# การประชุมทางวิชาการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 62

## The 62nd Kasetsart University Annual Conference

วันที่ 5-7 มีนาคม 2567 ณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน

"ศาสตร์แห่งแผ่นดิน เพื่อเป้าหมายการพัฒนาอย่างยั่งยืนและความเป็นกลางทางคาร์บอน"
"Knowledge of the Land for SDGs and Carbon Neutrality"

# Proceedings No. 2

## SCIENCE TECHNOLOGY AND ENVIRONMENT

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

# เรื่องเต็มการประชุมทางวิชาการมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 62

The Proceedings of the 62nd Kasetsart University Annual Conference

5-7 มีนาคม 2567 (March 5-7, 2024)

## เล่มที่ 2

**สาขาวิทยาศาสตร์**

(Subject: Science)

**สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์**

(Subject: Engineering and Architecture)

**สาขาอุตสาหกรรมเกษตร**

(Subject: Agro-Industry)

**สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม**

(Subject: Natural Resources and Environment)

# การประชุมทางวิชาการมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 62

The 62nd Kasetsart University Annual Conference

5-7 มีนาคม 2567 (March 5-7, 2024)

**จัดโดย** (Organized by)

**มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์** (Kasetsart University)

**ร่วมกับ** (in cooperation with)

กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม

กระทรวงเกษตรและสหกรณ์

กระทรวงศึกษาธิการ

กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

กระทรวงดิจิทัลเพื่อเศรษฐกิจและสังคม

สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม

สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ

เครือข่ายวิจัยประชาชื่น

สมาคมเมล็ดพันธุ์แห่งประเทศไทย

สมาคมนักวิชาการอ้อยและน้ำตาลแห่งประเทศไทย

สมาคมวิทยาศาสตร์เกษตรในพระบรมราชูปถัมภ์

สมาคมดินและปุ๋ยแห่งประเทศไทย

สมาคมนักโรคพืชแห่งประเทศไทย

สมาคมสภาวิชาการอุตสาหกรรมเกษตร

สมาคมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีทางอาหารแห่งประเทศไทย

สัตวแพทยสภา

สัตวแพทยสมาคมแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์

# เรื่องเต็มการประชุมทางวิชาการมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 62

The Proceedings of the 62nd Kasetsart University Annual Conference

**วันที่** 5-7 **มีนาคม** 2567 (March 5-7, 2024)

**เล่ม** 2

**จัดโดย**

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

**พิมพ์ครั้งที่** 1 **เดือน เมษายน** 2567

**จัดทำโดย**

สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

**ลิขสิทธิ์เป็นของ**

สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

โทรศัพท์ 02-579-5548

ISBN (e-book) (**ชุด**): 978-616-278-834-5

# คำนำ

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ได้จัดการประชุมวิชาการอย่างต่อเนื่องเป็นประจำทุกปี โดยร่วมกับกระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ กระทรวงศึกษาธิการ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม กระทรวงดิจิทัลเพื่อเศรษฐกิจและสังคม สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ และเครือข่ายวิจัยประชาชื่น จัดให้มีการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 62 ระหว่างวันที่ 5-7 มีนาคม พ.ศ. 2567 ภายใต้หัวข้อ “ศาสตร์แห่งแผ่นดินเพื่อเป้าหมายการพัฒนาอย่างยั่งยืนและความเป็นกลางทางคาร์บอน” (Knowledge of the Land for SDGs and Carbon Neutrality) เพื่อมุ่งส่งเสริมให้นักวิชาการและคณาจารย์จากสาขาต่างๆ นำเสนอผลงานวิจัย แลกเปลี่ยนความคิดเห็น ประสบการณ์ และความชำนาญ ระหว่างนักวิชาการ คณาจารย์ของภาครัฐและภาคเอกชน ซึ่งจะนำไปสู่ความร่วมมือทางการวิจัยและยังเปิดโอกาสให้นิสิต นักศึกษา ได้แสดงผลงานทางวิชาการ โดยความรู้และวิทยาการใหม่ ๆ ดังกล่าว ยังได้ถ่ายทอด เผยแพร่สู่สาธารณชน อันจะนำมาซึ่งความกินดี อยู่ดี และการพัฒนาประเทศอย่างยั่งยืน

การนำเสนอผลงานวิชาการประกอบด้วยภาคบรรยายจำนวน 114 เรื่อง และภาคโปสเตอร์จำนวน 66 เรื่อง รวม 180 เรื่อง แบ่งออกเป็น 12 สาขา ได้แก่ สาขาพืช สาขาสัตว์ สาขาสัตวแพทยศาสตร์ สาขาประมง สาขาส่งเสริมการเกษตรและคหกรรมศาสตร์ สาขาวิทยาศาสตร์ สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ สาขาอุตสาหกรรมเกษตร สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม สาขาศึกษาศาสตร์ สาขาเศรษฐศาสตร์และบริหารธุรกิจ สาขามนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ โดยได้รับการพิจารณาให้ตีพิมพ์ผลงานวิจัยเรื่องเต็มใน E-Proceedings จำนวน 158 เรื่อง

เอกสารฉบับนี้เป็นการรวบรวมผลงานวิจัยเรื่องเต็ม ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ทั้งภาคบรรยายและภาคโปสเตอร์ เล่มที่ 2 ประกอบด้วย **สาขาวิทยาศาสตร์** จำนวน 12 เรื่อง **สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์** จำนวน 28 เรื่อง **สาขาอุตสาหกรรมเกษตร** จำนวน 20 เรื่อง และ**สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม** จำนวน 23 เรื่อง ซึ่งได้ผ่านการคัดเลือกจากคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิประจำสาขา

ในนามของคณะกรรมการดำเนินงานจัดการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 62 ขอขอบคุณ คณาจารย์ นักวิจัย นักวิชาการ และนิสิต นักศึกษา ที่ได้ร่วมนำเสนอผลงานวิจัย และผู้ที่สนใจเข้าร่วมการประชุมทางวิชาการในครั้งนี้ ขอขอบคุณคณะกรรมการทุกฝ่ายที่สละเวลา แรงกาย แรงใจและความคิด ร่วมมือกันจัดเตรียมการประชุม จนทำให้การประชุมทางวิชาการครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

(ดร.จงรัก วัชรินทร์รัตน์)

อธิการบดีมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ประธานคณะกรรมการอำนวยการจัดการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 62

# ความสมบูรณ์ของการเสนอผลงาน
# ในการประชุมทางวิชาการ
# มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 62
# ประกอบด้วย หนังสือรับรองการมาเสนอผลงาน
# และการได้ตีพิมพ์ลงในเอกสารบทคัดย่อ


**สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์**

**มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์**

E-mail: kuannualconf@gmail.com

Website: http://annualconference.ku.ac.th

https://www3.rdi.ku.ac.th/

# สารบัญ

## สาขาวิทยาศาสตร์ (Oral Presentation)


| ลำดับ | รหัสผลงาน | ชื่อผลงาน | หน้า |
|---|---|---|---|
| 1 | 43 | Effect of plant growth-promoting rhizobacteria on Maled Fai rice seedlings under drought stress in hydroponic system<br>Sudteeluk Kittivijarn, Wilailak Siripornadulsil, Surasak Siripornadulsil | 2 |
| 2 | 49 | Validation of MassARRAY technology for molecular testing of spinal muscular atrophy in pregnant women<br>Wantanai Satheanwongsa, Chayada Tangshewinsirikul, Donniphat Dejsuphong, Preyaporn Onsod, Budsaba Rerkamnuaychoke, Teerapong Siriboonpiputtana, Takol Chareonsirisuthigul | 11 |
| 3 | 73 | การโคลนและวิเคราะห์ยีนบิลินไลเอสที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์โฮโล-ซีไฟโคไซยานินหน่วยย่อยเบตาจากไซยาโนแบคทีเรียน้ำพุร้อน<br>ขนิษฐา คำนึง, เทพปัญญา เจริญรัตน์, สุเปญญา จิตตพันธ์, ชนิตโชต ปิยพิทยานันต์ | 22 |
| 4 | 105 | Salt-tolerant and plant growth-promoting bacteria enhanced growth of KDML105 rice seedlings under salt stress condition<br>Nutthanin Wiriyatanapat, Wilailak Siripornadulsil, Surasak Siripornadulsil | 30 |
| 5 | 111 | Uracil and dihydrouracil measurement in the Thai general population and initial valation of liqu chromatography-tandem mass spectrometry method<br>Sutawan Jogloy, Chonlaphat Sukasem, Apichaya Puangpetch, Chalirmporn Atasilp | 39 |


## สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ (Oral Presentation)


| ลำดับ | รหัสผลงาน | ชื่อผลงาน | หน้า |
|---|---|---|---|
| 1 | 82 | CFD analysis of heat transfer enhancement by helical inserts<br>Worapon Tipkaew, Suabsakul Gururatana, Rodolphe Perrin | 48 |
| 2 | 90 | การออกแบบและควบคุมการทำงานของรถฟอร์คลิฟท์แบบล้อแมคคานั่ม<br>ชวัลวิทย์ ชื่นสุขอุรา, วิทิต ฉัตรรัตนกุลชัย | 56 |
| 3 | 173 | การศึกษาความเป็นไปได้ด้วยการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการระบายความร้อนออกจากแม่พิมพ์เป่า (รวดเร็ว) ที่มีรูท่อน้ำหล่อเย็นแนบชิดผิวแม่พิมพ์<br>คุณยุต เอี่ยมสอาด, วรรณภัทร โพธิ์เดช, กิตตินาถ วรรณิสสร, วรัทยา ธรรมกิตติภพ | 67 |

| ลำดับ | รหัสผลงาน | ชื่อผลงาน | หน้า |
|---|---|---|---|
| 4 | 95 | การออกแบบหอประชุมมาตรฐานเพื่อการระบายอากาศ<br>กรวรรณ ปิ่นทอง, ภัทรนันท์ ทักขนนท์ | 77 |
| 5 | 96 | การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการระบายอากาศแบบธรรมชาติและการระบายอากาศแบบทางกล เพื่อลดความร้อนภายในห้องเครื่องระบบปรับอากาศแบบรวมศูนย์<br>อติศร ผลพฤกษา, ภัทรนันท์ ทักขนนท์ | 85 |
| 6 | 122 | การปรับปรุงภูมิทัศน์พื้นที่หลาดต้นน้ำลำขนุน<br>วรวุฒิ มัธยันต์, กมลพร สมคิด, วิสุทธิ์ นุชนาบี | 93 |
| 7 | 127 | ระบบป้องกันน้ำท่วมแบบดั้งเดิมในโบราณสถานในเมืองประวัติศาสตร์อยุธยา<br>ปรัตกร อินทรกำแหง, ปฏิพล ยอดสุรางค์ | 103 |
| 8 | 129 | การวิเคราะห์การกระจุกตัวของตลาดในย่านการค้าเก่า กรุงเทพมหานคร<br>สุชาวดี นนทรีย์, ปฏิพล ยอดสุรางค์ | 112 |
| 9 | 38 | การจัดลำดับความสำคัญของการปรับปรุงโครงการอ่างเก็บน้ำขนาดกลาง กรณีศึกษา: อ่างเก็บน้ำในจังหวัดลำปาง<br>กิ่งกมล สิงห์ทอง, พิพัฒน์ สอนวงษ์, ชวเลข วณิชเวทิน | 120 |
| 10 | 39 | การเลือกรูปแบบอาคารชลประทานในการวางโครงการพัฒนาแหล่งน้ำ กรณีศึกษา: ลุ่มน้ำห้วยดู่ อำเภอนครไทย จังหวัดพิษณุโลก<br>เสียงซอ แจ้งบำรุง, พิพัฒน์ สอนวงษ์, ชวเลข วณิชเวทิน | 129 |
| 11 | 41 | ความสามารถของผู้รับเหมาที่มีอิทธิพลต่อความสำเร็จของโครงการก่อสร้าง<br>สมเกียรติ จารุจิต, ปิยนุช เวทย์วิวรณ์, ศุภวุฒิ มาลัยกฤษณะชลี | 139 |
| 12 | 55 | ปัจจัยที่ส่งผลต่อการยอมรับเทคโนโลยีรถบัสรับส่งสาธารณะไร้คนขับ (Autonomous Shuttles Bus) ในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน<br>ชานน โตโพธิ์ไทย, เอกชัย ศิริกิจพาณิชย์กูล, สโรช บุญศิริพันธ์ | 147 |
| 13 | 72 | การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความล่าช้าในงานก่อสร้างโครงการบรรเทาอุทกภัยเขตชุมชนและเขตเศรษฐกิจเมือง<br>ศุภกฤต เพ็งนิล, ชวเลข วณิชเวทิน, พิพัฒน์ สอนวงษ์ | 155 |
| 14 | 100 | การประยุกต์ใช้วิธีการให้คะแนนแบบผสมผสาน เพื่อพิจารณาความเหมาะสมของสถานีรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนสายสีเขียว ณ ช่วงเวลาก่อนและหลังการก่อสร้าง<br>ณัฐศรันย์ บุญช่วยชูพันธุ์, ปิยนุช เวทย์วิวรณ์ | 162 |
| 15 | 102 | การออกแบบโครงสร้างไม้ไผ่เพื่อขออนุญาตก่อสร้าง (ในประเทศไทย)<br>ปณิตา โลหะรักษ์, ปิยนุช เวทย์วิวรณ์ | 171 |
| 16 | 110 | การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดจากการทำงาน กับความผูกพันต่อองค์กรของวิศวกรในอุตสาหกรรมก่อสร้างไทย<br>ธนัชพัชร์ เชียงพันธ์, ปิยนุช เวทย์วิวรณ์, สุธาริน สถาปิตานนท์ | 178 |

| ลำดับ | รหัสผลงาน | ชื่อผลงาน | หน้า |
|---|---|---|---|
| 17 | 156 | การประยุกต์ใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคารในการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ผ่านการปรับเปลี่ยนวัสดุก่อสร้างบ้านพักอาศัย 2 ชั้น: กรณีศึกษา<br>กิตติกร จันทรเสนา, ธนพ ศิริวัฒนานุรักษ์, วริสรา เลิศไพฑูรย์พันธ์ | 186 |
| 18 | 231 | ปัจจัยที่มีผลต่อต้นทุนค่าก่อสร้างอาคารในช่วงระยะเวลาเกิดโรคระบาดโควิด-19<br>การวี มณีสายสุวรรณ, ศุภวุฒิ มาลัยกฤษณะชลี, ฆนิศา รุ่งแจ้ง | 194 |
| 19 | 67 | การตรวจสอบการปลอมปนของน้ำเชื่อมอ้อยในน้ำผึ้งด้วยฟูเรียร์ทรานฟอร์มเนียอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีร่วมกับอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่อง<br>วุฒิพงษ์ บุตรนนท์, รวิภัทร ลาภเจริญสุข | 203 |
| 20 | 69 | คอมพิวเตอร์วิทัศน์สำหรับระบุต้นทุเรียนด้วยอัลกอริทึม YOLO<br>บุณยกร อุดมสิน, ธีรภัทร์ แพงวาปี, ณัฐชนน ฤาชา, รวิภัทร ลาภเจริญสุข | 212 |
| 21 | 70 | อุปกรณ์ควบคุมหัวฉีดเครื่องพ่นสารเคมีด้วยลมพัดโดยใช้เทคนิคคอมพิวเตอร์วิทัศน์<br>ธีรภัทร์ แพงวาปี, บุณยกร อุดมสิน, ณัฐชนน ฤาชา, รวิภัทร ลาภเจริญสุข | 221 |
| 22 | 232 | การศึกษาประสิทธิภาพและความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคากรณีศึกษาเขตพื้นที่สถานีผลิตน้ำ การประปาส่วนภูมิภาค<br>ณัฐรัฐ พงศ์โพธิ์เงิน, นาตยา คล้ายเรือง | 230 |
| 23 | 51 | Identifying the influential factors on the waste separation behavior of university students for sustainable sol waste management<br>Nine Yawai Phyo Ei, Nattapon Leeabai | 238 |
| 24 | 52 | Microfibres shedding from polyame fabric by sequent washing process<br>Fauzul Rizqa, Sucheela Polruang | 247 |
| 25 | 132 | Bio-carrier (fine polyurethane sponge media) investigations with enriched anammox cultures<br>Patcharaporn Phocharoen, Pongsak (Lek) Noophan, Sineenat Thaiboonrod | 255 |
| 26 | 61 | การศึกษาสารอินทรีย์ละลายน้ำเป้าหมายของคลอรีนในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำประปา กรณีน้ำดิบมีปริมาณสาหร่ายอุดตันบ่อกรองสูง วิเคราะห์โดยฟลูออเรสเซนต์สเปกโทรสโคปี<br>เดชชนะ ชาติวัฒนานนท์, วิทรัช ยุทธวงศ์ | 264 |

## สาขาอุตสาหกรรมเกษตร (Oral Presentation)


| ลำดับ | รหัสผลงาน | ชื่อผลงาน | หน้า |
|---|---|---|---|
| 1 | 208 | Modification of rice/soy protein-polyphenol complexes to enhance foaming properties<br>Pawadee Ko-amornsup, Prisana Suwannaporn | 276 |
| 2 | 126 | ผลของการผสมสตาร์ชข้าวเหนียวและสตาร์ชมันสำปะหลังต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชเพสท์<br>มณฑิชา ถุงเงิน, น้ำฝน ลำดับวงศ์ | 284 |
| 3 | 36 | ผลของการแทนที่ไขมันในเค้กเนยสดด้วยผงมะพร้าวจากอุตสาหกรรมกะทิ UHT<br>ธนพร จรบุรมย์, ปิติพร ฤทธิเรืองเดช, ปภาวริน หล่อลีฬหา | 293 |
| 4 | 26 | ผลของผงฝรั่งที่ใช้แทนที่ไขมันต่อคุณภาพทางกายภาพ เคมี และประสาทสัมผัสของไส้กรอก<br>วิชุนันท์ ลีวรรณ์, ปิติพร ฤทธิเรืองเดช, นันทวัน เทอดไทย | 301 |
| 5 | 103 | ปริมาณไขมันที่เป็นของแข็งในรูปผลึก พฤติกรรมการตกผลึกและการหลอมเหลว และลักษณะโครงสร้างผลึกของเนยโกกุมผสมเนยโกโก้<br>กรรณิการ์ อำไพ, โสภาค สอนไว, ปราโมทย์ คูวิจิตรจารุ | 310 |
| 6 | 47 | Extraction of Thai vanilla pods assisted by high pressure processing for application in peanut milk<br>Issariya Promjan, Wannasawat Ratphitagsanti, Witha Chantrapornchai | 318 |
| 7 | 112 | Modifying solid behaviour of mungbean-adlay mixed flour paste at ambient temperature<br>Montree Sreemak, Parichat Hongsprabhas | 328 |
| 8 | 195 | Preparation and chemical composition of flour from yam (*Dioscorea alata* L.) tuber and application of yam flour in crispy waffle product<br>Phatsanan Kudeedang, Namfone Lumdubwong, Pinthip Rumpagaporn | 336 |
| 9 | 24 | การเปรียบเทียบฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระและยับยั้งแอลฟา-กลูโคซิเดส ในสารสกัดสมุนไพรไทย: การสำรวจความสัมพันธ์กับปริมาณฟลาโวนอยด์และฟีนอลิกรวม<br>ณิชกานต์ มนต์ภาณีวงศ์, ศรัณยู อุ่นทวี, สุดาทิพย์ จันทร, ชนัญ ผลประไพ | 346 |

## สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (Oral Presentation)


| ลำดับ | รหัสผลงาน | ชื่อผลงาน | หน้า |
|---|---|---|---|
| 1 | 34 | Chemically and biologically changing in the oxidation pond system for municipal wastewater treatment<br>Chalisa Tudsanaton, Thanit Pattamapitoon, Sathapat Saneha, Parkin Maskulrath | 356 |
| 2 | 153 | ผลของการเติมวัสดุหมักที่มีแหล่งไนโตรเจนเป็นวัสดุหมักร่วมกับกากไขมันเพื่อการทำปุ๋ยหมัก<br>อิสริยาภรณ์ เอนกบุญ, นพวรรณ เสมวิมล, ธนิศร์ ปัทมพิฑูร, วัชรพงษ์ วาระรัมย์,<br>จุลบุตร จันทร์สูรย์, ศิวนาถ ไทยภักดี | 364 |
| 3 | 158 | คุณลักษณะของน้ำเสียโรงงานผลิตขนมไทย จังหวัดเพชรบุรี ที่มีความเป็นไปได้ในการผลิตก๊าซชีวภาพ<br>ณภัทร งามสิริเกียรติ, นพวรรณ เสมวิมล, ธนิศร์ ปัทมพิฑูร, อรอนงค์ ผิวนิล,<br>จุลบุตร จันทร์สูรย์, นิรุต อุปนันท์, ภาวิน วิจิตรตระการ | 372 |
| 4 | 168 | Hydrochemical characteristics and groundwater quality assessment along the coastal aquifer in Rayong province, Thailand<br>Sirilak Lorchuenwong, Srilert Chotpantarat | 380 |
| 5 | 175 | คุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมีตามระดับความลึกในระบบการบำบัดน้ำเสียในระบบบ่อผึ่งร่วมกับผักตบชวา<br>วรัญดา ไตรกิศยาโสภณ, อรอนงค์ ผิวนิล, วัชรพงษ์ วาระรัมย์, ธนิศร์ ปัทมพิฑูร,<br>มัลลิกา ศรีชมภู, อัจฉรา นาไชยบูรณ์ | 390 |
| 6 | 184 | ผลของความลึกต่อออกซิเจนละลายน้ำและกระบวนการย่อยสลายทางชีววิทยาในระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนแบบบ่อผึ่ง<br>จินต์จุฑา นาคขุนทด, ธนิศร์ ปัทมพิฑูร, อรอนงค์ ผิวนิล, วัชรพงษ์ วาระรัมย์,<br>ชาลิสา ทัศนาธร, มัลลิกา ศรีชมภู | 397 |
| 7 | 185 | อิทธิพลของรังสีแสงอาทิตย์ต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณแอโรบิคแบคทีเรียในระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนแบบบ่อผึ่ง<br>มณินทร ภูรัตนาอรุณ, ธนาทิพย์ กันศรี, ธนิศร์ ปัทมพิฑูร, ชาลิสา ทัศนาธร,<br>จินต์จุฑา นาคขุนทด | 406 |
| 8 | 194 | อิทธิพลของรังสีแสงอาทิตย์ต่อประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจน ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อผึ่ง<br>ต้นน้ำ คลอดแคล้ว, ปิยนุช เงางาม, ธนิศร์ ปัทมพิฑูร, ชาลิสา ทัศนาธร,<br>จินต์จุฑา นาคขุนทด, มัลลิกา ศรีชมภู | 414 |
| 9 | 203 | การเปลี่ยนแปลงของค่าออกซิเจนละลายน้ำด้วยเครื่องกลเติมอากาศชัยพัฒนารุ่น RX-5B และ C<br>พรณัฐชา เดชร่มโพธิ์ทอง, กิตติชัย ดวงมาลย์, ภาคิน มาสกุลรัตน์ | 421 |

| ลำดับ | รหัสผลงาน | ชื่อผลงาน | หน้า |
|---|---|---|---|
| 10 | 206 | ผลของการขุดลอกตะกอนต่อคุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมี ในบ่อบำบัดน้ำเสียชุมชนของเทศบาลเมืองเพชรบุรี<br>วลีสิริ จันชะนะกิจ, อรอนงค์ ผิวนิล, อรปรียา วงษ์เปี้ย, มัลลิกา ศรีชมภู, ภาวิน วิจิตรตระการ | 430 |
| 11 | 57 | การประเมินการเปลี่ยนแปลงบริการระบบนิเวศ: กรณีศึกษาโครงการเหมืองแร่หินอุตสาหกรรมชนิดหินปูน ตำบลหนองโอ่ง อำเภออู่ทอง จังหวัดสุพรรณบุรี<br>จินตนา แถวนาชุม, นพพล อรุณรัตน์, สุกัญญา เสรีนนท์ชัย, อุทัย เจริญวงศ์ | 440 |
| 12 | 123 | ระยะเวลาของฝนสะสมที่ส่งผลต่อการรุกล้ำของน้ำเค็มในแม่น้ำบางปะกง<br>สวรส เรืองรักษ์, ปวีร์ คล่องเวสสะ, ศรีเลิศ โชติพันธรัตน์, อาทิตยา ช่างด้วง | 450 |
| 13 | 196 | การประยุกต์ใช้ข้อมูลจากระบบตรวจสอบพื้นที่ปลูกไม้มีค่าเพื่อการปรับปรุงงานเพาะชำกล้าไม้ของกรมป่าไม้<br>ปัณฑารีย์ แสงไสยาศน์, ชาคริต ณ ตะกั่วทุ่ง, ลัดดาวรรณ เหรียญตระกูล | 459 |
| 14 | 149 | การพัฒนาฐานข้อมูลเพื่อยกระดับการจัดการเสือโคร่งในกรงเลี้ยงในประเทศไทย<br>ทศพร ลักขณาศรี, ชาคริต ณ ตะกั่วทุ่ง, ขรรค์ชัย ประสานัย, เดชฤทธิ์ สิทธิบาล | 467 |
| 15 | 180 | ความชุกชุมและการใช้ประโยชน์พื้นที่สัตว์เหยื่อเสือโคร่งในอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่<br>ปกรณ์ คำสุดแสง, วรงค์ สุขเสวต, สมพร พากเพียร | 477 |


## สาขาวิทยาศาสตร์ (Poster Presentation)


| ลำดับ | รหัสผลงาน | ชื่อผลงาน | หน้า |
|---|---|---|---|
| 1 | 63 | การทดสอบประสิทธิภาพของระบบโครงสร้างผนังอาคารและการประเมินค่าความไม่แน่นอน<br>กัณตีมา วาริพันธน์, นพฤทธิ์ จินันทุยา, วิวัฒน์ วงศ์ก่อเกื้อ | 486 |
| 2 | 64 | ระบบชั่งน้ำหนักผู้ป่วยติดเตียงแบบแยกส่วนและการเทียบมาตรฐาน<br>ภัค ชลนากิจกุล, ศักดิ์ชัย ชมโคกกรวด, นพฤทธิ์ จินันทุยา, วิวัฒน์ วงศ์ก่อเกื้อ | 493 |
| 3 | 134 | การย่อยสลายสารกำจัดวัชพืช 2,4-dichlorophenoxyacetic acid โดยแบคทีเรียที่คัดแยกจากดินแปลงปลูกอ้อย<br>สนธยา ขำติ๊บ, จิตรา เกาะแก้ว, กนกอร บุญพา, อำนาจ เอี่ยมวิจารณ์ | 499 |
| 4 | 178 | การค้นหาสมุนไพรและเห็ดที่มีฤทธิ์ยับยั้งการติดเชื้อไวรัสเยื่อบุช่องท้องแมวอักเสบ<br>วิวรรธน์ กลั่นแก้ว, เกียรติทวี ชูวงศ์โกมล | 508 |

| ลำดับ | รหัสผลงาน | ชื่อผลงาน | หน้า |
|---|---|---|---|
| 5 | 179 | การศึกษาผลกระทบของตำรับสมุนไพรไทยเพื่อใช้ในการต้านการอักเสบในแบบจำลองเซลล์ปอดที่ถูกเหนี่ยวนำให้เกิดการอักเสบด้วยลิโพโพลีแซคคาร์ไรด์<br>ภูมินทร์ ฉ่ำสดใส, เกียรติทวี ชูวงศ์โกมล | 514 |
| 6 | 182 | การทำสารแคนนาบิไดออลให้บริสุทธิ์ในอุตสาหกรรมกัญชง (*Cannabis sativa* L.)<br>บุษกร ชูทอง, พิเชษฐ อนุรักษ์อุดม, วีรชัย พุทธวงศ์ | 518 |
| 7 | 226 | การประเมินศักยภาพน้ำบาดาลในพื้นที่แอ่งน้ำบาดาลชลบุรี-ระยอง<br>มณธิดา เสริมสิทธิพร, ศรีเลิศ โชติพันธรัตน์ | 526 |


## สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ (Poster Presentation)


| ลำดับ | รหัสผลงาน | ชื่อผลงาน | หน้า |
|---|---|---|---|
| 1 | 84 | การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยควบคุมการไหลของน้ำกับปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดน้ำในแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่าง<br>กัญจน์ กุณฐูป, สัญญา สิริวิทยาปกรณ์ | 534 |
| 2 | 143 | การศึกษาความแข็งแรงและพฤติกรรมการกัดกร่อนของรอยเชื่อมแผ่นอลูมิเนียมและทองแดงด้วยการเชื่อมแบบสลักเกลียว การเชื่อมด้วยหมุดย้ำ และการเชื่อมแบบจุด<br>ศรัญญา วิชาไชย, ปรัชพล เสาวภา, รติพร มั่นพรหม, ราชธีร์ เตชไพศาลเจริญกิจ | 541 |


## สาขาอุตสาหกรรมเกษตร (Poster Presentation)


| ลำดับ | รหัสผลงาน | ชื่อผลงาน | หน้า |
|---|---|---|---|
| 1 | 30 | ผลของอัลบูมินจากไข่ต่อคุณภาพของผงวุ้นว่านหางจระเข้อบแห้งแบบโฟม-แมท<br>มณชัย เดชสังกรานนท์, วีรชน ภูหินกอง, อมรรัตน์ สีสุกอง, วิภา ทัพเชียงใหม่, วราภรณ์ วัฒนเขจร, นเรศ บางศิริ | 549 |
| 2 | 31 | สมบัติพรีไบโอติกของวุ้นว่านหางจระเข้<br>มณชัย เดชสังกรานนท์, วีรชน ภูหินกอง, อมรรัตน์ สีสุกอง, วิภา ทัพเชียงใหม่, วราภรณ์ วัฒนเขจร, นเรศ บางศิริ | 558 |
| 3 | 40 | Development of production processes for mozzarella cheese, ricotta cheese, and milk cream and quality comparison with commercial products<br>Phakhwan Kongchamdee, Sansiree Jansarikij, Awipa Luangpikulthong, Weerachet Jittanit | 566 |

| ลำดับ | รหัสผลงาน | ชื่อผลงาน | หน้า |
|---|---|---|---|
| 4 | 42 | Organic solvent pretreatment on sugarcane leaves for prebiotic production<br>Thidarat Yordsunk, Kittipong Rattanaporn, Weerachet Jittanit,<br>Kullanart Tongkhao | 574 |
| 5 | 62 | ผลของใบกัญชาต่อคุณภาพเอกซ์ทรูเดตที่มีส่วนผสมหลักจากแป้งถั่วเหลืองสกัดไขมัน<br>คันฉัตร สังข์ชุม, กมลวรรณ แจ้งชัด, อนุวัตร แจ้งชัด | 581 |
| 6 | 106 | ผลของการดัดแปรด้วยอัลตราซาวน์ต่อสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนถั่วเขียวไอโซเลท<br>วิภาวี จั่นเพชร, วรรธินี เกตุคง | 591 |
| 7 | 151 | Sleeping quality survey: A comprehensive market survey and consumer study on sleep quality and factors affecting sleep quality in Thai consumers<br>Konrawat Daengprapai, Withida Chantrapornchai,<br>Aussama Soontrunnarudrungsri | 599 |
| 8 | 152 | ผลของสารควบคุมความเป็นกรดต่อความคงตัวของครีมจากพืชเพื่อการใช้งานในกาแฟ<br>นวพร มัคสมุทร์, นพรัตน์ ปราบสงบ, เทพกัญญา หาญศีลวัต | 609 |
| 9 | 189 | การศึกษากลุ่มผู้บริโภคเจเนอเรชั่นแซดในการตัดสินใจซื้อผลิตภัณฑ์แปรรูปจากวัสดุเหลือทิ้งจากเส้นใยธรรมชาติของกลุ่มวิสาหกิจชุมชน<br>นิชดา ตู้จินดา, กรทิพย์ วัชรปัญญาวงศ์ เตชะเมธีกุล, ปวริน ตันตริยานนท์,<br>พรรณภัทร พรหมเพ็ญ | 619 |
| 10 | 199 | การตกแต่งไมโครแคปซูลวิตามินอีลงบนผ้าฝ้ายด้วยกระบวนการจุ่มอัด-อบแห้ง-อบผนึก<br>เกวลิน ใหม่จันดี, พรสวรรค์ บุญน้อย, ผุสดี แซ่ลิ่ม | 629 |
| 11 | 201 | การศึกษาวิธีการสกัดและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดหยาบจากใบหม่อน<br>สิวินีย์ ยงค์ไพบูลย์, หทัยรัตน์ ริมคีรี, วิษฐิดา จันทราพรชัย | 638 |


## สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (Poster Presentation)


| ลำดับ | รหัสผลงาน | ชื่อผลงาน | หน้า |
|---|---|---|---|
| 1 | 154 | ผลของการเติมเปลือกสับปะรดต่อการผลิตปุ๋ยหมักจากผักตบชวาและฟางข้าว<br>กานต์สินี วิรุณกาญจน์, ปิยาภรณ์ สมสมัคร, อาทิตยา ช่างด้วง, ประไพพิศ ชัยรัตนมโนกร | 647 |
| 2 | 155 | การสำรวจสารกำจัดศัตรูพืชตกค้างในพืชและสิ่งแวดล้อมจากแหล่งปลูกอ้อยในจังหวัดสุพรรณบุรี<br>ปภัสรา คุณเลิศ, ประกิจ จันทร์ติ๊บ, กาญจนาภา ด้วงนคร | 656 |

| ลำดับ | รหัสผลงาน | ชื่อผลงาน | หน้า |
|---|---|---|---|
| 3 | 170 | การประยุกต์เอนไซม์แลคเคสตรึงเพื่อกำจัดสารปฏิชีวนะออกซีเตตราไซคลินในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ<br>ปิยาภรณ์ สมสมัคร, กัณฑิกา นนทามิตร, ชนกนันท์ ก้องสมุทร, อาทิตยา ช่างด้วง, ประไพพิศ ชัยรัตนมโนกร | 668 |
| 4 | 172 | Effects of meteorological factors and air pollutants on $PM_{2.5}$ concentrations during winter season in Bangkok<br>Torfun Tawpang, Pawee Klongvessa, Parkpoom Choomanee | 676 |
| 5 | 202 | การบำบัดไซโปรฟลอกซาซินในน้ำเสียด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกโอโซเนชัน<br>ศรายุทธ สุขสมแดน, อาภาพร กิจเจริญ, ชลอ จารุสุทธิรักษ์ | 685 |
| 6 | 221 | ปัจจัยของไนโตรเจนเสมือนของผลไม้ในประเทศไทย: กรณีศึกษามังคุด<br>สุจิตรา พุฒชา, ณหทัย ศรีเชียงสา, ณัฐนรี แจ่มนภา, สิทธินันท์ ท่อแก้ว, สินศุภา จุ้ยจุลเจิม, อัญชลี สุวรรณมณี | 694 |
| 7 | 218 | การศึกษาลักษณะทางกายวิภาคของไม้วงศ์ยาง<br>มารศรี แก้วปราณี | 703 |
| 8 | 223 | กายวิภาคและการตรวจพิสูจน์ของไม้ จำนวน 100 ชนิด<br>บางรักษ์ เชษฐสิงห์ | 712 |

# สาขาวิทยาศาสตร์

(Subject: Science)

---

# ภาคบรรยาย

(Oral Presentation)

# Effect of plant growth-promoting rhizobacteria on Maled Fai rice seedlings under drought stress in hydroponic system

Sudteeluk Kittivijarn[a,b], Wilailak Siripornadulsil[b], Surasak Siripornadulsil[c,*]

[a]Department of Microbiology, Faculty of Science, Khon Kaen University, Khon Kaen 40002, Thailand

[b]Salt-Tolerant Rice Research Group, Khon Kaen University, Khon Kaen 40002, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: surasak@kku.ac.th

## Abstract

The cultivation of rice, which is a staple crop across the globe, is adversely affected by drought stress. As a drought-tolerant, high-nutrition crop, Maled Fai rice variety can meet the global demand for nutritious foods. Eight isolates of growth-promoting rhizobacteria were able to grow in Maled Fai rice seedlings under normal conditions without polyethylene glycol (PEG) and under drought stress with PEG. The bacterial isolate, *Serratia* sp. NP11 increased root lengths by 8.84% and shoot heights by 15.94% of rice seedlings when cultivated in 25% PEG. Rice seedlings inoculated with *Enterobacter* sp. NR36 showed increased proline content up to 144%, root biomass up to 35.29%, and leaf moisture up to 37.46% under high drought stress (25% PEG). As a result, the bacteria were able to increase Maled Fai rice seedling tolerance to drought, reduce stress and promote growth under drought stress in hydroponic system.

**Keywords**: Drought stress, Hydroponic system, Maled Fai rice, Plant growth-promoting rhizobacteria, PEG

## Introduction

Maled Fai, an upland black rice (*Oryza sativa* L.) variety, is a local rice variety widely planted as a separator crop between rubber and palm tree rows in south Thailand because it grows well under dry soil conditions. As it is mainly cultivated in the southern regions, it is less adaptable to diverse environments. The cultivation of upland rice is therefore more crucial for food security. Besides economic and household importance, Maled Fai rice variety is culturally and traditionally significant. Upland rice is typically grown once a year in upland areas or fields during the rainy season, but its yield is lower than paddy rice (Taridala et al., 2019). The upland rice variety Maled Fai produces colored grains with a wide range of desirable colors and contains higher levels of anthocyanins, antioxidants, and phenolic compounds (Kapcum et al., 2016).

Consumers are increasingly interested in products with high nutritional value. Maled Fai is often consumed as brown rice or unpolished rice due to its higher caloric, protein, vitamin, mineral, and antioxidant content than white rice. It is also nutritionally beneficial to consume brown rice with a dark grain coat. A large number of important minerals and antioxidants can be found in brown rice, which contains significantly more than white rice (Shen et al., 2009), followed by red rice, which has a low level of anthocyanins in its white part (Chen et al., 2012).

The drought is the most significant factor inhibiting crop growth and productivity on more than half of all arable land (Huang et al., 2017). Additionally, climate change is causing drought conditions to worsen in many regions worldwide (Condon, 2020). There are few options available for dealing with drought's effects. Two such strategies for increasing crop productivity and water efficiency are developing drought-resistant plant varieties and improving calendar management practices. Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) are a brand-new, long-term method for protecting plants from oxidative stress and enhancing agricultural productivity (Condon, 2020). This method is therefore being used by researchers to enhance rice productivity and quality in drought-stressed conditions. Rhizobacteria are beneficial bacteria found in root surface of plant and contribute to their growth and development. Increased PGPR allows plants to better cope with abiotic stress, such as drought, by absorbing and using water more efficiently. PGPR also provides plants with a number of beneficial compounds, including enzymes and hormones which enable them to grow and tolerate stress (Kumar et al., 2022). Maled Fai is an upland rice typically grown in dry areas and yields are lower than those of paddy fields. The purpose of this study is to examine the effects of PGPR isolated from the roots and rhizosphere soil of Khao Dawk Mali 105 (KDML 105) on Maled Fai rice growth in a hydroponic system under drought conditions. As a result of this study, PGPR may be applied to promote rice plant growth in drought-stressed areas.

## Materials and Methods

*Bacterial strains*

There are eight isolates in this study that are considered to be potential PGPR, which are *Bacillus* sp. (NP35, NP79), *Enterobacter* sp. (NR5, NR10, NR36), *Klebsiella* sp. (NR94, PS44) and *Serratia* sp. NP11. They were isolated from the roots and rhizosphere soil of Khao Dawk Mali 105 (KDML 105) rice plants and are capable of nitrogen-fixation, phosphate solubilization, and/or indole acetic acid production (unpublished data).

*Drought tolerance of rice seedlings grown in a hydroponic solution*

Maled Fai rice (*Oryza sativa* L.) seeds from the Faculty of Agriculture, Khon Kaen University, Thailand, were used for this study. Seeds were surface sterilized by soaking in $dH_2O$ and 95% ethanol for 3 minutes and 0.2% mercuric chloride for 30 minutes. After being washed twice with sterile $dH_2O$, seeds were cultivated at room temperature in the dark until germinating. Eight bacterial isolates were grown in nutrient broth and incubated at 150 rpm and 30 °C for 18 h. Cell pellets were collected by centrifugation at 4 °C and 5,000 x g for 10 min. Following that, each bacterial suspension with a concentration of $5\times10^7$ CFU/mL in normal saline solution (0.85% w/v NaCl) was prepared and inoculated into germinated rice seedlings using 60 seeds per 1 mL bacterial suspension. Three days were allowed for the bacteria to colonize the germinating rice seeds. Then, rice seedlings were transferred to Hoagland's nutrient solution containing 0.4% agar (Thongnok et al. 2021) and transplanted into a small plastic container containing 400 ml of Hoagland's nutrient solution supplemented with 0, 15 and 25% polyethyleneglycol (PEG). During the experiment, the nutrient solution was periodically replenished.

*Rice growth parameters*

The shoot height and root lengths and biomass (dry weight) were determined for the rice seedlings harvested at 10, 20 and 30 days after transplantation (DAT).

*Relative water content*

The relative water content (%RWC) was determined by recording the fresh leaf weight. Fresh leaf samples were soaked in water for 4 h and then dried in a hot air oven overnight to a constant weight to determine the dry weight. All weights were measured to the nearest milligram. The %RWC was calculated as described by Larkunthod et al. (2018).

*Determination of proline content*

An analysis of the proline content was conducted according to the procedure described by Bates (1973). A 100 mg sample of dry plant material was homogenized in 3% sulfosalicylic acid and the extract was added with glacial acetic acid and ninhydrin for 1 h at 100°C, followed by an ice bath to terminate the reaction. The reaction mixture was extracted with toluene and its optical density was measured at 520 nm. Proline content was measured with a standard curve.

*Statistical analysis*

All the parameters were analyzed in a completely randomized design (CRD) using Statistix 8 (Statistix8, 2003). The data is expressed as means and standard deviations of three replicates.

**Results and discussion**

*Plant growth-promoting parameters*

A shoot height increase of 2.02%–15.94% was observed in the absence of PEG (Fig. 1A), while rice seedlings inoculated with *Enterobacter* sp. NR36 exhibited the highest shoot height increases at 10 DAT. The root length (Fig. 1D), on the other hand, showed no significant changes and bacteria did't tend to increase root length. At 10 DAT, the shoot height did not change significantly in the presence of 15% PEG (Fig. 1E), but bacteria tended to increase it by 3.37%. A significant change in root length was observed at 10 DAT, but at 20 DAT, *Enterobacter* sp. NR36 bacteria significantly increased root length compared to the control by up to 5.39%. Other bacteria had no difference in root length. At 10 DAT, the bacteria increased shoot height by 0.83%–11.28% in the presence of 25% PEG (Fig. 1F). In comparison to the control, *Bacillus* sp. NP79, *Klebsiella* sp. NR94, and *Enterobacter* sp. NR5 bacteria significantly increased root growth. In the absence of PEG, shoot biomass increased by 0.84%–35.29%, but this was not as significant as the increase in root biomass (Fig. 2A, 2D), which the bacteria enhanced by 1.91–64.25%. When rice seedlings were inoculated with *Klebsiella* sp. PS44, root biomass increased to approximately 78.57% greater than that of the control at 30 DAT without PEG (Fig. 2D).

With 15% PEG, the bacteria increased shoot biomass by 2.71%–23.79% (Fig. 2B), although not statistically significant. Bacteria were able to increase root biomass by 0.73%–51.01%, but there was no significant difference between root biomass and shoot biomass. *Klebsiella* sp. PS44 isolate showed the greatest increase in all parameters among all treatments. At 10 DAT, the bacteria increased the shoot biomass from 0.70% to 3.24% and the root biomass from 16.30% to 26.43 %, but the change was not significant. In comparison with the control, both *Enterobacter* sp. NR36 and *Klebsiella* sp. PS44 isolates showed a higher increase in parameters. This study found that some rice plants died after being exposed to 15% or 25% PEG. Osmotic stress leads to the death of rice seedlings. The plants were killed by 15% PEG by 30 DAT, but by 25% PEG by 20 DAT. *Enterobacter* sp. NR36 and *Klebsiella* sp. PS44 induced more growth in terms of shoot height, root length, and biomass than the other bacteria (Figs. 1 and 2). Plant dry weight, root length, and shoot height are good indicators of stress exposure (Xu et al., 2006), including drought stress or osmotic stress, under which plants are limited in the amount of water they can absorb, resulting in a decrease in cell elongation as turgor water pressure falls. A decrease in cell growth results in a decrease in biomass and dry weight (Roy et al., 2018). As PEG concentrations increased, the fresh and dry weight of the rice seedlings decreased (Fig. 2).

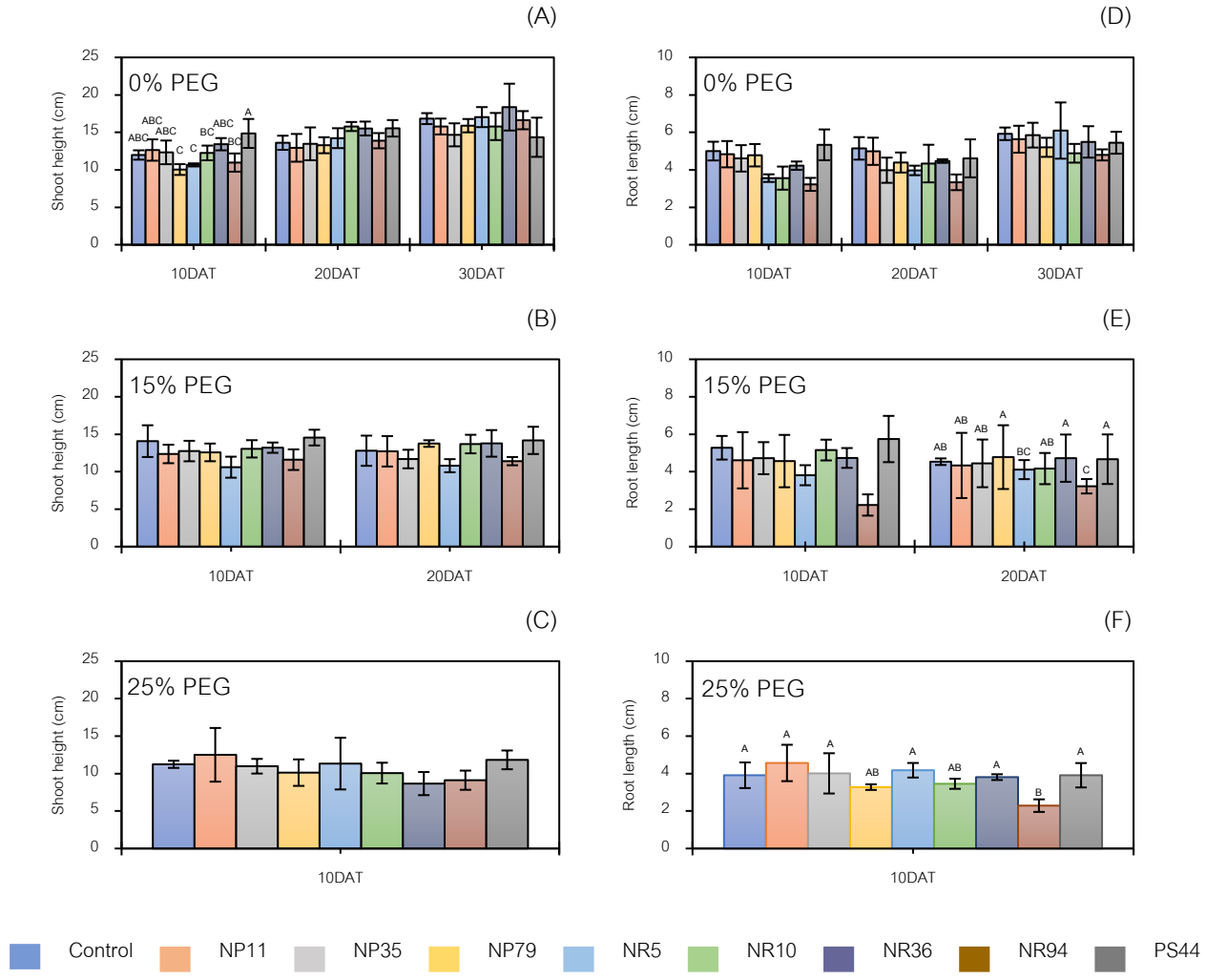


**Fig. 1** Effects of PGPR on growth parameters of rice seedlings in Hoagland's nutrient solution with PEG at 0, 10, 20 and 30 DAT. (A) Shoot length without PEG, (B) Shoot length with 15% PEG, (C) Shoot length with 25% PEG, (D) Root length without PEG, (E) Root length with 15% PEG, and (F) Root length with 25% PEG. The data are the means ± standard deviations of three replicates. Different letters indicate a significant difference between treatments ($p < 0.05$) at the same time by the LSD test

PGPR could not increase the dry weight of rice under conditions where the highest PEG concentration, 25% PEG, affected the dry weight of rice (Fig. 2). A number of previous studies have shown a similar trend, that is, a decrease in the dry weight of roots and shoots in the presence of PEG (Ashadduzaman et al., 2020). In the presence of PEG, shoot weight and length decrease due to a reduced photosynthetic rate, and bacteria cannot promote rice growth under these high-stress conditions. Drought stress might adversely affect root cell development, resulting in nutrient deficiencies, which in turn affects photosynthesis, which is essential for biomass accumulation and root and shoot elongation (Zarei, 2022). The presence of PEG affected the water absorption, resulting in reduced dry biomass, and the level of stress increased root length of seedlings under PEG conditions (Figs. 1 and 2). PEG decreased plant root length and dry weight under hydroponic conditions. The effects of PGPR on plants under drought stress and their responses have been studied, yet detailed results on the effects of seeds coated with PGPR on plants under drought stress are lacking (Manuel et al., 2019).

*Relative water content and proline content*

As a result of water deficit stress, proline content decreased, resulting in a decrease in relative water content (Figs. 3A–C). According to the observed data, %RWC was approximately 88%–94% without PEG and under no stress (Fig. 3A), 87–93% with 15% PEG (Fig. 3B), and 73–86% with 25% PEG (Fig. 3C). With or without PEG, the %RWC was most strongly decreased by 25% PEG, but did not differ significantly between 10, 20 and 30 DAT. In the presence of 25% PEG, the solutions showed a %RWC lower than under normal conditions, but slightly lower. However, the change was not significant at 15% PEG, and there was no clear increase under bacterial inoculation. The PEG-induced drought stress caused a significant drop in RWC (Pamuta et al., 2022). During osmotic or PEG stress, proline accumulation occurred, but without PEG, proline content did not differ among bacterial treatments, ranging between 0.54 and 15.80 µg/gFW (Fig. 3D). PEG at 15% increased the proline content to 1.86–28.80 µg/gFW (Fig. 3E), similar to 25% PEG, which was approximately 5.85–19.04 µg/gFW (Fig. 3F). *Enterobacter* sp. NR36 and *Klebsiella* sp. PS44 decreased proline content at 10 and 20 DAT, respectively, with values significantly lower than the control. Proline, while harmful at high levels, has been suggested that it may serve as an indicator of stress resistance. However, the link between proline aggregation and stress resistance is not always clear (Szabados and Savoure, 2010). Antioxidant activity protects rice plants from oxidative stress and increases drought tolerance (Mishra and Panda, 2017). In paddy fields, soil moisture

content affects root systems and increases root dry matter. It is consistent with Kano-Nakata et al. (2019) who report that soil moisture distribution affects root systems and root dry matter in paddy fields.

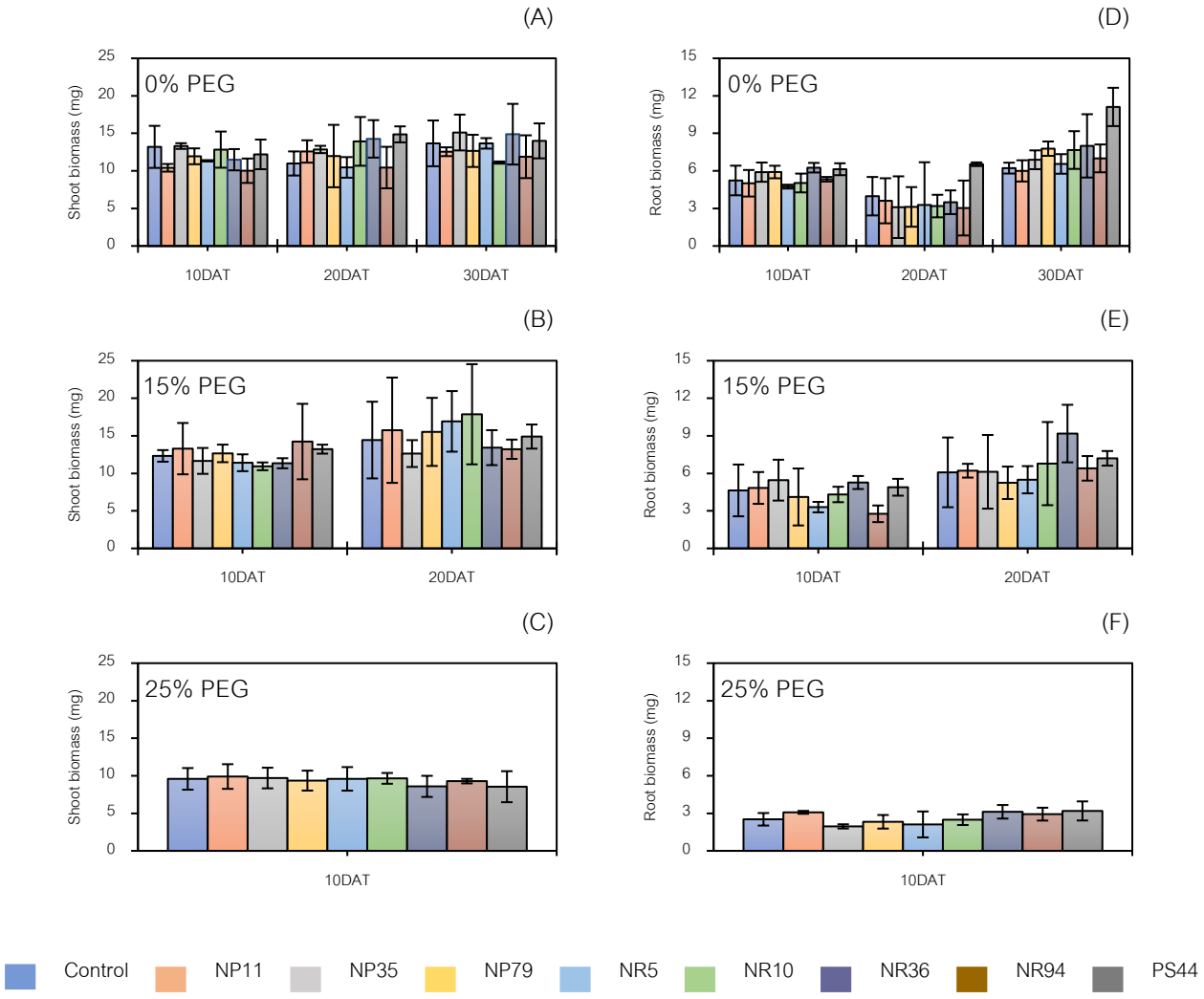



**Fig. 2** Effects of PGPR on the biomass of rice seedlings in Hoagland's nutrient solution with PEG at 0, 10, 20 and 30 DAT. (A) Shoot biomass without PEG, (B) Shoot biomass with 15% PEG, (C) Shoot biomass with 25% PEG, (D) Root biomass without PEG, (E) Root biomass with 15% PEG, and (F) Root biomass with 25% PEG. The data are the means ± standard deviations of three replicates. Different letters indicate a significant difference between treatments ($p < 0.05$) at the same time by the LSD test

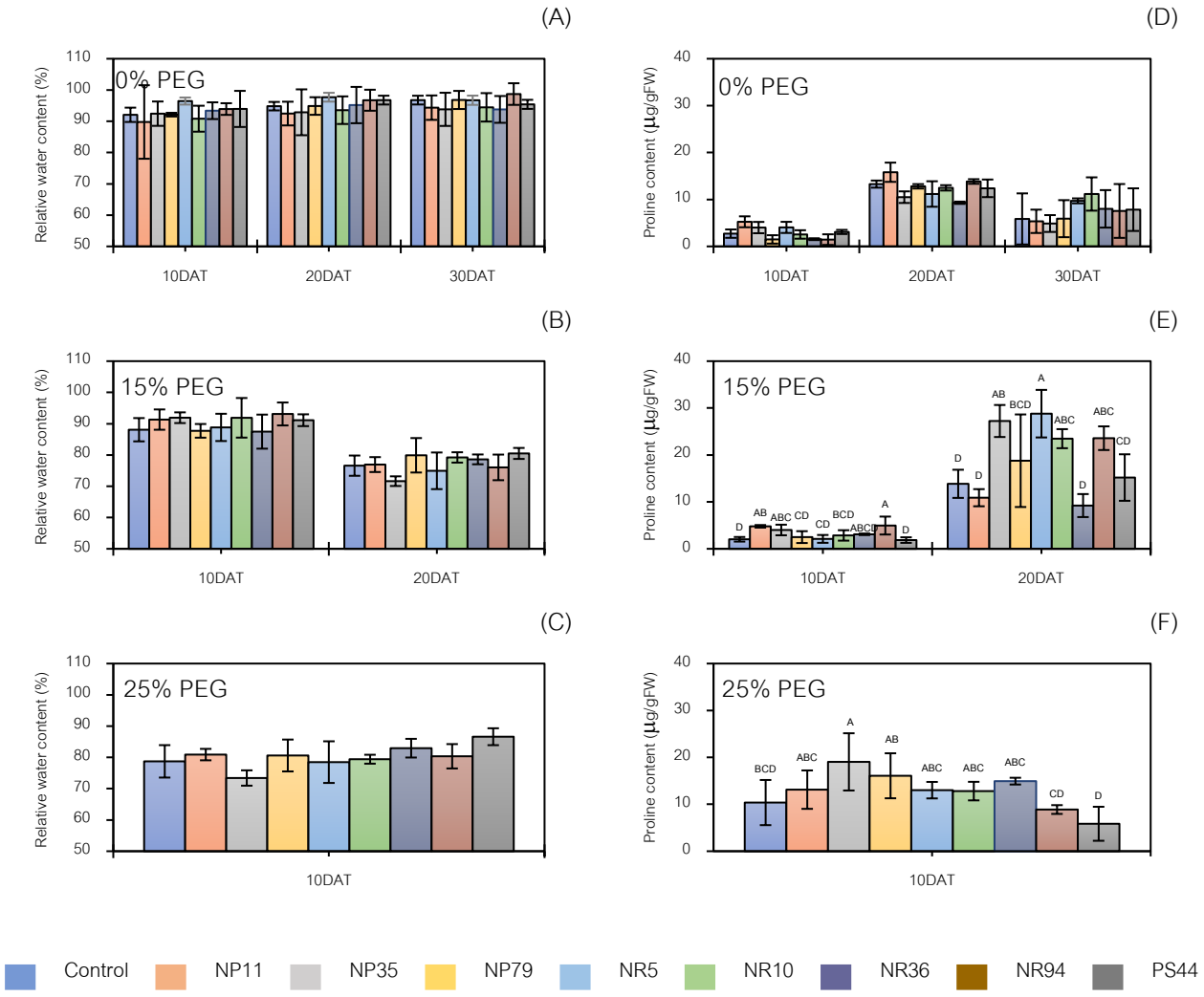



**Fig. 3** Effects of PGPR on relative water content (RWC) and proline content of rice seedlings grown in Hoagland's nutrient solution with PEG at 0, 10, 20 and 30 DAT. % RWC in (A) 0% PEG, (B) 15% PEG, (C) 25% PEG and proline content in (D) 0% PEG, (E) 15% PEG, and (F) 25% PEG. The data are the means ± standard deviations of three replicates. Different letters indicate a significant difference between treatments ($p < 0.05$) at the same time by the LSD test

## Conclusion

In Maled Fai rice seedlings, drought affects the length of the roots and height of the shoots. Among the analyzed parameters, *Enterobacter* sp. NR36 and *Klebsiella* sp. PS44 acted as PGPR and showed improved drought tolerance when exposed to 15% PEG, which represents a moderate stress level. Considering that *Klebsiella* sp. PS44 may be a pathogen, further study of this strain might not be warranted. Under drought stress, PGPR also promoted a higher RWC, low drought levels, and a healthy proline balance. Therefore, this study provides very useful information about promoting the growth of rice plants in drought areas that can be further examined in pots and paddy fields.

**Acknowledgements**

The study was financially supported by the National Research Council of Thailand (NRCT).

**References**

Ashadduzaman, Md., Hale, M.D., Ormondroyd, G.A. Spear, M.J. 2020. Dynamic mechanical analysis of Scots pine and three tropical hardwoods. Int. Wood Prod. J. 11: 189–203.

Bates, L.S., Waldren, R.A., Teare, I.D. 1973. Rapid determination of free proline for water-stress studies. Plant and Soil 39: 205–207.

Chen, X.Q., Nagao, N., Itani, T., Irifune, K. 2012. Anti-oxidative analysis, and identification and quantification of anthocyanin pigments in different coloured rice. Food Chem. 135: 2783–2788.

Condon, A.G. 2020. Drying times: Plant traits to improve crop water use efficiency and yield. J. Exp. Bot. 71: 2239–2252.

Huang, Z., Lai, Q. 2020. Mabikibacter ruber Choi et al. 2017 is a later heterotypic synonym of *Notoacmeibacter marinus* Huang et al. 2017. Int. J. Syst. Evol. Micr. 70: 439–441.

Kano-Nakata, M., Nakamura, T., Mitsuya, S., Yamauchi, A. 2019. Plasticity in root system architecture of rice genotypes exhibited under different soil water distributions in soil profile. Plant. Prod. Sci. 22: 501–509. https://doi.org/10.1080/1343943X.2019.1608836.

Phimphilai. 2016. Anthocyanins, phenolic compounds and antioxidant activities in colored corn cob and colored rice bran. Int. Food. Res. J. 23: 2347–2356

Kumar, R., Swapnil, P., Meena, M., Selpair, S., Yadav, B.G. 2022. Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): Approaches to alleviate abiotic stresses for enhancement of growth and development of medicinal plants. Sustainability 14: 15514.

Larkunthod, P., Nounjan, N., Siangliw, J.L., Toojinda, T., Sanitchon, J., Jongdee, B., Theerakulpisut, P. 2018. Physiological responses under drought stress of improved drought-Tolerant rice lines and their parents. Not. Bot. Horti. Agrobot. 46: 679–687. doi.org/10.15835/nbha46211188.

Manuel, G., Posluns, M. 2019. The fourth world: An Indian reality. U of Minnesota Press.

Mishra, S.S., Panda, D. 2017. Leaf traits and antioxidant defense for drought tolerance during early growth stage in some popular traditional rice landraces from Koraput, India. Rice Sci. 24: 207–217. doi.org/10.1016/j.rsci.2017.04.001.

Pamuta, D., Siangliw, M., Sanitchon, J., Pengrat, J., Siangliw, J.L., Toojinda, T., Theerakulpisut, P. 2022. Physio-biochemical traits in improved 'KDML105' jasmine rice lines containing drought and salt tolerance gene under drought and salt stress. Chilean J. Agric. Res. 82: 97–110.

Statistix8, 2003. Statistix8: Analytical Software User's Manual. Tallahassee, Florida.

Shen, Y., Jin, L., Xiao, P., Lu, Y., Bao, J. 2009. Total phenolics, flavonoids, antioxidant capacity in rice grain and their relations to grain color, size and weight. J. Cereal. Sci. 49: 106–111.

Szabados, L., Savouré, A. 2010. Proline: a multifunctional amino acid. Trends Plant Sci. 15: 89–97. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2009.11.009.

Taridala, S.A.A., Abdullah, W.G., Tuwo, M.A., Bafadal, A., Fausayana, I., Salam, I., Wahyuni, S. 2019. Exploration of the potential of upland rice agribusiness development in South Konawe District, Southeast Sulawesi. In IOP Conf. Ser.Earth Environ. Sci. Vol. 260: 012011.

Thongnok, S., Siripornadulsil, W., Siripornadulsil, S. 2021. AsIII-oxidizing and Cd-tolerant plant growth-promoting bacteria synergistically reduce arsenic translocation, toxicity and accumulation in KDML105 rice. Environ. Exp. Bot. 192: 104660. doi.org/10.1016/j.envexpbot.2021.104660.

Xu, J., Plaxco, K.W., Allen, S.J. 2006. Probing the collective vibrational dynamics of a protein in liquid water by terahertz absorption spectroscopy. Protein Sci. 15: 1175–1181.

Zarei, T. 2022. Balancing water deficit stress with plant growth-promoting rhizobacteria: A case study in maize. Rhizosphere, 100621.

# Validation of MassARRAY technology for molecular testing of spinal muscular atrophy in pregnant women

Wantanai Satheanwongsa[a], Chayada Tangshewinsirikul[b], Donniphat Dejsuphong[c], Preyaporn Onsod[d], Budsaba Rerkamnuaychoke[a], Teerapong Siriboonpiputtana[a], Takol Chareonsirisuthigul[a,*]

[a]Department of Pathology, Faculty of Medicine Ramathibodi Hospital, Mahidol University, Bangkok 10400, Thailand

[b]Department of Obstetrics and Gynecology, Faculty of Medicine Ramathibodi Hospital, Mahidol University, Bangkok 10400, Thailand

[c]Division of Translational Medicine, Faculty of Medicine Ramathibodi Hospital, Mahidol University, Bangkok 10400, Thailand

[d]Human Genetics Laboratory, Department of Pathology, Faculty of Medicine Ramathibodi Hospital, Mahidol University, Bangkok 10400, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: takol.cha@mahidol.edu

**Abstract**

Spinal muscular atrophy (SMA) is a severe autosomal recessive neurodegenerative disorder characterized by dysfunction and degeneration of alpha motor neurons, leading to progressive muscular weakness. Recently, MassARRAY technology has emerged as a new, practical, and robust method for detecting common genetic alterations. This study aimed to validate the MassARRAY assay for molecular testing of SMA in pregnant women. The genomic DNA ($n$ = 14) isolated from Thai pregnant women's blood specimens were detected for the mutation and copy number variation of survival motor neuron 1 (*SMN1*) and survival motor neuron 2 (*SMN2*) genes exons 7 and 8, using established MassARRAY and Multiplex Ligation-dependent Probe Amplification (MLPA) assay. The results revealed the concordance between the two methods in detecting *SMN1* homozygous deletion from genotyping, resulting in sensitivity and specificity, both 100%. However, the copy number determination results were discordant in four samples (28.6%); one case was concluded to be SMA carrier by MassARRAY, while MLPA was identified as normal. More clinical samples and additional internal control markers were required to investigate its efficiency further. The success of this study will be helpful in SMA clinical management, both in diagnosis and carrier screening.

**Keywords**: MassARRAY, Neuromuscular disease, *SMN1*, *SMN2*, Spinal muscular atrophy

**Introduction**

Spinal muscular atrophy (SMA) is an autosomal recessive neuromuscular disorder that causes progressive symmetrical muscular weakness in patients, with an estimated prevalence of 1 in 5,000 to 1 in 10,000 live births. SMA is caused by the mutation of the survival motor neuron 1 gene (*SMN1*), which is located on the long arm of chromosome 5 (5q11.2–13.3) (Prior et al., 2011). Around 95% of SMA patients were found the homozygous deletion of *SMN1* exon 7, resulting in the absence of SMN protein production, leading to the degeneration and loss of anterior horn cells in the spinal cord and brainstem nuclei (The American College of Obstetricians and Gynecologists, 2009; Su et al., 2011). The survival motor neuron 2 gene (*SMN2*) is the homolog gene of *SMN1* but differs in some nucleotide base pairs transition in exon 7 (c.840C>T) and exon 8 (c.1155G>A). *SMN2* can produce SMN protein like *SMN1* but in fewer amounts. In the general population, the copy number of *SMN2* can be varied from 0 to 5 copies among each person. It was found that the copy number of *SMN2* might be used as a prognostic marker for severity prediction (Mercuri et al., 2022).

The average carrier frequency of SMA ranges from 1 in 25 to 1 in 50 in the population, which was predicted to be the second highest after Thalassemia (Sugarman et al., 2012). Although carriers did not develop the disease, the pregnancy between two carriers couples can pass the recessive gene on to the fetus, with 1 in 4 chances of inheriting an abnormal gene and causing the disease in every pregnancy. Since 2008, the American College of Medical Genetics (ACMG) (Prior, 2008) and the American College of Obstetrics and Gynecology (ACOG) have recommended offering SMA carrier testing to all couples planning pregnancy or women in the early stage of pregnancy, regardless of race or ethnicity. The previous studies report that the prevalence of SMA carriers in pregnant women is 2–3% (Su et al., 2011; Calì et al., 2014).

Real-time PCR and multiplex ligation-dependent probe amplification (MLPA) have been considered the gold standard for SMA diagnosis and carrier screening with 100% specificity and 95–98% sensitivity (Prior, 2008). In Thailand, most laboratories use real-time PCR to detect the mutation of *SMN1* for diagnosis of SMA and carrier screening. However, they did not detect a copy number of *SMN2* for the prognosis of the disease severity (Dejsuphong et al., 2019). Real-time PCR also had limitations, such as this technique required standard curve-making to analyze the result. For MLPA, this technique was more convenient for detecting *SMN1* and *SMN2* mutation in the same reaction. However, the limitation of this technique was a prolonged turnaround time. Therefore, more studies are required to develop new genetic testing tools to reduce these limitations.

MassARRAY is the developed technique that precisely detects the mass of the DNA molecules using matrix-assisted laser desorption/ionization time-of-flight (MALDI-TOF) mass spectrometry. Each nucleotide A, T, C, and G has its unique molecular weight. Thus, each DNA fragment's different sequences and lengths result in unique molecular weight profiles that can be used to identify specific genetic alterations. Therefore, MassARRAY is introduced to detect the mutation that mainly affects the DNA molecular weight, such as single nucleotide polymorphism (SNP), insertion, deletion, and methylation (Suchiman et al., 2015; Ellis and Ong, 2017; Lin et al., 2019; Scott et al., 2021). Recently, this technique has been developed to detect up to 40 to 60

targets in the same reaction, leading to a shorter turnaround time than other methods. In addition, it is more cost-effective (Lin et al., 2019).

This study evaluated the efficacy of the MassARRAY technique for detecting SMA genotyping and copy numbers in pregnant women using MLPA as a standard method. As the SMA prevalence is high in Thailand, the results of this study will be helpful in SMA clinical management, both in diagnosis and carrier screening. The accurate and rapid diagnosis test could help patients access treatment quickly and support maternal decisions about antenatal care and the subsequent pregnancy to decrease SMA prevalence.

## Materials and Methods

*Specimen collection*

Peripheral blood samples ($n$ = 10) were collected from pregnant women who came for antenatal care at Ramathibodi Hospital, Thailand, from September 2020 to February 2022, and had previous SMA mutation screening results by standard method (MLPA). The selected samples include positive SMA, positive SMA carrier, and negative SMA. The sample ID was generated for each specimen to conceal the personal identification information of any participants. The specimens were preserved in EDTA tubes and stored at 4°C after collection. For the additional dried blood spot (DBS) test, pregnant women's blood samples ($n$ = 4) were preserved in the FTA card (Qiagen, Germany) and stored at room temperature. Research ethics has been reviewed and approved by the Human Research Ethics Committee, Faculty of Medicine Ramathibodi Hospital, Mahidol University (MURA 2023/451). All pregnant women have read and signed the consent form before participation.

*DNA extraction and quantification*

Genomic DNA was extracted from peripheral blood samples using QIAamp® DNA Blood Mini Kit (Qiagen, Germany), while MagPurix® Forensic DNA Extraction Kit (Zinexts Life Science, Taiwan) was used for DNA extraction from FTA cards following the manufacturer's instructions. The purity and quality of DNA were evaluated using NanoDrop™ 2000 spectrophotometry (Thermo Fisher Scientific, USA).

*MassARRAY assay*

The multiplex PCR MassARRAY reaction was used to amplify *SMN1* and *SMN2* exons 7 and 8 variants of interest, using two well-known positions, c.840C>T and c.1155G>A. The assay also includes one primer sequence specific for the *GAPDH* gene as an internal control essential for copy number calculation. In addition, to identify the SMA silent carriers, two positions, g.27134T>G and g.27706_27707delAT, were also included in the multiplex assay. The samples were adjusted in the concentration of DNA to 20–40 ng in a final volume of 2 µL. Nuclease-free water, 1X PCR Buffer, 2mM $MgCl_{2,}$ 500 µM dNTPs Mix, 100 nM PCR Primer Mix, and 0.2 U/µL Polymerase enzyme were added into each reaction. PCR conditions were 95°C for 2 minutes, followed by 48 cycles of 95°C for 30 s, 56°C for 30 s, 72°C for 60 s, and a final incubation at 72°C for

5 minutes. After the amplification, the shrimp alkaline phosphatase (SAP) reaction was performed to inactivate the unincorporated dNTPs using 0.073 U/μL SAP enzyme and 1X SAP buffer. Incubation conditions were 37°C for 40 minutes, followed by one cycle of 85°C for 5 minutes. The single base extension (SBE) onto the mutation site was performed after SAP treatment using the extension primers and assay-specific iPLEX terminator nucleotide mixes. Each reaction contains HPLC-grade water, 0.222X iPLEX Buffer Plus, 0.222X iPLEX Termination Mix, 0.52–1.57 μM Extend Primer Mix, and 0.142 U/μL iPLEX Pro Enzyme Polymerase. PCR conditions were 95°C for 30 s, followed by 40 cycles of [95°C for 5 s, then five cycles of (52°C for 5 s, 80°C for 5 s)], and a final incubation at 72°C for 3 minutes. The mass spectrum from each PCR amplicon's time-resolved spectra was retrieved using a MassARRAY mass spectrometer (Agena Bioscience, USA). It was analyzed through SpectroTYPER software (Agena Bioscience, USA) to perform genotype calling. The copy number of each target allele was calculated in ratio using the area under the peak of SNP divided by the internal control.

*Validation by Multiplex Ligation-dependent Probe Amplification assay (MLPA)*

MLPA assay was used to confirm the genotype of the *SMN* genes in all specimens using SALSA® MLPA® Probemix P021-B1 SMA (MRC Holland, Netherlands) following the manufacturer's protocol. The P021-B1 contains 32 MLPA probes, including two probes specific for sequences in exon 7 of the *SMN1* and *SMN2* (21488-L30891 and 21488-L30892), two probes specific for sequences in exon 8 of the *SMN1* and *SMN2* (21490-L29983 and 21490-L29984), 17 probes detecting sequences that are present in both *SMN1* and *SMN2*, one probe for the *NAIP* gene, and other probes for other chromosomes and reference probes. The samples were adjusted in the DNA concentration to at least 50 ng in a final volume of 5 μL. The amplified DNA fragments were separated using capillary electrophoresis 3500 Genetic Analyzer (Applied Biosystems, USA) and analyzed using Coffalyser.net software (MRC Holland, Netherlands).

**Results**

Ten peripheral blood samples were successfully DNA extracted with an average concentration of 23.01±4.47 ng/μL. The DNA extraction from the FTA card was more complicated for four DBS samples due to the low amount of preserved blood used (10 punches of FTA per reaction). The average DNA concentration extracted from FTA was 3.53±1.07 ng/μL.

**Table 1** Genotyping of mutation points related to SMA by MassARRAY assay

| Sample | Type | DNA conc. (ng/µL) | Genotype detected by MassARRAY technique | | | | Interpretation | | | | | Validated by MLPA |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | c.840C>T | c.1155G>A | g.27134T>G | g.27706_27707delAT | *SMN1* Exon7 | *SMN1* Exon8 | *SMN2* Exon7 | *SMN2* Exon8 | Silent carrier | |
| SMA-01 | PB | 26.70 | CT | GA | T | AT | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | concordance |
| SMA-02 | PB | 24.90 | CT | GA | T | AT | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | concordance |
| SMA-03 | PB | 20.40 | CT | GA | T | AT | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | concordance |
| SMA-04 | PB | 21.60 | CT | GA | T | AT | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | concordance |
| SMA-05 | PB | 26.00 | T | A | T | AT | ✗ | ✗ | ✓ | ✓ | ✗ | concordance |
| SMA-06 | PB | 22.40 | T | A | T | AT | ✗ | ✗ | ✓ | ✓ | ✗ | concordance |
| SMA-07 | PB | 16.60 | CT | GA | T | AT | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | concordance |
| SMA-08 | PB | 23.30 | CT | GA | T | AT | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | concordance |
| SMA-09 | PB | 17.00 | CT | GA | T | AT | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | concordance |
| SMA-10 | PB | 31.20 | C | G | T | AT | ✓ | ✓ | ✗ | ✗ | ✗ | concordance |
| SMA-11 | DBS | 4.00 | C | G | T | AT | ✓ | ✓ | ✗ | ✗ | ✗ | concordance |
| SMA-12 | DBS | 3.05 | CT | GA | T | AT | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | concordance |
| SMA-13 | DBS | 2.30 | CT | GA | T | AT | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | concordance |
| SMA-14 | DBS | 4.75 | CT | GA | T | AT | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | concordance |

DNA conc.: DNA concentration; DBS: Dried blood spot; MLPA: Multiplex ligation-dependent probe amplification; PB: Peripheral blood; *SMN1*: Survival motor neuron 1; *SMN2*: Survival motor neuron 2; ✓: target detected; ✗: target not detected

All fourteen samples were successfully genotyped for SMA mutation-related points, and the copy numbers of *SMN1* and *SMN2* exons 7 and 8 were determined using an established MassARRAY assay. To interpret the genotyping result, the mutation points c.840C>T belong to exon 7 of both two genes, where genotype (C) belongs to *SMN1* and genotype (T) belongs to *SMN2*. For c.1155G>A, this belongs to exon 8 of both two genes, where genotype (G) belongs to *SMN1* and genotype (A) belongs to *SMN2*. In this study, the genotyping by MassARRAY (Table 1) reported ten samples (71.4%) with genotype (CT) in position c.840C>T and (GA) in position c.1155G>A, indicating *SMN1* and *SMN2,* both exons 7 and 8 were detected in these samples. (Fig. 1(A, B)). Two samples (14.3%) reported genotype (T) in position c.840C>T and (A) in position c.1155G>A, indicating only *SMN2* exons 7 and 8 were detected in these samples and were identified as SMA patients (Fig. 1(C, D)). Another two samples (14.3%) reported genotype (C) in position c.840C>T and (G) in position c.1155G>A, indicating only *SMN1* exons 7 and 8 were detected. These fourteen samples were also previously performed using the MLPA technique to confirm the mutation. The results from MLPA were 100% concordant with the genotyping obtained from the MassARRAY. This established assay also provides a specific probe for silent carriers mutation, but we did not detect the patient who had g.27134T>G and g.27706_27707delAT mutation in this study.

For the copy number determination, *SMN1* exons 7 and 8 copy numbers were used to identify the SMA disease, while the copy number of *SMN2* exons 7 and 8 was used to prognosis the disease severity. Thirteen samples (92.9%) showed consistent results in identifying the SMA patients and carriers, but only ten (71.4%) reported consistent results for copy number determination between both methods. Nine individuals (64.3%)

were identified as normal (≥ 2 copies of *SMN1* exons 7 and 8), two individuals (14.3%) were identified as SMA carriers (1 copy of *SMN1* exons 7 and 8), and two (14.3%) were identified as SMA patients (0 copy of *SMN1* exons 7 and 8). However, one individual (SMA-14) (7.1%) was determined as an SMA carrier by the MassARRAY assay, while MLPA identified this individual as normal (Table 2). For the *SMN2* gene, because we did not request any patients' medical records, this study did not compare the *SMN2* copy number with clinical symptoms found in each patient.

**Table 2** The copy number of survival motor neuron 1 (*SMN1*) and survival motor neuron 2 (*SMN2*) genes exons 7 and 8 detected by MassARRAY and MLPA assay

| Sample | Copy number determined by MassARRAY technique | | | | Interpretation | Copy number determined by MLPA technique | | | | Interpretation |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | *SMN1* (copies) | | *SMN2* (copies) | | | *SMN1* (copies) | | *SMN2* (copies) | | |
| | Exon7 | Exon8 | Exon7 | Exon8 | | Exon7 | Exon8 | Exon7 | Exon8 | |
| SMA-01 | 3 | 3 | 1 | 1 | Normal | 3 | 3 | 1 | 1 | Normal |
| SMA-02 | 3 | 2 | 1 | 2 | Normal | 3 | 2 | 1 | 2 | Normal |
| SMA-03 | 2 | 3 | 2 | 1 | Normal | 2 | 3 | 2 | 1 | Normal |
| SMA-04 | 1 | 1 | 2 | 2 | SMA Carrier | 1 | 1 | 2 | 2 | SMA Carrier |
| SMA-05 | 0 | 0 | 3 | 3 | SMA | 0 | 0 | 3 | 3 | SMA |
| SMA-06 | 0 | 0 | 3 | 3 | SMA | 0 | 0 | 3 | 3 | SMA |
| SMA-07 | 1 | 1 | 1 | 1 | SMA Carrier | 1 | 1 | 1 | 1 | SMA Carrier |
| SMA-08 | 2 | 1 | 2 | 1 | Normal | 2 | 1 | 2 | 3 | Normal |
| SMA-09 | 2 | 2 | 2 | 2 | Normal | 2 | 2 | 2 | 2 | Normal |
| SMA-10 | 3 | 3 | 0 | 0 | Normal | 3 | 3 | 0 | 0 | Normal |
| SMA-11 | 3 | 3 | 0 | 0 | Normal | 3 | 3 | 0 | 0 | Normal |
| SMA-12 | 2 | 2 | 1 | 1 | Normal | 3 | 3 | 1 | 1 | Normal |
| SMA-13 | 2 | 3 | 2 | 2 | Normal | 2 | 2 | 1 | 1 | Normal |
| SMA-14 | 1 | 1 | 1 | 2 | SMA Carrier | 2 | 2 | 2 | 2 | Normal |

MLPA: Multiplex ligation-dependent probe amplification; *SMN1*: Survival motor neuron 1; *SMN2*: Survival motor neuron 2

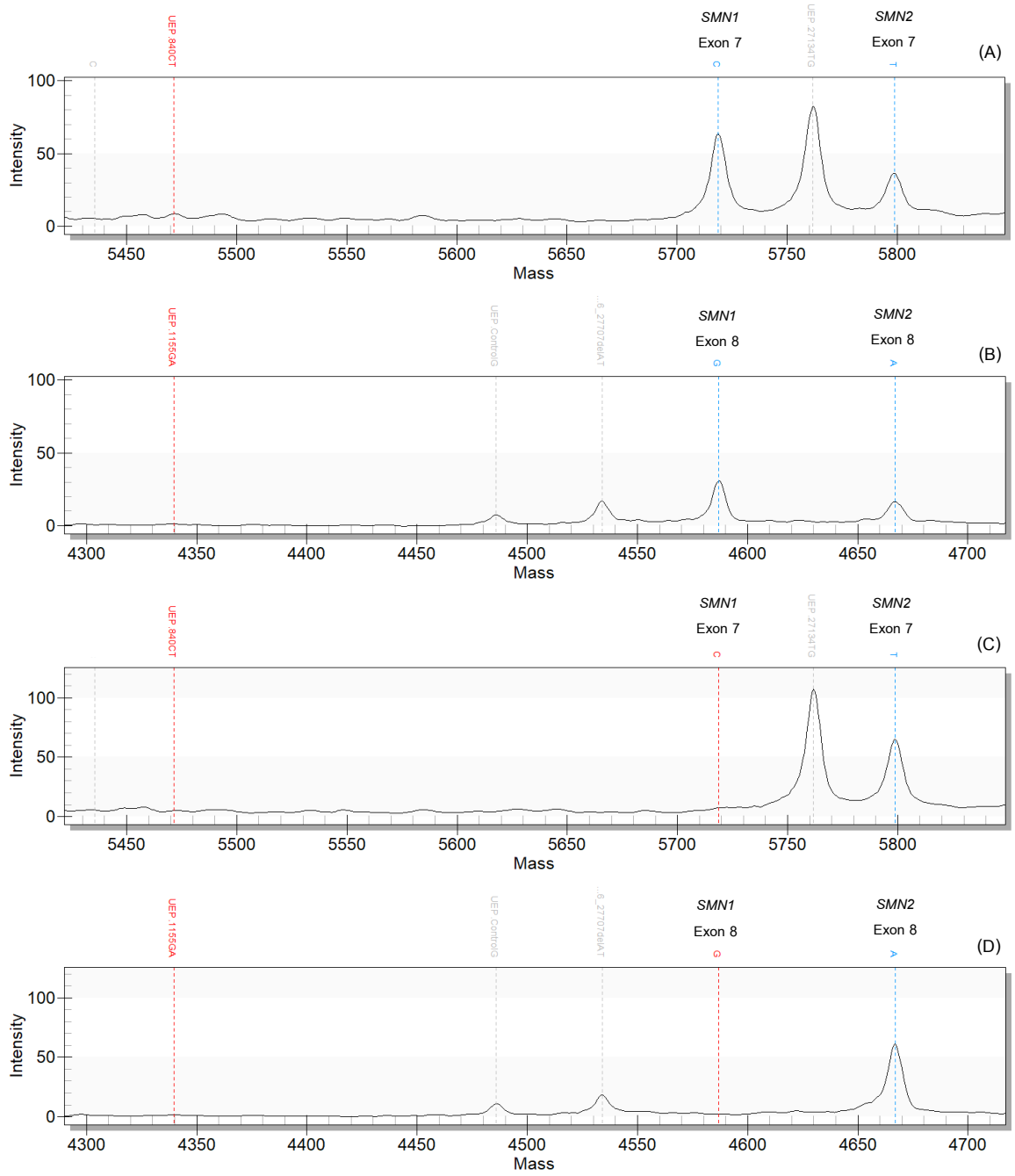



**Fig.1** The Mass spectra of a healthy individual and SMA-affected positive patient: mass spectrum of nucleotide position c.840C>T of SMA-01. This case had one peak at 5718.8 Da and one peak at 5798.7 Da, indicating the *SMN1* and *SMN2* exon 7 were detected in this individual (A); the mass spectrum of nucleotide position c.1155G>A of SMA-01. This case had one peak at 4587.0 Da and one peak at 4666.9 Da, indicating the *SMN1* and *SMN2* exon 8 were detected in this individual (B); the mass spectrum of nucleotide position c.840C>T of SMA-05. This case had only one peak at 5798.7 Da, indicating only *SMN2* exon 7 was detected in this individual (C); the mass spectrum of nucleotide position c.1155G>A of SMA-05. This case had only one peak at 4666.9 Da, indicating only the *SMN2* exon 8 was detected in this individual (D). The red vertical dotted lines on the left show the mass of unextension primer (UEP), the red and blue vertical dotted lines on the right show the mass of primer after extension, the grey vertical dotted lines on the background show the mass of UEP and primer after extension of other nucleotide position

**Discussion**

The MassARRAY system is a high-efficiency technique for detecting various genetic mutations and has been recently used by many laboratories as a clinical diagnosis and screening tool. In this study, we evaluated the efficacy of the established MassARRAY assay to detect mutations and copy number variation of *SMN1* and *SMN2* exons 7 and 8 to identify SMA-affected pregnant women using MLPA as a standard method. As an autosomal recessive inheritance disease, SMA can be transmitted to the fetus by the SMA-affected or SMA carrier parents. Thus, SMA screening in pregnant women is the first important step for determining the chance of transmitting the disease to the fetus. Although several previous studies have developed new technologies for SMA screening (Pyatt et al., 2007; Dobrowolski et al., 2012; Ar Rochmah et al., 2017; Vidal-Folch et al., 2018; Zhang et al., 2020; Zhao et al., 2021), each method also has its limitations when applied to use in the actual clinical setting. The most common limitation found in previous techniques was that they involve multiple hands-on steps, leading to labor-intensive and time-consuming. Therefore, more studies are needed to develop new genetic analysis tools for SMA diagnosis and carrier screening.

The MassARRAY assay is composed of 2 main steps: PCR reactions and a mass analysis process capable of analyzing larger batches of samples daily (~96 samples). The PCR reaction contains only three simple steps with an average of 28 minutes of hands-on time and 8 hours of elapsed time, less than the MLPA assay. Therefore, this method can reduce the turnaround time, benefiting patients by giving them quick access to clinical management. For mass analysis, this step is automated with more effortless operation. The PCR amplicons are automatically transferred onto the sprectroCHIP® array and transported into the MALDI-TOF system for mass detection, reducing labor intensiveness. In addition, this study used peripheral blood and dried blood spots as DNA sources, with the lowest DNA extracted concentration equal to 2.30 ng/μL. Although the optimal DNA concentration required for MassARRAY is 10–40 ng/μL, this study has proved the high sensitivity of MassARRAY assay that enables detecting mutation from samples with DNA concentration less than 10 ng/μL.

In this study, we established a new MassARRAY to identify the genotype and copy number of two *SMN* genes related to SMA patients and carrier diagnoses. The mass spectrum of MassARRAY clearly distinguished between SMA-positive samples (*SMN1* homozygous deletion) and normal individuals (Fig. 1). The genotyping of all fourteen samples concords with the results obtained from MLPA (Table 1). Thus, the sensitivity and specificity of this assay were 100% in detecting the presence of *SMN1* and *SMN2* exons 7 and 8. Two samples (SMA-05 and SMA-06) were genotyped (T) in c.840 and (A) in c.1155, which refers to homozygous deletion of the *SMN1* gene and will be concluded as SMA-positive patients. Another previous study by Lin et al. also reports the high efficacy of MassARRAY technology for identifying *SMN1* homozygous deletion with more straightforward operation and cost-effectiveness than other methods. Nevertheless, Lin's study did not calculate the copy number of *SMN1* and *SMN2* genes, which is essential for carrier screening and predicting severity (Lin et al., 2019). According to the standard guidelines for SMA, the copy number of *SMN1* gene exons 7 and 8 was used to diagnose the SMA patients and carriers, while the *SMN2* gene was used as a prognosis marker. (The American College of Obstetricians and Gynecologists, 2009). We tried to identify the copy number of both

exons in both genes by calculating the area under the peak of SNP divided by the internal control from the mass spectrum results. All fourteen samples successfully determined the copy number (Table 2). We found that the copy number of *SMN1* exons 7 and 8 of SMA-05 and SMA-06 was 0, which confirms the *SMN1* homozygous deletion observed from genotyping and mass spectrum results. However, the copy number determination by MassARRAY was discordant in four samples compared with MLPA. Interestingly, SMA-14 was detected with only one copy of *SMN1* exons 7 and 8 by MassARRAY, which will conclude this patient as an SMA carrier. In contrast, the result from MLPA showed two copies detected in both exons of the *SMN1* gene in this patient, which was identified as a normal case. Therefore, this assay's sensitivity and specificity for identifying SMA patients and carriers from copy number were 100% and 90%, respectively. The precise identification of SMA carriers was important in clinical management, especially in pregnant women, because the carrier gene can be transferred onto the fetus with one in four chances of causing disease if an SMA carrier was also detected in her couple. Therefore, we tried to improve the power of copy number calculation to provide more reliable results. Two possible reasons for these discordant results were the small sample size and inadequate housekeeping gene as an internal control for copy number calculation. We plan to increase the sample size to reduce the variation for further work. Moreover, two more housekeeping genes, *ACTB* and *HPRT1,* will be added to the assay for normalization and to increase the accuracy of the copy number calculation. In addition, the discordant copy numbers were observed most in DBS samples with low DNA concentration. Therefore, we suggest that high DNA concentration is required for copy number determination by MassARRAY.

In conclusion, the MassARRAY assay is an efficient molecular test in SMA. This method is a high throughput technique that simultaneously detects small mutations and aberrant copy numbers. It is easy to perform and reduces turnaround time. However, more clinical samples will be required to confirm the sensitivity and specificity of copy number determination. The success of this study will be helpful in SMA clinical management, both in diagnosis and carrier screening.

## Conflict of Interest

The authors declare that there are no conflicts of interest.

## Acknowledgements

We thank all participants who donated blood samples for this study. This work was supported by the Department of Pathology and Department of Obstetrics and Gynecology, Faculty of Medicine Ramathibodi Hospital, Mahidol University.

**References**

Ar Rochmah, M., Harahap, N.I.F., Niba, E.T.E., et al. 2017. Genetic screening of spinal muscular atrophy using a real-time modified COP-PCR technique with dried blood-spot DNA. Brain Dev. 39:774–782. doi: 10.1016/j.braindev.2017.04.015

Calì, F., Ruggeri, G., Chiavetta, V., et al. 2014. Carrier screening for spinal muscular atrophy in Italian population. J. Genet. 93: 179–181. doi: 10.1007/s12041-014-0323-x

Dejsuphong, D., Taweewongsounton, A., Khemthong, P., Chitphuk, S., Stitchantrakul, W., Sritara, P., Tunteeratum, A., Sura, T. 2019. Carrier frequency of spinal muscular atrophy in Thailand. Neurol Sci. 40: 1729–1732. doi: 10.1007/s10072-019-03885-5

Dobrowolski, S.F., Pham, H.T., Downes, F.P., Prior, T.W., Naylor, E.W., Swoboda, K.J. 2012. Newborn screening for spinal muscular atrophy by calibrated short-amplicon melt profiling. Clin. Chem. 58:1033–1039. doi: 10.1373/clinchem.2012.183038

Ellis, J.A., Ong, B. 2017. The MassARRAY® System for targeted SNP genotyping. Methods Mol Biol. 1492: 77–94. doi: 10.1007/978-1-4939-6442-0_5

Lin, Y., Lin, C.H., Yin, X., et al. 2019. Newborn screening for spinal muscular atrophy in china using DNA mass spectrometry. Front Genet. 10: 1255. doi: 10.3389/fgene.2019.01255

Mercuri, E., Sumner, C.J., Muntoni, F., Darras, B.T., Finkel, R.S. 2022. Spinal muscular atrophy. Nat. Rev. Dis. Primers. 8: 1–16. doi: 10.1038/s41572-022-00380-8

Prior, T.W. 2008. Carrier screening for spinal muscular atrophy. Genet Med. 10:840–842. doi: 10.1097/GIM.0b013e318188d069

Prior, T.W., Nagan, N., Sugarman, E.A., Batish, S.D., Braastad, C. 2011. Technical standards and guidelines for spinal muscular atrophy testing. Genet Med. 13: 686–694. doi: 10.1097/GIM.0b013e318220d523

Pyatt, R.E., Mihal, D.C., Prior, T.W. 2007. Assessment of liquid microbead arrays for the screening of newborns for spinal muscular atrophy. Clin. Chem. 53: 1879–1885. doi: 10.1373/clinchem.2007.092312

Scott, S.A., Scott, E.R., Seki, Y., et al. 2021. Development and analytical validation of a 29 gene clinical pharmacogenetic genotyping panel: Multi-Ethnic Allele and copy number variant detection. Clin Transl Sci. 14: 204–213. doi: 10.1111/cts.12844

Su, Y.N., Hung, C.C., Lin, S.Y., et al. 2011. Carrier screening for spinal muscular atrophy (SMA) in 107,611 pregnant women during the period 2005-2009: a prospective population-based cohort study. PLoS One. 6:e17067. doi: 10.1371/journal.pone.0017067

Suchiman, H.E., Slieker, R.C., Kremer, D., Slagboom, P.E., Heijmans, B.T., Tobi, E.W. 2015. Design, measurement and processing of region-specific DNA methylation assays: the mass spectrometry-based method EpiTYPER. Front Genet. 6: 287. doi: 10.3389/fgene.2015.00287

Sugarman, E.A., Nagan, N., Zhu, H., et al. 2012. Pan-ethnic carrier screening and prenatal diagnosis for spinal muscular atrophy: clinical laboratory analysis of >72,400 specimens. Eur. J. Hum. Genet. 20: 27–32. doi: 10.1038/ejhg.2011.134

The American College of Obstetricians and Gynecologists. 2009. ACOG committee opinion No. 432: spinal muscular atrophy. Obstet Gynecol. 113: 1194–1196. doi: 10.1097/AOG.0b013e3181a6d03a

Vidal-Folch, N., Gavrilov, D., Raymond, K., Rinaldo, P., Tortorelli, S., Matern, D., Oglesbee, D. 2018. Multiplex droplet digital PCR method applicable to newborn screening, carrier status, and assessment of spinal muscular atrophy. Clin. Chem. 64: 1753–1761. doi: 10.1373/clinchem.2018.293712

Zhang, J., Wang, Y., Ma, D., et al. 2020. Carrier screening and prenatal diagnosis for spinal muscular atrophy in 13,069 Chinese pregnant women. J. Mol. Diagn. 22: 817–822. doi: 10.1016/j.jmoldx.2020.03.001

Zhao, S., Wang, W., Wang, Y., et al. 2021. NGS-based spinal muscular atrophy carrier screening of 10,585 diverse couples in China: a pan-ethnic study. Eur. J. Hum. Genet. 29: 194–204. doi: 10.1038/s41431-020-00714-8

# การโคลนและวิเคราะห์ยีนบิลินไลเอสที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์โฮโล-ซีไฟโคไซยานินหน่วยย่อยเบตาจากไซยาโนแบคทีเรียน้ำพุร้อน

Cloning and analysis of Bilin Lyase genes involving in the biosynthesis of a Holo-C-Phycocyanin Beta Subunit from the Hot Spring Cyanobacterium

**ขนิษฐา คำนึง, เทพปัญญา เจริญรัตน์, สุเปญญา จิตตพันธ์, ชนิตโชต ปิยพิทยานันต์***

Khanittha Kumnueng, Theppanya Charoenrat, Supenya Chittapun, Chanitchote Piyapittayanun*

สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ปทุมธานี 12120

Department of Biotechnology, Faculty of Science and Technology, Thammasat University, Pathum Thani 12120, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: chanitchote@gmail.com

**บทคัดย่อ**

ซีไฟโคไซยานินคือโปรตีนสีน้ำเงินที่มีบทบาทในการสังเคราะห์แสงของไซยาโนแบคทีเรีย ถูกประยุกต์ใช้เป็นสารแต่งสีในอาหารและเครื่องสำอางและมีสมบัติเรืองแสงจึงถูกใช้ติดฉลากในงานทางอณูชีววิทยา งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อโคลนยีนบิลินไลเอส *cpcS* และ *cpcT* ที่จำเป็นในกระบวนการสังเคราะห์ซีไฟโคไซยานินจากไซยาโนแบคทีเรียน้ำพุร้อน *Thermosynechococcus* sp. TUBT-T01 ผลการวิเคราะห์ลำดับนิวคลีโอไทด์พบว่ายีน *cpcS* และ *cpcT* มีความยาว 549 และ 591 คู่เบส และแปลรหัสเป็นโปรตีนที่มีความยาว 182 และ 196 กรดอะมิโน ตามลำดับ ผลการเปรียบเทียบลำดับนิวคลีโอไทด์พบว่ามีความเหมือนกับยีน *cpcS* และ *cpcT* ในจีนัส *Thermosynechococcus* spp. ที่ระดับสูงสุด 96% ซึ่งสอดคล้องกับความสัมพันธ์เชิงวิวัฒนาการ ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้จะนำไปสู่การผลิตรีคอมบิแนนท์โฮโล-ซีไฟโคไซยานินหน่วยย่อยเบตาจาก *Thermosynechococcus* sp. TUBT-T01 ที่มีเสถียรภาพที่อุณหภูมิสูง โดยใช้ระบบการแสดงออกใน *Escherichia coli* ซึ่งเป็นการเพิ่มศักยภาพในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

**คำสำคัญ**: ซี-ไฟโคไซยานิน *cpcS cpcT*

**Abstract**

C-phycocyanin is a blue-colored protein that is involved in the photosynthesis of cyanobacteria. It is utilized as a colorant in food and cosmetics as well as a fluorescent label in molecular biology. This study aimed to clone the bilin lyase genes, *cpcS* and *cpcT*, from the hot spring cyanobacterium, *Thermosynechococcus* sp. TUBT-T01. These genes are necessary for the biosynthesis of a holo-c-phycocyanin beta subunit. Analysis of nucleotide sequences revealed that the *cpcS* and *cpcT* genes are 549 and 591 base pairs in length, which encode proteins of 182 and 196 amino acids, respectively. The result of nucleotide sequence alignment indicated that *cpcS* and *cpcT* had the highest identity, which was approximately 96% with members of the genus *Thermosynechococcus* spp. consistent with their evolutionary relationship. This study will significantly contribute to the recombinant production of a thermostable *Thermosynechococcus* sp. TUBT-T01 holo-C-phycocyanin beta subunit in *Escherichia coli* thereby expanding its potential for future applications.

