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของขนมปังที่มีการทดแทนแป้งสาลีด้วยผงฟักทองญี่ปุ่น

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมผงฟักทองญี่ปุ่น

การเตรียมผงฟักทองญี่ปุ่น โดยนำเนื้อฟักทองญี่ปุ่นที่เป็นวัตถุดิบเหลือทิ้งจากกระบวนการตัดแต่งของฟักทองญี่ปุ่นระยะเก็บเกี่ยว 55-65 วัน มาหั่นให้เป็นชิ้นเล็กๆ ขนาดเท่ากัน แล้วนำไปลวกด้วยน้ำร้อน (อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที) จากนั้นทำให้เนื้อฟักทองญี่ปุ่นที่ผ่านการลวกเย็นลงด้วยน้ำอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 นาที ผึ่งให้แห้ง แล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 ชั่วโมง จากนั้นบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบดธัญพืชแล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาด 80 เมช (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 180 มิลลิเมตร)

บรรจุผงฟักทองญี่ปุ่นในถุงอลูมิเนียมฟอยด์ปิดสนิท เพื่อป้องกันการออกซิเดชันเนื่องจากแก๊สออกซิเจนในอากาศจนกระทั่งนำมาใช้ในการผลิตขนมปังและการวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของผลิตภัณฑ์

การเตรียมตัวอย่างขนมปัง

ขนมปังที่มีการทดแทนแป้งสาลีด้วยผงฟักทองญี่ปุ่น ที่อัตราส่วนระหว่างแป้งสาลีและผงฟักทองญี่ปุ่นเท่ากับ 100:0, 90:10, 80:20 และ 70:30 ตามลำดับ วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design : CRD) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ และเปรียบเทียบการวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพและเคมีของผลิตภัณฑ์ขนมปังด้วยวิธี Duncan 's New Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ผลการคำนวณทางสถิติ SPSS

การเตรียมขนมปังที่มีการทดแทนแป้งสาลีด้วยผงฟักทองญี่ปุ่น ดัดแปลงสูตรและวิธีการเตรียมจาก Sudipta and Soumitra (2015) และ วราภรณ์และเจิมสิริ (2551) สูตรพื้นฐานของขนมปังจืด (Loaf bread) ประกอบด้วยแป้งสาลี 57% ยีสต์ 1% เกลือ 0.5% ไข่ไก่ 7% งา 1% น้ำผึ้ง 1.5% เนยขาว (จืด) 1% และน้ำ 31% วิธีการเตรียมขนมปังจืด คือ เริ่มจากตีเนยขาว(จืด) ให้ขึ้นฟู เนื้อเนียนเรียบ แล้วค่อยๆ ผสมแป้งสาลี ผงฟักทองญี่ปุ่น และยีสต์ ตามสัดส่วนลงไป แล้วค่อยๆ เติมส่วนผสมที่ 2 คือ น้ำ เกลือ น้ำผึ้ง และไข่ไก่ ตามสัดส่วน จากนั้นผสมส่วนผสมโดยใช้เครื่องตีผสมแป้ง ใช้ระดับความแรงในการตีแป้งปานกลาง พอให้แป้งเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนวดผสมแป้งให้เข้ากันโดยใช้มือเป็นเวลา 3 นาที จนกระทั่งส่วนผสมโดของขนมปังไม่ติดนิ้วมือ จากนั้นนวดโดเป็นเวลา 10 นาที จนกระทั่งโดเรียบเนียนและยืดหยุ่น แล้วจึงหมักโดที่ได้เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นคลึงหน้าโดให้เนียน คลึงเป็นก้อนยาวขนาดประมาณพิมพ์ขนมปัง แล้วแบ่งก้อนโดใส่พิมพ์ขนมปังขนาด 4.5×9 นิ้ว ให้เท่ากัน แล้วหมักต่อไปอีก 30 นาที จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ทำให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมี

ศึกษาสมบัติทางกายภาพ เคมี และองค์ประกอบทางเคมีของผงฟักทองญี่ปุ่น

ศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของผงฟักทองญี่ปุ่น ได้แก่ ค่าสี (L*, a* และ b*) ด้วยเครื่อง Chroma Meter (Konica Minolta, CR-400, Japan) ค่าดัชนีการละลายน้ำ (Water solubility index:WSI) และค่าดัชนีการอุ้มน้ำ (Water absorption index:WAI) ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ค่าการละลาย (Solubility) และค่ากำลังการพองตัว (Swelling power) ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส (กล้าณรงค์ และเกื้อกูล, 2546) และค่าวอเตอร์แอคทีวิตี้ (Water activity) ของผงฟักทองญี่ปุ่น การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผงฟักทองญี่ปุ่น ได้แก่ ความชื้น (Moisture) เถ้า (Ash) โปรตีน (Crude protein) ไขมัน (Crude fat) เส้นใย (Crude fiber) คาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate) (AOAC, 2000) และอะไมโลส (Amylose) (Juliano,1971) ทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ

ศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของขนมปังที่มีการทดแทนแป้งสาลีด้วยผงฟักทองญี่ปุ่น

การวัดอัตราการขึ้นฟูของโด หรือปริมาตรของโดขนมปัง (Loaf volume of bread dough) (จำนวนเท่า) โดยวัดปริมาตรของโดที่เพิ่มขึ้นหลังจากทิ้งโดไว้ 1 ชั่วโมงเพื่อให้โดเกิดการขึ้นฟูเปรียบเทียบกับปริมาตรของโดเริ่มต้น ด้วยวิธีการแทนที่ด้วยเมล็ดงา (Wongsagonsup *et al*., 2015) และการวัดแรงต้านการกด (N) หรือวัดค่าความเหนียวของโดโดยใช้เครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Texture Analyzer, TA.XT. PLUS, USA) โดยใช้บีกเกอร์เป็นอุปกรณ์สำหรับใส่ตัวอย่าง และใช้หัววัด Perspective cylinder probe ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร (P/50P) รายงานค่าความเหนียวของโดจากค่าสูงสุดที่อ่านได้ของกราฟ (ดัดแปลงวิธีจาก Różyło and Laskowski, 2011)

การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ขนมปังที่มีการทดแทนแป้งสาลีด้วยผงฟักทองญี่ปุ่นโดยการวัดค่าสีตัวอย่างขนมปังด้วยเครื่อง Chroma Meter (Konica Minolta, CR-400, Japan) การวัดค่าเนื้อสัมผัสโดยการวัดค่าความแข็ง (Hardness) และความยืดหยุ่น (Springiness) ด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Texture Analyzer, TA.XT. PLUS, USA) โดยการตัดก้อนขนมปังให้เป็นสี่เหลี่ยมลูกเต๋าขนาด 30×30×30 มิลลิเมตร กดด้วยหัวกดทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ด้วยวิธี Texture Profile Analysis (TPA) 2 ครั้ง ด้วยความเร็ว 10 มิลลิเมตรต่อนาที จำนวน 3 ครั้ง ระยะพัก 10 วินาที รายงานค่าเป็นค่าความแข็ง (Hardness) และความยืดหยุ่น (Springiness) (ดัดแปลงวิธีจาก Różyło and Laskowski, 2011)

นอกจากนี้ ทำการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของผลิตภัณฑ์ขนมปังที่มีการทดแทนแป้งสาลีด้วยผงฟักทองญี่ปุ่น ได้แก่ ความชื้น เถ้า โปรตีน ไขมัน เส้นใย คาร์โบไฮเดรต และค่าวอเตอร์แอคทีวิตี้ (AOAC, 2000)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

สมบัติทางกายภาพ เคมี และองค์ประกอบทางเคมีของผงฟักทองญี่ปุ่น

ศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของผงฟักทองญี่ปุ่น ได้แก่ ค่าสี (L*, a* และ b*) ค่าดัชนีการละลายน้ำ (Water solubility index : WSI) ค่าดัชนีการอุ้มน้ำ (Water absorption index : WAI) ค่าการละลาย (Solubility) ค่ากำลังการพองตัว (Swelling power) และค่าวอเตอร์แอคทีวิตี้ (Water activity) ของผงฟักทองญี่ปุ่น (Table 1)

Table 1 Physical and chemical properties of Japanese pumpkin powder

Physical and chemical properties	Japanese pumpkin powder
L*	59.40±3.72
a*	9.53±0.70
b*	65.73±3.08
Water solubility index : WSI (%)	24.43±0.85
Water absorption index : WAI (%)	3.76±0.51
Solubility (%)	28.50±1.31
Swelling power (%)	11.29±0.15
Water activity	0.44±0.01

สมบัติทางกายภาพและเคมีของผงฟักทองญี่ปุ่น (Table 1) พบว่า ค่าความสว่าง (L*) และค่าสีเหลือง (b*) ของผงฟักทองญี่ปุ่นมีค่ามากกว่าผงฟักทองหรือแป้งฟักทอง (*Cucurbita moschata*) ที่ผ่านกระบวนการทำแห้งโดยใช้ลมร้อนด้วยตู้อบแบบถาดที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่า L* และ ค่า b* เท่ากับ 46.30 และ 33.45 ตามลำดับ (Aukkanit and Sirichokworrakitaukkanit, 2016) และแป้งฟักทองที่ผ่านกระบวนการทำแห้งด้วยเครื่อง Ventilated dryer ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งมีค่า L* และ ค่า b* เท่ากับ 72.27±0.16 และ 55.98±0.03 ตามลำดับ (See *et al.,* 2007) นอกจากนี้ ค่ากำลังการพองตัว และค่าการละลายที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ของสตาร์ชจาก Squash (*Cucurbita maxima*) เท่ากับ 6.22±0.16 (g/g) และ 69.27±0.29 (g/100g) ตามลำดับ ซึ่งผงฟักทองญี่ปุ่นมีค่ากำลังการพองตัวและค่าการละลายที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เท่ากับ 11.29±0.15% และ 28.50±1.31% ตามลำดับ โดยค่ากำลังการพองตัวและ

ค่าการละลายมีค่าเฉพาะขึ้นอยู่กับปริมาณฟอสฟอรัสและสารประกอบอื่นๆ ได้แก่ ฟอสโฟลิพิด (Phospholipids) และฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์ (Phosphate monoesters) (Yin and Wang, 2016)

ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผงฟักทองญี่ปุ่น (Table 2) พบว่าผงฟักทองญี่ปุ่นมีปริมาณโปรตีนและเส้นใยอย่างหยาบใกล้เคียงกับผงฟักทอง แต่ปริมาณเถ้ามีค่าน้อยกว่าซึ่งผงฟักทองมีโปรตีน 3.73-9.69% เส้นใยอย่างหยาบ 2.90-3.26% และเถ้า 6.13-7.24% (Sudipta and Soumitra, 2015) และผงฟักทองญี่ปุ่นยังมีปริมาณโปรตีนอย่างหยาบน้อยกว่า แต่มีปริมาณเถ้า และเส้นใยอย่างหยาบมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งสาลีชนิดหนัก (แป้งขนมปัง) ซึ่งมีค่าโปรตีนอย่างหยาบ เถ้า และเส้นใยอย่างหยาบ เท่ากับ 14.68±0.04%, 0.50±0.05% และ 0.10±0.05% ตามลำดับ (Wongsagonsup *et al.,* 2015) นอกจากนี้ยังพบว่า ผงฟักทองญี่ปุ่นมีปริมาณอะไมโลสที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งสาลีชนิดหนัก โดยมีปริมาณอะไมโลส เท่ากับ 22.39±0.48% (พรรณทิพา, 2555)

Table 2 Chemical composition of Japanese pumpkin powder

Chemical composition	Japanese pumpkin powder
Moisture (%)	4.65±0.39
Ash (%)	4.38±0.04
Crude protein (%)	4.58±0.28
Crude fat (%)	0.25±0.04
Crude fiber (%)	2.67±0.22
Carbohydrate (%)	83.47±1.31
Amylose (%)	3.79±0.36

การทดแทนแป้งสาลีด้วยผงฟักทองญี่ปุ่นต่อสมบัติทางกายภาพและเคมีของขนมปัง

ผลิตภัณฑ์ขนมปังที่มีการทดแทนแป้งสาลีด้วยผงฟักทองญี่ปุ่นที่อัตราส่วนระหว่างแป้งสาลีและผงฟักทองญี่ปุ่นเท่ากับ 100:0, 90:10, 80:20 และ 70:30 ตามลำดับ การวัดแรงต้านการกดหรือวัดค่าความเหนียวของโด (Compression resistance of dough (N)) และการวัดอัตราการขึ้นฟูของโดหรือปริมาตรของโดขนมปัง (Loaf volume of bread dough) (จำนวนเท่า) (Table 3) และวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพค่าสี L*, a* และ b* ของขนมปังที่มีการทดแทนแป้งสาลีด้วยผงฟักทองญี่ปุ่น (Table 4)

Table 3 Effect of Japanese pumpkin powder substitution on physical properties of dough

Wheat flour : Japanese pumpkin powder	Compression resistance of dough (N)	Loaf volume of bread dough (Folds)
100:0	1.36±0.12 ^{d}	0.54±0.02^{a}
90:10	4.96±0.16 ^{c}	0.47±0.03^{b}
80:20	8.30±0.85 ^{b}	0.40±0.01^{c}
70:30	11.38±0.98 ^{a}	0.35±0.02^{d}

Means in columns not followed by the same superscripts are significantly different ($p \leq 0.05$)

จากผลการวิเคราะห์ดัง Table 3 พบว่า ขนมปังที่มีการทดแทนด้วยผงฟักทองญี่ปุ่นในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้ค่าแรงต้านการกดหรือค่าความเหนียวของโดมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) และอัตราการขึ้นฟูของโดหรือปริมาตรของโดขนมปัง มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เนื่องจากการลดปริมาณแป้งสาลีในขนมปังทำให้ Gluten matrix ลดลง ส่งผลให้ขนมปังมีอัตราการขึ้นฟูของโดลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) นอกจากนี้ งานวิจัยของ See *et al*. (2007) รายงานว่า การทดแทนแป้งสาลีด้วยผงฟักทองมากกว่า 10% ส่งผลให้ปริมาตรของขนมปัง (Loaf volume of bread) มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับขนมปังที่ไม่มีการทดแทนด้วยผงฟักทอง เนื่องจาก Gluten matrix ที่น้อยลง และปฏิสัมพันธ์ขององค์ประกอบต่างๆ ในผงฟักทองที่มากขึ้น อาจเป็นสาเหตุให้ค่าปริมาตรจำเพาะของขนมปัง (Specific volume of bread) และค่าความแน่นเนื้อ (Firmness) ของ Bread crumb สูงขึ้น นอกจากนี้การทดแทนแป้งสาลีด้วยผงฟักทองที่มากขึ้น (ช่วง 10-40%) ค่าปริมาตรจำเพาะของขนมปังมีค่าลดลง แต่ค่าความแข็งและค่าสีเหลืองของขนมปังมีค่าสูงขึ้น (Wongsagonsup *et al*., 2015) ซึ่งการทดแทนแป้งสาลีด้วยผงฟักทองญี่ปุ่นในขนมปังของงานวิจัยนี้ที่ 10% ทำให้อัตราการขึ้นฟูของโดขนมปังลดลงเพียง 13% เมื่อเปรียบเทียบกับขนมปังที่ไม่มีส่วนผสมของผงฟักทองญี่ปุ่น

Table 4 Effect of Japanese pumpkin powder substitution on color values of bread

Wheat flour : Japanese pumpkin powder	Color		
	L*	a*	b*
100:0	57.95±0.89[a]	1.21±0.17[d]	16.12±0.30[c]
90:10	57.92±0.89[a]	2.07±0.21[c]	47.71±0.68[b]
80:20	57.85±0.84[a]	4.32±0.60[b]	52.70±0.25[a]
70:30	53.21±0.40[b]	7.45±0.70[a]	52.75±0.20[a]

Means in columns not followed by the same superscripts are significantly different ($p \leq 0.05$)

ผลิตภัณฑ์ขนมปังที่มีการทดแทนแป้งสาลีด้วยผงฟักทองญี่ปุ่นที่อัตราส่วนมากขึ้น พบว่าค่าสีแดง (a*) และค่าสีเหลือง (b*) มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่าความสว่าง (L*) มีค่าลดลง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (Table 4) เนื่องจากผงฟักทองญี่ปุ่นมีลักษณะเป็นผงสีเหลืองเข้ม โดยมีค่าสีเหลือง (b*) เท่ากับ 65.73±3.08 (Table 1) ดังนั้นการเติมผงฟักทองญี่ปุ่นที่มากขึ้น ส่งผลให้สีขนมปังมีสีคล้ำลง และมีค่าความเป็นสีเหลืองเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ See *et al*. (2007) การทดแทนแป้งสาลีด้วยผงฟักทองที่ 5-15% ค่าสี a* และ b* มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่า L* มีค่าลดลง

ขนมปังที่มีการทดแทนแป้งสาลีด้วยผงฟักทองญี่ปุ่นที่อัตราส่วนระหว่างแป้งสาลีและผงฟักทองญี่ปุ่นมากขึ้น ทำให้ขนมปังมีค่าความแข็งมากขึ้น และค่าความยืดหยุ่นลดลง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (Table 5) เนื่องจากผงฟักทองญี่ปุ่นมีปริมาณเส้นใยอย่างหยาบ และเถ้าสูงกว่าแป้งสาลี (Table 2) ซึ่งฟักทองเป็นแหล่งของเส้นใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำ (Insoluble dietary fiber) โดยแป้งฟักทองหรือผงฟักทองประกอบด้วยเซลลูโลส 40% เฮมิเซลลูโลส 4.3% และลิกนิน 4.3% (Aukkanit and Sirichokworrakitaukkanit, 2016) ซึ่งปริมาณเส้นใยอย่างหยาบที่สูงของผงฟักทองญี่ปุ่นที่เป็นองค์ประกอบในขนมปังที่มากขึ้น จึงไปเจือจางปริมาณกลูเตน และรบกวน Gluten matrix ในระหว่างกระบวนการหมักจึงส่งผลให้โดของขนมปังมีอัตราการขึ้นฟูลดลง

และทำให้ขนมปังมีค่าความแข็งมากขึ้น และค่าความยืดหยุ่นลดลง ซึ่งการทดแทนแป้งสาลีด้วยผงฟักทองญี่ปุ่นในขนมปัง 10% ทำให้ค่าความยืดหยุ่นลดลง 24.6% เมื่อเปรียบเทียบกับขนมปังที่ไม่เสริมผงฟักทองญี่ปุ่น

Table 5 Effect of Japanese pumpkin powder substitution on texture of bread

Wheat flour : Japanese pumpkin powder	Hardness (N)	Springiness (N)
100:0	11.26±0.08^{d}	1.34±0.02^{a}
90:10	93.26±1.49^{c}	1.01±0.02^{b}
80:20	151.71±4.92^{b}	0.38±0.01^{c}
70:30	296.52±20.02^{a}	0.26±0.01^{d}

Means in columns not followed by the same superscripts are significantly different ($p \leq 0.05$)

สมบัติทางเคมีของขนมปังที่มีการทดแทนแป้งสาลีด้วยผงฟักทองญี่ปุ่นที่อัตราส่วนแตกต่างกัน (Table 6) พบว่า ขนมปังที่มีการทดแทนแป้งสาลีด้วยผงฟักทองญี่ปุ่นในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้ค่าเส้นใยอย่างหยาบ (%) และค่าเถ้า (%) ของขนมปัง มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) แต่ค่าปริมาณโปรตีนและไขมันของขนมปังมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เนื่องจากผงฟักทองญี่ปุ่นมีปริมาณโปรตีนและไขมันน้อยกว่าแป้งสาลีชนิดหนัก แต่มีปริมาณเส้นใยอย่างหยาบและเถ้ามากกว่า นอกจากนี้ ขนมปังที่มีการทดแทนแป้งสาลีด้วยผงฟักทองญี่ปุ่นในงานวิจัยนี้ ยังมีองค์ประกอบทางเคมีใกล้เคียงกับ See *et al.* (2007)

Table 6 Effect of Japanese pumpkin powder substitution on chemical properties of bread

Wheat flour : Japanese pumpkin powder	Water activity (aw)	Moisture content (%)	Ash (%)	Crude protein (%)	Crude fat (%)	Crude fiber (%)	Carbohydrate (%)
100:0	0.95±0.04^{a}	48.13±0.22^{a}	1.09±0.02^{d}	12.90±0.16^{a}	2.76±0.08^{a}	2.78±0.79^{d}	32.34±1.77^{a}
90:10	0.95±0.05^{a}	47.34±0.51^{a}	1.33±0.07^{c}	12.66±0.10^{b}	2.63±0.11^{b}	5.45±0.79^{c}	30.59±1.62^{b}
80:20	0.94±0.06^{a}	47.26±0.78^{a}	1.65±0.02^{b}	12.16±0.09^{c}	2.59±0.12^{c}	6.42±0.11^{b}	29.92±1.90^{b}
70:30	0.93±0.01^{b}	42.97±0.74^{b}	2.01±0.51^{a}	11.57±0.08^{d}	2.45±0.08^{d}	7.45±0.29^{a}	33.55±1.17^{a}

Means in columns not followed by the same superscripts are significantly different ($p \leq 0.05$)

สรุป

การทดแทนแป้งสาลีด้วยผงฟักทองญี่ปุ่นในขนมปัง 10-30% ทำให้ค่าการต้านแรงกดของโด ค่าความแข็งของขนมปัง ค่าเส้นใยอย่างหยาบ และค่าเถ้าของขนมปังเพิ่มมากขึ้น แต่ค่าความยืดหยุ่นของขนมปัง ค่าปริมาณโปรตีน และไขมันของขนมปังลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) การทดแทนแป้งสาลีด้วยผงฟักทองญี่ปุ่นที่ 10% ทำให้อัตราการขึ้นฟูของโดหรือปริมาตรของโดขนมปังลดลง 13% และค่าความยืดหยุ่นลดลง 24.6% เมื่อเปรียบเทียบกับขนมปังที่ไม่มีส่วนผสมของผงฟักทองญี่ปุ่น ดังนั้นการเสริมผงฟักทองญี่ปุ่นใน

ขนมปัง 10-30% ทำให้ค่าเส้นใยอย่างหยาบ และค่าเถ้าของขนมปังเพิ่มมากขึ้น จึงเป็นการเพิ่มคุณภาพด้านโภชนาการของขนมปัง และเพิ่มมูลค่าให้กับวัตถุดิบเหลือทิ้งจากกระบวนการตัดแต่งของฟักทองญี่ปุ่น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ ที่ให้การสนับสนุนทรัพยากรและสถานที่ในการวิจัย และให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วง

เอกสารอ้างอิง

กล้าณรงค์ ศรีรอต และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ. 2546. **เทคโนโลยีของแป้ง**. พิมพ์ครั้งที่ 3. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

พรรณทิพา เจริญไทยกิจ. 2555. **การพัฒนาขนมปังจากแป้งสาลีผสมข้าวเหนียว**. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์. คณะเทคโนโลยีและนวัตกรรมผลิตภัณฑ์การเกษตร มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.

วราภรณ์ เจริญถาวร และ เจิมสิริ เหลืองศุภภรณ์. 2551. **Bread-ขนมปัง**. สำนักพิมพ์ ฟูล สท็อป. กรุงเทพฯ.

AOAC. 2000. Official Methods of Analysis of the Association of Official Chemists International. 17th ed. **The Association of Official Analytical Chemists**. Maryland, U.S.A.

Aukkanit, N. and S. Sirichokworrakitaukkanit. 2016. Effect of dried pumpkin powder on physical, chemical, and sensory properties of noodle. **Proceedings of Academics World 52nd International Conference**, Los Angeles, USA, 21st-22nd November, 128-132.

Juliano, B.O. 1971. A simplified assay for milled-rice amylose. **Cereal Science Today**. 16: 334-340.

Muenmanee, N., A. Joomwong, J. Natwichai and D. Boonyakiat. 2016. Changes in physico-chemical properties during fruit development of Japanese pumpkin (*Cucurbita maxima*). **International Food Research Journal**. 23(5): 2063-2070.

Różyło, R. and J. Laskowski. 2011. Predicting bread quality (bread loaf volume and crumb texture). **Polish Journal of Food and Nutrition Sciences**. 61(1): 55-62.

See, E.F., W.A. Wan Nadiah and A.A. Noor Aziah. 2007. Physico-chemical and sensory evaluation of breads supplemented with pumpkin flour. **ASEAN Food Journal**. 14(2): 123-130.

Sudipta, D. and B. Soumitra. 2015. Production of pumpkin powder and its utilization in bakery products development : A review. **International Journal of Research in Engineering and Technology**. 4(5): 478-481.

Wongsagonsup, R., P. Kittisuban, A.Yaowalak and M. Suphantharika. 2015. Physical and sensory qualities of composite wheat-pumpkin flour bread with addition of hydrocolloids. **International Food Research Journal**. 22(2): 745-752.

Yin, L. and C. Wang. 2016. Morphological, thermal and physicochemical properties of starches from squash (*Cucurbita maxima*) and pumpkin (*Cucurbita moschata*). **Journal of Horticulture**. 3(4): 187. doi:10.4172/2376-0354.1000187.

ผลของสนามไฟฟ้าแบบปานกลางภายใต้ความดันต่อการสกัดสารฟีนอลิกทั้งหมด แอนโทไซยานินทั้งหมด และเปอร์เซ็นต์สีของพอลิเมอร์จากรำข้าวไรซ์เบอร์รี่

Effect of Moderate Electric Field with Overriding Pressure on Extraction of Total Phenolics, Total Anthocyanins and Percent Polymeric Color from Riceberry Bran

ภัคจีรกร แย้มเกษร[1] และ ปิติยา กมลพัฒนะ[1*]

Pakjirakorn Yamkasorn[1] and Pitiya Kamonpatana[1*]

บทคัดย่อ

การศึกษาผลของการสกัดรำข้าวไรซ์เบอร์รี่ด้วยสนามไฟฟ้าแบบปานกลาง (moderate electric field, MEF) ภายใต้ความดันต่อการสกัดปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมด สารแอนโทไซยานินทั้งหมด และเปอร์เซ็นต์สีของพอลิเมอร์ของสารสกัด ซึ่งทุกสภาวะการสกัดด้วย MEF ภายใต้ความดันจะใช้ความดันคงที่ที่ 1 bar โดยวางแผนการทดลองแบบ Central composite design (CCD) เมื่อเปรียบเทียบกับการสกัดด้วยตัวทำละลาย พบว่าสารสกัดจากความเข้มสนามไฟฟ้า 14.58 V/cm ภายใต้ความดัน เป็นเวลา 75 นาที และความเข้มสนามไฟฟ้า 23.00 V/cm ภายใต้ความดัน เป็นเวลา 30 นาที มีปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดสูงที่สุด ($p<0.05$) และสารสกัดที่สกัดด้วยความเข้มสนามไฟฟ้า 6.15 V/cm ที่เวลา 120 นาที มีสารแอนโทไซยานินทั้งหมดสูงที่สุด ($p<0.05$) ส่วนเปอร์เซ็นต์สีของพอลิเมอร์ในทุกสภาวะการสกัดไม่มีความแตกต่างกัน ($p>0.05$) โดยสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดสารฟีนอลิกและสารแอนโทไซยานินจะขึ้นกับความเข้มสนามไฟฟ้าและระยะเวลาที่ใช้ในการสกัด จะเห็นได้ว่าการสกัดด้วย MEF ภายใต้ความดันมีประสิทธิภาพในการสกัดมากกว่าการสกัดด้วยตัวทำละลาย

ABSTRACT

This study aimed to evaluate effects of electric field strength (EF) and extraction time of MEF extraction with overriding pressure on total phenolic contents (TPC), total monomeric anthocyanins (TMA) and percent polymeric color (PPC) of riceberry bran extracts. The constant pressure of 1 bar was applied for every MEF condition. The condition for riceberry bran extraction is evaluated by central composite design (CCD). The results showed that MEF extraction with overriding pressure had the highest TPC at the condition of EF 23.00 V/cm for 30 min and EF 14.58 V/cm for 75 min ($p<0.05$). The highest TMA was obtained at EF 16.15 V/cm for 120 min ($p<0.05$). The optimal condition for phenolic and anthocyanin extraction depended on the EF and extraction time. However, PPC of samples obtained from all conditions was not significantly different. In conclusion, MEF assisted extraction with overriding pressure showed the potential to enhance efficiency of the extraction.

Key Words: riceberry rice, extract, moderate electric field

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

[1]ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

ข้าวไรซ์เบอร์รีเป็นข้าวสีม่วงดำซึ่งเป็นข้าวสีของไทยที่ได้รับการปรับปรุงพันธุ์เพื่อพัฒนาคุณค่าทางโภชนาการให้ได้ประโยชน์สูงสุดต่อผู้บริโภคและจัดเป็นข้าวที่มีสารต้านอนุมูลอิสระและ แอนโทไซยานิน (anthocyanin) สูง ซึ่งพบว่าในส่วนของรำข้าวไรซ์เบอร์รี่นั้นมีส่วนประกอบของสารไซยานิดิน-3-กลูโคไซด์ (Cyanindin-3-*O*-glucoside, C3G) และพีโอนิดิน-3-กลูโคไซด์ (Peonidin-3-*O*-glucoside, P3G) สูง จึงนำมาใช้เป็นข้าวต้นแบบในการวิจัย นอกจากนี้การค้าขายเชิงพาณิชย์ของ C3G และ P3G ยังมีมูลค่าสูงจากข้อมูลของ บ. Polyphenols (Polyphenols AS, n.d.) พบว่า C3G ราคาขายอยู่ที่ 6,888 บาทต่อ 10 มิลลิกรัม ในขณะที่ P3G ราคาขายอยู่ที่ 13,236 บาทต่อ 10 มิลลิกรัม ข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการสกัดสารต้านอนุมูลอิสระที่พบในข้าวสีเป็นอีกทางหนึ่งในการเพิ่มมูลค่าให้กับข้าวไทย อีกทั้งยังเป็นที่ต้องการในตลาดโลกในปัจจุบันซึ่งวิธีการสกัดสารให้ได้ปริมาณมากในเวลาอันสั้นจึงเป็นสิ่งที่สำคัญ

งานวิจัยนี้มีจึงแนวคิดในการประยุกต์วิธีการสกัดโดยใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบปานกลาง (moderate electric field, MEF) ภายใต้ความดันเพื่อช่วยในการสกัดสารต้านอนุมูลอิสระจากรำข้าวไรซ์เบอร์รี่ MEF เป็นกระบวนการที่ใช้ความเข้มของสนามไฟฟ้าน้อยกว่า 1,000 V/cm ซึ่งอาจกระทบกับโครงสร้างของรำข้าว ส่งผลให้ตัวทำละลายสามารถเข้าไปละลายสารสำคัญภายในรำข้าวได้ดีขึ้น ส่วนการใช้ความดันเข้ามาช่วยในการสกัดอาจเพิ่มผลผลิตจากการสกัดได้สูงขึ้นที่อุณหภูมิการสกัดที่ต่ำในระยะเวลาที่สั้นลง การประยุกต์วิธีการสกัดโดยใช้ MEF ภายใต้ความดันอาจช่วยลดข้อบกพร่องของการสกัดแบบดั้งเดิมที่สกัดด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ ซึ่งเกี่ยวข้องกับการใช้ระยะเวลาในการสกัดค่อนข้างนานและได้ผลผลิตจากการสกัดค่อนข้างน้อย

งานวิจัยที่เกี่ยวกับการสกัดสารต้านอนุมูลอิสระในข้าวสีโดยการประยุกต์การนำสนามไฟฟ้าแบบปานกลางภายใต้ความดันนั้นถือเป็นเรื่องใหม่และมีความจำเป็นในการทำการวิจัยในประเทศไทยและเพื่อเสริมสร้างความสามารถในการสร้างมูลค่าเพิ่มของข้าวไทยในอนาคต นอกจากนี้ความสำเร็จของการวิจัยนี้สามารถนำไปสู่การต่อยอดในการเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดสารต้านอนุมูลอิสระ และอาจใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาทางเทคโนโลยีในอุตสาหกรรมเพื่อนำไปแปรรูปเป็นอาหารสุขภาพหรืออาหารทางยาต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

การสกัดสารต้านอนุมูลอิสระจากรำข้าวไรซ์เบอร์รี่

ศึกษาการสกัดโดยการเปรียบเทียบวิธีการสกัดตัวทำละลายอินทรีย์ระหว่างสกัดด้วยสนามไฟฟ้าแบบปานกลางภายใต้ความดันกับการสกัดด้วยวิธีดั้งเดิม ซึ่งออกแบบแผนการทดลองแบบ Central Composite Design (CCD) 2 ปัจจัย คือความเข้มสนามไฟฟ้าและเวลาที่แตกต่างกัน (X_1 และ X_2) ปัจจัยละ 3 ระดับ (-1, 0 และ +1) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดรำข้าวไรซ์เบอร์รี่ ในขณะที่ตัวแปรตาม คือ ปริมาณสารแอนโทไซยานินทั้งหมด ใน Table 1 แสดงตัวแปรที่เขียนด้วยรหัสสามระดับคือ -1, 0 และ +1 โดยทำการทดสอบซ้ำ 2 ซ้ำ วิธีการสกัดทั้ง 2 วิธีดัดแปลงวิธีจาก Chen *et al*. (2012) ตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัด ได้แก่ 0.1% กรดไฮโดรคลอริกในตัวทำละลายเอทานอลต่อน้ำ (70:30) และอัตราส่วนของรำข้าว 1 กรัมต่อสารละลายเอทานอล 200 มิลลิลิตร โดยวิธีการสกัดแบบดั้งเดิมสกัดด้วยตัวทำละลายอินทรีย์จะทำการสกัดในที่ปราศจากแสงโดยใช้เวลา

ในการสกัด 30, 75, 120 นาทีที่อุณหภูมิห้อง ส่วนวิธีการสกัดด้วยสนามไฟฟ้าแบบปานกลางภายใต้ความดันจะทำการให้สนามไฟฟ้ากับสารผสมในหลอดแก้วทรงกระบอก (Figure 1) ที่ห่อหุ้มด้วยอลูมิเนียมฟอยล์เพื่อป้องการแสงจากภายนอก โดยให้ความเข้มสนามไฟฟ้าที่ 6.15, 14.58, 23.00 V/cm, ความถี่ 30 Hz และ เวลาในการสกัด 30, 75, 120 นาที และควบคุมอุณหภูมิระหว่างสกัดให้อยู่ในช่วง 25-30 องศาเซลเซียสภายใต้ความดันสูงสุด 1 bar นำสารสกัดที่ได้ไปเหวี่ยงแยกตะกอนโดยเครื่องเหวี่ยงและกรองสารสกัดด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 เก็บสารสกัดในขวดแก้วสีชาที่ -18 องศาเซลเซียส

Table 1 Independent variables used in the optimization study

Independent variable	Code	Coded variable		
		-1	0	+1
electric field strength (V/cm)	X_1	6.15	14.58	23.00
extraction time (min)	X_2	30.00	75.00	120.00

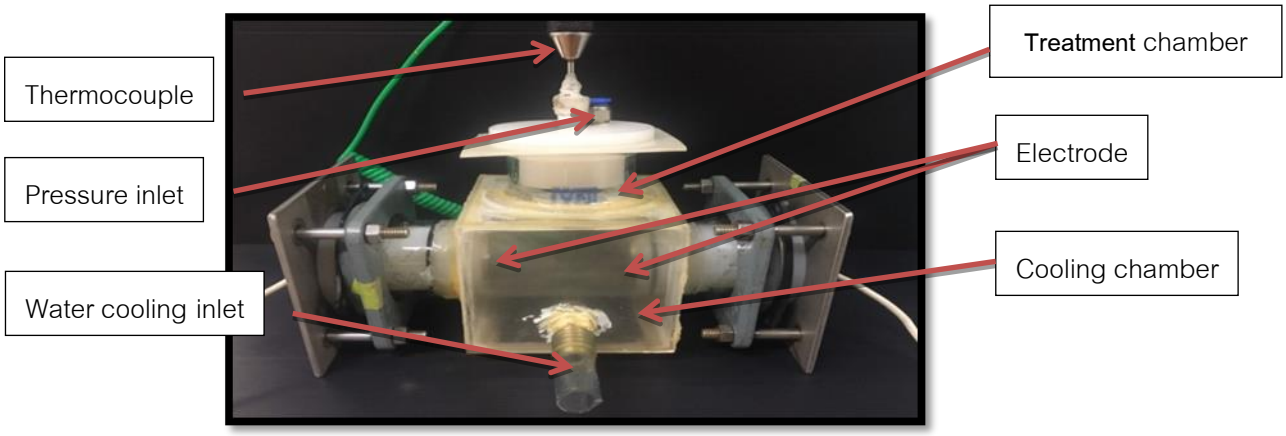


Figure 1 Moderate electric field chamber under pressure

การวิเคราะห์สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (Total phenolic content, TPC)

วิเคราะห์โดยใช้วิธี โฟลิน-ไซโอแคลทู (Singleton *et al.*, 1999) โดยผสมสารสกัดตัวอย่าง 250 ไมโครลิตรกับสารประกอบโฟลิน-ไซโอแคลทูฟีนอล 500 ไมโครลิตร และน้ำกลั่น 7.5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันและเติมโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้นร้อยละ 15 ปริมาตร 2 มิลลิลิตร หลังจากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตร 10.0 มิลลิลิตร และบ่มทิ้งไว้ในที่มืดที่อุณหภูมิห้อง 2 ชั่วโมง ตรวจวัดการดูดกลืนแสงโดยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer (Thermo Scientific, model Genesys 10uv, England) ที่ 750 นาโนเมตร

การวิเคราะห์ปริมาณแอนโทไซยานินทั้งหมด (Total monomeric anthocyanin, TMA)

วิเคราะห์โดยใช้วิธีพีเอช-ดิฟเฟอเรนเชียล (pH-differential) (Giusti and Wrolstad, 2005) โดยเจือจางสารสกัด 10 เท่ากับสารละลายบัฟเฟอร์ของโพแทสเซียมคลอไรด์ pH 1.0 และสารละลายบัฟเฟอร์ของโซเดียมอะซิเตท pH 4.5 บ่มที่อุณหภูมิห้อง 15 นาที แล้วนำมาวัดการดูดกลืนแสงโดยเครื่องวัดค่าดูดกลืนแสงที่ 513 นาโนเมตรและ 700 นาโนเมตร โดยปริมาณแอนโทไซยานินทั้งหมด จะคำนวณจากเทอมของ Cyanidin-3-glucoside ความเข้มข้นของ Monomeric anthocyanins contents คำนวณโดยสมการ (1)

$$\text{Monomeric anthocyanins content (mg/ l)} = \frac{[A_{diff} \times Mw \times DF \times 1000]}{\varepsilon \times l} \quad (1)$$

เมื่อ Mw คือน้ำหนักโมเลกุลของ cyanidin-3-glucoside (449.2),

DF คือ dilution factor (10),

ε คือ molar absorptivity of cyanidin-3-glucoside (26,900 l/mol cm)

และ A_{diff} คำนวนจากสมาการ (2)

$$A_{diff} = (A_{513} - A_{700})_{pH1.0} - (A_{513} - A_{700})_{pH4.5} \quad (2)$$

โดย A_{513} คือค่าดูดกลืนแสงของสารสกัดรำข้าวไรซ์เบอร์รี่ที่ความยาวคลื่น 513 นาโนเมตร

A_{700} คือค่าดูดกลืนแสงของสารสกัดรำข้าวไรซ์เบอร์รี่ที่ความยาวคลื่น 700 นาโนเมตรเพื่อลดผลกระทบจากความขุ่นหรือการตกตะกอนของสารสกัด

การวัด Polymerized anthocyaninและเปอร์เซ็นต์ของสีจากพอลิเมอร์ (Percent polymeric color, PPC)

การวัด Polymerized anthocyanin และเปอร์เซ็นต์ของสีจากพอลิเมอร์ (Wang *et al*., 2016) คืออัตราส่วนของสารประกอบแอนโทไซยานินในรูปพอลิเมอร์และมอนอเมอร์ริกแอนโทไซยานิน โดยสามารถคำนวณได้โดยอัตราส่วนระหว่างสีของพอลิเมอร์ต่อความหนาแน่นของสีทั้งหมดคูณด้วย 100 ในสมการที่ (3)

$$PPC = \frac{\text{Polymeric color}}{\text{Color density}} \times 100 \quad (3)$$

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลของสารสกัดจากรำข้าวไรซ์เบอร์รี่ที่สกัดด้วยMEFภายใต้ความดันต่อปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมด

จากการวิเคราะห์หาความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างการสกัดด้วยสนามไฟฟ้าแบบปานกลางภายใต้ความดันและการสกัดด้วยวิธีดั้งเดิมด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 พบว่า เมื่อทำการสกัดรำข้าวไรซ์เบอร์รี่ด้วย MEF ภายใต้ความดัน ที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 14.58 V/cm เป็นเวลา 75 นาที และที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 23.00 V/cm เป็นเวลา 30 นาที สารสกัดที่ได้มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดสูงที่สุด ($p<0.05$) คือ 4,967.44 มิลลิกรัมของกรดแกลลิกต่อรำข้าวไรซ์เบอร์รี่ 100 กรัมน้ำหนักแห้ง และ 5,017.59 มิลลิกรัมของกรดแกลลิกต่อรำข้าวไรซ์เบอร์รี่ 100 กรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ (Figure 2) ซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากปรากฏการณ์อิเล็กโทรพอเลชั่นระหว่างการสกัดด้วย MEF โดยสนามไฟฟ้าส่งผลให้เกิดการเหนี่ยวนำประจุไฟฟ้ามาสะสมที่ผนังเซลล์ของรำข้าวและเมื่อความเข้มสนามไฟฟ้ามีค่ามากกว่าค่าความเข้มสนามไฟฟ้าวิกฤตจะส่งผลให้ผนังเซลล์ถูกทำลาย ทำให้เกิดรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมากที่ผนังเซลล์ จึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการแพร่ของสารตัวทำละลายผ่านเข้าออกระหว่างภายในและภายนอกเซลล์ (Sensoy and Sastry, 2004) และเมื่อ

ประยุกต์ใช้ความดันร่วมกับ MEF ความดันอาจจะส่งผลให้เซลล์เกิดการเสียรูปทรง ทำให้เกิดความเสียหายต่อเนื้อเยื่อเซลล์ สารตัวทำละลายจึงสามารถแพร่ผ่านผนังเซลล์เข้าสู่ภายในเซลล์ได้ดีขึ้นในระหว่างกระบวนการสกัด (Kotovicz and Zanoelo, 2013) จึงส่งผลให้การสกัดด้วย MEF ภายใต้ความดันมีปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดสูงกว่าวิธีการสกัดแบบดั้งเดิม แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้ความเข้มสนามไฟฟ้าสูงเป็นเวลานานขึ้น พบว่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดมีค่าลดลง ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการสลายตัวของสารต้านอนุมูลอิสระบางส่วนในระหว่างการสกัดด้วย MEF ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้จาก 3 กลไก ได้แก่ การกัดกร่อนของโลหะจากอิเลคโทรด การสลายตัวของน้ำ และการเกิดอนุมูลอิสระในระบบ (Sarkis *et al*. 2013) จาก Figure 2 จะเห็นว่าการสกัดด้วย MEF ภายใต้ความดันนอกจากจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัด TPC แล้วยังช่วยลดระยะเวลาในการสกัดได้เมื่อใช้ความเข้มสนามไฟฟ้าที่มากขึ้น

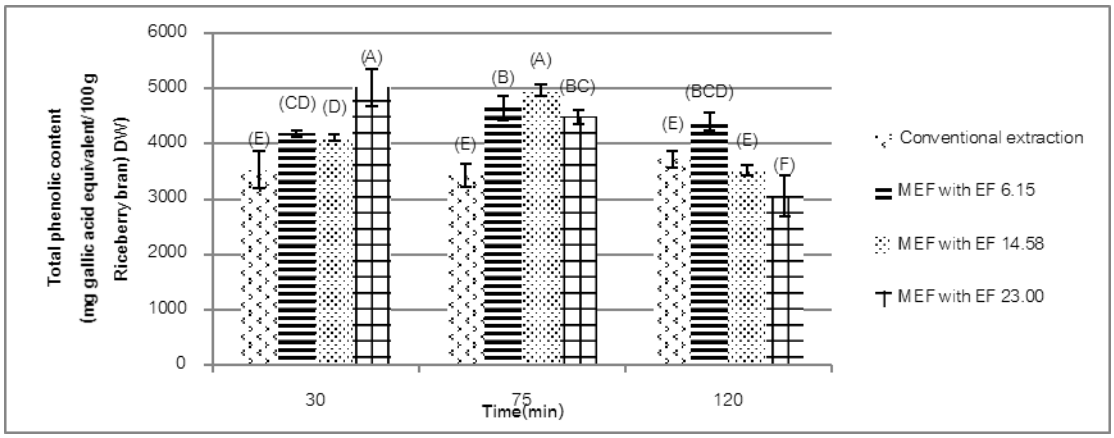


Figure 2 Effect of MEF extraction with overriding pressure 1 bar on TPC of riceberry bran

$^{A, B, C, D, E, F}$ mean followed by the same letter within each condition are not significantly different at $p>0.05$.

ผลของสารสกัดจากรำข้าวไรซ์เบอร์รี่ที่สกัดด้วย MEF ภายใต้ความดันต่อปริมาณสารแอนโทไซยานินทั้งหมด

ผลการสกัดด้วยความเข้มสนามไฟฟ้า 6.15 V/cm ที่เวลา 120 นาทีแสดงให้เห็นว่า ปริมาณสารแอนโทไซยานินทั้งหมดในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกร้อยละ 0.1 ในสารละลายเอทานอลร้อยละ 70 มีค่าสูงที่สุด คือ 555.91 มิลลิกรัมของไซยานิดิน-3-กลูโคไซด์ (Cyanidin-3-*O*-glucoside, C3G) ต่อรำข้าวไรซ์เบอร์รี่ 100 กรัมน้ำหนักแห้ง ($p<0.05$) ซึ่งแสดงดัง Figure 3 เนื่องจากสารละลายที่ใช้สกัดเป็นกรด การใช้ความเข้มสนามไฟฟ้าสูงเป็นเวลานานมีผลทำให้ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่อิเลคโทรดเกิดขึ้นมากกว่าความเข้มสนามไฟฟ้าต่ำ ดังนั้น การใช้ความเข้มสนามไฟฟ้า 6.15 V/cm จึงสามารถสกัดปริมาณสารแอนโทไซยานินทั้งหมดได้มากกว่า

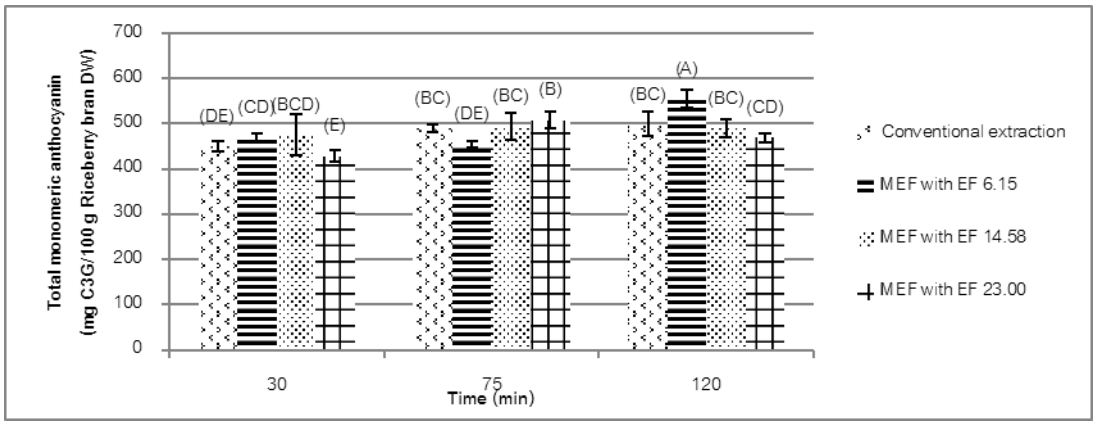


Figure 3 Effect of MEF extraction with overriding pressure 1 bar on TMA of riceberry bran

$^{A, B, C, D, E}$ mean followed by the same letter within each condition are not significantly different at $p>0.05$.

ผลของสารสกัดจากรำข้าวไรซ์เบอร์รี่ที่สกัดด้วย MEFภายใต้ความดันต่อเปอร์เซ็นต์สีของพอลิเมอร์

ในส่วนของเปอร์เซ็นต์สีของพอลิเมอร์ (Figure 4) ในทุกสภาวะในการสกัดไม่แตกต่างกัน ($p>0.05$) ซึ่งหลักการหาเปอร์เซ็นต์สีของพอลิเมอร์คือ แอนโทไซยานินจะจับกับ Bisulfite เกิดเป็นสารไม่มีสีแต่สารประกอบเชิงซ้อนจำพวก Polymerized colored anthocyanin-tannin complexes จะสามารถต้านทานการฟอกสีของ Bisulfite ได้ แต่ทว่าปฏิกิริยาการฟอกสีจะเกิดได้สมบูรณ์กับ Monomeric anthocyanin สารแอนโทไซยานินจัดอยู่ในกลุ่มสารประกอบฟีนอล (phenolic compounds) ซึ่งส่วนใหญ่จะพบสารประกอบฟีนอลิกในธัญพืชทั้งเมล็ด ได้ 3 รูปแบบคือ สารฟีนอลิกที่อยู่ในรูปอิสระ (free phenolics) รูปแบบ Soluble-conjugated phenolics และรูปแบบเกาะตรึง Insoluble-bound phenolics (Shao *et al*. 2014) จากการศึกษาของ Madhujith และ Shahidi (2009) พบว่าสารฟีนอลิกส่วนใหญ่อยู่ในรูป Insoluble-bound fractions รองลงมาคือสารฟีนอลิกที่อยู่ในรูป Soluble conjugate และสารฟีนอลิกที่อยู่ในรูปอิสระตามลำดับ อาจมีความเป็นไปได้ว่าสารประกอบในสารสกัดรำข้าวส่วนใหญ่อยู่ในรูป Insoluble-bound fractions จึงสามารถต้านทานการฟอกสีของ Bisulfite ได้ และแอนโทไซยานินที่อยู่ในรูปแบบ Insoluble-bound อาจจะมีความต้านทานสภาวะในการสกัดต่างๆ ได้มากกว่าแอนโทไซยานินที่อยู่ในรูปอิสระ ดังนั้นในทุกสภาวะการสกัดไม่ว่าจะเป็นการสกัดด้วยวิธีดั้งเดิมด้วยตัวทำละลายอินทรีย์และการสกัดด้วย MEF ภายใต้ความดันที่เวลาแตกต่างกันและความเข้มสนามไฟฟ้าแตกต่างกัน เปอร์เซ็นต์สีของพอลิเมอร์มีปริมาณไม่แตกต่างกัน ($p>0.05$)

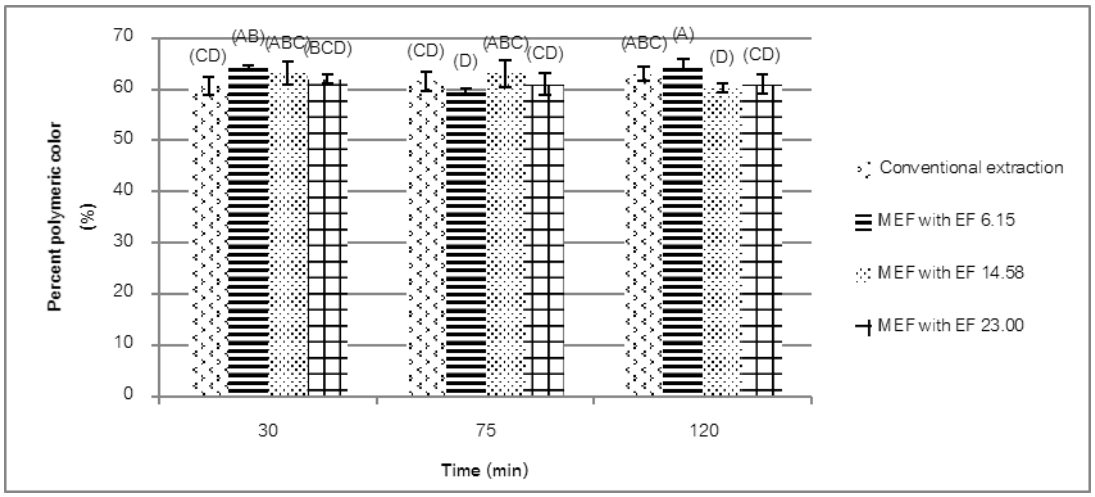


Figure 4 Effect of MEF extraction with overriding pressure 1 bar on PPC of riceberry bran

$^{A, B, C, D}$ mean followed by the same letter within each condition are not significantly different at $p>0.05$.

สรุป

กระบวนการให้สนามไฟฟ้าแบบปานกลางหรือ Moderate electric field (MEF) เป็นเทคโนโลยีที่สามารถช่วยเพิ่มการถ่ายเทมวลระหว่างการสกัด โดยกระแสไฟฟ้าอาจทำลายโครงสร้างผนังเซลล์ของพืชด้วย Electroporation และเพิ่มความสามารถให้สารต่างๆ ที่อยู่ภายในเซลล์รำข้าวสามารถแพร่ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ได้ดีขึ้นส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการสกัดมากกว่าการสกัดด้วยวิธีแบบดั้งเดิมด้วยตัวทำละลายอินทรีย์และลดระยะเวลาการสกัดลงได้ ประสิทธิภาพในการสกัดด้วย MEF จะขึ้นกับความเข้มสนามไฟฟ้าและระยะเวลาที่ใช้ในการสกัด โดยสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดสารฟีนอลิกคือ การสกัดด้วย MEF ภายใต้ความดันที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 14.58 V/cm เป็นเวลา 75 นาทีและที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 23.00 V/cm เป็นเวลา 30 นาที ($p>0.05$) ส่วนสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดสารแอนโทไซยานินคือ การสกัดด้วย MEF ภายใต้ความดันความเข้มสนามไฟฟ้า 6.15 V/cm ที่เวลา 120 นาที ($p<0.05$) แต่อย่างไรก็ตามเมื่อใช้ความเข้มสนามไฟฟ้าที่สูงเป็นเวลานานอาจส่งผลให้สารต้านอนุมูลอิสระในรำข้าวเกิดการสลายบางส่วนได้จากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.ศศิธร ตรงจิตภักดี อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำการค้นคว้าข้อมูล และขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่สนับสนุนทุนในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

Chen, X.Q., N. Nagao, T. Itani and K. Irifune. 2012. Anti-oxidative analysis, and identification and quantification of anthocyanin pigments in different coloured rice. **Food Chemistry** 135: 2783-2788.

Giusti, M.M. and R.E. Wrolstad. 2005. Characterization and measurement of anthocyanins by UV-visible spectroscopy, pp. 19-31. *In* R. E. Wrolstad, T. E. Acree, E. A. Decker, M. H. Penner, D. S. Reid, S. J. Schwartz, C. F. Shoemaker, D. Smith and P. Sporns, eds. Handbook of food analytical chemistry: Pigments, colorants, flavors, texture, and bioactive food components. Wiley-Interscience, Hoboken, New Jersey.

Kotovicz, V. and E.F. Zanoelo. 2013. Hydrostatic pressure cycling extraction of soluble matter from mate leaves. **Journal of Food Engineering** 116: 656-665.

Madhujith, T. and F. Shahidi. 2009. Antioxidant potential of barley as affected by alkaline hydrolysis and release of insoluble-bound phenolics. **Food Chemistry** 117 (2009) 615–620

Polyphenols AS. n.d. **Cyanidin 3-glucoside and Peonidin 3-glucoside** . Available Source: http://polyphenols.com/products/category111.html , November 2, 2018

Puértolas, E., N. López, G, Saldaña, I. Álvarez and J. Raso. 2010. Evaluation of phenolic extraction during fermentation of red grapes treated by a continuous pulsed electric fields process at pilot-plant scale. **Journal of Food Engineering** 98: 120-125.

Sarkis, J.R., D.P. Jaeschke, I.C. Tessaro and L.D.F. Marczak. 2013. Effects of ohmic and conventional heating on anthocyanin degradation during the processing of blueberry pulp. **Food Science and Technology** 51: 79-85.

Sensoy and S.K. Sastry. 2004. Extraction using moderate electric fields. **Journal of Food Engineering and Physical Properties** 69(1): 7-13.

Shao, Y., F. Xu, X. Sun, J. Bao and T. Bet. 2014. Phenolic acids, anthocyanins, and antioxidant capacity in rice (*Oryza sativa* L.) grains at four stages of development after flowering. **Food Chemistry** 143 (2014) 90–96

Silva, E.M., H. Rogez and Y. Larondelle. 2007. Optimization of extraction of phenolics from Inga edulis leaves using response surface methodology. **Separation and Purification Technology** 55 (2007) 381–387

Singleton, V.L., R. Orthofer and R.M. Lamuela-Raventos. 1999. Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidant by means of Folin–Ciocalteu reagent. **Method in Enzymology** 299: 152–178.

Wang, W., J. Jung, E. Tomasino and Y. Zhao. 2016. Optimization of solvent and ultrasound-assisted extraction for different anthocyanin rich fruit and their effects on anthocyanin compositions. **Food Science and Technology** 72: 229-238

การเพิ่มการรอดชีวิตของจุลินทรีย์โพรไบโอติกในน้ำสับปะรดโดยวิธีการห่อหุ้มด้วยแอลจิเนต

The Enhancement of The Probiotic Viability in Pineapple Juice by using Alginate Encapsulation

ไกลกว่า วุฒิเสน[1*] ณัฏฐา เลาหกุลจิตต์[1] อรพิน เกิดชูชื่น[1] และ รัตติยา แววนุกูล[1]

Kaikwa Wuttisan[1*], Nutta Laohakunjit[1], Orapin Kerdchoechuen[1] and Rattiya Weanukul[1]

บทคัดย่อ

จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาการรอดชีวิตของจุลินทรีย์โพรไบโอติก สายพันธุ์ *Lactobacillus casei* ในน้ำสับปะรดร่วมกับการเพิ่มพรีไบโอติกับการห่อหุ้มด้วยแอลจิเนต เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกาแลกโตโอลิโกแซคคาร์ไรด์ (GOS) และ ฟรุตโตโอลิกโกแซคคาไรด์ (FOS) และน้ำสับปะรด โดยเพิ่มปริมาณความเข้มข้นเป็นร้อยละ 0.5, 1.0 และ 1.5 โดยมวลต่อปริมาตร พบว่า ความเข้มข้น ของ FOS ที่ร้อยละ 1.5 โดยมวลต่อปริมาตร สามารถเพิ่มอัตราการรอดชีวิตได้สูงที่สุด คิดเป็นร้อยละ 22 ของปริมาณเชื้อเริ่มต้น จากนั้นนำผลดังกล่าวมาร่วมกับเทคนิคการห่อหุ้มด้วยนำโพรไบโอติมาห่อหุ่มด้วยโซเดียมอัลจิเนต (SA) โดยใช้ความเข้มข้นของ SA เป็น 1.5% w/v เพื่อหาอัตราส่วนของ FOS, GOS และน้ำสับปะรดที่เหมาะสม (1:0.5, 1:1 และ 1:2 v/v) พบว่าอัตราส่วนของ FOS ต่อ น้ำสับปะรดที่เหมาะสมในการรักษาจำนวนโพรไบโอติกมีชีวิตโดยให้ค่าการรอดชีวิตการรอดชีวิตสูงสุดเป็น 93.57% ของเชื้อเริ่มต้น และขนาดของอนุภาค SA ที่ห่อหุ้มโพรไบโอติกที่ได้มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยตั้งแต่ 2 ถึง 2.2 mm

ABSTRACT

The aim of this research was to study the probiotic viability of *Lactobacillus casei* in pineapple juice combined with increasing of prebiotic and encapsulation by sodium alginate (SA). The addition of galacto-oligosaccharides (GOS) and fructo-oligosaccharides (FOS) concentrations were increased to 0.5, 1.0 and 1.5% w/v. The FOS concentration was 1.5% w/v detended highest survival viability of microorganism with resistance 22% of initial amount of microorganism. The encapsulation fetching was evalvated to improve the preventing of survival cell. The ratios between of FOS and pineapple juice were 1:0.5, 1:1 and 1:2 v/v to initial amount cell. The highest survival ability to cell was 93.57% when using the mixture ratio of FOS and pineapple is 1:0.5 combine 2% SA in encapsulation. The size of sphere diameter that encapsulation probiotic average from 2 to 2.2 mm.

Key Words: probiotic, prebiotic, pineapple, alginate

* Corresponding author: e-mail address: Kimhyeson1313@gmail.com

[1]ภาควิชาเทคโนโลยีชีวเคมี คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ 10150

[1]Department of Biochemical Technology, Faculty of School of Bioresources and Technology, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10150

คำนำ

ปัจจุบันคนส่วนใหญ่ได้ให้ความสนใจเรื่องอาหารเพื่อสุขภาพ (functional food) เป็นอย่างมาก เนื่องจากเชื่อว่าช่วยให้สุขภาพแข็งแรงและช่วยป้องกันโรคต่างๆ รวมทั้งโรคมะเร็งได้ ซึ่งทั้งโพรไบโอติก (probiotic) และพรีไบโอติก (prebiotic) จัดเป็นอาหารสุขภาพ ซึ่งโพรไบโอติก คือ จุลินทรีย์ประจำถิ่น (normal flora) ในลำไส้ใหญ่ของมนุษย์ เป็นจุลชีพที่มีชีวิต มีประโยชน์ต่อร่างกาย (Gibson *et al*.,1995) เช่น ลดจำนวนของแบคทีเรียที่ก่อโรค กำจัดสารพิษต่างๆ และสารก่อมะเร็ง ช่วยสร้างภูมิคุ้มกันต้านทานโรค โดยเฉพาะโรคติดเชื้อระบบทางเดินอาหาร ช่วยสร้างและช่วยการดูดซึมวิตามินและเกลือแร่หลายชนิด เช่น วิตามิน เค (ช่วยการแข็งตัวของเลือด) และวิตามิน บี และอาจช่วยลดการดูดซึมไขมันโคเลสเตอรอล (cholesterol) ปัจจุบันจุลินทรีย์ที่มีคุณสมบัติเป็นโพรไบโอติกและเป็นที่ยอมรับ ได้แก่ แลคโตบาซิลลัส (Lactobacillus) (Salminen *et al*., 1998) จุลินทรีย์เหล่านี้มีความปลอดภัยต่อการบริโภคของมนุษย์ มีการเหลือรอดในระบบทางเดินอาหาร และมีผลต่อการยับยั้งจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรค เช่น *Lactobacillus* sp. สามารถยับยั้ง *Staphylococcus aureus*, *Bacillus cereus* และ *Clostridium botulinum* (Suskovic *et al*., 2001 ; Vasiljevic *et al*., 2008) เป็นต้น แต่เมื่อผ่านกระบวนการผลิตส่งผลให้จโพรไบโอติกที่มีในผลิตภัณฑ์อาหารต่างๆ มีปริมาณลดน้อยลง เนื่องจากโพรไบโอติกในอาหารไม่ทนต่อสภาวะแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ pH อากาศ เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการรอดชีวิตของจุลินทรีย์ นอกจากนี้ในสภาวะปกติในกระเพาะอาหารมีความเป็นกรดสูง ส่งผลให้โพรไบโอติกมีจำนวนลดน้อยลง (Krasaekoopt *et al*.,2014); Deeth *et al*.,2003) วิธีการเพิ่มการรอดชีวิตของโพรไบโอติกโดยการเติมพรีไบโอติกเป็นอาหารเรียกว่า ซินไบโอติก ในการผลิตผลิตภัณฑ์ซินไบโอติกที่เป็นพรีไบโอติกทำงานร่วมกับโพรไบโอติก เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะทางกายภาพและทางประสาทสัมผัสที่ดี และปริมาณเชื้อโพรไบโอติกที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์ในปริมาณที่เหมาะสมนั้นเป็นสิ่งสำคัญ แต่การเสริมโพรไบโอติกลงในผลิตภัณฑ์ มักประสบปัญหา เนื่องจากโพรไบโอติกที่เสริมลงไปมีอัตราการเจริญต่ำหรือไม่สามารถอยู่รอดได้ในกระบวนการผลิตหรือการเก็บรักษา (Gibson *et al.,*1995) มีรายงานถึงการเพิ่มการอยู่รอดของโพรไบโอติก เช่น การเติมน้ำผลไม้ ได้แก่ สับปะรด ส้ม และทับทิม เป็นต้น การเติมน้ำผลไม้ลงไปในผลิตภัณฑ์ เป็นแนวทางหนึ่งในการส่งเสริมและเพิ่มอัตราการอยู่รอดของโพรไบโอติกที่สูงขึ้น (Gibson *et al*.,1995) เนื่องจากในน้ำผลไม้มีน้ำตาลสูงที่เป็นแหล่งคาร์บอนให้แก่โพรไบโอติก โพรไบโอติกจึงมีอัตราการอยู่รอดที่สูงขึ้นในกระบวนการผลิต นอกจากนี้ยังเป็นการเพิ่มกลิ่นและสารที่มีคุณค่าทางโภชนาการให้แก่ผลิตภัณฑ์ได้อีก ดังนั้นน้ำผลไม้เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการนำมาเพิ่มการรอดชีวิตหรือที่เรียกว่าซินไบโอติก แต่ทั้งนี้ในการผลิตซินไบโอติกส่วนมากนั้นมักอยู่ในรูปของของเหลว ซึ่งไม่สะดวกต่อการนำไปใช้งาน ไม่เอื้ออำนวยต่อการขนส่งและอาจสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการ อีกทั้งจุลินทรีย์ไม่ทนต่ออุณหภูมิสูง ส่งผลให้จำนวนโพรไบโอติกลดจำนวนลงในระหว่างการเก็บรักษา เทคนิคในการห่อหุ้มโซเดียมแอลจิเนต พบว่า *Bicillus pseudolongum* ที่ถูกห่อหุ้มสามารถรอดชีวิตได้มากกว่าเซลล์อิสระที่ไม่ได้มีการห่อหุ้มด้วย cellulose acetate phthalate นอกจากนี้ Krasaekoopt *et al.(*2003) นำแอลจิเนตเพื่อห่อหุ้ม *L. acidophilus* และ *L. casei* แล้วนำไปเติมลงในผลิตภัณฑ์ โยเกิร์ต และ น้ำผลไม้ พบว่า จุลินทรีย์ทั้งสองสายพันธุ์มีอัตราการ

รอดชีวิตเมื่อเทียบกับจุลินทรีย์เซลล์ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการห่อหุ้มด้วยแอลจิเนต ส่งผลให้เพิ่มอัตราการรอดชีวิตของจุลินทรีย์ในผลิตภัณฑ์มากขึ้น

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มการรอดชีวิตของโพรไบโอติกร่วมกับพรีไบโอติกร่วมและน้ำสับปะรด รวมทั้งการห่อหุ้มด้วยแอลจิเนต

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมหัวเชื้อแบคทีเรีย

นำเชื้อแบคทีเรีย *Lactobacillus casei* ลงในอาหารเหลวเลี้ยงเชื้อ De Man Rogosa and Sharpe (MRS) ปริมาตร 50 มิลลิลิตร บ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำมาเขี่ยบนอาหารแข็ง MRS เพื่อให้ได้โคโลนีเดี่ยวที่บริสุทธิ์ เมื่อได้โคโลนีเดี่ยวลงในอาหารเหลว MRS ปริมาตร 4 มิลลิลิตร บ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นดูด cell suspension ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง ขนาด 1.5 มิลลิลิตร ที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้ว นำมาปั่นเหวี่ยงแยกเซลล์ที่ความเร็ว 8,500 g ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 4 นาที ล้างตัวเซลล์ด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 0.85 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

การศึกษาชนิดพรีไบโอติกต่อการรอดชีวิตของจุลินทรีย์โพรไบโอติก

นำเชื้อ *Lactobacillus casei* เติมลงอาหารที่มีส่วนผสมของ กาแลกโตโอลิโกแซคคาร์ไรด์ และ ฟรุตโตโอลิกโกแซคคาไรด์ และ น้ำสับปะรด ที่ความเข้มข้น ร้อยละ 0, 0.5, 1.0 และ 1.5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร บ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส จากนั้นเก็บตัวอย่างทุกๆ 6 ชั่วโมง จนครบเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อหาปริมาณการตอบสนองระหว่างแบคทีเรียโพรไบโอติกกับพรีไบโอติก โดยการทำ spread plate บนอาหารแข็ง MRS ทำการทดลอง 2 ซ้ำ คำนวณค่าการอยู่รอด ดังสมการ

$$\text{ค่าการรอดชีวิต(CFU/ml)} = \frac{\Sigma c}{(v1n1+0.1n2)d}$$

โดย Σc = *ผลรวมของโคโลนีที่นับได้ทั้งหมดจากจานเพาะเชื้อที่นับได้ในช่วง* 25-250*โคโลนี*

V_1 = *ปริมาตรของสารละลายที่ใช้ในการเพาะเชื้อ*

n_1 = *จำนวนจานเพาะเชื้อที่ยับได้ในช่วง* 25-250 *โคโลนี ในระดับความเข้นข้นแรก*

n_2 = *จำนวนจานเพาะเชื้อที่ยับได้ในช่วง* 25-250 *โคโลนี ในระดับความเข้นข้นที่* 2

d = *ระดับความเข้นข้นแรกที่สามารถนับเชื้อได้ในช่วง* 25-250 *โคโลนี*

การศึกษาการหุ้มโพรไบโอติกและพี่ไบโอติกด้วยแอลจิเนต

นำ *Lactobacillus casei* ลงอาหารเลี้ยงเชื้อ MRS ปริมาตร 50 มิลลิลิตร นำมาปั่นเหวี่ยงแยกเซลล์ที่ความเร็ว 10,000 g จากนั้นเทของเหลวทิ้ง แล้วล้างเซลล์ด้วยสารละลาย peptone 0.1 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักต่อปริมาณ จำนวน 2 ครั้ง จากนั้นทำการเติมพรีไบโอติก 5 มิลลิลิตร พรีไบโอติกที่ใช้คือ 1.5% FOS , 1.5% GOS และ น้ำสับปะรด โดยมีอัตราส่วนของ ของ FOS 2%, FOS ต่อ สับปะรด ที่อัตราส่วน 1:1, 1:2 และ 2:1 และ GOS 1.5%, GOS ต่อ สับปะรด ที่อัตราส่วน 1:1, 1:2 และ 2:1จากนั้นเติม sodium alginate 2 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 20 มิลลิลิตร นำไปเขย่าบน vortex ให้เป็นเนื้อเดียวกัน แล้วหยดสารละลายของซินไบโอติก ที่รวมกับ sodium algenate 2 เปอร์เซ็นต์ หยดลงใน แคลเซียมคลอไรด์ 0.05 โมลาร์ เป็นเวลา 30 นาที นำมาศึกษาการรอดชีวิต (Claudai, 2014)

ศึกษาการวัดขนาดของเม็ดบีดส์

นำเม็ดบีดส์มาวัดด้วยเครื่อง เวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ ยี่ห้อ mitutoyo จำนวน 10 เม็ด แล้วบันทึกผลการทดลอง

การนับจำนวนแบคทีเรียซินไบโอติกที่ผ่านการห่อหุ้มเซลล์

ชั่งเม็ดเจลซินไบโอติก 1 กรัม เติมสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ พีเอช 8.0 ปริมาตร 9 มิลลิลิตร นำไปเขย่าบน vortex ที่ระดับสูงสุด เป็นเวลา 20 นาที จนกระทั่งมีการละลายของเม็ดเจลทั้งหมด แล้วเจือจาง suspension ของเซลล์ที่ได้แบบ serial ten - fold dilution ด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.85 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักต่อปริมาตร เจือจางได้ระดับความเข้มข้นที่เหมาะสม นับจำนวนเซลล์ในเม็ดเจล โดยเทคนิคการทำ spread plate ด้วยอาหาร MRS agar บ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง รายงานผลการรอดชีวิตของเชื้อจุลินทรีย์เป็น log CFU ต่อมิลลิลิตร

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลของโอลิโกแซคคาไรด์และน้ำสับปะรดต่อการอยู่รอดของเชื้อโพรไบโอติก

จากการศึกษาการเพิ่มจำนวนของโพรไบโอติกโดยการเพิ่มพรีไบโอติกทำให้ *L. casei* มีการรอดชีวิตมากขึ้น โดย FOS, GOS และ น้ำสับปะรด พบว่า อัตราการเจริญของแบคทีเรีย *L. casei* มีอัตราการเจริญสูงขึ้นเมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นของพรีไบโอติก พรีไบโอติกสามารถเพิ่มอัตราการรอดชีวิตของโพรไบโอติกได้สอดคล้องกับ Gibson และ Roberfroid (1995) เมื่อเพิ่มพรีไบโอติกสามารถเพิ่มอัตราการรอดชีวิตของแบคทีเรียโพรไบโอติกได้สูงขึ้น โดยพรีไบโอติกชนิด FOS สามารถเพิ่มอัตราการอยู่รอดของ *L. casei* ได้สูงกว่า พรีไบโอติกชนิด GOS และ น้ำสับปะรด ที่เวลา 24 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้น 1.5 เปอร์เซ็นต์ (ตารางที่ 1) เนื่องจากในพรีไบโอติกชนิด FOS มีโครงสร้างที่ประกอบด้วยกลูโคส และฟรุคโตสต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิก (glycosidic) โดยกลูโคสจับกับฟรุคโตสที่ตำแหน่ง α 1-2 และฟรุคโตสจับกับฟรุคโตสในลำดับถัดมาที่ตำแหน่ง β 2-1 ซึ่งอยู่

บริเวณปลายสายจึงส่งผลให้โพรไบโอติกสามารถย่อยสลายและสามารถนำโมเลกุของน้ำตาลไปใช้ในกระบวนการเจริญเติบโตได้มากกว่าพรีไบโอติกชนิด GOS ซึ่งเป็นพรีไบโอติกชนิด กาแลคโตโอลิโกแซคคาไรด์ มีองค์ประกอบโครงสร้างของ Glu α 1-4[β-Gal 1-6]n ซึ่งเป็นโมเลกุลของน้ำตาลกลูโคสกับน้ำตาลกาแลกโตส แต่มีขนาดใหญ่กว่าน้ำตาลฟรุตโตสใน FOS จึงส่งผลให้อัตราการเจริญใน FOS สูงกว่าทั้ง GOS และน้ำสับปะรด (Thammarutwasik *et al*, 2009)

Table 1 Number of survival cell of *L.casei* cell with and without prebiotic and pineapple

Probiotic	Prebiotic	Conc. (%)	Number of cell (log CFU/ml)				
			0 hr.	6 hr.	12 hr.	18 hr.	24 hr.
L.casei	Control	0	7.63 ± 0.2	8.15 ± 0.3	8.12 ± 0.5	8.06 ± 0.2	8.02 ± 0.2
	FOS	0.5	7.78 ± 0.1	8.15 ± 0.4	9.30 ± 0.3	9.67 ± 0.4	9.54 ± 0.1
		1	7.85 ± 0.2	8.18 ± 0.3	9.41 ± 0.1	9.69 ± 0.3	9.68 ± 0.3
		1.5	7.88 ± 0.4	8.23 ± 0.4	9.47 ± 0.2	9.88 ± 0.4	9.80 ± 0.3

Probiotic	Prebiotic	Conc. (%)	Number of cell (log CFU/ml)				
			0 hr.	6 hr.	12 hr.	18 hr.	24 hr.
L.casei	Control	0	7.56 ± 0.2	8.00 ± 0.1	8.05 ± 0.2	8.06 ± 0.1	8.06 ± 0.1
	GOS	0.5	7.72 ± 0.3	8.04 ± 0.1	8.08 ± 0.1	8.06 ± 0.1	8.09 ± 0.2
		1	7.75 ± 0.3	8.12 ± 0.1	8.15 ± 0.1	8.21 ± 0.3	8.54 ± 0.2
		1.5	7.79 ± 0.4	8.17 ± 0.2	8.32 ± 0.1	8.40 ± 0.4	8.58 ± 0.3
	Control	0	7.59 ± 0.5	8.02 ± 0.2	8.07 ± 0.3	8.17 ± 0.3	8.05 ± 0.1
	pineapple	0.5	7.74 ± 0.1	8.08 ± 0.3	8.56 ± 0.3	8.01 ± 0.3	8.34 ± 0.1
		1	7.78 ± 0.2	8.17 ± 0.1	8.26 ± 0.4	8.32 ± 0.2	8.72 ± 0.2
		1.5	7.82 ± 0.1	8.21 ± 0.3	8.31 ± 0.2	8.67 ± 0.4	8.80 ± 0.3

ผลต่อกระบวนการผลิตซินไบโอติกด้วยเทคนิกการห่อหุ้มด้วยแอลจิเนต

เมื่อนำแบคทีเรียโพรไบโอติกสายพันธุ์ *L. casei* มาห่อหุ้มด้วยแอลจิเนต ที่ความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับพรีไบโอติก 2 ชนิด คือ FOS และ GOS มีความเข้มข้นร้อยละ 1.5 อัตราส่วนน้ำสับปะรดที่ 1:0.5, 1:1 และ 1:2 ตามลำดับ พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของพรีไบโอติกให้กับแบคทีเรียโพรไบโอติก ส่งผลให้อัตราการรอด

ชีวิตเพิ่มขึ้น และนอกจากนั้นเมื่อเติมน้ำสับปะรดให้กับจุลินทรีย์โพรไบโอติกยังสามารถเพิ่มอัตราการรอดชีวิตให้กับจุลินทรีย์โพรไบโอติกได้ สอดคล้องกับการรายงานของ Krasaekoopt และ คณะ (2014) เมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของพรีไบโอติกให้กับแบคทีเรียโพรไบโอติกส่งผลให้แบคทีเรียโพรไบโอติกมีอัตราการรอดชีวิตมากขึ้น จากการศึกษาการห่อหุ้มด้วยแอลจิเนต อัตราการรอดชีวิตของจุลินทรีย์โพรไบโอติกยังมีอัตราการรอดที่ลดลงเมื่อเทียบกับเซลล์เริ่มต้น (Table 2) เนื่องจากในระหว่างกระบวนการห่อหุ่มเซลล์ด้วยแอลจิเนต เซลล์มีการสัมผัสกับอากาศ ส่งผลให้เซลล์บางส่วนเกิดการตายระหว่างการห่อหุ้ม นอกจากนี้ขนาดอนุภาคและการกระจายตัวของอนุภาคในเม็ดเจลที่ใช้ในการห่อหุ้ม ยังมีผลต่ออัตราการรอดชีวิตของจุลินทรีย์ พบว่ามีขนาดอยู่ระหว่าง 2.0 – 2.2 มิลลิเมตร ซึ่งเม็ดเจลที่มีขนาดใหญ่ส่งผลให้แบคทีเรียโพรไบโอติกมีโอกาสรอดชีวิตสูงกว่าเม็ดบีดส์ที่มีขนาดเล็ก ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Chandramouli *et al.* (2004) พบว่า ขนาดของเม็ดบีดส์มีผลต่ออัตราการรอดชีวิตของเชื้อจุลินทรีย์โพรไบโอติก โดยถ้าขนาดเม็ดบีดส์มีขนาดใหญ่สามารถบรรจุสารที่ช่วยเพิ่มการอยู่รอดให้กับจุลินทรีย์ได้มากกว่าเม็ดบีดส์ขนาดเล็ก และสามารถเพิ่มอายุการเก็บรักษาของจุลินทรีย์ได้มากกว่าอีกด้วย แต่การเพิ่มความเข้มข้นของพรีไบโอติกไม่ได้มีผลต่อขนาดของเม็ดบีดส์ เนื่องจากโพรไบโอติกและพรีไบโอติกร่วมเป็นเนื้อเดียวกันทำให้ความเข้มข้นของพรีไบโอติกไม่ได้ส่งผลต่อขนาดของเม็ดบีดส์ ดังนั้นความเข้มข้นของพรีไบโอติกจึงไม่ได้มีผลต่อขนาดของเม็ดบีดส์

Table 2 Number of survival cell of *L. casei* cell with and without prebiotic per pineapple

Probiotic	Prebiotic	Prebiotic:Pineapple	Number of cell (log CFU/ml)		% Resistance	Size of beads (mm)
			Before	After		
L.casei	Control	1:0	9.98 ± 0.3	8.14 ± 0.2	81.56	2.0
	GOS	1:0.5	9.86 ± 0.5	8.94 ± 0.3	90.67	2.1
		1:1	9.62 ± 0.6	8.77 ± 0.5	91.16	2.1
		1:2	9.56 ± 0.7	8.86 ± 0.3	92.68	2.2
	Control	1:0	9.98 ± 0.2	8.47 ± 0.5	84.87	2.0
	FOS	1:0.5	10.28 ± 0.3	9.62 ± 0.4	93.57	2.2
		1:1	9.76 ± 0.1	8.94 ± 0.7	91.56	2.2
		1:2	10.52 ± 0.5	9.73 ± 0.2	92.51	2.1

สรุป

การเติมพรีไบโอติกให้กับจุลินทรีย์โพรไบโอติกส่งผลให้อัตราการเจริญของจุลินทรีย์โพรไบอิกสามารถเจริญได้และมีอัตราการเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้นข้นของพรีไบโอติก และพบว่าพรีไบโอติกชนิด FOS ส่งผลต่อการเจริญของโพรไบโอติกสายพันธุ์ *L. casei* ได้ดีที่สุด นอกจากนี้อัตราส่วนในการเติมพรีไบโอติกต่อน้ำสับปะรด พบว่า อัตราส่วนที่เหมาะสมต่อการเจริญของจุลินทรีย์มากที่สุดคือ อัตราส่วน 1:2 และขนาดเม็ดบีดส์ที่มีขนาดใหญ่ส่งผลให้อัตราการเจริญเพิ่มขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี มหาวิทยาเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี วิทยาเขตบางขุนเทียน

เอกสารอ้างอิง

Barreteau, H., Delattre, C. and Michaud, P. 2006. Production of oligosaccharides as promising new food additive generation. **Journal of Food Technology and Biotechmology**. 44: 323-333.

Bielecka, M., Biedrzycka, E. and Majakowska, A. 2002. Selection of probiotics and prebiotics for synbiotics and confirmation of their in vivo effectiveness. **Food Research International**. 35: 125-131.

Campbell, J.M., Fahey, G.C. and Wolf, B.W. 1997. Selected indigestible oligosaccharides affect large bowel mass, cecal and fecal short-chain fatty acids, pH and microflora in rats. **The Journal of Nutrition**. 127: 130-136.

Chuang, L., Wu, H.G., Pai, C., Hsieh, P.S., Tsai, J.J., Yen, J.H. and Lin, M.Y. 2007. Heat-killed cells of *Lactobacilli* skew the immune response toward T helper 1 polarization in mouse splenocytes and dendritic cell-treated T cells. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. 11080-11086.

Duangjitcharoen, Y., Kantachote, D., Ongsakul, M., Poosaran, N. and Chaiyasut, C. 2009. Potential use of probiotic *Lactobacillus plantarum* SS2 isolated from a fermented plant beverage: safety assessment and persistence in the murine gastrointestinal tract. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**. 25: 315-321.

Schrezenmeir, J. and de Vrese, M. 2001. Probiotics, prebiotics, and synbiotics - approaching a definition. **The American Journal of Clinical Nutrition**. 73: 361-364.

Terada, A., Hara, H., Kataoka, M. and Mitsuoka, T. 1992. Effect of lactulose on the composition and metabolic activity of the human faecal flora. **Microbial Ecology in Health and Disease**. 5: 43-50.

Zampa, A., Silvi, S., Fabiani, R., Morozzi, G., Orpiansri, C. and Cresi, A. 2004. Effects of different digestible carbohydrates on bile acid metabolism and SCFA production by human gut micro-flora grown in an in vitro semi-continuous culture. **Journal of Anaerobe**. 10: 19-26.

สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

Subject: Natural Resources and Environment

ภาคบรรยาย

Oral Presentation



KU
KASETSART
UNIVERSITY

ปริมาณธาตุอาหารหลักของพืชในปุ๋ยหมักที่ผลิตจากตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปาร่วมกับขยะอินทรีย์

Macronutrient Quantity of Plant in Compost from Waterworks Soil Sludge Combination with Organic Waste

นนทพร ประเสริฐกุล[1*] วัชรพงษ์ วาระรัมย์[1] อรอนงค์ ผิวนิล[1] และ ธนิศร์ ปัทมพิฑูร[1]

Nontaporn Prasertkul[1*], Watcharapong Wararam[1], Onanong Phewnil[1] and Thanit Pattamapitoon[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการใช้ประโยชน์จากตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปาร่วมกับขยะอินทรีย์ โดยวางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) ทำการหมักปุ๋ยจากตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปาและขยะอินทรีย์ 4 อัตราส่วน คือ 1:1, 1:2, 2:1 และชุดควบคุม ตามลำดับ จำนวนหน่วยทดลองละ 3 ซ้ำ เก็บตัวอย่างปุ๋ยหมักภายหลังการย่อยสลายสมบูรณ์ที่ระยะเวลา 35 วัน โดยวิเคราะห์หาปริมาณธาตุอาหารหลักของพืช ได้แก่ ไนโตรเจนทั้งหมด (Total N) ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (P_2O_5) และโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ (K_2O_5) พบว่าปริมาณธาตุอาหารหลักของพืชในปุ๋ยหมักแต่ละอัตราส่วนมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) โดยปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ และโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ พบมากที่สุดในปุ๋ยหมักที่มีอัตราส่วนของตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปาและขยะอินทรีย์ 1:2 มีปริมาณร้อยละ 0.670, 0.006 และ 0.020 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ที่กำหนดไว้ในพระราชบัญญัติปุ๋ย พ.ศ. 2548 พบว่า ปุ๋ยหมักในอัตราส่วนที่ดีที่สุดมีปริมาณธาตุอาหารหลักต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ดังนั้นปุ๋ยหมักที่ได้จากตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปาร่วมกับขยะอินทรีย์จึงเหมาะสมนำไปใช้ประโยชน์เป็นวัสดุปลูกเพื่อเพิ่มปริมาณธาตุอาหารหลักให้กับพืช

ABSTRACT

This research aimed to study on utilization of waterworks soil sludge combination with organic waste. The experiments was designed Completely Randomized Design (CRD), 4 treatments as waterworks soil sludge and organic waste in ratio 1:1, 1:2, 2:1 and control with 3 replications. Compost samples were collected when completed decomposing stage at 35-day age. Macronutrients in compost from waterworks soil sludge mixed with organic waste were determination in term of total nitrogen (Total N), available phosphorus (P_2O_5), and exchangeable potassium (K_2O_5). The results that found macronutrients in treatments were highly significant difference ($P<0.05$). Total N, P_2O_5 and K_2O_5 contents in compost from waterworks soil sludge and organic waste in ratio of 1:2 were 0.670, 0.006 and 0.020 percent, respectively. However, the result of macronutrients were lower than standard of organic compost follow by fertilizer act in year 2005. Conclusion the compost from waterworks soil sludge and organic waste could be used for adding macronutrient as growing medium to plant.

Key Words: Plant Macronutrient, Compost, Waterworks Soil Sludge, Organic Waste

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

[1]ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

คำนำ

กระบวนการผลิตน้ำประปาจากแหล่งน้ำธรรมชาติมีการผลิตในแต่ละวันเป็นจำนวนมาก เพื่อให้ได้มาซึ่งความสะอาด ปลอดภัย และคุณภาพน้ำใช้ที่ดี กรรมวิธีในการผลิตจะต้องได้มาตรฐาน โดยระบบผลิตน้ำประปาทั่วไปสำหรับน้ำผิวดินที่เป็นวัตถุดิบ มักจะมีตะกอนที่เกิดจากกระบวนการตกตะกอนด้วยสารเคมีเสมอ ซึ่งตะกอนของระบบผลิตน้ำประปาส่วนใหญ่เกิดจากกระบวนการตกตะกอนด้วยสารส้ม มีการระบายออกจากถังตกตะกอนเป็นปริมาณมาก ก่อให้เกิดปัญหาในการกำจัดทั้งในแง่ของการขนส่งและการหาพื้นที่กำจัด (เพิ่มผล, 2546) โดยคุณสมบัติของตะกอนดินจากระบบผลิตน้ำประปา เป็นเนื้อตะกอนดินทรายร่วน (loamy sand) มีธาตุอาหารหลักของพืช ได้แก่ ไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) และโพแทสเซียม (K) อยู่ในระดับปานกลางถึงสูงเป็นส่วนใหญ่ รวมทั้งมีอินทรียวัตถุ (organic matter) อยู่ในระดับค่อนข้างสูง ส่งผลทำให้ตะกอนดินจากระบบผลิตน้ำประปามีความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนให้กับพืชได้เป็นอย่างดี และมีการระบายน้ำที่ดี ด้วยคุณสมบัติดังกล่าวหากมีการนำตะกอนจากระบบผลิตน้ำประปามาใช้ประโยชน์ในทางการเกษตรสามารถช่วยลดปริมาณของเสียและลดพื้นที่กำจัดได้ โดยการหมักทำปุ๋ยด้วยกระบวนการแปรสภาพของอินทรียวัตถุโดยอาศัยจุลินทรีย์ ที่มีอยู่ในธรรมชาติช่วยในการย่อยสลาย (ประภาพรรณ, 2548) ร่วมกับขยะอินทรีย์ที่มีแหล่งกำเนิดจากชุมชน ที่เป็นขยะย่อยสลายได้เร็ว ให้กลายเป็นวัสดุปรับสภาพดินที่มีธาตุอาหารพืชสูง สามารถใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของดินเพื่อใช้ประโยชน์ในการเพาะปลูกได้ จึงเป็นแนวทางหนึ่งในการลดปริมาณตะกอนดินและเพิ่มมูลค่าของของเสียที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อในภาคการเกษตรได้เป็นอย่างดี

อุปกรณ์และวิธีการ

วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

เตรียมตะกอนดินจากกระบวนการตกตะกอนของระบบผลิตน้ำประปาและดินนา โดยนำไปผึ่งแห้งในที่ร่ม 21 วัน แล้วทำการบดและร่วนผ่านตะแกรงให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 เซนติเมตร โดยทำการผสมรวมกับขยะอินทรีย์ขนาดประมาณ 1-2 เซนติเมตร เพื่อให้เกิดการย่อยสลายตัวได้เร็วขึ้น

แผนการทดลอง

วางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) จำนวน 3 ซ้ำ ที่ประกอบด้วยการหมักตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปาร่วมกับชั้นขยะอินทรีย์ 3 อัตราส่วน คือ 1:1 (T1), 1:2 (T2) และ 2:1 (T3) คิดเป็น 45:45, 30:60 และ 60:30 กิโลกรัมโดยน้ำหนัก และชุดควบคุมทำการหมักดินนาร่วมกับชั้นขยะอินทรีย์อัตราส่วน 1:2 (Control) คิดเป็น 30:60 กิโลกรัมโดยน้ำหนัก ตามลำดับ ในวงบ่อซีเมนต์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 เซนติเมตร สูง 80 เซนติเมตร ด้วยเทคโนโลยีกล่องคอนกรีตกำจัดขยะของโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ ทำการรดน้ำครั้งแรกที่กองปุ๋ยหมัก 2.5 ลิตร และรดน้ำครั้งละ 1.5 ลิตร ทุก 7 วัน ทิ้งไว้โดยไม่ต้องมีการกลับกองปุ๋ยจนการย่อยสลายภายในกองปุ๋ยหมักสมบูรณ์

การเก็บตัวอย่าง

ภายหลังปุ๋ยหมักย่อยสลายสมบูรณ์แล้วครบ 35 วัน นำปุ๋ยออกจากวงบ่อซีเมนต์ไปผึ่งแห้งในที่ร่มประมาณ 7-10 วัน สุ่มเก็บตัวอย่างปุ๋ยหมักในแต่ละอัตราส่วน อัตราส่วนละ 3 ซ้ำ ปริมาณ 500 กรัม แล้วนำมา

บดและร่อนด้วยตะแกรงร่อนดินขนาด 2 มิลลิเมตร เก็บตัวอย่างปุ๋ยหมักที่ได้ไว้ในถุงพลาสติกปิดสนิท เพื่อใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของปุ๋ยหมัก ได้แก่ ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ค่าการนำไฟฟ้า (EC) อินทรียวัตถุ (OM) และปริมาณธาตุอาหารหลักของพืช ได้แก่ ไนโตรเจนทั้งหมด (Total N) ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (P_2O_5) และโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ (K_2O_5) (Table 1) นำผลที่ได้วิเคราะห์ความแปรปรวน และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตามวิธี Duncan's multiple range test (ไมตรี, 2554)

Table 1 Parameters and methods of compost analysis

Parameters	Methods of analysis	Referent
pH	pH Meter	Li *et al*. (2012)
Electrical Conductivity, EC (dS/m)	EC Meter	Patcharee (2011)
Organic Matter, OM (%)	Walkley and Black	Conklin (2005)
Total Nitrogen, Total-N (%)	Kjeldahl	Conklin (2005)
Available Phosphorus, P_2O_5 (%)	Spectrophotometer molybdovanadate	Land Development Department (2010)
Exchangeable Potassium, K_2O_5 (%)	Atomic Absorption Spectrophotometer	Soil and Plant Analysis Council (2000)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

องค์ประกอบทางเคมีของตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปาและดินนา

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปา พบว่า เนื้อตะกอนดินเป็นดินทรายร่วน (loamy sand) มีสภาพความเป็นกรดเล็กน้อย โดยมีความเป็นกรด-ด่าง (pH) เท่ากับ 6.57 มีสภาพการนำไฟฟ้า (EC) เท่ากับ 2.50 mS/cm มีปริมาณอินทรียวัตถุ (OM) อยู่ในระดับค่อนข้างสูง ร้อยละ 3.48 มีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดอยู่ในระดับปานกลาง ร้อยละ 0.42 มีฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์อยู่ในระดับสูง เท่ากับ 28.61 มิลลิกรัม/กิโลกรัม มีปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้อยู่ในระดับสูงมาก เท่ากับ 139.00 มิลลิกรัม/กิโลกรัม (Table 2)

องค์ประกอบทางเคมีของดินนา พบว่า เนื้อดินเป็นดินร่วนเหนียว (clay loam) มีสภาพความเป็นกลาง โดยมีค่าค่า pH เท่ากับ 7.07 มีปริมาณอินทรียวัตถุอยู่ในระดับค่อนข้างต่ำ ร้อยละ 1.10 มีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด ร้อยละ 0.06 มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ และโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ เท่ากับ 1.94 และ 68.05 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ (Table 2)

Table 2 Chemical composition of waterworks soil sludge and paddy soil

Parameters	Waterworks soil sludge	Paddy soil
Soil texture	loamy sand	clay loam
EC (mS/cm)	2.50	0.30
pH	6.57	7.07
Organic Matter (%)	3.48	1.10
Total N (%)	0.42	0.06
Available-P (mg/kg)	28.61	1.94
Exchangeable K (mg/kg)	139.00	68.05

องค์ประกอบทางเคมีของปุ๋ยหมัก

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ค่าการนำไฟฟ้า (EC) อินทรียวัตถุ (OM) ของปุ๋ยหมักภายหลังการย่อยสลายสมบูรณ์แล้วที่ระยะเวลา 35 วัน (Table 3) พบว่า ปุ๋ยหมักทุกอัตราส่วนมีค่า pH อยู่ระหว่าง 6.88-7.30 และ EC อยู่ระหว่าง 1.24-3.40 dS/m เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ที่กรมวิชาการเกษตรได้กำหนดไว้ในพระราชบัญญัติปุ๋ย พ.ศ. 2548 ว่าปุ๋ยอินทรีย์ที่มีคุณภาพต้องมีค่า pH ระหว่าง 5.5-8.5 และมีค่า EC ไม่เกิน 6 dS/m โดยค่า pH และ EC ของปุ๋ยหมักสามารถใช้ในการบ่งบอกถึงความสมบูรณ์ของกระบวนการย่อยสลายอินทรีย์สาร (มณฑยา, 2546) โดยสารอินทรีย์จะถูกย่อยสลายอย่างสมบูรณ์ ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีอิออนเป็นองค์ประกอบ ก็ต่อเมื่อมีค่า pH อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์ ส่งผลทำให้มีค่า EC สูงตามไปด้วย แต่เนื่องจากค่า EC ขึ้นอยู่กับจำนวนอิออนในปุ๋ยหมักที่ได้ (Soil and Plant Analysis Council, 1999) ซึ่งในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศส่งผลให้มีค่า pH และ EC ต่ำ เนื่องจากปริมาณกรดอินทรีย์ในวัสดุหมักเพิ่มขึ้น รวมทั้งมีอิออนบางตัวหายไปอีกด้วย (Metcalf and Eddy, 1991) ในขณะที่ค่า OM พบมากที่สุดในปุ๋ยหมักจากตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปาและขยะอินทรีย์อัตราส่วน 1:2 (T2) มีค่าร้อยละ 7.38 เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมปุ๋ยหมักจากดินนาและขยะอินทรีย์ (Control) ที่มีค่าน้อยที่สุดร้อยละ 3.19 พบว่าแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่งสถิติ ($P<0.05$) เนื่องจากคุณสมบัติของตะกอนดินที่มีอินทรียวัตถุอยู่ในระดับค่อนข้างสูง (เอิบและคณะ, 2544) กว่าดินนา ส่งผลให้ร้อยละของอินทรียวัตถุในปุ๋ยภายหลังการหมักเพิ่มสูงขึ้นด้วย

Table 3 Chemical composition of compost from waterworks soil sludge combination with organic waste

Treatment	Ratio of soil: organic waste (kg by weight)	Parameters		
		pH	EC (dS/m)	OM (%)
T1	45:45 (1:1)	7.04b	1.24a	5.72a
T2	30:60 (1:2)	6.88a	3.10a	7.38c
T3	60:30 (2:1)	7.08ab	3.40a	4.87b
Control	30:60 (1:2)	7.30ab	2.86a	3.19b

Remark: xa = Significant at $P<0.05$

ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total N) ในปุ๋ยหมัก

ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total N) ของปุ๋ยหมักภายหลังการย่อยสลายสมบูรณ์แล้วที่ระยะเวลา 35 วัน (Table 4) พบว่า ปุ๋ยหมักจากตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปาและขยะอินทรีย์อัตราส่วน 1:2 (T2) มีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดมากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 0.670 รองลงมาในปุ๋ยหมักอัตราส่วน 1:1 (T1) และ 2:1 (T3) มีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดเท่ากัน คิดเป็นร้อยละ 0.590 และชุดควบคุมปุ๋ยหมักจากดินนาและขยะอินทรีย์อัตราส่วน 1:2 (Control) มีปริมาณร้อยละ 0.310 ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่งสถิติ เนื่องจากคุณสมบัติของตะกอนดินมีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดอยู่ในระดับปานกลาง ที่ส่งผลให้ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในปุ๋ยหน่วยทดลอง (T1-T3) สูงกว่าชุดควบคุม (Control) และปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดของปุ๋ยหมักยังเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณของขยะอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นในแต่ละอัตราส่วนด้วย

Table 4 Quantity of macronutrient of compost from waterworks soil sludge combination with organic waste

Treatment	Ratio of soil: organic waste (kg by weight)	Parameters		
		Total N (%)	P_2O_5 (%)	K_2O_5 (%)
T1	45:45 (1:1)	0.590a	0.003b	0.020a
T2	30:60 (1:2)	0.670c	0.006b	0.020a
T3	60:30 (2:1)	0.590b	0.003a	0.020a
Control	30:60 (1:2)	0.310b	0.008a	0.020a

Remark: xa = Significant at P<0.05

ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (P_2O_5) ในปุ๋ยหมัก

ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (P_2O_5) ของปุ๋ยหมักภายหลังการย่อยสลายสมบูรณ์แล้วที่ระยะเวลา 35 วัน (Table 4) พบว่า ปุ๋ยหมักจากตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปาและขยะอินทรีย์อัตราส่วน 1:2 (T2) มีปริมาณ P_2O_5 ร้อยละ 0.006 รองลงมาในปุ๋ยหมักอัตราส่วน 1:1 (T1) และ 2:1 (T3) มีปริมาณ P_2O_5 เท่ากัน ร้อยละ 0.003 น้อยกว่าชุดควบคุมปุ๋ยหมักจากดินนาและขยะอินทรีย์อัตราส่วน 1:2 (Control) มีปริมาณร้อยละ 0.008 อย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ เนื่องจากทั่วไปในดินธรรมชาติจะมีฟอสฟอรัสต่ำมาก เมื่อเทียบกับปริมาณไนโตรเจนและโพแทสเซียม โดยเฉลี่ยแล้วในดินมีฟอสฟอรัสเพียงร้อยละ 0.050 ดินชั้นบนของดินนาในประเทศไทยมีฟอสฟอรัสเฉลี่ยเพียงร้อยละ 0.02 (Yongyut, 2003) ในขณะที่ตะกอนดินจากระบบผลิตน้ำประปามีฟอสฟอรัสเฉลี่ยอยู่เพียงร้อยละ 0.001 (เอิบและคณะ, 2544) ซึ่งฟอสฟอรัสในดินมักสูญเสียไปจากดินได้โดยง่าย และมักอยู่ในรูปที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยมาก (ศุภมาศและคณะ, 2559) ส่งผลให้เมื่อวัสดุหมักดังกล่าวผ่านกระบวนการหมักแล้วทำให้ปุ๋ยหมักที่ได้มีค่า P_2O_5 อยู่ในระดับต่ำเมื่อเทียบกับมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ที่กรมวิชาการเกษตรได้กำหนดไว้ในพระราชบัญญัติปุ๋ย (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2550 ว่าปุ๋ยอินทรีย์ที่มีคุณภาพต้องมีค่า P_2O_5 ไม่น้อยกว่าร้อยละ 0.500

ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ (K_2O_5) ในปุ๋ยหมัก

ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ (K_2O_5) ของปุ๋ยหมักภายหลังการย่อยสลายสมบูรณ์แล้วที่ระยะเวลา 35 วัน (Table 4) พบว่า ปุ๋ยหมักทุกอัตราส่วนทั้งหน่วยทดลอง และควบคุม (Control) มีปริมาณ K_2O_5 ร้อยละ 0.020 ซึ่งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยการเปลี่ยนแปลงของปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้นั้น มาจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่มีการใช้โพแทสเซียมในการเจริญเติบโตและสร้างเซลล์ (Chalermchai et al., 2013) ซึ่งการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของปริมาณธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ในปุ๋ยหมักที่เวลาต่างๆ อาจเป็นผลมาจากอัตราการเกิดขบวนการ immobilization และ mineralization ของธาตุอาหารในปุ๋ยหมักได้ด้วยเช่นกัน (Sophie and Marstorp, 2002)

สรุป

จากการศึกษาปริมาณธาตุอาหารหลักของพืชในปุ๋ยหมักที่ผลิตจากตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปาร่วมกับขยะอินทรีย์ในอัตราส่วน 1:1, 1:2, 2:1 และชุดควบคุม พบว่า ปริมาณธาตุอาหารหลักของพืชในปุ๋ยหมักแต่ละอัตราส่วนมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยปุ๋ยหมักจากตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปาร่วมกับขั้นขยะอินทรีย์อัตราส่วน 30:60 กิโลกรัมโดยน้ำหนัก (1:2) มีปริมาณธาตุอาหารหลักของพืชมากที่สุด ได้แก่ ไนโตรเจนทั้งหมด ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ และโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ ร้อยละ 0.670, 0.006 และ 0.020 ตามลำดับ ต่ำกว่ามาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ที่กรมวิชาการเกษตรได้กำหนดไว้ในพระราชบัญญัติปุ๋ย พ.ศ. 2548 ที่มีค่าไนโตรเจนทั้งหมด ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ และโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ เท่ากับร้อยละ 1.0, 0.5 และ 0.5 ตามลำดับ ดังนั้นปุ๋ยหมักที่ผลิตจากตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปาร่วมกับขยะอินทรีย์นั้นจึงเหมาะสมเป็นเพียงวัสดุปลูกในทางการเกษตร มีธาตุอาหารหลักของพืชอยู่ในระดับหนึ่ง ที่มีคุณสมบัติสามารถต้านทานการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรดด่าง (buffer) ของดินปลูกได้เป็นอย่างดี

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ จังหวัดเพชรบุรี ที่สนับสนุนงบเอื้อเฟื้อสถานที่ในการดำเนินงานวิจัย ขอขอบคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่โครงการแหลมผักเบี้ยทุกท่านที่ได้มีส่วนร่วมอำนวยความสะดวกต่อการทำวิจัย รวมทั้งขอขอบคุณนิสิตระดับปริญญาโท รุ่น 40 ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่มีส่วนช่วยในการดำเนินงานวิจัยไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

กรมวิชาการเกษตร. 2548. **ประกาศกรมวิชาการเกษตรเรื่อง มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ พ.ศ. 2548**. 30 กันยายน 2548.

ประภาพรรณ ซื่อสัตย์. 2548. **การใช้ปุ๋ยหมักจากขยะชุมชนเทศบาลเมืองเพชรบุรีที่ผลิตด้วยเทคโนโลยีกล่องคอนกรีตเป็นวัสดุปลูกดาวเรือง**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ปิยะมาตร์ กิ่งพุ่ม. 2543. **การใช้ตะกอนดินน้ำประปาเป็นวัสดุปลูกทานตะวันกระถาง**. ปัญหาพิเศษปริญญาตรี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

เพิ่มผล กาญจนามัย. 2546. **การใช้ประโยชน์ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปาบางเขนในอุตสาหกรรมก่อสร้าง**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ไมตรี แก้วทับทิม. 2554. ปริมาณธาตุอาหารพืชในปุ๋ยอินทรีย์จากการหมักวัสดุอินทรีย์ต่างๆ. **ว.วิทย.กษ**. 42 (3/1): 479-482.

ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, ชัยสิทธิ์ ทองจู และแสงดาว เขาแก้ว. 2559. **มลพิษทางดิน**. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ

เอิบ เขียวรื่นรมณ์, อัญชลี สุทธิประการ, สุเทพ ทองแพ, พิบูลย์ กังแฮ, เสาวนุช ถาวรพฤกษ์, สมชัย อนุศนธิ์พรเพิ่ม, วิภาวรรณ ท้ายเมือง, ปริศนา เสือแซมเสริม และนฤมล จันทร์จิราวุฒิกุล. 2544. **การศึกษาคุณภาพของตะกอนแยกจากน้ำดิบของการประปานครหลวง เพื่อพัฒนาใช้ประโยชน์ทางการเกษตรกรรมและอุตสาหกรรม**. ภาคปฐพีวิทยา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

Conklin, A.R.Jr. 2005. **Introduction to Soil Chemistry: Analysis and Instrumentation**. Wiley, New Jersey.

Gunnarsson, S. and H. Marstorp. 2002. Carbohydrate composition of plant materials determines N mineralization. **Nutrient Cycling in Agro ecosystems**. 62: 175–183.

Land Development Department. 2000. **Analytical Handbook of Chemical Soil Analysis**. Ministry of Agriculture and Cooperatives, Bangkok, Thailand.

Li, R., J.J. Wang, Z. Zhang, F. Shen, G. Zhang, R. Qin, X. Li, R. Xiao. 2012. Nutrient Transformations during Composting of Pig Manure with Bentonite. **Bioresour Technol**. 121: 362–368.

Osatapa, Y. 2003. **Plant nutrient**. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture. Kasetsart University, Bangkok.

Paekum, C., M. Tittayavan and W. Nuangmek. 2013. **Screening of Enzymes Activities in Indigenous Microorganism for Water Hyacinth Degradation**. 29th National Graduate Research Conference: 1078-1083.

Soil and Plant Analysis Council. 1999. **Soil Analysis Handbook of Reference Method**. CRC Press, USA.

Soil and Plant Analysis Council. 2000. **Soil Analysis: Handbook of Reference Methods**. CRC Press, Boca Raton.

Theerajindakajon, P. 2011. **Handbook of Soil Chemical Analysis**. Khon Kaen University Press, Khon Kaen, Thailand.

ความเป็นไปได้ของการใช้ตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปาร่วมกับขยะอินทรีย์ทดแทนดินนาในการหมักปุ๋ยอินทรีย์ด้วยเทคโนโลยีกล่องคอนกรีต

Possibility of Waterworks Plant Sludge Instead of Paddy Soil for Making Compost from Organic Waste by Concrete Box Technology

พรภัสสร ศุขะพันธุ์[1*] วัชรพงษ์ วาระรัมย์[1] อรอนงค์ ผิวนิล[1] และ ธนิศร์ ปัฑมพิฑูร[1]

Phonphatson Sukhaphan[1*], Watcharapong Wararam[1], Onanong Phewnil[1] and Thanit Pattamapitoon[1]

บทคัดย่อ

การใช้ตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปาทดแทนดินนาในการหมักร่วมกับขยะอินทรีย์ เพื่อผลิตปุ๋ยหมักด้วยเทคโนโลยีกล่องคอนกรีต โดยประกอบด้วย 2 ปัจจัยหลัก ปัจจัยแรก คือ ชนิดของดินที่ใส่ในการหมักปุ๋ยอินทรีย์ ได้แก่ ดินนา และตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปา และปัจจัยที่สอง คือ อัตราส่วนของชนิดดินที่ใช้ในการหมักต่อขยะอินทรีย์ ได้แก่ 1:1 1:2 และ 2:1 เก็บตัวอย่างปุ๋ยหมักภายหลังการย่อยสลายสมบูรณ์ที่ระยะเวลา 35 วัน พบว่าปุ๋ยหมักที่ผลิตได้ทุกอัตราส่วน มีค่า C/N ratio อยู่ในเกณฑ์คุณภาพเทียบเท่ากับปุ๋ยอินทรีย์ (C/N ratio ไม่เกิน 20:1) โดยค่า C/N ratio ของดินนาต่อขยะอินทรีย์ อัตราส่วน 1:1 1:2 และ 2:1 มีค่าเท่ากับ 7.75:1 6.12:1 และ 6.16:1 ตามลำดับ และค่า C/N ratio ของตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปาต่อขยะอินทรีย์ มีค่าเท่ากับ 5.51:1 6.14:1 และ 4.68:1 ตามลำดับ โดยที่อัตราส่วน 1:2 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการใช้ดินนาและตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปามีค่า C/N ratio ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ อย่างไรก็ดีปุ๋ยหมักที่มีตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปาเป็นส่วนผสมจะมีค่าอินทรียวัตถุสูงกว่าดินนา ทั้งนี้จากผลการศึกษาเห็นได้ว่าตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปาสามารถนำมาทดแทนดินนาในการใช้ผลิตปุ๋ยหมักร่วมกับขยะอินทรีย์ได้

ABSTRACT

Waterworks plant sludge was used instead of paddy soil for making compost from organic waste. There were two factors, which were type of soil (paddy soil and waterworks plant sludge) and ratio of soil and organic waste (1:1, 1:2 and 2:1). Compost samples were collected after completed decomposing process at 35 day. The results found C/N ratio of compost in all ratios were under standard of organic compost (C/N ratio not more than 20:1). The C/N ratio number of waterworks plant sludge-organic waste in ratio of 1:1, 1:2 and 2:1 were 7.75:1, 6.12:1 and 6.16:1, meanwhile C/N ratio number of paddy soil -organic waste were 5.51:1, 6.14:1 and 4.68:1, respectively. The comparison of C/N ratio between paddy soil-organic waste and waterworks plant sludge-organic waste in ratio of 1:2 was not statistical significant difference. However, organic matter (OM) content in compost from waterworks plant sludge was more than compost from paddy soil. The results might be concluded that waterworks plant sludge could be used instead of paddy soil for producing compost from organic waste.

Key Words: Waterworks sludge, Paddy soil, Compost, Concrete box technology

*Corresponding author; e-mail address: Phonphatson.55040144@gmail.com

[1]ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

คำนำ

โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริได้พัฒนาเทคโนโลยีการกำจัดขยะส่วนที่เป็นสารอินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายได้ ด้วยการใช้เทคโนโลยีการกำจัดขยะด้วยกล่องคอนกรีต (โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ, 2560) โดยหมักขยะสลับชั้นกับดินนาในกล่องคอนกรีต เนื่องจากดินนาซึ่งมีองค์ประกอบของเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) และเฟอร์รัสออกไซด์ (FeO) โดยออกซิเจนที่เป็นส่วนประกอบดังกล่าวทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอนหลักที่จุลินทรีย์สามารถดึงมาใช้ เพื่อช่วยให้กระบวนการย่อยสลายดำเนินต่อไปได้ โดยผ่านกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรียกลุ่มใช้ออกซิเจน ซึ่งจะได้ปุ๋ยหมักหรือวัสดุปรับปรุงดินเป็นผลผลิตจากเทคโนโลยีดังกล่าว ข้อดีของเทคโนโลยีกล่องคอนกรีตนี้ คือ ใช้ระยะเวลาในการหมักสั้น ประหยัดพื้นที่ในการหมัก และง่ายในการบำรุงรักษา แต่ปัจจุบันพบปัญหาการขาดแคลนดินนาและค่าใช้จ่ายที่สูง ดังนั้นการนำตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปาที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างของแข็งแขวนลอยที่อยู่ในน้ำดิบกับสารเคมีที่เติมลงไปในการสร้างตะกอน เช่น สารส้ม ซึ่งระบายออกจากถังตะกอนเป็นปริมาณมาก ก่อให้เกิดปัญหาในด้านการจัดการและการกำจัดทั้งในด้านพื้นที่ และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการมาหมักทำปุ๋ยทดแทนการใช้ดินนา โดยผสมกับขยะอินทรีย์ในสัดส่วนที่เหมาะสม จึงเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากคุณสมบัติของเนื้อตะกอนดินจากการผลิตน้ำประปามีธาตุอาหารพืชโดยทั่วไปอยู่ในระดับปานกลางถึงสูง ส่วนใหญ่เป็นจำพวกธาตุอาหารรองซึ่งอยู่ในรูปของไอออนบวก อีกทั้งมีปริมาณอินทรียวัตถุ (OM) ในปริมาณที่สูงด้วย ส่งผลให้ตะกอนดินจากกระบวนการผลิตน้ำประปามีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกระหว่างธาตุอาหารที่พืชต้องการกับอนุภาคตะกอนดินได้ดี สามารถนำไปใช้ประโยชน์ทางการเกษตรได้ (เอิบและคณะ, 2544) ด้วยคุณสมบัติดังกล่าวจึงเป็นแนวทางเลือกหนึ่งที่มีความเป็นไปได้ในการนำของเสียกลับมาใช้ประโยชน์ และเพิ่มมูลค่าของเหลือทิ้งอีกทั้งสามารถนำผลการศึกษาที่ได้จากงานวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้ในพื้นที่จริงเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการซื้อปุ๋ยเคมีของเกษตรกรได้

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

1. จัดเตรียมกล่องคอนกรีตทรงกระบอก (2 วงต่อกัน) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 60 เซนติเมตร สูง 80 เซนติเมตร ก้นบ่อมีท่อระบายน้ำชะขยะ จำนวน 18 บ่อ ใช้ทรายหยาบรองพื้นบ่อหนา 7 เซนติเมตร

2. ดินนา และตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปาที่ใช้ในการทดลองนำมาผึ่งให้แห้งในที่ร่ม ให้มีความชื้นน้อยกว่าร้อยละ 20 แล้วบดร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร

3. ขยะอินทรีย์ที่ใช้ในการทดลอง แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ ขยะอินทรีย์จำพวกพืชผัก, ผลไม้ ต่อขยะอินทรีย์จำพวกเศษอาหาร ในอัตราส่วน 2:1 โดยน้ำหนัก ทำการสับขยะให้มีขนาด 1-2 เซนติเมตร นำขยะทั้งสองชนิดผสมกันโดยการคลุกเคล้าตามอัตราส่วนให้เข้ากันดี

วิธีการทดลอง

1. ทำการเก็บตัวอย่างดินก่อนการหมัก จำนวน 1 กิโลกรัม เพื่อทำการวิเคราะห์สมบัติดิน อันได้แก่ ความชื้น (Moisture content), ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH), ค่าการนำไฟฟ้า (EC), เนื้อดิน (soil texture), ปริมาณ

อินทรีย์คาร์บอนและอินทรียวัตถุ (Organic Carbon และ Organic Matter), ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total Nitrogen) และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio)

2. สุ่มเก็บตัวอย่างขยะก่อนการหมัก จำนวน 1 กิโลกรัม เพื่อทำการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมี อันได้แก่ ความชื้น (Moisture content), ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนและอินทรียวัตถุ (Organic Carbon และ Organic Matter), ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total Nitrogen) และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio)

3. วางแผนการทดลองแบบ 2x3 Factorial in RCBD จำนวน 3 ซ้ำ โดยมีการกำหนดปัจจัยหลัก 2 ปัจจัย ดังนี้ ปัจจัยแรก คือ ชนิดของดินที่ใส่ในการหมักปุ๋ยอินทรีย์ ได้แก่ ดินนา และตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปา และปัจจัยที่สอง คือ อัตราส่วนของชนิดดินที่ใช้ในการหมักต่อขยะอินทรีย์ ได้แก่ 1:1 1:2 และ 2:1 ทำการหมักดินนาร่วมกับขยะอินทรีย์ และตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปาร่วมกับขยะอินทรีย์ในกล่องคอนกรีต อัตราส่วนดังกล่าวคิดเป็น 45:45 30:60 และ 60:30 กิโลกรัมโดยน้ำหนัก ตามลำดับ โดยทำการบรรจุขยะอินทรีย์สลับเป็นชั้นๆกับชนิดดิน และใส่ดินทับหน้าชั้นขยะแล้วเกลี่ยดินให้ทั่วเพื่อคลุมพื้นที่ผิวของกล่องคอนกรีต จากนั้นรดน้ำทุก 7 วัน ครั้งละ 1.5 ลิตร (โครงการฯแหลมผักเบี้ย, 2560) ทิ้งไว้โดยไม่ต้องกลับกองเป็นระยะเวลา 35 วัน ทำการวัดการยุบตัวของปุ๋ยหมักทุกสัปดาห์โดยเปรียบจากความสูงที่ลดลงจากเริ่มต้นของการทดลอง และวัดอุณหภูมิภายในกล่องหมักที่ระดับกึ่งกลางความลึกของกล่องคอนกรีต และอุณหภูมิบรรยากาศภายนอกพื้นที่ทดลองโดยใช้เทอร์โมมิเตอร์ทุกวัน เวลา 7.00 น. ตลอดระยะเวลาการทดลองจนกว่าอุณหภูมิภายในบ่อหมักจะคงที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิบรรยากาศเป็นเวลาอย่างน้อย 7 วัน

การเก็บตัวอย่างปุ๋ยหมักเพื่อวิเคราะห์

เก็บตัวอย่างปุ๋ยหมักภายหลังการย่อยสลายสมบูรณ์แล้วโดยพิจารณาจากการยุบตัวของปุ๋ยหมักและอุณหภูมิภายในกล่องคอนกรีตเท่าหรือใกล้เคียงกับอุณหภูมิบรรยากาศ จำนวน 1 กิโลกรัม โดยสุ่มเก็บเป็นจุดทั้งกล่องหมัก กล่องหมักละ 4 จุด นำมารวมกัน จากนั้นนำตัวอย่างมาผึ่งในที่ร่ม แล้วบดร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร เพื่อใช้เป็นตัวแทนตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมี อันได้แก่ ความชื้น (Moisture content), ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH), ค่าการนำไฟฟ้า (EC), ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนและอินทรียวัตถุ (Organic Carbon และ Organic Matter), ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total Nitrogen) และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio)

การวิเคราะห์ทางสถิติ

ทำการวิเคราะห์ผลโดยใช้วิธีวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) เพื่อหาความแตกต่างของข้อมูลและแปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดย Dancan's New Multiple's Range Test (DMRT)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

องค์ประกอบ และสมบัติต่าง ๆของวัสดุที่ใช้ในการหมัก

1. สมบัติของดินที่ใช้ในการหมัก

ดินนาที่ใช้ในการหมักขยะ จากการวิเคราะห์สมบัติบางประการของดิน พบว่า มีความชื้นร้อยละ 7.43 เนื้อดินเป็นดินร่วนปนเหนียว (Clay loam) มีค่า pH เท่ากับ 7 ซึ่งมีค่าความเป็นกลางและอยู่ในช่วง 3.0-11.0 ซึ่ง

สามารถนำมาทำปุ๋ยหมักได้ (Bertoldi *et al.*, 1983) มีค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 0.30 mS/cm ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนร้อยละ 0.64 ปริมาณอินทรียวัตถุร้อยละ 1.10 ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดร้อยละ 0.06 และสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 10.67:1

ตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปา จากการวิเคราะห์สมบัติบางประการของดิน พบว่า มีความชื้นร้อยละ 19.02 เนื้อดินเป็นดินทรายปนดินร่วน (loamy sand) มีค่า pH เท่ากับ 6.6 ซึ่งมีค่าความเป็นกรดเล็กน้อยและอยู่ในช่วง 3.0-11.0 สามารถนำมาทำปุ๋ยหมักได้ (Bertoldi *et al.*, 1983) มีค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 2.50 mS/cm ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนร้อยละ 2.02 ปริมาณอินทรียวัตถุร้อยละ 3.48 ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดร้อยละ 0.42 และสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 4.81:1 จากสมบัติของดินที่ใช้ในการหมักพบว่าตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปามีความชื้น ค่าการนำไฟฟ้า ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนและอินทรียวัตถุ และปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดมากกว่าดินนาจึงมีความเป็นไปได้ในการนำมาทำปุ๋ยหมักเพื่อนำของเสียกลับมาใช้ประโยชน์และเพิ่มพูนมูลค่า

2. สมบัติของขยะอินทรีย์ที่ใช้ในการหมัก

ขยะอินทรีย์ที่ใช้ในการหมัก มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นผัก/ผลไม้ และเศษอาหาร จากการวิเคราะห์สมบัติบางประการของขยะอินทรีย์ พบว่า มีความชื้นร้อยละ 86.06 ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนร้อยละ 5.55 ปริมาณอินทรียวัตถุร้อยละ 9.57 ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดร้อยละ 0.17 และสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 32.65:1 จากสมบัติของขยะอินทรีย์ที่ใช้ในการหมัก พบว่าขยะอินทรีย์มีความชื้น และสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของขยะอินทรีย์ที่สูง จึงนำมาใช้เป็นส่วนผสมกับดินเพื่อส่งเสริมปฏิกิริยาการย่อยสลายให้เกิดเร็วขึ้น

การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของปุ๋ยหมัก

1. ความชื้น

ความชื้นของปุ๋ยหมักหลังจากสิ้นสุดระยะเวลาในการหมัก (Table 1) พบว่า การใส่ตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปาร่วมกับขยะอินทรีย์ในอัตราส่วน 1:1 1:2 และ 2:1 ทำให้ปุ๋ยหมักมีความชื้นร้อยละ 37.97 42.89 และ 37.88 ตามลำดับ สูงกว่าการใส่ดินนาร่วมกับขยะอินทรีย์ทุกอัตราส่วนที่มีความชื้นร้อยละ 18.49 25.03 และ 17.71 ตามลำดับ และมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ สอดคล้องกับงานวิจัยของ ไพศาล (2555) ที่รายงานว่า ปริมาณความชื้นในปุ๋ยหมักจะเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณขยะอินทรีย์ เนื่องจากการใส่ขยะอินทรีย์มากทำให้ปุ๋ยหมักมีปริมาณอินทรียวัตถุมาก ซึ่งอินทรียวัตถุมีความสามารถในการอุ้มน้ำสูงกว่าดิน อีกทั้งความชื้นเริ่มต้นของตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปามีค่าสูงกว่าดินนาส่งผลให้ปุ๋ยหมักตำรับที่ใส่ตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปาร่วมกับขยะอินทรีย์ในอัตราส่วน 1:2 มีปริมาณความชื้นสูงที่สุด (ร้อยละ 42.89)

2. การยุบตัวของปุ๋ยหมัก

การยุบตัวของปุ๋ยหมักหลังจากสิ้นสุดระยะเวลาในการหมัก (Table 1) พบว่า การใส่ตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปาร่วมกับขยะอินทรีย์ และการใส่ดินนาร่วมกับขยะอินทรีย์ ในอัตราส่วน 1:1 1:2 และ 2:1 มีการยุบตัวของปุ๋ยหมักแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยการใส่ตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปาร่วมกับขยะอินทรีย์ มีแนวโน้มการยุบตัวร้อยละ 42.56 47.04 และ 30.20 ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่าการใส่ดินนาร่วมกับขยะอินทรีย์ที่มีการยุบตัวร้อยละ 44.86 48.20 และ 31.65 ตามลำดับ เนื่องจากลักษณะเนื้อดินของตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปาเป็นดินทรายปนดินร่วน (loamy sand) ซึ่งมีอนุภาคเนื้อดินขนาดใหญ่กว่าจึงเกิดการย่อยสลายได้ช้ากว่า อีกทั้งการยุบตัวของปุ๋ยหมักเกิดจากปริมาตรของขยะอินทรีย์ที่ลดลงเมื่อเกิดการสลายตัว (ไพศาล, 2555)

ดังนั้นตำรับการทดลองที่ใส่ดินนาหรือตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปาร่วมกับขยะอินทรีย์ในอัตราส่วน 1:2 ซึ่งมีปริมาณขยะมากกว่าย่อมมีการยุบตัวของกองปุ๋ยหมักเกิดขึ้นได้มากกว่า

3. อุณหภูมิ

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ตรวจวัดเวลา 7.00 น. ตลอดระยะเวลาทดลอง (Figure 1) พบว่า การใส่ตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปาร่วมกับขยะอินทรีย์ และการใส่ดินนาร่วมกับขยะอินทรีย์ ในอัตราส่วน 1:1 1:2 และ 2:1 มีอุณหภูมิเริ่มต้นในบ่อหมักเฉลี่ยอยู่ที่ 34.0 องศาเซลเซียส โดยพบว่าอุณหภูมิสูงสุดส่วนใหญ่อยู่ในวันที่ 2-3 ของการหมัก พบอยู่ในช่วง 40.8 – 34.5 องศาเซลเซียส สอดคล้องกับการศึกษาของศิวนาถ (2556) ที่พบว่าในช่วง 2-4 วันแรกของการกองปุ๋ยหมักอุณหภูมิในกองปุ๋ยหมักจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากพลังงานความร้อนถูกปลดปล่อยออกมาจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์ซึ่งมีกิจกรรมสูงในช่วงแรกของการย่อยสลาย (Wei *et al*., 2014) โดยบ่อหมักที่ใช้ตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปาร่วมกับขยะอินทรีย์ในอัตราส่วน 1:1 1:2 และ 2:1 มีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดคือ 40.0 39.3 และ 40.8 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าการใส่ดินนาร่วมกับขยะอินทรีย์ ที่มีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 34.5 35.7 และ 35.2 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปามีอินทรียวัตถุที่สูงกว่าดินนาจึงส่งผลต่อกระบวนการย่อยสลายดังกล่าวข้างต้น และหลังจากนั้นจนถึงช่วง 2 สัปดาห์แรก พบว่าอุณหภูมิในบ่อหมักเฉลี่ยมีแนวโน้มลดลงอยู่ในช่วง 29.5 - 33.1 องศาเซลเซียส แต่ยังสูงกว่าอุณหภูมิบรรยากาศที่อยู่ในช่วง 27.0 - 30.5 องศาเซลเซียส ส่วนการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วงท้ายจนถึงสิ้นสุดระยะเวลาการหมัก พบว่าอุณหภูมิในบ่อหมักมีแนวโน้มลดลงและคงที่ ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเวลาผ่านไปสารอินทรีย์ในบ่อหมักมีปริมาณลดลงจากการถูกใช้ไปอย่างต่อเนื่อง ทำให้กิจกรรมของจุลินทรีย์ลดลงตามไปด้วย (ศิวนาถ, 2556) โดยการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในช่วงหลังมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของบรรยากาศ

Table 1 Physical properties of compost in concrete boxes

Treatment (ratio of soil : organic waste)	Parameters	
	Moisture content (%)	Compost layer collapse (%)
S_1T_1 (1:1)	18.49[a]	44.86[b]
S_1T_2 (1:2)	25.03[a]	48.20[b]
S_1T_3 (2:1)	17.71[a]	31.65[a]
S_2T_1 (1:1)	37.97[a]	42.56[b]
S_2T_2 (1:2)	42.89[b]	47.04[b]
S_2T_3 (2:1)	37.88[c]	30.20[a]
F-test (S_1 x S_2)	*	*

Notes: S_1= Paddy soil and organic waste, S_2 = Waterworks sludge and organic waste

ns = No Significant different, X^X, * = Significant different at P<0.05

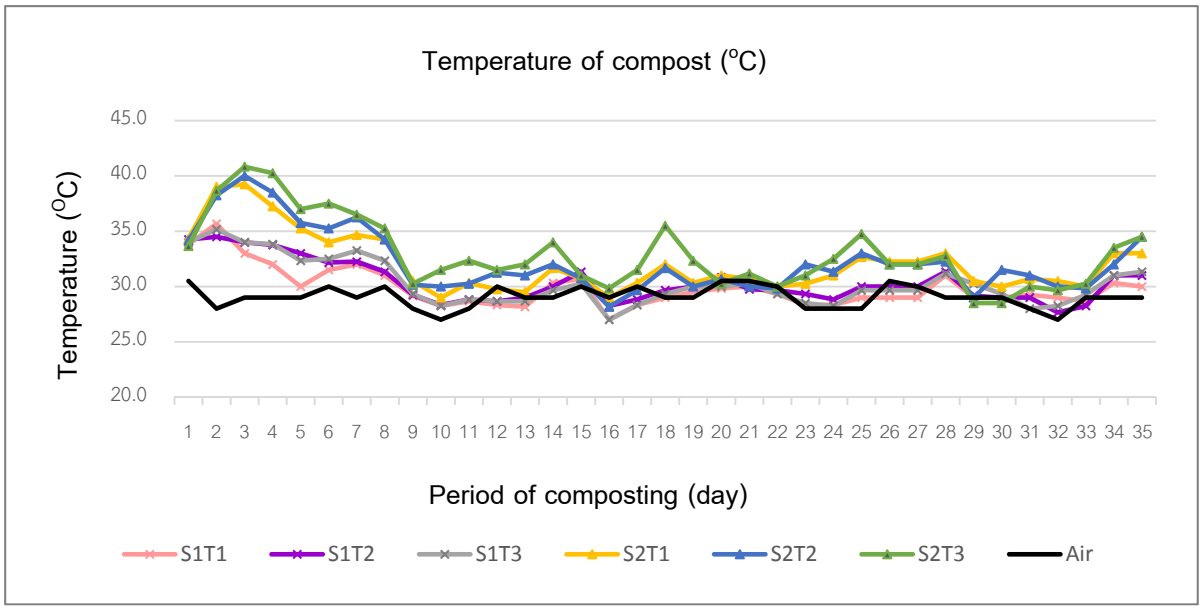


Figure 1 Changeable of temperature in concrete boxes and ambient air

การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีของปุ๋ยหมัก

1. ความเป็นกรด-ด่าง (pH) และค่าการนำไฟฟ้า (EC)

จากการศึกษาความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของปุ๋ยหมักหลังจากสิ้นสุดระยะเวลาในการหมัก (35 วัน) (Table 2) พบว่า ทุกตำรับการทดลองมีค่า pH สูงขึ้นเมื่อเทียบกับค่าวัสดุหมักก่อนการทดลอง เนื่องจากในกระบวนการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ต่างๆ โดยจุลินทรีย์หลังจากที่น้ำตาลและแป้งถูกย่อยสลายหมดแล้วในระยะต่อมาสารประกอบโปรตีนจะถูกย่อยสลายและปลดปล่อยแอมโมเนีย (NH_3) ออกมา เมื่อทำปฏิกิริยากับความชื้นได้ OH^- ส่งผลให้ปุ๋ยหมักที่ได้มีสภาพมีสภาพ pH สูงขึ้น (Fernandez *et al*., 2010) โดยการใส่ตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปาร่วมกับขยะอินทรีย์ และการใส่ดินนาร่วมกับขยะอินทรีย์ในอัตราส่วน 1:1 1:2 และ 2:1 ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยการใส่ตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปาร่วมกับขยะอินทรีย์ มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 7.04 6.88 7.08 และ ตามลำดับ ส่วนการใส่ดินนาร่วมกับขยะอินทรีย์มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 7.02 7.30 และ 7.25 ตามลำดับ และสำหรับค่าการนำไฟฟ้า (EC) ของปุ๋ยหมักที่ได้จากการใช้ดินนาและตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปาร่วมกับขยะอินทรีย์ทุกอัตราส่วนอยู่ในช่วง 1.24-3.40 ซึ่งมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพปุ๋ยหมัก ซึ่งกำหนดค่า EC ต้องไม่เกิน 6 mS/cm (กรมพัฒนาที่ดิน, 2556)

2. ปริมาณอินทรียวัตถุ และอินทรีย์คาร์บอน (Organic Matter and Organic Carbon)

ปริมาณอินทรียวัตถุ และอินทรีย์คาร์บอนของปุ๋ยหมักเมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการหมัก (Table 2) พบว่า การใส่ตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปาร่วมกับขยะอินทรีย์ในอัตราส่วน 1:1 1:2 และ 2:1 ทำให้ปุ๋ยหมักมีปริมาณอินทรียวัตถุร้อยละ 5.72 7.38 และ 4.87 ตามลำดับ และอินทรีย์คาร์บอนร้อยละ 3.32 4.28 2.82 ตามลำดับ สูงกว่าการใส่ดินนาร่วมกับขยะอินทรีย์ที่มีปริมาณอินทรียวัตถุ ร้อยละ 2.50 3.19 และ 1.62 ตามลำดับ และอินทรีย์คาร์บอนร้อยละ 1.45 1.85 0.94 ตามลำดับ แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติทุกอัตราส่วน อย่างไรก็ดีปุ๋ยหมักที่มีตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปาเป็นส่วนผสมจะมีค่าอินทรียวัตถุ และอินทรีย์คาร์บอนสูงกว่าดินนา โดยพบมากที่สุดในอัตราส่วน 1:2 มีค่าเท่ากับร้อยละ 7.38 และ 4.28 ตามลำดับ เนื่องจากคุณสมบัติตะกอนดินโรงผลิต

น้ำประปามีองค์ประกอบของอินทรียวัตถุที่สูง ซึ่งจะส่งเสริมให้เกิดกระบวนการย่อยสลายที่เร็วขึ้น (เอิบและคณะ, 2544) อีกทั้งปริมาณอินทรียวัตถุและอินทรีย์คาร์บอนในปุ๋ยหมักยังแปรผันตรงกับสัดส่วนของขยะอินทรีย์อีกด้วย

3. ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total Nitrogen)

ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดของปุ๋ยหมักเมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการหมัก (Table 2) พบว่า การใส่ตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปาร่วมกับขยะอินทรีย์ในอัตราส่วน 1:1 1:2 และ 2:1 ทำให้ปุ๋ยหมักมีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดร้อยละ 0.59 0.67 และ 0.59 ตามลำดับ สูงกว่าการใส่ดินนาร่วมกับขยะอินทรีย์ที่มีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดร้อยละ 0.19 0.31 และ 0.15 ตามลำดับ แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากคุณสมบัติของเนื้อตะกอนดินจากการผลิตน้ำประปามีธาตุอาหารพืชโดยทั่วไปอยู่ในระดับปานกลางถึงสูง (เอิบและคณะ, 2544) อีกทั้งปริมาณไนโตรเจนในปุ๋ยหมักยังแปรผันตรงกับสัดส่วนของขยะอินทรีย์อีกด้วย

4. อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio)

อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของปุ๋ยหมักเมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการหมัก (Table 2) พบว่า การใส่ตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปาร่วมกับขยะอินทรีย์ในอัตราส่วน 1:1 1:2 และ 2:1 ทำให้ปุ๋ยหมักมีค่า C/N ratio เท่ากับ 5.51:1 6.14:1 และ 4.68:1 ตามลำดับ และค่า C/N ratio ของดินนาร่วมกับขยะอินทรีย์มีค่าเท่ากับ 7.75:1 6.12:1 และ 6.16:1 ตามลำดับ โดยที่อัตราส่วน 1:2 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการใช้ดินนาและตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปา มีค่า C/N ratio ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยค่า C/N ratio ของตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปามีค่าน้อยกว่าดินนาเนื่องจากตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปามีองค์ประกอบของไนโตรเจนทั้งหมดที่สูงกว่าจึงส่งเสริมให้เกิดการย่อยสลายที่เร็วขึ้นทำให้พบค่า C/N ratio น้อยกว่าดินนานั่นเอง แต่ทุกตำรับการทดลองมีค่า C/N ratio อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพปุ๋ยหมัก ซึ่งกำหนดค่า C/N ratio ไม่เกิน 20:1 โดยน้ำหนัก (กรมพัฒนาที่ดิน, 2556) ซึ่ง Samudro and Hermana (2007) รายงานว่า ปุ๋ยหมักที่มีค่า C/N ratio ต่ำกว่าหรือเท่ากับ 20:1 เป็นปุ๋ยหมักที่ย่อยสลายสมบูรณ์เหมาะสำหรับนำไปใช้งาน สามารถนำไปใช้ใส่ในดินได้โดยไม่ทำให้พืชเป็นอันตรายและเป็นปุ๋ยหมักที่มีคุณภาพดี

Table 2 Chemical properties of compost in concrete boxes

Treatment (Ratio of Soil : Organic waste)	Parameters					
	pH	EC (mS/cm)	Organic Carbon (%)	Organic Matter (%)	Total Nitrogen (%)	C/N ratio
S_1T_1 (1:1)	7.02^{a}	2.90^{b}	1.45^{b}	2.50^{b}	0.19^{b}	7.75^{b}
S_1T_2 (1:2)	7.30^{a}	2.86^{b}	1.85^{b}	3.19^{b}	0.31^{c}	6.12^{a}
S_1T_3 (2:1)	7.25^{a}	1.89^{a}	0.94^{a}	1.62^{a}	0.15^{a}	6.16^{a}
S_2T_1 (1:1)	7.04^{a}	1.24^{a}	3.32^{ab}	5.72^{ab}	0.59^{a}	5.51^{ab}
S_2T_2 (1:2)	6.88^{a}	3.10^{a}	4.28^{b}	7.38^{b}	0.67^{b}	6.14^{b}
S_2T_3 (2:1)	7.08^{a}	3.40^{a}	2.82^{a}	4.87^{a}	0.59^{a}	4.68^{a}
F-test (S_1 x S_2)	ns	ns	*	*	*	*

Notes: S_1= Paddy soil and organic waste, S_2 = Waterworks sludge and organic waste

ns = No Significant different, X^{X}, * = Significant different at P<0.05

สรุป

จากการศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้ตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปาร่วมกับขยะอินทรีย์ทดแทนดินนาในการหมักปุ๋ยอินทรีย์ด้วยเทคโนโลยีกล่องคอนกรีต พบว่า ปุ๋ยหมักที่ได้จากการใช้ดินนาและตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปาร่วมกับขยะอินทรีย์ทุกอัตราส่วน มีค่า C/N ratio อยู่ในเกณฑ์คุณภาพเทียบเท่ากับปุ๋ยอินทรีย์ (C/N ratio ไม่เกิน 20:1) (กรมพัฒนาที่ดิน, 2556) โดยที่อัตราส่วน 1:2 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการใช้ดินนาและตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปา มีค่า C/N ratio ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ อย่างไรก็ดีปุ๋ยหมักที่มีตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปาเป็นส่วนผสมจะมีปริมาณอินทรียวัตถุสูงกว่าดินนา อีกทั้งปริมาณอินทรียวัตถุในปุ๋ยหมักยังแปรผันตรงกับสัดส่วนของขยะอินทรีย์อีกด้วย จากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่า ตะกอนดินโรงผลิตน้ำประปาสามารถนำมาทดแทนดินนาในการใช้ผลิตปุ๋ยหมักร่วมกับขยะอินทรีย์ได้ โดยมีค่า C/N ratio ที่ได้เทียบเท่าคุณภาพปุ๋ยอินทรีย์

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ จังหวัดเพชรบุรี ที่สนับสนุนงบเอื้อเฟื้อสถานที่ในการดำเนินงานวิจัย ขอขอบคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่โครงการแหลมผักเบี้ยทุกท่านที่ได้มีส่วนร่วมอำนวยความสะดวกต่อการทำวิจัย รวมทั้งขอขอบคุณนิสิตปริญญาโทรุ่นที่ 40 ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่มีส่วนช่วยในการดำเนินงานวิจัยไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

กรมพัฒนาที่ดิน. 2556. **มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ (ปุ๋ยหมัก ปุ๋ยอินทรีย์คุณภาพสูง) ของกรมพัฒนาที่ดิน**. แหล่งที่มา: http://www.ldd.go.th/ldd/Fertilizer/OrganicFertilizer.pdf., 15 มีนาคม 2556.

โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ ตำบลแหลมผักเบี้ย อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี. 2560. **เอกสารประกอบการเผยแพร่ความรู้การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการกำจัดขยะและบำบัดน้ำเสียตามพระราชดำริ**. 84 หน้า.

ไพศาล ริมชลา. 2555. **การศึกษาขนาดของวัสดุหมักประเภทผลไม้และเปลือกผลไม้กับสัดส่วนการคลุกเคล้าด้วยดินเนื้อละเอียดที่มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายเป็นปุ๋ยหมัก**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ศิวนาถ ไทยภักดี. 2556. **การศึกษาอิทธิพลของเปลือกสับปะรดและดินนาต่อประสิทธิภาพการย่อยสลายของขยะอินทรีย์**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

เอิบ เขียวรื่นรมณ์, อัญชลี สุทธิประการ, สุเทพ ทองแพ, พิบูลย์ กังแฮ, เสาวนุช ถาวรพฤกษ์, สมชัย อนุสนธิ์พรเพิ่ม, วิภาวรรณ ท้ายเมือง. 2544. **การศึกษาคุณภาพของตะกอนแยกจากน้ำดิบของการประปานครหลวงเพื่อพัฒนาใช้ประโยชน์ทางการเกษตรกรรมและอุตสาหกรรม**. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 72หน้า.

Bertoldi, M.D., G. Vallini and A. Pera. 1983. **The biology of composting : A Review. Waste Manage.** 1:157-176.

Fernandez, F.J., V. Sánchez- Arias., L. Rodríguez and J. Villasenor. 2010. Feasibility of composting combinations of sewage sludge, olive mill waste and winery waste in a rotary drum reactor. **Waste Manage.** 30: 1948-1956.

Samudro, G.and J. Hermana. 2007. Denitrification efficiency in a compost bed with various carbon and nitrogen content. **Journal of Applied Sciences in Environmental Sanitation** 2(2): 57-62.