**Keywords**: C-phycocyanin *cpcS cpcT*

**คำนำ**

ซีไฟโคไซยานิน คือโปรตีนสีน้ำเงินที่สามารถละลายน้ำได้ดี เป็นหนึ่งในไฟโคบิลิโปรตีนสำคัญในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของโซยาโนแบคทีเรีย สามารถดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตรและปลดปล่อยแสงฟลูออเรสเซนต์สูงสุดที่ความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร (Minkova et al., 2003) ปัจจุบันมีการศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับสมบัติทางสีและแสงของซี ไฟโคไซยานินเพื่อต่อยอดสู่การนำไปใช้ประโยชน์ในระดับอุตสาหกรรม-เช่น การใช้เป็นสารแต่งสีในอุตสาหกรรมอาหารหรือเครื่องสำอาง การใช้เป็นสีย้อมธรรมชาติ และการใช้เป็นเครื่องหมายติดฉลากฟลูออเรสเซนต์ในการตรวจวัดทางอณูชีววิทยา และยังพบว่ามีสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระ (Bhat et al., 2000) ต้านการอักเสบ (Nyman et al., 2004) และยับยั้งเซลล์มะเร็ง (Shin et al., 2009) จึงสามารถประยุกต์ซีไฟโคไซยานินในทางการแพทย์ได้อีกด้วย

โครงสร้างของซีไฟโคไซยานินประกอบด้วยส่วนของโปรตีนไม่มีสีเรียกว่า 1) อะโป ซีไฟโคไซยานิน แบ่งเป็น-2 หน่วยย่อยได้แก่หน่วยย่อยแอลฟาและเบตา ที่ควบคุมการแสดงออกโดยยีน *cpcA* และ *cpcB* ตามลำดับ และ 2) โครโมฟอร์ชนิดไฟโคไซยาโนบิลินมีโครงสร้างเตตราไพโรลเส้นตรง )linear tetrapyrrole chromophores) ที่ถูกสังเคราะห์ผ่านการทำงานของเอนไซม์ Heme oxygenase 1 ที่ควบคุมการแสดงออกด้วยยีน *hox1* และเอนไซม์ Ferredoxin oxidoreductase ที่ควบคุมการแสดงออกด้วยยีน *pcyA* โดยมีเอนไซม์กลุ่มบิลินไลเอสทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาการเข้าจับระหว่างอะโปซีไฟโค-ไซยานินหน่วยย่อยเบตากับไฟโคไซยาโนบิลินด้วยพันธะไธโออีเทอร์ (chromophorylation) โดยบิลินไลเอสชนิด CpcE และ CpcF จะเข้าจับกันอยู่ในรูปเฮเทอโรเตตราเมอร์เข้าเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดการเข้าจับ 1 ตำแหน่งคือ cys-84 ในหน่วยย่อยแอลฟา (Fairchild et al.,1992) ส่วนของหน่วยย่อยเบตามีการเข้าเร่งปฏิกิริยา 2 ตำแหน่ง ได้แก่ cys-84 ด้วยเอนไซม์บิลินไลเอสชนิด CpcS ที่อยู่ในรูปโฮโมไดเมอร์ (Zhao et al., 2007) และตำแหน่ง cys-153 ด้วยชนิด CpcT ที่อยู่ในรูปโฮโมไดเมอร์เช่นเดียวกัน (Zhou et al., 2014) ส่งผลต่อการเกิดสีน้ำเงินและสมบัติทางแสงของโปรตีน

กลุ่มวิจัยสาหร่ายและแพลงก์ตอน สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ได้คัดแยกและระบุสายพันธุ์ไซยาโนแบคทีเรีย *Thermosynechococcus* sp. TUBT-T01 จากน้ำพุร้อนบ่อกรัง จังหวัดสุราษฎร์ธานี และพบว่าสายพันธุ์นี้สร้างซีไฟโคไซยานินที่มีเสถียรภาพที่อุณหภูมิสูงเมื่อเทียบกับซีไฟโคไซยานินจากไซยาโนแบคที่เรียที่เจริญเติบโตในอุณหภูมิปานกลาง (Suwanmanee et al., 2015) โดยลำดับนิวคลีโอไทด์บางส่วนของยีน *cpcA cpcB cpcE* และ *cpcF* จาก *Thermosynechococcus* sp. TUBT-T01 เป็นลำดับอนุรักษ์ที่พบเฉพาะกลุ่มของไซยาโนแบคทีเรียที่เจริญเติบโตในอุณหภูมิสูงเท่านั้น ความแตกต่างนี้อาจมีความเกี่ยวข้องต่อการคงสภาพโปรตีนภายใต้อุณหภูมิสูง (Dedvisitsakul et al., 2017; Huadraksasat et al., 2017; Sritusnee et al., 2020)

เนื่องจากการเพาะเลี้ยง *Thermosynechococcus sp.* TUBT-T01 ต้องใช้สภาวะที่มีอุณหภูมิสูง เจริญเติบโตช้า ขั้นตอนในการสกัดโปรตีนออกจากเซลล์และการทำให้บริสุทธิ์มีความซับซ้อน ผู้วิจัยจึงได้โคลนยีนบิลินไลเอส *cpcS* และ *cpcT* จาก *Thermosynechococcus sp.* TUBT-T01 ซึ่งเป็นแหล่งที่มาเดียวกับยีน *cpcB* เนื่องจาก Zhao et al. (2007) รายงานว่าอะโปโปรตีนแต่ละหน่วยย่อยมีความจำเพาะต่อบิลินไลเอสที่แตกต่างกัน ซึ่งความจำเพาะนี้ส่งผลต่อความเปลี่ยนแปลงสมบัติการดูดกลืนแสงของโปรตีน นอกจากนี้การเข้าจับไฟโคไซยาโนบิลินในตำแหน่งที่ต่างกันอาจส่งผลต่อสมบัติการปลดปล่อยแสงฟลูออเรสเซนต์ที่เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับหน่วยย่อยแอลฟา เพื่อใช้สำหรับการสร้างวิถีชีวสังเคราะห์ขึ้นใหม่ในการผลิตรีคอมบิแนนท์โฮโลซีไฟโคไซยานินหน่วยย่อยเบตา-โดยใช้ระบบ *Escherichia coli* จากการแสดงออกร่วมกันของยีน *cpcB hox1 pcyA cpcS* และ *cpcT* เพราะระบบนี้สามารถผลิตโปรตีนปริมาณสูงลดระยะเวลา รวมถึงง่ายต่อการทำโปรตีนให้บริสุทธิ์ และได้วิเคราะห์ลำดับนิวคลีโอไทด์ของยีน *cpcS* และ *cpcT* ลำดับกรดอะมิโน และคาดการณ์สมบัติของโปรตีน โดยคาดหวังว่ารีคอมบิแนนท์โฮโลซีไฟโคไซยานินที่-ผลิตได้จะมีเสถียรภาพที่อุณหภูมิสูง ซึ่งจะเป็นการลดข้อจำกัดและเพิ่มความหลากหลายในการนำไปใช้ประโยชน์ในวงกว้างมากยิ่งขึ้น

## อุปกรณ์และวิธีการ

*การออกแบบไพรเมอร์สำหรับเพิ่มปริมาณยีน cpcS และ cpcT*

รวบรวมข้อมูลลำดับนิวคลีโอไทด์ของไซยาโนแบคทีเรียในกลุ่ม *Thermosynechococcus* spp. ในฐานข้อมูล GenBank โดยเปรียบเทียบลำดับนิวคลีโอไทด์ด้วยโปรแกรม MEGA11 (Tamura et al., 2021) เพื่อหาตำแหน่งอนุรักษ์ที่เหมาะสมเพื่อออกแบบไพรเมอร์ (Table 1) ในการเพิ่มปริมาณยีน *cpcS* และ *cpcT* คำนวณค่าพารามิเตอร์ได้แก่ ค่า Tm, %GC content, primer dimer ด้วยโปรแกรม OligoAnalyzer (Owczarzy et al., 2008) โดยปฏิกิริยาลูกโซ่พอลิเมอเรสมีองค์ประกอบดังนี้ 1) บัฟเฟอร์ 1X High Fidelity PCR 2) ดีออกซีไรโบนิวคลีโอไทด์ไตรฟอสเฟตชนิดละ 0.2 มิลลิโมลาร์ 3) แมกนีเซียมซัลเฟต 2.0 มิลลิโมลาร์ 4) คู่ไพรเมอร์ชนิดละ 0.2 ไมโครโมลาร์ 5) เอนไซม์ Platinum® *Taq* DNA High Fidelity Polymerase (5 ยูนิตต่อไมโครลิตร) 1 ยูนิต (Invitrogen, USA) 6) เซลล์ *Thermosynechococcus sp.* TUBT-T01 100 ไมโครกรัมเป็นดีเอ็นเอแม่แบบ และสภาวะของปฏิกิริยาเป็นดังนี้ 1) Initial Denaturation 94 °C 5 นาที 2) Denaturation 94 °C 30 วินาที 3) Annealing 42 °C 30 วินาที 4) Extension 72 °C 1 นาที 30 วินาที 5) Denaturation 94 °C 30 วินาที 6) Annealing 54 °C 30 วินาที 7) Extension 72 °C 1 นาที 30 วินาทีและ 8) Final extension 72 °C 7 นาที ตั้งค่าวนซ้ำในขั้นตอนที่ 2–4 เป็นจำนวน 15 รอบและขั้นตอนที่ 5-7 เป็นจำนวน 25 รอบ จากนั้นทำผลิตภัณฑ์ปฏิกิริยาลูกโซ่พอลิเมอเรสให้บริสุทธิ์ด้วยชุด QIAquick PCR Purification (QIAGEN, Germany) และตรวจสอบผลด้วยอิเล็กโทรโฟรีซิสบนเจลอะกาโรส 0.8% โดยมวลต่อปริมาตร

**Table 1** Primers of *cpcS* and *cpcT* gene

| Target gene | Primer Name | Primer sequences (3′⟶5′) |
|---|---|---|
| *cpcS* | RBS-*cpcS*-F | 5′-TAAGAAGGAGATATACATATGTGCGCAGGTATGGACAT-3′ |
| | *cpcS*-R | 5′-GAGCTCTCAGGAATTGGCGGGTTG-3′ |
| *cpcT* | RBS-*cpcT*-F | 5′-TAAGAAGGAGATATACATATGACACACGCAACCGATGT-3′ |
| | *cpcT*-R | 5′-GCTTTGTTAGCAGCCCTCGAGTTAGGC AATAATCTCATCGGCA-3′ |

*การโคลนยีน cpcS และ cpcT*

นำผลิตภัณฑ์ปฏิกิริยาลูกโซ่พอลิเมอเรสที่บริสุทธิ์เชื่อมต่อ (ligation) เข้าสู่เวกเตอร์ pGEM-T Easy ด้วยชุด TA-cloning (Promega, USA) จากนั้นทรานสฟอร์มเข้าสู่เซลล์คอมพีเทนต์ *Escherichia coli* DH5α เป็นเวลา 30 นาทีบนน้ำแข็ง และนำไปแช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 42 °C เป็นเวลา 45 วินาที และคัดเลือกโคโลนีสีขาวที่สามารถเจริญเติบโตบนอาหารแข็ง LB ที่เติมยาปฏิชีวนะแอมพิซิลลิน เพื่อนำไปยืนยันการแทรกของยีนด้วยวิธีโคโลนีพีซีอาร์โดยใช้คู่ไพรเมอร์ M13-F(5′-GTAAAACGACGGCCAGT-3′) และM13-R (5′-GCGGATAACAATTTCACACAGG-3′) ที่มีลำดับนิวคลีโอไทด์จำเพาะบนเวกเตอร์ pGEM-T Easy นำโคโลนีที่ผ่านการยืนยันไปเพาะเลี้ยงเพื่อเพิ่มปริมาณรีคอมบิแนนท์พลาสมิดและส่งวิเคราะห์ลำดับนิวคลีโอไทด์

*การวิเคราะห์ลำดับนิวคลีโอไทด์และลำดับกรดอะมิโนของยีน cpcS และ cpcT*

นำผลลำดับนิวคลีโอไทด์ของยีน *cpcS* และ *cpcT* ที่ได้ไปเปรียบเทียบกับลำดับนิวคลีโอไทด์ในฐานข้อมูล GenBank ด้วยโปรแกรม BLASTN (NCBI, USA) คาดการณ์ลำดับกรดอะมิโนและวิเคราะห์แผนภูมิความสัมพันธ์เชิงวิวัฒนาการ (phylogenetic tree) ของโปรตีนด้วยโปรแกรม MEGA11 (Tamura et al., 2021) ด้วยหลักการ Maximum-

Likelihood จากนั้นคำนวณขนาดของโปรตีนและวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพด้วยโปรแกรม ProtParam (Gasteiger et al., 2005) และทำนายโครงสร้างทุติยภูมิของโปรตีนด้วยโปรแกรม GOR4 (Garnier et al., 1996)

**ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง**

*การวิเคราะห์ลำดับนิวคลีโอไทด์ของยีน cpcS และ cpcT*

หลังจากการใช้ไพรเมอร์ RBS-*cpcS*-F และ *cpcS*-R ซึ่งมีค่า Tm เท่ากับ 64.5 และ 67.7 ค่า %GC content เท่ากับ 39 และ 58 และค่า primer dimer เท่ากับ -13.8 kcal/mol และ -9.49 kcal/mol ตามลำดับ เพื่อเพิ่มปริมาณยีนบิลินไลเอส *cpcS* และไพรเมอร์ RBS-*cpcT*-F และ *cpcT*-R ซึ่งมีค่า Tm เท่ากับ 64.8 และ 71.3 ค่า %GC content เท่ากับ 39 และ 49 และค่า primer dimer เท่ากับ -7.82 kcal/mol และ -9.96 kcal/mol ตามลำดับ เพื่อเพิ่มปริมาณยีน *cpcT* ด้วยปฏิกิริยาลูกโซ่พอลิเมอเรส พบแถบดีเอ็นเอขนาดประมาณ 600 คู่เบส ปรากฏบนเจลอะกาโรส (Fig. 1) เมื่อนำชิ้นดีเอ็นเอดังกล่าวเชื่อมต่อกับเวกเตอร์ pGEM-T-easy และทรานสฟอร์มเข้าสู่ *Escherichia coli* DHα พบว่ามีโคโลนีเจริญขึ้นบนอาหาร LB ที่เติมยาปฏิชีวนะเพนนิซิลลินและเมื่อยืนยันด้วยโคโลนีพีซีอาร์จึงระบุได้ว่ามียีน *cpcS* และ *cpcT* แทรกในเวกเตอร์ pGEMT-easy ผลการวิเคราะห์ลำดับนิวคลีโอไทด์ด้วยคู่ไพรเมอร์ M13-F และ M13-R และเปรียบเทียบกับฐานข้อมูล GenBank ด้วยโปรแกรม BLASTN พบว่ายีน *cpcS* มีความยาว 549 คู่เบส มีค่า %Identity ที่ใกล้เคียงกับไซยาโนแบคทีเรียสายพันธุ์ *Thermosynechococcus* sp. CL- %96.90 1มากที่สุดที่รองลงมาคือสายพันธุ์ *Thermosynechococcus elongatus* PKUAC-SCTE542, *Thermosynechococcus* sp. TA-1, *Thermosynechococcus* sp. NK55 และ *Thermosynechococcus vulcanus* NIES-2134 ซึ่งมีค่าประมาณ 95% และยีน *cpcT* มีความยาว 591คู่เบส พบว่ามีค่า %Identity ที่ใกล้เคียงกับไซยาโนแบคทีเรียสายพันธุ์ *Thermosynechococcus* sp. TA-1 มากที่สุดที่ 93.91% รองลงมาคือสายพันธุ์ *Thermosynechococcus* sp. CL-1, *Thermosynechococcus elongatus* PKUAC-SCTE542 และ *Thermosynechococcus* sp. NK 55ซึ่งมีค่าประมาณ 93%โดยค่าความคาดหวัง (E-value) ของทั้ง 2 ยีนมีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงค่าความเชื่อมั่นในระดับสูงที่ลำดับนิวคลีโอไทด์ของยีนบิลินไลเอสทั้ง 2 ชนิดมีความเหมือนกับไซยาโนแบคทีเรียในกลุ่มที่กล่าวมาข้างต้นเป็นอย่างมาก เป็นไปได้ว่าลำดับนิวคลีโอไทด์อนุรักษ์ของยีน *cpcS* และ *cpcT* จากไซยาโนแบคทีเรียในกลุ่มนี้จะมีบทบาทเกี่ยวข้องกับเสถียรภาพของโปรตีนที่อุณหภูมิสูง

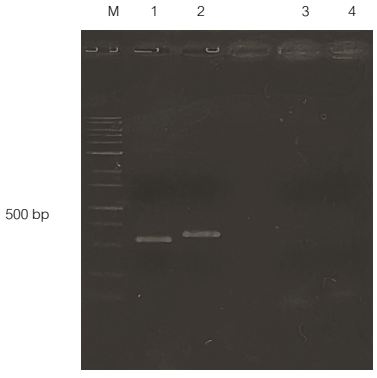



**Fig. 1** Electrophoresis of Polymerase Chain Reaction products on 0.8% agarose gel. M: 1Kb plus DNA Ladder (BIO-HELIX, Taiwan); 1,2: *cpcS* and *cpcT* PCR product; 3,4: negative control

*การวิเคราะห์ลำดับกรดอะมิโนและความสัมพันธ์เชิงวิวัฒนาการของโปรตีนไลเอส CpcS และ CpcT*

เมื่อวิเคราะห์ลำดับกรดอะมิโนของโปรตีน CpcS พบว่าสามารถแปลรหัสได้เป็น 182 กรดอะมิโน มวลโมเลกุลเท่ากับ 20.32 กิโลดาลตัน หลังการศึกษาแผนภูมิความสัมพันธ์เชิงวิวัฒนาการของโปรตีน พบว่า CpcS ของ *Thermosynechococcus sp. TUBT-T01* ถูกจัดอยู่ในกลุ่มความสัมพันธ์ร่วมกับสายพันธุ์ *Thermosynechococcus* sp. *vestitus*, *Thermosynechococcus* sp. CL-1, *Thermosynechococcus elongatus* PKUAC-SCTE542, *Thermosynechococcus* sp. TA-1, *Thermosynechococcus* sp. NK55, *Thermosynechococcus vulcanus* NIES-2134 และ *Thermosynechococcus elongatus* BP-1 ด้วยค่าความเชื่อมั่นของการทดสอบซ้ำเท่ากับ 99% แสดงใน Fig. 2

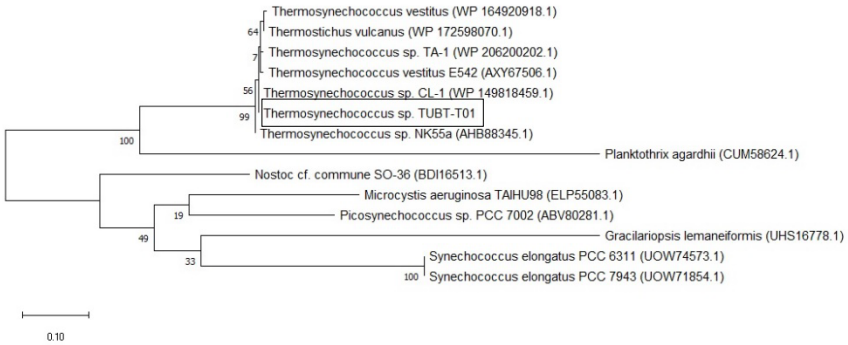



**Fig. 2** Phylogenetic analysis of CpcS amino acid sequence. Number at nodes represent the bootstrap values. The evolutionary distance between the groups is indicated by the scale (0.10 = 10% difference)

โครงสร้างทุติยภูมิของโปรตีน CpcS จาก *Thermosynechococcus sp. TUBT-T01* แสดงใน Fig. 3 ประกอบด้วยโครงสร้างแบบเกลียวแอลฟา (α-helix) คิดเป็น 29.78% กระจายตลอดสายพอลิเปปไทด์ โครงสร้างแผ่นชีตเบตา (β-pleated sheet) คิดเป็น 20.22% และแบบเกลียวที่ไม่เป็นระเบียบ (random coil) คิดเป็น 50% ที่กระจายอยู่ทั้งของสายพอลิเปปไทด์ โดยคาดว่าโปรตีน CpcS จะทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาการเข้าจับระหว่างบิลินและอะโป-ซีไฟโคไซยานินหน่วยย่อยเบตาที่ตำแหน่งซีสทิอีน-82 (Zhao et al., 2007; Huadraksasat et al., 2017) เมื่อเปรียบเทียบโครงสร้างทุติยภูมิที่ทำนายได้ พบว่ามีความคล้ายคลึงเป็นอย่างมากกับกลุ่มไซยาโนแบคทีเรียที่เติบโตในอุณหภูมิสูง แต่พบความแตกต่างขององค์ประกอบ ขนาดและการเรียงตัวของโครงสร้างโปรตีนเมื่อเทียบกับ *Nostoc* cf. commune SO-36 (BDI16513.1) ซึ่งเป็นไซยาโนแบคทีเรียที่เจริญเติบโตในอุณหภูมิปานกลาง และสาหร่ายสีแดง *Gracilariopsis lemaneiformis* (UHS16778.1)

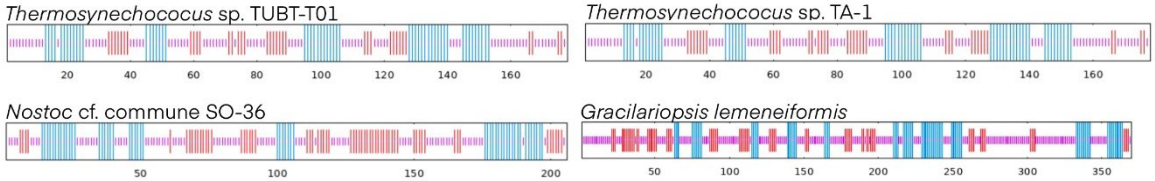



**Fig. 3** The secondary of CpcS. The blue bars are α-helix, red bars are β-sheet, and purple bars are random coil regions

ในส่วนของผลวิเคราะห์ลำดับกรดอะมิโนของโปรตีน CpcT พบว่าสามารถแปลรหัสได้เป็น 196 กรดอะมิโน มวลโมเลกุลเท่ากับ 22.44 กิโลดาลตัน หลังการศึกษาเชิงวิวัฒนาการของโปรตีน ด้วย Phylogenetic tree พบว่า CpcT ของ *Thermosynechococcus sp. TUBT-T01* ถูกจัดอยู่ในกลุ่มความสัมพันธ์ร่วมกับสายพันธุ์ *Thermosynechococcus* sp. CL-1, *Thermosynechococcus elongatus* PKUAC-SCTE542, *Thermosynechococcus* sp. TA-1,

*Thermosynechococcus* sp. NK55, *Thermosynechococcus vulcanus* NIES-2134 และ *Thermosynechococcus elongatus* BP-1 ด้วยค่าความเชื่อมั่นของการทดสอบซ้ำเท่ากับ 100% แสดงใน Fig. 4

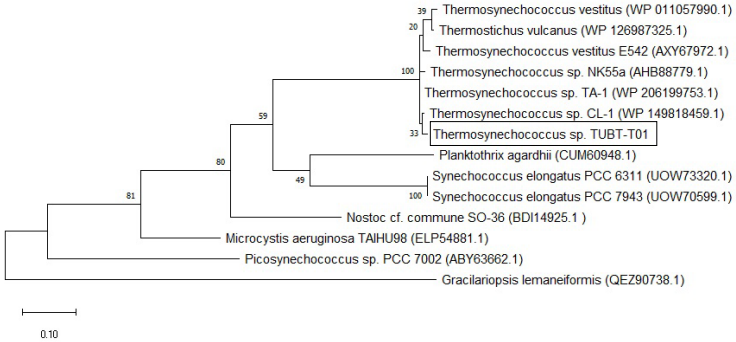



**Fig. 4** Phylogenetic analysis of CpcT amino acid sequence. Number at nodes represent the bootstrap values. The evolutionary distance between the groups is indicated by the scale (0.10 = 10% difference)

โครงสร้างทุติยภูมิของโปรตีน CpcT จาก *Thermosynechococcus sp. TUBT-T01* แสดงใน Fig. 5 ประกอบด้วยโครงสร้างแบบเกลียวแอลฟา คิดเป็น 32.65% ซึ่งมีความหนาแน่นที่บริเวณปลาย N-terminal โครงสร้างแผ่นชีตเบตาคิดเป็น 17.68% ที่กระจายทั่วทั้งสายพอลิเปปไทด์ และแบบเกลียวที่ไม่เป็นระเบียบคิดเป็น 49.49% โดยมีความหนาแน่นที่บริเวณปลาย C-terminus โดยคาดว่าโปรตีน CpcT จะทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาการเข้าจับกับตำแหน่งซีสทีอีน-153 (Zhao et al., 2007; Huadraksasat et al., 2017) และโครงสร้างทุติยภูมิที่ทำนายได้มีความคล้ายคลึงกับกลุ่มไซยาโนแบคทีเรียที่เจริญเติบโตในอุณหภูมิสูงแต่แตกต่างจากกลุ่มที่เจริญเติบโตในอุณหภูมิปานกลางเช่นเดียวกับของ CpcS

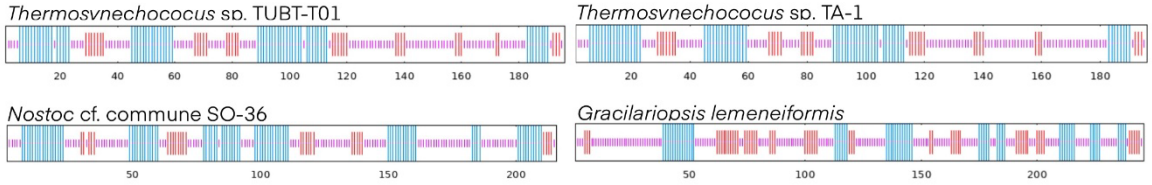



**Fig. 5** The secondary of CpcT. Long vertical bars are **α**-helix, medium vertical bars are **β**-sheet, and short vertical bars are random coil regions.

ผลจากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงวิวัฒนาการของโปรตีน CpcS และ CpcT จาก *Thermosynechococcus sp.* TUBT-T01 มีความคล้ายคลึงกันคือมีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกับไซยาโนแบคทีเรียในกลุ่มที่เจริญเติบโตที่อุณหภูมิสูงและแยกแขนง (branch) ออกจากไซยาโนแบคทีเรียที่เจริญในอุณหภูมิปานกลางและสาหร่ายสีแดง (*Gracillariopsis lemaneiformis*) อย่างชัดเจน เช่นเดียวกับความสัมพันธ์เชิงวิวัฒนาการของเอนไซม์บิลินไลเอส CpcE และ CpcF จาก *Thermosynechococcus sp.* TUBT-T01 (Sritusnee et al., 2020) ซึ่งสอดคล้องกับผลการเปรียบเทียบลำดับนิวคลีโอไทด์ จากผลที่ได้นี้แสดงให้เห็นว่าไซยาโนแบคทีเรียอาจเกิดวิวัฒนาการในระดับยีนเพื่อให้สามารถคงศักยภาพการทำงานของโปรตีนเมื่ออยู่ภายใต้อุณหภูมิสูงซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเสียสภาพของโปรตีน

จากการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพของโปรตีนด้วยโปรแกรม ProtParam แสดงผลตาม Table 2 โดยพบว่าโปรตีน CpcS และ CpcT มีค่า pH ที่ทำให้โปรตีนมีประจุเท่ากับ 0 (isoelectric point หรือ PI) เท่ากับ 5.23 และ 5.63 ตามลำดับ ค่าตัวชี้วัดความเสถียรของโปรตีนในหลอดทดลอง (instability index) ของ CpcS มีค่าเท่ากับ 47.37 ซึ่งมีค่าสูงกว่า 40 ทำนายว่าโปรตีนอาจมีเสถียรภาพต่ำ และ CpcT มีค่าเท่ากับ 37.32 ซึ่งค่าต่ำกว่า 40 แสดงว่าโปรตีนมีเสถียรภาพ และค่าความชอบน้ำหรือไม่ชอบน้ำของโปรตีน (hydropathicity index) CpcS และ CpcT เท่ากับ -0.285 และ -0.292 ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้มีค่าเป็นลบแสดงให้เห็นว่าโปรตีนมีสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) อาจส่งผลให้โปรตีนละลายน้ำได้ดี

ผลการวิเคราะห์ที่ได้นี้เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการวางแผนการทดลองในขั้นตอนการผลิตและการทำโปรตีนให้บริสุทธิ์

**Table 2** Physicochemical properties of proteins

| Protein | Amino acid sequences | Molecular weight (KDa) | Isoelectric point | Instability index | Hydropathicity index |
|---|---|---|---|---|---|
| CpcS | 182 | 20.32 | 5.23 | 47.37 | -0.285 |
| CpcT | 196 | 22.44 | 5.63 | 37.32 | -0.292 |

## สรุป

การวิเคราะห์ลำดับนิวคลีโอไทด์และสมบัติของโปรตีนบิลินไลเอส CpcS และ CpcT จากไซยาโนแบคทีเรีย *Thermosynechococcus* sp. TUBT-T01 พบว่ามีความยาวของสายนิวคลีโอไทด์เท่ากับ 549 และ 591 คู่เบส ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบลำดับนิวคลีโอไทด์กับฐานข้อมูล GenBank ของ NCBI พบว่าโปรตีนทั้ง 2 ชนิดมีความหมือนกับกลุ่มไซยาโนแบคทีเรียในกลุ่ม *Thermosynechococcus* spp. ที่ค่าสูงสุดเท่ากับ 96% ซึ่งความสัมพันธ์เชิงวิวัฒนาการและการทำนายโครงสร้างทุติยภูมิของโปรตีนก็แสดงผลในลักษณะเดียวกัน ทำให้คาดการณ์ได้ว่าลำดับนิวคลีโอไทด์และลำดับกรดอะมิโนอนุรักษ์ของ CpcS และ CpcT จากกลุ่มไซยาโนแบคทีเรียที่เจริญเติบโตในอุณหภูมิสูงมีอิทธิพลต่อเสถียรภาพของโปรตีน งานวิจัยชิ้นนี้เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการผลิตซีไฟโคไซยานินหน่วยย่อยเบตาจากไซยาโนแบคทีเรีย *Thermosynechococcus* sp. TUBT-T01 โดยใช้ระบบการแสดงออกของ *E. coli* ซึ่งคาดหวังว่าซีไฟโคไซยานินหน่วยย่อยเบตาที่ผลิตได้จะมีเสถียรภาพที่อุณหภูมิสูง เพื่อเพิ่มศักยภาพและต่อยอดการใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมทางเทคโนโลยีชีวภาพต่อไป

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

## เอกสารอ้างอิง

Bhat, V.B., Madyastha, K.M. 2000. C-phycocyanin: A potent peroxyl radical scavenger in vivo and in vitro. Biochem. Biophys. Res. Commun. 275: 20–25. doi: 10.1006/bbrc.2000.3270

Dedvisitsakul, P., Huadraksasat, S., Chittapun, S., Charoenrat, T., Piyapittayanun, C. 2017. Cloning of a C-phycocyanin alpha subunit from *Thermosynechococcus* sp. TUBT-T01 and prediction of its properties. WJST. 15: 857–867. https://doi.org/10.48048/wjst.2018.3626

Fairchild, C.D., Zhao, J., Zhou, J., Colson, S.E., Bryant, D.A., Glazer, A.N. 1992. Phycocyanin alpha-subunit phycocyanobilin lyase. PNAS USA. 89: 7017–7021. doi: 10.1073/pnas.89.15.7017

Garnier, J., Gibrat, J.F., Robson, B. 1996. GOR method for predicting protein secondary structure from amino acid sequence. Meth. Enzymol. 266: 540–553. doi: 10.1016/s0076-6879(96)66034-0

Gasteiger, E., Hoogland, C., Gattiker, A., Duuvaud, S., Wilkins, M.R., Appel, R.D., Bairoch, A. 2005. Protein identification and analysis tools on the ExPASy Server. The Proteomics protocols handbook. pp. 571–607.

Huadraksasat, S., Chittapun, S., Charoenrat, T., Dedvisitsakul, P., Piyapittayanun, C. 2017. Identification and analysis of a C-phycocyanin beta subunit gene from *Thermosynechococcus* sp. TUBT-T01. BUSCIJ. 22: 141–156.

Minkova, K.M., Tchernov, A.A., Tchorbadjieva, M.I., Fournadjieva, S.T., Antova, R.E., Busheva, M.C. 2003. Purification of c-phycocyanin from *Spirulina (Arthrospira) fusiformis*. J. Biotechnol. 102: 55–59. doi: 10.1016/s0168-1656(03)00004-x

Nyman, E.S., Hynninen, P.H. 2004. Research advances in the use of tetrapyrrolic photosensitizers for photodynamic therapy. J. Photochem. Photobiol. B. 73: 1–28. doi: 10.1016/j.jphotobiol.2003.10.002

Owczarzy, R., Tataurov, A.V., Wu, Y., et al. 2008. IDT SciTools: A suite for analysis and design of nucleic acid oligomers. Nucleic. Acids Res. 36: 163–169. doi: 10.1093/nar/gkn198

Shih, C.M., Cheng, S.N., Wong, C.S., Kuo, Y. L., Chou, T.C. 2009. Antiinflammatory and antihyperalgesic activity of c-phycocyanin. Anesth Analg. 108: 1303–1310. doi: 10.1213/ane.0b013e318193e919

Sritusnee, W., Charoenrat, T., Chittapun, S., Jaikaew, P., Dedvisitsakul, P., Piyapittayanun, C. 2020. Cloning and analysis of holo-c-phycocyanin alpha subunit synthesis genes from *Nostoc* spp. and *Thermosynechococcus* sp. TUBT-T01. BUSCIJ. 26: 149–167.

Suwanmanee, K., Charoenrat, T., Chittapun, S. 2015. In: Proceeding of 7th National Conference on Algae and Plankton (NCAP). Bangkok, Thailand. 1–12 pp.

Tamura, K., Stecher, G., Kumar, S. 2021. MEGA11: Molecular evolutionary genetics analysis version 11. Mol. Biol. Evol. 38: 3022–3027. https://doi.org/10.1093/molbev/msab120

Zhao, K.H., Zhang, J., Tu, J.M., et al. 2007. Lyase activities of CpcS- and CpcT-like proteins from Nostoc PCC7120 and sequential reconstitution of binding sites of phycoerythrocyanin and phycocyanin beta-subunits. J. Biol. Chem. 47: 34093–34103. doi: 10.1074/jbc.M703038200

Zhao, K.H., Su, P., Tu, J.M., et al. 2007. Phycobilin: Cystein-84 biliprotein lyase, a near-universal lyase for cysteine-84-binding sites in cyanobacterial phycobiliproteins. PNAS USA. 104: 14300–14305. doi: 10.1073/pnas.0706209104

Zhou, W., Ding, W.L., Zeng, X.L., Dong, L.L., Zhao, B., Zhou, M., Scheer, H., Zhao, K.H., Yang, X. 2014. Structure and mechanism of the phycobiliprotein lyase CpcT. J. Biol. Chem. 39: 26677–26689. doi: 10.1074/jbc.M114.586743

# Salt-tolerant and plant growth-promoting bacteria enhanced growth of KDML105 rice seedlings under salt stress condition

**Nutthanin Wiriyatanapat[a], Wilailak Siripornadulsil[a,b], Surasak Siripornadulsil[a,b]**

[a]Department of Microbiology, Faculty of Science, Khon Kean University, Khon Kean 40002, Thailand

[b]Research Center for Environmental and Hazardous Substances Management, Khon Kean University Khon Kean 40002, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: surasak@kku.ac.th

**Abstract**

Rice is an important crop for economic development worldwide. In Thailand, rice is widely grown in the northeast where the soil is mostly saline. Salinity is one of the stress factors that limit rice growth and yield. In this study, salt-tolerant rhizobacteria were isolated from rice roots and rhizosphere soil in saline soil areas in Maha Sarakham Province where salinity impacts rice growth severely. There are 544 isolates showing nitrogen fixation and resistance to 5% NaCl (401 isolates), 10% NaCl (102 isolates), solubilizing phosphates (84 isolates), producing plant hormones Indole-acetic acid (IAA) (150 isolates), and producing extracellular polymeric substances (EPS) (145 isolates). Among the selected 12 isolates with plant-promoting properties, *Pseudomonas* sp. PPSS-67 was the most effective isolate for producing the highest concentration of IAA and high rice germination under moderate and high salinity conditions. In addition, *Enterobacter* sp. PPSR-10 promoted rice growth in moderate and high salinity conditions by increasing shoot height and root length. As a result, the potential for *Pseudomonas* sp. PPSS-67 and *Enterobacter* sp. PPSR-10 to promote rice growth under salt stress should be further investigated.

**Keywords**: KDML105, Rice seedlings, Plant growth-promoting, Rhizobacteria, Salt-tolerant

## Introduction

Salinity stress is caused by a large accumulation of salt solution in soil, which inhibits crop growth and yield and affects global food production. It is estimated that global soil salinity affects arable lands by 950 million hectares and irrigated lands by 250 million hectares (Solis et al., 2020). Increasing saline soil areas were observed every year (Parida and Das, 2005; Yokoi et al., 2022). The total area of saline soils in Thailand is 1.904 million hectares, whereas salt-affected soils have an area of 2.302 million hectares. Rice was usually grown in slightly to moderately salt-affected areas (Arnin and Glick, 2015).

The rice plant (*Oryza sativa* L.) is an important crops and a staple food of the world's population, with 90% of the total global production coming from Asia. Changing demographics, consumer demands, and environmental concerns are all issues facing the world today (Fukagawa and Ziska, 2019). Due to climate change and rising temperatures, the amount of water evaporated from the soil increases, causing salt to remain in the soil and increasing soil salinity (Khamidov et al., 2022). The rice plant is susceptible to salinity, which reduces its survival rate and yield and inhibits seedling growth and development (Li et al., 2023).

A high salinity environment can cause a variety of effects on rice morphology, physiology, and biochemistry, including defection in root system establishment, leaf rolling, reduction in biomass and grain yields, osmotic stress that reduces or eliminates nutrients, and ion-toxicity that damages macromolecules and cellular structures (Liu et al., 2022). Combining halotolerant plant growth-promoting (HT-PGPB) into plant cultivation helps plants to adapt to salinity stress and improves growth and soil properties (Hidri et al., 2022). The PGPB can directly stimulate plant growth by fixing nitrogen, soluble phosphorus, and synthesizing auxins, indole-3-acetic acid (IAA), and 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid (ACC) deaminases, which reduce ethylene that restricts plant growth. In addition, PGPB is capable of synthesizing antibiotics or enzymes that can inhibit pathogens (Heydarian et al., 2016; Dobrzyñski et al., 2022).

The purpose of this study was to isolate bacteria from rice cultivated in salt soil, and to examine their properties as growth promoters. Then, PGPB isolates were tested in hydroponic systems for their potential to promote growth in rice under salinity stress.

## Materials and Methods

*Sample collection and screening of salt-tolerant bacteria*

The rhizosphere soil and rice root samples were collected in October from three sites: A and B in Nong Bua Kaew subdistrict, and C in Pan-an subdistrict, Maha Sarakham Province. Samples were collected from areas with white crust on the soil surface and dead rice plants (Fig. 1). A sample was assigned N for Nong Bua Kaew, P1 for Pan-an, P2 for Payakkaphumphisai, S1 for Maha Sarakarm, S2 for Soil, and R for Root, where 1 and 2 correspond to sites 1, 2, respectively (Table 1).




**Fig. 1** Collection sites of soil and rice root samples in Phayakkhaphum Phisai District, Maha Sarakham Province. (A) Site 1, Nong Bua Kaew Subdistrict, (B) Site 2, Nong Bua Kaew Subdistrict, and (C) Site 3, Pan-an Subdistrict

To screen salt-tolerant bacteria, 1 g of rice root samples were ground with 0.85% sodium chloride (w/v) and 1 g of rhizosphere soil samples were diluted with 0.85% sodium chloride (w/v). The sample suspensions were spread on nutrient agar (NA) supplemented with 2%, 5%, and 10% NaCl (w/v) and the plates were incubated at 30ºC for 24 h. The single colonies were collected and tested for plant growth-promoting properties.

*Plant-growth promoting properties of salt-tolerant bacteria*

Nitrogen fixation was tested by cultivating bacteria on nitrogen-free medium (Sun et al., 2018) at 30°C for 24 h. Positive results are indicated by the colonies of bacteria growing on the medium surface.

Phosphate solubilization of bacteria were tested by cultivation on the Pikovskaya's agar plate. The bacteria were incubated at 30ºC for 24 h. A clear zone around the colonies indicates a positive result (Pikovskaya, 1948).

For IAA production, the bacteria were cultured on Luria- Bertani ( LB) agar containing 1 mM L-tryptophan at 30°C for 24 h. Positive result was demonstrated by pink colonies after dropping with Salkowski's reagent (Zahroya et al., 2020). IAA production was quantified by incubating bacteria in nutrient broth containing 0.5 mM L-tryptophan in the dark for 3 days. After centrifugation of the culture suspension for 10 min at 13,000 rpm, 1 mL of the supernatant was added to 2 mL Salkowski's reagent and incubated for 30 minutes at room temperature. An absorbance measurement at 600 nm was used to determine the IAA. Based on the standard curve, IAA production was calculated according to Patten and Glick (2002).

EPS production was determined by cultivating bacteria on Congo red agar at 30ºC for 18–24 h. The presence of black colonies indicated that the isolate produced EPS (Mariana et al., 2009).

ACC utilization ability of the bacterial isolates was determined by ninhydrin-ACC assay. The bacteria were cultured in minimal DF-ACC salt medium supplemented with 0.5 mM ACC and incubated at 28°C for 3 days (Dworkin and Foster, 1905; Penrose and Glick, 2003). A 1 mL of culture was centrifuged and 100 μL supernatant was measured at 570 nm. An absorbance of inoculated and non-inoculated samples was compared and calculated with the standard curve (Li et al., 2011). One unit of ACC consumption was expressed as one mM per day.

*Germination rate and growth promotion of bacterial-inoculated rice plants under different salt concentrations*

KDML105 rice seeds were surface sterile by soaking in 90% ethanol and washing with sterile water. After that, the seeds were soaked in 0.2%(w/v) $HgCl_2$, shaken every 5 minutes, washed with sterile $H_2O$, and added with 5 mL sterile $H_2O$. Sterile seeds were incubated in the dark at room temperature. Two days after incubation in the dark, sterile seeds were inoculated with each salt-tolerant bacterial culture. The bacterial cultures were prepared by cultivating in nutrient broth for 18 h, centrifuged at 8,000 rpm for 10 min, and washed twice in 0.85% NaCl. Each culture was adjusted to yield an optical density (OD) at 600 nm of ~ 0.1 (approximately $5.5\times10^6$ CFU/mL) of bacterial suspension to inoculate on the rice seedlings. Two days later, rice growth conditions were adjusted with 0, 60, and 120 mM NaCl solution (equal to EC 0, 6, and 11 dS/m). Rice seedlings were grown under different salinity conditions, including normal (no salinity or EC 0), moderate salinity (EC 6), and high salinity (EC 11).

The germination rate of rice seeds was recorded every day. After the rice seeds reached 50% germination, they were incubated in dark for another seven days. The samples were collected in triplicate. Non-inoculated and inoculated rice seedlings were measured for root length, shoot height, and dry weight.

**Results and Discussion**

*Screening of salt-tolerant bacteria and measurement of plant growth parameters*

Bacteria tolerant to salt were isolated from the rhizosphere soil and rice root collected from soil with salinity. There were 554 isolates that showed nitrogen fixation and tolerance to 2% NaCl. A total of 401 and 102 isolates were salt-tolerant to 5% and 10% NaCl, respectively. Among 554 isolates, phosphate solubilization, and IAA and EPS production were observed in 84, 150, and 145 isolates, respectively (Table 1). Thus, these bacterial isolates were regarded as PGPB that are capable of converting some substances into nutrients, and dissolving mineral forms that the plants can utilize for their growth.

**Table 1** Detailed information on samples collection, sampling site, sample code, bacteria code, number of isolates, salt concentration, and plant growth-promoting properties

| Location | Sampling site | Sample code | Code of bacteria | Number of isolates | Salt concentration (w/v) | | | Plant growth promoting properties | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 2% | 5% | 10% | N | P | IAA | EPS |
| Nong Bua Kaew | A | NPSS1 | NPSS | 142 | 142 | 130 | 64 | 142 | 2 | 54 | 36 |
| | | NPSR1 | NPSR | | | | | | | | |
| | B | NPSS2 | | 201 | 201 | 70 | 15 | 201 | 63 | 23 | 58 |
| | | NPSR2 | | | | | | | | | |
| Pan-an | C | PPASS | PPSS | 71 | 71 | 71 | - | 71 | 5 | 21 | 17 |
| | | | PASS | 30 | 30 | 27 | 17 | 30 | - | - | - |
| | | PPASR | PPSR | 110 | 110 | 103 | 6 | 110 | 14 | 52 | 34 |
| All | | | | 554 | 554 | 401 | 102 | 554 | 84 | 150 | 145 |

Among the 554 salt-tolerant isolates, 12 isolates significantly enhanced the plant abilities in all parameters, including nitrogen fixation, phosphate solubilization, IAA production, and EPS production. Bacteria screened from the rhizosphere soil included PPSS-67 and PPSS-70 and from rice root included NPSR-79 and 80, PPSR-8, 10, 11, 13, 17, 18, 19, and 25. Based on tests of all plant growth-promoting properties, two isolates (PPSS-67 and PPSS-70) were capable of nitrogen fixation, phosphate solubilization, and IAA and EPS production. The bacteria produced IAA ranging from 3.8 to 17.8 µg/mL, and ACC consumption ranging from 0.15 to 0.32 mM/d (Fig. 2). IAA was significantly different among all isolates ($p < 0.05$), PPSS-67 produced the highest amount of IAA, 17.8 µg/mL, followed by PPSR-11, 13.3 µg/mL, and PPSR-10 for 12.7 µg/mL in Fig. 2A. As a result of generating IAA, PGPB stimulates plants' growth, increases their number and length of cells, and improves their ability to absorb nutrients (Munir et al., 2022; Yadav et al., 2022). ACC consumption was not significantly different among all isolates ($p > 0.05$), but the highest value was found in PPSR-11 at 0.32 mM/d, followed by PPSR-25 at 0.29 mM/d and PPSR-10 at 0.27 mM/d (Fig. 2B).

*Germination rate and growth promotion of KDML105 rice seedlings inoculated with salt-tolerant bacteria*

In rice seedlings inoculated with 12 isolates of salt-tolerant bacteria, NPSR-79 and PPSR-8 increased germination rate by 5% as compared with non-inoculated control, and PPSR- 18 increased value by 2% under normal condition at day1 (Fig. 3). PPSS-67 increased germination rate by 8% under moderate salinity condition (6 dS/m) at day1 and by 5%, 2%, and 13% under high salinity (11dS/m) condition at days1, 2 and 3, respectively. Under normal and moderate salinity conditions, all samples germinated at 100% on day 2 (data not shown). The highest concentration of growth hormone IAA is produced by PPSS-67, resulting in rapid growth, reduced salinity stress, and high germination rates. Under salinity conditions, PPSP-11 isolate produced the highest amounts of ACC consumption, resulting in a reduction in ethylene levels and promoting rice seedling growth (Glick et al., 2007).

In comparison with controls under none, moderate, and high salinity conditions, PPSR-19, PPSR-18, and PPSR-10 increased root length by 24%, 53%, and 68%, respectively (Fig. 4). The PPSR-8 increased shoot height by 1% under normal conditions. Both PPSR-10 and PPSR-13 increased shoot height by 8% and 13% under moderate saline conditions. For isolate NPSR-79, shoot height increased by 7% in high salinity conditions (Fig. 5). A bacterial treatment did not affect rice seedling biomass in normal saline or moderate saline, while isolates PPSR-70 and PPSR-25 produced 3% and 2% more biomass, respectively (Fig. 6). Root length and biomass of control seedlings under salinity conditions were higher than those under normal conditions. Despite decreased nutrient absorption, plants are more likely to survive by increasing their growth under high salt concentrations (Rivera et al. 2022; Zou et al. 2022). However, it is unclear whether salinity increases plant growth. As salt concentration affects bacterial activity, it has a dual effect: On the positive side, salt may stimulate bacteria to exhibit improved plant-promoting abilities. Conversely, salt reduces or destroys bacteria, resulting in diminished or completely absent plant-promoting activities.

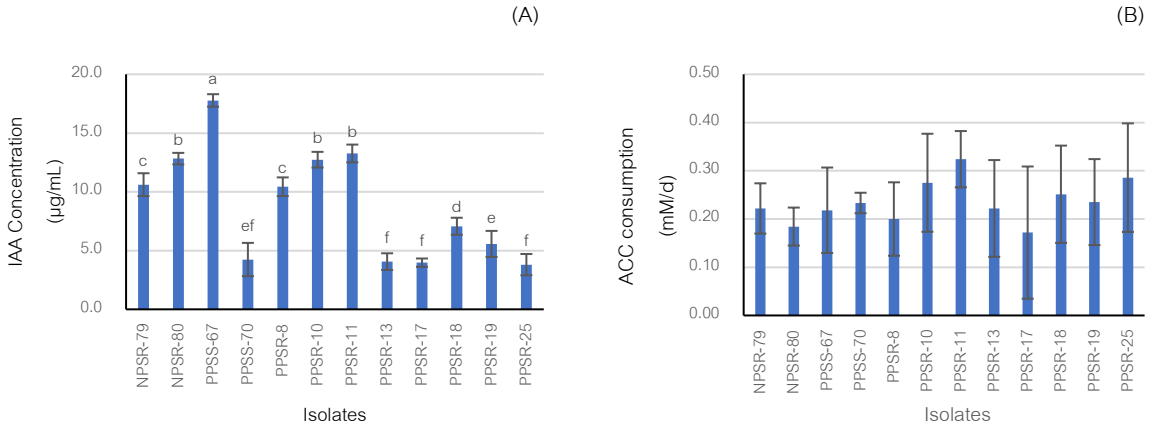



**Fig. 2** Plant growth-promoting traits of salt-tolerant bacteria. (A) IAA production showed significantly different ($p < 0.05$), (B) ACC consumption

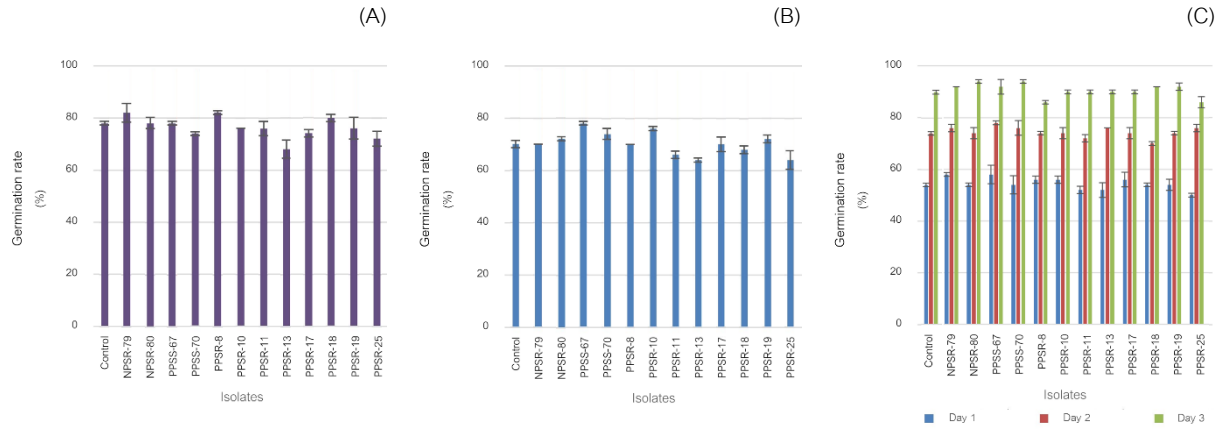



**Fig. 3** Germination rate of control and bacterial inoculated rice seedlings under different salinity levels: (A) normal condition of 1 day, (B) moderate salinity condition of 1 day, (C) high salinity condition day 1 to day 3

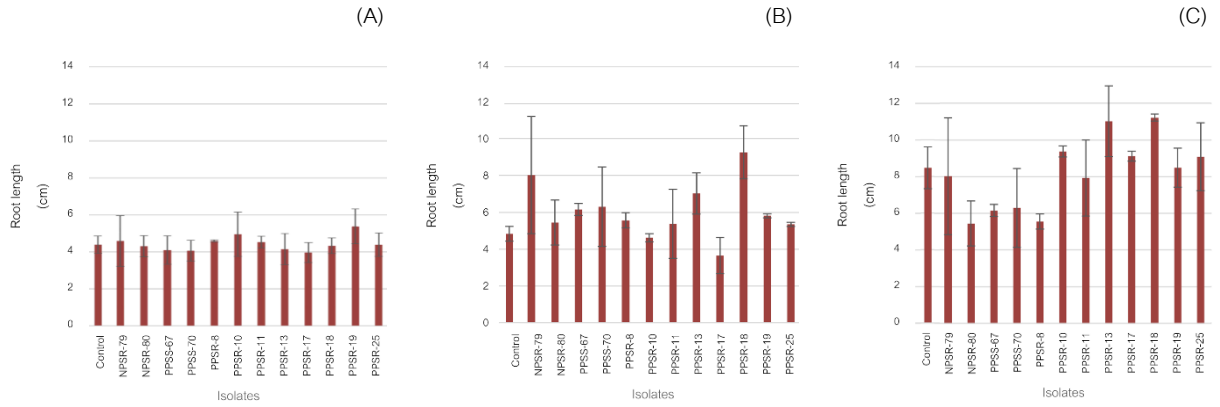



**Fig. 4** Root length of control and bacterial inoculated rice seedlings under different salinity levels for 7 days: (A) normal condition, (B) moderate salinity condition, (C) high salinity condition

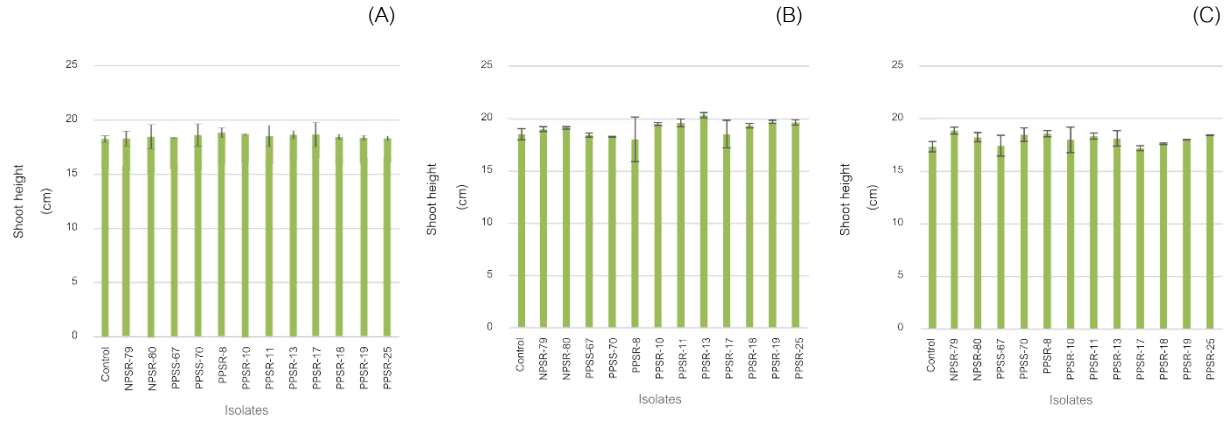



**Fig. 5** Shoot height of control and bacterial inoculated rice seedlings under different salinity levels for 7 days: (A) normal condition, (B) moderate salinity condition, (C) high salinity condition

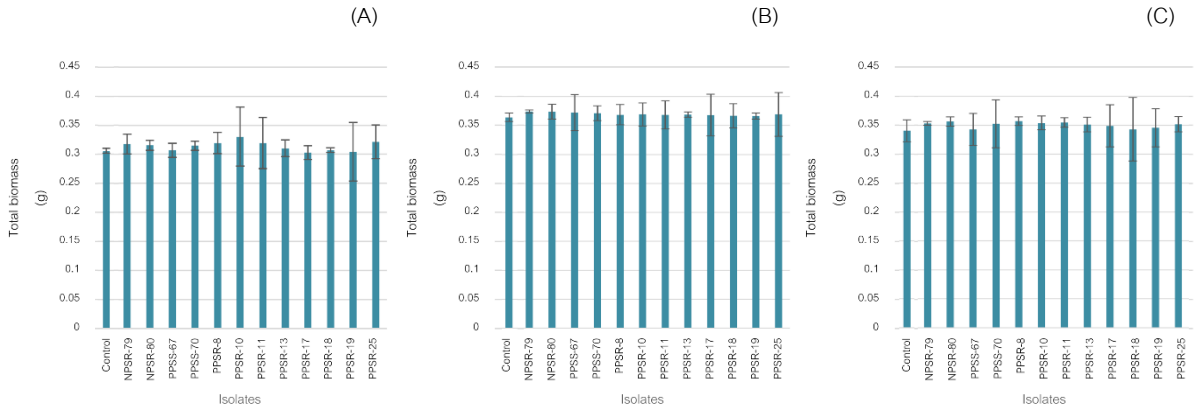



**Fig. 6** Biomass of control and bacterial inoculated rice seedlings under different salinity levels for 7 days: (A) normal condition, (B) moderate salinity condition, (C) high salinity condition

## Conclusion

There were 554 salt-tolerant bacteria isolated from rhizosphere soils and rice roots collected from saline soils in Maha Sarakham Province. Some isolates showed salt tolerance at 5% and 10% NaCl, as well as their plant growth-promoting properties, such as nitrogen fixation, phosphate solubilization, IAA production, and EPS production. Twelve isolates were selected because they significantly enhanced plant abilities in all aspects. For IAA production and ACC utilization, *Pseudomonas* sp. PPSS-67 produced the highest amount of IAA, which correlates with the high germination rate of rice seedlings under moderate and high salinity. Additionally, *Enterobacter* sp. PPSR-10 increased shoot height and root length in medium and high salinity conditions. The results demonstrated that rhizosphere bacteria with salt-tolerant properties and their growth-promoting properties can reduce salt stress in rice seedlings.

**Acknowledgements**

This study was partially supported by the Department of Microbiology, Faculty of Science, and Research Center for Environmental and Hazardous Substances Management at Khon Kaen University.

**References**

Dobrzyñski, J., Jakubowska, Z., Dybek, B. 2022. Potential of *Bacillus pumilus* to directly promote plant growth. Front. Microbiol. 13: 1069053.

Dworkin, M., Foster, J. 1958. Experiments with some microorganisms which utilize ethane and hydrogen. J. Bacteriol. 75: 592–603.

Fukagawa, N.K., Ziska, L.H. 2019. Rice: Importance for global nutrition. J. Nutr. Sci. Vitaminol. 65: S2–S3.

Glick, B.R., Todorovic, B., Czarny, J., Cheng, Z., Duan, J., McConkey, B. 2007. Promotion of plant growth by bacterial ACC deaminase. Crit. Rev. Plant Sci. 26: 227–242.

Heydarian, Z., Yu, M., Gruber, M., Glick, B.R., Zhou, R., Hegedus, D.D. 2016. Inoculation of soil with plant growth promoting bacteria producing 1-aminocyclopropane-1-carboxylate deaminase or expression of the corresponding *acdS* gene in transgenic plants increases salinity tolerance in *Camelina sativa*. Front. microbiol. 7: 1966.

Hidri, R., Mahmoud, O.M.B., Zorrig, W., Mahmoudi, H., Smaoui, A., Abdelly, C., Azcon, R., Debez, A. 2022. Plant growth-promoting rhizobacteria alleviate high salinity impact on the halophyte *Suaeda fruticosa* by modulating antioxidant defense and soil biological activity. Front. Plant Sci. 13: 821475.

Khamidov, M., Ishchanov, J., Hamidov, A., Donmez, C., Djumaboev, K. 2022. Assessment of soil salinity changes under the climate change in the Khorezm region, Uzbekistan. Int. J. Environ. Res. Public Health 19: 8794.

Li, Z., Chang, S., Lin, L., Li, Y., An, Q. 2011. A colorimetric assay of 1-aminocyclopropane-1-carboxylate (ACC) based on ninhydrin reaction for rapid screening of bacteria containing ACC deaminase. Lett. Appl. Microbiol. 53: 178–185.

Li, Z., Zhou, T., Zhu, K., et al. 2023. Effects of salt stress on grain yield and quality parameters in rice cultivars with differing salt tolerance. Plants 12: 3243.

Liu, C., Mao, B., Yuan, D., Chu, C., Duan, M. 2022. Salt tolerance in rice: Physiological responses and molecular mechanisms. The Crop Journal 10: 13–25.

Mariana, N.S., Salman, S.A., Neela, V., Zamberi, S. 2009. Evaluation of modified Congo red agar for detection of biofilm produced by clinical isolates of methicillin resistance Staphylococcus aureus. Afr. J. Microbiol. Res. 3: 330–338.

Munir, N., Hanif, M., Abideen, Z., Sohail, M., El-Keblawy, A., Radicetti, E., Mancinelli, R., Haider, G. 2022. Mechanisms and strategies of plant microbiome interactions to mitigate abiotic stresses. Agronomy 12: 2069.

Parida, A.K., Das, A.B. 2005. Salt tolerance and salinity effects on plants: A review. Ecotoxicol. Environ. Saf. 60: 324–349.

Patten, C.L., Glick, B.R. 2002. Role of *Pseudomonas putida* indoleacetic acid in development of the host plant root system. Appl. Environ. Microbiol. 68: 3795–3801.

Penrose, D.M., Glick, B.R. 2003. Methods for isolating and characterizing ACC deaminase-containing plant growth-promoting rhizobacteria. Physiol. Plant. 118: 10–15.

Pikovskaya, R. 1948. Mobilization of phosphorus in soil in connection with vital activity of some microbial species. Mikrobiologiya 17: 362–370.

Rivera, P., Moya, C., O'Brien, J.A. 2022. Low salt treatment results in plant growth enhancement in tomato seedlings. Plants 11: 807.

Solis, C.A., Yong, M.T., Vinarao, R., et al. 2020. Back to the wild: on a quest for donors toward salinity tolerant rice. Front. Plant Sci. 11: 323.

Sun, S., Chen, Y., Cheng, J., Li, Q., Zhang, Z., Lan, Z. 2018. Isolation, characterization, genomic sequencing, and GFP-marked insertional mutagenesis of a high-performance nitrogen-fixing bacterium, Kosakonia radicincitans GXGL-4A and visualization of bacterial colonization on cucumber roots. Folia Microbiologica 63: 789–802.

Yadav, A., Mudoi, K.D., Kumar, N., Geed, S.R., Gogoi, P., Sharma, R.K., Saikia, R. 2022. Auxin biosynthesis by Microbacterium testaceum Y411 associated with orchid aerial roots and their efficacy in micropropagation. Front. Plant Sci. 13: 1037109.

Yokoi, S., Bressan, R.A. Hasegawa, P.M. 2002. Salt stress tolerance of plants. JIRCAS Working Report. Weast Lafayette, USA, pp. 25–33.

Zahroya, I.U., Mubarik, N.R., Tjahjoleksono, A. 2020. Isolation and characterization of indole-3-acetic acid producing bacteria from red onion rhizosphere. In: IOP conference series: Earth and environmental science. Bogor, Indonesia, 012046 pp.

Zou, Y., Zhang, Y., Testerink, C. 2022. Root dynamic growth strategies in response to salinity. Plant Cell Environ. 45: 695–704.

# Uracil and dihydrouracil measurement in the Thai general population and initial validation of liquid chromatography-tandem mass spectrometry method

Sutawan Jogloy[a,*], Chonlaphat Sukasem[a], Apichaya Puangpetch[a], Chalirmporn Atasilp[b]

[a]Department of Pathology, Faculty of Medicine Ramathibodi Hospital, Mahidol University, Bangkok 10400, Thailand

[b]Chulabhorn International College of Medicine, Thammasat University, Pathumthani 12120, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: sutawan.jog@student.mahidol.edu

**Abstract**

5-Fluorouracil is a commonly used medication for treating various types of cancer. It is linked to the activity of the DPD enzyme, which can cause toxicity if its activity is deficient. In this study, the aim was to measure the levels of uracil and dihydrouracil in the general Thai population and to validate an LC-MS/MS method. The UPLC-MS/MS method was used to analyze 97 EDTA plasma samples for uracil and dihydrouracil levels. The LC-MS/MS method of uracil and dihydrouracil levels was the first development in Thailand, and preliminary validation for linearity and accuracy was achieved. The results showed that the levels of uracil ranged from 7.32 to 26.75 ng/mL (median±IQR: 11.69±3.43 ng/mL), while the levels of dihydrouracil ranged from 76.80 to 184.21 ng/mL (median±IQR: 123.53±23.8 ng/mL). In conclusion, the distribution of uracil and dihydrouracil levels in the Thai general population was established, and the LC-MS/MS methodology was the first developed and preliminarily validated in Thailand.

**Keywords**: 5-fluorouracil, Dihydropyrimidine dehydrogenase (DPD) enzyme, Dihydrouracil, LC-MS/MS, Uracil

## Introduction

The chemotherapy drug 5-fluorouracil (5-FU) is used to treat various types of cancer such as colorectal, breast, pulmonary, and head and neck malignancies by inhibiting the processes of DNA and RNA (Dean and Kane, 2020) . Only about 1–3% of drugs remain in their active form, whereas 80% are converted into an inactive form using the dihydropyrimidine dehydrogenase (DPD) enzyme, which turns 5-FU into dihydrofluorouracil (FUH2) and then fluoro-beta-ureidopropionate (FUPA). The DPD enzyme in pyrimidine catabolism converts uracil to dihydrouracil, meaning that all processes use the same path of 5-fluorouracil (Büchel et al., 2013). However, the use of 5-FU drugs has been associated with post-treatment toxicities such as foot-hand syndrome, neurotoxicity, leukopenia, and myelosuppression, and some cases can be life-threatening (Kristensen et al., 2010; Garcia-Gonzalez et al., 2018). Recent studies have found that the incidence of toxicity in fluorouracil-treated patients is linked to partial deficiencies or deficiency of the DPD enzyme known as DPD deficiency. The DPD enzyme is regulated in the production of *DPYD* genes and varies by race (Amstutz et al., 2018; Thomas et al., 2016). Patients who received fluorouracil have reported severe toxicity even when they tested negative for the three major variants of the *DPYD* gene. Later, it was discovered that a rare variant was causing the severe cases (Garcia-Gonzalez et al., 2018). As a result, the detection of DPD phenotype was studied.

DPD phenotypic assays have been studied to assess toxicity before 5-fluorouracil drug therapy. A method of the patient's DPD enzyme detection is the measurement of uracil (U), dihydrouracil ($UH_2$), and ratios calculated using liquid chromatography with tandem mass spectrometry (LC-MS-MS). Uracil and dihydrouracil are catabolism products, and their ratio reflects enzyme deficiencies. LC-MS/MS is the one of methods used to measure uracil and dihydrouracil. The uracil levels are divided into normal, partial, and complete deficiency groups. According to the study, the present decrease $UH_2$/U ratio is due to decreased catabolism and potentially fatal toxicity (Boisdron-Celle et al., 2007; Zhou et al., 2007). However, there is no developed LC-MS/MS method for determining uracil and dihydrouracil in Thailand, including the study of values studies on the Thai population. This study aims to determine uracil, and dihydrouracil in the Thai general population and to perform preliminary validation on LC-MS/MS for the first time in Thailand.

## Materials and Methods

*Study population*

This cross-sectional study was conducted between December 2022 and June 2023 at the Central Laboratory of Chulabhorn Hospital. The study collected EDTA blood from 97 Thai general population from 7:00 to 10:00 a.m. after an overnight fast to avoid food factors (Henricks et al., 2018). The blood samples were centrifuged at 1,600 g for 10 minutes within 1 hour after sampling or stored at 2–8°C and centrifuged within 4 hours. The plasma was stored at -80°C for uracil and dihydrouracil analysis (Maillard et al., 2022). The research ethics and protocols have been reviewed and approved by the Committee on Human Rights Related to Research Involving Human Subjects of the Faculty of Medicine Ramathibodi Hospital, Mahidol University in

COA.MURA2023/473, and the Committee on Human Rights Related to Research Involving Human Subjects of the Chulabhorn Royal Academy in EC 023/2566. To be included to participate in this study, the participant must be over 18 years of age, AST and ALT levels must be equal to or less than 2.5 times the upper limit of normal (ULN), creatinine levels must be less than 1.5 mg/dL and provided informed consent. The exclusion criteria from the project are pregnancy, having had a blood transfusion within the past 3 months, laboratory evidence indicating renal or hepatic abnormalities, and refusal to participate in the project.

*Measurement of U, UH2, 5-FU by UPLC-MS/MS*

A 500 µL sample was mixed with internal standard uracil and dihydrouracil. The sample was extracted to protein precipitation and liquid-liquid extraction using 600 mg ammonium sulfate, then 4 mL of ethyl acetate mixed with isopropanol (in the ratio of 85/15 in volume/volume) was added and centrifuged. The supernatant was dried using 37ºC and compressed air. The dried sample was reconstituted using 120 µL of 0.1% formic acid in water and 20 µL was injected into the Acquity® UPLC separation module and Waters TQ® Detector UPLC-MS/MS for analysis. To perform the required procedure, use mobile phase A containing 0.1% formic acid in water and mobile phase B containing 0.1% formic acid in acetonitrile. Use a proportional gradient as follows: for the first 2 minutes, use 100% of Mobile phase A; for the next 2.5–4 minutes, use 5% of Mobile phase A; and, for the final 4.2–7.5 minutes, use 100% of Mobile phase A. The column temperature should be maintained at 40°C and the flow rate should be 0.5 mL/min.

*Statistically analysis*

The mean, standard deviation, median, and interquartile range (IQR) of the uracil, dihydrouracil, and the $UH_2$/U ratio were calculated by SPSS version 16.

*LC-MS/MS Development and preliminary validation*

To optimize energy and determine the precursor and product ions of substances in AB Sciex® API 3200 mass spectrometry, the uracil, dihydrouracil, and 5-fluorouracil standard and internal standard (IS) were diluted to 500 ng/mL and injected. The analyzed-on LC-MS/MS Agilent® 1260 Liquid chromatography selected columns by column C18-EC, 4.6 × 50 mm i.d., 1.8µm, column C18 Poroshell, 2.1 × 150 mm i.d., 2.7 µm, and HILIC Poroshell 120, 4.6 × 100 mm i.d., 2.7µm. Next, the appropriate temperature of the selected column was compared between 5, 25, 30, and 40. As for the mobile phase, a comparison was made between the mobile phase B which is 0.1%formic acid in acetonitrile, and in methanol, both to find the appropriate flow rate. The above selection checks the peak area, retention time, and signal-to-noise (S/N). Sample extraction was compared between protein precipitation and liquid-liquid extraction using ammonium sulfate and ethyl acetate in isopropanol and solid phase extraction HLB (Hydrophilic-lipophilic balance) and both were compared peaks area. To validate the linearity, a mixture of uracil, dihydrouracil, and 5-fluorouracil was prepared in 3% bovine serum albumin (BSA). Final concentrations were 2.5, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500, 800, and 1,000 ng/mL. For accuracy, the quality control preparation was used in 3 levels: low, medium, and high, also containing 3%BSA.

**Results and Discussion**

*The uracil, dihydrouracil, and $UH_2$/U ratio measurement*

Out of the total participants, 28 (28.9%) were male and 69 (71.1%) were female. Their mean age was 46 years (ranging from 22 to 77 years old). The uracil levels in the sample ranged from 7.32 ng/mL to 26.75 ng/mL (median±IQR: 11.69±3.43 ng/mL), while the dihydrouracil levels ranged from 76.80 ng/mL to 184.21 ng/mL (median±IQR: 123.53±23.8 ng/mL), resulting in a $UH_2$/U ratio ranging from 4.94 to 22.56 (median±IQR: 10.58±2.87). However, the proportions of men and women utilized in this study were not equal because it was a study of general populations without regard to gender. This implies that more study is necessary. All samples tested for 5-FU had a value of less than 5 ng/mL. In comparison to Jiang et al. (2002)'s study which used the LC-MS/MS principle in 123 Chinese population, our study found that the median uracil value was lower, while the $UH_2$ and ratio values were higher (Jiang et al., 2002). However, the study of Cordore et al. (2012) measured the values of 26 French general population and found that the U and $UH_2$ median values of our study were higher while the ratio median was lower (Coudoré et al., 2012). There is a wide range of studies that have obtained uracil and dihydrouracil, with differences in analytical principles, and ethnicity studied. Additionally, 8 samples or 8.2% of the total (3 males and 5 females) had uracil levels greater than or equal to 16 ng/mL. According to the French cancer institute (INCa) and French health authority (HAS), individuals with values between 16 ng/mL and 150 ng/mL are considered partially deficient in DPD enzyme (Giraud and HAS, 2018). However, the study's main limitation is that it only examined the general population and did not do *DPYD* genotyping and toxicity. To determine the threshold for DPD deficiency, further investigation into the *DPYD* gene and the toxicity of 5-fluorouracil is required. The uracil, dihydrouracil, and $UH_2$/U ratio distribution results are shown in Fig.1

*Result of LC-MS/MS development and preliminary validation*

In the LC-MS/MS system, a study was conducted to find out the properties of certain substances. By adjusting the energy and ion values of the substances, it was discovered that all the substances were uracil, dihydrouracil, 5-fluorouracil, and internal standard (IS) were found to be scannable in positive mode with product ion 1 as the quantifier ion and product ion 2 as the qualifier ion. The tune mass spectrometry results are shown in Table 1.

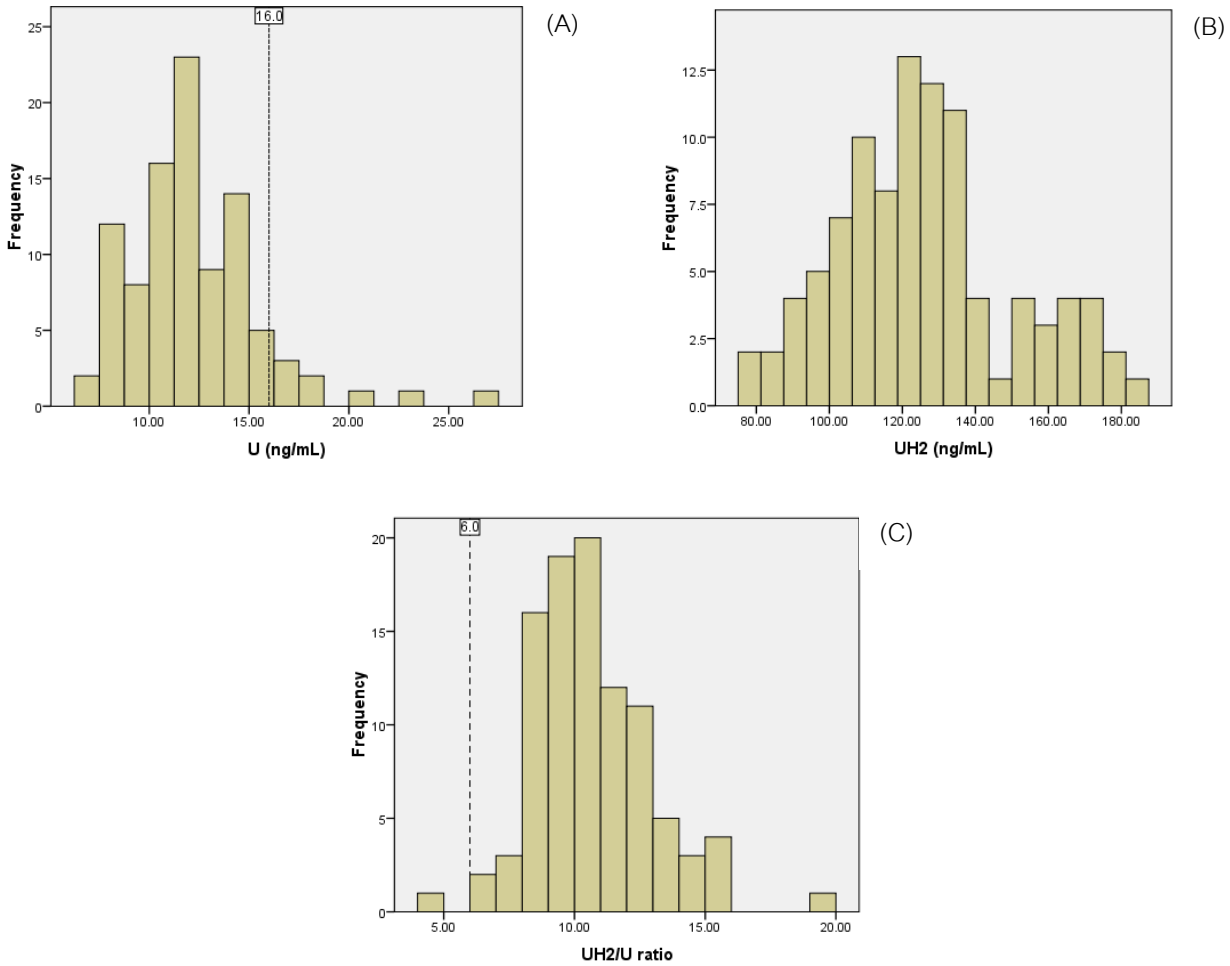



**Fig. 1** The study analyzed the distribution of uracil (A), dihydrouracil (B), and $UH_2$/U ratio (C) in 97 Thai general population. The results for Uracil were shown as a "…" dashed line indicating a cut-off level of 16 ng/mL, while the $UH_2$/U ratio was shown as a "- - -" dashed line with a cut-off level of 6

**Table 1** The tune of mass spectrometry

| Parameter | Compound | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Uracil (U) | Dihydrouracil ($UH_2$) | 5-fluorouracil | IS-uracil | IS-dihydrouracil |
| Precursor ion | 113.2 | 115.0 | 131.1 | 115.9 | 118 |
| DP | 38.12 | 42.74 | 42.95 | 38.70 | 36.99 |
| EP | 3.43 | 1.66 | 4.88 | 3.57 | 3.80 |
| CEP | 10.36 | 12.508 | 13.036 | 12.535 | 12.604 |
| Product ion 1 | 70 | 72.6 | 114.3 | 71 | 76.2 |
| CE | 21.31 | 24.22 | 32.84 | 24.7 | 25.1 |
| CXP | 2.89 | 2.1 | 3.57 | 2.3 | 1.87 |
| Product ion 2 | 96.2 | 97.9 | 58.1 | - | - |
| CE | 22.31 | 25 | 36.93 | - | - |
| CXP | 2.64 | 2.02 | 3.57 | - | - |

The development of uracil and dihydrouracil has been noted in several studies. However, in this study, the LC-MS/MS system was discovered based on the sensitivity of the analyzer. After testing the LC-MS/MS system against other systems under the same conditions, we found that the other systems had greater sensitivity. In this study to optimize LC-MS/MS, column C18 Poroshell, 2.1×150 inner diameters (i.d.), particle size 2.7 µm, at a column temperature of 40ºC. The mobile phase A consisted of 0.1% formic acid in water, while mobile phase B was made up of 0.1% formic acid in acetonitrile with a flow rate of 0.2 mL/min, and the injection volume was 20 µL. The selected column indicates that column length typically ranges between 100–150mm to improve efficacy separation of substances (Büchel et al., 2013; Jacobs et al., 2016; Tafzi et al., 2020). Column temperature should not be too low to prevent long retention time, low peak sensitivity, and high pressure. The column was leaked with the 0.1%formic acid in methanol in a flow rate over 0.1 mL/min, then was not selected in mobile phase B. When selecting the mobile phase, the main thing to consider is the appropriate pressure and flow rate to avoid leakage. The gradient analysis used 100% mobile phase A for 0–3 minutes, 5% mobile phase A for 4–6 minutes, and 100% mobile phase A for 6.2–12 minutes.

For sample extraction, there are various methods to choose from even solid phase extraction (SPE) (Svobaite et al., 2008). The substance presented a low peak area, rendering it unusable. Additionally, liquid-liquid extraction is available with acetonitrile for analytical purposes (van den Wildenberg et al., 2022). However, we noticed that the drying process took around 3 hours, which is a long time and may potentially impact the substance. The extraction using ammonium sulfate and ethyl acetate in isopropanol were tested according to another study (Coudoré et al., 2012) and this study was selected for extraction method with showed all peak substances and high peak area.

The standard curves had a linearity range of 10 to 500 ng/mL for uracil, 25 to 800 ng/mL for dihydrouracil, and 25 to 1,000 ng/mL for 5-FU. The lowest standard concentration of uracil, dihydrouracil, and 5-fluorouracil in 3%BSA showed more than 5 signal-to-noise ratios (FDA, 2018). Compared to the lowest concentration in other studies, it was found that other studies could measure low values of uracil, dihydrouracil, and 5-fluorouracil (Büchel et al., 2013; Jacobs et al., 2016). The regression used was linear by weight 1/x for all three and the regression coefficient was greater than 0.99. The peak chromatogram seen by 3%BSA was blank and did not match the peak of the interested analytes, which could be used for prepared standard and quality control. All 3 levels of quality control passed the criteria by 15%, all of which were found to be accurate according to the recommendation of validation (FDA, 2018). The further study, the selectivity, precision, matrix effect and recovery, and stability still need to be determined. Limitation of this validation, it was discovered that there was a discrepancy in the retention time of the substance each day. The pH of the mobile phases, the column temperature, and the pressure were checked. After replacing the guard column, a slight decrease in pressure was observed. This incident will be further investigated.

In summary, The Thai general population was measured with UPLC-MS/MS as U, UH2, and UH2/U ratio distribution. These findings can be applied to predict treatment planning with 5-FU, thereby reducing the

risk of further toxicity. A study was conducted in Thailand to test uracil, dihydrouracil, and 5-fluorouracil plasma using LC-MS/MS. The study has been tuned MS and optimized LC, preliminarily validated in linearity and accuracy, and can be further developed and validated for future use.

**Conflict of Interest**

The author declares that there are no conflicts of interest.

**References**

Amstutz, U., Henricks, L.M., Offer, S.M., Barbarino, J., Schellens, J.H.M., Swen, J.J., Klein, T.E. et al. 2018 Clinical pharmacogenetics implementation consortium (Cpic) Guideline for Dihydropyrimidine Dehydrogenase Genotype and Fluoropyrimidine dosing: 2017 Update. Clin. Pharmacol. Ther. 103: 210–216. doi.org/10.1002/cpt.911.

Boisdron-Celle, M., Remaud, G., Traore, S., Poirier, A.L., Gamelin, L., Morel, A., Gamelin, E. 2020. 5-Fluorouracil-Related Severe Toxicity: A comparison of different methods for the pretherapeutic detection of Dihydropyrimidine Dehydrogenase Deficiency. Cancer Lett. 249: 271–82. doi.org/10.1016/j.canlet. 2006.09.006.

Büchel, B., Rhyn, P. Schürch, S., Bühr, C., Amstutz, U., Largiadèr. C.R. 2013. Lc-Ms/Ms method for simultaneous analysis of Uracil, 5,6-Dihydrouracil, 5-Fluorouracil and 5-Fluoro-5,6-Dihydrouracil in human plasma for therapeutic drug monitoring and toxicity prediction in cancer patients. Biomed. Chromatogr. 27: 7–16. doi.org/10.1002/bmc.2741.

Coudoré, F., Roche, D., Lefeuvre, S., Faussot, D., Billaud, E.M., Loriot, M.A., Beaune, P. Validation of an ultra-high performance liquid chromatography tandem mass spectrometric method for quantifying uracil and 5,6-Dihydrouracil in Human Plasma. J. Chromatogr. Sci. 50: 877–884. doi.org/10.1093/chromsci/bms085.

FDA, US. 2018. Bioanalytical method validation guidance for industry. US Department of Health and Human Services Food and Drug Administration Center for Drug Evaluation and Research and Center for Veterinary Medicine

Garcia-Gonzalez, X., Lopez-Tarruella, S. Garcia, M.I. et al. Severe toxicity to capecitabine due to a new variant at a donor splicing site in the Dihydropyrimidine Dehydrogenase (Dpyd) Gene. Cancer Manag. Res. 10 4517–4122. doi.org/10.2147/CMAR.S174470.

Henricks, L.M., Jacobs, B.A.W., Meulendijks, D. et al. Food-Effect study on uracil and dihydrouracil plasma levels as marker for Dihydropyrimidine Dehydrogenase activity in human volunteers. Br. J. Clin. Pharmacol. 84: 2761–2769. doi.org/10.1111/bcp.13719.

Jacobs, B.A., Rosing, H., Vries, N. de, Meulendijks, D., Henricks, L.M., Schellens, J.H., Beijnen, J.H. 2016. Development and validation of a rapid and sensitive Uplc-Ms/Ms method for determination of Uracil and

Dihydrouracil in Human Plasma. J. Pharm. Biomed. Anal. 126: 75–82. doi.org/10.1016/j.jpba. 2016.04.039.

Jiang, H., Jiang, J., Hu, P., Hu, Y. 2002. Measurement of endogenous Uracil and Dihydrouracil in plasma and urine of normal subjects by liquid chromatography-Tandem mass spectrometry. J. Chromatogr. B Analyt. Technol. Biomed. Life Sci. 769: 169–176. doi.org/10.1016/s1570-0232(02)00009-0.

Kristensen, M.H., Pedersen, P., Mejer, J. The Value of Dihydrouracil/Uracil plasma ratios in predicting 5-fluorouracil-related toxicity in colorectal cancer patients. J. Int. Med. Res. 38: 1313–1323. doi.org/10.1177/147323001003800413.

Laura, D., Kane, M. 2020. Capecitabine therapy and dpyd genotype.

Maillard, M., Launay, M., Royer, B. et al. 2023. Quantitative impact of pre-analytical process on plasma uracil when testing for Dihydropyrimidine Dehydrogenase Deficiency. Br. J. Clin. Pharmacol. 89: 762–772. doi.org/10.1111/bcp.15536.

Screening for Dihydropyrimidine Dehydrogenase Deficiency to Decrease the Risk of Severe Toxicities Related to Fluoropyrimidines (5-Fluorouracil or Capecitabine). 2018. https://www.has-sante.fr/upload/docs/ application/pdf/2019-01/inahta_brief_dpd_5fu.pdf, 16 August 2023.

Svobaite, R., Solassol, I., Pinguet, F., Ivanauskas, L., Brès, J., Bressolle, F.M. 2008. Hplc with UV or Mass Spectrometric detection for quantifying endogenous uracil and dihydrouracil in human plasma. Clin. Chem. 54: 1463–1472. doi.org/10.1373/clinchem.2007.102251.

Tafzi, N., Woillard, J.B., Fleytoux, A., Picard, N., Marquet, P. Phenotyping of Uracil and 5-Fluorouracil metabolism using Lc-Ms/Ms for prevention of toxicity and dose adjustment of fluoropyrimidines. Ther. Drug Monit. 42: 540–547. doi.org/10.1097/ftd.0000000000000768.

Thomas, F., Hennebelle, I. Delmas, C. et al. Genotyping of a family with a novel deleterious dpyd mutation supports the pretherapeutic screening of dpd deficiency with Dihydrouracil/Uracil ratio. Clin. Pharmacol. Ther. 99: 235–242. doi.org/10.1002/cpt.210.

van den Wildenberg, S.A.H., Streng, A.S., van den Broek, R., et al. 2022. Quantification of uracil, dihydrouracil, thymine and dihydrothymine for reliable dihydropyrimidine dehydrogenase (Dpd) phenotyping critically depend on blood and plasma storage conditions. J. Pharm. Biomed. Anal. 221: 115027. doi.org/10.1016/j.jpba.2022.115027.

Zhou, Z.W., Wang, G.Q., Wan de, S., Lu, Z.H., Chen, Y.B., Li, S., Chen, G., Pan, Z.Z. 2007. The Dihydrouracil/Uracil ratios in plasma and toxicities of 5-Fluorouracil-Based adjuvant chemotherapy in colorectal cancer patients. Chemotherapy 53: 127–131.doi.org/10.1159/000099984.

# สาขาวิศวกรรมศาสตร์
# และสถาปัตยกรรมศาสตร์
# (Subject: Engineering and Architecture)

---

# ภาคบรรยาย
# (Oral Presentation)

# CFD analysis of heat transfer enhancement by helical inserts

Worapon Tipkaew*, Suabsakul Gururatana, Rodolphe Perrin

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University Sriracha Campus, Chonburi 20230, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: worapon.ti@ku.th

**Abstract**

This study focuses on the investigation by numerical simulation of heat transfer enhancement in a straight pipe subjected to a constant heat flux, using helical inserts. Various geometrical parameters, such as the pitch length, tape length and angle are assessed in comparison to the case without insert. The turbulent flow is analysed for Reynolds numbers in the range 5,000 < Re < 20,000, and for two values of Prandtl number, Pr = 0.7 and Pr = 7, corresponding to air and water respectively. RANS simulations are carried out using Ansys Fluent and fully developed flows are considered using periodic boundary conditions. The accuracy is ensured by grid convergence tests and model validations. The investigation focuses on the significant impact parameters of the helical insert, which generates rotational fluid flow and improves heat transfer from the wall boundary to the fluid region. The predicted velocity and temperature fields are analysed, and the friction factor, Nusselt number, and a thermal enhancement factor (TEF) are used to determine the optimum geometric configuration of the helical insert. While a significant increase of heat transfer is achieved, it is also shown that further modifications of the geometry would be necessary to increase the TEF.

**Keywords**: CFD, Heat transfer enhancement, Helical insert, RANS

## Introduction

Heat exchangers are vital components of process technology. Hence, the profitability of a process is significantly influenced by the judicious selection and design of heat exchangers with economic considerations. Enhanced efficiency in process heat exchange results in decreased energy consumption and significant cost savings. An effective heat exchanger design must strike a balance between the heat transfer rate and pressure drop within the system, resulting in a high thermal performance factor.

The heat enhancement techniques can be broadly categorized into passive and active techniques. The passive techniques operate without necessitating direct external power such as enlarging the heating surface area of tubes or adding vortex flow devices in the tubes, these techniques result in an augmentation of the heat transfer coefficient by perturbing or modifying the flow characteristics. In contrast, active techniques, such as surface vibration or fluid injection, demand external power to accomplish the intended flow modifications and enhance the heat transfer rate. In light of the latest research works, it has been observed that a majority of researchers are dedicating their attention to passive techniques. Many studies concluded similarly that inserting twisted tapes inside the tube can generate swirl flows, thereby increasing thermal performance. This implies that the tape has a positive influence on the system (Mahfouz et al., 2018).

This study aims to investigate the impact of a helical insert incorporating a rod along the centerline inside the tube. Various insert geometries are analyzed to determine the optimal configuration. Computational Fluid Dynamics (CFD) analysis of the flow and heat transfer in the fluid domain is performed to assess the friction and heat transfer efficiency for different fluids and pumping power conditions. A constant heat flux is assumed at the tube wall. The test section is shortened by implementing a periodic boundary condition to reduce the mesh count. Grid independence is validated to strike a balance between simulation accuracy and time consumption. Turbulent flows are considered using Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) modeling, with ANSYS Fluent being employed for the calculations.

## Materials and Methods

### *Materials*

The main materials and equipment for CFD simulation include 1. Computer notebook, 2. SOLIDWORKS program and 3. Ansys program (Student version).

### *Methods*

#### *Model Configurations*

A new geometry of helical insert to be inserted at the center of a tube is proposed in this work (see Fig. 1A), with the objective of generating a vortex flow and therefore an increased mixing between the near wall region and the center region, helping to increase the heat transfer.

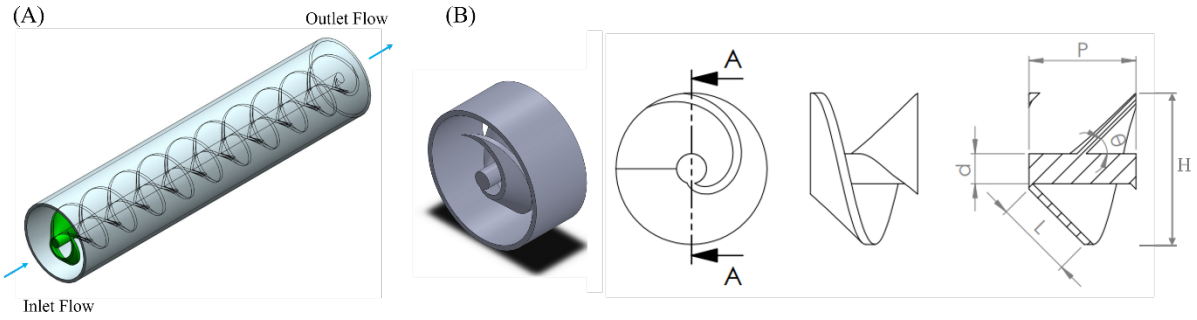



**Fig. 1** Helical inset tube assembly (A) and the physical model of helical screw insert (B)

The geometrical parameters characterizing this geometry are the pitch length (P), the tape width (L) and the tape angle (θ), as shown in Fig. 1B. Using these parameters, the helical ratio (R) is defined as R = P/H, where H = d+2Lsinθ.

The physical geometries of the helical inserts are generated using the SOLIDWORKS software. In order to analyse the influence of the different geometrical parameters of the inserts, 27 models are generated, with varying pitch, length and angle as defined in Fig. 1B. These parameters vary in the following ranges:

| | |
|---|---|
| Pitch length | 10 mm $\leq$ Pitch $\leq$ 50 mm |
| Tape width | 10 mm $\leq$ Width $\leq$ 20 mm |
| Tape angle | 30° $\leq$ Angle $\leq$ 60° |

For each geometry, the insert is placed in a tube with an inside diameter of 50 mm throughout the full length of the tube.

*Boundary Condition*

The analysis will focus on the fully developed flow region. Since the geometry is periodic in the main flow direction and the steady RANS approach is chosen to simulate these turbulent flows, only one pitch length of the full tube needs to be is considered in the computational domain for the CFD simulations, as shown in Fig. 1. Boundary conditions are prescribed as follows: A constant heat flux of 1,000 W/m² is applied to the surface of the circular tube to ensure uniform heat flow. The insert walls are assumed to be adiabatic, indicating no heat transfer through their surfaces. The inlet water and air temperature are set at 300 K. Additionally, it is assumed that at the average bulk temperature, the thermophysical characteristics of the fluid remain constant. In the analysis, the heat loss from the tube surface to the atmosphere via convection and radiation is considered negligible. No-slip conditions are applied at every wall, and a mass flow rate is prescribed, along with periodic boundary conditions, which allow for the prescription of the Reynolds number (Re). The flow is analyzed for $5000 < Re < 20000$ and $0.72 < Pr < 6.90$. The fluid flow is fully developed throughout the tube, and the flow direction is shown in Fig. 2B.

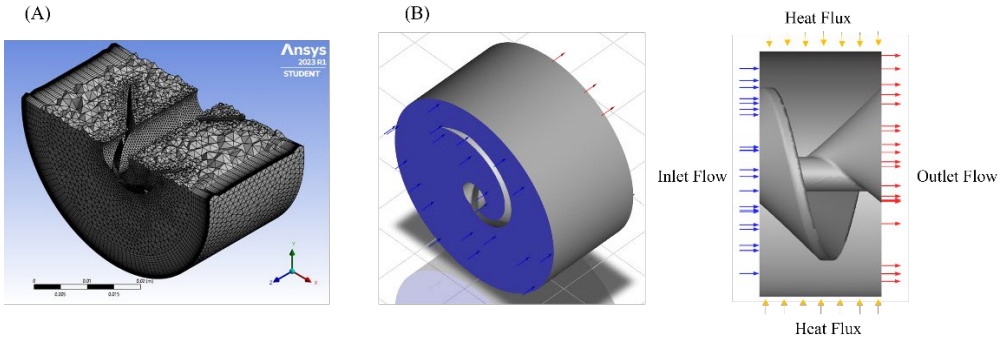



Fig. 2 Section plan of mesh element for fluid domain (A) and flow direction in the circular tube fitted with helical insert (B)

*Simulation Setup*

From the geometrical models, meshes are generated using ANSYS Meshing, and flows are simulated using the finite volume method with ANSYS Fluent. Similarly, to the studies of Zhang et al, 2013, the standard RANS k-ε model with enhanced wall treatment is chosen and therefore, simulations consist in the resolution of the continuity equation, momentum equations, energy equation, turbulence (k-ε) equations. These governing equations are solved on the three-dimensional domain and steady state is considered in this study (ANSYS, 2009). Near-wall treatments for wall-bounded turbulent flows were attempted to be simulated using various functions, including standard wall functions, scalable wall functions, and enhanced wall treatment. However, during validation, when compared with the Dittus-Boelter and Gnielinski correlations for this study, it was found that the enhanced wall treatment (EWT) exhibited a deviation less than the others. Simulations were carried out on unstructured meshes refined at the walls as shown in Fig. 2A. Inflation layers were applied to the tube's wall so that y+ ≈1 is approximately achieved, allowing the enhanced wall treatment to operate in the 'low Re' mode.

*Data Processing*

Following the completion of the numerical simulation, this section provides a condensed summary of the processed results obtained. In order to analyse the results, the following quantities are calculated in a post-processing step: Reynolds number $(Re) = U_b D/v$, friction factor $(f) = [(\Delta P/L)D]/\left(\frac{1}{2}\rho U_b^2\right)$, Nusselt number $(Nu) = \mathrm{h}D/k_f$ and the thermal-performance enhancement factor $(TEF) = \left(\frac{Nu}{Nu_0}\right)/\left(\frac{f}{f_0}\right)^{0.8/2.75}$ as suggested by Promvonge et al, 2020.

*Model Validation*

*Grid Independence Study*

The deviations in the friction factor and the Nusselt number are crucial factors for tubes fitted with helical tape inserts; that is why it was selected for testing grid independence. The test was conducted starting with a small number of cells and progressing to a greater number of cells. The selection criteria for computational analysis are that the friction factor and Nusselt number do not change significantly. Fig. 3 (A and

B) for the grid independence test of a smooth tube shows that with approximately 350,000 cells, the friction factor and Nusselt number exhibit a small deviation compared to ~500,000 cells, amounting to 0.14% and 0.04% of the friction factor and Nusselt number deviation, respectively. Additionally, the y+ value at tube's wall is 0.24. If the grid is refined beyond this point, the deviation does not undergo a significant change. Therefore, around 350,000 cells are taken into consideration for the numerical analysis to maintain a balance between accuracy and time consumption for simulation. A similar analysis has been carried out with the insert.

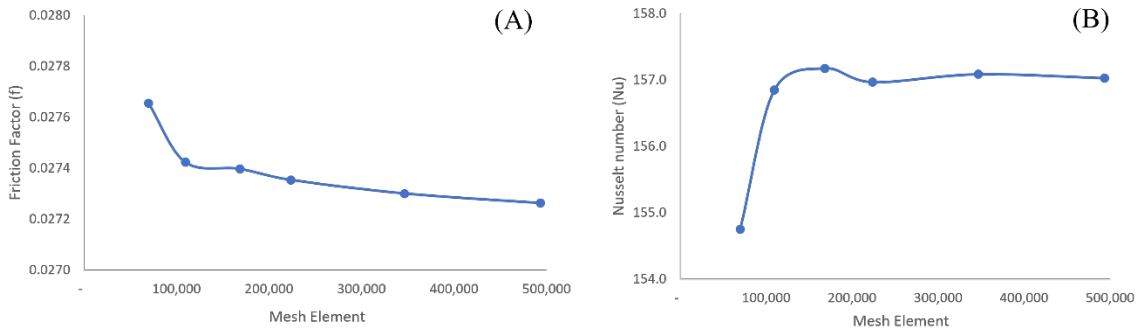



**Fig. 3** Grid independence test results for friction factor (A) and Nusselt number (B) at different grid cell numbers for the simulation of smooth tube without insert when Re = 20,000

*Comparison with reference data*

The present numerical results are validated ensuring the accuracy of the numerical data by comparing the Nusselt number and friction factor of a circular smooth tube with water under the same conditions. The absolute deviation ranges of friction factor compared to Blasius correlation is 2.7%–15.3% and Petukhov correlation is 4.4%–12.2% respectively. Both correlation results are expressed similarly: there is more deviation at low Re, and the deviation gradually decreases at higher Re. In terms of the Nusselt number, when compared to Dittus-Boelter correlation, the deviation averages 13.4% at both low and high Re. When results are compared with Gnielinski correlation, the deviation is smaller at high Re (20,000) is 6.5%.

**Results and Discussion**

This section demonstrates how the heat transfer and pressure drop of a tube fitted with a helical insert are influenced by the specific model of tube insert employed under constant pumping power. A comparison is made between 27 different insert models fitted in tube and a plain tube (without inserts) simulated under similar conditions.

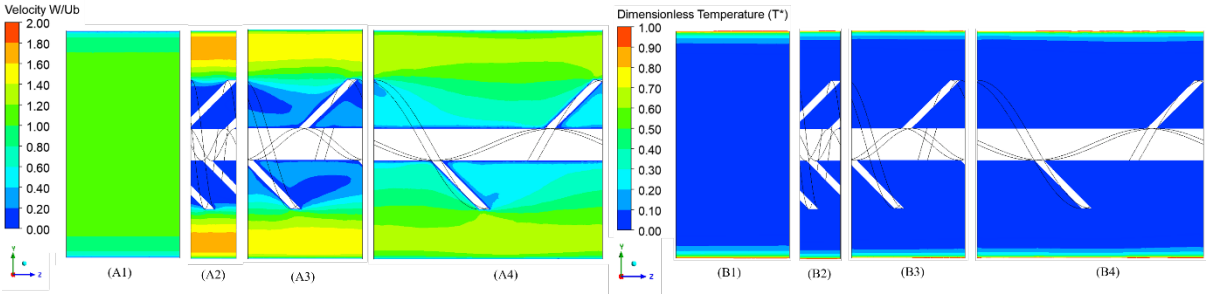



Fig. 4 Velocity $W/U_b$ contours (A1–A4) and dimensionless temperature $(T^*) = \frac{T-T_0}{T_S-T_0}$ ($T_0$ is bulk temperature of fluid around the center of tube and Ts is the average temperature of fluid around tube surface) of air domain along the Z-direction for (A1 and B1) plain tube, helical insert (A2 and B2) P/D ratio = 0.2 (model 5), (A3 and B3) P/D ratio = 0.5 (model 14) and (A4 and B4) P/D ratio = 1.0 (model 23)

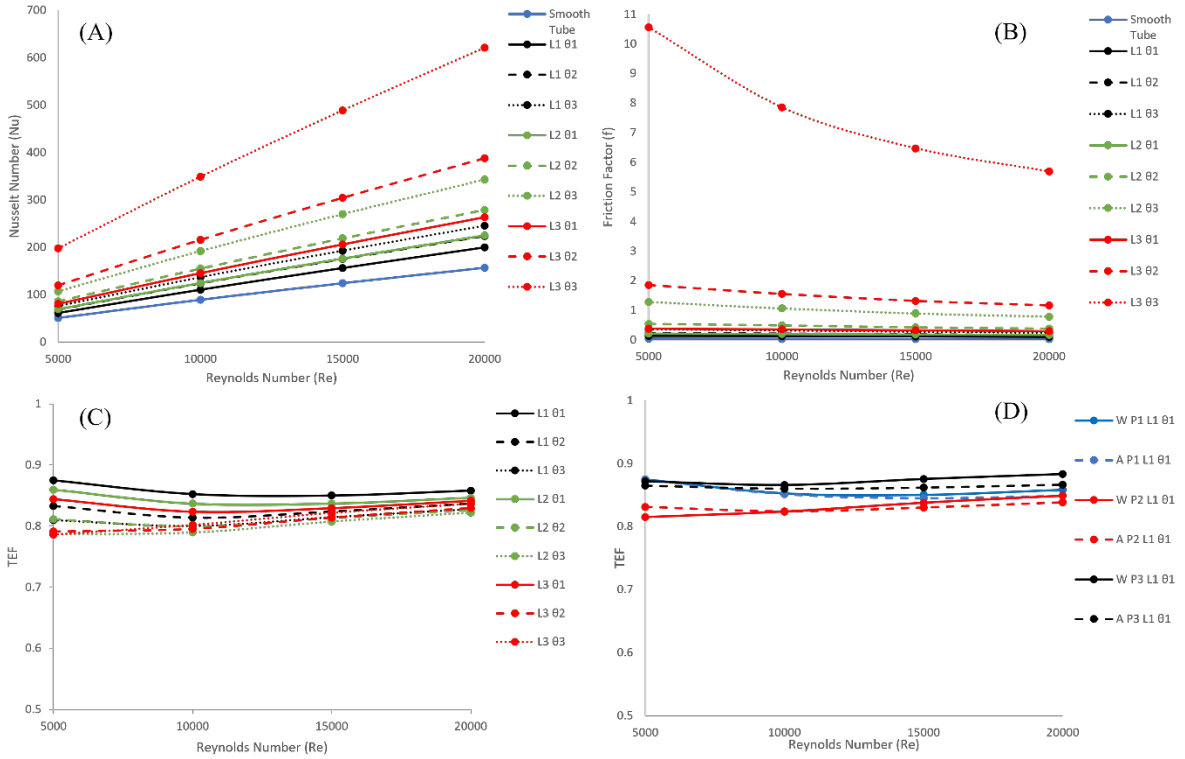



Fig. 5 Variation of Nusselt number, friction factor and TEF against Reynolds number of smooth tube and the helical insert at same P/D ratio 0.2 (Model 1–9) using water (A, B and C). (D)TEF comparison between water and air in same configuration of helical insert of P1 L1 θ1(Model 1), P2 L1 θ1 (Model 10) and P3 L1 θ1 (Model 19)

*Effects of helical inserts on the characteristics of heat transfer*

The heat transfer rate is assessed in terms of the Nusselt number, while the pressure drop is evaluated in terms of the friction factor. The CFD results will be compared between each insert model and a plain tube under similar simulating conditions. Fig. 5A shows the variation of Nusselt number against the Reynolds number at the different ratio of helical inserts using water. Considering the tape width (L), three sizes are specified: L1 = 10 mm, L2 = 15 mm, and L3 = 20 mm. Additionally, the tape angle with the rod (θ) is defined across three

angles: θ1 = 30º, θ2 = 45º, and θ3 = 60 º. All model simulations indicate that Nu increases with increasing Re. However, the results show that the Nusselt number increases when decreasing the helical ratio (R) and P/D ratio. For example, helical insert with P = 10 mm, L = 20 mm and θ = 60º has the lowest helical ratio (R) is 0.24, P/D ratio of 0.2 and L/D of 0.4, was simulated in water and air achieving the highest heat transfer rate, with averagely a 74.6% and 75.1% enhancement over the plain tube being predicted. The CFD results compare Nusselt number values between water and air, revealing that water exhibits higher results under the same variable conditions. For example, in the testing of helical insert with P = 10 mm, L = 20 mm and θ = 60º, water achieves a Nusselt number higher, with an average difference of 58.8%. This is expected, since the Prandtl number of air is lower than of water.

*Effect of flow and geometrical parameters on pressure drop.*

Fig. 4(A1) shows the velocity $W/U_b$, contours along the length of the tube in the case of a smooth tube. The velocity increases progressively from near the wall to the center of the tube and consistently reaches its maximum in the center region. It can be observed that the fluid flows smoothly through the tube without significant effects on friction and pressure loss. When Fig. 4(A2–A4) shows a helical insert is continuously placed in the central part of the tube, the hydrodynamic boundary layer induces turbulence, leading to fluid mixing (although not shown here for the sake of conciseness, it is observed that the turbulent kinetic energy increases by more than 100% in the boundary layer region near the pipe's wall, compared to the plain tube). Helical insert obstructs the flow of fluid by presenting an additional surface in the direction of fluid movement, resulting in heightened resistance and an associated increase in frictional or pressure losses. Fig. 5B shows that, in all cases, the friction factor of these helical inserts decreases with increasing Reynolds number. Furthermore, the CFD results showed that the friction factor increases when decreasing P/D ratio and helical ratio (R). Throughout the investigated range, tubes fitted with helical tape inserts exhibit friction factors 63.4–99.6% higher than those of plain tubes.