การประยุกต์ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์เพื่อประเมินความเปราะบางด้านกายภาพของโครงสร้างบ้านเรือนที่ได้รับผลกระทบจากอุทกภัย พื้นที่คาบสมุทรสทิงพระ จังหวัดสงขลา

Using GIS to Estimate the Physical Vulnerability of Building Structures for Coastal Flood in Sating-Pra Peninsula, Songkhla

มุทริกา บุญสิทธิ์[1*] กาญจนา นาคะภากร[1] อัจฉรา อัศวรุจิกุลชัย[1] และ สุเพชร จิรขจรกุล[2]

Moottarika Boonsit[1*], Kanchana Nakhapakorn[1], Achara Ussawarujikulchai[1] and Supet Jirakajohnkool[2]

บทคัดย่อ

การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความเปราะบางและตัวชี้วัดที่ส่งผลต่อความเปราะบางด้านกายภาพของโครงสร้างบ้านเรือนในระดับครัวเรือนผลการศึกษาพบว่า ในแต่ละพื้นที่มีระดับความรุนแรงของความเปราะบางแตกต่างกันไป โดยในพื้นที่ที่ไม่ได้รับผลกระทบจากอุทกภัยทั้งปี พ.ศ.2553 และ ปี พ.ศ.2560 พบว่ามีระดับความเปราะบางของโครงสร้างครัวเรือนในระดับปานกลางมากที่สุด ส่วนในพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากอุทกภัยทั้งปี พ.ศ.2553 และ ปี พ.ศ.2560 พบว่ามีระดับความเปราะบางของโครงสร้างครัวเรือนในระดับสูงและระดับปานกลาง และตัวชี้วัดที่สามารถทำนายความเปราะบางในพื้นที่ที่ไม่ได้รับผลกระทบจากอุทกภัยในปี พ.ศ.2553 และในปี พ.ศ.2560 มีดังนี้ ตัวชี้วัดด้านประเภทของดิน ตัวชี้วัดด้านวัสดุหน้าต่าง และในพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากอุทกภัย พ.ศ.2553 มีดังนี้ ตัวชี้วัดด้านสภาพบ้าน ด้านวัสดุพื้น ส่วน พ.ศ.2560 มีดังนี้ตัวชี้วัดลักษณะการยกพื้นบ้าน ด้านสภาพบ้าน

ABSTRACT

The purpose of this study was to assess vulnerability and indicators that affected the physical vulnerability of building structures. The result indicated that the severity of the vulnerability in each area was varies, which the non-flood affected areas in 2010 and 2017, the level of vulnerability was the most moderate level, whereas the flood affected area was a high and moderate level of vulnerability in the building structure. Moreover, the study showed the indicators that can predicted vulnerability in non-flood affected area in 2010 and 2017, which were as follows; soil types, window materials. In the flood affected area, indicators that can predicted vulnerability in 2010 were building status, floor materials and in 2017 were the floor appearance, building status.

Key word: Physical vulnerability, Flooding, Building structure, Coastal flood, Sating-Pra Peninsula, GIS

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

[1]สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล นครปฐมฯ 73170

[1]Program in Technology of Environmental Management, Faculty of Environment and Resource Studies, Mahidol University, NakhonPathom 73170

[2]ภาควิชาเทคโนโลยีชนบท คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จังหวัดปทุมธานี 12121

[2]Department of Rural Technology, Faculty of Science and Technology,Thammasat University, Pathum Thani 12121

คำนำ

ภัยธรรมชาติที่เกิดขึ้นในประเทศไทยนั้น อุทกภัยนับเป็นภัยธรรมชาติที่เกิดขึ้นบ่อยครั้งที่สุดซึ่งเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ ได้แก่ การเกิดฝนตกหนักต่อเนื่องกันเป็นเวลานานอันเนื่องมาจากพายุหมุนเขตร้อนที่พัดผ่านบริเวณใกล้เคียงรวมถึงฤดูมรสุม (สมคิด, 2559) โดยเฉพาะภาคใต้ฝั่งตะวันออกของประเทศไทยที่ได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือที่พัดผ่านในเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนมกราคม ทำให้มีฝนตกหนักติดต่อกันเป็นบริเวณกว้าง ปริมาณน้ำฝนที่มีมากไม่สามารถระบายออกสู่ทะเลได้ทัน ปรากฏการณ์ดังกล่าวเกิดขึ้นเป็นประจำทุกปีโดยเฉพาะบริเวณคาบสมุทรสทิงพระ เนื่องจากสภาพกายภาพทางภูมิศาสตร์ของที่ตั้งที่เป็นชุมชนชายฝั่ง และเป็นพื้นที่ลุ่มต่ำ ตั้งอยู่ระหว่างทะเลสาบสงขลาและทะเลอ่าวไทย (เพ็ญประไพ, 2557) ซึ่งมีความเสี่ยงและมีโอกาสที่จะเผชิญและเปิดรับกับภัยธรรมชาติที่เกิดขึ้น กรมป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยจังหวัดสงขลา (2558) ได้รายงานข้อมูลพื้นที่เสี่ยงอุทกภัยจังหวัดสงขลา พบว่าพื้นที่คาบสมุทร สทิงพระ มีครัวเรือนที่อยู่ในพื้นที่เสี่ยงอุทกภัย จำนวน 14,651 ครัวเรือน จากปัญหาที่เกิดขึ้นการเตรียมการป้องกันและลดปัญหาจากอุทกภัย โดยใช้วิธีการประเมินความเปราะบางจึงเป็นวิธีการที่ช่วยให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับความเปราะบางของบ้านเรือนจากอุทกภัย โดยเลือกศึกษาในระดับครัวเรือนเพื่อที่จะได้ทราบความเสียหายอย่างเฉพาะเจาะจง โดยผู้วิจัยลงพื้นที่เพื่อเก็บข้อมูลแบบสอบถามเชิงสำรวจในแต่ละครัวเรือนเพื่อที่จะได้มาซึ่งข้อมูลด้านกายภาพของโครงสร้างบ้านเรือน ทั้งก่อนที่จะเกิดอุทกภัยครั้งใหญ่ในปี พ.ศ. 2553 และการเปลี่ยนแปลงหลังจากผ่านเหตุการณ์อุทกภัยมาแล้ว เพื่อนำมาเป็นข้อมูลในการวิเคราะห์เชิงพื้นที่โดยใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) ในวิธีการวิเคราะห์แบบซ้อนทับ (Overlay Analysis) และศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความเปราะบางโดยการวิเคราะห์ความถดถอยพหุคูณของความเปราะบางด้านกายภาพของโครงสร้างบ้านเรือน ซึ่งผลที่ได้สามารถนำไปเป็นฐานข้อมูลในการเฝ้าระวังและวางมาตรการป้องกันอุทกภัยที่อาจเกิดขึ้นในอนาคต อีกทั้งยังเป็นประโยชน์ต่อชุมชนและภาครัฐในการวางแผนป้องกันภัยพิบัติ รวมทั้งลดความรุนแรงของความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สิน เนื่องด้วยการปรับตัวเพื่อเตรียมรับมือกับภัยธรรมชาติที่มีประสิทธิภาพจะสามารถทำให้มนุษยย์สามารถอยู่ร่วมกับภัยธรรมชาติได้อย่างปลอดภัยดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยครั้งนี้ คือ เพื่อศึกษาความเปราะบางและปัจจัยที่ส่งผลต่อความเปราะบางด้านโครงสร้างทางกายภาพของบ้านเรือน

อุปกรณ์และวิธีการ

พื้นที่ศึกษา

การวิจัยครั้งนี้ได้เลือกพื้นที่ศึกษาคือชุมชนบริเวณคาบสมุทรสทิงพระ ซึ่งครอบคลุมพื้นที่อำเภอระโนด อำเภอกระแสสินธุ์ อำเภอสทิงพระและอำเภอสิงหนคร จังหวัดสงขลา (Figure 1)

ประชากรและกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา

ประชากรที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้คือ ครัวเรือนที่อยู่ในพื้นที่คาบสมุทรสทิงพระซึ่งครอบคลุมพื้นที่อำเภอระโนด อำเภอกระแสสินธุ์ อำเภอสทิงพระ และอำเภอสิงหนคร จังหวัดสงขลา รวม 36 ตำบล จำนวน 50,279 หลังคาเรือน (กรมการปกครอง, 2560) สำหรับกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ใช้วิธีคัดเลือกกลุ่มตัวอย่างจากสูตรของ krejcie and morgan (Krejcie and Morgan, 1970) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% คิดเป็นกลุ่มตัวอย่าง 33 ตำบล จำนวนทั้งสิ้น 382 หลังคาเรือน (จำนวนกลุ่มตัวอย่างที่เก็บได้จริง 415 หลังคาเรือน) จากนั้นจึงกำหนด

กลุ่มตัวอย่างระดับหลังคาเรือนแบบเจาะจง (Purposive Sampling) โดยนำจำนวนครัวเรือนมาเทียบกับสัดส่วนของพื้นที่ที่ไม่ได้รับผลกระทบจากอุทกภัยและพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากอุทกภัยที่ได้จากแผนที่น้ำท่วม 8 ปี (พ.ศ. 2553 – พ.ศ. 2560) อธิบายได้ว่า พื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากอุทกภัย มีสัดส่วน 75% คิดเป็นจำนวนตัวอย่าง 321 ครัวเรือน และพื้นที่ที่ไม่ได้รับผลกระทบจากอุทกภัย มีสัดส่วน 25% คิดเป็นจำนวนตัวอย่าง 94 ครัวเรือน และในการลงพื้นที่เก็บข้อมูลจะทำการสุ่มตัวอย่างแบบเป็นระบบ (Systematic sampling) โดยสร้างตารางขนาด 1×1 กิโลเมตรครอบคลุมพื้นที่ศึกษา แล้วทำการเก็บข้อมูล 1 ครัวเรือนต่อ 1 ช่องตาราง

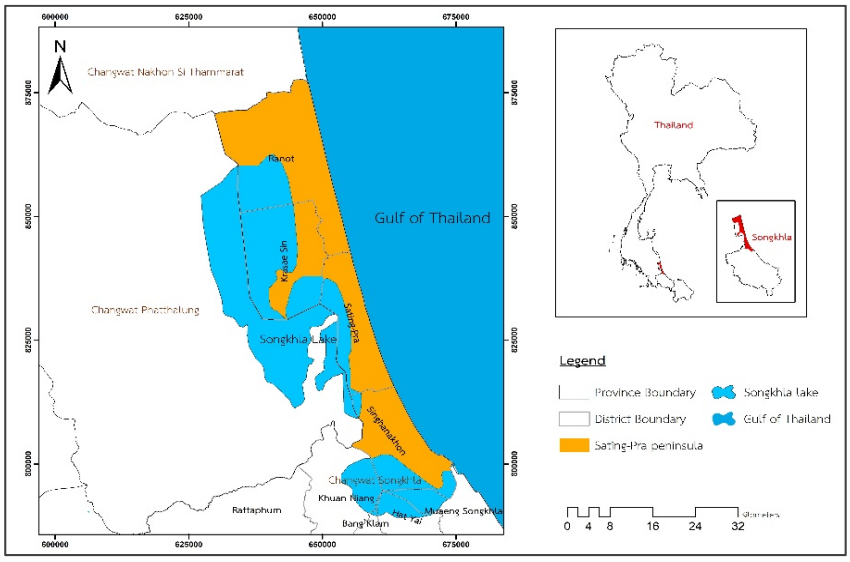


Figure 1 The study area

การเก็บรวบรวมข้อมูล

ข้อมูลสำหรับการประเมินความเปราะบางแบ่งเป็น 2 ประเภท คือข้อมูลปฐมภูมิและข้อมูลทุติยภูมิมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ข้อมูลปฐมภูมิ เป็นการลงสำรวจในพื้นที่ศึกษาและรวบรวมข้อมูลโดยใช้ข้อมูลพิกัดตำแหน่งของที่อยู่อาศัยจากเครื่องรับสัญญาณระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก (Global Navigation Satellite System: GNSS) และแบบสอบถามซึ่งได้สร้างขึ้นจากการศึกษางานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง โดยรวบรวมตัวชี้วัดจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่มีการศึกษาเกี่ยวกับตัวชี้วัดด้านกายภาพของโครงสร้างอาคารและบ้านเรือน แล้วนำมาคัดเลือกให้เหมาะสมตามบริบทของพื้นที่ศึกษา คัดกรองโดยพิจารณาความถี่ของตัวชี้วัดที่พบในงานวิจัยที่นำมาใช้ประเมินความเปราะบาง ซึ่งได้แก่ ตัวชี้วัดด้านกายภาพของโครงสร้างและลักษณะของอาคาร ระยะห่างจากชายฝั่ง ประเภทของดิน และความสูงจากระดับน้ำทะเล (Table 1)

ทั้งนี้ข้อมูลแบบสอบถาม ประกอบด้วย แบบสอบถามเกี่ยวกับโครงสร้างบ้านที่ได้ผลกระทบจากน้ำท่วม โดยจะแบ่งเป็น 2 ช่วงเวลาคือโครงสร้างบ้านในอดีต (ก่อน พ.ศ. 2553) และโครงสร้างบ้านปัจจุบันที่มีการปรับเปลี่ยนโครงสร้างหลังจากประสบอุทกภัยเมื่อในอดีต (ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2554 - พ.ศ. 2560) ประกอบด้วย ประเภทของวัสดุก่อสร้าง สภาพบ้าน วัสดุมุงหลังคา วัสดุประตู วัสดุหน้าต่าง วัสดุพื้น จำนวนชั้นของบ้าน ลักษณะของพื้นบ้าน ระยะเวลาของเหตุการณ์น้ำท่วม และระดับน้ำที่ท่วมตัวบ้าน

2. ข้อมูลทุติยภูมิ โดยทำการสืบค้นจากฐานข้อมูลและขอความอนุเคราะห์ข้อมูลจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ดังต่อไปนี้

2.1) ข้อมูลแผนที่น้ำท่วม ปี พ.ศ. 2553 – พ.ศ. 2560 จากสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน) ซึ่งเผยแพร่ออนไลน์ที่ http://flood.gistda.or.th/

2.2) ข้อมูลกลุ่มชุดดินและข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน จากกรมพัฒนาที่ดิน

2.3) ข้อมูลความลาดชัน Digital Elevation Model (DEM) รายละเอียด 12.5 ซึ่งเผยแพร่ออนไลน์ที่ http://monde-geospatial.com

2.4) ข้อมูลจำนวนอำเภอ จำนวนตำบลและจำนวนหลังคาเรือน จาก ศูนย์บริหารการทะเบียนภาค 9 สาขาจังหวัดสงขลา กรมการปกครอง กระทรวงมหาดไทย ปลายปี ณ เดือนมีนาคม พ.ศ. 2560

การวิเคราะห์ข้อมูล

1. การประเมินความเปราะบาง (Vulnerability assessment) คือ ด้วยการประยุกต์ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Geographic Information System: GIS) ในการวิเคราะห์เพื่อจำแนกระดับความเปราะบางของครัวเรือน โดยวิธีการวิเคราะห์แบบซ้อนทับ (Overlay Analysis) ซึ่งจะใช้ตัวชี้วัดการเปิดรับต่อการเกิดอุทกภัย (Table 1) โดยการรวมค่าคะแนนในทุกตัวชี้วัดและ คะแนนรวมของตัวชี้วัดจะถูกนำมาแบ่งระดับความเปราะบางของโครงสร้างบ้านเรือนเป็น 4 ระดับคือ เปราะบางสูงมาก เปราะบางมาก เปราะบางปานกลาง และเปราะบางต่ำ โดยใช้หลักทางสถิติหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) มากำหนดค่าพิสัย (Range) ของคะแนนในแต่ละช่วงโอกาส

$$\text{อันตรภาคชั้น} = \frac{\text{ค่าคะแนนสูงสุด} - \text{ค่าคะแนนต่ำสุด}}{\text{จำนวนช่วง/ระดับความเปราะบาง}}$$

2. การวิเคราะห์ความถดถอยพหุคูณของความเปราะบางด้านกายภาพของโครงสร้างบ้านเรือนด้วยตัวชี้วัดวัสดุก่อสร้าง สภาพบ้าน วัสดุมุงหลังคา วัสดุประตู วัสดุหน้าต่าง วัสดุพื้น จำนวนชั้นของบ้าน ลักษณะของพื้นบ้าน ระยะเวลาของเหตุการณ์น้ำท่วม ระดับน้ำที่ท่วมตัวบ้าน ระยะห่างจากชายฝั่ง และประเภทของดิน โดยการวิเคราะห์ Multiple Regression

Table 1 Physical vulnerability assessment indicators

Indicators	Vulnerability Level				Source
	Low 1	Moderate 2	High 3	Very high 4	
Material types	Concrete and mixed wood-concrete	Masonry	Wood, bamboo	galvanized iron	Primary data (Field work)
Building status	Very good	Good	bad	Very bad	
Roof materials	Metal sheet	Concrete tiles	Clay tiles	galvanized iron, bamboo, awing	
Door materials	Metal	Glass	Wood, bamboo	galvanized iron	
Window materials	Metal	Glass	Wood, bamboo	galvanized iron	
Floor materials	Concrete	-	-	Wood, bamboo	
Number of storey	> 2 storeys	2 storeys	-	1 storeys	
The floor appearance	House with lifted floor	Lay floor tiles on first floor	First floor same level ground floor	First floor lower than ground floor	
Flooding period	1 month	1 – 2 month	3 month	>3 month	Secondary data
Flooding levels	<0.5 meters	>0.5-1 meters	>1-2 meters	>2 meters	
Distance from coastal	>200 meters	151-200 meters	101-150 meters	<100 meters	
Soil types	clay	Silt	sand and sandy soil	Gravel and gravelly soil	
Meters above sea level	>500 meters	301-500 meters	101-300 meters	0-100 meters	

Source: Adapted from Taramelli *et al*. (2014), Krishnamurthy *et al*. (2010), Tran *et al*. (2009) and Ministry of Public Health (2016)

ผลและวิจารณ์ผล

1. ผลการประเมินความเปราะบาง (Vulnerability assessment)

พบว่าในพื้นที่ที่ไม่ได้รับผลกระทบจากอุทกภัย พ.ศ. 2553 ครัวเรือนส่วนมากมีร้อยละความเปราะบางในระดับปานกลางคิดเป็นร้อยละ 11.81 (49 ครัวเรือน) พบมากที่สุดในอำเภอสิงหนคร และครัวเรือนส่วนน้อยมีร้อยละความเปราะบางในระดับสูงมาก คิดเป็นร้อยละ 0.72 (3 ครัวเรือน) ส่วน พ.ศ. 2560 ครัวเรือนส่วนมากมีร้อยละความเปราะบางในระดับปานกลาง คิดเป็นร้อยละ 13.01 (54 ครัวเรือน) พบมากที่สุดในอำเภอสิงหนครและครัวเรือนส่วนน้อยมีร้อยละความเปราะบางในระดับสูงมาก 0.48 (2 ครัวเรือน) หรืออาจกล่าวได้ว่าไม่ได้รับผลกระทบจากระดับน้ำที่ท่วมสูง และทุกตัวชี้วัดด้านโครงสร้างอาคารบ้านเรือนส่วนใหญ่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง (Table 2) และในพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากอุทกภัย พ.ศ. 2553 ครัวเรือนส่วนมากมีร้อยละความเปราะบางในระดับสูง คิดเป็นร้อยละ 34.70 (144 ครัวเรือน)พบมากที่สุดในอำเภอระโนด และครัวเรือนส่วนน้อยมีร้อยละความเปราะบางในระดับต่ำ คิดเป็นร้อยละ 2.17 (9 ครัวเรือน) ส่วน พ.ศ. 2560 ครัวเรือนส่วนมากมีร้อยละความ

เปราะบางในระดับปานกลาง คิดเป็นร้อยละ 35.90 (149 ครัวเรือน) พบมากที่สุดในอำเภอระโนด และครัวเรือนส่วนน้อยมีร้อยละความเปราะบางในระดับต่ำ คิดเป็นร้อยละ 2.17 (9 ครัวเรือน) (Table 3)

ซึ่งความแตกต่างของความเปราะบางสามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีความเปราะบางที่ Disaster Preparedness and Management (2016) อธิบายถึงความเปราะบางไว้ว่าเป็นระดับผลที่เกิดขึ้นกับทรัพย์สินเมื่อมีความล่อแหลมต่อแรงกระทำจากภัยซึ่งจะแตกต่างกันไปตามตำแหน่งทางภูมิศาสตร์โดยหากพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงแล้วจะเห็นได้ว่ามีการเปลี่ยนแปลงจากความเปราะบางสูงมาเป็นระดับความเปราะบางปานกลางซึ่งแสดงให้เห็นว่าครัวเรือนบางส่วนมีความสามารถในการปรับเปลี่ยนโครงสร้างบ้านเรือน เช่น เปลี่ยนจากบ้านที่ตัวบ้านต่ำกว่าถนนหน้าบ้านเป็นการปูวัสดุเพื่อทำให้ตัวบ้านสูงขึ้น ครัวเรือนบางส่วนเปลี่ยนแปลงวัสดุก่อสร้างจาก ไม้หรือไม้ไผ่ เป็นอิฐก่อ และเปลี่ยนจากวัสดุสังกะสีเป็นคอนกรีตหรือคอนกรีตผสมไม้ เปลี่ยนแปลงวัสดุมุงหลังคาจากกระเบื้องดินเผาเป็นกระเบื้องคอนกรีตเนื่องจากมีความคงทนมากกว่าซึ่งจะทำให้ครัวเรือนนั้นมีศักยภาพเพิ่มขึ้นและสามารถรับมือกับเหตุการณ์อุทกภัยในอนาคตได้ทั้งนี้การปรับเปลี่ยนโครงสร้างเพื่อความแข็งแรงของที่อยู่อาศัยทำให้เห็นถึงการปรับตัวเพื่อรับกับภัยธรรมชาติในอนาคต สามารถอธิบายว่า พัฒนาการของรูปทรงของบ้านเรือนนั้นจะเป็นการปรับตัวให้สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมทางธรรมชาติเป็นสำคัญ จากสภาพภูมิอากาศที่มีการเปลี่ยนแปลงไป รวมถึงภัยพิบัติที่มีความรุนแรงขึ้น อาจทำให้บ้านเรือนในรูปแบบดั้งเดิมไม่แข็งแรงพอที่จะรับมือ (รัชกานต์, 2556) และผลที่ปรากฏนี้สอดคล้องกับทฤษฎีของความเสี่ยง ที่กรมป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย กระทรวงมหาดไทย (2557) กล่าวว่าในทางกายภาพแล้วโครงสร้างพื้นฐานหรืออาคารสถานที่สำคัญที่มีความแข็งแรงทนทาน สามารถต้านรับกับภัยพิบัติที่มีความรุนแรงได้ มักช่วยให้ประชาชนและชุมชนสามารถรับมือกับภัยพิบัติได้ดีมากขึ้นซึ่งจัดเป็นศักยภาพในแบบหนึ่ง ทั้งนี้การปรับเปลี่ยนโครงสร้างบ้านเพื่อให้สัมพันธ์กับกับสภาพแวดล้อมนับเป็นภูมิปัญญาที่ตอบสนองต่อการอยู่อาศัยและลักษณะการดำรงชีพได้อย่างสมเหตุสมผล และยังคงเห็นและได้รับการส่งต่อจากบ้านเรือนยุคแรกจนถึงยุคปัจจุบัน

Table 2 Vulnerability level of building structure in non-flood affected area

District name	Non-Flood affected area (Household/percentage)							
	2010				2017			
	Low	Moderate	High	Very high	Low	Moderate	High	Very high
Krasaesin	1(0.24)	5(1.20)	3(0.72)	-	1(0.24)	5(1.20)	3(0.72)	-
Ranot	7(1.69)	7(1.69)	6(1.45)	-	6(1.45)	8(1.93)	6(1.45)	-
Sating-Pra	2(0.48)	12(2.89)	3(0.72)	1(0.24)	3(0.72)	12(2.89)	2(0.48)	1(0.24)
Singhanakorn	9(2.17)	25(6.02)	11(2.65)	2(0.48)	12(2.89)	29(6.99)	5(1.20)	1(0.24)
Total	19(4.58)	49(11.81)	23(5.54)	3(0.72)	22(5.30)	54(13.01)	16(3.86)	2(0.48)

Remark: Percentage of total sample (415 households)

Table 3 Vulnerability level of building structure in flood affected area

District name	Flood affected area (Household/percentage)							
	2010				2017			
	Low	Moderate	High	Very high	Low	Moderate	High	Very high
Krasaesin	2(0.48)	12(2.89)	16(3.86)	5(1.20)	2(0.48)	16(3.82)	14(3.37)	3(0.72)
Ranot	1(0.24)	57(13.73)	55(13.25)	15(3.61)	2(0.48)	61(14.70)	47(11.33)	18(4.34)
Sating-Pra	4(0.96)	32(7.71)	40(9.64)	14(3.37)	2(0.48)	38(9.16)	37(8.92)	13(3.13)
Singhanakorn	2(0.48)	26(6.27)	33(7.95)	7(1.69)	3(0.72)	34(8.19)	27(6.51)	4(0.96)
Total	9(2.17)	127(30.60)	144(34.70)	41(9.88)	9(2.17)	149(35.90)	125(30.12)	38(9.16)

Remark: Percentage of total sample (415 households)

2. ผลการวิเคราะห์ถดถอยในการทำนายความเปราะบางด้านกายภาพของโครงสร้างบ้านเรือน

ตัวชี้วัดที่สามารถทำนายความเปราะบางในพื้นที่ที่ไม่ได้รับผลกระทบจากอุทกภัยในปี พ.ศ. 2553 โดยทำนายได้ร้อยละ 61 (R^2 = .606) มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 มีดังนี้ ตัวชี้วัดด้านประเภทของดิน ตัวชี้วัดด้านวัสดุหน้าต่าง ตัวชี้วัดด้านวัสดุประตู ตัวชี้วัดด้านวัสดุพื้น ตัวชี้วัดด้านการยกพื้นบ้าน ตัวชี้วัดด้านจำนวนชั้นของบ้าน (β = .296, .297, .278, .247, .202, .152 ตามลำดับ) และในพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากอุทกภัย พ.ศ.2553 พบว่า ตัวชี้วัดที่สามารถทำนายความเปราะบางด้านกายภาพของโครงสร้างอาคารบ้านเรือนได้ โดยทำนายได้โดยทำนายได้ร้อยละ 48 (R^2 = .480) มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ดังนี้ ตัวชี้วัดด้านสภาพบ้าน ตัวชี้วัดด้านวัสดุพื้น ตัวชี้วัดด้านการยกพื้นบ้าน ตัวชี้วัดด้านวัสดุมุงหลังคา ตัวชี้วัดด้านระยะห่างจากชายฝั่ง ตัวชี้วัดด้านจำนวนชั้นของบ้าน ตัวชี้วัดด้านประเภทของดิน ตัวชี้วัดด้านระยะเวลาของเหตุการณ์ที่เกิดอุทกภัย ตัวชี้วัดด้านระดับน้ำสูงสุดที่ท่วมตัวบ้าน และตัวชี้วัดด้านวัสดุหน้าต่าง (β = .252, .251, .230, .191, .182, .169, .157, .138, .137, .123 ตามลำดับ)

ในพื้นที่ที่ไม่ได้รับผลกระทบจากอุทกภัยปี พ.ศ. 2560 พบว่า มีตัวชี้วัด ที่สามารถทำนาย ความเปราะบางด้านกายภาพของโครงสร้างอาคารบ้านเรือนได้ โดยทำนายได้ร้อยละ 57 (R^2 = .571) มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05มีดังนี้ ตัวชี้วัดด้านวัสดุหน้าต่าง ตัวชี้วัดด้านประเภทของดิน ตัวชี้วัดด้านวัสดุมุงหลังคา ตัวชี้วัดด้านระยะห่างจากชายฝั่ง (β = .322, .296, .231, .180 ตามลำดับ) และในพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากอุทกภัยปี พ.ศ. 2560 พบว่า มีตัวชี้วัด ที่สามารถทำนาย ความเปราะบางด้านกายภาพของโครงสร้างอาคารบ้านเรือนได้ โดยทำนายได้ร้อยละ 48 (R^2 = .475) มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 มีดังนี้ ตัวชี้วัดลักษณะการยกพื้นบ้าน ตัวชี้วัดด้านสภาพบ้าน ตัวชี้วัดด้านระยะเวลาที่เกิดอุทกภัย ตัวชี้วัดด้านวัสดุพื้น ตัวชี้วัดด้านจำนวนชั้นของบ้าน ตัวชี้วัดด้านระยะห่างจากชายฝั่ง ตัวชี้วัดด้านประเภทของดิน ตัวชี้วัดด้านวัสดุมุงหลังคา ตัวชี้วัดด้านระน้ำสูงสุดที่ท่วมตัวบ้าน (β = .233, .231, .204, .201, .186, .163, .146, .139, .103 ตามลำดับ)

ซึ่งตัวชี้วัดที่สามารถทำนายความเปราะบางทั้งในพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากอุทกภัยและไม่ได้รับผลกระทบจากอุทกภัยมีความสอดคล้องกับทฤษฎีขององค์ประกอบความเสี่ยงของความเปราะบางทางกายภาพ (Physical Vulnerability) ที่กล่าวว่าความเปราะบางทางกายภาพเป็นผลจากความรุนแรงของปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ เช่น ความใกล้ใกล้ของการตั้งถิ่นฐาน สถานที่ตั้ง การออกแบบและวัสดุที่ใช้สำหรับสิ่งก่อสร้างที่จำเป็น

และสำหรับบ้าน (UNISDR, 2016) และยังสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Krishnamurthy *et al*. (2011) ที่ทำการศึกษาเรื่องหลักสำคัญของแนวความคิดท้องถิ่นของความเสี่ยงของพายุเฮอริเคนสู่การจัดทำนโยบาย กรณีศึกษาชุมชนที่ประเทศเม็กซิโก พบว่าตัวชี้วัดด้านกายภาพของโครงสร้างบ้านเรือนส่งอิทธิพลสูงสุดต่อความเปราะบางซึ่งส่วนใหญ่มักจะอยู่บริเวณใกล้ชายฝั่ง อีกทั้ง กรมป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย (2558)กล่าวว่าประเภทของวัสดุที่ใช้สร้างบ้านเรือนมีส่วนสำคัญต่อความเปราะบางของโครงสร้างอาคาร





Figure 2 (a) Houses affected by high floods in 2005 and 2010 (b) New strong house and lifted floor

สรุป

ชุมชนบริเวณคาบสมุทรสทิงพระ จังหวัดสงขลาได้รับผลกระทบจากอุทกภัยและคลื่นซัดฝั่งเป็นประจำทุกปี ส่งผลทำให้เกิดความเสียหายกับโครงสร้างบ้านเรือนของผู้ที่อยู่อาศัยในบริเวณนี้ (Figure 2)การศึกษาในครั้งนี้ ทำให้ทราบถึงข้อมูลเชิงภูมิศาสตร์ของสภาพพื้นที่ศึกษา ข้อมูลพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบ รวมถึงข้อมูลโครงสร้างทางกายภาพของโครงสร้างครัวเรือนในปีพ.ศ.2553 และปี พ.ศ.2560 เพื่อนำไปประกอบการวิเคราะห์ความเปราะบางและศักยภาพทางกายภาพของโครงสร้างบ้านเรือน และยังทำให้ได้ข้อค้นพบที่เป็นประโยชน์ต่อชาวบ้านที่อาศัยอยู่ในพื้นที่ศึกษาที่ควรเฝ้าระวังและเพิ่มศักยภาพให้กับโครงสร้างบ้านเรือนเพื่อเตรียมรับมือกับเหตุการณ์อุทกภัยที่อาจเพิ่มความรุนแรงขึ้นได้ในอนาคต นอกจากนั้นแล้วยังมีประโยชน์ในทางนโยบาย กล่าวคือข้อมูลที่ทางผู้วิจัยได้ลงไปสำรวจนั้นสามารถนำไปเป็นข้อมูลสนับสนุนในการวางแผนระยะยาวในการเฝ้าระวังภัยพิบัติได้โดยการร่วมมือกันในหลายๆหน่วยงาน เพื่อที่จะช่วยลดความเปราะบางของโครงสร้างงบ้านเรือนในบริเวณชุมชนชายฝั่งและมีประโยชน์สำหรับการวางแผนการจัดการความเสี่ยง การวางผังเมือง โดยเป็นสิ่งที่บ่งชี้ว่าบริเวณไหนควรจะปลูกสร้างบ้านเรือนประเภทใด ทั้งนี้ข้อมูลความเปราะบางรายครัวเรือนควรนำมาพิจารณาในอนาคตว่ามีความเป็นไปได้ที่จะพัฒนาระบบเตือนภัยที่สอดคล้องกับแผนการจัดการ ซึ่งมีประสิทธิภาพในการลดความเสี่ยงต่อคนและทรัพย์สิน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล รวมทั้งอาจารย์ที่ปรึกษา และชาวบ้านบริเวณคาบสมุทรสทิงพระที่มีส่วนร่วมและให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ ทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

กรมการปกครอง. 2560. **สถิติจำนวนประชากรและบ้าน ณ ฐานข้อมูลปัจจุบัน**. แหล่งที่มา: http://stat.dopa.go.th/stat/statnew/upstat_m.php,15 เมษายน 2560.

กรมป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย. 2557. **การลดความเสี่ยงจากภัยพิบัติสู่การพัฒนาอย่างยั่งยืน**. สำนักงานโครงการพัฒนาแห่งสหประชาชาติ สำนักงานประเทศไทย, กรุงเทพฯ.

กรมป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย. 2558. **แผนการป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยแห่งชาติ พ.ศ. 2558**. กรมป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย, กรุงเทพฯ.

เพ็ญประไพ ภู่ท่อง. 2557. **โครงการการประเมินศักยภาพด้านการปรับตัวต่อภัยพิบัติทางธรรมชาติของชุมชนพื้นที่คาบสมุทรสทิงพระจังหวัดสงขลาโดยกลุ่มเยาวชนในพื้นที่**. คณะการจัดการสิ่งแวดล้อมมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

รัชกานต์ ฉิมประเสริฐ. 2556. **พัฒนาการของเรือนพื้นถิ่นซึ่งสัมพันธ์กับสภาพแวดล้อมชุมชนลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา ตำบลท่าหิน อำเภอสทิงพระ จังหวัดสงขลา**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยศิลปากร.

สมคิด ภูมิโคกรักษ์. 2559. การประยุกต์ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์เพื่อวิเคราะห์หาพื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดอุทกภัยในจังหวัดนครปฐม. **วารสารเทคโนโลยีภูมิสารสนเทศ มหาวิทยาลัยบูรพา** 2:41-48.

Disaster Preparedness and Management. 2016. **Vulnerability and risk**. Available Source: http://www.odpm.gov.tt/node/162, March 20, 2016.

Krejcie, R. V. and D. W. Morgan. 1970. Determining sample size for research activities. **Educational and psychological measurement** 30(3): 607-610.

Krishnamurthy, P. K., J. B. Fisher and C. Johnson. 2011. Mainstreaming local perceptions of hurricane risk into policymaking: A case study of community GIS in Mexico. **Global Environmental Change** 21: 143-153.

Ministry of Public Health. 2015. **The Study of Vulnerability and Health Adaptation Due to Climate Change in the Flood Impact, 2016. Bangkok**: Ministry of Public Health.

Taramelli, A., E. Valentini and S. Sterlacchini. 2015. A-GIS based approach for hurricane hazard and vulnerability assessment in Cayman Island. **Ocean & Coastal Management** 108: 116-130.

Tran, P., R. Shaw, G. Chantry and J. Norton. 2009. GIS and local knowledge in disaster management: a case study of flood risk mapping in Viet Nam. **GIS and local knowledge in disaster management** 33: 152-169.

UNISDR. 2016. **Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030**. Available Source: https://www.unisdr.org/we/coordinate/sendai-framework2030, October 15, 2016.

การวิเคราะห์ทางการเงินของการนำเข้าไม้แปรรูปจากประเทศมาเลเซียปี พ.ศ. 2560

Financial Analysis of Lumber Imported from Malaysia, 2017

สุนิสา ลำคำ[1*] พสุธา สุนทรห้าว[1] และ สุรินทร์ อ้นพรม[1]

Sunisa Lamkham[1*], Pasuta Sunthornhao[1] and Surin Onprom[1]

บทคัดย่อ

การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาขั้นตอนและวิเคราะห์ทางการเงินของการนำเข้าไม้แปรรูปจากประเทศมาเลเซีย ปี พ.ศ.2560 โดยใช้สัมภาษณ์เชิงลึกในการเก็บข้อมูลจากผู้ประกอบการโรงงานไม้แปรรูปทั้งหมด 12 โรงงาน ในพื้นที่ 4 จังหวัด ได้แก่ กรุงเทพมหานคร นนทบุรี ปทุมธานี และ สมุทรปราการ วิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติเชิงพรรณนา เพื่ออธิบายขั้นตอนการนำเข้าไม้และวิเคราะห์ทางการเงิน โดยกำหนดอัตราดอกเบี้ยร้อยละ 5 7 10 และ 12 เพื่อศึกษาผลตอบแทนต่อต้นทุน (Benefit -cost ratio : B/C) มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net present value : NPV) และ อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal rate of return : IRR) ผลการศึกษาพบว่าขั้นตอนการนำเข้าไม้แปรรูปมีเอกสารที่ต้องสำแดงต่อด่านศุลกากร ได้แก่ ใบรับรองแหล่งกำเนิดสินค้า สัญญาซื้อขาย ใบเสร็จรับเงิน บัญชีไม้ตามขนาด ใบรับรองการปลอดโรคและศัตรูของพืชทุกชนิด และ ใบตราส่งสินค้าทางเรือ ใช้เวลาการตรวจพิสูจน์เอกสารไม่เกิน 1 สัปดาห์ ผลการวิเคราะห์ทางการเงิน พบว่า มีความคุ้มค่าในการลงทุนในทุกอัตราดอกเบี้ย โดยมีค่า B/C > 1 NPV > 0 และ IRR มากกว่าอัตราดอกเบี้ยที่กำหนด แสดงว่าการลงทุนได้รับกำไร

ABSTRACT

The objectives of this study were to determine process and financial analysis of importing lumber from Malaysia in 2017. The study implored indepth interview for gathering data from 12 factories In 4 provinces namely: Bangkok, Nonthaburi, Pathum Thani and Samutprakarn. The descriptive statistic were used to explain importing lumber process while financial analysis were given discount rates of 5 7 10 and 12 to analyse parameter of Benefit -cost ratio (B/C), net present value (NPV) and internal rate of return (IRR).The findings in this study revealed the following. In the process of lumber importation, there are documents required to be submitted to the Customs for the clearance of imports consists Certificate of Origin(CO),Sales Contract, Commercial Invoice, Grading Summary, Phytosanitary Certificate and Bill of Lading which duration of process not more than 1 week. Moreover, the study found financial return of every discount rate level have profit which its presented B/C > 1 NPV > 0 and IRR more than discount rate.

Key Words: lumber, financial analysis, Malaysia, Benefit -cost ratio, Net present value, Internal rate of return

*Corresponding author; e-mail: Sunisa33mo@gmail.com

[1]ภาควิชาการจัดการป่าไม้ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Forest Management, Faculty of Forestry, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

สถานการณ์ปัจจุบันทรัพยากรป่าไม้ของประเทศไทยได้ถูกบุกรุกทำลายจำนวนมากจนเหลือพื้นที่ป่าไม้เพียง 102 ล้านไร่ หรือประมาณ 31.58% ของพื้นที่ประเทศ (กรมป่าไม้, 2561ก) รัฐบาลได้ประกาศยกเลิกการสัมปทานป่าไม้ (ป่าบก) ในปี พ.ศ. 2532 ทำให้ปริมาณไม้ที่ผลิตได้ในประเทศไม่เพียงพอต่อความต้องการ ทำให้พื้นที่ป่าไม้ที่เหลืออยู่ไม่สามารถผลิตไม้เพียงพอต่อความต้องการใช้ของประชาชน (วิทูร, 2538) กล่าวว่าเมื่อปริมาณการใช้ไม้เพิ่มมากขึ้นจึงจำเป็นต้องนำเข้าไม้ในรูปของไม้ซุงและไม้แปรรูปเพื่อเป็นวัตถุดิบป้อนโรงงาน จึงมีการนำเข้าไม้แปรรูปจากต่างประเทศ เพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการใช้ไม้และลดการตัดไม้ภายในประเทศ ข้อมูลของกรมป่าไม้ในปีพ.ศ. 2559 ประเทศไทยมีกำลังการผลิตไม้จำนวน 324,035 ลูกบาศก์เมตร ขณะที่ปริมาณไม้ที่ต้องนำเข้ามีจำนวน 4,367,243 ลูกบาศก์เมตร (กรมป่าไม้, 2561ข) ซึ่งในกรณีที่ไม้ราคาลูกบาศก์เมตรละ 15,000 บาท มีมูลค่าการนำเข้าสูงกว่า 60,000 ล้านบาท การใช้ไม้สำหรับก่อสร้างทั้งในกรุงเทพมหานครและต่างจังหวัดว่ายังคงได้รับความนิยม (สมเพ็ชร์, 2528) ทั้งมีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นและตราบใดที่ยังมีอุตสาหกรรมไม้ ประเทศไทยคงจะต้องนำเข้าไม้ต่อไปอีกในอนาคต การนำเข้าไม้จากต่างประเทศ จะนำเข้าทั้งที่เป็นไม้ซุงและไม้แปรรูป ในอดีตการนำเข้าไม้จากต่างประเทศ จะมีการนำเข้ามาจากหลายประเทศ เช่น มาเลเซีย กัมพูชา สาธารณรัฐสหภาพเมียนมา และสาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว เป็นต้น (กรมป่าไม้, 2561ข) ซึ่งการนำเข้าไม้แปรรูปมีมูลค่าสูงและทำกำไรให้กับผู้ประกอบการมากน้อยเพียงใดนั้นเป็นประเด็นที่น่าสนใจเพราะถ้าในกรณีประเทศไทยหันมาส่งเสริมให้ในประเทศปลูกและซื้อขายกันเองจะส่งผลให้ภาพรวมของการพัฒนาเศรษฐกิจของเกษตรกรและประเทศชาติอย่างแน่นอน การส่งเสริมมีผลต่อการเพิ่มขึ้น หรือลดลงของพื้นที่สวนป่าภาคเอกชนเป็นอย่างมาก และแนวทางในการส่งเสริมโดยเฉพาะจากหน่วยงานของรัฐควรมีมาตรการที่ชัดเจน (พสุธา, 2542) เพราะเงินตราที่ซื้อไม้ในแต่ละปีกว่า 60,000 ล้านบาทนี้จะหมุนเวียนอยู่ภายในประเทศ

ดังนั้นการศึกษาเรื่องนี้จึงมีเป้าหมายเพื่อศึกษาขั้นตอน และวิเคราะห์ทางการเงินของผู้ประกอบการนำเข้าไม้แปรรูปจากประเทศมาเลเซียปี พ.ศ. 2560 ในจังหวัดกรุงเทพมหานคร นนทบุรี ปทุมธานี และสมุทรปราการ ทั้งนี้เนื่องมาจากประเทศไทยมีการนำเข้าไม้จากประเทศมาเลเซียเป็นปริมาณมากที่สุด

อุปกรณ์และวิธีการ

การเก็บรวบรวมข้อมูล

1. ข้อมูลทุติยภูมิ (Secondary data) เป็นการรวบรวมและค้นคว้าข้อมูลพื้นฐานจากเอกสารทางวิชาการ เอกสารที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยทั้งภาครัฐ รัฐวิสาหกิจและภาคเอกชน โดยรวบรวมจากหน่วยงานต่าง ๆ

2. ข้อมูลปฐมภูมิ (Primary data) ได้จากการเก็บข้อมูลเพื่อวิเคราะห์ทางการเงิน โดยเก็บข้อมูลแบบเจาะลึกเพื่อให้ได้ข้อมูลของผู้ประกอบการในการนำเข้าไม้แปรรูปจากประเทศมาเลเซียปี พ.ศ. 2560 โดยทำการสัมภาษณ์เชิงลึกผู้ประกอบการเพื่อให้ได้ข้อมูลด้านต้นทุน และรายได้ ซึ่งมีผู้ประกอบการจังหวัดกรุงเทพมหานครจำนวน 18 ราย จังหวัดนนทบุรีจำนวน 7 ราย จังหวัดปทุมธานี จำนวน 8 ราย และจังหวัดสมุทรปราการ จำนวน 5 ราย ทั้งหมดจำนวน 38 ราย (สำนักงานปลัดกระทรวงพาณิชย์, 2560) ประชากรที่ใช้ในการวิจัยเป็นผู้ประกอบการนำเข้าไม้แปรรูปจากประเทศมาเลเซียในจังหวัดกรุงเทพมหานคร นนทบุรี ปทุมธานี และสมุทรปราการ โดยในแต่ละจังหวัดจะทำการสุ่มเลือกมา 3 โรงงาน ตามปริมาณการนำเข้า มาก ปานกลาง น้อย ซึ่งจะได้จำนวนโรงงานตัวอย่างทั้งหมด 12 โรงงานหรือคิดเป็น 31.57% ของจำนวนโรงงานในกรุงเทพมหานครและปริมณฑลทั้งหมด

การวิเคราะห์ข้อมูล

1. การวิเคราะห์เชิงพรรณนา (descriptive analysis) ข้อมูลที่รวบรวมได้จากแบบสัมภาษณ์จากผู้ประกอบการที่นำเข้าไม้แปรรูปเพื่อให้ทราบขั้นตอนการนำเข้าไม้แปรรูป และข้อมูลทั่วไป

2. การวิเคราะห์เชิงปริมาณ (quantitative analysis) ทำการวิเคราะห์ทางการเงินของผู้ประกอบการนำเข้าไม้แปรรูปจากประเทศมาเลเซีย โดยกำหนดอัตราดอกเบี้ยไว้ที่ 4 ระดับ คือร้อยละ 5 7 10 และ 12

3. การวิเคราะห์ทางการเงินของการนำเข้าไม้แปรรูป โดยใช้เกณฑ์วัดความเหมาะสมในการลงทุน 3 วิธี (สันติ และอรรถชัย, 2557)

1) อัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุน (Benefit – cost ratio: B/C) เป็นอัตราส่วนระหว่างผลตอบแทนที่ได้รับจากการลงทุนซึ่งวัดออกมาในรูปของมูลค่าปัจจุบันของผลตอบแทนกับมูลค่าปัจจุบันของต้นทุนที่จ่ายไปในการดำเนินโครงการ ตลอดจนชั่วอายุโครงการ ณ อัตราดอกเบี้ยหนึ่ง B/C ของโครงการมีค่ามากกว่า 1 แสดงว่าการลงทุนทำโครงการครั้งนี้ได้กำไร

2) มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net present value: NPV) เป็นการหาผลต่างระหว่างมูลค่าปัจจุบันของผลตอบแทน (Present value of benefit: PVB) ที่ได้รับจากการลงทุนกับมูลค่าปัจจุบันของต้นทุนที่จ่าย (Present value of cost: PVC) ไปในการดำเนินโครงการ ตลอดจนชั่วอายุของโครงการ ณ อัตราดอกเบี้ยหนึ่ง NPV มีค่ามากกว่า 0 หรือมีค่าเป็นบวก แสดงว่าการลงทุนทำโครงการครั้งนี้ได้กำไร

3) อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal rate of returns: IRR) หมายถึง ร้อยละของผลตอบแทนที่ได้รับจากการลงทุน อัตราที่ได้รับเป็นอัตราผลตอบแทนที่จุดคุ้มทุนหรือผลตอบแทน (คิดเป็นเปอร์เซ็นต์) ที่ได้รับตลอดระยะเวลาของการลงทุนที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันของผลตอบแทนที่ได้รับมีค่าเท่ากับมูลค่าปัจจุบันของค่าใช้จ่าย (NPV = 0) ค่า IRR มีค่ามากกว่าค่าอัตราดอกเบี้ยที่กำหนด แสดงว่า การลงทุนครั้งนี้ได้กำไร

ผลและวิจารณ์

ข้อมูลพื้นฐานทั่วไปของผู้ประกอบการ

ผู้ประกอบการโรงงานนำเข้าไม้แปรรูปพบว่าเป็นเพศชาย คิดเป็นร้อยละ 91.67 และเพศหญิง ร้อยละ 8.33 อายุของผู้ประกอบการโรงงานนำเข้าไม้แปรรูปโดยมีอายุเฉลี่ย 55.75 ปี มีอายุมากที่สุด 77 ปี และอายุน้อยที่สุด 33 ปี ระดับการศึกษาขั้นสูงสุดของผู้ประกอบการโรงงานนำเข้าไม้แปรรูป พบว่าจบการศึกษาระดับปริญญาโทหรือเทียบเท่า คิดเป็นร้อยละ 41.67 รองลงมาจบการศึกษาระดับปริญญาตรี หรือเทียบเท่า ร้อยละ 33.33 ระดับอนุปริญญา ร้อยละ 16.67 และมัธยมศึกษาตอนปลาย ร้อยละ 8.33

ขั้นตอนการนำเข้าไม้แปรรูปจากประเทศมาเลเซียปี พ.ศ. 2560

ขั้นตอนการนำเข้าไม้แปรรูปจากแหล่งผลิตประเทศมาเลเซีย เอกสารที่ต้องสำแดงต่อด่านศุลกากรไทยก่อนการนำเข้าไม้แปรรูปมีดังนี้ ใบรับรองแหล่งกำเนิดสินค้า (Certificate of Origin:CO) สัญญาซื้อขาย (Sales Contract) ใบเสร็จรับเงิน (Commercial Invoice) บัญชีไม้ตามขนาด (Grading Summary) ใบรับรองการปลอดโรคและศัตรูของพืชทุกชนิด (Phytosanitary Certificate) และ ใบตราส่งสินค้าทางเรือ (Bill of Lading) ใช้เวลาการตรวจพิสูจน์เอกสารไม่เกิน 1 สัปดาห์ เอกสารที่ต้องสำแดงต่อด่านป่าไม้มีดังนี้ ใบเสร็จรับเงิน

(Commercial Invoice) บัญชีไม้ตามขนาด (Grading Summary) ใบรับรองการปลอดโรคและศัตรูของพืชทุกชนิด (Phytosanitary Certificate) เจ้าหน้าตรวจสอบชนิด จำนวน ขนาด ปริมาตร หรือเครื่องหมายไม้ว่าตรงตามเอกสารที่สำแดงหรือไม่ จากนั้นเจ้าหน้าที่จะรับรองการตรวจสอบไม้โดยประทับตราประจำตัวพนักงานเจ้าหน้าที่ที่หน้าตัดของไม้ และออกใบเบิกทางนำไม้หรือของป่าเคลื่อนที่ไปยังจุดหมายปลายทางใช้เวลาการตรวจพิสูจน์เอกสารไม่เกิน 1 – 2 วัน เจ้าหน้าที่ได้ปฏิบัติตามระเบียบกรมป่าไม้ว่าด้วยการนำไม้หรือของป่าเคลื่อนที่ พ.ศ. 2552 และปฏิบัติตามพระราชบัญญัติป่าไม้ พุทธศักราช 2484 มาตรา 39 ผู้ใดนำไม้หรือของป่าเคลื่อนที่ต้องมีใบเบิกทางของพนักงานเจ้าหน้าที่กำกับไปด้วย ตามข้อกำหนดใน กฎกระทรวง (กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2551)

การวิเคราะห์ทางการเงิน

1. ต้นทุนและรายได้

ในการศึกษาทางการเงินของผู้ประกอบการนำเข้าไม้แปรรูปทำการเก็บข้อมูลด้านต้นทุน และรายได้ของผู้ประกอบการโรงงานไม้แปรรูป ซึ่งประกอบไปด้วย ต้นทุน ได้แก่ ค่าจ้างพนักงาน ค่าเสื่อมราคาสำนักงาน ค่าเสื่อมราคาของโกดัง ค่าเช่าที่ดิน ค่าจ้างแรงงาน ค่าภาษี มูลค่าไม้ ค่าขนส่ง และค่าสาธารณูปโภค และรายได้ ได้จากมูลค่าการจำหน่ายไม้ เพื่อศึกษาทางการเงินของผู้ประกอบการโรงงานไม้แปรรูป 12 โรงงาน ค่าเฉลี่ยและผลรวมของต้นทุนและรายได้ในพื้นที่ 4 จังหวัด ได้แก่ กรุงเทพมหานคร นนทบุรี ปทุมธานี และสมุทรปราการ รายละเอียดแสดงใน Table 1

Table 1 Average costs and revenue from lumber investment of all study province in 2013-2017.

Item	Year (Baht)				
	2013	2014	2015	2016	2017
Bangkok province					
Costs					
1. Employee wages	3,096,000	3,232,000	3,352,000	3,472,000	3,592,000
2. Office Depreciation	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000
3. Warehouse Depreciation	520,000	520,000	520,000	520,000	520,000
4. Labor costs	1,150,000	1,198,000	1,252,000	566,000	1,450,000
5. Customs duty	3,346,667	3,373,333	3,033,333	3,156,667	2,800,000
6. Product value	224,688,630	225,897,796	210,156,261	212,872,088	204,507,847
7. Transport fee	3,419,966	3,322,406	3,115,970	3,185,413	2,909,427
8. Public Utilities	378,000	412,400	420,000	376,000	340,000
Total costs	237,599,263	238,955,935	222,849,564	225,148,168	217,119,274
Revenue					
1. Value	236,587,515	291,826,681	271,320,982	267,515,966	253,503,044
Total revenue	236,587,515	291,826,681	271,320,982	267,515,966	253,503,044

Table 1 (Cont.)

Item	Year (Baht)				
	2013	2014	2015	2016	2017
Nonthaburi province					
Costs					
1. Employee wages	2,820,800	2,932,800	3,042,800	3,116,800	3,172,800
2. Office Depreciation	606,667	606,667	606,667	606,667	606,667
3. Warehouse Depreciation	320,000	320,000	320,000	320,000	320,000
4. Rental land	133,333	133,333	133,333	133,333	133,333
5. Labor costs	1,390,600	1,464,600	1,458,600	1,572,600	1,686,600
6. Customs duty	300,000	300,000	300,000	283,333	233,333
7. Product value	56,748,623	54,136,105	53,146,652	48,301,615	46,434,415
8. Transport fee	965,679	887,783	876,030	773,013	764,301
9. Public Utilities	516,600	528,000	504,000	503,200	496,000
Total costs	63,802,302	61,309,288	60,388,082	55,610,561	53,847,449
Revenue					
1. Value	63,471,427	69,911,889	68,605,187	62,387,780	59,498,072
Total revenue	63,471,427	69,911,889	68,605,187	62,387,780	59,498,072
Pathum Thani province					
Costs					
1. Employee wages	2,112,000	2,204,000	2,288,000	2,394,000	2,492,000
2. Office Depreciation	713,333	713,333	713,333	713,333	713,333
3. Warehouse Depreciation	423,333	423,333	423,333	423,333	423,333
4. Labor costs	1,353,000	1,415,500	1,442,400	1,494,400	1,520,500
5. Customs duty	516,667	533,333	566,667	500,000	433,333
6. Product value	44,664,374	44,121,148	45,967,812	45,049,880	45,795,542
7. Transport fee	801,835	772,629	801,629	773,549	761,913
8. Public Utilities	346,000	386,400	424,000	416,000	398,000
Total costs	50,930,542	50,569,676	52,627,174	51,764,495	52,537,954
Revenue					
1. Value	50,560,386	60,075,146	62,365,633	55,220,809	51,278,525
Total revenue	50,560,386	60,075,146	62,365,633	55,220,809	51,278,525
Samut Prakarn province					
Costs					
1. Employee wages	1,112,800	1,170,800	1,228,800	1,286,800	1,368,800
2. Office Depreciation	260,000	260,000	260,000	260,000	260,000
3. Warehouse Depreciation	250,000	250,000	250,000	250,000	250,000
4. Rental land	73,333	73,333	73,333	73,333	73,333
5. Labor costs	1,044,600	1,070,600	1,099,600	1,106,600	1,114,800
6. Customs duty	350,000	400,000	2,916,667	350,000	350,000
7. Product value	35,063,241	40,949,706	36,801,348	34,299,804	32,664,296

Table 1 (Cont.)

Item	Year (Baht)				
	2013	2014	2015	2016	2017
Samut Prakarn province					
8. Transport fee	604,353	686,722	599,390	586,315	546,196
9. Public Utilities	328,000	360,000	350,000	336,000	334,400
Total costs	39,086,327	45,221,161	43,579,138	38,548,852	36,961,825
Revenue					
1. Value	38,952,961	49,183,814	44,205,285	41,204,598	39,242,989
Total revenue	38,952,961	49,183,814	44,205,285	41,204,598	39,242,989
Average total costs	97,854,609	99,014,015	94,860,990	92,768,019	90,116,626
Average total revenue	97,393,072	117,749,383	111,624,272	106,582,288	100,880,658

2. วิเคราะห์ทางการเงิน

การวิเคราะห์ทางการเงินของผู้ประกอบการนำเข้าไม้แปรรูปจากประเทศมาเลเซียทั้ง 4 จังหวัด ใช้เกณฑ์ในการตัดสินใจในการลงทุน คือค่ารายได้ต่อต้นทุน (B/C) มากกว่า 1 และมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) มากกว่า 0 และอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) มากกว่าอัตราดอกเบี้ยที่กำหนด ใช้อัตราดอกเบี้ยร้อยละ 5 7 10 และ 12 ผลการศึกษาแสดงใน Table 2

Table 2 The B/C ratio, NPV, IRR from lumber investment of all study province in 2013-2017.

Item	Discount rate (%)	B/C	NPV (Baht)	IRR (%)
Bangkok province	5	1.031	1,504,004	38.84
	7	1.022	762,428	
	10	1.014	352,993	
	12	1.011	231,995	
Nonthaburi province	5	1.017	227,813	25.95
	7	1.012	110,932	
	10	1.007	47,688	
	12	1.005	29,444	
Pathum Thani province	5	1.024	249,939	25.68
	7	1.016	122,079	
	10	1.010	52,452	
	12	1.007	32,322	
Samut Prakarn province	5	1.011	93,087	28.89
	7	1.008	47,187	
	10	1.005	21,291	
	12	1.004	13,573	

จาก Table 2 พบว่า จังหวัดกรุงเทพมหานคร ณ อัตราดอกเบี้ยร้อยละ 5 7 10 และ12 พบว่า B/C มีค่าเท่ากับ 1.031 1.022 1.014 1.011 ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่า 1 NPV มีค่าเท่ากับ 1,504,004 762,428 352,993 231,995 บาท ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่า 0 และ IRR มีค่าเท่ากับ 38.84% ซึ่งมีค่ามากกว่าอัตราดอกเบี้ยที่กำหนด กล่าวคือโรงงานนำเข้าไม้แปรรูปจังหวัดกรุงเทพมหานครได้รับกำไร

จังหวัดนนทบุรี ณ อัตราดอกเบี้ยร้อยละ 5 7 10 และ12 พบว่า B/C มีค่าเท่ากับ 1.017 1.012 1.007 1.005 ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่า 1 NPV มีค่าเท่ากับ 227,813 110,932 47,688 29,444 บาท ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่า 0 และ IRR มีค่าเท่ากับ 25.95% ซึ่งมีค่ามากกว่าอัตราดอกเบี้ยที่กำหนด กล่าวคือโรงงานนำเข้าไม้แปรรูปจังหวัดนนทบุรีได้รับกำไร

จังหวัดปทุมธานี ณ อัตราดอกเบี้ยร้อยละ 5 7 10 และ12 พบว่า B/C มีค่าเท่ากับ 1.024 1.016 1.010 1.007 ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่า 1 NPV มีค่าเท่ากับ 249,939 122,079 52,452 32,322 บาท ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่า 0 และ IRR มีค่าเท่ากับ 25.68% ซึ่งมีค่ามากกว่าอัตราดอกเบี้ยที่กำหนด กล่าวคือโรงงานนำเข้าไม้แปรรูปจังหวัดปทุมธานีได้รับกำไร

จังหวัดสมุทรปราการ ณ อัตราดอกเบี้ยร้อยละ 5 7 10 และ12 พบว่า B/C มีค่าเท่ากับ 1.011 1.008 1.005 1.004 ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่า 1 NPV มีค่าเท่ากับ 93,087 47,187 21,291 13,573 บาท ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่า 0 และ IRR มีค่าเท่ากับ 28.89% ซึ่งมีค่ามากกว่าอัตราดอกเบี้ยที่กำหนด กล่าวคือโรงงานนำเข้าไม้แปรรูปจังหวัดสมุทรปราการได้รับกำไร

Table 3 The B/C, NPV, IRR of average total costs and total revenue from lumber investment of all study province in 2013-2017.

Discount rate (%)	B/C	NPV (Baht)	IRR (%)
5	1.027	533,155	40.49
7	1.019	271,490	
10	1.012	126,485	
12	1.010	83,500	

จาก Table 3 พบว่า ณ อัตราดอกเบี้ยร้อยละ 5 7 10 และ12 พบว่า B/C มีค่าเท่ากับ 1.027 1.019 1.012 1.010 ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่า 1 NPV มีค่าเท่ากับ 533,155 271,490 126,485 83,500 บาท ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่า 0 และ IRR มีค่าเท่ากับ 40.49% ซึ่งมีค่ามากกว่าอัตราดอกเบี้ยที่กำหนด กล่าวคือโรงงานนำเข้าไม้แปรรูป เฉลี่ยรวมทั้ง 4 จังหวัดได้รับกำไร

สรุป

ผู้ประกอบการโรงงานนำเข้าไม้แปรรูปพบว่าเป็นเพศชาย คิดเป็นร้อยละ 91.67 และเพศหญิง ร้อยละ 8.33 อายุของผู้ประกอบการโรงงานนำเข้าไม้แปรรูปโดยมีอายุเฉลี่ย 55.75 ปี ระดับการศึกษาขั้นสูงสุดของผู้ประกอบการพบว่าจบการศึกษาระดับปริญญาโท คิดเป็นร้อยละ 41.67

ขั้นตอนการนำเข้าไม้แปรรูปจากแหล่งผลิตประเทศมาเลเซีย เอกสารที่ต้องสำแดงต่อด่านศุลกากรไทยก่อนการนำเข้าไม้แปรรูปมีดังนี้ ใบรับรองแหล่งกำเนิดสินค้า สัญญาซื้อขาย ใบเสร็จรับเงิน บัญชีไม้ตามขนาด ใบรับรองการปลอดโรคและศัตรูของพืชทุกชนิด และ ใบตราส่งสินค้าทางเรือ ใช้เวลาไม่เกิน 1 สัปดาห์

ในการศึกษาทางการเงินของผู้ประกอบการนำเข้าไม้แปรรูป ซึ่งประกอบไปด้วย ต้นทุน ได้แก่ ค่าจ้างพนักงาน ค่าเสื่อมราคาสำนักงาน ค่าเสื่อมราคาของโกดัง ค่าเช่าที่ดิน ค่าจ้างแรงงาน ค่าภาษี มูลค่าไม้ ค่าขนส่ง และค่าสาธารณูปโภค และรายได้ได้จากมูลค่าการจำหน่ายไม้ ผลการวิเคราะห์ทางการเงินของผู้ประกอบการนำเข้าไม้แปรรูปที่มีขนาดเล็ก กลาง ใหญ่ รวมจำนวน 12 โรงงาน ในพื้นที่ 4 จังหวัด ได้แก่ กรุงเทพมหานคร นนทบุรี ปทุมธานี และสมุทรปราการ พบว่าโรงงานทั้ง 4 จังหวัดมีความคุ้มค่าในการลงทุนในทุกอัตราดอกเบี้ยที่กำหนดไว้ โดยมีค่า B/C > 1 NPV > 0 และ IRR > อัตราดอกเบี้ยที่กำหนด แสดงว่าการลงทุนได้รับกำไร

เอกสารอ้างอิง

กรมป่าไม้. 2561ก. **สถิติการป่าไม้ของประเทศไทยปี 2561**. ส่วนศูนย์ข้อมูลกลาง สำนักสารนิเทศ กรมป่าไม้, กรุงเทพฯ.

_____. 2561ข. **สถิติป่าไม้**. แหล่งที่มา: http://forestinfo.forest.go.th/Content.aspx?id=9, 11 สิงหาคม 2561.

กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2551. **กฎหมายทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม**. สำนักงานปลัดกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ.

พสุธา สุนทรห้าว. 2542. **อุปทานไม้ท่อนยูคาลิปตัสและการวิเคราะห์ด้านการเงินของสวนป่าภาคเอกชนในประเทศไทยปี พ.ศ. 2540**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วิฑูร พงศ์ปรีตร. 2538. **การแปรรูปไม้และผลิตภัณฑ์ไม้แปรรูป**. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

วุฒิพล หัวเมืองแก้ว. 2553. **เศรษฐศาสตร์ทรัพยากรป่าไม้**. ภาควิชาการจัดการป่าไม้ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สมเพ็ชร์ มังกรดิน. 2528. **เศรษฐศาสตร์ทรัพยากรป่าไม้**. คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สันติ สุขสอาด และอรรถชัย บรมบัญญัติ. 2557. การตลาดวิเคราะห์ทางการเงินของการลงทุนทำสวนไม้กฤษณาในจังหวัดระยอง. **วารสารวนศาสตร์** 33 (2): 103-112.

สำนักงานปลัดกระทรวงพาณิชย์. 2560. **รายชื่อผู้ประกอบการนำเข้าไม้แปรรูปจากประเทศมาเลเซีย** แหล่งที่มา: http://www2.ops3.moc.go.th/ie/Default.aspx, 17 สิงหาคม 2560.

การประเมินหาปริมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดิน จากข้อมูลภาพดาวเทียม Landsat 8 ในพื้นที่วนอุทยานนครไชยบวร จังหวัดพิจิตร

Estimation of Above Ground Biomass Using Landsat 8 Satellite Imagery in Nakhon Chai Boworn Forest Park, Phichit Province

กฤติณ สุดโต[1*] วีระภาส คุณรัตนสิริ[1] และ วันชัย อรุณประภารัตน์[2]

Krittin Sudto[1*], Weeraphart Khunrattanasiri[1] and Wanchai Arunpraparut[2]

บทคัดย่อ

การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อประเมินหาปริมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดิน จากข้อมูลภาพดาวเทียม Landsat 8 ในพื้นที่วนอุทยานนครไชยบวร จังหวัดพิจิตร โดยการวิเคราะห์สมการถดถอยหาความสัมพันธ์ระหว่างมวลชีวภาพเหนือพื้นดินกับค่าการสะท้อนแสงของแถบความถี่ที่เกี่ยวข้องและดัชนีพืชพรรณสังเคราะห์ขึ้นจากข้อมูลภาพดาวเทียม Landsat 8 ได้แก่ แถบความถี่เขียว แถบความถี่แดง แถบความถี่อินฟราเรดใกล้ Ratio Vegetation Index (RVI), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Difference Vegetation Index (DVI), Infrared Percentage Vegetation Index (IPVI), Transformation Vegetation Index (TVI), และSoil - Adjusted Vegetation Index (SAVI) พบว่า รูปแบบสมการที่เหมาะสมที่สุดเป็นสมการความสัมพันธ์ระหว่างมวลชีวภาพเหนือพื้นดินกับดัชนีพืชพรรณ TVI อยู่ในรูปแบบสมการมวลชีวภาพเหนือพื้นดิน = $0.0000004e^{16.346x}$ มีค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนดเท่ากับ 0.685 ประเมินมวลชีวภาพเหนือพื้นดินในพื้นที่วนอุทยานนครไชยบวรได้ทั้งสิ้น 31,431.567 ตัน

ABSTRACT

The objective of this study was to estimate Above Ground Biomass (AGB) using Landsat 8 satellite imagery in Nakhon Chai Boworn Forest Park, Phichit Province. The relationship between AGB and three Landsat 8 bands (i.e. red band, green band, and near-infrared band) and six vegetation index (i.e. Ratio Vegetation Index (RVI), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Difference Vegetation Index (DVI), Infrared Percentage Vegetation Index (IPVI), Transformation Vegetation Index (TVI), and Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI)) were based on regression analysis method. The results showed that the best model was TVI with the equation was AGB = $0.0000004e^{16.346x}$ and the coefficient of determination (R^2) was 0.685. In addition, total AGB in Nakhon Chai Boworn Forest Park was 31,431.567 tons.