*Effect of flow and geometrical parameters on overall thermal performance.*

Two variables, the Nusselt number and the friction factor, contribute to the calculation of TEF. In order to achieve higher thermal performance with the helical insert, design modifications are implemented with the goal of increasing the Nusselt number while minimizing the friction factor. Fig. 5C depicts TEF results for water and air. In all simulation scenarios, the TEF values remain below one, with a maximum value of 0.87. This implies that the efficiency of the helical inserts is inadequate for practical applications, under pumping power conditions within the Reynolds number range of 5,000–20,000. Fig. 5D shows the comparison of TEF values between water and air testing within the same helical insert. The data reveals that, in all cases, the TEF values for water are slightly higher than those for air. For instance, on average, the TEF values for water exceed those for air by approximately 1.2% of helical insert with P = 10 mm, L = 20 mm and θ = 60º.

**Conclusion and Suggestion**

In this study, the numerical investigation explored heat transfer, pressure drop and thermal-performance enhancement through a tube fitted with helical inserts, each equipped with a central rod. A total of 27 models were studied in both water and air fluids. CFD grid independence and validation against correlations were carried out to ensure accurate model results. The Nusselt number increases when the Reynolds number increases, in contrast to the friction factor, which decreases with an increase in Reynolds number. The insert has been shown efficient to increase heat transfer at a given Re. However, the TEF results for the same power pumping range (Re = 5,000-20,000) implies that the efficiency of the helical inserts is suboptimal, with a maximum value of 0.87, which is below 1.0. Nevertheless, to further enhance efficiency in future studies, modifying helical insert geometry becomes a pivotal factor in implementing improvements, such as studying helical tape inserts as proposed by Bhuiya et al. (2015) etc., aiming for the optimal outcome through a reduction in the friction factor and an increase in the Nusselt number. The TEF values for water are slightly higher than those for air.

## References

ANSYS, I. 2009. Ansys fluent 12.0 theory guide.

https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/main_pre.htm. 20 October 2023.

Bhuiya, M.M.K., et al. 2015. Heat transfer performance evaluation and prediction of correlation for turbulent flow through a tube with helical tape inserts at higher Reynolds number. Heat and Mass Transfer. 52: 1219–1230. doi:10.1007/s00231-015-1643-y

Mahfouz, A.E., Abdelmaksoud, W.A., Khalil, E.E. 2018. Heat transfer and fluid flow characteristics in a heat exchanger tube fitted with inserts. J. Therm. Sci. Eng. Appl. 10: 031012. doi:10.1115/1.4038707

Promvonge, P., Promthaisong, P., Skullong, S. 2020. Experimental and numerical heat transfer study of turbulent tube flow through discrete V-winglets. Heat Mass Transfer 151. 119351 doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer. 2020.119351

Zhang, X., Liu, Z., Liu, W. 2013. Numerical studies on heat transfer and friction factor characteristics of a tube fitted with helical screw-tape without core-rod inserts. Heat Mass Transfer 60: 490–498. doi:10.1016/j. ijheatmasstransfer.2013.01.041

# การออกแบบและควบคุมการทำงานของรถฟอร์คลิฟท์แบบล้อแมคคานั่ม

Design and control of mecanum wheel forklift

**ชวัลวิทย์ ชื่นสุขอุรา*, วิทิต ฉัตรรัตนกุลชัย**

Chawanwit Chuensukura*, Withit Chatrattanakulchai

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: chawanwit.chu@ku.th

**บทคัดย่อ**

โรงงานส่วนใหญ่ใช้รถฟอร์คลิฟท์ขนย้ายสินค้า แต่ด้วยพื้นที่จำกัดในโรงงานบางแห่ง ทำให้เส้นทางเคลื่อนที่ของรถเกิดปัญหา ซึ่งเส้นทางที่คับแคบทำให้สินค้าที่วางอยู่อาจชนกับรถฟอร์คลิฟท์ได้หากผู้ขับขี่มีความชำนาญมากไม่พอ ผู้วิจัยจึงมุ่งหมายที่จะสร้างรถฟอร์คลิฟท์ที่ใช้ล้อแบบแมคคานั่มที่มีจุดเด่นด้านความคล่องตัว นอกจากนี้การบังคับรถฟอร์คลิฟท์ทั่วไปมีความซับซ้อน ต้องใช้เวลาเรียนรู้ฝึกฝนจนชำนาญจึงจะขับขี่ได้อย่างปลอดภัย ผู้วิจัยจึงพัฒนาระบบบังคับควบคุมให้ง่ายต่อผู้ใช้งาน การวิจัยเริ่มจากศึกษาโครงสร้างของรถฟอร์คลิฟท์แบบเดิม ศึกษาการควบคุมหุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบล้อแมคคานั่ม ออกแบบรถฟอร์คลิฟท์แบบล้อแมคคานั่ม ทดสอบความแข็งแรงภายในโปรแกรม แล้วสร้างรถฟอร์คลิฟท์แบบล้อแมคคานั่มตามที่ออกแบบไว้ วางระบบไฟฟ้า พัฒนาโปรแกรมควบคุมสั่งการ ทดสอบการทำงานเปรียบเทียบผลลัพธ์ ซึ่งรถฟอร์คลิฟท์แบบล้อแมคคานั่มที่สร้างขึ้นสามารถทำงานในระบบขับเคลื่อน 6 รูปแบบและระบบยกสินค้า 2 รูปแบบได้ถูกต้องและปรับความเร็วได้

**คำสำคัญ**: ระบบบังคับควบคุม, รถฟอร์คลิฟท์, ล้อแมคคานั่ม

**Abstract**

Most industrial factories prefer using forklifts for moving goods. However, limited space within some factories poses issues for forklift mobility. The narrow pathway can result in collisions between forklifts and cargo boxes if the driver lacks sufficient expertise. To address this, the researcher aimed to design a forklift with Mecanum wheels, known for their flexibility in movement. Additionally, the common forklift control is complex. It takes much time to learn and practice until you can drive safely. Therefore, the researcher wants to develop a user-friendly control system. The procedure of research began with studying the structures of the general forklift. Learn about the control of the mobile robot utilizing Mecanum wheels. Next, the researcher designs a forklift with Mecanum wheels and uses simulations to test the strength of some parts that must withstand heavy loads. Then, set up the electrical system and develop a program to control the system in the forklift. Finally, test the operation and compare the results. The Mecanum wheel forklift works in drive systems with 6 modes and lifting systems with 2 modes correctly and can increase or decrease speed.

**Keywords**: Control system, Forklift, Mecanum wheel

**คำนำ**

ระบบการจัดการสินค้าของโรงงานส่วนใหญ่จะใช้รถฟอร์คลิฟท์ในการขนย้ายสินค้า ซึ่งในโรงงานมักจะมีกล่องที่บรรจุสินค้าจำนวนมากและวางเรียงกันเป็นกลุ่ม ส่งผลให้เส้นทางการเคลื่อนที่ของรถฟอร์คลิฟท์ถูกจำกัด ใช้เวลานานเมื่อต้องการเปลี่ยนทิศทาง และในการเปลี่ยนทิศทางของรถฟอร์คลิฟท์ จะใช้วิธีการคล้ายกับรถยนต์ทั่วไป ทำให้ต้องมีพื้นที่ที่กว้างเพียงพอ แต่ด้วยสภาพแวดล้อมในโรงงานบางแห่งนั้นไม่ได้เอื้ออำนวยด้านพื้นที่การวิ่งของรถมากนัก อาจจะทำให้สินค้าเสียหายจากการชนระหว่างที่รถฟอร์คลิฟท์มีการกลับตัวหรือเปลี่ยนทิศทางได้

รถฟอร์คลิฟท์ทั่วไปจะขับเคลื่อนโดยใช้ระบบบังคับเลี้ยว (Steering System) ที่ล้อด้านหลัง แต่ในการจัดการกับข้อจำกัดการเคลื่อนที่ในทางแคบนั้น การนำล้อแบบแมคคานั่มมาใช้ สามารถทำให้รถฟอร์คลิฟท์เคลื่อนที่ไปได้ทุกทิศทางโดยที่ไม่เกิดการหมุนของตัวรถ และจุดหมุนของรถจะอยู่ที่จุดกึ่งกลางของล้อทั้งสี่ ส่งผลให้การเปลี่ยนทิศทางของหน้ารถนั้น ใช้พื้นที่และเวลาที่น้อยกว่ารถฟอร์คลิฟท์ทั่วไป เพราะฉะนั้นรถฟอร์คลิฟท์แบบล้อแมคคานั่มจึงเหมาะนำมาใช้ขนย้ายสินค้าในโรงงานที่มีข้อจำกัดด้านพื้นที่ และยังมีข้อได้เปรียบเรื่องความเร็วในการขนย้าย เนื่องจากสามารถเคลื่อนที่ไปด้านข้างได้ นอกจากนี้ในรถฟอร์คลิฟท์ทั่วไปจะมีระบบบังคับควบคุมรถและกลไกยกสินค้าที่ค่อนข้างซับซ้อน ผู้ขับต้องเรียนรู้ฝึกฝนจนชำนาญจึงจะขับได้อย่างปลอดภัย ดังนั้นการพัฒนาในส่วนของระบบบังคับควบคุมที่มีความสะดวกและเข้าใจง่ายจะช่วยผู้ขับขี่ได้มาก

รถฟอร์คลิฟท์แบบล้อแมคคานั่มจะมีประโยชน์ในการขนส่งและลำเลียงสินค้าอย่างมาก เนื่องจากจุดเด่นของล้อแบบแมคคานั่ม ทำให้รถสามารถเปลี่ยนทิศทางได้อย่างรวดเร็ว ใช้พื้นที่ในการเคลื่อนที่น้อยกว่ารถฟอร์คลิฟท์ทั่วไป และระบบบังคับควบคุมที่เป็นมิตรกับผู้ใช้ ส่งผลให้ผู้ขับขี่ใช้เวลาไม่นานก็สามารถบังคับควบคุมได้อย่างชำนาญ ซึ่งรถฟอร์คลิฟท์แบบล้อแมคคานั่มต้นแบบนี้ สามารถนำไปวิจัยพัฒนาได้อีกหลายด้านในอนาคต เพื่อสร้างความก้าวหน้าให้กับอุตสาหกรรมการขนส่ง

**อุปกรณ์และวิธีการ**

รถฟอร์คลิฟท์แบบล้อแมคคานั่มที่สร้างขึ้นนั้น มีอุปกรณ์หลายอย่าง ผู้วิจัยจึงแสดงภาพโดยรวมของส่วนประกอบสำคัญและจุดที่ติดตั้งอุปกรณ์นั้น ๆ ตาม Fig. 1

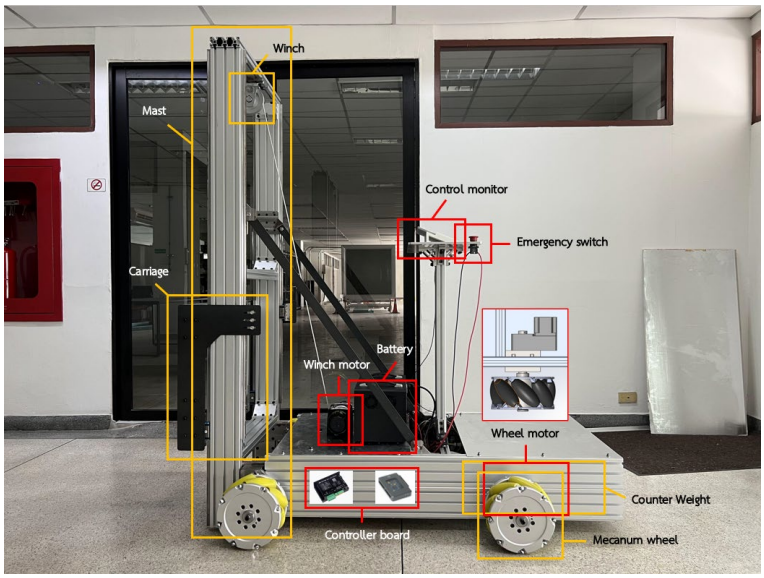



Fig. 1 Component of Mecanum wheel forklift

*อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง*

1. โครงสร้างของรถฟอร์คลิฟท์ที่ใช้อลูมิเนียมโปรไฟล์ตาม Fig. 2



**Fig. 2** Forklift made by aluminium profile

2. ชิ้นส่วนจากงาน Machining ที่ใช้วัสดุเป็นเหล็ก
3. ล้อแมคคานั่มตาม Fig. 3 จำนวน 4 ล้อ



**Fig. 3** Mecanum wheel

4. ชุดเกียร์และมอเตอร์ รุ่น Z55BLD750-48GU-30S-6GU30LC 48 VDC ตาม Fig. 4 จำนวน 4 ตัว



**Fig. 4** Gear motor for wheel

มอเตอร์ DC 48 V ไร้แปรงถ่าน ขนาด 750 W มีชุดเกียร์อัตราทด 20 : 1 ความเร็วที่ออกจากเพลาเป็น 150 rpm

5. บอร์ดขับมอเตอร์ รุ่น ZBLD.C20-800LRC จำนวน 4 ตัว
6. ชุดมอเตอร์รอกสลิงไฟฟ้า ขนาด 1300 W 12 VDC ตาม Fig. 5 จำนวน 1 ตัว




Fig. 5 Winch motor

7. แผงวงจรขับมอเตอร์ DC รุ่น SE-HB200-1 จำนวน 1 ตัว
8. ล้อทดสลิง 1 ตัว
9. Linear Guide 4 เส้น และ Slide Block 6 ตัว
10. แบตเตอรี่ ขนาด 2000 W 220 VAC ความจุ 3500 Wh
11. Power Supply 2 ตัว
    a. Power Supply ขนาด 1500 W 220 VAC to 48 VDC
    b. Power Supply ขนาด 1500 W 220 VAC to 12 VDC
12. Emergency Switch รุ่น XA2ES542 จำนวน 1 ตัว
13. NI myRIO-1900
14. คอมพิวเตอร์แล็ปท็อป รุ่น Surface Go 3

*การออกแบบระบบโดยรวมและโปรแกรมควบคุม*

ออกแบบรถฟอร์คลิฟท์แบบล้อแมคคานั่ม

โครงสร้างพื้นฐานของรถฟอร์คลิฟท์มี 5 ส่วนสำคัญได้แก่ โครงรถ, น้ำหนักถ่วง, แหล่งพลังงาน, แผงงา, และเสา ดังนั้นจึงมีการปรับโครงสร้างเดิมให้มีความเรียบง่ายในการทำแบบจำลองที่ออกแบบไว้ให้เป็นหุ่นยนต์เคลื่อนที่จริงตาม Fig. 6

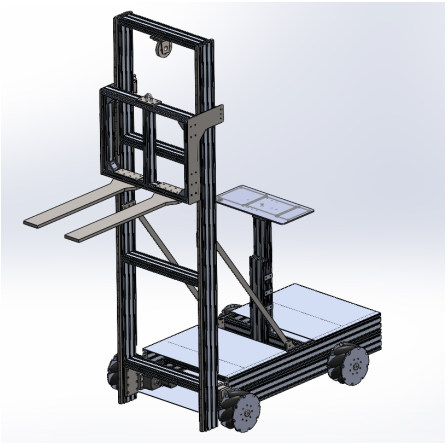


Fig. 6 The model of Mecanum wheel forklift

การคำนวณขนาดของมอเตอร์ขับเคลื่อน

พิจารณาแรงต้านบนทางชัน (grade resistance) จากสมการการเคลื่อนที่ของนิวตัน

$$\sum F = ma$$
$$F_t - F_g = ma$$
$$F_t = ma + F_g$$
$$\frac{\tau}{r} = ma + mgsin\theta$$
$$\tau = m(a + gsin\theta)r$$

กำลังมอเตอร์จะคิดน้ำหนักรวม 1,000 กิโลกรัม ความเร็วเชิงเส้นสูงสุด 1.2 เมตร/วินาที, เวลาจากเริ่มต้นถึงความเร็วสูงสุด 1.2 วินาที, ขึ้นทางชันได้ 5 องศา, เส้นผ่านศูนย์กลางล้อ 260 มิลลิเมตร จะได้

$$\tau = m(a + gsin\theta)r$$
$$\tau = 1000(1 + (9.81(0.087)))(0.13)$$
$$\tau = 241\ N.m$$

ออกแบบที่แฟคเตอร์กำลัง 1.2 จะได้แรงบิตทั้งหมด 1.2 x 241 = 289.2 N.m

แรงบิดที่ต้องการต่อ 1 ล้อ คือ 289.2 / 4 = 72.3 N.m

ความเร็วสูงสุดที่ต้องการคือ 1.2 m/s ล้อหมุน 1 รอบ เคลื่อนที่ได้ $2\pi(0.13)$ = 0.82 m

จากความเร็วเชิงเส้นที่ต้องการ จะได้ความเร็วการหมุนประมาณ 1.2 / 0.82 $\approx$ 1.5 รอบ/วินาที = 1.5 x 60 = 90 rpm

จากความเร็วของมอเตอร์ที่ต้องการ จะได้ความเร็วเชิงมุม 1.5 x $2\pi$ = 9.42 rad/s

และกำลังมอเตอร์ที่ต้องการเป็น 72.3 x 9.42 = 681 W

การคำนวณสมดุลของรถ

ต้องการยกกล่องสินค้าหนัก 300 กิโลกรัม ที่วางบนแท่นวางสินค้า ขนาดกว้างสุดที่ 1.2 เมตร โดยสิ่งต้องคำนึงคือ รถอาจจะคว่ำไปด้านหน้าได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการถ่วงน้ำหนักส่วนท้ายของรถ ซึ่งจาก Fig. 7 แสดงแผนภาพแรงกระทำและระยะระหว่างจุดที่มีแรงกระทำกับจุดหมุนบนตัวรถเพื่อนำมาใช้ในการคำนวณโมเมนต์ หาน้ำหนักถ่วงป้องกันรถคว่ำไปด้านหน้าขณะที่มีโหลดจากสินค้า

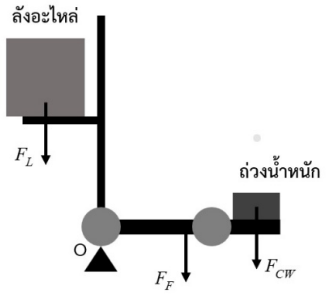



**Fig. 7** Diagram showing the forces for determining vehicle balance

กำหนดจุดหมุนอยู่ที่จุด O จะได้ $F_L$ เป็นแรงจากโหลดกล่องสินค้าบนแท่นวางคำนวณที่ 400 กิโลกรัม ระยะจากกึ่งกลางกล่องสินค้าถึงจุดหมุน O เป็น 0.89 เมตร $F_F$ เป็นแรงจากน้ำหนักรถคำนวณที่ 300 กิโลกรัม ระยะจากกึ่งกลางรถถึงจุดหมุน O เป็น 0.775 เมตร และ $F_{CW}$ เป็นแรงจากการถ่วงน้ำหนัก โดยระยะจากจุดถ่วงน้ำหนักถึงจุดหมุน O (Fig. 7)

เป็น 1.55 เมตร สามารถหาขนาดน้ำหนักถ่วงได้จาก

$$\sum M = 0$$

$$400(9.81)(0.89) = 300(9.81)(0.775) + \mathrm{x}(9.81)(1.55)$$

$$x = 79.68 \text{ kg}$$

กล่องสินค้า ณ จุดที่ยกสูงที่สุด ต้องการถ่วงน้ำหนักที่ท้ายรถอย่างน้อย 79.68 กิโลกรัม

การทดสอบจำลองภายในโปรแกรม (Simulation)

ก่อนการสร้างชิ้นงานจริง ผู้วิจัยได้ทำการสร้างแบบจำลองและทำการจำลองสถานการณ์ต่าง ๆ โดยการกำหนดเงื่อนไขโดยวัสดุที่ใช้เป็นเหล็ก แรงกระทำตามน้ำหนักสินค้าที่ 300 กิโลกรัม และกำหนดจุดยึดตาม Fig. 8 เพื่อทำการ simulation ซึ่งจะได้ผลลัพธ์ออกมาเป็นค่าความเค้น ระยะการโก่งงอ และความเครียด

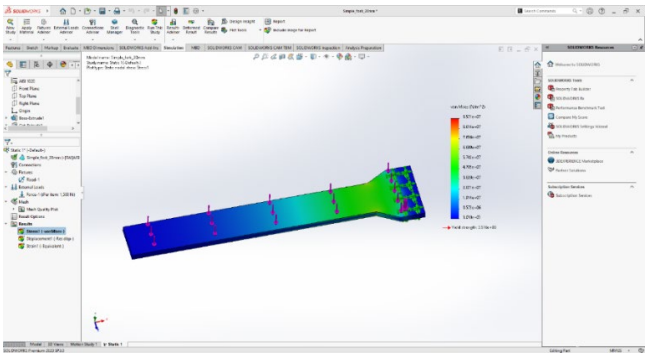


**Fig. 8** Simulation result of fork part

**Table 1** Stress, safety factor, deflection displacement, and mass of fork at various thicknesses

| Thickness (mm) | Von Mises Stress ($N/m^2$) | Yield Strenght ($N/m^2$) | Safety Factor | Displacement (mm) | Mass (kg) |
|---|---|---|---|---|---|
| 10 | $3.777 \times 10^8$ | | 0.931 | 51.89 | 9.672 |
| 12 | $2.573 \times 10^8$ | | 1.366 | 30.14 | 11.612 |
| 14 | $1.955 \times 10^8$ | | 1.798 | 19.02 | 13.551 |
| 16 | $1.553 \times 10^8$ | $3.516 \times 10^8$ | 2.264 | 12.77 | 15.491 |
| 18 | $1.192 \times 10^8$ | | 2.949 | 8.983 | 17.431 |
| 20 | $9.571 \times 10^7$ | | 3.673 | 6.559 | 19.371 |
| 22 | $8.156 \times 10^7$ | | 4.311 | 4.936 | 21.311 |

จาก Table 1 ผู้วิจัยได้เลือกใช้ Fork ที่ความหนา 20 mm เนื่องจากมีค่า safety factor มากกว่า 2.5 มีระยะการโก่งงอที่ปลายน้อยกว่า 10 mm และน้ำหนักของชิ้นงานน้อยกว่า 20 kg นอกจากนี้หากในอนาคตต้องการปรับขนาดความหนาให้น้อยลงก็สามารถทำได้ แต่ไม่ควรให้ความหนาน้อยกว่า 18 mm

การเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าและระบบควบคุม

หลังจากที่ประกอบในส่วนโครงสร้างของตัวรถเสร็จแล้ว ต้องทำการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าและระบบควบคุมของอุปกรณ์ต่าง ๆ ตาม Fig. 9 และผู้วิจัยได้ต่อระบบควบคุมในส่วนของล้อแมคคานั่มโดยกำหนดทิศทางและชื่อตัวแปรต่าง ๆ ที่จำเป็นในส่วนของการเขียนโปรแกรมควบคุมตาม Fig. 10

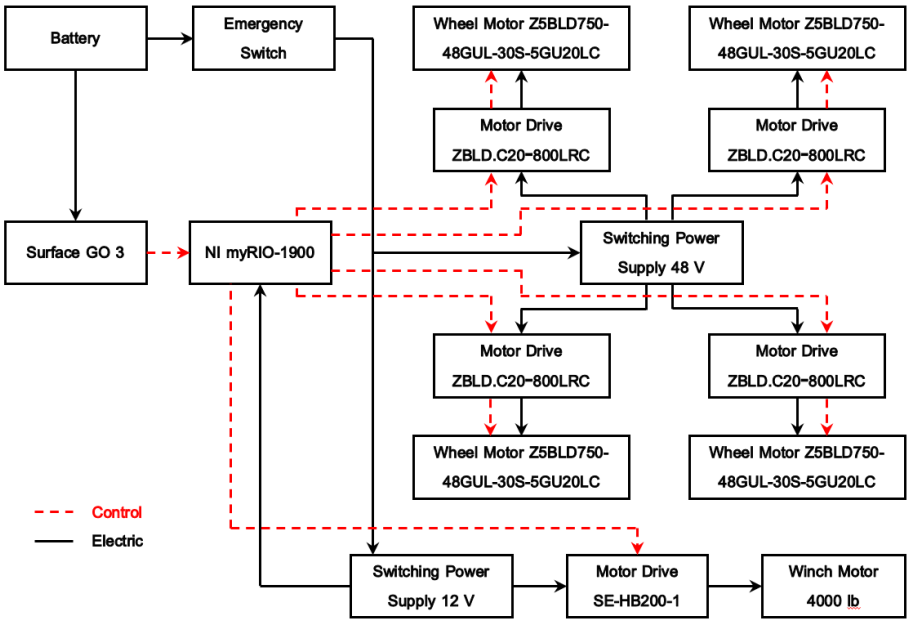



Fig. 9 Electrical and control system of Mecanum wheel forklift

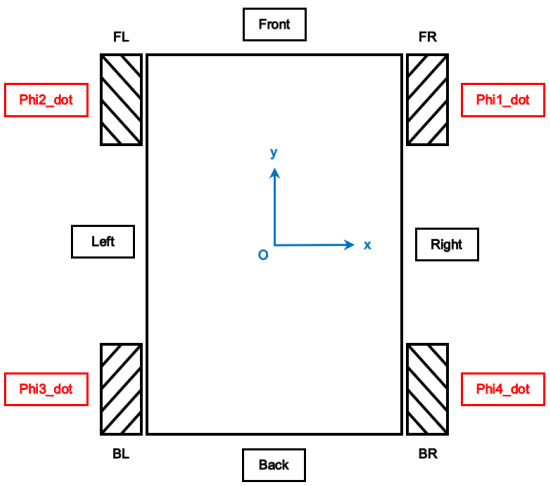



Fig. 10 Diagram of car part showing name of each wheel

โปรแกรมควบคุมการทำงาน

ใช้โปรแกรม LabVIEW ในการเขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมการทำงานของรถฟอร์คลิฟท์ทั้งระบบขับเคลื่อนด้วยการควบคุมสั่งการมอเตอร์ที่ล้อ และระบบยกสินค้าด้วยการควบคุมสั่งการมอเตอร์รอกสลิง โดย Fig. 11 จะแสดง State Chart การทำงานทั้งหมดของโปรแกรม

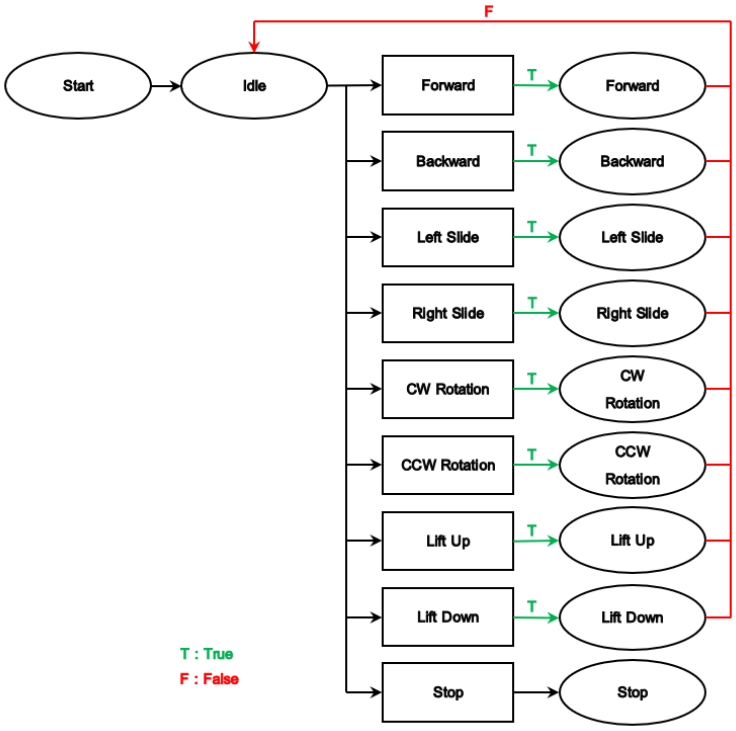



Fig. 11 State chart of program for control Mecanum wheel forklift

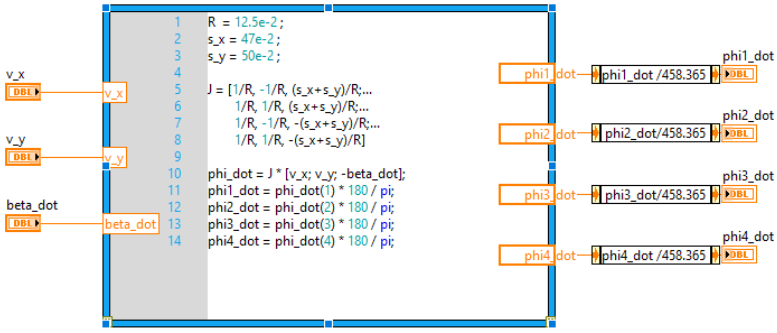



Fig. 12 Math Model of Mecanum wheel robot

จาก Fig. 12 จะเป็น Math Model ที่ใช้ในการเคลื่อนที่สำหรับหุ่นยนต์แบบล้อแมคคานั่ม ซึ่งโปรแกรมภายในหน้าต่างนี้จะแบ่งเป็น 3 ส่วนได้แก่

1. ส่วนที่รับข้อมูลเข้า ซึ่งข้อมูลที่รับเข้ามาจะมีความเร็วในแกน x, แกน y และแกน z
2. ส่วนประมวลผล ที่ใช้ MathScript Node ภายในจะมี 3 ส่วนได้แก่ ส่วนแรกเป็นการกำหนดค่าคงที่ ส่วนสองเป็นเมทริกซ์ J ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของล้อทั้งสี่ล้อตามรูปแบบของล้อแมคคานั่ม ส่วนสามเป็นการนำความเร็วแกน x, y, z มาแปลงเป็นค่าความเร็วเชิงมุมของล้อทั้งสี่ในแต่ละล้อ
3. ส่วนที่ส่งข้อมูลออกมา ซึ่งจะส่งค่าความเร็วเชิงมุมของล้อทั้งสี่ในแต่ละล้อที่ได้จากการคำนวณผ่านหลักการ Inverse Kinematics ออกมา แล้วทำการปรับค่าให้เหมาะสมก่อนนำไปใช้

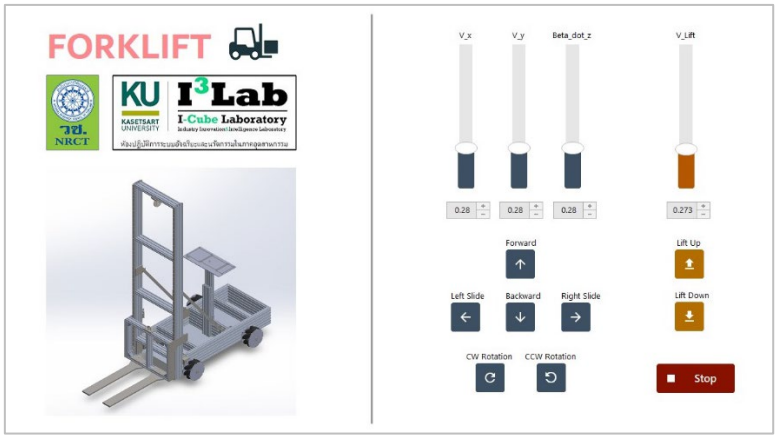



Fig. 13 Dashboard for user to control Mecanum wheel forklift

**ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง**

จากการทดสอบการเคลื่อนที่ของรถฟอร์คลิฟท์แบบล้อแมคคานั่มที่สร้างขึ้นนั้นพบว่า มอเตอร์สามารถออกแรงขับให้ล้อเริ่มเคลื่อนที่ได้ที่ค่า PWM 10% ขึ้นไปและเมื่อค่า PWM ที่ป้อนให้มอเตอร์เพิ่มขึ้น รถฟอร์คลิฟท์ก็จะเคลื่อนที่เร็วขึ้นตาม แต่จะพบการสั่นที่มากขึ้นตามความเร็วที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งจะได้ผลลัพธ์ออกมาตาม Table 2 แต่เมื่อค่า PWM เกิน 50% ขึ้นไปจะพบว่า รถเกิดการสั่นกระตุกเป็นระยะ และมีสาเหตุมาจากการที่จ่ายกระแสให้ไฟฟ้าให้มอเตอร์ได้ไม่เพียงพอ ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการเพื่อขนาดของแหล่งพลังงานและ power supply ให้เพียงพอที่จะขับมอเตอร์ได้เต็มประสิทธิภาพ

**Table 2** Result of motion testing

| PWM | Test | Number | | | Mean | Distance | | Speed | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | (s) | Linear (m) | Angular (°) | Linear (m/s) | Angular (rad/s) |
| 0.1 (10%) | x | 46.80 | 46.44 | 47.02 | 46.75 | 4.50 | - | 0.096 | - |
| | y | 40.00 | 39.78 | 40.15 | 39.98 | 4.50 | - | 0.113 | - |
| | z | 59.67 | 59.55 | 59.61 | 59.61 | - | 360.00 | - | 0.105 |
| 0.2 (20%) | x | 21.25 | 21.18 | 21.21 | 21.21 | 4.50 | - | 0.212 | - |
| | y | 18.98 | 18.90 | 18.95 | 18.94 | 4.50 | - | 0.238 | - |
| | z | 27.70 | 28.03 | 28.01 | 27.91 | - | 360.00 | - | 0.225 |
| 0.3 (30%) | x | 13.41 | 13.38 | 13.40 | 13.40 | 4.50 | - | 0.336 | - |
| | y | 11.96 | 12.03 | 11.93 | 11.97 | 4.50 | - | 0.376 | - |
| | z | 17.33 | 17.48 | 17.56 | 17.46 | - | 360.00 | - | 0.360 |
| 0.4 (40%) | x | 9.55 | 9.65 | 9.58 | 9.59 | 4.50 | - | 0.469 | - |
| | y | 8.40 | 8.34 | 8.48 | 8.41 | 4.50 | - | 0.535 | - |
| | z | 12.28 | 12.50 | 12.33 | 12.37 | - | 360.00 | - | 0.508 |

## สรุป

รถฟอร์คลิฟท์แบบล้อแมคคานั่มสามารถทำงานในส่วนของระบบขับเคลื่อนทั้ง 6 รูปแบบและระบบยกสินค้าทั้ง 2 รูปแบบได้อย่างถูกต้อง สามารถปรับเพิ่มหรือลดความเร็วได้ ซึ่งตอนนี้มอเตอร์ยังไม่สามารถทำงานเต็มประสิทธิภาพได้ เนื่องจากโครงสร้างบางแห่งที่ยังต้องปรับปรุงให้แข็งแรงขึ้น เพื่อลดการสั่นกระตุกขณะเคลื่อนที่ลง ในอนาคตสามารถนำรถฟอร์คลิฟท์แบบล้อแมคคานั่มต้นแบบนี้ไปพัฒนาได้ในอีกหลายรูปแบบทั้งในด้านของโครงสร้าง กลไกการยกสินค้าที่แข็งแรงและรับน้ำหนักได้มากขึ้น ตลอดจนการพัฒนาโปรแกรมควบคุมระบบต่าง ๆ ให้มีประสิทธิภาพและความปลอดภัยที่มากขึ้น

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านอุปกรณ์และสถานที่ในการทำงานวิจัย และขอขอบคุณสำนักงานการวิจัยแห่งชาติที่ได้มอบทุนสนับสนุนวิจัย นอกจากนี้ขอขอบคุณบุคลากรและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องที่ไม่ได้กล่าวไว้ ที่ให้การสนับสนุนจนกระทั่งการวิจัยครั้งนี้ประสบความสำเร็จไปได้ด้วยดี

**เอกสารอ้างอิง**

Anonymous. 2023. Design Considerations in LabVIEW. National Instruments.https://www.ni.com/en/support/documentation/supplemental/22/design-considerations-in-labview-.html# section-628343598, 11 Mar 2023.

Anonymous (n.d.). 6 Steps for Getting Started with LabVIEW. National Instruments. https://learn.ni.com/learn/article/labview-tutorial, 11 Mar 2023.

Anonymous (n.d.). What is Forklift? Working Mechanism & Where It is Used? Torcan Lift Equipment. https://torcanlift.com/what-is-forklift-working-mechanism-where-it-isused/#:~:text=Lifting%20Mechanism%3A%20Roller%20Chain%20Pulley,the%20top%20of%20the%20mast, 11 Mar 2023.

Doroftei, I., et al. 2007. Omnidirectional mobile robot-design and implementation, INTECH Open Access Publisher London, UK.

Lalge, R., et al. 2021. Design and analysis of two wheel drive forklift for industrial warehouses. New Arch-International Journal of Contemporary Architecture. 8: 825–830.

Taheri, H., et al. 2015. Kinematic model of a four mecanum wheeled mobile robot. International journal of computer applications 113: 6–9.

Tareq, K., et al. 2018. Forklift design. van Haendel, R.P. (2005). Design of an omnidirectional universal mobile platform.

ศุภรัตน์ แย้มควญ. 2566. LabVIEW คืออะไร. byter. https://byter.in.th/labview/what-is-labview/, 11 Mar 2023.

# การศึกษาความเป็นไปได้ด้วยการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการระบายความร้อนออกจากแม่พิมพ์เป่า (รวดเร็ว) ที่มีรูท่อน้ำหล่อเย็นแนบชิดผิวแม่พิมพ์

# Feasibility study by comparative analysis to increase the cooling efficiency of blow (rapid) mold with conformal cooling channels

**คุณยุต เอี่ยมสอาด[a,*], วรรณภัทร โพธิ์เดช[b], กิตตินาถ วรรณิสสร[a], วรัทยา ธรรมกิตติภพ[c]**

Kunnayut Eiamsa-ard[a,*], Wannapat Phodej[b], Kittinart Wannissorn[a], Varataya Thammkittipob[c]

[a]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[b]หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[c]ภาควิชาอาชีวศึกษา คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[a]Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

[b]Master of Engineering Program in Industrial Production Technology, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

[c]Vocational Education Department, Faculty of Education, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: kunnayut@gmail.com

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการเพิ่มประสิทธิภาพในการระบายความร้อนออกจากแม่พิมพ์รวดเร็วด้วยการวิเคราะห์เปรียบเทียบ ผลการวิจัยสรุปได้ว่า ประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อน รวมถึง การกระจายตัวของอุณหภูมิสม่ำเสมอทั่วกัน ของแม่พิมพ์ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลัก ดังนี้ (ก) ปริมาตรเนื้อโลหะของแม่พิมพ์ (ข) ท่อน้ำหล่อเย็นที่แนบชิดผิวแม่พิมพ์ และ กระจายทั่วพื้นผิวแม่พิมพ์ (ค) อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นภายในท่อน้ำหล่อเย็น (ง) ความเร็วการไหลของน้ำหล่อเย็นในท่อหล่อเย็น (จ) ความเร็วของการไหลของน้ำหล่อเย็นชิดผิวแม่พิมพ์ และ (ฉ) การชะงักการไหลในสนามการไหลของน้ำหล่อเย็นตามรอยหักมุมต่าง ๆ ในท่อน้ำหล่อเย็น

**คำสำคัญ**: แม่พิมพ์เป่า (รวดเร็ว), แม่พิมพ์ที่มีรูท่อน้ำหล่อเย็นแนบชิดผิว, พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ, ไฟไนต์เอเลเมนต์

**Abstract**

Feasibility study has been done in this research in order to increase the efficiency of heat transfer inside the molds using a comparative analysis. The results can be concluded that the efficiency of heat transfer inside molds as well as the temperature gradient on the mold surface depend on these factors including (a) Mold volume (b) Conformity and uniformity of cooling channels (c) Coolant volume flowrate (d) Coolant velocity (e) Coolant velocity on the boundary layer and (f) Coolant stagnation

**Keywords**: Computational Fluid Dynamics (CFD), Conformal Cooling Channel, Finite Element, Rapid Tooling

**คำนำ**

ในงานอุตสาหกรรมเป่าหรือฉีดพลาสติก เวลาที่ใช้ในการลดอุณหภูมิของแม่พิมพ์เป่าหรือแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกนั้นส่งผลโดยตรงอย่างมากกับเวลาที่ใช้ในวัฏจักรการเป่าหรือฉีดขึ้นรูปชิ้นงานพลาสติกต่อชิ้น กล่าวคือ เมื่อทำการระบายความร้อนออกจากแม่พิมพ์เป่าหรือแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกได้ดีมีประสิทธิภาพ เวลาที่ใช้ในการผลิตชิ้นงานจะลดลง ซึ่งจะส่งผลให้ต้นทุนโดยรวมลดลง (Khan et al., 2014) นอกจากเวลาที่ใช้ในการนำความร้อนออกจากเนื้อพลาสติกที่อ่อนตัวจากความร้อนจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงรูปได้แล้ว การกระจายตัวของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ บนผิวของแม่พิมพ์ (Mold Surface) อย่างสม่ำเสมอทั่วกันยังส่งผลโดยตรงกับคุณภาพของชิ้นงานพลาสติกที่ขึ้นรูปอีกด้วย เนื่องจากการบิดเบี้ยวของชิ้นงานพลาสติกที่ผลิตได้นั้นเกิดขึ้นจากอุณหภูมิที่ไม่สม่ำเสมอทั่วกันของตำแหน่งต่าง ๆ บนชิ้นงานพลาสติกที่ขึ้นรูป ในปัจจุบัน การสร้างแม่พิมพ์ที่มีรูท่อหล่อเย็นแนบชิดผิวสามารถขึ้นรูปได้จากเทคโนโลยีการเติมเนื้อวัสดุที่ขึ้นรูปแม่พิมพ์จากผงโลหะ (Powder-based Additive Manufacturing) แต่แม่พิมพ์ที่ขึ้นรูปจากผงโลหะยังไม่เป็นที่นิยมและไม่เหมาะสมกับการใช้งานจริงในอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ตามโรงงานทั่วไป เนื่องจากต้นทุนเริ่มต้นและต้นทุนที่ใช้ในการผลิตแม่พิมพ์ที่ขึ้นรูปจากผงโลหะรวมถึงค่าวัสดุยังมีราคาที่สูงมากเกินไปสำหรับการผลิตในงานโรงงานอุตสาหกรรม

ดังนั้นงานวิจัยที่เกี่ยวกับแม่พิมพ์ที่มีรูท่อน้ำหล่อเย็นแนบชิดผิวกลุ่มหนึ่งมุ่งเน้นไปที่การเขียนโปรแกรม (In-house Software) เพื่อสร้างท่อหล่อเย็นแนบชิดผิวแม่พิมพ์ในรูปทรงต่าง ๆ แบบอัตโนมัติ (Park and Dang, 2010; Yu et al., 2011; Yu and Chiu, 2011; Alban et al., 2013; Au and Yu, 2014; Yu et al., 2015; Au et al., 2018; Mercado-Colmenero et al., 2019; Torres-Alba et al., 2020) และมีงานวิจัยอีกกลุ่มหนึ่งที่ทำการศึกษาเน้นไปที่การใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทำการจำลองการถ่ายเทความร้อนเพื่อทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการระบายความร้อนออกจากแม่พิมพ์เป็นหลัก (Saifullah and Masood, 2007; Marques et al., 2015) บทความปริทัศน์ของ Shaochuan et al. (2021) ได้ทำการรวบรวมและสรุปข้อมูลของการออกแบบและการผลิตแม่พิมพ์ที่มีรูท่อน้ำหล่อเย็นแนบชิดผิว ในบทความนี้ได้อธิบายถึงแนวทางและวิธีการออกแบบรูท่อน้ำหล่อเย็นแนบชิดผิวสำหรับแม่พิมพ์

ยังพบว่ามีหลายงานวิจัยที่ใช้โปรแกรมสร้างแบบจำลองเพื่อช่วยในการวิเคราะห์และออกแบบแม่พิมพ์ อาทิ งานวิจัยเพื่อจำลองและศึกษาผลของระยะเวลาในการระบายความร้อนของ Preform ต่อคุณสมบัติทางกลของขวด (Daver and Demirel, 2012) งานวิจัยจำลองการเป่าขวดพลาสติก PET (Shubham et al., 2013) ซึ่งเน้นไปที่การจำลองการฟอร์มตัวของ PET parison ในขั้นตอนการเป่าแรงดัน งานวิจัยเพื่อจำลองและวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนในการผลิต Spoiler รถยนต์ (Cheng and Han, 2018) ซึ่งนำเสนอวิธีการปรับปรุงระบบการให้ความร้อนด้วยอุปกรณ์ทางไฟฟ้า (Electric-heat) เพื่อให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนดีขึ้น งานวิจัยที่ทำการทดลองและสร้างแบบจำลอง CFD เพื่อเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนของแม่พิมพ์ die cast ระหว่าง แม่พิมพ์ที่มีรูท่อน้ำหล่อเย็นแบบดั้งเดิม และ รูท่อน้ำหล่อเย็นแนบชิดผิว (Kurtulus et al., 2021) งานวิจัยโดยการสร้างแบบจำลอง CFD เพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนของแม่พิมพ์ผลิตขวดแก้วที่ออกแบบให้มีรูท่อน้ำหล่อเย็นแนบชิดผิว (Rosa et al., 2023) ซึ่งพบปัญหาการสะสมของความร้อนเฉพาะจุดที่เพิ่มมากขึ้น

งานวิจัยการคำนวณเชิงตัวเลขและการสร้างแบบจำลอง เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการระบายความร้อนของชิ้นอินเสิร์ท (Bruno and Sobotka, 2024) ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการปรับ mesh ของหน้าสัมผัสผิวที่มีการถ่ายเทความร้อนระหว่างกันเพื่อให้ผลของการจำลองแม่นยำมากขึ้น งานวิจัยเชิงเปรียบเทียบเพื่อหาค่า Reynold number ที่ดีที่สุดของแม่พิมพ์ Hot stamp ที่มีรูท่อน้ำหล่อเย็นแนบชิดผิว (Peng et al., 2024) งานวิจัยเปรียบเทียบผลการระบายความร้อนเมื่อเปลี่ยนค่า Reynold number ตั้งแต่ 4,000 ถึง 200,000 ผลการวิจัยพบว่าค่า 20,000 คือค่าที่ดีที่สุด เมื่อคิดเป็นความเร็วของน้ำระบายความร้อนได้ประมาณ 2.5 m/s ที่ขาเข้า งานวิจัยเพื่อปรับโครงสร้างและรูท่อน้ำหล่อเย็นที่ใช้ในการระบาย

ความร้อนของ Rapid thermal response mold (Cervantes-Vallejo et al., 2024) เป็นการหาค่า Parameter ในการออกแบบที่ดีที่สุดใช้วิธี Response surface methodology เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และใช้ analysis of variance ยืนยันความถูกต้อง การจัดวางตำแหน่งของ Heating rod และ Cooling channel ใช้วิธี Particle Swarm Optimization เพื่อทำการจำลองการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน รวมถึงทำการวิเคราะห์ความแข็งแรงด้วย FEM

จากการวิเคราะห์ผลงานวิจัยดังที่ได้กล่าวถึงข้างต้นนั้น ค่อนข้างจะเน้นหนักไปทางการสร้างและการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของท่อน้ำหล่อเย็นที่มีลักษณะเป็นโครงตาข่าย เนื่องจากขั้นตอนวิธีการ (Algorithm) ที่ใช้ในการสร้างท่อน้ำหล่อเย็นที่มีลักษณะเป็นโครงตาข่ายนั้นทำได้ง่ายกว่าวิธีอื่น ๆ เนื่องจากใช้ข้อมูลโครงตาข่าย (Mesh) ของพื้นผิวแม่พิมพ์ได้โดยตรง ถึงแม้ว่ารูท่อน้ำหล่อเย็นที่สร้างขึ้นได้จากวิธีการเหล่านั้นจะอยู่แนบชิดผิวแม่พิมพ์ก็ตาม แต่เนื่องจากรูท่อน้ำหล่อเย็นมีลักษณะที่โยงใยกันเป็นตาข่ายที่ซับซ้อนจึงส่งผลให้การควบคุมการไหลของน้ำหล่อเย็นในแต่ละเส้นทางการไหลของน้ำหล่อเย็นนั้นทำได้ค่อนข้างยาก ซึ่งทำให้อุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ บนพื้นผิวแม่พิมพ์นั้นแตกต่างกัน

**อุปกรณ์และวิธีการ**

การเจาะท่อน้ำหล่อเย็นไม่สามารถเจาะรูท่อน้ำหล่อเย็นให้แนบชิดผิวแม่พิมพ์ได้ การเจาะรูท่อน้ำหล่อเย็นลงบนแม่พิมพ์นั้นจำเป็นต้องเจาะเป็นรูตรงทั้งนี้เนื่องจากดอกสว่านที่ใช้ในการเจาะมีลักษณะเป็นแท่งตรงเท่านั้น ในบทความวิจัยก่อนหน้า ของ คุณยุต เอี่ยมสอาด และคณะ (2565) ศึกษาแม่พิมพ์เป่าที่มีระบบท่อน้ำหล่อเย็นแนบชิดผิวสร้างโดยการวางแผ่นโลหะที่ถูกตัดให้มีลักษณะเป็นแผ่นโลหะแบน ๆ ที่มีรูปทรงตามภาพตัดขวางของแม่พิมพ์ตามค่าความหนาของแผ่นโลหะที่นำมาซ้อนกันเข้าเพื่อให้เป็นรูปทรงของแม่พิมพ์ โดยที่ผิวท่อน้ำหล่อเย็นและผิวแม่พิมพ์มีระยะห่างเท่ากันสม่ำเสมอทั่วกันทั้งแผ่นโลหะ (ทุกแผ่น) ซึ่งแผ่นโลหะที่มีรูปทรงเป็นภาพตัดขวางถูกยึดเข้าด้วยกันด้วยสลักเกลียวและถูกกัดเก็บผิวเป็นขั้นตอนสุดท้ายด้วยเครื่องกัดซีเอ็นซี พบว่าการใช้ท่อหล่อเย็นแนบชิดผิวแม่พิมพ์นั้นมีประสิทธิภาพในการระบายความร้อนได้ดีกว่าการใช้ท่อน้ำหล่อเย็นแบบดั้งเดิม (Mohamed et al., 2013; Eiamsa-ard and Wannissorn, 2015; Shindemand Ashtankar, 2017) แต่ในงานวิจัยครั้งนี้ คณะผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมจำลองการถ่ายเทความร้อนจากผิวแม่พิมพ์ เพื่อที่จะนำไปใช้ออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ที่มีรูท่อน้ำหล่อเย็นแนบชิดผิวด้วยกระบวนการขึ้นรูปแม่พิมพ์ด้วยการเชื่อมพอกเนื้อโลหะด้วยลวดเชื่อม MIG/MAG ที่ติดตั้งอยู่บนเครื่องกัดซีเอ็นซี ซึ่งการออกแบบรูท่อน้ำหล่อเย็นในงานวิจัยนี้จะยึดหลักจากบทความปริทัศน์ที่ได้ทำการสรุปรวบรวมข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการออกแบบรูท่อน้ำหล่อเย็นแนบชิดผิวโดย Shaochuan et al. (2021)

คณะผู้วิจัยได้ทำการออกแบบแม่พิมพ์ทั้งหมด 4 แบบ โดยมีเงื่อนไขคือทุกส่วนของแม่พิมพ์จะต้องมีความหนาอย่างน้อย 6 mm จากข้อจำกัดของเทคโนโลยี Wire Arc Additive Manufacturing และจะต้องมี safety factor มากกว่า 2.0 ในกระบวนการวิเคราะห์หา failure (ก) **แบบที่** 1 คณะผู้วิจัยได้ทำการออกแบบให้มีรูท่อน้ำหล่อเย็นอยู่ในแนวดิ่งจำนวนมากที่สุดเท่าที่จะมากได้ เป็นท่อทรงกระบอกในแนวตรงในลักษณะของรูท่อน้ำหล่อเย็นแบบดั้งเดิมดังแสดงใน Fig. 1

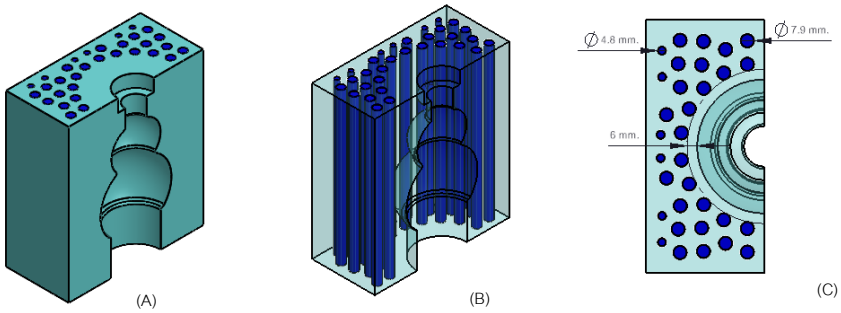



**Fig. 1** Model 1: Isometric view (A); Mold transparent (B); Top view (C)

(ข) **แบบที่ 2** คณะผู้วิจัยได้พยายามนำเนื้อโลหะออกจากแม่พิมพ์ให้ได้มากที่สุดเท่าที่จะมากได้ และรูท่อน้ำหล่อเย็นยังถูกออกแบบให้เป็นท่อแนบชิดผิวแม่พิมพ์ ดังแสดงใน Fig. 2

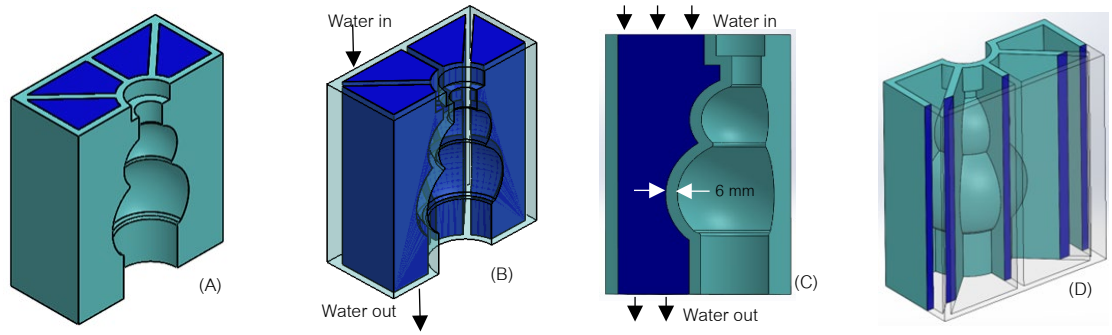



**Fig. 2** Model 2: Isometric view (A); Mold transparent (B); Section view (C); Section view with transparent (D)

(ค) **แบบที่ 3** คณะผู้วิจัยได้ทำการออกแบบให้น้ำไหลผ่านแม่พิมพ์ในแนวขวาง และมีรูปร่างของรูระบายน้ำเป็นแบบชิดผิวขนานไปกับรูปร่างของ cavity ของแม่พิมพ์ ดังแสดงใน Fig. 3

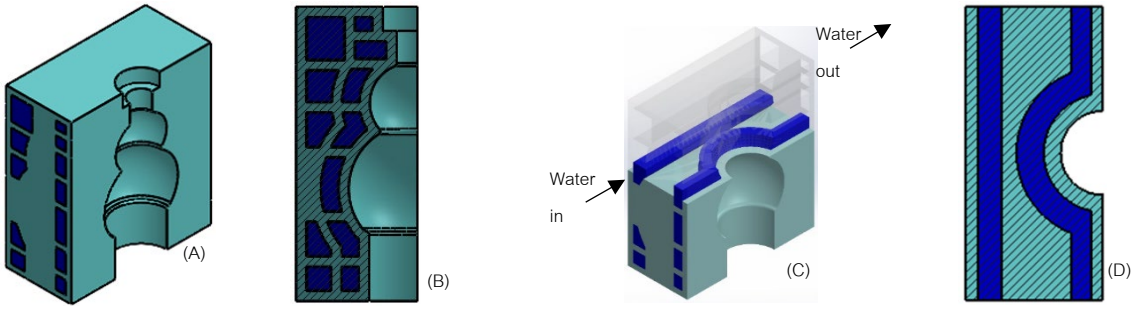



**Fig. 3** Model 3: Isometric view (A); Section view (B); Section view with transparent (C); Section view - top (D)

(ง) **แบบที่ 4** คณะผู้วิจัยได้นำแบบที่ 3 มาเพิ่มโค้งตรงขอบของรูท่อน้ำหล่อเย็นรวมถึงจุดหักมุมเปลี่ยนทิศทางทุกตำแหน่ง เพื่อลดการชะงักการไหลในสนามการไหลของน้ำหล่อเย็นตามรอยหักมุมต่าง ๆ ดังแสดงใน Fig. 4

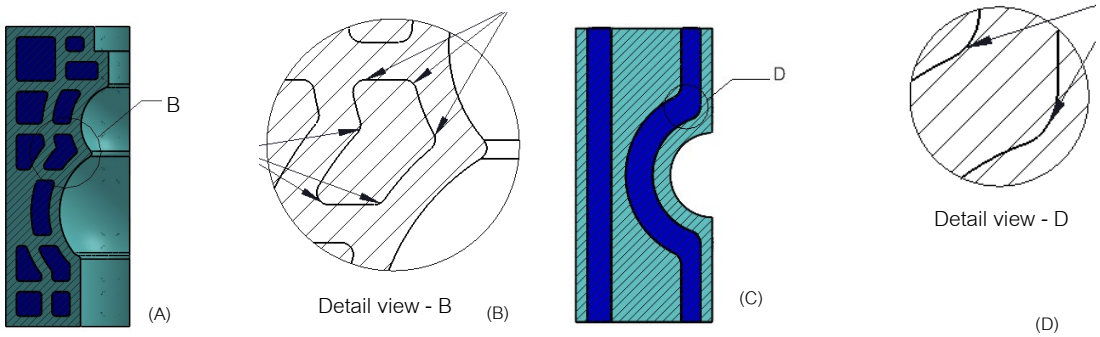



**Fig. 4** Model 4: Section view (A); Detail view - B (B); Section view - top (C); Detail view - D (D)

เป้าหมายหลักในการออกแบบรูท่อน้ำหล่อเย็นภายในแม่พิมพ์ มี 2 เป้าหมายหลัก คือ (ก) ประสิทธิภาพในการลดอุณหภูมิของ parison เมื่อทำการปล่อยให้น้ำหล่อเย็นเพื่อทำการระบายความร้อนไหลผ่านแม่พิมพ์ โดยใช้อุณหภูมิที่สูงที่สุดและอุณหภูมิต่ำที่สุดของ parison เป็นตัวชี้วัด และ (ข) การกระจายตัวของอุณหภูมิที่สม่ำเสมอทั่วกันของ parison เมื่อทำการปล่อยให้น้ำระบายความร้อนไหลผ่านแม่พิมพ์ โดยใช้ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่ต่ำที่สุดและอุณหภูมิ

เฉลี่ยของ parison เป็นตัวชี้วัด และเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบสำหรับการวิเคราะห์ คณะผู้วิจัยได้คำนวณข้อมูลต่าง ๆ รวมถึงผลการวิเคราะห์ FEM ที่ได้จากแบบจำลองที่เกี่ยวข้องกับแม่พิมพ์ทั้ง 4 แบบ ปรากฏดัง Table 1

**Table 1** Specification of 4 models and stress analysis results from Ansys: Static-structural module

| Model | Mold Volume ($m^3$) | Inlet Area ($mm^2$) | Wetted Surface* ($mm^2$) | Max. Stress (MPa) | Min. Safety Factor |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1.3379e-3 | 1,382 | 125,072 | 109.610 | 7.705 |
| 2 | 0.6157e-3 | 6,222 | 115,024 | 93.851 | 8.998 |
| 3 | 1.1212e-3 | 2,700 | 120,909 | 117.160 | 7.208 |
| 4 | 1.1288e-3 | 2,660 | 114,942 | 112.370 | 7.515 |

*surface that in contact with fluid

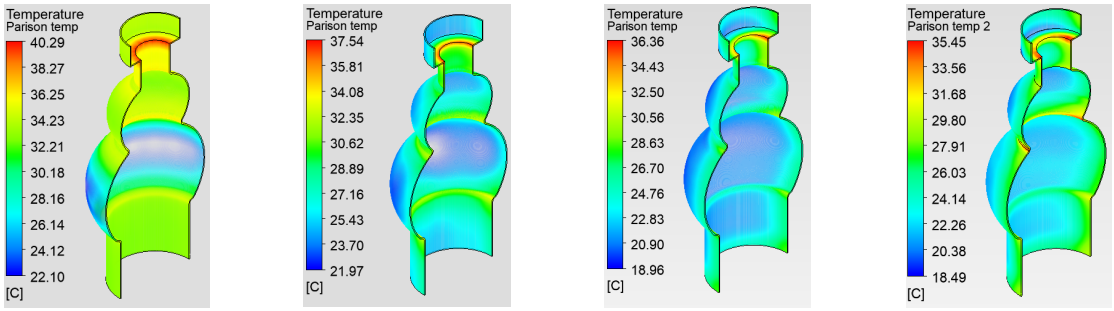
นอกเหนือจากการทำแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนระหว่าง parison กับน้ำหล่อเย็นโดยผ่านทางผิวแม่พิมพ์แล้ว ยังมีความจำเป็นต้องทำการจำลองเพื่อวิเคราะห์ความแข็งแรงอีกด้วย โดยมี load คือแรงที่ใช้ประกบแม่พิมพ์เข้าด้วยกัน ในขณะที่มีแรงดันของอากาศที่ใช้เป่า parison ซึ่งเป็นสภาวะขีดสุดของกระบวนการ โดยกำหนดให้ขวดพลาสติกทำมาจาก Polyethylene Terephthalate (PET) แม่พิมพ์ทำมาจาก tool steel ASTM A681 เกรด P20 และใช้น้ำเป็นของไหลในการหล่อเย็นระบายความร้อนออกจาก parison โดยผ่านทางผิวแม่พิมพ์ คณะผู้วิจัยนำผลของอุณหภูมิที่ได้เข้ามาทำการวิเคราะห์ความแข็งแรงของแม่พิมพ์โดยใช้ Static-structural module อุณหภูมิจะส่งผลต่อการขยายตัวและ stress ของแม่พิมพ์ load ของการจำลองคือแรงดันลมที่ใช้เป่าคือ 4.137 MPa และแรงที่ใช้ในการประกบแม่พิมพ์คือ 36448 N (คิดที่ safety factor = 1.25 ของแรงดันลมที่ใช้เป่าที่กระทำกับ projected area ในแนวแกน x) จากผลลัพธ์ maximum stress จะเกิดขึ้นบริเวณ cavity จุดที่เนื้อของแม่พิมพ์น้อยที่สุดหรือบริเวณขอบแม่พิมพ์ที่ถูกกำหนดให้เป็น fixed support อย่างไรก็ตามค่า safety factor ที่น้อยที่สุดของแบบที่ 3 มีค่าเท่ากับ 7.208 ซึ่งสูงกว่าขั้นต่ำที่ต้องการคือ 2.0 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าทุกแบบไม่เกิด failure

คณะผู้วิจัยวิเคราะห์ CFD เพื่อหาอุณหภูมิของแม่พิมพ์ และ parison ที่เวลา 10 วินาทีหลังจากปล่อยให้น้ำหล่อเย็นถ่ายเทความร้อนออกจากแม่พิมพ์โดยใช้ Fluent module คณะผู้วิจัยกำหนดขอบเขตและเงื่อนไขดังต่อไปนี้เพื่อลดความซับซ้อนของการวิเคราะห์ ได้แก่ (ก) ให้น้ำหล่อเย็นไหลเข้าสู่แม่พิมพ์เป็น uniform profile ด้วย total mass flow rate = 3.45 kg/s โดยแบ่ง mass flow rate ของแต่ละรูท่อน้ำหล่อเย็นระบายความร้อนจะถูกคิดตามอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดแต่ละทางเข้าต่อพื้นที่หน้าตัดของทางเข้าทั้งหมดคูณกับ total mass flow rate (ข) อุณหภูมิขาเข้า = 10 ºC (ค) ผิวทั้งหมดของแม่พิมพ์และ parison เป็นฉนวนกันความร้อนโดยสมบูรณ์ ยกเว้นพื้นที่ผิวที่สัมผัสระหว่างแม่พิมพ์กับน้ำและแม่พิมพ์กับ parison และ (ง) เพื่อหลีกเลี่ยงความคลาดเคลื่อนในการถ่ายเทข้อมูลผ่าน module ใน Ansys ที่มี mesh แตกต่างกัน จึงกำหนดให้อุณหภูมิตั้งต้นในการจำลองนี้เท่ากับอุณหภูมิตั้งต้นของการจำลองในขั้นตอนเป่าแรงดัน

**ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง**

การหาอุณหภูมิของแม่พิมพ์ และ parison ที่เวลา 10 วินาที (ที่ได้จากการจำลอง CFD) หลังจากปล่อยให้น้ำหล่อเย็นถ่ายเทความร้อนออกจากแม่พิมพ์โดยใช้ Fluent module ในโปรแกรม Ansys ได้แสดงไว้ใน Fig. 5 และ Table 1 พบว่า (ก) พื้นที่ที่อยู่ใกล้กับน้ำหล่อเย็นกว่าจะมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าพื้นที่ที่อยู่ไกลน้ำหล่อเย็น ดังนั้นพื้นที่ที่อุณหภูมิสูงของทุกแบบ

คือพื้นที่บริเวณคอขวดด้านบนและพื้นที่บริเวณส่วนเว้าของขวด (รอยต่อพื้นผิว) ซึ่งน้ำหล่อเย็นเกิดจากการชะงักการไหลในสนามการไหลของน้ำหล่อเย็น และ (ข) พื้นที่ที่มีความเร็วของน้ำหล่อเย็นภายในท่อสูงกว่าจะระบายความร้อนได้ดีกว่า




Model 1 Model 2 Model 3 Model 4

**Fig. 5** Parison temperature after 10 min: Model 1 (A); Model 2 (B); Model 3 (C); Model 4 (D)

เมื่อสังเกตจากช่วงอุณหภูมิและโทนสีอุณหภูมิของ parison ที่ทำได้ ดังแสดงใน Fig. 5 รวมถึงข้อมูลใน Table 2 จะเห็นได้ว่า (ก) แม่พิมพ์ที่มีรูท่อน้ำหล่อเย็นแบบที่ 3 มีประสิทธิภาพในการระบายความร้อนสูงที่สุด (ข) แม่พิมพ์ที่มีรูท่อน้ำหล่อเย็นแบบที่ 4 และ แบบที่ 2 มีประสิทธิภาพในการระบายความร้อนดีเป็นอันดับ 2 และ อันดับ 3 ตามลำดับ แต่ต่างกับแม่พิมพ์ที่มีรูท่อน้ำหล่อเย็นแบบที่ 3 ไม่มากนัก และ (ค) แม่พิมพ์ที่มีรูท่อน้ำหล่อเย็นแบบที่ 1 มีประสิทธิภาพในการระบายความร้อนต่ำที่สุด

**Table 2** CFD analysis result (10 sec. after the cooling systems start) from Ansys: Fluent module

| Model | Max Mold Temp. (ºC) | Avg. Mold Temp. (ºC) | Min. Mold Temp. (ºC) | Max Parison Temp. (ºC) | Avg. Parison Temp. (ºC) | Min. Parison Temp. (ºC) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 33.657 | 16.636 | 10.448 | 39.690 | 30.917 | 21.967 |
| 2 | 27.068 | 16.388 | 11.184 | 36.330 | 26.277 | 21.923 |
| 3 | 29.206 | 18.147 | 10.579 | 35.260 | 22.872 | 18.507 |
| 4 | 29.166 | 18.467 | 10.833 | 36.258 | 23.835 | 17.972 |

อย่างไรก็ตามเมื่อสังเกตจากอัตราการเปลี่ยนโทนสีบนพื้นผิวแม่พิมพ์ที่แสดงใน Fig. 5 จะเห็นได้ว่า (ก) แม่พิมพ์ที่มีรูท่อน้ำหล่อเย็นแบบที่ 3 มีการกระจายตัวของอุณหภูมิบนพื้นผิวแม่พิมพ์ดีที่สุด อุณหภูมิค่อนข้างจะสม่ำเสมอกว่าแบบอื่น ๆ (ข) แม่พิมพ์ที่มีรูท่อน้ำหล่อเย็นแบบที่ 4 มีการกระจายตัวของอุณหภูมิบนพื้นผิวแม่พิมพ์ดีเป็นอันดับ 2 อย่างไรก็ตามแม่พิมพ์ที่มีรูท่อน้ำหล่อเย็นแบบที่ 4 นี้มีอุณหภูมิที่ค่อนข้างสูงเป็นบริเวณแคบ ๆ ตรงรอยต่อของพื้นผิวที่แนวตรงกลางของแม่พิมพ์ ทั้งนี้เนื่องจาก การถ่ายเทความร้อนโดยทั่วไปดีขึ้นมาก จึงทำให้การถ่ายเทความร้อนที่ต่ำกว่าในบางบริเวณเห็นเด่นชัดขึ้น โดยเฉพาะบริเวณที่มีความเร็วของน้ำหล่อเย็นต่ำมาก ๆ เมื่อเทียบกับบริเวณอื่น ๆ เช่น จุดที่เกิดการชะงักการไหลในสนามการไหลของน้ำหล่อเย็นตามรอยหักมุมต่าง ๆ (ค) แม่พิมพ์ที่มีรูท่อน้ำหล่อเย็นแบบที่ 2 มีการกระจายตัวของอุณหภูมิบนพื้นผิวแม่พิมพ์ดีเป็นอันดับ 3 (มีการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ดีแต่ด้อยกว่าแม่พิมพ์ที่มีรูท่อน้ำหล่อเย็นแบบที่ 3 และ แบบที่ 4) และ (ง) แม่พิมพ์ที่มีรูท่อน้ำหล่อเย็นแบบที่ 1 มีการกระจายตัวของอุณหภูมิบนพื้นผิวแม่พิมพ์ที่ดีน้อยที่สุด

จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า (ก) แม่พิมพ์ที่มีรูท่อน้ำหล่อเย็นแบบที่ 1 นั้นขึ้นรูปง่ายที่สุดซึ่งใช้กระบวนการกัดและเจาะรูเท่านั้น ไม่จำเป็นต้องใช้กระบวนการเชื่อมพอกด้วยลวดเชื่อมในการขึ้นรูป (Wire Arc Additive Manufacturing) แต่มีประสิทธิภาพในการระบายความร้อนต่ำที่สุดและการกระจายตัวของอุณหภูมิบนพื้นผิวแม่พิมพ์ไม่ดีนัก และแม่พิมพ์มี

น้ำหนักมากที่สุด ในแม่พิมพ์ที่มีรูท่อน้ำหล่อเย็นแบบที่ 1 ดังแสดงใน Fig. 6 เนื่องจากรูปทรงของ cavity มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่แตกต่างกันในแนวตั้งจึงส่งผลให้ตำแหน่งบริเวณ cavity ที่ด้านบนตรงคอขวดมีระยะห่างจากรูท่อน้ำหล่อเย็นมากกว่าที่ตำแหน่งอื่น ๆ บนแม่พิมพ์ การระบายความร้อนจึงดีน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับแม่พิมพ์ที่มีรูท่อน้ำหล่อเย็นแบบอื่น ๆ

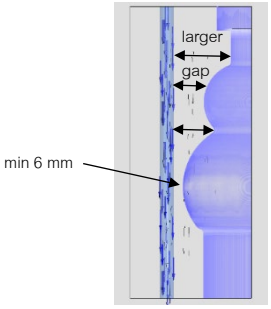



**Fig. 6** Left side view of Model 1 showing the fluid velocity in a cooling channel and the parison temperature

(ข) แม่พิมพ์ที่มีรูท่อน้ำหล่อเย็นแบบที่ 2 นั้นสามารถขึ้นรูปด้วยกระบวนการเชื่อมพอกด้วยลวดเชื่อมได้ง่ายที่สุด มีประสิทธิภาพในการระบายความร้อนค่อนข้างดี แต่มีประสิทธิภาพในการระบายความร้อนและการกระจายตัวของอุณหภูมิบนพื้นผิวแม่พิมพ์ต่ำกว่าแม่พิมพ์ที่มีรูท่อน้ำหล่อเย็นแบบที่ 3 และ แบบที่ 4 เนื่องจาก แม่พิมพ์มีพื้นที่หน้าตัดของรูท่อน้ำหล่อเย็นที่ใหญ่มาก ๆ เมื่อเทียบกับแม่พิมพ์มีรูท่อน้ำหล่อเย็นแบบอื่น ๆ จึงทำให้ความเร็วโดยเฉลี่ยของน้ำหล่อเย็นภายในรูท่อน้ำหล่อเย็นนั้นต่ำมาก ๆ ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพในการระบายความร้อนที่น้อยกว่า แม้ว่าแม่พิมพ์ที่มีรูท่อน้ำหล่อเย็นแบบที่ 2 จะมีน้ำหนักเพียงครึ่งหนึ่งของแม่พิมพ์ที่มีรูท่อน้ำหล่อเย็นแบบอื่นก็ตาม ดังแสดงใน Fig. 7

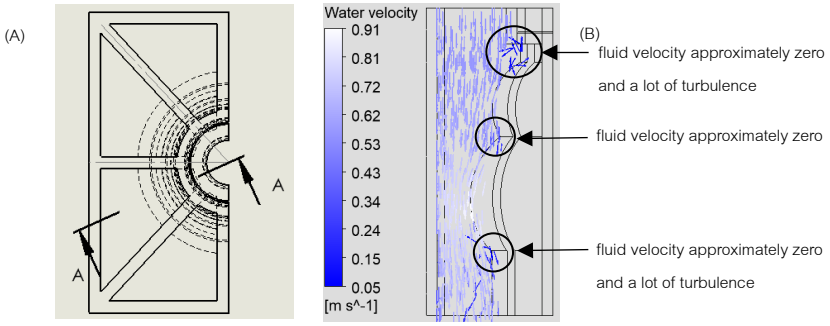



**Fig. 7** Model 2: Top view (A); Graphic showing the fluid velocity in a cooling channel at section A-A (B)

และ (ค) แม่พิมพ์ที่มีรูท่อน้ำหล่อเย็นแบบที่ 3 และ แบบที่ 4 มีประสิทธิภาพในการระบายความร้อนที่ใกล้เคียงกันและสูงมากที่สุดเมื่อเทียบกับแม่พิมพ์ที่มีรูท่อน้ำหล่อเย็นแบบที่ 1 และ แบบที่ 2 แม้ว่าจะมีน้ำหนักมากกว่าแม่พิมพ์ที่มีรูท่อน้ำหล่อเย็นแบบที่ 2 ถึงเท่าตัวก็ตาม แม่พิมพ์ที่มีรูท่อน้ำหล่อเย็นแบบที่ 4 มีข้อด้อยกว่าแม่พิมพ์ที่มีรูท่อน้ำหล่อเย็นแบบที่ 3 ได้แก่ พื้นที่ผิวแม่พิมพ์บริเวณคอขวดด้านบนและพื้นที่ผิวแม่พิมพ์บริเวณส่วนเว้าของขวด (รอยต่อพื้นผิว) มีอุณหภูมิที่สูงกว่าพื้นที่ผิวแม่พิมพ์บริเวณอื่น ทั้งนี้เนื่องจากน้ำหล่อเย็นที่ตำแหน่งดังกล่าวข้างต้นเกิดจากการชะงักการไหลในสนามการไหลของน้ำหล่อเย็นในท่อมากกว่า ดังแสดงใน Fig. 8 และ Fig. 9

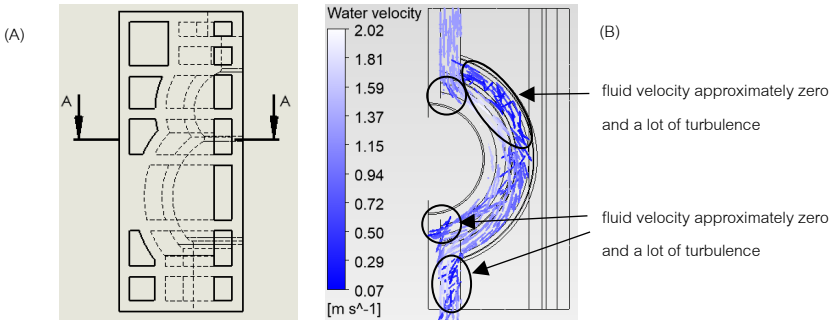



**Fig. 8** Model 3: Left side view (A); Graphic showing the fluid velocity in a cooling channel at section A-A (B)

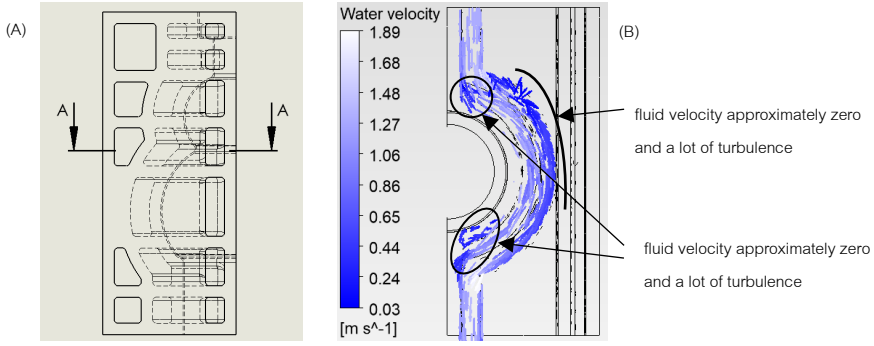



**Fig. 9** Model 4: Left view (A); Graphic result show cooling fluid velocity in a channel at section A-A (B)

## สรุป

การออกแบบแม่พิมพ์ที่มีรูท่อน้ำหล่อเย็นทั้ง 4 แบบในงานวิจัยนี้มีข้อกำหนดอยู่ 2 เรื่อง คือ (ก) ที่ตำแหน่งใด ๆ บนแม่พิมพ์จะต้องมีความหนาอย่างน้อย 6 mm และ (ข) วัสดุที่เลือกใช้ทำแม่พิมพ์คือ P20 tool steel ซึ่งมีค่า strength ที่สูงมาก ดังนั้นจะเห็นได้อย่างชัดเจนจากผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของแม่พิมพ์ทั้ง 4 แบบว่า แม่พิมพ์ทั้ง 4 แบบนั้นมี safety factor ที่สูงมาก (ซึ่งอาจจะมากเกินไป) จึงไม่เห็นความแตกต่างของความแข็งแรงอย่างมีนัยสำคัญ และยากที่จะเกิด failure ขึ้นกับโครงสร้างของแม่พิมพ์ ดังนั้นการวิเคราะห์จึงมุ่งเน้นไปที่การให้น้ำหล่อเย็นระบายความร้อนไหลผ่านแม่พิมพ์แนบชิดผิว เพื่อให้แม่พิมพ์มีประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนออกจาก parison ผ่านแม่พิมพ์ได้ดีที่สุด รวมถึงมีการกระจายตัวของอุณหภูมิสม่ำเสมอทั่วกันทั้งผิวแม่พิมพ์

ปัจจัยที่สำคัญในการออกแบบและการสร้าง แม่พิมพ์ที่มีรูท่อน้ำหล่อเย็น ให้มีประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนออกจาก parison ผ่านแม่พิมพ์ได้สูง รวมถึง มีการกระจายตัวของอุณหภูมิสม่ำเสมอทั่วกันทั้งผิวแม่พิมพ์มีดังนี้ (ก) ปริมาตรเนื้อโลหะของแม่พิมพ์ควรจะน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ในขณะที่แม่พิมพ์ยังสามารถรับแรงต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นบนแม่พิมพ์ได้ซึ่งดูได้จาก safety factor ซึ่งอาจรวมถึง deflection ด้วยในกรณีที่ต้องการ precision ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากการเป่าหรือฉีดด้วย (ข) ควรออกแบบรูท่อน้ำหล่อเย็นในแม่พิมพ์ให้แนบชิดผิวแม่พิมพ์มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ (ค) ควรออกแบบรูท่อน้ำหล่อเย็นในแม่พิมพ์เพื่อให้น้ำหล่อเย็นสามารถไหลผ่านครบทุกตำแหน่งที่มีปัญหาในการระบายความร้อนในแม่พิมพ์ด้วยรูท่อน้ำหล่อเย็นแบบดั้งเดิม (ง) ควรออกแบบรูท่อน้ำหล่อเย็นในแม่พิมพ์ให้มีอัตราการไหล (volume flowrate) ของน้ำหล่อเย็นภายในรูท่อน้ำหล่อเย็นให้สูงที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ (จ) ควรออกแบบรูท่อน้ำหล่อเย็นในแม่พิมพ์ให้มีความเร็วของการไหล (velocity) ของน้ำหล่อเย็นภายในรูท่อน้ำหล่อเย็นให้สูงที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ (ฉ) ควรออกแบบให้รูท่อน้ำหล่อเย็นในแม่พิมพ์ให้มีความเร็วของการไหล (velocity) ของน้ำหล่อเย็นในแม่พิมพ์คงที่เท่าที่จะเป็นไปได้ (หรือมากขึ้นได้ แต่ห้ามออกแบบของการไหลของน้ำหล่อเย็นให้ความเร็วลด) (ช) ควรออกแบบให้รูท่อน้ำหล่อเย็นในแม่พิมพ์ให้มีความเร็วของการไหล (velocity) ของน้ำหล่อเย็นชิดผิวแม่พิมพ์สูงที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ และ (ซ) ควร

ออกแบบรูท่อน้ำหล่อเย็นเพื่อ กำจัด และ/หรือ ลด การชะงักการไหลในสนามการไหลของน้ำหล่อเย็นตามรอยหักมุมต่าง ๆ ในรูท่อน้ำหล่อเย็นให้น้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

**กิตติกรรมประกาศ**

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนอุดหนุนจาก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ โครงการพัฒนาผลิตภัณฑ์นวัตกรรม แผนปฏิบัติการกลุ่มงานวิจัย แผนงานด้านสิ่งประดิษฐ์และนวัตกรรม ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2564–2566 และ ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์พื้นที่และสาธารณูปโภคที่ใช้ในงานวิจัย

**เอกสารอ้างอิง**

คุณยุต เอี่ยมสอาด, กิตตินาถ วรรณิสสร, อุทัย เกรียบกลาง, ธีระวัจน์ คำวิลาศ. 2565. แม่พิมพ์เป่า (รวดเร็ว) ที่มีท่อน้ำหล่อเย็นแนบชิดผิว. ใน: การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 36. โรงแรมฮอลิเดย์ อินน์ วานา นาวา หัวหิน ประจวบคีรีขันธ์ 19–22 กรกฎาคม 2565.

Alban, A., Sobotka, V, LeGoff, R., Jarny, Y. 2013. Optimal cooling design in injection moulding process–A new approach based on morphological surfaces. Appl. Therm. Eng. 52: 170–178

Au, K.M., Yu, K.M. 2014. Variable distance adjustment for conformal cooling channel design in rapid tool. J. Manuf. Sci. Eng.136: 044501

Au, K.M., Yu, K.M., Chiu, W.K. 2011. Visibility-based conformal cooling channel generation for rapid tooling, Computer-Aided Design 43: 356–373.

Bruno, A., Sobotka, V. 2024. A numerical framework for three-dimensional optimization of cooling channels in thermoplastic printed molds. Appl. Therm. Eng. 238: 121988. doi.org/10.1016/j.applthermaleng. 2023.121988.

Cervantes-Vallejo, F.J., Hernández-Navarro, C., Camarillo-Gómez, K.A., Louvier-Hernández, J.F., Navarrete-Damián, J., 2024. Thermal-Structural optimization of a rapid thermal response mold: Comprehensive simulation of a heating rod system and a fluid cooling system implemented MSR-PSO-FE. J. Manuf. Sci. Eng. 47: 102279. doi.org/10.1016/j.tsep.2023.102279.

Cheng, L.X., Han, X.H. 2018. Optimal design of heating system in rapid thermal cycling blow mold by a two-step method based on sequential quadratic programming. Int. Commun. Heat Mass Transf. 96: 114–121. doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2018.06.006.

Daver, F., Demirel, B. 2012. A simulation study of the effect of preform cooling time in injection stretch blow molding. J. Mater. Process. Technol. 212: 2400–2405. doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.06.004.

Eiamsa-ard, K., Wannissorn, K. 2015. Conformal bubbler cooling for molds by metal deposition process, Comput. Aided Des. 69: 126–133. doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.004

Khan, M., Kamran, Afaq, S., Khan, N.U., Ahmad, S. 2014. Cycle time reduction in injection molding process by selection of robust cooling channel design, ISRN Mechanical Engineering 2014: 968484. doi.org/10.1155/2014/968484

Kuo, C.C., You, Z.Y. 2018. Development of injection molding tooling with conformal cooling channels fabricated by optimal process parameters. Int. J. Adv. Manuf. Tech. 96: 1003–1013. doi.org/10.1007/ s00170-018-1664-z

Kurtulus, K., Bolatturk, A., Coskun, A., Gurel, B. 2021. An experimental investigation of the cooling and heating performance of a gravity die casting mold with conformal cooling channels. Appl. Therm. Eng. 194: 117105. doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117105.

Marques, S., Adriano, F.S., Jackson, M., Ihar, Y. 2015. Design of conformal cooling for plastic injection moulding by heat transfer simulation. Polemeros 25: 564–574.

Mercado-Colmenero, J.M., Martin-Doñate, C., Rodriguez-Santiago, M., Moral-Pulido, F., Rubio-Paramio, M.A. 2019. A new conformal cooling lattice design procedure for injection molding applications based on expert algorithms. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 102: 1719–1746. doi.org/10.1007/s00170-018-03235-3

Mohamed, O.A., Masood, S.H., Saifullah, A., 2013. A Simulation study of conformal cooling channels in plastic injection molding. Int. J. Eng. Res. 2: 344–348

Park, H.S., Dang, X.P. 2010. Optimization of conformal cooling channels with array of baffles for plastic injection mold. Int. J. Precis. Eng. Manuf. 11: 879–890

Peng, G., Dun, L., Yutao, P., Shaochuan, F. 2024. Optimal Reynolds number of cooling water in conformal cooling molds. Appl. Therm. Eng. 236: 121509. doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121509.

Rosa, N., Costa, J., Lopes, A.G. 2023. CFD study of transient heating and cooling of a blank mould with a conformal cooling channel for manufacturing glass containers. Results Eng. 17: 100932. doi.org/10. 1016/j.rineng.2023.100932.

Saifullah, A.B.M., Masood, S.H. 2007. Finite element thermal analysis of conformal cooling channels in injection moulding. ACAM 1: 337–341.

Shaochuan, F., Kamat, A.M., Yutao, P. 2021. Design and fabrication of conformal cooling channels in molds: Review and progress updates. Int. J. Heat Mass Transf. 171: 121082. doi.org/10.1016/j.ijheatmass transfer.2021.121082.

Shinde, M.S., Ashtankar, K.M. 2017. Additive manufacturing–Assisted conformal cooling channels in mold manufacturing processes, Adv. Mech. Eng. 9: 1–14.

Shubham, G., Vikram, U., Amit, S. R., et al. 2013. Simulation of blow molding using Ansys Polyflow. Procedia. 5: 468–473. doi.org/10.1016/j.apcbee.2013.05.079.

Torres-Alba, A., Mercado-Colmenero, J.M., Diaz-Perete D., Martin-Doñate, C. 2020. A new conformal cooling design procedure for injection molding based on temperature clusters and multidimensional discrete models. Polymers 12: 154. doi.org/10.3390/polym12010154

Yu, W., Yu, K.M., Wang, C.L. 2015. Spiral and conformal cooling in plastic injection molding. Comput. Aided Des. 63: 1–11.

Yu, W., Yu, K.M., Wang, C.L., Zhang, Y. 2011. Automatic design of conformal cooling circuits for rapid tooling, Comput. Aided Des. 43: 1001–1010.

# การออกแบบหอประชุมมาตรฐานเพื่อการระบายอากาศ

## Designing standard auditorium for ventilation

**กรวรรณ ปิ่นทอง***, **ภัทรนันท์ ทักขนนท์**

Korrawan Pinthong*, Pattaranan Takkanon

ภาควิชานวัตกรรมอาคาร คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Building Innovation, Faculty of Architecture, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: korrawan.pi@ku.th

**บทคัดย่อ**

การศึกษาต้องการหาทิศทางการวางอาคารที่สัมพันธ์กับทิศทางลมประจำถิ่นและการออกแบบช่องเปิดบนหลังคาเพื่อประสิทธิภาพการระบายอากาศด้วยวิธีธรรมชาติ โปรแกรม scStream จำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics ; CFD) ถูกนำมาใช้จำลองอาคารกรณีศึกษา 3 รูปแบบ โดยวางอาคารหันทั้ง 8 ทิศสัมพันธ์กับทิศทางลมประจำถิ่น ผลการศึกษาพบว่าลมประจำถิ่นด้านทิศตะวันออกเฉียงเหนือที่มีความเร็วลมตั้งต้นเฉลี่ย 2.40 เมตรต่อวินาที ทำให้เกิดกระแสลมภายในอาคารได้ดีกว่าลมจากทิศทางอื่น รูปแบบหลังคาสองชั้นที่มีช่องเปิดบนหลังคาสามารถทำให้ระบายอากาศได้ดีกว่าแบบเดิมในระดับช่วงบนใกล้หลังคา ส่วนการติดตั้งลูกหมุนระบายอากาศบนหลังคา สามารถดึงลมภายในอาคารออกสู่ด้านบนของหลังคาเป็นผลให้ลดความร้อนภายในอาคารได้ดีกว่าการเพิ่มช่องเปิดหลังคาเพียงอย่างเดียว

**คำสำคัญ**: การระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติ, พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ, อาคารหอประชุม

**Abstract**

The study aims to find building orientations responding to prevailing wind directions and roof opening design for natural ventilation efficiency. ScStream, a computational fluid dynamics software package, was used to simulate 3 types of case study models with 8 orientations in relation to 3 prevailing wind directions . Results showed that north-east (NE) wind with initial velocity of 2.40 m/s promoted indoor air ventilation better than those from other directions. The double roof with roof openings provided better ventilation at upper-level space close to the roof when compared with the original design. Adding roof ventilators drew indoor air and pushed hot air out through the roof resulting in mitigating the indoor heat better than having roof openings alone.

**Keywords**: Computational Fluid Dynamics, Natural Ventilation, Office Auditorium

**คำนำ**

ปัจจุบันสถานศึกษาในจังหวัดชลบุรี มักของบประมาณในการจัดสร้างหอประชุมเนื่องจากมีประโยชน์ใช้สอยอเนกประสงค์ เมื่อจัดสร้างแล้วจึงปรับปรุงอาคารที่เริ่มแรกออกแบบสำหรับการระบายอากาศด้วยวิธีธรรมชาติโดยติดตั้งเครื่องปรับอากาศที่บริเวณหอประชุมชั้น 2 ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานและงบประมาณ ดังนั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญที่ควรมีแบบมาตรฐานสำหรับอาคารหอประชุม ที่เหมาะสำหรับการระบายอากาศด้วยวิธีธรรมชาติ เพื่อลดการใช้พลังงานในอาคาร จึงมีแนวคิดในการจัดทำแบบมาตรฐานสำหรับอาคารหอประชุมที่ผ่านการคิดและวิเคราะห์การระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติ เพื่อมุ่งเน้นการออกแบบอาคารที่สามารถอยู่ร่วมกับสภาพแวดล้อมให้ได้มากที่สุดก่อนที่จะใช้ระบบปรับอากาศเพื่อลดการใช้พลังงานในอาคาร ผลการศึกษาจะแสดงการกระจายตัวของลมในอาคารต้นแบบและอาคารที่ปรับปรุงแล้วเพื่อประเมินประสิทธิภาพการระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติของการใช้รูปทรงหลังคาที่แตกต่างกันสำหรับอาคารหอประชุม

**อุปกรณ์และวิธีการ**

1. โปรแกรม Cradle scSTREAM 2021 สำหรับการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics; CFD) เพื่อคำนวณและจำลองแบบวิธีการไหลของของไหลไม่ว่าจะเป็นอากาศหรือก๊าซชนิดต่าง ๆ น้ำและของเหลวใดๆ ที่เคลื่อนที่ไปในขอบเขตที่กำหนด โดย CFD เป็นวิธีที่เป็นที่ยอมรับ มีความน่าเชื่อถือ เป็นวิธีการจำลองสภาพการไหลของอากาศโดยการคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข สามารถแสดงผลเป็นทั้งตัวเลขและภาพ มีหลักการทำงานโดยทั่วไปโดยการคำนวณความร้อน (Heat) และการไหล (Flow) ของอากาศหรือของไหลปริมาตรใด ๆ ในพื้นที่ที่ต้องการศึกษา โปรแกรม scStream แบ่งการทำงานออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

1) Preprocessor ขั้นตอนการเตรียมแบบจำลอง การสร้าง Grid หรือ Mesh และระบุค่าเงื่อนไขต่าง ๆ
2) Solver ขั้นตอนการคำนวณ
3) Postprocessor ขั้นตอนการแสดงผลการคำนวณและจำลองแบบ

ความน่าเชื่อถือของผลการทดลองด้วยโปรแกรมสามารถตรวจสอบได้จาก 2 ประเด็น ได้แก่

- การประเมินความคงที่ของการคำนวณ (Assess the stability of the calculation) เพื่อยืนยันค่าสูงสุดและต่ำสุดที่ได้จะต้องไม่แกว่ง มีความสม่ำเสมอ มวลสารและความร้อนได้สมดุล และสำคัญมากที่ในภาวะการวิเคราะห์แบบ Steady State การคำนวณเป็นวงรอบทีละรอบต้องไปถึงจุด Convergence ตามเกณฑ์ที่กำหนดในการคำนวณ
- การยืนยันการตั้งค่าเพื่อการคำนวณและวิเคราะห์ (Confirm the setup of the analysis) โดยพิจารณาว่าจำนวนตัวเลขของ Mesh ยอมรับได้หรือไม่ น้อยหรือมาก หยาบหรือละเอียดเพียงพอสำหรับการแบ่งพื้นที่ในการคำนวณ และค่า y+ = 30 – 1000 สำหรับการจำลองแบบ Standard k-$\varepsilon$ นอกจากนี้ควรพิจารณาว่าภาพที่เห็นเป็นผลการคำนวณนั้นสมเหตุสมผลรึไม่ตามเงื่อนไขที่กำหนดก่อนคำนวณ

งานวิจัยที่ใช้โปรแกรม scStream เช่น งานวิจัยเรื่องตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้งกังหันลมประกอบอาคารเพื่อสมรรถภาพด้านพลังงาน (ผาภูมิ และ ภัทรนันท์, 2019) ได้ศึกษาลักษณะการติดตั้งกังหันลมเพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมของความเร็วลมเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในแต่ละแบบจำลอง และประเมินประสิทธิภาพทางพลังงานไฟฟ้าที่สูงสุด และงานวิจัยเรื่องการเพิ่มการระบายอากาศในหอผู้ป่วยรวมด้วยวิธีผสานเพื่อควบคุมการติดเชื้อ (โอ๊ก, 2019) โดยจำลองการเคลื่อนที่ของอากาศ เพื่อหาแนวทางการเพิ่มการระบายอากาศภายในหอผู้ป่วยรวม

2. อาคารที่นำมาทดลองคือ แบบมาตรฐานสำนักงานคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐานแบบหอประชุม 101 ล. 27 (กลุ่มออกแบบและก่อสร้าง สำนักงานคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน กระทรวงศึกษาธิการ, 2528) ดัง Fig. 1 และ Fig. 2 เป็นอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก 2 ชั้นใต้ถุนโล่ง ขนาดกรอบอาคาร กว้าง 24.00 เมตร ยาว 47.00 เมตร ความสูง 12.75 เมตร หลังคามุงด้วยกระเบื้องลอนคู่ พื้นปูกระเบื้องเซรามิค ส่วนผนังประกอบด้วย ผนังก่ออิฐฉาบปูน ผนังช่องเกล็ดระบายอากาศ และผนังอิฐบล็อกช่องลม ด้านบนมีฝ้าเพดานยิปซั่มบอร์ด และมีช่องเปิดระบายอากาศทั้ง 2 ด้านเท่ากัน อัตราส่วนช่องเปิดร้อยละ 35 ของพื้นที่ผนัง ดัง Table 1 แสดงการตั้งค่าวัสดุอาคาร

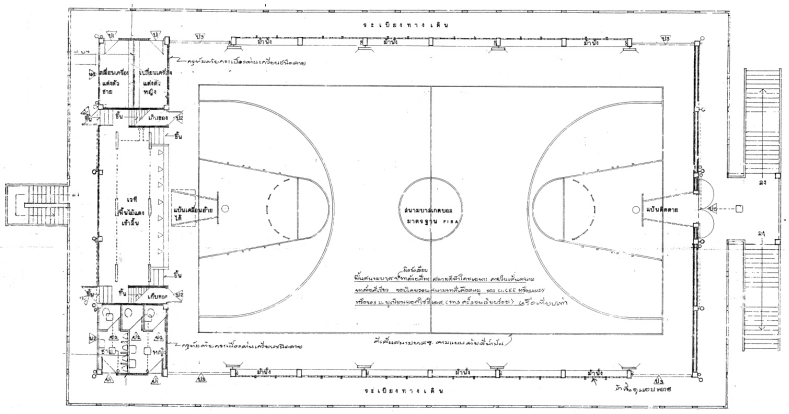


**Fig.1** Standard Second Floor Layout of Basic Meeting Hall Office, Education Committee, Room 101, Building 27

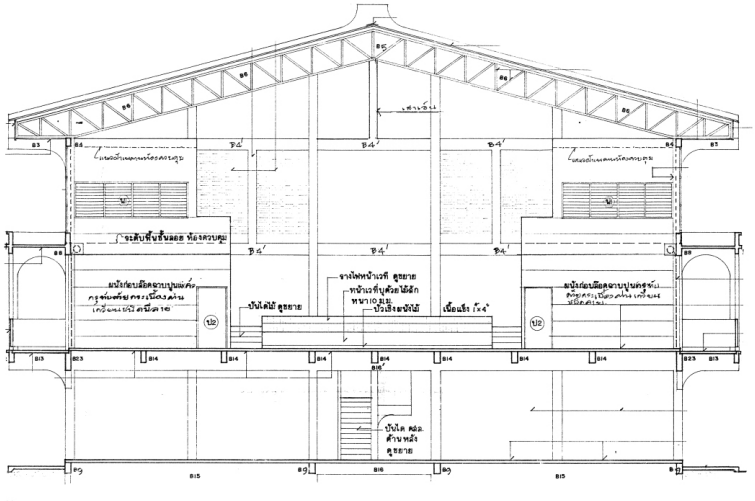


**Fig. 2** The standard architectural section of the basic meeting hall office of the Education Committee, Room 101, Building 2

**Table 1** Building material setting

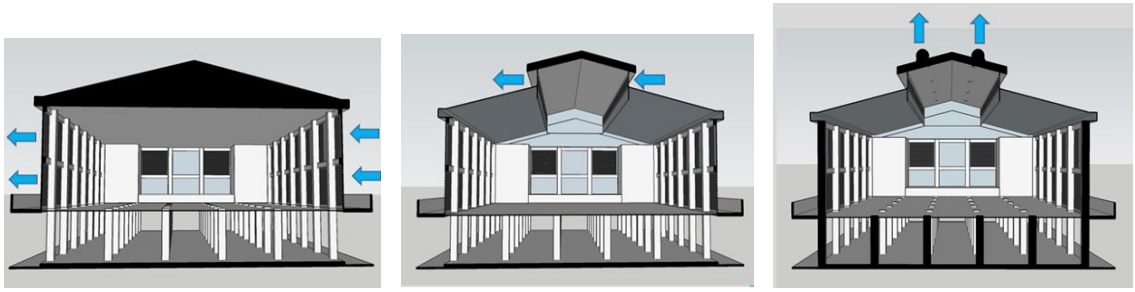
| Type | Material | Thickness (m) | Conductivity (W/m-k),(K) | Specific. Heat (J/kg-k) | Density (kg/m$^3$) |
|---|---|---|---|---|---|
| Wall | Brick_sand | 0.1 | 1650 | 920 | 0.93 |
| Ceiling | Gypsum plate | 0.09 | 0.14 | 1130 | 910 |
| Floor | Porcelain floor covering | 0.01 | 1.10 | 800 | 2400 |

*วิธีการ*

โมเดลอาคารกรณีศึกษาที่ 1 ทำการทดลองโดยการวางอาคารทั้ง 8 ทิศ เพื่อรับลมประจำถิ่นโดยใช้ข้อมูลอากาศของกรมอุตุนิยมวิทยาของจังหวัดชลบุรี (ศูนย์ภูมิอากาศ กองพัฒนาอุตุนิยมวิทยา, 2563) จำนวน 3 ทิศ คือทิศตะวันออกเฉียงเหนือ ความเร็วลมเฉลี่ย 2.40 เมตรต่อวินาที ทิศตะวันออกเฉียงใต้ ความเร็วลมเฉลี่ย 2.05 เมตรต่อวินาที และ ลมทางทิศตะวันตก ความเร็วลมเฉลี่ย 1.74 เมตรต่อวินาที ดัง Table 2 รวม 24 กรณีศึกษา

**Table 2** Local winds

| Month | Local winds | Wind speed (m/s) |
|---|---|---|
| October - February | North-east (NE) | 2.40 |
| March - May | South-east (SE) | 2.05 |
| June - September | West (W) | 1.74 |



(A) (B) (C)

**Fig. 3** (A) Case Study 1 (B) Case Study 2 (C) Case Study 3

จาก Fig. 3 การทำโมเดลอาคารกรณีศึกษาที่ 2 จำลองรูปแบบหลังคาสองชั้นที่มีช่องเปิดบนหลังคา และการทำโมเดลอาคารกรณีศึกษาที่ 3 โดยการติดตั้งลูกหมุนระบายอากาศบนหลังคา ทั้งสองกรณีศึกษานี้มีจุดสังเกตในระดับความสูง 5.00, 7.50, 10.00 และ 14.00 เมตร (จากระดับพื้นดิน) ตามลำดับ ดัง Fig. 4 เพื่อสังเกตกระแสลมที่เข้ามาภายในอาคารเพื่อเปรียบเทียบและนำไปพิจารณา โดยใช้โปรแกรม scSTREAM โปรแกรมจำลองพลศาสตร์การไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics ; CFD) ในการทำการทดลอง

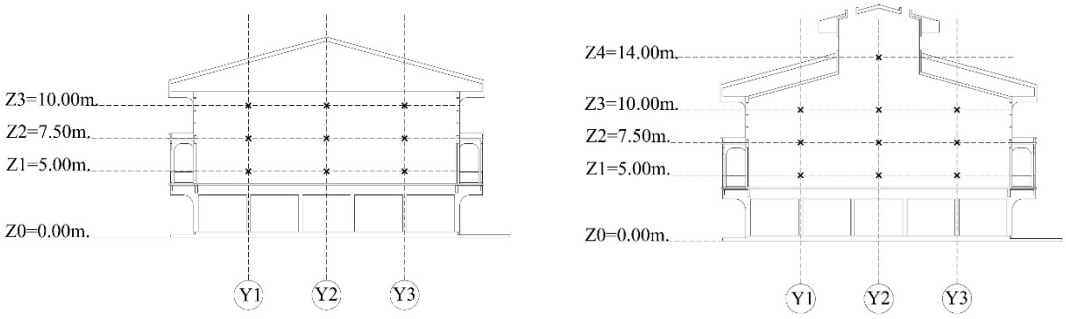



**Fig. 4** (A) Vertical Observations Inside Case Study 1 (B) Vertical Observations Inside Case Study 2,3

**ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง**

**Table 3** Experiment Results Case Study 1

| Building Direction | Wind Direction | Observation Point Elevation (m/s) | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 5.00 | 7.50 | 10.00 |
| | | wind speed (m/s) | | |
| North (N) | NE | 0.14 | 0.17 | 0.16 |
| | SE | 0.12 | 0.13 | 0.16 |
| | W | 0.06 | 0.10 | 0.19 |
| North - East (NE) | NE | 0.05 | 0.04 | 0.05 |
| | SE | 0.08 | 0.08 | 0.20 |
| | W | 0.04 | 0.05 | 0.09 |
| East (E) | NE | 0.14 | 0.12 | 0.19 |
| | SE | 0.12 | 0.12 | 0.19 |
| | W | 0.04 | 0.03 | 0.03 |
| South - East (SE) | NE | 0.08 | 0.11 | 0.21 |
| | SE | 0.04 | 0.04 | 0.04 |
| | W | 0.07 | 0.06 | 0.17 |
| South (S) | NE | 0.12 | 0.11 | 0.12 |
| | SE | 0.09 | 0.11 | 0.15 |
| | W | 0.09 | 0.08 | 0.18 |
| South - West (SW) | NE | 0.05 | 0.04 | 0.04 |
| | SE | 0.09 | 0.10 | 0.20 |
| | W | 0.08 | 0.09 | 0.15 |
| West (W) | NE | 0.13 | 0.17 | 0.17 |
| | SE | 0.13 | 0.14 | 0.17 |
| | W | 0.06 | 0.05 | 0.06 |
| North - West (NW) | NE | 0.10 | 0.12 | 0.21 |
| | SE | 0.04 | 0.04 | 0.04 |
| | W | 0.06 | 0.07 | 0.12 |

จากกรณีศึกษาที่ 1 ดัง Table 3 ผลการศึกษาพบว่ามีความเร็วลมในระดับความสูง 5.00 เมตรจากพื้นดิน (ระดับผู้ใช้อาคาร 1.50 เมตร จากระดับพื้นห้องประชุมชั้นสอง) มีค่าความเร็วลมสูงสุดจำนวน 4 ทิศได้แก่อาคารที่หันหน้าอาคารทางทิศเหนือ,ทิศตะวันออก,ทิศใต้ และทิศตะวันตกที่มีลมประจำถิ่นด้านทิศตะวันออกเฉียงเหนือทั้งหมด ทำให้พบว่าความเร็วลมประจำถิ่นเฉลี่ย 2.40 เมตรต่อวินาที ทำให้เกิดกระแสลมภายในอาคารได้ดีกว่าลมประจำถิ่นจากทิศทางอื่น

การหันทิศทางอาคารควรทำมุมเอียงกับทิศทางลมประจำถิ่น เพื่อการกระจายตัวของลมที่ดีกว่า เนื่องจากอาคารมีช่องเปิดทั้งสองด้านที่เท่ากัน ทำให้เกิดการระบายอากาศที่ดี (มาลินี, 2544)

จากกรณีศึกษาที่ 2 ดัง Table 4 และ 5 รูปแบบหลังคาสองชั้นที่มีช่องเปิดบนหลังคาสามารถทำให้ระบายอากาศได้ดีกว่าแบบกรณีศึกษาที่ 1 ความเร็วลมสูงสุดในอาคารที่หันหน้าทางทิศตะวันออก ปะทะกับลมประจำถิ่นด้านทิศตะวันออกเฉียงเหนือ ในระดับความสูงที่ 10.00 เมตร อยู่ที่ 0.19 ,0.23 เมตรต่อวินาทีตามลำดับ จะเห็นได้ว่ารูปแบบหลังคาสองชั้นที่มีช่องเปิดบนหลังคาสามารถพาลมภายในอาคารออกสู่ด้านบนของหลังคาเป็นผลให้มีการการกระจายตัวของลมภายในอาคารได้ดีกว่ากรณีศึกษาที่ 1 อยู่ที่ 0.04 เมตรต่อวินาที

**Table 4** Experiment Results Case Study 1,2,3 North (N)

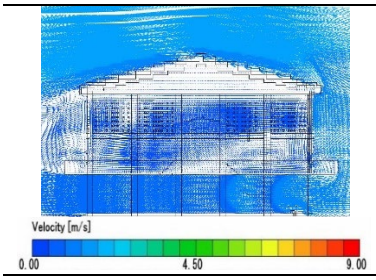
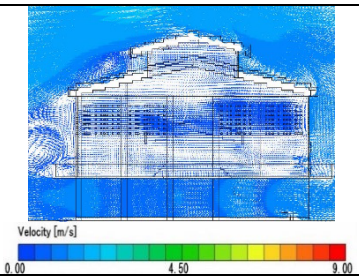
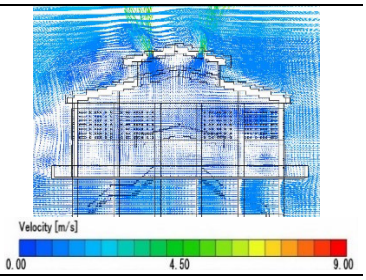
| Case Study 1 | Case Study 2 | Case Study 3 |
|---|---|---|
| Building Direction : North (N)<br>Wind Direction : North – East (NE) 2.40 m/s | | |
|  |  |  |
| 5.00 7.50 10.00 m. | 5.00 7.50 10.00 14.00 m. | 5.00 7.50 10.00 14.00 m. |
| 0.14 0.17 0.16 m/s | 0.08 0.15 0.20 0.11 m/s | 0.08 0.18 0.25 0.14 m/s |

**Table 5** Experiment Results Case Study 1,2,3 East (E),Sounth (S), West (W)

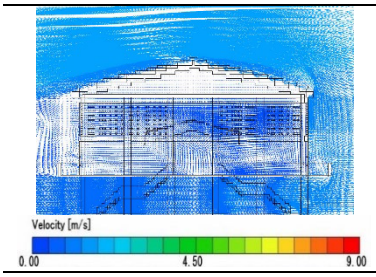
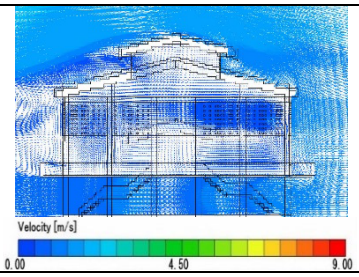
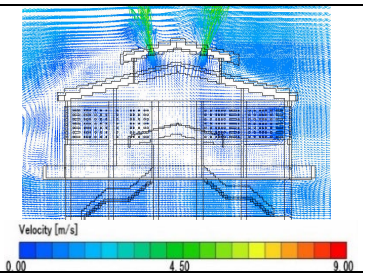
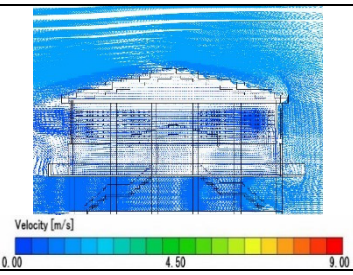
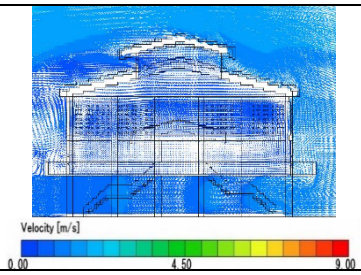
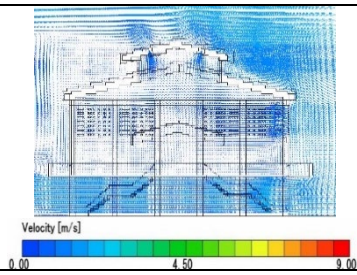
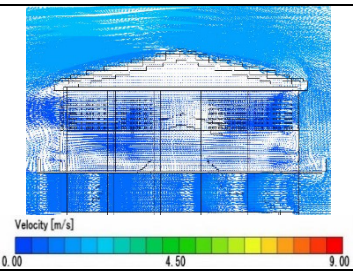
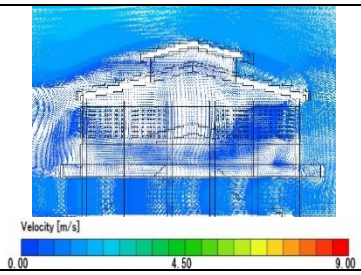
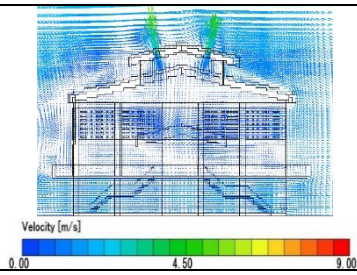
| Building Direction : East (E)<br>Wind Direction : North – East (NE) 2.40 m/s | | |
|---|---|---|
| Case Study 1 | Case Study 2 | Case Study 3 |
|  |  |  |
| 5.00 7.50 10.00 m. | 5.00 7.50 10.00 14.00 m. | 5.00 7.50 10.00 14.00 m. |
| 0.14 0.12 0.19 m/s | 0.13 0.13 0.23 0.07 m/s | 0.14 0.18 0.23 0.09 m/s |

**Table 5** (Continued) Experiment Results Case Study 1,2,3 East (E), Sounth (S), West (W)

| Case Study 1 | | | | Case Study 2 | | | | Case Study 3 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Building Direction : Sounth (S) Wind Direction : North – East (NE) 2.40 m/s | | | | | | | | | | | |
|  | | | |  | | | |  | | | |
| 5.00 | 7.50 | 10.00 | m. | 5.00 | 7.50 | 10.00 | 14.00 m. | 5.00 | 7.50 | 10.00 | 14.00 m. |
| 0.12 | 0.11 | 0.12 | m/s | 0.15 | 0.13 | 0.15 | 0.23 m/s | 0.18 | 0.17 | 0.19 | 0.21 m/s |
| Building Direction : West (W) Wind Direction : North – East (NE) 2.40 m/s | | | | | | | | | | | |
| Case Study 1 | | | | Case Study 2 | | | | Case Study 3 | | | |
|  | | | |  | | | |  | | | |
| 5.00 | 7.50 | 10.00 | m. | 5.00 | 7.50 | 10.00 | 14.00 m. | 5.00 | 7.50 | 10.00 | 14.00m. |
| 0.13 | 0.17 | 0.17 | m/s | 0.19 | 0.17 | 0.19 | 0.13 m/s | 0.20 | 0.20 | 0.21 | 0.25 m/s |

การทดลองกรณีศึกษาที่ 3 ดัง Table 4 และ 5 พบว่าการติดตั้งลูกหมุนระบายอากาศบนหลังคา (Ventilators) มีความเร็วลมที่ดีกว่ากรณีศึกษาที่ 1 และกรณีศึกษาที่ 2 ความเร็วลมสูงสุด ในอาคารที่หันหน้าทางทิศเหนือปะทะกับลมประจำถิ่นด้านทิศตะวันออกเฉียงเหนือ ในระดับความสูงที่ 10.00 เมตร อยู่ที่ 0.16 ,0.20, 0.25 เมตรต่อวินาทีตามลำดับ จะเห็นได้ว่าลูกหมุนระบายอากาศสามารถดึงลมภายในอาคารออกสู่ด้านบนของหลังคาเป็นผลให้ลดความร้อนสะสมบริเวณใต้หลังคาได้ และมีการกระจายตัวของลมภายในอาคารทำให้กระแสลมภายในอาคารไหลเวียนดีขึ้นกว่าแบบเดิมอยู่ที่ 0.09 เมตรต่อวินาที

## สรุป

ผลการศึกษาพบว่าลมประจำถิ่นด้านทิศตะวันออกเฉียงเหนือที่มีความเร็วลมตั้งต้นเฉลี่ย 2.40 เมตรต่อวินาที ทำให้เกิดกระแสลมภายในอาคารได้ดีกว่าลมจากทิศทางอื่น การหันทิศทางอาคารควรทำมุมเอียงกับทิศทางลมประจำถิ่นเพื่อการกระจายตัวของลมที่ดีกว่า รูปแบบหลังคาสองชั้นที่มีช่องเปิดบนหลังคาสามารถทำให้ระบายอากาศได้ดีกว่าแบบเดิมในระดับช่วงบนใกล้หลังคา ส่วนการติดตั้งลูกหมุนระบายอากาศบนหลังคา สามารถดึงลมภายในอาคารออกสู่ด้านบนของหลังคาเป็นผลให้ลดความร้อนภายในอาคารได้ดีกว่าการเพิ่มช่องเปิดหลังคาเพียงอย่างเดียว ผลจากการวิจัยนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงแก้ไขแบบหอประชุมมาตรฐานในปัจจุบัน และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับอาคาร

หอประชุมทั่วไปได้ ซึ่งทั้งนี้การระบายอากาศที่ดีต้องขึ้นอยู่กับทิศทางการวางอาคารสัมพันธ์กับความเร็วลมของแต่ละสภาพภูมิอากาศของพื้นที่นั้นๆ

**กิตติกรรมประกาศ**

ขอขอบพระคุณทุกคนที่เกี่ยวข้องที่ให้ความร่วมมือและให้กำลังใจเสมอมา จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

**เอกสารอ้างอิง**

โอ๊ก ศรนิล. 2562. Improving multiple-beds wards ventilation using hybrid technique to control inflections. Academic Journal of Architecture 68: 55–68.

กลุ่มออกแบบและก่อสร้าง สำนักงานคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน กระทรวงศึกษาธิการ. 2528. แบบหอประชุม 101 ล.27 พิเศษ.

ผาภูมิ พิมลวิชยากิจ, ภัทรนันท์ ทักขนนท์. 2562. ตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้งกังหันลมประกอบอาคารเพื่อสมรรถภาพด้านพลังงาน. Paper presented at the 10th Built Environment Research Associates Conference (BERAC2019) Bangkok, Thailand.

มาลินี ศรีสุวรรณ. 2544. การ ศึกษาความสัมพันธ์ของทิศทางกระแสลมกับการเจาะช่องเปิดที่ผนังอาคารสำหรับภูมิอากาศร้อนชื้นในประเทศไทย. NAJUA: Architecture, Design and Built Environment 17: 152–152.

ศูนย์ภูมิอากาศ กองพัฒนาอุตุนิยมวิทยา. 2563. สถานีอุตุนิยมวิทยาชลบุรี.

# การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการระบายอากาศแบบธรรมชาติและการระบายอากาศแบบทางกล เพื่อลดความร้อนภายในห้องเครื่องระบบปรับอากาศแบบรวมศูนย์

# Efficiency comparison of Natural ventilation and Mechanical ventilation to reduce the heat of centralized air conditioning system room

**อติศร ผลพฤกษา***, **ภัทรนันท์ ทักขนนท์**

Atisorn Phonpuksa*, Pattaranan Takkanon

ภาควิชานวัตกรรมอาคาร คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Building Innovation, Faculty of Architecture, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: atisorn.ph@ku.th

**บทคัดย่อ**

การวิจัยครั้งนี้มุ่งเปรียบเทียบประสิทธิภาพการลดความร้อนโดยการระบายอากาศด้วยวิธีธรรมชาติและการระบายอากาศด้วยวิธีทางกล โดยทำการศึกษาห้องเครื่องระบบปรับอากาศแบบรวมศูนย์ขนาด 2,000 ตันความเย็นทั้งหมด 9 กรณีศึกษา ใช้โปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล scSTREAM ในการจำลองการไหลของอากาศของห้องที่ใช้การระบายอากาศด้วยวิธีธรรมชาติ ผ่านอัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ผนังอาคาร (WWR) ร้อยละ 10 และ 30 และห้องที่ใช้การระบายอากาศด้วยวิธีทางกลที่อัตราการเปลี่ยนถ่ายอากาศต่อชั่วโมง 25 ACH ผลการศึกษาสรุปได้ว่าการระบายอากาศด้วยวิธีธรรมชาติมีอุณหภูมิห้องเฉลี่ยสูงกว่าห้องที่ใช้การระบายอากาศด้วยวิธีทางกล 0.25 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ผนังอาคารร้อยละ 10 และ 0.13 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ผนังอาคารร้อยละ 30 ตามลำดับ

**คำสำคัญ**: การระบายอากาศแบบวิธีทางกล, การระบายอากาศแบบวิธีธรรมชาติ, ห้องเครื่องกล

**Abstract**

The research is aimed to compare efficiency of heat reduction by natural ventilation and mechanical ventilation. The research studied centralized air conditioning system room 2,000 TR capacity. There were 9 case studies in total. The study adopted scSTREAM, a computational fluid dynamics (CFD) program, to simulate air flow of the rooms with 10% and 30% window-to-wall ratio (WWR) for natural ventilation, and the rooms with 25 ACH by mechanical ventilation. The findings of the study concluded that naturally ventilated rooms showed average temperatures higher than those of the mechanically ventilated ones by 0.25°C for the room with 10% WWR, and by 0.13°C for the room with 30% WWR, respectively.

**Keywords**: Mechanical room, Mechanical ventilation, Natural ventilation

**คำนำ**

การควบคุมอุณหภูมิให้เกิดสภาวะน่าสบายต้องมีการใช้ระบบปรับอากาศภายในอาคาร การปรับสภาวะอากาศให้เป็นไปตามที่ต้องการตามการใช้งานของพื้นที่บริเวณนั้นๆ จะต้องมีการควบคุม อุณหภูมิ ความชื้น การกระจายลม เสียง และความสะอาดของอากาศ (สำนักพัฒนาทรัพยากรบุคคลด้านพลังงาน, 2559) โดยสามารถจำแนกระบบปรับอากาศเป็น 2 ชนิดโดยรวมได้แก่ ระบบปรับอากาศที่ระบายความร้อนด้วยอากาศ และระบายความร้อนด้วยน้ำ อาคารประเภทสำนักงานส่วนใหญ่จะใช้ระบบที่ระบายความร้อนด้วยน้ำชนิดรวมศูนย์เพื่อควบคุมสภาวะน่าสบายภายในอาคาร เนื่องจากสัดส่วนการใช้พลังงานไฟฟ้าในการทำความเย็นมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าระบบปรับอากาศที่ระบายความร้อนด้วยอากาศ อุณหภูมิห้องเครื่องระบบปรับอากาศแบบรวมศูนย์มีแหล่งกำเนิดความร้อนมาจากเครื่องทำน้ำเย็นแบบรวมศูนย์และมอเตอร์ปั๊มน้ำที่ใช้งานภายในระบบปรับอากาศเป็นหลัก การควบคุมอุณหภูมิห้องให้ใกล้เคียงกับสภาวะอากาศภายนอกจึงเป็นสิ่งสำคัญเพื่อยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์เครื่องจักร การเคลื่อนย้ายอากาศด้วยปริมาณที่กำหนดให้ไหลไปในทิศทางและความเร็วที่ต้องการ สามารถกำจัดมลพิษ ความร้อน ความชื้น กลิ่นรบกวน ควันและอื่นๆ ให้ออกไปจากที่ปฏิบัติงานได้ (เอกชัย ดีศิริ และคณะ, 2561) โดยทางเลือกในการระบายความร้อนออกจากห้องเครื่องระบบปรับอากาศแบบรวมศูนย์ที่ไม่นิยมนั้นคือการใช้วิธีการระบายอากาศแบบธรรมชาติ เนื่องจากการวางตำแหน่งห้องเครื่องในขั้นตอนการออกแบบอาคารในบางกรณีไม่สามารถใช้วิธีการระบายอากาศแบบธรรมชาติได้ โดยตัวแปรสำคัญคือลมธรรมชาติที่มีทิศทางและความเร็วลมที่ไม่แน่นอน รวมไปถึงการวางตำแหน่งช่องทางลมเข้าและช่องทางลมออกที่อาจไม่สัมพันธ์กัน ทำให้การลดความร้อนภายในห้องเครื่องระบบปรับอากาศอาจทำได้ไม่ดีเมื่อเทียบกับการระบายอากาศโดยใช้พัดลมระบายอากาศในการระบายความร้อน

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการระบายอากาศด้วยวิธีธรรมชาติและการระบายอากาศด้วยวิธีทางกล เพื่อลดความร้อนที่เกิดจากเครื่องจักรภายในห้องเครื่องระบบปรับอากาศแบบรวมศูนย์ แล้วทำการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องเครื่องระบบปรับอากาศ เพื่อหาแนวทางที่เหมาะสมในการออกแบบห้องเครื่องระบบปรับอากาศแบบรวมศูนย์ให้อุณหภูมิภายในห้องเครื่องใกล้เคียงกับอุณหภูมิภายนอกอาคารมากที่สุด

**อุปกรณ์และวิธีการ**

*อุปกรณ์*

1. โปรแกรม Cradle scSTREAM 2021 สำหรับคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics; CFD) ในการศึกษาปรากฏการณ์ทางธรรมชาติต้องมีการเก็บข้อมูลเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น โดยข้อมูลที่เก็บจากการใช้เครื่องมือวัดอาจมีค่าความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นเมื่อนำมาวิเคราะห์ การเก็บข้อมูลบางอย่างมีข้อจำกัดในด้านการตรวจวัด การเก็บข้อมูลหลายค่าเมื่อนำข้อมูลมาใช้อาจเกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นได้ โปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics; CFD) จึงเป็นทางเลือกที่ตอบสนองต่อการใช้เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลที่เก็บมาจากเครื่องมือวัด เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการวิเคราะห์เมื่อมีการใช้ข้อมูลหลายค่าร่วมกัน โดยบริษัท Nikken Sekkei, Ltd. บริษัทสถาปนิกชั้นนำของญี่ปุ่น ได้มีการใช้โปรแกรม scSTREAM ในการตรวจสอบสมรรถนะ Bio Skin ของอาคาร โครงการ Sony City Osaki (Nikken Sekkei Ltd, 2019) การออกแบบการระบายอากาศด้วยวิธีธรรมชาติ เพื่อให้เห็นทิศทางการไหลของอากาศผ่านอาคารมีความจำเป็นต้องใช้โปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหลมาช่วยในการวิเคราะห์ โดยโครงการ Raintree Kindergarten เป็นโครงการออกแบบโรงเรียนอนุบาลในประเทศไทย บริษัท GreenDwell

(GreenDwell, 2020) มีการใช้โปรแกรม scSTREAM เพื่อวิเคราะห์การจัดวางผังบริเวณให้เกิดคอร์ท และสร้างช่องลม หรือ Wind Channel ให้เกิดขึ้นในโครงการ

2. โปรแกรม SketchUP 2020 สำหรับจำลองห้องเครื่องระบบปรับอากาศแบบรวมศูนย์ขนาด 2,000 ตันความเย็น ในการออกแบบห้องเครื่องระบบปรับอากาศเพื่อนำไปจำลองพลศาสตร์ของไหลในโปรแกรม scSTREAM โมเดลที่ใช้ในการจำลองพลศาสตร์ของไหลจำเป็นต้องใช้ไฟล์นามสกุล.3ds โปรแกรม SketchUP จึงเป็นโปรแกรมทางเลือกที่สามารถขึ้นรูปโมเดลอย่างง่ายไม่มีความซับซ้อน ซึ่งเพียงพอต่อการนำไปวิเคราะห์ผลกระทบจากการไหลของอากาศผ่านห้องเครื่องระบบปรับอากาศแบบรวมศูนย์ขนาด 2,000 ตันความเย็นในงานวิจัยนี้

*การออกแบบห้องเครื่องระบบปรับอากาศแบบรวมศูนย์ขนาด 2,000 ตันความเย็น*

ห้องเครื่องระบบปรับอากาศขนาด 2,000 ตันความเย็น (Fig. 1) มีขนาดห้องกว้าง 12 เมตร x ยาว 34 เมตร x สูง 4.6 เมตร ช่องเปิดประตูมีขนาดกว้าง 4 เมตร x สูง 3 เมตร พื้นที่ห้อง 408 ตารางเมตร ตาม Fig. 1 ภายในห้องใช้โมเดลแบบจำลอง เครื่องทำน้ำเย็น (Chiller; CH) ขนาดกว้าง 2.5 เมตร x ยาว 5 เมตร x สูง 3 เมตร (Trane product catalog CenTraVac™, 2016) ขนาดการทำความเย็น 500 ตันความเย็น จำนวน 4 เครื่อง ปั๊มน้ำเย็น (Chilled Water Pump; CHP) และ ปั๊มน้ำร้อน (Condenser Water Pump; CDP) ขนาดกว้าง 1 เมตร x ยาว 1.9 เมตร x สูง 1 เมตร (GRUNDFOS DATA BOOKLET, 2023) จำนวนทั้งหมด 8 เครื่อง แบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 3 กรณีศึกษาหลัก คือ

1. ช่องเปิดผนัง 10 เปอร์เซ็นต์ พื้นที่ช่องเปิด 39 ตารางเมตร
2. ช่องเปิดผนัง 30 เปอร์เซ็นต์ พื้นที่ช่องเปิด 112 ตารางเมตร
3. พัดลมระบายอากาศ อัตราการเปลี่ยนถ่ายอากาศต่อชั่วโมง 25 ACH

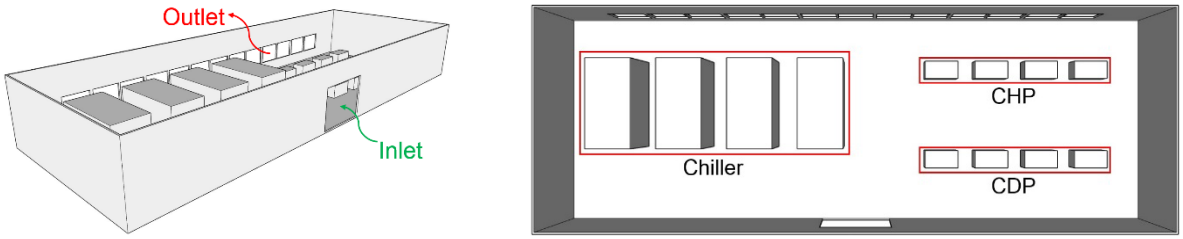



**Fig. 1** Centralized air conditioning system room sizes 2,000 ton of refrigeration

*การกำหนดตำแหน่งเก็บข้อมูลค่าอุณหภูมิและค่าความเร็วลม*

ข้อมูลค่าอุณหภูมิและความเร็วลมจะกำหนดตำแหน่งเก็บข้อมูลเป็นจุด (Point) ระยะห่างระหว่างจุด 2 เมตร ครอบคลุมพื้นที่ว่างทั่วบริเวณห้องเครื่องระบบปรับอากาศขนาด 2,000 ตันความเย็น (Fig. 2) แบ่งเป็น 3 ระดับความสูง คือ 1.5, 3.0, 4.5 เมตร โดยจะใช้การระบุตำแหน่งจุดตามแกน X และแกน Y ตาม Fig. 2 แล้วทำการหาค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิและความเร็วลม ทั้ง 9 กรณีศึกษา จากนั้นทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิและความเร็วลม ภายในห้องเครื่องระบบปรับอากาศแบบการระบายอากาศด้วยวิธีธรรมชาติขนาดช่องเปิด 10 และ 30 เปอร์เซ็นต์ และแบบการระบายอากาศด้วยวิธีทางกล ที่อัตราการเปลี่ยนถ่ายอากาศต่อชั่วโมง 25 ACH

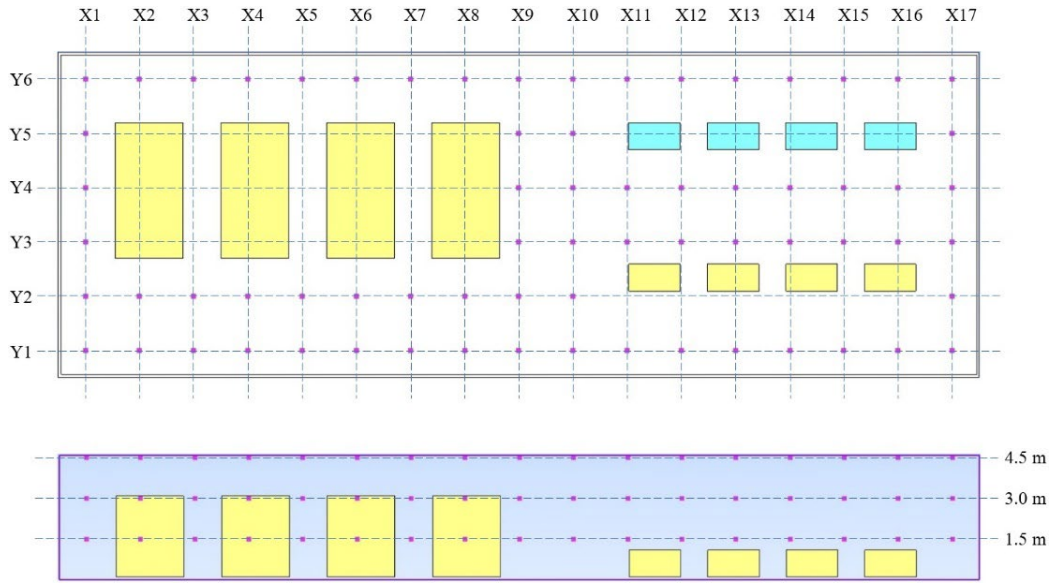



**Fig. 2** Temperature and wind speed data storage location

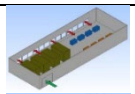
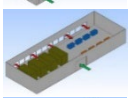
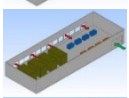
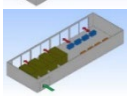
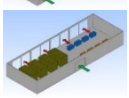
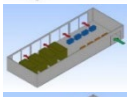
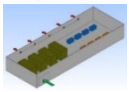
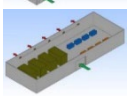
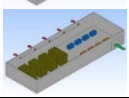
*การจำลองการไหลของอากาศในโปรแกรม scSTREAM*

โปรแกรม scSTREAM เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์สภาวะการเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อน ซึ่งสามารถวิเคราะห์อุณหภูมิ ความชื้น การแผ่รังสี ความเร็วและทิศทางลม (Software Cradle, 2019) โปรแกรม scSTREAM แบ่งการทำงานออกเป็น 3 ขั้นตอน 1) Preprocessor เป็นขั้นตอนการใส่ข้อมูลในแบบจำลอง ระบุค่าเงื่อนไขต่างๆให้เหมาะสมกับแบบจำลอง 2) Solver เป็นขั้นตอนการคำนวณผลลัพธ์โดยใช้วิธีไฟไนต์วอลลุ่ม (Finite Volume Method) 3) Postprocessor เป็นขั้นตอนการแสดงผลการคำนวณจากโปรแกรมและจำลองแบบ โดยแสดงผลในรูปแบบต่างๆ อาทิ Streamline, Contour, Vector และเลือกแสดงค่าความเร็วลม ความดัน อุณหภูมิ และความชื้น ตามจุดพิกัดที่กำหนด เพื่อให้ได้ค่าเป็นตัวเลขที่สามารถนำไปใช้ได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

*การกำหนดตัวแปรต้นกรณีศึกษาในโปรแกรม scSTREAM*

ห้องเครื่องระบบปรับอากาศแบบรวมศูนย์ทั้ง 9 กรณีศึกษาดัง Table 1 จะกำหนดค่าอุณหภูมิที่ใช้ในโปรแกรม scSTREAM 2021 ซึ่งมาจากการตรวจวัดโดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน (Thermal imaging camera) ตรวจวัดที่เปอร์เซ็นต์การทำงานของเครื่องจักรที่อยู่ในช่วง 60–80% ของประสิทธิภาพการทำงาน ซึ่งเป็นการทำงานในช่วงที่ระบบปรับอากาศสามารถคงสภาวะความน่าสบายภายในอาคารได้ค่อนข้างคงที่ในระหว่างวัน โดยปั๊มน้ำเย็น (Chilled water pump) และปั๊มน้ำร้อน (Condenser water pump) ที่ทำการตรวจวัดติดตั้งระบบปรับความเร็วรอบมอเตอร์ (Variable speed drive) ซึ่งสามารถปรับเปอร์เซ็นต์การทำงานให้สัมพันธ์กันกับเครื่องทำน้ำเย็นในระหว่างการทำงานได้ การตรวจวัดอุณหภูมิที่ปล่อยออกมาจากเครื่องจักรจึงอยู่ในช่วงเปอร์เซ็นต์ดังกล่าว โดยค่าอุณหภูมิเครื่องทำน้ำเย็น (Chiller) 40 องศาเซลเซียส, ปั๊มน้ำเย็น (Chilled Water Pump) 40 องศาเซลเซียส, ปั๊มน้ำร้อน (Condenser Water Pump) 44 องศาเซลเซียส และกำหนดค่าอุณหภูมิอากาศภายนอกที่ใช้ในโปรแกรมเท่ากับ 35 องศาเซลเซียส โดยช่องทางลมเข้าจะแบ่งเป็น 3 แบบ ครอบคลุมทั้งการระบายอากาศด้วยวิธีธรรมชาติ ที่ความเร็วลมธรรมชาติ 0.5 เมตรต่อวินาทีและวิธีทางกล ที่อัตราการเปลี่ยนถ่ายอากาศต่อชั่วโมง 25 ACH

**Table 1** Case study Centralized air conditioning system room sizes 2,000 ton of refrigeration

| Case study | Detail of case study | Model |
|---|---|---|
| Case 1 | Wall opening 10 percent, air inlet channel type 1 |  |
| Case 2 | Wall opening 10 percent, air inlet channel type 2 |  |
| Case 3 | Wall opening 10 percent, air inlet channel type 3 |  |
| Case 4 | Wall opening 30 percent, air inlet channel type 1 |  |
| Case 5 | Wall opening 30 percent, air inlet channel type 2 |  |
| Case 6 | Wall opening 30 percent, air inlet channel type 3 |  |
| Case 7 | Ventilation fan, air inlet channel type 1 |  |
| Case 8 | Ventilation fan, air inlet channel type 2 |  |
| Case 9 | Ventilation fan, air inlet channel type 3 |  |

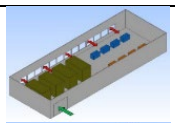
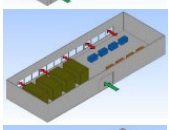
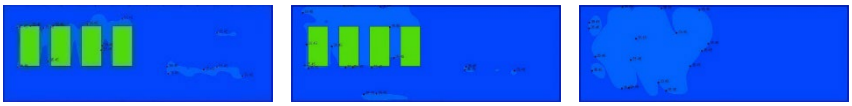
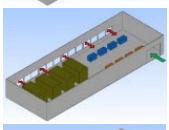
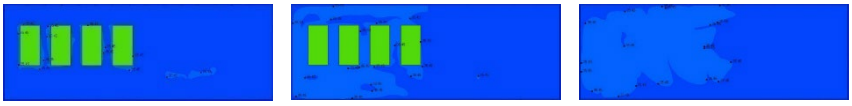
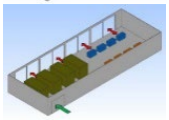
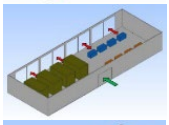
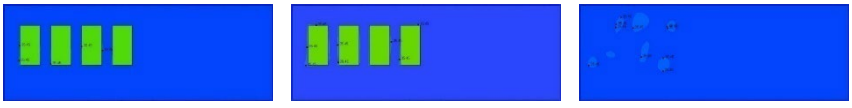
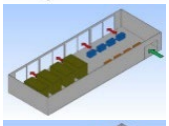
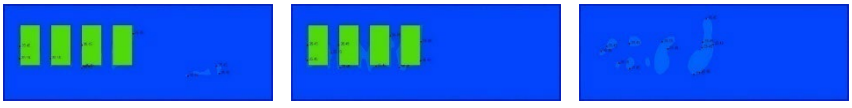
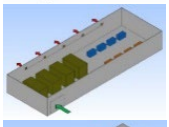
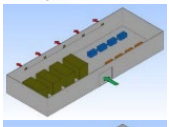
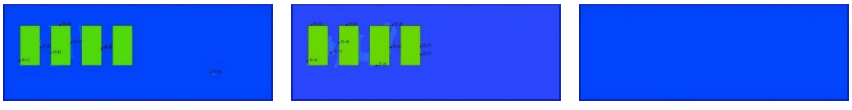
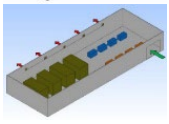
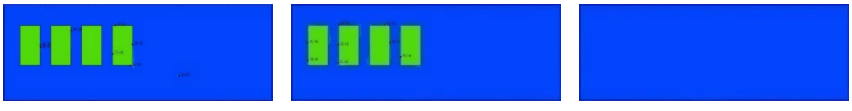
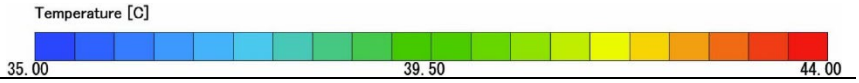
*การตั้งค่าวัสดุในโปรแกรม scSTREAM*

การกำหนดค่าวัสดุห้องเครื่องระบบปรับอากาศแบบรวมศูนย์ขนาด 2,000 ตันความเย็น จะใช้ค่าวัสดุที่เป็นค่าตั้งต้นภายในโปรแกรม scSTREAM ดัง Table 2 โดยวัสดุผนังเป็นผนังก่ออิฐฉาบปูน วัสดุพื้นเป็นพื้นคอนกรีต เนื่องจากไม่คิดค่าการแผ่รังสีความร้อนจากเพดานจึงตั้งค่าเพดานเป็น Panel เมื่อทำการจำลองการไหลของอากาศทั้ง 9 กรณีศึกษา จะได้ค่าความร้อนโดยรอบบริเวณเครื่องจักร ที่ระดับความสูง 1.5, 3.0, 4.5 เมตร ดัง Table 3

**Table 2** Material of Centralized air conditioning system room

| Type | Material | Thickness (m) | Density ($kg/m^3$) | Specific heat (J/kg-k) | Thermal conductivity (W/m-k) |
|---|---|---|---|---|---|
| Wall | Brick_sand | 0.1 | 1650 | 920 | 0.93 |
| Floor | Concrete | 0.1 | 2400 | 900 | 1.2 |

**Table 3** Compare the temperature inside the centralized air conditioning system room

| Case study | Model | Height | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 1.5 m | 3.0 m | 4.5 m |
| Case 1 |  |  | | |
| Case 2 |  |  | | |
| Case 3 |  |  | | |
| Case 4 |  |  | | |
| Case 5 |  |  | | |
| Case 6 |  |  | | |
| Case 7 |  |  | | |
| Case 8 |  |  | | |
| Case 9 |  |  | | |
| | |   | | |

**ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง**

เมื่อเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิเฉลี่ยและค่าความเร็วลมเฉลี่ยทั้ง 9 กรณีศึกษา ดังแสดงใน Fig. 3 การระบายอากาศแบบธรรมชาติ (Natural ventilation) เมื่อเปรียบเทียบช่องทางลมเข้าแบบเดียวกันอัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ผนังอาคารร้อยละ 10 มีอุณหภูมิห้องเฉลี่ยสูงกว่าร้อยละ 30 ทุกกรณีศึกษา โดยที่ช่องทางลมเข้าแบบที่ 1 สูงกว่า 0.11 องศาเซลเซียส ที่ช่องทางลมเข้าแบบที่ 2 สูงกว่า 0.14 องศาเซลเซียส และที่ช่องทางลมเข้าแบบที่ 3 สูงกว่า 0.11 องศาเซลเซียส เมื่อวิเคราะห์ช่องทางลมเข้าทั้ง 3 แบบ พบว่าที่ความเร็วลมธรรมชาติ 0.5 เมตรต่อวินาที การเพิ่มพื้นที่ช่องเปิดผนังอาคาร (ช่องทางลมออก) จากร้อยละ 10 เป็นร้อยละ 30 จะช่วยให้การไหลของอากาศผ่านห้องเครื่องระบบปรับอากาศเกิดการปะทะกับช่องทางลมออกน้อยกว่าการเปิดช่องเปิดผนังอาคารร้อยละ 10 ซึ่งเป็นสาเหตุการสะสมความร้อนอันเนื่องมาจากการหมุนวนของอากาศภายในห้องเครื่องระบบปรับอากาศ การระบายอากาศโดยวิธีทางกล (Mechanical ventilation) เมื่อเปรียบเทียบช่องทางลมเข้าแบบเดียวกันพบว่ามีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องเครื่องระบบปรับอากาศใกล้เคียงกันกับ

อุณหภูมิภายนอกทั้ง 3 กรณีศึกษา ตำแหน่งช่องทางลมเข้าจึงไม่มีนัยสำคัญในการลดอุณหภูมิภายในห้องเครื่องระบบปรับอากาศ เมื่อใช้พัดลมระบายอากาศในการระบายความร้อน

อัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ผนังอาคารมีผลต่อการลดอุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องเครื่องระบบปรับอากาศแบบรวมศูนย์ โดยอัตราส่วนช่องเปิดผนังอาคารร้อยละ 10 อุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องเครื่องระบบปรับอากาศจะสูงกว่าอัตราส่วนช่องเปิดผนังอาคารร้อยละ 30 เมื่อใช้วิธีการระบายอากาศแบบธรรมชาติ แต่เมื่อใช้การระบายอากาศโดยวิธีทางกลจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องเครื่องระบบปรับอากาศมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิภายนอก เมื่อพิจารณาการวางตำแหน่งช่องทางลมเข้าพบว่าการวางตำแหน่งช่องทางลมเข้าแบบที่ 1 จะช่วยลดอุณหภูมิเฉลี่ยห้องเครื่องได้มากกว่าแบบที่ 2 และ แบบที่ 3 ซึ่งเป็นผลมาจากความร้อนที่เกิดขึ้นส่วนมากอยู่บริเวณเครื่องทำน้ำเย็น การวางตำแหน่งช่องทางลมเข้าแบบที่ 1 จะทำให้การไหลของลมธรรมชาติพาความร้อนส่วนมากไปยังช่องทางลมออกได้มากกว่าการว่างตำแหน่งช่องลมเข้าแบบอื่น แต่การวางตำแหน่งช่องทางลมเข้าไม่มีผลต่อการใช้พัดลมระบายอากาศ เนื่องจากพัดลมระบายอากาศสามารถดึงความร้อนที่เกิดขึ้นภายในห้องเครื่องระบบปรับอากาศออกสู่ภายนอกได้ครอบคลุมทั้งบริเวณห้องเครื่อง

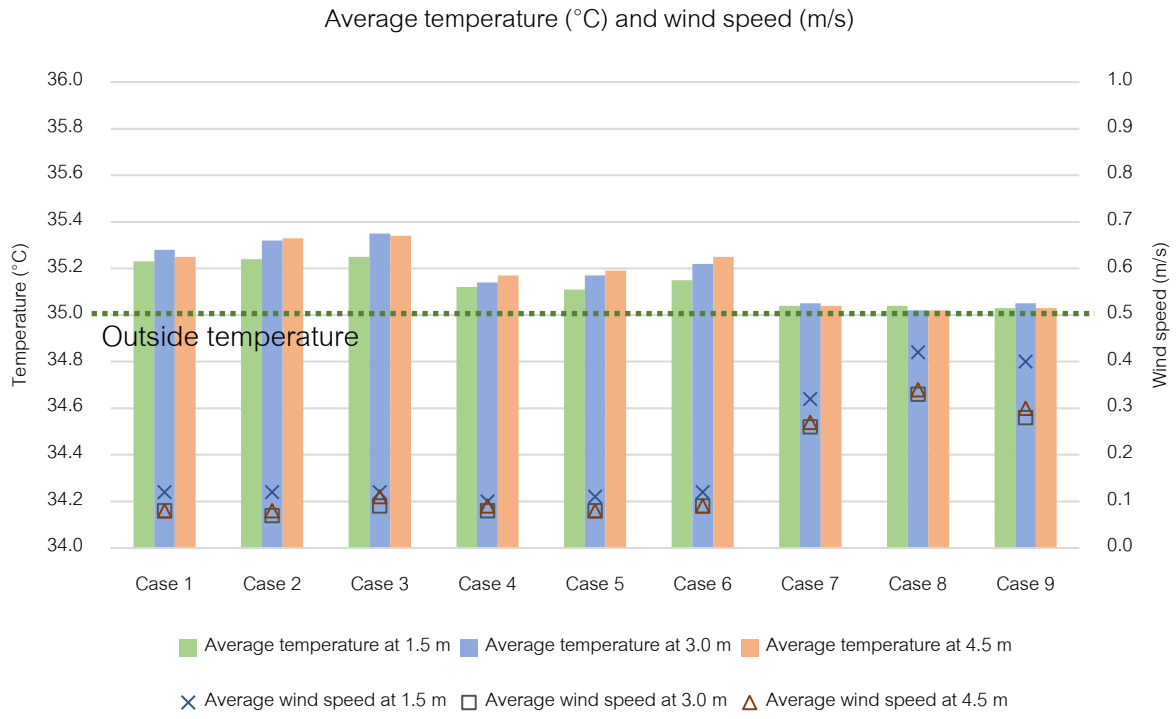



Fig. 3 Average temperature and wind speed results

## สรุป

การจำลองพลศาสตร์การไหลของอากาศผ่านโปรแกรม Cradle scSTREAM เพื่อศึกษาแนวทางการลดอุณหภูมิภายในห้องเครื่องระบบปรับอากาศแบบรวมศูนย์ พบว่าการระบายอากาศโดยวิธีทางกล มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการลดอุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องเครื่องระบบปรับอากาศให้ใกล้เคียงกับอุณหภูมิอากาศภายนอก เมื่อเปรียบเทียบการลดอุณหภูมิภายในห้องเครื่องระบบปรับอากาศแบบรวมศูนย์โดยใช้วิธีการระบายอากาศแบบธรรมชาติและการระบายอากาศโดยวิธีทางกล พบว่าค่าอุณหภูมิเฉลี่ยโดยรวมของห้องเครื่องมีค่าแตกต่างกันไม่เกิน 0.4 องศาเซลเซียส ดังนั้นการจัดวางห้องเครื่องระบบปรับอากาศโดยอาศัยการลดความร้อนภายในห้องเครื่องจากลมธรรมชาติจึงเป็นอีกทางเลือกในการระบายอากาศได้

**เอกสารอ้างอิง**

สำนักพัฒนาทรัพยากรบุคคลด้านพลังงาน. 2559. คู่มือการปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานระบบปรับอากาศ.

เอกชัย ดีศิริ, ธนภัทร พรหมวัฒภักดี, ปรากฤต เหลี่ยงประดิษฐ์. 2018. การพัฒนาระบบควบคุมการระบายอากาศอัตโนมัติสำหรับห้องปรับอากาศเพื่อการประหยัดพลังงานโดยใช้การตรวจจับออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.

Nikken Sekkei Ltd. 2019. Corporate BIM Strategies of an Institutional Architect Office: Assisting Architectural Designs with a Variety of Simulations Using a Thermo-Fluid Software "scSTREAM". https://www.cradle-cfd.com/media/scstream/scstream_case/a53, 11 June 2020.

GreenDwell. 2020. Case Study: Raintree Kindergarten - GreenDwell Thailand. https://www.cradle.co.th/index.php/component/content/article/11-application/139-casestudy-greendwell?Itemid=186, 11 June 2020.

Grundfos data booklet. 2023. LS horizontal split-case pumps 50 Hz.

Software Cradle. 2019. Thermo-fluid analysis software product guide.

Trane product catalog CenTraVac™. 2016. Water-Cooled Liquid Chillers 120–4000+ Tons (450–14000+ kW).

# การปรับปรุงภูมิทัศน์พื้นที่หลาดต้นน้ำลำขนุน

# A landscape renovation of Ton Nam Lam Khanun market

**วรวุฒิ มัธยันต์, กมลพร สมคิด*, วิสุทธิ์ นุชนาบี**

Worawut Matthayan, Kamonporn Somkid*, Wisut Nuchnabe

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตตรัง ตรัง 92000

Faculty of Architecture, Prince of Songkla University, Trang Campus, Trang 92000, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: kamonporn.so@psu.ac.th

**บทคัดย่อ**

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจัดทำแนวทางในการการปรับปรุงหลาดต้นน้ำลำขนุน อำเภอย่านตาขาว จังหวัดตรัง ให้มีสอดคล้องกับกิจกรรม และพฤติกรรมของผู้ใช้พื้นที่ เพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติและการท่องเที่ยวที่ยั่งยืน การดำเนินการวิจัยเริ่มจากการเก็บข้อมูลทางกายภาพเพื่อสร้างผังบริเวณของพื้นที่หลาดต้นน้ำลำขนุนเดิม จากนั้นจึงมีการสังเกตพฤติกรรมและสำรวจความคิดเห็นของผู้ใช้พื้นที่ผ่านการสังเกตการณ์อย่างมีส่วนร่วมและการสัมภาษณ์อย่างไม่เป็นทางการ ผ่านกลุ่มประชากร 4 กลุ่ม คือ ชาวชุมชนลำขนุน, ผู้ประกอบการร้านค้า, นักท่องเที่ยว และตัวแทนจากภาครัฐ เพื่อสรุปกิจกรรมและพฤติกรรมของผู้ใช้งานพื้นที่ ในการสร้างข้อเสนอแนะแนวคิดในการปรับปรุงภูมิทัศน์หลาดต้นน้ำลำขนุนผ่านการออกแบบผังบริเวณใหม่ โดยผลงานขั้นสุดท้ายจะมีนำเสนอต่อผู้ใช้งานพื้นที่ทั้ง 4 กลุ่ม เพื่อเลือกแนวทางการปรับปรุงภูมิทัศน์หลาดต้นน้ำลำขนุนที่เหมาะสมที่สุด อันได้แก่ แนวคิดการปรับปรุงพื้นที่หลาดต้นน้ำลำขนุนที่เน้นสร้างอัตลักษณ์ผ่านสถาปัตยกรรมพื้นถิ่น และแนวคิดของการปรับปรุงผังบริเวณ ปรับตำแหน่ง ที่ตั้งของร้านค้า ลานกิจกรรม ห้องน้ำสาธารณะ เพื่อไม่ให้บดบังทัศนียภาพของคลองลำขนุน

**คำสำคัญ**: การปรับปรุงภูมิทัศน์, การอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติ, หลาดต้นน้ำลำขนุน, อำเภอย่านตาขาว

**Abstract**

This research aims to develop guidelines for the improvement of the neglected area around Lam Khanun Creek in Yan Takao District, Trang Province, to align with the activities and behaviors of the local users. The objective is to promote the conservation of natural resources and sustainable tourism. The research begins with collecting physical data to create a map of the original neglected area around Lam Khanun Creek. Subsequently, behavioral observations and informal interviews were conducted with the involvement of four population groups: the local community, business owners, tourists, and government representatives. This was done to assess the activities and behaviors of the area users. The findings were used to propose conceptual improvements to the neglected landscape around Lam Khanun Creek through the design of a new area map. The final output will be presented to the users from all four groups for selecting the most suitable approach for enhancing the neglected area. This includes the idea of enhancing the neglected area by focusing on creating a local architectural identity and modifying the layout, positioning of shops, activity areas, and public restrooms, all aimed at preserving the scenic beauty of Lam Kanoon Creek.

**Keywords**: Landscape improvement, Landscaping improvements, Natural resource conservation, Ton Nam Lam Khanun Market, Yan Ta Khao District

**คำนำ**

หลาดต้นน้ำลำขนุน เป็นตลาดน้ำที่ตั้งอยู่บริเวณคลองลำขนุน ตำบลนาชุมเห็ด อำเภอย่านตาขาว จังหวัดตรัง เป็นตลาดที่จำหน่ายผลิตผล สินค้าจากชุมชนลำขนุน และเป็นสถานที่พักผ่อนหย่อนใจให้กับผู้คนในชุมชนลำขนุนและพื้นที่ใกล้เคียง ปัจจุบันยังคงพบเห็นเด็ก ๆ กระโดดเล่นน้ำคลองลำขนุน หรือมีกิจกรรมแสดงศิลปะพื้นบ้าน เช่น การรำมโนราห์ ที่มักจะจัดในพื้นที่นี้ในช่วงกิจกรรมวันสำคัญต่าง ๆ คลองลำขนุนเป็นลำคลองที่ไหลมาจากป่าต้นน้ำ เขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าเทือกเขาบรรทัดที่มีทรัพยากรธรรมชาติอุดมสมบูรณ์ มีต้นขนุนปานต้นใหญ่อยู่ริมคลองในชุมชน จึงเป็นที่มาของชื่อคลอง ชื่อหมู่บ้านลำขนุน และหลาดต้นน้ำลำขนุน

ชุมชนบ้านลำขนุนเป็นชุมชนที่มีนโยบายส่งเสริมการท่องเที่ยวเชิงอนุรักษ์ (Eco Tourism) และการอนุรักษ์สภาพแวดล้อมตามธรรมชาติ (Frederick Steiner and Kent Butler, 2007) อันเกิดจากความต้องการของคนในชุมชนและท้องถิ่น ปัจจุบันหลาดต้นน้ำลำขนุนเป็นพื้นที่ที่ได้รับความสนใจในฐานะของแหล่งท่องเที่ยวใหม่ จากทั้งคนในพื้นที่และจังหวัดใกล้เคียง มีการพัฒนาแบบค่อยเป็นค่อยไปโดยไม่มีการวางแผนรองรับมากนัก จึงทำให้เกิดปัญหาในหลายด้าน เช่น มีการสร้างร้านค้าและสิ่งปลูกสร้างบดบังทัศนียภาพของลำคลองลำขนุน มีการจัดวางตำแหน่งของห้องน้ำสาธารณะที่ไม่เหมาะสม การออกแบบผังบริเวณขาดการคำนึงถึงอารยสถาปัตย์ (Universal Design) นอกจากนี้ยังขาดการออกแบบพื้นที่รองรับนักเที่ยวและกิจกรรมสาธารณะ เช่น ลานกิจกรรม (Plaza) พื้นที่จอดจักรยาน และสถาปัตยกรรมที่มีความโดดเด่น (Landmark)

งานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเสนอแนวทางในการปรับปรุงภูมิทัศน์และพื้นที่ใช้สอยบริเวณหลาดต้นน้ำลำขนุน และเสนอแนะแนวทางในการออกแบบงานสถาปัตยกรรมให้มีความสอดคลองกับกิจกรรมและพฤติกรรมของผู้ใช้ทั้งกิจกรรมเดิมและกิจกรรมใหม่ เพื่อการส่งเสริมการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติและการท่องเที่ยวที่ยั่งยืน

**วิธีการดำเนินงานวิจัย**

การศึกษาการปรับปรุงพื้นที่หลาดต้นน้ำลำขนุน แบ่งออกเป็น 6 ช่วงดำเนินการ ดังนี้

1. การเก็บข้อมูลทางกายภาพเพื่อสร้างผังบริเวณของพื้นที่หลาดต้นน้ำลำขนุนเดิม (Field survey)
2. สังเกตพฤติกรรมและสำรวจความคิดเห็นของผู้ใช้พื้นที่แบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม คือ ชาวชุมชนลำขนุน, ผู้ประกอบการร้านค้า, นักท่องเที่ยว และตัวแทนจากภาครัฐ ผ่านการสังเกตการณ์อย่างมีส่วนร่วม (Participant observation) และการสัมภาษณ์อย่างไม่เป็นทางการ (Informal Interview) ใน 4 ประเด็น ประกอบด้วย ข้อมูลโดยทั่วไป (General Information) การเข้าถึงพื้นที่และกิจกรรม (Accessibility and Activity) สิ่งอำนวยความความสะดวก (Facility) และข้อเสนอแนะต่อการพัฒนาพื้นที่
3. สรุปผลสำรวจกิจกรรมและพฤติกรรมของผู้ใช้งานพื้นที่ เพื่อกำหนดฟังก์ชันการใช้งานอย่างเหมาะสมสำหรับงานออกแบบผังบริเวณใหม่ของหลาดต้นน้ำลำขนุน
4. สร้างข้อเสนอแนะในการปรับปรุงภูมิทัศน์หลาดต้นน้ำลำขนุน โดยการออกแบบผังบริเวณ และการออกแบบสถาปัตยกรรม โดยมีการสร้างแนวคิดในการออกแบบทั้งหมด 3 ตัวเลือก
5. นำเสนอทางเลือกในการออกแบบภูมิทัศน์หลาดต้นน้ำลำขนุนทั้ง 3 ทางเลือก ต่อผู้มีส่วนได้ส่วนเสียในพื้นที่ทั้ง 4 กลุ่ม เพื่อเลือกแนวทางในการปรับปรุงภูมิทัศน์หลาดต้นน้ำลำขนุนที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการโหวต
6. แบบที่ได้รับการเลือกสูงสุดจะถูกพัฒนาเป็นแบบก่อสร้าง และส่งมอบให้ท้องถิ่นเพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงพื้นที่หลาดต้นน้ำลำขนุนต่อไป

**ผลการวิจัย**

1. การศึกษาข้อมูลทางกายภาพของพื้นที่

1.1 แผนที่ภูมิประเทศ ได้ดำเนินการสำรวจ และรังวัดขนาดของพื้นที่ และความลาดชันของพื้นที่เป็นที่เรียบร้อย พบว่ามีพื้นที่ 6.76163025 ไร่ และได้ Output เป็นแผนที่แสดงสิ่งปลูกสร้างและระดับความลาดชันของภูมิประเทศ

1.2 ผังการใช้ประโยชน์พื้นที่ในปัจจุบัน แสดงดัง Fig. 1

(A) (B)

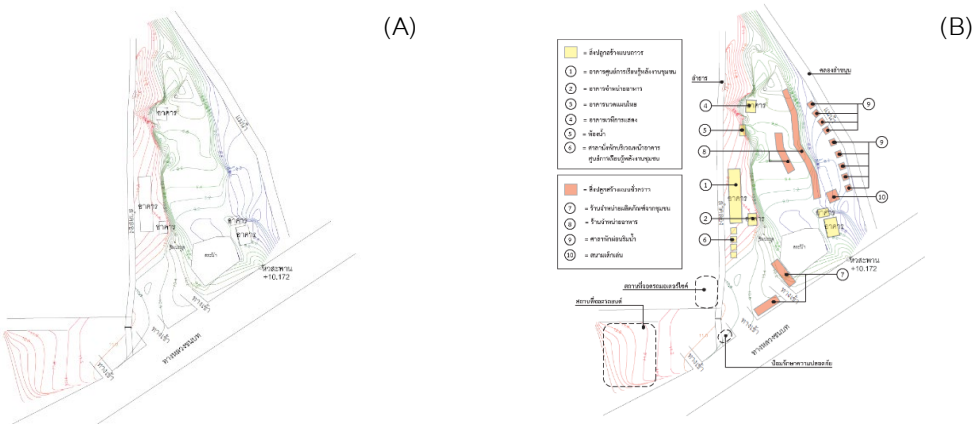


**Fig. 1** Slope and location of buildings in the Lam Khanun upstream slope (A); Showing the location of various types of buildings (B)

ภาพแสดงตำแหน่งสิ่งปลูกสร้างประเภทต่างๆ บริเวณพื้นที่หลาดต้นน้ำลำขนุนแบบสามมิติ แสดงดัง Fig. 2



**Fig. 2** Three-dimensional layout of the Lam Khanun upstream area according to the location of various types of buildings

1) สิ่งปลูกสร้างแบบถาวร (อาคารโครงสร้างเหล็ก หรืออาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก) ประกอบด้วย

- อาคารศูนย์การเรียนรู้พลังงานชุมชน ต.นาชุมเห็ด อ.ย่านตาขาว ซึ่งใช้งานเป็นอาคารอเนกประสงค์และจัดกิจกรรมประชุมลูกบ้านของผู้ใหญ่บ้านเดือนละ 1–2 ครั้ง

- ศาลานั่งพัก บริเวณหน้าอาคารศูนย์การเรียนรู้พลังงานชุมชน, อาคารนวดแผนไทย (โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก), เวทีการแสดง, ห้องน้ำและห้องอาบน้ำ, อาคารอเนกประสงค์ ด้านหลังอาคารศูนย์การเรียนรู้พลังงานชุมชนแสดงดัง Fig. 3

(A) (B)

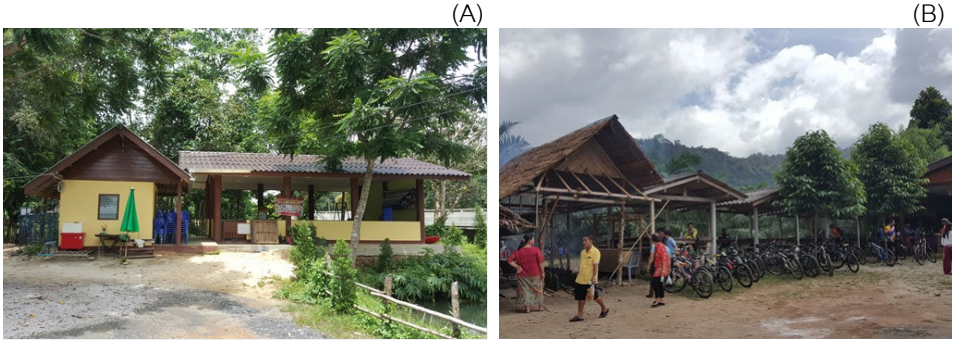


**Fig. 3** Permanent buildings Thai Massage Building (A); Permanent buildings Resting pavilion in front of the Community Energy Learning Center building (B)

2) สิ่งปลูกสร้างแบบไม่ถาวร (โครงสร้างไม้ไผ่) ประกอบด้วย

- ร้านจำหน่ายผลิตภัณฑ์จากชุมชน แสดงดัง Fig. 4
- ร้านจำหน่ายอาหาร
- สนามเด็กเล่น, ม้านั่ง, ศาลาพักผ่อน, ซุ้มทางเข้า แสดงดัง Fig. 4
- สิ่งอำนวยความสะดวกอื่นๆ

(A) (B)



**Fig. 4** Non-permanent buildings (bamboo structure), community product shop (A); Non-permanent buildings, playgrounds (B)

2. ศึกษาประเภท และพฤติกรรมของผู้ที่มาใช้สถานที่

จากการสังเกต จำแนกประเภท และพฤติกรรมของนักท่องเที่ยว ร้านค้า และผู้ใช้สถานที่ประเภทอื่นๆ สามารถจำแนกได้ดังนี้

2.1 กลุ่มนักท่องเที่ยว

2.1.1 นักท่องเที่ยวที่เป็นคนในพื้นที่หรืออยู่ละแวกใกล้เคียง

- เดินทางมาน้อยกว่า 2 คน
- เดินทางมามากกว่า 2 คน (เป็นครอบครัว)

2.1.2 นักท่องเที่ยวที่เป็นคนต่างพื้นที่

- เดินทางมาน้อยกว่า 2 คน
- เดินทางมามากกว่า 2 คน (เป็นครอบครัว)

2.1.3 นักท่องเที่ยวที่มีความต้องการพิเศษ เช่น

- คนชรา
- ผู้พิการ

2.1.4 นักท่องเที่ยวที่มาเป็นกลุ่มหรือชมรม เช่น

- กลุ่มปั่นจักรยาน
- กลุ่มมอเตอร์ไซค์

2.2 กลุ่มผู้ค้าขาย

2.2.1 ผู้ค้าขายผลผลิต-ผลิตภัณฑ์จากชมชน

2.2.2 ผู้ค้าขายอาหารและเครื่องดื่ม

2.3 กลุ่มนักแสดงที่มาทำการแสดงบนเวที

3. การศึกษาความต้องการของผู้ใช้สถานที่

ประกอบด้วย ชาวบ้านในพื้นที่, นักท่องเที่ยว และหน่วยงานท้องถิ่น โดยสังเกตและสอบถามความต้องการของชาวบ้านในพื้นที่, นักท่องเที่ยว และหน่วยงานท้องถิ่น

3.1 ศึกษาความต้องการของนักท่องเที่ยว โดยให้นักศึกษาลงพื้นที่จริงและใช้แบบสอบถามความคิดเห็นของนักท่องเที่ยวที่มีต่อหลาดต้นน้ำลำขนุน

3.2 ศึกษาความต้องการของสมาชิกชุมชน หมู่ 8 ต.นาชุมเห็ด ซึ่งเป็นทั้งนักท่องเที่ยว และผู้ค้าขายในพื้นที่

เมื่อวันที่ 17 กรกฎาคม 2561 นายหนูอิ่ม ปานนิล (ผู้ใหญ่บ้าน หมู่ 8 ล้านลำขนุน) และผู้วิจัยได้ลงพื้นที่ จัดการประชุมเพื่อรับฟังความคิดเห็น ความต้องการทางด้านกายภาพ การจัดพื้นที่ประโยชน์ใช้สอยของพื้นที่หลาดต้นน้ำลำขนุน โดยมีสมาชิกชุมชน หมู่ 8 ต.นาชุมเห็ด ซึ่งสมาชิกส่วนใหญ่เป็นผู้ค้าอาหาร และผลิตภัณฑ์จากชุมชนในพื้นที่หลาดต้นน้ำลำขนุนเข้าร่วมแสดงความคิดเห็น

3.3 ข้อสรุปความต้องการของผู้ใช้สถานที่ทุกกลุ่ม

ข้อสรุปความต้องการของผู้ใช้สถานที่ทุกกลุ่มโดยผ่านการประชุม และการลงพื้นที่สำรวจของผู้วิจัยและนักศึกษา โดยสอบถามกลุ่มพ่อค้าแม่ค้า, กลุ่มสมาชิกชุมชนหมู่ 8 บ้านลำขนุน อำเภอย่านตาขาว, กลุ่มนักท่องเที่ยว และหน่วยงานภาครัฐ สามารถสรุปความต้องการร่วมของการปรับปรุงพื้นที่ด้านกายภาพดังนี้

3.3.1 ปรับปรุงการแบ่งพ้นที่ใช้สอยภายในหลาดต้นน้ำลำขนุนให้เป็นสัดส่วน

3.3.2 เพิ่มภาพสัญลักษณ์ (Logo) หรือภาพจำลองพื้นที่ เพื่อให้นักท่องเที่ยวสามารถถ่ายรูป หรือจุด check in

3.3.3 กำหนดทางเดินเข้า – ออกในพื้นที่หลาดต้นน้ำลำขนุนให้ชัดเจน

3.3.4 ควรมีการเพิ่มจำนวนห้องน้ำให้มากขึ้น โดยแยกเป็นห้องน้ำชาย ห้องน้ำหญิง ห้องน้ำสำหรับผู้พิการ และไม่ไกลเกินไป

3.3.5 ปรับรูปแบบร้านค้าให้ดูน่าดึงดูดและสดใสขึ้น

3.3.6 ปรับปรุงรูปแบบและเพิ่มปริมาณซุ้มที่นั่งริมคลองลำขนุนให้เพียงพอต่อปริมาณนักท่องเที่ยว

3.3.7 ปรับปรุงพื้นที่จอดรถยนต์ รถจักรยานยนต์ และจักรยานโดยให้มีหลังคาคลุม

3.3.8 จัดพื้นที่สำหรับจอดรถจักรยานยนต์ให้เป็นสัดส่วน

3.3.9 ปรับปรุงบริเวณลำธารที่อยู่ใกล้เคียงคลองลำขนุนเพื่อเป็นพื้นที่สำหรับนั่งพักผ่อน และเป็นจุดชมวิวเพิ่มเติม

4. แนวทางในการออกแบบปรับปรุงพื้นที่

การจัดทำแนวทางในการปรับปรุงพื้นทั้งด้านการจัดผังประโยชน์ใช้สอยของพื้นที่ และรูปแบบสิ่งปลูกสร้างต่างๆ ได้มีการออกแบบหลายๆแนวทาง โดยเป็นการบูรณาการงานวิจัยเข้ากับการเรียนการสอนรายวิชา 997-260 การออกแบบโครงสร้างในงานสถาปัตยกรรม 1 โดยแบ่งนักศึกษาเป็นกลุ่ม ลงพื้นที่สำรวจความต้องการของกลุ่มผู้ใช้พื้นที่กลุ่มต่าง ๆ ทั้งในด้านการวางผังพื้นที่ และรูปแบบงานสถาปัตยกรรม โดยนำเสนอการออกแบบปรับปรุง ในรูปแบบของหุ่นจำลอง และแผ่นภาพแสดงแนวความคิดและแบบขยายทางสถาปัตยกรรม

จากนั้นในวันที่ 28 พฤศจิกายน 2561 มีการนำเสนอแนวความคิดของแต่ละกลุ่มผ่านการประชุมแลกเปลี่ยนความคิดเห็น ณ ศาลาอเนกประสงค์ในพื้นที่หลาดต้นน้ำลำขนุน โดยมีสมาชิกลูกบ้าน ชุมชนหมู่ 8 บ้านลำขนุน อำเภอย่านตาขาวประมาณ 150 คน, ตัวแทนภาครัฐ ประกอบด้วยผู้ใหญ่บ้านหมู่ 8 บ้านลำขนุน อำเภอย่านตาขาว และนายอำเภอย่านตาขาว เข้าร่วมรับฟังการนำเสนอผลงานของนักศึกษาแต่ละกลุ่มลงคะแนนเสียงเพื่อโหวตรูปแบบงานสถาปัตยกรรมและแนวความคิดในการปรับปรุงพื้นที่ เพื่อเป็นข้อมูลในการจัดทำแผนพัฒนาพื้นที่ของหลาดต้นน้ำลำขนุนต่อไป แสดงดัง Fig. 5



**Fig. 5** The design that received the most votes was from presenting ideas through a meeting to exchange ideas at the multi-purpose pavilion in the Lam Khanun Market area

รูปแบบหลาดต้นน้ำลำขนุนที่ได้รับคะแนนโหวตมากที่สุดจากที่ประชุมแลกเปลี่ยนความคิดเห็น ณ ศาลาอเนกประสงค์ในพื้นที่หลาดต้นน้ำลำขนุน โดยมีสมาชิกลูกบ้าน ชุมชนหมู่ 8 บ้านลำขนุน อำเภอย่านตาขาวประมาณ 150 คน, ตัวแทนภาครัฐ ประกอบด้วยผู้ใหญ่บ้านหมู่ 8 บ้านลำขนุน อำเภอย่านตาขาว และนายอำเภอย่านตาขาว มีรูปแบบดังนี้ (โดยเปรียบเทียบกับรูปแบบก่อนปรับปรุง) แสดงดัง Fig. 6–8

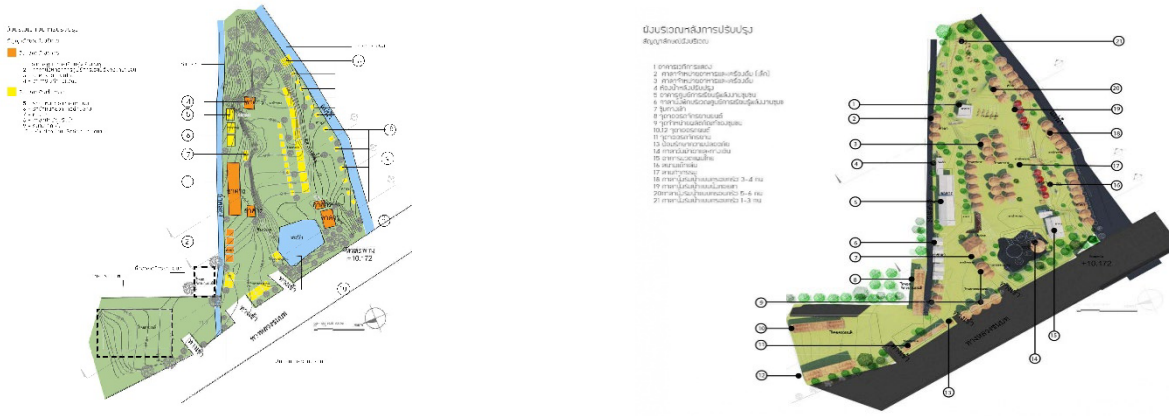


**Fig. 6** The original area plan of Ton Nam Lam Khanun Market before renovation

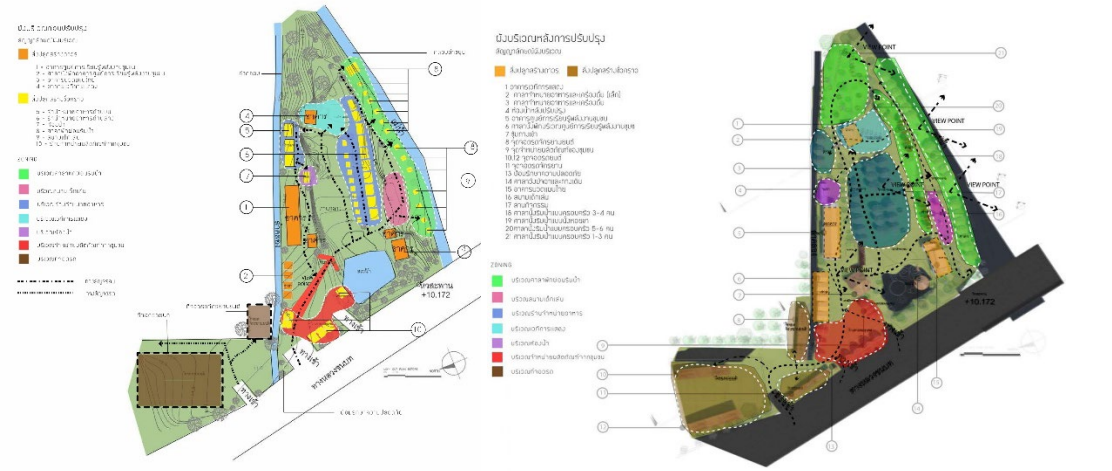


**Fig. 7** Map of travel routes in the original area before renovation of Ton Nam Lam Khanun Market and after improvement By adding more points where you can see the view of Lam Khanun Canal

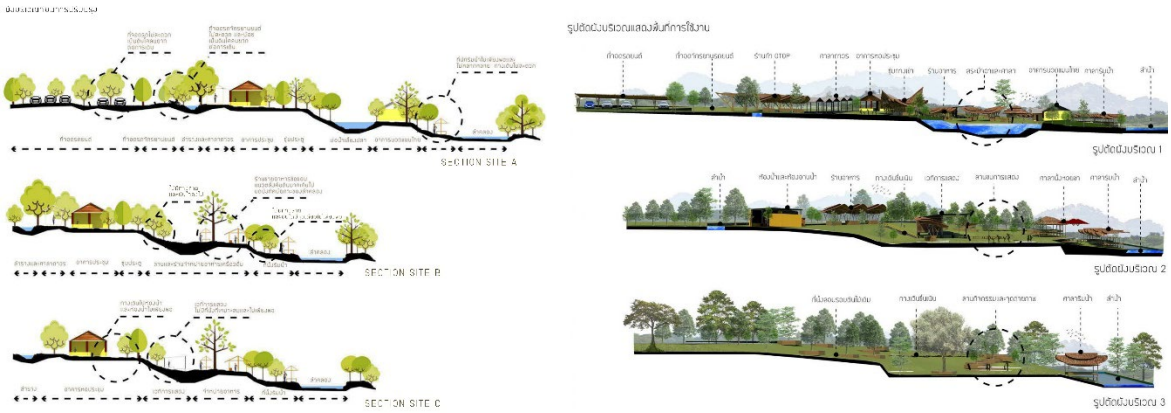



**Fig. 8** Cut-out image showing the level (Contour) and arrangement of usable areas (Function) of the area before and after the renovation of Ton Nam Lam Khanun Market.

มีแนวคิดในการออกแบบมาจากรูปทรงของเรือซึ่งมีที่มาจากเรือที่ชาวบ้านนาซุมเห็ดใช้สัญจรไปมา หรือขนส่งสินค้าไปขายภายในอำเภอย่านตาขาวในสมัยก่อน วัสดุประกอบอาคารเป็นวัสดุที่สามารถหาได้ในชุมชนและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เป็นโครงสร้างหลักของอาคาร โดยใช้ไม้ไผ่เป็นโครงสร้างหลักและใช้ตับจาก หรือตับใบสาคูเป็นวัสดุมุงหลังคา แสดงดัง Fig. 9–10




**Fig. 9** Perspective of the entrance arch design after renovation (A); Design of the entrance to the pavilion for selling agricultural products and products from the community after renovation (B)




**Fig. 10** 10 Perspective on the design of a small waterside pavilion after renovation (A); medium size after renovation (B); Large after renovation (C)

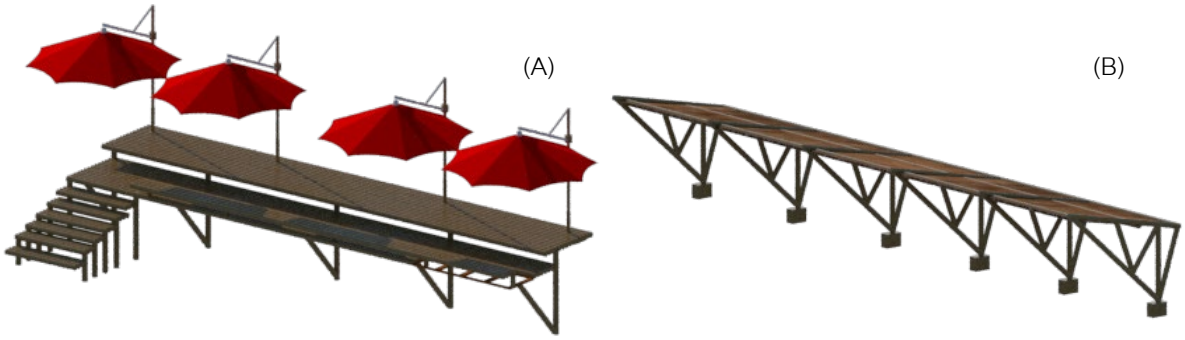



**Fig. 11** Perspective design of the renovated pavilion (A); Garage roof design after renovation (B)

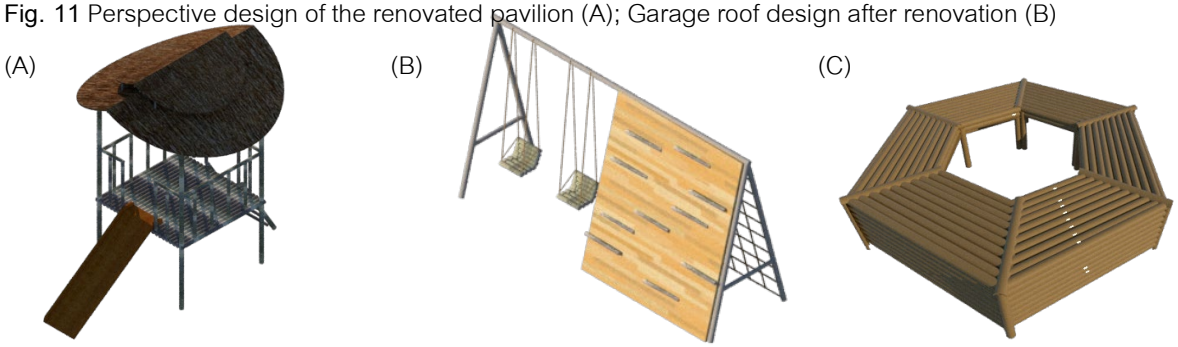



**Fig. 12** Perspective on the design of the children's play area after renovation (A); Children's swing design after renovation (B); Design of a seat surrounded by trees after renovation (C)

รูปทัศนียภาพในหลาดต้นน้ำลำขนุนหลังปรับปรุง และหุ่นจำลอง (Model) ของพื้นที่หลาดต้นน้ำลำขนุนหลังปรับปรุง แสดงดัง Fig. 13–14



Fig. 13 Scenery in Lam Khanun Floating Market after renovation



Fig. 14 Model of the Lad Ton Nam Lam Khanun area after renovation

## สรุป

รูปแบบของการปรับปรุงภูมิทัศน์ภายในหลาดต้นน้ำลำขนุนนั้นเป็นผลจากการลงพื้นที่สัมภาษณ์ผู้มาใช้พื้นที่ประเภทต่าง ๆ (นักท่องเที่ยว ชาวบ้านในพื้นที่ ผู้ที่มาค้าขายผลผลิตจากชุมชน และผู้ที่ขายอาหาร) รวมทั้งการระดมแสดงความคิดเห็นผ่านที่ประชุม โดยมีชาวบ้านหมู่ที่ 8 ตำบลนาชุมเห็ด อำเภอย่านตาขาว ในฐานะนักท่องเที่ยว ผู้ประกอบการร้านอาหารและร้านขายผลิตผลจากชุมชน, ผู้ใหญ่บ้านหมู่ที่ 8 และนายอำเภอย่านตาขาว ในฐานะตัวแทนจากภาครัฐ ได้ทำการโหวตเพื่อคัดเลือกรูปแบบและแนวคิดจากผลงานนักศึกษาหลาย ๆ กลุ่มนำมาเป็นต้นแบบในการปรับปรุงพื้นที่หลาดต้นน้ำลำขนุน ซึ่งประกอบด้วยการปรับปรุงในด้านการวางผังบริเวณ และการปรับปรุงรูปแบบของงานสถาปัตยกรรมในพื้นที่

ในด้านการปรับปรุงในด้านการวางผังข้อสรุปที่ได้ พบว่าโดยส่วนมากต้องการปรับปรุงในเรื่องของมุมมอง (Vista) ทัศนียภาพภายในพื้นที่เนื่องจากในปัจจุบันบริเวณตำแหน่งที่ตั้งของร้านขายอาหาร หันหลังร้านให้กับคลองลำขนุน ที่ทำให้บดบังทัศนียภาพที่สวยงานในพื้นที่, การเพิ่มที่นั่งพักผ่อนริมน้ำให้เยอะมากขึ้นและสอดคล้องกับพฤติกรรมของนักท่องเที่ยวที่มาเป็นกลุ่มย่อย ๆ ละกลุ่มใหญ่ ๆ, ที่นั่งห้อยขาเพื่อรองรับนักท่องเที่ยวที่อาจจะมีจำนวนมากในหน้าเทศกาลหรือวันหยุด, การเพิ่มศาลาให้อาหารปลาและทางเดินรอบวังมัจฉา และการกำหนดตำแหน่งของที่จอดจักรยาน

ในด้านการปรับปรุงในด้านการปรับปรุงรูปแบบของงานสถาปัตยกรรม พบว่าต้องการให้รูปแบบกลมกลืนกับธรรมชาติ มีการใช้งบประมาณที่ประหยัด และใช้วัสดุที่ชาวบ้านสามารถหาได้จากในพื้นที่ โดยงานสถาปัตยกรรมที่ทำการปรับปรุงรูปแบบประกอบด้วย ซุ้มทางเข้าหลัก ศาลาขายผลิตผลจากชุมชน ศาลาขายอาหาร ศาลานั่งพักผ่อนริมคลองลำขนุน ของเด็กเล่น ที่นั่งใต้ต้นไม้ และมีที่นั่งห้อยขาซึ่งสามารถจุนักท่องเที่ยวได้จำนวนมาก ๆ และเป็นการสร้างรูปแบบที่น่าสนใจให้กับพื้นที่ โดยแนวคิดหลักของรูปแบบที่ผ่านการโหวตเป็นรูปแบบของงานสถาปัตยกรรมที่ถอดรูปทรงมาจากเรือที่ใช้สัญจรในคลองลำขนุน เพื่อทำการติดต่อกันในชุมชน และการเดินทางไปยังเทศบาลตำบลย่านตาขาวในอดีต ซึ่งใช้

วัสดุที่สามารถหาได้จากในพื้นที่และเป็นวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ช่างพื้นถิ่นสามารถก่อสร้างได้ โดยใช้ไม้ไผ่เป็นโครงสร้างหลักของอาคาร และใช้ตับจาก หรือตับใบสาคูเพื่อมุงเป็นหลังคา อีกทั้งมีความต้องการในด้านการออกแบบมาสคอตที่แสดงถึงเอกลักษณ์ของพื้นที่ จุดถ่ายภาพ และโลโก้บนของที่ระลึก

เมื่อได้ผลงานวิจัยซึ่งคือแบบของผังบริเวณ แบบขยายสิ่งปลูกสร้างต่างๆ และหุ่นจำลอง แล้วได้ดำเนินการมอบผลงานดังกล่าวให้แก่ภาครัฐเพื่อนำผลงานที่ได้เป็นแนวทางในการปรับปรุงพื้นที่ต่อไป แต่จากการพูดคุยกับเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องพบว่าในก่อสร้างจริงจะต้องอาศัยงบประมาณของทางภาครัฐ ซึ่งอาจจะน้อยหรือมากแตกต่างกันในแต่ละครั้ง ดังนั้นการที่จะทำให้โครงการปรับปรุงพื้นที่หลาดต้นน้ำลำขนุนเป็นรูปธรรมขึ้นมาได้อาจจะต้องมีการแบ่งเฟสในการปรับปรุงเป็นส่วน ๆ ซึ่งจะต้องอาศัยการวางแผนงานการก่อสร้างต่อไปในอนาคต

**เอกสารอ้างอิง**


กรมทางหลวงชนบท กระทรวงคมนาคม. โครงการศึกษาแนวทางการจัดทำโครงการและออกแบบเส้นทางชมทิวทัศน์ (Scenic Route). กรมทางหลวงชนบท กระทรวงคมนาคม, กรุงเทพฯ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ ภาควิชาภูมิสถาปัตยกรรม. คู่มือพัฒนาภูมิทัศน์เมืองเพื่อการท่องเที่ยว. กรุงเทพฯ: กองวางแผนโครงการ การท่องเที่ยวแห่งประเทศไทย, 2531.

ชยาภรณ์ ชื่นรุ่งโรจน์. การวางแผนการพัฒนาการท่องเที่ยว. เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2537.

เดชา บุญค้ำ. 1991. การวางผังบริเวณและงานบริเวณ. บริษัทวี.พริ้นท์ จำกัด, กรุงเทพฯ, 282 หน้า.

บุญเลิศ จิตตั้งวัฒนา. 2548. อุตสาหกรรมการท่องเที่ยว. บริษัท เพรส แอนด์ ดีไซน์ จำกัด, กรุงเทพฯ

ศศิยา ศิริพาณิชย์. ภูมิทัศน์พื้นฐาน. คณะเกษตร กำแพงแสน และภาควิชาพืชสวน คณะเกษตรกำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม. 332 หน้า.

วิฑูรย์ เหลียวรุ่งเรือง, สุจิณณา พานิชกุล, ปัทมา จันทร์วิโรจน์. 2547. เส้นทางท่องเที่ยวสถาปัตยกรรมเชิงประวัติศาสตร์: รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์. เชียงใหม่

ภาควิชาปฐพีวิทยา. 2519. ปฐพีวิทยาเบื้องต้น. โรงพิมพ์คุรุสภา, กรุงเทพฯ 628 หน้า.

สมจิต โยธะคง. 2530. การวางผังตกแต่งบริเวณ. สำนักพิมพ์ บำรุงสาสน์, กรุงเทพฯ 297 หน้า.

สุรพงศ์ โอวรารินทร์. 2546. การออกแบบวางผังบริเวณสถานีฝึกนิสิตวนศาสตร์ห้วยยาง จังหวัดประจวบคีรีขันธ์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ

Bono, E. 1922. Teach your children how to think. Penguin Books, Ltd., London. 313 p.

Brooke, J. 1991. Garden Design Book. The complete practical guide to planning, styling, and planting any garden. Dorling Kindersley, London. 351 p.

Bousmaha Baiche and Nicholas Walliman. 2000. Architecs's Data. Blackwell Publishing Company, United State of America. 636p.

Frederick Steiner and Kent Butler. 2007. Planning and Urban Design Standards. John Wiley & Sons, Inc., New Jersey. 436p.

Grant W. Reid. 2002. Landscape graphics. Crown Published Group, a division of Random House Inc., New York. 216.

Lynch, K. 1984. Site Planing. 3rd ed. MIT Press, Cambridge, Massachusetts. 499 p.

Ridge, G.W. 1993. From concept to form in landscape design. Van Nostrand Reinhold, New York. 162 p.

Robert Holden and Jamie Liversedge. 2014. Landscape Architecture an Introduction. Laurence King Publishing Ltd., United Kingdom. 208p.

Norman K.Booth. 1983. Basic elements of landscape architectural design. Waveland Press, Inc., United State of America. 315p.

# ระบบป้องกันน้ำท่วมแบบดั้งเดิมในโบราณสถานในเมืองประวัติศาสตร์อยุธยา

## Traditional flood prevention system in historic monuments of the historic city of Ayutthaya

**ปรัตกร อินทรกำแหง**[a,*], **ปฏิพล ยอดสุรางค์**[b]

Parattakorn Intrakamhang[a,*], Patiphol Yodsurang[b]

[a]นักศึกษาปริญญาโท หลักสูตรสถาปัตยกรรมมหาบัณฑิต (สิ่งแวดล้อมสรรค์สร้าง) คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[b]ภาควิชาสถาปัตยกรรม คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[a]Graduate Student, Master of Architecture (Built Environment), Faculty of Architecture, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

[b]Department of Architecture, Faculty of Architecture, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: parattakorn.int@ku.th

**บทคัดย่อ**

การวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาองค์ความรู้ระบบป้องกันน้ำท่วมแบบดั้งเดิมจากการศึกษาโบราณสถานในพื้นที่นอกเขตอุทยานประวัติศาสตร์พระนครศรีอยุธยา โดยศึกษาองค์ประกอบที่หลงเหลือในโบราณสถาน ซึ่งเกี่ยวข้องกับสภาพแวดล้อมแบบน้ำท่วมซ้ำซาก โดยโบราณสถานและองค์ประกอบที่หลงเหลือเป็นหลักฐานเชิงประจักษ์ที่แสดงให้เห็นถึงองค์ความรู้แบบดั้งเดิมโดยใช้ธรรมชาติในการแก้ปัญหาของพื้นที่ การวิจัยนี้ใช้การศึกษาการสำรวจพื้นที่เก็บข้อมูลและการบันทึกใช้วิธีสำรวจอย่างรวดเร็ว และวิเคราะห์โดยใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ พบว่ารูปแบบการใช้ประโยชน์ที่ดินและทุ่งรับน้ำ นั้นมีความสำคัญต่อระบบป้องกันน้ำท่วมแบบดั้งเดิม โดยเฉพาะทุ่งรับน้ำซึ่งมีปริมาณลดลงจากการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการใช้ประโยชน์ที่ดิน และการขยายตัวของเมือง

**คำสำคัญ**: แนวทางการแก้ไขปัญหาที่อาศัยธรรมชาติเป็นพื้นฐาน, ระบบป้องกันน้ำท่วมแบบดั้งเดิม, องค์ประกอบโบราณสถาน

**Abstract**

This research aims to study the traditional flood prevention systems in historic monuments outside the Ayutthaya Historical Park. Specifically, focusing on elements tied to repeated flooding. These historic monuments and remaining elements serve as empirical evidence demonstrating traditional knowledge of living with nature. The research methodology employs rapid survey in the case study area and analyzed with GIS. The result reveals the pattern of land use and flood fields that are important to the traditional flood prevention system However, The quantity of flood fields has decreased due to the expansion of urbanization and transformation of land use.

**Keywords**: Historic monument elements, Nature-base solutions, Traditional flood prevention

**บทนำ**

จังหวัดพระนครศรีอยุธยาตั้งอยู่บนพื้นที่ราบลุ่มภาคกลางตอนล่างของประเทศไทย มีลักษณะภูมิประเทศราบลุ่ม น้ำท่วมถึง ไม่มีภูเขาและป่าไม้ มีแม่น้ำไหลผ่านถึง 4 สาย ได้แก่ แม่น้ำเจ้าพระยา แม่น้ำป่าสัก แม่น้ำลพบุรี และแม่น้ำน้อยรวมความยาวประมาณ 200 กิโลเมตร มีลำคลองใหญ่น้อยรวม 1,254 คลอง เชื่อมต่อกับแม่น้ำเกือบทั่วบริเวณพื้นที่ ทำให้รูปแบบการใช้ชีวิตและวัฒนธรรมของพื้นที่นี้มีความสัมพันธ์กับสายน้ำ ทั้งในด้าน เศรษฐกิจ สังคม และวัฒนธรรม ดังเห็นได้จากการเป็นที่ตั้งราชธานีของอาณาจักรอยุธยาในอดีต และในปัจจุบันได้กลายมาเป็นที่ตั้งของมรดกโลก อย่าง นครประวัติศาสตร์พระนครศรีอยุธยาที่มีความสำคัญต่อการแสดงถึงหลักฐานของวัฒนธรรม หรืออารยธรรมที่ปรากฏให้ เห็นอยู่ในปัจจุบัน หรือสาบสูญไปแล้ว (UNESCO, 2023) รวมทั้งการใช้ประโยชน์จากธรรมชาติที่ใช้พื้นที่ทุ่งรับน้ำ ในการ ปลูกข้าว โดยทุ่งรับน้ำในพื้นที่จังหวัดพระนครศรีอยุธยาได้แก่ พื้นที่ทุ่งรับน้ำบ้านแพน พื้นที่ทุ่งรับน้ำบางบาล พื้นที่ทุ่งรับน้ำ บางกุ่ม พื้นที่ทุ่งรับน้ำพระยาบรรลือ พื้นที่ทุ่งรับน้ำเจ้าเจ็ด พื้นที่ทุ่งรับน้ำผักไห่ (GISTDA, 2022) พื้นที่ทุ่งรับน้ำเหล่านี้มี ความสำคัญทางประวัติศาสตร์ในฐานะเป็นแหล่งทรัพยากรธรรมชาติที่อุดมสมบูรณ์ที่ส่งผลต่อการตั้งถิ่นฐานของอารย ธรรมในพื้นที่จังหวัดพระนครศรีอยุธยา นอกจากนี้ยัง ทุ่งรับน้ำ ยังทำหน้าที่เป็นที่รับน้ำในฤดูน้ำหลาก โดยกระจายน้ำเข้า ทุ่งผ่านคลองขุด เพื่อไม่ให้น้ำเข้าไปยังพระนคร (วัลลิโภดม, 2559) และรับศึกจากพม่าในสมัยอยุธยา นอกจากนี้โบราณทั้ง ที่หลงเหลืออยู่ยังกระจัดกระจายอยู่ทั่ว โดยพระราชบัญญัติ โบราณสถาน โบราณวัตถุ ศิลปวัตถุและพิพิธภัณฑสถาน แห่งชาติ พ.ศ. 2504 ในมาตรา 4 ได้นิยามคำว่า “โบราณสถาน” หมายความว่าอสังหาริมทรัพย์ซึ่งโดยอายุ หรือโดย ลักษณะแห่งการก่อสร้าง หรือหลักฐานเกี่ยวกับประวัติของอสังหาริมทรัพย์นั้นเป็นประโยชน์ในทางศิลปะ ประวัติศาสตร์ หรือ โบราณคดี ทั้งนี้ให้รวมถึงสถานที่ที่เป็นแหล่งโบราณคดี แหล่งประวัติศาสตร์ และอุทยานประวัติศาสตร์ด้วย ซึ่งแหล่ง โบราณสถานมีทั้งภายในพื้นที่โดยการควบคุมดูแลเข้มข้นอย่าง เช่น พื้นที่อุทยานประวัติศาสตร์พระนครศรีอยุธยา ซึ่งเป็น มรดกโลก และสถานที่ท่องเที่ยวสำคัญของประเทศไทย จึงทำให้ได้รับการบูรณะ ซ่อมแซม ดูแล จากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังมีโบราณสถานที่กระจัดกระจายอยู่ ภายนอกเกาะเมืองเช่นกัน แต่อย่างไรสภาพการดูแล โบราณสถานเหล่านี้เป็นการดูแลตามสภาพและแตกต่างจากโบราณสถานในเกาะเมือง

โบราณสถานนอกเขตอุทยานประวัติศาสตร์พระนครศรีอยุธยา กระจายอยู่ตาม เขตรอบนอกเกาะเมืองอยุธยา กระจายอยู่ในเขต ตำบลคลองสระบัว ตำบลหันตรา ตำบลกระมัง ตำบลอโยธยา ตำบลประตูชัย ตำบลท่าวาสุกรี ตำบล สวนพริก ตำบลปากกราน ตำบลภูเขาทอง ตำบลหัวรอ ตำบลรัตนไชย ตำบลไผ่ลิง อำเภอ พระนครศรีอยุธยา ซึ่งตั้งอยู่ ซ้อนทับกับพื้นที่ทุ่งรับน้ำ โดยเฉพาะทางด้านทิศเหนือของเกาะเมืองอยุธยา กลุ่มโบราณสถานเหล่านี้จึงต้องเผชิญกับ สภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลง อย่างน้ำท่วมซ้ำซาก อยู่ตลอดเวลา และหลงเหลือองค์ประกอบ เช่น ฐานไพที กำแพงกัน คลื่นกระแทก อุโบสถ วิหาร กำแพงแก้ว ปรางค์ เจดีย์ เป็นต้น แม้จะผ่านกาลเวลามาหลายร้อยปี จึงเป็นสิ่งที่แสดงให้เห็น ถึง ภูมิปัญญาดั้งเดิม ในอดีตในการออกแบบวิธีการจัดการกับสภาพแวดล้อมที่ตั้งอยู่บนพื้นที่น้ำท่วมซ้ำซากแต่อย่างไรก็ ตาม การเปลี่ยนแปลงของภูมิอากาศ (ENSO) เช่นเหตุการณ์น้ำท่วมในปี พ.ศ. 2554 และล่าสุดในเดือนตุลาคม ปี พ.ศ. 2565 ซึ่งข้อมูลระดับน้ำเฉลี่ยในบริเวณพื้นที่จังหวัดพระนครศรีอยุธยาพบว่า ในปี พ.ศ. 2563 ถึง พ.ศ. 2566 มีระดับน้ำ เฉลี่ยเกินกว่าระดับน้ำทะเลปานกลาง (มากกว่า 0.00 ม.) และความจุน้ำในลำน้ำ จัดอยู่ในเกณฑ์ ระดับน้ำมาก หรือ ความ จุน้ำมากกว่า 70.1% ของความจุลำน้ำ ณ สถานี C.35 บ้านป้อม จังหวัดพระนครศรีอยุธยา (สำนักงานทรัพยากรน้ำ แห่งชาติ, 2566) แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มที่พื้นที่จังหวัดพระนครศรีอยุธยาจะต้องอยู่ร่วมกับน้ำบ่อยขึ้นจากการเปลี่ยนแปลง ของสภาพภูมิอากาศที่รุนแรง รวมทั้งภูมิประเทศที่ราบลุ่มน้ำท่วมถึง ดังนั้นองค์ประกอบของโบราณสถานที่หลงเหลือ และ ทนทานต่อสภาพแวดล้อมน้ำท่วมซ้ำซากในโบราณสถานนอกเกาะเมือง จึงเป็นหลักฐานเชิงประจักษ์ของการอยู่ร่วมกับ

สายน้ำ ดังนั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญที่การบันทึกการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ของระบบดั้งเดิมเพื่อถ่ายทอดให้แก่คนรุ่นหลังว่า ผู้คนในอดีตสามารถอยู่ร่วมกับสายน้ำได้อย่างไร (Yodsurang et al. 2022) เพื่อก่อให้เกิดความเข้าใจและแนวสร้างทางในการอยู่ร่วมกับธรรมชาติในสภาพแวดล้อมของพื้นที่ราบลุ่มน้ำท่วมถึงอย่างอยุธยา

**การตรวจเอกสาร**

*1. ภูมิศาสตร์และการดำรงชีวิตแบบดั้งเดิมบนพื้นที่ราบน้ำท่วมถึงบริเวณลุ่มน้ำอยุธยา*

ลักษณะทางภูมิศาสตร์ของอยุธยาตั้งอยู่บนพื้นที่ราบลุ่มภาคกลางตอนล่างของประเทศไทย ซึ่งเป็นบริเวณสามเหลี่ยมปากแม่น้ำเจ้าพระยา (Chao Phraya Delta) มีลักษณะภูมิประเทศราบลุ่มน้ำท่วมถึง โดยบริเวณมีแม่น้ำไหลผ่านถึง 4 สายได้แก่ แม่น้ำเจ้าพระยา แม่น้ำป่าสัก แม่น้ำลพบุรี และแม่น้ำน้อยรวมความยาวประมาณ 200 กิโลเมตร มีลำคลองใหญ่น้อยรวม 1,254 คลอง เชื่อมต่อกับแม่น้ำเกือบทั่วบริเวณพื้นที่ ส่งผลต่อการก่อสร้างขึ้นของอารยธรรมที่บนบริเวณดังกล่าวที่ถูกกำหนดโดยสายน้ำ ทั้งเศรษฐกิจ สังคม และวัฒนธรรม จากภูมิศาสตร์แบบสามเหลี่ยมปากแม่น้ำ และมีลักษณะเป็นพื้นที่หน่วงน้ำ (Retarding basin) รวมทั้งคิดตะกอนที่ทับถม ส่งผลให้รูปแบบการใช้ประโยชน์ที่ดินของพื้นที่สามเหลี่ยมปากแม่น้ำจะเน้นการปลูกข้าวเป็นสำคัญ ในพื้นที่โดยรอบทำให้มีนาข้าวจำนวนมากในพื้นที่ และมีความสัมพันธ์กับการบริหารการจัดการน้ำ (Tanabe, 1994) โดยวัฒนธรรมการปลูกข้าว (Wet-Rice Cultivation) ผลผลิตทางการเกษตร และการขนส่ง ถูกกำหนดโดยรูปแบบทางกายภาพของภูมิประเทศพื้นที่แบบดินดอนปากแม่น้ำ และปริมาณของน้ำที่ท่วมตามธรรมชาติจากแม่น้ำ (Tanabe, 1977) และการเชื่อมต่อระหว่างแม่น้ำสายหลักผ่านระบบคูคลอง รวมทั้งรูปแบบการตั้งถิ่นฐานที่กระจายอยู่ตามแนวของแม่น้ำ ลำคลอง อันเป็นที่ปรากฏจากโบราณสถานที่หลงเหลืออยู่บนบริเวณพื้นที่ดังกล่าว

*2. สถาปัตยกรรมอยุธยากับสายน้ำ*

โบราณสถานในพื้นที่ราบลุ่มเจ้าพระยา โดยเฉพาะโบราณสานในพื้นที่พระนครศรีอยุธยาทั้งบริเวณในเกาะเมือง และนอกรอบเกาะเมือง โดยโบราณสถานหรือสถาปัตยกรรมตั้งอยู่ตามแนวแม่น้ำ ซึ่งเป็นสถานี่ปลูกข้าว เดินทาง แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างผู้คนและสายน้ำ ซึ่งเป็นสิ่งที่ก่อให้เกิดภูมิทัศน์ทางวัฒนธรรมตลอดแนวแม่น้ำบริเวณลุ่มน้ำเจ้าพระยา โดยเฉพาะพื้นที่ทุ่งรับน้ำซึ่งอยู่นอกเกาะเมืองอยุธยากลุ่มโบราณสถานเหล่านี้จึงต้องเผชิญกับสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลง อย่างน้ำท่วมซ้ำซาก ที่มักเกิดขึ้นในพื้นที่ทุ่งรับน้ำ โดยโบราณสถานภายนอกพื้นที่แหล่งมรดกโลกมีการออกแบบของโครงสร้างและด้วยความแม่นยำทั้งการปรับระดับอาคาร และภูมิประเทศของที่ตั้งมาตั้งแต่อดีต ซึ่งสามารถป้องกันปัญหา และอยู่รอดในสภาวะน้ำท่วมได้ เป็นสิ่งที่แสดงให้เห็นถึงการอยู่ร่วมระหว่างชุมชนกับสภาวะน้ำท่วม รวมทั้งการตั้งถิ่นฐานหลายแห่งบริเวณแม่น้ำเจ้าพระยาในอดีตยังเป็นตัวอย่างที่โดดเด่นของการดำรงชีวิตในการตั้งถิ่นฐานที่สัมพันธ์กับแหล่งน้ำ (Yodsurang, 2022) เช่น การเชื่อมต่อกับระบบคูคลองโดยท่าเรือโบราณในพื้นที่โบราณสถาน หรือ องค์ประกอบที่แสดงให้เห็นการยกระดับพื้นที่ตั้งเช่น เนิน รวมทั้งการยกฐานของอาคารขึ้น เช่น ส่วนฐานไพที (Elevated basement) โดยคำว่า ไพที มีความหมายเดียวกับคำว่า เวที เป็นฐานร่วมโดยมีสิ่งก่อสร้างอื่นอยู่ด้วย (สันติ เล็กสุขุม, 2563) อย่างเช่น รองรับอาคาร เจดีย์ กำแพงแก้ว เป็นต้น และกำแพงกันคลื่นกระแทก (Wave protection wall) ที่ทำหน้าที่กันคลื่นที่เกิดจากลมที่พัดน้ำมากระแทกกับตัวอาคาร จะเห็นได้ว่าองค์ประกอบต่าง ๆ เหล่านี้เป็นสิ่งที่แสดงให้เห็นถึง ภูมิปัญญาดั้งเดิม ของผู้คนในอดีตกับการออกแบบวิธีการจัดการกับสภาพแวดล้อมที่ตั้งอยู่บนพื้นที่ราบลุ่มน้ำท่วมถึง (Fig. 1)

(A) (B)



Fig. 1 Flood and historic monuments: (A) Flood on historic monument reaching the elevated basement; and (B) Phraya Man temple on elevated basement in flood. (Yodsurang, 2022).