Key Words: above ground biomass, Landsat 8, Nakhon Chai Boworn Forest Park

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

[1]ภาควิชาการจัดการป่าไม้ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 50 ถ.พหลโยธิน เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Forestry Management, Faculty of Forestry, Kasetsart University, Bangkok 10900

[2]ภาควิชาวิศวกรรมป่าไม้ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 50 ถ.พหลโยธิน เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

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

คำนำ

ป่าไม้เป็นทรัพยากรธรรมชาติที่มีความสำคัญทั้งทางตรงและทางอ้อมต่อสิ่งมีชีวิตไม่ว่าจะเป็นมนุษย์หรือสัตว์ อีกทั้งยังช่วยในการรักษาสมดุลของสิ่งแวดล้อม หากป่าไม้ถูกทำลายไปย่อมส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมที่เกี่ยวข้องอื่นๆ และยังก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global Warming) จากปัญหาดังกล่าวนี้ ทำให้หลายประเทศทั่วโลกพยายามหาทางแก้ไขปัญหาโดยได้ทำการจัดตั้งอนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศ (United Nations Framework Convention on Climate Change: UNFCC) ขึ้นตั้งแต่ปี พ.ศ. 2535 มีเป้าหมายในการรักษาระดับความเข้มข้นของก๊าซเรือนกระจกในบรรยากาศให้คงที่และอยู่ในระดับที่ปลอดภัย ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าต้นไม้นั้นจะสามารถช่วยดูดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากบรรยากาศ กระบวนการสังเคราะห์แสงและนำมาสะสมไว้ในรูปของมวลชีวภาพ (Biomass) ทั้งในส่วนเหนือพื้นดินและใต้พื้นดิน

การรักษาทรัพยากรธรรมชาติและความหลากหลายทางชีวภาพที่ยังเหลืออยู่เป็นสิ่งจำเป็นอย่างมาก ซึ่งวนอุทยานนครไชยบวรถือว่าเป็นพื้นที่ที่มีกลุ่มไม้ยางนาธรรมชาติที่ค่อนข้างสมบูรณ์จัดเป็น 1 ใน 19 แหล่งพันธุกรรมไม้ยางนาของกรมป่าไม้และถือได้ว่าเป็นป่าไม้ยางนาผืนสุดท้ายของจังหวัดพิจิตร นับว่าเป็นผืนป่าที่มีความสำคัญมาก เนื่องจากพื้นที่ป่าไม้มีขนาดพื้นที่ใหญ่ทำให้ยากต่อการสำรวจและต้องใช้เวลาในการสำรวจเป็นภาคพื้นดินเวลานาน ด้วยเหตุนี้การนำเทคโนโลยีทางด้านสารสนเทศภูมิศาสตร์ และการรับรู้ระยะไกล (Remote Sensing) มาใช้ในการสำรวจทรัพยากรธรรมชาติ สามารถช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพื้นที่ให้มีสะดวกรวดเร็วและช่วยประหยัดค่าใช้จ่าย

การศึกษาวิจัยครั้งนี้เลือกใช้ข้อมูลภาพดาวเทียม Landsat 8 ในการประเมินมวลชีวภาพเหนือพื้นดิน เนื่องจากเป็นดาวเทียมที่ให้บริการข้อมูลภาพโดยไม่ต้องเสียค่าใช้จ่าย มีความละเอียดจุดภาพเท่ากับ 30 เมตร ถ่ายภาพซ้ำที่เดิมทุกๆ 16 วัน มาประยุกต์ร่วมกับข้อมูลปริมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินที่ได้จากการสำรวจภาคสนามจากนั้นนำมาศึกษาหาความสัมพันธ์ เพื่อสร้างสมการความสัมพันธ์ในการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินที่มีความเหมาะสมมากที่สุด เพื่อนำไปประมาณหามวลชีวภาพเหนือพื้นดินบริเวณวนอุทยานนครไชยบวร ซึ่งข้อมูลดังกล่าวจะช่วยให้ทราบปริมาณมวลชีวภาพในพื้นที่วนอุทยาน ช่วยในการวางแผนการจัดการพื้นที่และติดตามแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงปริมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินในอนาคต

อุปกรณ์และวิธีการ

1.พื้นที่ศึกษา

วนอุทยานนครไชยบวร ตั้งอยู่ที่หมู่ 2 บ้านหนองดง ตำบลท่าเสา อำเภอโพทะเล จังหวัดพิจิตร มีเนื้อที่ประมาณ 1,080 ไร่ หรือ 1.728 ตารางกิโลเมตร อยู่ในเขตป่าสงวนแห่งชาติป่าหนองดง ตามกฎกระทรวงฉบับที่ 155 (พ.ศ. 2509) กรมป่าไม้ได้จัดตั้งเป็นวนอุทยานเมื่อวันที่ 25 กรกฎาคม 2532

2. การเตรียมข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม

2.1 เลือกภาพจากดาวเทียม Landsat 8 ระบบบันทึกข้อมูลระบบ Operational Land Imager (OLI) มีความละเอียดจุดภาพเท่ากับ 30 เมตร Path 130 Row 049 บันทึกภาพเมื่อวันที่ 19 มกราคม พ.ศ. 2561 เวลา 10.41.28 น. มีเมฆปกคลุมร้อยละ 1.18 มาใช้ในการศึกษาประเมินหาปริมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดิน ในพื้นที่วนอุทยานนครไชยบวร

2.2 ปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเชิงรังสี (Radiometric Correction) ให้ภาพดาวเทียม Landsat 8 โดยการแปลงค่าดิจิตอลเชิงเลข (Digital Number: DN) ของข้อมูลภาพดาวเทียมให้เป็นค่าการสะท้อนแสงเหนือชั้นบรรยากาศ (Top of Atmosphere: TOA) เพื่อลดความผิดพลาดของพลังงานที่สะท้อนจากวัตถุบนภาพดาวเทียมไปสู่อุปกรณ์บันทึกข้อมูล โดยปรับแก้ปัจจัยรบกวนจากชั้นบรรยากาศ ได้แก่ สภาพอากาศ สภาพภูมิประเทศ อุณหภูมิ และมุมตกกระทบของแสงอาทิตย์

2.3 การปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเชิงเรขาคณิต (Geometric Correction) ทำการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเชิงเรขาคณิตของข้อมูลภาพดาวเทียม โดยใช้กระบวนการ Image to Map Registration เป็นการกำหนดตำแหน่งของจุดภาพให้เข้ากับระบบพิกัดของแผนที่ด้วยการใช้จุดควบคุมทางภาคพื้น (Ground Control Point: GCP) โดยใช้รูปแบบสมการพหุนาม (Polynomial Equation) ลำดับที่ 2 ใช้ค่าพิกัดทางภูมิศาสตร์ระบบ Universal Transverse Mercator (UTM) พื้นหลักฐาน (Datum) แบบ WGS 1984

2.4 จัดทำข้อมูลดัชนีพืชพรรณรูปแบบต่างๆ จากข้อมูลภาพดาวเทียม Landsat 8 โดยใช้ค่าการสะท้อนแสงของแถบความถี่ที่เกี่ยวข้องและดัชนีพืชพรรณต่างๆ ได้แก่ ดัชนีพืชพรรณ RVI NDVI DVI IPVI TVI และSAVI เพื่อหารูปแบบดัชนีพืชพรรณที่มีความเหมาะสม ที่จะใช้สำหรับการประเมินหาปริมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินบริเวณพื้นที่วนอุทยานนครไชยบวร

3. การสำรวจภาคสนาม

3.1 การวางแปลงตัวอย่าง

ทำการวางแปลงตัวอย่างเพื่อสำรวจหาปริมาณมวลชีวภาพโดยวิธีการสำรวจแบบ วิธีการจำแนกชั้น Stratification system โดยทำการคัดเลือกพื้นที่วางแปลงตัวอย่าง เพื่อเป็นตัวแทนในการวางแปลงสำรวจออกเป็น 3 ระดับ คือ บริเวณที่มีความอุดมสมบูรณ์มาก ปานกลาง และน้อย โดยพิจารณาจากข้อมูลภาพถ่ายโปรแกรม Google Earth ทำการวางแปลงตัวอย่างแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 40 x40 เมตร ให้ครอบคลุมและกระจายทั่วพื้นที่วนอุทยานนครไชยบวร ซึ่งมีลักษณะพื้นที่เป็นป่าดิบแล้ง

3.2 การเก็บข้อมูลภาคสนาม

3.2.1 การวัดขนาดเส้นผ่านผ่านศูนย์กลางทำการวัดต้นไม้ทุกต้นที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ระดับอกตั้งแต่ 4.5 เซนติเมตรขึ้นไป โดยทำการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ระดับ 1.30 เมตร (DBH) โดยใช้เทปวัดขนาด ที่เรียกว่า Diameter tape

3.2.2 การวัดความสูงของต้นไม้จะใช้เครื่องมือวัดความสูง Vertex IV hypsometer เป็นเครื่องมือที่สามารถวัดมุมและความสูงของต้นไม้

4. การวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 การประเมินหามวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นไม้ส่วนต่างๆ ได้แก่ ลำต้น กิ่ง และใบ โดยประเมินค่าที่ได้จากสมการแอลโลเมตรี (Allometric equation) แสดงดัง Table 1

Table 1 Allometric equation for estimation of above ground biomass in Nakhon Chai Boworn Forest Park.

Forest Types	Equation
Dry evergreen forest[1]	$Ws = 0.0509 (D^2H)^{0.919}$
	$Wb = 0.00893 (D^2H)^{0.977}$
	$Wl = 0.0140 (D^2H)^{0.669}$
	*AGB = Ws+Wb+Wl
Bambusa Bambos[2]	$Wc = 0.3044 (D)^{1.7526}$
	$Wb = 0.0795 (D)^{2.0827}$
	$Wl = 0.0088 (D)^{1.1385}$
	$*AGB = 0.3939 (D)^{1.8325}$
Vine[3]	$*AGB = 0.8622 (D)^{2.0210}$

หมายเหตุ [1] Tsutsumi *et al.* (1983), [2] สาพิศ (2533), [3] ชิงชัย และคณะ (2554)

* คือ สมการที่ใช้ในการหามวลชีวภาพส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินทั้งหมด (กิโลกรัม)

เมื่อ Ws คือ มวลชีวภาพส่วนของลำต้น (กิโลกรัม)

Wb คือ มวลชีวภาพส่วนของกิ่ง (กิโลกรัม)

Wl คือ มวลชีวภาพส่วนของใบ (กิโลกรัม)

Wc คือ มวลชีวภาพส่วนของลำไม้ไผ่ (กิโลกรัม)

AGB คือ น้ำหนักมวลชีวภาพส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินทั้งหมด (กิโลกรัม)

D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ระดับอก (เซนติเมตร)

H คือ ความสูงของต้นไม้ถึงปลายยอด (เมตร)

4.2 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างมวลชีวภาพเหนือพื้นดินกับแถบความถี่ที่เกี่ยวข้องและดัชนีพืชพรรณที่สังเคราะห์ขึ้นจากภาพดาวเทียม Landsat 8 ด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอย ทั้งแบบเส้นตรงและแบบไม่เป็นเส้นตรง โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด (R^2) สำหรับใช้เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของดัชนีพืชพรรณต่างๆ กับมวลชีวภาพเหนือพื้นดิน เพื่อหาสมการประมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินที่เหมาะสมที่สุด

4.3 นำสมการที่มีความเหมาะสมที่สุดมาใช้ในการประมาณหามวลชีวภาพเหนือพื้นดิน เพื่อประเมินหาประมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินในพื้นที่วนอุทยานนครไชยบวร จังหวัดพิจิตร

ผลและวิจารณ์

1. การเตรียมข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม

1.1 ปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเชิงรังสี (Radiometric Correction)

ทำการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเชิงรังสี (Radiometric Correction) ซึ่งเป็นการแปลงค่าดิจิตอลเชิงเลข (Digital Number) ของข้อมูลภาพดาวเทียมให้เป็นค่าการสะท้อนแสงเหนือชั้นบรรยากาศ (Top of

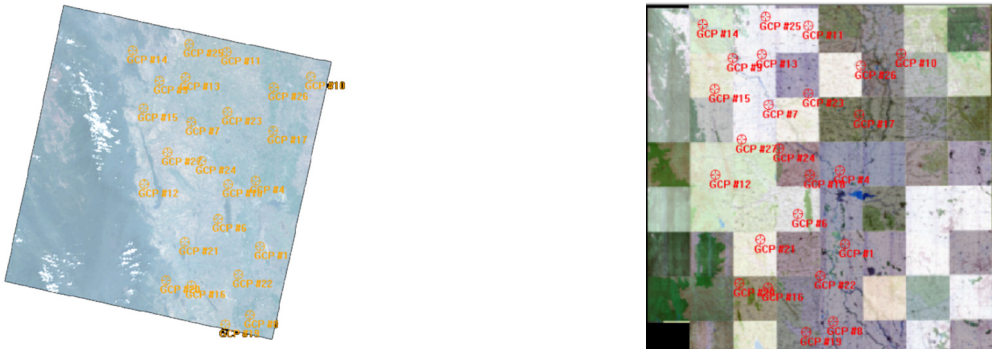
Atmosphere) พบว่า มีการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวเลขไปเป็นค่าการสะท้อนช่วงคลื่นที่แท้จริงของข้อมูลภาพโดยมีค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด และค่าเฉลี่ย แสดงดัง Table 2

Table 2 The statistical parameters of Landsat 8 imagery data from Pre-processing to Post Processing.

Band	Pre-processing ($Wm^{-2} * sr * \mu m$)			Post Processing (Unitless)		
	Min.	Max.	Mean	Min.	Max.	Mean
Green	7191	25205	8686.29	0.06	0.57	0.10
Red	6449	29937	8121.59	0.04	0.71	0.08
Near Infrared	5776	37053	13504.89	0.02	0.90	0.24

1.2 การปรับแก้ข้อมูลความผิดพลาดเชิงเรขาคณิต (Geometric Correction)

ทำการปรับแก้ความผิดพลาดเชิงเรขาคณิตโดยการใช้แผนที่ภูมิประเทศมาตราส่วน 1:50,000 ลำดับชุด L7018 ของกรมแผนที่ทหาร มาใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงทางภูมิศาสตร์และกำหนดตำแหน่งพิกัดของจุดภาพให้เข้ากับพิกัดทางภูมิศาสตร์ โดยใช้จุดควบคุมภาคพื้นดินทั้งสิ้น 24 จุด และมีค่าความผิดพลาดในการปรับแก้เฉลี่ย (Root Mean Square Error) เท่ากับ 0.4276 จุดภาพการกระจายของจุดควบคุมภาคพื้นดิน แสดงดัง Figure 1



Landsat 8 Satellite Imagery Topographic Map

Figure 1 Ground control point for geometric correction of Landsat 8 satellite imagery.

2. การสำรวจภาคสนาม

2.1 การสำรวจครั้งนี้ได้ทำการวางแปลงตัวอย่างแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 40 × 40 เมตร ทั้งสิ้น 15 แปลงตัวอย่าง โดยทั้ง 3 ระดับทำการเก็บข้อมูลระดับละ 5 แปลง ให้กระจายครอบคลุมทั่วพื้นที่วนอุทยานนครไชยบวร แสดงดัง Figure 2

2.2 การเก็บข้อมูล

เก็บข้อมูลต้นไม้ในแปลงตัวอย่างโดยในส่วนการวัดความโตของต้นไม้วัดต้นไม้ทุกต้นทั้งที่มีชีวิตและต้นตายที่มีขนาด DBH ตั้งแต่ 4.5 เซนติเมตร พร้อมทำการวัดความสูง ในส่วนของเถาวัลย์และไม้ไผ่ ทำการวัดขนาดความโตที่มีขนาด DBH ตั้งแต่ 2 เซนติเมตร โดยทำการวัดข้อมูลในช่วงเดือนตุลาคมถึงธันวาคม 2560

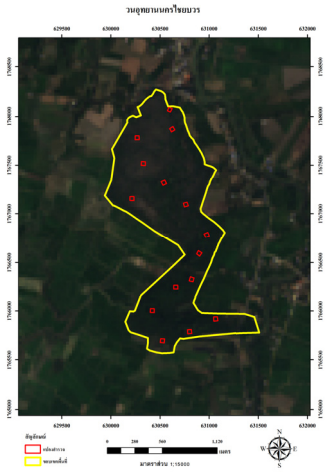


Figure 2 Sample plots position of Nakhon Chai Boworn Forest Park.

3. การวิเคราะห์ข้อมูล

3.1 นำข้อมูลความโตและความสูงของต้นไม้ในแปลงตัวอย่างที่ทำการสำรวจ มาคำนวณหาปริมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินโดยประยุกต์ใช้สมการแอลโลเมตรีใน Table 1 เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินต่อจุดภาพของภาพดาวเทียม Landsat 8 แสดงดัง Table 3

Table 3 Above ground biomass of simple plot was calculated using the allometric equation.

ID	Biomass (ton per hectare)			Above Ground Biomass (ton per hectare)	Above Ground Biomass (ton per pixel)
	Tree	Vine	Bamboo		
Low 1	21.894	0.945	-	22.839	2.056
Low 2	149.894	4.450	2.808	157.152	14.144
Low 3	84.236	6.186	-	90.422	8.138
Low 4	40.115	2.778	-	42.893	3.860
Low 5	28.856	1.329	-	30.185	2.717
Medium 1	232.736	0.689	-	233.425	21.008
Medium 2	184.067	17.077	-	201.144	18.103
Medium 3	252.683	9.800	-	262.483	23.623
Medium 4	225.165	24.899	-	250.064	22.506
Medium 5	176.217	4.580	-	180.797	16.272
High 1	317.513	20.350	8.206	346.069	31.146
High 2	297.365	2.463	-	299.828	26.985
High 3	270.675	4.005	-	274.68	24.721
High 4	299.426	21.019	-	320.445	28.840
High 5	362.150	19.412	6.559	388.121	34.931

3.2 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินกับค่าการสะท้อนแสงของแถบความถี่ที่เกี่ยวข้องและดัชนีพืชพรรณรูปแบบต่างๆ ได้แก่ แถบความถี่เขียว แถบความถี่แดง แถบความถี่

อินฟราเรดใกล้ และดัชนีพืชพรรณ RVI NDVI DVI IPVI TVI และ SAVI บริเวณตำแหน่งแปลงตัวอย่าง เพื่อหาความสัมพันธ์กับข้อมูลภาพดาวเทียม ในรูปแบบสมการเส้นตรงและไม่เส้นตรง แสดงดัง Table 4

จากการวิเคราะห์ข้อมูลใน Table 4 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างมวลชีวภาพกับดัชนีพืชพรรณทั้ง 9 รูปแบบ ในรูปแบบสมการเส้นตรงและไม่เป็นเส้นตรง พบว่า รูปแบบสมการเอ็กซ์โพเนนเชียล มีความสัมพันธ์ระหว่างมวลชีวภาพเหนือพื้นดินกับดัชนีพืชพรรณ TVI มากที่สุดมีค่า R^2 เท่ากับ 0.685 ดังสมการ $Y = 0.0000004^{16.346x}$

นำสมการมาทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อหาค่าความมีนัยสำคัญทางสถิติของสมการที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้สถิติทดสอบแบบ Overall F-test พบว่า จากการทดสอบมีค่าทางสถิติมากกว่าค่าในช่วงวิกฤติ หมายความว่า ค่าดัชนีพืชพรรณ TVI สามารถอธิบายความผันแปรของค่าปริมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดิน

3.3 การตรวจสอบค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (Root Mean Square Error) ในแต่ละแปลงสำรวจของมวลชีวภาพเหนือพื้นดินระหว่างมวลชีวภาพที่ได้จากการสำรวจภาคสนามกับสมการการคาดการณ์ พบว่า มีค่าเท่ากับ 5.078

3.4 การคาดการณ์มวลชีวภาพเหนือพื้นดิน นำค่าจุดภาพดัชนีพืชพรรณ TVI บริเวณพื้นที่วนอุทยานนครไชยบวร มาคำนวณปริมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินโดยแทนค่าลงในสมการ $Y = 0.0000004^{16.346x}$ พบว่าพื้นที่วนอุทยานนครไชยบวรมีพื้นที่ประมาณ 1,080 ไร่ มีปริมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินเท่ากับ 31,431.567 ตัน

Table 4 The Correlation between Above Ground Biomass and Reflectance and Vegetation index.

Vegetation index	Equation between Above Ground Biomass and Vegetation index							
	Linear		Exponential		Logarithm		Power	
	Equation	R^2	Equation	R^2	Equation	R^2	Equation	R^2
Green	y = -1338.5x + 131.17	0.436	$Y = 337009e^{-119.9x}$	0.463	Y = -114ln(x) - 263.79	0.435	$Y = 0.0000000002x^{-10.18}$	0.459
Red	y = -820.91x + 68.644	0.582	$Y = 1142.4e^{-72.11x}$	0.593	Y = -53.49ln(x) - 131.63	0.589	$Y = 0.00003x^{-4.663}$	0.591
NIR	y = 152.55x - 22.572	0.439	$Y = 0.3817e^{13.368x}$	0.445	Y = 41.398ln(x) + 73.391	0.460	$Y = 1850.1x^{3.6859}$	0.481
RVI	y = 7.1237x - 14.509	0.678	$Y = 0.8364e^{0.6075x}$	0.652	Y = 28.71ln(x) - 24.403	0.671	$Y = 0.3319x^{2.502}$	0.673
NDVI	y = 86.57x - 35.636	0.651	$Y = 0.1176e^{7.6385x}$	0.670	Y = 46.899ln(x) + 41.168	0.623	$Y = 105.59x^{4.1871}$	0.656
DVI	y = 157x - 14.727	0.641	$Y = 0.796e^{13.534x}$	0.603	Y = 29.623ln(x) + 65.508	0.618	$Y = 880.13x^{2.6115}$	0.634
IPVI	y = 173.03x - 122.12	0.651	$Y = 6E\text{-}05e^{15.272x}$	0.670	Y = 134.29ln(x) + 46.597	0.642	$Y = 168.37x^{11.902}$	0.666
*TVI	y = 179.23x - 171.47	0.650	$*Y = 4E\text{-}07e^{16.346x}$	*0.685	Y = 183.4ln(x) + 8.004	0.643	$Y = 5.2886x^{16.787}$	0.682
SAVI	y = 106.57x - 21.738	0.641	$Y = 0.4215e^{9.2693x}$	0.641	Y = 35.07ln(x) + 53.52	0.626	$Y = 310.46x^{3.1065}$	0.649

Remark * Equation used in this research.

สรุป

1. การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างมวลชีวภาพเหนือพื้นดินกับค่าการสะท้อนแสงของแถบความถี่ที่เกี่ยวข้องและดัชนีพืชพรรณที่สังเคราะห์ขึ้นจากข้อมูลภาพดาวเทียม Landsat 8 ทั้งในรูปแบบ พบว่า รูปแบบสมการเอ็กซ์โพเนนเชียล มีความสัมพันธ์ระหว่างมวลชีวภาพกับดัชนีพืชพรรณ TVI สูงสุดซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด เท่ากับ 0.685 มีรูปแบบความสัมพันธ์ดังสมการ $Y = 0.0000004e^{16.346x}$

2. การประเมินหาปริมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดิน จากข้อมูลภาพดาวเทียม Landsat 8 ในพื้นที่วนอุทยานนครไชยบวร โดยเลือกใช้รูปแบบสมการและดัชนีพืชพรรณที่มีความเหมาะสมที่สุดในการหาปริมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดิน พบว่า ในพื้นที่วนอุทยานนครไชยบวร มีพื้นที่เท่ากับ 1,080 ไร่ มีมวลชีวภาพเหนือพื้นดินประมาณ 31,431.567 ตัน

เอกสารอ้างอิง

ชิงชัย วิริยะบัญชา, ภาณุมาศ ลาดปาละ และวัฒนา ศักดิ์ชูวงษ์. 2554. การสะสมคาร์บอนของเถาวัลย์ ในป่าธรรมชาติ ณ อุทยานแห่งชาติแก่งกระจาน, ใน **การประชุมวิชาการระดับชาติ เรื่อง ประเทศไทยกับภูมิอากาศ ครั้งที่ 2 : การเปลี่ยนกระบวนทัศน์สู่เศรษฐกิจสีเขียว**.องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน).

สาพิศ ร้อยอำแพง. 2533. **ผลผลิตมวลชีวภาพของไม้ไผ่พื้นเมือง 4 ชนิด**. ภาควิชาวนวัฒนวิทยา คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Tsutsumi, T., K. Yoda, P. Sahunalu, P. Dhanmanonda and B. Prachaiyo. 1983. Forest :Felling, Burning and Regeneration, pp. 13-62. *In* K. Kyuma and C. Pairintra, eds. **Shifting Cultivation. An Experiment at Nam Phrom, Thailand and its Implications for Upland Farming in the Monsoon Tropics**.

การใช้ประโยชน์และการจัดการของป่าในป่าชุมชนป่าเขาอังคาร จังหวัดบุรีรัมย์

Utilization and Management of Non-timber Forest Products at Pakhao Angkarn Community Forest, Buri Rum Province

สุวิมล จันทร์น้อย[1*] วิพักตร์ จินตนา[1] และ นิตยา เมี้ยนมิตร[1]

Suwimol Jannoi[1*], Vipak Jintana[1] and Nittaya Mianmit[1]

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการใช้ประโยชน์และการจัดการของป่าในป่าชุมชนป่าเขาอังคาร จังหวัดบุรีรัมย์ โดยใช้วิธีสัมภาษณ์ตัวแทนครัวเรือน จำนวน 210 ราย ร่วมกับการสัมภาษณ์เชิงลึกผู้ให้ข้อมูลหลักจาก 3 หมู่บ้านของตำบลเจริญสุข ศึกษาสังคมพืชแหล่งผลิตของป่าโดยวางแปลงตัวอย่างขนาด 10×20 เมตร จำนวน 8 แปลงในพื้นที่เก็บหาของป่า พบว่าร้อยละ 49.05 ของครัวเรือนตัวอย่าง ใช้ประโยชน์โดยเก็บหาของป่าเพื่อใช้ในการดำรงชีพและสร้างรายได้เสริม ของป่าที่เก็บหา แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทอาหาร ประกอบด้วยเห็ด 20 ชนิด พืช 9 ชนิด สัตว์ 1 ชนิด และประเภทวัสดุใช้สอย คือ ดินภูเขาไฟสำหรับทำสีย้อมผ้า แหล่งผลิตของป่ามีลักษณะสังคมพืชเป็นป่าเต็งรัง มีไม้เด่น ได้แก่ รัง แดง และมะกอกเกลื้อน (IVI = 93.025, 22.428 และ 12.163 ตามลำดับ) คณะกรรมการป่าชุมชนได้กำหนดกติกาในการจัดการป่าชุมชน เพื่อควบคุมการใช้ประโยชน์ รวมถึงด้านดูแล ฟื้นฟูและป้องกันรักษาป่าชุมชน

ABSTRACT

The objective of this research was to study the utilization and management of non-timber forest products (NTFPs)in the Pakhao Angkarn Community Forest in Buri Rum province. A total of 210 household's representatives were interviewed with a structure questionnaire and key informant in-depth interviews were conducted in 3 villages of Charoen Suk sub-district. Plant community forest in the productive forest was investigated using a purposive 8 sample plots sized of 10×20 meter. The results reveal that 49.05 percent of household's representatives for livelihood and generate income. There are 2 kinds of NTFPs collected, the first is food products comprised 20 species of mushrooms, 9 species of plants and 1 species of animals.The second is material product, volcanic soil for dyeing. The forest type is dry dipterocarp forest dominated by *Shorea siamensis* Miq., *Xylia xylocarpa* (Roxb.) W.Theob.var.kerrii (Craib & Hutch.) I.C.Nielsen.and *Canarium subulatum* Guillaumin. (IVI = 93.025, 22.428 and 12.163 respectively). The community forest committee has established rules for community forest management to control the use of forest including maintenance, restoration and protection of the community forests.

Key Words: Utilization of NTFPs, Management of community forest, Pakhao Angkarn community forest

*Corresponding author; e mail address: Jannoi_34@hotmail.com

[1]ภาควิชาการจัดการทรัพยากรป่าไม้ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 50 ถ.พหลโยธิน เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Forest Management, Faculty of forestry, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

ทรัพยากรป่าไม้มีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ในสังคมไทยมาเป็นเวลานาน โดยเฉพาะชุมชนที่อยู่รอบพื้นที่ป่า พึ่งพิงป่าเพื่อเป็นแหล่งอาหาร ยารักษาโรค เชื้อเพลิง และไม้ใช้สอย (สมศักดิ์, 2550) โดยภาครัฐเปิดโอกาสให้ภาคประชาชนมีส่วนร่วมในการจัดตั้งป่าชุมชน จัดการทรัพยากรป่าไม้ในพื้นที่ให้สมบูรณ์และอนุญาตให้มีการใช้ประโยชน์ของป่าตามวัตถุประสงค์ของชุมชน (กรมป่าไม้, 2553)

ของป่าเป็นผลิตผลตามธรรมชาติจากป่ายกเว้นไม้ รวมทั้งยางไม้ น้ำมันไม้ รังนก ครั่ง รวงผึ้ง น้ำผึ้ง มูลค้างคาวและหินที่ไม่ใช่แร่ตามกฎหมายว่าด้วยแร่ (ราชกิจจานุเบกษา, 2518) โดยในแต่ละชุมชนมีการใช้ประโยชน์ของป่าที่ต่างกัน ขึ้นอยู่กับวัฒนธรรมและความเชื่อในการดำรงชีวิต ซึ่งเป็นเรื่องสำคัญอย่างยิ่งในการจัดการป่าชุมชนให้ยั่งยืนโดยไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและให้มีความสอดคล้องกันระหว่างชุมชนกับสภาพแวดล้อม ทั้งด้านระบบนิเวศและการเมือง (เสน่ห์ และคณะ, 2536)

ป่าชุมชนป่าเขาอังคาร ตำบลเจริญสุข จังหวัดบุรีรัมย์ เป็นป่าชุมชนที่จัดตั้งขึ้นเมื่อ พ.ศ.2553 อยู่ในเขตป่าสงวนแห่งชาติป่าเขาอังคาร มีเนื้อที่ประมาณ 3,432 ไร่ 99 ตารางวา เป็นพื้นที่เนินสูงค่อนข้างชัน ดินเป็นดินภูเขาไฟที่เกิดจากการระเบิดของภูเขาไฟที่ดับไปแล้ว มีหินค่อนข้างมาก เนื้อดินตื้นแต่มีความอุดมสมบูรณ์ค่อนข้างสูง ของป่ามีความหลากหลาย (กรมทรัพยากรธรณี, 2553) ราษฎรในพื้นที่ใกล้เคียงป่าชุมชนใช้ประโยชน์ของป่าจำนวนมาก ราษฎรมีการจัดการป่าชุมชนที่เข้มแข็ง และชุมชนเข้าร่วมโครงการธงพิทักษ์ป่า เพื่อรักษาชีวิตในการดูแล ฟื้นฟู ป้องกันป่าชุมชน ผู้วิจัยจึงเลือกพื้นที่นี้เพื่อศึกษาการใช้ประโยชน์ และการจัดการของป่าในป่าชุมชนป่าเขาอังคาร โดยเน้นการใช้ประโยชน์ และการจัดการป่าชุมชน อันเป็นแนวทางในการจัดการทรัพยากรป่าไม้ในป่าชุมชนแห่งนี้ ให้มีความเหมาะสมกับการดำรงชีวิตของราษฎรในท้องถิ่นต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

การเก็บรวบรวมข้อมูล

1. ปริมาณและการใช้ประโยชน์จากป่าชุมชน

สัมภาษณ์ตัวแทนครัวเรือนตัวอย่างโดยใช้แบบสัมภาษณ์ ด้วยวิธีการสุ่มตัวอย่างแบบแบ่งชั้นภูมิ โดยคำนวณขนาดครัวเรือนตัวอย่าง 3 หมู่บ้าน ที่อยู่ใกล้พื้นที่ป่าชุมชนรัศมี 5 กิโลเมตร (หมู่ที่ 1, 12 และ 14 รวมทั้งสิ้น 461 ครัวเรือน) โดยใช้สูตรของเครซซี่และมอร์แกน (Krejcie and Morgan, 1970) จำนวน 210 ครัวเรือน และกระจายสัดส่วนของแต่ละหมู่บ้านตามแนวทางของสุบงกช (2556) ได้แก่ หมู่ที่ 1, 12 และ 14 จำนวน 77, 77 และ 56 ครัวเรือนตามลำดับ

2. การจัดการป่าชุมชนป่าเขาอังคาร ตำบลเจริญสุข จังหวัดบุรีรัมย์

สัมภาษณ์ครัวเรือนตัวอย่าง 210 ครัวเรือนตามสัดส่วนข้างต้น และสัมภาษณ์เชิงลึกผู้ให้ข้อมูลหลักจำนวน 4 คน ได้แก่ คณะกรรมการป่าชุมชน ผู้นำชุมชนและราษฎรในชุมชน ภายใต้แนวคิดการจัดการป่าชุมชนด้านการฟื้นฟูป่า การป้องกันและการดูแลรักษาป่าชุมชน

3. การศึกษาแหล่งผลิตของป่าในป่าชุมชนป่าเขาอังคาร ตำบลเจริญสุข จังหวัดบุรีรัมย์

วางแปลงสำรวจสังคมพืชในป่าชุมชน โดยใช้แนวเส้นทางเก็บหาของป่าเป็น base line วางแปลงสำรวจขนาด 10×20 เมตร ทั้งหมด 8 แปลง ภายในแบ่งเป็นแปลงย่อยขนาด 10×10 เมตร สำหรับสำรวจแจงนับไม้ต้นและวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก (DBH) ที่มีขนาดความโตตั้งแต่ 4.5 เซนติเมตรขึ้นไปและสูง 1.30 เมตรขึ้น

ไป แปลงขนาด 4×4 เมตร สำหรับสำรวจแจงนับไม้หนุ่ม และวัดขนาด DBH ที่มีขนาดความโตน้อยกว่า 4.5 เซนติเมตรและสูง 1.30 เมตรขึ้นไป และแปลงขนาด 1×1 เมตร สำหรับสำรวจแจงนับลูกไม้ รวมถึงพืชพื้นล่างที่พบ

4. การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ค่าร้อยละ ความถี่ ค่าเฉลี่ย และค่าดัชนีความสำคัญของไม้ต้น ได้แก่ ความหนาแน่นสัมพัทธ์ ความถี่สัมพัทธ์ ค่าเด่นสัมพัทธ์ และค่าดัชนีความสำคัญ

ผลและวิจารณ์

ปริมาณและการใช้ประโยชน์จากป่าชุมชน

จากการศึกษาการใช้ประโยชน์ของป่า พบว่าลักษณะทั่วไปของครัวเรือนตัวอย่างส่วนใหญ่ร้อยละ 70 เป็นเพศหญิง มีอายุเฉลี่ย 54.86 ปี (อายุต่ำสุดคือ 15 ปี และอายุสูงสุดคือ 94 ปี) ส่วนใหญ่จบการศึกษาชั้นประถมศึกษาร้อยละ 69.52 (รองลงมาจบชั้นมัธยมศึกษา อาชีวะศึกษา ปริญญาตรี และไม่ได้ศึกษาร้อยละ 22.86, 3.33, 2.86 และ 1.43 ตามลำดับ) ส่วนใหญ่ประกอบอาชีพเกษตรกรรมทำนาร้อยละ 57.14 (รองลงมาประกอบอาชีพรับจ้าง ว่างงาน ค้าขาย แม่บ้าน รับราชการ และอื่นๆ คิดเป็นร้อยละ 17.14, 12.38, 4.29, 4.29, 3.33 และ 1.43 ตามลำดับ) มีรายได้เฉลี่ย 6,854.62 บาทต่อเดือน (รายได้ต่ำสุดคือ 0 บาท และรายได้สูงสุดคือ 74,500 บาท) มีจำนวนสมาชิกเฉลี่ย 4 คนต่อครัวเรือน มีสมาชิกที่ประกอบอาชีพเฉลี่ย 2 คนต่อครัวเรือน มีที่ดินเป็นของตนเองคิดเป็นร้อยละ 86.67

กลุ่มตัวอย่างร้อยละ 49.05 ใช้ประโยชน์ของป่าจากการเก็บหาเอง ร้อยละ 11.90 ใช้ประโยชน์ของป่าแต่ไม่ได้เก็บหาเอง และร้อยละ 39.05 ไม่ได้ใช้ประโยชน์ของป่า ของป่าแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่ 1) ประเภทอาหาร ประกอบด้วยเห็ด 20 ชนิด (เก็บหาช่วงเดือน พ.ค.- ต.ค.) ได้แก่ เห็ดระโงกเหลือง เห็ดระโงกขาว เห็ดตับเต่าดำ เห็ดผึ้ง เห็ดมันปูใหญ่ เห็ดขอนขาว เห็ดเพ็ก เห็ดแดงกุหลาบ เห็ดถ่านเล็ก เห็ดแดงน้ำหมาก เห็ดหน้าม่วง เห็ดไคลเขียว เห็ดก้นครก เห็ดหน้าวัว เห็ดโคน เห็ดไคลขาว เห็ดน้ำแป้ง เห็ดโคนปลวกจิก เห็ดหน้ามอม และเห็ดก่อแดง เห็ดที่ใช้ประโยชน์มากที่สุดคือ เห็ดระโงกเหลือง มีผู้เก็บหาร้อยละ 93.20 ของผู้เก็บหาทั้งหมด มีปริมาณเก็บหาเฉลี่ย 11.55 กิโลกรัมต่อครัวเรือนต่อปี ดัง Table 1 พืช 9 ชนิดและสัตว์ 1 ชนิด ได้แก่ โจด กระเจียว ดอกดิน (เก็บหาช่วงเดือน พ.ค.- ส.ค.) ว่านหัวเปราะ (เก็บหาตลอดทั้งปี) ผักหวานป่า บุกป่า อีนูน (เก็บหาช่วงเดือน ม.ค.- เม.ย.) ตะคร้อ (เก็บหาช่วงเดือน มี.ค.- ก.ค.) ตะขบป่า (เก็บหาช่วงเดือน ก.ค.- ส.ค.) และมดแดง (เก็บหาช่วงเดือน มี.ค.- พ.ค.) พืชและสัตว์ที่ใช้ประโยชน์มากที่สุดคือ โจด มีผู้เก็บหาร้อยละ 54.37 มีปริมาณเก็บหาเฉลี่ย 144.29 กิโลกรัมต่อครัวเรือนต่อปี ดัง Table 2 และ 2) ประเภทวัสดุใช้สอย คือ ดินภูเขาไฟสำหรับย้อมผ้า (เก็บหาตลอดทั้งปี) มีผู้เก็บหาทั้งสิ้น 4 ครัวเรือน คิดเป็นร้อยละ 3.88 มีปริมาณเก็บหาเฉลี่ย 51.13 กิโลกรัมต่อครัวเรือนต่อปี

กลุ่มตัวอย่างที่อาศัยรอบพื้นที่ป่าใช้ประโยชน์ของป่าประมาณครึ่งหนึ่งจากการเก็บหาของป่าเอง และมีบางส่วนที่ใช้ประโยชน์ของป่าแต่ไม่ได้เก็บหาเอง โดยของป่าที่ใช้ประโยชน์ส่วนใหญ่เป็นพืชอาหารที่ใช้บริโภคภายในครัวเรือน และจำหน่ายเพื่อสร้างรายได้ให้แก่ครัวเรือน ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดของสมศักดิ์ (2550) ที่อธิบายไว้ว่าผู้ที่อยู่ใกล้พื้นที่ป่าจะพึ่งพิงป่าในการดำรงชีวิต

การจัดการป่าชุมชนป่าเขาอังคาร ตำบลเจริญสุข จังหวัดบุรีรัมย์

จากการศึกษาพบว่าคณะกรรมการป่าชุมชนเป็นผู้กำหนดกติกาในการจัดการป่าชุมชน โดยราษฎรร้อยละ 95.71 รับทราบกฎระเบียบป่าชุมชน และไม่รับทราบกฎระเบียบป่าชุมชนร้อยละ 4.29 มีผู้ปฏิบัติตามกฎระเบียบร้อยละ 97.07 และมีผู้ที่ละเมิดกฎระเบียบร้อยละ 2.93 (เก็บของป่าเกินปริมาณที่กำหนด)

ราษฎรหมู่ที่ 1, 12 และ 14 ตำบลเจริญสุข มีกระบวนการจัดการป่าชุมชน 3 รูปแบบ ได้แก่ 1) การฟื้นฟูป่า โดยใช้ทฤษฎีการปลูกป่าโดยไม่ต้องปลูกให้ป่าเติบโตเป็นป่าที่สมบูรณ์โดยไม่ตัด หรือทำลายต้นไม้ 2) การป้องกันและดูแลรักษาป่า ได้แก่ การจัดตั้งกลุ่มราษฎรอาสาสมัครพิทักษ์ป่า (รสทป.) ลาดตระเวนพื้นที่ป่า การจัดตั้งศูนย์การเรียนรู้ป่าชุมชนให้ความรู้แก่ราษฎรถึงวิธีการเก็บหาของป่าเชิงอนุรักษ์ และมีกิจกรรมการป้องกันไฟด้วยการทำแนวกันไฟและชิงเผาทุก 5 ปี และป้องกันการทำลายต้นไม้ด้วยการห้ามนำของมีคมที่มีขนาดเกิน 2 นิ้วเข้าไปในพื้นที่ป่าชุมชน 3) การควบคุมการใช้ประโยชน์ ได้แก่ การกำหนดเวลาเข้าออกป่าชุมชนในช่วงเวลา 06.00 ถึง 18.00 น. การควบคุมปริมาณการเก็บหาของป่าในแต่ละครั้งห้ามเกิน 30 กิโลกรัมต่อคนต่อครั้ง และห้ามทำลาย ขุด ถอนของป่าทุกชนิด หากฝ่าฝืนข้อตกลงดังกล่าวจะมีมาตรการลงโทษและเสียค่าปรับ

การจัดการป่าชุมชนในพื้นที่ยังมีราษฎรบางส่วนละเมิดกฎระเบียบของป่าชุมชน ดังนั้นควรมีเจ้าหน้าที่ประสานงานกับชุมชนตลอดเวลา และควรได้รับเงินทุนสนับสนุนจากหน่วยงานต่างๆ สำหรับดำเนินงานด้านการฟื้นฟู ป้องกัน และรักษาป่าให้มีความสมบูรณ์และยั่งยืนตลอดไป

สังคมพืชแหล่งผลิตของป่าในป่าชุมชนป่าเขาอังคาร ตำบลเจริญสุข จังหวัดบุรีรัมย์

จากการศึกษาพบว่าป่าชุมชนมีลักษณะสังคมพืชเป็นป่าเต็งรัง ไม้ต้นที่มีค่าดัชนีความสำคัญทางนิเวศสูงที่สุด คือ รัง (*Shorea siamensis* Miq.) มีค่าดัชนีความสำคัญทางนิเวศ 93.025 รองลงมามีค่าดัชนีความสำคัญทางนิเวศ 22.427 คือ แดง *(Xylia xylocarpa* (Roxb.) W.Theob.var.kerrii (Craib & Hutch.) I.C. Nielsen) และรองลงมามีค่าดัชนีความสำคัญทางนิเวศ 12.163 คือ มะกอกเกลื้อน (*Canarium subulatum* Guillaumin.) และไม้ต้นที่มีค่าดัชนีความสำคัญทางนิเวศต่ำที่สุด 3 ชนิด คือ ประดู่ป่า (*Pterocarpus macrocarpus* Kurz.), ผักหวานป่า (*Champereia manillana* (Blume) Merr.) และหว้า (*Syzygium cumini* (L.) Skeels.) มีค่าดัชนีความสำคัญทางนิเวศ 2.905 ดัง Table 3

ไม้ต้นพบทั้งสิ้น 31 ชนิด โดยชนิดที่มีความหนาแน่นมากที่สุดคือ รัง มีความหนาแน่น 122 ต้นต่อไร่ รองลงมา คือ แดง มีความหนาแน่น 19 ต้นต่อไร่ และติ้วขาวมีความหนาแน่นเฉลี่ย 13 ต้นต่อไร่

ไม้หนุ่มพบทั้งสิ้น 5 ชนิด โดยชนิดที่มีความหนาแน่นมากที่สุดคือ แดง 18.25 ต้นต่อไร่ รองลงมาคือ กระดูกอึ่ง มีความหนาแน่น 12.5 ต้นต่อไร่ รองลงมา คือ น้ำใจใคร่ กระท่อมหมู และมะม่วงหัวแมงวันมีความหนาแน่น 6.25 ต้นต่อไร่

ลูกไม้และพืชพื้นล่างพบทั้งสิ้น 8 ชนิด ได้แก่ อีนูนหรือผักสาบ กระเจียว ดอกดิน แสลงพัน ว่านเข้าพรรษา ข้าวเย็น ว่านหัวเปราะและบุกป่า โดยดอกดิน มีความหนาแน่นมากที่สุด คือ 3,000 ต้นต่อไร่ รองลงมาคือ ว่านเข้าพรรษา มีความหนาแน่น 1,400 ต้นต่อไร่ และรองลงมาคือ กระเจียว มีความหนาแน่น 1,200 ต้นต่อไร่

ไผ่ พบทั้งสิ้น 1 ชนิด คือ โจด มีความหนาแน่น 8 กอต่อไร่ โดยเฉลี่ยประมาณ 30 ลำต่อกอ

Table 1 List of mushroom species collected by villagers from Pakhao Angkarn community forest.

No.	Local name	Scientific name	Collector		Products (kg./ collector/ year)	Collection purpose			Price (bath/kg.)
			Households	%		Consumption (%)	Trade (%)	Consumption & Trade (%)	
1	Ra ngohk leuang	*Amanita hemibapha* (Berk.&Br.) Sacc.Subsp.Javanica Cor.& Bas.	96	93.20	11.55	56.25	7.29	36.46	194.05±52.22
2	Kon	*Termitomyces globulus* R.Heim & Gooss.Font.	82	79.61	10.80	53.66	2.44	43.90	199.17±31.11
3	Dang nam mak	*Russula emetica* (Schaeff.Ex Fr.) Pers.S.f.Gray	24	23.30	6.98	41.67	4.17	54.17	110.71±49.99
4	Gor dang	*Russula emetica* (Schaeff.) Pers.	19	18.45	9.48	31.58	10.53	57.89	150±52.22
5	Peung	*Thaeogyroporus porentosus* (berk.ET.Broome)	16	15.53	5.39	62.50	6.25	31.25	200±0.00
6	Na mum	*Russula adusta* (Pers.ex Fr.) Fries	14	13.59	8.85	57.14	7.14	35.71	108±52.15
7	Dang gu lap	*Russula rosacea* (Pers.) S.F.Gray.	12	11.65	5.98	75.00	8.33	16.67	100±20.00
8	Pek	*Russula adusta* (Pers.ex Fr.) Fries	9	8.74	4.87	66.67	-	33.33	157.5±99.46
9	Kai kieow	*Russula virescens* (Schaeff.) Fr.	8	7.77	6.59	37.50	-	62.50	140±69.28
10	Kohn pluak jik	*Termitomyces clypeatus* Heim.	7	6.80	5.44	57.14	-	42.86	233.33±50.00
11	Na muang	*Russula cyanoxantha* (Schaeff.ex Secr.) Fr.	6	5.83	5.35	66.67	-	33.33	193.33±110.15
12	Kai kao	*Russula delica* Fr.	6	5.83	5.52	50.00	-	50.00	152.5±103.72
13	Man poo	*Cantharellus cibarius* Fr.	2	1.94	1.45	50.00	-	50.00	100
14	Ra ngohk kao	*Amanita princeps* Corner & Bas.	1	0.97	10.00	-	-	100.00	150
15	Tap tao dam	*Boletellus emodensis* (Berk.) Sing.	1	0.97	2.00	-	-	100.00	100
16	Khon kao	*Lentinus squarrosulus* Mont.	1	0.97	0.60	100.00	-	-	80
17	Tan lek	*Russula densifolia* Secr. Ex Gillet.	1	0.97	0.80	100.00	-	-	80
18	Kon krok	*Russula japonica* Hongo.	1	0.97	3.50	0.00	-	100.00	80
19	Na wua	*Russula foetens* (Pers.) Fr.	1	0.97	4.00	0.00	100.00	-	100
20	Nam pang	*Russula alboareolata* Hongo.	1	0.97	10.00	0.00	-	100.00	50

Table 2 List of plants and animals collected by villagers from Pakhao Angkarn community forest.

No.	Local name	Scientific name	Collector		Products (kg./ collector/ year)	Collection purpose			Price (bath/kg.)
			Households	%		Consumption (%)	Trade (%)	Consumption & Trade (%)	
1	Jod	*Vietnamosasa ciliata* (A.Camus) T.Q.Nguyen.	56	54.37	144.29	58.93	7.14	33.93	18.7±2.70
2	Gra jieow	*Curcuma sessilis* Gage.	52	50.49	45.45	55.77	13.46	30.77	65.8±17.44
3	E-noon	*Adenia viridiflora* Craib	38	36.89	22.77	57.89	18.42	23.68	153.13±34.00
4	Pak wan pa	*Champereia manillana* (Blume) Merr.	38	36.89	14.86	73.68	10.53	15.79	200±0.00
5	Dok din	*Curcuma parviflora* Wall.	25	24.27	52.98	44.00	12.00	44.00	59.52±18.53
6	Mod dang	*Oecophylla smaragdina* Fabricius	6	5.83	11.72	83.33	16.67	-	350±0.00
7	Buk	*Pseudodracontium harmandii* Engl.	2	1.94	15.00	-	100.00	-	40
8	Wan hua pror	*Kaempferia galanga* L.	2	1.94	7.50	-	100.00	-	70
9	Ta kor	*Schleichera oleosa* (Lour.) Oken	2	1.94	2.00	-	100.00	-	40
10	Ta kob pa	*Flacourtia indica* (Burm.f.) Merr.	2	1.94	1.30	-	100.00	-	50

สังคมพืชป่าเต็งรังเกิดไฟป่าขึ้นทุกปี ทำให้มีชนิดของไม้หนุ่ม ลูกไม้และพืชพื้นล่างน้อย จึงพบไม้ต้นเป็นส่วนใหญ่ ชุมชนได้จัดการสังคมพืชด้วยการทำแนวกันไฟและชิงเผา มีการควบคุมการใช้ประโยชน์ของป่าด้วยการห้ามขุดถอนของป่า จึงใช้ประโยชน์ได้ในส่วนของหน่อ ใบ ดอก และผล ทำให้ป่าชุมชนมีความสมบูรณ์และยั่งยืน

Table 3 Relative density, relative frequency, relative dominance and Importance Value Index (IVI) of the species found in the Pakhao Angkarn community forest.

No.	Scientific name	Relative (%)			IVI
		Density	Frequency	Dominance	
1	*Shorea siamensis* Miq.	22.372	11.429	59.225	93.025
2	*Xylia xylocarpa* (Roxb.) W.Theob.var.kerrii (Craib & Hutch.) I.C.Nielsen.	4.645	8.571	9.210	22.427
3	*Canarium subulatum* Guillaumin.	1.834	5.714	4.615	12.163
4	*Shorea obtusa* Wall.ex Blume.	6.601	2.857	2.223	11.681
5	*Cratoxylum formosum* (Jack) Benth.&Hook.f.ex Dyersubsp. formosum	4.768	5.714	1.127	11.609
6	*Haldina cordifolia* (Roxb.) Ridsdale.	2.934	5.714	2.413	11.061
7	*Mammea siamensis* (Miq.) T.Anderson.	3.423	4.286	3.040	10.749
8	*Cratoxylum formosum* (Jacq) Benth. & Hook.f.ex Dyer subsp.*pruniflorum* (Kurz) Gogelein	3.667	2.857	3.627	10.152
9	*Millettia brandisiana* Kurz.	1.834	5.714	2.433	9.981
10	*Buchanania lanzan* Spreng.	2.445	4.286	2.891	9.621
11	*Olax psittacorum* (Lam.) Vahl.	3.423	4.286	1.055	8.764
12	*Lannea coromandelica* (Houtt.) Merr.	2.934	4.286	1.497	8.716
13	*Vitex glabrata* R.Br.	5.868	1.429	1.417	8.714
14	*Gardenia sootepensis* Hutch.	2.445	4.286	0.262	6.993
15	*Antidesma ghaesembilla* Gaertn.	3.667	2.857	0.463	6.988
16	*Phyllanthus emblica* L.	3.667	2.857	0.074	6.599
17	*Morinda coreia* Buch.- Ham.	1.467	2.857	0.399	4.723
18	*Flacourtia indica* (Burm.f.) Merr.	2.934	1.429	0.094	4.456
19	*Hymenodictyon orixense* (Roxb.) Mabb.	1.467	1.429	1.397	4.292
20	*Vitex pinnata* L.	1.467	1.429	0.630	3.526
21	*Ziziphus cambodiana* Pierre.	1.467	1.429	0.465	3.361
22	*Bombax anceps* Pierre.	1.467	1.429	0.458	3.353
23	*Senna timoriensis* (DC.) Irwin & Barneby.	1.467	1.429	0.410	3.306
24	*Terminalia alata* Heyne ex Roth.	1.467	1.429	0.133	3.028
25	*Diospyros vera* (Lour.) A.Chev.	1.467	1.429	0.128	3.023
26	*Erythroxylum cuneatum* (Miq.) Kurz.	1.467	1.429	0.111	3.007
27	*Ardisia amherstiana* A.DC. var. *amherstiana*	1.467	1.429	0.090	2.985
28	*Mitragyna rotundifolia* (Roxb.) Kuntze.	1.467	1.429	0.083	2.979
29	*Syzygium cumini* (L.) Skeels	1.467	1.429	0.010	2.905
30	*Champereia manillana* (Blume) Merr.	1.467	1.429	0.010	2.905
31	*Pterocarpus macrocarpus* Kurz.	1.467	1.429	0.010	2.905

สรุป

ป่าชุมชนป่าเขาอังคาร ตำบลเจริญสุข อำเภอเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดบุรีรัมย์ มีลักษณะสังคมพืชเป็นป่าเต็งรัง มีไม้เด่น ประกอบด้วย รัง แดง และมะกอกเกลื้อน ประมาณครึ่งหนึ่งของราษฎรที่อาศัยในหมู่บ้านที่อยู่ใกล้กับพื้นที่ป่าชุมชนใช้ประโยชน์จากป่าเพื่อเก็บหาผลผลิตที่ไม่ใช่เนื้อไม้สำหรับใช้ในการดำรงชีวิตและจำหน่ายสร้างรายได้เสริม ของป่าที่มีการเก็บหามาก ได้แก่ เห็ดและพืชอาหารชนิดต่างๆ ซึ่งส่วนใหญ่เก็บหาในช่วงฤดูฝน นอกจากนั้นยังมีราษฎรบางส่วนที่เก็บดินภูเขาไฟมาใช้เป็นวัตถุดิบทำสีย้อมซึ่งสามารถเก็บได้ตลอดทั้งปี ทั้งนี้ผู้เก็บหาของป่าเกือบทั้งหมดรับทราบและปฏิบัติตามกติกาในการใช้ประโยชน์จากป่าชุมชนที่กำหนดขึ้นโดยคณะกรรมการป่าชุมชน

ทั้งนี้ชุมชนควรมีการติดตามการใช้ประโยชน์ของป่า การสำรวจสังคมพืชอย่างต่อเนื่อง เพื่อเป็นประโยชน์ในการจัดการป่าชุมชนให้เหมาะสมและยั่งยืนสืบไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณราษฎรตำบลเจริญสุข อำเภอเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดบุรีรัมย์ และผู้ที่ช่วยเก็บข้อมูลทุกท่านที่สนับสนุนและช่วยเหลือในการทำวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2553. **การจำแนกเขตเพื่อการจัดการด้านธรณีวิทยาและทรัพยากรธรณี จังหวัดบุรีรัมย์**. พิมพ์ครั้งที่ 1. จันวาณิชย์ ซีเคียวริตี้พริ้นท์ติ้ง จำกัด, กรุงเทพฯ.

กรมป่าไม้. 2553. **การส่งเสริมการจัดการป่าชุมชน**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรมป่าไม้, กรุงเทพฯ.

ราชกิจจานุเบกษา. 2518. ฉบับกฤษฎีกา เล่ม 92 ตอนที่ 5, หน้า 3.

สมศักดิ์ สุขวงศ์. 2550. **การจัดการป่าชุมชน เพื่อคนและเพื่อป่า**. พิมพ์ครั้งที่ 1. ทวีวัฒน์การพิมพ์, กรุงเทพฯ.

สุบงกช จามีกร. 2556. **สถิติวิเคราะห์สำหรับงานวิจัยทางสังคมศาสตร์**. พิมพ์ครั้งที่ 1. ภาควิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

เสน่ห์ จามริก, ยศ บวรศักดิ์ อุวรรณโณ, เจริญ คัมภีรภาพ และ ไพสิฐ พาณิชย์กุล. 2536. **ป่าชุมชนในประเทศไทย: แนวทางการพัฒนา เล่ม 1 ป่าฝนเขตร้อนกับภาพรวมของป่าชุมชนในประเทศไทย**. พิมพ์ครั้งที่ 1. สถาบันชุนชนท้องถิ่นพัฒนา, กรุงเทพฯ.

Krejcie, R.V. and D.W. Morgan. 1970. Determining Sample Size for Research Activites. **Educational and Psychological Measurement** 30: 607-61.

การปลดปล่อยแก๊สมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์จากบ่อทิ้งซากไก่เนื้อโคราชในฟาร์ม

CH_4 and CO_2 Emissions from Korat's Chicken Carcass Pit in a Farm

ธัชชัย เยี่ยมสูงเนิน[1] และ นเรศ เชื้อสุวรรณ[1*]

Thatchai Yiamsungnoen[1] and Nares Chuersuwan[1*]

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประมาณการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจก 2 ชนิด คือ แก๊สมีเทน และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จากบ่อทิ้งซากไก่เนื้อโคราชด้วยวิธีการใช้กล่องแบบปิด (Closed chamber) เก็บตัวอย่างแก๊สระหว่างเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2560 ถึงเดือนมกราคม พ.ศ. 2561 พบว่า อัตราการปลดปล่อยมีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเฉลี่ยประมาณ 0.35 ± 0.28 และ 5.99 ± 5.10 g/m^{2}hr ตามลำดับ เมื่อคำนวณการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกจากการกำจัดซากไก่ตลอดช่วงเวลาการเลี้ยงพ่อพันธุ์-แม่พันธุ์ไก่เนื้อโคราชระยะเวลา 16 เดือนที่ครอบคลุมถึงกระบวนการผลิตลูกไก่เนื้อโคราช ทำให้มีค่าเฉลี่ยการปลดปล่อยแก๊สมีเทนประมาณ 0.36 ± 0.29 kg CH_4 และมีค่าเฉลี่ยการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 6.21 ± 5.29 kg CO_2 สำหรับการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกจากการคำนวณเทียบกับค่าศักยภาพการทำให้โลกร้อนพบว่า มีค่าเฉลี่ยประมาณ 16.40 ± 13.38 kg CO_2-eq แนวทางการลดการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกจากบ่อทิ้งซากไก่สามารถทำได้ด้วยการใช้ระบบปิดหรือการจัดทำระบบแก๊สชีวภาพอย่างมีประสิทธิภาพเพื่อการผลิตลูกไก่เนื้อโคราชในอนาคต

ABSTRACT

This study aims to estimate two greenhouse gas emissions, CH_4 and CO_2, from a carcass pit operated in a university's farm with a closed chamber method. The sampling was performed between November 2017 and January 2018. The average emissions of CH_4 and CO_2 from the carcass pit were 0.35 ± 0.28 and 5.99 ± 5.10 g/m^{2}hr, respectively. The greenhouse gas emissions were also applied to estimate the greenhouse gas emissions from carcass pit management of the breeding parent farm and hatchery processes during the 16-month process. The average emissions of CH_4 and CO_2 were 0.36 ± 0.29 kg CH_4 and 6.21 ± 5.29 kg CO_2 for carcass pit management processes. Greenhouse gas emissions from the measurements were calculated with global warming potential to CO_2 equivalent. The result of the global warming potential of the carcass pit was 16.40 ± 13.38 kg CO_2-eq. The reduction of greenhouse gas from the process of carcass management may involve a close landfill system or a biogas system to collectively manage the full-scale operation in the future.

Key Words: Methane, Carbon dioxide, Korat's Chicken carcass pit

*Corresponding author; e-mail address: **nares@sut.ac.th**

[1]หลักสูตรมลพิษสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัย สำนักวิชาสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา 30000

[1]Program in Environmental Pollution and Safety. Institute of Public Health, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000

คำนำ

แนวโน้มการผลิตไก่เนื้อของเกษตรกรไทยในช่วง พ.ศ. 2555-2559 มีการเติบโตอย่างต่อเนื่องในอัตราเฉลี่ยร้อยละ 6.8 ต่อปี ซึ่งมาจากความต้องการของผู้บริโภคที่เพิ่มขึ้นทั้งภายในและต่างประเทศ จากข้อมูลการผลิตไก่เนื้อในปี พ.ศ. 2559 พบว่า ประเทศไทยมีผลผลิตไก่เนื้อประมาณ 1,550 ล้านตัว คิดเป็นปริมาณเนื้อไก่ 2.48 ล้านตัน และมีอัตราการผลิตเพิ่มขึ้นจากปี พ.ศ. 2558 ร้อยละ 1.3 (ศูนย์อัจฉริยะเพื่ออุตสาหกรรมอาหาร, 2560) “ไก่เนื้อโคราช” เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยและพัฒนาสายพันธุ์โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (มทส.) ร่วมกับสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และกรมปศุสัตว์ เพื่อส่งเสริมในการประกอบอาชีพปศุสัตว์ในระดับวิสาหกิจชุมชนของเกษตรกรให้ดีขึ้น โดยเป็นไก่ลูกผสมระหว่างพ่อพันธุ์ไก่พื้นเมืองเหลืองหางขาว และแม่พันธุ์ไก่สายพันธุ์ มทส. มีลักษณะเด่น คือ มีการเจริญเติบโตที่รวดเร็วกว่า และมีรสชาติของเนื้อใกล้เคียงกับไก่พันธุ์พื้นเมือง (วิทธวัช, 2557) ซึ่งฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีได้มีการเลี้ยงและขยายพันธุ์ พ่อพันธุ์-แม่พันธุ์ เพื่อใช้ในการผลิตไข่สำหรับการฟักเป็นลูกไก่เนื้อโคราชจำหน่ายแก่เกษตรกรผู้เลี้ยง อนึ่ง กระบวนการเลี้ยงไก่มีของเสียที่เกิดจากซากไก่ตายและคัดทิ้ง รวมทั้งของเสียที่เกิดจากกระบวนการฟักไข่ เช่น ลูกไก่คัดทิ้ง และไข่ตายโคม เป็นต้น ฟาร์มมหาวิทยาลัยมีวิธีการจัดการของเสียด้วยวิธีการทิ้งลงบ่อทิ้งซากเพื่อให้เกิดการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ที่ไม่ใช้อากาศ ส่งผลให้เกิดการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกจากการจัดการของเสียดังกล่าว และกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้อากาศสามารถดังแสดงใน Figure 1

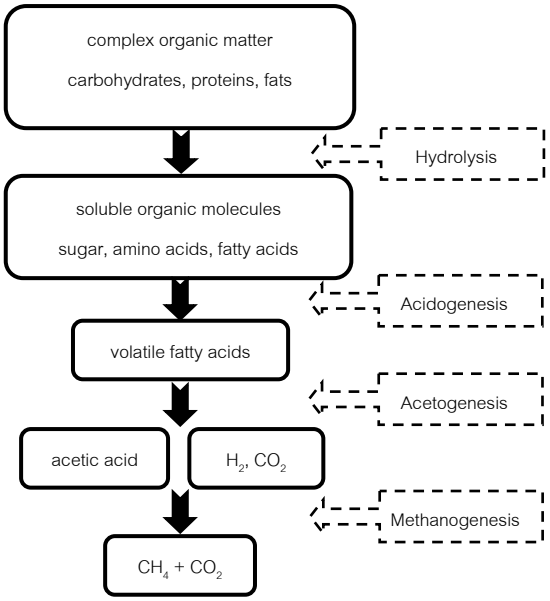


Figure 1 Anaerobic decomposition process

Source: National Agricultural Biosecurity Center (2004)

กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์แบบไม่ใช้อากาศมีขั้นตอนหลัก 4 ขั้นตอน คือ

ขั้นตอนที่ 1 ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) เป็นกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีขนาดใหญ่ด้วยเอนไซม์ที่มีการหลั่งจากเซลล์ของแบคทีเรียทำให้สารอินทรีย์เกิดการแตกตัวเป็นโมเลกุลขนาดเล็ก

ขั้นตอนที่ 2 แอซิโดเจนิซิส (Acidogenesis) เป็นกระบวนการสร้างกรดอินทรีย์จากสารอินทรีย์ขนาดเล็กจากกระบวนการไฮโดรไลซิส ไปเป็นกรดไขมันระเหย (Volatile fatty acids) ด้วยแบคทีเรียสร้างกรด

ขั้นตอนที่ 3 แอซิโตเจนิซิส (Acetogenesis) เป็นกระบวนการสร้างกรดแอซิติกจากกรดไขมันระเหย ของแบคทีเรียกลุ่มแอซีโตเจนิก (Acetogenic bacteria) ซึ่งจะมีกระบวนการเปลี่ยนกรดไขมันระเหยไปเป็นกรดแอซิติก กรดฟอร์มิก แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน เป็นสารตั้งต้นสำคัญสำหรับการสร้างมีเทน

ขั้นตอนที่ 4 มีเทนโนเจนิซิส (Methanogenesis) เป็นกระบวนการที่แบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน (Methanogenic bacteria) ย่อยสลายและเปลี่ยนผลิตภัณฑ์จากขั้นตอนแอซิโตเจนิซิส ไปเป็นแก๊สมีเทนซึ่งสามารถจำแนกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ แบคทีเรียที่สร้างมีเทนจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน (Hydrogenotrophic bacteria) สามารถใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอน และไฮโดรเจนเป็นแหล่งพลังงาน และแบคที่เรียที่สร้างมีเทนจากกรดแอซิติก (Acetotrophic bacteria) ใช้แอซิเตดเป็นตัวรับอิเล็กตรอนและไฮโดรเจนเป็นแหล่งพลังงาน (สิริรัตน์ และ ปราโมช, 2548)

Xu *et al.* (2007) ได้ทำการศึกษาเก็บตัวอย่างแก๊สเรือนกระจกภาคสนามจากการจัดการของเสียปศุสัตว์ โดยนำซากโคและมูลหมักเป็นวัสดุปรับปรุงคุณภาพดิน พบว่า แก๊สเรือนกระจกที่มีการปลดปล่อยอย่างมีนัยสำคัญ 2 ชนิด คือ แก๊สมีเทน (CH_4) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) มีค่าการปลดปล่อยเท่ากับ 0.145 และ 0.006 m^3/kg ของน้ำหนักแห้ง สอดคล้องกับ Yuan *et al.* (2011) ที่ทำการศึกษาจากการจำลองการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนของซากโคในระดับห้องปฏิบัติการ พบว่ามีค่าการปลดปล่อยแก๊สมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ 0.33 และ 0.09 m^3/kg ของน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ข้อมูลการปล่อยแก๊สเรือนกระจกจากการจัดการซากไก่เนื้อโคราชยังไม่มี และข้อมูลที่เกี่ยวข้องในประเทศไทยยังจำกัดอยู่มาก ดังนั้น การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประมาณปริมาณการปลดปล่อยของแก๊สมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์จากบ่อทิ้งซากไก่เนื้อโคราชภายในฟาร์มด้วยวิธีการใช้กล่องแบบปิด (Closed chamber) โดยการเลี้ยงไก่เนื้อโคราชดำเนินการอยู่ภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา

อุปกรณ์และวิธีการ

การออกแบบการทดลอง

บ่อทิ้งซากไก่เนื้อโคราชเป็นบ่อคอนกรีตทรงกลมขนาดความจุประมาณ 2.3 ลูกบาศก์เมตร มีการขุดหลุมฝังวงซีเมนต์ทรงกลมลงในดินมีความลึกประมาณ 3 เมตร ตั้งอยู่ภายในพื้นที่ฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ด้านบนของบ่อเป็นฝามีช่องเปิดสี่เหลี่ยมขนาดประมาณ 0.37 ม.×0.37 ม. เพื่อใช้สำหรับทิ้งซากไก่พ่อพันธุ์-แม่พันธุ์ และลูกไก่ที่ตายระหว่างการเลี้ยง รวมทั้งลูกไก่คัดทิ้งจากกระบวนการฟักเพื่อจำหน่ายแก่เกษตรกร การเก็บตัวอย่างแก๊สมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์จากบ่อทิ้งซากไก่เนื้อโคราชใช้กล่องแบบปิด (Closed chamber) ทำด้วยอะคริลิคใส ทรงสี่เหลี่ยมมีปลายเปิดเพียงด้านเดียว ขนาด 35×35×65 ลูกบาศก์เซนติเมตร ภายนอกกล่องใช้ซิลีโคนปิดทับตามแนวของรอยต่อทั้งหมดระหว่างแผ่นอะคริลิคเพื่อป้องกันการรั่วของแก๊ส ด้านบนมีท่อขนาดเล็กสำหรับการเก็บตัวอย่างแก๊สมีเทน (Figure 2) และด้านข้างของกล่องมีช่องเจาะต่อเข้ากับเครื่องวัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Figure 3) ภายในกล่องมีการติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์สำหรับตรวจวัดอุณหภูมิขณะเก็บตัวอย่าง การเก็บตัวอย่างแก๊สดำเนินการทุก 2 สัปดาห์ระหว่างเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2560 ถึง มกราคม พ.ศ. 2561 ซึ่งการเลี้ยงไก่เนื้อโคราชของฟาร์มมหาวิทยาลัยมีกิจกรรมที่ค่อนข้างคงที่ตลอดช่วงการเลี้ยงในระยะเวลาประมาณ 16 เดือน การเก็บตัวอย่างจึงดำเนินการในเวลา 3 เดือน หรือประมาณร้อยละ 20 ของช่วงเวลาการเลี้ยงพ่อพันธุ์-

แม่พันธุ์ มีการเก็บตัวอย่างแก๊สรวม 5 ครั้ง และดำเนินการในช่วง 08.00 – 09.00 น. ตัวอย่างแก๊สมีเทนรวม 55 ตัวอย่าง และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เก็บข้อมูลเป็นรายวินาทีรวม 9,005 ตัวอย่าง

การเก็บและการวิเคราะห์ตัวอย่างแก๊ส

การเก็บตัวอย่างแก๊สทำโดยนำกล่องวางคว่ำลงบนฐานไม้อัดซึ่งมีช่องว่างตรงกลาง ใช้ดินน้ำมันปิดทับรอยต่อระหว่างกล่องและฐานไม้ให้สนิท วางชุดเก็บตัวอย่างแก๊สบนฝาซีเมนต์ซึ่งมีช่องว่างสำหรับทิ้งซากไก่ที่มีดินเหนียวปั้นเป็นคันดินโดยรอบ กดฐานกล่องให้แน่นสนิทกับคันดิน เพื่อป้องกันการรั่วไหลของแก๊ส การเก็บตัวอย่างเริ่มจากนาทีที่ 0 – 30 นาที

การเก็บตัวอย่างแก๊สมีเทนใช้กระบอกฉีดยาขนาด 50 มิลลิลิตร ดูดตัวอย่างจากท่อเก็บตัวอย่าง จากนั้นถ่ายตัวอย่างแก๊สสู่ถุงเก็บตัวอย่างแก๊ส (Tedlar® bag) ดังแสดงใน Figure 2 เก็บตัวอย่างแก๊สทุก 3 นาที จนครบ 30 นาที รวมทั้งสิ้น 11 ตัวอย่างต่อการดำเนินการทดลอง 1 ครั้ง และนำไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของแก๊สมีเทนในตัวอย่างด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ชนิดเฟรมไอออไนเซชั่น (GC-FID) โดยใช้แก๊สมีเทนความเข้มข้นมาตรฐาน 19.5 ppm (Air Liquide, Thailand) ในการหาความเข้มข้นเชิงปริมาณ



Figure 2 Methane sampling from a closed chamber

สภาวะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์หาปริมาณแก๊สมีเทนด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ชนิดเฟรมไอออไนเซชั่น (GC-FID) (Agilent Inc., USA) และแยกด้วยคอลัมน์แบบ capillary (HP-PLOT Al_2O_3 S 30 m × 0.25 mm ID × 5 µm film, Agilent Inc., USA) โดยเป็นเงื่อนไขที่ได้จากการการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Table 1)

Table 1 Conditions for GC-FID instrument in the analysis of methane gas

Parameter	Condition
Injection port temperature (°C)	250
Split ratio	20:1
FID detector temperature (°C)	250
Oven temperature	
- Initial temperature (°C)	50
- Hold time for Initial temperature (min)	3

Table 1 Continued

Parameter	Condition
- Temperature increasing rate (°C/min)	15
- Final temperature (°C)	150
- Hold time for final temperature (min)	3
Hydrogen gas flow rate (ml/min)	30
Oxygen gas flow rate (ml/min)	400
Nitrogen gas flow rate (ml/min)	10
Helium gas flow rate (ml/min)	5

การเก็บตัวอย่างแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ใช้เครื่องวิเคราะห์แก๊สแบบให้ค่าโดยตรง (Real-time) Testo® 350 (Testo GmbH, Germany) เชื่อมต่อกับกล่องเก็บแก๊ส โดยสอดหัวเก็บตัวอย่างแก๊สเข้าไปในจุดเก็บตัวอย่าง ใช้ดินน้ำมันปิดทับช่องว่างระหว่างหัวเก็บตัวอย่างและกล่อง (Figure 3) มีระยะเวลาการเก็บตัวอย่างแก๊สรวม 30 นาที บันทึกค่าทุก 1 วินาที



Figure 3 Carbon dioxide measurement with a Testo® 350 instrument

การคำนวณเพื่อประมาณการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจก

การประเมินการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจก สามารถคำนวณได้จากความเข้มข้นของแก๊สเรือนกระจกที่เปลี่ยนแปลงไปภายในกล่องต่อระยะเวลาที่ใช้เก็บตัวอย่าง ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ในรูปแบบของสมการเส้นตรง (Linear regression) ผลการคำนวณได้เป็นอัตราการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกที่สนใจ ต่อหน่วยของพื้นที่ และเวลา (mg/m^2hr) (นเรศ และคณะ, 2553)

$$E = \frac{XhM}{RT}$$

เมื่อ E คือ อัตราการปลดปล่อยแก๊ส (mg/m^2hr)

X คือ การเปลี่ยนแปลงของแก๊สภายใน chamber (ppm/hr)

h คือ ความสูงของ chamber (m)

M คือ มวลโมเลกุลของแก๊ส (MW_{CO2} = 44.01 g/mol, MW_{CH4} = 16.04 g/mol)

R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส เท่ากับ 0.0821 (L atm/K mol)