*3. ระบบการจัดการแบบดั้งเดิม*

ระบบการจัดการแบบดั้งเดิม (Traditional Management System) อาจจะเรียกกันว่าเป็นองค์ความรู้และการปฏิบัติที่สั่งสมมา รวมทั้งความเชื่อที่เกี่ยวกับความสัมพันธ์ของสิ่งมีชีวิต (รวมถึงมนุษย์) และกับสิ่งแวดล้อมที่ถูกสร้างขึ้นได้รับการอนุรักษ์ และถ่ายทอดในบริบทดั้งเดิมและข้ามจากรุ่นสู่รุ่นมายังบริบทปัจจุบัน (Jopela, 2016) ระบบการจัดการแบบดั้งเดิมที่อยู่ในชุมชนสามารถ แบ่งออกได้สองด้าน คือ ด้านจิตวิญญาณ ด้านสังคม และด้านเทคนิค ซึ่งมักจะในอยู่ในรูปแบบของการบอกเล่าของผู้คนในชุมชน หรืออยู่ในรูปแบบที่เป็นลายลักษณ์อักษร เช่น จารึก บันทึก และตำรา เป็นต้น รวมทั้งในรูปแบบของทรัพย์สินทางวัฒนธรรม (ปฏิพล, 2563) ดังเช่น โบราณสถานที่หลงเหลือ ที่มีองค์ประกอบ เช่นเนินดินหรือ การยกฐานอาคาร เช่น ฐานไพที และกำแพงกันคลื่นกระแทก ที่ทำให้โบราณสถานสามารถอยู่รอดในพื้นที่น้ำราบลุ่มน้ำท่วมถึงได้ รวมทั้งการใช้ภูมิประเทศแบบทุ่งรับน้ำ ในการรับน้ำ เกษตรกรรม ปลูกข้าว และการป้องกันข้าศึกจากสงคราม

*4. แนวทางการแก้ไขปัญหาที่อาศัยธรรมชาติเป็นพื้นฐาน*

แนวทางการแก้ไขปัญหาที่อาศัยธรรมชาติเป็นพื้นฐาน (Nature-Base Solutions) คือ แนวทางการดำเนินงานเพื่อบริหารจัดการ ปกป้อง และฟื้นฟูระบบนิเวศ อย่างยั่งยืน ซึ่งสามารถจัดการกับความท้าทาย ทางสังคม ได้อย่างมีประสิทธิภาพและปรับให้เข้าสถานการณ์เพื่อสร้างคุณภาพชีวิตที่ดีของมนุษย์ควบคู่กับการคงไว้ซึ่งประโยชน์จากความหลากหลายทางชีวภาพ (IUCN, 2023) โดยมีกรณศึกษาที่น่าสนใจ คือ แนวคิดการแก้ปัญหาน้ำท่วมในประเทศปากีสถาน อันเนื่องจากภูมิศาสตร์ของประเทศนั้นเป็นพื้นที่ราบต่ำ โดยแนวทางการแก้ไขปัญหาที่อาศัยธรรมชาติเป็นพื้นฐาน ในปากีสถาน ได้แก่ 1) การฟื้นฟูสภาพป่าและการปลูกป่า, 2) การฟื้นฟูพื้นที่ชุ่มน้ำ, 3) การจัดการที่ดินอย่างยั่งยืน, และ 4) โครงสร้างพื้นฐานสีเขียว โดยเฉพาะ การฟื้นฟูพื้นที่ชุ่มน้ำ (Wetland restoration) ที่เป็นเกราะป้องกันน้ำท่วมตามธรรมชาติโดยการดูดซับและกักเก็บน้ำ ลดการไหลของน้ำสูงสุด และกรองมลพิษ การฟื้นฟูพื้นที่ชุ่มน้ำที่เสื่อมโทรมให้ประโยชน์หลายเช่น การปรับปรุงคุณภาพน้ำ การเพิ่มความหลากหลายทางชีวภาพ และการสร้างพื้นที่ในการพักผ่อนหย่อนใจ (United Nations, 2023) ซึ่งเป็นการแก้ปัญหาตั้งแต่ต้นน้ำจนถึงปลายน้ำ โดยเน้นการแก้ปัญหาระยะยาวของพื้นที่โดยอาศัยลักษณะของภูมิประเทศ นอกจากนี้แนวทางดังกล่าวยังส่งเสริมให้เกิดการแก้ปัญหาในหลายระดับ เช่น การแก้ปัญหาทางกายภาพอย่างน้ำท่วมที่ส่งเสริมให้เกิดการแก้ปัญหาทางด้านเศรษฐกิจ และสังคม

**วัตถุประสงค์**

1. ศึกษาและวิเคราะห์รูปแบบองค์ประกอบของระบบป้องกันน้ำท่วมแบบดั้งเดิมในโบราณสถาน
2. เพื่อให้ได้ข้อมูลที่สามารถใช้เป็นฐานข้อมูลในการจัดทำข้อเสนอ และทางเลือกในการจัดการพื้นที่น้ำท่วม

**ขอบเขตการศึกษา**

*1. ขอบเขตด้านเนื้อหา*

การวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาต่อสิ่งแวดล้อมสรรค์สร้างที่มีผลกระทบต่อระบบป้องกันน้ำท่วมแบบดั้งเดิมในโบราณสถาน โดยเน้นการศึกษาโดยใช้การสำรวจข้อมูลของระบบป้องกันน้ำท่วมแบบดั้งเดิมในบราณสถาน องค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับการยกระดับอาคารและน้ำท่วม คือ ฐานไพที และกำแพงกันคลื่นกระแทก รวมทั้งลักษณะทางกายภาพ และบริบทที่ตั้ง รวมทั้งสิ่งแวดล้อมสรรค์สร้างในพื้นที่ศึกษา

*2. ขอบเขตทางด้านพื้นที่*

การวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาโบราณสถานในพื้นที่หมายเลขที่ 5 (Fig. 2) บริเวณทุ่งนอกเกาะเมืองด้านทิศเหนือในอำเภอ พระนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ซึ่งลักษณะทางกายภาพเป็นที่ราบลุ่ม น้ำท่วมถึง มีระบบคูคลองเชื่อมต่อกัน เช่น คลองสระบัว คลองบางขวด คลองบางปลาหมอ มีการปลูกข้าว ทำนา มีพื้นที่อยู่อาศัย และชุมชนกระจายอยู่ทั่วพื้นที่ ตามแนวถนน นอกจากนี้ยังเป็นที่ตั้งของ ทุ่งโบราณได้แก่ ทุ่งแก้ว-ทุ่งขวัญ ทุ่งลุมพลี ทุ่งภูเขาทอง โดยในพื้นที่มีโบราณสถานกระจัดกระจายอยู่ทั้งที่ขึ้นทะเบียน และไม่ได้ขึ้นทะเบียน ซึ่งตามลักษณะภูมิประเทศ ของทุ่งโบราณเหล่านี้ได้กลายพื้นที่กักเก็บน้ำในช่วงฤดูมรสุม (Yodsurang, 2022) จากน้ำที่หลากมาจากภาคเหนือ มาตั้งแต่ในอดีต ทำให้โบราณสถานในพื้นที่นี้ต้องเผชิญกับสภาพแวดล้อมของการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา จากปัจจัยทางด้านธรรมชาติ อย่างสภาวะน้ำท่วมตามลักษณะภูมิประเทศ และปัจจัยที่มนุษย์สร้างขึ้นอย่างการพัฒนา และการเจริญเติบโตของเมือง แต่อย่างไรก็ตามโบราณสถานเหล่านี้ยังคงสามารถดำรงอยู่ได้ จนมาถึงปัจจุบันภายใต้สภาวะความเปลี่ยนแปลงกว่าหลายร้อยปี

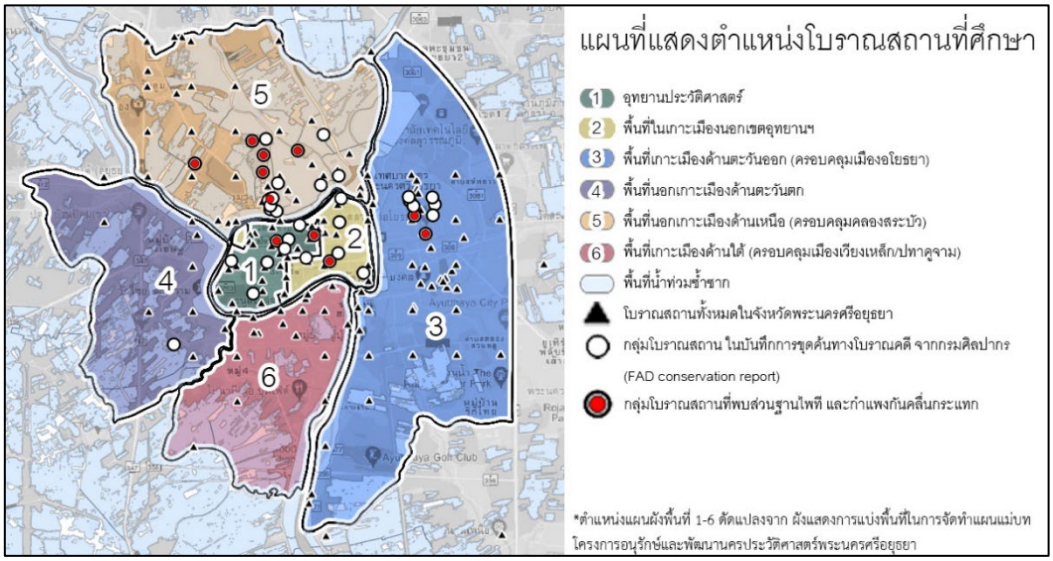



**Fig. 2** Study area, Map of the specific historical monuments

**วิธีดำเนินการวิจัย**

1.การวิจัยนี้ได้ใช้ การศึกษากรณีศึกษาโบราณสถาน 400 แห่งในพื้นที่อุทยานประวัติศาสตร์และพื้นที่ที่เกี่ยวข้องตามโครงกาอนุรักษ์และพัฒนาเมืองประวัติศาสตร์อยุธยา และการทบทวนเอกสารข้อมูลทุติยภูมิจากรายงานการขุดค้นขุดแต่ง และออกแบบเพื่อการบูรณะโบราณสถานจากกรมศิลปากร (FAD conservation report) เพื่อค้นหา และจำแนกองค์ประกอบของของโบราณสถานจากการขุดค้นทางโบราณคดี ที่เกี่ยวข้องกับการยกระดับอาคาร และสภาพแวดล้อมน้ำท่วมซ้ำซาก คือ ฐานไพที และกำแพงกันคลื่นกระแทกในโบราณสถานนอกเกาะเมืองอยุธยา (Fig. 3)

2.การสำรวจพื้นที่เก็บข้อมูลและการบันทึกใช้วิธีสำรวจอย่างรวดเร็ว (Rapid survey)เพื่อให้ได้มาซึ่งภาพรวมของกายภาพของพื้นที่ศึกษา ในกลุ่มโบราณสถานบริเวณพื้นที่หมายเลขที่ 5 (Fig. 2) ที่มีข้อมูลรายละเอียดการขุดค้น จำนวน 16 แห่ง โดยเฉพาะทางด้านสภาพแวดล้อม และรูปแบบการใช้ประโยชน์ที่ดินบริเวณโดยรอบโบราณสถาน และวิเคราะห์โดยใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Geographic information: GIS) ผ่านโปรแกรม QGIS โดยใช้การซ้อนกันของชั้นข้อมูลที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ 1) การศึกษากลุ่มประชากรโบราณสถาน 400 แห่งในพื้นที่อุทยานประวัติศาสตร์ และพื้นที่ที่เกี่ยวข้องตามโครงกาอนุรักษ์และพัฒนาเมืองประวัติศาสตร์อยุธยา 2) เอกสารข้อมูลทุติยภูมิจากรายงานการขุดค้น ขุดแต่ง และออกแบบเพื่อการบูรณะโบราณสถานจากกรมศิลปากร 3) แผนที่น้ำท่วมซ้ำซาก เพื่อให้ได้ออกมาเป็นการเกาะกลุ่มของกลุ่มตัวอย่างโดยแสดงตำแหน่งที่ตั้งโบราณสถานที่หลงเหลือบริเวณนอกเกาะเมือง จากนั้นจำแนกองค์ประกอบทางกายภาพในโบราณสถานที่ศึกษา เพื่อให้ทราบถึงจำนวนองค์ประกอบที่หลงเหลือในโบราณสถาน และนำมาวิเคราะห์เพื่อให้ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างโบราณสถาน และสภาพแวดล้อมทางกายภาพซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของระบบป้องกันน้ำท่วมแบบดั้งเดิม (Fig. 3)

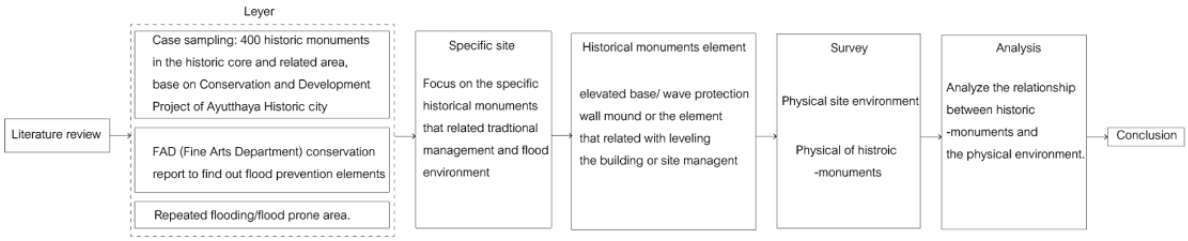



**Fig. 3** Research framework diagram

**ผลและวิจารณ์ผลการวิจัย**

จากการศึกษาพบว่าจากกลุ่มตัวอย่างโบราณสถานจำนวน 42 แห่งพบว่า ส่วนใหญ่เป็นวัดร้างสภาพของโบราณสถานมีวัชพืชปกคลุมสภาพแวดล้อมของที่ตั้งโดยรอบส่วนใหญ่เป็นทุ่งนา ป่ารกที่มีต้นไม้ และในบางแห่งมีชุมชนหรือ บ้านพักอาศัยของประชาชนอยู่ในบริเวณใกล้เคียง โดยองค์ประกอบของโบราณสถานสามารถจัดหมวดหมู่เป็นกลุ่มใหญ่ ๆ ได้แก่ 1) เจดีย์ประทาน, 2) เจดีย์ราย, 3) วิหาร, 4) อุโบสถ, 5) กำแพงแก้ว, 6) กำแพงวัด, 7) ปรางค์, 8) อาคารโบราณสถานอื่น, และ9) อื่น ๆ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นองค์ประกอบของศาสนถาน (Table 1) และภายในพื้นที่นอกเกาะเมืองทางด้านเหนือ (ทุ่งแก้ว – ทุ่งขวัญ) มีจำนวนโบราณสถาน 16 แห่ง ที่ตั้งอยู่บนพื้นที่น้ำท่วมซ้ำซาก โดยเฉพาะบริเวณพื้นที่โซนที่ 5 (พื้นที่เกาะเมืองด้านเหนือ ครอบคลุมคลองสระบัว) ส่วนใหญ่พบองค์ประกอบประเภทของการจัดการภูมิประเทศ เช่น กำแพงกันดิน เนินดิน เนินโบราณสถาน และองค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับการยกระดับอาคารให้สูงขึ้น คือ ฐานไพที จำนวน 5 แห่ง ได้แก่ 1) วัดพระยาแมน, 2) โคกพระยา, 3) วัดจงกลม, 4) วัดพระงาม, และ 5) วัดแค และ กำแพงกันคลื่น

กระแทก 1 แห่งได้แก่ วัดพระยาแมน ตามแผนที่แสดงตำแหน่งโบราณสถานที่ศึกษา (Fig. 2) จะเห็นได้ว่าโบราณสถานที่หลงเหลืออยู่ในพื้นที่น้ำท่วมซ้ำซาก มีการจัดการในระดับสภาพแวดล้อม ภูมิประเทศ และระดับการออกแบบทางสถาปัตยกรรมของอาคาร ซึ่งเป็นองค์ประกอบของระบบป้องกันน้ำท่วมแบบดั้งเดิมโดยสามารถอยู่รอดในสภาวะน้ำท่วมเรื่อยมานับตั้งแต่อดีต และหลงเหลือเป็นหลักฐานเชิงประจักษ์ที่แสดงให้เห็นถึงการอยู่ร่วมกันระหว่างชุมชนและสภาพแวดล้อมทางธรรมชาติ แต่อย่างไรก็ตามสภาพแวดล้อมที่ตั้งของโบราณสถานดังกล่าว ซึ่งอยู่บนพื้นที่ทุ่งโบราณ (ทุ่งแก้ว - ทุ่งขวัญ) ในอำเภอพระนครศรีอยุธยาจังหวัดพระนครศรีอยุธยามีแนวโน้มที่จะลดลงจากการเจริญเติบโตของเมือง และชุมชน ถึงแม้รูปแบบการใช้ประโยชน์ที่ดินส่วนใหญ่เป็นการใช้ประโยชน์ที่ดินประเภทชนบทและเกษตรกรรม และมีบางส่วนบริเวณพื้นที่ติดคลองเมือง (ทิศเหนือของอุทยานประวัติศาสตร์พระนครศรีอยุธยา) เป็นพื้นที่การใช้ประโยชน์ที่ดินประเภทชุมชน แต่จากการสำรวจ และภาพถ่ายทางดาวเทียมพบว่าสภาพแวดล้อมโดยรวมของพื้นที่ศึกษาเริ่มถูกพัฒนาเป็นที่อยู่อาศัยมากขึ้น และมีการเริ่มมีการเกิดขึ้นของหมู่บ้านจัดสรร แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มที่ลดลงของทุ่ง ซึ่งเป็นองค์ประกอบทางกายภาพที่สำคัญของของระบบป้องกันน้ำท่วมแบบดั้งเดิม (Fig. 4)

**Table 1** Number of remaining elements in historic monuments and their locations

| Element / Location | Zone 1 | Zone 2 | Zone 3 | Zone 4 | Zone 5 | Urban area | Rice field area | Repeated flood area |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Elevated basement | 2 | 1 | 2 | 2 | 5 | 8 | 4 | 3 |
| Wave protection wall | | | | | 1 | | 1 | 1 |
| Mound in historic monument | | | 4 | 1 | 4 | 7 | 4 | 5 |
| Retianing wall | 1 | | 2 | | 2 | 2 | 2 | 1 |
| Temple wall | 2 | 4 | 6 | 1 | 6 | 16 | 3 | 5 |
| Ubosot-Wall (Kampaeng Kaeo) | 1 | | 3 | 1 | 4 | 5 | 4 | 5 |
| Phra Ubosot | 2 | 2 | 7 | 1 | 7 | 10 | 9 | 8 |
| Viharn | 7 | 6 | 3 | 1 | 7 | 23 | 1 | 8 |
| Chedi Rai (Pagoda) | 5 | 5 | 5 | 1 | 7 | 19 | 4 | 8 |
| Chedi Phra Than (Main Pagoda) | 4 | 4 | 7 | 1 | 8 | 18 | 6 | 9 |
| Phra Prang | 2 | 1 | 1 | | 2 | 5 | 1 | 2 |
| Other remaining building | 4 | 3 | 1 | 1 | 4 | 10 | 3 | 5 |

การพัฒนา และการขยายตัวของเมืองทั้งในทางการวางแผน วางผัง รวมทั้งสถานการณ์ที่เกิดขึ้นจริง ที่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนรูปแบบการใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่ในพื้นที่รับน้ำตามธรรมชาตินั้นส่งผลให้ ให้ระดับน้ำที่ท่วมซ้ำซากในพื้นที่มีแนวโน้มสูงขึ้นกว่าในอดีตจากการลดลงของทุ่งรับน้ำ ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของระบบป้องกันน้ำท่วมแบบ

ดั้งเดิม นอกจากนี้ยังส่งผลต่อองค์ประกอบแบบดั้งเดิมในโบราณ ทำให้ต้องยกระดับความสูงขึ้นตามระดับน้ำที่ท่วมสูงขึ้น และยังส่งผลต่อองค์ประกอบโบราณสถานที่ไม่สามารถปรับระดับได้ หรือ อยู่ใต้ดินนั้นหายไป

**บทสรุปและข้อเสนอแนะ**

จากการศึกษาและสำรวจพบว่าระบบป้องกันน้ำท่วมแบบดั้งเดิมในโบราณสถานในเมืองประวัติศาสตร์อยุธยา สามารถจำแนกเป็น องค์ประกอบทางสถาปัตยกรรมของโบราณสถานที่หลงเหลือคือ ฐานไพทีและกำแพงกันคลื่นกระแทก และองค์ประกอบทางสภาพแวดล้อมคือ การใช้ประโยชน์จากภูมิประเทศแบบน้ำท่วมถึง ซึ่งปัจจุบันยังคงหลงเหลือและทำหน้าที่เป็นทุ่งนาที่ใช้ปลูกข้าว ซึ่งเป็นรูปแบบการใช้ประโยชน์ที่ดินแบบดั้งเดิม ดังนั้นระบบป้องกันน้ำท่วมแบบดั้งเดิมจึงมีความสอดคล้องกับแนวคิดของการแก้ปัญหาที่อาศัยธรรมชาติเป็นพื้นฐาน และแสดงให้เห็นถึงภูมิปัญญา ความรู้ ที่หลงเหลือผ่านมรดกทางวัฒนธรรมซึ่งสอดคล้องกับระบบการจัดการแบบดั้งเดิมด้านเทคนิคในรูปแบบของทรัพย์สินทางวัฒนธรรม (ปฏิพล, 2563) แต่อย่างไรก็ตามรูปแบบการใช้ประโยชน์ที่ดิน ที่มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงจากพื้นที่เกษตรกรรมสู่พื้นที่อยู่อาศัย ทำให้องค์ประกอบทางสภาพแวดล้อมอย่าง ทุ่งนา ทุ่งรับน้ำ มีปริมาณพื้นที่ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการที่พื้นที่อยู่อาศัยซ้อนทับกับพื้นที่น้ำท่วมซ้ำซาก ดังนั้นการวางแผน ออกแบบผังเมือง และการควบคุม จึงมีความสำคัญต่อการอนุรักษ์ระบบป้องกันน้ำท่วมแบบดั้งเดิมซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของมรดกทางวัฒนธรรม และเป็นการแก้ไขปัญหาของพื้นที่โดยอาศัยธรรมชาติเป็นพื้นฐานตามหลักเกณฑ์สำคัญในการกำหนด และปรับใช้มาตรการการแก้ปัญหาที่อาศัยธรรมชาติเป็นพื้นฐานโดยได้บอกไว้ในเอกสาร คู่มือสำหรับการกำหนดและการนำเอามาตรการการปรับตัวโดยอาศัยระบบนิเวศไปดำเนินการในลุ่มน้ำของประเทศไทย (GIZ, et al., 2022) เพื่อช่วยให้มนุษย์สามารถรับมือกับผลกระทบเชิงลบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศได้ รวมทั้งสร้างความยั่งยืนในด้านสิ่งแวดล้อม สังคมและวัฒนธรรม

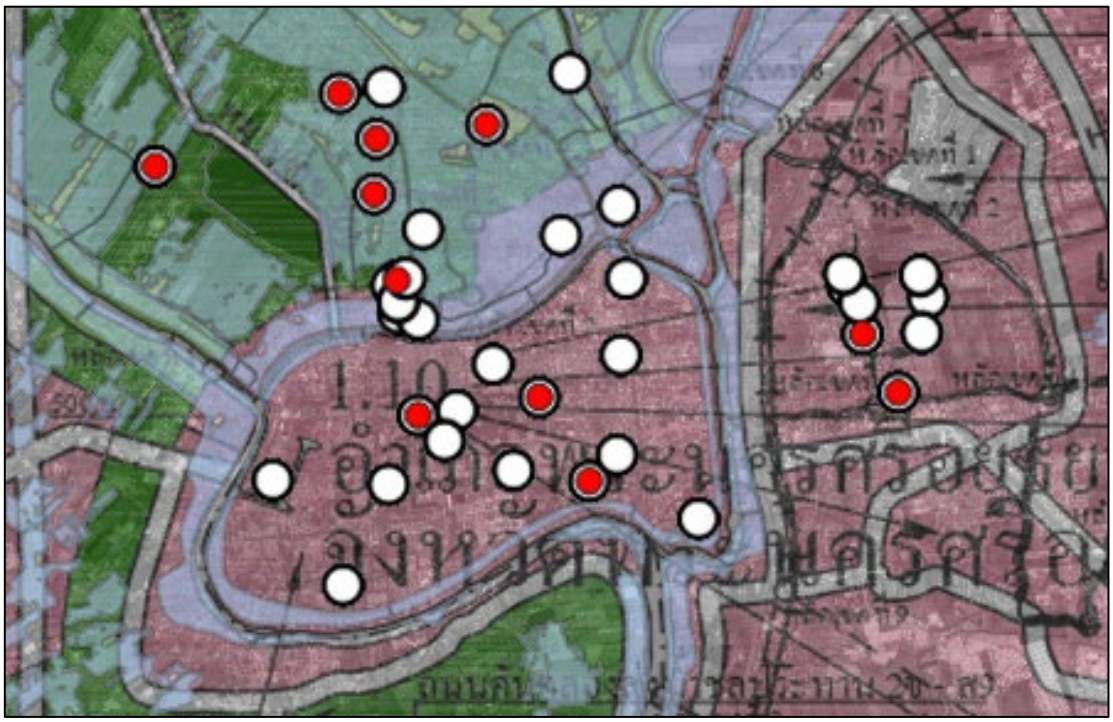


Fig. 4 Historic monuments in repeating flood area and latest city planning in 2017

**เอกสารอ้างอิง**

ปฏิพล ยอดสุรางค์. 2563. แนวทางการอนุรักษ์มรดกทางธรรมชาติและมรดกทางวัฒนธรรมที่เน้นผู้คนเป็นศูนย์กลาง. เจ-ดี : วารสารวิชาการ การออกแบบสภาพแวดล้อม. 2563: 11–17.

พระราชบัญญัติ โบราณสถาน โบราณวัตถุศิลปวัตถุ และพิพิธภัณฑสถานแห่งชาติพ.ศ. 2504 แก้ไขเพิ่มเติม โดยพระราชบัญญัติโบราณสถาน โบราณวัตถุ ศิลปวัตถุ และพิพิธภัณฑสถานแห่งชาติ (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2535. มาตราที่ 4, หน้า 1.

ศรีศักร วัลลิโภดม. 2559. ภูมิวัฒนธรรมกับการจัดการน้ำในภาคประชาคม: กรณีอยุธยาและสุโขทัย. https://lek-prapai.org/home/view.php?id=5041", 30 พฤษภาคม 2566.

สันติเล็ก สุขุม. 2563. วัด-เจดีย์ ในและนอกเกาะกรุงศรีอยุธยา, พิมพ์ครั้งที่ 3. บริษัทมติชนจำกัด (มหาชน). กรุงเทพฯ.

สำนักงานทรัพยากรน้ำแห่งชาติ. 2556. https://nationalthaiwater.onwr.go.th/waterlevel, 30 พฤษภาคม 2566.

GISTDA. 2022. ส่อง..!! 10 ทุ่งเจ้าพระยาตอนล่าง เตรียมรับมือมวลน้ำก้อนใหญ่ ปลายกันยานี้ ...ข้อมูลจากดาวเทียมเผยข้าวเก็บเกี่ยวแล้วกว่า 90 %. https://www.gistda.or.th/news_view.php?n_id=6337&lang=EN, 30 พฤษภาคม 2566.

GIZ, IUNC, ONWR & UNEP-WCMC. 2022. Guidebook for the Design and Implementation of Ecosystem-based Adaptation Measures in River Basins in Thailand. GIZ.

Jopela, A. 2016. Traditional management systems at heritage sites in Africa. Midrand: African World Heritage Fund. https://awhf.net/wp-content/uploads/2016/10/AWHF-English-Book.compressed.pdf, 30 May 2023.

IUCN. 2023. About Nature-based Solutions. https://www.iucn.org/our-work/nature-based-solutions, 30 May 2023.

Tanabe, S. 1977. Historical geography of the canal system in the Chao Phraya river delta. Journal of the Siam Society 1977: 24–26.

Tanabe, S. 1994. Ecology and practical technology peasant farming systems in Thailand. White Lotus Co.,Ltd. Thailand.

UNESCO. 2023. Historic City of Ayutthaya. https://whc.unesco.org/en/list/576/, 30 May 2023.

United Nations. 2023. Implementation of Nature-Based Solutions for Climate Resilient and Flood Risk Management in Pakistan. https://sdgs.un.org/partnerships/implementation-nature-based-solutions-climate-resilient-and-flood-risk-management, 6 November 2023.

Yodsurang, P. 2022. Lost and found: the water-based settlement of the historic city of Ayutthaya. Restauro Archeologico. 2022. 498–501. doi.org/10.36253/rar-14356

Yodsurang, P., Yasufumi, U. 2022. Water-Based settlement and the loss of community water resilience. Interiority 5: 179–196. doi.org/10.7454/in.v5i2.210

# การวิเคราะห์การกระจุกตัวของตลาดในย่านการค้าเก่า กรุงเทพมหานคร

## Analysis of market concentration in the old commercial district of Bangkok

**สุชาวดี นนทรีย์**[a,*], **ปฏิพล ยอดสุรางค์**[b]

Suchawadee Nonsee[a,*], Patiphol Yodsurang[b]

[a]นิสิตปริญญาโท หลักสูตรสถาปัตยกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต (สิ่งแวดล้อมสรรค์สร้าง) คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[b]ภาควิชาสถาปัตยกรรมศาสตร์ คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[a]Master of Architecture (Built Environment), Faculty of Architecture, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

[b]Department of Architecture, Faculty of Architecture, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: suchawadee.n@ku.th

**บทคัดย่อ**

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์การกระจุกตัวของตลาดจากฐานข้อมูลสำรวจเชิงพื้นที่ การวิจัยได้เก็บข้อมูลของตลาดทั่วกรุงเทพฯ จำนวน 704 แห่ง โดยใช้วิธีการเก็บข้อมูลอย่างรวดเร็ว (Rapid survey) ผ่านเครื่องมือ Google Place API ในการระบุพิกัดของตลาด และใช้เทคนิควิเคราะห์เชิงพื้นที่ ผ่านโปรแกรมประยุกต์ QGIS ในการวิเคราะห์การประมาณค่าความหนาแน่น (Kernel Density Estimation) โดยนำข้อมูลข้างต้นมาซ้อนทับเพื่อให้เกิดชั้นของข้อมูล เพื่อหาความสัมพันธ์เชิงสัณฐานของพื้นที่ เช่น ลักษณะการเกาะกลุ่มของตลาดตามตัวแปรที่ใส่ลงไป จากการศึกษาพบว่า ค่าความหนาแน่น >35 ของตลาดกระจุกตัวในพื้นที่เกาะรัตนโกสินทร์ชั้นในครอบคลุมเขตพื้นที่ทั้ง 4 พื้นที่ ได้แก่ เขตพระนคร เขตป้อมปราบศตรูพ่าย เขตสัมพันธวงศ์ และเขตคลองสาน กรุงเทพมหานคร แสดงให้เห็นความซ้อนทับและต่อเนื่องของตลาดที่ยังมีชีวิตอยู่มาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน

**คำสำคัญ**: การประมาณความหนาแน่น, กรุงเทพมหานคร, ตลาด, ย่านการค้าเก่า

**Abstract**

This study aims to analyze market concentration using a spatial survey database. The research collected data on 704 markets throughout Bangkok, utilizing the Rapid Survey method through the Google Place API tool to determine market coordinates. Spatial analysis techniques in the QGIS application were employed to analyze Kernel Density Estimation by overlaying the gathered data to create data layers. The morphological relationship of the area, such as clustering characteristics of the market based on entered variables, was examined. The study revealed that the market density value of >35 is concentrated in the inner Rattanakosin Island area, covering Phra Nakhon District, Pom Prap Sattru Phai District, Samphanthawong District, and Khlong San District in Bangkok. This indicates the overlapping and continuous existence of markets from the past to the present

**Keywords**: Bangkok, Density estimation, Markets, Old commercial district

**คำนำ**

กรุงเทพมหานครเป็นจุดหมายของการท่องเที่ยวที่ได้รับความนิยมจากนักท่องเที่ยวทั้งชาวไทยและต่างประเทศ มีความโดดเด่นด้วยสถานที่ท่องเที่ยวที่หลากหลาย ปัจจัยในการตัดสินใจเลือกจุดหมายปลายทางของนักท่องเที่ยวในยุคปัจจุบัน คือ ความสนใจด้านวัฒนธรรมของท้องถิ่นนั้นๆ อาทิ พื้นที่ในย่านเมืองเก่าที่เป็นแหล่งรวมวัฒนธรรม สถาปัตยกรรมที่มีคุณค่าและวิถีชีวิตที่สำคัญ เป็นต้น ตลาดในเขตเมืองเก่าเป็นตัวเลือกหนึ่งที่สำคัญของการท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรม ที่มีนักท่องเที่ยวเข้ามากระจุกตัวอยู่ปะปนกับการใช้ชีวิตประจำวันของผู้คน เมื่อมีนักท่องเที่ยวได้รับแรงบันดาลใจจากปัจจัยทางวัฒนธรรมที่ก่อกำเนิดความเป็นตลาด และความสนใจในเมือง วิถีชีวิต ประวัติศาสตร์ สถาปัตยกรรม หรือวัฒนธรรมร่วมสมัยก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

บทบาทของตลาดในเขตเมืองเก่าอาจไม่ใช่พื้นที่ประจำวันหรือประจำสัปดาห์ แต่อาจกลายเป็นจุดหมายปลายทางสำหรับที่ผู้คนหรือนักท่องเที่ยวที่ต้องการมาสัมผัสบรรยากาศแปลกใหม่ที่ตนไม่เคยสัมผัส หรือหากตลาดนั้นมีร้านอาหารดัง ซึ่งคนในปัจจุบันสามารถรู้จักได้ผ่านเว็บไซต์หรือพื้นที่อื่นๆ ของตลาดก็อาจจะเกิดความคึกคักตามมา เป็นผลพลอยได้จากการที่ร้านนั้นเป็นจุดหมายปลายทางของผู้คนหรือนักท่องเที่ยว ช่วยเสริมสร้างและคงคุณค่าของความเป็นย่านในพื้นที่นั้นผ่านตลาดก็เป็นได้ (ว่าน และอดิศักดิ์, 2563) ดังนั้น ตลาดในปัจจุบันเป็นองค์ประกอบที่สำคัญอย่างหนึ่งในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจของประเทศ การทำธุรกิจตลาดมีแนวโน้มที่จะเติบโตอย่างต่อเนื่องและขยายตัวไปอย่างกว้างขวาง นอกจากนั้นตลาดยังเป็นพื้นที่ทางสังคม อันประกอบขึ้นมาจากสัณฐานของเมืองและผู้คน มีการซื้อขายแลกเปลี่ยนสินค้าและบริการ รวมถึงข้อมูลข่าวสารต่าง ๆ เป็นพื้นที่ศูนย์กลางที่เกี่ยวข้องกับเศรษฐกิจ สังคม และวัฒนธรรม อีกด้วย

**ความสำคัญของย่านเมืองเก่า**

ย่านเมืองเก่ามีต้นทุนทางประวัติศาสตร์ที่ชัดเจน ผ่านเรื่องราวของผู้คน วัฒนธรรมของเมืองที่ผ่านการเปลี่ยนแปลงมาหลายยุคสมัย ไม่ว่าจะเป็นวัด วัง สถาปัตยกรรมโบราณ รวมไปถึงวิถีอาชีพของชุมชนดั้งเดิม ว่าด้วยการประกาศขอบเขตเมืองเก่านั้น คณะกรรมการอนุรักษ์และพัฒนากรุงรัตนโกสินทร์ และเมืองเก่า ได้ดำเนินพิจารณาเมืองที่มีคุณค่าและศักยภาพตามคุณสมบัติที่กำหนดเป็นนิยามเมืองเก่า เพื่อให้คณะรัฐมนตรีเห็นชอบ โดยได้ประกาศขอบเขตพื้นที่เมืองเก่าอย่างเป็นทางการแล้ว จำนวน 36 เมือง และเมืองเก่าที่สำเร็จลุล่วงในการจัดแผนและผังแม่บทการอนุรักษ์และพัฒนาเมืองเก่าแล้ว จำนวน 22 เมือง ในระหว่างนี้ยังอยู่ในระหว่างการขับเคลื่อนตามกระบวนการ เพื่อเป็นการขับเคลื่อนให้ส่งเสริมการอนุรักษ์และพัฒนาพื้นที่เมืองเก่าอย่างมีประสิทธิภาพต่อไป (สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2564) ทำให้เกิดทัศนียภาพภูมิทัศน์เมืองประวัติศาสตร์ที่แสดงให้เห็นถึงความต่อเนื่องของคุณค่าทางประวัติศาสตร์จนถึงปัจจุบัน

**คุณค่าทางประวัติศาสตร์ และภูมิทัศน์เมืองประวัติศาสตร์**

การรับรู้ความสัมพันธ์เชิงภูมิทัศน์ตลอดจนองค์ประกอบอื่น ๆ ที่รวมกันเป็นโครงสร้างเมือง สังคม วัฒนธรรมประเพณี ระบบเศรษฐกิจ และมิติของมรดกทางวัฒนธรรมในรูปแบบของนามธรรม อัตลักษณ์ ขณะเดียวกันก็ตระหนักถึงการเปลี่ยนแปลงทางสังคมและความหลากหลายทางวัฒนธรรม ที่เป็นปัจจัยที่สำคัญของการอนุรักษ์ภูมิทัศน์เมืองประวัติศาสตร์ ในมิติการพัฒนาทางสังคมและเศรษฐกิจที่มีรากฐานมาจากความสัมพันธ์กันของการจัดการเมืองและทรัพยากรธรรมชาติ โดยเชื่อมประสานระหว่างมรดกจากอดีต ปัจจุบันและอนาคตเข้าด้วยกันได้อย่างมีความเหมาะสมและยั่งยืน (เกรียงไกร, 2559) จากการศึกษาและเข้าใจความเป็นย่านการค้นคว้าเบื้องต้นเพียงอย่างเดียวอาจไม่สามารถที่

จะสะท้อนความหมายและองค์ประกอบ ตลอดจนสัณฐานความเป็นย่านได้อย่างครบถ้วน แต่ยังต้องศึกษาและทำความเข้าใจของโครงสร้าง ทั้งมิติเชิงด้านกายภาพ สังคม เศรษฐกิจ การเมือง ฯลฯ พฤติกรรมจากกลุ่มคนในพื้นที่นั้นประกอบเป็นเรื่องราว เป็นอีกหนึ่งเครื่องมือสำคัญที่สร้างความเข้าใจถึงองค์ประกอบของความสัมพันธ์ ความหมาย และระบบย่านที่เชื่อมโยงและเป็นเหตุเป็นผลซึ่งกันและกัน ช่วยเติมเต็มความเข้าใจไม่ใช่เพียงว่าย่านคืออะไร แต่ย่านสามารถบอกอะไรได้บ้าง แสดงดัง Fig. 1 (ชนม์ชนิกานต์, 2564)

ย่านท่าเตียน เป็นชุมชนริมแม่น้ำเจ้าพระยาที่มีประวัติศาสตร์ 500 ปี พื้นที่นี้ประกอบด้วย ‘วัด วัง ตลาด’ ท่าเตียนนอกจากมีความเก่าแก่แล้วยังเป็นที่ที่มีความรุ่งเรืองทางเศรษฐกิจและการขนส่งที่สำคัญ ในฐานะสถานการค้าและแหล่งชุมชนชาวจีน (วลัยลักษณ์, 2561) ปัจจุบันย่านท่าเตียนเป็นทั้งตลาดและสถานที่ท่องเที่ยวที่มีชื่อเสียงและได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก ย่านชุมชนทางทิศเหนือนั้นมีตลาดบางลำพูเป็นศูนย์กลางและเป็นชุมชนที่มีการอยู่อาศัยหลากหลายกลุ่มชาติพันธุ์ ถือเป็นตลาดริมน้ำและท่าน้ำเพื่อการคมนาคม เป็นแหล่งขนถ่ายและแลกเปลี่ยนสินค้า พืชผักผลไม้จากย่านฝั่งธนบุรีและนนทบุรีตลอดจนพื้นที่สวนที่อยู่ไกลออกไปทางฝั่งตะวันตกของแม่น้ำเจ้าพระยาก่อนจะพัฒนากลายเป็นตลาดบก (วลัยลักษณ์, 2561) ใกล้กับตรอกเฟื่องทองที่มีทางออกไปยังถนนราชบพิธฯ บริเวณนั้นเรียกกันว่า “ตรอกหม้อ” ซึ่งถือว่าเป็นตลาดสดแห่งสุดท้ายในย่านเมืองเก่า (วลัยลักษณ์, 2561) ปัจจุบันย่านตรอกเฟื่องทองและตรอกวิสูตรกลายเป็นย่านธุรกิจที่สืบเนื่องมาจากพื้นที่ดั้งเดิมที่มีการทำทองคำเปลวและรูปพรรณ

ส่วนการค้าที่ย่านวังบูรพาซบเซาไปเพราะหมดยุคของโรงภาพยนตร์และห้างสรรพสินค้าแบบเดิม ทำให้ร้านค้าทั่วบริเวณนี้กิจการค่อนข้างซบเซาจนไม่อาจเทียบกับยุครุ่งเรืองได้แต่อย่างใด นับว่าเป็นความรุ่งเรืองของยุคสมัยสมบูรณาญาสิทธิราชย์มาจนถึงหลังสมัยเปลี่ยนแปลงการปกครอง และในยุคสมัยที่เกิดสงครามเวียดนามตลอดจนชีวิตความเป็นอยู่ของวัยรุ่นเยาวชน และผู้คนในสังคมทั้งหมดได้รับอิทธิพลทางวัฒนธรรมจากอเมริกันอย่างเต็มที่ย่านวังบูรพานั้นเป็นประจักษ์พยานของการเปลี่ยนทางสังคมได้อย่างเห็นชัดที่สุดแห่งหนึ่ง (วลัยลักษณ์, 2561) อย่างไรก็ตามภูมิทัศน์เมืองประวัติทางศาสตร์ที่ยังคงแสดงให้เห็นถึงความเจริญของย่านการค้าแห่งนี้ยังคงมีให้เห็นได้จากอาคาร “ห้างไนติงเกล-โอลิมปิค” ที่มีอายุมานานมากกว่า 70 ปี ที่ยังคงเปิดกิจการอยู่

สำหรับ ย่านสำเพ็งและเยาวราช เป็นย่านที่ชาวจีนที่เข้ามาอยู่อาศัยในย่านสำเพ็งนั้นเกาะกลุ่มกันเป็นกลุ่ม ๆ โดยสร้างศาลเจ้าเฉพาะตนเองเป็นหลัก ย่านสำเพ็งจึงมิใช่มีแต่เพียงกลุ่มคนจีนเท่านั้น แต่เป็นศูนย์กลางการค้าขายที่นำพาพ่อค้าต่างกลุ่มชาติพันธุ์มาค้าขายและอยู่อาศัย จนกลายเป็นพื้นที่ทางเศรษฐกิจตั้งแต่เริ่มสร้างกรุงฯ จนถึงปัจจุบัน (วลัยลักษณ์, 2561) การท่องเที่ยวช่วยให้ชุมชนการค้าแห่งนี้คึกคักเป็นพิเศษทั้งนักท่องเที่ยวชาวไทยและชาวต่างประเทศเป็นแหล่งที่แสดงออกถึงอัตลักษณ์ของชุมชนชาวย่านผ่านวิถีชีวิตและงานสถาปัตยกรรม

ย่านกะดีจีน-คลองสาน เป็นอีกย่านเก่าแก่ริมแม่น้ำเจ้าพระยา ราชธานีสมัยกรุงธนบุรี ที่มีหลักฐานการตั้งถิ่นฐานและการทำการค้าของผู้คนจากหลากหลายชาติพันธุ์เกิดเป็นสังคมพหุวัฒนธรรม (นวพร, 2566) ด้วยต้นทุนทางวัฒนธรรมและประวัติศาสตร์ ทำให้ย่านแห่งนี้เต็มไปด้วยแหล่งเรียนรู้ด้านวัฒนธรรม ประเพณี ภูมิปัญญา และเรื่องเล่าที่มาจากหลักฐานความเป็นอยู่ของผู้คนในอดีต

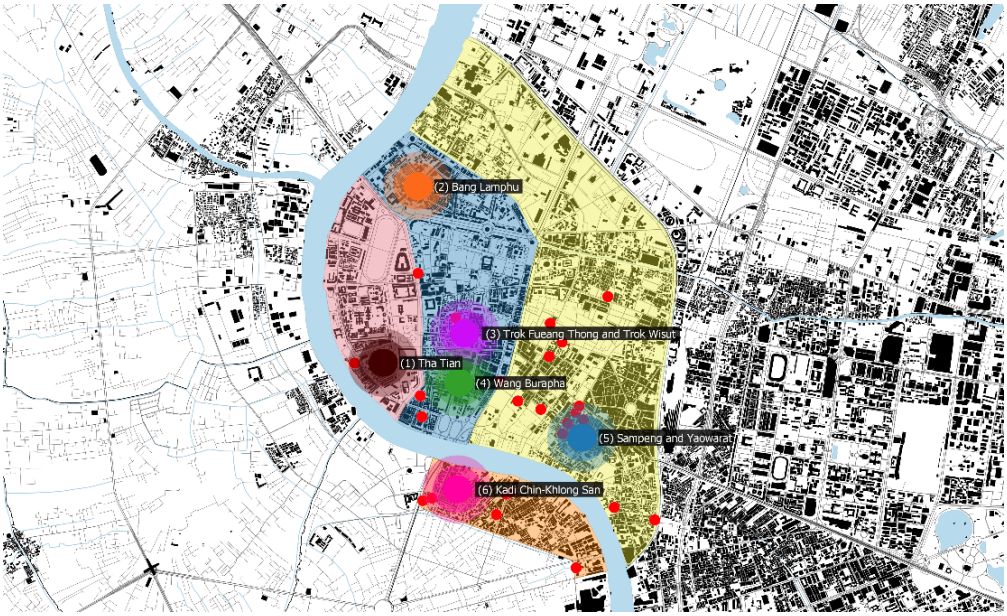



Fig. 1 Modified map of Bangkok around 1931 showing study areas of various old districts

ตลาดมีบทบาทในวัฒนธรรมใหม่ เป็นสถานที่พบปะและเรียนรู้เกี่ยวกับวัฒนธรรมใหม่ๆ อีกทั้งยังเป็นศูนย์กลางการค้าและการแลกเปลี่ยนทางเศรษฐกิจ และสามารถสนับสนุนเศรษฐกิจในท้องถิ่นและให้การเข้าถึงสินค้าราคาถูกและสินค้ารีไซเคิล โดยยังสามารถทำหน้าที่เป็นแหล่งท่องเที่ยวทางวัฒนธรรมและการท่องเที่ยวที่สำคัญอีกด้วย (Helene and Niklas, 2013) ตลาดเป็นพื้นที่ทางสังคมที่มีส่วนสำคัญต่อสิ่งทอที่มีชีวิตชีวาของเมืองประวัติศาสตร์ ตลาดเหล่านี้ทำหน้าที่เป็นมากกว่าพื้นที่เชิงพาณิชย์ พวกเขายังมีปรากฏการณ์ทางวัฒนธรรมที่สะท้อนถึงประวัติศาสตร์อันยาวนาน ความหลากหลาย และพลวัตของเมือง (ภูเกริก, 2554) ตลาดที่มักเกิดขึ้นในเมืองประวัติศาสตร์ โดยมากจะเป็นการดำรงอยู่ต่อ ๆ กันมา

นั่นทำให้เห็นว่าตลาดไม่ได้เป็นเพียงหน่วยงานทางเศรษฐกิจเท่านั้น แต่ยังทำหน้าที่เป็นเวทีทางวัฒนธรรมที่ย่านชุมชนที่หลากหลายมาพบกัน สินค้ามากมายสะท้อนให้เห็นถึงประวัติศาสตร์และวัฒนธรรมอันยาวนานของย่านและเมืองที่ได้รับอิทธิพลจากภูมิหลังทางวัฒนธรรมที่หลากหลาย ปฏิสัมพันธ์ระหว่างผู้ขายและลูกค้า ส่งเสริมความรู้สึกของชุมชน ส่งเสริมการทำงานร่วมกันทางสังคมและการแลกเปลี่ยนวัฒนธรรม นอกจากนี้ตลาดมักจะกลายเป็นพื้นที่สำหรับการเฉลิมฉลองประเพณี งานเทศกาล และการแสดงออกทางศิลปะในท้องถิ่น ด้วยเหตุนี้ จึงทำให้สถานะของพวกเขาแข็งแกร่งขึ้นในฐานะองค์ประกอบสำคัญของวัฒนธรรมการมีชีวิตของเมืองประวัติศาสตร์ (Ativetin, 2012) แนวคิดเรื่องมรดกวัฒนธรรมที่มีชีวิต ตลาดนัดมีบทบาทสำคัญในการทำความเข้าใจมรดกวัฒนธรรมร่วมสมัย ในขณะที่ยังคงรักษาองค์ประกอบทางประวัติศาสตร์ไว้ด้วย สิ่งเหล่านี้ทำให้เห็นว่ามีพัฒนาการอย่างต่อเนื่องซึ่งสะท้อนถึงรสนิยมและความชอบที่เปลี่ยนแปลงไปของประชาชนในท้องถิ่น การปรับตัวนี้ก่อให้เกิดความยืดหยุ่นและความยั่งยืนของตลาดเนื่องจากยังคงเป็นองค์ประกอบที่เกี่ยวข้องและสำคัญของโครงสร้างต่าง ๆ ในเมืองประวัติศาสตร์

**ข้อมูลและวิธีการ**

*เครื่องมือในการวิจัย*

ใช้เครื่องมือ Google Places API ซึ่งเป็นบริการของ Google Maps Platform ที่สามารถจัดหาข้อมูลตำแหน่งโดยส่งคืนข้อมูลตำแหน่งที่มีการจัดรูปแบบและรูปภาพภาพที่เกี่ยวกับสถานที่ตั้งทางภูมิศาสตร์ หรือจุดสนใจที่โดดเด่น

(Google Maps Platform, 2023) และใช้โปรแกรม QGIS ซึ่งเป็นโปรแกรมประยุกต์ด้านระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ สามารถวิเคราะห์และแก้ไขสารสนเทศเชิงพื้นที่ รวมถึงการสร้าง วิเคราะห์และส่งออกแผนที่ในรูปแบบกราฟิกได้

*การเก็บรวบรวมข้อมูล*

กลุ่มตัวอย่างตลาดทั่วกรุงเทพฯ จำนวน 704 แห่ง ที่เป็นผลลัพธ์มาจากการระบุพิกัดของตลาด แสดงดัง Fig. 2 ถูกรวบรวมผ่านการสำรวจที่จะถูกระบุโดยใช้ Google Places API เครื่องมือนี้จะสามารถระบุที่ตั้ง ความนิยม ประเภทกิจกรรม เวลาทำการ และความคิดเห็นของผู้บริโภคจะถูกรวบรวมโดยตรงจากกลุ่มตลาดที่ระบุ (ปฏิพล และคณะ, 2566) ซึ่งช่วยในการรับข้อมูลภาพกว้างจากกลุ่มตัวอย่างที่เป็นตัวแทนที่จะสะท้อนการวิเคราะห์ประชากรทั้งหมด ทำให้การสำรวจสามารถจัดการได้และมีประสิทธิภาพมากขึ้น

*การวิเคราะห์ข้อมูล*

การวิเคราะห์หาพื้นที่ที่มีการกระจุกตัวของตลาดทั่วกรุงเทพฯ โดยใช้วิธีการคาดประเมินความหนาแน่นเชิงพื้นที่แบบเคอร์เนล (Kernel Density Estimation) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์เชิงพื้นที่บนระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ (GIS) (ปุณยนุช และณัฐพงศ์, 2562) บนโปรแกรมประยุกต์ QGIS จากการวิเคราะห์สรุปได้ว่า พื้นที่ที่มีความหนาแน่นของตลาดในพื้นที่กรุงเทพมหานคร ในงานวิจัยครั้งนี้ พบว่ามีทั้งหมด 4 พื้นที่ ครอบคลุมเขตเกาะรัตนโกสินทร์ชั้นใน ได้แก่ 1. เขตพระนคร 2. เขตป้อมปราบศตรูพ่าย 3. เขตสัมพันธวงศ์ และ 4. เขตคลองสาน แสดงดัง Fig. 3

**ผลและผลวิจารณ์ผลการทดลอง**

ผลการสำรวจโดยใช้ Google Places API เป็นเครื่องมือในการระบุพิกัดที่สำคัญ พบตลาดโดยใช้คำสำคัญ คือ “ตลาด” “ตลาดนัด” “ตลาดสด” ทั้งหมด 704 แห่ง ในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานคร Fig. 2 ลักษณะทางกายภาพของตลาดในพื้นที่กรุงเทพมหานครมักจะเป็นแหล่งท่องเที่ยวซึ่งมาจากการพัฒนารูปแบบเพื่อให้ตอบสนองความต้องการและการใช้ชีวิตของผู้คนมากยิ่งขึ้นตามยุคสมัยที่เปลี่ยนไป การกระจุกตัวของตลาดในภาพของกรุงเทพมหานครพบว่ามักกระจุกตัวที่ย่านเมืองเก่า เป็นรูปแบบของตลาดบกที่เป็นตลาดสด มักจะมีลักษณะเป็นที่พักอาศัยและร้านขายของด้วย เพื่อตอบสนองวิถีชีวิตของชาวชุมชนที่เป็นย่านตลาดในสมัยอดีต

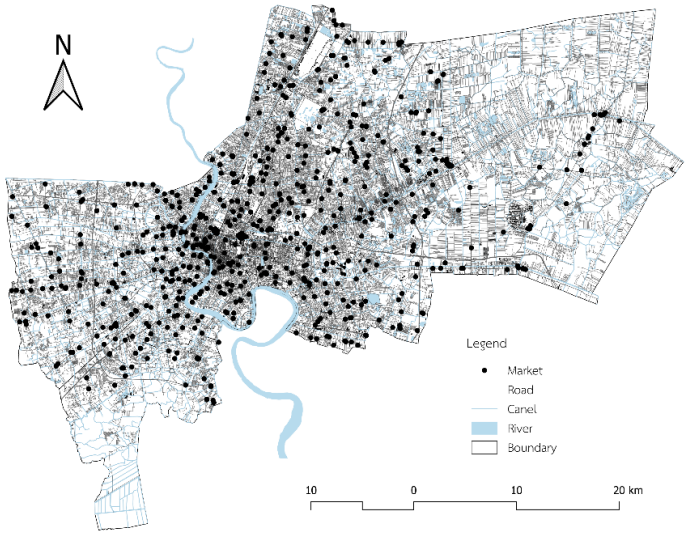



Fig. 2 Map showing the location of markets throughout Bangkok

จากการวิเคราะห์แผนที่ข้างต้น Fig. 2 พบว่าตลาดนั้นไม่ได้กระจายอย่างสม่ำเสมอทั่วกรุงเทพฯ แต่จะหนาแน่นและเบาบางในบางเขต อาจพิจารณาได้จากความหนาแน่นของประชากร (เกียรติ และคณะ, 2525) โดยประเด็นหลักสำคัญของการกระจายตัวของตลาดนั้นอาจสัมพันธ์กับเรื่องของการตั้งถิ่นฐานของคนกรุงเทพฯ ในสมัยก่อน จากการซ้อนทับกันกับแผนที่แสดงย่านเก่า Fig. 3 พบว่าย่านการค้าในเขตเมืองเก่า ประกอบด้วย ย่านท่าเตียน ย่านบางลำพู ย่านตรอกเฟื่องทองและตรอกวิสูตร ย่านวังบูรพา ย่านสำเพ็งและเยาวราช และย่านกะดีจีน-คลองสาน แม้ว่าลักษณะทางเศรษฐกิจสังคมร่วมสมัยจะมีความแตกต่างจากเดิมไปบ้าง แต่ยังคงอัตลักษณ์คุณค่าของภูมิทัศน์เมืองประวัติศาสตร์ย่านการค้าแบบดั้งเดิมไว้อยู่

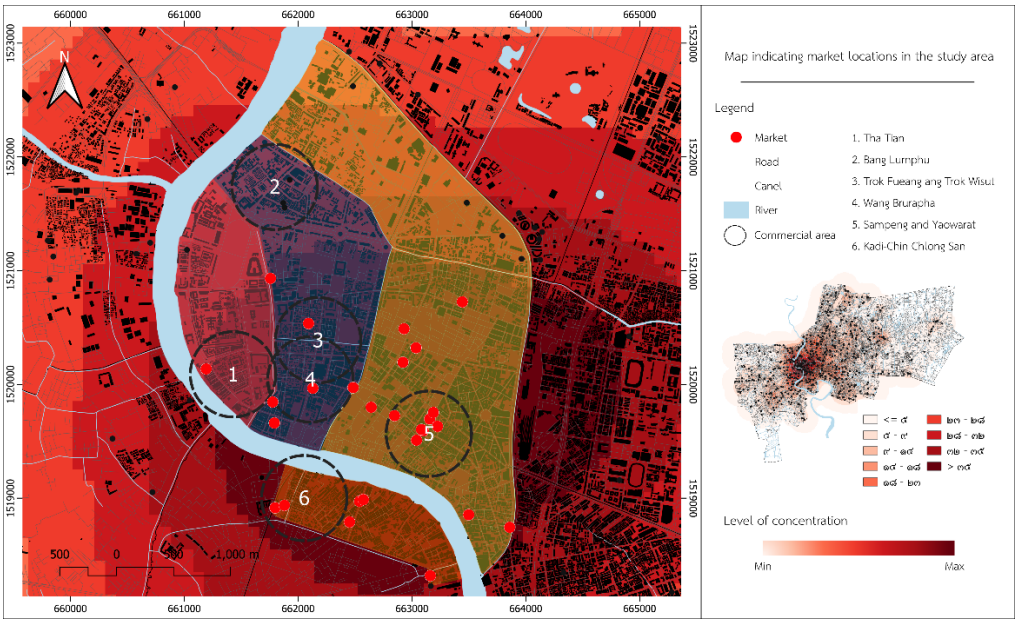



**Fig. 3** Map showing the location of the flea market in the study area

**Table 1** The table shows the number of markets separated by area

| Number | Zone/Area | Flea market | Fresh market | Total |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Phra Nakhon District | 3 | 4 | 7 |
| 2 | Pom Prap Sattru Phai District | 2 | 2 | 4 |
| 3 | Samphanthawong District | 5 | 5 | 10 |
| 4 | Khlong San District | 6 | 0 | 6 |
| | Total | 16 | 11 | 27 |

ตลาดมีความสัมพันธ์กับวิถีชุมชนมาตั้งแต่อดีตในฐานะที่เป็นแหล่งแลกเปลี่ยนสินค้าอุปโภค บริโภคในชีวิตประจำวันถึงแม้ว่ารูปแบบวิถีชุมชนจะเปลี่ยนแปลงไปจากอดีต แต่ในฐานะที่ตลาดเป็นองค์ประกอบพื้นฐานของพื้นที่ชุมชน ทุกชุมชนจึงต้องมีตลาด จะเห็นได้ว่าร่องรอยการพัฒนาการของตลาดนัดในสังคมไทยที่มีมาแต่อดีต นั้นเป็นกิจกรรมการซื้อขายแลกเปลี่ยนสินค้าในแต่ละชุมชน อาจจัดขึ้นในช่วงเวลาใดเวลาหนึ่ง ซึ่งจะเป็นที่รับรู้ของชุมชนนั้น ๆ (ทรงสิริ, 2556) ดังนั้น จากการวิเคราะห์การกระจุกตัวของตลาดดังแผนที่ Fig. 3 พบว่าตลาดมีการกระจุกตัวหนาแน่นอยู่ในเขตพระนคร จำนวน 7 แห่ง ได้แก่ (1) ตลาดท่าเตียน (2) ปากคลองตลาด (3) ตลาดตรอกหม้อ (4) ตลาดส่งเสริม

การเกษตร (5) ตลาดหลังกระทรวง (6) ตลาดพาหุรัด และ (7) ตลาดยอดพิมาน เขตป้อมปราบศัตรูพ่าย จำนวน 4 แห่ง ได้แก่ (1) ตลาดสดแม้นศรี (2) คลองถมเซ็นเตอร์ (ตลาดคลองถม) (3) ตลาดวรจักร และ (4) Electricity market เขตสัมพันธวงศ์ จำนวน 10 แห่ง ได้แก่ (1) ตลาดสำเพ็ง (2) Morning Market ตลาดเช้ามืด (3) ตลาดกลางคืนไชน่าทาวน์ (4) ตลาดกรมภูธเรศ (5) พูนเจริญ (6) ตลาดน้อย (7) ตลาดนัดวันอาทิตย์ (8) ตลาดเก่าเล่งบ๊วยเอี๊ยะ (9) ตลาดตรอกอิสรานุภาพ และ (10) ตลาดเก่าเยาวราช และเขตคลองสาน จำนวน 6 แห่ง ได้แก่ (1) ตลาดพญาไม้ (2) ตลาดท่าดินแดง (3) ตลาดนัดท่าดินแดง (4) ตลาดTheZonePlaza (5) บุรินทร์มาร์เก็ต Burin Market และ (6) Saphan Cool–โครงการตลาดสะพานคู่ ดังที่จำแนกในตารางข้างต้น Table 1 ซึ่งตลาดทั้งหมดที่กล่าวมานั้นล้วนเป็นตลาดในยุคที่รุ่งเรืองมาก่อนในอดีต โดยเฉพาะตลาดท่าเตียนที่มีต้นทุนทางประวัติศาสตร์อย่างชัดเจนทั้งความรุ่งเรืองทางเศรษฐกิจและการขนส่งที่สำคัญ จนถึงปัจจุบันแม้ว่าภายหลังตลาดจะมีการปรับเปลี่ยนไปจากเดิมตามสภาพสังคมและยุคสมัย

## สรุป

ตลาดร่วมสมัยที่ซ้อนทับกันยังดำเนินอยู่ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน เราจะเห็นพื้นที่ที่มีความต่อเนื่องของคุณค่าของเมืองเก่าในทางด้านเศรษฐกิจร่วมสมัยอย่างเข้มข้นกระจุกอยู่ในย่านท่าเตียน ซึ่งเหมือนกับที่ พิมชนก ณ พัทลุง (2565) กล่าวไว้ว่า ถึงแม้บทบาทและความสำคัญของย่านท่าเตียนและชุมชนโดยรอบจะลดลงตามการเติบโตของบ้านเมืองเศรษฐกิจ หรือจำนวนที่เพิ่มมากขึ้นของตลาดและห้างสรรพสินค้า ทำให้ท่าเตียนอาจไม่ได้ทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางของการค้าขายและการคมนาคมอย่างเมื่อก่อนแล้ว แต่ในปัจจุบันท่าเตียนก็ยังคงเป็นย่านที่มีเอกลักษณ์จากการผสมผสานกลิ่นอายของอดีตและปัจจุบันที่ยังคงอยู่คู่กัน จากร้านค้าเป็นคาเฟ่ จากตลาดที่ขายของนับชนิดไม่ถ้วนเป็นแหล่งอาหารทะเลแห้ง กล่าวได้ว่าชุมชนแห่งนี้ได้เติบโตและเปลี่ยนแปลงตามบริบทสังคมมาในทุกยุคสมัยและเป็นชุมชนที่มีชีวิตโดยแท้จริง

## เอกสารอ้างอิง

เกรียงไกร เกิดศิริ. 2559. บทความแปล “ข้อแนะนำเกี่ยวกับภูมิทัศน์เมืองประวัติศาสตร์”. วารสารหน้าจั่ว สถาปัตยกรรม การออกแบบ และสภาพแวดล้อม. 30: 27–36.

เกียรติ จิวะกุล. 2525. ตลาดในกรุงเทพฯ การขยายตัวและพัฒนาการ. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.

ชนม์ชนิกานต์ ศศิชานนท์. 2564. ทฤษฎีพื้นฐานที่นักออกแบบ (เมือง) ควรรู้ เพื่อทำความเข้าใจย่านและเมือง (understanding urbanism). https://theurbanis.com/public-realm/10/11/2021/5508, 1 พฤศจิกายน 2566.

ทรงสิริ วิชิรานนท์. 2556. พัฒนาการตลาดนัด. วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร, 7: 159–171. doi.org/10.14456/jrmutp.2013.31

นวพร เต็งประเสริฐ. 2566. รู้จักเมือง รู้จักย่านกะดีจีน-คลองสาน. https://theurbanis.com/insight/19/01/2023/13997, 7 ธันวาคม 2566.

ปฏิพล ยอดสุรางค์, อรช กระแสอินทร์, ดลฤทัย เจียรกุล, ขนิษฐา สุขสง. 2566. การวางแผนเส้นทางท่องเที่ยวฐานทรัพยากรสิ่งแวดล้อมสรรค์สร้างในเมืองรองริมแม่น้ำ. วารสารการจัดการสิ่งแวดล้อม, 19: 66–89. doi.org/10.14456/jem.2023.4

ปุณยนุช แสงวัฒนะ, ณัฐพงศ์ พันธ์น้อย. 2562. การกระจุกตัวของโรงงานอุตสาหกรรมขนาดเล็กและผลกระทบต่อพื้นที่โดยรอบในเขตชั้นในของกรุงเทพมหานคร. สาระศาสตร์, 2: 271–284.

พิมชนก ณ พัทลุง. 2565. ตึกแถวย่านท่าเตียนหลักฐานของการพัฒนาเมืองที่มียังชีวิต. https://dsignsomething.com/2022/03/17/tha-tian-urbanview,

ภูเกริก บัวสอน. 2554. การฟื้นฟูตลาดเก่าในเมืองไทย. Veridian E-Journal 4: 37–55.

มหาวิทยาลัยศิลปากร คณะสถาปัตกรรมศาสตร์. 2564. คู่มือแนวทางขับเคลื่อนการอนุรักษ์และพัฒนากรุงรัตนโกสินทร์ แผนผังแม่บทการอนุรักษ์และพัฒนากรุงรัตนโกสินทร์เพื่อการขับเคลื่อนแผนไปสู่การดำเนินการของหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพฯ.

วลัยลักษณ์ ทรงศิริ. 2561. "เมืองประวัติศาสตร์กรุงเทพฯ" และการเดินทางย้อนรอยการจัดการเมืองประวัติศาสตร์ที่ไม่มีชีวิต(๓).https://lekprapai.org/home/view.php?id=5387&fbclid=IwAR2uYCp2yvrgO71jLjYhXmGMPlWIZ4l7szseOOcRyvecvL_2KDy0x6m9Ulg, 30 ตุลาคม 2566.

ว่าน ฉันทวิลาสวงศ์ และ อดิศักดิ์ กันทะเมืองลี้. 2563. มองย่านผ่านตลาด: ศูนย์รวมของเมืองและบทบาทที่เปลี่ยนไป. https://theurbanis.com/insight/01/09/2020/2538, 11 ธันวาคม 2566.

Ativetin, T. 2012. Community flea markets and manner of consumption in urban context. Fine Arts International Journal 15: 92–101. https://ejournals.swu.ac.th/index.php/jfofa/article/view/2074

Google Maps Platform. 2023. Places API. https://developers.google.com/maps/documentation/places/web-service/overview?hl=th, 19 January 2024.

Helene, B., Niklas, S. 2013. Flea markets as drivers of urban culture, commerce and sustainable cities. SIEF2013: Circulation. https://nomadit.co.uk/conference/sief2013/paper/16854, 8 December 2023.

# การจัดลำดับความสำคัญของการปรับปรุงโครงการอ่างเก็บน้ำขนาดกลาง กรณีศึกษา: อ่างเก็บน้ำในจังหวัดลำปาง

## Prioritization of medium reservoir project improvement a case study of reservoir in Lampang province

**กิ่งกมล สิงห์ทอง***, **พิพัฒน์ สอนวงษ์**, **ชวเลข วณิชเวทิน**

Gingkamon Singthong*, Piphat Sornworng, Chavalek Vanichavetin

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Civill Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: gingkamon.jo@ku.th

**บทคัดย่อ**

การศึกษาวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจัดลำดับการปรับปรุงโครงการอ่างเก็บน้ำชลประทานขนาดกลางทั้ง 30 แห่ง ในเขตจังหวัดลำปาง โดยใช้การวิเคราะห์การตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์ ด้วยวิธีกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytical Hierarchy Process: AHP) และวิธีเทคนิคการเรียงลำดับตามอุดมคติ (TOPSIS) ซึ่งพิจารณาจากเกณฑ์หลักทั้ง 3 ด้าน ได้แก่ (1) ด้านสภาพทางกายภาพของอาคารหัวงาน (2) ด้านประสิทธิภาพของระบบส่งน้ำ และ (3) ด้านบริหารจัดการน้ำต้นทุน โดยประกอบไปด้วยเกณฑ์รองจำนวน 6 เกณฑ์ ภายใต้การสอบถามผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 15 ท่าน โดยผลการจัดลำดับด้วยวิธี AHP พบว่าโครงการอ่างเก็บน้ำที่ควรปรับปรุง 3 ลำดับแรก คือ โครงการอ่างเก็บน้ำแม่เลียงพัฒนา (0.424) โครงการอ่างเก็บน้ำแม่ต๋ำน้อย (0.406) และโครงการอ่างเก็บน้ำแม่สัน (0.388) ตามลำดับ ส่วนการจัดลำดับด้วยวิธี TOPSIS พบว่าโครงการอ่างเก็บน้ำที่ควรปรับปรุง 3 ลำดับแรก คือ โครงการอ่างเก็บน้ำแม่เลียงพัฒนา (0.566) โครงการอ่างเก็บน้ำแม่ไพร (0.515) โครงการอ่างเก็บน้ำแม่อ้อน 2 (0.510) ตามลำดับ

**คำสำคัญ**: กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์, โครงการอ่างเก็บน้ำ, เทคนิคการเรียงลำดับตามอุดมคติ

**Abstract**

This study aims to prioritize the improvement of 30 irrigation reservoir projects in Lampang. Multi criteria decision analysis through Analytic Hierarchy Process (AHP) and Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution (TOPSIS) were performed based on 3 main criteria, including: (1) The physical conditions of structures (2) The efficiency of the irrigation distribution systems and (3) The management of water budgets. The AHP and TOPSIS analysis also include 6 sub-criteria which are designed by interviewing 15 experts. AHP identified the top three projects for improvement as Mae Liang Pattana Project (0.424), Mae Tam Noi Project (0.406), and Mae San Project (0.388), respectively. TOPSIS analysis ranked the leading projects as Mae Liang Pattana Project (0.566), Mae Phrai Project (0.515), and Mae On 2 Project (0.510), consecutively.

**Keywords**: Analytic Hierarchy Process, Reservoir Projects, TOPSIS

**คำนำ**

โครงการอ่างเก็บน้ำขนาดกลางของกรมชลประทานในเขตจังหวัดลำปาง มีการดำเนินการก่อสร้างและบริหารจัดการน้ำในพื้นที่มาเป็นเวลานาน โดยเริ่มก่อสร้างตั้งแต่ปี พ.ศ.2514 และดำเนินการก่อสร้างเพิ่มเติมเรื่อยมา ปัจจุบันมีทั้งหมด 30 โครงการ จากการใช้งานเป็นระยะเวลานาน จึงส่งผลให้อาคารหัวงาน ระบบส่งน้ำ และระบบระบายน้ำของโครงการ อยู่ในสภาพชำรุดทรุดโทรม ถึงแม้ว่าจะมีการดูแลบำรุงรักษาตลอดระยะเวลาก็ตาม รวมทั้งสภาพความต้องการใช้น้ำ สภาพปัญหาอุทกภัยที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ทำให้อาคารหัวงานของโครงการเดิมไม่สามารถรองรับ และแก้ไขปัญหาในปัจจุบันได้ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องปรับปรุงโครงการอ่างเก็บน้ำ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการส่งน้ำชลประทาน และบรรเทาปัญหาอุทกภัยให้สอดคล้องกับสภาพสังคม การเพาะปลูก และกิจกรรมการใช้น้ำในปัจจุบัน

ดังนั้นในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะศึกษาการจัดลำดับการปรับปรุงโครงการอ่างเก็บน้ำชลประทานขนาดกลางในเขตจังหวัดลำปาง เพื่อหาค่าน้ำหนักความสำคัญของหลักเกณฑ์ และจัดลำดับความสำคัญของโครงการอ่างเก็บน้ำเพื่อเข้าสู่กระบวนการปรับปรุงต่อไป

**อุปกรณ์และวิธีการ**

*รวบรวมและกำหนดหลักเกณฑ์ที่ใช้ในการพิจารณา*

จากการรวบรวมข้อมูลพื้นฐาน ข้อมูลการวิเคราะห์ความปลอดภัยเขื่อน ข้อมูลแผนงานการปรับปรุงโครงการอ่างเก็บน้ำ ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง และการสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญทำให้ทราบถึงสภาพปัญหาของโครงการอ่างเก็บน้ำทั้ง 30 แห่ง ในเขตจังหวัดลำปาง และสามารถกำหนดหลักเกณฑ์ที่มีผลต่อการจัดลำดับการปรับปรุงโครงการอ่างเก็บน้ำได้ 3 หลักเกณฑ์ ได้แก่ (1) ด้านสภาพทางกายภาพของอาคารหัวงาน ซึ่งเป็นข้อมูลการประเมินสภาพหัวงาน (Condition Index, CI) ของกรมชลประทานที่บ่งบอกถึงความมั่นคงแข็งแรงของหัวงานอาคาร (2) ด้านประสิทธิภาพของระบบส่งน้ำ เป็นการรวบรวมปัญหาและแผนงานการปรับปรุงระบบส่งน้ำของทั้ง 30 โครงการ เพื่อปรับปรุงและพัฒนาระบบส่งน้ำให้มีประสิทธิภาพ และ (3) ด้านบริหารจัดการน้ำต้นทุน บ่งบอกถึงการบริหารจัดสรรน้ำที่มีอยู่ในอ่างเก็บน้ำกับพื้นที่เพาะปลูก โดยทั้ง 3 หลักเกณฑ์ ประกอบไปด้วยหลักเกณฑ์ย่อยที่เป็นอิสระต่อกันแสดงดัง Fig.1 และตารางแสดงข้อมูลของโครงการอ่างเก็บน้ำทั้ง 30 โครงการแสดงดัง Table 1

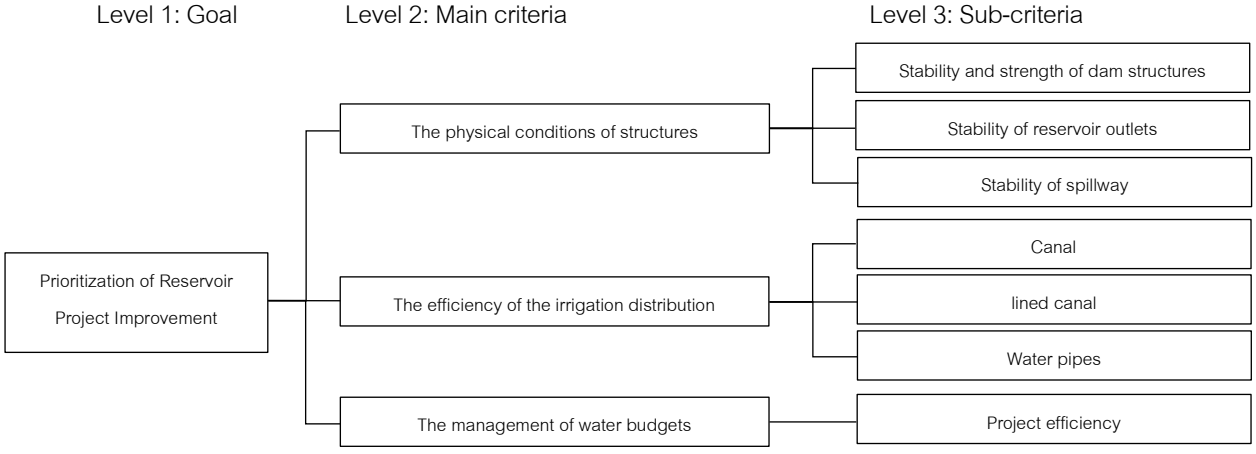



**Fig. 1** AHP hierarchy for Prioritization of Reservoir Project Improvement

**Table 1** Reservoir project information

| Reservoir project | Condition Index, CI (%) | | | Improving the irrigation distribution systems (location) | | | Ratio of Maximum cultivation area to Appropriate space according to capacity (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | dam structures | outlets | spillway | Canal | lined canal | Water pipes | |
| Mae Fa Reservoir | 0.97 | 1.00 | 1.00 | 1 | 1 | 0 | 0.01 |
| Mae Sai Kham Reservoir | 0.66 | 0.71 | 0.69 | 1 | 0 | 1 | 1.87 |
| Huai Luang Wang Wua Reservoir | 0.63 | 0.79 | 0.74 | 0 | 0 | 3 | 1.99 |
| Huai Mae Nueng Reservoir | 0.65 | 0.71 | 0.65 | 1 | 2 | 2 | 1.82 |
| Mae Khom Reservoir | 0.64 | 0.83 | 0.65 | 1 | 2 | 3 | 1.51 |
| Mae Tam Noi Reservoir | 0.69 | 0.82 | 0.71 | 0 | 1 | 3 | 0.11 |
| Mae Fueang Reservoir | 0.73 | 0.81 | 0.50 | 2 | 1 | 4 | 2.34 |
| Mae Phrai Reservoir | 0.67 | 0.79 | 0.70 | 3 | 8 | 0 | 1.78 |
| Mae San Reservoir | 0.69 | 0.77 | 0.57 | 3 | 0 | 0 | 0.58 |
| Mae Pon Reservoir | 0.66 | 0.78 | 0.80 | 1 | 0 | 0 | 1.63 |
| Huai Mae Yao Reservoir | 0.68 | 0.77 | 0.72 | 0 | 3 | 0 | 0.56 |
| Huai Kiang Reservoir | 0.83 | 0.89 | 0.67 | 0 | 5 | 0 | 1.25 |
| Mae Tha Reservoir | 0.65 | 0.70 | 0.57 | 0 | 0 | 1 | 1.18 |
| Mae Thi Reservoir | 0.86 | 0.87 | 0.60 | 1 | 1 | 1 | 1.08 |
| Mae Wa Reservoir | 0.62 | 0.87 | 0.79 | 1 | 2 | 0 | 0.65 |
| Mae Hai Reservoir | 0.67 | 0.82 | 0.83 | 3 | 3 | 0 | 1.55 |
| Mae Kied Reservoir | 0.70 | 0.86 | 0.71 | 1 | 0 | 3 | 1.84 |
| Mae Liang Phatthana Reservoir | 0.65 | 0.86 | 0.90 | 3 | 6 | 0 | 0.65 |
| Lower Mae Tam Reservoi | 0.67 | 0.88 | 0.85 | 4 | 0 | 1 | 1.76 |
| Mae Than Reservoir | 0.67 | 0.82 | 0.83 | 1 | 1 | 1 | 0.51 |
| Huai Luang Reservoir | 0.68 | 0.73 | 0.74 | 0 | 0 | 1 | 1.37 |
| Huai Samai Reservoir | 0.85 | 0.83 | 0.87 | 0 | 3 | 1 | 1.30 |
| Mae Tok Reservoir | 0.67 | 0.82 | 0.83 | 1 | 2 | 0 | 1.45 |
| Mae Riang Reservoir | 0.67 | 0.88 | 0.83 | 6 | 3 | 1 | 2.58 |
| Mae Aab Reservoir | 0.86 | 0.79 | 0.76 | 1 | 2 | 0 | 0.99 |
| Mae Phrik Reservoir | 0.90 | 0.81 | 0.85 | 1 | 0 | 0 | 0.22 |
| Mae Phrik Pha Wing Chu Reservoir | 0.98 | 1.00 | 0.95 | 0 | 0 | 0 | 0.69 |
| Mae Lo Hak Reservoir | 0.62 | 0.70 | 0.59 | 3 | 0 | 0 | 1.01 |
| Mae Ngon Reservoir | 0.67 | 0.88 | 0.83 | 1 | 2 | 0 | 1.65 |
| Mae On 2 Reservoir | 0.80 | 0.91 | 0.92 | 5 | 0 | 1 | 0.97 |

*การคัดเลือกกลุ่มตัวอย่างและผู้เชี่ยวชาญ*

ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง คือ บุคลากรที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการปรับปรุงโครงการอ่างเก็บน้ำของกรมชลประทาน จำนวน 15 ท่าน โดยผู้ตอบแบบสอบถาม คือ ผู้เชี่ยวชาญ ผู้บริหาร และผู้ออกแบบ ซึ่งล้วนเป็นเป็นผู้มีประสบการณ์

*การสร้างแบบสอบถาม*

การสร้างแบบสอบถามจะถูกจัดทำขึ้นหลังจากการพิจารณาหลักเกณฑ์ที่ได้จากการสัมภาษณ์และคำแนะนำของผู้เชี่ยวชาญ โดยการสร้างแบบสอบถามตามแนวทางของกระบวนการ AHP จะต้องใช้หลักการเปรียบเทียบเป็นคู่ๆ เพื่อให้ผู้ตัดสินใจเปรียบเทียบความสำคัญของเกณฑ์ 2 เกณฑ์

*การเก็บรวบรวมข้อมูลการตัดสินใจของผู้เชี่ยวชาญ*

งานวิจัยนี้เก็บข้อมูลแบบสอบถามจากผู้เชี่ยวชาญจำนวน 15 ท่าน โดยให้ผู้เชี่ยวชาญเปรียบเทียบความสำคัญของเกณฑ์ 2 เกณฑ์ ซึ่งมีหลักการ คือ เปลี่ยนความรู้สึก (นามธรรม) ที่มีความคิดเห็นว่าปัจจัยตัวหนึ่งสำคัญมากกว่าหรือน้อยกว่าอีกตัวหนึ่งให้ออกมาอยู่ในรูปแบบของคะแนน (รูปธรรม) โดยใช้ตัวเลขแสดงดัง Table 2

**Table 2** Ranking of weightiness

| Intensity of importance | Definition | Explanation |
|---|---|---|
| 1 | Equally Important | Two criteria contribute equally to the objective |
| 3 | Moderately More Important | Experience and judgment slightly favor one activity over another |
| 5 | Strongly More Important | Experience and judgment strongly favor one activity over another |
| 7 | Very Strongly More Important | The dominance of one element has been demonstrated in practice |
| 9 | Extremely More Important | Dominance of the highest degree |
| 2, 4, 6, 8 | Intermediate Judgment Value | When compromise is needed |

*เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บข้อมูล และวิเคราะห์ข้อมูล*

ผู้ทำการศึกษาได้คัดเลือกโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลคือ Microsoft Excel ในการวิเคราะห์ข้อมูลจากการตัดสินใจจากข้อมูลที่ได้จากวิธีการใช้แบบสอบถามของกลุ่มผู้เชี่ยวชาญ ด้วยวิธี AHP เพื่อหาค่าถ่วงน้ำหนักของหลักเกณฑ์ และเปรียบเทียบการจัดลำดับด้วยวิธี AHP และวิธี TOPSIS

1. กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytical Hierarchy Process, AHP) เป็นกระบวนการที่ใช้ในการวินิจฉัยเพื่อช่วยในการตัดสินใจประเด็นปัญหาที่มีความซับซ้อนให้ดำเนินการง่ายขึ้น โดยทำการแบ่งองค์ประกอบของปัญหาทั้งที่เป็นออกเป็นส่วนๆ แล้วสร้างรูปแบบโครงสร้างของปัญหาให้อยู่ในรูปของแผนภูมิลำดับชั้น เพื่อมาวิเคราะห์หาทางเลือกที่ดีที่สุด โดยการเปรียบเทียบทางเลือกที่ละคู่ (Pair wise) โดยกำหนดค่าของการเปรียบเทียบออกมาในรูปของตัวเลข จากนั้นนำข้อมูลที่ได้จากแบบสอบถามมาคำนวณในรูปแบบเมทริกซ์ เพื่อหาค่าน้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์และตรวจสอบความสอดคล้องของข้อมูล (Consistency Ratio, C.R.) ก่อนจะนำค่าน้ำหนักมาใช้เพื่อจัดลำดับความสำคัญต่อไป

2. วิธีเทคนิคการเรียงลำดับตามอุดมคติ (Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution : TOPSIS) TOPSIS เป็นวิธีที่นิยมใช้ในการตัดสินใจเลือกทางเลือกที่ดีที่สุด โดยมีหลักการ คือ การหาทางเลือกที่

มีระยะทางใกล้เคียงกับค่าที่ดีที่สุดของแต่ละเกณฑ์ และมีระยะที่ห่างไกลจากค่าที่แย่ที่สุดในแต่ละเกณฑ์ไปพร้อมๆ กัน เพื่อหาดัชนีผสมของทางเลือกแต่ละทางเลือกซึ่งเรียกว่าค่าสัมประสิทธิ์ที่ใกล้แนวคิดในอุดมคติที่สุด (Closeness Coefficient : CC) ดังนั้นทางเลือกที่มีค่า CC สูงที่สุดจึงเป็นทางเลือกที่มีสมรรถนะโดยรวมใกล้เคียงกับค่าที่ดีที่สุด รวมทั้งห่างไกลจากค่าที่แย่ที่สุดในภาพรวม

**ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง**

*1. ผลการวิเคราะห์ค่าน้ำหนักของหลักเกณฑ์ด้วยวิธี AHP*

จากการวิเคราะห์แบบสอบถามของผู้เชี่ยวชาญจำนวน 15 ท่าน ด้วยวิธี AHP พบว่าค่าน้ำหนักของแต่ละเกณฑ์มีความสำคัญแตกต่างกันแสดงดัง Table 3 โดยเกณฑ์หลักที่มีผลต่อการปรับปรุงโครงการอ่างเก็บน้ำมากที่สุด คือ ด้านสภาพทางกายภาพของอาคารหัวงาน (0.443) รองลงมา คือ ด้านประสิทธิภาพของระบบส่งน้ำ (0.346) และด้านบริหารจัดการน้ำต้นทุน (0.215) ซึ่งจากการตรวจสอบค่าความสอดคล้องของข้อมูล (Consistency Ratio, C.R.) พบว่าค่า C.R. ไม่เกิน 10% หมายความว่าข้อมูลการตัดสินใจที่ได้จากการสอบถามผู้เชี่ยวชาญมีความสอดคล้องและอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้แสดงดัง Table 3

**Table 3** Weights of each under all decision criteria

| Main criteria | Weighted | Sub-criteria | Weighted | C.R. |
|---|---|---|---|---|
| The physical conditions of structures [A] | 0.443 | • Stability and strength of dam structures [A1] | 0.241 | 0.000 |
| | | • Stability of reservoir outlets [A2] | 0.084 | |
| | | • Stability of spillway [A3] | 0.118 | |
| The efficiency of the irrigation distribution [B] | 0.346 | • Canal [B1] | 0.153 | 0.001 |
| | | • lined canal [B2] | 0.105 | |
| | | • Water pipes [B3] | 0.083 | |
| The management of water budgets [C] | 0.215 | • Project efficiency [C1] | 0.215 | 0.001 |

*2. ผลการวิเคราะห์การปรับปรุงโครงการอ่างเก็บน้ำด้วยวิธี AHP และวิธี TOPSIS*

จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี AHP พบว่าโครงการอ่างเก็บน้ำที่ควรปรับปรุง 3 ลำดับแรก คือ โครงการอ่างเก็บน้ำแม่เลียงพัฒนา (0.432) โครงการอ่างเก็บน้ำแม่ต๋ำน้อย (0.419) และโครงการอ่างเก็บน้ำแม่สัน (0.370) ตามลำดับ แสดงดัง Table 4 แต่การวิเคราะห์การจัดลำดับด้วยวิธี TOPSIS พบว่าโครงการอ่างเก็บน้ำที่ควรปรับปรุง 3 ลำดับแรก คือ โครงการอ่างเก็บน้ำแม่เลียงพัฒนา (0.586) โครงการอ่างเก็บน้ำแม่ไพร (0.522) โครงการอ่างเก็บน้ำแม่อ้อน 2 (0.501) ตามลำดับ แสดงดัง Table 5 ซึ่งจากการเปรียบเทียบการจัดลำดับด้วยวิธีทั้ง 2 นั้น จะเห็นได้ว่ามีเพียงโครงการอ่างเก็บน้ำแม่เลียงพัฒนา และโครงการอ่างเก็บน้ำแม่ปอนที่มีผลการวิเคราะห์ที่สอดคล้องกันแสดงดัง Table 6

**Table 4** Analysis of reservoir project improvements using the AHP method

| Reservoir project | The physical conditions of structures [A] (0.443) | The efficiency of the irrigation distribution [B] (0.346) | The management of water budgets [C] (0.215) | Total |
|---|---|---|---|---|
| Mae Liang Phatthana Reservoir | 0.107 | 0.155 | 0.161 | 0.424 |
| Mae Tam Noi Reservoir | 0.124 | 0.076 | 0.206 | 0.406 |
| Mae San Reservoir | 0.144 | 0.077 | 0.167 | 0.388 |
| Mae Phrai Reservoir | 0.132 | 0.182 | 0.066 | 0.381 |
| Mae Lo Hak Reservoir | 0.165 | 0.077 | 0.131 | 0.373 |
| Mae On 2 Reservoir | 0.065 | 0.148 | 0.134 | 0.347 |
| Mae Than Reservoir | 0.114 | 0.060 | 0.173 | 0.346 |
| Mae Khom Reservoir | 0.142 | 0.114 | 0.089 | 0.345 |
| Mae Wa Reservoir | 0.127 | 0.052 | 0.161 | 0.340 |
| Huai Mae Yao Reservoir | 0.129 | 0.039 | 0.168 | 0.336 |
| Mae Riang Reservoir | 0.108 | 0.213 | 0.000 | 0.322 |
| Mae Hai Reservoir | 0.114 | 0.116 | 0.086 | 0.316 |
| Mae Fueang Reservoir | 0.140 | 0.148 | 0.020 | 0.307 |
| Huai Mae Nueng Reservoir | 0.149 | 0.094 | 0.064 | 0.306 |
| Mae Tha Reservoir | 0.162 | 0.021 | 0.116 | 0.299 |
| Lower Mae Tam Reservoir | 0.106 | 0.123 | 0.068 | 0.297 |
| Mae Phrik Reservoir | 0.057 | 0.026 | 0.196 | 0.279 |
| Mae Thi Reservoir | 0.092 | 0.060 | 0.125 | 0.277 |
| Mae Kied Reservoir | 0.120 | 0.088 | 0.061 | 0.269 |
| Mae Aab Reservoir | 0.080 | 0.052 | 0.132 | 0.264 |
| Huai Kiang Reservoir | 0.088 | 0.066 | 0.110 | 0.264 |
| Mae Tok Reservoir | 0.114 | 0.052 | 0.094 | 0.260 |
| Mae Fa Reservoir | 0.008 | 0.039 | 0.214 | 0.260 |
| Huai Luang Reservoir | 0.132 | 0.021 | 0.101 | 0.253 |
| Huai Luang Wang Wua Reservoir | 0.139 | 0.063 | 0.049 | 0.251 |
| Mae Sai Kham Reservoir | 0.142 | 0.046 | 0.059 | 0.248 |
| Mae Ngon Reservoir | 0.108 | 0.052 | 0.078 | 0.238 |
| Huai Samai Reservoir | 0.066 | 0.060 | 0.107 | 0.234 |
| Mae Pon Reservoir | 0.125 | 0.026 | 0.079 | 0.230 |
| Mae Phrik Pha Wing Chu Reservoir | 0.011 | 0.000 | 0.158 | 0.169 |

**Table 5** Analysis of reservoir project improvements using the TOPSIS method

| Reservoir project | Distance from $A^+$ | Distance from $A^-$ | Closeness Coefficient ($CC_i$) |
|---|---|---|---|
| Mae Liang Phatthana Reservoir | 0.062 | 0.081 | 0.566 |
| Mae Phrai Reservoir | 0.074 | 0.078 | 0.515 |
| Mae On 2 Reservoir | 0.076 | 0.079 | 0.510 |
| Mae Riang Reservoir | 0.084 | 0.084 | 0.500 |
| Mae San Reservoir | 0.085 | 0.069 | 0.448 |
| Mae Tam Noi Reservoir | 0.095 | 0.075 | 0.440 |
| Mae Fa Reservoir | 0.097 | 0.069 | 0.415 |
| Mae Lo Hak Reservoir | 0.087 | 0.062 | 0.415 |
| Mae Hai Reservoir | 0.080 | 0.056 | 0.412 |
| Lower Mae Tam Reservoir | 0.087 | 0.060 | 0.408 |
| Mae Than Reservoir | 0.091 | 0.061 | 0.399 |
| Mae Wa Reservoir | 0.092 | 0.059 | 0.391 |
| Mae Phrik Reservoir | 0.100 | 0.064 | 0.388 |
| Huai Mae Yao Reservoir | 0.097 | 0.061 | 0.385 |
| Mae Khom Reservoir | 0.089 | 0.052 | 0.366 |
| Mae Fueang Reservoir | 0.097 | 0.054 | 0.358 |
| Huai Kiang Reservoir | 0.098 | 0.053 | 0.352 |
| Mae Aab Reservoir | 0.095 | 0.048 | 0.334 |
| Mae Thi Reservoir | 0.095 | 0.045 | 0.323 |
| Mae Phrik Pha Wing Chu Reservoir | 0.112 | 0.050 | 0.308 |
| Huai Mae Nueng Reservoir | 0.095 | 0.042 | 0.305 |
| Huai Samai Reservoir | 0.100 | 0.043 | 0.302 |
| Mae Kied Reservoir | 0.102 | 0.043 | 0.297 |
| Mae Tha Reservoir | 0.108 | 0.045 | 0.294 |
| Mae Tok Reservoir | 0.098 | 0.041 | 0.293 |
| Mae Ngon Reservoir | 0.100 | 0.037 | 0.270 |
| Huai Luang Wang Wua Reservoir | 0.112 | 0.041 | 0.269 |
| Huai Luang Reservoir | 0.110 | 0.039 | 0.262 |
| Mae Pon Reservoir | 0.107 | 0.035 | 0.245 |
| Mae Sai Kham Reservoir | 0.106 | 0.033 | 0.236 |

## สรุป

การศึกษาวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจัดลำดับความสำคัญของการปรับปรุงโครงการอ่างเก็บน้ำขนาดกลางทั้ง 30 แห่งในเขตจังหวัดลำปาง โดยใช้วิธี AHP มาเปรียบเทียบกับวิธี TOPSIS ภายใต้ข้อมูลและหลักเกณฑ์เดียวกันได้ผลแสดงดัง Table 5 จากผลการวิเคราะห์พบว่า โครงการอ่างเก็บน้ำแม่เลียงพัฒนาเป็นโครงการที่ควรปรับปรุงเป็นลำดับแรก ส่วนลำดับที่ควรปรับปรุงรองลงมามีการจัดลำดับที่แตกต่างกันค่อนข้างมาก แสดงให้เห็นว่าผลการวิเคราะห์การจัดลำดับของ

ทั้ง 2 วิธี มีความสอดคล้องกันเพียงแค่ลำดับที่ 1 และลำดับที่ 29 แต่ลำดับอื่นๆ จะมีผลการวิเคราะห์การจัดลำดับที่แตกต่างกันออกไป

เนื่องจากกระบวนการวิเคราะห์ของทั้ง 2 วิธีมีความแตกต่างกัน โดยที่การวิเคราะห์ด้วยวิธี AHP เป็นกระบวนการตัดสินใจที่นำเอาความรู้สึก หรือความคิดของผู้ตัดสินใจมาให้ค่าน้ำหนักเป็นตัวเลข โดยเปรียบเทียบหลักเกณฑ์ที่ละคู่ เพื่อหาค่าน้ำหนักของหลักเกณฑ์ และตรวจสอบค่าความสอดคล้องของข้อมูลก่อนนำไปจัดลำดับทางเลือก แต่การวิเคราะห์ด้วยวิธี TOPSIS นั้น หลังจากได้ค่าถ่วงน้ำหนักแล้ว จะต้องกำหนดค่าในอุดมคติเชิงบวกและเชิงลบ เพื่อคำนวณค่าเข้าใกล้จุดอุดมคติแล้วจึงนำผลไปจัดลำดับทางเลือก ดังนั้นควรใช้วิธี TOPSIS มาจัดลำดับเพื่อปรับปรุงโครงการอ่างเก็บน้ำจึงจะมีความน่าเชื่อถือมากกว่า

อย่างไรก็ตามงานวิจัยในครั้งนี้มีเป้าหมายเพื่อจัดลำดับความสำคัญของการปรับปรุงโครงการอ่างเก็บน้ำกรมชลประทานขนาดกลางในเขตจังหวัดลำปาง หากจะจัดลำดับการปรับปรุงโครงการอ่างเก็บน้ำในพื้นที่ที่ต่างออกไป ควรจะพิจารณาหลักเกณฑ์ที่ใช้ในการจัดลำดับให้เหมาะสมกับสภาพปัญหาของพื้นที่โครงการนั้น และควรเพิ่มกระบวนการวิเคราะห์การจัดลำดับเพื่อให้ผลการจัดลำดับมีความชัดเจนมากยิ่งขึ้น

**Table 6** Comparing the ranking of reservoir project improvements using the AHP method and the TOPSIS method

| Reservoir project | AHP | | TOPSIS | |
|---|---|---|---|---|
| | Value | Rank | Value | Rank |
| Mae Liang Phatthana Reservoir | 0.424 | 1 | 0.566 | 1 |
| Mae Tam Noi Reservoir | 0.406 | 2 | 0.440 | 6 |
| Mae San Reservoir | 0.388 | 3 | 0.448 | 5 |
| Mae Phrai Reservoir | 0.381 | 4 | 0.515 | 2 |
| Mae Lo Hak Reservoir | 0.373 | 5 | 0.415 | 8 |
| Mae Than Reservoir | 0.347 | 6 | 0.510 | 3 |
| Mae On 2 Reservoir | 0.346 | 7 | 0.399 | 11 |
| Mae Wa Reservoir | 0.345 | 8 | 0.366 | 15 |
| Mae Khom Reservoir | 0.340 | 9 | 0.391 | 12 |
| Huai Mae Yao Reservoir | 0.336 | 10 | 0.385 | 14 |
| Mae Hai Reservoir | 0.322 | 11 | 0.500 | 4 |
| Mae Riang Reservoir | 0.316 | 12 | 0.412 | 9 |
| Huai Mae Nueng Reservoir | 0.307 | 13 | 0.358 | 16 |
| Maetha Reservoir | 0.306 | 14 | 0.305 | 21 |
| Mae Fueang Reservoir | 0.299 | 15 | 0.294 | 24 |
| Lower Mae Tam Reservoi | 0.297 | 16 | 0.408 | 10 |
| Mae Phrik Reservoir | 0.279 | 17 | 0.388 | 13 |
| Mae Thi Reservoir | 0.277 | 18 | 0.323 | 19 |
| Mae Fa Reservoir | 0.269 | 19 | 0.297 | 23 |
| Mae Aab Reservoir | 0.264 | 20 | 0.334 | 18 |

**Table 6** (Continued) Comparing the ranking of reservoir project improvements using the AHP method and the TOPSIS method

| Reservoir project | AHP | | TOPSIS | |
|---|---|---|---|---|
| | Value | Rank | Value | Rank |
| Huai Kiang Reservoir | 0.264 | 21 | 0.352 | 17 |
| Mae Tok Reservoir | 0.260 | 22 | 0.293 | 25 |
| Mae Fa Reservoir | 0.260 | 23 | 0.415 | 7 |
| Huai Luang Reservoir | 0.253 | 24 | 0.262 | 28 |
| Huai Luang Wang Wua Reservoir | 0.251 | 25 | 0.269 | 27 |
| Mae Sai Kham Reservoir | 0.248 | 26 | 0.236 | 30 |
| Mae Ngon Reservoir | 0.238 | 27 | 0.270 | 26 |
| Huai Samai Reservoir | 0.234 | 28 | 0.302 | 22 |
| Mae Pon Reservoir | 0.230 | 29 | 0.245 | 29 |
| Mae Phrik Pha Wing Chu Reservoir | 0.169 | 30 | 0.308 | 20 |

**กิตติกรรมประกาศ**

ขอขอบคุณทุกคนที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับงานวิจัยชิ้นนี้ ขอขอบคุณหน่วยงานต่าง ๆ และสำนักบริหารโครงการ กรมชลประทานที่ให้ความช่วยเหลือ และให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย ทำให้งานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

**เอกสารอ้างอิง**

กรมชลประทาน. 2554. คู่มือการประเมินสภาพเขื่อนโดยวิธีดัชนีสภาพ (Dam Assessment Manual by Condition Index Method).กรมชลประทาน สามเสน, กรุงเทพฯ.

ธนกฤต อรัญดร. 2563. การจัดลำดับความสำคัญของโครงการลงทุนก่อสร้างและปรับปรุงถนนในจังหวัดสงขลา, น.115. ใน วารสารวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ. ปีที่ 14 ฉบับที่ 1.

กรมชลประทาน. 2552. มาตรฐานการศึกษาเพื่อวางแผนพัฒนาลุ่มน้ำและโครงการพัฒนาแหล่งน้ำ ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 2. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรมชลประทาน, กรุงเทพฯ.

กษิดิ์เดช ชีตา. 2563 การจัดลำดับความสำคัญของอ่างเก็บน้ำโดยใช้กระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

# การเลือกรูปแบบอาคารชลประทานในการวางโครงการพัฒนาแหล่งน้ำ กรณีศึกษา: ลุ่มน้ำห้วยดู่ อำเภอนครไทย จังหวัดพิษณุโลก

Alternative irrigation structure to project planning of water resources development: Huai Du River Basin, Nakhon Thai district, Phitsanulok province case study

**เสียงซอ แจ้งบำรุง***, **พิพัฒน์ สอนวงษ์**, **ชวเลข วณิชเวทิน**

Siangsor Jangbumrung*, Piphat Sornworng, Chavalek Vanichavetin

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail: siangsor.ja@ku.th

**บทคัดย่อ**

การศึกษาวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อคัดเลือกรูปแบบอาคารชลประทานที่มีความเหมาะสมในการวางโครงการพัฒนาแหล่งน้ำ ซึ่งประกอบไปด้วยอาคารชลประทาน 3 รูปแบบได้แก่ อ่างเก็บน้ำ ประตูระบายน้ำ และฝาย กรณีศึกษาลุ่มน้ำห้วยดู่ อำเภอนครไทย จังหวัดพิษณุโลก โดยใช้การวิเคราะห์การตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์ ด้วยวิธีกระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น (Analytical Hierarchy Process: AHP) และการรวมแบบถ่วงน้ำหนักอย่างง่าย (Simple Additive Weighting : SAW) ซึ่งพิจารณาจากเกณฑ์หลักทั้ง 4 ด้าน ได้แก่ (1) ด้านวิศวกรรม (2) ด้านเศรษฐศาสตร์ (3) ด้านสังคม และ (4) ด้านสิ่งแวดล้อม โดยประกอบไปด้วยเกณฑ์รองจำนวน 9 เกณฑ์ ภายใต้การสอบถามผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 15 ท่าน โดยผลจากการวิเคราะห์การจัดลำดับด้วยวิธี AHP พบว่าอาคารชลประทานที่เหมาะสมในพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยดู่ คือ อ่างเก็บน้ำ (65.779) ประตูระบายน้ำ (62.928) และฝาย (46.307) ตามลำดับ ส่วนการวิเคราะห์การจัดลำดับด้วยวิธี SAW พบว่าอาคารชลประทานที่เหมาะสมในพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยดู่ คือ อ่างเก็บน้ำ (76.725) ประตูระบายน้ำ (72.250) และฝาย (60.250) ตามลำดับ

**คำสำคัญ**: กระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น, การรวมแบบถ่วงน้ำหนักอย่างง่าย, อาคารชลประทาน

**Abstract**

The aim of this study is to select suitable irrigation structure for project planning of water resources development. Three structure types include: reservoirs, regulator gates, and weirs were considered for the Huai Du River Basin in Nakhon Thai District, Phitsanulok Province. Multi criteria decision analysis through Analytic Hierarchy Process (AHP) And Simple Additive Weighting (SAW) were performed based on four main criteria including: (1) Engineering (2) Economy (3) Society and (4) Environment. Apart from the four main criteria, 9 sub-criteria are based on interviewing 15 experts. According to AHP ranking analysis, the appropriate irrigation structure in the Huai Du Basin is the reservoir (65.779), regulator gates (62.928), and weir (46.307), respectively. Similarly, the SAW sequencing analysis also found that the appropriate irrigation structure in the Huai Du Basin are the reservoir (76.725), regulator gates (72.250), and weir (60.250).

**Keywords**: Analytic Hierarchy Process, Irrigation Structure, Simple Additive Weighting

**คำนำ**

การพัฒนาแหล่งน้ำเป็นโครงการที่มีวงจรและกระบวนการหลายขั้นตอน เช่น การวางแผนและจัดเตรียมโครงการ การก่อสร้าง การบริหารจัดการโครงการ การบำรุงรักษาโครงการ การประเมินผลโครงการ และการปรับปรุงโครงการ ซึ่งจะเห็นว่าทุกกระบวนการมีความเกี่ยวข้องสัมพันธ์กัน และมีลักษณะเป็นวงจรของการดำเนินการ การวางโครงการจัดเป็นกระบวนการต้น ๆ ของวงจรของการพัฒนาแหล่งน้ำ ซึ่งถือว่าอยู่ในช่วงของการวางแผนและจัดเตรียมโครงการ เป็นกระบวนการที่มีความสำคัญในการที่จะทำให้ทราบถึงความเป็นไปได้ ลักษณะที่เหมาะสมและผลกระทบของโครงการในมิติต่าง ๆ ก่อนที่จะตัดสินใจดำเนินการในขั้นต่อไป

ปัญหาทรัพยากรน้ำโดยเฉพาะการขาดแคลนน้ำและน้ำท่วมมีแนวทางและวิธีการในการแก้ไขปัญหาหลายรูปแบบทั้งการใช้สิ่งก่อสร้างและไม่ใช้สิ่งก่อสร้าง ซึ่งผู้วางโครงการพัฒนาแหล่งน้ำเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว จำเป็นที่ต้องจัดลำดับความสำคัญของโครงการ รวมไปถึงการคัดเลือกโครงการที่มีความเหมาะสมที่สุดมาดำเนินการ ลุ่มน้ำห้วยดู่ ซึ่งเป็นลุ่มน้ำขนาดเล็กตั้งอยู่ในเขตในอำเภอนครไทย จังหวัดพิษณุโลก ซึ่งเป็นพื้นที่หนึ่งที่ประสบปัญหาภัยแล้งและน้ำท่วมเป็นประจำ ที่ผ่านมากรมชลประทานได้เคยศึกษาวางโครงการเพื่อแก้ปัญหาทรัพยากรน้ำในพื้นที่โดยการวางแผนให้ก่อสร้างอ่างเก็บน้ำห้วยดู่เป็นอ่างเก็บน้ำขนาดกลาง มีความจุ 1.848 ล้านลูกบาศก์เมตร อย่างไรก็ตามยังมีประเด็นคำถามและข้อทักท้วงจากหลายภาคส่วนว่า ยังมีรูปแบบและแนวทางการแก้ไขปัญหาแบบอื่นๆในลุ่มน้ำห้วยดู่ที่มีความเหมาะสมกว่าอ่างเก็บน้ำหรือไม่

ในการเลือกรูปแบบอาคารหัวงานโครงการเพื่อนำเข้าสู่กระบวนการวางโครงการพัฒนาแหล่งน้ำในปัจจุบันเลือกโดย การร้องขอของประชนซึ่งขาดความเข้าใจในรูปแบบของอาคารหัวงานโครงการ และอาศัยดุลยพินิจของผู้อำนวยการส่วนเป็นหลัก ซึ่งไม่มีหลักเกณฑ์ที่ชัดเจนและแน่นอน ผู้วิจัยจึงได้เล็งเห็นถึงปัญหาและความสำคัญดังกล่าวและทำการดำเนินการศึกษาโดยมุ่งเน้นการกำหนดหลักเกณฑ์ในการจัดลำดับในการเลือกรูปแบบอาคารหัวงานโครงการ หาค่าน้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์ และจัดลำดับความสำคัญของรูปแบบอาคารหัวงานโครงการ โดยอาศัยปัจจัยหลายด้าน ได้แก่ ด้านวิศวกรรม ด้านเศรษฐกิจ ด้านสังคม และด้านสิ่งแวดล้อม เพื่อให้ทราบถึงสภาพปัญหาและความจำเป็นในการพัฒนาโครงการแล้วเลือกรูปแบบอาคารหัวงานโครงการที่เหมาะสมและสอดคล้องกับสภาพปัญหาในพื้นที่เพื่อนำเข้าสู่กระบวนการศึกษาวางโครงการพัฒนาแหล่งน้ำ โดยใช้วิธีการคัดเลือกโครงการที่เหมาะสมด้วยกระบวนการตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์ (Multi-criteria Decision Analysis : MCDA) มาเป็นเครื่องมือเพื่อจัดลำดับความสำคัญในการคัดเลือกรูปแบบอาคารชลประทานที่เหมาะสมในการแก้ปัญหาทรัพยากรน้ำในลุ่มน้ำห้วยดู่

**อุปกรณ์และวิธีการ**

*รวบรวมข้อมูลและกำหนดทางเลือกในการแก้ไขปัญหา*

รวบรวมข้อมูลพื้นฐาน สภาพปัญหาของพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยดู่ และกำหนดทางเลือกรูปแบบแนวทางดำเนินการเพื่อแก้ไขปัญหาด้านทรัพยากรน้ำของลุ่มน้ำห้วยดู่ อำเภอนครไทย จังหวัดพิษณุโลก โดยคำนึงถึงความสอดคล้องกับศักยภาพของลุ่มน้ำ

*กำหนดหลักเกณฑ์ที่ใช้ในการพิจารณา*

จากการรวบรวมข้อมูลพื้นฐาน สภาพปัญหาของพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยดู่ และกำหนดทางเลือกในการแก้ไขปัญหาด้านทรัพยากรน้ำของลุ่มน้ำห้วยดู่ อำเภอนครไทย จังหวัดพิษณุโลก รวมถึงการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการพัฒนาแหล่งน้ำ ได้แก่ เล่มศึกษาวางโครงการมาตรฐานการศึกษาเพื่อวางแผนพัฒนาลุ่มน้ำและโครงการพัฒนาแหล่งน้ำของกรมชลประทาน และเล่มรายงานการศึกษาผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่ผ่านมาของกรมชลประทาน จะสามารถกำหนดหลักเกณฑ์ที่มีผลต่อการเลือกรูปแบบอาคารชลประทานในการวางโครงการพัฒนาแหล่งน้ำ 4 หลักเกณฑ์ ได้แก่ (1) ด้านวิศวกรรม บ่งชี้ความเหมาะสมด้านวิศวกรรมแขนงต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการวางโครงการพัฒนาแหล่งน้ำ ซึ่งประกอบไปด้วยหลักเกณฑ์ย่อย 3 หลักเกณฑ์ ได้แก่ สัดส่วนความจุต่อปริมาตรน้ำท่า พื้นที่รับประโยชน์ และความยากง่ายในการก่อสร้าง (2) ด้านเศรษฐศาสตร์ เป็นเกณฑ์ที่แสดงความคุ้มทุนของโครงการ ซึ่งประกอบไปด้วยหลักเกณฑ์ย่อย 2 หลักเกณฑ์ ได้แก่ อัตราส่วนค่าลงทุนโครงการต่อปริมาณน้ำเก็บกัก และ อัตราส่วนค่าลงทุนต่อไร่ของพื้นที่รับประโยชน์ (3) ด้านสังคมเกี่ยวกับผลกระทบทางด้านสังคมหากมีโครงการ ซึ่งประกอบไปด้วยหลักเกณฑ์ย่อย 2 หลักเกณฑ์ ได้แก่ ผลกระทบต่อที่ทำกินของประชาชน และครัวเรือนที่ได้รับผลกระทบ และ (4) ด้านสิ่งแวดล้อม เกี่ยวกับผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมหากมีโครงการ ซึ่งประกอบไปด้วยหลักเกณฑ์ย่อย 2 หลักเกณฑ์ ได้แก่ ผลกระทบต่อพื้นที่เพื่อการอนุรักษ์ และผลกระทบต่อชั้นคุณภาพลุ่มน้ำ ชั้นที่ 1 โดยในการกำหนดเกณฑ์การตัดสินใจต้องครอบคลุมจุดประสงค์ของงานวิจัย และหลักเกณฑ์แต่ละหลักเกณฑ์ต้องไม่ทับซ้อนกัน

*การคัดเลือกกลุ่มตัวอย่างและผู้เชี่ยวชาญ*

ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง คือ บุคลากรที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการวางโครงการพัฒนาแหล่งน้ำของกรมชลประทาน จำนวน 15 คน ซึ่งเป็นผู้บริหารและผู้เชี่ยวชาญที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการวางโครงการพัฒนาแหล่งน้ำ โดยผู้ตอบแบบสอบถามคือผู้เชี่ยวชาญ (Expert) ซึ่งเป็นผู้มีประสบการณ์ในการวางโครงการพัฒนาแหล่งน้ำ

*การเก็บรวบรวมข้อมูลการตัดสินใจของผู้เชี่ยวชาญ*

งานวิจัยนี้เก็บข้อมูลแบบสอบถามจากผู้เชี่ยวชาญที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการวางโครงการพัฒนาแหล่งน้ำจำนวน 15 ท่านโดยในส่วนของการเปรียบเทียบความสำคัญของเกณฑ์หรือปัจจัยด้านต่างๆ นั้นจะให้ผู้เชี่ยวชาญเปรียบเทียบเกณฑ์หรือปัจจัยทีละคู่ โดยคำอธิบายส่วนตัวเลขในการระบุระดับความสำคัญของเกณฑ์หรือปัจจัยของวิธี AHP ดังแสดงใน Table 1 และ คำอธิบายส่วนตัวเลขในการระบุระดับความสำคัญของเกณฑ์หรือปัจจัยของวิธี SAW ดังแสดงใน Table 2

**Table 1** Ranking of weightiness for AHP

| Ranking of weightiness | Meaning |
|---|---|
| 1 | Equally Important |
| 3 | Moderately More Important |
| 5 | Strongly More Important |
| 7 | (Very Strongly More Important |
| 9 | Extremely More Important |
| 2, 4, 6, 8 | Intermediate Judgment Value |

**Table 2** Ranking of weightiness for SAW

| Ranking of weightiness | Meaning |
|---|---|
| 0 | No comparison |
| 1 | Less Important |
| 2 | Equally Important |
| 3 | More Important |

*เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บข้อมูล และวิเคราะห์ข้อมูล*

ผู้ทำการศึกษาได้คัดเลือกโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลคือโปรแกรมระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ ใช้สำหรับแสดงภาพ ปรับแก้ข้อมูลเชิงพื้นที่ ใช้แบบจำลองความสูงเชิงเลข (Digital Elevation Model : DEM) ร่วมกับแผนที่ภูมิประเทศของกรมแผนที่ทหาร ในการกำหนดตำแหน่งที่ตั้งของทางเลือกที่เหมาะสมตามศักยภาพของลุ่มน้ำ สร้างแผนที่และรายงาน และใช้โปรแกรม Microsoft Excel ในการวิเคราะห์ข้อมูลจากการตัดสินใจจากข้อมูลที่ได้จากวิธีการใช้แบบสอบถามของกลุ่มผู้เชี่ยวชาญ เพื่อวิเคราะห์ด้วยวิธีการคัดเลือกโครงการที่เหมาะสมด้วยกระบวนการตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์ (Multi-criteria Decision Analysis : MCDA) เพื่อหาค่าถ่วงน้ำหนักของหลักเกณฑ์ และเปรียบเทียบการจัดลำดับด้วยวิธี AHP และวิธี SAW

1.กระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น (Analytical Hierarchy Process: AHP) เป็นเครื่องมือที่ถูกนำมาใช้ในกระบวนการตัดสินใจในประเด็นปัญหาที่มีความซับซ้อนให้ตัดสินใจได้ง่ายขึ้น โดยใช้การแบ่งองค์ประกอบปัญหาออกเป็นส่วนๆ ในรูปแผนภูมิลำดับชั้น เป็นการนำเอาความคิดความรู้สึกที่เป็นนามธรรมนำมาให้ค่าน้ำหนัก ใช้ตัวเลขแทนค่าเพื่อให้เห็นเป็นรูปธรรม โดยเปรียบเทียบความสำคัญของเกณฑ์ในการตัดสินใจเป็นรายคู่และใช้ตารางเมตริกซ์เป็นเครื่องมือช่วยในการเปรียบเทียบและตรวจสอบความสอดคล้องของข้อมูล (Consistency Ratio: C.R.) แล้วนำมาคำนวณค่าถ่วงน้ำหนัก เพื่อนำไปสู่การจัดลำดับความสำคัญของแต่ละทางเลือก

2. การรวมแบบถ่วงน้ำหนักอย่างง่าย (Simple Additive Weighting : SAW) เป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อน ใช้แนวคิดการรวมค่าน้ำหนักเชิงเส้นตรงซึ่งอยู่บนหลักการพื้นฐานของการให้ค่าน้ำหนักเฉลี่ย และจะถ่วงน้ำหนักและให้ค่าคะแนนที่แตกต่างกันตามความสำคัญ โดยการนำค่าปรกติของหลักเกณฑ์คูณกับน้ำหนักของทางเลือกจากนั้นทางเลือกที่มีคะแนนสูงสุดจะเป็นทางเลือกที่เหมาะสมที่สุด

**ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง**

*1. ผลการวิเคราะห์ค่าน้ำหนักของหลักเกณฑ์*

1.1 ผลการวิเคราะห์ค่าน้ำหนักของหลักเกณฑ์ด้วยวิธี AHP

จากการวิเคราะห์แบบสอบถามด้วยวิธีกระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น (Analytical Hierarchy Process : AHP) พบว่าผลการวิเคราะห์ค่าน้ำหนักของเกณฑ์หลักที่มีผลต่อการเลือกรูปแบบอาคารในการวางโครงการพัฒนาแหล่งน้ำ คือ ด้านวิศวกรรม (0.488) รองลงมา คือ ด้านสิ่งแวดล้อม (0.205) ด้านสังคม (0.199) และ ด้านเศรษฐศาสตร์ (0.109) ตามลำดับ และผลการวิเคราะห์ค่าน้ำหนักของเกณฑ์รองที่มีผลต่อการเลือกรูปแบบอาคารในการวางโครงการพัฒนาแหล่งน้ำ โดยตรวจสอบค่าความสอดคล้องด้วยอัตราส่วนความสอดคล้องของข้อมูล (Consistency Ratio, C.R.) จากการสอบถามผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 15 ท่าน ซึ่งมีค่า C.R. < 0.1 ดัง Table 3

1.2 ผลการวิเคราะห์ค่าน้ำหนักของหลักเกณฑ์ด้วยวิธี SAW

จากการวิเคราะห์แบบสอบถามด้วยวิธีการรวมแบบถ่วงน้ำหนักอย่างง่าย (Simple Additive Weighting : SAW) พบว่าผลการวิเคราะห์ค่าน้ำหนักของเกณฑ์หลักที่มีผลต่อการเลือกรูปแบบอาคารในการวางโครงการพัฒนาแหล่งน้ำ คือ ด้านวิศวกรรม (0.342) รองลงมา คือ ด้านสิ่งแวดล้อม (0.164) ด้านสังคม (0.239) และ ด้านเศรษฐศาสตร์ (0.256) ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ค่าน้ำหนักของเกณฑ์รองที่มีผลต่อการเลือกรูปแบบอาคารในการวางโครงการพัฒนาแหล่งน้ำ ดัง Table 3 และข้อมูลของทางเลือกแต่ละรูปแบบ ดัง Table 4

**Table 3** Weights of each decision criteria for AHP and SAW

| Decision criteria | AHP | SAW |
|---|---|---|
| | Weight | Weight |
| Engineering | 0.488 | 0.342 |
| ➢ Ratio of storage capacity to average runoff | 0.481 | 0.422 |
| ➢ Benefiting areas | 0.381 | 0.372 |
| ➢ Construction difficulty | 0.138 | 0.206 |
| - Construction period | 0.242 | 0.283 |
| - Water transfer during construction | 0.314 | 0.322 |
| - Improvement of foundation | 0.444 | 0.394 |
| Economy | 0.109 | 0.164 |
| ➢ Project investment per water storage capacity | 0.532 | 0.533 |
| ➢ Value of project investment per Rai in beneficiary areas | 0.468 | 0.467 |
| Society | 0.199 | 0.239 |
| ➢ Impact on cultivated land | 0.305 | 0.367 |
| ➢ Impact on households | 0.695 | 0.633 |
| Environment | 0.205 | 0.256 |
| ➢ Impact on Conservation Area | 0.391 | 0.250 |
| ➢ Impact on first-class quality of river basin | 0.609 | 0.750 |

**Table 4** Information about each choice

| Decision criteria | Reservoirs | Regulator gates | Weirs |
|---|---|---|---|
| Engineering | | | |
| ➢ Ratio of storage capacity to average runoff (%) | 38.82 | 11.96 | 13.30 |
| ➢ Benefiting areas (Rai) | 1,441.00 | 569.00 | 633.00 |
| ➢ Construction difficulty | | | |

**Table 4** (Continued) Information about each choice

| Decision criteria | Reservoirs | Regulator gates | Weirs |
|---|---|---|---|
| - Construction period (Years) | 3.00 | 6.00 | 9.00 |
| - Water transfer during construction (Locations) | 1.00 | 3.00 | 9.00 |
| - Improvement of foundation | Difficult | Easy | Easy |
| Economy | | | |
| ➢ Project investment per water storage capacity (Baht/$m^3$) | 40.42 | 57.03 | 109.05 |
| ➢ Value of project investment per Rai in beneficiary areas (Baht/Rai) | 42,931.00 | 57,168.72 | 108,531.00 |
| Society | | | |
| ➢ Impact on cultivated land (Rai) | 42.00 | 4.00 | 12.00 |
| ➢ Impact on households (Households) | 11.00 | 6.00 | 18.00 |
| Environment | | | |
| ➢ Impact on Conservation Area (Rai) | 132 | 0.00 | 0.00 |
| ➢ Impact on first-class quality of river basin | Not entering the first-class quality of river basin | | |

*2. ผลการเปรียบเทียบการเลือกรูปแบบอาคารชลประทานในการวางโครงการพัฒนาแหล่งน้ำ ด้วยวิธี AHP และวิธี SAW*

จากการวิเคราะห์การจัดลำดับด้วยวิธี AHP พบว่าอาคารชลประทานที่เหมาะสมในพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยดู่ คือ อ่างเก็บน้ำ (65.779) ประตูระบายน้ำ (62.928) และฝาย (46.307) ตามลำดับ ดัง Table 5 และ Table 7 ส่วนการวิเคราะห์การจัดลำดับด้วยวิธี SAW พบว่าอาคารชลประทานที่เหมาะสมในพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยดู่ คือ อ่างเก็บน้ำ (76.725) ประตูระบายน้ำ (72.250) และฝาย (60.250) ตามลำดับ ดัง Table 6 และ Table 7

**Table 5** The score selected after the conversion score is completed for AHP

| Decision criteria | Reservoirs | Regulator gates | Weirs |
|---|---|---|---|
| Engineering (0.488) | | | |
| ➢ Ratio of storage capacity to average runoff (0.481) | 38.820 | 11.957 | 13.300 |
| ➢ Benefiting areas (0.381) | 100.000 | 39.486 | 43.928 |
| ➢ Construction difficulty (0.138) | | | |
| - Construction period (0.242) | 100.000 | 50.000 | 33.333 |
| - Water transfer during construction (0.314) | 100.000 | 33.333 | 11.111 |
| - Improvement of foundation (0.444) | 22.200 | 100.000 | 100.000 |

**Table 5** The score selected after the conversion score is completed for AHP

| Decision criteria | Reservoirs | Regulator gates | Weirs |
|---|---|---|---|
| Economy (0.109) | | | |
| ➢ Project investment per water storage capacity (0.532) | 100.000 | 70.873 | 37.066 |
| ➢ Value of project investment per Rai in beneficiary areas (0.468) | 100.000 | 75.095 | 39.556 |
| Society (0.199) | | | |
| ➢ Impact on cultivated land (0.305) | 9.524 | 100.000 | 33.333 |
| ➢ Impact on households (0.695) | 54.545 | 100.000 | 33.333 |
| Environment (0.205) | | | |
| ➢ Impact on Conservation Area (0.391) | 28.000 | 100.000 | 100.000 |
| ➢ Impact on first-class quality of river basin (0.609) | 100.000 | 100.000 | 100.000 |

**Table 6** Configure the weights and score values for each relevant criteria for SAW

| Decision criteria | Index range | Weight factor |
|---|---|---|
| Engineering (Full score 34 points) | | |
| 1. Ratio of storage capacity to average runoff (14 points) | More than 50 % | 1 |
| | Between 25-50 % | 0.75 |
| | Between 10-25 % | 0.5 |
| | Less than 10 % | 0.25 |
| 2. Benefiting areas (13 points) | More than 1000 Rai | 1 |
| | Between 800 - 1000 Rai | 0.75 |
| | Between 600 - 800 Rai | 0.5 |
| | Less than 600 Rai | 0.25 |
| 3. Construction difficulty (7 points) | | |
| - Construction period (2 points) | Less than 2 Years | 1 |
| | Between 2 - 4 Years | 0.75 |
| | Between 4 - 6 Years | 0.5 |
| | More than 6 Years | 0.25 |
| - Water transfer during construction (2 points) | Less than 2 Locations | 1 |
| | Between 2 - 4 Locations | 0.75 |
| | Between 4 - 6 Locations | 0.5 |
| | More than 6 Locations | 0.25 |
| - Improvement of foundation (3 points) | Easy | 1 |
| | Difficult | 0.5 |
| Economy (Full score 16 points) | | |
| 1. Project investment per water storage capacity ( 9 points) | Less than 50 Baht/$m^3$ | 1 |
| | Between 50 - 70 Baht/$m^3$ | 0.75 |
| | Between 70 - 100 Baht/$m^3$ | 0.5 |
| | More than 100 Baht/$m^3$ | 0.25 |

**Table 6** (Continued) Configure the weights and score values for each relevant criteria for SAW

| Decision criteria | Index range | Weight factor |
|---|---|---|
| 2. Value of project investment per Rai in beneficiary areas ( 7 points) | Less than 30,000 Baht/Rai | 1 |
| | Between 30,000 – 50,000 Baht /Rai | 0.75 |
| | Between 50,000 – 70,000 Baht/Rai | 0.5 |
| | More than 70,000 Baht/Rai | 0.25 |
| Society (Full score 24 points) | | |
| 1. Impact on cultivated land (9 points) | Less than 10 Rai | 1 |
| | Between 10-30 Rai | 0.75 |
| | Between 30-50 Rai | 0.5 |
| | More than 50 Rai | 0.25 |
| 2. Impact on households ( 15 points) | Less than 5 Households | 1 |
| | Between 5 - 10 Households | 0.75 |
| | Between 10 - 15 Households | 0.5 |
| | More than 15 Households | 0.25 |
| Environment (Full score 26 points) | | |
| 1. Impact on Conservation Area ( 6.5 points) | Less than 50 Rai | 1 |
| | Between 50 - 500 Rai | 0.65 |
| | More than 500 Rai | 0.3 |
| 2. Impact on first-class quality of river basin ( 19.5 points) | Not entering the first-class quality of river basin | 1 |
| | Enter the first-class quality of river basin | 0.5 |

**Table 7** Analysis of appropriate irrigation structure for AHP and SAW

| Decision criteria | AHP | | | SAW | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Reservoirs | Regulator gates | Weirs | Reservoirs | Regulator gates | Weirs |
| Engineering | | | | | | |
| ➢ Ratio of storage capacity to average runoff | 9.110 | 2.806 | 3.121 | 10.50 | 7.00 | 7.00 |
| ➢ Benefiting areas | 18.592 | 7.341 | 8.167 | 13.00 | 3.25 | 6.50 |
| ➢ Construction difficulty | | | | | | |
| - Construction period | 1.625 | 0.813 | 0.542 | 1.50 | 1.00 | 0.50 |
| - Water transfer during construction | 2.103 | 0.701 | 0.234 | 2.00 | 1.50 | 0.50 |
| - Improvement of foundation | 0.662 | 2.980 | 2.980 | 1.50 | 3.00 | 3.00 |
| Economy | | | | | | |
| ➢ Project investment per water storage capacity | 5.769 | 4.088 | 2.138 | 9.00 | 6.75 | 4.50 |
| ➢ Value of project investment per Rai in beneficiary areas | 5.083 | 3.817 | 2.011 | 3.50 | 3.50 | 1.75 |
| Society | | | | | | |
| ➢ Impact on cultivated land | 0.578 | 6.064 | 2.021 | 4.50 | 9.00 | 6.75 |
| ➢ Impact on households | 7.547 | 13.836 | 4.612 | 7.50 | 11.25 | 3.75 |
| Environment | | | | | | |
| ➢ Impact on Conservation Area | 2.244 | 8.014 | 8.014 | 4.23 | 6.50 | 6.50 |
| ➢ Impact on first-class quality of river basin | 12.467 | 12.467 | 12.467 | 19.50 | 19.50 | 19.50 |
| Total | 65.779 | 62.928 | 46.307 | 76.73 | 72.25 | 60.25 |
| Ranking | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |

**สรุป**

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อคัดเลือกรูปแบบอาคารชลประทานที่มีความเหมาะสมในการวางโครงการพัฒนาแหล่งน้ำ กรณีศึกษาลุ่มน้ำห้วยดู่ อำเภอนครไทย จังหวัดพิษณุโลก โดย ใช้วิธีกระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น (Analytical Hierarchy Process: AHP) มาเปรียบเทียบกับวิธีการรวมแบบถ่วงน้ำหนักอย่างง่าย (Simple Additive Weighting : SAW) ได้ผลดัง Table 6 โดยจะเห็นได้ว่าผลการวิเคราะห์ทั้งหมดมีความสอดคล้องกัน คือ อ่างเก็บน้ำ ประตูระบายน้ำ และฝาย ตามลำดับ

จากการศึกษาวิจัยครั้งนี้สามารถสรุปผลได้ว่าการวิเคราะห์ด้วยวิธี AHP นั้น ต้องมีการกำหนดโครงสร้างของลำดับชั้นในการทำงานให้ชัดเจนจากนั้นจึงทำการเปรียบเทียบหลักเกณฑ์ที่นำมาใช้ทีละคู่ ผู้ตอบแบบสอบถามต้องทำความเข้าใจในระดับความสำคัญแต่ละระดับ ทำให้การวิเคราะห์มีความยุ่งยากและซับซ้อน เพราะเป็นการนำเอาความคิดความรู้สึกที่เป็นนามธรรมนำมาให้ค่าน้ำหนัก ใช้ตัวเลขแทนค่า เพื่อให้เห็นเป็นรูปธรรม ส่วนการวิเคราะห์ด้วยวิธี SAW เป็นกระบวนการวิเคราะห์ผลที่มีความง่ายไม่ซับซ้อน โดยผู้ตอบแบบสอบถามเป็นผู้กำหนดค่าถ่วงน้ำหนัก ถ้าผู้ตอบแบบสอบถามมีอคติผลของการวิเคราะห์จะเกิดความไม่น่าเชื่อถือได้

อย่างไรก็ตามไม่ว่าจะวิเคราะห์ด้วยกระบวนวิธีการใดสิ่งสำคัญคือหลักเกณฑ์หรือข้อมูลที่นำมาใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของแต่ละทางเลือก ซึ่งเกณฑ์ที่ใช้จะต้องสอดคล้องกับข้อมูลพื้นฐาน หลักเกณฑ์แต่ละเกณฑ์ไม่ทับทับซ้อนกันและสามารถแก้ปัญหาได้ตรงประเด็น และผู้ตอบแบบสอบถามซึ่งเป็นคนกำหนดค่าถ่วงค่าน้ำหนักเพื่อให้คะแนนนั้นต้องมีความเที่ยงตรงและสมเหตุสมผล จึงจะส่งผลให้ทางเลือกที่ได้เป็นทางเลือกที่เหมาะสมและสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การศึกษาครั้งนี้สอบถามผู้เชี่ยวชาญทั้งหมด 15 ท่าน ประกอบด้วยนักวิชาการด้านเศรษฐศาสตร์ 3 ท่าน นักวิชาการด้านสิ่งแวดล้อม 2 ท่าน และวิศวกร 10 ท่าน เนื่องด้วยโครงสร้างขององค์กรเกี่ยวข้องกับวิศวกรรม บุคลากรด้านวิศวกรรมจึงมีมากกว่าวิชาชีพอื่น ผลจากการศึกษาจึงถูกเทน้ำหนักไปทางมุมมองของวิศวกร และผลการศึกษาก็แสดงออกมาให้เห็นว่าเกณฑ์ด้านวิศวกรรมมีน้ำหนักมากที่สุด ดังนั้นเมื่อจะศึกษาการเลือกรูปแบบอาคารชลประทานในพื้นที่อื่นแล้ว การมีกลุ่มผู้ตอบแบบสอบถามจำนวนที่มากกว่านี้จะช่วยให้ผลการจัดอันดับของทางเลือกดีขึ้น โดยค่าน้ำหนักของเกณฑ์ หรือทางเลือกที่ถูกจัดลำดับจะไม่ใช่คำตอบของคนหมู่มากกลุ่มใดกลุ่มหนึ่ง

**กิตติกรรมประกาศ**

ขอขอบคุณหน่วยงานต่าง ๆ สำนักบริหารโครงการ กรมชลประทานที่ให้ความช่วยเหลือในด้านข้อมูลที่ใช้ประกอบการทำงานวิจัยชิ้นนี้ และขอขอบคุณผู้เชี่ยวชาญทั้ง 15 ท่าน สังกัดกรมชลประทานที่ให้ความอนุเคราะห์ตอบแบบสอบถาม ด้วยความอนุเคราะห์จากทั้งหมดนี้ส่งผลให้การศึกษาวิจัยประสบความสำเร็จด้วยดี

**เอกสารอ้างอิง**

กรมชลประทาน. 2552. มาตรฐานการศึกษาเพื่อวางแผนพัฒนาลุ่มน้ำและโครงการพัฒนาแหล่งน้ำ ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 2. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรมชลประทาน, กรุงเทพฯ.

กรมชลประทาน. 2553. อภิธานศัพท์เทคนิคด้านการชลประทานและการระบายน้ำ ฉบับปรับปรุง. กรมชลประทาน, กรุงเทพฯ.

กฤษติวกร ธรรมแสง. 2564. การประยุกต์ใช้วิธีAHP ร่วมกับ FSM และ SAW ในการคัดเลือกเกษตรกรผู้ส่งมอบวัตถุดิบเพื่อจัดทาเกษตรพันธสัญญาในอุตสาหกรรมแป้งมันสาปะหลัง, น.87–96. ในวารสารวิจัย มข. (ฉบับบัณฑิตศึกษา) ปีที่ 22 ฉบับที่ 3.

พรรณิภา ด้วงเกิด. 2565. การจัดลำดับความสำคัญของประตูระบายน้ำ กรณีศึกษาโครงการชลประทานปทุมธานี, น. 32–43. ในวารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ปีที่ 28 ฉบับที่ 1.

ศิววุธ สงสุทธิต. 2560. การกำหนดปัจจัยทางเลือกในการบริหารจัดการน้ำโดยใช้กระบวนการตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์ โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาผักไห่, การประชุมวิชาการแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 10

# ความสามารถของผู้รับเหมาที่มีอิทธิพลต่อความสำเร็จของโครงการก่อสร้าง

## Contractor capabilities influencing on construction project performance

**สมเกียรติ จารุจิต*, ปิยนุช เวทย์วิวรณ์, ศุภวุฒิ มาลัยกฤษณะชลี**

Somkait jarujit*, Piyanut Wethyavivorn, Suphawut Malaikrisanachalee

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail: somkait.ja@ku.th

**บทคัดย่อ**

การศึกษามีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถของผู้รับเหมาที่มีอิทธิพลต่อความสำเร็จของโครงการก่อสร้าง โดยการเก็บข้อมูลผ่านแบบสอบถาม 369 ชุด ภาครัฐ รัฐวิสาหกิจ และภาคเอกชนในประเทศไทย การวิเคราะห์ปัจจัยพบว่าการจัดกลุ่มที่เหมาะสมสำหรับความสามารถของผู้รับเหมามี 9 กลุ่ม ได้แก่ ความสามารถในการบริหารจัดการโครงการของผู้รับเหมา ความสามารถในการวางแผนงานของผู้รับเหมา ความสามารถในการควบคุมเวลาของผู้รับเหมา ความสามารถด้านความชำนาญในงานก่อสร้าง ความสามารถในการบริหารจัดการสภาพคล่องทางการเงินของผู้รับเหมา ความสามารถในการประสานงานของผู้รับเหมา ความสามารถในการจัดการด้านบุคลากรของผู้รับเหมา ความสามารถด้านความมั่นคงทางการเงินและเทคนิคทางวิศวกรรม ความสามารถด้านการบริหารสัญญาของผู้รับเหมา โดยค่าเฉลี่ยความสามารถของผู้รับเหมาที่ส่งผลกระทบต่อความสำเร็จของโครงการก่อสร้างมีค่าอยู่ในระดับมาก ($\bar{x}$ = 3.463–3.889) ทั้งหมดสามารถนำไปกำหนดคุณสมบัติในการประกวดราคาของผู้รับเหมาเพื่อให้โครงการก่อสร้างได้ผู้รับเหมาที่มีประสิทธิภาพ

**คำสำคัญ**: ความสามารถของผู้รับเหมา, คุณสมบัติของผู้รับเหมา, ความสำเร็จของโครงการก่อสร้าง

**Abstract**

The study is to investigate how contractors' abilities influence the success of construction projects. By collecting data through 369 questionnaires from the government sector, state enterprises, and the private sector in Thailand. Factor analysis revealed that there were nine groups of appropriate groupings for contractor competencies: contractor project management competencies; Contractor's ability to plan work Contractor's ability to control time Ability to be skilled in construction work Ability to manage the contractor's financial liquidity Contractor's coordination Contractor's personnel management ability Financial stability and technical engineering Contract management capabilities of contractors. The average contractor's ability that affects the success of a construction project is at a high level ($\bar{x}$ = 3.463–3.889). All of this can be used to determine the contractor's qualifications in bidding so that the construction project can get a contractor efficient.

**Keywords**: Construction project performance, Contractor capabilities, Qualifications of contractors

**บทนำ**

ปัจจุบันในประเทศไทยนั้นมีการเกิดของโครงการก่อสร้างต่างๆ มากมาย ซึ่งทำให้ธุรกิจประเภทอุตสาหกรรมก่อสร้างมีแนวโน้มที่จะขยายตัวทำให้มีจำนวนผู้รับเหมามากขึ้นโดยปัจจัยหลักมาจากการลงทุนโครงการขนาดใหญ่ของภาครัฐ ขณะที่การลงทุนงานก่อสร้างของภาคเอกชนธุรกิจโครงการประเภทที่อยู่อาศัยและอสังหาริมทรัพย์เพื่อการพาณิชย์ก็เริ่มฟื้นตัว ดังนั้นผู้รับเหมาบางรายยังพึ่งเริ่มทำธุรกิจ หรืออาจจะอยู่ในช่วงฟื้นตัวหลังจากสภาพเศรษฐกิจช่วงก่อนหน้าที่ได้รับผลกระทบจากโรคโควิด-19 ทำให้มีความเป็นไปได้สูงที่โครงการก่อสร้างอาจจะได้ผู้รับเหมาที่ไม่มีประสิทธิภาพพอที่จะดำเนินการก่อสร้างให้สำเร็จลุล่วงทั้งในฐานะผู้รับเหมาหลักของโครงการ และผู้รับเหมาช่วง ถ้าไม่กำหนดคุณสมบัติหรือเงื่อนไขในสัญญาจ้างก่อสร้างให้รัดกุมก็จะทำให้โครงการก่อสร้างนั้นไม่ประสบความสำเร็จ

ดังนั้น งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาเกี่ยวกับเรื่องความสามารถของผู้รับเหมาที่สามารถดำเนินงานก่อสร้างให้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ได้ โดยจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นแนวทางในการคัดเลือกผู้รับเหมาในงานก่อสร้าง และช่วยให้โครงการประสบผลสัมฤทธิ์ได้ดีมากขึ้น โดยจะทำการวิจัยโดยใช้แบบสอบถามมีเป้าหมายมุ่งเน้นไปที่ผู้ที่มีความเกี่ยวข้องกับอุสาหกรรมการก่อสร้างในประเทศไทย แล้วนำมาวิเคราะห์โดยวิธีทางสถิติเพื่อจัดลำดับคุณสมบัติของผู้รับเหมาที่ส่งผลกระทบต่อความสำเร็จของโครงการก่อสร้าง

**อุปกรณ์และวิธีการ**

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

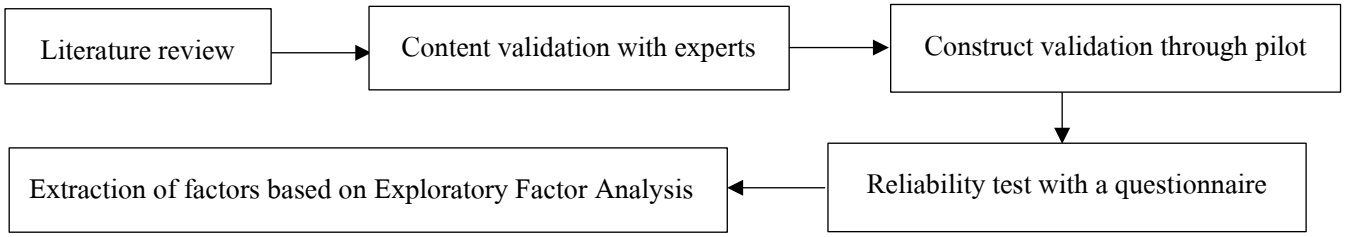



**Fig. 1** Conceptual framework

งานวิจัยนี้ตาม Fig. 1 แบ่งออกได้เป็น 5 ขั้นตอน ดังนี้ (1) ศึกษาทฤษฎีและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับความสามารถของผู้รับเหมาที่ส่งผลกระทบต่อความสำเร็จของโครงการก่อสร้างระบุตัวแปรจากงานวิจัยก่อนหน้า และจัดหมวดหมู่ความสามารถของผู้รับเหมาที่ส่งผลกระทบต่อความสำเร็จของโครงการก่อสร้าง และสัมภาษณ์ผู้มีประสบการณ์ด้านงานก่อสร้างจำนวน 9 คน โดยกำหนดได้เป็นตัวแปรสังเกตได้จำนวน 57 ตัวแปร 6 หมวดหมู่ แล้วนำมาสร้างแบบสอบถามแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 เป็นส่วนของข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถามที่เป็นผู้เกี่ยวข้องกับโครงการก่อสร้างอาคารชลประทานแบบคำถามปลายปิด ประกอบด้วย เพศ ระดับการศึกษา ประสบการณ์ในการทำงาน ตำแหน่งหน่วยงาน ส่วนที่ 2 เป็นส่วนของความคิดเห็นต่อความสามารถของผู้รับเหมาที่ส่งผลกระทบโครงการทั้งหมด 57 ตัวแปร 6 หมวดหมู่และเก็บข้อมูลลิเคิร์ท (Likert Scale) โดยกำหนดรูปแบบออกเป็นระดับความคิดเห็น 5 ระดับ (Five-Point Likert Scale) คือ จริงที่สุด จริงมาก จริงปานกลาง จริง ไม่จริงเลย

จากการทบทวนวรรณกรรมจะสามารถสรุปปัจจัยได้ดังนี้

**Table 1** Factors from the literature review

| Factor | Sub Factor | Source |
|---|---|---|
| Quality | CQ1,CQ2,CQ3,CQ4,CQ5,CQ6,CQ7, CQ8,CQ9,CQ10 | (Khoso et al., 2021) ,(Khoso et al., 2016), (Alzahrani and Emsley, 2013) , (Muhwezi et al., 2014) |
| Financial | CF1,CF2,CF3,CF4,CF5,CF6,CF7,CF8, CF9,CF10 | (Khoso et al., 2021) (Sweis et al., 2014) (Enshassi et al., 2009) (Puri and Tiwari, 2014) |
| Personnel | CP1,CP2,CP3,CP4,CP5,CP6,CP7,CP 8,CP9,CP10,CP11,CP12,CP13,CP14 | (Khoso et al., 2021) (Khoso et al., 2016)(Alzahrani and Emsley, 2013) (Puri and Tiwari, 2014) (Muhwezi et al., 2014) |
| Management | CM1,CM2,CM3,CM4,CM5,CM6,CM7, CM8,CM9,CM10,CM11 | (Khoso et al., 2021) (Khoso et al., 2016) (Alzahrani and Emsley, 2013) (Muhwezi et al., 2014) (Sweis et al., 2014) (Puri and Tiwari, 2014) |
| Time | CT1,CT2,CT3,CT4,CT5,CT6 | (Alzahrani and Emsley, 2013) (Muhwezi et al., 2014) (Sweis et al., 2014) |
| Relationship | CR1,CR2,CR3,CR4,CR5,CR6 | (Khoso et al., 2021) (Puri and Tiwari, 2014) |

(2) Content validation with experts เมื่อได้ทำการสังเคราะห์แบบสอบถามแล้ว ได้ทำการ Validation กับผู้เชี่ยวชาญจำนวนทั้งสิ้น 8 คนเพื่อดำเนินการตรวจสอบความถูกต้องและแก้ไขข้อมูล

(3) Construct validation through pilot test with practitioners ทำการแก้ไขแบบสอบถามแล้ว ทดลองเก็บข้อมูล ผู้ตอบแบบสอบถามที่ได้รับการคัดเลือกมีประสบการณ์การทำงานและมีส่วนร่วมในโครงการก่อสร้างจากภาครัฐ เอกชน และรัฐวิสาหกิจ ซึ่งรวมถึงเจ้าของ ที่ปรึกษา วิศวกรโครงการ และสถาปนิกโครงการ ซึ่งทุกคนมีส่วนร่วมในความสามารถที่หลากหลายในโครงการก่อสร้างและเข้าใจในงานก่อสร้างทั้งหมด นอกจากนี้ ผู้เข้าร่วมที่มีส่วนร่วมในโครงการก่อสร้างต่างๆ เช่น ผู้รับเหมาและนักออกแบบ ยังได้มีส่วนร่วมในการประเมินความสามารถของผู้รับเหมาอย่างรอบด้าน ซึ่งมีอิทธิพลอย่างมากต่อประสิทธิภาพของโครงการก่อสร้าง

(4) Reliability test with a questionnaire ทำทดสอบความเชื่อมั่นของแบบสอบถามโดยวิธีการทดสอบ Cronbach's alpha โดยจะต้องมีค่าเกิน 0.70 จึงจะถือว่าชุดข้อมูลมีความน่าเชื่อถือ และสามารถยอมรับได้ที่ 0.60 (Hair, 2010) โดยในงานวิจัยนี้มีค่า Cronbach's alpha เท่ากับ 0.97 มากกว่า 0.7 จึงถือว่าข้อมูลมีความน่าเชื่อถือสูง

(5) Extraction of factors based on Exploratory Factor Analysis ทดสอบความเหมาะสมของข้อมูลจากผลการทดสอบความเหมาะสมของข้อมูลที่จะใช้กับวิธีวิเคราะห์องค์ประกอบ พบว่า ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษามีค่าที่เหมาะสม สามารถใช้ข้อมูลนี้กับวิเคราะห์ปัจจัยเชิงสำรวจได้ เป็นไปตามข้อตกลงเบื้องต้นของการใช้วิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบ พิจารณาได้จาก ค่า KMO มีค่าเท่ากับ 0.920 > 0.60 ค่า Approx. Chi-square เท่ากับ 20,657.099 ค่า df เท่ากับ 1596 และค่า Sig. เท่ากับ 0.000 (p-value = 0.000) การสกัดปัจจัยตามการวิเคราะห์ปัจจัยเชิงสำรวจโดย โดยสกัดปัจจัยเพื่อให้ได้ความแปรปรวนทั้งหมดมากที่สุด รวมถึงโครงสร้างขององค์ประกอบที่เหมือนกัน โดยองค์ประกอบดังกล่าวจะมีค่า Eigenvalue มากกว่า 1 และนำปัจจัยเหล่านั้นมาทำการหมุนแกนเพื่อลดจำนวนตัวแปรและได้มาซึ่งตัวบ่งชี้ที่ดีที่สุดด้วยการหมุนแกนแบบตั้งฉากหรือวิธี Varimax ซึ่งเป็นวิธีการที่พยายามให้ค่าสูงสุดกระจายไปภายในแต่ละปัจจัยและหมุนให้ตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันสูงมาอยู่ร่วมกันในแต่ละปัจจัยเพื่อให้ได้องค์ประกอบร่วมที่มีความชัดเจนมากขึ้น อีกทั้งยังง่ายต่อการแปลความหมาย โดยแสดงค่าความแปรปรวนของแต่ละปัจจัยได้ดัง Table 2

## ผลและวิจารณ์

**Table 2** Total Variance Explained

| Component | Initial Eigenvalues | | | Extraction Sums of Squared Loadings | | | Rotation Sums of Squared Loadings | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Total | % of Variance | Cumulative % | Total | % of Variance | Cumulative % | Total | % of Variance | Cumulative % |
| 1 | 25.062 | 43.969 | 43.969 | 25.062 | 43.969 | 43.969 | 6.599 | 11.577 | 11.577 |
| 2 | 3.058 | 5.365 | 49.334 | 3.058 | 5.365 | 49.334 | 5.382 | 9.442 | 21.018 |
| 3 | 3.036 | 5.326 | 54.660 | 3.036 | 5.326 | 54.660 | 5.141 | 9.019 | 30.037 |
| 4 | 2.304 | 4.042 | 58.702 | 2.304 | 4.042 | 58.702 | 4.827 | 8.469 | 38.506 |
| 5 | 1.880 | 3.299 | 62.000 | 1.880 | 3.299 | 62.000 | 4.668 | 8.190 | 46.696 |
| 6 | 1.592 | 2.793 | 64.793 | 1.592 | 2.793 | 64.793 | 4.578 | 8.032 | 54.728 |
| 7 | 1.364 | 2.393 | 67.187 | 1.364 | 2.393 | 67.187 | 3.480 | 6.106 | 60.834 |
| 8 | 1.219 | 2.138 | 69.325 | 1.219 | 2.138 | 69.325 | 2.952 | 5.180 | 66.014 |
| 9 | 1.047 | 1.836 | 71.161 | 1.047 | 1.836 | 71.161 | 2.934 | 5.148 | 71.161 |

จาก Table 2 พบว่า หลังจากการสกัดปัจจัยความสามารถของผู้รับเหมาที่มีอิทธิพลต่อความสำเร็จของโครงการก่อสร้าง ประกอบด้วย 9 ปัจจัยปัจจัยที่มีค่า Eigenvalue มากกว่า 1.000 สามารถอธิบายความแปรปรวนที่เกิดขึ้นได้ร้อยละ 71.161 ซึ่งควรมีค่ามากกว่าร้อยละ 60 (Hair, 2010) เมื่อพิจารณาค่าน้ำหนักของแต่ละตัวแปรหลังจากหมุนแกน (Rotated Component Matrix) พบว่าตัวแปรความเสี่ยงทั้งหมด 57 ตัวแปรมีความสัมพันธ์ร่วมกันและสามารถจัดเข้ากลุ่มของตัวแปรแฝงที่สังเกตไม่ได้ ได้ทั้งหมดจำนวน 9 ปัจจัย มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 โดยใช้เกณฑ์ค่าน้ำหนักมากกว่า 0.300 (Hair, 2010) ในการพิจารณาคัดเลือกตัวแปร จากนั้นกำหนดชื่อปัจจัยให้สอดคล้องกับกลุ่มตัวแปรสังเกตโดย 9 กลุ่มปัจจัย ดังที่แสดงใน Table 3

**Table 3** Factor Component

| Capability | Factor Component Variable | Factor loading | mean | Rank |
|---|---|---|---|---|
| Contractor's project management capabilities | CP10 -The contractor's ability to procure machinery and construction materials. | 0.741 | 3.824 | 1 |
| | CP12 - Executives of this contractor ability to manage an organization very well. | 0.706 | 3.805 | 2 |
| | CP11 -The contractor's project manager is knowledgeable and experienced. | 0.708 | 3.791 | 3 |
| | CM3 -The contractor can control the quality of the work to be as specified. effectively | 0.454 | 3.763 | 4 |
| | CF3 - The contractor can plan the use of materials very well. | 0.409 | 3.759 | 5 |
| | CM1 - The contractor plans and schedules the project's operations. very well. | 0.642 | 3.751 | 6 |
| | CM2 - The contractor can progress the project. Always goes according to plan. | 0.501 | 3.737 | 7 |
| | CP14 - Contractor personnel have few absenteeism. The entire duration of the project | 0.502 | 3.718 | 8 |
| | CP7 - Contractors provide incentives to employees that are satisfactory, resulting in employees working to their fullest potential. | 0.488 | 3.715 | 9 |
| | CP13 - Contractors organize training for personnel to increase necessary skills continuously and regularly. | 0.600 | 3.680 | 10 |
| | CP5 - Contractors always have enough skilled (craftsmen) and unskilled (laborers) labor to meet the project needs. | 0.388 | 3.661 | 11 |

**Table 3** (Continued) Factor Component

| Capability | Factor Component Variable | Factor loading | mean | Rank |
|---|---|---|---|---|
| Contractor's ability to plan work | CQ10 - Contractors can prepare operational reports for each disbursement period that are always complete and accurate. | 0.464 | 3.683 | 1 |
| | CP6 - Contractor personnel have a good attitude to be successful | 0.531 | 3.672 | 2 |
| | CM8 - The contractor has prepared the necessary information in attending meetings with the project team for the project to achieve its objectives very well | 0.656 | 3.583 | 3 |
| | CM6 - The contractor has planned the disposal of garbage and waste during the construction of this project. and can perform very well | 0.599 | 3.526 | 4 |
| | CM7 - The contractor reviews mistakes made in the project. and find ways to correct operations to reduce errors as well | 0.654 | 3.501 | 5 |
| | CM9 - The contractor plans to manage and control air pollution (dust) generated from this construction project. very well | 0.804 | 3.496 | 6 |
| | CM10 - The contractor plans to manage and carry out noise pollution control. arising from this construction project very well | 0.783 | 3.393 | 7 |
| Contractor's ability to control time | CT3 - Contractors can quickly solve problems in construction work. Always up to date with the situation | 0.725 | 3.751 | 1 |
| | CT2 - Contractors can quickly order and import construction materials. and always according to plan | 0.752 | 3.743 | 2 |
| | CT4 - The contractor has procedures in place to process project documents efficiently. | 0.766 | 3.713 | 3 |
| | CT6 - Contractors can move machinery and equipment quickly. There will be no delays to this project. | 0.623 | 3.699 | 4 |
| | CT1 - The contractor can enter the construction area at the time specified in the contract. | 0.622 | 3.645 | 5 |
| | CT5 - The contractor can work as planned or faster than the plan specified in the contract. | 0.595 | 3.558 | 6 |
| Ability to expertise in construction work | CQ1 - The contractor has experience and expertise. In project work, the nature and size are similar the project. | 0.844 | 3.745 | 1 |
| | CQ9 - Contractors always hire subcontractors who have knowledge and expertise appropriate to the job. | 0.811 | 3.734 | 2 |
| | CQ2 - The contractor has good experience in the region of this construction project. | 0.797 | 3.710 | 3 |
| | CQ3 - The contractor has contracted a project that is similar in complexity to this project. Frequently | 0.669 | 3.707 | 4 |
| | CQ5 - The contractor has an appropriate number of projects that are in progress during the same period, not exceeding capacity. | 0.380 | 3.615 | 5 |
| Ability to manage the contractor's | CQ8 - The contractor can guarantee the project's performance as specified in the contract. | 0.366 | 3.867 | 1 |
| | CF8 - The contractor has control over the actual cost of this project. Able to evaluate their own profit and loss | 0.690 | 3.762 | 2 |
| | CF7 - The contractor performed the job well. effective Therefore, operating costs (overheads) can be controlled very well. | 0.604 | 3.756 | 3 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| financial liquidity | CF6 - The contractor has prepared to deal with the higher cost of construction materials and equipment during the implementation of this project is very beneficial. | 0.710 | 3.734 | 5 |
| | CF10 - Contractors can complete a report on their operations according to disbursement periods. | 0.528 | 3.724 | 6 |
| | CF4 - The contractor never lacked financial liquidity during the construction of this project. | 0.544 | 3.626 | 7 |
| | CF5 - The main contractor never paid any late subcontractors on this project. | 0.746 | 3.561 | 8 |
| Contractor's coordination | CR4 - The contractor has a very good relationship with designer of this construction project | 0.602 | 3.843 | 1 |
| | CR2 - The contractor has a good relationship with the job owner. No conflicts occurred during construction. | 0.667 | 3.832 | 2 |
| | CR1 - The contractor has a very good relationship. with local material dealers for this construction project | 0.735 | 3.813 | 3 |
| | CR3 - The contractor has a good relationship with the affected people. | 0.714 | 3.753 | 4 |
| | CR5 - The contractor is familiar with the workforce in the project area. | 0.773 | 3.732 | 5 |
| | CR6 - The contractor has good relationships with all subcontractors on this project. | 0.714 | 3.664 | 6 |
| Contractor's personnel management ability | CP4 - The contractor uses appropriate technology and machinery for construction. | 0.482 | 3.827 | 1 |
| | CP8 - The contractor has engineers, foremen, skilled craftsmen who have technical expertise and can perform their assigned duties well. | 0.506 | 3.762 | 2 |
| | CP3 - The contractor can coordinate. For the project to be very successful | 0.414 | 3.759 | 3 |
| | CP1 - The contractor has sufficient administrative personnel to meet the needs of the project. | 0.440 | 3.680 | 4 |
| | CP2 - The contractor has enough technical experts. | 0.432 | 3.610 | 5 |
| | CF9 - Contractors have made very few changes to construction work such as demolition and redoing. | 0.544 | 3.604 | 6 |
| | CQ7 - The contractor has good IT and software capabilities required to do the job. | 0.494 | 3.463 | 7 |
| Financial stability and technical engineering | CQ4 - Contractors use appropriate methods, technology, and machinery for construction. Conforms to engineering principles | 0.425 | 3.856 | 1 |
| | CF1 - The contractor is financially strong. | 0.673 | 3.751 | 2 |
| | CF2 - Contractor's average annual income over the past 5 years at a very good | 0.702 | 3.705 | 3 |
| Contract management capabilities of contractors | CQ6 - The contractor has a good understanding aspect of the construction contract. | 0.659 | 3.889 | 1 |
| | CM4 - Contractors can work well as a team | 0.486 | 3.829 | 2 |
| | CM5 - The contractor has a plan. and be able to manage risks in this project | 0.500 | 3.724 | 3 |

จาก Table 3 การวิเคราะห์ปัจจัยเชิงสำรวจค่าน้ำหนักองค์ประกอบแสดงให้เห็นระดับความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ในแต่ละปัจจัย ผลการวิเคราะห์สามารถจัดกลุ่มได้ 9 ปัจจัย สามารถสรุปรายละเอียดของแต่ละปัจจัยได้ดังนี้

ปัจจัยที่ 1 ความสามารถในการบริหารจัดการโครงการของผู้รับเหมา ประกอบด้วย 13 ตัวแปร มีค่าน้ำหนักองค์ประกอบอยู่ระหว่าง 0.388 ถึง 0.741 โดยที่มีความแปรปรวน 6.599 หรือร้อยละ 11.577 โดยปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความสำเร็จของโครงการก่อสร้างมากที่สุดคือ ผู้รับเหมามีความสามารถในการจัดหาเครื่องจักร เครื่องมือ ตลอดจนวัสดุที่ใช้ในการดำเนินโครงการได้ตามความต้องการเสมอ (Mean = 3.824)

ปัจจัยที่ 2 ความสามารถในการวางแผนงานของผู้รับเหมาประกอบด้วย 7 ตัวแปร มีค่าน้ำหนักองค์ประกอบอยู่ระหว่าง 0.464 ถึง 0.804 โดยที่มีความแปรปรวน 5.382 หรือร้อยละ 9.019 โดยปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความสำเร็จของ

โครงการก่อสร้างมากที่สุดคือ ผู้รับเหมาสามารถดำเนินการจัดทำรายงานการดำเนินงานตามงวดเบิกจ่ายได้ครบถ้วน ถูกต้อง และตรงตามเวลาเสมอ (Mean = 3.683)

ปัจจัยที่ 3 ความสามารถในการควบคุมเวลาของผู้รับเหมา ประกอบด้วย 6 ตัวแปร มีค่าน้ำหนักองค์ประกอบอยู่ระหว่าง 0.595 ถึง 0.766 โดยที่มีความแปรปรวน 5.141 หรือร้อยละ 11.577 โดยปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความสำเร็จของโครงการก่อสร้างมากที่สุดคือ ผู้รับเหมามีประสบการณ์มีความชำนาญ ในงานโครงการลักษณะและขนาดที่ใกล้เคียงกันกับโครงการนี้ (Mean = 3.751)

ปัจจัยที่ 4 ความสามารถด้านความชำนาญในงานก่อสร้าง ประกอบด้วย 5 ตัวแปร มีค่าน้ำ หนักองค์ประกอบอยู่ระหว่าง 0.380 ถึง 0.844 โดยที่มีความแปรปรวน 4.827 หรือร้อยละ 8.469 โดยปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความสำเร็จของโครงการก่อสร้างมากที่สุดคือ ผู้รับเหมามีประสบการณ์มีความชำนาญ ในงานโครงการลักษณะและขนาดที่ใกล้เคียงกันกับโครงการนี้ (Mean = 3.745)

ปัจจัยที่ 5 ความสามารถในการบริหารจัดการสภาพคล่องทางการเงินของผู้รับเหมา ประกอบด้วย 7 ตัวแปร มีค่าน้ำ หนักองค์ประกอบอยู่ระหว่าง 0.366 ถึง 0.746 โดยที่มีความแปรปรวน 4.668 หรือร้อยละ 8.190 โดยปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความสำเร็จของโครงการก่อสร้างมากที่สุดคือ ผู้รับเหมาสามารถรับประกันผลงานโครงการตามที่ระบุในสัญญาได้ (Mean = 3.867)

ปัจจัยที่ 6 ความสามารถในการประสานงานของผู้รับเหมา ประกอบด้วย 6 ตัวแปร มีค่าน้ำหนักองค์ประกอบอยู่ระหว่าง 0.602 ถึง 0.773 โดยที่มีความแปรปรวน 4.578 หรือร้อยละ 8.032 โดยปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความสำเร็จของโครงการก่อสร้างมากที่สุดคือ ผู้รับเหมามีความความสัมพันธ์ที่ดีกับผู้ออกแบบของโครงการก่อสร้างนี้ (Mean = 3.843)

ปัจจัยที่ 7 ความสามารถในการจัดการด้านบุคลากรของผู้รับเหมา ประกอบด้วย 7 ตัวแปร มีค่าน้ำหนักองค์ประกอบอยู่ระหว่าง 0.414 ถึง 0.544 โดยที่มีความแปรปรวน 3.480 หรือร้อยละ 6.106 โดยปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความสำเร็จของโครงการก่อสร้างมากที่สุดคือ เจ้าหน้าที่ทางด้านโยธา วิศวกร โฟร์แมน ช่างฝีมือ ของผู้รับเหมามีความรู้ความชำนาญด้านเทคนิค สามารถปฏิบัติหน้าที่ตามที่ได้รับมอบหมายได้ (Mean = 3.827)

ปัจจัยที่ 8 ความสามารถด้านความมั่นคงทางการเงินและเทคนิคทางวิศวกรรม ประกอบด้วย 3 ตัวแปร มีค่าน้ำหนักองค์ประกอบอยู่ระหว่าง 0.425 ถึง 0.702 โดยที่มีความแปรปรวน 2.952 หรือร้อยละ 5.180 โดยปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความสำเร็จของโครงการก่อสร้างมากที่สุดคือ ผู้รับเหมามีการใช้วิธีการ เทคโนโลยี และเครื่องมือเครื่องจักรในการก่อสร้างที่เหมาะสม สอดคล้องตามหลักวิศวกรรม (Mean = 3.856)

ปัจจัยที่ 9 ความสามารถด้านการบริหารสัญญาของผู้รับเหมา ประกอบด้วย 3 ตัวแปร มีค่าน้ำหนักองค์ประกอบอยู่ระหว่าง 0.486 ถึง 0.659 โดยที่มีความแปรปรวน 2.934 หรือร้อยละ 5.148 โดยปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความสำเร็จของโครงการก่อสร้างมากที่สุดคือ ผู้รับเหมามีความเข้าใจสัญญาจ้างก่อสร้างในทุกแง่มุมเป็นอย่างดี (Mean = 3.889)

**สรุปผลการศึกษา**

การศึกษานี้ความสามารถของผู้รับเหมามีอิทธิพลต่อความสำเร็จของโครงการก่อสร้างพบว่า มี 9 ปัจจัยที่ส่งผลต่อความสำเร็จของโครงการก่อสร้าง มีการแยกองค์ประกอบ 9 รายการ 57 ตัวแปร ได้แก่ (1) ความสามารถในการบริหารจัดการโครงการของผู้รับเหมา (2) ความสามารถในการวางแผนงานของผู้รับเหมา (3) ความสามารถในการควบคุมเวลาของผู้รับเหมา (4) ความสามารถด้านการมีประสบการณ์และความชำนาญในงานก่อสร้าง (5) ความสามารถในการบริหารจัดการสภาพคล่องทางการเงินของผู้รับเหมา (6)ความสามารถในการประสานงานของผู้รับเหมา (7) ความสามารถในการ

จัดการด้านบุคลากรของผู้รับเหมา (8) ความสามารถด้านความมั่นคงทางการเงินและเทคนิคทางวิศวกรรม (9) ความสามารถด้านการบริหารสัญญาของผู้รับเหมา และค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับมากซึ่งจะสามารถนำกลุ่มปัจจัยทั้งหมดไปกำหนดคุณสมบัติของผู้รับเหมาได้ต่อไปโดยนำไปเปรียบเทียบกับคุณสมบัติของผู้รับจ้างที่มีอยู่ของกรมบัญชีกลางที่กำหนดไว้แต่ละหมวดงาน และเสนอเพิ่มคุณสมบัติที่ไม่ได้ถูกกำหนดไว้ให้เหมาะสมกับหมวดงานต่าง ๆ และไม่ขัดต่อการจัดซื้อจัดจ้างและการบริหารพัสดุภาครัฐ และใช้เป็นเครื่องมือในการประเมินผู้รับเหมาหลังจากงานก่อสร้างเสร็จสิ้นเพื่อเป็นคะแนนของผู้รับเหมาในการประกวดราคาครั้งต่อไปซึ่งจะสามารถช่วยให้โครงการก่อสร้างประสบความสำเร็จได้

**ข้อจำกัดของการศึกษาและแนวทางการต่อยอดงานวิจัยในอนาคต**

ข้อจำกัดของการศึกษานี้คือ การกำหนดกลุ่มเป้าหมายเนื่องจากผู้ตอบแบบสอบถามต้องเป็นผู้ที่มีความรู้ความสามารถ และมีประสบการณ์ด้านสัญญางานก่อสร้างถึงจะได้รับคำตอบที่ชัดเจนตรงตามวัตถุประสงค์ซึ่งแต่ละหน่วยงานหรือบริษัทมีจำนวนไม่มากจึงทำให้ต้องใช้เวลาในการสำรวจ อย่างไรก็ตามในการศึกษาในครั้งนี้ไม่ได้กล่าวถึงความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยซึ่งหากมีการศึกษาเพิ่มเติมจะทำให้เข้าใจคุณสมบัติของผู้รับเหมาก่อสร้างได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น และยังสามารถศึกษาเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างงานก่อสร้างภาครัฐและภาคเอกชนว่ามีมุมมองที่ต่างกันอย่างไร

**เอกสารอ้างอิง**

Alzahrani, J.I., Emsley, M.W. 2013. The impact of contractors' attributes on construction project success: A post construction evaluation. Int. J. Proj. Manag. 31: 313–322 doi:10.1016/j.ijproman.2012.06.006

Enshassi, A., Mohamed, S., Abushaban, S. 2009. Factors affecting the performance of construction projects in the Gaza strip. J. Civ. Eng. Manag. 15: 269–280. doi: 10.3846/1392-3730.2009.15.269-280

Hair, J.F. 2010. Multivariate data analysis. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.

Khoso, A.R. Shaikh, P. Khahro, S. Ali, T. 2016. Assessment of critical factors for prequalification of contractors in construction industry of Pakistan. In: 8th International International Civil Engineering Congress (ICEC-2016), Ensuring Technological Advancement through Innovation Based Knowledge Corridor 23–24 December 2016, Karachi, Pakistan.

Khoso, A.R., Yusof, A.M., Chai, C, Laghari, M.A. 2021. Robust contractor evaluation criteria classification for modern technology public construction projects. Journal of Public Procurement. 21: 53–74 doi 10.1108/JOPP-06-2020-0053

Muhwezi, L., Acai, J., Otim, G. 2014. An assessment of the factors causing delays on building construction projects in Uganda. International Journal of Construction Engineering and Management 3: 13–23 doi: 10.5923/j.ijcem.20140301.02

Puri, D. Tiwari, S. 2014. Evaluating the criteria for contractors' selection and bid evaluation. International Journal of Engineering Science Invention 3: 44–48

Sweis, R.J., Bisharat, S.M., Bisharat, L., Sweis, G. 2014. Factors affecting contractor performance on public construction projects. Life Sci.11: 28–39.

# ปัจจัยที่ส่งผลต่อการยอมรับเทคโนโลยีรถบัสรับส่งสาธารณะไร้คนขับ (Autonomous Shuttles Bus) ในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

# Factors affecting the acceptance of driverless public shuttle bus technology in Kasetsart University Bang Khen Campus

**ชานน โตโพธิ์ไทย*, เอกชัย ศิริกิจพาณิชย์กูล, สโรช บุญศิริพันธ์**

Chanon Topothai*, Ackchai Sirikijpanichkul, Saroch Boonsiripant

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail: chanon.to@ku.th

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปัจจัยที่ส่งเสริมและปัจจัยที่เป็นอุปสรรคต่อการยอมรับเทคโนโลยีรถบัสรับส่งสาธารณะไร้คนขับ ซึ่งมีวิธีการศึกษาเชิงปริมาณโดยใช้แบบสอบถามและการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยัน หรือ CFA (Confirmatory Factor Analysis)และใช้โมเดลสมการเชิงโครงสร้างมาช่วยในการวิเคราะห์ ว่าแต่ละตัวแปรส่งผลต่อการยอมรับเทคโนโลยียานยนต์ไร้คนขับมากน้อยเพียงใด ผลการวิเคราะห์ของแบบจำลองพบว่าค่าความตรงของแบบจำลอง (Model Fit) ประกอบไปด้วยค่า Degree of freedom (CMIN/DF) มีค่า1.546 ค่า (GFI, AGFI, NFI) มีค่า 0.926, 0.896 และ0.932 ตามลำดับค่า SRSEA มีค่า 0.047 และ RMR มีค่า 0.03 ซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนดทั้งหมดบ่งบอกว่าแบบจำลองมีความกลมกลืนกับข้อมูลสูง ทำให้แบบจำลองจึงมีความน่าเชื่อถือ โดยสามารถสรุปได้ว่าปัจจัยที่ส่งเสริมในการยอบรับได้แก่ทัศนคติ ความเชื่อมั่น ความง่ายต่อการใช้งาน และความสะดวกสบายส่วนปัจจัยในด้านความเสี่ยงจะเป็นอุปสรรคที่ทำให้เกิดการยอบรับเทคโนโลยีนี้

**คำสำคัญ**: รถบัสรับส่งสาธารณะไร้คนขับ, สมการเชิงโครงสร้าง, องค์ประกอบเชิงยืนยัน

**Abstract**

This research study investigates the factors that promote or hinder the acceptance of driverless public buses. The quantitative research approach is employed, utilizing questionnaires and Confirmatory Factor Analysis (CFA). A structural equation modeling (SEM) is used to analyze how each variable influences the acceptance of driverless public buses. The analysis results of the model reveal that the Model Fit, including the Degree of Freedom (CMIN/DF) with a value of 1.546, and the goodness-of-fit indices (GFI, AGFI, NFI) with values of 0.926, 0.896, and 0.932, respectively, meet the established criteria. Additionally, the Standardized Root Mean Square Residual (SRSEA) is 0.047, and the Root Mean Square Residual (RMR) is 0.03, both within the acceptable range. These results collectively suggest that the model is well-fitted to the data, rendering it reliable. In summary, factors that promote acceptance include attitudes, confidence, ease of use, and convenience, while risk-related factors may pose obstacles to the adoption of this technology.

**Keywords**: Confirmatory factor analysis, Driverless public bus, Structural equation modeling

**คำนำ**

การเติบโตของเทคโนโลยีขนส่งที่พัฒนาอย่างรวดเร็วประกอบกับการขยายของเมืองและประชากรที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณการใช้รถยนต์โดยสารในภาคส่วนต่างๆทั้งขนส่งสาธารณะและการคมนาคมเพื่อธุรกิจส่งสินค้าเพิ่มมากขึ้นสิ่งหนึ่งที่ตามมาคือจำนวนอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นบนท้องถนนทั่วโลกนั้นแปรผันตาม Who(2018)กล่าวว่าอุบัติเหตุบนท้องถนนถือเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดการเสียชีวิตมากเป็นอันดับที่ 8 ของคนทุกกลุ่มอายุทั่วโลก ซึ่งปัจจุบันมีผู้เสียชีวิตจากสาเหตุนี้มากกว่าจำนวนผู้เสียชีวิตจากสาเหตุอื่น ๆ เช่น โรคร้ายแรง ในส่วนของประเทศไทยจากรายงานปี 2018 ของ WHO ประเทศไทยมีอัตราการเสียชีวิตบนท้องถนนสูงสุดในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ โดยอยู่ที่ 32.7 คน ต่อประชากร 1 แสนคน แต่ในช่วงหลังได้มีการพัฒนาเทคโนโลยียานยนต์ไร้คนขับ (Autonomous vehicles หรือ Self-driving Car) มาอย่างต่อเนื่องควบคู่กับการเติบโตของอุตสาหกรรมรถยนต์ไฟฟ้าโดยและเริ่มมีการนำมาทดลองใช้งานจริงในหลายๆพื้นที่ เนื่องจากเทคโนโลยียานยนต์ไร้คนขับจะเข้ามาช่วยแก้ปัญหาอุบัติเหตุบนท้องถนนที่เกิดจากความผิดพลาดของมนุษย์ (Human Error) เช่น เมาแล้วขับ การเสียสมาธิ โดยอาศัยเซ็นเซอร์และปัญญาประดิษฐ์ร่วมกันเพื่อนำทางอีกทั้งยังช่วยให้เกิดความสะดวกสบายกับผู้เดินทางซึ่งรวมถึงผู้สูงอายุ ผู้พิการ และเด็กเล็กที่ไม่สามารถขับรถได้ ทำให้ผู้คนสามารถเดินทางไปไหนมาไหนได้ง่ายและมีอิสระมากขึ้น ลดปัญหาการจราจรที่ติดขัด ประหยัดเวลาในการเดินทางและยังแก้ไขปัญหาการขาดแคลนแรงงานอันเกิดจากสังคมสูงวัยที่กำลังจะประสบในหลายๆประเทศได้ Calin (2020) ส่วนในภาคธุรกิจอุตสาหกรรมเทคโนโลยีนี้ยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการขนส่งสินค้าสามารถควบคุมความเสี่ยงที่จะเกิดอุบัติเหตุในโรงงานให้น้อยที่สุด ช่วยประหยัดค่าแรง และลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แม้เทคโนโลยียานยนต์ไร้คนขับจะมีประโยชน์ในหลาย ๆ ด้านแต่ก็มีความเสี่ยงที่อาจเกิดจากระบบที่มีโอกาสทำงานผิดพลาดรวมถึงปัจจัยภายนอกที่ส่งผลต่อการทำงานของระบบซึ่งอาจทำให้เกิดอุบัติเหตุที่รุนแรงต่อชีวิตได้เหตุผลที่กล่าวมาจึงนับเป็นความเสี่ยงที่มีผลต่อการตัดสินใจเลือกใช้ยานยนต์ที่มีการใช้งานเทคโนโลยีนี้ จากที่กล่าวมาการนำเทคโนโลยีรถบัสรับส่งสาธารณะไร้คนขับมาทดลองใช้งานจริงส่วนใหญ่จึงเริ่มนำร่องในสถานที่ปิดหรือสถานศึกษาเป็นอันดับแรกนำมาซึ่งงานวิจัยนี้ที่ได้ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการยอมรับเทคโนโลยีรถบัสรับส่งสาธารณะไร้คนขับ (Autonomous Shuttles Bus) ในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

**ขั้นตอนการดำเนินการศึกษา**

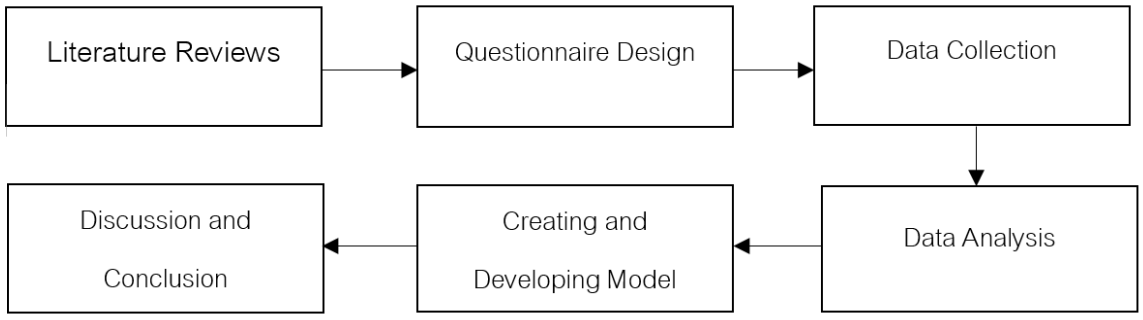



Fig. 1 Conceptual framework

การศึกษาเรื่องปัจจัยที่ส่งผลต่อการยอมรับเทคโนโลยีรถบัสรับส่งสาธารณะไร้คนขับ (Autonomous Shuttles Bus) ในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขนแบ่งออกเป็น 6 ขั้นตอน (Fig. 1) ดังนี้

1.1 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยที่ส่งผลต่อการยอมรับเทคโนโลยีรถบัสรับส่งสาธารณะไร้คนขับ

เอกสารเกี่ยวกับรถบัสรับส่งสาธารณะไร้คนขับ (Autonomous Shuttle Bus) และสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลและการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้สมการเชิงโครงสร้าง การวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยัน ทฤษฎีการยอบรับเทคโนโลยี

1.2 ออกแบบแบบสอบถามที่จะใช้ในการรวบรวมข้อมูลเพื่อวางแผนการสำรวจข้อมูล และวิธีการเก็บรวบรวมข้อมูล

1.3 ดำเนินการสำรวจข้อมูลเชิงปริมาณโดยใช้วิธีเก็บแบบสอบถามออนไลน์ผ่าน Google Form

1.4 การวิเคราะห์เพื่อแสดงลักษณะของการแจกแจงข้อมูลของตัวแปรโดยใช้สถิติพรรณนาได้แก่ ความถี่ ค่าร้อยละ การวิเคราะห์ค่าองค์ประกอบเชิงยืนยัน (Confirmatory factor analysis) ด้วยการวิเคราะห์ สมการเชิงโครงสร้าง

1.5 พัฒนาโมเดลสมการเชิงโครงสร้าง (Structural Equation Model)

1.6 สรุปผลการวิจัยและจัดทำข้อเสนอแนะที่ได้จากการวิจัย

**ประชากรและตัวอย่างในการวิจัย**

ประชากรเป้าหมายในงานวิจัยนี้คือกลุ่มนิสิตนักศึกษาที่แต่เดิมต้องต้องอาศัยยานพาหนะต่าง ๆ เช่น จักรยานยนต์ จักรยานยนต์รับจ้าง รถสวัสดิการมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (รถตะลัย) จักรยาน และ บริการเช่าสกูตเตอร์ในการสัญจรภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขนไปยังอาคารเรียน โรงอาหาร ลานจอดรถหรือประตูทางออกไปยังจุดเชื่อมต่อรถไฟฟ้า และมีความสนใจใช้บริการเทคโนโลยีรถบัสรับส่งสาธารณะไร้คนขับ (Autonomous Shuttles Bus) ในพื้นที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขนซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีแนวโน้มในการนำเทคโนโลยียานยนต์ไร้คนขับมาใช้ก่อนสถานที่อื่น ๆ โดยสำหรับงานวิจัยเกี่ยวกับแบบจำลองการยอมรับเทคโนโลยี ที่ใช้แบบจำลองสมการโครงสร้าง (Structural Equation Modeling, SEM) ในการช่วยวิเคราะห์ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะใช้ขนาดของกลุ่มตัวอย่างเท่ากับ 10 เท่าของจำนวนข้อคำถาม (Christopher Westland, 2010) โดยในงานวิจัยนี้มีข้อคำถามในส่วนที่ 3 ทั้งหมด 21 ข้อคำถาม ดังนั้นขนาดของกลุ่มตัวอย่างควรมีอย่างน้อย 210 คนทางผู้วิจัยจึงได้เลือกใช้กลุ่มตัวอย่างทั้งหมด 250 ตัวอย่างเผื่อข้อมูลสูญหาย

**เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูล**

เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูลเป็นแบบสอบถาม โดยสอบถามจากกลุ่มตัวอย่างสัญจรภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน โดยผู้วิจัยได้ออกแบบจัดทำแบบสอบถามโดยอ้างอิงจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและสามารถแบ่งแบบสอบถามได้เป็น 3 ส่วน ดังต่อไปนี้

**ส่วนที่** 1 สอบถามเกี่ยวกับข้อมูลส่วนบุคคลของกลุ่มตัวอย่างที่ทำงานหรือเดินทางภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน แบบให้เลือกตอบ ได้แก่ เพศ (Gender) อายุ (Age) สถานภาพสมรส (Status) การศึกษา (Education) อาชีพ (Occupation) รายได้ (Income) ประเภทที่พักอาศัย (Accommodation Type) จำนวนรถยนต์ที่ครัวเรือนมีครอบครอง (Household Car Ownership) ลักษณะของแบบสอบถามเป็นแบบเลือกตอบ (Check List) โดยให้เลือกตอบเพียง 1 คำตอบ

**ส่วนที่** 2 ข้อมูลลักษณะการเดินทางในปัจจุบันของผู้เดินทาง วัตถุประสงค์ของการเดินทาง จุดหมายปลายทาง ความถี่ รูปแบบการเดินทาง ค่าใช้จ่าย ลักษณะของแบบสอบถามเป็นแบบ เลือกตอบ (Check List) โดยให้เลือกตอบเพียง 1 คำตอบจากหลายคำตอบ

**ส่วนที่** 3 ที่จะสอบถามเกี่ยวกับการยอมรับต่อเทคโนโลยีรถบัสรับส่งสาธารณะไร้คนขับประกอบไปด้วย 21 ข้อคำถามโดยใช้มาตรวัดของลิเคิร์ทแบบ 5 ระดับ (5-point Likertscale) ที่ไล่ระดับจากที่เห็นด้วยอย่างยิ่ง จนถึง ไม่เห็นด้วย

อย่างยิ่ง โดยข้อคำถามอ้างอิงมาจากงานวิจัยที่มีการเก็บข้อมูลโดยใช้แบบสอบถามเช่นเดียวกัน Wu (2021) เช่นคำถามที่เกี่ยวกับการรับรู้ถึงประโยชน์ในการใช้งาน การรับรู้ถึงความง่ายในการใช้งาน การรู้รู้ถึงความสบาย ความเชื่อถือ การรับรู้ถึงความเสี่ยง ทัศนคติที่มีต่อเทคโนโลยีและความตั้งใจที่จะใช้งานแบบสอบถามโดยจะมีการตรวจสอบและพัฒนาคุณภาพของเครื่องมือ

เก็บข้อมูล ผ่านการทำ Pilot Survey โดยจะมีกลุ่มตัวอย่างไม่น้อยกว่า 20 คน เพื่อนำผลมาปรับปรุงแบบสอบถามและเมื่อได้แบบสอบถามที่สมบูรณ์แล้ว จะทำการเริ่มเก็บข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่างจริง

**โครงสร้างแบบจำลอง**

จากรูป Fig. 2 รูปแบบของโมเดลที่นำมาใช้อาศัยทฤษฎีการยอมรับเทคโนโลยี (Technology Acceptance Model) ซึ่งเป็นทฤษฎีที่ คิดค้นโดย Davis et al. (1989) ซึ่งพัฒนามาจากแนวคิดของ TRA โดย TAM จะเน้นการศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อการยอมรับหรือการตัดสินใจที่จะใช้เทคโนโลยีหรือนวัตกรรมใหม่ได้แก่ การรู้ถึงความง่ายในการใช้งาน (Perceived Ease of Use) และการรับรู้ถึงประโยชน์ที่เกิดจากการใช้ (Perceived Usefulness) ซึ่งเป็นโมเดลพื้นฐานในการศึกษาในงานวิจัยเกี่ยวกับเทคโนโลยีต่างๆต่อมาแบบจำลองการยอมรับเทคโนโลยี 2 (Technology Acceptance Model 2, TAM2) ได้ถูกพัฒนาขึ้นจากแบบจำลองการยอมรับเทคโนโลยีเดิมโดย (Venkatesh, 2000) ได้เพิ่มตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวกับแรงจูงใจจากสังคม (Social Influence) เช่นอิทธิพลจากบุคคลรอบข้างและสังคม (Subjective Norm), ความสมัครใจ (Voluntariness), ภาพลักษณ์ (Image) ส่วนในงานวิจัยนี้ที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยียานยนต์ไร้คนขับได้เพิ่มในส่วนของปัจจัยด้านความน่าเชื่อถือ,ปัจจัยด้านการรับรู้ถึงความเสี่ยงและปัจจัยด้านความสะดวกสบายเพิ่มเข้ามาโดยความน่าเชื่อถือเป็นอีกหนึ่งตัวแปรที่สำคัญต่อความไว้วางใจของผู้คนต่อเทคโนโลยีอัตโนมัติกับความตั้งใจที่จะยอมรับเทคโนโลยีซึ่งในหลายๆงานวิจัยได้มีการนำตัวแปรในด้านความน่าเชื่อถือมาใช้ประกอบการวิเคราะห์การยอมรับเทคโนโลยี เช่นงานวิจัยของ Wu (2021) ที่พบว่าการรับรู้ถึงความน่าเชื่อถือเป็นตัวแปรที่ทำนายถึงความตั้งใจที่จะใช้ยานยนต์ไร้คนขับในเชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญทำให้ได้ออกมาเป็นโมเดลการยอมรับเทคโนโลยีรถบัสรับส่งสาธารณะไร้คับขับตามรูป Fig. 3

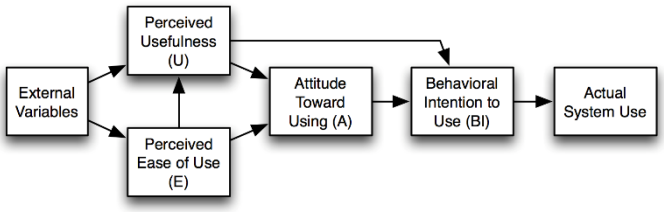



**Fig. 2** The structure of technology acceptance model

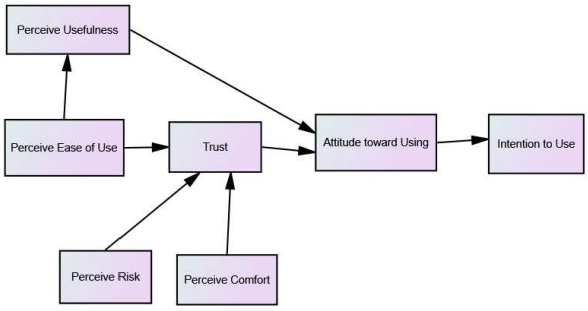



**Fig. 3** Modified model of acceptance of autonomous buses

**ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง**

1. ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยัน (Confirmatory Factor Analysis)

ทางผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยัน โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อหาค่าความเหมาะสมที่ถูกต้องของแบบจำลองและได้ทำการปรับแก้ค่าต่างๆเพื่อให้แบบจำลองเป็นไปตามเกณฑ์ที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากความสอดคล้องของทั้งโมเดล (Over all goodness of fit) ประกอบไปด้วยค่า Degree of freedom (CMIN/DF) มีค่า 1.546 ค่า (GFI, AGFI, NFI) มีค่า 0.926, 0.896 และ 0.932 ตามลำดับค่า SRSEA มีค่า 0.047 และ RMR มีค่า 0.03 โดย Schumacker และ Lomax (2010) ได้เสนอว่า GFI, AGFI และ CFI ที่มากกว่า .90–.95 คือ โมเดลสร้างมีความสอดคล้องกับข้อมูลเชิงประจักษ์ ส่วน standardized RMR ถ้ามีค่าต่ำกว่า 0.05 แสดงว่า โมเดลที่ได้มีความสอดคล้องกับข้อมูลดี ส่วน RMSEA ที่ถ้ามีค่าต่ำกว่า 0.08 แสดงว่า โมเดลมีความสอดคล้องกับข้อมูลเชิงประจักษ์ดี โดยการศึกษาครั้งนี้ผู้ศึกษาได้เลือกใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS และโปรแกรม AMOS ซึ่งเป็น plug-in ของโปรแกรม SPSS ในการวิเคราะห์เพื่อประมาณค่าสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ โดยมีรูปแบบของการสร้างแบบจำลองดัง Fig. 4 โดยในกล่องสี่เหลี่ยมคือข้อมูลจากข้อคำถามแต่ละข้อที่ได้จากการเก็บตัวอย่างแบบสอบถามมา และกล่องรูปวงรีแทนตัวแปรต่างๆ จากนั้นผู้วิจัยได้ทำการโยงเส้นจากตัวแปรต่างๆไปสู่ข้อคำถามที่อยู่ในตัวแปรเดียวกันเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรและทำการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ โดยในครั้งแรกผลที่ออกมายังไม่ได้ค่าความตรงของแบบจำลองตามเกณฑ์ จึงทำการปรับโยงค่าความแปรปรวนร่วมระหว่างค่าความคลาดเคลื่อนของแต่ละข้อคำถาม และทำการนำข้อมูลของข้อคำถามบางคำถามออกเนื่องจากมีค่าน้ำหนักองค์ประกอบ (Factor Loading)น้อยเกินไปเมื่อเทียบกับข้อคำถามอื่นๆ ทำให้ได้แบบจำลองที่ได้สามารถพัฒนาขึ้นมาให้เป็นไปตามเกณฑ์ได้โดยจาก Table 1 จะพบว่าตัวแปรทุกตัวมีค่าความเชื่อมั่น (composite reliability - CR) มากกว่า ค่าเฉลี่ยความแปรปรวนที่สกัดได้ (Average Variance Extraction, AVE) ทั้งหมดและค่าเฉลี่ยความแปรปรวนที่สกัดได้มีค่ามากกว่า 0.5 ทั้งหมด ดังนั้นจึงถือว่าแบบจำลองมีค่าความตรงสู่สมบูรณ์ (Convergent Validity) ที่ผ่านเกณฑ์ (Hair et al., 2010)

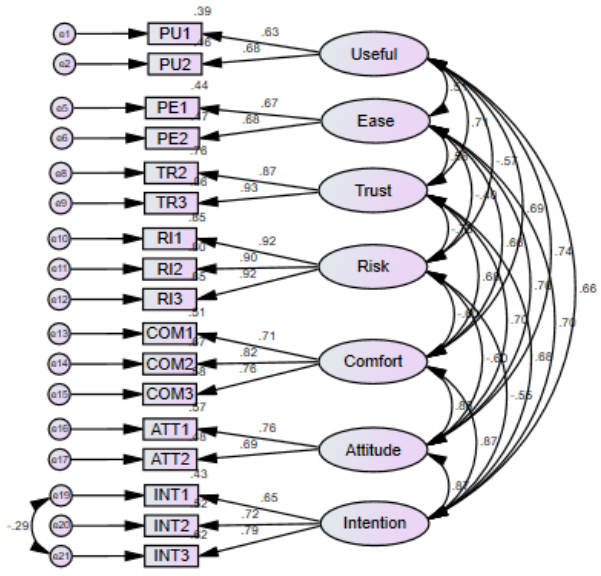



**Fig. 4** Confirmatory Factor Analysis Modeling

**Table 1** The results of the measurement model, reliability, and convergent validity

| Variable | Regression Weights/Factor Loading | t-value | AVE | C.R | Cronbach's Alpha |
|---|---|---|---|---|---|
| **Perceived Usefulness** | | | 0.425 | 0.596 | 0.701 |
| PU1 | 0.627 | | | | |
| PU2 | 0.676 | 7.226 | | | |
| **Perceived Ease of Use** | | | 0.445 | 0.625 | 0.721 |
| PE1 | 0.666 | | | | |
| PE2 | 0.683 | 7.294 | | | |
| **Trust** | | | 0.811 | 0.895 | 0.894 |
| TR2 | 0.873 | | | | |
| TR3 | 0.927 | 18.066 | | | |
| **Risk** | | | 0.832 | 0.937 | 0.935 |
| RI1 | 0.919 | | | | |
| RI2 | 0.897 | 22.489 | | | |
| RI3 | 0.92 | 23.852 | | | |
| **Comfort** | | | 0.586 | 0.809 | 0.804 |
| COM1 | 0.712 | | | | |
| COM2 | 0.819 | 11.764 | | | |
| COM3 | 0.762 | 11.048 | | | |
| **Attitude** | | | 0.525 | 0.688 | 0.702 |
| Att1 | 0.756 | | | | |
| Att2 | 0.692 | 10.40 | | | |
| **Intention** | | | 0.523 | 0.766 | 0.726 |
| INT1 | 0.655 | | | | |
| INT2 | 0.722 | 9.145 | | | |
| INT3 | 0.787 | 8.940 | | | |

PU = Perceive Usefulness(การรับรู้ถึงประโยชน์) ,PE = Perceive Ease of Use (การรับรู้ถึงความง่ายในการใช้งาน) ,TR = Trust (ความน่าเชื่อถือ)

RI = Risk(การรับรู้ถึงความเสี่ยง), COM = Perceive Comfort(การรับรู้ถึงความสบาย),Att = Attitude toward Using (ทัศนคติต่อรถบัสรับส่งสาธารณะไร้คนขับ)

INT = Intention to Use(ความตั้งใจที่จะใช้งาน)

2. วิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้าง(Structure Equation Modeling)

จากการวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้างจากความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ พบว่าโมเดลที่ตั้งไว้ตามสมมติฐานมีความสอดคล้องของโมเดลจึงไม่ต้องทดสอบโมเดลตัวอื่น ๆ โดยเมื่อวิเคราะห์เส้นทาง (path analysis) ข้างต้นสามารถสรุปหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสังเกตได้ (observed variable) และตัวแปรแฝง (latent variable) ชี้ให้เห็นว่าปัจจัยที่ส่งผลทางตรงต่อความตั้งใจที่จะใช้เทคโนโลยีรถบัสรับส่งสาธารณะไร้คนขับ (Autonomous Shuttles Bus) เกิดจากทัศนคติที่มีต่อเทคโนโลยีโดยมีค่าน้ำหนักของปัจจัยเท่ากับ 0.91 ส่วนปัจจัยทางอ้อมที่ส่งผลต่อทัศนคติที่มีต่อเทคโนโลยีรถบัสรับส่งสาธารณะไร้คนขับได้แก่การรับรู้ถึงประโยชน์ซึ่งมีค่าน้ำหนักเท่ากับ 1.26 โดยมีปัจจัยด้านการรับรู้ถึงความง่ายในการใช้งานที่ส่งผลต่อการรับรู้ถึงประโยชน์มีค่าเท่ากับ 1

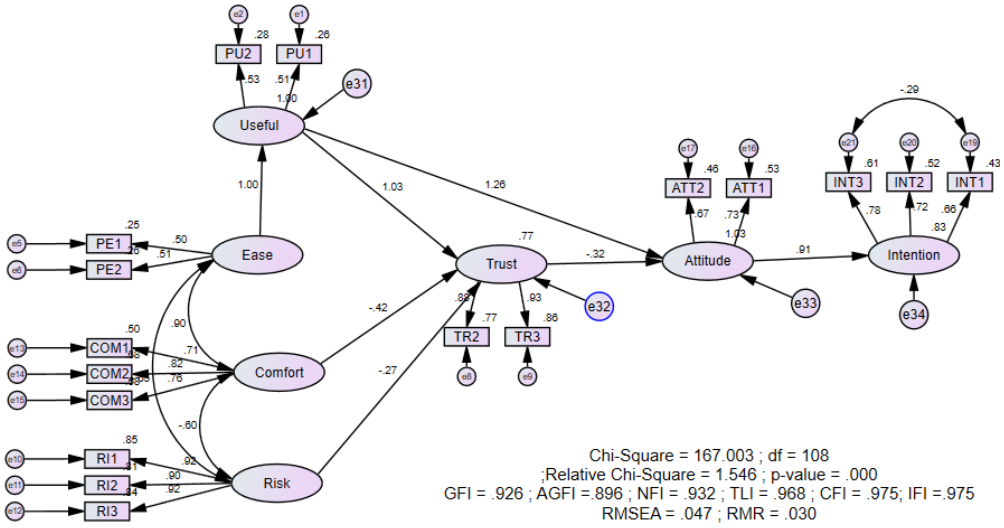



Fig.5 Structure Equation Modeling

Table 2 Regression Coefficients from Structural Equation Model

| | Relation | | Standardized regression weight | S.E. | t-value | P | Hypothesis testing result |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Useful | <--- | Ease | 1.002 | 0.124 | 5.956 | *** | Supported |
| Trust | <--- | Useful | 1.03 | 0.718 | 3.852 | *** | Supported |
| Trust | <--- | Comfort | -0.415 | 0.307 | -1.861 | 0.063 | Not supported |
| Trust | <--- | Risk | -0.272 | 0.068 | -3.179 | 0.001 | Supported but negative impact |
| Attitude | <--- | Trust | -0.316 | 0.176 | -1.526 | 0.127 | Not supported |
| Attitude | <--- | Useful | 1.261 | 0.586 | 4.9 | *** | Supported |
| Intention | <--- | Attitude | 0.913 | 0.085 | 9.129 | *** | Supported |

จาก Table 2 จะพบว่าผลการวิเคราะห์ข้อมูลแบบจำลองสมการโครงสร้างจากความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ทั้ง 7 สมมติฐาน ที่ตั้งไว้โดยอ้างอิงจากทฤษฎีการยอมรับเทคโนโลยี Fig. 3 พบว่ามี 4 ความสัมพันธ์ที่เป็นไปตามสมมุติฐานซึ่ง

ประกอบไปด้วยความง่ายต่อการใช้งานมีความสัมพันธ์เชิงบวกต่อการรับรู้ถึงประโยชน์โดยในช่องค่าน้ำหนักความสัมพันธ์ (Standardized Regression Weights) มีค่าเท่ากับ 1.002 มีค่าการถดถอยเท่ากับ 0.124 ต่อมาคือด้านการรับรู้ถึงประโยชน์มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยยะทางสถิติต่อความเชื่อถือ มีค่าน้ำหนักความสัมพันธ์ที่ 1.03 และค่าการถดถอยเท่ากับ 0.718 และสมมุติฐานด้านการรับรู้ถึงประโยชน์มีความสัมพันธ์กับทัศนคติต่อการใช้งานโดยมีค่าน้ำหนักความสัมพันธ์ที่ 1.261 และค่าการถดถอยเท่ากับ 0.586 สุดท้ายปัจจัยด้านทัศนคติต่อการใช้งานมีความสัมพันธ์ต่อความตั้งใจที่จะใช้งานมีค่าน้ำหนักความสัมพันธ์ที่ 0.913 และค่าการถดถอยเท่ากับ 0.085 ในส่วนของปัจจัยด้านอื่น ๆ เช่น ความสบายกับความเชื่อถือและความเชื่อถือกับทัศนคติต่อการใช้งานพบว่าไม่มีความสัมพันธ์กันทางสถิติแต่ในด้านของความเสี่ยงจะมีความสัมพันธ์ทางด้านลบต่อความเชื่อถือ

**สรุปผลการศึกษา**

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษาปัจจัยที่ส่งเสริมและปัจจัยที่เป็นอุปสรรคต่อการยอมรับเทคโนโลยีรถบัสรับส่งสาธารณะไร้คนขับโดยโมเดลความยินยอมต่อรถบัสอัตโนมัติถูกสร้างขึ้นโดยใช้แนวคิดจากโมเดลการยอมรับเทคโนโลยี และได้เพิ่มปัจจัยเสริม เช่น ความเชื่อมั่น, การรับรู้ถึงความเสี่ยง, และการรับรู้ถึงความสะดวกสบาย เข้าไปในโมเดลจากนั้นได้ออกแบบแบบสอบถามและตรวจสอบโมเดลด้วยข้อมูลที่เก็บรวบรวม ผลลัพธ์จากโมเดลรองรับสมมติฐานทั้งหมด 4 สมมติฐานสรุปได้ดังนี้ทัศนคติจะมีผลเชิงบวกและมีความสำคัญต่อการยอมรับเทคโนโลยีรถบัสไร้คนขับมากขึ้นโดยที่ทัศนคติที่เชิงบวกของบุคคลต่อรถบัสอัตโนมัติยิ่งสูงขึ้น ก็จะทำให้มีการยอบรับสูงขึ้นความเชื่อมั่น, ความง่ายต่อการใช้งาน,ความสะดวกสบายจะมีผลเชิงบวกและมีความสำคัญต่อความเชื่อถือและทัศนคติ โดยจะมีผลเชิงบวกต่อความตั้งใจที่จะใช้งานในท้ายที่สุดแต่ในด้านการรับรู้ถึงความเสี่ยงจะมีผลเชิงลบต่อความเชื่อมั่นโดยหากในอนาคตถ้าจะสนับสนุนให้เกิดการยอมรับเทคโนโลยีรถบัสรับส่งสาธารณะไร้คนขับมากขึ้น ควรจะมีมาตรการในการรองรับต่างๆ เช่น การแบ่งช่องจราจรแยกสำหรับยานพาหนะแต่ละประเภทเพื่อลดความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้นต่อผู้ใช้งาน ความพร้อมด้านกฎหมายในการรองรับกับการเปลี่ยนแปลงนี้ซึ่งในงานวิจัยนี้ยังมีข้อจำกัดบางอย่างในการศึกษาเช่นกลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่เป็นนักศึกษาส่งผลให้กลุ่มตัวอย่างสามารถยอมรับกับเทคโนโลยีใหม่ ๆ ได้ง่ายกว่ากลุ่มช่วงอายุอื่นๆและกลุ่มตัวอย่างที่ได้ตอบแบบสอบถามยังไม่เคยได้เห็นการใช้งานเทคโนโลยีรถบัสรับส่งสาธารณะไร้คนขับจริง ทำให้ขาดประสบการณ์การใช้งานจริง ดังนั้นกลุ่มตัวอย่างจึงไม่สามารถมองเห็นภาพการใช้งานยานยนต์ไร้คนขับเป็นภาพเดียวกันได้ดังนั้นข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคตคือเรื่องของกลุ่มตัวอย่างที่หลากหลายขึ้นเพื่ออธิบายภาพรวมได้อย่างครอบคลุมยิ่งขึ้นและอาจต้องรอให้เกิดการใช้งานจริงอย่างแพร่หลายเพื่อให้กลุ่มตัวอย่างเห็นภาพการใช้งานได้อย่างชัดเจนและสามารถมองไปได้ทิศทางเดียวกันได้

**เอกสารอ้างอิง**

Christopher Westland, J. 2010. Lower bounds on sample size in structural equation modeling. Electron. Commer. Res. Appl. 9: 476–487. doi:10.1016/j.elerap.2010.07.00

Iclodean, C., Cordos, N., Varga, B.O. 2020. Autonomous shuttle bus for public transportation a review. Energies MDPI. 13: 2917. doi.org/10.3390/en13112917

Wu, Z., Zhou, H., Xi, H., Wu, N. 2021. Analysing public acceptance of autonomous buses based on an extended TAM model. IET Intell. Transp. Syst. 1318–1330. doi.org/10.1049/itr2.12100

# การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความล่าช้าในงานก่อสร้างโครงการบรรเทาอุทกภัยเขตชุมชนและเขตเศรษฐกิจเมือง

## A study of factors affecting construction delays in flood alleviation projects in urban and economic areas

**ศุภกฤต เพ็งนิล***, **ชวเลข วณิชเวทิน**, **พิพัฒน์ สอนวงษ์**

Suphakrit Pengnil*, Chavalek Vanichavetin, Piphat Sornwong

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: suphakrit.pe@ku.th

**บทคัดย่อ**

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยที่มีผลต่อความล่าช้าในงานก่อสร้างโครงการบรรเทาอุทกภัยเขตชุมชนและเขตเศรษฐกิจเมือง โดยใช้การวิเคราะห์การตัดสินใจแบบพหุหลักเกณฑ์ ด้วยกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytical Hierarchy Process : AHP) จากการเก็บข้อมูลผ่านแบบสอบถามของผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 15 ราย ซึ่งเป็นผู้บริหารและผู้เชี่ยวชาญที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการบริหารโครงการก่อสร้างชลประทานขนาดใหญ่ จากการศึกษาพบว่าปัจจัย 3 อันดับแรก คือ ด้านมวลชน (21.80%) ด้านเอกสารและสัญญา (20.50%) และด้านการปฏิบัติงาน (15.40) ตามลำดับ ทั้งนี้ ผลที่ได้จากการศึกษาสามารถนำไปปรับใช้กับกระบวนการตัดสินใจและการวางแผนการทำงานก่อสร้าง และยังสามารถดำเนินงานตามภารกิจของกรมชลประทานในการพัฒนาแหล่งน้ำ บริหารจัดการน้ำ ป้องกันและบรรเทาอุทกภัยให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

**คำสำคัญ**: กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์, ความล่าช้าในงานก่อสร้าง, อาคารชลประทาน

**Abstract**

The purposes of this study were to examine and prioritize the factors affecting the construction delays in flood alleviation projects in urban and economic areas. Using the analysis of multi-criteria decision making by analytical hierarchy process (AHP) with data from questionnaires of the 15 specialists, who are executives and specialists involved in managing major irrigation construction projects. It was found that the first three factors were public relations (21.80%), documents and contracts (20.50%) and operations (15.40%) respectively. As a result, the study's findings can be applied to decision-making and construction planning processes, as well as to operating the Royal Irrigation Department's mission of developing water sources, managing water resources, and preventing and alleviating floods more effectively.