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K) ที่ความดัน 1 บรรยากาศ

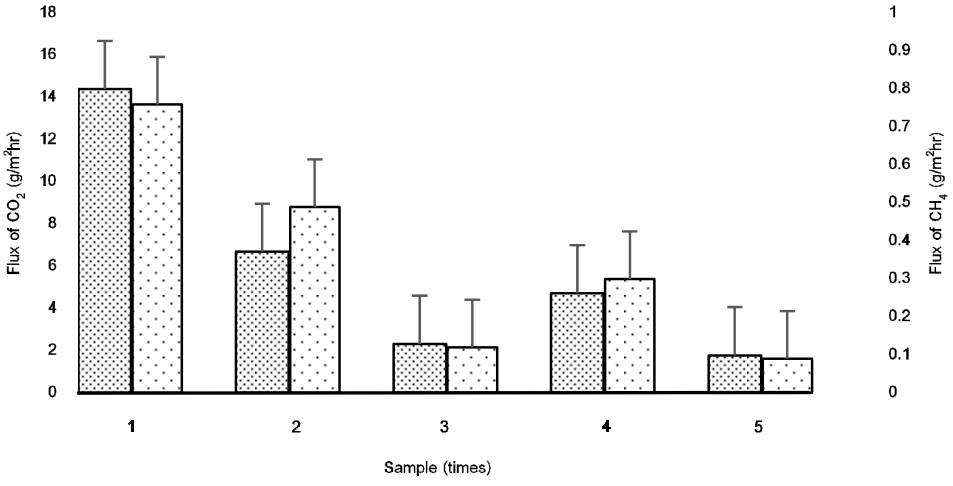
ค่าของปริมาณแก๊สมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการตรวจวัดนำมาประเมินปริมาณที่เกิดขึ้นตลอดช่วงเวลาของการเลี้ยงไก่เนื้อโคราชของฟาร์มที่เกิดขึ้นในระยะเวลา 16 เดือน โปรแกรม MS Excel® ใช้ในการคำนวณค่าสถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ค่าเฉลี่ย (Mean) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standard error)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการศึกษาอัตราการปลดปล่อยแก๊สมีเทนและคาร์บอนไดอออกไซด์จากบ่อทิ้งซากไก่เนื้อโคราชในช่วงเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2560 ถึงเดือนมกราคม พ.ศ. 2561 มีดังนี้

การปลดปล่อยแก๊สมีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์

บ่อทิ้งซากไก่เนื้อโคราชมีอัตราการปลดปล่อยแก๊สมีเทนโดยเฉลี่ยประมาณ 0.35 ± 0.28 g/m^{2}hr การปลดปล่อยแก๊สมีเทนสูงสุดพบในระดับ 0.76 g/m^{2}hr และมีค่าการปลดปล่อยแก๊สมีเทนต่ำสุดประมาณ 0.09 g/m^{2}hr (Figure 4)และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีอัตราการปลดปล่อยโดยเฉลี่ยประมาณ 5.99 ± 5.10 g/m^{2}hr โดยมีค่าการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด 14.41 g/m^{2}hr และมีค่าการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำสุดประมาณ 1. 78 g/m^{2}hr (Figure 4)



CO_2	14.41	6.69	2.32	4.73	1.78
CH_4	0.76	0.49	0.12	0.30	0.09

Figure 4 Fluxes of methane and carbon dioxide from the chicken carcass pit

จากการศึกษาการปลดปล่อยแก๊สมีเทน และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่ามีอัตราการปลดปล่อยสูงสุดในเดือนพฤศจิกายน เนื่องมาจากฟาร์มมหาวิทยาลัยมีกระบวนการผลิตพ่อพันธุ์-แม่พันธุ์ไก่เนื้อโคราชทดแทน โดยมีการผลิตลูกไก่ของพ่อพันธุ์-แม่พันธุ์ในกระบวนการนี้มีการคัดทิ้งลูกไก่ที่ไม่สมบูรณ์ จึงทำให้มีการทิ้งซากลงบ่อทิ้งซากในปริมาณมาก ส่งผลให้มีกระบวนการย่อยสลายซากไก่สูงขึ้นด้วย ส่วนเดือนมกราคมมีแนวโน้มการปลดปล่อยแก๊สมีเทน และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำสุด เป็นผลมาจากการทิ้งซากไก่น้อยลงเพราะผ่านช่วงกระบวนการคัดทิ้งของลูกไก่พ่อพันธุ์-แม่พันธุ์ และเมื่อลูกไก่เริ่มเจริญเติบโตมากขึ้นมีอัตราการตายที่ต่ำลง แก๊สมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแก๊สเรือนกระจกที่สำคัญจากการย่อยสลายซากปศุสัตว์ (Xu *et al*., 2007) การศึกษาของ Yuan *et al.* (2011) จำลองการเน่าเปื่อยของซากโคในระดับห้องปฏิบัติการ พบปริมาณการปลดปล่อยแก๊สมีเทนสูงกว่าแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แต่ในการศึกษาครั้งนี้เป็นการย่อยสลายซากไก่ในบ่อทิ้งซาก พบปริมาณการปลดปล่อยแก๊สมีเทนต่ำกว่าแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากระดับความลึกของบ่อทิ้งซากลดลง ทำให้เกิดการย่อยสลายของจุลินทรีย์กลุ่มที่ใช้ออกซิเจนร่วมกับกระบวนการย่อยสลายของกลุ่มจุลินทรีย์ที่ไม่ใช้ออกซิเจน ส่งผลให้เกิดแก๊สมีเทนน้อยลง เพราะแก๊สมีเทนจะเกิดจากกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนเท่านั้น และเกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มมากขึ้น เพราะสามารถเกิดขึ้นได้จากทั้งกระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจนและไม่ใช้ออกซิเจน จากการศึกษาครั้งนี้เป็นการเก็บตัวอย่างภาคสนามจึงไม่สามารถควบคุมปัจจัยที่เกี่ยวข้องต่อปริมาณการเกิดขึ้นของแก๊สมีเทนได้ เช่น ปริมาณสารอาหาร และค่าความเป็นกรดด่างภายในบ่อทิ้งซาก เป็นต้น (สิริรัตน์ และ ปราโมช, 2548) ผลจากการศึกษาดังกล่าวสามารถนำไปใช้ประมาณการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกจากบ่อทิ้งซากไก่เนื้อโคราชต่อไป

การประมาณการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกจากบ่อทิ้งซากไก่เนื้อโคราช

บ่อทิ้งซากไก่เนื้อโคราชใช้ในการจัดการซากของเสียจากการเลี้ยงพ่อพันธุ์-แม่พันธุ์ รวมถึงกระบวนการผลิตลูกไก่เนื้อโคราช แก๊สเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจึงมาจากการการจัดการของเสียของทั้งสองกิจกรรม ผลการศึกษาพบว่า มีการปลดปล่อยแก๊สมีเทนโดยเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.36 ± 0.29 kg CH_4 โดยมีค่าการปลดปล่อยแก๊สมีเทนสูงสุด 0.79 kg CH_4 และมีค่าการปลดปล่อยแก๊สมีเทนต่ำสุดประมาณ 0.09 kg CH_4 การปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเฉลี่ยประมาณ 6.21 ± 5.29 kg CO_2 โดยมีการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด 14.94 kg CO_2 และการปลดปล่อยต่ำสุดประมาณ 1.85 kg CO_2 ตัวอย่างการคำนวณแสดงใน Table 2

Table 2 Estimation of greenhouse gas emissions from the carcass pit

Greenhouse gas	Flux (g/m^2hr)	Period of time[1/] (day)	Cross section[2/] (m^2)	Greenhouse gas emission (kg GHG)
CH_4	0.35	480	0.09	0.36
CO_2	5.99	480	0.09	6.21

1/ Process of parent's farm take about 480 days

2/ Cross sectional area of the support base chamber is 30*30 cm^2

ศักยภาพทำให้เกิดภาวะโลกร้อนของบ่อทิ้งซากไก่โคราช

ปริมาณแก๊สมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปลดปล่อยจากการจัดการซากไก่เนื้อโคราชของกระบวนการเลี้ยงพ่อพันธุ์-แม่พันธุ์ และการผลิตลูกไก่เนื้อโคราช ใช้ในการคำนวณศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global warming potential: GWP) โดยมีคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแก๊สอ้างอิง ได้เป็นหน่วยคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (CO_2-eq) เอกสารของ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2013) ระบุค่า GWP_{100} ของแก๊สมีเทนเป็น 28 เท่าของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้น การปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกจากการย่อยสลายของสารอินทรีย์ภายในบ่อทิ้งซากมีค่าผลรวมการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อนเฉลี่ยประมาณ 16.40 ± 13.38 kg CO_2-eq โดยมีค่าก่อให้เกิดภาวะโลกร้อนสูงสุด 37.06 kg CO_2-eq และมีค่าต่ำสุดประมาณ 4.37 kg CO_2-eq ตามลำดับ

การศึกษาครั้งนี้ทำให้ทราบระดับการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกออกสู่บรรยากาศจากกระบวนการจัดการของเสียด้วยบ่อทิ้งซากไก่เนื้อโคราชจากกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการผลิตลูกไก่เนื้อโคราชและการเพาะเลี้ยงพ่อพันธุ์-แม่พันธุ์ หากฟาร์มมหาวิทยาลัยต้องการดำเนินกิจกรรมให้สอดรับกับการลดแก๊สเรือนกระจก หรือมีการขยายกำลังการผลิตให้ครบวงจรอาจทำให้มีการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกจากการจัดการของเสียอาจสูงขึ้น เพราะฉะนั้นการจัดทำระบบแก๊สชีวภาพจากบ่อทิ้งซากไก่เนื้อโคราชจึงเป็นทางเลือกที่ดี เพราะสามารถช่วยลดปริมาณแก๊สเรือนกระจกที่จะถูกปลดปล่อยออกสู่บรรยากาศ และสามารถนำแก๊สชีวภาพมาใช้เป็นพลังงานทดแทนในฟาร์มมหาวิทยาลัยได้ อีกทั้งสามารถช่วยลดปัญหากลิ่นเหม็น แมลงวัน และเชื้อโรคได้ ทั้งนี้ การฝังกลบแบบปิดเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการจัดการซากไก่ที่ใช้ในฟาร์มเพาะเลี้ยง

สรุป

ผลการศึกษาการปลดปล่อยแก๊สมีเทน และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จากบ่อทิ้งซากไก่เนื้อโคราชพบว่าการปลดปล่อยแก๊สมีเทนมีค่าเฉลี่ยประมาณ 0.35 ± 0.28 g/m^2hr และคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเฉลี่ยประมาณ 5.99 ± 5.10 g/m^2hr ซึ่งปริมาณของซากไก่ภายในบ่อทิ้งซากส่งผลโดยตรงต่อปริมาณแก๊สเรือนกระจกที่เกิดขึ้น และการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกทั้งสองชนิดเมื่อพิจารณาร่วมกับกระบวนการเลี้ยงพ่อพันธุ์-แม่พันธุ์ไก่เนื้อโคราชในระยะเวลา 16 เดือน และกระบวนการผลิตลูกไก่เนื้อโคราชมีค่าเฉลี่ยการปลดปล่อยแก๊สมีเทนประมาณ 0.36 ± 0.29 kg CH_4 และมีค่าเฉลี่ยการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 6.21 ± 5.29 kg CO_2 ซึ่งคำนวณเป็นค่าศักยภาพทำให้เกิดภาวะโลกร้อนได้ผลรวมการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อนของบ่อทิ้งซากมีค่าเฉลี่ยประมาณ 16.40 ±13.38 kg CO_2-eq ตามลำดับ ทั้งนี้ ค่าปริมาณการปล่อยแก๊สทั้งสองชนิดที่ใช้ได้มาจากการเก็บตัวอย่างในช่วง 3 เดือนที่มีสมมติฐานว่า กิจกรรมการทิ้งซากไก่เนื้อโคราชที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเลี้ยงพ่อพันธุ์-แม่พันธุ์ และการผลิตลูกไก่ไม่เปลี่ยนแปลงมากนักตลอดช่วงเวลาเก็บตัวอย่าง การปล่อยแก๊สมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้นี้เป็นส่วนหนึ่งของข้อมูลสนับสนุนการจัดทำบัญชีการปล่อยแก๊สเรือนกระจกในส่วนของการจัดการซากไก่ในบ่อปิดของฟาร์ม

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่สนับสนุนทุนโครงการวิจัยเพื่อทำวิทยานิพนธ์ระดับบัณฑิตศึกษา และศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี รวมทั้งฟาร์มมหาวิทยาลัยที่ได้ให้ความร่วมมือและช่วยอำนวยความสะดวกเป็นอย่างดีตลอดทั้งการศึกษามา ณ โอกาสนี้ด้วย

เอกสารอ้างอิง

นเรศ เชื้อสุวรรณ, จรียา ยิ้มรัตนบวร, สิราภรณ์ โพธิวิชยานนท์ และ ธนัญชัย วรรณสุข. 2557. **สภาวะที่เหมาะสมในการลดปริมาณการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจก (คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน และไนตรัสออกไซด์) ควบคู่กับการพัฒนาประสิทธิภาพของบึงประดิษฐ์เพื่อบำบัดน้ำเสียชุมชน**. สาขาวิชาอนามัยสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา.

ปราโมช เชี่ยวชาญ และ สิริรัตน์ สุวณิชเจริญ. 2548. **ระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ**. แหล่งที่มา: http://www.stou.ac.th/School/Shs/booklet/6_2548/OccHealth htm, 31 ตุลาคม 2561.

วิทธวัช โมฬี. 2557. **คู่มือการเลี้ยงไก่เนื้อโคราช**. พิมพ์ครั้งที่ 2. สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตสัตว์ สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา.

ศูนย์อัจฉริยะเพื่ออุตสาหกรรมอาหาร กระทรวงอุตสาหกรรม. 2560. **อุตสาหกรรมไก่เนื้อ**. แหล่งที่มา: http://fic.nfi.or.th/foodsectordatabank-detail.php?id=32, 1 พฤศจิกายน 2561.

Intergovernmental Panel on Climate Change. 2013. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press, United Kingdom.

National Agricultural Biosecurity Center. 2004. **Carcass disposal: A comprehensive review**. Kansas State University, Kansas.

Xu, S., X. Hao., K. Stanford., T. McAllister., F.J. Larney. and J. Wang. 2007. Greenhouse gas emissions during co-composting of cattle mortalities with manure. **Nutrient Cycling in Agroecosystems** 78 (2): 177-187.

Yuan, Q., S. E. Saunders and S.L. Bartelt-Hunt. 2012. Methane and carbon dioxide production from simulated anaerobic degradation of cattle carcasses. **Waste Management** 32 (5): 939-943.

ถิ่นอาศัยที่เหมาะสมของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมขนาดใหญ่ ในเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าภูเขียว จังหวัดชัยภูมิ

Suitable Habitat of Large Mammals at Phu Khieo Wildlife Sanctuary, Chaiyaphum Province

คชกริช ผลานิสงค์[1*] ยงยุทธ ไตรสุรัตน์[1] นริศ ภูมิภาคพันธ์[1] ดวงใจ ศุขเฉลิม[1] และ สุชาติ โภณชงค์[2]

Kochchakrit Planisong[1*], Yongyut Trisurat[1], Duangchai Sookchaloem[1],

Naris Bhumpakphan[1] and Suchart Podchong[2]

บทคัดย่อ

การศึกษาถิ่นอาศัยที่เหมาะสมของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมขนาดใหญ่ ในเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าภูเขียว จังหวัดชัยภูมิ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการกระจายและการใช้ประโยชน์ร่วมกันของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมขนาดใหญ่ โดยใช้แบบจำลอง maximum entropy (MaxEnt) ในการประเมินการกระจายของสัตว์ป่าทั้งหมด 6 ชนิด ผลการศึกษา พบว่า ปัจจัยแวดล้อมที่มีอิทธิพลต่อการกระจายของสัตว์ป่า ประกอบด้วย แหล่งโป่ง ความชัน ทุ่งหญ้า แหล่งน้ำ และปริมาณน้ำฝนของเดือนที่สูงสุด เมื่อพิจารณาพื้นที่เหมาะสมของสัตว์ป่าทั้งหมด 6 ชนิด ต่อพื้นที่ทั้งหมดของเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าภูเขียว พบว่า กระทิง (30.81%) มีพื้นที่การกระจายมากที่สุด รองลงมาได้แก่ วงศ์หมี (29.16%) ช้างป่า (25.24%) หมูป่า (17.19%) กวางป่า (15.32%) และเลียงผา (12.44%) ตามลำดับ สำหรับการกระจายของสัตว์ป่าสามารถแบ่งพื้นที่การใช้ประโยชน์ร่วมกันออกเป็น 3 กลุ่ม ประกอบด้วย การใช้ประโยชน์พื้นที่ร่วมกันระดับมาก (5-6 ชนิด) การใช้ประโยชน์พื้นที่ร่วมกันระดับปานกลาง (3-4 ชนิด) และการใช้ประโยชน์พื้นที่ร่วมกันระดับน้อย (≤ 2 ชนิด) ซึ่งพื้นที่การใช้ประโยชน์ร่วมกันระดับมากมีขนาด 18.93 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 1.82% ส่วนมากกระจายอยู่ในบริเวณทางตอนเหนือของพื้นที่

ABSTRACT

This article attempted to predict the distributions and co-habitats of large mammals at Phu Khieo Wildlife Sanctuary, Chaiyaphum Province. The research study wildlife of distribution were evaluated by using maximum entropy (MaxEnt) model. The selected mammal 6 species. The results revealed that at the considerable environment factors on wildlife of distribution include saltlicks, slope, water sources and precipitation of wettest month. The maximum range size was predicted gaur (30.81%), covering of the sanctuary's area, followed by bears (29.16%), elephant (25.24%), wild boar (17.19%), sambar deer (15.32%), and serow (12.44%). Furthermore, the co-habitats or overlapped habitats were classified into 3 categories: high level (5-6 species), medium level (3-4 species), and low level (≤ 2 species). The high level class covers 1.82% of the sanctuary's area or approximately 19 km^2 situated in the northern part.

Key words: Large mammals, Distribution, Phu Khieo Wildlife Sanctuary

*Corresponding author; e-mail address: **kochchakrit.pl@ku.th**

[1]ภาควิชาชีววิทยาป่าไม้ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Forest Biology, Faculty of Forestry, Kasetsart University, Bangkok 10900

[2] สาขาวิชาการบริหารทรัพยากรป่าไม้และสิ่งแวดล้อม คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[2]Forest Resource and Environmental Administration, Faculty of Forestry, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

สัตว์ป่าทุกชนิด มีความต้องการปัจจัยเฉพาะด้านในการดำรงชีวิต ประกอบด้วย ปัจจัยด้านกายภาพ และปัจจัยด้านชีวภาพ (นริศ, 2553) ซึ่งปัจจัยแต่ละด้าน สามารถบ่งบอกถึงลักษณะการกระจายของสัตว์ป่าในแต่ละชนิด นอกจากนี้ ภัยธรรมชาติหรือการใช้ประโยชน์ที่ดินรอบพื้นที่อนุรักษ์ เช่น การทำเกษตร การคมนาคม ที่อยู่อาศัย และโรงงานอุตสาหกรรม อาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดพื้นที่อยู่อาศัยของสัตว์ป่า รวมถึงการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ยังเป็นอีกสาเหตุให้เกิดผลกระทบต่อการกระจายของสัตว์ป่า (Trisurat *et al*., 2014)

เขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าภูเขียว จังหวัดชัยภูมิ เป็นถิ่นที่อยู่อาศัยของสัตว์ป่าสำคัญหลายชนิด ได้แก่ ช้าง กระทิง นกเงือก และเพียงพอนเส้นหลังขาว ที่หาได้ยาก เป็นต้น (สุชาติ, 2558) หากมีการบุกรุกพื้นที่ป่า และการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ อาจทำให้สัตว์ป่าบางชนิดที่ไม่สามารถปรับตัวได้ เกิดการย้ายถิ่นอาศัยออกนอกแนวเขตพื้นที่ เพื่อหาแหล่งน้ำหรืออาหารในการดำรงชีวิต (Trisurat *et al*., 2014) ทำให้สัตว์ป่านั้นถูกล่า และส่งผลต่อการลดลงประชากรสัตว์ป่าบางชนิดที่เปราะบางได้ในที่สุด นอกจากนี้ปัญหาดังกล่าวได้นำมาซึ่งความขัดแย้งระหว่างชุมชนกับหน่วยงานป่าไม้ได้ (พิเชฐ และคณะ, 2561) ในเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าภูเขียว มีงานวิจัยหลายเรื่อง ที่ศึกษาเกี่ยวกับถิ่นที่อยู่อาศัยของสัตว์ป่า เช่น ช้างป่า (ศุภกิจ, 2546) กระทิง เบญจรัตน์, 2553) และชนิดเหยื่อและการใช้พื้นที่อาศัยของหมาใน (นคร, 2555) ผลการวิจัยข้างต้นเป็นข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการจัดการพื้นที่ แต่อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ประโยชน์พื้นที่ร่วมกันของสัตว์ป่าค่อนข้างน้อย สำหรับวิธีในการศึกษาแบบจำลองการกระจายของสัตว์ป่า มีด้วยกันหลายวิธี (Trisurat & Toxopeus, 2011) ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูล แตกต่างกันออกไป โดยแบบจำลอง maximum entropy (MaxEnt) เป็นแบบจำลองที่นิยมใช้ และให้ค่าความน่าชื่อถือสูง (นิรันดร์รัตน์, 2558) ดังนั้น การศึกษาในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการกระจายและพื้นที่การใช้ประโยชน์ร่วมกันของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมขนาดใหญ่ ในเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าภูเขียว สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการกำหนดมาตรการ เพื่อการวางแผน และจัดการถิ่นที่อยู่อาศัยของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมขนาดใหญ่ต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

พื้นที่ศึกษา

เขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าภูเขียวอยู่ในพื้นที่กลุ่มป่าภูเขียว-น้ำหนาว ของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มีพื้นที่ประมาณ 1,500 ตารางกิโลเมตร ตั้งอยู่ในช่วงเส้นรุ้งที่ 16° 5' ถึง 16° 35' เหนือ และเส้นแวงที่ 101° 20' ถึง 101° 55' ตะวันออก พื้นที่ส่วนใหญ่มีความสูงจากระดับน้ำทะเลปานกลางประมาณ 250 ถึง 1,300 เมตร ค่าเฉลี่ยประมาณ 770 เมตร (อุทิศ, 2550)

การเก็บและเตรียมข้อมูล

1. เลือกสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมขนาดใหญ่ ที่มีน้ำหนักตัวเต็มวัยตั้งแต่ 100 กิโลกรัมขึ้นไป (Olivier *et al*., 2009) จำนวน 6 ชนิด ได้แก่ กระทิง (*Bos gaurus*) วงศ์หมี (Ursidae) ช้างป่า (*Elephas maximus*) หมูป่า (*Sus scrofa*) กวางป่า (*Rusa unicolor*) และเลียงผา (*Capricornis sumatraensis*) จากข้อมูลการปรากฏการเดินสำรวจลาดตระเวนของเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าภูเขียว (ข้อมูลจากกรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช)

ระหว่างปี พ.ศ. 2555 - 2559 และสำรวจเพิ่มเติมในปี พ.ศ. 2558 - 2559 ทั้งทางตรงและทางอ้อม ได้แก่ ร่องรอย กองมูล เสียงร้อง และการพบเห็นสัตว์ป่า ด้วยเครื่องกำหนดพิกัดตำแหน่งบนพื้นผิวโลก (Global Positioning System: GPS)

2. จัดเตรียมข้อมูลปัจจัยแวดล้อมต่าง ๆ ของเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าภูเขียว ที่จำเป็นต่อการดำรงชีวิตของสัตว์ป่ามาเป็นตัวแปรอิสระ (independent data) ในการศึกษาการกระจายของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมขนาดใหญ่ และข้อมูลปัจจัยแวดล้อมทั้งหมดที่สำคัญต่อสัตว์ป่า (Trisurat *et al*., 2010) จะถูกจัดให้อยู่ในรูปแบบข้อมูลเชิงพื้นที่ (spatial data) หรือรูปแบบกริด (grid format) โดยมีขนาดจุดภาพ (resolution) เท่ากับ 100x100 เมตร ทั้งหมด 15 ปัจจัย ประกอบด้วย ความสูงจากระดับน้ำทะเลปานกลาง ความลาด ระยะห่างจากลำน้ำ ระยะห่างจากแหล่งน้ำถาวร ระยะห่างจากแหล่งโป่ง ระยะห่างจากหมู่บ้าน ระยะห่างจากถนน ระยะห่างจากหน่วยพิทักษ์ป่า ระยะห่างจากทุ่งหญ้า ประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดิน (กรมพัฒนาที่ดิน, 2558) โดยนำมาจัดจำแนกออกเป็น 5 กลุ่ม ประกอบด้วย 1) ทุ่งหญ้า ทุ่งหญ้าสลับไม้พุ่ม พื้นที่ที่หญ้าที่มีหินโผล่ 2) ป่าผลัดใบ ได้แก่ ป่าเต็งรัง ป่าสนเขา และป่าเบญจพรรณ 3) ป่าไม่ผลัดใบ ได้แก่ ป่าดิบแล้ง และป่าดิบชื้น 4) แหล่งน้ำถาวร และ 5) อื่น ๆ ในส่วนของปัจจัยด้านสภาพภูมิอากาศของ WorldClime (2016) ได้จากค่าเฉลี่ยระหว่างปี ค.ศ. 1950 - 2000 (http://www.worldclim.org/) ของการทำนายแบบจำลองทางสถิติ ตามภาพเหตุการณ์ IPCC AR5 ระดับ RCP 8.5 (WorldClim, 2016) ทำการคัดเลือกปัจจัยภูมิอากาศที่เหมาะสมในการวิเคราะห์การกระจายของสัตว์ป่า และลดความซ้ำซ้อนของข้อมูล จากปัญหา muti-collinearity มาก (Trisurat et al., 2014) โดยใช้โปรแกรม R คำนวณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Coefficient Correlation) หลังจากนั้น ทำการคัดเลือกปัจจัยที่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์น้อยกว่า 0.80 ($r<0.80$) ผลการวิเคราะห์ พบว่า ปัจจัยที่สามารถนำมาวิเคราะห์ข้อมูลมีทั้งหมด 5 ปัจจัย ประกอบด้วย อุณหภูมิเฉลี่ยรายปี (bio1) ปริมาณน้ำฝนรายปี (bio12) ปริมาณน้ำฝนของเดือนที่สูงสุด (bio13) ปริมาณน้ำฝนแปรปรวน (bio15) ปริมาณน้ำฝนของสี่เดือนที่สูงสุด (bio16) ทั้งนี้การคัดเลือกปัจจัยสภาพภูมิอากาศได้ใช้ตามการศึกษาของ Trisurat *et al*. (2014) และนิรันทร์รัตน์ (2558)

การวิเคราะห์ข้อมูล

นำข้อมูลปัจจัยแวดล้อมต่าง ๆที่มีความสำคัญต่อสัตว์ป่ามาสร้างแบบจำลองทางสถิติ โดยใช้โปรแกรม MaxEnt (Phillips and Dudik, 2008) เพื่อนำไปใช้อธิบายความสัมพันธ์ของปัจจัยแวดล้อมต่าง ๆ กับการปรากฏของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมขนาดใหญ่ ซึ่งประกอบไปด้วยขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

1. แปลงข้อมูลปัจจัยแวดล้อมให้เป็นข้อมูล ASCII ที่มีขนาดจุดภาพเท่ากันทุกชั้นข้อมูล

2. แบ่งข้อมูลจุดสำรวจสัตว์ป่าทั้งหมด ออกเป็น 2 ส่วน โดยการใช้โปรแกรม R สุ่มตัวอย่างข้อมูล (random sampling) ประกอบด้วย ส่วนที่ 1 ข้อมูลการปรากฏ (presence) ของสัตว์ป่าร้อยละ 75 สำหรับนำไปวิเคราะห์ข้อมูล (training data) และสร้างแผนที่ความน่าจะเป็นในการกระจายของสัตว์ป่า และส่วนที่ 2 ข้อมูลการปรากฏและไม่ปรากฏ (absence) ของสัตว์ป่าอย่างละร้อยละ 25 สำหรับนำมาใช้ทดสอบความถูกต้อง (testing) ของแผนที่ (Trisurat *et al*., 2014)

3. กำหนดการแสดงผลแบบ logistic ส่วนค่าอื่น ๆ กำหนดตามค่า default ของแบบจำลองจากโปรแกรมสำเร็จรูป MaxEnt software version 3.1.0 และดำเนินการวิเคราะห์ข้อมูล จำนวน 5 ครั้ง (replication)

เพื่อลดความคลาดเคลื่อนในการจำลองข้อมูล (Trisurat *et al*., 2014) ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ค่าความน่าจะเป็นของการปรากฏ (probability of presence) มีค่าระหว่าง 0 - 1 ค่าบทบาทของปัจจัยแวดล้อมต่อการกระจายของสัตว์ป่า (contribution) และค่าความน่าเชื่อถือแบบจำลอง Area Under Curve (AUC) ของสมการ ถ้าค่าของ AUC เข้าใกล้ 1 แสดงว่าแบบจำลองจะมีความน่าเชื่อถือมาก (Phillips & Dudik, 2008)

4. ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ของโปรแกรม MaxEnt จะได้ค่า logistic threshold เป็นค่าจุดตัดการปรากฏ (cut-off value) จำนวน 11 ค่า ในการศึกษาครั้งนี้ เลือกใช้ 6 ค่า ประกอบไปด้วย Maximum training sensitivity plus specificity logistic threshold (MTRSPS), Equal training sensitivity and specificity logistic threshold (ETRSAS), Maximum test sensitivity plus specificity logistic threshold (MTESPS), Equal test sensitivity and specificity logistic threshold (ETESAS), 10 percentile training presence logistic threshold (PTP) และ Minimum training presence logistic threshold (MTP) เนื่องจากให้ความถูกต้องสูง (Trisurat and Bhumpakphan, 2018) มาแบ่งชั้นความน่าจะเป็นในการปรากฏ (presence) และไม่ปรากฏ (absence) ของสัตว์ป่าในแต่ละค่า โดยให้ค่าการปรากฏเป็นหนึ่งและไม่ปรากฏเป็นศูนย์ หลังจากนั้นทำการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง จากข้อมูลการปรากฏและไม่ปรากฏร้อยละ 25 ของแต่ละชนิดที่จัดเตรียมไว้ข้างต้น มาซ้อนทับกับแผนที่ทั้ง 6 แผนที่ แล้วเลือกแผนที่ที่ให้ค่าความถูกต้องมากที่สุด

5. นำแผนที่การกระจายของสัตว์ป่าทั้ง 6 ชนิด มาซ้อนทับกัน (overlay) และเปรียบเทียบระดับพื้นที่การใช้ประโยชน์ร่วมกันของสัตว์ป่าทั้ง 6 ชนิด

ผลและวิจารณ์

ตำแหน่งการปรากฏของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมขนาดใหญ่

จากการสำรวจและรวบรวมข้อมูลตำแหน่งการปรากฏร่องรอยหรือพบเห็นโดยตรงของ สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมขนาดใหญ่ ในพื้นที่เขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าภูเขียว จังหวัดชัยภูมิ พบจุดการปรากฏของสัตว์ป่าจากการเดินสำรวจในปี พ.ศ. 2558 - 2559 ของผู้ศึกษา รวม จำนวน 278 จุด และจากฐานข้อมูลการลาดตระเวนของเจ้าหน้าที่ในช่วงปี พ.ศ. 2555 - 2559 จำนวน 2,796 จุด รวมทั้งหมด 3,074 จุด กระทิงพบมากสุด จำนวน 1,272 จุด รองลงมาได้แก่ ช้างป่า (968 จุด) หมูป่า (398 จุด) กวางป่า (242 จุด) ส่วนเลียงผา และวงศ์หมี พบประมาณ 100 จุดต่อชนิด

แบบจำลองถิ่นที่อยู่อาศัยของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมขนาดใหญ่

ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการปรากฏของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมขนาดใหญ่และปัจจัยแวดล้อมโดยใช้แบบจำลอง MaxEnt พบว่า ปัจจัยแวดล้อมที่มีอิทธิพลต่อการกระจายของสัตว์ป่า ประกอบด้วย ระยะห่างจากแหล่งโป่ง (≤ 10 กิโลเมตร) มีอิทธิพลต่อ กระทิง ช้างป่า และเลียงผา รองลงมา ได้แก่ ระยะห่างจากทุ่งหญ้า (≤ 10 กิโลเมตร) มีค่ามีอิทธิพลต่อ เลียงผา วงศ์หมี และช้างป่า ความลาดชัน (10 - 90%) มีอิทธิพลต่อ เลียงผา วงศ์หมี และช้างป่า ระยะห่างจากหมู่บ้าน (≤ 8 กิโลเมตร) มีอิทธิพลต่อ หมูป่า เลียงผา และช้างป่า ระยะห่างจากแหล่งน้ำ (≤ 5 กิโลเมตร) มีอิทธิพลต่อ กวางป่า หมี และหมูป่า ปริมาณน้ำฝนของเดือนที่สูงสุด (205 - 263 มิลลิเมตร) มีอิทธิพลต่อ หมูป่า กระทิง และช้างป่า มีค่าเฉลี่ยร้อยละความสำคัญของปัจจัยต่อสัตว์ป่าเท่ากับ 27.15, 9.97, 8.72, 8.72, 8.18 และ 6.68 ตามลำดับ (Table 1) สำหรับประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดิน พบว่า สิ่ง

ปกคลุมดินประเภท แหล่งน้ำ ทุ่งหญ้า และป่าดิบแล้ง มีความสำคัญสูง และมีอิทธิพลต่อ ช้างป่า กระทิง และหมี (ธีระพงษ์, 2545; ศุภกิจ; 2546; เบญจรัตน์; 2553; สุชาติ; 2558) ส่วนปัจจัยที่เหลือมีความสำคัญลดลงมา (Table 1)

จากผลการศึกษาถิ่นอาศัยที่เหมาะสมของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมขนาดใหญ่ โดยใช้จุดตัดการปรากฏ (Table 1) พบว่า ขนาดพื้นที่การกระจายของกระทิง (Figure 1A) มีพื้นที่มากสุด ร้อยละ 30.81 รองลงมาได้แก่ วงศ์หมี (Figure 1E) ช้างป่า (Figure 1B) หมูป่า (Figure 1F) กวางป่า (Figure 1D) และเลียงผา (Figure 1C) มีขนาดพื้นที่ร้อยละ 29.16, 25.24, 17.19, 15.32 และ 12.44 ตามลำดับ สำหรับความสัมพันธ์ของปัจจัยแวดล้อมและขนาดพื้นที่การกระจายของสัตว์ป่า สามารถบ่งบอกได้ว่าสัตว์ป่าบางชนิดมีความต้องการปัจจัยแวดล้อมเฉพาะในการดำรงชีวิต (นริศ, 2553) อย่างเช่น เลียงผา มีถิ่นอาศัยอยู่บริเวณหน้าผาสูงชัน ซึ่งสังเกตได้จากค่าร้อยละความสำคัญของปัจจัยความลาดชันที่มีค่ามากถึง ร้อยละ 28 รองจากแหล่งโป่ง และที่สำคัญ IUCN (2018) จัดให้อยู่ในสถานภาพกลุ่มแนวโน้มเสี่ยงต่อการสูญพันธุ์ ประกอบกับลักษณะภูมิประเทศของเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าภูเขียว มีหน้าผาสูงชันรอบแนวเขตใกล้กับชุมชน จึงทำให้มีโอกาสถูกล่าได้ง่าย ด้วยพฤติกรรมของเลียงผาเป็นสัตว์ที่มีถิ่นอาศัยประจำถิ่น (กลุ่มงานวิจัยสัตว์ป่า, 2550) ส่วนสัตว์ป่าชนิดที่เหลือ มีความสัมพันธ์กับปัจจัยแวดล้อมที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับพฤติกรรมและสภาพแวดล้อมของสัตว์ป่าแต่ละชนิด (นริศ, 2553; สุชาติ, 2558) ซึ่งสังเกตได้จาก Table 1 นอกจากนี้ยังพบว่า ขนาดพื้นที่การกระจายของช้างป่า มีขนาดพื้นที่เพิ่มขึ้นจากงานวิจัยของ ศุภกิจ (2546) และพื้นที่การกระจายของกระทิง มีขนาดพื้นที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยของเบญจรัตน์ (2553) ส่วนขนาดพื้นที่ของสัตว์ป่าชนิดที่เหลือมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของสุชาติ (2558)

จากผลการศึกษาค่าความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง (AUC) ของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมขนาดใหญ่ทั้งหมด 6 ชนิด พบว่า แบบจำลองการกระจายของกวางป่า มีค่ามากกว่า 0.9 จัดอยู่ในระดับดีเยี่ยม และแบบจำลองของเลียงผาและหมูป่า มีค่าระหว่าง 0.8 - 0.9 จัดอยู่ในระดับดีมาก ส่วนชนิดที่เหลืออีก 3 ชนิด คือ กระทิง ช้างป่า และวงศ์หมี จัดอยู่ในระดับดี เมื่อพิจารณาจากการทดสอบความถูกต้องของแผนที่ ซึ่งได้จากค่า logistic thresholds จำนวน 6 ค่า โดยใช้ข้อมูลร้อยละ 25 พบว่า ค่า ETRSAS เหมาะสำหรับ เลียงผา ช้างป่า และหมูป่า ค่า MTESPS เหมาะสำหรับ กวางป่า ส่วนค่า MTRSPS เหมาะสำหรับ กระทิง และวงศ์หมี (Table 1)

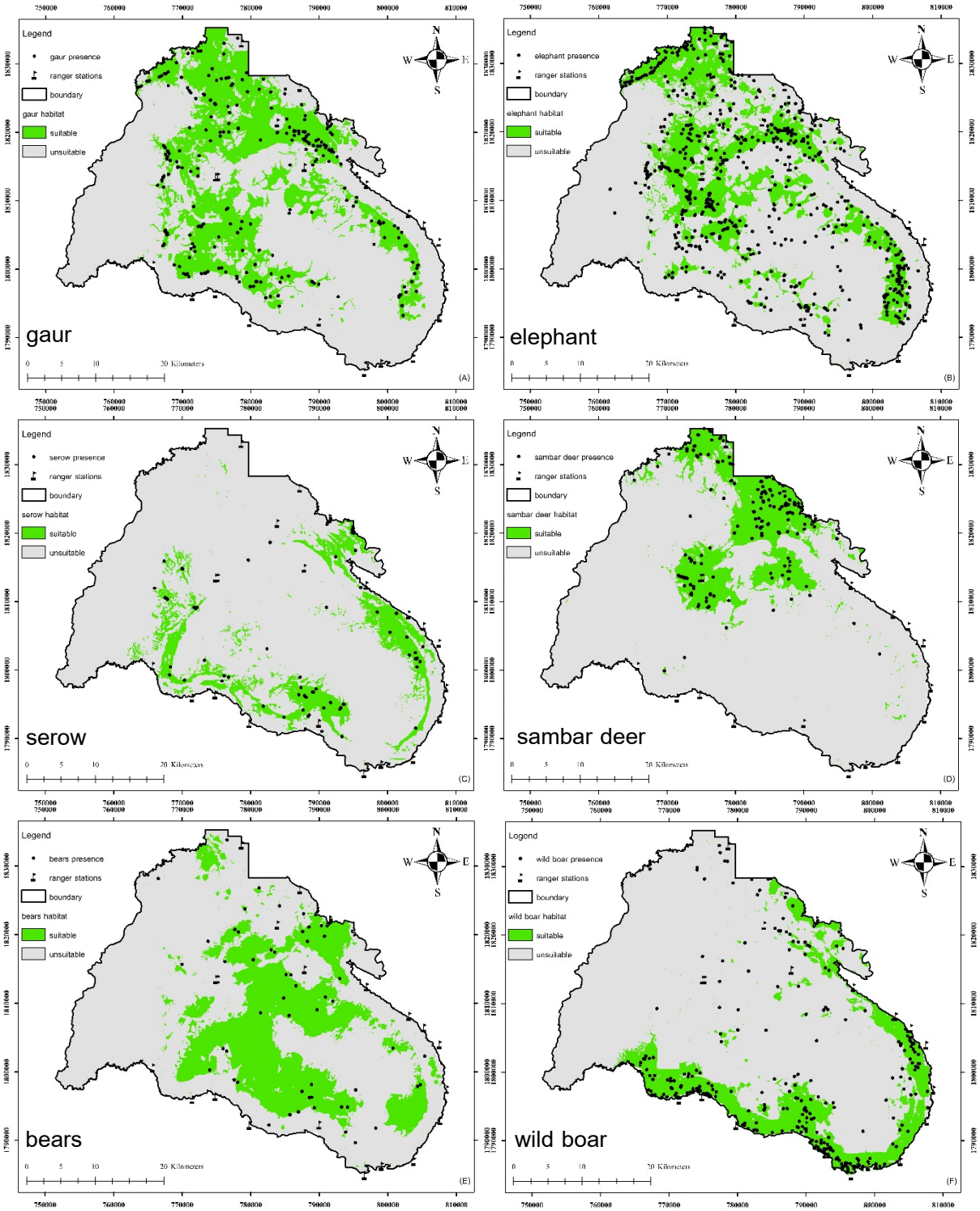


Figure 1 Suitable habitat of large mammals

Table 1 Presence contribution of large mammals

Species	Bio1	Bio12	Bio13	Bio15	Bio16	Mean Sea-Level	Range	Land use	Ranger station	Roads	Salt licks	Slope	Stream	Village	Water	AUC	Threshold	Cut-off value
Gaur	0.20	4.10	14.00	0.80	0.70	1.90	5.30	9.90	1.70	3.50	41.80	4.70	4.70	4.40	2.00	0.76	MTRSPS	0.40
Serow	1.70	1.10	0.10	0.90	0.10	1.90	14.50	4.10	1.00	5.30	30.30	25.50	2.20	11.00	0.40	0.86	ETRSAS	0.27
Deer	2.20	1.80	1.20	0.20	0.80	7.50	2.80	2.70	23.10	10.50	5.00	5.60	5.40	8.80	22.60	0.90	MTESPS	0.17
Elephant	0.30	0.30	2.20	0.10	0.70	1.60	8.50	17.10	0.80	2.70	41.20	6.10	2.50	9.30	6.70	0.76	ETRSAS	0.42
Wild boar	9.50	1.70	20.90	1.70	2.10	6.60	3.50	3.80	8.60	4.20	15.80	1.30	1.10	12.40	6.80	0.84	ETRSAS	0.27
Bears	1.20	0.70	1.70	0.60	0.10	2.00	25.20	9.30	1.20	2.10	28.80	9.10	0.90	6.40	10.60	0.69	MTRSPS	0.40
Average	2.52	1.62	6.68	0.72	0.75	3.58	9.97	7.82	6.07	4.72	27.15	8.72	2.80	8.72	8.18			
Maximum	9.50	4.10	20.90	1.70	2.10	7.50	25.20	17.10	23.10	10.50	41.80	25.50	5.40	12.40	22.60			
Minimum	0.20	0.30	0.10	0.10	0.10	1.60	2.80	3.80	0.80	2.10	5.00	1.30	0.90	4.40	0.40			

Remarks: Bio1 = Annual Mean Temperature, Bio12 = Annual Precipitation, Bio13 = Precipitation of Wettest Month, Bio15 = Precipitation Seasonality, Bio16 = Precipitation of Wettest Quarter, MTESPS = Maximum test sensitivity plus specificity logistic threshold, MTRSPS = Maximum training sensitivity plus specificity logistic threshold, ETRSAS = equal Training Sensitivity and specificity and AUC = Area Under Curve.

พื้นที่การใช้ประโยชน์ร่วมกันของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมขนาดใหญ่

จากพื้นที่การใช้ประโยชน์ร่วมกันของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมขนาดใหญ่ พบว่า มีระดับความชุกชุมของการใช้ประโยชน์พื้นที่ร่วมกันของสัตว์ป่าแต่ละจำนวนความชุกชุมชนิดต่อขนาดพื้นที่การใช้ประโยชน์ร่วมกันของสัตว์ป่าทั้งหมด 6 ชนิด แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ประกอบด้วย กลุ่มที่ 1 การใช้ประโยชน์พื้นที่ร่วมกันของสัตว์ป่าระดับน้อย (≤ 2 ชนิด) มีขนาดพื้นที่ 765.49 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 71.70 กลุ่มที่ 2 การใช้ประโยชน์พื้นที่ร่วมกันของสัตว์ป่าระดับปานกลาง (3-4 ชนิด) มีขนาดพื้นที่ 275.29 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 26.47 และกลุ่มที่ 3 การใช้ประโยชน์พื้นที่ร่วมกันของสัตว์ป่าระดับมาก (5-6 ชนิด)มีขนาดพื้นที่ 18.93 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 1.82 (Figure 2) รวมพื้นที่การใช้ประโยชน์ร่วมกันของสัตว์ป่าทั้งหมดต่อพื้นที่ของเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าภูเขียวทั้งหมด เท่ากับ 1,039.71 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 66.20 สำหรับพื้นที่การใช้ประโยชน์ร่วมกันของสัตว์ป่ากลุ่มที่ 3 อยู่ในบริเวณทิศเหนือของพื้นที่ และมีหน่วยพิทักษ์ป่า 4 หน่วย ล้อมรอบ ประกอบด้วย หน่วยพิทักษ์ป่าบึงแปน หน่วยพิทักษ์ป่าศาลาพรม หน่วยพิทักษ์ป่าหนองไรไก่ และหน่วยพิทักษ์ป่าแก้งตาดไซ ซึ่งบริเวณพื้นที่กลุ่มที่ 3 มีความเหมาะสมเป็นถิ่นที่อยู่อาศัยของสัตว์ป่าทั้ง 6 ชนิด เนื่องจากมีลำน้ำพรมไหลผ่านเป็นหุบเขาค่อนข้างลาดชันน้อย และสภาพพื้นที่เป็นป่าสมบูรณ์ตามงานวิจัยของ สุชาติ (2558) แต่ในบริเวณพื้นที่ดังกล่าว มีความเสี่ยงที่สัตว์ป่าจะออกนอกพื้นที่ได้ เนื่องจากบริเวณหน่วยพิทักษ์ป่าหนองไรไก่ และแก้งตาดไซ มีลำน้ำไหลผ่านลงสู่ชุมชน ประกอบกับเป็นหุบเขาค่อนข้างลาดชันน้อย อาจส่งผลให้เกิดปัญหาความขัดแย้งระหว่างชุมชนกับสัตว์ป่า นอกจากนี้ข้อมูลการกระจายของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมขนาดใหญ่ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการจัดการและฟื้นฟูประชากรของสัตว์ผู้ล่าในพื้นที่ เช่น หมาใน เสือดาว และเสือโคร่ง (อัจฉรา, 2543; ศุภกร และคณะ, 2560)

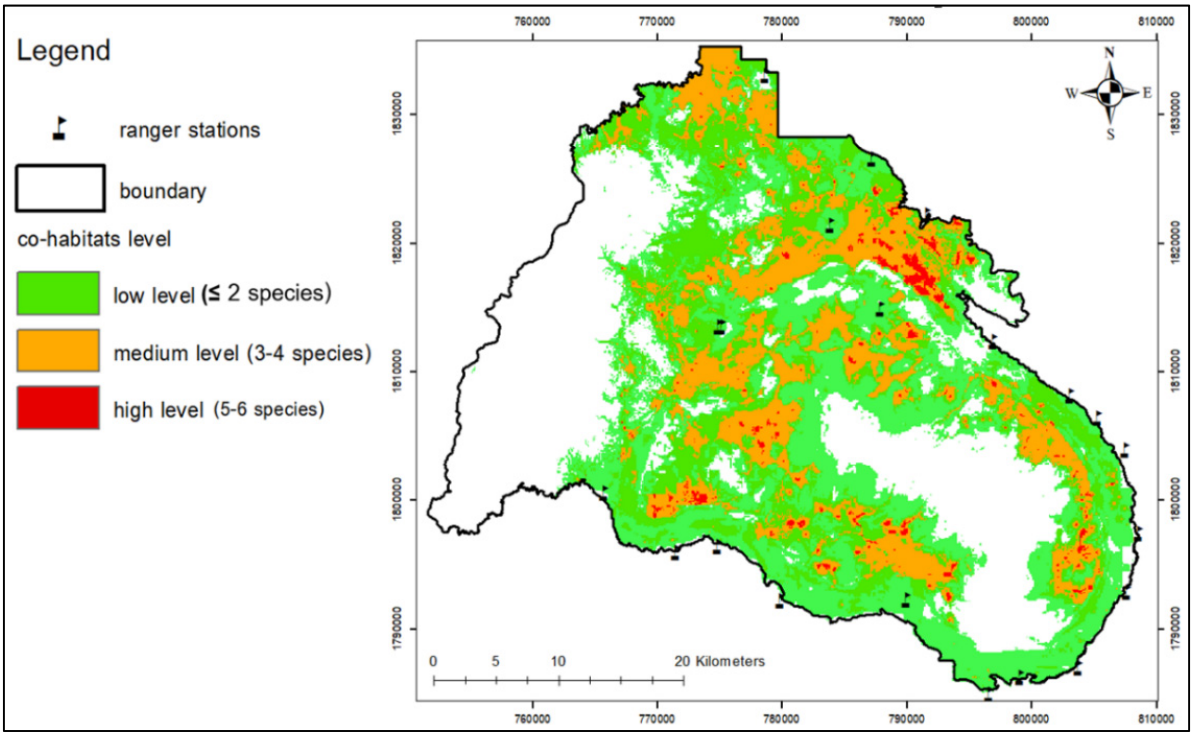


Figure 2 Co-habitats level of large mammals on Phu Khieo Wildlife Sanctuary

สรุป

1. จากการศึกษาการกระจายของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมขนาดใหญ่ ในเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าภูเขียว พบว่าพื้นที่การกระจายของสัตว์ป่าทั้ง 6 ชนิด ได้แก่ กระทิง วงศ์หมี ช้างป่า หมูป่า กวางป่า และเลียงผา มีขนาดพื้นที่การกระจายโดยเรียงจากมากไปน้อยร้อยละ 30.81, 29.16, 25.24, 17.19, 15.32 และ 12.44 ตามลำดับ

2. พื้นที่การใช้ประโยชน์ร่วมกันของสัตว์ป่าสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ประกอบด้วย กลุ่มที่ 1 การใช้ประโยชน์พื้นที่ร่วมกันระดับมาก มีขนาด 18.93 ตารางกิโลเมตร กลุ่มที่ 2 การใช้ประโยชน์พื้นที่ร่วมกันระดับปานกลาง มีขนาด 275.29 ตารางกิโลเมตร และกลุ่มที่ 3 การใช้ประโยชน์พื้นที่ร่วมกันระดับน้อย มีขนาดพื้นที่ 765.49 ตารางกิโลเมตร ของพื้นที่ทั้งหมด สำหรับพื้นที่กลุ่มที่ 1 ส่วนมากอยู่ในบริเวณหน่วยพิทักษ์ป่า 4 หน่วย ได้แก่ หน่วยพิทักษ์ป่าตาดไซ หน่วยพิทักษ์ป่าหนองไรไก่ หน่วยพิทักษ์ป่าบึงแปน และหน่วยพิทักษ์ป่าศาลาพรม ควรจะมีการลาดตระเพิ่มเติมในพื้นที่กลุ่มที่ 1 เพื่อป้องกันความขัดแย้งระหว่างสัตว์ป่าและชุมชน เนื่องจากบริเวณดังกล่าวอยู่ใกล้ชุมชน อาจทำให้สัตว์ป่าบางชนิดออกนอกพื้นที่

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่สนับสนุนการวิจัย โดยได้มอบทุนอุดหนุนการทำกิจกรรมส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัย ประเภททุนบัณฑิตศึกษา จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประจำปี 2560

เอกสารอ้างอิง

กลุ่มงานวิจัยสัตว์ป่า. 2550. **สัตว์ป่าสงวนในประเทศไทย**. พิมพ์ครั้งที่ 2. ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย จำกัด, กรุงเทพฯ.

ธีระพงษ์ ชุมแสงศรี. 2545. **ระบบสารสนเทศน์ภูมิศาสตร์เพื่อการวิเคราะห์ถิ่นที่อยู่อาศัยของสัตว์ป่าขนาดใหญ่ ในเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าตะเบาะ-ห้วยใหญ่**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นคร สลางสิงห์. 2555. **ชนิดเหยื่อและการใช้พื้นที่อาศัยของหมาใน** (*Cuon Alpinus*) **ในเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าภูเขียว จังหวัดชัยภูมิ**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นริศ ภูมิภาคพันธ์. 2553. **นิเวศวิทยาและการจัดการสัตว์ป่า**. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ คณะวนศาสตร์ ภาควิชาชีววิทยาป่าไม้, กรุงเทพฯ.

นิรันรัตน์ ป้อมอิ่ม. 2558. **การแพร่กระจายและสถานภาพการอนุรักษ์พลับพลึงธาร** (*Crinum Thaianum* J. Schulze) **ในประเทศไทย**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

เบญจรัตน์ พรหมเพ็ญ. 2553. **แบบจำลองถิ่นอาศัยของกระทิง** (*Bos Gaurus* H. Smith) **ในเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าภูเขียว จังหวัดชัยภูมิ**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

พิเชฐ นุ่นโต, ชุติอร ซาวีนี, มัทนา ศรีกระจ่าง และ ชิษนุวัฒน์ มณีศรีขำ. 2561. **เสียงคน เสียงช้างป่า: แนวโน้มการตอบสนองของชุมชนต่อการจัดการปัญหาความขัดแย้งระหว่างคนกับช้างป่าในประเทศไทย**. กองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ฝ่ายวิจัยเพื่อท้องถิ่น, กรุงเทพฯ.

ศุภกร อินทรประสิทธิ์, รองลาภ สุขมาสรวง และ ประทีป ด้วงแค. 2560. ความมากมายและการเลือกกินเหยื่อของหมาใน (*Cuon Alpinus*) ในเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าห้วยขาแข้ง จังหวัดอุทัยธานี. **วารสารสัตว์ป่าเมืองไทย** 24(1): 63-74.

ศุภกิจ วินิตพรสวรรค์. 2546. **การประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์เพื่อวิเคราะห์การแพร่กระจายของช้างป่า (*Elephas Maximus* Linnaeus, 1758) ในเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าภูเขียว จังหวัดชัยภูมิ**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สุชาติ โภชฌงค์. 2558. **รายงานโครงการวิจัยฉบับสมบูรณ์การประเมินถิ่นที่อยู่อาศัยที่เหมาะสมของสัตว์ป่าชนิดสำคัญในกลุ่มผืนป่าภูเขียว-น้ำหนาว**. ส่วนสารสนเทศด้านอนุรักษ์สัตว์ป่า, กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช.

อัจฉรา เพชรดี. 2543. **อุปนิสัยการกินอาหารของเสือโคร่งในเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าห้วยขาแข้งจากการวิเคราะห์มูล**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อุทิศ กุฏอินทร์. 2550. **ข้อมูลพื้นฐานเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าภูเขียว**. สำนักอนุรักษ์สัตว์ป่า, กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช.

IUCN. 2018. **The Iucn Red List of Threatened Species**. Available Source: http://www.iucnredlist.org/details/3812/0, November 5, 2018.

Olivier, P.I., R.J. Van Aarde and S.M. Ferreira. 2009. Support for a Metapopulation Structure among Mammals. **Mammal Review** 39(3): 178-192.

Phillips, J. S. and M. Dudik. 2008. Modeling of Species Distributions with Maxent: New Extensions and a Comprehensive Evaluation. **Ecography** 31: 756-769.

Trisurat, Y. and A. G. Toxopeus. 2011. Modeling Species Distribution, pp. 171-197. *In* Y. Trisurat., R. P. Shrestha and R. Alkemade. **Book Modeling Species Distribution.** Hershey.

_____ and N. Bhumpakphan. 2018. Effects of Land Use and Climate Change on Siamese Eld's Deer (*Rucervus Eldii Siamensis*) Distribution in the Transboundary Conservation Area in Thailand, Cambodia, and Lao Pdr. **Frontiers in Environmental Science** 6: 1-15.

_____, R. Alkemade and P. Verburg. 2010. Projecting Land Use Change and Its Consequences for Biodiversity in Northern Thailand. **Environmental Management** 45: 626-639.

_____, B. Kanchanasaka and H. Kreft. 2014. Assessing Potential Effects of Land Use and Climate Change on Mammal Distribution in Northern Thailand. **Wildlife research** 41: 522-536.

WorldClime. 2016. **Global Climate Data**. Available Source: https://worldclim.org/, November 30, 2016.

การศึกษากระบวนการโอโซนเนชันร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษ

The Study of Catalytic Ozonation in Effluent Pulp and Paper Industry

ธรณินทร์ ส้มเกิด[1*] และ ภัชราภรณ์ สุวรรณวิทยา[1]

Thoranin Somkerd[1*] and Patcharapon Suwannawittaya[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีความประสงค์เพื่อการศึกษากระบวนการบำบัดน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษ โดยอาศัยกระบวนการโอโซนเนชั่น ในสภาวะที่มีและไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 โดยทำการทดลองแบบกะ (batch) แปรผันสภาวะ pH (4, 7, 10) เติมโอโซนที่ปริมาณเฉลี่ย 4.732 มิลลิกรัมโอโซนต่อนาที พบว่าโอโซนสามารถกำจัดสารอินทรีย์ที่เหลือในน้ำทิ้งได้ โดยถูกกำจัดมากขึ้นตามปริมาณโอโซนที่เติมเข้าระบบ สภาวะที่มี TiO_2 ให้ผลการกำจัดดีกว่าสภาวะที่ไม่มี pH เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อปฏิกิริยาด้วย แม้จะไม่ชัดเจนเท่าผลของตัวเร่งปฏิกิริยา ภายใต้สภาวะที่ดีที่สุดคือ การเติมโอโซน 60 นาที ปริมาณโอโซน 260.92 มิลลิกรัมโอโซนต่อลิตร ที่ pH 10 เมื่อใช้โอโซนอย่างเดียว BOD ลดลง 29.13% COD ลดลง 36.7% ในสภาวะที่มี TiO_2 การกำจัดดีขึ้น BOD ลดลง 36% COD ลดลง 60% สัดส่วน BOD:COD ที่เพิ่มขึ้นจาก 0.24 เป็น 0.34 แสดงให้เห็นว่าน้ำตัวอย่างมีความสามารถในการย่อยสลายดีขึ้น สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์สารด้วยเทคนิค GCMS ที่พบว่าสารโมเลกุลใหญ่มีปริมาณลดลงหลังกระบวนการโอโซนเนชัน

ABSTRACT

This study focuses on ozonation process of effluent from pulp and paper effluent treatment plant. The conditions under the use of ozone only and ozone with TiO_2 catalyst were compared. A batch experiment was conducted at varying pH (4, 7, 10) with ozone supplied at the average rate of 4.732 mgO_3/min. It was found that organic matter was removed related to ozone injection rate. The presence of TiO_2 resulted in better removal than the use of ozone only. It was also found that pH affected the removal, although the effect was not as clear as that of TiO_2 catalyst. The highest organic removal obtained in the batch with ozone only and ozone with TiO_2 was at pH10 and 60 minutes ozonation time (260.92 mgO_3/L). BOD and COD were reduced by 29.13 and 36.7 %, respectively in the former batch, while those in the latter batch were 36 and 60%, respectively. The increase in BOD: COD ratio from 0.24 to 0.34 revealed that biodegradability of the water sample was improved. This agreed with GCMS analytical result in which larger molecules were reduced after ozonation.

Keyword: Ozonation, Catalyst, Phenolic Compound, Pulp and Paper, Titanium Dioxide

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

[1]ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

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

คำนำ

น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษเกิดจากกระบวนการผลิต ได้แก่ กระบวนการต้มเยื่อ ล้างเยื่อและฟอกเยื่อ มีการปนเปื้อนด้วยสารอินทรีย์จากวัตถุดิบ ประกอบด้วยสารประกอบฟีโนลิก ลิกนิน อนุพันธ์ของลิกนินและโพลิเมอร์ของลิกนิน ทำให้น้ำเสียที่ออกจากระบบนั้นมีสีน้ำตาลเข้ม สารเหล่านี้ย่อยสลายได้ยากทางชีวภาพ น้ำเสียที่ผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพยังมีค่าซีโอดีที่สูงและเกินค่ามาตรฐานน้ำทิ้งที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดไว้คือ 120 มิลลิกรัมต่อลิตรและมีสีน้ำตาลเข้มอยู่ ถึงแม้ว่าสีของน้ำทิ้งจะยังไม่ได้กำหนดออกมาเป็นตัวเลขที่ชัดเจน เพียงกำหนดให้สีของน้ำทิ้งไม่เป็นที่น่ารังเกียจแต่หากปล่อยน้ำทิ้งเหล่านี้ลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติจะส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นหลังการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการทางชีวภาพแล้วควรมีการบำบัดน้ำทิ้งเพื่อปรับสภาพให้เหมาะสมขึ้น ลดความเป็นพิษของสารประกอบฟีโนลิกที่อาจส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อม กระบวนการบำบัดที่น่าสนใจได้แก่ การออกซิไดซ์สารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อนด้วยตัวออกซิแดนท์ที่รุนแรง (Oxidant) เช่น เปอร์แมงกาเนต (Permanganate, MnO_4^-), ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide, H_2O_2) และกระบวนการเฟนตัน เป็นต้น (รสสุคนธ์, 2553) หรือกระบวนการทางกายภาพ เช่น การดูดติดผิว (ต่อพงษ์, 2544) รวมทั้งกระบวนการ Advanced Oxidation Process (AOP) ซึ่งเป็นกระบวนการทางเคมีที่ใช้หลายกระบวนการร่วมกัน โดยผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮดรอกซิลแรดิคัล

โอโซน (Ozone, O_3) เป็นสารออกซิแดนท์ที่รุนแรงชนิดหนึ่งสามารถทำปฏิกิริยาได้กับสารหลากหลายชนิด โดยปฏิกิริยาทั้งทางตรงและทางอ้อมโดยผ่านไฮดรอกซิลแรดิคัล (Gunten, 2003) โอโซนสามารถย่อยสลายพันธะเคมีของสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อน เช่น กลุ่มที่มีโครงสร้างเป็นวงแหวนเบนซีน (aromatic ring) ให้เป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างอย่างง่าย ทำให้จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายต่อได้ มีผลให้กระบวนการบำบัดทางชีวภาพมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น นอกจากนี้โอโซนสามารถเปลี่ยนรูปไปเป็นออกซิเจนได้ง่ายจึงไม่ตกค้างอยู่ในน้ำและไม่สร้างปัญหาด้านกลิ่นและรส จึงมีการนำโอโซนมาใช้ประโยชน์ในงานบำบัดน้ำเสียประเภทต่าง ๆ (เนทิยา, 2543; นนทพงษ์, 2548; สุเมธ, 2541) รวมทั้งน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษด้วย อย่างไรก็ตามกระบวนการออกซิเดชันด้วยโอโซนในบางกรณีอาจเกิดปฏิกิริยาที่ไม่สมบูรณ์ จึงมีการนำตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 เข้ามาประยุกต์ใช้ร่วมกับการเติมโอโซนเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของโอโซน ดังการทดลองของ จิดาภา (2560) ที่ใช้การเติมโอโซนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 ในการกำจัดฮิวมิก พบว่าได้ผลดีในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ที่คงทนและยากต่อการย่อยสลายในกระบวนการทางชีวภาพ และเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดฮิวมิกที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค FEEM สูงสุดที่ 56.65%

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกระบวนการโอโซนเนชันภายใต้สภาวะที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 และไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 ในการบำบัดน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ และติดตามผลิตภัณฑ์สารอินทรีย์ที่เกิดจากกระบวนการ โดยการวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเทคนิค Gas Chromatography Mass Spectrophotometry

อุปกรณ์และวิธีการ

การทดลองบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษด้วยโอโซน ใช้น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดแบบตะกอนเร่งของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษในจังหวัดสมุทรสาคร นำมาวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ และ องค์ประกอบสารอินทรีย์ โดยสารกลุ่มที่สนใจคือกลุ่มสารประกอบฟีโนลิก (นนทพงษ์,

2548; ต่อพงศ์, 2544) รายละเอียดการวิเคราะห์ดังแสดงใน Table 1 การวิเคราะห์สารประกอบฟีโนลิกใช้วิธี Gas Chromatography Mass Spectrometryโดยใช้เครื่อง GCMS รุ่น 5890 HP, detector HP 5872A, Capillary Column รุ่น HP5MS (30 m x 0.32 mm, 0.5 µm thickness) และใช้ก๊าซฮีเลียมเป็น mobile phase

Table 1 Analytical method for wastewater parameter

Parameter	Analytical Method	Standard Method
BOD (mg/L)	5-Day BOD Test	5210 B
COD (mg/L)	Closed Reflux	5220 D
pH	pH meter	-
Byproduct in wastewater (Qualitative analysis)	GC/MS (Gas Chromatography Mass Spectrometry)	*

หมายเหตุ * นนทพงษ์ (2548)

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

ในการทดลองนี้เลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide, TiO_2) โดยใช้ TiO_2 เคลือบบนตัวกลางคือ เม็ดแก้ว (glass bead) ตามวิธีการทดลองของ Gracia *et al.* (1996) โดยนำเม็ดแก้ว (glass bead) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร แช่ในกรด HF (เพื่อช่วยให้เคลือบติดได้ง่ายขึ้น) แล้วล้างทำความสะอาดด้วย Acetone และ Isopropanol ในเครื่อง Sonicator ผึ่งให้แห้ง ก่อนนำไปแช่ในสารสะลาย TiO_2 Degussa P-25 ความเข้มข้น 3% w/v เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงหลังเคลือบพบว่ามี TiO_2 เคลือบอยู่บนเม็ดแก้ว 6.02 % (w/w)

รูปแบบถังปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลอง

การทดลองทำในระดับห้องปฏิบัติการในถังปฏิกิริยาแบบกะ (batch reactor) ซึ่งประกอบด้วย ขวดโหลแก้วปริมาตร 2 ลิตร (น้ำตัวอย่าง 1 ลิตร) ต่อแบบอนุกรมกับขวดบรรจุสารละลาย 2% KI 3 ขวด เพื่อดักจับก๊าซส่วนเกิน ดังแสดงใน Figure 1 โอโซนที่เติมเข้าสู่ถังปฏิกิริยาได้จาก เครื่องผลิตโอโซน FAC OZONIZER รุ่น FAC-250 มีกำลังผลิตเฉลี่ย 4.732 มิลิกรัมโอโซนต่อนาที (ค่าเฉลี่ยจากการทดสอบในถังปฏิกิริยา) วิเคราะห์โดยวิธี Wet Chemistry Potassium Iodide Method ตาม Standard Method Number 2350E (APHA & AWWA, 2005) ปริมาณโอโซนที่เข้าทำปฏิกิริยาคำนวณจากปริมาณโอโซนที่ผลิตได้หักด้วยปริมาณในขวดดักก๊าซ

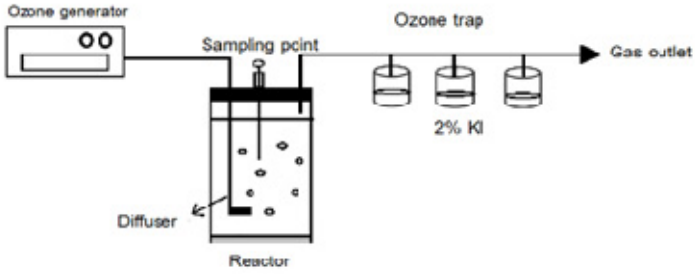


Figure 1 Diagram of Ozonation System (จิดาภา, 2560)

การทดลองบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษด้วยโอโซน

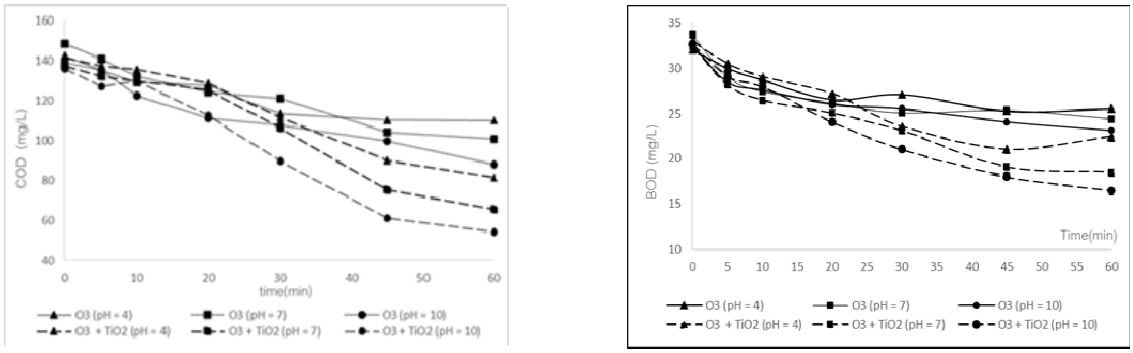
ในการทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการลดปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษโดยการใช้โอโซน แบ่งออกเป็น 2 ชุดการทดลอง คือ ชุดที่หนึ่งมีโอโซนเป็นตัวออกซิแดนท์เพียงอย่างเดียว และชุดที่สองมีโอโซนเป็นตัวออกซิแดนท์ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 ซึ่งเติมเม็ดแก้วที่เคลือบด้วย TiO_2 ลงในถังปฏิกิริยา ใช้น้ำตัวอย่างชุดละ 1 ลิตร ปรับสภาวะ pH 4.0 ± 0.1, 7.0± 0.1 และ 10± 0.1 โดยเก็บตัวอย่างระหว่างการเติมโอโซนที่เวลา 0, 5, 10, 20, 30, 45 และ 60 นาที

ผลและวิจารณ์

จากการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ พบว่ามีสีน้ำตาลและกลิ่นเหม็น ค่า pH เฉลี่ย 7.16 บีโอดี (Biochemical Oxygen Demand, BOD) เฉลี่ย 32 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand, COD) เฉลี่ย 135 มิลลิกรัมต่อลิตร

ประสิทธิภาพการลดปริมาณสารอินทรีย์ด้วยโอโซน

ผลการศึกษาการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีเริ่มต้น ที่สภาวะค่า pH 4, 7 และ 10 และระยะเวลาในการเติมโอโซนที่ 0, 5 , 10, 20, 30, 45 และ 60 นาที ปริมาณโอโซนที่ใช้ในปฏิกิริยา 0,14.06, 34.92, 71.84, 109.56,178.14, 260.92 มิลลิกรัมโอโซนต่อลิตร ตามลำดับ แสดงใน Figure 2 จะเห็นว่า ในทั้ง 3 สภาวะ pH สารอินทรีย์ (ทั้งค่า COD และ BOD) ในทั้ง 2 ชุดการทดลองมีแนวโน้มเดียวกัน คือ ลดลงตามปริมาณโอโซนที่เติมเข้าสู่ระบบ โดยที่ในช่วง 10-20 นาทีแรก ปริมาณโอโซนที่ใช้ในปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น 37 มิลลิกรัมโอโซนต่อลิตร การเปลี่ยนแปลงไม่แตกต่างกันมาก แต่หลังจาก 20 นาทีจนถึง 60 นาที เมื่อปริมาณโอโซนเพิ่มเป็น 260.92 มิลลิกรัมโอโซนต่อลิตร จะสังเกตได้ว่ามีความแตกต่างชัดเจนขึ้น โดยที่ในสภาวะที่มี TiO_2 สารอินทรีย์ลดลงไปมากกว่าในสภาวะที่ไม่มีตัวเร่ง TiO_2 เพราะเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้ระบบโอโซนมีประสิทธิภาพสูงขึ้น เพราะ Hydroxyl free radical ที่ถูกสร้างโดยตัวเร่งปฏิกิริยานั้นมีความว่องไวปฏิกิริยามากกว่าโมเลกุลโอโซน (สุเมธ, 2541) โดยสภาวะที่มี TiO_2 ค่า COD ลดลงจากค่าตั้งต้น 141.8 เหลือ 56.7มิลลิกรัมต่อลิตร (คิดเป็นประสิทธิภาพ 60.1 %) BOD ลดลงจาก 32.78 เหลือ 20.7 มิลลิกรัมต่อลิตร(คิดเป็นประสิทธิภาพ 36.7 %) ในขณะที่ในสภาวะที่ไม่มีตัวเร่ง ค่า COD ลดลงจากค่าตั้งต้น 139.8 เหลือ 88.2 มิลลิกรัมต่อลิตร (คิดเป็นประสิทธิภาพ 36.02 %) BOD ลดลงจาก 32.65 เหลือ 23.14 มิลลิกรัมต่อลิตร (คิดเป็นประสิทธิภาพ 29.13 %)



(a) (b)

Figure 2 Organic content in pulp and paper wastewater after ozonation and catalytic ozonation at pH 4, 7 and 10 (a) COD and (b) BOD

ผลของ pH ที่มีต่อการลดปริมาณสารอินทรีย์ด้วยโอโซน

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบสภาวะ pH ทั้ง 3 สภาวะ พบว่า pH ส่งผลต่อการกำจัดสารอินทรีย์ในทั้ง 2 ชุดการทดลอง ค่า pH ในช่วงเป็นกรดให้ผลการกำจัดที่ต่ำที่สุด ค่า pH เป็นกลาง (pH 7) และ ด่าง (pH 10) ให้ผลการกำจัดที่ดีขึ้นตามลำดับ อาจเนื่องมาจากปฏิกิริยาออกซิเดชันในการทดลองนี้เกิดโดยกลไกทางอ้อมผ่านทางไฮดรอกซิลแรดิคัล ซึ่งเกิดได้ดีในสภาวะด่าง (Gunten, 2003) Figure 3 แสดงผลการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปร้อยละของปริมาณที่ถูกกำจัด (% removal) หลังการเติมโอโซน 60 นาที คิดเป็นปริมาณโอโซนที่ใช้ในปฏิกิริยา 260.92 มิลลิกรัมโอโซนต่อลิตร ผลการกำจัด COD ที่ pH 4, 7 และ 10 ในสภาวะที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มจาก 22.72% เป็น 32.8% และ 36.7% ตามลำดับ ในสภาวะที่มี TiO_2 เพิ่มจาก 42.3% เป็น 52.1% และ 60.1% ตามลำดับ ในส่วนของค่า BOD แม้ว่าผลการกำจัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน

นอกจากนั้นยังพบว่า pH มีผลต่อโอโซน เมื่อระยะเวลาสัมผัสโอโซนนานขึ้นส่งผลให้ค่า pH มีแนวโน้มลดลง สอดคล้องกับการทดลองของ Hoigne (1988) อาจเนื่องมาจากเมื่อโอโซนลายตัวในน้ำจะให้ Hydroxyl radical (^{o}OH) และ Hydrogen peroxide ion ($^{o}OH_2$) ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาแตกตัวไปเป็น Hydrogen ion (H^+) ในกรณีที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ ดังนั้นเมื่อระยะเวลาสัมผัสโอโซนนานขึ้น ปริมาณโอโซนในน้ำมีมากขึ้น มีโอกาสทำปฏิกิริยากับน้ำแตกตัวให้ H^+ ได้มากขึ้น และการทดลองของ Rice (1980) ที่พบว่าค่า pH ลดลงอาจเนื่องมาจากการเกิดผลพลอยได้ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นกรดระหว่างการทำปฏิกิริยาโอโซเนชัน

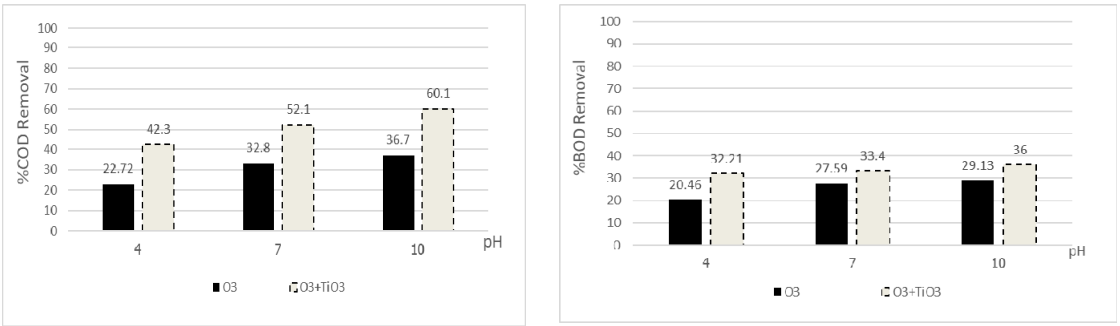


Figure 3 Effect of pH on organic removal (%) in pulp and paper wastewater by catalytic ozonation process at 60 min

ผลของกระบวนการโอโซนเนชันต่อความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradability)

ความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradability) ของสารอินทรีย์พิจารณาได้จากอัตราส่วนระหว่าง BOD : COD เมื่อนำผลการทดลองจากสภาวะที่ให้ผลการกำจัดดีที่สุด คือ การเติมโอโซนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 ที่ pH 10 มาเปรียบเทียบความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradability) ของน้ำทิ้งหลังผ่านกระบวนการโอโซน ได้ผลดังแสดงใน Figure 4 จะเห็นได้ว่าความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการเติมโอโซนเพิ่มขึ้นโดยอัตราส่วนระหว่าง BOD : COD เพิ่มขึ้นจากค่าตั้งต้น 0.24 เป็น 0.34 เมื่อเติมโอโซนไป 60 นาที เพราะโอโซนสามารถย่อยสลายพันธะเคมีของสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อน เช่น กลุ่มที่มีโครงสร้างเป็นวงแหวนเบนซีน (aromatic ring) ให้เป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างอย่างง่าย ทำให้จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายต่อได้ มีผลให้กระบวนการบำบัดทางชีวภาพมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น (เนทิยา, 2543; นนทพงษ์, 2548; สุเมธ, 2541)

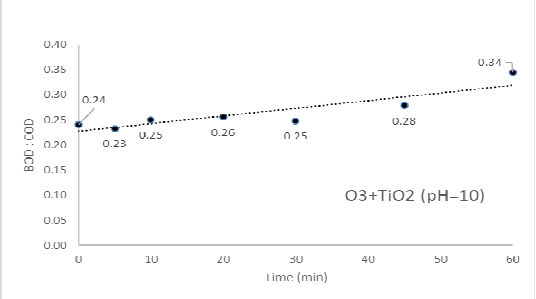


Figure 4 BOD: COD ratio in pulp and paper wastewater after catalytic ozonation process at pH 10

ผลิตภัณฑ์จากกระบวนการโอโซนเนชันของสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ

เพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงของสารอินทรีย์จากการออกซิเดชัน ในการศึกษานี้ได้นำน้ำตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการโอโซนเนชันในสภาวะที่ให้ผลการกำจัดสูงสุดคือ เติมโอโซนในสภาวะที่มี TiO_2 ที่ pH 10 เป็นเวลา 60 นาที มาวิเคราะห์หาสารอินทรีย์โดยวิเคราะห์ในเชิงคุณภาพด้วยเทคนิค Gas Chromatography Mass Spectrometry (GC/MS) โดยมีสารเป้าหมายในกลุ่มสารประกอบฟีโนลิก (ต่อพงศ์, 2544; นนทพงษ์, 2548) ดังแสดงใน Table 3

ผลการวิเคราะห์ใน Table 4 แสดงพื้นที่ใต้กราฟ (Area peak) ซึ่งให้ข้อมูลเชิงปริมาณของสารผลิตภัณฑ์ จะเห็นว่า มีเพียง Penta chloroethane ซึ่งเป็นสารอินทรีย์โมเลกุลเล็กที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นในสภาวะที่มี TiO_2 ในขณะที่ Phthalic anhydride ซึ่งมีโครงสร้างแบบวง และ สารตัวอื่นซึ่งมีโมเลกุลใหญ่มีปริมาณลดลงจากค่าตั้งต้น แสดงว่าถูกออกซิไดซ์โดยโอโซน โดยในสภาวะที่มี TiO_2 จะมีปริมาณต่ำกว่า หรือ เกิดปฏิกิริยาได้มากกว่า

Table 3 By target compounds (phenolic derivatives) related to pulp and paper wastewater

Compound	Mass/Ion	Retention time (min)	Molecule Structure
Penta chloroethane	117,130,167	17.412	$CHCl_2CCl_3$
Penta siloxane	147,191,207	12.075	$C_{10}H_{30}O_5Si_5$
Phthalic anhydride	76,104,148	10.035	$C_8H_4O_3$
Dibutyl phthalate	57,104,149	19.453	$C_{16}H_{22}O_4$
1,2-Benzenedicarboxylic acid	76,104,148	10.350	$C_8H_6O_4$
(2,3-Diphenylcyopropyl) methyl phenyl sulfoxide	91,115,207	27.115	$C_{22}H_{20}OS$

Table 4 Area peak of target compounds (phenolic derivatives) in pulp and paper wastewater after ozonation (with and without TiO_2) at pH = 10, 60 min.