**Keywords**: Analytical hierarchy process, Construction delays, Irrigation building

**คำนำ**

กรมชลประทาน มีภารกิจเกี่ยวกับการพัฒนาแหล่งน้ำตามศักยภาพของลุ่มน้ำให้เพียงพอ และจัดสรรน้ำให้กับผู้ใช้น้ำทุกประเภท เพื่อให้ผู้ใช้น้ำได้รับน้ำอย่างทั่วถึงและเป็นธรรม ตลอดจนป้องกันความเสียหายอันเกิดจากน้ำ โดยมีอำนาจหน้าที่ ดำเนินการจัดให้ได้มาซึ่งน้ำ หรือกักเก็บ รักษา ควบคุม ส่ง ระบาย หรือจัดสรรน้ำเพื่อการเกษตร การพลังงาน การสาธารณูปโภค หรือการอุตสาหกรรม

โครงการชลประทานขนาดใหญ่เป็นงานชลประทานอเนกประสงค์ที่สามารถก่อให้เกิดประโยชน์ทางด้านการเกษตร การอุปโภคบริโภค การบรรเทาอุทกภัย การอุตสาหกรรม การผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังน้ำ การคมนาคม แหล่งเพาะพันธุ์ประมงน้ำจืด แหล่งท่องเที่ยวพักผ่อนหย่อนใจ และอื่น ๆ ในแต่ละโครงการมีงานก่อสร้างหลายประเภท เช่น เขื่อนเก็บกักน้ำ เขื่อนหรือฝายทดน้ำ การสูบน้ำ ระบบส่งน้ำ ระบบระบายน้ำ ระบบชลประทานในแปลงนา ถ้าเป็นการก่อสร้างประเภทเขื่อนเก็บกักน้ำ สามารถเก็บกักน้ำได้ตั้งแต่ 100 ล้านลูกบาศก์เมตรขึ้นไป หรือมีพื้นที่อ่างเก็บน้ำตั้งแต่ 15 ตารางกิโลเมตรขึ้นไป หรือโครงการชลประทานที่มีพื้นที่การชลประทานตั้งแต่ 80,000 ไร่ขึ้นไป รวมทั้งโครงการที่มีวงเงินค่าก่อสร้างมากกว่า 1,000 ล้านบาทขึ้นไป ก่อนเริ่มดำเนินโครงการจะต้องเสนอคณะรัฐมนตรีพิจารณาอนุมัติเปิดโครงการตามมาตรา 4 (8) ของพระราชกฤษฎีกาว่าด้วยการเสนอเรื่องต่อคณะรัฐมนตรีและการประชุมคณะรัฐมนตรี พ.ศ. 2548 ทั้งนี้ โครงการชลประทานขนาดใหญ่ มีลักษณะและองค์ประกอบของโครงการมาก ใช้งบประมาณสูง อีกทั้งกระบวนการก่อสร้างเกี่ยวข้องกับหน่วยงานและราษฎรเป็นจำนวนมาก เช่น การจัดหาที่ดินของราษฎรที่ได้รับผลกระทบในการดำเนินโครงการหรือที่ดินของเอกชน ซึ่งดำเนินการทั้งการจัดซื้อโดยวิธีปรองดอง และวิธีการขอออกพระราชกฤษฎีกาเวนคืนที่ดิน ต้องใช้ระยะเวลาในการดำเนินงาน ส่งผลให้การดำเนินการก่อสร้างโครงการต้องใช้ระยะเวลายาวนานด้วย อีกทั้งการก่อสร้างต้องใช้ความชำนาญในการควบคุม เพื่อให้แผนงาน/โครงการบรรลุตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้

ซึ่งปัญหาหลัก ๆ ที่เกิดขึ้นในหลายจังหวัดคือปัญหาอุทกภัยในพื้นที่เขตชุมชนและเขตเศรษฐกิจเมือง เนื่องจากเหตุอุทกภัยทำให้เกิดความเสียหายแก่พื้นที่เพาะปลูก บ้านเรือน ตลอดจนชีวิตทรัพย์สินของราษฎร และทรัพย์สินของทางราชการเป็นจำนวนมาก ดังนั้น กรมชลประทานจึงได้มีการศึกษาความเหมาะสมในการดำเนินการแก้ไขปัญหาในภาพรวมโดยวางแผนงานการดำเนินการภายใต้โครงการขนาดใหญ่เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการระบายน้ำที่ไหลผ่านเมือง และการผันน้ำก่อนเข้าเมือง ส่งผลให้เกิดกระบวนการทำงานและแก้ไขปัญหาอย่างเป็นระบบ

อย่างไรก็ดีการก่อสร้างระบบชลประทานที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งมีหลายแผนงาน/โครงการภายใต้การแก้ไขปัญหาในภาพรวมมักกจะมีอุปสรรคในการก่อสร้าง โดยจากการพิจารณาผลการดำเนินงานโครงการก่อสร้างชลประทานขนาดใหญ่เกิดความล่าช้าในการดำเนินการ ทำให้ส่งผลที่ไม่เป็นผลดีต่อทุกฝ่ายที่ทำงานร่วมกันในโครงการ อีกทั้งยังทำให้ประชาชนโดยรอบพื้นที่เกิดความเดือดร้อนและได้รับผลกระทบจากปัญหาน้ำท่วม ดังนั้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความล่าช้าในงานก่อสร้างโครงการบรรเทาอุทกภัยเขตชุมชนและเขตเศรษฐกิจเมือง เพื่อนำไปใช้ในการวางแผนการทำงานก่อสร้างอาคารชลประทานให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น และยังช่วยลดความผิดพลาดที่จะเกิดขึ้นในการดำเนินการก่อสร้างของกรมชลประทาน

**อุปกรณ์และวิธีการ**

วิธีดำเนินการศึกษาการจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยที่มีผลต่อความล่าช้าในงานก่อสร้างโครงการบรรเทาอุทกภัยเขตชุมชนและเขตเศรษฐกิจเมือง เพื่อทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อความล่าช้าในงานก่อสร้างโครงการบรรเทาอุทกภัยเขตชุมชนและเขตเศรษฐกิจเมือง และทราบลำดับความสำคัญของปัจจัยเหล่านั้นว่ามีผลกระทบมากน้อยเพียงใด โดยมีแนวทางกระบวนการในการทำวิจัยด้วยวิธีการ วิเคราะห์เชิงลำดับชั้น (Analytical Hierarchy Process: AHP) เพื่อกำหนดเกณฑ์ในการตัดสินใจและสร้างเครื่องมือที่ใช้ในการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูล โดยมีขั้นตอนในการดำเนินการวิจัย ดังนี้

*การกำหนดปัจจัยที่ใช้ในการเลือกเป็นเกณฑ์จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง*

การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความล่าช้าในงานก่อสร้างโครงการบรรเทาอุทกภัยเขตชุมชนและเขตเศรษฐกิจเมือง เป็นการศึกษาเกี่ยวกับปัญหาต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยที่มีผลต่อความล่าช้าในงานก่อสร้างโครงการบรรเทาอุทกภัยเขตชุมชนและเขตเศรษฐกิจเมือง ดังแสดงใน Table 1

**Table 1** Ranking factor sources

| Main decision criteria | Sub-decision criteria | Sources |
|---|---|---|
| Personnel [A] | A1, A2, A3 | ธเนศ อักษร. 2556, พรรษมล เทียนพูล, อภิชาต ประสิทธิ์สม. 2561 |
| Operations [B] | B1, B2, B3, B4 | ธเนศ อักษร. 2556, ปรีชา วิลัยวงค์. 2560, โสภณ ศรีทอง. 2559 |
| Documents and Contracts [C] | C1, C2, C3 | ธเนศ อักษร. 2556, |
| Geographical Conditions [D] | D1, D2, D3, D4 | ปรีชา วิลัยวงค์. 2560, โสภณ ศรีทอง. 2559 |
| Machinery [E] | E1, E2, E3, | ปรีชา วิลัยวงค์. 2560, พรรษมล เทียนพูล, อภิชาต ประสิทธิ์สม. 2561, โสภณ ศรีทอง. 2559, |
| Financial [F] | F1, F2, F3, F4 | ธเนศ อักษร. 2556 |
| Public relations [G] | G1, G2, G3 | ธเนศ อักษร. 2556, โสภณ ศรีทอง. 2559 |

*การคัดเลือกกลุ่มตัวอย่างและผู้เชี่ยวชาญ*

ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง คือ บุคลากรที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการบริหารโครงการก่อสร้างของกรมชลประทาน จำนวน 15 คน ซึ่งเป็นผู้บริหารและผู้เชี่ยวชาญที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการบริหารโครงการก่อสร้างชลประทานขนาดใหญ่ โดยผู้ตอบแบบสอบถาม คือ ผู้เชี่ยวชาญ (Expert) ซึ่งเป็นผู้บริหาร ผู้ออกแบบ และผู้ควบคุมงาน ซึ่งเป็นผู้มีประสบการณ์ในงานก่อสร้างชลประทานขนาดใหญ่ ไม่น้อยกว่า 15 ปี

*การเก็บรวบรวมข้อมูล*

งานวิจัยนี้เก็บข้อมูลผ่านแบบสอบถามจากผู้เชี่ยวชาญจำนวน 15 ท่าน โดยให้ผู้เชี่ยวชาญเปรียบเทียบเพื่อกำหนดค่าน้ำหนักความสำคัญระหว่างเกณฑ์เป็นคู่ๆ โดยใช้ตัวเลขแทนค่าเพื่อนำไปสู่การคำนวณค่าคะแนนความสำคัญของแต่ละทางเลือก ดังแสดงใน Table 2

**Table 2** Ranking of weightiness

| Ranking of weightiness | Meaning |
|---|---|
| 1 | Equally Important |
| 3 | Moderately More Important |
| 5 | Strongly More Important |
| 7 | Very Strongly More Important |
| 9 | Extremely More Important |
| 2, 4, 6, 8 | Intermediate Ranking Value |

*เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บข้อมูล และวิเคราะห์ข้อมูล*

เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ที่วางไว้ ผู้ทำการศึกษา ได้คัดเลือกโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลคือ Microsoft Excel ในการวิเคราะห์ข้อมูลจากการตัดสินใจจากวิธีการใช้แบบสอบถามของกลุ่มผู้เชี่ยวชาญ เพื่อวิเคราะห์ด้วยวิธีกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytical Hierarchy Process: AHP)

1. กระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น (Analytical Hierarchy Process: AHP) เป็นเทคนิคที่ที่ถูกนำมาใช้ในกระบวนการตัดสินใจ โดยใช้การแบ่งองค์ประกอบปัญหาออกเป็นส่วนๆ ในรูปแผนภูมิลำดับชั้น จากนั้นนำมาให้ค่าน้ำหนักของแต่ละองค์ประกอบ แล้วนำมาคำนวณค่าถ่วงน้ำหนัก เพื่อนำไปสู่การจัดลำดับค่าความสำคัญของแต่ละทางเลือก

1.1 การสลายปัญหาที่ซับซ้อน (Decomposition) ดำเนินการให้อยู่ในรูปของแผนภูมิโครงสร้างที่เป็นลำดับชั้น (Hierarchy Structure) แต่ละระดับชั้นประกอบด้วยเกณฑ์การตัดสินใจที่เกี่ยวข้องกับปัญหานั้น ระดับชั้นบนสุดเรียกว่าเป้าหมายโดยรวม ซึ่งมีเพียงปัจจัยเดียวเท่านั้น ระดับชั้นที่ 2 อาจมีหลายปัจจัย ขึ้นอยู่กับจำนวนระดับชั้นทั้งหมดของแผนภูมิ ปัจจัยต่างๆ ในระดับชั้นเดียวกันต้องมีความสำคัญเท่ากัน ถ้าระดับชั้นใดมีปัจจัยที่มีความสำคัญแตกต่างกันมาก ควรแยกปัจจัยที่สำคัญน้อยกว่าให้ลงไปอยู่ระดับชั้นถัดไป

1.2 การหาลำดับความสำคัญ (Prioritization) ดำเนินการโดยเปรียบเทียบความสัมพันธ์ทีละคู่ (Pairwise Comparison) จากปัจจัยที่มีผลกระทบต่อเกณฑ์การตัดสินใจในแต่ละระดับชั้นด้วยวิธี Principle of Hierarchic Composition ผลการวินิจฉัยจะถูกแสดงออกมาในรูปมาตราส่วนของระดับความสำคัญที่เป็นตัวเลข 1 ถึง 9 (แสดงใน Table 2) โดยแสดงอยู่ในรูปแบบตารางเมทริกซ์ ซึ่งเป็นเครื่องมือที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเปรียบเทียบในลักษณะเป็นคู่หรือจับคู่ ซึ่งสามารถตรวจสอบความสอดคล้องกันของการวินิจฉัย และสามารถวิเคราะห์ความอ่อนไหวของลำดับความสำคัญเมื่อการวินิจฉัยเปลี่ยนแปลงไปได้อีกด้วย

1.3 การสังเคราะห์ (Synthesis) ดำเนินการโดยพิจารณาลำดับความสำคัญทั้งหมด จากการเปรียบเทียบว่าทางเลือกใดสมควรได้รับเลือก

1.4 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของทางเลือกที่มีต่อปัจจัยในการวินิจฉัย (Sensitive Analysis) จะดำเนินการภายหลังจากเสร็จจากกระบวนการทั้งหมด เป็นการพิจารณาว่าเมื่อข้อมูลมีการเปลี่ยนแปลงทางด้านเกณฑ์การตัดสินใจหรือปัจจัยใดปัจจัยหนึ่ง จะทำให้อันดับความสำคัญของทางเลือกมีการเปลี่ยนแปลงหรือไม่

**ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง**

สำหรับในการวิจัยครั้งนี้ สามารถวิเคราะห์ระดับความสำคัญของปัจจัยที่มีผลต่อความล่าช้าในงานก่อสร้างโครงการบรรเทาอุทกภัยเขตชุมชนและเขตเศรษฐกิจเมืองแสดงดัง Table 3 และ Table 4 ดังนี้

**Table 3** List of weightiness factors affecting construction delays in flood alleviation projects in urban and economic areas

| Example | Personnel [A] | Operations [B] | Documents and Contracts [C] | Geographical Conditions [D] | Machinery [E] | Financial [F] | Public relations [G] | Consistency Ratio [C.R.] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0.054 | 0.036 | 0.346 | 0.087 | 0.066 | 0.243 | 0.168 | 0.084 |
| 2 | 0.076 | 0.295 | 0.159 | 0.037 | 0.082 | 0.241 | 0.110 | 0.026 |
| 3 | 0.042 | 0.117 | 0.141 | 0.230 | 0.059 | 0.077 | 0.335 | 0.016 |
| 4 | 0.080 | 0.151 | 0.328 | 0.058 | 0.234 | 0.108 | 0.042 | 0.023 |
| 5 | 0.254 | 0.048 | 0.037 | 0.158 | 0.085 | 0.084 | 0.335 | 0.058 |
| 6 | 0.262 | 0.262 | 0.087 | 0.184 | 0.047 | 0.038 | 0.121 | 0.038 |
| 7 | 0.130 | 0.115 | 0.216 | 0.038 | 0.059 | 0.101 | 0.342 | 0.091 |
| 8 | 0.148 | 0.244 | 0.387 | 0.041 | 0.102 | 0.052 | 0.027 | 0.095 |
| 9 | 0.108 | 0.143 | 0.238 | 0.061 | 0.056 | 0.042 | 0.353 | 0.054 |
| 10 | 0.075 | 0.046 | 0.184 | 0.080 | 0.116 | 0.403 | 0.096 | 0.096 |
| 11 | 0.055 | 0.197 | 0.168 | 0.069 | 0.127 | 0.042 | 0.342 | 0.027 |
| 12 | 0.114 | 0.079 | 0.221 | 0.152 | 0.063 | 0.040 | 0.332 | 0.045 |
| 13 | 0.132 | 0.107 | 0.193 | 0.054 | 0.094 | 0.037 | 0.383 | 0.034 |
| 14 | 0.226 | 0.127 | 0.103 | 0.038 | 0.067 | 0.129 | 0.311 | 0.081 |
| 15 | 0.212 | 0.358 | 0.075 | 0.034 | 0.052 | 0.159 | 0.110 | 0.033 |
| Geometric mean | 0.135 | 0.154 | 0.205 | 0.086 | 0.094 | 0.109 | 0.218 | 1.000 |

**Table 4** Average weightiness ranking of factors affecting construction delays in flood alleviation projects in urban and economic areas

| Main decision criteria | Sub-decision criteria |
|---|---|
| 1. Personnel [A] (0.135) | ➢ Insufficient contractors with regard to the volume of construction work, as well as a lack of skills in irrigation work. [A1] (0.396)<br>➢ The employer assigned several projects to a supervisor, which had an impact on the supervisor's performance. [A2] (0.190)<br>➢ The differences in knowledge, skills, and expertise in construction operation and planning between the employer and the contractors. [A3] (0.414) |
| 2. Operations [B] (0.154) | ➢ The employer's delay in delivering the construction area. [B1] (0.420)<br>➢ Inadequate operational procedure knowledge and understanding in accordance with the required work instruction. [B2] (0.233)<br>➢ The coordination delays caused by the large number of related agencies. [B3] (0.173)<br>➢ The employer stopped or delayed the operations during the construction process, causing it to fail to operate as planned. [B4] (0.174) |

**Table 4** (Continued) Average weightiness ranking of factors affecting construction delays in flood alleviation projects in urban and economic areas

| Main decision criteria | Sub-decision criteria |
|---|---|
| 3. Documents and Contracts [C] (0.205) | ➢ A land dispute occurred, or the document requesting for permission from the public sectors was delayed. [C1] (0.468)<br>➢ The drawing and the contract were revised during the construction process. [C2] (0.317)<br>➢ The contract was canceled during the construction process. [C3] (0.215) |
| 4. Geographical Conditions [D] (0.086) | ➢ The area conditions changed in a way that was not consistent with the details in the drawing. [D1] (0.195)<br>➢ Due to the geography of the business district and the residential area, there were limitations and obstacles in transferring machines into the construction site. [D2] (0.321)<br>➢ The entrance to the construction site was obstructed by public utilities and infrastructure. [D3] (0.193)<br>➢ Natural disasters such as rain and flooding. [D4] (0.292) |
| 5. Machinery [E] (0.094) | ➢ The machinery contractor failed to provide machines in accordance with the construction plan. [E1] (0.548)<br>➢ The contractor's machines were deteriorated and frequently damaged. [E2 ] (0.259)<br>➢ The machines were unable to operate fully effectively due to area conditions such as traffic and geography. [E3] (0.193) |
| 6. Financial [F] (0.109) | ➢ Inadequate construction budget planning. [F1] (0.187)<br>➢ Contractors' lack of financial liquidity. [F2] (0.371)<br>➢ The delays in payment. [F3] (0.123)<br>➢ The construction bidding was unrealistically low in order to acquire the construction project. [F4] (0.319) |
| 7. Public relations [G] (0.218) | ➢ The misunderstanding of people in the surrounding area of the construction project. [G1] (0.233)<br>➢ Conflicts and opposition from residents in the surrounding area. [G2] (0.489)<br>➢ The opposition from non-governmental organizations (NGOs). [G3] (0.278) |

## สรุป

ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความล่าช้าในงานก่อสร้างโครงการบรรเทาอุทกภัยเขตชุมชนและเขตเศรษฐกิจเมือง จากการคำนวณค่าน้ำหนักคะแนนตามกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytical Hierarchy Process : AHP) โดยคำนวณแยกตามปัจจัยหลักและปัจจัยย่อย และมีการคำนวณคะแนนตามสูตรคำนวณ เพื่อหาคะแนนรวมและนำคะแนนรวมที่ได้มาจัดลำดับปัจจัยที่มีผลต่อความล่าช้าในงานก่อสร้างโครงการบรรเทาอุทกภัยเขตชุมชนและเขตเศรษฐกิจเมือง จากการวิเคราะห์พบว่าปัจจัย 3 อันดับแรกที่เกิดขึ้น คือ 1) ด้านมวลชน (0.218) โดยมีเกณฑ์ย่อยเรียงตามน้ำหนักความสำคัญดังนี้ 1.1) ปัญหาความขัดแย้งและต่อต้านของราษฎรที่อาศัยอยู่ในเขตพื้นที่โครงการ (0.489) 1.2) ปัญหาจาก

การต่อต้านจากองค์กรอิสระ (NGOs) (0.278) 1.3) ปัญหาการเกิดความเข้าใจคลาดเคลื่อนของราษฎรในพื้นที่โครงการ (0.233) 2) ด้านเอกสารและสัญญา (0.205) โดยมีเกณฑ์ย่อยเรียงตามน้ำหนักความสำคัญดังนี้ 2.1) ปัญหาการเกิดข้อพิพาทเรื่องขอบเขตที่ดินหรือเอกสารขออนุญาตทางราชการล่าช้า (0.468) 2.2) ปัญหาการแก้ไขแบบและแก้ไขสัญญาระหว่างการก่อสร้าง (0.317) 2.3) ปัญหาการยกเลิกสัญญาระหว่างการก่อสร้าง (0.215) 3) ด้านการปฏิบัติงาน (0.154) โดยมีเกณฑ์ย่อยเรียงตามน้ำหนักความสำคัญดังนี้ 3.1) ปัญหาการส่งมอบพื้นที่ก่อสร้างล่าช้าจากผู้ว่าจ้าง (0.420) 3.2) ปัญหาการขาดความรู้ความเข้าใจในขั้นตอนการปฏิบัติงานตาม Work Instruction ที่กำหนด (0.233) 3.3) ปัญหาการหยุดงานหรือชะลองานของผู้รับจ้างในระหว่างการก่อสร้าง ทำให้ไม่สามารถปฏิบัติงานได้ตามแผนที่วางไว้ (0.174) 3.4) ปัญหาการติดต่อประสานงานล่าช้า เนื่องจากมีหลายหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง (0.173) ดังนั้น ปัญหาอันดับแรกที่เกิดขึ้น คือ ด้านมวลชน แนวทางแก้ไข ควรมีการทำประชาพิจารณ์รับฟังความคิดเห็นจากประชาชนผู้มีส่วนได้ส่วนเสียทั้งทางตรงและทางอ้อม ชี้แจงทำความเข้าใจ สร้างการรับรู้และความเชื่อมั่น รวมถึงปัญหาและความกังวล ให้ประชาชนมีส่วนร่วมในทุกกระบวนการของงานก่อสร้าง เพื่อให้ประชาชนได้สื่อสาร สะท้อนความคิดเห็น เพื่อให้ภาครัฐได้รับทราบถึงความต้องการของประชาชนผู้มีส่วนได้ส่วนเสียในพื้นที่อย่างแท้จริง ก็จะสามารถหักล้างความกังวลต่อผลกระทบที่เกิดขึ้นได้ ทั้งนี้ ผลที่ได้จากการศึกษาสามารถนำไปปรับใช้กับกระบวนการตัดสินใจและการวางแผนการทำงานก่อสร้าง เพื่อช่วยลดความผิดพลาดที่จะเกิดขึ้นในการดำเนินการก่อสร้างของกรมชลประทาน และยังสามารถดำเนินงานตามภารกิจของกรมชลประทานในการพัฒนาแหล่งน้ำ บริหารจัดการน้ำ ป้องกันและบรรเทาอุทกภัยให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

**กิตติกรรมประกาศ**

ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้บริหารของกรมชลประทานที่ให้ความช่วยเหลือในด้านข้อมูลที่ใช้ประกอบการทำวิจัยเล่มนี้ ส่งผลให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

**เอกสารอ้างอิง**

ธเนศ อักษร. 2556. การศึกษาแนวทางเพื่อเพิ่มสมรรถนะการบริหารและจัดการสัญญาก่อสร้างในกรมชลประทาน: กรณีศึกษาโครงการก่อสร้างขนาดใหญ่. ชลสารกรมชลประทาน. สำนักวิจัยและพัฒนา, กรมชลประทาน, กรุงเทพฯ. วิศวกรรมเล่ม 8 ฉบับที่ 2.

ปรีชา วิลัยวงค์. 2560. การศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการควบคุมคุณภาพงานก่อสร้างถนน โดยประยุกต์ใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ กรณีศึกษาการก่อสร้างถนนโครงการกังหันลม ตำบลวะตะแบก อำเภอเทพสถิต จังหวัดชัยภูมิ. คลังปัญญามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

พรรษมล เทียนพูล, อภิชาต ประสิทธิ์สม. 2561. ปัจจัยที่ทำให้เกิดความล่าช้าในการดำเนินงานโครงการก่อสร้างอาคารชลประทาน กรณีศึกษา : โครงการก่อสร้างอาคารชลประทาน ของสำนักงานชลประทานที่ 9. วารสารเกษมบัณฑิต.

วิฑูรย์ ตันศิริมงคล. 2542. AHP กระบวนการตัดสินใจที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในโลก. กรุงเทพ : กราฟฟิก แอนด์ปริ้นติ้ง.

โสภณ ศรีทอง. 2559. สาเหตุที่ทำให้เกิดความล่าช้าในโครงการก่อสร้างขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นในเขตอำเภอโกสุมพิสัย จังหวัดมหาสารคาม. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม.

# การประยุกต์ใช้วิธีการให้คะแนนแบบผสมผสาน เพื่อพิจารณาความเหมาะสมของสถานีรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนสายสีเขียว ณ ช่วงเวลาก่อนและหลังการก่อสร้าง

## Applying a hybrid scoring methodology to consider the suitability of green line mass rapid transit station in the pre and post construction time

**ณัฐศรันย์ บุญช่วยชูพันธุ์***, **ปิยนุช เวทย์วิวรณ์**

Nutsaraun Boonchuaychuphun*, Piyanut Wethyavivorn

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สาขาวิชาเทคโนโลยีโครงสร้างเพื่อสิ่งแวดล้อมสรรค์สร้าง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Structural Technology for the Built Environment, Faculty of Engineer, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: wongsatorn.m@ku.th

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาและทบทวนความเหมาะสมของสถานที่ตั้งสถานีรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนสายสีเขียว (Green Line Mass Rapid Transit) ตั้งแต่สถานีคูคตถึงสถานีเคหะฯ ครอบคลุมพื้นที่ 3 จังหวัด ได้แก่ จังหวัดปทุมธานี, กรุงเทพมหานคร และจังหวัดสมุทรปราการ ตามลำดับ โดยการศึกษาจะพิจารณาภายใต้เงื่อนไขความเหมาะสมของสถานที่ตั้งสถานี 3 หลักเกณฑ์ประกอบด้วย ด้านความใกล้ชิดของสถานที่ตั้ง (Proximity), ด้านความสามารถในการพัฒนาได้ของสถานที่ตั้ง (Developability) และ ด้านคุณภาพของการมองเห็นหรือทัศนียภาพ (Visual Quality) ทั้งนี้งานวิจัยนี้ได้ศึกษาความเหมาะสมของสถานที่ตั้งสถานีรถไฟฟ้า ซึ่งแปรผันตามช่วงเวลา 2 ช่วงเวลาด้วยกัน คือ ณ ช่วงเวลาก่อนดำเนินการก่อสร้าง และ ณ ช่วงเวลาหลังดำเนินการก่อสร้างหรือก่อสร้างแล้วเสร็จ ซึ่งการคำนวณค่าคะแนนความเหมาะสมของสถานที่ตั้งแต่ละสถานีจะมีการคำนวณค่าคะแนน โดยใช้วิธีการให้คะแนนแบบผสมผสาน จากนั้นจึงสรุปค่าคะแนนความเหมาะสมผ่านการพัฒนาแบบจำลองความเหมาะสม (Model Development) ทั้งหมด 2 รูปแบบ เพื่อให้ทราบถึงความเหมาะสมของสถานที่ตั้งแต่ละสถานีว่าความเหมาะสมมีการเปลี่ยนแปลงไปหรือไม่ เมื่อช่วงเวลาและสถานที่ตั้งที่พิจารณาต่างกัน นำไปสู่การตรวจสอบและประยุกต์ใช้ในการพิจารณาระบบโครงข่ายคมนาคมพื้นฐาน และวิศวกรรมโครงสร้างพื้นฐานและขนส่งที่จะดำเนินการก่อสร้างในอนาคตต่อไป

**คำสำคัญ**: การจราจรแออัด, การใช้งานโปรแกรมประยุกต์ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์, ความเหมาะสมของสถานที่ตั้งสถานีรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน, รถไฟฟ้าสายสีเขียว,ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์, วิธีการให้คะแนนแบบผสมผสาน

**Abstract**

The objectives of this research are to study and review the suitability of the location of the Green Line Mass Rapid Transit station from Khu Khot Station to Kheha Station. Covers an area of 3 provinces, Pathum Thani Province, Bangkok, and Samut Prakan Province, respectively. The study will consider conditions under the suitability of station locations, 3 criteria include the proximity of the location (Proximity), the developability of the location (Developability), and the quality of vision or scenery (Visual Quality). This research studied the suitability of the location of the Green Line Mass Rapid Transit station. This varies according to two periods of time, namely at the time before construction begins and at the time after construction or construction is completed. In calculating the suitability scores for each station location, the score values will be calculated by using a Hybrid Scoring Methodology. Then, the suitability scores are summarized through the development of all 2 additive models (Model Development) in order to know the suitability of each station location and whether suitability has changed or not. When the time period and location considered are different. This leads to examination and application in considering basic transportation network systems, infrastructure and transportation engineering that will continue construction in the future.

**Keywords**: Geographic Information Systems, Green Line Mass Rapid Transit, Hybrid Scoring Methodology, Suitability of mass transit station locations, Traffic congestion, Using of geographic information system applications

**คำนำ**

ณ ปัจจุบัน ประเทศไทยมีการปริมาณการจราจรที่เพิ่มมากขึ้นและขยายตัวอย่างรวดเร็วในทุก ๆ พื้นที่ ส่งผลให้เกิดสภาพการจราจรแออัดในหลายพื้นที่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเขตชุมชนเมือง และยังกระจายออกไปตามจังหวัดต่าง ๆ ทั่วประเทศ ด้วยปัญหาเหล่านี้ ส่งผลกระทบต่อการดำเนินชีวิตของประชาชน (กิ่งกาญจนา, 2563) โดยในปี พ.ศ. 2514 รัฐบาลไทยได้รับความอนุเคราะห์จากรัฐบาลเยอรมันในการจัดส่ง คณะผู้เชี่ยวชาญมาทำการศึกษา สำรวจ และวางแผนแม่บทสำหรับการจราจรและขนส่งในกรุงเทพมหานคร ซึ่งได้รับคำแนะนำว่าควรจัดให้มี ระบบรถขนส่งมวลชนแบบเร็ว (Mass Rapid Transit System) เพื่อแก้ไขปัญหาการเดินทางและการจราจร ในกรุงเทพมหานคร จึงได้มีประกาศของคณะปฏิวัติ ฉบับที่ 290 ลงวันที่ 27 พฤศจิกายน พ.ศ. 2515 จัดตั้งการทางพิเศษแห่งประเทศไทยขึ้น เพื่อจัดสร้างทางพิเศษ ซึ่งประกอบด้วยระบบทางด่วน (Express Way) และระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน (Mass Rapid Transit System) ต่อมาประเทศไทยได้มีการดำเนินการก่อสร้าง และเปิดให้บริการรถไฟฟ้าครั้งแรก เมื่อวันที่ 5 ธันวาคม 2542 ใน 2 เส้นทาง รวมทั้งสิ้น 23 สถานี สายสุขุมวิท ด้วยระยะทาง 17 กิโลเมตร จากสถานีหมอชิต ถึงสถานีอ่อนนุช และสายสีลม ระยะทาง 6.5 กิโลเมตร จากสถานีสนามกีฬาแห่งชาติ ถึงสถานีสะพานตากสิน ซึ่งนับเป็นเวลาเกือบ 25 ปีมาแล้วที่ประเทศไทยได้มีระบบรถไฟขนส่งมวลชนใช้บริการ และในปัจจุบันโครงข่ายการคมนาคมทางรางได้ดำเนินการก่อสร้างและเปิดให้บริการเป็นจำนวนมาก (วเรศรา และ ฐานันดร, 2561) และได้มีการดำเนินการก่อสร้างและเปิดให้บริการโครงข่ายระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนขยายออกไปสู่จังหวัดต่าง ๆ โดยในขั้นตอนการพิจารณาวางแผนแม่บทสำหรับการจราจรและขนส่งในกรุงเทพมหานคร ต้องมีการพิจารณาในเรื่องของสถานที่ตั้ง รวมถึงแนวโครงข่ายที่จะพาดผ่านในพื้นที่ต่าง ๆ เพื่อให้เกิดประโยชน์และมีประสิทธิภาพสูงสุด แต่เมื่อวันเวลาได้ผ่านล่วงเลยไป ความเหมาะสมนั้นจะยังคงเหมือนเดิมหรือไม่ สถานที่ที่เดียวกันแต่ ณ วันเวลาที่เปลี่ยนไป ความเหมาะสมจะมีความเปลี่ยนแปลงเช่นไร หรือแม้กระทั่ง ณ วันเวลาเดียวกัน แต่สถานที่ตั้งต่างกัน ความเหมาะสมจะขึ้นอยู่กับบริบทพื้นที่มากน้อยเพียงใด สิ่งเหล่านี้ล้วนเป็นประเด็นที่น่าสนใจมากกว่าเพียงการรับรู้ถึงความเหมาะสม ณ ช่วงเวลาใดเวลาหนึ่ง

ในงานวิจัยฉบับนี้ มุ่งเน้นการศึกษาความเหมาะสมของสถานที่ตั้งสถานีรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน โดยจะพิจารณากรณีศึกษารถไฟฟ้าขนส่งมวลชนสายสีเขียว (Green Line Mass Rapid Transit) ตั้งแต่สถานีคูคตถึงสถานีเคหะฯ ซึ่งเป็นสถานีที่ก่อสร้างแล้วเสร็จและมีการเปิดให้บริการมาแล้วเป็นระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการทบทวนวรรณกรรม และรวบรวมข้อมูลจากงานวิจัยและวารสารทางวิชาการต่างๆ ทั้งในไทยและต่างประเทศ จึงได้มาเป็นหลักเกณฑ์ในการพิจารณาความเหมาะสมของสถานที่ตั้งสถานีรถไฟฟ้าทั้ง 3 หลักเกณฑ์ ได้แก่ ด้านความใกล้ชิดของสถานที่ตั้ง (Proximity), ด้านความสามารถในการพัฒนาได้ของสถานที่ตั้ง (Developability) และ ด้านคุณภาพของการมองเห็นหรือทัศนียภาพ (Visual Quality) (Rosenberg and Esnard, 2008) นอกจากนี้ข้อมูลที่นำมาพิจารณาตามหลักเกณฑ์เป็นข้อมูลที่ได้รวบรวมมาจากหลายแหล่ง อาทิ ข้อมูลระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ และลงพื้นที่จริงเพื่อสำรวจและรวบรวมข้อมูล จากนั้นจึงนำข้อมูลต่างๆ ที่ได้มาคำนวณค่าคะแนนความเหมาะสม สุดท้ายจึงสรุปผลด้วยวิธีการให้คะแนนแบบผสมผสาน ผ่านแบบจำลองความเหมาะสม (Additive Models) ทั้งหมดทั้ง 4 รูปแบบ โดยการค้นคว้าอิสระนี้สามารถทำให้ทราบถึงความเหมาะสมของสถานที่เดียวกัน ณ ช่วงเวลาหนึ่งอาจมีความเหมาะสมค่อนข้างมาก แต่เมื่อวันเวลาผ่านไปความเหมาะสมนั้นอาจมากขึ้นหรือลดน้อยลงไปตามวันเวลาที่ล่วงเลย หรือ ณ ช่วงเวลาเดียวกัน แต่สถานที่ที่พิจารณาแตกต่างกัน ก็อาจจะมีความเหมาะสมไม่เท่ากัน เนื่องจากบริบทพื้นที่ ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยฉบับนี้จะสามารถนำรูปแบบการพิจารณาความ

เหมาะสมของสถานที่ตั้งสถานีรถไฟฟ้าที่ปรากฏในงานวิจัย ไปพัฒนาและปรับใช้ในการวางแผนแม่บทสำหรับการจราจรและขนส่งในประเทศไทยต่อไป

**วิธีการศึกษา**

การศึกษาความเหมาะสมของสถานที่ตั้งสถานีรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนสายสีเขียว (สุขุมวิท) ผู้วิจัยได้ดำเนินการศึกษาและทบทวนหลักเกณฑ์การพิจารณาความเหมาะสมของสถานที่ตั้งสถานีรถไฟฟ้าหรือโครงสร้างพื้นฐานประเภทอื่น ๆ จากการทบทวนวรรณกรรมทั้งในประเทศและต่างประเทศ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ โดยทางผู้วิจัยได้รวบรวมข้อมูลจากงานวิจัยต่าง ๆ (Ghobarah, 1987) และได้รูปแบบการพิจารณาความเหมาะสมของสถานที่ตั้งสถานีรถไฟฟ้า โดยพิจารณาจาก 3 หลักเกณฑ์ (Criteria) ประกอบด้วย ด้านความใกล้ชิดของสถานที่ตั้ง (Proximity), ด้านความสามารถในการพัฒนาได้ของสถานที่ตั้ง (Developability) และ ด้านคุณภาพของการมองเห็นหรือทัศนียภาพ (Visual Quality) ซึ่งทางผู้วิจัยได้พิจารณาความเหมาะสมของสถานที่ตั้งสถานีรถไฟฟ้าตาม 3 หลักเกณฑ์ (Criteria) ข้างต้น โดยพิจารณา ณ ช่วงเวลาก่อนดำเนินการก่อสร้าง (Pre-construction) และ ณ ช่วงเวลาหลังดำเนินการก่อสร้างหรือก่อสร้างแล้วเสร็จ (Post-construction) และผู้วิจัย ได้กำหนดคำนิยามของทั้ง 3 หลักเกณฑ์ (Criteria) ดังนี้

- ด้านความใกล้ชิดของสถานที่ตั้ง (Proximity) หมายถึง ความสามารถของผู้ใช้บริการระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนสายสีเขียวในการเดินเท้าไปยังสถานีที่ต่างๆ ที่กำหนดไว้ในหลักเกณฑ์ย่อย (Sub-criteria)ประกอบด้วย สถานที่ราชการ, ที่จอดแล้วจร, จุดเชื่อมต่อระบบขนส่งมวลชนประเภทอื่น, ที่พักอาศัย (คิดเฉพาะที่พักขนาดใหญ่ที่รวมคนจำนวนมาก อาทิ คอนโดมิเนียม, หอพัก เป็นต้น),ร้านอาหาร, สถานบันเทิง (รวมถึงโรงมหรสพ), ศูนย์การค้า (คิดเฉพาะที่ที่รวมคนจำนวนมาก อาทิ ห้างสรรพสินค้า, ตลาดนัด,อเวนิว เป็นต้น), สถานพยาบาล (อาทิ โรงพยาบาล, คลินิก เป็นต้น), สถานศึกษา (ทุกระดับชั้นทั้งรัฐบาลและเอกชน) และสวนสาธาณะ (รวมถึงสนามกีฬากลางแจ้ง, ยิม เป็นต้น) จากการศึกษาและทบทวนวรรณกรรมพบว่าการพัฒนาพื้นที่โดยรอบสถานีขนส่งมวลชน (Transit Oriented Development) เป็นแนวคิดการพัฒนาพื้นที่แบบผสมผสานรอบสถานี ซึ่งมุ่งเน้นไปยังระบบขนส่งมวลชนทางรางเป็นศูนย์กลาง ได้ระบุระยะทางเดินเท้าที่เหมาะสม สำหรับผู้ใช้บริการระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนมีรัศมีอยู่ที่ประมาณ 500 เมตร หรือ 0.5 กิโลเมตร (สมพงษ์ และคณะ, 2554) ดังนั้นผู้วิจัยจะศึกษาจำนวนหลักเกณฑ์ย่อย (Sub-criteria) ที่อยู่ภายใต้รัศมีข้างต้น ของแต่ละสถานี โดยที่มาของข้อมูลคะแนนดิบมาจากข้อมูลระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์

- ด้านความสามารถในการพัฒนาได้ของสถานที่ตั้ง (Developability) หมายถึง ความสามารถในการพัฒนาของพื้นที่ที่ดินที่จะดำเนินการก่อสร้างสถานีรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน จากการศึกษาและทบทวนวรรณกรรม การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน แห่งประเทศไทยได้ระบุว่าสถานีรถไฟฟ้าสายสีเขียว (สุขุมวิท) มีความยาวสถานีอยู่ที่ 150 เมตร คิดเฉพาะพื้นที่รางวิ่งและ ชานชาลา การให้ค่าคะแนนดิบของด้านความสามารถในการพัฒนาได้ของสถานที่ตั้ง (Developability) จะพิจารณาจากหลักเกณฑ์ย่อย (Sub-criteria) ประกอบด้วย การใช้ประโยชน์ที่ดิน, ความสามารถในการเข้าถึงได้ของที่ดิน ความเป็นเจ้าของที่ดิน มูลค่าที่ดิน โดยการให้ค่าคะแนนดิบผู้วิจัยจะให้ค่าคะแนนดิบแบบ 2 ทาง (Binary scoring system) พิจารณาจากสภาพพื้นที่นั้นๆ ที่จะดำเนินการก่อสร้างสถานีรถไฟฟ้ายังสามารถพัฒนาได้หรือไม่ หากยังสามารถพัฒนาได้จะกำหนดให้ค่าคะแนนดิบ เท่ากับ 1 และหากไม่สามารถพัฒนาได้แล้วจะกำหนดให้ค่าคะแนนดิบ เท่ากับ 0 ซึ่งคำนิยามของหลักเกณฑ์ย่อย (Sub-criteria)โดยที่มาของข้อมูล สำหรับการให้ค่าคะแนนดิบด้านความสามารถในการพัฒนาได้ของสถานที่ตั้ง (Developability) จะใช้ข้อมูลจากฐานข้อมูล SmartLand Application ที่จัดทำและรวบรวมโดย

กรมที่ดิน กระทรวงมหาดไทย และข้อมูลเกี่ยวกับมูลค่าที่ดินจากฐานข้อมูล https://assessprice.treasury.go.th ที่จัดทำและรวบรวมโดยกรมธนารักษ์ กระทรวงการคลัง

- ด้านคุณภาพของการมองเห็นหรือทัศนียภาพ (Visual Quality) หมายถึง คุณภาพของการรับรู้ถึงความปลอดภัย การเข้าถึง และความสวยงามทั่วไปของพื้นที่ที่ดินที่จะดำเนินการก่อสร้างสถานีรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน จากการศึกษาและทบทวนวรรณกรรม งานวิจัยใช้หลักเกณฑ์นี้ในการพิจารณาความเหมาะสม ให้ค่าคะแนนดิบของด้านคุณภาพของการมองเห็นหรือทัศนียภาพ (Visual Quality) ข้อมูลรวบรวมจากการลงพื้นที่สำรวจหน้างานและใช้การถ่ายภาพ การให้ค่าคะแนนดิบของด้านคุณภาพของการมองเห็นหรือทัศนียภาพ (Visual Quality) มีโอกาสที่การให้ค่าคะแนนจะแตกต่างออกไปตามผู้สำรวจแต่ละคน เนื่องจากเป็นการให้คะแนนตามความรับรู้ด้วยการมองเห็น แต่อย่างไรการประเมินด้วยสายตาก็ถือเป็นสิ่งสำคัญและจำเป็น ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ เพราะในบริบทของการรับรู้ของผู้ใช้บริการจะสามารถรับรู้ถึงคุณภาพด้านนี้ได้ดีที่สุด โดยการมองเห็น และการให้ค่าคะแนนจะพิจารณาตามหลักเกณฑ์ย่อย (Sub-criteria) ประกอบด้วยลักษณะสถานที่ตั้ง, การรับรู้ถึงความปลอดภัย และความสะดวกในการเข้าถึง/ออกจากสถานี ซึ่งการให้คะแนนด้านนี้ จะกำหนดระดับคะแนนทั้งสิ้น 5 ระดับ โดยระดับ 1 หมายถึง สามารถรับรู้ถึงหลักเกณฑ์ย่อย (Sub-criteria) นั้น ๆ ได้น้อยที่สุดมาก จนถึงระดับ 5 หมายถึง สามารถรับรู้ถึงหลักเกณฑ์ย่อย (Sub-criteria) นั้น ๆ ได้มากที่สุดตามลำดับ

เมื่อดำเนินการกำหนดค่าคะแนนความเหมาะสมของแต่ละสถานีทั้ง 3 ด้าน ที่พิจารณาตามหลักเกณฑ์ (Criteria) ครบถ้วนสมบูรณ์แล้ว รายละเอียดตาม Table 1 ผู้วิจัยได้นำค่าคะแนนที่ได้ทั้งหมดมาคำนวณค่าคะแนนความเหมาะสมสุทธิ ดำเนินการปรับค่าคะแนนให้มีคะแนนเต็มเท่ากับ 1 ด้วยการนำค่าคะแนนดิบของความเหมาะสมที่มีค่ามากที่สุดมาหารค่าคะแนนความเหมาะสมอื่น ๆ โดยคะแนนเต็มเท่ากับ 1 หมายถึง สถานที่ตั้งของสถานีนั้นมีความเหมาะสมมากที่สุดเมื่อเทียบกับสถานีอื่น ๆ ที่พิจารณา

**Table 1** Each station score in 3 criteria at pre & post-construction (The Total Points Were Then Normalized by Dividing by the Maximum Total to Derive the Score)

| Station | Pre-construction | | | Post-construction | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Proximity | Developability | Visual quality | Proximity | Developability | Visual quality |
| Khu Khot | 0.060 | 0.750 | 0.333 | 0.083 | 0.750 | 0.500 |
| Yaek Kor Por Aor | 0.179 | 0.750 | 0.333 | 0.226 | 0.750 | 0.500 |
| Royal Thai Air Force Museum | 0.166 | 0.750 | 0.417 | 0.165 | 1.000 | 0.500 |
| Bhumibol Adulyadej Hospital | 0.464 | 0.750 | 0.667 | 0.466 | 1.000 | 0.643 |
| Saphan Mai | 0.536 | 0.500 | 0.583 | 0.519 | 1.000 | 0.643 |
| Sai Yud | 0.894 | 0.500 | 0.583 | 0.850 | 1.000 | 0.643 |
| Phahonyothin 59 | 0.351 | 0.500 | 0.583 | 0.338 | 1.000 | 0.643 |
| Wat Phra Sri Mahathat | 0.404 | 0.750 | 0.917 | 0.406 | 1.000 | 0.857 |
| 11th Infantry Regiment | 0.609 | 0.750 | 0.583 | 0.594 | 1.000 | 0.500 |
| Bang Bua | 0.430 | 0.500 | 0.500 | 0.451 | 1.000 | 0.500 |
| Royal Forest Department | 0.344 | 0.750 | 0.833 | 0.256 | 1.000 | 0.786 |
| Kasetsart University | 0.589 | 0.750 | 0.917 | 0.594 | 1.000 | 0.857 |
| Sena Nikhom | 1.000 | 0.500 | 0.917 | 1.000 | 1.000 | 0.786 |
| Ratchayothin | 0.457 | 0.500 | 0.917 | 0.459 | 1.000 | 0.786 |
| Phahonyothin 24 | 0.285 | 0.500 | 0.667 | 0.323 | 1.000 | 0.572 |

**Table 1** (Continued) Each station score in 3 criteria at pre & post-construction (The Total Points Were Then Normalized by Dividing by the Maximum Total to Derive the Score)

| Station | Pre-construction | | | Post-construction | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Proximity | Developability | Visual quality | Proximity | Developability | Visual quality |
| Ha Yaek Lat Phrao | 0.338 | 0.500 | 1.000 | 0.383 | 1.000 | 1.000 |
| Mo Chit | 0.371 | 0.750 | 1.000 | 0.421 | 1.000 | 1.000 |
| SaphanKhwai | 0.325 | 0.500 | 0.667 | 0.368 | 1.000 | 0.643 |
| Sena Ruam | 0.245 | 0.500 | 0.583 | 0.278 | 1.000 | 0.643 |
| Ari | 0.417 | 0.500 | 0.667 | 0.474 | 1.000 | 0.643 |
| Sanam Pao | 0.278 | 0.750 | 0.500 | 0.316 | 1.000 | 0.500 |
| Victory Monument | 0.523 | 0.750 | 1.000 | 0.594 | 1.000 | 1.000 |
| Phaya Thai | 0.669 | 0.750 | 1.000 | 0.759 | 1.000 | 1.000 |
| Ratchathewi | 0.563 | 0.750 | 1.000 | 0.639 | 1.000 | 1.000 |
| Siam | 0.854 | 0.500 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| Chit Lom | 0.563 | 0.500 | 0.917 | 0.669 | 1.000 | 0.929 |
| Phloen Chit | 0.517 | 0.750 | 0.917 | 0.609 | 1.000 | 0.929 |
| Nana | 0.510 | 0.500 | 0.667 | 0.579 | 1.000 | 0.643 |
| Asok | 0.556 | 0.500 | 0.667 | 0.632 | 1.000 | 0.643 |
| Phrom Phong | 0.457 | 0.500 | 0.667 | 0.519 | 1.000 | 0.786 |
| Thong Lo | 0.570 | 0.500 | 0.750 | 0.647 | 1.000 | 0.786 |
| Ekkamai | 0.589 | 0.500 | 0.750 | 0.669 | 1.000 | 0.786 |
| Phra Khanong | 0.338 | 0.750 | 0.667 | 0.383 | 1.000 | 0.715 |
| On Nut | 0.523 | 0.500 | 0.667 | 0.594 | 1.000 | 0.643 |
| Bang Chak | 0.298 | 0.500 | 0.583 | 0.541 | 1.000 | 0.643 |
| Punnawithi | 0.265 | 0.500 | 0.750 | 0.421 | 1.000 | 0.786 |
| Udom Suk | 0.417 | 0.500 | 0.750 | 0.624 | 1.000 | 0.643 |
| Bang Na | 0.424 | 0.500 | 0.667 | 0.489 | 1.000 | 0.715 |
| Bearing | 0.298 | 0.500 | 0.667 | 0.346 | 1.000 | 0.643 |
| Samrong | 0.212 | 0.500 | 0.833 | 0.398 | 1.000 | 0.715 |
| Pu Chao | 0.219 | 0.500 | 0.750 | 0.451 | 1.000 | 0.643 |
| Chang Erawan | 0.225 | 0.500 | 0.750 | 0.383 | 1.000 | 0.715 |
| Royal Thai Naval Academy | 0.325 | 0.750 | 0.833 | 0.466 | 1.000 | 0.786 |
| Pak Nam | 0.291 | 0.750 | 0.583 | 0.308 | 1.000 | 0.572 |
| Srinagarindra | 0.384 | 0.750 | 0.750 | 0.391 | 1.000 | 0.715 |
| Phraek Sa | 0.238 | 0.750 | 0.500 | 0.346 | 1.000 | 0.572 |
| Sai Luat | 0.225 | 0.500 | 0.583 | 0.383 | 1.000 | 0.572 |
| Kheha | 0.278 | 0.750 | 0.583 | 0.451 | 1.000 | 0.643 |

จากนั้น นำค่าคะแนนความเหมาะสมของแต่ละสถานีทั้ง 3 ด้าน ณ ช่วงเวลาก่อนดำเนินการก่อสร้างและดำเนินการก่อสร้างแล้วเสร็จมารวมกันเป็นคะแนนความเหมาะสมสุทธิของแต่ละสถานี แต่เนื่องจากคะแนนที่ได้มาข้างต้น มีวิธีการให้

คะแนนดิบ รวมถึงที่มาของค่าคะแนนที่ต่างกัน ทั้งข้อมูลจากระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์และการเก็บข้อมูลภาพถ่ายจากการลงพื้นที่สำรวจสถานที่ตั้งสถานีผู้วิจัยจึงเลือกใช้วิธีการให้คะแนนแบบผสมผสาน (Hybrid scoring methodology) (Yu et al., 2011) โดยผู้วิจัยได้สรุปค่าคะแนนความเหมาะสมผ่านการพัฒนาแบบจำลองความเหมาะสม (Model Development) ทั้งหมด 2 รูปแบบรายละเอียดตาม Table 2

**Table 2** Additive Model Equations and Calculations for Each station result

| Model | Equation |
|---|---|
| I | $\frac{\text{Proximity score} + \text{developability score} + \text{visual quality score}}{3}$ |
| II | $\frac{2(\text{Proximity score}) + \text{developability score} + \text{visual quality score}}{4}$ |

การพัฒนาแบบจำลองความเหมาะสม (Model Development) ทั้ง 2 รูปแบบมีความแตกต่างกันที่การให้ความสำคัญหรือน้ำหนักของค่าคะแนนความเหมาะสมในด้านความใกล้ชิดของสถานที่ตั้ง (Proximity) โดยแบบจำลองที่ 1 (Model 1) จะกำหนดให้น้ำหนักของค่าคะแนนความเหมาะสมในแต่ละด้านมีค่าเท่ากันทั้งหมด แต่แบบจำลองที่ 2 (Model 2) จะกำหนดให้น้ำหนักของค่าคะแนนความเหมาะสมในด้านความใกล้ชิดของสถานที่ตั้ง (Proximity) มีค่าน้ำหนักเป็น 2 เท่าของความเหมาะสมในด้านความสามารถในการพัฒนาได้ของสถานที่ตั้ง (Developability) และด้านคุณภาพของการมองเห็นหรือทัศนียภาพ (Visual Quality) เนื่องจากผู้วิจัยได้ศึกษาและทบทวนวรรณกรรม พบว่าความเหมาะสมในด้านความสามารถในการพัฒนาได้ของสถานที่ตั้ง (Developability) และด้านคุณภาพของการมองเห็นหรือทัศนียภาพ (Visual Quality) สามารถปรับปรุง แก้ไขได้ง่ายกว่าด้านความใกล้ชิดของสถานที่ตั้ง (Proximity) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาพแวดล้อมในเมืองใหญ่ๆ ที่มีความหนาแน่นสูง จะถูกจำกัดและไม่สามารถปรับปรุง เปลี่ยนแปลงได้โดยง่าย สุดท้ายจะได้ค่าคะแนนความเหมาะสมของทุกสถานีรายละเอียดตาม Table 3

**Table 3** Model Results for All Stations

| Station | Pre-construction | | Post-construction | | % Difference | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Model I results | Model II results | Model I results | Model II results | Model I results | Model II results |
| Khu Khot | 0.381 | 0.301 | 0.444 | 0.354 | 16.62% | 17.72% |
| Yaek Kor Por Aor | 0.421 | 0.360 | 0.492 | 0.425 | 16.92% | 18.07% |
| Royal Thai Air Force Museum | 0.444 | 0.374 | 0.555 | 0.458 | 25.02% | 22.25% |
| Bhumibol Adulyadej Hospital | 0.627 | 0.586 | 0.703 | 0.644 | 12.18% | 9.88% |
| Saphan Mai | 0.540 | 0.539 | 0.721 | 0.670 | 33.47% | 24.33% |
| Sai Yud | 0.659 | 0.718 | 0.831 | 0.836 | 26.06% | 16.40% |
| Phahonyothin 59 | 0.478 | 0.446 | 0.660 | 0.580 | 38.14% | 29.94% |
| Wat Phra Sri Mahathat | 0.690 | 0.619 | 0.754 | 0.667 | 9.31% | 7.87% |
| 11th Infantry Regiment | 0.648 | 0.638 | 0.698 | 0.672 | 7.80% | 5.34% |
| Bang Bua | 0.477 | 0.465 | 0.650 | 0.601 | 36.41% | 29.10% |
| Royal Forest Department | 0.643 | 0.568 | 0.681 | 0.574 | 5.91% | 1.11% |
| Kasetsart University | 0.752 | 0.711 | 0.817 | 0.761 | 8.66% | 7.03% |
| Sena Nikhom | 0.806 | 0.854 | 0.929 | 0.946 | 15.28% | 10.81% |
| Ratchayothin | 0.625 | 0.583 | 0.748 | 0.676 | 19.80% | 15.99% |

**Table 3** (Continued) Model Results for All Stations

| Station | Pre-construction | | % Difference | | Pre-construction | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Model I results | Model II results | Model I results | Model II results | Model I results | Model II results |
| Mo Chit | 0.707 | 0.623 | 0.807 | 0.711 | 14.17% | 14.08% |
| Phahonyothin 24 | 0.484 | 0.434 | 0.632 | 0.555 | 30.56% | 27.76% |
| Ha Yaek Lat Phrao | 0.613 | 0.544 | 0.795 | 0.692 | 29.71% | 27.20% |
| SaphanKhwai | 0.497 | 0.454 | 0.671 | 0.595 | 34.89% | 31.08% |
| Sena Ruam | 0.443 | 0.393 | 0.640 | 0.550 | 44.63% | 39.79% |
| Ari | 0.528 | 0.500 | 0.706 | 0.648 | 33.64% | 29.45% |
| Sanam Pao | 0.509 | 0.452 | 0.605 | 0.533 | 18.83% | 18.02% |
| Victory Monument | 0.758 | 0.699 | 0.865 | 0.797 | 14.13% | 14.02% |
| Phaya Thai | 0.806 | 0.772 | 0.920 | 0.880 | 14.09% | 13.97% |
| Ratchathewi | 0.771 | 0.719 | 0.880 | 0.820 | 14.12% | 14.00% |
| Siam | 0.785 | 0.802 | 1.000 | 1.000 | 27.44% | 24.68% |
| Chit Lom | 0.660 | 0.636 | 0.866 | 0.817 | 31.24% | 28.51% |
| Phloen Chit | 0.728 | 0.675 | 0.846 | 0.787 | 16.25% | 16.56% |
| Nana | 0.559 | 0.547 | 0.741 | 0.700 | 32.53% | 28.10% |
| Asok | 0.574 | 0.570 | 0.758 | 0.727 | 32.02% | 27.51% |
| Phrom Phong | 0.541 | 0.520 | 0.768 | 0.706 | 41.95% | 35.71% |
| Thong Lo | 0.607 | 0.597 | 0.811 | 0.770 | 33.69% | 28.89% |
| Ekkamai | 0.613 | 0.607 | 0.818 | 0.781 | 33.48% | 28.64% |
| Phra Khanong | 0.585 | 0.523 | 0.699 | 0.620 | 19.58% | 18.61% |
| On Nut | 0.563 | 0.553 | 0.746 | 0.708 | 32.38% | 27.93% |
| Bang Chak | 0.460 | 0.420 | 0.728 | 0.681 | 58.14% | 62.31% |
| Punnawithi | 0.505 | 0.445 | 0.736 | 0.657 | 45.69% | 47.66% |
| Udom Suk | 0.556 | 0.521 | 0.756 | 0.723 | 35.98% | 38.70% |
| Bang Na | 0.530 | 0.504 | 0.734 | 0.673 | 38.53% | 33.64% |
| Bearing | 0.488 | 0.441 | 0.663 | 0.584 | 35.79% | 32.46% |
| Samrong | 0.515 | 0.439 | 0.704 | 0.628 | 36.74% | 42.93% |
| Pu Chao | 0.490 | 0.422 | 0.698 | 0.636 | 42.60% | 50.87% |
| Chang Erawan | 0.492 | 0.425 | 0.699 | 0.620 | 42.22% | 45.94% |
| Royal Thai Naval Academy | 0.636 | 0.558 | 0.751 | 0.680 | 18.05% | 21.77% |
| Pak Nam | 0.542 | 0.479 | 0.627 | 0.547 | 15.71% | 14.20% |
| Srinagarindra | 0.628 | 0.567 | 0.702 | 0.624 | 11.75% | 10.06% |
| Phraek Sa | 0.496 | 0.432 | 0.639 | 0.566 | 28.83% | 31.07% |
| Sai Luat | 0.436 | 0.383 | 0.652 | 0.585 | 49.41% | 52.48% |
| Kheha | 0.537 | 0.472 | 0.698 | 0.636 | 29.96% | 34.70% |

**สรุปผลการศึกษา**

ผลการศึกษาพบว่า ค่าคะแนนความเหมาะสมด้านความใกล้ชิดของสถานที่ตั้ง (Proximity) จะมีแนวโน้มค่าคะแนนความเหมาะสม ณ ช่วงเวลาหลังดำเนินการก่อสร้างหรือก่อสร้างแล้วเสร็จ (Post-construction) สูงกว่าก่อนดำเนินการก่อสร้าง (Pre-construction) เป็นส่วนใหญ่ แต่ก็มีจำนวน 6 สถานี ได้แก่ สถานีพิพิธภัณฑ์กองทัพอากาศ สถานีสะพานใหม่ สถานีสายหยุด สถานีพหลโยธิน 59 สถานีกรมทหารราบที่ 11 สถานีกรมป่าไม้ คิดเป็น 12.5% ที่มีค่าคะแนนความเหมาะสม ณ ช่วงเวลาหลังดำเนินการก่อสร้างหรือก่อสร้างแล้วเสร็จ (Post-construction) ต่ำกว่าก่อนดำเนินการก่อสร้าง (Pre-construction) โดยเมื่อวิเคราะห์จากค่าคะแนนดิบ จะพบว่าบริเวณสถานีดังกล่าวเป็นที่ตั้งของสถานที่ราชการและที่พักอาศัยเป็นส่วนใหญ่ซึ่งสถานที่เหล่านี้ มีโอกาสเคลื่อนย้าย/ปิดตัวได้น้อย แต่สิ่งที่ทำให้สถานีทั้ง 6 สถานีมีแนวโน้ม ค่าความเหมาะสมต่างจากสถานีอื่น ๆ มีสาเหตุมาจากสถานที่ประเภทร้านอาหารและศูนย์การค้า เพราะสถานที่เหล่านี้ จะได้รับผลกระทบจากปัจจัยด้านอื่น ๆ อาทิ วิกฤตเศรษฐกิจ เนื่องมาจากโรคระบาด ทำให้ธุรกิจเหล่านี้ต้องเคลื่อนย้าย/ปิดตัวได้ง่าย อีกทั้งบริเวณสถานีเหล่านี้ไม่ใช่ย่านผู้คนพลุกพลาน จึงทำให้การเกิดใหม่ของสถานที่ต่าง ๆ น้อยกว่าเมื่อเทียบกับสถานีอื่น ๆ

ค่าคะแนนความเหมาะสมด้านความสามารถในการพัฒนาได้ของสถานที่ตั้ง (Developability) จะมีแนวโน้มค่าคะแนนความเหมาะสม ณ ช่วงเวลาหลังดำเนินการก่อสร้างหรือก่อสร้างแล้วเสร็จ (Post-construction) สูงกว่าก่อนดำเนินการก่อสร้าง (Pre-construction) เป็นส่วนใหญ่ จะมีเพียง 2 สถานีเท่านั้นคิดเป็น 4.17% ที่มีค่าคะแนนความเหมาะสม ณ ช่วงเวลาหลังดำเนินการก่อสร้างหรือก่อสร้างแล้วเสร็จ (Post-construction) ต่ำกว่าก่อนดำเนินการก่อสร้าง (Pre-construction) ได้แก่ สถานีคูคต และสถานีแยก คปอ. โดยเมื่อวิเคราะห์ค่าคะแนนดิบ จะพบว่าค่าคะแนนความเหมาะสมจะมีค่าสูงขึ้น ณ ช่วงเวลาหลังดำเนินการก่อสร้างหรือก่อสร้างแล้วเสร็จ (Post-construction) ก็มีความสอดคล้องตามความเป็นจริง ที่ว่าเมื่อมีการเข้ามาของรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในพื้นที่ใด ๆ ค่าความเหมาะสมก็ควรที่จะสูงขึ้น ส่วนอีก 4.17% ที่มีค่าความเหมาะสมต่างไปจากสถานีส่วนใหญ่ มีผลมาจากอิทธิพลของพื้นที่ตั้งสถานี ซึ่งอิทธิพลดังกล่าวส่งผลกระทบต่อความเหมาะสมเป็นอย่างมาก โดยสถานีคูคต และสถานีแยก คปอ. ตั้งอยู่ในจังหวัดปทุมธานีและเขตพื้นที่กรุงเทพมหานครที่ติดกับจังหวัดปทุมธานีตามลำดับ ค่าความเหมาะสมจึงสวนทางกับสถานีอื่น ๆ ที่มีสถานที่ตั้งอยู่ในตัวเมืองใหญ่หรือใกล้เคียง (ผู้วิจัยไม่ได้นำปัจจัยอิทธิพลของพื้นที่ตั้งสถานี บริบทความเป็นต่างจังหวัด มาเป็นส่วนหนึ่งของหลักเกณฑ์ย่อย (Sub-criteria) ในการพิจารณาสำหรับการศึกษาครั้งนี้)

ค่าคะแนนความเหมาะสมด้านคุณภาพของการมองเห็นหรือทัศนียภาพ (Visual Quality) จะมีแนวโน้มค่าคะแนนความเหมาะสมที่หลากหลายและกระจายตัว โดยประกอบด้วยค่าความเหมาะสม ณ ช่วงเวลาหลังดำเนินการก่อสร้างหรือก่อสร้างแล้วเสร็จ (Post-construction) สูงกว่า, ต่ำกว่า และเท่ากันกับก่อนดำเนินการก่อสร้าง (Pre-construction) จำนวน 18, 22 และ 8 สถานี คิดเป็น 37.5%, 45.83% และ 16.67% ตามลำดับ เนื่องจากความเหมาะสมในด้านนี้ เป็นการให้คะแนน จากการลงพื้นที่สำรวจหน้างานและใช้การถ่ายภาพ จึงค่อนข้างมีความไม่เที่ยง ขึ้นกับการรับรู้ทางการมองเห็นหรือทัศนียภาพของผู้วิจัย

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลการศึกษาของแต่ละสถานีผ่านการพัฒนาแบบจำลองความเหมาะสม (Model Development) ทั้งหมด 2 รูปแบบ จะเห็นได้ว่าผลลัพธ์ไปในทิศทางเดียวกันคือ สถานีที่ตั้งอยู่ในพื้นที่ปริมณฑลจะมี ค่าเปอร์เซ็นต์ความเปลี่ยนแปลงของความเหมาะสมเพิ่มขึ้นสูงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับสถานีที่ตั้งอยู่ในพื้นที่กรุงเทพมหานคร อาทิ สถานีที่ตั้งอยู่ในพื้นที่ปริมณฑล ได้แก่สถานีบางจากและสถานีปู่เจ้า มีค่าเปอร์เซ็นต์ความเปลี่ยนแปลงของความเหมาะสมสำหรับรูปแบบที่ 1 เท่ากับ 58.14% และ 42.60% ตามลำดับ และรูปแบบที่ 2 เท่ากับ

62.31% และ 50.87% ตามลำดับ ส่วนสถานีที่ตั้งอยู่ในพื้นที่กรุงเทพมหานคร ได้แก่สถานีพญาไทและสถานีราชเทวี มีค่าเปอร์เซ็นต์ ความเปลี่ยนแปลงของความเหมาะสมสำหรับรูปแบบที่ 1 เท่ากับ 14.09% และ 14.02% ตามลำดับ และรูปแบบที่ 2 เท่ากับ 13.97% และ 14.00% ตามลำดับ จากตัวอย่างผลการศึกษาข้างต้น ทำให้ทราบว่าการเข้ามาของรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน ส่งผลต่อความเหมาะสมของสถานที่ตั้งต่างกัน บางสถานที่ตั้งอยู่ในตัวเมืองใหญ่หรือใกล้เคียง ก็จะมีความเหมาะสมสูงอยู่แล้ว ต่อให้มีการเข้ามาของรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนก็ไม่ได้ส่งผลให้สถานที่นั้นๆ มีความเหมาะสมสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งต่างจากสถานีที่ตั้งอยู่ในพื้นที่ปริมณฑลการเข้ามาของรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนส่งผลต่อความเหมาะสมสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ นี่จึงเป็นการรับรองของประโยคที่ว่า “การเข้ามาของรถไฟฟ้า นำมาซึ่งความเจริญของพื้นที่” แต่จะเจริญขึ้นได้มากน้อยเพียงใด ก็ยังขึ้นอยู่กับบริบทพื้นที่นั้น ๆ

**กิตติกรรมประกาศ**

งานวิจัยฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ไปด้วยดีได้นั้น เนื่องจากได้รับคำแนะนำแนวทางรวมไปถึงคำชี้แนะจากรองศาสตราจารย์ ดร.ปิยนุช เวทยวิวรรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก รวมถึงอาจารย์ท่านอื่น ๆ ที่ไม่ได้กล่าวถึง อีกทั้งข้อมูลเพิ่มเติมสนับสนุนประกอบงานวิจัยฉบับนี้ จากเจ้าหน้าที่การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทยและเจ้าหน้าที่กรมโยธาธิการและผังเมือง ที่กรุณาให้การสนับสนุนงานวิจัยตั้งแต่ขั้นตอนการศึกษาค้นคว้าข้อมูล ตลอดจนการปรับแก้เพื่อให้งานวิจัยที่ออกมามีความสมบูรณ์มากที่สุด ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

งานวิจัยฉบับนี้ผู้วิจัยมุ่งเน้นและคาดหวังว่าประโยชน์จะเกิดแก่ผู้ที่ต้องการจะศึกษาในเรื่องการพิจารณาสถานที่ตั้งสถานีรถไฟฟ้า หรือศึกษาความเหมาะสมของระบบโครงข่ายคมนาคมพื้นฐาน โดยใช้ฐานข้อมูลระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์เป็นข้อมูลในการพิจารณาความเหมาะสมในด้านต่าง ๆ ไม่มากก็น้อย หากงานวิจัยฉบับนี้มีข้อบกพร่องประการใด ผู้ทำการวิจัยขออภัยมา ณ ที่นี้และนำข้อเสนอแนะจากผู้อ่าน เพื่อเป็นประโยชน์ในการปรับปรุงและพัฒนางานวิจัยต่อไป

**เอกสารอ้างอิง**

กิ่งกาญจนา อาสายุทธ. 2563. การพัฒนาพื้นที่เชิงพาณิชย์โดยรอบสถานีรถไฟฟ้าและการสื่อสารการตลาดที่ส่งผลต่อกระบวนการตัดสินใจเลือกใช้บริการรถไฟฟ้ามหานครสายฉลองรัชธรรม (สายสีม่วง ช่วงสถานีเตาปูน – สถานีคลองบางไผ่). http://ithesis-ir.su.ac.th/dspace/bitstream/123456789/3068/1/61602334.pdf. 21 กุมภาพันธ์ 2566.

วเรศรา วีระวัฒน์, ฐานันดร บุญไชย. 2561. การใช้แบบจำลองในการวิเคราะห์รูปแบบการให้บริการเดินรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในเมือง TSTJ 7: 1–14. doi.org/10.14456/tjst.2018.22

สมพงษ์ ศิริโสภณศิลป์, วิษารัช สัญญาลักษณ์ฤาชัย, วิรัช หิรัญ. 2554. การพัฒนาระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในประเทศไทย, http://www.cuti.chula.ac.th/twwwroot/journals/old/translog6/p2.pdf, 22 กุมภาพันธ์ 2566.

Ghobarah, A. 1987. Civil engineers’ in site – selection studies, Vienna, Austria. https://ascelibrary-org.kasetsart.idm.oclc.org/, 22 February 2023.

Rosenberg, J.L., Esnard, A.-M. 2008. Applying a hybrid scoring methodology to transit site J. Urban Plan. Dev. 134: 180–186. doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9488(2008)134:4(180)

Yu, J., A.M. ASCE, Y.L., M. ASCE, G.-L. C., , Ma, W., Yang, X. 2011. Location UrbanTransit Hubs: Multicriteria Model and Case study in China. J. Transp. Eng. 137: 944–952. doi.org/10.1061/(ASCE)TE. 1943-5436.0000275

# การออกแบบโครงสร้างไม้ไผ่เพื่อขออนุญาตก่อสร้าง (ในประเทศไทย)

## Designing bamboo structures for building permits (in Thailand)

**ปณิตา โลหะรักษ์* , ปิยนุช เวทย์วิวรณ์**

Panita Loharak*, Piyanut Wethyavivorn

ภาควิชาเทคโนโลยีโครงสร้างเพื่อสิ่งแวดล้อมสรรค์สร้าง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Structural Technology for the Built Environment, Faculty of Engineer, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: panita.loh@ku.th

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการนำไม้ไผ่ที่มีในประเทศไทยมาใช้ในการออกแบบ โดยพัฒนาแบบจำลองโมดูลมาตรฐานเปรียบเทียบกับมาตรฐานการออกแบบโครงสร้างไม้ของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยเพื่อขออนุญาตก่อสร้าง โดยการเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลระหว่างไม้ไผ่และไม้เนื้อแข็ง เนื่องจากการศึกษาข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องของ บุญส่ง และคณะ (2556) พบว่าไม้ไผ่มีคุณสมบัติเทียบเท่าไม้เนื้อแข็ง จึงนำคุณสมบัติของไม้ทั้งสองประเภทมาทำการเปรียบเทียบ โดยเลือกใช้ไผ่ตงเนื่องจากเป็นไผ่ที่มีขนาดใหญ่ ลำต้นมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6–12 เซนติเมตร ไม่มีหนาม ลำปล้องยาวประมาณ 20 เซนติเมตร เป็นไผ่ที่นิยมปลูกในภาคกลาง ซึ่งจากการวิเคราะห์โครงสร้างในโปรแกรม Autodesk Robot Structural Analysis โดยใช้ Design Code เป็น EN 1995-1:2004/A2:2014 (Euro Code 5) ซึ่งเป็นมาตรฐานอ้างอิงการออกแบบโครงสร้างไม้ และจากการวิเคราะห์โครงสร้างไม้เนื้อแข็งพบว่ามีค่า Design Ratio อยู่ที่ระหว่าง 0.27–0.58 และค่า Design Ratio ของไผ่ตงอยู่ระหว่าง 7.41–15.43 แสดงให้เห็นว่าการกำหนดคุณสมบัติเชิงกลของไผ่ตงนั้น ยังไม่ผ่านข้อกำหนดการออกแบบตามมาตรฐาน งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อให้เป็นแนวทางและเป็นข้อมูลสำหรับการศึกษาไม้ไผ่ในการออกแบบโครงสร้างเพื่อใช้เป็นโครงสร้างหลักในการขออนุญาตก่อสร้าง เนื่องจากปัจจุบันไม้ไผ่ยังไม่สามารถขออนุญาตก่อสร้างโดยใช้เป็นโครงสร้างหลักได้

**คำสำคัญ**: การขออนุญาตก่อสร้าง, ไม้เนื้อแข็ง, ไม้ไผ่

**Abstract**

This research aims to study the use of bamboo available in Thailandfor structure design. By developing a standard module model and comparing it with the engineering institute of Thailand's wooden structure design standards to obtain construction permission. By comparing the mechanical properties between bamboo and hardwood. Due to the study of data from related research by Bunsong and colleagues (2013), it was found that bamboo has properties comparable to hardwood. Therefore, the properties of both types of wood were compared. We chose to use bamboo because it is a large bamboo. The trunk has a diameter of 6–12 centimeters, has no thorns, and the length of the segments is approximately 20 centimeters. It is a popular type of bamboo grown in the central region. From the structural analysis in the Autodesk Robot Structural Analysis program, the hardwood structure has the Design Ratio value of hardwood. is between 0.27–0.58 and the Design Ratio of bamboo is between 7.41–15.43, showing that the determination of the mechanical properties of bamboo has not yet passed the standard design requirements. This research was created to provide guidelines and information for studying bamboo in designing structures to be used as the main structure in requesting construction permits. This is because currently bamboo cannot request permission to construct using it as the main structure.

**Keywords**: Bamboo, Construction Permit, Medium hardwood

**คำนำ**

ปัจจุบันภาวะโลกร้อนกำลังเป็นเรื่องที่ผู้คนทั่วโลกให้ความสำคัญ และเป็นที่สนใจอย่างแพร่หลาย โดยทุก ๆ อุตสาหกรรมมีส่วนร่วมในการทำให้เกิดมลพิษทางอากาศ ซึ่งอุตสาหกรรมก่อสร้างเป็นสาขาอุตสาหกรรมที่ก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศมากที่สุดในโลก จากการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จำนวน 39% ของอุตสาหกรรมก่อสร้างและอาคารเมื่อปี พ.ศ. 2561 (จาก Masci innoversity มาตรฐานความยั่งยืนสำหรับงานก่อสร้าง)

ในหลายประเทศรวมถึงประเทศไทยเริ่มมีการนำวัสดุธรรมชาติเข้ามามีส่วนร่วมในอุตสาหกรรมก่อสร้างมากขึ้น และหนึ่งในวัสดุที่ผู้คนให้ความนิยมเป็นจำนวนมากได้แก่ “ไม้ไผ่” เนื่องจากไม้ไผ่เป็นพืชที่เจริญเติบโตได้ง่าย ราคาไม่สูงจนเกินไป และเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรง สวยงาม มีความเป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัว เหมาะแก่การนำมาใช้เป็นวัสดุทางเลือก ที่ไม่ก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ ในหลายประเทศไม้ไผ่สามารถนำมาใช้เป็นโครงสร้างหลักในการก่อสร้างที่อยู่อาศัยได้ ซึ่งในประเทศไทยเองมีการนำไม้ไผ่มาใช้เป็นวัสดุก่อสร้างมากขึ้นเช่นกัน แต่เนื่องจากในปัจจุบันประเทศไทย ยังไม่มีมาตรฐานสำหรับการออกแบบโครงสร้างไม้ไผ่ และไม่สามารถนำมาใช้เป็นโครงสร้างหลักของตัวอาคารได้

ดังนั้น การศึกษา “การออกแบบโครงสร้างไม้ไผ่เพื่ออนุญาตก่อสร้าง” เป็นการศึกษาเพื่อให้เห็นถึงความสามารถของไม้ไผ่ที่สามารถใช้เป็นโครงสร้างหลักของตัวอาคาร และเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนามาตรฐานการออกแบบโครงสร้างของประเทศไทยต่อไป

**ระเบียบวิธีการวิจัย**

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าในต่างประเทศ มีเพียง 2 ประเทศ ที่มีข้อกำหนดคุณสมบัติเชิงกลของพันธุ์ไผ่ไว้ในมาตรฐานเพื่อให้ใช้ค่าสำหรับการออกแบบในกรณีที่ไม่มีการทดสอบไม้ไผ่ คือ ประเทศบังกลาเทศ (Bangladesh National Building Code, BNBC, 2555) ตาม Table 1

**Table 1** Standard bamboo properties Bangladesh National Building Code (BNBC)

| Bamboo species | Density (kg/m$^3$) | | Bending strength (MPa) | | Compressive strength (MPa) | | Elastic modulus (MPa) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | G | D | G | D | G | D | G | D |
| Bambusa Bambos | 559 | 663 | 58.3 | 80.1 | 35.5 | 53.4 | 59.5 | 86.6 |
| Bambusa Sp. | 570 | 672 | 59.7 | 105.0 | 39.9 | 65.2 | 110.1 | 178.1 |
| Dendrocalamus asper | 603 | 673 | 52.9 | 52.4 | 45.6 | 47.9 | 66.2 | 107.2 |
| Bambusa polymorpha | 610 | 840 | 36.6 | 40.6 | 31.4 | - | 60.0 | 58.9 |
| Bambusa vulgaris Schrad | 610 | 830 | 53.2 | 65.8 | 39.5 | 68.0 | 103.3 | 111.8 |
| Dendrocalamus giganteus Munro | 597 | - | 17.2 | - | 35.2 | - | 6.1 | - |
| Dendrocalamus hamiltonii | 515 | - | 40.0 | - | 43.4 | - | 24.9 | - |
| Bambusa longispiculata | 711 | 684 | 33.1 | 47.8 | 42.1 | 61.1 | 55.1 | 60.3 |
| Dendrocalamus Membranaceus Munro | 551 | 664 | 26.3 | 37.8 | 40.5 | - | 24.4 | 37.7 |
| Dendrocalamus strictus | 631 | 728 | 73.4 | 119.1 | 35.9 | 69.1 | 119.8 | 150.0 |
| Thyrsostachys oliveri | 733 | 758 | 61.9 | 90.0 | 46.9 | 58.0 | 97.2 | 121.5 |

Note: G is the value from fresh condition. D is the value from air dry condition.

Source: BNBC (2555)

ซึ่งในประเทศไทยยังไม่มีการกำหนดค่าคุณสมบัติของไม้ไผ่โดยตรงจึงต้องทำการเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติเชิงกลจาก กรมโยธาธิการและผังเมือง (2564) ตาม Table 2 พบว่าค่าต้านทานแรงดัดของไผ่ตงอยู่ในเกณฑ์ไม้เนื้อแข็ง

**Table 2** Classification of wood according to standards มยผ. 1104-2564

| Wood type | Bending strength (MPa) | Natural durability (years) |
|---|---|---|
| Softwood | less than 60 | less than 2 |
| Medium hardwood | 60 - 100 | more than 2 |
| Hardwood | 100 | more than 6 |

Source: Department of Public Works and Town & Country Planning, 2564

และจากการเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติเชิงกลจาก กระทรวงมหาดไทย (2527) ตาม Table 3 พบว่าค่าต้านทานหน่วยแรงดัดและแรงดึงของไผ่ตงอยู่ในเกณฑ์ไม้เนื้อแข็ง ค่าหน่วยแรงอัดขนานเสี้ยนของไผ่ตงอยู่ในเกณฑ์ไม้เนื้ออ่อน และหน่วยแรงเฉือนขนานเสี้ยนของไผ่ตงอยู่ในเกณฑ์ไม้เนื้อแข็งปานกลาง

**Table 3** Permissible force units of buildings consisting of wood according to Ministerial Regulation No. 6

| Wood type | Bending and tensile force units MPa ($kg/cm^2$) | parallel burr compression force unit MPa ($kg/cm^2$) | Transverse Burr Compression Force Unit MPa ($kg/cm^2$) | Parallel Burr Shear Unit MPa ($kg/cm^2$) |
|---|---|---|---|---|
| Softwood | 8 (80) | 6 (60) | 1.6 (16) | 0.8 (8) |
| Medium hardwood | 10 (100) | 7.5 (75) | 2.2 (22) | 1 (10) |
| Hardwood | 12 (120) | 9 (90) | 3 (30) | 1.2 (12) |

Source: Ministry of interior Thailand (2527)

การศึกษาการออกแบบโครงสร้างไม้ไผ่เพื่อขออนุญาตก่อสร้าง จะศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลระหว่างไม้เนื้อแข็งและไม้ไผ่ ซึ่งจะแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

1. ไม้เนื้อแข็ง อ้างอิงข้อมูลคุณสมบัติเชิงกลของไม้เนื้อแข็งจากมาตรฐานวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยและตามพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522 Table 4 โดยนำข้อมูลดังกล่าว กำหนดค่าในโปรแกรม Autodesk Robot Structural Analysis ตาม Fig. 1 จากนั้นทำการสร้างโมเดลขนาด 3.00 × 3.00 × 2.40 เมตร ตาม Fig. 2 โดยใช้ Design Code เป็น EN 1995-1:2004/A2:2014 (Euro Code 5) ซึ่งเป็นมาตรฐานอ้างอิงการออกแบบโครงสร้างไม้ กำหนดค่า Live Load = 225 kg/m2 และวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรม

**Table 4** Unit of force allowed by wood

| Wood type | Bending and tensile force units ($kg/cm^2$) | Elastic modulus ($kg/cm^2$) | parallel burr compression force unit ($kg/cm^2$) | Transverse Burr Compression Force Unit ($kg/cm^2$) | Parallel Burr Shear Unit ($kg/cm^2$) |
|---|---|---|---|---|---|
| Very soft wood | 60 | 78,900 | 45 | 12 | 6 |
| Soft wood | 80 | 94,100 | 60 | 16 | 8 |
| Medium hardwood | 100 | 112,300 | 75 | 22 | 10 |
| Hardwood | 120 | 136,300 | 90 | 30 | 12 |
| Very hard wood | 150 | 189,000 | 110 | 40 | 15 |

Source: Engineering Institute of Thailand standards and the Building Control Act B.E. 2522

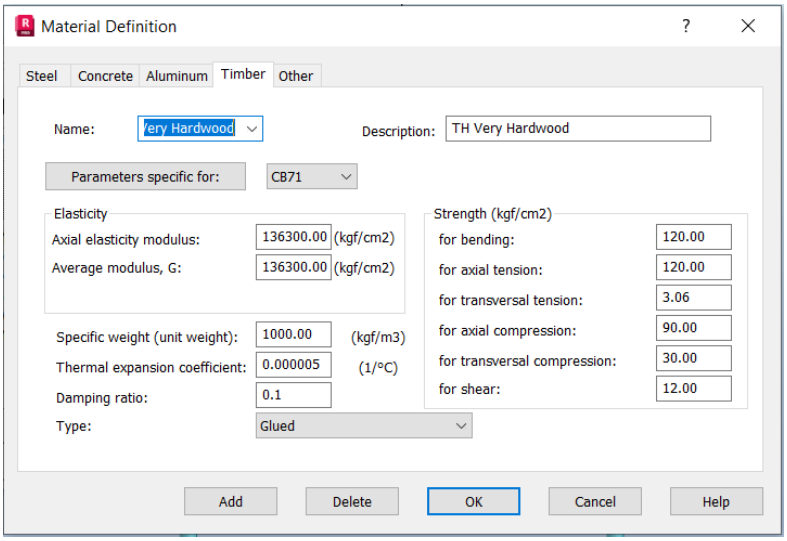



**Fig. 1** Setting hardwood mechanical properties

2. ไม้ไผ่ ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้ไผ่ตงที่มีอายุ 3–4 ปี และได้รับการถนอมไม้ไผ่ด้วยระบบอัดน้ำยาสูญญากาศ เนื่องจาก อ้างอิงข้อมูลคุณสมบัติเชิงกลของไผ่ตงจาก สุภิญญาลักษณ์ (2557) การศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของไผ่ตงเพื่อสร้างค่ามาตรฐานของวัสดุและการประยุกต์ใช้งานโครงสร้างสำหรับ อาคารสาธารณะ วิทยานิพนธ์ ,มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ โดยนำข้อมูลดังกล่าว กำหนดค่าในโปรแกรม Autodesk Robot Structural Analysis ตาม Fig. 3 จากนั้นทำการสร้างโมเดลขนาด 3.00 × 3.00 × 2.40 เมตร ตาม Fig. 2 โดยใช้ Design Code เป็น EN 1995-1:2004/A2:2014 (Euro Code 5) ซึ่งเป็นมาตรฐานอ้างอิงการออกแบบโครงสร้างไม้ กำหนดหน้าตัดเป็นรูปทรงกระบอกกลวงเพื่อให้การจำลองมีความคล้ายคลึงกับไม้ไผ่มากที่สุดโดยให้มีขนาดหน้าตัดที่ 12 เซนติเมตร กำหนดค่า Live Load = 225 $kg/m^2$ และกำหนดจุดรองรับให้เป็นแบบยึดแน่น (Fix Support)วิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ของโปรแกรม

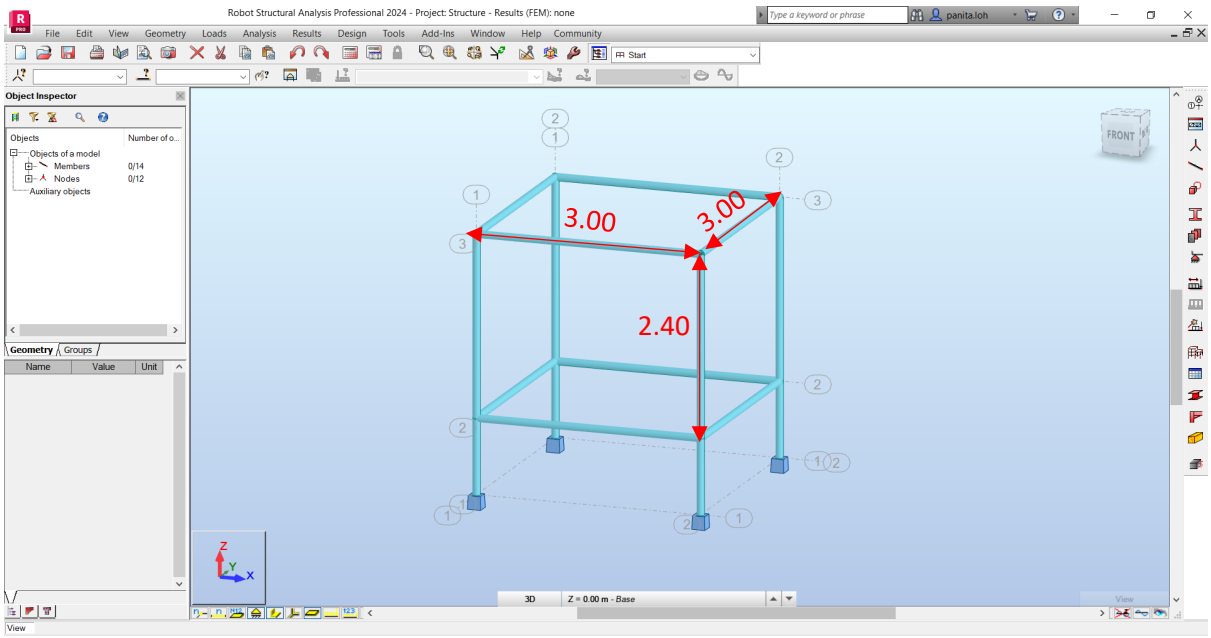



**Fig. 2** Example of a scale model 3.00 × 3.00 × 2.40 meters by Autodesk Robot Structural Analysis program

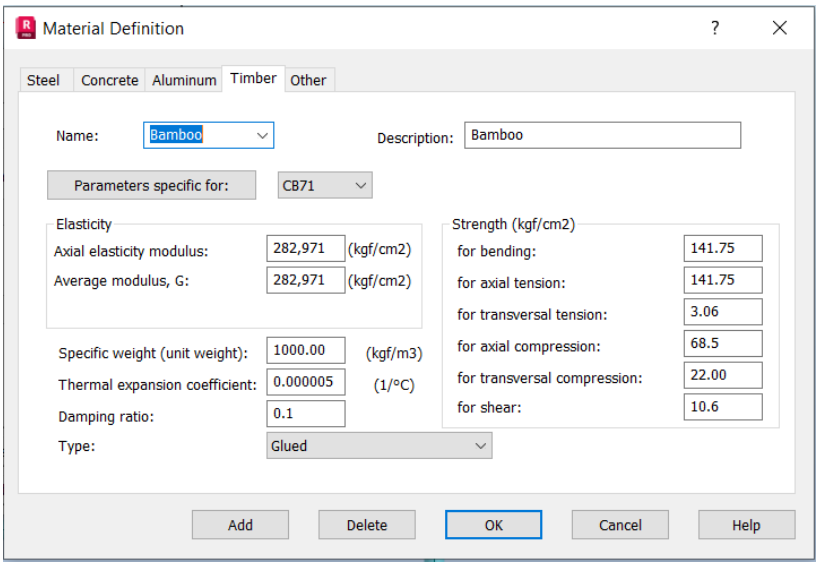
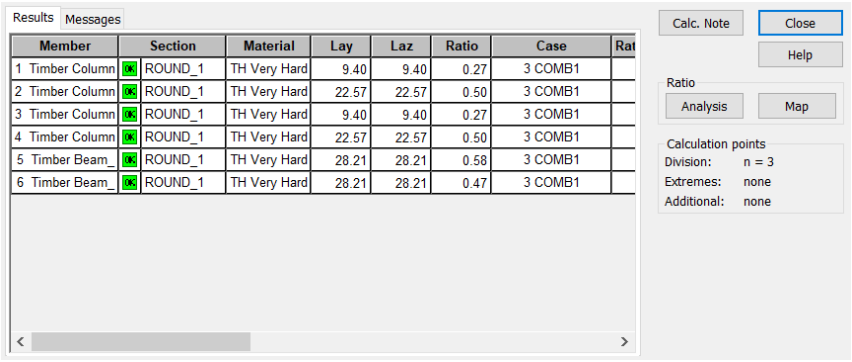



**Fig. 3** Setting bamboo mechanical properties

## ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

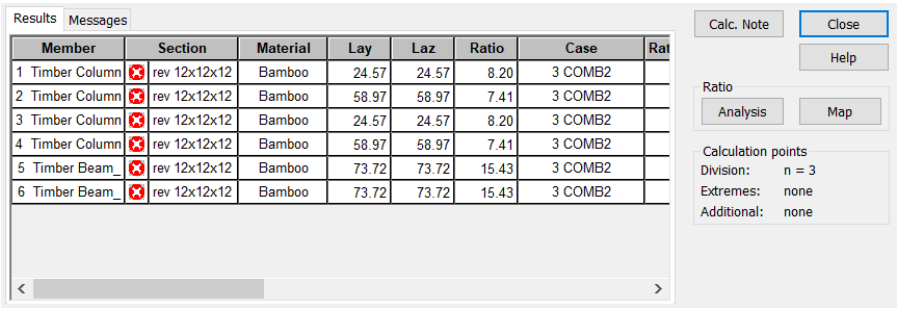
จากการวิเคราะห์โครงสร้างจาก โปรแกรม Autodesk Robot Structural Analysis โดยอ้างอิงการกำหนดค่าคุณสมบัติเชิงกลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องของ (ภิญญาลักษณ์, 2557) ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของไม้ทั้งสองประเภทสามารถพิจารณาได้จากค่า Design Ratio โดยค่า Design Ratio หมายถึงหน่วยแรงที่เกิดขึ้นต่อหน่วยแรงที่ยอมให้ต้องมีค่าน้อยกว่า 1 ซึ่งหากค่าที่ได้มีค่าน้อยกว่า 1 หมายถึงองค์อาคารนั้นๆผ่านข้อกำหนดการออกแบบ โดยจากผลทดสอบพบว่าค่า Design Ratio ของไม้เนื้อแข็งมีค่า อยู่ระหว่าง 0.27–0.58 (Fig. 4) และค่า Design Ratio ของไผ่ตงมีค่าอยู่ระหว่าง 7.41–15.43 (Fig. 5 และ Table 5) แสดงให้เห็นว่าไม้เนื้อแข็งผ่านข้อกำหนดในการวิเคราะห์โครงสร้างจากโปรแกรม Autodesk Robot Structural Analysis และไผ่ตงไม่ผ่านข้อกำหนดในการวิเคราะห์โครงสร้างจากโปรแกรม

Autodesk Robot Structural Analysis ซึ่งในการออกแบบโครงสร้างไม้ไผ่มีข้อจำกัดหลายอย่างที่ต้องคำนึงถึง เช่น อายุของไม้ไผ่ การถนอมเนื้อไม้ และจุดต่อของโครงสร้าง




| Member | Section | Material | Lay | Laz | Ratio | Case | Rat |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 Timber Column | ROUND_1 | TH Very Hard | 9.40 | 9.40 | 0.27 | 3 COMB1 | |
| 2 Timber Column | ROUND_1 | TH Very Hard | 22.57 | 22.57 | 0.50 | 3 COMB1 | |
| 3 Timber Column | ROUND_1 | TH Very Hard | 9.40 | 9.40 | 0.27 | 3 COMB1 | |
| 4 Timber Column | ROUND_1 | TH Very Hard | 22.57 | 22.57 | 0.50 | 3 COMB1 | |
| 5 Timber Beam_ | ROUND_1 | TH Very Hard | 28.21 | 28.21 | 0.58 | 3 COMB1 | |
| 6 Timber Beam_ | ROUND_1 | TH Very Hard | 28.21 | 28.21 | 0.47 | 3 COMB1 | |

**Fig. 4** Analysis table for hardwood results from the Autodesk Robot Structural Analysis program.




| Member | Section | Material | Lay | Laz | Ratio | Case | Rat |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 Timber Column | rev 12x12x12 | Bamboo | 24.57 | 24.57 | 8.20 | 3 COMB2 | |
| 2 Timber Column | rev 12x12x12 | Bamboo | 58.97 | 58.97 | 7.41 | 3 COMB2 | |
| 3 Timber Column | rev 12x12x12 | Bamboo | 24.57 | 24.57 | 8.20 | 3 COMB2 | |
| 4 Timber Column | rev 12x12x12 | Bamboo | 58.97 | 58.97 | 7.41 | 3 COMB2 | |
| 5 Timber Beam_ | rev 12x12x12 | Bamboo | 73.72 | 73.72 | 15.43 | 3 COMB2 | |
| 6 Timber Beam_ | rev 12x12x12 | Bamboo | 73.72 | 73.72 | 15.43 | 3 COMB2 | |

**Fig. 5** Analysis table for bamboo results from the Autodesk Robot Structural Analysis program.

**Table 5** Table showing Design Ratio values from analysis in Autodesk Robot Structural Analysis program

| Wood type | Design Ratio |
|---|---|
| Dendrocalamus asper | 7.41–15.43 |
| Hardwood | 0.27–0.58 |

## สรุป

จากการศึกษาแนวทางการออกแบบโครงสร้างไม้ไผ่เพื่อขออนุญาตต้องคำนึงถึงการรับแรงที่ถูกต้อง และต้องอ้างอิงหน่วยแรงที่ยอมให้ของไม้ตามมาตรฐานวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยและพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522 โดยจากการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยโปรแกรม Autodesk Robot Structural Analysis ออกแบบโครงสร้างเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 3.00 × 3.00 × 2.40 เมตร พบว่าค่า Design Ratio ของไม้เนื้อแข็งมีค่าอยู่ที่ระหว่าง 0.27–0.58 และค่า Design Ratio ของไผ่ตงอยู่ระหว่าง 7.41–15.43 ตาม Table 5 แสดงให้เห็นว่าการกำหนดคุณสมบัติเชิงกลของไผ่ตงนั้น ยังไม่ผ่านข้อกำหนดการออกแบบตามมาตรฐาน ในงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์โครงสร้างเพียงรูปแบบเดียวคือรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาด 3.00 × 3.00 × 2.40 เมตร และใช้ไผ่ตง 1 ลำต่อชิ้นส่วนโครงสร้างเท่านั้น โดยในขั้นตอนต่อไปของงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจะทำการทดลองเพิ่มจำนวนไม้ไผ่เพื่อเป็นการเสริมแรงในการวิเคราะห์โครงสร้าง เพื่อทดสอบหาจำนวนที่เหมาะสม และผ่านข้อกำหนดการออกแบบตามมาตรฐานต่อไป

**เอกสารอ้างอิง**

การจำแนกประเภทของไม้ตามมาตรฐาน มยผ. 1104-64. กรมโยธาธิการและผังเมืองกระทรวงมหาดไทย พ.ศ. 2564

หน่วยแรงที่ยอมให้ของไม้ มาตรฐานวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยและตามพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522

หน่วยแรงที่ยอมให้ของอาคารที่ประกอบด้วยไม้ตามกฎกระทรวงฉบับที่ 6 กระทรวงมหาดไทย พ.ศ. 2527

บุญส่ง สมเพาะ, ปิยะวดี บัวจงกล, วัลยุทธ เฟื่องวิวัฒน์, วรัญญู ราษฎร์เจริญ. 2556. คุณสมบัติของไม้ไผ่บางชนิดเพื่อการก่อสร้าง. สำนักวิจัยและพัฒนาการป่าไม้ กรมป่าไม้

ภิญญาลักษณ์ จันทรวงศ์. 2557. การศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของไผ่ตงเพื่อสร้างค่ามาตรฐานของวัสดุและการประยุกต์ใช้งานโครงสร้างสำหรับ อาคารสาธารณะ. วิยานิพนธ์, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ภัทฐิตา พงศ์ธนา, สุปรีดี ฤทธิรงค์. 2558. การศึกษาความสามารถการรับน้ำหนักของโครงสร้างไม้ไผ่โดยวิธีการรวบลำเพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบอาคารสาธารณะขนาดเล็ก. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

สุรพงษ์ ดารม. 2562. การวิเคราะห์ค่าความปลอดภัยสำหรับไม้ไผ่ใช้ในงานก่อสร้าง. มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตปราจีนบุรี

Amede, E.A., Hailemariama, E.K., Hailemariam, L.M., Nuramo, D.A. 2021. A Review of Codes and Standards for Bamboo Structural Design. Construction Management, Addis Ababa University, Addis Ababa, Ethiopia, Structural Engineering, Addis Ababa University, Addis Ababa, Ethiopia

Donini, G., Greco, S., Molari, L., Zanetti, A. 2022. Structure design of an Italian bamboo house in an Italian regulatory. DICAM, Alma Mater Studiorum, Viale Risorgimento 2, 40136 Bologna, Italy, Malpais de Cobano (Puntarenas), Costa Rica

# การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดจากการทำงาน กับความผูกพันต่อองค์กร ของวิศวกรในอุตสาหกรรมก่อสร้างไทย

# Exploring the relationship between job stress and organizational commitment among engineers in the Thai construction industry

**ธนัชพัชร์ เชียงพันธ์***, **ปิยนุช เวทย์วิวรณ์**, **สุธาริน สถาปิตานนท์**

Thanatpat Cheingphun*, Piyanut Wethyavivorn, Sutharin Sthapitanonda

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: thanatpat.c@ku.ac.th

**บทคัดย่อ**

ปัญหาความความเครียดจากการทำงาน เป็นปัญหาสำคัญของอุตสาหกรรมการก่อสร้าง ส่งผลร้ายแรงต่อการพัฒนาที่ยั่งยืนขององค์กร ทำให้เกิดการสูญเสียโอกาสการเจริญเติบโตของตนเองและองค์กร ขาดความสุขในการทำงาน จากปัญหาดังกล่าว งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลทำให้เกิดความเครียด โดยรวบรวมความคิดเห็น ทัศนคติ จากวิศวกรองค์กรภาครัฐ รัฐวิสาหกิจ และเอกชน การวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงสำรวจ พบว่าปัจจัยที่ส่งผลถึงความเครียดจากการทำงานอย่างมีนัยสำคัญ ประกอบด้วย การรับรู้การสนับสนุนจากองค์กร สภาพแวดล้อมการทำงานเป็นพิษและความโปร่งใส ค่านิยมด้านการทำงาน ลักษณะบุคลิกภาพ ค่านิยมการทำงานด้านสภาพแวดล้อมและความมั่นคงทางอารมณ์ ความชอบธรรมและการเคารพผู้ใหญ่ ผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นแนวทางการบริหารทรัพยากรบุคคล เพื่อลดอัตราลาออก เพิ่มแรงจูงใจในการประกอบวิชาชีพวิศวกร และเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืนขององค์กร

**คำสำคัญ**: ความเครียดจากการทำงาน, ความผูกพันกับองค์กร, ความพึงพอใจในงาน, สภาพแวดล้อมการทำงานเป็นพิษ

**Abstract**

Workplace Stress problems are an important issue in the construction industry. They have a serious impact on the sustainable development of the organization, leading to the loss of opportunities for personal and organizational growth and causing a lack of happiness at work. The purpose of this research is to study the factors affecting workplace stress of engineers. This will be achieved by collecting opinions and attitudes from engineers in government, state enterprises, and private organizations, using exploratory factor analysis. The study found that several factors significantly affect workplace stress is Organizational support, Toxic Workplace Environment & Corruptions, Work values, Personality Traits, Biospheric Value & Neuroticism and Rightness & Traditional Value.