Compound	Area peak		
	Before Treatment	O_3	O_3+TiO_2
Penta chloroethane	$1.474e^{+7}$	$1.467\ e^{+7}$	$2.30\ e^{+7}$
Penta siloxane	$1.728\ e^{+8}$	$5.88\ e^{+7}$	$1.152\ e^{+7}$
Phthalic anhydride	$1.850\ e^{+8}$	$7.74\ e^{+7}$	$1.526\ e^{+7}$
Dibutyl phthalate	$1.848\ e^{+8}$	$9.345\ e^{+7}$	$5.386\ e^{+7}$
1,2-Benzenedicarboxylic acid	$1.816\ e^{+7}$	$1.816\ e^{+7}$	$1.83\ e^{+7}$
(2,3-Diphenylcyopropyl) methyl phenyl sulfoxide	$1.089\ e^{+9}$	$1.064\ e^{+9}$	$9.760\ e^{+8}$

สรุป

น้ำทิ้งจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการทางชีวภาพของอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษยังคงมีสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยากปนเปื้อนอยู่ และมีปัญหาเรื่องสีจากสารประกอบฟีโนลิก กระบวนการโอโซนเนชันสามารถกำจัดสารอินทรีย์ และ สีที่เหลืออยู่ได้ โดยสารอินทรีย์ถูกกำจัดได้มากขึ้นตามปริมาณโอโซนที่เติมเข้าระบบ โดยสภาวะที่มี TiO_2 ให้ผลการกำจัดดีกว่าสภาวะที่ไม่มี pH เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อปฏิกิริยาด้วย แม้จะไม่ชัดเจนเท่าผลของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยที่สภาวะ pH 7 และ 10 ให้ผลการกำจัดดีกว่าที่ pH 4 ภายใต้สภาวะที่ดีที่สุด คือ เติมโอโซน 60 นาที ปริมาณโอโซนที่ใช้ทำปฏิกิริยา 260.92 มิลลิกรัมโอโซนต่อลิตร ที่ pH 10 เมื่อใช้โอโซนอย่างเดียว BOD ลดลง 29.13% COD ลดลง 36.7% ในสภาวะที่มี TiO_2 การกำจัดดีขึ้น BOD ลดลง 36% COD ลดลง 60% สัดส่วน BOD: COD ที่เพิ่มขึ้นจาก 0.24 เป็น 0.34 แสดงให้เห็นว่าน้ำตัวอย่างมีความสามารถในการย่อยสลายดีขึ้น สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์สารด้วยเทคนิค GCMS ที่พบว่าสารโมเลกุลใหญ่มีปริมาณลดลงหลังกระบวนการโอโซนเนชัน

เอกสารอ้างอิง

จิดาภา โสภาประดิษฐ์ และภัชราภรณ์ สุวรรณวิทยา. 2560. **การกำจัดฮิวมิคด้วยกระบวนการโอโซนเนชันที่มี TiO_2 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา**. กรุงเทพฯ. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

ต่อพงศ์ กรีธาชาติ. 2544. **การลดสีของโรงงานเยื่อและกระดาษด้วยกระบวนการดูดซับด้วยแอ๊คติเวตเต็ดคาร์บอน**, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

นนทพงษ์ กาณุดุลกิตติ. 2548. **การบำบัดสีน้ำทิ้งโรงงานเยื่อและกระดาษโดยกระบวนการโอโซน**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

เนทิยา ตัณฑชุณห์. 2543. **การลดปริมาณสารอินทรีย์ก่อนเข้าระบบบำบัดโดยกระบวนการโอโซนเนชัน**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

รสสุคนธ์ เกษมณี และศิวพร ชูเรือง, 2553, **การลดซีโอดีของน้ำเสียจากโรงงานผลิตเยื่อและกระดาษด้วยปฏิกิริยาโฟโต-เฟนตัน**, โครงงานปริญญาตรี, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สุเมธ ชวเดช. 2541. **การพัฒนากระบวนการออกซิเดชันสำหรับการบำบัดน้ำเสีย**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

APHA, AWWA and WEF. 2005. **Standard Method for the Examination of Water and Wastewater**. 20th ed. American Public Health Association, Washington D.C.

Garcia – Valls R. and T.A. Hatton. 2003. Metal Ion Complexation with Lignin Derivatives. **Chemical Engineering Journal** 94: 99 – 105.

Gunten U. 2003. Ozonation of drinking water. Part I. Oxidation kinetics and product formation, **Wat. Res** 37: 1443-1467.

Hoigne, J. and H. Bader. 1983. Rate Constant of the Reaction of Ozone with Organic and Inorganic Compounds in Water. **Wat. Research** 17: 173-187.

Rice, R.G., G.W. Miller, C.M. Roboson and A.G. Hill. 1980. Ozone Utilization in Europe, pp. 117-134. *In* **AIChe Symposium Series** 97:76.

ความหนาแน่นและโครงสร้างประชากรของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมขนาดเล็ก อันดับสัตว์ฟันแทะ บริเวณพื้นที่ จังหวัดสมุทรสงคราม

Density and Population Structure of Small Mammals in Order Rodentia in Samut Songkhram Province, Thailand

สมเกียรติ กล้าแข็ง[1,2] เกรียงศักดิ์ หามะฤทธิ์[2] รองลาภ สุขมาสรวง[1] และ ประทีป ด้วงแค[1*]

Somkiat klakhaeng[1,2], Greangsak Hamarit[2], Ronglarp Sukmasuang[1] and Prateep Duengkae[1*]

บทคัดย่อ

การศึกษาความหนาแน่นและโครงสร้างประชากรของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมขนาดเล็ก อันดับสัตว์ฟันแทะ บริเวณพื้นที่สวนไม้ผล จังหวัดสมุทรสงคราม ด้วยวิธีการวางกรงดัก ระยะเวลา 10 เดือน จำนวนทั้งสิ้น 3,920 trap nights ความสำเร็จในการดักสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมขนาดเล็ก เท่ากับ 6.91% จับสัตว์ได้ทั้งหมด 271 ครั้ง โดยเป็นสัตว์ที่ถูกทำเครื่องหมาย จำนวน 175 ตัว และสามารถจับซ้ำได้ทั้งหมด 97 ครั้ง (36.00%) จำแนกสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมขนาดเล็กที่จับออกได้เป็น 2 วงศ์ 2 สกุล 3 ชนิด ได้แก่ หนูท้องขาวบ้าน (*Rattus rattus*) กระรอกท้องแดง (*Callosciurus erythraeus*) และกระรอกปลายหางดำ (*Callosciurus caniceps*) โดยมีความสำเร็จในการดักเท่ากับ 5.59% , 0.92% และ 0.41% ตามลำดับ มีความหนาแน่น เท่ากับ 33.38, 4.32 และ 1.56 ตัวต่อเฮกตาร์ ตามลำดับ อัตราส่วนระหว่างเพศผู้ต่อเพศเมีย พบว่า หนูท้องขาว กระรอกท้องแดงและกระรอกปลายหางดำ มีค่าเท่ากับ 1: 0.76, 1: 0.60 และ 1: 0.02 ตัว ตามลำดับ การศึกษาในครั้งนี้เป็นรายงานแรกด้านประชากรของสัตว์กลุ่มนี้ในพื้นที่ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการจัดการควบคุมประชากรสัตว์ฟันแทะที่ก่อความเสียหายต่อการเกษตรในพื้นที่ได้อย่างเหมาะสมและถูกต้องตามหลักวิชาการต่อไป

ABSTRACT

The study on Density and Population Structure of Small Mammals in Order Rodentia in Orchard Samut Songkhram Province, with a live traps. A total of 3,920 trap nights for 10 months was show the traps success of the small mammal equally 6.91%. A total individuals of 271 representing 3 species (belong to 2 families and 2 genera) were capture. The one hundred seventy five individuals were marked in 97 times (36.00%) recaptured totally. The traps success of Roof rat *(Rattus rattus)* Pallas's Squirrel (*Callosciurus erythraeus*) and Grey-bellied Squirrel (*Callosciurus caniceps*) were 5.59, 0.92 and 0.41 percent respectively. The population abundance were 33.38, 4.32 and 1.56 individuals/ha. A comparison of sex ratios were 1: 0.76, 1: 0.60 and 1: 0.02 individuals respectively. This study is the first report on the population of this species in the area, so it is applied in the management of rodents that damage for agriculture. To be appropriate and accurate according to academic principles.

Keywords: Rodentia, small mammals, density, population

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

[1]ภาควิชาชีววิทยาป่าไม้ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Forestry, Faculty of Forestry, Kasetsart University, Bangkok 10900

[2]สำนักวิจัยพัฒนาการอารักขาพืช กรมวิชาการเกษตร กรุงเทพฯ 10900

[2]Plant Protection Research and Development Office. Department of Agriculture Bangkok 10900

คำนำ

สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมขนาดเล็ก อันดับสัตว์ฟันแทะ (Rodentia) เป็นสัตว์ป่ากลุ่มหนึ่งที่สามารถพบเห็นได้ทั่วไป ซึ่งมีบทบาทสำคัญในระบบนิเวศ โดยทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการถ่ายทอดพลังงานด้วยการเป็นอาหารของสัตว์ผู้ล่าในห่วงโซ่อาหาร เช่น งู นกแสก นกเค้าแมว ชะมดและอีเห็น เป็นต้น (เกรียงศักดิ์, 2540) ในอีกมุมมองหนึ่ง สัตว์เหล่านี้ยังเป็นสัตว์ที่ทำให้เกิดความเสียหายแก่ผลผลิตทางการเกษตร และเป็นพาหะนำโรคที่สำคัญมาสู่คน ซึ่งส่งผลกระทบด้านสุขภาพและเศรษฐกิจ การทำความเข้าใจเกี่ยวกับชนิด และประชากรของสัตว์ฟันแทะจึงมีความสำคัญต่อการควบคุมประชากร เพื่อป้องกันและการแก้ไขปัญหาในอนาคต และเนื่องจากผลของการขยายตัวทางเศรษฐกิจ ทำให้มีความต้องการเพิ่มพื้นที่อาศัยและพื้นที่เพาะปลูกพืชมากขึ้น ส่งผลให้เกิดปัญหาการบุกรุกพื้นที่ป่า ซึ่งการเข้าไปทำลายแหล่งพื้นที่อยู่อาศัยของสัตว์เพื่อทำการเกษตรนั้น ทำให้ระบบนิเวศเสียสภาพสมดุลไป ทำให้ประชากรของสัตว์บางชนิด เช่น กลุ่มสัตว์ฟันแทะบางชนิดอพยพ เคลื่อนย้ายไปหาแหล่งหากินและแหล่งอาศัยแห่งใหม่ เกิดการเปลี่ยนแปลงด้านจำนวนและชนิดของประชากร เป็นต้น ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงประชากร อาจจะเกิดมาจากการเกิด การตาย การอพยพ อาหาร สภาพแวดล้อม การถูกล่า ระบบนิเวศที่เปลี่ยนไป ตลอดจนการเปลี่ยนแปลงของสภาพพื้นที่ที่ใช้ในการเพาะปลูกพืช (Aplin *et al*., 2003) การเปลี่ยนแปลงของจำนวนประชากรของสัตว์ มักก่อให้เกิดปัญหามากมาย ส่งผลต่อการเข้าบุกรุกทำลายพื้นที่การเกษตร ทำให้ได้รับความเสียหาย เกษตรกรต้องเสียค่าใช้จ่ายในการป้องกันและกำจัด เพื่อให้เกิดความเสียหายแก่ผลผลิตทางการเกษตรน้อยที่สุด ดังนั้น ข้อมูลเกี่ยวกับประชากรและการเปลี่ยนแปลงประชากรจึงมีความสำคัญ วิธีหนึ่งที่สามารถใช้ประเมินขนาดประชากรได้นั้น คือการประเมินขนาดประชากรด้วยข้อมูลที่ได้จากการวิจัย เช่น การจับสัตว์ทำเครื่องหมายระบุตัวตน ปล่อยและจับซ้ำ (Capture-Marked-recapture method: CMR) เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาจำนวนประชากร (นริศ, 2543) การหาโครงสร้างประชากร โดยการใช้ชั้นอายุ (age class) เป็นตัวกำหนดกลุ่มของประชากร หรืออาจใช้ช่วงอายุแบ่งกลุ่มประชากรอย่างกว้างๆ การหาอัตราส่วนระหว่างเพศ (sex ratios) อันเป็นสิ่งสำคัญในการศึกษาประชากร เพราะเป็นข้อมูลในการคำนวณหาอัตราการเปลี่ยนแปลงของประชากร (Delany,1974; Downing, 1980) เป็นต้น

จังหวัดสมุทรสงคราม จัดเป็นพื้นที่เกษตรกรรม ที่มักพบกับปัญหาเรื่องของผลผลิตที่ถูกทำลายอันเนื่องมาจากสัตว์ฟันแทะ ก่อความเสียหายต่อการเกษตรของชาวสวนผลไม้ที่มีการปลูกไม้ผลแบบสวนผสมผสาน ทำให้ผลผลิตลดลงและได้รับความเสียหาย (องค์การบริหารส่วนตำบลบางสะแก, 2561) โดยมีพืชเศรษฐกิจหลัก คือ มะพร้าว ส้มโอ ลิ้นจี่ (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2558) ทางเกษตรกรเองพยายามหาทางแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น แต่ยังไม่สามารถแก้ไขปัญหาได้เนื่องจากประเทศไทยยังมีงานวิจัยและข้อมูลพื้นฐานที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้แก้ปัญหาที่เกิดขึ้นจากสัตว์ฟันแทะค่อนข้างน้อย ในสภาพสวนไม้ผลที่มีลักษณะระบบนิเวศที่หลากหลาย กอปรกับข้อมูลงานศึกษาวิจัยไม่เพียงพอที่จะดำเนินการจัดการที่ถูกต้องเป็นไปตามหลักวิชาการ ปัญหาที่เกิดขึ้นดังกล่าวมีแนวโน้มที่จะรุนแรงขึ้น

ด้วยเหตุนี้ ผู้ศึกษาวิจัยจึงมีความสนใจในการศึกษา โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ ทราบชนิด ความหนาแน่นและโครงสร้างประชากรของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมขนาดเล็ก ในอันดับสัตว์ฟันแทะ เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานซึ่งจะนำมาประยุกต์ใช้ในการจัดการ โดยเฉพาะในด้านการจัดการประชากรของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมขนาดเล็ก ในอันดับสัตว์ฟันแทะ ตลอดจนแนวทางวางแผนการอนุรักษ์ในพื้นที่อย่างถูกต้องยั่งยืนและเหมาะสมต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

การสำรวจและเก็บข้อมูลภาคสนาม

เลือกพื้นที่ศึกษาโดยเป็นสวนไม้ผลที่มีการปลูกพืชแบบผสมผสาน บริเวณจังหวัดสมุทรสงคราม (พิกัด 47P 0598056 E 1488100 N) เก็บข้อมูลของสัตว์โดยวางกรงดัก (live trap) ขนาด 15 x 15 x 30 เซนติเมตร ด้วยวิธี grid method โดยประยุกต์ ตาม Barnett and Dutton (1995) และ Martin *et al*. (2001) กำหนดพื้นที่สำรวจโดยในพื้นที่กริดขนาด 7 x 7 แต่ละจุดวางกรงดักเว้นระยะห่าง 20 เมตร (Figure 1) นำกรงดักไปวางไว้ใต้ต้นไม้และบนต้นไม้หรือกิ่งไม้สูงจากพื้นดินประมาณ 2-3 เมตร อย่างละกรง จำนวน 98 กรง (Figure 2) ใช้เวลาในการวางกับดัก 4 คืน (trap night) ก่อนทำการดักจับจะเปิดกรงไว้ก่อนประมาณ 1 อาทิตย์ เพื่อให้สร้างความคุ้นเคยก่อนทำการดักจับจริง มีการตรวจกรงดักทุกวัน วันละ 2 ครั้ง ในช่วงเวลา 07.00 น. และ 15.00 น. โดยใช้กล้วยน้ำว้าสุกเป็นเหยื่อล่อ ทำการวางกรงดักจับทุกเดือน สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมที่ถูกจับได้จะถูกวัดขนาด ชั่งน้ำหนัก บันทึกข้อมูล จำแนกชนิดและเพศ ตามคู่มือการจำแนกสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมของ Lekagul and McNeelley (1977) และ Francis (2008) และทำเครื่องหมายระบุตัวตน ประยุกต์ตามวิธีการของ Dahlborn *et al*. (2013) และ Chen *et al*. (2016) ก่อนการปล่อย ในการดักจับครั้งต่อไป เมื่อสัตว์ฟันแทะที่ถูกทำเครื่องหมายถูกจับได้จะทำการวัดขนาดและชั่งน้ำหนัก และบันทึกข้อมูลก่อนการปล่อย ในขณะที่สัตว์ที่ไม่ได้ถูกทำเครื่องหมายจะถูกทำเครื่องหมายหลังการวัดและบันทึกขนาดก่อนการปล่อย การปล่อยสัตว์จะทำการปล่อยในพื้นที่เดิมที่สัตว์แต่ละตัวถูกจับได้

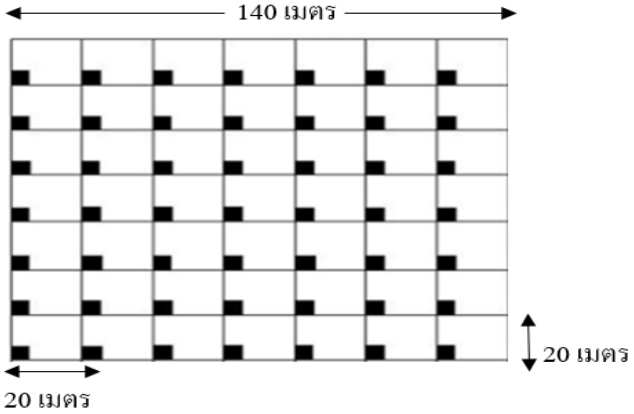


Figure 1 Place a trap cage in each grid.



Figure 2 Traps attached to trees height with about 2-3 meter of the ground.

การวิเคราะห์ข้อมูล

ศึกษาขนาดโครงสร้างประชากรของสัตว์อันดับสัตว์ฟันแทะ โดยใช้โปรแกรม CAPTURE เพื่อหาขนาดของประชากรในพื้นที่และหาค่าความหนาแน่นของประชากรในพื้นที่ (population density) โดยใช้สูตรคำนวณของ Karanth and Nichols (1998) ดังสมการที่ 1

$$D = N / A \qquad \text{สมการที่ 1}$$

เมื่อ D = ความหนาแน่น

N = ขนาดประชากรที่จับได้ หรือขนาดประชากรที่ได้จากการประเมิน

A = ขนาดพื้นที่ทั้งหมดที่พบสัตว์

การประเมินประชากร จากการคำนวณหาความสำเร็จในการดักจับ (trap success) ดังสมการที่ 2

$$\text{traps success} = \frac{\text{จำนวนตัวสัตว์ที่ดักจับได้ในพื้นที่นั้น} \times 100}{\text{จำนวนกรงดักที่ใช้ x จำนวนคืนที่วางกรงดัก}} \qquad \text{สมการที่ 2}$$

ผลและวิจารณ์

การศึกษาความหนาแน่นและโครงสร้างประชากรของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมขนาดเล็ก อันดับสัตว์ฟันแทะ บริเวณพื้นที่สวนผลไม้ที่มีการปลูกพืชแบบผสมผสาน จังหวัดสมุทรสงคราม ด้วยวิธีการวางกรงดัก ระยะเวลา 10 เดือน จำนวนทั้งสิ้น 3,920 trap nights ความสำเร็จในการดักจับสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมขนาดเล็ก เท่ากับ 6.91 % และสามารถจับสัตว์ได้ทั้งหมด 271 ครั้ง โดยเป็นสัตว์ที่ถูกทำเครื่องหมาย จำนวน 175 ตัว และสามารถจับซ้ำได้ทั้งหมด 97 ครั้ง (36%) โดยสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมขนาดเล็กที่จับได้จำแนกเป็น 2 วงศ์ 2 สกุล 3 ชนิด ได้แก่ หนูท้องขาวบ้าน กระรอกท้องแดง และกระรอกปลายหางดำ

จากการศึกษาครั้งนี้ ความสำเร็จในการดัก พบว่า หนูท้องขาวบ้าน (*Rattus rattus*; *Rr*) กระรอกท้องแดง (*Callosciurus erythraeus*; *Ce*) และกระรอกปลายหางดำ (*Callosciurus caniceps; Cc*) เท่ากับ 5.59% , 0.92% และ 0.41% ตามลำดับ โดยพบว่าการวางกรงดักนั้นเปิดโอกาสให้สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมขนาดเล็กที่มีนิเวศวิทยาถิ่นอาศัยและมีพฤติกรรมหากินบริเวณพื้นดิน (terrestrial small mammal) ติดกรงมากกว่าสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมขนาดเล็ก ที่มีนิเวศวิทยาถิ่นอาศัยและมีพฤติกรรมหากินบนเรือนยอด (arboreal small mammal) (Table 1) อันเนื่องมาจากสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมขนาดเล็กที่มีนิเวศวิทยาถิ่นอาศัยและหากินบริเวณพื้นดินสามารถใช้ประโยชน์จากทรัพยากรต่างๆ ที่อยู่บริเวณพื้นดินได้ดีกว่าสัตว์ที่มีนิเวศวิทยาถิ่นอาศัยและมีพฤติกรรมหากินบนเรือนยอด (Wells *et al*., 2004; Lekagul and McNeely, 1988)

Table 1 The capture small mammal species were classified habitat types (arboreal and terrestrial)

Common name	Scientific name	Captures (N)		Total (N)
		Arboreal	Terrestrial	
Roof rat	*Rattus rattus*	49	170	219
Pallas's squirrel	*Callosciurus erythraeus*	36	0	36
Grey-bellied squirrel	*Callosciurus caniceps*	16	0	16
Total (N)		**101**	**170**	**271**

เมื่อนำข้อมูลในแต่ละเดือนของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมขนาดเล็กที่ได้มาสร้างกราฟ จะเห็นได้ว่าจำนวนตัวของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมขนาดเล็ก จะมีจำนวนมากในช่วงเริ่มแรกของการทดลองและมีจำนวนลดลงตามลำดับช่วงเวลาที่ผ่านไป (Figure 3) สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมขนาดเล็กมีความสามารถในการเคลื่อนย้ายได้อย่างอิสระ ซึ่งทำให้ประชากรของสัตว์ในกลุ่มนี้เกิดเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ รวมทั้งปัจจัยด้านการอพยพเคลื่อนย้ายถิ่นที่อยู่อาศัยปริมาณจำกัดในเรื่องของสภาพภูมิอากาศและปัจจัยด้านอาหาร การถูกล่าของสัตว์ผู้ล่าและการที่ถูกรบกวนจากการทำกิจกรรมของมนุษย์ สิ่งเหล่านี้ล้วนมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของจำนวนประชากรแทบทั้งสิ้น (Beck *et al*., 2004) อย่างไรก็ตาม อาจเนื่องมาจากพฤติกรรมการเข็ดขยาดต่อกรงดัก (trap-shyness) ของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมขนาดเล็กในกลุ่มนี้ ซึ่งเป็นพฤติกรรมการหลีกเลี่ยงกับดัก ซึ่งเกิดจากการเรียนรู้ว่ากับดักเป็นสิ่งอันตรายต่อการอยู่รอดและดำรงชีวิตเมื่อถูกจับในครั้งก่อนหน้า ซึ่งสอดคล้องกับ Natalie and Andrew (2011) ที่ได้ศึกษาการเข็ดขยาดของกรงดักในหนูชนิด *Dipodomys heermanni arenae* และ O' Farrell *et al*., (1994) ศึกษาเปรียบเทียบระหว่างกับดักเชอร์แมน (Sherman) และกับดักตาข่าย พบความแตกต่าง โดยหนูจะถูกจับด้วยกับดักตาข่ายสูงกว่ากรงดักอย่างมีนัยสำคัญ อีกทั้งปัจจัยหนึ่งที่อาจจะส่งผลให้เกิดความผันแปรจำนวนสัตว์ในแต่ละเดือน คือปัจจัยทางด้านพืชอาหารและสภาพภูมิอากาศมีผลต่อผลผลิตพืชอาหารในพื้นที่ จะเห็นได้ว่าในเดือนมีนาคมถึงเดือนพฤษภาคมที่อยู่ในช่วงฤดูแล้ง พืชอาหารที่ให้ผลผลิตในช่วงนั้นได้แก่ลิ้นจี่พันธุ์ค่อม (*Litchi chinensis* Sonn.) และเก็บเกี่ยวผลผลิตในช่วงนั้น จึงมีความเป็นไปได้ว่าสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมขนาดเล็กเลือกที่กินผลผลิตที่มีอยู่ในพื้นที่มากกว่าเหยื่อที่ใช้ในการดักจับ จึงอาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้อัตราการดักจับสัตว์กลุ่มกระรอกที่อาศัยและหากินบนเรือนยอด (arboreal small mammal) ติดกับดักได้น้อย เนื่องจากสัตว์กลุ่มนี้ใช้ประโยชน์จากทรัพยากรในช่วงเวลานั้นได้ดี (Forget *et al*., 2002) ซึ่งต่างจากสัตว์กลุ่มหนูที่สามารถเข้าถึงทรัพยากรได้ทั้งพื้นดินและเรือนยอดทำให้ติดกับดักได้มากกว่านั่นเอง

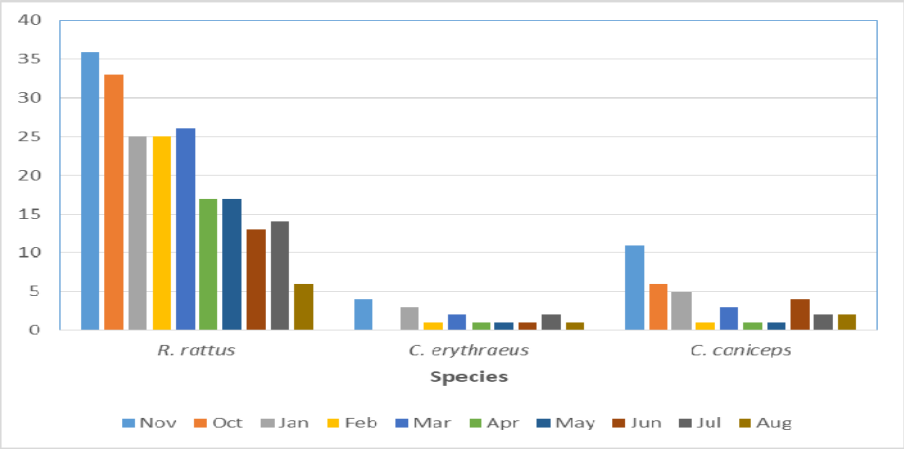


Figure 3 Number of captured small mammals of all species were decreased in monthly survey.

เมื่อนำข้อมูลที่ได้มาทำประวัติการจับ (Capture history) พบว่า หนูท้องขาวบ้าน (*R. rattus*) เป็นชนิดที่ถูกจับได้มากที่สุด เมื่อนำมาคำนวณด้วยโปรแกรม CAPTURE เพื่อประเมินขนาดของประชากรโดยเฉลี่ย (Mean ± SE) โดยการใช้แบบจำลอง $M_{(bh)}$ ประเมินจำนวนประชากร ($\hat{N}$) ของหนูท้องขาวบ้าน มีขนาดของประชากรที่ได้

จากการประเมิน 65 ± 0.43 ตัว ส่วนกระรอกท้องแดง (*C. erythraeus*) ใช้แบบจำลอง $M_{(h)}$ ประเมินจำนวนประชากร ได้เท่ากับ 8 ± 0.46 ตัว และกระรอกปลายหางดำ (*C. caniceps*) ใช้แบบจำลอง $M_{(h)}$ ประเมินจำนวนประชากร ได้เท่ากับ 3 ± 0.06 ตัว เมื่อนำข้อมูลมาคำนวณหาความหนาแน่นของประชากรในพื้นที่ พบว่า ขนาดความหนาแน่นของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมในพื้นที่ตามสูตรของ Karanth and Nichols (1998) พบว่า หนูท้องขาว กระรอกท้องแดง และกระรอกปลายหางดำ มีความหนาแน่น เท่ากับ 33.38, 4.32 และ 1.56 ตัวต่อเฮกตาร์ ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาขนาดของประชากรในพื้นที่ศึกษา พบว่าหนูท้องขาว เป็นชนิดที่มีขนาดประชากรที่มากกว่าสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมขนาดเล็กชนิดอื่น อันเนื่องมาจากหนูท้องขาวมีอัตราการการเกิดที่สูงกว่าสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมชนิดอื่น กล่าวคือ มีการตั้งท้องและออกลูกครั้งละ 2-13 ตัว ใช้เวลาในการตั้งท้องนาน 17 -21 วัน และสามารถผสมพันธุ์ได้ภายใน 24 ชั่วโมงหลังการออกลูก (กองกีฏและสัตววิทยา, 2544) และปัจจัยด้านความหลากหลายด้านอาหาร ในพื้นที่ศึกษามีการปลูกพืชผสมผสานและมีพืชหลักคือ มะพร้าว ส้มโอ ลิ้นจี่ และกล้วย มีทรัพยากรอาหารหมุนเวียนตลอดทั้งปี นั่นจึงเป็นสาเหตุที่ทำให้ประชากรเพิ่มอย่างรวดเร็ว

เมื่อนำผลจากการศึกษามาเปรียบเทียบสัดส่วนจำนวนตัวระหว่างเพศของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมขนาดเล็กทั้งหมด 3 ชนิด พบว่า หนูท้องขาว กระรอกท้องแดง และกระรอกปลายหางดำ มีอัตราส่วนเพศผู้ต่อเพศเมียตัวเต็มวัยในสัดส่วน 1: 0.76,1: 0.60 และ 1: 0.02 ตัว ตามลำดับ จากผลการศึกษาที่ได้ เมื่อเปรียบเทียบสัดส่วนเพศของหนูท้องขาว พบว่ามีความแตกต่างจาก เกรียงศักดิ์ (2540) ที่รายงานว่า หนูท้องขาวในบริเวณพื้นที่ป่าไม้และในพื้นที่เกษตรกรรมริมชายฝั่งแม่น้ำโขง อำเภอสังคม จังหวัดหนองคาย มีสัดส่วนเพศผู้ต่อเพศเมียในตัวเต็มวัยเป็น 1: 0.5 ตัว การที่สัดส่วนเพศผู้มากกว่าเพศเมีย อาจจะเนื่องจากเพศผู้มีอาณาเขตการหากินที่กว้างกว่า ทำให้โอกาสในการดักจับเพศผู้มีมากกว่าเพศเมีย และในเพศเมียอาจจะมีการตั้งท้องหรือเลี้ยงลูกอ่อนอยู่ในบริเวณพื้นที่รัง ทำให้โอกาสในการดักจับเพศเมียได้น้อยกว่าเพศผู้ (Barnett and Dutton, 1995; Hanssan, 1975; Shenkut *et al*., 2006) ในกระรอกปลายหางดำ พบว่ามีความแตกต่างกับรายงานของ ยุวลักษณ์ (2558) ที่ได้ศึกษา ความหลากชนิดและความมากมายของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมขนาดเล็กในป่าเบญจพรรณ เขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าสลักพระ จังหวัดกาญจนบุรี ที่พบสัดส่วนเพศผู้ต่อเพศเมียในตัวเต็มวัยเท่ากับ 1: 2.2 ตัว อาจเกิดจากการที่กระรอกปลายหางดำนั้น เพศผู้มักจะมีขนาดพื้นที่อาศัยและหากินมากกว่าเพศเมีย นั่นจึงอาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้มีโอกาสในการติดกรงดักได้มากกว่าเพศเมีย (Saiful *et al*., 2001)

สรุป

การศึกษาความหนาแน่นและโครงสร้างประชากรของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมขนาดเล็ก อันดับสัตว์ฟันแทะ บริเวณพื้นที่สวนไม้ผลที่มีการปลูกพืชแบบผสมผสาน จังหวัดสมุทรสงคราม ด้วยวิธีการวางกรงดัก ระยะเวลา 10 เดือน จำนวนทั้งสิ้น 3,920 trap nights ความสำเร็จในการดักจับสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมขนาดเล็ก เท่ากับ 6.91 % และสามารถจับสัตว์ได้ทั้งหมด 271 ครั้ง โดยเป็นสัตว์ที่ถูกทำเครื่องหมาย จำนวน 175 ตัว และสามารถจับซ้ำได้ทั้งหมด 97 ครั้ง (36.00 %) โดยสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมขนาดเล็กที่จับได้จำแนกเป็น 2 วงศ์ 2 สกุล 3 ชนิด ได้แก่ หนูท้องขาวบ้าน กระรอกท้องแดง และกระรอกปลายหางดำความสำเร็จในการวางกรงดัก พบว่า หนูท้องขาวบ้าน กระรอกท้องแดง และกระรอกปลายหางดำ เท่ากับ 5.59, 0.92 และ 0.41 % ตามลำดับ และความหนาแน่นของ

สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมพบว่า หนูท้องขาว กระรอกท้องแดง และกระรอกปลายหางดำ มีความหนาแน่น เท่ากับ 33.38, 4.32 และ 1.56 ตัวต่อเฮกตาร์ ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบสัดส่วนจำนวนตัวระหว่างเพศของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมขนาดเล็กทั้งหมด 3 ชนิด พบว่า หนูท้องขาว กระรอกท้องแดงและกระรอกปลายหางดำ มีอัตราส่วนเพศผู้ต่อเพศเมียตัวเต็มวัยในสัดส่วน 1: 0.76, 1: 0.60 และ 1: 0.02 ตัว ตามลำดับ

จากการศึกษาครั้งนี้ การใช้กรงดักเป็นวิธีการหนึ่งที่เหมาะสมในการสำรวจชนิดและประชากรของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมขนาดเล็ก แต่ก็ยังมีข้อจำกัดในเรื่องของการเข็ดขยาดต่อกรงดัก (trap-shyness) ดังนั้น จึงควรใช้วิธีการเก็บข้อมูลในรูปแบบอื่นเสริมเพิ่มเติมและเป็นวิธีการที่ไม่เป็นการรบกวนกิจกรรมของสัตว์มากจนเกินไป เช่น การทำเส้นทางสำรวจ (Line Transect Sampling) ตลอดจนการติดกล้องดักถ่ายภาพ (Camera trap) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้มากขึ้น เป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คุณโชติ ชูแสง ผู้ช่วยผู้ใหญ่บ้าน ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์แปลงในการศึกษาครั้งนี้ และขอขอบคุณ คุณเกรียงศักดิ์ หามะฤทธิ์ นักสัตววิทยาปฏิบัติการ กลุ่มงานสัตววิทยาการเกษตร กรมวิชาการเกษตร ที่ได้ให้คำแนะนำและการเก็บข้อมูลและคุณอภิญญา สายสมร ที่ได้ให้คำแนะนำในการใช้โปรแกรมวิเคราะห์ข้อมูล

เอกสารอ้างอิง

กองกีฏและสัตววิทยา กรมวิชาการเกษตร. 2544. **หนูและการป้องกันกำจัด**. กองกีฏและสัตววิทยา กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

เกรียงศักดิ์ หามะฤทธิ์. 2530. **ความหลากชนิดและนิเวศวิทยาของหนูในพื้นที่ป่าไม้และพื้นที่เกษตรกรรมริมชายฝั่งแม่น้ำโขง อำเภอสังคม จังหวัดหนองคาย**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นริศ ภูมิภาคพันธ์. 2543. **นิเวศวิทยาและการจัดการสัตว์ป่า** Wildlife Ecology and Management. ภาควิชาชีววิทยาป่าไม้ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ยุวลักษณ์ ชนะชัย. 2558. **ความหลากชนิดและความมากมายของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมขนาดเล็กในป่าเบญจพรรณ เขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าสลักพระ จังหวัดกาญจนบุรี**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2558. **สถิติการเกษตรของประเทศไทย ปี 2558**. สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

องค์การบริหารส่วนตำบลบางสะแก. 2561. โครงการกำจัดกระรอก ปี 2561. น. 22-23 *ใน* **แผนพัฒนาการเกษตรระดับตำบล อำเภอบางคนที จังหวัดสมุทรสงคราม พ.ศ.2561-2564**. สำนักงานเกษตรจังหวัดสมุทรสงคราม กรมส่งเสริมการเกษตร.

Aplin, K. P., P. R. Brown, J. Jacob, C. J. Krebs and G. R. Singleton. 2003. **Field Methods for Rodent Studies in Asia and the Indo-Pacific**. ACIAR Monograph. Canberra.

Barnett, A. and J. Dutton. 1995. **Expedition Field Techniques Small Mammals (excluding bats) 2nd ed**. Kensington Gore, London.

Beck, H., M. S. Gaines, J. E. Hines and J. D. Nichols. 2004. Comparative dynamics of small mammal populations in treefall gaps and surrounding understory within Amazonian rainforest. **Oikos** 106: 27 – 38.

Chen, M., L. Kan, Benjamin, T. Ledford and J. Q. He. 2016. Tattooing Various Combinations of Ears, Tail, and Toes to Identify Mice Reliably and Permanently. **Journal of the American Association for Laboratory Animal Science** 55 (2): 189 – 198.

Dahlborn K, P. Bugnon, T Nevalainen, M. Raspa, P. Verbost and E. Spangenberg. 2013. Report of the Federation of European Laboratory Animal Science Associations Working Group on animal identification. **Laboratory Animals** 47: 2 – 11.

Delany, M. J. 1974. **The Ecology of Small Mammals. 1st ed.** Edward Arnold (Publishers) Limited, London.

Downing, R. L. 1980. Vital Statistics of Animal population, pp. 247 - 267. *In* S. D. Shemnitz, ed. **Wildlife Management Techniques Mammal. 4th ed.** The Wildlife Society, Washington. D. C.

Forget, P. M., D. S. Hammond, T. Milleron, and R. Thomas. 2002. Seasonality of fruiting and food hoarding by rodents in Neotropical forest: Consequences for seed dispersal and seedling recruitment, pp. 241 – 256. *In* D.J. Levey, W.R. Silva, and M. Galetti, eds. **Seed Dispersal and Frugivory: Ecology, Evolution and Conservation**. CABI Publishing. UK.

Francis, C.M. 2008. **A field guide to the Mammal of Thailand and South - East Asia**. Asia Books Co., Ltd., Bangkok

Hansson, L. 1975. Comparison between small mammal sampling with small and large removal quadrats. **Oikos** 26: 398 - 404.

Karanth, K.U., and J. D. Nichols. 1998. Estimation of Tiger Densities in India Using Photographic Captures and Recapture. **Ecology** 79: 2852 - 2862.

Lekagul, B., and A. M. Jeffery. 1977. **Mammal of Thailand**. Kurusapha Ladprao, Bangkok.

Martin, R. E., R. H. Pine and A. F. DeBlase. 2001. **A Manual of Mammalogy with Key to the Family of the World, 3rd ed.** McGrawHill Companies, New York.

Natalie, E. F., and R. R. Andrew. 2001. **Trap Shyness and Avoidance Affects on Capture Proportions of *Dipodomys heermanni arenae***. A Senior Project presented to the Faculty of the Biological Sciences Department California Polytechnic State University, San Luis Obispo.

O' Farrell, M. J., W. A. Clark, F. H. Emmerson, S. M. Juarez, F. R. Kay, T. M. O'Farrell, and T. Y. Goodlet. 1994. Use of a mesh live trap for small mammals: Are results from Sherman live traps deceptive. **Journal of Mammalogy** 75 (3): 692 – 699.

Saiful, A. A., A. H. Idris, Y. N. Rashid, N. Tamura and F. Hayashi. 2001. Home range size of Sympatric squirrel species inhabiting a lowland dipterocarp forest in Malaysia. **Biotropica** 33 (2): 346 – 351.

Shenkut, M., A. Mebrate and M. Balakrishnan. 2006. Distribution and Abundance of Rodents in the armlands: a case study in Alelltu Woreda, Ethiopia. **Ethiopia Journal Science** 29: 63-70.

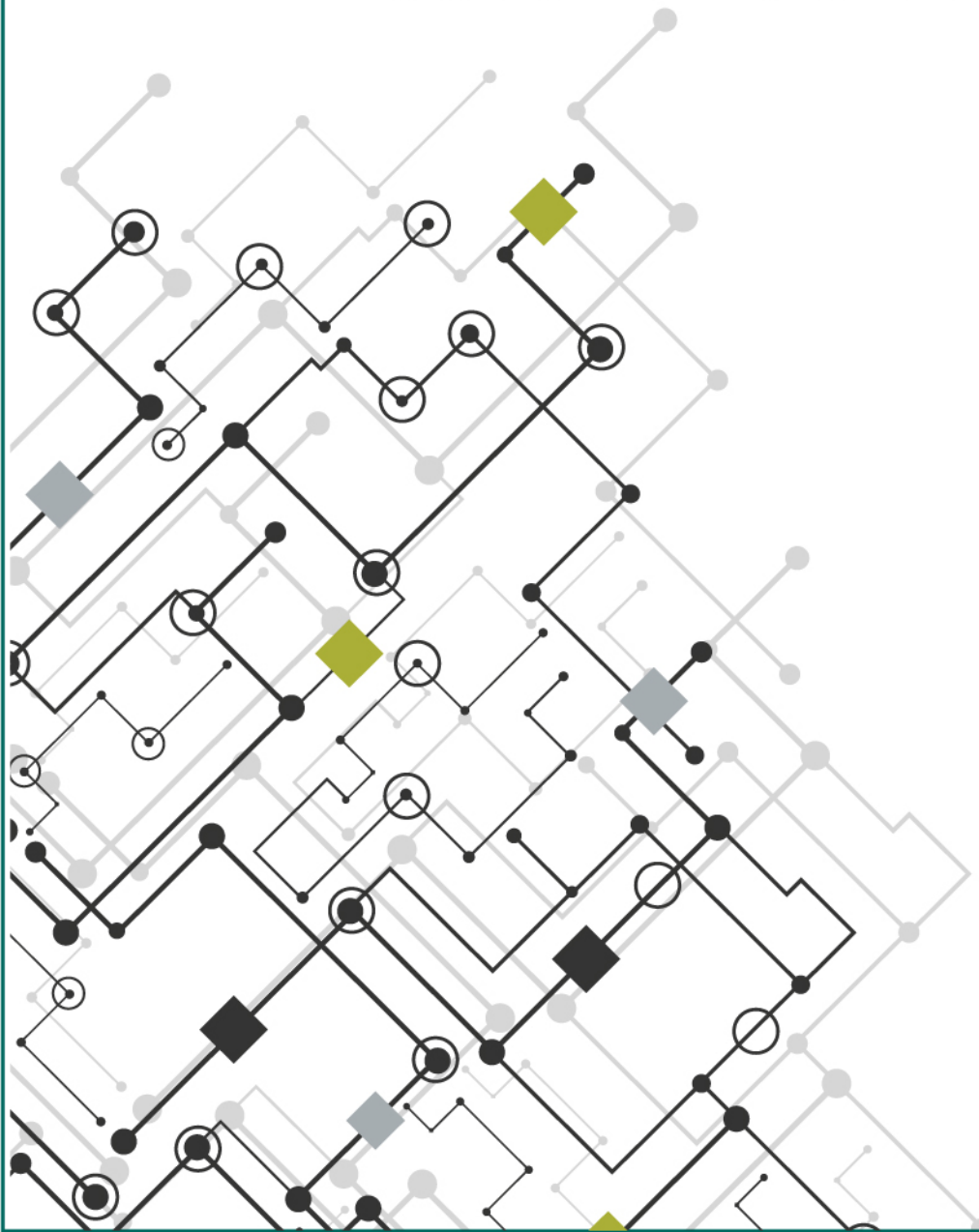
Wells, K., M. B. Lakim, M. Pfffer and K. E. Linsenmair. 2004. Use of arboreal and terrestrial space by a small mammal community in tropical rain forest in Borneo, Malaysia. **Journal of Biogeography** 31: 641 – 652.

สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

Subject: Natural Resources and Environment

ภาคโปสเตอร์

Poster Presentation



KU
KASETSART
UNIVERSITY

การใช้ประโยชน์พันธุ์ไม้ป่าชายเลน หมู่บ้านป่ายาง ตำบลกะไหล อำเภอตะกั่วทุ่ง จังหวัดพังงา

Utilization of Mangrove Tree Species in Pa Yang Village, Kalai Sub-district, Takua Thung District, Phang Nga Province

นิติญา สังขนันท์[1*] ธิดารัตน์ คำล้อม[1] และ กาญจนา วรรณจิตร์[1]

Nitiya Sangkhanan[1*] Tidarat Kumlom[1] and Kanjana Wannachit[1]

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการใช้ประโยชน์พันธุ์ไม้จากป่าชายเลน และกฎ ระเบียบ ในการใช้ประโยชน์ รวมทั้งปัญหา อุปสรรคของประชาชนเกี่ยวกับการใช้ประโยชน์พันธุ์ไม้จากป่าชายเลน หมู่บ้านป่ายาง ตำบลกะไหล อำเภอตะกั่วทุ่ง จังหวัดพังงา โดยศึกษาประชากรทุกครัวเรือนที่อาศัยอยู่ในหมู่บ้าน จำนวน 180 ครัวเรือน เก็บรวมรวบข้อมูลโดยใช้แบบสอบถาม สถิติที่ใช้ในการรวบรวมข้อมูลคือ ค่าความถี่ ค่าร้อยละ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ผลการศึกษาพบว่า การใช้ประโยชน์พันธุ์ไม้จากป่าชายเลนในด้านการสร้างที่อยู่อาศัยที่พบมากที่สุด คือ โปรงแดง)*Ceriops tagal*(สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการสร้างที่อยู่อาศัยได้ครบทุกประเภท (เสาบ้าน เสาค้ำยัน จั่วบ้าน ไม้คาน สะพานทางเข้าบ้าน รั้วกั้นหน้าบ้าน (ใช้กั้นเด็กเล็ก)) การใช้ประโยชน์พันธุ์ไม้จากป่าชายเลนในการทำอุปกรณ์การประมงที่พบมากที่สุด คือ แสมดำ (*Avicennia officinalis*) นำมาใช้ในการทำไซดักปลา และคันเบ็ดตกปลา สำหรับกฎ ระเบียบ การใช้ประโยชน์พันธุ์ไม้จากป่าชายเลน พบว่าประชาชนในหมู่บ้านทั้ง 180 ครัวเรือน ได้ปฏิบัติตามเกณฑ์ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.00 ได้แก่ 1) บุคคลใดเข้าตัดไม้ป่าชายเลนโดยไม่ได้รับอนุญาตจากคณะกรรมการป่าชุมชนจะมีบทลงโทษปรับ 5,000 – 10,000 บาท และ 2) ห้ามคนต่างหมู่บ้านเข้ามาใช้ประโยชน์ทุกชนิดในป่าชุมชน ส่วนปัญหา อุปสรรค ประชาชนส่วนใหญ่ไม่ได้รับรู้ข่าวสาร คิดเป็นร้อยละ 36.11

ABSTRACT

This research aims to study the utilization of mangrove tree species, rules and regulations, including with problems and obstacles of the utilization. All data were collected from 180 households living in village by questionnaires. Statistics used for data analysis were frequency, percentage, mean, and standard deviation. The results showed that the maximum utilized mangrove tree species were *Ceriops tagal*, which could be used for shelter constructions (pillar, pole, gable, beam, bridge, and barrier (for baby), including with *Avicennia officinalis* for making fish traps and fishing rods. All 180 households living in village could follow utilizations' rules and regulations of mangrove tree species at mean value of 4.00, which were 1) Cutting mangrove tree species without permission from committee of community forest would be fined 50,000 – 10,000 Baht, 2) People living in other villages were not allowed to utilize the community forest. The major problem and obstacle of the villager was lacking of updated news and information at 36.11%.

Key Words: utilization, public participation, mangrove forests

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

[1]สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต 83000

[1]Environmental science Program, Faculty of Science and Technology, Phuket Rajabhat University 83000

คำนำ

ป่าชายเลน (mangrove forest) คือ กลุ่มสังคมพืชเขตร้อนหรือกึ่งเขตร้อนที่ขึ้นบริเวณชายฝั่งทะเล บริเวณปากแม่น้ำ เกาะต่างๆ มีน้ำทะเลท่วมถึง โดยวัดจากระดับน้ำทะเลที่ขึ้นสูงสุดและน้ำทะเลลดลงต่ำสุด ประกอบไปด้วยพันธุ์ไม้หลากหลายชนิดที่ทนทานต่อน้ำเค็มซึ่งมีโกงกางเป็นพันธุ์ไม้หลักและไม้อื่นๆ ขึ้นปะปนอีกหลายชนิด เช่น ตะบูน ลำพู แสมทะเล โปรง ถั่วขาว ตาตุ่มทะเล เป็นต้น ป่าชายเลนเป็นที่อยู่ของสิ่งมีชีวิตหลายชนิดทั้งพืชและสัตว์ ป่าชายเลนจึงเป็นแหล่งที่ให้ประโยชน์แก่มนุษย์ส่วนใหญ่ การพึ่งพิงทรัพยากรจากป่าชายเลน ไม่ว่าจะเป็นการใช้ไม้และการจับสัตว์น้ำในป่าชายเลน พืชป่าชายเลนบางชนิดยังถูกนำมาทำอาหารและเป็นส่วนประกอบของยารักษาโรคได้อีกด้วย (วีระ, 2552)

มนุษย์คือผู้ที่เข้าไปใช้ประโยชน์จากป่าชายเลนมากที่สุด รวมทั้งเป็นผู้ก่อให้เกิดผลกระทบต่อป่าชายเลนมากที่สุดเช่นกัน มนุษย์ใช้ประโยชน์ป่าชายเลนทั้งในแง่ของผลผลิตทางตรง เช่น การใช้เนื้อไม้ ได้แก่ การนำมาเผาถ่าน ทำไม้ค้ำยัน เสาเข็ม สะพาน ส่วนประกอบต่างๆ ของบ้านเรือน และการใช้เครื่องมือทำอุปกรณ์ประมง การใช้ประโยชน์ทางอ้อมคือ ใช้เป็นพื้นที่อนุบาลสัตว์น้ำชายฝั่ง ผลผลิตทางการประมง และเป็นฉากกำบังจากภัยธรรมชาติ (สรายุทธ และ รุ่งสุริยา, 2554)

ป่าชายเลนในเขตหมู่ที่ 10 บ้านป่ายาง ตำบลกะไหล อำเภอตะกั่วทุ่ง จังหวัดพังงา มีเนื้อที่ป่าชายเลนทั้งหมดประมาณ 400 ไร่ และเป็นส่วนหนึ่งของอุทยานแห่งชาติอ่าวพังงา พื้นที่ป่าชายเลนตำบลกะไหล มีหน่วยงานที่รับผิดชอบดูแลคือ สถานีพัฒนาทรัพยากรป่าชายเลนที่ 22 มีการแบ่งพื้นที่ป่าชายเลนในหมู่บ้านป่ายางออกเป็น 2 ประเภท คือ ป่าอนุรักษ์ ได้แก่ พื้นที่ที่ได้รับการคุ้มครองที่ถูกต้องตามกฎหมายจำนวน 300 ไร่ และป่าใช้สอย ได้แก่ ป่าชายเลนที่ชาวบ้านหรือชุมชนใช้ประโยชน์จำนวน 100 ไร่ มีครัวเรือนอาศัยอยู่ทั้งหมดจำนวน 180 ครัวเรือน โดยชุมชนมีการใช้ประโยชน์พันธุ์ไม้จากป่าชายเลนในพื้นที่ของป่าใช้สอย (100 ไร่) ในรูปแบบต่างๆ ได้แก่ การทำเสาเข็ม เสาค้ำยัน สะพาน และอุปกรณ์ประมง ซึ่งส่วนใหญ่นำมาสร้างเป็นที่อยู่อาศัยและอุปกรณ์ด้านการประมง ทั้งนี้ชาวบ้านมีกฎ ระเบียบการใช้ไม้ป่าชายเลน โดยมีการทำข้อตกลงกันภายในหมู่บ้าน เช่น ปริมาณไม้ที่ถูกตัดไปจากการใช้ประโยชน์ด้านต่างๆ นั้นจะต้องมีการปลูกทดแทนขึ้นใหม่ เพื่อชดเชยปริมาณไม้ที่หายไป (สุรศักดิ์ , สัมภาษณ์, 2560) ทำให้ผู้วิจัยสนใจที่จะศึกษารูปแบบการใช้ประโยชน์พันธุ์ไม้จากป่าชายเลนและกฎ ระเบียบ ในการนำไม้จากป่าชายเลนมาใช้ประโยชน์ รวมถึงศึกษาปัญหา อุปสรรค ของประชาชนในการใช้ประโยชน์จากป่าชายเลนของหมู่บ้านป่ายาง ตำบลกะไหล อำเภอตะกั่วทุ่ง จังหวัดพังงา เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ความเหมาะสมในด้านปริมาณ สัดส่วน ที่นำไม้จากป่าชายเลนมาใช้ประโยชน์และวิเคราะห์ผลที่อาจจะเกิดขึ้นกับระบบนิเวศป่าชายเลน หากมีการใช้ไม้ในป่าชายเลนที่ไม่เหมาะสมต้องมีแนวทางเพื่อการป้องกันและแก้ไขต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

การวิจัยนี้เป็นวิจัยเชิงสำรวจ (Survey Research) โดยใช้แบบสอบถามเป็นเครื่องมือในการเก็บข้อมูลกับประชาชนกลุ่มเป้าหมาย ซึ่งได้แก่ ครัวเรือนทั้งหมดที่อาศัยอยู่ในหมู่บ้านป่ายาง ตำบลกะไหล อำเภอตะกั่วทุ่ง จังหวัดพังงา 180 ครัวเรือน เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูล คือ แบบสอบถาม แบ่งออกเป็น 4 ตอน ได้แก่ ตอนที่ 1 ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม ตอนที่ 2 รูปแบบการใช้ประโยชน์พันธุ์ไม้จากป่าชายเลนของหมู่บ้านป่ายาง ตำบลกะไหล อำเภอตะกั่วทุ่ง จังหวัดพังงา ตอนที่ 3 กฎ ระเบียบ การใช้ประโยชน์พันธุ์ไม้จากป่า

ชายเลนของหมู่บ้านป่ายาง ตำบลกะไหล อำเภอตะกั่วทุ่ง จังหวัดพังงา และตอนที่ 4 ปัญหา อุปสรรคในการใช้ประโยชน์พันธุ์ไม้จากป่าชายเลนของหมู่บ้านป่ายาง ตำบลกะไหล อำเภอตะกั่วทุ่ง จังหวัดพังงา วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้สถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ค่าความถี่ (frequency) ร้อยละ (percentage) ค่าเฉลี่ย (mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation)

ผลและวิจารณ์

การศึกษาเรื่อง การใช้ประโยชน์พันธุ์ไม้ป่าชายเลน หมู่บ้านป่ายาง ตำบลกะไหล อำเภอตะกั่วทุ่ง จังหวัดพังงา สามารถแบ่งผลการศึกษาได้เป็น 3 ด้าน ดังนี้

1. ด้านรูปแบบการใช้ประโยชน์พันธุ์ไม้จากป่าชายเลนของหมู่บ้านป่ายาง ตำบลกะไหล อำเภอตะกั่วทุ่ง จังหวัดพังงา

1.1 การใช้ประโยชน์พันธุ์ไม้จากป่าชายเลนเพื่อการก่อสร้างที่อยู่อาศัย พบว่า มีการนำพันธุ์ไม้จากป่าชายเลนมาใช้ประโยชน์ในการทำเสาบ้านมากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 28.33 คือ ตะบูนขาว (*Xylocarpus granatum*) เนื่องจากเป็นไม้ขนาดกลางที่มีความแข็งแรง ทนทนต่อการถูกแช่อยู่ในน้ำทะเลเป็นเวลานาน มีการนำพันธุ์ไม้จากป่าชายเลนมาใช้ประโยชน์ในการทำเสาค้ำยันมากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 35.56 คือ ถั่วขาว (*Bruguiera cylindrica*) เนื่องจากมีลักษณะตรง ไม่คดเคี้ยว และแข็งแรงทนทาน มีการนำพันธุ์ไม้จากป่าชายเลนมาใช้ประโยชน์ในการทำจั่วบ้านมากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 31.67 คือ โกงกางใบเล็ก (*Rhizophora apiculata*) เนื่องจากไม้มีลักษณะตรง มีความแข็งแรงและเหนียว และในพื้นที่ส่วนใหญ่หาต้นโกงกางใบเล็กได้ง่าย มีการนำพันธุ์ไม้จากป่าชายเลนมาใช้ประโยชน์ในการทำไม้คานมากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 28.33 คือ ตะบูนดำ (*Xylocarpus moluccensis*) เนื่องจากมีเนื้อไม้แข็ง มีรสฝาด เหมาะแก่การทำไม้คาน เพราะปลวกจะไม่มากัดกินเนื้อไม้ มีการนำพันธุ์ไม้จากป่าชายเลนมาใช้ประโยชน์ในการทำสะพานทางเข้าบ้านมากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 12.22 คือ โปรงแดง (*Ceriops tagal*) เนื่องจากเนื้อไม้แข็งและยาว ลำต้นตรง และมีการนำพันธุ์ไม้จากป่าชายเลนมาใช้ประโยชน์ในการทำรั้วกั้นหน้าบ้าน (ใช้กั้นเด็กเล็ก) มากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 10.00 คือ ถั่วดำ (*Bruguiera parviflora)* เนื่องจากเป็นไม้ที่มีลักษณะตรง ผิวเรียบ ไม่ขรุขระ เหมาะที่จะรั้วกั้นเด็ก ไม่มีเสี้ยนไม้ (Figure 1) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ อรณิชชา (2557) พบว่า ประมาณร้อยละ70 ของครัวเรือนทั้งหมด ได้นำไม้ป่าชายเลนมาใช้สำหรับสร้างบ้าน ทำสะพาน ชนิดไม้ที่นำมาใช้มี 5 ชนิด ได้แก่ โปรงแดง โกงกางใบเล็ก ตะบูนขาว ตะบูนดำ และถั่วขาว ชนิดที่นิยมใช้มากที่สุดคือ โปรงแดง และรองลงมาคือ โกงกางใบเล็ก

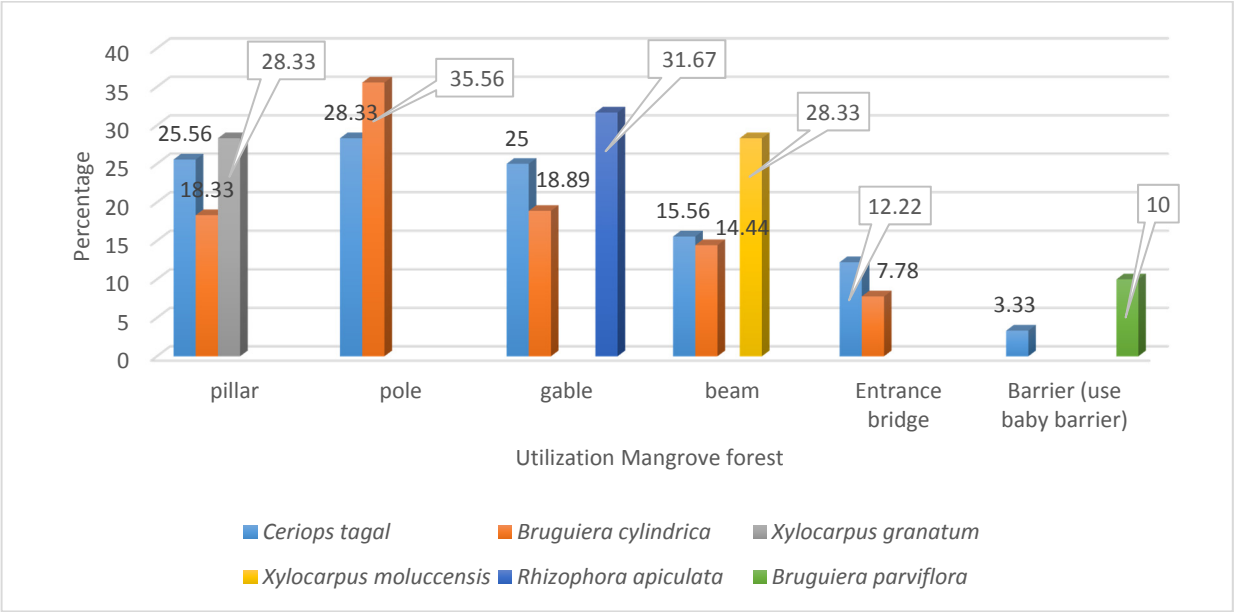


Figure 1 Show the utilization of mangrove trees in residential construction in Pa Yang Village, Takua Thung District, Phang Nga Province.

1.2 การใช้ประโยชน์พันธุ์ไม้จากป่าชายเลนเพื่อทำอุปกรณ์การประมง พบว่า นำพันธุ์ไม้จากป่าชายเลนมาใช้ประโยชน์ในการทำไซดักปลามากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 7.78 คือ แสมดำ (*Avicennia officinalis*) เนื่องจากเป็นไม้เนื้อแข็ง เหมาะที่จะแช่อยู่ในน้ำนานๆ และเมื่อมีการใช้ตะปูตอก เนื้อไม้จะไม่แตก มีการนำพันธุ์ไม้จากป่าชายเลนมาใช้ประโยชน์ในการทำไซดักปู คิดเป็นร้อยละ 12.78 คือ โกงกางใบเล็ก (*Rhizophora apiculata*) เนื่องจากมีลักษณะลำต้นตรง แข็งแรง และหาได้ง่าย มีการนำพันธุ์ไม้จากป่าชายเลนมาใช้ประโยชน์ในการทำคันเบ็ดตกปลา คิดเป็นร้อยละ 10.00 คือ แสมดำ เนื่องจากเนื้อไม้แข็ง แต่ถ้าต้นยังเล็กสามารถนำมาดัดให้โค้งงอได้ เหมาะสำหรับทำคันเบ็ด มีการนำพันธุ์ไม้จากป่าชายเลนมาใช้ประโยชน์ในการทำกระชัง คิดเป็นร้อยละ 3.89 คือ ตะบูนขาว)*Xylocarpus granatum*(เนื่องจากเป็นไม้ขนาดกลาง แข็งแรง ทนทานต่อแดด ฝนได้ดี และมีการนำพันธุ์ไม้จากป่าชายเลนมาใช้ประโยชน์ในการทำเสาหลักเลี้ยงหอย คิดเป็นร้อยละ 5.00 คือ ลำต้นของเป้งทะเล (*Phoenix paludosa*) เนื่องจากเนื้อไม้มีลักษณะนุ่ม ไม่แข็งมาก ลำต้นตรง เหมาะที่จะให้หอยมาเกาะ แต่ถ้าเนื้อไม้แข็งไป หอยจะไม่สามารถเกาะติดได้ (Figure 2) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ นันท์นภัส (2554) ที่พบว่า พืชที่นำมาใช้ประโยชน์มีถึง 10 ชนิด โดยมีการนำมาใช้ในการทำเครื่องมือด้านการประมง ชนิดที่มีการนำมาใช้ประโยชน์มากที่สุด ได้แก่ แสม (*Avicennia sp.*)

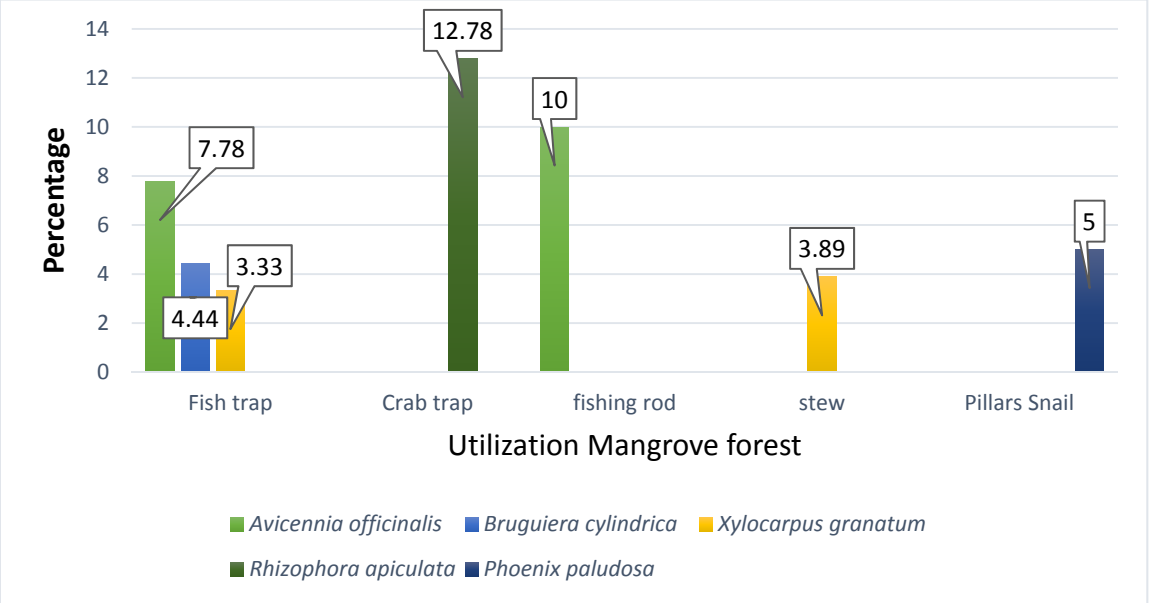


Figure 2 Show the utilization of mangrove trees to create fishing gear in village of Pa Yang, Takua Thung, Phang Nga.

2. ด้าน กฎ ระเบียบ การใช้ประโยชน์พันธุ์ไม้จากป่าชายเลนของหมู่บ้านป่ายาง ตำบลกะไหล อำเภอตะกั่วทุ่ง จังหวัดพังงา

ด้านกฎ ระเบียบ โดยแสดงเป็นค่าเฉลี่ย ซึ่งคิดได้จากการสำรวจจากการร่วมปฏิบัติของคนในชุมชนในด้านกฎ ระเบียบ การใช้ประโยชน์พันธุ์ไม้จากป่าชายเลน ซึ่งมีระดับการปฏิบัติแบ่งออกเป็น 4 ระดับ ได้แก่ 4 หมายถึง ปฏิบัติเป็นประจำ 3 หมายถึง ปฏิบัติบ่อยครั้ง 2 หมายถึง ปฏิบัติเป็นบางครั้ง และ 1 หมายถึง ไม่ปฏิบัติเลย

ผลการศึกษาด้านกฎ ระเบียบ พบว่า 1. มีการใช้กฎ ระเบียบในการตัดต้นไม้ 1 ต้น จะต้องปลูกเพิ่มอีก 5 ต้น คิดเป็นค่าเฉลี่ย 3.53 ของระดับการปฏิบัติ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ธิดารัตน์ นิติญา และนงนภัส (2560) พบว่า ส่วนใหญ่คนในชุมชนปฏิบัติเป็นไปตามกฎระเบียบข้อบังคับของชุมชน เช่น นำไม้มาสร้างบ้าน โดยการตัดไม้ 1 ต้น ต้องทำการปลูกทดแทน 5 ต้น เช่นกัน 2.ในการที่ให้บุคคลใดเข้าตัดไม้ป่าชายเลนโดยไม่ได้รับอนุญาตจากคณะกรรมการป่าชุมชนมีบทลงโทษปรับ 5,000 -10,000 บาท คิดเป็นค่าเฉลี่ย 4.00 ของระดับการปฏิบัติ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ อรณิชชา (2557) พบว่าประชาชนจะต้องมีการใช้กฎกติกาของชุมชนร่วมกัน ได้แก่ ในการตัดไม้จากป่าชายเลนเพื่อใช้สอยของชุมชน และ 3. ห้ามคนต่างหมู่บ้านเข้ามาใช้ประโยชน์ทุกชนิดในป่าชุมชน คิดเป็นค่าเฉลี่ย 4.00 ของระดับการปฏิบัติ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ชุติมาและและเก็ตถวา (2559) พบว่า วิธีการจัดการป่าชุมชนเพื่อให้การจัดการป่าชุมชนได้ผลดีมีประสิทธิภาพนั้น ชุมชนจะต้องมีการกำหนดกฎระเบียบ ข้อบังคับ ข้อห้ามขึ้นมาบังคับใช้ร่วมกันภายในชุมชน (Table 1)

Table 1 Behavior of rules for use of mangrove trees.

Behavior of rules for use of mangrove trees	$\bar{x}$	S.D.
1. Cut 1 tree must be planted with 5 trees.	3.53	0.62
2. Any person who cut mangrove trees without permission community forest committee will be fined 5,000 -10,000 baht.	4.00	0.00
3. People living in other villages were not allowed to utilize the community forest.	4.00	0.00

หมายเหตุ

คะแนนเฉลี่ย 3.26 - 4.00 หมายถึง ประชาชนมีพฤติกรรมในกฎ ระเบียบการใช้ประโยชน์ อยู่ในระดับปฏิบัติเป็นประจำ
คะแนนเฉลี่ย 2.51 - 3.25 หมายถึง ประชาชนมีพฤติกรรมในกฎ ระเบียบการใช้ประโยชน์ อยู่ในระดับปฏิบัติบ่อยครั้ง
คะแนนเฉลี่ย 2.50 - 1.76 หมายถึง ประชาชนมีพฤติกรรมในกฎ ระเบียบการใช้ประโยชน์ อยู่ในระดับปฏิบัติบางครั้ง
คะแนนเฉลี่ย 1.00 - 1.75 หมายถึง ประชาชนมีพฤติกรรมในกฎ ระเบียบการใช้ประโยชน์ อยู่ในระดับไม่ปฏิบัติเลย

3. ด้านปัญหา อุปสรรคในการใช้ประโยชน์พันธุ์ไม้จากป่าชายเลนของหมู่บ้านป่ายาง ตำบลกะไหล อำเภอตะกั่วทุ่ง จังหวัดพังงา

การศึกษาพบว่ามีปัญหา อุปสรรค สามารถเรียงลำดับ 5 ลำดับได้ดังนี้ 1. ด้านการเข้าร่วมกิจกรรม คือ ไม่ได้รับรู้ข่าวสารเกี่ยวกับการจัดการประชุมเกี่ยวกับการใช้ประโยชน์จากป่าชายเลน คิดเป็นร้อยละ 36.11 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ณัฐติกานต์ (2558) พบว่า ปัญหาอุปสรรคในด้านอื่น ได้แก่ ประชาชนไม่ได้รับรู้ข่าวสาร ความรู้เรื่องการใช้ประโยชน์ทรัพยากรป่าชายเลน 2. ด้านการสนับสนุน/งบประมาณคือ ไม่ได้รับการสนับสนุนจากหน่วยงานต่างๆ ในการจัดกิจกรรมในการฟื้นฟูป่าชายเลน คิดเป็นร้อยละ 20.56 และ 3. ด้านการมีส่วนร่วม/เข้าร่วมกิจกรรมของประชาชน คือ การไม่ได้เข้าร่วมกิจกรรมฟื้นฟูป่าชายเลน เช่น กิจกรรมปลูกป่าชายเลนที่จัดขึ้นเนื่องในวันที่ 12 สิงหาคม วันแม่แห่งชาติ คิดเป็นร้อยละ 18.33 ไม่สอดคล้องกับงานวิจัยของ ธิดารัตน์ นิติญา และนงนภัส (2560) พบว่า ส่วนใหญ่มีส่วนร่วมในการเข้าร่วมกิจกรรมการอนุรักษ์และฟื้นฟูป่าชายเลน เช่น กิจกรรมการปลูกป่าชายเลนที่จัดขึ้นเนื่องในวันที่ 12 สิงหาคม วันแม่แห่งชาติมากที่สุด (Table 2)

Table 2 Problem to utilization of mangrove forest in the village of Pa Yang

Problem to utilization of mangrove forest in the village of Pa Yang	Frequency	Percentage
1. The villager was lacking of updated news and information	65	36.11
2. There is no support from various agencies to organize mangrove rehabilitation activities.	37	20.56
3 You do not participate in mangrove rehabilitation on important days.	33	18.33

สรุป

การใช้ประโยชน์พันธุ์ไม้จากป่าชายเลนในด้านการสร้างที่อยู่อาศัยที่พบมากที่สุด คือ โปรงแดง สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการสร้างที่อยู่อาศัยได้ครบทุกประเภท (เสาบ้าน เสาค้ำยัน จั่วบ้าน ไม้คาน สะพานทางเข้าบ้าน รั้วกั้นหน้าบ้าน (ใช้กั้นเด็กเล็ก)) การใช้ประโยชน์พันธุ์ไม้จากป่าชายเลนในการทำอุปกรณ์การประมงที่พบมากที่สุด คือ แสมดำ นำมาใช้ในการทำไซดักปลา และคันเบ็ดตกปลา สำหรับกฎ ระเบียบ การใช้ประโยชน์พันธุ์ไม้จากป่าชายเลน พบว่าประชาชนในหมู่บ้านทั้ง 180 ครัวเรือน ได้ปฏิบัติตามเกณฑ์ มีค่าเฉลี่ย 4.00 ได้แก่ 1) บุคคลใดเข้าตัดไม้ป่าชายเลนโดยไม่ได้รับอนุญาตจากคณะกรรมการป่าชุมชนจะมีบทลงโทษปรับ 5,000 – 10,000 บาท 2) ห้ามคนต่างหมู่บ้านเข้ามาใช้ประโยชน์ทุกชนิดในป่าชุมชน ส่วนปัญหา อุปสรรค ประชาชนส่วนใหญ่ไม่ได้รับรู้ข่าวสาร คิดเป็นร้อยละ 36.11 สำหรับข้อเสนอแนะในงานวิจัยครั้งนี้ควรมีการประชาสัมพันธ์ในด้านการฟื้นฟูป่าชุมชน ให้ความรู้ความเข้าใจในการใช้ประโยชน์จากป่าชายเลน รวมถึงผลกระทบต่อระบบนิเวศป่าชายเลน หากมีการนำไม้มาใช้ประโยชน์ในสัดส่วนที่มากเกินไปหรือไม่สมดุลกัน และในการศึกษาครั้งต่อไปควรมีการประเมินความเหมาะสมในด้านปริมาณ สัดส่วนที่นำไม้จากป่าชายเลนมาใช้ประโยชน์ และวิเคราะห์ผลที่อาจเกิดขึ้นกับระบบนิเวศป่าชายเลน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต และที่สำคัญคือ ขอขอบคุณผู้นำชุมชนหมู่บ้านป่ายาง ตำบลกะไหล อำเภอตะกั่วทุ่ง จังหวัดพังงา ที่ได้ให้ข้อมูลต่างๆ และมีส่วนร่วมที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการวิจัยในครั้งนี้ และทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

ชุติมา สามารถ และเก็ตถวา บุญปราการ. 2559. การจัดการดูแลป่าชุมชนอย่างมีส่วนร่วมของชุมชนบ้านนิคมพัฒนาที่ 1 ตำบลท่าชะมวง อำเภอรัตภูมิ จังหวัดสงขลา. **วารสารมนุษย์ศาสตร์สังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ** 11 (1): 193-235.

โชติ ถาวร. 2554. องค์กรชุมชนในการจัดการป่าชายเลน อ่าวป่าคลอก จังหวัดภูเก็ต, น. 217-227. *ใน* **รายงานสืบเนื่องจากการประชุมทางวิชาการและนำเสนอผลงานวิจัย "มสธ.วิจัย ประจำปี 2554"**. มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช, นนทบุรี.

ณัฐติกานต์ ชูสลับ. 2558. **การใช้ประโยชน์การมีส่วนร่วมของประชาชนในการอนุรักษ์ป่าชายแลน กรณีศึกษา: ชุมชนบ้านเกาะกลาง ตำบลคลองประสงค์ อำเภอเมือง จังหวัดกระบี่**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต.

นันท์นภัส อิทธิชาญสีห์. 2554. **ภูมิปัญญาท้องถิ่นการใช้ประโยชน์จากทรัพยากรป่าชายเลนของ ชุมชนบ้านคลองลัด ตำบลบางตะบูนออก อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยศิลปากร.

ธิดารัตน์ คำล้อม นิติญา สังขนันท์ และนงนภัส สกุลมา. 2560. การใช้ประโยชน์และการมีส่วนร่วมของประชาชนในการอนุรักษ์และฟื้นฟูป่า ชายเลน กรณีศึกษา: บ้านกลาง ตำบลบางเตย อำเภอเมือง จังหวัดพังงา, น. 991-998. *ใน* **รายงานการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 56 (สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม)**. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

วีระ เทพกรณ์. 2552. **ป่าชายเลน.** พิมพ์ครั้งที่ 4. สำนักพิมพ์ปันรู้. กรุงเทพฯ.

สรายุทธ บุณยะเวชชีวิน และรุ่งสุริยา บัวสาลี. 2554. **ป่าชายเลน นิเวศวิทยาและพรรณไม้**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ. มูลนิธิกระต่ายในดวงจันทร์

สุรศักดิ์ อ้าหมาด. 2560. ผู้ใหญ่บ้านป่ายาง.สัมภาษณ์, 16 กุมภาพันธ์ 2560.

อรณิชชา ประทีป ณ ถลาง. 2557. การใช้ไม้และผลผลิตไม้ป่าชายเลนบ้านสามช่องใต้ จังหวัดพังงา. **วารสารการจัดการป่าไม้** 7 (14): 1-11.

ศักยภาพของป่าต่อการเพิ่มพูนปริมาณการสะสมคาร์บอน: กรณีศึกษา ป่าดิบชื้น โรงเรียนบ้านโหล๊ะท่อม อำเภอป่าพะยอม จังหวัดพัทลุง

Potential of Forest for Increasing the Carbon Storge: A Case Study of Tropical Rain Forest at Ban Lo Thom School PhapayomDistric, Phatthalung Province

อานุช คีรีรัฐนิคม[1*] และ สุภฎา คีรีรัฐนิคม[1]

Anut Kiriratnikom[1*] and Suphada Kiriratnikom[1]

บทคัดย่อ

การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินการเพิ่มพูนการสะสมคาร์บอนในป่าดิบชื้นโรงเรียนบ้านโหล๊ะท่อม ในระยะเวลา 1 ปี โดยวางแปลงถาวรขนาด 40 x 40 ตารางเมตร และแบ่งออกเป็นแปลงย่อยขนาด 10x10 เมตร เพื่อศึกษาไม้ใหญ่ และวางแปลงขนาด 4x4 และ 1x1 ตารางเมตร เพื่อศึกษาไม้หนุ่ม และกล้าไม้ ผลการศึกษา พบว่า ป่าโรงเรียนบ้านโหล๊ะท่อมมีลักษณะดินเป็นดินทราย-ทรายปนร่วน มีความเป็นกรด-ด่าง 4.13 มีปริมาณอินทรีย์วัตถุ 1.19 % ปริมาณไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม 53.67 6.22 และ 36.52 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ และมีปริมาณคาร์บอนสะสม 106.71 ตัน/เฮกตาร์ โดยสะสมในไม้ใหญ่ ไม้หนุ่ม และกล้าไม้ เท่ากับ 105.04 1.46 และ 0.21 ตัน/เฮกตาร์ ตามลำดับ และมีการสะสมคาร์บอนเพิ่มขึ้น 20.84 ตัน/เฮกตาร์/ปี หรือคิดเป็นอัตราการเพิ่มร้อยละ 19.53 ต่อปี

ABSTRACT

The research was to study for evaluate the potential for annual carbon accumulation in tropical rain forestat Ban Lo Thom School. By 40x40 m^2sample plot, 10x10 m^2 sample plot for tree, 4x4 m^2, 1x1 m^2 for sapling and seedling, respectively. The results showed that soil of Ban Lo Thom School forest is sand–loamy sand with pH of 4.13, 1.19% organic matter, 53.67, 6.22 and 36.22 mg/kg of nitrogen phosphorus and potassium respectively. Ban Lo Thom School forest could store 106.71 t ha^{-1}, carbon in tree, 105.04, 1.46 and 0.21 t ha^{-1}, carbonin sapling and seedling, respectively. And accumulation carbonwill increased 20.84t $ha^{-1}yr^{-1}$ (19.53 % yr^{-1}).

Key Words: Carbon storage, Increasing

*Corresponding author; e-mail address: anut59@hotmail.com

[1]สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ชีวภาพและสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ พัทลุง 93210

[1]Department of Biological Science and Environment, Faculty of Science, Thaksin University, Phatthaung, Thailand 93210

คำนำ

จากการรายงานของ Global Carbon Project (2009) พบว่าในช่วงปี พศ. 2543-2552 มีการปลดปล่อยคาร์บอนออกสู่บรรยากาศถึง 8.8 $\pm$0.86 พันตัน/ปี ซึ่งการเพิ่มขึ้นของปริมาณ CO_2 ในบรรยากาศมีสาเหตุมาจากหลายปัจจัย และปัจจัยหนึ่งที่สำคัญคือการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการใช้ประโยชน์ที่ดิน (IPCC, 1996) โดยเฉพาะอย่างยิ่งการทำลายทรัพยากรป่าไม้ โดยร้อยละ 20 เกิดจากการสูญเสียคาร์บอนที่เก็บกักในรูปเนื้อไม้ (OEPP, 2000) เนื่องมาจากป่าไม้สามารถช่วยดูดและกักเก็บ CO_2 โดยจะสะสมคาร์บอนในมวลชีวภาพส่วนต่าง ๆ ของต้นไม้ ได้แก่ ลำต้น กิ่ง ใบ และราก ซึ่งศักยภาพของการกักเก็บ CO_2 จะขึ้นอยู่กับปัจจัยทางด้านนิเวศวิทยา ได้แก่ ชนิดป่า ความหนาแน่นของป่า สภาพภูมิประเทศ และปัจจัยสิ่งแวดล้อม (Senpaseuth*et al*., 2009) ทั้งนี้หากไม่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ป่าไม้เมื่อเวลาผ่านไปต้นไม้มีการเจริญเติบโตทั้งความสูง ความโต ทำให้ป่าไม้สามารถที่จะเพิ่มศักยภาพการสะสมคาร์บอนได้ ซึ่งจะเห็นได้จากการสะสมคาร์บอนในมวลชีวภาพเหนือดินของป่าชายเลนปากแม่น้ำคงคาเพิ่มขึ้น 4.71 ตัน/เฮกตาร์ หรือคิดเป็น 2.0 ล้านตันคาร์บอน จากพื้นที่ 9,630 ตารางกิโลเมตร และปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนในดินเพิ่มขึ้นจาก 0.51 % เป็น 0.65 % คิดเป็นมีปริมาณคาร์บอนในดินที่เพิ่มขึ้น 5.49 ล้านตัน (Ray *et al*., 2011)

อย่างไรก็ตามการที่จะสนับสนุนหรือส่งเสริมให้เยาวชน ชุมชน เกิดความรัก ความตระหนักถึงคุณค่าของป่าไม้ต่อการรักษาสภาพภูมิอากาศโลก จำเป็นต้องแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการเพิ่มพูนปริมาณการสะสมในแต่ละปีของป่า ซึ่งป่าบริเวณโรงเรียนบ้านโหล๊ะท่อม อำเภอป่าพะยอม จังหวัดพัทลุง เป็นป่าที่ทางโรงเรียนมีวัตถุประสงค์ที่จะอนุรักษ์ และจะพัฒนาเป็นแหล่งเรียนรู้ธรรมชาติ เพื่อให้แก่นักเรียนเกิดความตระหนักในการอนุรักษ์ทรัพยากรป่าไม้ และเป็นส่วนหนึ่งในการศึกษาเพื่อการอนุรักษ์ทรัพยากร ดังนั้นการศึกษาครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินการเพิ่มพูนการสะสมคาร์บอนในป่าดิบชื้นในระยะเวลา 1 ปี

อุปกรณ์และวิธีการ

การวางแปลงศึกษาและการเก็บข้อมูลภาคสนาม

ทำการวางแปลงศึกษาขนาด 40x40 ตารางเมตร จำนวน 1 แปลง โดยแบ่งออกเป็นแปลงย่อยขนาด 10x10 ตารางเมตร เพื่อสำรวจไม้ใหญ่ (ไม้ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเพียงอก มากกว่า 4.5 เซนติเมตร) และวางแปลงขนาด 4x4 และ 1x1 ตารางเมตร ในแปลงศึกษาขนาด 10x10 ตารางเมตร เพื่อศึกษาไม้หนุ่ม (ไม้ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเพียงอกน้อยกว่า 4.5 เซนติเมตร) และกล้าไม้ (ไม้ขนาดเล็กที่มีความสูงน้อยกว่า 1.3 เมตร) ตามลำดับ ทำการติดแท็กเบอร์ไม้ใหญ่และไม้หนุ่มทุกต้น จากนั้นบันทึกชื่อพันธุ์ไม้ เส้นรอบวงที่ระดับ 1.30 เมตร และความสูง สำหรับกล้าไม้จะทำการติดแท็กที่ทำด้วยระบบตัวเลขที่สลักบนห่วงอลูมิเนียมรัดสายไฟ จากนั้นบันทึกชนิดพันธุ์ไม้ และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางระดับชิดผิวดิน ทั้งนี้จะทำการเก็บข้อมูลก่อนและหลังเป็นเวลา 1 ปี

ทำการเก็บตัวอย่างดินบนระดับ 0-30 เซนติเมตร เพื่อวิเคราะห์เนื้อดิน (Soil texture) โดยวิธี Hydrometer method ค่า pH ด้วยวิธีการใช้ pH meter ในอัตราส่วนดิน : น้ำ = 1:1 (Mclean,1982) วิเคราะห์หาค่าปริมาณสารอินทรีย์ (OM) โดยวิธี Wet oxidation ของ Walkley and Black (1947) ค่าไนโตรเจนรวม ใช้วิธี Micro kjdahl method (Bremner and Mulvaney, 1982) ความเข้มข้นของ

ฟอสฟอรัสที่สกัดได้ ใช้วิธี Bray II และ Colorimetric method (Olsen and Sommers, 1982) และความเข้มข้นของโพแทสเซียมที่สกัดได้ใช้วิธีการสกัดด้วยสารละลาย Ammonium acetate 1N, pH 7.0 และอ่านค่าด้วยเครื่อง Flame photometer (Knudsen *et al.*, 1982)

การประเมินมวลชีวภาพ

ประเมินหามวลชีวภาพเหนือพื้นดินของไม้ใหญ่ ไม้หนุ่ม และกล้าไม้ โดยใช้สมการแอลโลเมตรี ดังนี้

สมการการหามวลชีวภาพของไม้ใหญ่ (ชิงชัย, 2546)

$Ws = 0.0396*(D^2 H)^{0.9326}$

$Wb = 0.006003*(D^2 H)^{1.0270}$

$Wl = ((28.0/ Ws + Wb) + 0.025)^{-1}$

$Wr = 0.0264 *(D^2H)^{0.7750}$

สมการการหามวลชีวภาพของไม้หนุ่ม (อานุช และสุภฎา, 2561)

$Log\ Ws = -1.114 + 0.77 log D^2H$

$Log\ Wb = -1.886 + 0.871 log D^2H$

$Log\ Wl = -1.658 + 0.571 log D^2H$

$Log\ Wr = -1.553 + 0.708 log D^2H$

โดยที่

Ws = มวลชีวภาพส่วนของลำต้น (กิโลกรัม)

Wb = มวลชีวภาพส่วนของกิ่ง(กิโลกรัม)

Wl = มวลชีวภาพส่วนของใบ (กิโลกรัม)

Wr = มวลชีวภาพส่วนของราก(กิโลกรัม)

D = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่ระดับอก (เซนติเมตร)

H = ความสูงของต้นไม้ถึงปลายยอด (เมตร)

สมการการหามวลชีวภาพของกล้าไม้ (อานุช และสุภฎา, 2561)

$Ws = 13.23(D_0^2)^{1.318}$

$Wb = 2.404(D_0^2)^{0.990}$

$Wl = 5.493(D_0^2)^{0.775}$

$Wr = 8.202 (D_0^2)^{1.110}$

โดยที่

Ws = มวลชีวภาพส่วนของลำต้น (กรัม)

Wb = มวลชีวภาพส่วนของกิ่ง (กรัม)

Wl = มวลชีวภาพส่วนของใบ (กรัม)

Wr = มวลชีวภาพส่วนของราก (กรัม)

D_0 = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่ระดับชิดดิน (เซนติเมตร)

การประเมินปริมาณคาร์บอนสะสมในมวลชีภาพ

ประเมินปริมาณคาร์บอนที่เก็บกักในไม้ใหญ่โดยใช้มวลชีวภาพของต้นไม้ทั้งหมดมาประเมินโดยน้ำหนักคาร์บอนในมวลชีวภาพมีค่าเป็นร้อยละ 47 ของมวลชีวภาพ (IPPC, 2006) สำหรับไม้หนุ่มและกล้าไม้ จะใช้มวลชีวภาพของต้นไม้แต่ละส่วนมาประเมินโดยน้ำหนักคาร์บอนในมวลชีวภาพในส่วนต่างๆ ได้แก่ ลำต้น กิ่ง ราก และใบ โดยไม้หนุ่มมีความเข้มข้นของคาร์บอนร้อยละ 56.78 53.53 49.23 และ 46.72 ของมวลชีวภาพ กล้าไม้มีความเข้มข้นของคาร์บอนร้อยละ 51.77 50.46 49.75 และ 47.18 ของมวลชีวภาพ ตามลำดับ (อานุช และสุภฎา, 2561)

ผลและวิจารณ์

คุณสมบัติของดิน

จากกการศึกษาลักษณะดินในแปลงถาวรพบว่าดินมีลักษณะเป็นดินทราย-ทรายปนร่วน มีสภาพความเป็นกรด (pH, 4.13) และมีปริมาณธาตุอาหารอยู่ในระดับต่ำ โดยมีปริมาณอินทรียวัตถุ 1.19 เปอร์เซ็นต์และมีปริมาณไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมเพียง 53.67 6.22 และ 36.52 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ (Table 1) ซึ่งนับว่ามีธาตุอาหารต่ำกว่าป่าดิบเขา ดอยอินทนนท์ จังหวัดเชียงใหม่ซึ่งมีปริมาณอินทรียวัตถุสูงถึง 8.34-12.99 เปอร์เซ็นต์ และมีปริมาณไนโตรเจนสูงถึง 5.20-6.80 กรัม/กิโลกรัม (ขนิษฐา และคณะ, 2555)

Table 1 Soil chemical properties in Ban Lo Thom school forest

Sample	Texture	pH	OM (%)	N (mg/kg)	P (mg/kg)	K (mg/kg)
1	Loamy Sand	4.63	0.727	42.00	7.09	34.61
2	Sand	3.88	1.238	56.00	8.40	35.90
3	Loamy Sand	3.88	1.609	63.00	3.17	39.04
Mean	-	**4.13±0.43**	**1.19±0.44**	**53.67±10.69**	**6.22±2.72**	**36.52±2.27**

ชนิดและความหนาแน่นของไม้ในแปลงถาวร

จากการศึกษาพบชนิดพันธุ์ไม้ในแปลงถาวรทั้งสิ้น 50 ชนิด 32 วงศ์ โดยพบไม้ใหญ่ จำนวน 36 ชนิด 24 วงศ์ มีความหนาแน่น 1,350.00 ต้น/เฮกตาร์ ซึ่งจะพบพันธุ์ไม้วงศ์ Dipierocarpaceae มากที่สุด ได้แก่ ไม้สักเขา (พันจำ) *(Vatica odorata)* ตะเคียนทราย (*Neobalanocarpus heimii*) กระบาก (*Anisoptera scaphula)* และไม้เคี่ยม (*Cotylelobium lanceolatum*) ไม้หนุ่มจำนวน 28 ชนิด 23 วงศ์ มีความหนาแน่น 11,601.56 ต้น/เฮกแตร์ ซึ่งจะพบพันธุ์ไม้วงศ์ Dipierocarpaceae มากที่สุด ได้แก่ ไม้สักเขา (พันจำ) ยางนา *(Dipterocarpus alatus)* และไม้เคี่ยม สำหรับกล้าไม้ จำนวน 14 ชนิด 13 วงศ์ มีความหนาแน่น 108,750.00 ต้น/เฮกตาร์ ซึ่งจะพบพันธุ์ไม้วงศ์ Myrtaceae มากที่สุด โดยพบ ไม้เมา *(Syzygium grandis)* และหว้านา (*Syzygium pachyphyllum*)

การเปลี่ยนแปลงการสะสมคาร์บอนในมวลชีวภาพ

การเปลี่ยนแปลงปริมาณคาร์บอนสะสมของไม้ใหญ่

จากการศึกษาความหนาแน่น และปริมาณมวลชีวภาพของไม้ใหญ่ เพื่อประเมินปริมาณคาร์บอนสะสมในมวลชีวภาพ ระยะเวลา 1 ปี ของป่าโรงเรียนบ้านโหล๊ะท่อม พบว่า ไม้ใหญ่จะมีความหนาแน่นที่ไม่เปลี่ยนแปลง โดยมีความหนาแน่น 1,350 ต้น/เฮกตาร์ แต่จะมีการสะสมคาร์บอนเพิ่มขึ้น 20.81 ตัน /เฮกตาร์ หรือคิดเป็นร้อยละ 19.81 (Table 2) ซึ่งนับว่าเป็นอัตราการเพิ่มที่สูงกว่าไม้ยางพาราที่จะมีการสะสมคาร์บอนในมวลชีวภาพเพิ่มขึ้น 4.2 ตัน/เฮกตาร์/ปี (Sone *et al*, 2014) และเมื่อพิจารณาการเจริญเติบโตของไม้ยางพาราจะพบว่าไม้ยางพารามีอัตราการเจริญเติบโตและการเพิ่มพูนการสะสมคาร์บอนมากที่สุดในช่วงอายุ 6-10 ปี ซึ่งจะมีอัตราการสะสมคาร์บอนรายปีสูงที่สุด ปริมาณเท่ากับ 8.35 ตัน/เฮกตาร์/ปี รองลงมา คือ ยางพารา ช่วงอายุ 11-15 ปี 16-20 ปี 1-5 ปี และ 21-25 ปี โดยมีอัตราการสะสมคาร์บอน 7.514 6.73 6.69 และ 5.98 ตัน/เฮกตาร์/ปี ตามลำดับ (ระวี และคณะ, 2555) อย่างไรก็ตาม ความหนาแน่นและอายุของไม้ในป่าธรรมชาติกับสวนยางพาราจะมีความแตกต่างกัน โดยสวนยางพาราจะมีความหนาแน่นประมาณ 162.5 ต้น/เฮกตาร์ และมีไม้ที่มีอายุเดียวกัน

Table 2 Density and carbon storage change in tree, sapling and seedling

Detail	Time	Tree	Sapling	Seedling	Total
Density (tree ha^{-1})	Start	1,350.00	11,601.56	108,750.00	121,607.81
	After 1 year	1,350.00	11,093.75	83,125.00	95,475.00
Change ofdensity (tree$ha^{-1}yr^{-1}$)		0.00 (0.00%)	-507.81 (-4.38%)	-25,625.00 (-23.56%)	-26,132.81 (-21.49%)
Diameter (cm)	Start	16.38±12.38	0.76±0.80	0.36±0.15	-
	After 1 year	16.42±10.68	0.87±0.43	0.45±0.20	-
Height (m)	Start	9.78±5.11	1.95±0.19	0.31±0.23	-
	After 1 year	11.87±5.24	2.14±0.73	0.37±0.26	-
Biomass (t ha^{-1})	Start	223.49	2.71	0.43	226.63
	After 1 year	267.77	2.64	0.56	270.97
Change ofbiomass (t $ha^{-1}yr^{-1}$)		44.28 (19.81%)	-0.07 (-2.58%)	0.13 (30.23%)	44.34 (19.56%)
Carbon storage (t ha^{-1})	Start	105.04	1.46	0.21	106.71
	After 1 year	125.85	1.42	0.28	127.55
Change of carbon storage (t ha^{-1} yr^{-1})		20.81 (19.81%)	-0.04 (-2.74%)	0.07 (33.33%)	20.84 (19.53%)

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงขนาดช่วงความโตของไม้ในเวลา 1 ปี จะพบว่า ไม้ที่มีขนาดเล็ก (>4.5-20.0 เซนติเมตร) จะมีจำนวนลดลงร้อยละ 1.86 โดยจะเปลี่ยนช่วงขนาดความโตเป็นไม้ที่มีขนาดกลาง และขนาดใหญ่เพิ่มขึ้นร้อยละ 4.35 และ 11.11 ตามลำดับ ซึ่งจะส่งผลให้ไม้ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20.1-40.0 เซนติเมตร มีปริมาณการสะสมคาร์บอนเพิ่มขึ้นมากที่สุด (ร้อยละ 23.61) แสดงให้เห็นว่าไม้ที่มีขนาดความโตดังกล่าวจะมีอัตราการเจริญเติบโตค่อนข้างสูง (Table 3, Figure 1)

Table 3 Change of density and carbon storage in range of diameter at breast height (DBH)

dbh (cm)	Density (tree ha^{-1})			Carbon storage (t ha^{-1})		
	Start	After 1 year	Change	Start	After 1 year	Change
≥4.5-20	1,006.25	987.50	-18.75 (-1.86%)	23.18	27.84	4.66 (20.10%)
20.1-40	287.50	300.00	12.50 (4.35%)	47.60	58.84	11.24 (23.61%)
>40	56.25	62.50	6.25 (11.11%)	34.26	39.17	4.91 (14.33%)
Total	**1,350.00**	**1,350.00**	**0.00 (0.00%)**	**105.04**	**125.85**	**20.81 (19.81%)**

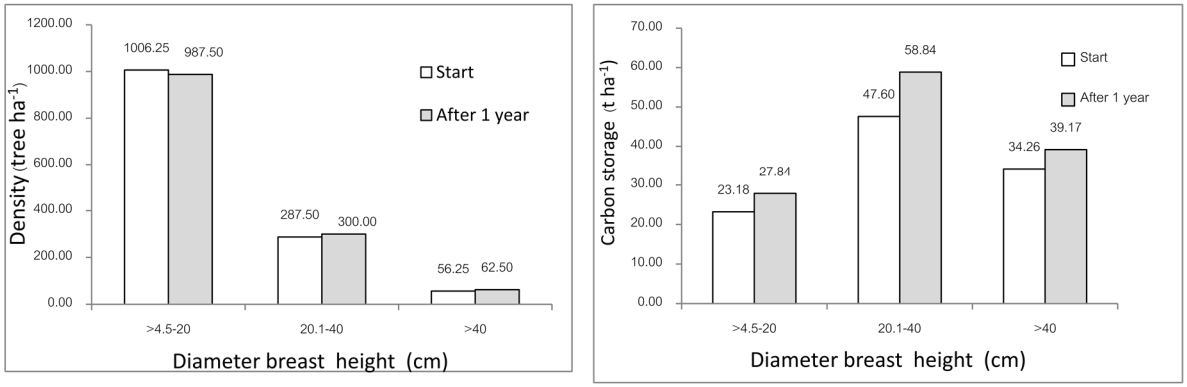


Figure 1 Annual change of density and carbon storageunder different diameter range

การเปลี่ยนแปลงปริมาณคาร์บอนสะสมของไม้หนุ่มและกล้าไม้

จากการศึกษาความหนาแน่น และปริมาณมวลชีวภาพของไม้หนุ่ม และกล้าไม้ เพื่อประเมินปริมาณคาร์บอนสะสมในมวลชีวภาพ ระยะเวลา 1 ปี ของป่าโรงเรียนบ้านโหล๊ะท่อม พบว่า ไม้หนุ่ม และกล้าไม้มีความหนาแน่นน้อยลงร้อยละ 4.38 และ 23.56 ตามลำดับ เนื่องจากมีการตัดฟัน ต้นไม้หักโค่น และตาย ส่งผลให้ไม้หนุ่มมีปริมาณการสะสมคาร์บอนลดลงจาก 1.46 ตัน /เฮกตาร์ เป็น 1.42 ตัน /เฮกตาร์ ส่วนกล้าไม้มีปริมาณการสะสมคาร์บอนเพิ่มมากขึ้นจาก 0.21 เป็น 0.28 ตัน /เฮกตาร์ หรือคิดเป็นร้อยละ 33.33 (Table 2, Figure 2)

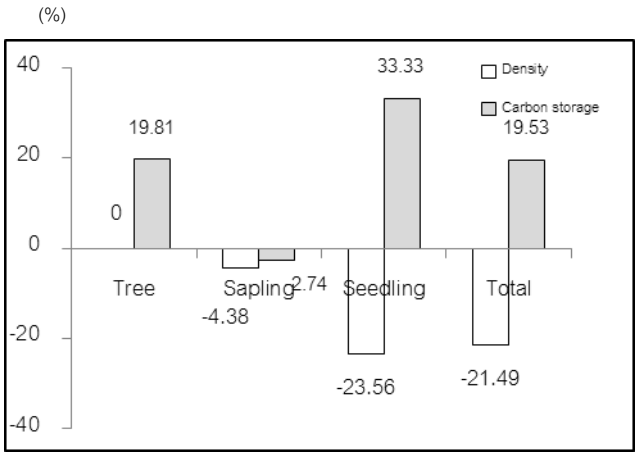


Figure 2 Annual change in density and carbon storage at Ban Lo Thom School Forest

สรุป

จากการศึกษา พบว่า ป่าโรงเรียนบ้านโหล๊ะท่อม ซึ่งเป็นป่าดิบชื้นที่มีความหนาแน่นของไม้ใหญ่ ไม้หนุ่ม และกล้าไม้ 1,350.00, 11,093.75 และ 83,125.00 ต้น/เฮกตาร์ มีศักยภาพในการเพิ่มพูนการสะสมคาร์บอนในมวลชีวภาพ 20.84 ตัน/เฮกตาร์/ปี ซึ่งเป็นอัตราที่มากกว่าป่าชายเลนที่ปากแม่น้ำคงคา ซึ่งมีการสะสมคาร์บอนในมวลชีวภาพเพิ่มขึ้นเพียง 4.71 ตัน/เฮกตาร์ (Ray *et al*., 2010) เมื่อพิจารณาไนโตรเจนในดินของป่าโรงเรียนบ้านโหล๊ะท่อม และป่าชายเลนที่ปากแม่น้ำคงคาจะพบว่าป่าโรงเรียนบ้านโหล๊ะท่อมมีปริมาณไนโตรเจนสูงกว่า โดยมีปริมาณไนโตรเจน 53.67 มิลลิกรัม/กิโลกรัม สำหรับป่าชายเลนปากแม่น้ำคงคามีปริมาณไนโตรเจน 2.3-2.9 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ซึ่งจะส่งผลให้ต้นไม้มีการเจริญเติบโตที่ดีและสามารถเก็บกักปริมาณคาร์บอนได้มากกว่า ละเมื่อพิจารณาการเพิ่มปริมาณคาร์บอนสะสมของไม้ใหญ่ ไม้หนุ่ม และกล้าไม้ จะพบว่าไม้ใหญ่มีการเพิ่มปริมาณคาร์บอนสะสมคาร์บอนมากที่สุด 20.81 ตัน/เฮกตาร์/ปี แต่พบว่ากล้าไม้มีอัตราการเพิ่มพูนมากที่สุดร้อยละ 33.33 ดังนั้นการดูแลรักษาต้นไม้ควรให้ความสำคัญกับไม้ทุกขนาด เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาตรไม้ที่มีขนาดใหญ่จะมีความสำคัญต่อการเพิ่มมวลชีวภาพและการสะสมคาร์บอนเป็นอย่างมาก (Kauppi *et al*., 2015) หากมีการดูแลรักษาไม้หนุ่มและกล้าไม้ ให้เจริญเป็นไม้ที่มีขนาดใหญ่ก็จะส่งผลต่อปริมาณการสะสมคาร์บอนมากขึ้นด้วย

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณปราชญ์ชาวบ้านบ้านโหล๊ะท่อม อำเภอป่าพะยอม จังหวัดพัทลุง และนิสิตสาขาวิทยาศาสตร์ชีวภาพและสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณทุกท่านที่อำนวยความสะดวกและให้ความช่วยเหลือในการเก็บรวบรวมข้อมูลภาคสนาม

การศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้รับงบประมาณสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินแผ่นดิน มหาวิทยาลัยทักษิณ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560

เอกสารอ้างอิง

ขนิษฐา เสียรพีระกุล, สุนทร คำยอง, นิวัติ อนงค์รักษ์ และเกรียงศักดิ์ ศรีเงินยวง. 2555. การประเมินมูลค่าคาร์บอนและธาตุอาหารสะสมในดินป่าดิบเขาบริเวณดอยดินทนนท์ จังหวัดเชียงใหม่. **วารสารเกษตร** 28(2): 173-182.

ชิงชัย วิริยะบัญชา. 2546. **คู่มือการประมาณมวลชีวภาพของหมู่ไม้**. ฝ่ายวนวัฒนวิจัยและพฤกษศาสตร์. กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช, กรุงเทพฯ.

ระวี เจียรวิภา, สุรชาติ เพชรแก้ว, มนตรี แก้วดวง และวิทยา พรหมมี. 2555. การประเมินการเก็บกักคาร์บอนและรายได้จากการชดเชยคาร์บอนในสวนยางพารา. **วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา** 17(2): 91-102.

อานุช คีรีรัฐนิคม และสุภฎา คีรีรัฐนิคม. 2561. ปริมาณไนโตรเจนสะสมในป่าชุมชนบ้าป่าพงศ์ อำเภอตะโหมด จังหวัดพัทลุง, น. 758-763. *ใน* **การประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยทักษิณครั้งที่ 28 ประจำปี 2561**. วันที่ 8-9 พฤษภาคม 2561 ณ โรงแรมสมิหลา บีช อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา.

Bremner, J.M. and C.S. Mulvaney. 1982. 31: Nitrogentotal, pp. 595-624. *In* A.L. Page, R.H. Miller and D.R. Keeney, eds. **Methods of Soil Analysis Part 2. Chemical and Microbiological Properties.** 2nd ed. Amer. Soc. Agron., Inc. Publisher, Medison, Wisconsin, USA.

Global Carbon Project. 2009. **Carbon budget and trends**. Available Source: http://Global Carbon Project.org/carbon budget, December 17, 2015.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 1996. **Greenhouse Gas Inventory Reference Manual. International Panel on Climate Change.** Cambridge University Press, Cambridge.

Kauppi, P.E., R.A. Birdsey, A. Ihalainen, P. Nojd, and A. Lehtoene. 2015. Effect of land management on large trees and carbon stock. **Biogeosciences** 12: 855-862.

Knudsen, D., G.A. Peterson and P.F. Pratt. 1982. 13: Lithium, Sodium and Potassium, pp. 225-246.*In* A.L. Page, R.H. Miller and D.R. Keeney, eds. **Methods of Soil Analysis Part 2. Chemical and Microbiological Properties.** 2nd ed. Amer. Soc. Agron., Inc. Publisher, Medison, Wisconsin, USA.

Mclean, E.O. 1982. 12: Soil pH and lime requirement, pp. 199-224. *In* A.L. Page, R.H. Miller and D.R. Keeney, eds. **Methods of Soil Analysis Part 2. Chemical and Microbiological Properties.** 2nd ed. Amer. Soc. Agron., Inc. Publisher, Medison, Wisconsin, USA.

Office of Environmental Policy and Planning (OEPP). 2000. **Thailand's National Greenhouse Gas Inventory 1994.** Ministry of Science, Technology and Environment, Bangkok.

Olsen, S.R. and L. E. Sommers. 1982. 24: Phosphorus,pp. 403-430..*In* A.L. Page, R.H. Miller and D.R. Keeney, eds. **Methods of Soil Analysis Part 2. Chemical and Microbiological Properties.** 2nd ed. Amer. Soc. Agron., Inc. Publisher, Medison, Wisconsin, USA.

Ray, R., D. Ganguly, C. Chowdhury, M. Dey, S. Das, M.K. Dutta and S.K. Mandal. 2011. Carbon sequestration and annual increase of carbon stock in a mangrove forest. **Atmospheric Environment** 45: 5016-5024.

Senpaseuth, P., C. Navanugraha and S. Pattanakiat. 2009. The Estimation of Carbon Storage in Dry Evergreen and Dry Dipterocarp Forests in Sang Khom District, Nong Khai Province. **Thailand Environment and Natural Resources Journal** 7(2): 1-11.

Sone, K., N. Watanabe, M. Takase, T. Hosaka and K. Gyokusen. 2014. Carbon sequestration, tree biomass growth and rubber yield of PB260 clone of rubber tree (*Heveabrasiliensis*) in North Sumatra. **J. Rubb. Res** 17(2): 115-127.

Walkley, A. and I. A. Black. 1947. Chromic acid titration method for determination of soil organic matter. **Soil Science** 63: 257.

รูปแบบการปรับปรุงน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียให้สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำ

Wastewater Improvement Model for Recycling Reusable Water

นันทวัฒน์ เนติจรัสโรจน์[1*] ณภัทร โพธิ์วัน[1] และ กัญจน์ ศิลป์ประสิทธิ์[1]

Nunthawat Neatijaradroj[1*] Naphat Powan[1] and Kun Silprasit[1]

บทคัดย่อ

การศึกษารูปแบบการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียให้นำกลับมาใช้ซ้ำในนิคมอุตสาหกรรมอัญธานี มีวัตถุประสงค์ 1) ศึกษาคุณภาพน้ำทิ้งที่ออกจากระบบบำบัดน้ำเสีย 2) ศึกษาคุณภาพน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการกรองระดับต้นแบบที่แตกต่างกัน และ 3) สามารถนำน้ำทิ้งให้สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ โดยเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งที่ผ่านระบบบำบัด เดือนละ 2 ครั้ง (เดือนพฤศจิกายน 2560 – พฤษภาคม 2561) นำน้ำทิ้งผ่านกระบวนการกรองระดับต้นแบบที่แตกต่างกัน 4 รูปแบบ ได้แก่ 1) กรองด้วยวัสดุเส้นใย Polypropylene แล้วกรองด้วยคาร์บอนแบบเกล็ด (GAC) แล้วกรองด้วยอัลตราฟิลเทรชัน 2) กรองด้วยวัสดุเส้นใย Polypropylene แล้วกรองด้วยคาร์บอนแบบอัดแท่ง (Carbon Block) แล้วกรองด้วยอัลตราฟิลเทรชัน 3) กรองทรายแล้วกรองด้วยคาร์บอนแบบเกล็ด แล้วกรองด้วยอัลตราฟิลเทรชัน และ 4) กรองทรายแล้วกรองด้วยคาร์บอนแบบอัดแท่ง แล้วผ่านการกรองด้วยอัลตราฟิลเทรชัน ทำการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ ได้แก่ ค่า BOD ค่า pH ค่า DO ค่า Temperature ค่า Conductivity ค่า TDS ค่า Turbidity และค่า Color โดยทำการเทียบคุณภาพน้ำทิ้งกับค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งของกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม พ.ศ. 2559 ผลการศึกษาคุณภาพน้ำทิ้งที่ออกจากระบบบำบัดมีค่าตามที่มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากนิคมอุตสาหกรรมกำหนด สามารถระบายทิ้งลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะได้ และพบว่าการกรองในรูปแบบที่ 3 เป็นต้นแบบที่ดี สามารถนำน้ำทิ้งกลับมาใช้ซ้ำในโรงงานอุตสาหกรรมได้

ABSTRACT

The study of waste water quality improvement method from wastewater treatment system for water reuse in Gemopolis Industrial Estate. Objective of this research was to 1) Study effluent quality from the wastewater treatment 2) Study effluent quality that has been treated from different model filtration process 3) Enable to be reuse from wastewater treatment system. The sample of wastewater treatment plant were collected 2 times per month from November 2017 to May 2018. Then uses of 4 prototype filtered methods are as follow: 1) Filter system with Polypropylene filter followed by Granular Activated Carbon (GAC) filter and then Ultrafiltration 2) Filter system with Polypropylene filter followed by Carbon Block filter and then Ultrafiltration 3) Filter system with sand filter followed by Granular Activated Carbon (GAC) filter and then Ultrafiltration 4) Filter system with sand filter followed by Carbon Block filter and then Ultrafiltration. These are an effective experimental process. There are measurement by BOD, pH, DO, Temperature, Conductivity, TDS, Turbidity and Color with the standard of Ministry of Natural Recourses and Environment (2016). As a result, effluent quality from the wastewater treatment would be according to acceptable standard discharged from Industrial Estate to public canal. The result of the experiments indicated that 3rd methods used produced the best prototype acceptable quality of water to be reused in the industry

Key words: wastewater treatment, ultrafiltration, Industrial Estate, filter

*Corresponding author; e-mail address: nunthawat@gemopolis.com

[1]ภาควิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมและการจัดการทรัพยากร คณะวัฒนธรรมสิ่งแวดล้อมและการท่องเที่ยวเชิงนิเวศ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ 10110

[1]Department of Science Program in Environmental Technology and Resources Management, Faculty of Environmental Technology and Resources Management, Srinakharinwirot University, 10110

คำนำ

มลพิษทางน้ำ เป็นปัญหาทางน้ำมีสาเหตุสำคัญมาจากการทิ้งน้ำจากโรงงาน แม้ว่าจะมีกฎหมายบังคับให้โรงงานอุตสาหกรรมต้องบำบัดน้ำทิ้งเหล่านี้ก่อนปล่อยออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติก็ตาม นิคมอุตสาหกรรมเป็นพื้นที่หรือแหล่งรวมของโรงงานอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ ไว้ในที่เดียวกัน ในเขตกรุงเทพมหานครมีด้วยกัน 3 แห่ง คือ นิคมอุตสาหกรรมบางชัน นิคมอุตสาหกรรมลาดกระบัง และนิคมอุตสาหกรรมอัญธานี หน่วยงานที่รับผิดชอบและดูแลการจัดตั้งนิคมอุตสาหกรรม คือ การนิคมอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย (กนอ.) สังกัดกระทรวงอุตสาหกรรม ดำเนินการจัดสรรพื้นที่สำหรับโรงงานอุตสาหกรรมเข้าไปอยู่รวมกันอย่างเป็นระบบและมีระเบียบ โดยนิคมอุตสาหกรรมอัญธานี (Gemopolis) เป็นนิคมอุตสาหกรรมเฉพาะทางที่เป็นแหล่งรวมของโรงงานอุตสาหกรรมที่ผลิตอัญมณีและเครื่องประดับเพียงอย่างเดียว ตั้งแต่ต้นน้ำไปยังปลายน้ำ (Cluster) ในกลุ่มอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ น้ำเสียจากโรงงานในนิคมอุตสาหกรรมเกิดจากกระบวนการผลิตเกิดขึ้นในบางขั้นตอนการผลิตเท่านั้น เช่น กระบวนการฉีดปูน กระบวนการล้างตัวเรือน กระบวนการชุบเคลือบผิว เป็นต้น ปริมาณน้ำเสียคิดจากน้ำใช้ทั้งหมดของโรงงานในนิคมฯ มีปริมาณน้ำเสียเฉลี่ยวันละ 1,800 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบเร่งตะกอน (Activated Sludge Process) โดยมาตรการในการจัดการระบบบำบัดน้ำเสียใช้ตามประกาศของกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม พ.ศ. 2559 เรื่องกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม (http://infofile.pcd.go.th/law/std_water_iww_2559.pdf?CFID=1930675&CFTOKEN=71712633)

กระบวนการที่นิยมนำมาประยุกต์ในการนำน้ำทิ้งกลับมาใช้ซ้ำมีหลายกระบวนการ เช่น การระเหย (Evaporation) การตกตะกอน (Sedimentation) การหมุนเหวี่ยง (Centrifugation) และกระบวนการเมมเบรน (Membrane Process) เป็นต้น การเลือกใช้กรรมวิธีการแยกวิธีใดนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น คุณสมบัติของวัตถุดิบ ความเป็นไปได้ทางเทคนิค ชนิดและคุณภาพของผลิตภัณฑ์สุดท้าย และความคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์ วิธีการทั่วไปในการเอาน้ำทิ้งกลับมาใช้ใหม่ ได้แก่ การกรองผ่านเยื่อกรองเมมเบรน (Membrane) เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่นิยมนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำ การบำบัดน้ำเสีย และการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ (Aim and Vigneswaran, 1998) อีกทั้งยังพบว่าเยื่อกรองเมมเบรนอัลตราฟิลเทรชันสามารถกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติที่มีอยู่ในน้ำด้วยกลไกการคัดขนาด เพื่อลดสารอินทรีย์ธรรมชาติซึ่งจะก่อให้เกิดสารตกค้างจากการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีนได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Scott, 1990; Uyak *et al*., 2008) เช่น การกรองแบบอัลตราฟิลเทรชัน (Ultra Filtration : UF) เป็นระบบการกรองที่ให้น้ำไหลผ่านเส้นใยสังเคราะห์ที่มีรูพรุนความละเอียดประมาณ 0.01 ไมครอน ซึ่งทำให้ตะกอน สารแขวนลอย โลหะหนักอื่นๆ รวมทั้งเชื้อแบคทีเรียที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเยื่อกรองไม่สามารถแทรกตัวเล็ดลอดผ่านไปได้ มีเพียงน้ำใสที่สามารถไหลผ่าน โดยสิ่งปนเปื้อนที่ถูกดักจับไว้จะถูกกำจัดออกจากระบบเป็นระยะ เพื่อป้องกันการตกค้างสะสม ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้งานระบบอัลตราฟิลเทรชันมากมาย เช่น ระบบผลิตน้ำประปา การนำน้ำทิ้งกลับมาใช้ใหม่ การผลิตน้ำใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม อุตสาหกรรมผลิตน้ำดื่ม หรือแม้แต่การกรองน้ำเพื่อใช้บริโภคในครัวเรือน ฯลฯ (Cheremisinoff, 1995) ทำให้ผู้วิจัยมีความสนใจศึกษารูปแบบการนำน้ำทิ้งที่ผ่านระบบบำบัดส่วนกลางนำไปใช้ซ้ำ โดยใช้ระบบการกรองด้วยระบบอัลตราฟิลเทรชัน โดยการศึกษาในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ศึกษาคุณภาพน้ำทิ้งที่ออกจากระบบบำบัดน้ำเสีย 2) ศึกษาคุณภาพน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการกรองระดับต้นแบบที่แตกต่างกัน 4 รูปแบบ และ 3) สามารถนำน้ำทิ้งให้สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้

อุปกรณ์และวิธีการ

1. การเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสีย

สุ่มเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียในนิคมอุตสาหกรรมอัญธานี เขตประเวศ จังหวัดกรุงเทพมหานครด้วยวิธีเก็บที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ตัวแทนที่ดีของน้ำทิ้ง โดยใช้วิธีการเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งตามประกาศของกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม พ.ศ. 2559 เรื่องกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ในข้อ 7.2 เป็นวิธีการเก็บแบบจ้วง (Grab Sampling) การเก็บตัวอย่างแบบนี้สามารถใช้เป็นตัวแทนของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากนิคมอุตสาหกรรมว่ามีคุณสมบัติเป็นอย่างไร โดยเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งหลังผ่านระบบการบำบัดตาม Figure 1 เก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจำนวน 1 จุด เดือนละ 2 ครั้ง ครั้งละ 1 ตัวอย่าง ตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน 2560 – พฤษภาคม 2561 เป็นระยะเวลา 7 เดือน รวมทั้งสิ้น 14 ตัวอย่าง

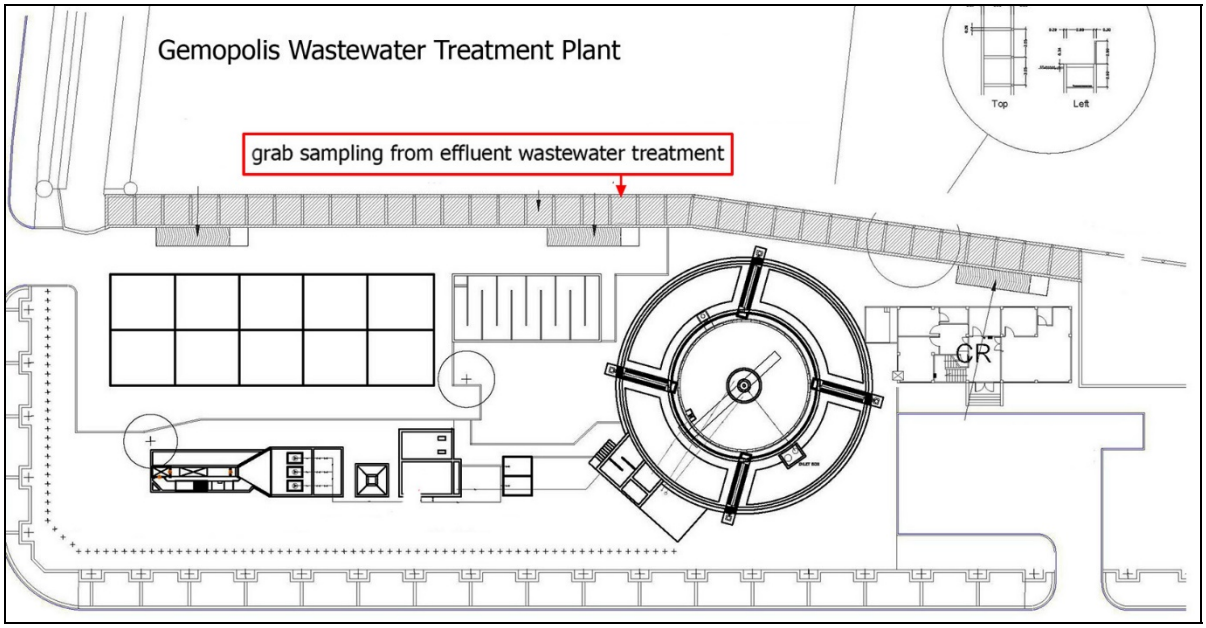


Figure 1 Grab sampling station at Gemopolis wastewater treatment plant

2. การทดสอบรูปแบบการกรองระดับต้นแบบที่แตกต่างกัน

นำน้ำทิ้งที่ออกจากกระบบบำบัดน้ำเสียไปผ่านกระบวนการกรองระดับต้นแบบที่แตกต่างกัน ใน 4 รูปแบบ คือ รูปแบบที่ 1 ระบบการกรองด้วยวัสดุเส้นใย Polypropylene แล้วผ่านระบบการกรองด้วย คาร์บอนแบบเกล็ด (GAC) แล้วผ่านระบบการกรองด้วยระบบอัลตราฟิลเทรชัน รูปแบบที่ 2 ระบบการกรองด้วยวัสดุเส้นใย Polypropylene แล้วผ่านระบบการกรองด้วย คาร์บอนแบบอัดแท่ง (Carbon Block) แล้วผ่านระบบการกรองด้วยระบบอัลตราฟิลเทรชัน รูปแบบที่ 3 ระบบการกรองทรายแล้วผ่านระบบการกรองด้วย คาร์บอนแบบเกล็ด (GAC) แล้วผ่านระบบการกรองด้วยระบบอัลตราฟิลเทรชัน และสุดท้าย รูปแบบที่ 4 ระบบการกรองทรายแล้วผ่านระบบการกรองด้วย คาร์บอนแบบอัดแท่ง (Carbon Block) แล้วผ่านระบบการกรองด้วยระบบอัลตราฟิลเทรชัน ซึ่งผู้วิจัยนำระบบการกรองด้วยระบบอัลตราฟิลเทรชันมาวางไว้เป็นขั้นตอนสุดท้ายของทั้ง 4 รูปแบบ เนื่องจากระบบอัลตราฟิลเทรชันเป็นระบบการกรองที่ให้น้ำไหลผ่านเส้นใยสังเคราะห์ที่มีรูพรุนความละเอียดประมาณ 0.01

ไมครอน ซึ่งทำให้ ตะกอน สารแขวนลอย โลหะหนักอื่นๆ รวมทั้งเชื้อแบคทีเรียที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเยื่อกรองไม่สามารถแทรกตัวเล็ดลอดผ่านไปได้ มีเพียงน้ำใสที่สามารถไหลผ่าน โดยสิ่งปนเปื้อนที่ถูกดักจับไว้จะถูกกำจัดออกจากระบบเป็นระยะ (Figure 2) โดยดำเนินการเก็บตัวอย่างน้ำที่ผ่านระบบการกรองทั้ง 4 รูปแบบๆ ละ 2 ครั้งต่อเดือน ตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน 2560 – พฤษภาคม 2561 เป็นระยะเวลา 7 เดือน รวมทั้งสิ้น 56 ตัวอย่าง

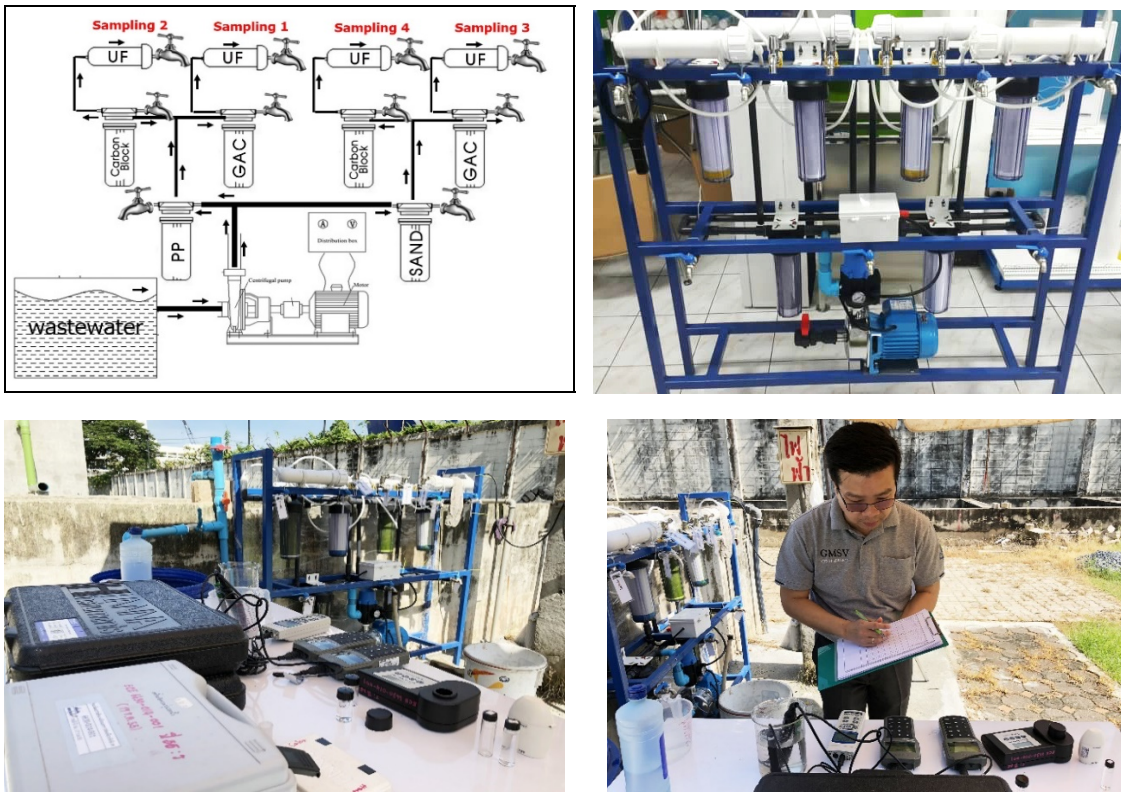


Figure 2 Filtration system Concept design & actual creation

3. การทดสอบพารามิเตอร์ในการตรวจวิเคราะห์น้ำทิ้งและน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการกรอง

สุ่มเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียในนิคมอุตสาหกรรมอัญธานี 1 จุด และนำน้ำทิ้งไปผ่านกระบวนการกรองทั้ง 4 รูปแบบ มาทำการวิเคราะห์หาค่าตามกระบวนการทดลองโดยกำหนดการหาค่าพารามิเตอร์ดังนี้

1) หาค่า BOD คือ การวัดความสกปรกของน้ำคิดเปรียบเทียบในรูปของปริมาณออกซิเจน (O_2) ที่ลดลงเนื่องจากจุลชีพจำพวกแบคทีเรีย (Bacteria) นำไปใช้ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ (organic) โดยการหาค่าความต่างของปริมาณออกซิเจนที่ละลายในตัวอย่างน้ำที่วัดได้วันแรก (DO_0) กับปริมาณออกซิเจนที่ละลายในตัวอย่างน้ำเดียวกันที่เก็บไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ (incubator) 20 ± 1°C เป็นเวลา 5 วัน (DO_5) ตามสมการที่ 1

$$BOD = DO_0 - DO_5 \qquad (1)$$

เมื่อ DO_0 = ค่าออกซิเจนละลายในน้ำที่ไตเตรตได้ในวันแรก

DO_5 = ค่าเฉลี่ยออกซิเจนละลายในน้ำที่ไตเตรตได้หลังจากเก็บไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ 20 ± 1°C เป็นเวลา 5 วัน

2) หาค่า pH คือ ค่าความเป็นกรด-ด่าง โดยใช้เครื่องมือวัด ยี่ห้อ HANNA รุ่น HI98190 ทำการใช้เครื่องมือตามวิธีที่แนะนำจากคู่มือการใช้งาน (https://www.neonics.co.th/manual/manual-hi98191-hi98190.pdf) 3) หาค่า DO (Dissolved Oxygen) คือ การหาปริมาณออกซิเจนซึ่งละลายอยู่ในน้ำ 4) หาค่าอุณหภูมิ (Temp) 5) หาค่า Conductivity คือ ค่าการนำไฟฟ้า 6) หาค่า TDS (Total Dissolved Solids) คือ ค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมด ผู้วิจัยใช้เครื่องมือวัดค่า ยี่ห้อ Lutron รุ่น WA-2017SD เพื่อวัดหาค่า DO, Conductivity, TDS, และอุณหภูมิ, 7) หาค่า Turbidity คือ ค่าความขุ่นของน้ำ โดยใช้เครื่องมือวัดค่า ยี่ห้อ Lovibond Turbicheck และ 8) หาค่า Color คือ วัดหาค่าสีของน้ำ โดยใช้เครื่องมือวัดค่า ยี่ห้อ PCU Checker Color of water จากนั้นทำการเปรียบเทียบคุณภาพน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียและน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการกรองทั้ง 4 รูปแบบ กับค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง ของกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากร ธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม พ.ศ.2559

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียส่วนกลางในนิคมอุตสาหกรรมอัญธานี ตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน 2560 – พฤษภาคม 2561 พบว่า ค่า BOD มีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 11.179 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง ค่า BOD จะต้องไม่เกิน 20 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงว่ามีค่าเป็นไปตามค่ามาตรฐาน และค่า pH เฉลี่ยเท่ากับ 6.9 ค่าอุณหภูมิเฉลี่ย เท่ากับ 31.09 องศาเซลเซียส ค่า TDS มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 722.07 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่า Color มีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 34.64 เอดีเอ็มไอ (Table 1) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งตามมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากนิคมอุตสาหกรรมตามประกาศของกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม พ.ศ. 2559 แล้วพบว่าน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียส่วนกลางในนิคมอุตสาหกรรมอัญธานีมีค่าเป็นไปตามค่ามาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากนิคมอุตสาหกรรม สามารถระบายทิ้งลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะหรือออกสู่สิ่งแวดล้อมได้

Table 1 Analysis Effluent from wastewater treatment plant

Standard / Station	BOD (mg/L)	pH	DO (mg/L)	Temp. (°C)	Cond. (µmhos/cm)	TDS (mg/L)	Turbid (NTU)	Color (ADMI)
	≤ 20	5.5 - 9.0	-	≤ 40	-	≤ 3000	-	300
Effluent	11.179	6.943	4.631	31.093	1.144	722.071	6.091	34.643

Remark: BOD is Biochemical Oxygen Demand, DO is Dissolved Oxygen, Temp is Temperature, Cond is Conductivity, TDS is Total Dissolved Solids, Turbid is Turbidity

เมื่อนำน้ำทิ้งที่ออกจากระบบบำบัดน้ำเสียไปทดสอบกระบวนการกรองระดับต้นแบบที่แตกต่างกัน 4 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบที่ 1 ระบบการกรองด้วยวัสดุเส้นใย Polypropylene แล้วผ่านระบบการกรองด้วย คาร์บอนแบบเกล็ด (GAC) แล้วผ่านระบบการกรองด้วยระบบอัลตราฟิลเทรชัน รูปแบบที่ 2 ระบบการกรองด้วยวัสดุเส้นใย Polypropylene แล้วผ่านระบบการกรองด้วย คาร์บอนแบบอัดแท่ง (Carbon Block) แล้วผ่านระบบการกรองด้วยระบบอัลตราฟิลเทรชัน รูปแบบที่ 3 ระบบการกรองทรายแล้วผ่านระบบการกรองด้วย คาร์บอนแบบเกล็ด (GAC) แล้วผ่านระบบการกรองด้วยระบบอัลตราฟิลเทรชัน และรูปแบบที่ 4 ระบบการกรองทรายแล้วผ่านระบบการกรอง

ด้วย คาร์บอนแบบอัดแท่ง (Carbon Block) แล้วผ่านระบบการกรองด้วยระบบอัลตราฟิลเทรชัน ผลการศึกษาพบว่าคุณภาพน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการกรองระดับต้นทั้ง 4 รูปแบบ มีค่าคุณภาพน้ำทิ้งผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานของคุณภาพน้ำที่ต้องการนำน้ำทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ในโรงงานอุตสาหกรรม (Asano, 1998) โดยน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการกรองทั้ง 4 รูปแบบ มีคุณภาพที่ดีขึ้น โดยจะเห็นว่าค่า BOD ทั้ง 4 รูปแบบ จากผลการวิเคราะห์จะตรวจไม่พบ และค่า pH, DO, อุณหภูมิ, และ ค่า Conductivity ยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน รวมทั้งพบว่า ค่า TDS ค่า Turbidity ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงความขุ่นของน้ำ และค่า Color เป็นค่าที่แสดงถึงสีที่ปรากฏหรือความใสของน้ำ มีค่าลดลงเมื่อผ่านระบบการกรองทั้ง 4 รูปแบบ โดยพบว่า น้ำทิ้งที่ผ่านระบบการกรองรูปแบบที่ 1 มีค่า TDS น้อยที่สุด เท่ากับ 648.94 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่ระบบการกรองรูปแบบที่ 4 พบค่า Turbidity และ Color น้อยที่สุด เท่ากับ 2.35 NTU และ 7.14 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับคุณลักษณะของมาตรฐานคุณภาพน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาค ตามคำแนะนำขององค์การอนามัยโลก (WHO) ปี 2011 พบว่าค่ามาตรฐาน Turbidity ต้องมีค่า $\leq$ 4 NTU และค่า Color $\leq$ 15 ADMI จากผลการวิเคราะห์การกรองทั้ง 4 รูปแบบการกรองทั้ง Turbidity และค่า Color มีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานอย่างชัดเจน สอดคล้องกับงานวิจัยของสุกุลยา (2554) ได้ทำการศึกษา การประยุกต์ใช้กระบวนการอัลตราฟิลเทรชันสำหรับการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติในกระบวนการผลิตน้ำประปา ทำการทดสอบน้ำผิวดินจากอ่างเก็บน้ำสุระและน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสีย ภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เรื่องคุณลักษณะของน้ำที่เข้าและออกจากระบบกรองอัลตราฟิลเทรชันของน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสีย สามารถลดค่าความขุ่น (Turbidity) และน้ำจะมีลักษณะใสขึ้น

จากการวิจัยครั้งนี้ การนำระบบการกรองทั้ง 4 รูปแบบนั้น สามารถนำมาใช้เพื่อนำน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียให้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เมื่อพิจารณาจากค่า BOD, ค่า DO, ค่า Turbidity, ค่า Color พบว่าไม่ว่าจะผ่านรูปแบบการกรองแบบใดก็ไม่มีค่าความแตกต่างกัน ส่วนรูปแบบการกรองรูปแบบที่ 3 : Sand -> GAC -> UF สามารถปรับสภาพ pH, Temperature. และ DO ได้ดีที่สุด ในขณะที่รูปแบบการกรองรูปแบบที่ 1: PP -> GAC -> UF สามารถกรองค่า TDS ได้ดีที่สุด ซึ่งเมื่อพิจารณาภาพรวมทั้งคุณภาพน้ำและปัจจัยทางด้านเศรษฐศาสตร์แล้วสามารถวิเคราะห์ได้ว่า รูปแบบที่ 3 คือ ระบบการกรองทรายแล้วผ่านระบบการกรองด้วยคาร์บอนแบบเกล็ด (GAC) แล้วผ่านระบบการกรองด้วยระบบอัลตราฟิลเทรชัน จะเป็นรูปแบบที่ดีที่สุด เนื่องจากวัสดุทรายสำหรับการกรองน้ำและคาร์บอนเกล็ดสำหรับการปรับสภาพน้ำ สามารถหาซื้อได้โดยง่ายและมีราคาที่เหมาะสมตามกระบวนการทางเศรษฐศาสตร์ และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการและการบำรุงรักษาก็มีค่าใช้จ่ายที่ไม่สูงเช่นกัน โดยรูปแบบที่ 3 นี้ยังสามารถนำน้ำทิ้งกลับมาใช้ซ้ำในโรงงานอุตสาหกรรมได้ทำให้ลดปริมาณการใช้น้ำประปาลง โดยอัตราการผลิตน้ำขึ้นอยู่กับการใช้ปั๊มแรงดัน ในการทดลองนี้ใช้ปั๊มแรงดันขนาด 1 แรงม้า สามารถผลิตน้ำที่ผ่านกระบวนการกรองได้ถึง 35 ลิตร / นาที แต่อย่างไรก็ตามการนำน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ ยังมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการและบำรุงรักษาสูง เมื่อเปรียบเทียบกับการผลิตน้ำจากแหล่งน้ำดิบธรรมชาติด้วยกระบวนการปรับคุณภาพน้ำทั่วไป ดังนั้นการประยุกต์ใช้กระบวนการกรองโดยมีระบบการกรองด้วยระบบอัลตราฟิลเทรชันมาวางไว้เป็นขั้นตอนสุดท้ายของทั้ง 4 รูปแบบซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการนำไปใช้งานจริงในอนาคตเพื่อให้ได้ค่าที่น่าเชื่อถือและทำการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์โดยเลือกเอาปัจจัยที่มีความสำคัญสำหรับการนำน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่

Table 2 Result Analysis wastewater treatment after filtration process

Standard / Station	BOD (mg/L)	pH	DO (mg/L)	Temp. (°C)	Cond. (µmhos/cm)	TDS (mg/L)	Turbid (NTU)	Color (ADMI)
	≤ 20	5.5 - 9.0	-	≤ 40	-	≤ 3000	-	300
Effluent	11.179	6.943	4.631	31.093	1.144	722.071	6.091	34.643
PP→GAC→UF	0.000	6.962	3.577	32.293	1.047	648.942	2.768	12.857
PP→C Block→UF	0.000	7.030	3.126	32.279	1.036	687.929	2.581	8.929
Sand→GAC→UF	0.000	7.171	3.356	32.486	1.046	696.857	2.681	10.357
Sand→C Block→UF	0.000	7.089	2.840	32.436	1.052	690.143	2.350	7.143

Remark: BOD is Biochemical Oxygen Demand, DO is Dissolved Oxygen, Temp is Temperature, Cond is Conductivity, TDS is Total Dissolved Solids, Turbid is Turbidity

สรุป

น้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบเร่งตะกอน (Activated Sludge Process) ในนิคมอุตสาหกรรมอัญธานี พบว่าได้ผลการทดสอบมีค่ามาตรฐานเป็นไปตามประกาศของกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม พ.ศ.2559 เรื่องกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม และพบว่าน้ำทิ้งที่ผ่านระบบการกรองระดับต้นแบบทั้ง 4 รูปแบบ สามารถนำน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการกรองกลับมาใช้ซ้ำภายในโรงงานได้ มีประสิทธิภาพในการลดค่า BOD, DO, TDS, Conductivity, Turbidity และค่า Color ดังนั้นคุณภาพน้ำทิ้งที่ผ่านระบบการกรองระดับต้นแบบทั้ง 4 รูปแบบ ที่แตกต่างกัน จะได้ค่าตามมาตรฐานที่ไม่ต่างกัน และหากนำด้านราคาที่เหมาะสมตามกระบวนการทางเศรษฐศาสตร์ และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการการบำรุงรักษาและมีค่าใช้จ่ายที่ไม่สูงมาพิจารณา รูปแบบระบบการกรองทรายแล้วผ่านระบบการกรองด้วย คาร์บอนแบบเกล็ด (GAC) แล้วผ่านระบบการกรองด้วยระบบอัลตราฟิลเทรชันเป็นรูปแบบที่เหมาะสมที่สุด สามารถนำน้ำทิ้งกลับมาใช้ซ้ำในโรงงานอุตสาหกรรมได้ทำให้ลดปริมาณการใช้น้ำประปาลง สามารถผลิตน้ำที่ผ่านกระบวนการกรองได้ถึง 35 ลิตร / นาที

เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2559. **กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม**. แหล่งที่มา: http://infofile.pcd.go.th/law/std_water_iww_2559.pdf?CFID=1930675&CFTOKEN=71712633, 6 มิถุนายน 2559.

สุกุลยา ทับอุไร. 2554. **การประยุกต์ใช้กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันสำหรับการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติในกระบวนการผลิตน้ำประปา**. ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

Aim, B. R. and S. Vigneswaran. 1998. Application of Membrane Processes in Water and Wastewater Treatment. **ENFO** 10(1) : 3-6.

Asano, T. 1998. **Wastewater Reclamation and Reuse, Water Quality Management Library**. Vol. 10, ISBN 1-56676-620-6, Technomic Publishing Company, INC., USA.

Cheremisinoff, P.N. 1995. **Handbook of water and wastewater treatment technology**. M. Dekker, New York.

Scott, K. 1990. **Membrane Separation Technology: industrial Applications and Markets**. Scientific and Technical Information, Oxford, England.

ผลของสารต้านเชื้อราในกล่องกระดาษบรรจุภัณฑ์ ต่อเชื้อโรคเกสรดำของกล้วยไม้ตัดดอก เพื่อยืดอายุการเก็บรักษา

Effect of Antifungal Agents in Packaging Container on Black Anther Disease of Orchid Cut Flowers for Storage Life Extension

บังอร นกครุฑ[1*] บัวผัน พวงศิลป์[1] และ สาวิตรี พิสุทธิ์พิเชฏฐ์[1]

Bang-on Nokkrut[1*], Buapan Puangsin[1] and Sawitree Pisutpiched[1]

บทคัดย่อ

การศึกษาผลของสารต้านเชื้อราในกล่องกระดาษบรรจุภัณฑ์ ต่อเชื้อโรคเกสรดำของกล้วยไม้ตัดดอก เพื่อยืดอายุการเก็บรักษา ใช้กระดาษคราฟท์เคลือบด้วยนาโนซิลเวอร์ (AgNPs) ประสิทธิภาพการต้านเชื้อรา *Colletotrichum gloeosporioides* ทดสอบโดยวิธี disc diffusion พบว่ากระดาษคราฟท์ที่ผ่านการเคลือบด้วย AgNPs 50 ppm มีประสิทธิภาพยับยั้งเชื้อราสูงสุด ทั้งนี้การเคลือบด้วยสารละลายแป้งไฮโดรโฟบิกร่วมกับ AgNPs ยังคงคุณสมบัติความแข็งแรงของกระดาษไว้ได้เมื่อเปรียบเทียบกับกระดาษคราฟท์ที่ไม่ผ่านการเคลือบ สำหรับการทดสอบระยะเวลาในการยืดอายุการเก็บรักษาของดอกกล้วยไม้ตัดดอกในกล่องกระดาษบรรจุภัณฑ์ที่จำลองขึ้น พบว่ากล่องกระดาษบรรจุภัณฑ์ที่ผ่านการเคลือบด้วย AgNPs 50 ppm และแช่ในน้ำยายืดอายุชั่วคราวที่ประกอบไปด้วยซิลเวอร์ไนเตรตสามารถลดอาการการติดเชื้อรา *C. gloeosporioides* ได้ดีที่สุด และกล้วยไม้ตัดดอกมีอายุการจัดเก็บรักษาสูงสุด 31.60 วัน ในขณะที่ทรีทเมนต์ควบคุมมีอายุการจัดเก็บรักษาเพียง 25.70 วันเท่านั้น

ABSTRACT

The study on effect of antifungal agents in packaging container on black anther disease of orchid cut flowers for storage life extension using Kraft paper was coated with Nanosilver (AgNPs). The efficiency of inhibit *Colletotrichum gloeosporioides* using disc diffusion method. The results show the coated packaging with AgNps of 50 ppm resulted in maximum inhibition of fungi on the coated paper. Moreover, the AgNPs coated paper containing with hydrophobic starch and AgNPs was maintained strengthen the mechanical properties of the paper when was compared with uncoated paper. The results of storage life extension of orchid cut flower in a simulated packaging found that the coated packaging with AgNPs of 50 ppm and was immersed in pulsing solution containing with silver nitrate could against *C. gloeosporioides* and in maximum of the storage life extension for 31.60 days, while the control treatment have the storage life extension for 25.70 days

Key Words: Antifungal paper, Black anther disease, Orchid cut flowers, Packaging container

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

[1]ภาควิชาวนผลิตภัณฑ์ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Forest Products, Faculty of Forestry, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

กล้วยไม้เป็นสินค้าส่งออกด้านเกษตรกรรมที่สำคัญของประเทศไทย มีมูลค่าการส่งออกโดยรวมเฉลี่ยประมาณ 2,000 ล้านบาท/ปี แต่ภายในช่วง 5 ปีหลังมานี้ พบว่าอัตราการขยายตัวการส่งออกกล้วยไม้ตั้งแต่ในปี พ.ศ. 2555 จนถึงปี พ.ศ. 2560 มีแนวโน้มลดลง (ศูนย์บริการข้อมูลเศรษฐกิจการเกษตร สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2560) ปัญหาหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อการส่งออกกล้วยไม้ตัดดอกของไทยคือ การแพร่ระบาดของโรคเกสรดำ ซึ่งเกิดจากเชื้อรา *Colletotrichum gloeosporioides* และพบระบาดเกือบตลอดทั้งปี โดยส่วนใหญ่พบเมื่อวิธีการจัดเก็บรักษากล้วยไม้ตัดดอกในระหว่างการขนส่งไม่เหมาะสม ทำให้อุณหภูมิและความชื้นมีการเปลี่ยนแปลงและไปกระตุ้นการเติบโตของเชื้อรา *C. gloeosporioides* ซึ่งอาการของการเกิดโรคในระยะแรกจะเกิดเป็นจุดเชื้อราเล็กๆ สีดำที่เส้าเกสรของดอกกล้วยไม้ แต่จะแสดงอาการเด่นชัดในระหว่างการส่งออก ทำให้กล้วยไม้ตัดดอกมีคุณภาพและอายุการใช้งานลดลง และถูกเผาทำลายเมื่อกล้วยไม้ตัดดอกถึงปลายทาง (สมศิริ, 2554)

มีการพบการรายงานสารต้านเชื้อราหลายชนิดที่สามารถต้านเชื้อรา *C. gloeosporioides* เช่น นาโนซิลเวอร์ (Lamsal *et al.,* 2011; Chowdappa *et al.,* 2014), ซิงค์ไพริไธออน (Nokkrut *et al*., 2017), เบนซิมิดาโซล (Chaichompoo and Phichai, 2010), กรดอินทรีย์ (Kang *et al.,* 2003), บอเรต (Shi *et al.,* 2012) และสารสกัดจากพืช (Bussaman *et al.,* 2012) เป็นต้น อย่างไรก็ตามมีงานวิจัยก่อนหน้านี้รายงานว่า สารต้านเชื้อราประเภทอินทรีย์มีความเสถียรต่ำที่อุณหภูมิสูงและระเหยได้ง่ายเมื่อเปรียบเทียบกับสารต้านเชื้อราประเภทอนินทรีย์ นอกจากนี้สารต้านเชื้อราที่ได้จากพืชมีขั้นตอนการเตรียมที่ยุ่งยากซับซ้อนและมีต้นทุนสูง ดังนั้นสารต้านเชื้อราประเภทอนินทรีย์จึงได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก (Carbone *et al.,* 2016)

ในระหว่างการส่งออกสินค้าเกษตรกรรมไปยังต่างประเทศ บรรจุภัณฑ์กระดาษเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่ออายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ ซึ่งการปรับปรุงคุณสมบัติบรรจุภัณฑ์กระดาษโดยใช้สารต้านเชื้อรา เป็นวิธีหนึ่งที่สามารถช่วยยืดอายุการเก็บรักษาได้ (Sumińska *et al.,* 2014; สุธีรา และคณะ, 2557) การผลิตกระดาษต้านเชื้อรามี 2 วิธี คือ วิธีการผสมสารต้านเชื้อราลงในน้ำเยื่อ และวิธีการผสมสารต้านเชื้อราร่วมกับน้ำยาเคลือบผิวหน้ากระดาษ แต่การเติมสารต้านเชื้อราลงในน้ำเยื่อมีข้อด้อยคือ ในกระบวนการขึ้นรูปแผ่นกระดาษสารต้านเชื้อรามักปนเปื้อนไปกับน้ำและถูกส่งออกไปยังแม่น้ำและทะเล ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเพิ่มระบบการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น (Klimpl *et al.,* 2005) จึงนำมาสู่การเลือกใช้วิธีการเคลือบสารต้านเชื้อราบนผิวหน้าของกระดาษ สารต้านเชื้อราจะแทรกตัวอยู่ภายในโครงสร้างโพลีเมอร์ของชั้นเคลือบที่ไม่เป็นระเบียบมากกว่าการสร้างพันธะกับโพลีเมอร์ ดังนั้นอนุภาคของสารต้านเชื้อราจึงสามารถเคลื่อนที่ได้ และมีประสิทธิภาพในการออกฤทธิ์ต้านเชื้อราได้อย่างสมบูรณ์ (Intili and Lewisville, 1985)

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการพัฒนาบรรจุภัณฑ์กระดาษที่มีคุณสมบัติต้านเชื้อรา *C. gloeosporioides* และศึกษาความสามารถในการยืดอายุการเก็บรักษากล้วยไม้ตัดดอก เพื่อเพิ่มมูลค่าการส่งออกและรักษามาตรฐานตลาดกล้วยไม้ไทย โดยใช้กระดาษคราฟท์เคลือบที่ผ่านการเคลือบผิวหน้ากระดาษด้วย AgNPs ที่ระดับความเข้มข้นแตกต่างกัน

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมกระดาษเคลือบด้วยสารต้านเชื้อรา

กระดาษคราฟท์น้ำหนักมูลฐาน 134 กรัม/ตารางเมตร (180x180 มิลลิเมตร) ถูกเคลือบด้วยน้ำยาเคลือบผิวหน้ากระดาษที่ประกอบไปสารละลายแป้งไฮโดรโฟบิก 8% ร่วมกับ AgNPs (20 และ 50 ppm) โดยใช้ bar coater กำหนดน้ำหนักของน้ำยาเคลือบตกค้างบนผิวหน้ากระดาษคราฟท์ 4±0.5 กรัม/ตารางเมตร ทำให้แห้งในตู้อบความร้อนที่ 105±2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที ลักษณะสัณฐานวิทยาของกระดาษทดสอบตรวจสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดชนิดฟิลอิมิชชั่น (Field Emission Scanning Electron Microscope; FE-SEM) และทำการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของกระดาษ ได้แก่ น้ำหนักมูลฐาน (ISO 536: 1995) ความหนาของกระดาษ (ISO 534: 2005) ความต้านทานต่อการดึง (ISO 1924-2: 2008) และความต้านทานต่อแรงดันทะลุ (ISO 2758: 2001) ทำการทดลอง 5 ซ้ำ

การทดสอบประสิทธิภาพของกระดาษต้านเชื้อราโดยวิธี disc diffusion

ประสิทธิภาพการต้านเชื้อรา *C. gloeosporioides* ของกระดาษ ใช้วิธี disc diffusion ดัดแปลงตามวิธีของ Alvarez-castellanos *et al*. (2001) โดยบ่มเชื้อเป็นเวลา 7 วัน ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส สังเกตการเจริญเติบโตของเชื้อรา *C. gloeosporioides* บนอาหารเลี้ยงเชื้อ PDA โดยวัดรัศมีจากจุดปลูกเชื้อไปยังขอบโคโลนีเชื้อราที่เจริญเติบโต บันทึกรัศมีของเชื้อราที่เจริญบนอาหาร PDA ในชุดควบคุม (ปราศจากกระดาษทดสอบ) เป็น A และรัศมีของเชื้อราในชุดทดสอบ เป็น B นำมาคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์การยับยั้งเชื้อรา (Inhibition (%)) แสดงดังสมการ ทำการทดลอง 5 ซ้ำ

$$\text{Inhibition (\%)} = \frac{\text{A} - \text{B}}{\text{A}} \times 100$$

การทดสอบความสามารถในการยืดอายุของกล้วยไม้ตัดดอก

จำลองกล่องบรรจุภัณฑ์กล้วยไม้ โดยนำกระดาษคราฟท์ที่ผ่านการเคลือบด้วย AgNPs ยึดติดภายในกล่องบรรจุภัณฑ์กล้วยไม้เต็มพื้นที่ บรรจุกล้วยไม้ตัดดอก 40 ช่อ ลงกล่องบรรจุภัณฑ์ที่จำลองขึ้น แสดงดัง Table 1 ซึ่งในแต่ละกล่องประกอบไปด้วยกล้วยไม้ตัดดอกผ่านการปลูกเชื้อ 1 ช่อ โดยใช้วิธีการ spore suspension ที่ระดับความเข้มข้น 10^6 สปอร์/มิลลิลิตร จากนั้นปิดฝากล่องให้สนิท ทำการทดสอบในสภาวะอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 50% เป็นเวลา 7 วัน รายงานผลเป็นอัตราการติดเชื้อ (Infection (%)) เมื่อ A คือ จำนวนช่อของดอกกล้วยไม้ทั้งหมดในแต่ละทรีทเมนต์ และ B คือ จำนวนช่อของดอกกล้วยไม้ที่แสดงอาการติดเชื้อรา *C. gloeosporioides* ในแต่ละทรีทเมนต์ แสดงดังสมการ (ดัดแปลงตามวิธีของ สุธีรา และคณะ, 2557) แต่ละชุดการทดลองมี 5 ซ้ำ

$$\text{Infection (\%)} = \frac{\text{B}}{\text{A}} \times 100$$

หลังจากตรวจสอบอัตราการติดเชื้อเป็นเวลา 7 วัน ทำการสุ่มตัวอย่าง 10 ตัวอย่าง/ทรีทเมนต์ เพื่อทำการบันทึกอายุการเก็บรักษา โดยนับจำนวนวันตั้งแต่เริ่มปักก้านลงในน้ำยายืดอายุการเก็บรักษาชั่วคราวจนถึงวันที่ดอกบานแสดงอาการเหี่ยวหรือฟุบ 50% ของดอกบานทั้งช่อ

Table 1 The treatments used during the packaging test.

Treatment	Packaging	Pulsing solution
T_0	Uncoated	Distilled water
T_1	Uncoated	8 - HQS 225 ppm + $AgNO_3$ 30 ppm + Sucrose 4%
T_2	Uncoated	8 - HQS 225 ppm + AgNPs 20 ppm + Sucrose 4%
T_3	AgNPs coated	8 - HQS 225 ppm + $AgNO_3$ 30 ppm + Sucrose 4%
T_4	AgNPs coated	8 - HQS 225 ppm + AgNPs 20 ppm + Sucrose 4%

การวิเคราะห์เชิงสถิติ

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely randomized design; CRD) เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าทดสอบต่างๆ ด้วยวิธีวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (ANOVA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยทรีทเมนต์ด้วยพิสัยดันแคน (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ผลและวิจารณ์

ผลของกระดาษเคลือบด้วย AgNPs ต่อการต้านเชื้อรา *C. gloeosporioides* โดยวิธี Disc diffusion

ประสิทธิภาพการต้านเชื้อรา *C. gloeosporioides* ของกระดาษคราฟท์ที่ผ่านการเคลือบด้วยสารละลายแป้งไฮโดรโฟบิกร่วมกับ AgNPs (20 และ 50 ppm) ใช้วิธีการบันทึกรัศมีโคโลนีของเชื้อรา แสดงดัง Figure 1 พบว่ากระดาษที่ผ่านการเคลือบด้วย AgNPs 50 ppm แสดงพื้นที่การยับยั้งเชื้อรา *C .gloeosporioides* หลังจากบ่มเชื้อได้ 7 วัน เมื่อนำค่าเฉลี่ยรัศมีโคโลนีของเชื้อรามาคำนวณเปอร์เซ็นต์การยับยั้งเชื้อรา พบว่าหลังจากบ่มเชื้อ 2 วัน กระดาษคราฟท์ผ่านการเคลือบด้วย AgNPs 50 ppm มีเปอร์เซ็นต์การยับยั้งเชื้อรามากกว่ากระดาษคราฟท์ที่ผ่านการเคลือบด้วย AgNPs 20 ppm แสดงดัง Table 2 ซึ่งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังนั้นกระดาษคราฟท์ที่ผ่านการเคลือบด้วย AgNPs 50 ppm มีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อราสูงสุด

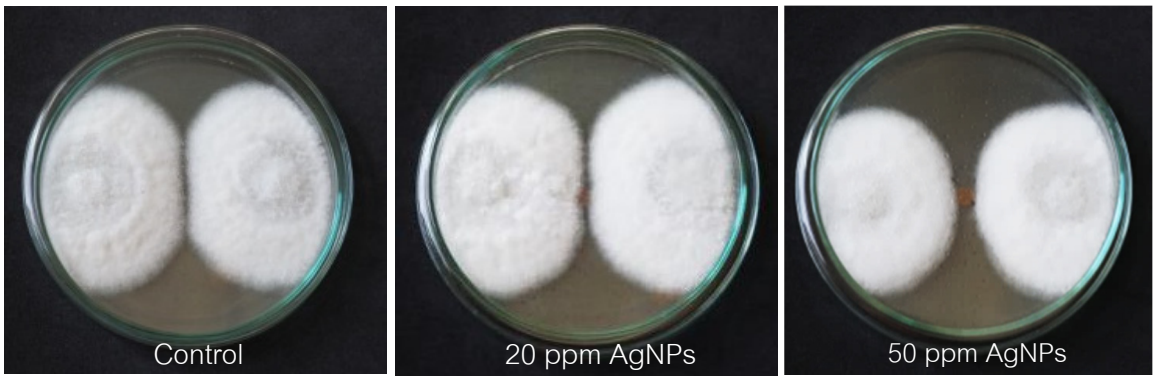


Figure 1 Antifungal activity in a control plate (no AgNP coating) and test plate with different concentrations of AgNPs coated paper, for 7 days of incubation.

Table 2 Inhibition efficacy (% relative to control) of AgNPs coated paper (20 and 50 ppm) on *C. gloeosporioides.*

Days	Inhibition (%relative to control)[1]	
	AgNPs coated paper (ppm)	
	20	50
1	ND	ND
2	12.00±2.70[a]	36.00±2.18[b]
3	3.92±1.79[a]	18.95±2.73[b]
4	4.88±2.44[a]	11.22±2.99[b]
5	4.26±1.73[a]	10.08±2.21[b]
6	2.72±1.42[a]	6.80±3.27[b]
7	0.00±0.00[a]	3.33±1.83[b]

Remark: [1]Average percentage of inhibition (n=5), followed by the same letters in the row, indicating that the numbers are not significantly different (p>0.05, based on DMRT), ND –Not determined.

ลักษณะสัณฐานวิทยาของกระดาษไม่ผ่านการเคลือบและผ่านการเคลือบผิวหน้า

จากการตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาของกระดาษด้วย FE-SEM ดังแสดงใน Figure 2(a-c) จะเห็นได้ว่า กระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบผิวหน้า (Figure 2a) แสดงพื้นผิวหยาบ และมองเห็นการประสานกันของเส้นใยชัดเจนกว่ากระดาษที่ผ่านการเคลือบด้วยสารละลายแป้งไฮโดรโฟบิกร่วมกับ AgNPs (Figure 2b) การเคลือบผิวหน้าด้วยสารละลายแป้งไฮโดรโฟบิก ทำให้เกิดผิวหน้ากระดาษเรียบ เนื่องจากช่องว่างระหว่างเส้นใยถูกเติมไปด้วยสารเคลือบ ทำให้โครงสร้างของกระดาษที่ผิวหน้ามีรูพรุนลดลง (Li *et al.,* 2015; Amini *et al.,* 2016) ความหนาของชั้นเคลือบ ดังแสดงใน Figure 2c ซึ่งมีความหนาประมาณ 6 ไมโครเมตร

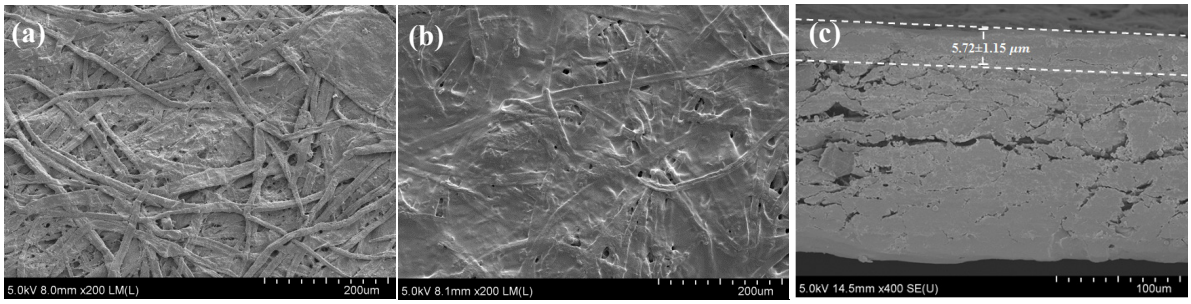


Figure 2 FE-SEM micrograph of (a) uncoated paper, (b) AgNPs coated paper and (c) cross-section of AgNPs coated layer.

คุณสมบัติเชิงกลของกระดาษต้านเชื้อรา

กระดาษที่ผลิตจากโรงงานอุตสาหกรรม จำเป็นต้องควบคุมคุณสมบัติเชิงกลของกระดาษให้เป็นไปตามมาตรฐาน ซึ่งมีความสำคัญมากต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นคุณสมบัติเชิงกลของกระดาษที่ผ่านการเคลือบด้วย AgNPs ควรได้รับการทดสอบเปรียบเทียบกับกระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบ พบว่าดัชนีความต้านทานต่อการดึง (Tensile index) ของกระดาษไม่ผ่านการเคลือบและผ่านการเคลือบในแนวขนานกับเครื่องจักร (Machine direction; MD) ไม่มีความแตกต่างกัน ในขณะที่ดัชนีความต้านทานต่อการดึงในแนวตั้งฉากกับเครื่องจักร (Cross machine direction; CD) และดัชนีความต้านทานต่อแรงดันทะลุ (Bursting index) เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เมื่อเปรียบเทียบกับกระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบ แสดงดัง Table 3 ซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่าดังกล่าว เกิดจากน้ำยาเคลือบผิวหน้ากระดาษมีคุณสมบัติเป็นฟิล์มที่ดี (Bruun, 2000).

Table 3 Mechanical properties of uncoated and AgNPs coated paper.

Mechanical properties	Paper	
	Uncoated	AgNPs coated
Basis weight (g/m^2)	133.88±1.25[a]	137.61±1.34[b]
Thickness (μm)	174.28±0.95[a]	180.00± 0.72[b]
Tensile index (Nm/g)	56.33±2.33[a]	56.02±3.56[a]
-MD	56.33±2.33[a]	56.02±3.56[a]
-CD	23.74±1.02[a]	25.94±0.98[b]
Bursting index (kPa m^2/g)	2.79±0.13[a]	3.08± 0.08[b]

Remark: Data are presented as mean ± standard deviation (n=10) followed by the same letters in the row, indicating that the numbers are not significantly different (p>0.05, based on the DMRT).

อายุการเก็บรักษาของดอกกล้วยไม้ในกล่องกระดาษบรรจุภัณฑ์

การทดสอบอัตราการติดเชื้อรา *C. gloeosporioides* และอายุการจัดเก็บรักษาของกล้วยไม้ตัดดอกในกล่องกระดาษบรรจุภัณฑ์ที่จำลองขึ้น พบว่ากล่องบรรจุภัณฑ์ที่ไม่ผ่านการเคลือบ (T_0) มีอัตราการติดเชื้อรา *C. gloeosporioides* สูงถึง 40% ในขณะที่กล่องบรรจุภัณฑ์ที่ผ่านการเคลือบด้วย AgNPs 50 ppm (T_3 และ T_4) มีอัตราการติดเชื้อรา *C. gloeosporioides* น้อยที่สุดคือ 12.5% แสดงดัง Table 4 และผลการทดสอบการยืดอายุการเก็บรักษาของกล้วยไม้ตัดดอกในกล่องกระดาษบรรจุภัณฑ์ที่จำลองขึ้น พบว่ากล่องกระดาษบรรจุภัณฑ์ที่เคลือบด้วย AgNPs 50 ppm (T_3 และ T_4) มีอายุการเก็บรักษากล้วยไม้ตัดดอกแตกต่างจากกล่องกระดาษบรรจุภัณฑ์ที่ไม่ผ่านการเคลือบ (T_0, T_1 และ T_2) อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทั้งนี้กล้วยไม้ตัดดอกในกล่องบรรจุภัณฑ์ที่เคลือบด้วย AgNPs 50 ppm และแช่น้ำยายืดอายุที่มีซิลเวอร์ไนเตรต (T_3) มีอายุการเก็บรักษามากที่สุด คือ 31.60 วัน มีความแตกต่างจากตัวอย่างควบคุม (T_0) ซึ่งมีอายุการเก็บรักษาเพียง 25.70 วัน

Table 4 Effect of pulsing solution and packing on disease rate and storage life of orchid cut flower

Treatments	Packaging	Pulsing solution	Infection[1] (%)	Storage life[1] (days)
T_0 (control)	Uncoated	Distilled	40.00±0.00[a]	25.70±2.16[a]
T_1	Uncoated	$AgNO_3$	29.17±1.44[a]	28.50±3.78[ab]
T_2	Uncoated	AgNPs	31.67±3.82[a]	26.20±2.94[ab]
T_3	AgNPs coated	$AgNO_3$	12.50±0.00[b]	31.60±2.95[c]
T_4	AgNPs coated	AgNPs	12.50±0.00[b]	29.00±3.71[c]

Remark: [1]Average±standard deviation (n=10) followed by the same letters in column are not significantly different (P>0.05, by Duncan's New Multiple Range Test (DMRT)) based

สรุป

ผลของกระดาษที่ผ่านการเคลือบด้วย AgNPs ต่อการต้านเชื้อรา *C. gloeosporioides* ทดสอบโดยวิธี Disc diffusion พบว่า กระดาษคราฟท์ที่ผ่านการเคลือบด้วย AgNPs 50 ppm มีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อราสูงสุด ทั้งนี้การเคลือบด้วยสารละลายแป้งไฮโดรโฟบิกร่วมกับ AgNPs 50 ppm ยังคงคุณสมบัติความแข็งแรงของกระดาษไว้ได้เมื่อเปรียบเทียบกับกระดาษคราฟท์ที่ไม่ผ่านการเคลือบ และเมื่อทำการทดสอบระยะเวลาในการยืดอายุการเก็บรักษาของดอกกล้วยไม้ในกล่องกระดาษบรรจุภัณฑ์ที่จำลองขึ้น พบว่า กล่องกระดาษบรรจุภัณฑ์ที่ผ่านเคลือบด้วย AgNPs 50 ppm และแช่ในน้ำยายืดอายุชั่วคราวที่ประกอบไปด้วยซิลเวอร์ไนเตรตสามารถลดอาการการติดเชื้อรา *C. gloeosporioides* ได้ดีที่สุด และมีอายุการจัดเก็บสูงสุดถึง 31.60 วัน ทั้งนี้จากผลการศึกษา ผู้วิจัยคาดว่าสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับบรรจุภัณฑ์พืชเศรษฐกิจอื่นๆ ได้ เช่น บรรจุภัณฑ์ห่อมะม่วง ส้ม มะนาว องุ่น พริก และสตอเบอรี่

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการทำกิจกรรมส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัยประเภทบัณฑิตศึกษา จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประจำปี พ.ศ. 2561

เอกสารอ้างอิง

ศูนย์บริการข้อมูลเศรษฐกิจการเกษตร สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (ผู้เผยแพร่). 2560. **สถิติส่งออกดอกกล้วยไม้สด 2555-2560**. (ไฟล์ข้อมูล). ศูนย์บริการข้อมูลเศรษฐกิจการเกษตร สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, กรุงเทพฯ.

สมศิริ แสงโชติ (ผู้เผยแพร่). 2554. **การสร้างระบบพยากรณ์โรคเพื่อการจัดการโรคของกล้วยไม้ในโรงเรือน**. (ไฟล์ข้อมูล). ภาควิชาโรคพืช คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สุธีรา วิทยากาญจน์, อุดมลักษณ์ สุขอัตตะ, ประภัสสร รักถาวร, ชัยพร สามพุ่มพวง, เกสรี กลิ่นสุคนธ์ และลลิตา คชารัตน์. 2557. การประยุกต์ใช้น้ำมันหอมระเหยจากใบของต้นยูคาลิปตัส และเสม็ดขาวเพื่อเป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์เพื่อการเกษตรและผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพ. *ใน* **งานการนำเสนอ**

ผลงานวิจัย โครงการวิจัยทุนอุดหนุนวิจัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ 2557. 14-15 กรกฎาคม 2015, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย.

Alvarez-Castellanos, P.P., C.D. Bishop and M.J. Pascual-Villalobos. 2001. Antifungal activity of the essential oils of flowerheads of garland chrysanthemum (*Chrysanthemum coronarium*) against agricultural pathogens. **Phytochemistry** 57: 99-102.

Amini, E., M. Azadfallah, M. Layeghi and R. Talaei-Hassanloui. 2016. Silver-nanoparticle-impregnated cellulose nanofiber coating for packaging paper. **Cellulose** 23: 557–570.

Bruun, S.E. 2000. Strach. pp. 241-249. *In* E. Lehtnen, ed. **Pigment coating and surface sizing of surface**. Gummerus Printing, Jyväskylä, Germany.

Bussaman, P., P. Namsena, P. Rattanasena and A. Chandrapatya. 2012. Effect of crude leaf extracts on *Colletotrichum gloeosporioides* (Penz.) Sacc. **Psyche**: 1-6.

Carbone, M., D.T. Donia, G. Sabbatella and R. Antiochia. 2016. Silver nanoparticles in polymeric matrices for fresh food packaging. **Journal of King Saud University-Science** 28: 273-279.

Chaichompoo, W. and K. Phichai. 2010. Effect of plant extract on growth inhibition of *Colletotrichum* sp. **MRUTTO Journal** 3: 18-25.

Chowdappa, P., S. Gowda, C.S. Chethana and S. Madhura. 2014. Antifungal activity of chitosan-silver nanoparticle composite against *Colletotrichum gloeosporioides* associated with mango anthracnose. **African journal of microbiology research** 8: 1803-1812.

Intili, H. S. and N. C. Lewisville. 1985. **Antimicrobial paper**. U.S. Patent 4533435.

Kang, H.C., Y.H. Park and S.J. Go. 2003. Growth inhibition of a phytopathogenic fungus, *Colletotrichum* species by acetic acid. **Microbiol. Res.** 158: 321–326.

Klimpl, F. and K. Sonenberg. 2005. **ANTIMICROBIAL PAPER**. US 6,939,442 B2.

Lamsal, K., S.W. Kim, J.H. Jung, Y.S. Kim, K.S. Kim and Y.S. Lee. 2011. Application of silver nanoparticles for the control of *Colletotrichum* species in *vitro* and pepper anthracnose disease in field. **Mycobiology** 39: 194-199.

Nokkrut, B., S. Pisutpiched and B. Puangsin. 2017. Effect of quaternary ammonium compounds and zinc pyrithione on antimicrobial properties in packaging containers for orchid cut flowers. **Thai J. For.** 36: 136-144.

Shi, X., B. Li, G. Qin and S.Tian. 2012. Mechanism of antifungal action of borate against *Colletotrichum gloeosporioides* related to mitochondrial degradation in spores. **Postharvest Biology and Technology** 67: 138–143.

Sumiński, P. 2011. Antimicrobial coatings on paper surface. pp. 1-14. *In* **EFPRO European Paper Week, Workshop: Early Stage Researchers–Presentation of Studies**. 15 November 2011, Brussels, Belgium.

คณะกรรมการฝ่ายวิชาการ

รองศาสตราจารย์ ดร.สุทธิพันธุ์ แก้วสมพงษ์		ประธานกรรมการ
รองศาสตราจารย์ ดร.อลิศรา มีนะกนิษฐ	ประธานสาขาพืช	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรรณวดี โสพรรณรัตน์	ประธานสาขาสัตว์	กรรมการ
ดร.จีรภา หินซุย	ประธานสาขาประมง	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สัตวแพทย์หญิง ดร.สิริรัตน์ นิยม	ประธานสาขาสัตวแพทยศาสตร์	กรรมการ
ดร.ศิริพร เรียบร้อย คิม	ประธานสาขาส่งเสริมการเกษตรและคหกรรมศาสตร์	กรรมการ
รองศาสตราจารย์ ดร.อรินทิพย์ ธรรมชัยพิเนต	ประธานสาขาวิทยาศาสตร์และพันธุวิศวกรรม	กรรมการ
รองศาสตราจารย์ ดร.ชาติ เจียมไชยศรี	ประธานสาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ขนิษฐา วัชราภรณ์	ประธานสาขาอุตสาหกรรมเกษตร	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นฤมล แก้วจำปา	ประธานสาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.หฤทัย นำประเสริฐชัย	ประธานสาขาเศรษฐศาสตร์และบริหารธุรกิจ	กรรมการ
ดร.พิกุล เอกวรางกูร	ประธานสาขาศึกษาศาสตร์	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นาวาอากาศโทหญิง ดร.งามลมัย ผิวเหลือง	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

รายชื่อผู้ทงคุณวุฒิ

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. ผศ.ดร.ชนิกานต์ ยิ้มประยูร	คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์
2. ผศ.ดร.นวลวรรณ ทวยเจริญ	คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์
3. ศ.อรศิริ ปาณินท์	คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์
4. ผศ.ดร.ชลอ จารุสุทธิรักษ์	ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
5. ผศ.ดร.สุรัตน์ บัวเลิศ	ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
6. ดร.นวทัศน์ ก้องสมุทร	ภาควิชาวิศวกรรมการบินและอวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์
7. ผศ.ดร.ศิริพงศ์ อติพันธ์	ภาควิชาวิศวกรรมการบินและอวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์
8. ผศ.ดร.อารยา ศักดิ์บูรณาเพชร	ภาควิชาวิศวกรรมการบินและอวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์
9. ผศ.ดร.กานดิส สุดสาคร	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
10. รศ.ดร.ไพศาล คงคาฉุยฉาย	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
11. ดร.ภีรพรรณ ดิษฐเนตร	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
12. รศ.ดร.เมตตา เจริญพานิช	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
13. ดร.บุญธรรม ปวีณ์วรรณ	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
14. ผศ.ดร.ณัฐศักดิ์ บุญมี	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
15. ผศ.ดร.ธำรงค์ พุทธาพิทักษ์ผล	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
16. รศ.ดร.วิทิต ฉัตรรัตนกุลชัย	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
17. ดร.อรรถพร วิเศษสินธุ์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
18. รศ.ดร.ชวลิต กิตติชัยการ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
19. ผศ.ดร.พรรณพิมพ์ พุทธรักษา มะเปี่ยม	ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์
20. รศ.ดร.อดิชัย พรพรหมินทร์	ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์
21. ผศ.ดร.สุภัทรชัย ชมพันธุ์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
22. รศ.ดร.เกียรติยุทธ กวีญาณ	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
23. ผศ.ดร.ธีรสิทธิ์ เกษตรเกษม	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
24. รศ.ดร.พีระยศ แสนโภชน์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
25. รศ.ดร.วิรุณศักดิ์ สันติเพ็ชร์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
26. รศ.ดร.วุฒิพงศ์ อารีกุล	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
27. ผศ.ดร.ศิริโรจน์ ศิริสุขประเสริฐ	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
28. รศ.ดร.อภินิติ โชติสังกาศ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

29. ผศ.ดร.เอกชัย ศิริพานิชย์กูล ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
30. ผศ.ดร.กิจพัฒน์ ภู่รวรรณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
31. ผศ.ดร.เหมือนมาศ วิเชียรสินธุ์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
32. รศ.ดร.ประเสริฐ สุวรรณวิทยา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
33. ผศ.ดร.สโรช บุญศิริพันธ์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
34. ดร.สุสิทธิ์ ฉายประกายแก้ว ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
35. รศ.ดร.ปิยะ โชติกไกร ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
36. รศ.ดร.นุชนภา ตั้งบริบูรณ์ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์
37. ดร.ยุรนันท์ หาญลำยวง ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์
38. ผศ.ดร.วิลาสินี อยู่ชัชวาล ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
39. รศ.ดร.วิไล เจียมไชยศรี ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
40. รศ.ดร.สัญญา สิริวิทยาปกรณ์ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
41. ผศ.ดร.จักรพันธ์ อร่ามพงษ์พันธ์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
42. ผศ.ดร.ชนะ รักษ์ศิริ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
43. ผศ.ดร.นันทชัย กานตานันทะ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
44. รศ.ดร.พิชิต สุขเจริญพงศ์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
45. ผศ.ดร.สุวิชภรณ์ วิชกูล ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
46. รศ.ดร.อนันต์ มุ่งวัฒนา ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
47. ผศ.ดร.จันทร์ศิริ สิงห์เถื่อน ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
48. ผศ.ดร.วิสุทธิ์ สุพิทักษ์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ

สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ : ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก

1. ดร.เจษฎาภรณ์ ปริยดำกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
2. ศ.ดร.ชวลิต ชาลีรักษ์ตระกูล ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
3. ผศ.ดร.ทรงยศ นาคอริยกุล ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
4. ดร.สมโภค กิ่งแก้ว ภาควิชาอนามัยสิ่งแวดล้อม คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

5. ผศ.ดร.ชินพัฒน์ บัวชาติ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
6. ดร.ทรงยศ กิจธรรมเกษร	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
7. รศ.ดร.ปิติวัฒน์ วัฒนชัย	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
8. ผศ.ดร.พีรพงศ์ จิตเสงี่ยม	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
9. รศ.ดร.สุทธิชัย เปรมฤดีปรีชาชาญ	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
10. รศ.ดร.รัตนา รุจิรวนิช	วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
11. ศ.ดร.ศิริรัตน์ จิตการค้า	วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
12. ศ.ดร.สุจิตรา วงศ์เกษมจิตต์	วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
13. ผศ.ดร.ปัญญวัชร์ วังยาว	ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
14. ผศ.ดร.สุวันชัย พงษ์สุกิจวัฒน์	ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
15. รศ.ดร.เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย	ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
16. ผศ.ดร.ศิริธันว์ เจียมศิริเลิศ	ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
17. รศ.ดร.นพิดา หิญชีระนันทน์	ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
18. รศ.ดร.สุธา ขาวเธียร	ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย
19. ผศ.ดร.สุรชัย ชัยทัศนีย์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
20. ผศ.ดร.ธาริณี รามสูต	คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร
21. ผศ.วรรณณา ธิธรรมมา	ภาควิชาเครื่องเคลือบดินเผา คณะมัณฑนศิลป์ มหาวิทยาลัยศิลปากร

22. ดร.นพคุณ บุญกระพือ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
23. รศ.ดร.เบญจมาศ พนมรัตนรักษ์	ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุมและเครื่องมือวัด คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
24. ผศ.ดร.สนิท วงษา	ภาควิชาครุศาสตร์โยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
25. รศ.ดร.ยิ่งสวัสดิ์ ไชยะกุล	คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
26. รศ.ดร.อาคม แก้วระวัง	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
27. ดร.สุทธิศักดิ์ ลาภประเสริฐ	การประปานครหลวง
28. ผศ.ดร.สุมนมาลย์ เนียมหลาง	ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
29. ดร.สุรพิชญ ลอยกุลนันท์	ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC)
30. ดร.อนัญญา กรรณสูต	คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการออกแบบ มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ วิทยาเขตบางนา
31. ผศ.ดร.อริสรา ชัยกิตติรัตนา	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

Editorial Board

Subject : Architecture and Engineering (internal)

1. Asst.Prof.Dr.Chanikarn Yimprayoon
2. Asst.Prof.Dr.Nuanwan Tuaycharoen
3. Prof.Orsiri Panin
4. Asst.Prof.Dr.Chalor Jarusutthirak
5. Asst.Prof.Dr.Surat Bualert
6. Dr.Navatasn Kongsamutr
7. Asst.Prof.Dr.Siripong Atipan
8. Asst.Prof.Dr.Araya Sakburanapech
9. Asst.Prof.Dr.Kandis Sudsakorn
10. Assoc.Prof.Dr.Paisan Kongkachuiychay
11. Dr.Peerapan Dittanet
12. Assoc.Prof.Dr.Metta Chareonpanich
13. Dr.Boontham Paweewan
14. Asst.Prof.Dr.Nathasak Boonmee
15. Asst.Prof.Dr.Tumrong Puttapitukporn
16. Assoc.Prof.Dr.Withit Chatlatanagulchai
17. Dr.Attaporn Wisessint
18. Assoc.Prof.Dr.Chawalit Kittichaikarn
19. Asst.Prof.Dr.Punpim Puttaraksa Mapiam
20. Assoc.Prof.Dr.Adichai Pornprommin
21. Asst. Prof.Dr.Suphattharachai Chomphan
22. Assoc.Prof.Dr.Kiatiyuth Kveeyarn 23. Asst.Prof.Dr.Teerasit Kasetkasem
24. Assoc.Prof.Dr.Peerayot Sanposh
25. Assoc.Prof.Dr.Wiroonsak Santipach
26. Assoc.Prof.Dr.Vutipong Areekul
27. Asst.Prof.Dr.Siriroj Sirisukprasert
28. Assoc.Prof.Dr.Apiniti Jotisankasa
29. Asst.Prof.Dr.Ackchai Sirikijpanichkul
30. Asst.Prof.Dr.Kitjapat Phuvoravan
31. Asst.Prof.Dr.Muanmas Wichiensin
32. Assoc.Prof.Dr.Prasert Suwanvitaya
33. Asst.Prof.Dr.Saroch Boonsiripant
34. Dr.Susit Chaiprakaikeow
35. Assoc.Prof.Dr.Piya Chotickai
36. Assoc.Prof.Dr.Nuchnapa Tangboriboon
37. Dr.Yuranan Hanlumyuang
38. Asst.prof.Dr.Wilasinee Yoochatchaval
39. Assoc.Prof.Dr.Wilai Chiemchaisri
40. Assoc.Prof.Dr.Sanya Sirivithayapakorn
41. Asst.Prof.Dr.Chuckaphun Aramphongphun
42. Asst.Prof.Dr.Chana Raksiri
43. Asst.Prof.Dr.Nantachai Kantanantha
44. Assoc.Prof.Dr.Pichit Sukchareonpong
45. Asst.Prof.Dr.Suwitchaporn Witchakul
46. Assoc.Prof.Dr.Anan Mungwattana
47. Asst.Prof.Dr.Chansiri Singhtaun
48. Asst.Prof.Dr.Wisut Supithak

Subject : Architecture and Engineering (external)

1. Dr.Jetsadaporn Priyadumkol
2. Prof.Dr.Chavalit Chaleeraktrakoon
3. Asst.Prof.Dr.Songyot Nakariyakul
4. Dr.Sompoke Kingkaew
5. Asst.Prof.Dr.Chinapat Buachart
6. Dr.Songyot Kitthamkesorn
7. Assoc.Prof.Dr.Pitiwat Wattanachai
8. Asst.Prof.Dr.Peerapong Jitsangiam
9. Assoc.Prof.Dr.Suttchai Premrudeepreechacharn
10. Assoc.Prof.Dr.Ratana Rujiravanit
11. Prof.Dr.Sirirat Jitkanka
12. Prof.Dr.Sujitra Wongkasemjit
13. Asst.Prof.Dr.Panyawat Wangyao
14. Asst.Prof.Dr.Suvanchai Pongsugitwat
15. Assoc.Prof.Dr.Seksak Asavavisithchai
16. Asst.Prof.Dr.Sirithan Jiemsirilers
17. Assoc.Prof.Dr.Napida Hinchiranan
18. Assoc.Prof.Dr.Sutha Khaodhiar
19. Asst.Prof.Dr.Surachai Chaitusaney
20. Assoc.Prof.Dr.Tharinee ramasoot
21. Asst.Prof.Wanna Thithamma
22. Dr.Noppakun Boonkrapue
23. Assoc.Prof.Dr.Benjamas Panomruttanarug
24. Asst.Prof.Dr.Sanit Wongsa
25. Assoc.Prof.Dr.Yingsawad Chaiyakul
26. Assoc.Prof.Dr.Arkom Kaewrawang
27. Dr.Sutthisak Lapprasert
28. Asst.Prof.Dr.Sumonman Niamlang
29. Dr.Surapich Loykulnant
30. Dr.Anaya Kannasoot
31. Asst.Prof.Dr.Arisara Chaikittiratana

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ

สาขาอุตสาหกรรมเกษตร : ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน

1. ดร.จีรภา หินชุย ภาควิชาผลิตภัณฑ์ประมง คณะประมง
2. ผศ.ดร.เยาวภา ไหวพริบ ภาควิชาผลิตภัณฑ์ประมง คณะประมง
3. ผศ.ดร.รณฤทธิ์ ฤทธิรณ ภาควิชาวิศวกรรมการอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน
4. รศ.ดร.ธัญญารัตน์ จิญกาญจน์ ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
5. ผศ.ดร.บุษรินทร์ จงเจริญยานนท์ ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
6. ดร.ปิยะวณี จริยะสกุลโรจน์ ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
7. รศ.ดร.ภาณุวัฒน์ สรรพกุล ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
8. รศ.ดร.รังรอง ยกส้าน ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
9. ผศ.ดร.เลอพงศ์ จารุพันธ์ ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
10. รศ.ดร.วาณี ชนเห็นชอบ ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
11. ผศ.ดร.อำพร เสน่ห์ ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
12. ดร.กิติพงษ์ รัตนาภรณ์ ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
13. ผศ.ดร.ประกิต สุขใย ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
14. รศ.ดร.ภคมน จิตประเสริฐ ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
15. รศ.ดร.วิรัตน์ วาณิชย์ศรีรัตนา ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
16. ดร.วิลาวัลย์ สินธุประภา ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
17. ดร.สุมัลลิกา โมรากุล ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
18. ดร.อภิชญา ลีลาวณิชกุล ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
19. ผศ.ดร.อัจฉรา เกษสุวรรณ ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
20. รศ.ดร.กมลวรรณ แจ้งชัด ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
21. ผศ.ดร.ทานตะวัน พิรักษ์ ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
22. ผศ.ดร.เทพกัญญา หาญศีลวัต ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
23. ดร.นพรัตน์ ปราบสงบ ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
24. ผศ.ดร.ปิติพร ฤทธิเรืองเดช 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.	ผศ.ดร.จันทร์ทิพย์ เศรษฐยานนท์	ภาควิชาวิทยาการสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
30.	ผศ.ดร.พรทิพย์ ธูปถมพงศ์	ภาควิชาวิทยาการสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
31.	ผศ.ดร.กฤษกมล ณ จอม	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
32.	ดร.กุลนาถ ทองขาว	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
33.	ผศ.ดร.จิตศิริ ราชตนะพันธุ์	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
34.	รศ.ดร.น้ำฝน ลำดับวงศ์	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
35.	รศ.ดร.ปริศนา สุวรรณาภรณ์	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
36.	ดร.ปัทธิมา อุดมไพจิตรกุล	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
37.	ผศ.ดร.มาศอุบล ทองงาม	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
38.	ดร.เยาวภา หล่อเจริญผล	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
39.	รศ.ดร.วรรณี จิรภาคย์กุล	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
40.	รศ.ดร.วราภรณ์ บุญทรัพย์ทิพย์	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
41.	รศ.ดร.วีรเชษฐ์ จิตตาณิชย์	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
42.	ผศ.ดร.ศศิธร ตรงจิตภักดี	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
43.	ผศ.ดร.สิริชัย ส่งเสริมพงษ์	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
44.	ผศ.ดร.สุดสาย ตรีวานิช	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร

45.	ผศ.ดร.อุทัย กลิ่นเกษร	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
46.	ดร.รังสิมา ชลคุป	สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตร และอุตสาหกรรมเกษตร
47.	ดร.อุดมลักษณ์ สุขอัตตะ	สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตร และอุตสาหกรรมเกษตร
48.	น.ส.กรุณา วงษ์กระจ่าง	สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร
49.	น.ส.ชมดาว สิกขะมณฑล	สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร
50.	น.ส.ประจงเวท สาตมาลี	สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร
51.	ดร.วราภรณ์ ประเสริฐ	สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร
52.	ดร.วิภา สุโรจนะเมธากุล	สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร
53.	ดร.สุมิตรา บุญบำรุง	สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร
54.	น.ส.อภิญญา จุฑางกูร	สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร

สาขาอุตสาหกรรมเกษตร : ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก

1.	ดร.อมรา ชินภูติ	กองวิจัยและพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว และแปรรูปผลิตผลเกษตร กรมวิชาการเกษตร
2.	ผศ.ดร.ดนุพล หุ่นโสภณ	ภาควิชาการตลาด คณะพาณิชยศาสตร์และการบัญชี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
3.	รศ.ดร.กัลยา เลาหสงคราม	ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
4.	ผศ.ดร.ธนจันทร์ มหาวนิช	ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
5.	ผศ.ดร.อินทาวุธ สรรพวรสถิตย์	ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
6.	รศ.ดร.สีหนาท ประสงค์สุข	ภาควิชาพฤกษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
7.	รศ.ดร.เข็มชัย เหมะจันทร	ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
8.	รศ.ดร.สุนีย์ นิธิสินประเสริฐ	ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

9. รศ.ดร.สงวนศรี เจริญเหรียญ	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
10. ศ.ดร.อรอนงค์ นัยวิกุล	ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
11. ผศ.ดร.จิรวรรณ อภิรักษากร	สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น
12. ดร.รัทรดา เทพประดิษฐ์	คณะอุตสาหกรรมเกษตรและชีวภาพ มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง
13. ผศ.ดร.รัชนี เจริญ	คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตปราจีนบุรี
14. รศ.ดร.ประภาศรี เทพรักษา	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
15. ผศ.ดร.รชา เทพษร	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
16. ผศ.ดร.สมโภช พจนพิมล	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
17. ดร.สุธีรา วัฒนกุล	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
18. ผศ.ดร.ปริตา ธนสุกาญจน์	ภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร
19. ดร.จารุภัทร ลือชา	สาขาวิชาอุตสาหกรรมอาหาร มหาวิทยาลัยมหิดล วิทยาเขตกาญจนบุรี
20. ผศ.ดร.อดิศักดิ์ จูมวงษ์	สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้
21. ผศ.ดร.เอกชัย ชูเกียรติโรจน์	สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง
22. ดร.ปิยาภรณ์ เชื่อมชัยตระกูล	สำนักวิชาอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง
23. รศ.ดร.มนัส ชัยจันทร์	สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
24. ผศ.ดร.เอกพันธ์ แก้วมณีชัย	ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร
25. ผศ.ดร.บุศรินทร์ เฆษะปะบุตร	ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร
26. รศ.ดร.วรัญญู ศรีเดช	ภาควิชาเทคโนโลยีวัสดุภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

27. ผศ.ดร.มุทิตา มีนุ่น	ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
28. ผศ.ดร.พิชญอร ไหมสุทธิสกุล	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย
29. รศ.ดร.วรรณา ตั้งเจริญชัย	คณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
30. รศ.ดร.อดิศร เสวตวิวัฒน์	คณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
31. ดร.สุนีย์ โชตินีรนาท	ศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ

Editorial Board

Subject : Agro-Industry (internal)

1. Dr.Jirapa Hinsui
2. Asst.Prof.Dr.Yaowapha Waiprib
3. Asst.Prof.Dr.Ronnarit Rittiron
4. Assoc.Prof.Dr.Tunyarut Jinkarn
5. Asst.Prof.Dr.Busarin Chongcharoenyanon
6. Dr.Piyawanee Jariyasakoolroj
7. Assoc.Prof.Dr.Panuwat Suppakul
8. Assoc.Prof.Dr.Rangrong Yoksan
9. Asst.Prof.Dr.Lerpong Jarupan
10. Assoc.Prof.Dr.Vanee Chonhenchob
11. Asst.Prof.Dr.Amporn Sane
12. Dr.Kittipong Rattanaporn
13. Asst.Prof.Dr.Prakit Sukyai
14. Assoc.Prof.Dr.Pakamon Chitprasert
15. Assoc.Prof.Dr.Wirat Vanichsriratana
16. Dr.Wilawan Sintuprapa
17. Dr.Sumallika Morakul
18. Dr.Apichaya Lilavanichakul
19. Asst.Prof.Dr.Ajchara Kessuvan
20. Assoc.Prof.Dr.Kamolwan Jangchud
21. Asst.Prof.Dr.Tantawan Pirak
22. Asst.Prof.Dr.Thepkunya Harnsilawat
23. Dr.Nopparat Prabsangob
24. Asst.Prof.Dr.Pitiporn Ritthiruangdej
25. Asst.Prof.Dr.Walairut Chantarapanont
26. Asst.Prof.Dr.Withida Chantrapornchai
27. Dr.Siwaporn O'Charoen
28. Assoc.Prof.Dr.Suntaree Suwonsichon
29. Asst.Prof.Dr.Jantip Setthayanond
30. Asst.Prof.Dr.Porntip Tooptompong
31. Asst.Prof.Dr.Kriskamol Na Jom
32. Dr.Kullanart Tongkhao
33. Asst.Prof.Dr.Chitsiri Rachtanapun
34. Assoc.Prof.Dr.Namfone Lumdubwong
35. Assoc.Prof.Dr.Prisana Suwannaporn
36. Dr.Pathima Udompijitkul
37. Asst.Prof.Dr.Masubon Thongngam
38. Dr.Yaowapa Lorjaroenphon
39. Assoc.Prof.Dr.Wannee Jirapakkul
40. Assoc.Prof.Dr.Waraporn Boonsupthip
41. Assoc.Prof.Dr.Weerachet Jittanit
42. Asst.Prof.Dr.Sasitorn Tongchitpakdee
43. Asst.Prof.Dr.Sirichai Songsermpong
44. Asst.Prof.Dr.Sudsai Trevanich
45. Asst.Prof.Dr.Utai Klinkesorn
46. Dr.Rungsima Chollakup
47. Dr.Udomlak Sukatta
48. Miss Karuna Wongkrajang
49. Miss Chomdao Sikkhamondhol
50. Miss Prajongwate Satmalee
51. Dr.Waraporn Prasert
52. Dr.Vipa Surojanametakul
53. Dr.Sumitra Boonbumrung
54. Miss Apinya Chudhangkura

Subject : Agro-Industry (external)

1. Dr.Amara Chinaphuti
2. Asst.Prof.Dr.Danupol Hoonsopon
3. Assoc.Prof.Dr.Kalaya Laohasongkram
4. Asst.Prof.Dr.Thanachan Mahawanich
5. Asst.Prof.Dr.Inthawoot Suppavorasatit
6. Assoc.Prof.Dr.Sehanat Prasongsuk
7. Assoc.Prof.Dr.Khemchai Hemachandra
8. Assoc.Prof.Dr.Sunee Nitisinprasert
9. Assoc.Prof.Dr.Sanguansri Charoenrein
10. Prof.Dr.Onanong Naivikul
11. Asst.Prof.Dr.Jirawan Apiraksakorn
12. Dr.Rutrada Theppradit
13. Asst.Prof.Dr.Ratchanee Charoen
14. Assoc.Prof.Dr.Prapasri Theprugsa
15. Asst.Prof.Dr.Racha Tepsorn
16. Asst.Prof.Dr.Sompoche Pojjanapimol
17. Dr.Suteera Vathanakul
18. Asst.Prof.Dr.Parita Thanasukarn
19. Dr.Jarupat Luecha
20. Asst.Prof.Dr.Adisak Joomwong
21. Asst.Prof.Dr.Ekachai Chukeatirote
22. Dr.Piyaporn Chueamchaitrakun
23. Assoc.Prof.Dr.Manat Chaijan
24. Asst.Prof.Dr.Eakaphan Keowmaneechai
25. Asst.Prof.Dr.Bussarin Ksapabutr
26. Assoc.Prof.Dr.Waranyou Sridach
27. Asst.Prof.Dr.Mutita Meenune
28. Asst.Prof.Dr.Pitchaon Maisuthisakul
29. Assoc.Prof.Dr.Wanna Tungjaroenchai
30. Assoc.Prof.Dr.Adisorn Swetwiwathana
31. Dr.Sunee Chotineeranat

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ

สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม : ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน

1.	รศ.ดร.วิพักตร์ จินตนา	ภาควิชาการจัดการป่าไม้ คณะวนศาสตร์
2.	ดร.นิตยา เมี้ยนมิตร	ภาควิชาการจัดการป่าไม้ คณะวนศาสตร์
3.	ดร.สุรินทร์ อ้นพรม	ภาควิชาการจัดการป่าไม้ คณะวนศาสตร์
4.	ผศ.ดร.รัชนี โพธิแท่น	ภาควิชาการจัดการป่าไม้ คณะวนศาสตร์
5.	ดร.กฤษฎาพันธุ์ ผลากิจ	ภาควิชาการจัดการป่าไม้ คณะวนศาสตร์
6.	ผศ.ดร.วีระภาส คุณรัตนสิริ	ภาควิชาการจัดการป่าไม้ คณะวนศาสตร์
7.	รศ.ดร.สันติ สุขสอาด	ภาควิชาการจัดการป่าไม้ คณะวนศาสตร์
8.	นายศุภศิษย์ ศรีอักขรินทร์	ภาควิชาการจัดการป่าไม้ คณะวนศาสตร์
9.	รศ.ดร.ดอกรัก มารอด	ภาควิชาชีววิทยาป่าไม้ คณะวนศาสตร์
10.	ศ.ดร.ยงยุทธ ไตรสุรัตน์	ภาควิชาชีววิทยาป่าไม้ คณะวนศาสตร์
11.	ดร.ธารรัตน์ แก้วกระจ่าง	ภาควิชาชีววิทยาป่าไม้ คณะวนศาสตร์
12.	รศ.ดร.รองลาภ สุขมาสรวง	ภาควิชาชีววิทยาป่าไม้ คณะวนศาสตร์
13.	รศ.ดร.ประทีป ด้วงแค	ภาควิชาชีววิทยาป่าไม้ คณะวนศาสตร์
14.	ผศ.ดร.สคาร ทีจันทึก	ภาควิชาวนวัฒนวิทยา คณะวนศาสตร์
15.	ผศ.ดร.นฤมล แก้วจำปา	ภาควิชาอนุรักษวิทยา คณะวนศาสตร์
16.	ผศ.ดร.สมนิมิตร พุกงาม	ภาควิชาอนุรักษวิทยา คณะวนศาสตร์
17.	ผศ.ดร.ปิยพงษ์ ทองดีนอก	ภาควิชาอนุรักษวิทยา คณะวนศาสตร์
18.	ดร.ยุทธพงษ์ คีรีมังคละ	ภาควิชาอนุรักษวิทยา คณะวนศาสตร์
19.	ดร.วีนัส ต่วนเครือ	ภาควิชาอนุรักษวิทยา คณะวนศาสตร์
20.	รศ.ดร.ภัทรา เพ่งธรรมกีรติ	ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
21.	ผศ.ดร.อรอนงค์ ผิวนิล	ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
22.	ดร.กิตติชัย ดวงมาลย์	ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
23.	ดร.ธนิศร์ ปัทมพิฑูร	ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
24.	ดร.สตรีไทย พุ่มไม้	ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
25.	ผศ.ดร.ธนาภรณ์ อธิปัญญากุล	ภาควิชาเศรษฐศาสตร์เกษตรและทรัพยากร คณะเศรษฐศาสตร์
26.	ผศ.ดร.รัติยา พงศ์พิสุทธา	ภาควิชาโรคพืช คณะเกษตร กำแพงแสน

สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม : ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก

1.	ผศ.ดร.แหลมไทย อาษานอก	สาขาเกษตรป่าไม้ มหาวิทยาลัยแม่โจ้-แพร่ เฉลิมพระเกียรติ
2.	รศ.ดร.ดุสิต เวชกิจ	สาขาส่งเสริมการเกษตรและสหกรณ์ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช
3.	ดร.คมสัน เรืองฤทธิ์สาระกุล	ส่วนพัฒนาวนศาสตร์ชุมชน สำนักจัดการป่าชุมชน กรมป่าไม้
4.	ดร. สิทธิศักดิ์ หมูคำหล้า	สถาบันวิทยาการอวกาศและภูมิสารสนเทศ (GISTDA Academy) สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน)
5.	ดร.รัฐกร สืบคำ	กลุ่มวิจัยปฐพีวิทยา กองวิจัยพัฒนาปัจจัยการผลิตทางการเกษตร กรมวิชาการเกษตร
6.	นางพิณทิพย์ ธิติโรจนะวัฒน์	สำนักอนุรักษ์และจัดการต้นน้ำ กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช
7.	ดร.พรทิพย์ โพนตุแสง	สาขาวิชาปฐพีศาสตร์และสิ่งแวดล้อม คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
8.	นายศุภกิจ วินิตพรสวรรค์	กลุ่มงานวิจัยสัตว์ป่า สำนักอนุรักษ์สัตว์ป่า กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช
9.	ดร.วรงค์ สุขเสวต	สถาบันวิจัยวลัยรุกขเวช มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
10.	ดร.ฉัตรพรรษ พงษ์เจริญ	ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
11.	รศ.ดร.ชุลีมาศ บุญไทย อิวาย	สาขาวิชาปฐพีศาสตร์และสิ่งแวดล้อม คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
12.	ดร.บารมี สกลรักษ์	สำนักวิจัยการอนุรักษ์ป่าไม้และพันธุ์พืช กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช

Editorial Board

Subject : Natural Resources and Environment (internal)

1. Assoc.Prof.Dr.Vipak Jintana
2. Dr.Nittaya Mianmit
3. Dr.Surin Onprom
4. Asst.Prof.Dr.Rachanee Pothitan
5. Dr.Kritsadapan Palakit
6. Asst.Prof.Dr.Weeraphart Khunrattanasiri
7. Assoc.Prof.Dr.Santi Suksard
8. Mr.Supasit Sriarkarin
9. Assoc.Prof.Dr.Dokrak Marod
10. Prof.Dr.Yongyut Trisurat
11. Dr.Tarnrat Kaewgrajang
12. Assoc.Prof.Dr.Ronglarp Sukmasuang
13. Assoc.Prof.Dr.Prateep Duengkae
14. Asst.Prof.Dr.Sakhan Teejuntuk
15. Asst.Prof.Dr.Naruemol Kaewjampa
16. Asst.Prof.Dr.Somnimirt Pukngam
17. Asst.Prof.Dr.Piyapong Tongdeenok
18. Dr.Yutthaphong Kheereemangkla
19. Dr.Venus Tuankrua
20. Assoc.Prof.Dr.Patthra Pengthamkeerati
21. Asst.Prof.Dr.Onanong Phewnil
22. Dr.Kittichai Duangmal
23. Dr.Thanit Pattamapitoon
24. Dr.Satreethai Poommai
25. Asst.Prof.Dr.Thanaporn Athipanyakul
26. Asst.Prof.Dr.Ratiya Pongpisutta

Subject : Natural Resources and Environment (external)

1. Asst.Prof.Dr.Lamthai Asanok
2. Assoc.Prof.Dr.Dusit Wechakit
3. Dr.Komsan Rueangritsarakul
4. Dr.Sitthisak Moukomla
5. Dr.Ratgon Suebkam
6. Mrs.Pintip Thitirojanawat
7. Dr.Porntip Phontusang
8. Mr.Supagit Vinitpornsawan
9. Dr.Warong Suksavate
10. Dr.Chattraphas Pongcharoen
11. Assoc.Prof.Dr.Chuleemas Boonthai Iwai
12. Dr.Baramee Sakolrak

คณะกรรมการฝ่ายจัดพิมพ์เอกสาร

ดร.นีรนุช ภาชนะทิพย์
ที่ปรึกษา
นายปัญญา ซื่อตรง
ประธานกรรมการ

นายจรูญศักดิ์ สวนสวรรค์
รองประธานกรรมการ

นางมัลลิกา เกตุชรารัตน์
รองประธานกรรมการ

นางสาวปฐมาวดี กุลวัฒนะไพศาล
รองประธานกรรมการ

นางวัชรี ทองทิพย์
กรรมการ

นางสาวยลรวิวรรณ วิบูรณวงศ์
กรรมการ

นายวิทยา วงษ์เอี่ยม
กรรมการ

นายภานุวัฒน์ บุญชัยกมลอากร
กรรมการ

นางปนัดดา ดีหะริง
กรรมการ

นายวัชระ นิลประพันธ์
กรรมการ

นางสาวจิราวรรณ สุริยกุล ณ อยุธยา
กรรมการ

นางสาวอุดมลักษณ์ พลอยสุวรรณ
กรรมการ

นางสาวธิดา จันทาพูน
กรรมการ

นางสาวสุดธิดา มีสวัสดิ์
กรรมการ

นางสาวกฤษฎี ปริวัตรกุล
กรรมการและเลขานุการ

นางสาวศลิษา หวานวาจา
กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

นางสุฌานี ศรีดี
กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

นางนฤมล อินถา
กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

นางสาวธัญญ์นัฐดา กุนอก
กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

"มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เป็นสถาบันที่มีปณิธานมุ่งมั่นในการสั่งสมเสาะแสวงหา
และพัฒนาความรู้ให้เกิดความเจริญงอกงามทางภูมิปัญญา
ที่เพียบพร้อมด้วยวิชาการ จริยธรรม และคุณธรรม
ตลอดจนเป็นผู้ชี้นำทิศทาง สืบทอดเจตนารมณ์ที่ดีของสังคม
เพื่อความคงอยู่ ความเจริญ
และความเป็นอารยะของชาติ"

จัดโดย

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ร่วมกับ

สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา

กระทรวงศึกษาธิการ

กระทรวงเกษตรและสหกรณ์

กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

กระทรวงดิจิทัลเพื่อเศรษฐกิจและสังคม

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

ISBN 978-616-278-510-8

ฝ่ายเลขานุการคณะกรรมการดำเนินการจัดการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 57

ฝ่ายบริการการศึกษา สำนักทะเบียนและประมวลผล ชั้น 7 อาคารระพีสาคริก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

โทร. โทรสาร 02 118 0143 และ 02 118 0145 E-mail : annualconference@ku.ac.th

http://annualconference.ku.ac.th

เอกสารวิชาการฝ่ายบริการการศึกษา สำนักทะเบียนและประมวลผล มก. 5/2562