**Keywords**: Job Satisfaction, Organizational Commitment, Toxic workplace Environment, Workplace Stress

**คำนำ**

อุตสาหกรรมก่อสร้างเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมที่มีบทบาทต่อการพัฒนาประเทศ ขับเคลื่อนระบบเศรษฐกิจให้เติบโต เกิดการจ้างงานในระบบ ปัญหาและอุปสรรคที่สำคัญคือ การบริหารทรัพยากรบุคคลที่มีความเครียดจากการทำงาน เกิดการลาออก ขาดแรงจูงใจในการประกอบวิชาชีพ ส่งผลด้านลบถึงความผูกพันต่อองค์กร และการพัฒนาที่ยั่งยืนขององค์กร รวมถึงปัญหาสุขภาพจิต เมื่อต้องทำงานภายใต้สภาวะกดดันสูง แข่งกับเวลา ข้อจำกัดของงบประมาณ และความต้องผลงานที่มีคุณภาพ จากงานวิจัยที่ผ่านมาโดยการศึกษาของ Vuong et al. (2021) พบว่าความผูกพันต่อองค์กรมาจากผลของความพึงพอใจต่องาน มีปัจจัยเรื่องรายได้ถูกจัดอันดับเป็นปัจจัยที่สำคัญมากที่สุด รองลงมาคือความสัมพันธ์กับเพื่อนร่วมงาน และ Tam and Zeng (2014) ได้ศึกษาปัจจัยความพึงพอใจต่อการทำงานของวิศวกรในบริษัท มีปัจจัยที่สำคัญ คือ พอใจในงานที่ทำ พอใจกับเพื่อนร่วมงาน และขั้นตอนวิธีการทำงานตามลำดับ ซึ่ง Wang et al. (2020) ศึกษาพบว่าสภาพแวดล้อมในการทำงานเป็นพิษและผลที่มาจากความเครียดในการทำงานมีผลเสียต่อความสำเร็จของโครงการ ความเครียดเป็นสาเหตุของปัญหาสุขภาพทางจิตใจและร่างกาย เช่น อาการนอนไม่หลับ โรคซึมเศร้า ความวิตกกังวล ส่งผลเสียต่อประสิทธิภาพของงาน Bowen et al. (2013) ศึกษาผู้เชี่ยวชาญด้านงานก่อสร้างใน South Africa พบว่าคนในอุตสาหกรรมก่อสร้างมีความเสี่ยงที่จะเกิดความเครียดสูง โดยมีสาเหตุหลัก คือ จำนวนชั่วโมงการทำงานที่มากเกินไปส่งผลให้ขาดความสมดุลในชีวิต และ Liang et al. (2021) พบว่าอุตสาหกรรมก่อสร้างมีลักษณะงานเฉพาะ ที่มีความยุ่งยาก ซับซ้อน เต็มไปด้วยความไม่แน่นอน และอันตราย ทำงานภายใต้สภาวะกดดัน งานล้นมือ ความขัดแย้งระหว่างบุคคล ทำงานไม่ตรงหน้าที่ และสภาพแวดล้อมที่ไม่เอื้อต่อการทำงาน ส่งผลให้บุคลากรที่ทำงานนี้มีความเครียดสูง เกิดความเสี่ยงต่อปัญหาสุขภาพ งานวิจัยของ Bowen et al. (2014c) ความเครียดจากงาน (หรือที่ทำงาน) เป็นการตอบสนองต่อความเครียดทางร่างกาย มีการแสดงอารมณ์ด้านลบ เมื่อต้องทำงานไม่ตรงกับความสามารถส่งผลต่อความสัมพันธ์กับเพื่อนร่วมงาน และครอบครัว นอกจากนั้น Rasool et al. (2021) ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสภาพแวดล้อมในที่ทำงานเป็นพิษกับบุคลากร พบว่า การถูกคุกคาม ถูกกลั่นแกล้ง ให้ผู้ที่ถูกกระทำได้รับความเจ็บปวดทางร่างกายหรือจิตใจ ส่งผลให้เกิดความเครียด ความวิตกกังวล ท้ายที่สุดก็จะลาออก รวมถึงแสดงพฤติกรรมด้านลบออกมา อีกทั้งการศึกษาของ Ameyaw et al. (2017) ถึงความโปร่งใสในงานก่อสร้างมีผลต่อความเครียดของบุคลากร พบว่าเมื่อทำงานด้วยความไม่โปร่งใส ทำให้ประสิทธิภาพของโครงการก่อสร้างลดลง มีต้นทุนสูง แต่คุณภาพต่ำ และเมื่อพบการกระทำความผิด กลัวเรื่องความปลอดภัยจะไม่กล้าแจ้งปัญหาให้ผู้รับผิดชอบเรื่องนี้ทราบ ขาดความเชื่อมั่นกับหน่วยงานที่ต่อต้านเรื่องนี้ กลัวถูกตีตรา ไล่ออก การศึกษาของ Çelik and Oral (2019) โครงการก่อสร้างมีหลายส่วนที่ต้องมีความร่วมมือกัน พบว่าการบริหารทรัพยากรบุคคลให้เข้มแข็งเป็นสิ่งที่สำคัญในอุตสาหกรรมก่อสร้าง เพื่อลดอัตราการลาออก และลักษณะบุคลิกภาพของแต่ละคนมีเอกลักษณ์เฉพาะทำให้การบริหารจัดการยาก และการศึกษาของ ป้องแก้ว (2559) ทำการศึกษาถึงพฤติกรรมด้านสิ่งแวดล้อมของมนุษย์โดยคำนึงถึงความยั่งยืนค่านิยมการทำงานของผู้ออกแบบในอุตสาหกรรมไทย มีทั้งหมด 6 ด้าน คือ ด้านสิ่งแวดล้อม ด้านการเห็นแก่ผู้อื่น ด้านการเห็นแก่ตนเอง ด้านความสุข ด้านดั้งเดิม และด้านเปิดกว้างที่จะเปลี่ยน

จากงานวิจัยข้างต้น พบว่าความเครียดจากการทำงานเป็นปัญหาที่ส่งผลเสียต่อสุขภาพ และลดการพัฒนาองค์กร ส่งผลให้บุคลากรไม่มีความผูกพันต่อองค์กร จึงเป็นที่มาของการศึกษาความเครียดจากการทำงาน กับความผูกพันต่อองค์กร ของวิศวกรในอุตสาหกรรมก่อสร้างไทย เพื่อหามาตรการที่จะลดความเครียดจากการทำงาน

**ทบทวนวรรณกรรม**

ความเครียดจากการทำงาน Bowen et al. (2014a) มีผลกระทบต่อการทำงานและคุณภาพชีวิต มี 3 ด้าน จำนวน 13 ตัวแปรที่ส่งผลต่อความเครียดของผู้เชี่ยวชาญด้านงานก่อสร้าง คือ (1) ด้านความต้องการงานหรือข้อเรียกร้องจากงาน ประกอบด้วย การทำงานให้ทันตามกำหนดเวลา ไม่สบายใจเมื่อต้องทำงานเป็นเวลานาน ไม่มีความสมดุลในการทำงานและชีวิตส่วนตัว ต้องพิสูจน์ตัวเองอยู่ตลอดเวลาในการทำงาน ชั่วโมงการทำงานต่อสัปดาห์ (2) ด้านการควบคุมงาน ประกอบด้วย กังวลเมื่อได้รับมอบหมายงานที่ยาก กลัวการแข่งขัน สภาพแวดล้อมในการทำงานที่ไม่ดี หน้าที่และความรับผิดชอบไม่สมดุลและ (3) ด้านการรับรู้การได้รับสนับสนุนงาน ประกอบด้วย หัวหน้างานช่วยให้ทำงานง่ายขึ้น หัวหน้างานช่วยแก้ไขปัญหางานที่ยาก เพื่อนร่วมงานทำให้การทำงานง่ายขึ้น เพื่อนร่วมงานช่วยแก้ไขปัญหางานที่ยาก

สภาพแวดล้อมในที่ทำงานเป็นพิษ และความเครียดจากการทำงาน Wang et al. (2020) ส่งผลเชิงลบต่อความสำเร็จของโครงการศึกษา 3 องค์ประกอบที่มีผลต่อความสำเร็จของโครงการคือ การสนับสนุนจากองค์กร สภาพแวดล้อมในที่ทำงานเป็นพิษ และความเครียดจากการทำงาน พบว่า สภาพแวดล้อมในที่ทำงานเป็นพิษ และความเครียดจากการทำงานส่งผลเชิงลบต่อความสำเร็จโครงการ และสภาพแวดล้อมในที่ทำงานเป็นพิษยังส่งผลต่อความเครียดจากการทำงาน

การศึกษาของ Çelik and Oral (2019) ศึกษาถึงลักษณะบุคลิกภาพ Costa (1996) และ Psychology (2019) ใช้ทฤษฎี The Five-Factor Theory อธิบาย 5 บุคลิกภาพ คือ ชอบการเข้าสังคม มีความเป็นมิตร มีจิตสำนึก มีความไม่มั่นคงทางอารมณ์ และเปิดรับประสบการณ์ เป็นปัจจัยที่สามารถใช้อธิบายลักษณะบุคลิกภาพได้เป็นอย่างดี

**วิธีการดำเนินการวิจัย**

*การรวบรวมข้อมูล*

ทำการรวบรวมข้อมูลปัจจัยที่ส่งผลต่อความเครียดจากการทำงาน โดยเลือกปัจจัยที่มีการศึกษาซ้ำ ๆ กัน หรือใกล้เคียงกันจากผู้วิจัยแต่ละท่านมาปรับใช้ในการศึกษานี้ นำมาตรวจสอบวิเคราะห์ปัจจัยเชิงสำรวจ (EFA) ผู้วิจัยได้สรุปตัวแปรจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ โดยลักษณะบุคลิกภาพ มี 5 ตัวแปร Çelik and Oral (2019) ค่านิยมการทำงาน มี 6 ตัวแปร ป้องแก้ว (2559) ความต้องการได้รับการสนับสนุนจากองค์กร 7 ตัวแปร ความเครียดจากการทำงาน มี 13 ตัวแปร Bowen et al. (2014b) ความพึงพอใจในงาน มี 7 ตัวแปร Tam and Zeng (2014) และความผูกพันต่อองค์กรมี 4 ตัวแปร Vuong et al. (2021) เป็นการเก็บข้อมูลแบบมาตรวัดลิเคอร์ท (Likert Type Scale) 5 ช่วง ให้ผู้ตอบระบุว่าเป็นจริงหรือไม่เป็นจริงของแต่ละข้อความ ตั้งแต่ เป็นจริงน้อยที่สุด (คะแนนเท่ากับ 1) ถึง เป็นจริงมากที่สุด (คะแนนเท่ากับ 5) ส่วนสภาพแวดล้อมในการทำงานที่เป็นพิษ และความโปรงใส มี 13 ตัวแปรเป็นการเก็บข้อมูลแบบมาตรวัดแบบช่วง (Interval Scale) โดยแบ่งเป็น 5 ระดับ ตั้งแต่เพื่อนร่วมงานไม่เคยปฏิบัติเช่นนี้เลย (คะแนนเท่ากับ 1) ถึง มีเกินกว่าร้อยละ 75 ของเพื่อนร่วมงานที่ปฏิบัติเช่นนั้น (คะแนนเท่ากับ 5) และนำแบบสอบถามไปเก็บรวบรวมข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่าง คือ วิศวกรที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมการก่อสร้าง จำนวนทั้งสิ้น 150 ฉบับ พบว่าแบบสอบถามมีความตรงเชิงโครงสร้าง และมีความน่าเชื่อถือได้ (Cronbach's Alpha) เท่ากับ 0.805 ซึ่งจะนำข้อมูลที่ได้ไปทำการวิเคราะห์เชิงสำรวจ (EFA) เพื่อจัดตัวแปรให้เข้ากลุ่มปัจจัย ต่อไป

*ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงสำรวจ (Exploratory Factor Analysis: EFA)*

การวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงสำรวจ (EFA) โดยวิธีการ Initial Principal Component (PCA) หมุนแกนองค์ประกอบตั้งฉากแบบ Varimax เพื่อจัดกลุ่มตัวแปรใหม่ให้มีความสัมพันธ์กัน นำ 3 องค์ประกอบเดิม คือ ลักษณะบุคลิกภาพและค่านิยมการทำงาน (Personality Traits & Value) ความต้องการได้รับการสนับสนุนจากองค์กร Organizational Supports) และสภาพแวดล้อมในที่ทำงานเป็นพิษและความไม่โปร่งใส (Toxic Workplace Environment & corruptions) จำนวน 26 ตัวแปรสังเกตได้ ผลการวิเคราะห์ค่า (Kaiser, 1974) KMO เท่ากับ 0.869 ค่า Anti-image Matrices (MSA) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.645–0.932 และค่า Bartlett's Test of Sphericity แสดงถึงว่าตัวแปรมีความสัมพันธ์โดยมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ (Sig.) 0.00 สามารถอธิบายร้อยละของความแปรปรวนสะสมรวมทุกปัจจัยได้ร้อยละ 64.50 ทั้งนี้ตัวแปรดั่งกล่าว มีความเหมาะสมที่จะนำมาวิเคราะห์ปัจจัยเชิงสำรวจต่อได้

เมื่อทำการวิเคราะห์แล้วสามารถจัดกลุ่มองค์ประกอบใหม่ได้ 6 องค์ประกอบ คือ การรับรู้การสนับสนุนจากองค์กร (Organizational Supports : ORGSup) สภาพแวดล้อมการทำงานเป็นพิษ และความไม่โปร่งใส (Toxic Workplace Environment & corruptions : TXCR) ค่านิยมด้านการทำงาน (Work values : WVA) ลักษณะบุคลิกภาพ (Personality Traits : PERT) ค่านิยมการทำงานด้านสภาพแวดล้อมและความมั่นคงทางอารมณ์ (Biospheric value & Neuroticism : BVNC) ความชอบธรรม และการเคารพผู้ใหญ่ (Rightness & Traditional Value : RNTV) จำนวน 26 ตัวแปรที่ค่า Factor Loading มากกว่า 0.45 จากกลุ่มตัวอย่าง 150 ชุด Hair et al., (2015); Poonam and Navdeep (2019) ดัง Table 1

**Table 1** Mean score and factor loading items show the six factors cause of stress

| Factor Component | % Variance | Varia-ble | Definition | Factor Loading | Mean |
|---|---|---|---|---|---|
| Factor 1: Organizational Supports (ORGSup) | 23.755 | OS2 | The organization always helps me whenever I am facing a bad time | 0.637 | 3.94 |
| | | OS3 | The organization respects and give importance to my opinions and suggestions. | 0.621 | 3.76 |
| | | OS5 | The organization provides me enough time to deal with my family matters. | 0.828 | 3.60 |
| | | OS6 | The organization cares about my thoughts and feelings. | 0.872 | 3.57 |
| | | OS7 | The organization tries to provide its employees with all the basic facilities to make life better. | 0.786 | 3.57 |
| | | OS1 | The organization attaches great importance to my work goals and values. | 0.770 | 3.56 |
| | | OS4 | The organization is flexible in my working hours if needed, whenever I guarantee to complete my tasks on time. | 0.756 | 3.56 |
| Factor 2: Toxic Workplace Environment & corruptions (TXCR) | 16.790 | TXC3 | My supervisor assigns me the work, which is not of my competence level. | 0.671 | 3.10 |

**Table 1** (Continued) Mean score and factor loading items show the six factors cause of stress

| Factor Component | % Variance | Varia-ble | Definition | Factor Loading | Mean |
|---|---|---|---|---|---|
| | | TXC7 | I found that my co-worker spoke rudely to me in public. | .763 | 2.98 |
| | | TXC2 | My co-worker often appreciates my physical appearance. | 0.736 | 2.93 |
| | | TXC4 | I found that my co-worker often tried to talk about my personal and sexual life | 0.713 | 2.80 |
| | | TXC6 | I found that my subordinate tried to maintain a distance from me at work | 0.751 | 2.65 |
| | | TXC1 | My supervisor assigns me the work, which is not of my competence level | 0.698 | 2.57 |
| | | TXC8 | I have encountered/am uncomfortable with the lack of transparency and fair consideration by government officials for the benefit of themselves or their partner. | 0.694 | 2.45 |
| | | TXC5 | I have experienced did not answer my greeting when I greeted him/her. | 0.638 | 2.32 |
| Factor 3: Work values: (WVA) | 9.550 | PV11 | Openness to Change Value, I see that openness to change. Being curious and careful can make life different and exciting. | .772 | 4.21 |
| | | PV8 | Hedonic Value, I realize that living a happy life and being content with myself is crucial to me. | .708 | 4.20 |
| | | PV7 | Altruistic Value, I see that social justice equality helps each other create peace and is important for work. | .741 | 4.06 |
| Factor 4: Personality Traits (PERT) | 7.769 | PV2 | Agreeableness, I tend to be a good follower. I have a preference for cooperating, having compassion, and supporting others. | 0.484 | 4.01 |
| | | PV3 | Conscientiousness, I practice discipline. Ensure that your work is driven by determination, dedication, and diligence. Responsible for completing tasks | 0.632 | 4.01 |

**Table 1** (Continued) Mean score and factor loading items show the six factors cause of stress

| Factor Component | % Variance | Varia-ble | Definition | Factor Loading | Mean |
|---|---|---|---|---|---|
| | | PV5 | Openness to experience, I am a creative person. Enjoys discovering new ideas and being open to new experiences and opportunities. | 0.671 | 3.81 |
| | | PV1 | Extraversion, I like to socialize, have a good mood, be friendly, like meeting people, reveal myself, like justice. | 0.655 | 3.81 |
| Factor 5: Biospheric Value & Neuroticism: (BVNC) | 5.755 | PV6 | Biospheric, I believe that my work should be more focused on preserving nature. | 0.731 | 3.54 |
| | | PV4 | Neuroticism: I tend to project negative emotions and projections. Feeling out of control, anxious, and uncertain about life and safety. | 0.625 | 2.43 |
| Factor 6: Rightness & Traditional Value (RNTV) | 5.498 | PV9 | Traditional Value, I think of it as being obedient, respectful, and following the lead of elders. | 0.546 | 3.70 |
| | | TXC9 | I feel afraid or worried when I express that I do not agree with unfairness in worker benefits, such as life safety, being stigmatized, and being fired from a work. | -0.564 | 2.34 |
| Percentage of Trace | 62.495 | | | | |

*Extraction Method: Principal Component Analysis. Rotation Method: Varimax Coefficient Display Format: Absolute value below 0.45 (n=150); MacCallum et al. (1999) Habing (2003)

**ผลการศึกษา**

ผลการศึกษาเพื่อหาปัจจัยที่ทำให้เกิดความเครียด สามารถจัดตัวแปรเข้ากลุ่มปัจจัยใหม่ โดยพิจารณาค่าเฉลี่ยที่ได้จากผู้ตอบแบบสอบถาม และค่าน้ำหนักปัจจัยที่มากกว่าค่า 0.45 พร้อมทำการตั้งชื่อปัจจัยใหม่ทั้ง 6 ตัวแปร โดยจะนำไปวิเคราะห์ปัจจัยเชิงยืนยัน (Confirmatory Factor Analysis; CFA) ต่อไป

1. การรับรู้การสนับสนุนจากองค์กร (ORGSup) มีความสอดคล้องกับความเครียดจากการทำงานหลายประการ มีค่าความแปรปรวนสะสมถึง 23.75% ตัวแปรสำคัญที่บุคลากรต้องการได้รับ คือ ปัจจัยความต้องการได้รับการสนับสนุนจากที่องค์กรให้ความช่วยเหลือเมื่อต้องเผชิญกับช่วงเวลาที่ยากลำบาก และครอบคลุมถึงสิ่งที่บุคลากรต้องการได้รับการสนับสนุนจากเพื่อนร่วมงาน และหัวหน้างาน

2. สภาพแวดล้อมการทำงานเป็นพิษ และความไม่โปร่งใส (TXCR) เป็นความเครียดที่เกิดจากหัวหน้างาน และเพื่อนร่วมงาน สามารถอธิบายว่ามีความสัมพันธ์กับความเครียดจากการทำงาน มีค่าความแปรปรวนสะสม 16.79% ปัจจัยที่สร้างสภาพแวดล้อมการทำงานเป็นพิษมากที่สุดคือ การได้มอบหมายงานที่เกินความรู้ความสามารถ

3. ค่านิยมด้านการทำงาน (WVA) สามารถอธิบายว่ามีความสัมพันธ์กับความเครียดจากการทำงานมีค่าความแปรปรวนสะสม 9.55% โดยค่านิยมการทำงานกล้าที่จะเปิดรับประสบการณ์ใหม่เป็นสิ่งที่บุคลากรต้องการได้รับ

4. ลักษณะบุคลิกภาพ (PERT) เป็นลักษณะเฉพาะของแต่ละบุคคล สามารถอธิบายถึงความสัมพันธ์กับความเครียดจากการทำงานมีค่าความแปรปรวนสะสมที่ 7.77% ลักษณะบุคลิกภาพด้านความเป็นมิตรเป็นสิ่งที่มีความสัมพันธ์กับความเครียดน้อย แต่เป็นสิ่งที่ผู้ตอบแบบสอบถามให้ความสำคัญ โดยความต้องการเปิดรับประสบการณ์เป็นปัจจัยที่มีความสัมพันธ์ต่อการเกิดความเครียดมากที่สุด

5. ค่านิยมการทำงานด้านสภาพแวดล้อมและความมั่นคงทางอารมณ์ (Biospheric value & Neuroticism : BVNC) สามารถอธิบายถึงความสัมพันธ์กับความเครียดจากการทำงานมีค่าความแปรปรวนสะสมที่ 5.755% พบว่าความต้องการของบุคลากรและความสัมพันธ์กับความเครียดมีทิศทางเดียวกันคือ เห็นว่างานก่อสร้างที่ทำควรให้ความสำคัญกับสิ่งแวดล้อมมากกว่านี้

6. ความชอบธรรมและการเคารพผู้ใหญ่ (Rightness & Traditional Value: RNTV) สามารถอธิบายถึงความสัมพันธ์กับความเครียดจากการทำงานมีค่าความแปรปรวนสะสมที่ 5.498% พบว่าค่านิยมด้านการเคารพผู้ใหญ่ มีความขัดแย้งกันระหว่างความโปร่งใสในการทำงาน กล่าวคือ บุคลากรมีความเครียด เพราะไม่เชื่อฟังผู้ใหญ่ เนื่องด้วยคำสั่งของผู้ใหญ่นั้นไม่ถูกต้อง ทำให้ผู้ปฏิบัติงานไม่อยากทำงานให้

**สรุปและอภิปายผล**

การศึกษาเพื่อหาปัจจัยความเครียดจากการทำงานของวิศวกรในอุตสาหกรรมก่อสร้างไทย มี 6 องค์ประกอบหลักสำคัญที่มีความสัมพันธ์ต่อความเครียด คือ การรับรู้การสนับสนุนจากองค์กร สภาพแวดล้อมการทำงานเป็นพิษและความไม่โปร่งใส ค่านิยมด้านการทำงาน ลักษณะบุคลิกภาพ ค่านิยมการทำงานด้านสภาพแวดล้อมและความมั่นคงทางอารมณ์ ความชอบธรรมและการเคารพผู้ใหญ่ ตามลำดับ ผลการวิจัยพบว่าการไม่ได้รับการสนับสนุนจากองค์กรที่ดีพอจะทำให้บุคลากรเกิดความเครียดต่อการทำงาน ดังนั้นองค์กรต้องให้ความสำคัญกับเรื่องนี้ เพื่อให้บุคลากรทำงานได้อย่างมีความสุข ทำให้งานมีประสิทธิภาพ เกิดความพึงพอใจต่องานนำมาซึ่งความผูกพันต่อองค์กร

**ข้อเสนอแนะ**

หน่วยงานหรือองค์กรต่างๆ ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง สามารถนำปัจจัยที่มีผลต่อความเครียดจากการทำงานของวิศวกร ไปพิจารณาปรับใช้กับการทำงาน เช่น ลดชั่วโมงการทำงานต่อสัปดาห์ ให้ทำงานตรงตามความรู้ความสามารถ จัดให้มีสวัสดิการที่ดีขึ้น รับฟังข้อเสนอแนะจากบุคลากร ส่งเสริมการเรียนรู้ตามความสนใจ จัดอบรมวิธีการจัดการความเครียดให้บุคลากรเพื่อสามารถเผชิญกับความเครียดอย่างถูกวิธี และจัดให้มีนักจิตวิทยาประจำหน่วยงาน เป็นต้น

**ข้อจำกัดการศึกษา**

ผู้ตอบแบบสอบถามมีเฉพาะกลุ่มสายงานวิศวกรที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับงานก่อสร้าง

**แนวทางการต่อยอดงานวิจัยในอนาคต**

การนำตัวแปรปัจจัยที่ได้ไปวิเคราะห์ปัจจัยเชิงยืนยัน (Confirmatory Factor Analysis; CFA) และโมเดลสมการโครงสร้าง (Structural Equation Modeling; SEM) ต่อไปตามลำดับ

**เอกสารอ้างอิง**

นุจรี ป้องแก้ว, ปิยนุช เวทย์วิวรณ์. 2559. การเปรียบเทียบค่านิยม ความเชื่อ บรรทัดฐานและพฤติกรรมการออกแบบโดยคำนึงถึงความยั่งยืนด้านสิ่งแวดล้อมของผู้ออกแบบในอุตสาหกรรมก่อสร้างไทย วิศวสารลาดกระบัง 33: 67–73

Ameyaw, E.E., Pärn, E., Chan, A.P.C., Owusu-Manu, D.-G., Edwards, D.J., Darko, A. 2017. Corrupt practices in the construction industry: Survey of ghanaian experience. J. Manag. Eng. 33: 05017006. doi.org/10.1061/(asce)me.1943-5479.0000555

Bowen, P., Edwards, P., Lingard, H. 2013. Workplace stress experienced by construction professionals in South Africa. J. Constr. Eng. Manag. 139: 393–403. https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0000625

Bowen, P., Edwards, P., Lingard, H., Cattell, K. 2014a. Occupational stress and job demand, control and support factors among construction project consultants. Int. J. Proj. Manag. 32: 1273–1284. https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2014.01.008

Bowen, P., Edwards, P., Lingard, H., Cattell, K. 2014b. Predictive modeling of workplace stress among construction professionals. J. Constr. Eng. Manag. 140: 04013055. doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0000806

Bowen, P., Edwards, P., Lingard, H., Cattell, K. 2014c. Workplace stress, stress effects, and coping mechanisms in the construction industry. J. Constr. Eng. Manag. 140: 04013059. doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0000807

Çelik, G., Oral, E. 2019. Mediating effect of job satisfaction on the organizational commitment of civil engineers and architects. Int. J. Proj. Manag. 21: 969–986. doi.org/10.1080/15623599.2019.1602578

Costa, M.A. 1996. The five-factor theory of personality. Theoretical Perspective.

Habing, B. 2003. Exploratory factor analysis. University of South Carolina, Columbia. http://www.stat.sc.edu/~habing/courses/530EFA.pdf. 11 March 2024

Kaiser, H.F. 1974. An index of factorial simplicity. Psychometrika (March 1974). https://doi.org/10.1007/BF02291575

MacCallum, R.C., Widaman, K.F., Zhang, S., Hong, S. 1999. Sample size in factor analysis. Psychol. Methods 4: 84–99. doi.org/10.1037/1082-989x.4.1.84

Poonam, S., Navdeep, K. 2019. Investment attitude of working women: A study of education sector in punjab. J. Technol. Manag. Grow. Econ. 10: 81–87. doi.org/10.15415/jtmge.2019.102007

Psychology, F.O. 2019. Big 5 Personality Factors. https://www.psy.chula.ac.th/th/feature-articles/big-5-personality-factors. 11 March 2024.

Rasool, S.F., Wang, M., Tang, M., Saeed, A., Iqbal, J. 2021. How toxic workplace environment effects the employee engagement: The mediating role of organizational support and employee wellbeing. Int. J. Environ. Res. Public Health 18: 2294. doi.org/10.3390/ijerph18052294

Tam, V. W.Y., Zeng, S.X. 2014. Employee job satisfaction in engineering firms. Eng. Constr. Archit. Manag. 21: 353–368. doi.org/10.1108/ecam-10-2012-0098

Vuong, B.N., Tung, D.D., Tushar, H., Quan, T.N., Giao, H.N.K. 2021. Determinates of factors influencing job satisfaction and organizational loyalty. Manag. Sci. Lett. 11: 203–212. doi.org/10.5267/j.msl.2020.8.014

Wang, Z., Zaman, S., Rasool, S.F., Zaman, Q.U., Amin, A. 2020. Exploring the relationships between a toxic workplace environment, workplace stress, and project success with the moderating effect of organizational support: Empirical evidence from Pakistan. Risk Manag. Healthc. Policy 13: 1055–1067. doi.org/10.2147/RMHP.S256155

# การประยุกต์ใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคารในการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ผ่านการปรับเปลี่ยนวัสดุก่อสร้างบ้านพักอาศัย 2 ชั้น: กรณีศึกษา

# Application of building information modeling for carbon footprint assessment through material changes in a two-story residential house: A case study

**กิตติกร จันทรเสนา, ธนพ ศิริวัฒนานุรักษ์, วริสรา เลิศไพฑูรย์พันธ์***

Kittikorn Chantarasenar, Thanop Siriwattananuruk, Warisara Lertpaitoonpan*

นักศึกษาสาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม กรุงเทพฯ 10900

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม กรุงเทพฯ 10900

*Corresponding author. E-mail address: warisara.le@spu.ac.th

**บทคัดย่อ**

การวิจัยนี้ใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) ในการประเมินผลกระทบของวัสดุก่อสร้างต่อคาร์บอนฟุตพริ้นท์ (CF) ในบ้านพักอาศัย 2 ชั้น แบบบ้านครอบครัวไทยร่วมสมัย 8 (ต้านแผ่นดินไหว) ของกรมโยธาธิการและผังเมือง โดยรายงานเฉพาะ CF ของวัสดุในหมวดงานโครงสร้างและสถาปัตยกรรมที่สูง 5 อันดับแรก พบว่า CF รวมทั้ง 5 ประเภทวัสดุจากหมวดงานโครงสร้างมีปริมาณเท่ากับ 14,583 $kgCO_2eq$ ส่วน CF จากงานสถาปัตยกรรมที่สูงสุด 5 อันดับแรกรวมกันเท่ากับ 28,658 $kgCO_2eq$ ซึ่งผนังก่ออิฐมอญเพียงอย่างเดียวก็มีปริมาณสูงถึง 16,447 $kgCO_2eq$ การปรับเปลี่ยนวัสดุที่ใช้ในงานด้านสถาปัตยกรรมทำให้ CF เหลือเพียง 10,195 $kgCO_2eq$ ซึ่งเท่ากับสามารถลดได้ 18,463 $kgCO_2eq$ หรือกล่าวได้ว่าสามารถลดคาร์บอนฟุตพริ้นท์ลง 65% การศึกษานี้ไม่เพียงแต่เป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมการก่อสร้างเท่านั้น แต่ยังมีความหมายสำคัญในเชิงนโยบายและสังคมด้วย

**คำสำคัญ**: ก๊าซเรือนกระจก, แบบจำลองสารสนเทศอาคาร, เปลี่ยนวัสดุก่อสร้าง

**Abstract**

This research utilized Building Information Modeling (BIM) to assess the impact of construction materials on the carbon footprint of a two-story Thai contemporary family home (earthquake-resistant) model 8, designed by the Department of Public Works and Town & Country Planning. The report specifically focuses on the carbon footprint of materials in the top five categories of structural and architectural work. It was found that the total carbon footprint for all five types of materials in the structural category amounts to 14,583 $kgCO_2eq$, while the top five in the architectural category sum up to 28,658 $kgCO_2eq$. Notably, the carbon footprint of Redbrick wall alone was as high as 16,447 $kgCO_2eq$. Changing the materials used in architectural work reduced the carbon footprint to just 10,195 $kgCO_2eq$, which equates to a reduction of 18,463 $kgCO_2eq$ or a 65% decrease. This study is not only beneficial to the construction industry but also holds significant implications in policy and societal contexts.

**Keywords**: BIM, Greenhouse gases, Material change

**คำนำ**

สถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องมีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่รุนแรงขึ้นทั่วโลก ประเทศไทยก็ไม่พ้นจากผลกระทบนี้ และได้มีการเสนอเป้าหมายและความก้าวหน้าในการแก้ปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศตามสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (UNFCCC) สถานการณ์โลกปัจจุบันพบว่าภาคพลังงานเป็นผู้ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุด (สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2562) นอกจากนี้ยังมีรายงานว่ามากกว่าหนึ่งในสามของการใช้พลังงานทั้งหมดและการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลมาจากภาคการก่อสร้างทั้งในประเทศที่พัฒนาแล้วและกำลังพัฒนา (Ministry of natural resources and environment, 2019; Ali et al., 2020) (Fig. 1) ดังนั้น การลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากภาคก่อสร้างจึงมีความสำคัญ ซึ่งสามารถดำเนินการได้หลายวิธีทั้งการออกแบบอาคารให้มีการใช้พลังงานลดลง การปรับเปลี่ยนวิธีการหรือขั้นตอนก่อสร้างที่ใช้พลังงานและทรัพยากรน้อยลง หรือปรับเปลี่ยนวัสดุในการก่อสร้างที่มีคาร์บอนฟุตพริ้นท์ (Carbon footprint: CF) ลดลง เป็นต้น (ธิบดินทร์ และคณะ, 2557; สัณศณีย์ และคณะ, 2563; Ondova et al., 2020; Zhou et al., 2023)

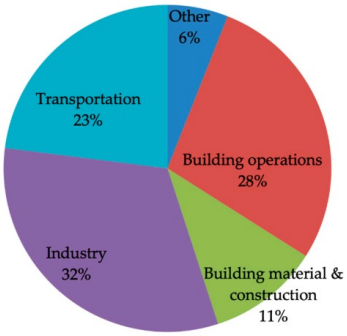



**Fig. 1** Global $CO_2$ emission by sector (Ali et al., 2020)

การนำเทคโนโลยีแบบจำลองสารสนเทศอาคาร หรือ BIM (Building Information Modeling) เข้าสู่กระบวนการการก่อสร้างเป็นสิ่งจำเป็น ด้วยคุณสมบัติของซอฟท์แวร์ BIM ที่สามารถสร้างความสัมพันธ์แบบค่าตัวแปร (Parametric Object-Based) ระหว่างองค์ประกอบของแบบจำลองอาคารเก็บไว้ในฐานข้อมูลส่วนกลาง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงรายละเอียดของวัสดุส่วนใดส่วนหนึ่ง เช่น ขนาด ระยะห่าง ชนิดของวัสดุ ระบบจะส่งผลเชื่อมโยงถึงมุมมองอื่นๆ โดยอัตโนมัติ ทำให้สามารถเห็นผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงนั้นในทันที (บริษัทบิมอ็อบเจ็คท์ (ไทยแลนด์), 2564; ไพจิตร และภาสกร, 2566) ด้วยความสามารถในการจัดการข้อมูลแบบไดนามิก (Dynamic) ของ BIM จึงช่วยให้การทำงานมีประสิทธิภาพ รวดเร็ว ลดต้นทุน และมีทางเลือกในการเลือกใช้วัสดุสำหรับก่อสร้างที่หลากหลายขึ้น ช่วยลดความขัดแย้งในขั้นตอนการก่อสร้าง เพิ่มประสิทธิภาพในการบริหารโครงการ นำไปสู่การพัฒนาการออกแบบอาคารและจัดการโครงการให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งจะสามารถลดค่าใช้จ่ายของโครงการลงได้ (สมาคมสถาปนิกสยามในพระบรมราชูปถัมภ์, 2558; Allplan, 2020)

การเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสมสำหรับโครงการก่อสร้างเฉพาะเจาะจงจะช่วยให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและสิ่งก่อสร้างมีความคงทน การเปลี่ยนแปลงวัสดุในการก่อสร้างอาคารเป็นส่วนหนึ่งของการปรับปรุงแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียนเพื่อให้การก่อสร้างนั้นใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าที่สุด ดังเช่นการศึกษาของ Robati et al. (2021) ที่พบว่าการปรับเปลี่ยนวัสดุก่อสร้างอาคารสูง 18 ชั้นในซิดนีย์ เช่น เปลี่ยนโครงสร้างเป็นคอนกรีตอัดแรงภายหลัง จะทำให้

คาร์บอนฟุตพริ้นท์แฝง (Embodied carbon) ลดลงร้อยละ 8 และประหยัดต้นทุนเงินทุนได้ร้อยละ 10 หากใช้โครงสร้างไม้ทั้งหมดจะช่วยลดคาร์บอนฟุตพริ้นท์แฝงลง ร้อยละ 13–26 และลดค่าใช้จ่ายลงร้อยละ 5

บทความนี้จึงจัดทำขึ้นเพื่อศึกษาคาร์บอนฟุตพริ้นท์แฝงที่ลดลงของการก่อสร้างบ้านพักอาศัย 2 ชั้น ตามแบบบ้านพักอาศัยของกรมโยธาธิการและผังเมือง (กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2560) ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงวัสดุบางรายการ โดยสร้างแบบจำลอง 3 มิติ และถอดปริมาณวัสดุด้วยซอฟท์แวร์ BIM เพื่อนำไปคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์ โดยข้อมูลนี้จะเป็นประโยชน์ในการตัดสินใจของผู้ที่เกี่ยวข้องในการพัฒนาการก่อสร้างบ้านพักอาศัยที่สอดคล้องกับนโยบายสังคมคาร์บอนต่ำ (Low carbon society)

**วิธีดำเนินการ**

การวิจัยนี้ดำเนินการผ่าน 4 ขั้นตอนหลัก โดยเริ่มจากการเลือกแบบอาคารพักอาศัย 2 ชั้น ต่อมาคือสร้างแบบจำลอง 3 มิติ ของอาคาร โดยใช้ซอฟท์แวร์ Autodesk Revit ทั้งงานโครงสร้างและงานสถาปัตยกรรม ขั้นตอนที่สามคือการประเมินปริมาณวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างและการคำนวณ CF ของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้าง สุดท้ายคือปรับเปลี่ยนวัสดุก่อสร้างบางชนิดโดยเลือกใช้วัสดุที่มีราคาต่างจากเดิมไม่เกินร้อยละ 10 และมีคุณสมบัติหรือรูปลักษณ์คล้ายคลึงกับวัสดุเดิม แต่มี CF น้อยกว่าวัสดุเดิม เพื่อประเมินปริมาณ CF ที่สามารถลดลงได้หลังจากการปรับเปลี่ยนวัสดุของอาคาร

*การเลือกแบบอาคารพักอาศัย 2 ชั้น*

การเลือกแบบบ้านพักอาศัย พิจารณาจากแบบบ้านที่มีขนาดและลักษณะใกล้เคียงกับบ้านที่สร้างขายทั่วไปในกรุงเทพมหานคร ซึ่งมีลักษณะเป็นบ้านพักอาศัย 2 ชั้น พื้นที่ใช้สอยประมาณ 100–200 ตารางเมตร ขนาด 3–4 ห้องนอน ซึ่งผู้วิจัยได้เลือกใช้แบบบ้านครอบครัวไทยร่วมสมัย 8 (ต้านแผ่นดินไหว) ของกรมโยธาธิการและผังเมือง (Fig. 2) ซึ่งสามารถปลูกในเขตพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวได้ มีพื้นที่ใช้สอย 156 ตารางเมตร ขนาด 3 ห้องนอน 2 ห้องน้ำ เป็นแบบสำหรับการก่อสร้าง (For construction drawing) ที่มีรายละเอียดของงานโครงสร้างและสถาปัตยกรรมครบถ้วนสมบูรณ์พร้อมสำหรับขออนุญาตก่อสร้าง




**Fig. 2** Two-story residential house model (กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2560)

*การสร้างแบบจำลอง 3 มิติ*

สร้างแบบจำลอง 3 มิติ ของบ้านพักอาศัย 2 ชั้น โดยใช้ซอฟแวร์ Autodesk Revit เวอร์ชั่น 2024 (สำหรับการศึกษา) โดยสร้างแบบจำลองเฉพาะในส่วนของงานโครงสร้าง (Structural model) และงานสถาปัตยกรรม

(Architectural model) เท่านั้น โดยการสร้างแบบจำลองนี้มีระดับชั้นในการพัฒนา หรือ ที่เรียกว่า LOD (Level of development) ในระดับ LOD300 ซึ่งในระดับนี้เป็นขั้นตอนการพัฒนาการออกแบบ (Design development stage) ที่รายละเอียดในแบบจำลองมีการนำเสนอข้อมูลของแบบอย่างแม่นยำ ทั้ง ขนาด รูปทรง ตำแหน่ง และการเชื่อมต่อขององค์ประกอบต่างๆ ได้รับการแสดงอย่างชัดเจนและเฉพาะเจาะจง (Fig. 3) ในกรณีที่มีการเปลี่ยนวัสดุภายหลังยังสามารถดำเนินการแก้ไขแบบจำลองได้ง่ายกว่าการเลือกใช้ซอฟท์แวร์สร้างแบบก่อสร้าง 2 มิติ

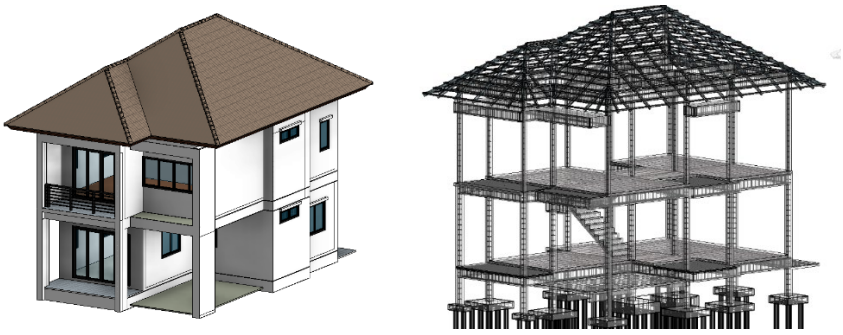


**Fig. 3** The 3D model created using Autodesk Revit software

*การประเมินปริมาณวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้าง และคำนวณค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์*

กระบวนการนี้เริ่มจากการถอดปริมาณวัสดุก่อสร้างจากแบบจำลอง 3 มิติ LOD300 ที่สร้างด้วยซอฟแวร์ Autodesk Revit. การใช้แบบจำลอง LOD300 ช่วยให้สามารถวิเคราะห์และประเมินปริมาณวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างได้อย่างละเอียด จากนั้นนำชนิดของวัสดุและปริมาณที่ถอดได้มาคำนวณปริมาณ CF โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (GHG Emission factor) จาก The Construction Material Pyramid ของประเทศเดนมาร์ก (Centre for Industrialized architecture, 2023) ค่าสัมประสิทธิ์นี้ให้ข้อมูลเกี่ยวกับปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ปล่อยออกมาสำหรับแต่ละหน่วยของวัสดุที่ใช้ การคำนวณ CF ของผลิตภัณฑ์ในรูปแบบของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสู่ชั้นบรรยากาศ ทำได้ด้วย Equation 1 และ Equation 2 ซึ่ง CF แสดงเป็นหน่วยกิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ($kgCO_2eq$)

$$CF = \text{Summary of GHG} \quad (1)$$

$$GHG = \text{Material quantity} \times \text{GHG Emission factor} \quad (2)$$

Where; CF (Carbon footprint) is represented in kilogram carbon dioxide equivalent ($kgCO_2eq$) unit
GHG (Greenhouse gases) is represented in kilogram carbon dioxide equivalent ($kgCO_2eq$) unit
GHG Emission factor is A coefficient which allows to convert activity data or material quantity to greenhouse gases emission (unitless)

*การปรับเปลี่ยนวัสดุก่อสร้าง*

หลังจากการประเมินค่า CF ขององค์ประกอบอาคารต่าง ๆ แล้ว จะปรับเปลี่ยนวัสดุก่อสร้างที่สามารถลดค่า CF ได้มากที่สุด โดยการพิจารณาองค์ประกอบที่มี CF สูงสุด 5 อันดับแรก ซึ่งเป็นตัวกำหนดค่า CF หลักของการก่อสร้าง

อาคาร การปรับเปลี่ยนนี้จะเน้นเฉพาะในหมวดงานสถาปัตยกรรมเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงวัสดุในหมวดงานโครงสร้างอาจส่งผลต่อความปลอดภัยและความทนทานของอาคาร เกณฑ์การเลือกวัสดุใหม่มีหลักการดังนี้: การเลือกใช้วัสดุที่มีให้เห็นในท้องถิ่นเพื่อลดผลกระทบจากการขนส่ง วัสดุที่เลือกควรมีคุณสมบัติหรือรูปลักษณะใกล้เคียงกับวัสดุเดิม เพื่อไม่ทำให้ลักษณะภายนอกของอาคารเปลี่ยนไป วัสดุใหม่ควรมีค่า CF น้อยกว่าวัสดุเดิม ซึ่งเป็นตัวชี้วัดหลักในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก วัสดุใหม่ควรมีราคาที่แตกต่างจากวัสดุเดิมไม่เกินร้อยละ 10 เพื่อให้การก่อสร้างยังคงมีความเป็นไปได้ทางเศรษฐกิจ

**ผลการศึกษาและอภิปรายผล**

จากการถอดปริมาณวัสดุจากแบบ 3 มิติที่สร้างขึ้นด้วยซอฟต์แวร์ Autodesk Revit และคำนวณ CF ของวัสดุแต่ละชนิดที่ใช้ในงานโครงสร้างและสถาปัตยกรรมของอาคารบ้านพักอาศัย 2 ชั้น พบว่า (Table 1):

หมวดงานโครงสร้าง: CF สูงสุด 5 อันดับแรกประกอบด้วย คานคอนกรีตเสริมเหล็ก ฐานรากเสาเข็มพื้นหล่อสำเร็จ พื้นหล่อในที่ และเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งมี CF รวมเท่ากับ 14,582.66 $kgCO_2eq$ คิดเป็นร้อยละ 20.87 ของ CF ของวัสดุทั้งหมด (งานโครงสร้างและสถาปัตยกรรม)

หมวดงานสถาปัตยกรรม: CF สูงสุด 5 อันดับแรกประกอบด้วย อิฐมอญก่อผนังแบบหนาครึ่งแผ่น กระเบื้องปูพื้นเซรามิค แผ่นฝ้าเพดานไฟเบอร์ซีเมนต์และยิปซั่มบอร์ด กระเบื้องหลังคาคอนกรีต และกระจกประตูและหน้าต่าง โดยมี CF รวมเท่ากับ 28,641.38 $kgCO_2eq$ คิดเป็นร้อยละ 40.98 ของ CF ของวัสดุทั้งหมด (งานโครงสร้างและสถาปัตยกรรม)

**Table 1** The five highest sources of greenhouse gas emissions from building structure and design work

| Elements (materials) | Unit | $kgCO_2eq$ |
|---|---|---|
| Structural work | Volume ($m^3$) | |
| Beam (Reinforced concrete) | 14.92 | 5,146.29 |
| Foundation (Pile type, Reinforced concrete) | 13.48 | 3,313.16 |
| Floor slab (Pre-cast, Reinforced concrete) | 10.86 | 2,033.29 |
| Floor slab (Cast in place, Reinforced concrete) | 7.00 | 2,629.31 |
| Column (Reinforced concrete) | 3.88 | 1,460.61 |
| Sum | | 14,582.66 |
| Architectural work | Area ($m^2$) | |
| Wall (Red brick) | 291.00 | 16,447.32 |
| Floor (Ceramic tile 30 cm × 30 cm) | 65.00 | 5,607.23 |
| Ceiling (Fiber cement board 6 mm 59 $m^2$) & Gypsum board 9 mm 111 $m^2$) | 170.00 | 3,452.74 |
| Roof (Concrete roof tile 33 cm x 42 cm) | 132.00 | 2,394.29 |
| Door and Window (Single glass 6 mm thick) | 35.00 | 756.00 |
| Sum | | 28,657.58 |

การศึกษาพบว่า ผนังก่ออิฐมอญพื้นที่ 291 ตารางเมตร (ยังไม่รวมวัสดุก่อและฉาบ) มี CF สูงถึง 16,447 $kgCO_2eq$ ซึ่งเป็นสัดส่วนสูงถึง 58% ของ CF รวมของวัสดุหมวดสถาปัตยกรรม 5 ประเภท และยังสูงกว่า CF ของวัสดุในหมวดงานโครงสร้างรวม 5 อันดับแรก ซึ่งแสดงถึงการเลือกใช้วัสดุในหมวดงานสถาปัตยกรรมจะส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อปริมาณคาร์บอนฟุตพริ้นท์แฝงของอาคาร หากเปลี่ยนวัสดุก่อผนังจากอิฐมอญเป็นคอนกรีตมวลเบาจะส่งผลหลายประการ เช่น คอนกรีตมวลเบากันความร้อนได้ดีกว่าอิฐมอญ ทำให้การใช้พลังงานในส่วนเครื่องปรับอากาศลดลง ผนังคอนกรีตมวลเบามีระยะเสาเอ็น คานเอ็น ที่ห่างกว่าผนังอิฐมอญ จึงอาจจะใช้จำนวนเสาเอ็น คานเอ็นน้อยกว่า ซึ่งจะทำให้ CF ของอาคารต่ำกว่า หากพิจารณาถึงความคงทนในระยะยาวอิฐมอญแข็งแรงและทนทานกว่าคอนกรีตมวลเบา ซึ่งอาจส่งผลดีต่อวัฏจักรชีวิตของอาคาร (Building life cycle) อย่างไรก็ตาม บทความนี้พิจารณาวัสดุทางเลือกจากค่า CF ของวัสดุและราคาเป็นหลัก ยังมิได้พิจารณาถึงตัวแปรอื่น

เมื่อมีการเปลี่ยนชนิดของวัสดุในหมวดงานสถาปัตยกรรม ซึ่งกำหนดเงื่อนไขในการตัดสินใจเลือกวัสดุ 2 ประเด็นหลักด้วยกัน คือ 1) ราคา และ 2) ค่า CF ของวัสดุ โดยราคาของวัสดุชนิดใหม่ต่างจากวัสดุชนิดเดิมไม่เกินร้อยละ 10 (ยกเว้นกระจกประตูและหน้าต่าง) (Table 2) และค่า CF ของวัสดุชนิดใหม่ต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับวัสดุชนิดเดิม ผลการศึกษาพบว่าการเปลี่ยนแปลงชนิดของวัสดุก่อสร้างบ้านพักอาศัยนี้ทำให้ค่า CF รวมของวัสดุทั้ง 5 ประเภท ลดลงเป็น 10,195 $kgCO_2eq$ (Table 3) ซึ่งหมายความว่า CF ลดลงเหลือเพียงร้อยละ 35 ของวัสดุชนิดเดิม หรือลดได้ถึง 18,463 $kgCO_2eq$ ซึ่งการเปลี่ยนไปใช้วัสดุชนิดใหม่ที่มี CF ต่ำกว่า ไม่เพียงแต่ส่งผลดีต่อสิ่งแวดล้อม แต่ยังเป็นการตัดสินใจที่คุ้มค่าทางเศรษฐกิจ เนื่องจากราคาค่าวัสดุใหม่ที่ลดลงและคุณสมบัติพิเศษที่ช่วยลดการใช้พลังงานในอาคาร

**Table 2** Overview of material substitutions and their respective unit costs

| Case study | | Material change | | |
|---|---|---|---|---|
| Material | Prices (THB/$m^2$) | Material | Prices (THB/$m^2$) | Diff. of prices (%) |
| Wall (Red brick) | 284.00 | Light weight concrete 7.5 cm thick | 273.00 | -3.87% |
| Floor (Ceramic tile) | 350.00 | Laminate | 330.00 | -5.71% |
| Ceiling (Fiber Cement board) | 268.00 | Gypsum board | 286.00 | +6.72% |
| Roof (Concrete roof tile) | 115.44 | Fiber cement roof tile | 106.67 | -7.60% |
| Door and Window (Single glass) | 193.75 | Tint float glass | 231.42 | +19.44 |

**Table 3** Greenhouse gas emissions resulting from changes in materials

| Elements (materials) | Area ($m^2$) | $kgCO_2eq$ |
|---|---|---|
| Wall (Light weight concrete block 7.5 cm thick) | 291.00 | 5,238.00 |
| Floor (Laminate) | 65.00 | 711.75 |
| Ceiling (Gypsum board) | 170.00 | 1,713.29 |
| Roof (Fiber cement roof tiles) | 132.00 | 1,775.61 |
| Door and Window (Tint float glass) | 35.00 | 756.00 |
| Total | | 10,194.65 |

ในการศึกษานี้มิได้ใช้กระบวนการ BIM ในการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของวัสดุ เนื่องจากต้องมีส่วนขยายสำหรับซอฟท์แวร์ BIM อย่างไรก็ตามการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ ด้วยซอฟท์แวร์ BIM ก็ให้ประโยชน์มากในกรณีที่มีการปรับเปลี่ยนวัสดุ เพราะระบบจะส่งผลเชื่อมโยงถึงมุมมองอื่นๆ โดยอัตโนมัติ ในขณะที่ซอฟท์แวร์เขียนแบบ 2 มิติจะสามารถเปลี่ยนได้ทีละมุมมอง นอกจากนี้หากจะนำแบบจำลองมาพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างการใช้วัสดุเดิมและการเปลี่ยนไปใช้วัสดุชนิดใหม่ (Fig. 4) การใช้ซอฟท์แวร์ BIM ก็ทำให้การสื่อสารทำความเข้าใจระหว่างบุคคลง่ายกว่า

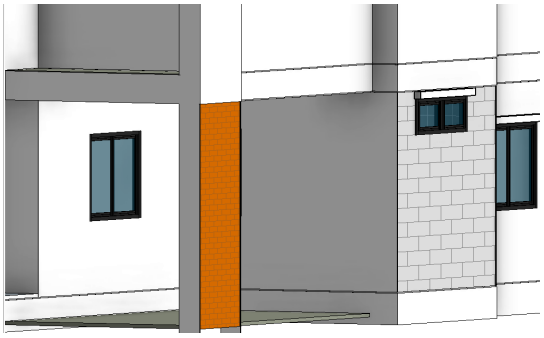


**Fig. 4** The model after changing the material from Red brick to Light weight concrete block

**สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ**

ผลการวิจัยนี้ได้ใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) ประกอบการประเมินผลกระทบของวัสดุก่อสร้างต่อ CF ในบ้านพักอาศัย 2 ชั้น ผลการศึกษาพบ CF ที่สูงอย่างน่าสังเกตจากวัสดุบางประเภทเช่นผนังก่ออิฐมอญที่มีค่าถึง 16,447 $kgCO_2eq$ ชี้ให้เห็นถึงความจำเป็นในการเลือกวัสดุก่อสร้างที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่า

การเปลี่ยนแปลงวัสดุในงานด้านสถาปัตยกรรมทำให้เกิดการลดลงของ CF อย่างมีนัยสำคัญ จาก 28,658 $kgCO_2eq$ ลงเหลือเพียง 10,195 $kgCO_2eq$ การลดลงนี้สะท้อนถึงประโยชน์ที่เกิดจากการเลือกใช้วัสดุที่ยั่งยืนมากขึ้น ดังนั้นการพิจารณาผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมตั้งแต่ขั้นตอนการออกแบบและการเลือกวัสดุตลอดจนการนำเสนอข้อมูลที่ชัดเจนเกี่ยวกับ CF ของวัสดุแต่ละประเภทสามารถช่วยให้ผู้ออกแบบและผู้สร้างตัดสินใจได้ดียิ่งขึ้นในการเลือกวัสดุที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด การวิเคราะห์ที่เน้นย้ำถึงการลด CF โดยไม่ได้เพิ่มต้นทุนวัสดุ สามารถช่วยส่งเสริมสนับสนุนนโยบายสังคมคาร์บอนต่ำ และเป็นแนวทางในการกระตุ้นการใช้วัสดุที่ยั่งยืนมากขึ้นในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ได้เลือกเปลี่ยนวัสดุเพียงบางประเภท และคำนวณค่าใช้จ่ายเฉพาะราคาวัสดุหลักเท่านั้น ยังไม่รวมถึงค่าวัสดุอื่นที่เปลี่ยนแปลงตามวัสดุหลัก เช่น เดิมผนังก่ออิฐมอญใช้มอร์ตาร์ในการประสาน แต่คอนกรีตบล็อกมวลเบาใช้ปูนกาวในการประสาน ซึ่งปูนก่อมีราคาต่างกับปูนกาวและปริมาณที่ใช้ก็ต่างกันด้วย อีกทั้งยังไม่ได้คิดค่าแรงรวมทั้งผลกระทบต่อระยะเวลาการทำงาน

ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยต่อไปเพื่อให้ได้ข้อมูลประกอบการตัดสินใจที่ดีขึ้นมีดังนี้:

การเปลี่ยนแปลงวัสดุจะส่งผลอย่างไรต่อรูปลักษณ์ภายนอกและภายในของอาคาร โดยพิจารณาว่าวัสดุที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเปลี่ยนแปลงรูปลักษณ์ของอาคารอย่างไร

นอกจากความทนทานแล้ว ควรศึกษาผลกระทบของวัสดุเหล่านั้นในระยะยาว รวมถึงการเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพหรือการต้องซ่อมแซมที่อาจเกิดขึ้น

คำนวณผลที่ตามมาของการเปลี่ยนวัสดุในแง่ของการกระทบต่อกระบวนการและระยะเวลาการก่อสร้าง รวมทั้งการประเมินค่าแรงโดยรวม

**เอกสารอ้างอิง**

กรมโยธาธิการและผังเมือง. 2560. บ้านครอบครัวไทยร่วมสมัย 8 (ต้านแผ่นดินไหว). กรุงเทพมหานคร.

กระทรวงพาณิชย์. 2566. ราคาวัสดุก่อสร้าง กรุงเทพมหานคร. http://www.indexpr.moc.go.th/PRICE_PRESENT/SelectCsi_month_REGION.asp?region=0, 1 พฤศจิกายน 2566.

กลุ่มออกแบบและก่อสร้าง สำนักงานคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน. 2566. บัญชีราคาค่าวัสดุก่อสร้างและค่าแรงงาน ประจำปี 2566.

ธิบดินทร์ แสงสว่าง, ทศพล สุขจิตร์, ธีระชัย สุรโชติเวศย์. 2557. การวิเคราะห์คาร์บอนฟุตพริ้นท์จากการสร้างบ้านพักอาศัย: กรณีศึกษาบ้านพักอาศัยขนาด 300 ตารางเมตร. วารสารวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 42: 579–588.

บริษัทบิมอ็อบเจ็คท์ (ไทยแลนด์)จำกัด. 2564. BIM คืออะไร? สำคัญอย่างไรต่อวงการอสังหาริมทรัพย์. https://bimspaces.com/blog/what-is-bim-how-important-is-the-real-estate-industry/#, 10 ตุลาคม 2566.

ไพจิตร ผาวัน, ภาสกร เมฆอากาศ. 2566. การประยุกต์ใช้แบบจำลองการถดถอยเพื่อพัฒนาการถอดปริมาณงานโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยซอฟท์แวร์บิม. ใน: รายงานการประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.พระนคร ครั้งที่ 7. มหาวิทยาลัยทคโนโลยีราชมงคลพระนคร. หน้า 337–342.

สมาคมสถาปนิกสยามในพระบรมราชูปถัมภ์. 2558. คู่มือปฏิบัติวิชาชีพแนวทางการใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคารสำหรับประเทศไทย. บริษัท พลัสเพรส จำกัด. กรุงเทพมหานคร.

สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2562. แผนที่นำทางการลดก๊าซเรือนกระจกของประเทศปี พ.ศ. 2564-2573. กรุงเทพมหานคร.

Ali, K.A., Ahmad, M.I., Yusup, Y. 2020. Issues, impact, and mitigations of carbon dioxide emissions in the building section. Sustainability. 2020: 10.3390/su12187427

Allplan. 2022. Achieving net zero with green BIM. https://blog.allplan.com/en/achieving-net-zero-with-green-bim, 17 December 2023.

Centre for Industrialized architecture, Denmark. The Construction Material Pyramid. https://www.materialepyramiden.dk/, 20 August 2023.

Ministry of natural resources and environment. 2019. Thailand's Third National Communication. Bangkok, Thailand.

Ondova, M., Estokova, A., Fabianova, M. 2020. Reducing the carbon footprint in the foundation's structures of masonry family house. J. Civ. Eng. 15: 55–62. doi.10.1515/sspjce-2020-0018

Robati, M., Oldfield, P., Nezhad, A.A., Carmichael, D.G., Kuru, A. 2021. Carbon value engineering: A framework for integrating embodied carbon and cost reduction strategies in building design. Build. Environ. 192. doi.10.1016/j.buildenv.2021.107620

Zhou, F., Ning, Y., Guo, X., Guo, S. 2023. Analyze differences in carbon emission from traditional and prefabricated buildings combining the lift cycle. Building 2023: 1–12. doi.org/10.3390/buildings13040874

# ปัจจัยที่มีผลต่อต้นทุนค่าก่อสร้างอาคารในช่วงระยะเวลาเกิดโรคระบาดโควิด-19

## Factor affecting construction cost of building during the COVID-19 epidimic peroid

**การวี มณีสายสุวรรณ*, ศุภวุฒิ มาลัยกฤษณะชลี, ฆนิศา รุ่งแจ้ง**

Kanisa Rungjang*, Supawut Malaikrissanachalee, Kanisa Rungiang

สาขาวิศวกรรมโครงสร้างพื้นฐานและการบริหาร ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Master of Engineering (Infrastructure Engineering and Management), Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: weeraphun.m@ku.th

**บทคัดย่อ**

ต้นทุนการก่อสร้าง เมื่อเกิดภาวะสถานการณ์วิกฤตในอนาคต โดยวิธีวิจัยเชิงปริมาณ (Quantitative Research) ผ่านการสำรวจกลุ่มตัวอย่าง 400 คน ได้แก่ กลุ่มเจ้าของโครงการ กลุ่มผู้ค้าวัสดุก่อสร้าง กลุ่มผู้ควบคุมงาน และกลุ่มผู้รับเหมางานก่อสร้างเอกชน ใช้แบบสอบถามในการเก็บข้อมูล และประมวลผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS สู่การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติเชิงพรรณนาและสถิติเชิงอนุมาน ผลการศึกษาพบว่า ต้นทุนค่าก่อสร้างในช่วงโรคระบาดโควิด-19 ค่าใช้จ่ายในภาพรวมอยู่ในระดับมาก ($\bar{x}$=3.46) เกิดจากการค่าขนส่งวัสดุก่อสร้างที่มีผลต่อต้นทุนการก่อสร้าง ($\bar{x}$=4.29, S.D.=0.79) และราคาวัสดุก่อสร้างที่เพิ่มสูงขึ้นกว่าราคามาตรฐานสากล ($\bar{x}$=4.29, S.D.=0.46) โดยปัจจัยความเสี่ยงต่อต้นทุนค่าก่อสร้างมีผลต่อต้นทุนค่าก่อสร้างในช่วงโรคระบาดโควิด-19 มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ซึ่งแสดงถึงความเสี่ยงด้านต้นทุนที่มีผลต่อการก่อสร้างในการจัดทำแผนด้านการดำเนินงานก่อสร้างตามสถานการณ์เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

**คำสำคัญ**: การก่อสร้าง, ปัจจัยความเสี่ยง, ปัจจัยต้นทุน, โรคระบาดโควิด-19

**Abstract**

This research aims to study the risk factors affecting the construction cost of building projects, in order to provide guidelines for preventing impacts from construction costs when facing crisis situations in the future. The research employs a quantitative approach through a survey of a sample group of 400 individuals, including project owners, construction material suppliers, project managers, and private construction contractors. Data collection was conducted using a questionnaire and processed with the SPSS software for statistical analysis, involving both descriptive and inferential statistics.

The study found that construction costs during the COVID-19 pandemic were relatively high ($\bar{x}$=3.46). This was attributed to transportation costs of construction materials affecting construction costs ($\bar{x}$=4.29, S.D.=0.79), and the increased prices of construction materials compared to international standards ($\bar{x}$=4.29, S.D.=0.46). The risk factors affecting construction costs during the COVID-19 pandemic were statistically significant at the 0.05 level, indicating the significant impact of these factors on construction costs. This underscores the importance of considering cost-related risks in construction planning to ensure optimal efficiency.

**Keywords**: Construction, Cost factors, COVID-19 pandemic, Risk factors

**บทนำ**

การใช้ทรัพยากรทางด้านงานก่อสร้างให้เกิดประโยชน์สูงสุด อันได้แก่ คน วัสดุอุปกรณ์ เครื่องทุ่นแรงและเทคโนโลยีต่าง ๆ มาใช้ร่วมกันอย่างเหมาะสม ให้มีระบบ ระเบียบ สะดวกราบรื่น และปราศจากอุปสรรคในระหว่างการดำเนินการ เพื่อให้สามารถบรรลุตามวัตถุประสงค์ของโครงการ ควรคำนึงถึง 1) เกิดผลกำไรตามที่คาดไว้ 2) งานเสร็จตามที่ระยะเวลากำหนดไว้ 3) ผลงานมีความถูกต้องตามรูปแบบและคุณภาพ 4) ดำเนินการอย่างปลอดภัยต่อทรัพย์สินและชีวิตมนุษย์ 5) ไม่สร้างผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมบริเวณงานก่อสร้าง และ 6) ดำเนินงานภายใต้ขนบธรรมเนียมประเพณีและปฏิบัติตามกฎหมาย จึงควรมีการจัดการควบคุมดูแลการก่อสร้างให้เป็นไปตามหลักการที่ถูกต้องปลอดภัย ต้องอาศัยผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกฝ่าย เพื่อให้งานก่อสร้างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น กล่าวคือ ควรจะคำนึงถึงองค์ประกอบหลักในการบริหารจัดการงานก่อสร้างที่เกี่ยวข้องกันอย่างเห็นได้ชัดเจน คือ เวลาในการก่อสร้าง งบประมาณค่าก่อสร้าง และคุณภาพงานก่อสร้าง ซึ่งทั้ง 3 องค์ประกอบนี้จะมีความสัมพันธ์กันอย่างใกล้ชิดและผู้ที่ดำเนินการจัดการงานก่อสร้าง จึงควรตระหนักและวางแผนอย่างรอบคอบในช่วงเวลาที่เหมาะสมด้วย (สุทธิ, 2555)

อย่างไรก็ตามอุปสรรคในการก่อสร้างสามารถเกิดขึ้นเสมอ เนื่องจากสาเหตุต่างๆ ทั้งทางตรงและทางอ้อม ก่อให้เกิดความล่าช้าของโครงการก่อสร้างนั้น รวมถึงต้นทุนค่าก่อสร้างในช่วงระยะเวลาเกิดโรคระบาดโควิด-19 ที่ส่งผลให้โครงการก่อสร้างล่าช้า ซึ่งไม่เป็นผลดีต่อทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้อง การรับทราบถึงปัญหาที่เป็นสาเหตุของความล่าช้าของโครงการก่อสร้างสามารถนำไปหาแนวทางการป้องกันปัญหาได้จึงเป็นสิ่งจำเป็น จึงจัดให้มีบุคลากรของผู้ออกแบบเข้าร่วมปรึกษาในการวางแผน และติดตามความก้าวหน้าของงานในขั้นตอนก่อสร้าง เพื่อลดปัญหาข้อสงสัยในระหว่างการก่อสร้าง (Shaban et al., 1995) จัดสรรเวลาที่เหมาะสมสำหรับกลุ่มที่ทำหน้าที่ออกแบบเพื่อให้ผู้ออกแบบมีเวลาเพียงพอในการจัดทำรายละเอียดและข้อกำหนดได้อย่างชัดเจน (Semple et al., 1994) และแจกแจงรายละเอียดหน้าที่และความรับผิดชอบของกลุ่มต่าง ๆ อย่างชัดเจน (ลิขิต และคณะ, 2564) ซึ่ง BUILK (2562) ได้รวบรวมและสำรวจต้นทุนที่เกิดขึ้นในโครงการก่อสร้างทั่วประเทศ กว่า 5,000 โครงการ และคำนวณหาค่าเฉลี่ยของ สัดส่วนต้นทุน งานก่อสร้าง จากฐานข้อมูลผู้ใช้งานระบบ BUILK Cost Control พบว่า โครงการก่อสร้างประเภท บ้าน/ทาวน์เฮ้าส์/ที่พักอาศัยแนวราบ มีสัดส่วนต้นทุนหมวดต่างๆ สรุปได้ว่ากลุ่มต้นทุนค่าวัสดุ ที่มีอัตราส่วนสูงที่สุดในงานก่อสร้าง คือ มากกว่า 50% ของทุกต้นทุน และจะยิ่งมีสัดส่วนที่มากขึ้นหากเป็นงานก่อสร้างที่มีขนาดที่ใหญ่ขึ้น

ดังนั้น ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะทำวิจัยเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อต้นทุนค่าก่อสร้างอาคารในช่วงระยะเวลาเกิดโรคระบาดโควิด-19 เพื่อศึกษาปัจจัยความเสี่ยงที่ส่งผลกระทบต่อต้นทุนค่าก่อสร้างโครงการอสังหาริมทรัพย์ ด้านอาคาร ประเภทบ้านพักอาศัย 2 ชั้น และเพื่อเป็นแนวทางในการพิจรณาการป้องกัน หรือการหาวิธีแก้ไขปัญหาผลผลกระทบต่อต้นทุนค่าก่อสร้างเมื่อเกิดสภาวะวิกฤตอีกในอนาคต

**วิธีดำเนินงานวิจัย**

*วัตถุประสงค์ของการวิจัย*

1) เพื่อศึกษาปัจจัยความเสี่ยงที่กระทบต่อต้นทุนค่าก่อสร้างโครงการอสังหาริมทรัพย์ ด้านอาคาร ประเภทบ้านพักอาศัย 2 ชั้น

2) เพื่อหาแนวทางในการพิจรณาการป้องกัน หรือหาวิธีแก้ไขปัญหาผลกระทบต่อต้นทุนค่าก่อสร้างโครงการอสังหาริมทรัพย์ ด้านอาคาร ประเภทบ้านพักอาศัย 2 ชั้น

*ขอบเขตของการวิจัย*

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อต้นทุนค่าก่อสร้างในช่วงระยะเวลาเกิดโรคระบาดโควิด-19 ในระหว่างเดือนสิงหาคม-เดือนธันวาคม 2566 ได้กำหนดขอบเขตในการวิจัยมีดังนี้

1) ขอบเขตด้านการศึกษานี้ได้มุ่งศึกษาเรื่องปัจจัยที่มีผลต่อต้นทุนค่าก่อสร้าง ในด้านอาคาร ประเภทอาคารทาวเฮาส์บ้านเดียวในช่วงระยะเวลาเกิดโรคระบาดโควิด-19

2) ขอบเขตด้านประชากรตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย คือ กลุ่มเจ้าของโครงการ กลุ่มผู้ค้าวัสดุก่อสร้างหลัก กลุ่มผู้ควบคุมงานและบริหารโครงการ กลุ่มผู้รับเหมางานก่อสร้าง ของหน่วยงานของรัฐและหน่วยงานของเอกชน โดยใช้วิธีการหาขนาดกลุ่มตัวอย่างจากสูตรการหาขนาดกลุ่มตัวอย่างกรณีไม่ทราบจำนวนประชากรใช้สูตรของ Cochran (1977) ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% และยอมรับค่าความคลาดเคลื่อนได้ไม่มากกว่า 5% ได้จำนวนกลุ่มตัวอย่างจำนวน 400 ตัวอย่าง จากวิธีการสุ่มแบบอาศัยความน่าจะเป็น (Probability Sampling) โดยใช้วิธีการสุ่มอย่างง่าย (Sample Random Sampling)

*กรอบแนวคิดงานวิจัย*

กรอบแนวคิดปัจจัยที่มีผลต่อต้นทุนค่าก่อสร้างในช่วงระยะเวลาเกิดโรคระบาดโควิด-19 (Fig. 1)

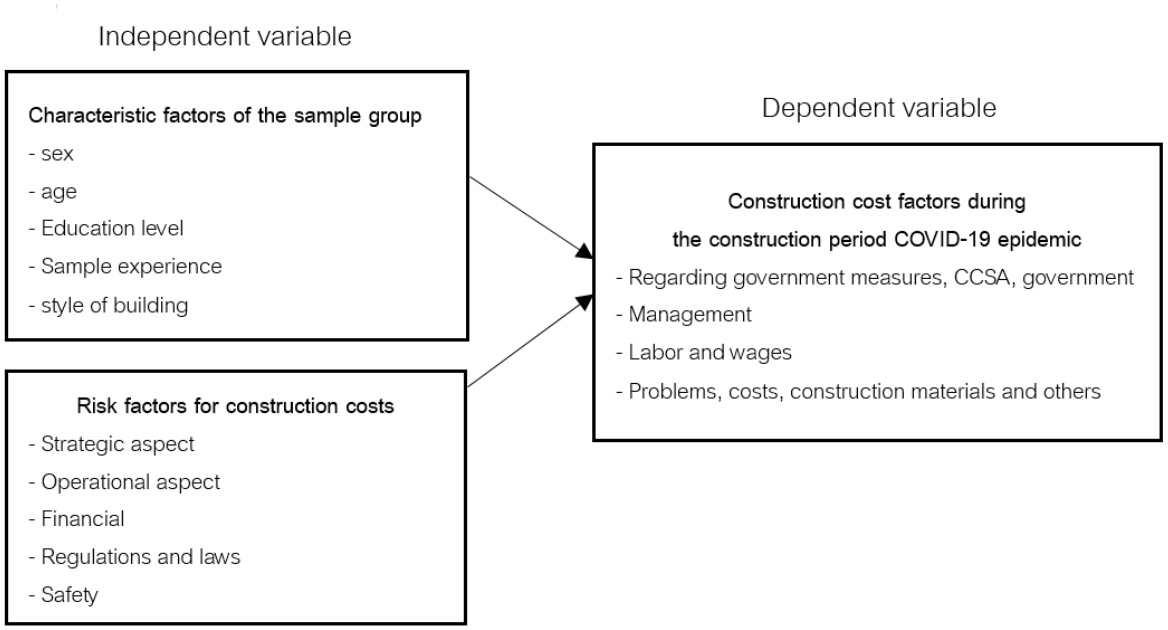



**Fig. 1** Conceptual framework for factors affecting construction costs during the COVID-19 outbreak period

*งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง*

ศรุต ดิลกภัทรวุฒิ (2561) ได้ศึกษาเรื่อง การระบุความเสี่ยงด้านการควบคุมต้นทุนก่อสร้างโครงการอาคารชุด กรณีศึกษา: อาคารชุดพักอาศัย 8 ชั้น ในเขตกรุงเทพมหานคร มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยเสี่ยงด้านการควบคุมต้นทุนก่อสร้าง ประเมินความเสี่ยงที่ส่งผลกระทบต่อการควบคุมต้นทุนก่อสร้าง และเสนอแนวทางในการจัดการความเสี่ยงด้านการควบคุมต้นทุนก่อสร้าง ในเขต ผลการศึกษาพบว่า ปัจจัยเสี่ยงที่มีค่าคะแนนความเสี่ยงอยู่ในระดับสูงมาก ได้แก่ ด้านการประมาณการต้นทุนก่อสร้างโครงการ ด้านการวางแผน ตามลำดับ

ศิรัส เคนพะนาน (2565) การวิจัยครั้งนี้เพื่อศึกษาปัจจัยสภาพแวดล้อมภายในองค์การ ภายนอกองค์การ ที่อิทธิพลต่อความสำเร็จในการดำเนินธุรกิจอุตสาหกรรมก่อสร้างในช่วงการแพร่ระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา เพื่อศึกษาปัจจัยสภาพแวดล้อมของอุตสาหกรรมก่อสร้างใน ในช่วงการแพร่ระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา พบว่า ปัจจัยสภาพแวดล้อมภายในองค์การ ภายนอกองค์การ ภาพรวมอยู่ในระดับมากที่สุด เรียงจากค่าเฉลี่ยมากไปหาน้อย ได้ดังนี้ อุปสรรค์ จุดแข็ง จุดอ่อน และโอกาส ปัจจัยสภาพแวดล้อมของอุตสาหกรรม ภาพรวมในระดับมากไปน้อย ได้ดังนี้ ด้านอำนาจการต่อรองของผู้ขายวัตถุดิบ ด้านอำนาจต่อรองผู้ซื้อ ด้านการแข่งขันใหม่ ด้านบริการที่สามารถทดแทนกันได้ และการแข่งขันในอุตสาหกรรม ความสำเร็จในการดำเนินธุรกิจอุตสาหกรรมก่อสร้างในในช่วงการแพร่ระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา

*ระเบียบวิธีวิจัย*

การวิจัยการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อต้นทุนค่าก่อสร้างในช่วงระยะเวลาเกิดโรคระบาดโควิด-19 เป็นการศึกษาในเชิงปริมาณ (Quantitative Research) โดยใช้วิธีการสำรวจ (Survey research) และใช้แบบสอบถามเป็นเครื่องมือในการเก็บข้อมูล โดยมีขั้นตอนและวิธีดำเนินการดังนี้

*การสร้างและการทดสอบเครื่องมือ*

การสร้างและการทดสอบเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยดำเนินการดังนี้

1) ทำการศึกษาทฤษฎี แนวคิดเอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง แนวทางในการสร้าง บริบทของงานก่อสร้าง ความเสี่ยงขององค์กร และข้อมูลโครงการในส่วนของอาคารสถานีขนส่งสินค้าโดยกำหนดนิยามตามขอบข่ายของเนื้อหาเพื่อสร้างตัวบ่งชี้ใช้เป็นกรอบแนวคิดในงานวิจัย

2) นำประเด็นที่ได้จากการศึกษา มาจัดเป็นหมวดหมู่ให้สอดคล้องกับกรอบแนวคิดและนำเสนอร่างแบบสอบถามต่ออาจารย์ที่ปรึกษาเพื่อตรวจสอบความครอบคลุมของเนื้อหาตามกรอบแนวคิด แล้วนำไปปรับปรุงแก้ไขเพื่อดำเนินการในลำดับต่อไป

3) นำร่างแบบสอบถามให้ผู้ทรงคุณวุฒิจำนวน 3 ท่าน ประเมินและวิเคราะห์หาค่าดัชนีความสอดคล้อง (Item Objective Congruence : IOC) โดยคัดเลือกข้อคำถามที่มีค่าเฉลี่ยตั้งแต่ 0.5 ขึ้นไป (สุวิมล, 2546) รวมทั้งปรับปรุงแบบสอบถามตามข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ แล้วเสนอต่ออาจารย์ที่ปรึกษาเพื่อตรวจสอบเครื่องมืออีกครั้ง

4) การทดสอบเครื่องมือก่อนนำไปใช้จริง (Pre-Test) จำนวน 30 ชุด ทั้งนี้เพื่อหาค่าความเชื่อถือได้ของมาตรวัด (Reliability) โดยการทดสอบความน่าเชื่อถือของมาตรวัด (Reliability Analysis)โดยใช้สูตรค่าสัมประสิทธิ์แอลฟาครอนบัค (Cronbach, 1990)

*การเก็บและรวบรวมข้อมูลวิเคราะห์*

ในงานวิจัยได้แบ่งการเก็บข้อมูลและรวบรวมที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย 2 ลักษณะ

1) ข้อมูลทุติยภูมิ (Secondary Data) ได้แก่ ข้อมูลจากการค้นคว้าและรวบรวมจากเอกสารหนังสือและรายงานต่าง แนวคิดและทฤษฎีเกี่ยวกับบริบทของงาน

2) ข้อมูลปฐมภูมิ (Primary Data) ได้แก่ ข้อมูลจากแบบสอบถามที่ตอบโดยกลุ่มตัวอย่างที่ได้จากการสุ่มกลุ่มประชากร

การวิเคราะห์ประมวลผลจากข้อมูลปฐมภูมิโดยการใช้ การแจกแจงความถี่ ร้อยละ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ทดสอบความสัมพันธ์โดยวิเคราะห์ประมวลผล ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป ทางสถิติ SPSS (Statistical Package for Social Science)

เพื่อวิเคราะห์ t-test, One-Way ANAOVA, Multiple Regression Analysis จากการจัดเก็บข้อมูลและประมวลสรุปผลการวิเคราะห์ข้อมูล

*ผลการวิจัย*

ส่วนที่ 1 ข้อมูลปัจจัยคุณลักษณะของกลุ่มตัวอย่าง พบว่าปัจจัยคุณลักษณะของกลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่เป็นเพศชาย มีจำนวน 257 คน คิดเป็นร้อยละ 64.2 อายุ 31–40 ปี มีจำนวน 187 คน คิดเป็นร้อยละ 46.8 มีระดับการศึกษาปริญญาตรี มีจำนวน 186 คน คิดเป็นร้อยละ 46.4 มีผู้เกี่ยวข้อง ด้านก่อสร้าง ผู้บริหารงานก่อสร้าง มีจำนวน 192 คน คิดเป็นร้อยละ 48.0 มีรูปแบบ อาคาร คอนโด/อพาร์ทเมนท์มีจำนวน 169 คน คิดเป็นร้อยละ 42.3 มีการเปลี่ยนแปลงราคาขนส่ง ราคาวัสดุ ปรับตามสถานการณ์เงินเฟ้อ มีจำนวน 167 คน คิดเป็นร้อยละ 41.8

ส่วนที่ 2 ข้อมูลเกี่ยวกับปัจจัยความเสี่ยง

**Table 1** Mean, standard deviation of respondents regarding construction costs during the COVID-19 pandemic period. Expenses arising from the COVID situation

| Expenses incurred From the Covid situation | $\bar{x}$ | S.D. | Meaning |
|---|---|---|---|
| 1. The price of construction materials has increased and does not meet international standards. | 4.29 | 0.46 | maximum |
| 2. Management of construction materials with rising prices | 4.14 | 0.64 | very |
| 3. Procurement of scarce construction materials | 3.29 | 0.95 | moderate |
| 4. Restrictions on transportation of construction materials and increased transportation costs. | 4.29 | 0.79 | maximum |
| 5. Expenses incurred from prevention and treatment | 3.00 | 0.66 | moderate |
| 6. Expenses from taking care of employees and labor | 2.51 | 0.92 | little |
| 7. Expenses incurred from extending construction time | 3.42 | 0.80 | very |
| 8. Expenses incurred from administration and management | 3.59 | 0.79 | very |
| 9. Changes in shipping prices | 2.15 | 0.94 | little |
| 10. The cost of adding more labor than usual | 3.87 | 0.82 | very |
| Together | 3.46 | 0.31 | very |

จาก Table 1 พบว่าผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่มีความคิดเห็นต่อต้นทุนค่าก่อสร้างในช่วงระยะเวลาเกิดโรคระบาดโควิด-19 ด้านค่าใช้จ่ายที่เกิดจาก สถานการณ์โควิดโดยภาพรวมอยู่ในระดับมาก มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.46 เมื่อพิจารณาเป็นข้อย่อยพบว่าผู้ตอบแบบสอบถามเห็นว่าข้อจำกัดในการขนส่งวัสดุก่อสร้างและค่าใช้จ่ายในการขนส่งขึ้นมากที่สุด มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.29 รองลงมา คือ ราคาวัสดุก่อสร้างสูงขึ้นไม่ตรงตามมาตรฐานสากลมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.29 และน้อยที่สุดการเปลี่ยน แปลงราคาขนส่ง มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.15

**Table 2** Results of the multiple regression analysis of the model (Anova)

| Model | Sum Of Squartes | df | Mean Square | F | Sig. |
|---|---|---|---|---|---|
| Regression | 0.310 | 5 | 0.062 | 2.922 | 0.013 |
| Residual | 8.343 | 393 | 0.021 | | |
| Total | 8.653 | 398 | | | |

จาก Table 2 พบว่า F-test มีค่า Sig. เท่ากับ 0.013 ซึ่งน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 แสดงว่ามีปัจจัยอย่างน้อย 1 ปัจจัยที่สามารถนำมาใช้ในการอธิบายต้นทุนค่าก่อสร้างในช่วงระยะเวลาเกิดโรคระบาดโควิด-19 หรือตัวแปรอิสระทั้ง 5 ปัจจัยที่ส่งผลต่อต้นทุนค่าก่อสร้างในช่วงระยะเวลาเกิดโรคระบาดโควิด-19

**Table 3** Results of Multiple Regression Analysis: Risk factors for construction costs affect construction costs during the COVID-19 outbreak period

| Model | Unstandardized Coefficients | | Standardized Coefficients | t | Sig. |
|---|---|---|---|---|---|
| | B | Std. Error | Beta | | |
| Constant | 3.290 | 0.174 | | 18.868 | 0.000 |
| Strategic aspect | 0.061 | 0.020 | 0.150 | 2.997 | 0.003 |
| Operational aspect | 0.001 | 0.016 | 0.004 | 0.073 | 0.942 |
| Financial | 0.007 | 0.032 | 0.013 | 0.232 | 0.816 |
| Compliance with regulations and laws | 0.014 | 0.020 | 0.034 | 0.678 | 0.498 |
| Safety | -0.054 | 0.029 | -0.102 | -1.887 | 0.060 |

จาก Table 3 พบว่าจากตัวแปรทั้ง 5 ปัจจัยมีผลต่อต้นทุนค่าก่อสร้างในช่วงระยะเวลาเกิดโรคระบาดโควิด-19 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 เมื่อพิจารณาค่า Sig. สามารถตอบแต่ละข้อสมมติฐานของงานวิจัยได้ดังนี้

สมมติฐานที่ 2 ปัจจัยความเสี่ยงต่อต้นทุนค่าก่อสร้างมีผลต่อต้นทุนค่าก่อสร้างในช่วงระยะเวลาเกิดโรคระบาดโควิด-19

1) ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเกี่ยวกับปัจจัยความเสี่ยง สรุปได้ดังนี้

ด้านกลยุทธ์ โดยภาพรวมอยู่ในระดับปานกลาง มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.37 เมื่อพิจารณาเป็นข้อย่อยพบว่าผู้ตอบแบบสอบถามเห็นว่าผลกระทบ ผู้รับเหมางาน หรือ out source ที่รับช่วงงานต่างๆ ในโครงการก่อสร้าง ในสถานะการโควิดมากที่สุด มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.95

ด้านการปฏิบัติงาน โดยภาพรวมอยู่ในระดับน้อย มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.38 เมื่อพิจารณาเป็นข้อย่อยพบว่าผู้ตอบแบบสอบถามเห็นว่าความเชื่อมั่นในการทำงานของผู้รับเหมามากที่สุด มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.88

ด้านการเงิน โดยภาพรวมอยู่ในระดับปานกลาง มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.93 เมื่อพิจารณาเป็นข้อย่อยพบว่าผู้ตอบแบบสอบถามเห็นว่าความช่วยเหลือไปยังผู้รับผลกระทบมากที่สุด มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.47

ด้านการปฏิบัติตามระเบียบและกฎหมายโดยภาพรวมอยู่ในระดับน้อย มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.32 เมื่อพิจารณาเป็นข้อย่อยพบว่าผู้ตอบแบบสอบถามเห็นว่าการปรับตัวตามมาตรการภาครัฐมากที่สุด มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.65

ด้านความปลอดภัยโดยภาพรวมอยู่ในระดับปานกลาง มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.82 เมื่อพิจารณาเป็นข้อย่อยพบว่าผู้ตอบแบบสอบถามเห็นว่าการสร้างการรับรู้ของผู้ปฏิบัติงานมากที่สุด มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.36

2) ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเกี่ยวกับต้นทุนค่าก่อสร้างในช่วงระยะเวลาเกิดโรคระบาดโควิด-19 สรุปได้ดังนี้

ด้านมาตรการ ศคบ. ที่เกี่ยวข้องโดยภาพรวมอยู่ในระดับปานกลาง มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.38 เมื่อพิจารณาเป็นข้อย่อยพบว่าผู้ตอบแบบสอบถามเห็นว่าคนงานหยุดงานเมื่อมีอาการป่วย เฝ้าระวังดูอาการมากที่สุด มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.88

ด้านบริหารจัดการโดยภาพรวมอยู่ในระดับปานกลาง มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.29 เมื่อพิจารณาเป็นข้อย่อยพบว่าผู้ตอบแบบสอบถามเห็นว่าการเปลี่ยนวิธีการก่อสร้างมากที่สุด มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.75

ด้านแรงงาน และค่าจ้างโดยภาพรวมอยู่ในระดับมาก มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.42 เมื่อพิจารณาเป็นข้อย่อยพบว่าผู้ตอบแบบสอบถามเห็นว่าการย้ายฐานแรงงานกลับท้องถิ่นมากที่สุด มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.76

ด้านค่าใช้จ่ายที่เกิดจาก สถานะการโควิดโดยภาพรวมอยู่ในระดับมาก มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.46 เมื่อพิจารณาเป็นข้อย่อยพบว่าผู้ตอบแบบสอบถามเห็นว่าข้อจำกัดในการขนส่งวัสดุก่อสร้างและค่าใช้จ่ายในการขนส่งสูงขึ้นมากที่สุด มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.29

3) สมมติฐานที่ 1 ปัจจัยคุณลักษณะส่วนบุคคลของกลุ่มมีผลต่อต้นทุนค่าก่อสร้างในช่วงระยะเวลาเกิดโรคระบาดโควิด-19 ในส่วนของอาคาร แตกต่างกัน พบว่า รูปแบบอาคาร การเปลี่ยนแปลงราคาขนส่งของกลุ่มมีผลต่อต้นทุนค่าก่อสร้างในช่วงระยะเวลาเกิดโรคระบาดโควิด-19 ในส่วนของอาคารที่แตกต่างกันส่วน เพศ อายุ ระดับการศึกษา ผู้เกี่ยวข้องด้านก่อสร้างของกลุ่มมีผลต่อต้นทุนค่าก่อสร้างในช่วงระยะเวลาเกิดโรคระบาดโควิด-19 ในส่วนของอาคารที่ไม่แตกต่างกัน

ผลการวิเคราะห์สมมติฐานที่ 2 ปัจจัยความเสี่ยงต่อต้นทุนค่าก่อสร้างมีผลต่อต้นทุนค่าก่อสร้างในช่วงระยะเวลาเกิดโรคระบาดโควิด-19 พบว่า ปัจจัยความเสี่ยงต่อต้นทุนค่าก่อสร้างกับต้นทุนค่าก่อสร้างในช่วงระยะเวลาเกิดโรคระบาดโควิด-19 มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01 โดยมีความสัมพันธ์กันในระดับต่ำ ($r = 0.031$)

ด้านกลยุทธ์ ที่มีผลต่อต้นทุนค่าก่อสร้างในช่วงระยะเวลาเกิดโรคระบาดโควิด-19 ส่วนด้านการปฏิบัติงาน ด้านการเงิน ด้านการปฏิบัติตามระเบียบและกฎหมาย ด้านความปลอดภัย ที่ไม่มีผล

**อภิปรายผลของการศึกษาตามสมมติฐาน**

การศึกษาวิจัยปัจจัยที่มีผลต่อต้นทุนค่าก่อสร้างอาคารในช่วงระยะเวลาเกิดโรคระบาดโควิด-19 โดยมีวัตถุประสงค์การวิจัย คือ เพื่อศึกษาปัจจัยความเสี่ยงที่กระทบต่อต้นทุนค่าก่อสร้างโครงการด้านอาคาร และเพื่อศึกษาแนวทางในการการป้องกันและแก้ไขต่อโครงการที่มีผลกระทบจากต้นทุนค่าก่อสร้างเมื่อเกิดภาวะสถานการณ์วิกฤตในอนาคต

การศึกษาปัจจัยความเสี่ยงที่กระทบต่อต้นทุนค่าก่อสร้างโครงการด้านอาคาร พบว่า ความคิดเห็นต่อต้นทุนค่าก่อสร้างในช่วงระยะเวลาเกิดโรคระบาดโควิด-19 ด้านค่าใช้จ่ายที่เกิดจากสถานการณ์โควิด-19 ในภาพรวมอยู่ในระดับมาก โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.46 ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อต้นทุนการก่อสร้างเกิดจากข้อจำกัดในการขนส่งวัสดุก่อสร้างและค่าใช้จ่ายในการขนส่งสูงขึ้น มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.29 โดยมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.79 และราคาวัสดุก่อสร้างเพิ่มสูงขึ้นกว่าราคามาตรฐานสากล มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.29 โดยมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.46 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อต้นทุนค่าก่อสร้างโครงการอสังหาริมทรัพย์ กรณีศึกษาโครงการทาวน์โฮม ของ สาวิตรี ทับแจ้งและมงคล อัศวดิลกฤทธิ์ (2566) ที่พบว่า ปัจจัยที่ส่งผลต่อต้นทุนค่าก่อสร้างอย่างมีนัยสำคัญ คือ ราคาวัสดุก่อสร้างและค่าใช้จ่ายในการขนส่งวัสดุก่อสร้างเพิ่มสูงขึ้น ที่แปรผันตรงตามต้นทุนของจำนวนชั้น รูปแบบการก่อสร้าง การออกแบบ และสัดส่วนพื้นที่ใช้สอย ซึ่งการตระหนักถึงปัจจัยความเสี่ยงด้านต้นทุนจะสามารถช่วยให้ผู้ประกอบการด้านธุรกิจอสังหาริมทรัพย์ ผู้บริหารโครงการ และผู้ที่

เกี่ยวข้องมีแนวทางในการกำหนดรูปแบบการพัฒนาโครงการอสังหาริมทรัพย์ต่อไปในอนาคตอย่างมั่นคงและยั่งยืน ซึ่งปัจจัยด้านต้นทุนเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับงานวิจัยการศึกษาปัจจัยที่ทาให้เกิดงานเปลี่ยนแปลงที่มีผลต่อต้นทุนการพัฒนาอสังหาริมทรัพย์ กรณีศึกษางานก่อสร้างอาคารสูง ของ สุภสัณห์ พินิจปรีชา และมงคล อัศวดิลกฤทธิ์ (2564) ที่พบว่า ต้นทุนด้านวัสดุส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงต้นทุนการพัฒนาอสังหาริมทรัพย์ในด้านรูปแบบของอสังหาริมทรัพย์ และนำไปสู่ผลกระทบด้านการบริหารงานโครงการก่อสร้าง จึงมีความจำเป็นในการบริหารความเสี่ยงด้านต้นทุนวัสดุก่อสร้างเพื่อเป็นแนวทางในการจัดการความเสี่ยงเพื่อลดผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงแผนงานของโครงการ

การศึกษาแนวทางในการป้องกันและวิธีแก้ไขต่อโครงการที่ได้รับผลกระทบจากต้นทุนการก่อสร้าง เมื่อเกิดภาวะสถานการณ์วิกฤตในอนาคต พบว่า การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุ (Multiple Regression Analysis) ปัจจัยความเสี่ยงต่อต้นทุนค่าก่อสร้างมีผลต่อต้นทุนค่าก่อสร้างในช่วงระยะเวลาเกิดโรคระบาดโควิด-19 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ซึ่งแสดงถึงปัจจัยความเสี่ยงต่อต้นทุนค่าก่อสร้างมีผลต่อต้นทุนค่าก่อสร้างในช่วงระยะเวลาเกิดโรคระบาดโควิด-19 โดยปัจจัยด้านกลยุทธ์มีผลต่อต้นทุนค่าก่อสร้างในช่วงระยะเวลาเกิดโรคระบาดโควิด-19 โดยมีแนวทางในการป้องกันผลกระทบจากต้นทุนการก่อสร้างเมื่อเกิดภาวะสถานการณ์วิกฤตผ่านการจัดทำแผนด้านการดำเนินงานก่อสร้างตามสถานการณ์ เช่น การบริหารจัดการแรงงาน การจัดสถานที่ที่ปลอดเชื้อจากการระบาดของแรงงาน การปรับแผนบริหารจัดการแรงงานทดแทนด้วยเครื่องจักร หรือแม้แต่การวางแผนก่อสร้างจากการทำผนังก่ออิฐเป็นผนังสำเร็จรูป ซึ่งสามารถจ้างผลิตจากภายนอกได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยปัจจัยลักษณะองค์กรที่มีความสัมพันธ์ต่อการควบคุมต้นทุนงานก่อสร้าง ของผู้ประกอบการธุรกิจรับเหมาก่อสร้างขนาดกลางในจังหวัดกรุงเทพมหานคร ของ ศรัณยู ปริมาณ และ ฉัตรธาร ลิ้มอุปถัมภ์ (2562) ที่พบว่า การวางแผนด้านต้นทุนการดำเนินการ ด้านต้นทุนวัสดุ และด้านต้นทุนแรงงาน สามารถควบคุมต้นทุนของผู้ประกอบการธุรกิจรับเหมาก่อสร้างขนาดกลางอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ซึ่งเป็นแนวทางป้องกันที่สำคัญต่อผู้ประกอบการรับเหมาก่อสร้างที่ได้รับผลกระทบจากต้นทุนการก่อสร้างเมื่อเกิดภาวะสถานการณ์วิกฤต ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับงานวิจัยกลยุทธ์ในการสร้างความได้เปรียบทางการแข่งขันธุรกิจอสังหาริมทรัพย์ในเขตเศรษฐกิจพิเศษจังหวัดเชียงราย ของ ณัชชา กันทะดง และวิกรม บุญนุ่น (2564) ที่พบว่า กลยุทธ์ในการสร้างความได้เปรียบทางการแข่งขันธุรกิจอสังหาริมทรัพย์ในเขตเศรษฐกิจพิเศษจังหวัดเชียงรายที่ได้รับผลกระทบจากสถานการณ์ทางการเงินซบเซาและวิกฤติการณ์โควิด-19 จำเป็นต้องมีการปรับตัวเพื่อให้อยู่รอดโดยการปรับกลยุทธ์ในการดำเนินการเพื่อรองรับกับการฟื้นตัวของภาคอสังหาริมทรัพย์ซึ่งมีการแข่งขันกันสูง โดยกลยุทธ์การปรับตัวผู้ประกอบการควรมีการวางแผนกลยุทธ์การดำเนินธุรกิจในระยะยาวในการปรับแผนทางการตลาดใหม่เพิ่มช่องทางการขายและลดต้นทุนและวางแผนการบริหารจัดการเงินเพื่อแก้ไขและป้องกันผลกระทบจากต้นทุนการก่อสร้างเมื่อเกิดภาวะสถานการณ์วิกฤตในอนาคต

**ข้อเสนอแนะของการศึกษาวิจัยในครั้งต่อไป**

ผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะของการศึกษาวิจัยในครั้งต่อไปดังนี้

1. เพื่อให้ได้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับต้นทุนค่าก่อสร้างในช่วงระยะเวลาเกิดโรคระบาดโควิด-19 จึงควรอาศัยการวิจัยโดยการเก็บข้อมูลในรูปแบบอื่นๆ เช่น การสัมภาษณ์เชิงลึก (In-depth Interview) และการทำการสัมภาษณ์เฉพาะกลุ่ม (Focus Group)

2. ควรศึกษาปัจจัยอื่นๆ เพิ่มเติมที่อาจส่งผลต่อต้นทุนค่าก่อสร้างในช่วงระยะเวลาเกิดโรคระบาดโควิด-19 ในอนาคต

**เอกสารอ้างอิง**

ณัชชา กันทะดง, วิกรม บุญนุ่น. 2564. กลยุทธ์ในการสร้างความได้เปรียบทางการแข่งขันธุรกิจอสังหาริมทรัพย์ในเขตเศรษฐกิจพิเศษจังหวัดเชียงราย. วารสารวิชาการสังคมมนุษย์มหาวิทยาลัยราชภัฏ นครศรีธรรมราช 11: 65–77.

ลิขิต พันธุเทพ, แสงสุรีย์ พังแดง, วชิรกรณ์ เสนาวัง 2564. ปัจจัยที่ทำให้เกิดความล่าช้าในงานก่อสร้างถนนขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นในจังหวัดนครพนม. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 26, วันที่ 23–25 มิถุนายน 2564, หน้า 34–37.

ศรัณยู ปริมาณ, ฉัตรธาร ลิ้มอุปถัมภ์. 2562. ปัจจัยลักษณะองค์กรที่มีความสัมพันธ์ต่อการควบคุมต้นทุนงานก่อสร้างของผู้ประกอบการธุรกิจรับเหมาก่อสร้างขนาดกลางในจังหวัดกรุงเทพมหานคร. รายงานการประชุม Graduate School Conference 3: 626–632.

ศรุต ดิลกภัทรวุฒิ. 2561. ได้ศึกษาเรื่องการระบุความเสี่ยงด้านการควบคุมต้นทุนการก่อสร้างโครงการอาคารชุด กรณีศึกษา: อาคารชุดอาศัย 8 ชั้น ในเขตกรุงเทพมหานคร (งานค้นคว้าอิสระปริญญามหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ กรุงเทพมหานคร

ศิรัส เคนพะนาน. 2565. การวิจัยครั้งนี้เพื่อศึกษาปัจจัยสภาพแวดล้อมภายในองค์การ ภายนอกองค์การ ที่มีอิทธิพลต่อความสำเร็จในการดำเนินธุรกิจอุตสาหกรรมก่อสร้างในช่วงการแพร่ระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรน่า (นักวิชาการอิสระ)

สุทธิ ภาษีผล. 2555. องค์ประกอบแสดงความสำเร็จของโครงการ. CPAC NEW. ฉบับที่ 1 มกราคม–มีนาคม.

สุภสัณห์ พินิจปรีชา, มงคล อัศวดิลกฤทธิ์. 2564. การศึกษาปัจจัยที่ทำให้เกิดงานเปลี่ยนแปลงที่มีผลต่อ ต้นทุนการพัฒนาอสังหาริมทรัพย์: กรณีศึกษางานก่อสร้างอาคารสูง. Int. eng. j. res. dev. 32: 25–38.

สุวิมล ติรกานันท์. 2546. การใช้สถิติในงานวิจัยทางสังคมศาสตร์: แนวทางสู่การปฏิบัติ. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สาวิตรี ทับแจ้ง, และมงคล อัศวดิลกฤทธิ์. 2566. การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อต้นทุนค่าก่อสร้างโครงการอสังหาริมทรัพย์: กรณีศึกษาโครงการทาวน์โฮม. Int. eng. j. res. dev. 34: 9–22.

BUILK. 2562. สัดส่วนต้นทุนงานก่อสร้าง (Cost Structure) ปี 2018. https://www.builk.com/th/สัดส่วนต้นทุนงานก่อสร้าง_2018/, 19 กันยายน 2566

Cochran, W.G. 1977. Sampling techniques. 3rd Edition, John Wiley & Sons, New York.

Cronbach, L.J. 1990. Essentials of psychological testing (5th ed.). New York: Harper Collins.

Semple, C., Hartman, F., Jergeas, G. 1994. Construction claims and disputes: causes and cost/time overruns, ASCE J. Constr. Eng. Manag.120: 785–795.

Shaban, R.A., Assaad, R., Al-Qudsi, S.S. 1995. The challenge of unemployment in the Arab region. Int. Labour Rev. 134: 65–81.

# การตรวจสอบการปลอมปนของน้ำเชื่อมอ้อยในน้ำผึ้งด้วยฟูเรียร์ทรานฟอร์มเนียอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีร่วมกับอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่อง

# Detection of adulteration of sugar cane syrup in honey by fourier transform near infrared spectroscopy coupled with machine learning algorithms

**วุฒิพงษ์ บุตรนนท์, รวิภัทร ลาภเจริญสุข***

Wutthiphong Boodnon, Ravipat Lapcharoensuk*

ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

Department of Agricultural Engineering, School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: ravipat.la@kmitl.ac.th

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์คือใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ร่วมกับอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่องตรวจสอบการปลอมปนน้ำผึ้ง ตัวอย่างประกอบด้วยน้ำผึ้งบริสุทธิ์ น้ำเชื่อมอ้อยบริสุทธิ์ และน้ำผึ้งผสมน้ำเชื่อมอ้อย ข้อมูลสเปกตรัมถูกบันทึกที่เลขคลื่น 12,500–4,000 $cm^{-1}$ แบบจำลองถูกสร้างด้วยเทคนิค partial least square regression, support vector machine, artificial neural network และ principal component neural network ผลการทำนายทดีที่สุดได้จากแบบจำลอง principal component neural network โดยสมรรถนะคือ $R^2_{testing}$ = 0.99 และ $RMSE_{testing}$ = 3.22 %w/w ผลที่ได้แสดงให้เห็นถึงการใช้เทคนิค NIRS ร่วมกับการเรียนรู้ของเครื่องทำนายการปลอมปนของในน้ำผึ้งได้

**คำสำคัญ**: การเรียนรู้ของเครื่อง, การปลอมปน, น้ำผึ้ง, เนียอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

**Abstract**

The purpose of this research is application of near-infrared spectroscopy (NIRS) techniques combined with machine learning algorithms for detecting adulteration of honey. The samples in this study were pure honey, pure sugar cane syrup and honey adulterated with sugarcane syrup. The near-infrared spectra of the samples were collected at a wavenumber of 12,500–4,000 $cm^{-1}$. The models were developed using partial least square regression, support vector machine, artificial neural network and principal component neural network. The best prediction result obtained from the principal component neural network which performance of model was $R^2_{testing}$ = 0.99 and $RMSE_{testing}$ = 3.22 %w/w. The results showed possibility of application of near infrared spectroscopy combined with machine learning algorithms for predicting the adulteration of sugarcane syrup in pure honey.

**Keywords**: Adulteration, Honey, Machine learning, Near-Infrared spectroscopy

**คำนำ**

น้ำผึ้งเป็นสารให้ความหวานที่ผึ้งผลิตขึ้นโดยใช้น้ำหวานจากดอกไม้ ประกอบด้วยน้ำตาลฟรุกโตสและกลูโคสเป็นหลัก (สมิต และคณะ, 2549) นอกจากนั้นยังมีน้ำตาล แร่ธาตุ วิตามิน และสารต้านอนุมูลอิสระอื่น ๆ ในปริมาณเล็กน้อย มนุษย์ใช้น้ำผึ้งเป็นสารให้ความหวานตามธรรมชาติมาเป็นเวลาหลายพันปีและมีประโยชน์ต่อสุขภาพหลายประการ สามารถใช้ในการปรุงอาหาร และเป็นสารให้ความหวานจากธรรมชาติสำหรับชาและเครื่องดื่มอื่น ๆ น้ำผึ้งเป็นสินค้าที่มีคุณค่า ทั้งเป็นอาหารและมีประโยชน์ต่อสุขภาพ นอกจากนี้ยังใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น เครื่องสำอางและผลิตภัณฑ์บำรุงผิว ตลาดน้ำผึ้งทั่วโลกมีมูลค่าหลายพันล้านดอลลาร์ และเป็นแหล่งรายได้ที่สำคัญสำหรับผู้เลี้ยงผึ้งและผู้ผลิตน้ำผึ้งจำนวนมากทั่วโลก ปัญหาสำคัญเกี่ยวกับการปลอมปนในอุตสาหกรรมน้ำผึ้ง คือการเจือปนสารอื่น ๆ เช่น น้ำเชื่อมน้ำตาลหรือน้ำเชื่อมข้าวโพดลงในน้ำผึ้งเพื่อเพิ่มปริมาณและลดต้นทุน การกระทำนี้ถือว่าผิดกฎหมายในหลายประเทศรวมถึงประเทศไทยด้วยเช่นกัน การปลอมปนมีผลเสียต่อคุณภาพของน้ำผึ้งหลายประการ เช่น สามารถลดสารอาหารตามธรรมชาติและสารต้านอนุมูลอิสระในน้ำผึ้งซึ่งทำให้ประโยชน์ที่ได้จากน้ำผึ้งลดลงอย่างมาก นอกจากนั้นอาจทำให้น้ำผึ้งเน่าเสียและปนเปื้อนได้ง่ายขึ้นซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อผู้บริโภค เป็นต้น วิธีที่สามารถตรวจสอบน้ำผึ้งได้อย่างแม่นยำนั้นประกอบด้วย Nuclear Magnetic Resonance (NMR) (Song et al., 2020), Isotope Ratio Mass Spectrometry (IRMS) (Xu et al., 2020), Enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA) และ Near infrared spectroscopy (NIRS) (Naila et al., 2020) เป็นต้น วิธีการทางเหล่านี้มีความแม่นยำและเชื่อถือได้สูง สามารถตรวจจับการปลอมปนในน้ำผึ้งได้แม้เพียงเล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตามเทคนิคเหล่านี้เป็นเทคนิคที่มีมีข้อจำกัด เช่น ต้องใช้สารเคมีในการทดลอง ต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญในการตรวจสอบ เป็นเทคนิคที่มีต้นทุนในการตรวจสอบแต่ละตัวอย่างสูง ใช้เวลานานในการตรวจสอบ หากมีเทคนิคในการตรวจสอบที่มีความรวดเร็ว ต้นทุนต่ำ ไม่ต้องใช้สารเคมี และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมย่อมช่วยแก้ปัญหาเหล่านี้ได้

เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (Near-infrared spectroscopy, NIRS) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์แบบไม่ทำลายที่ใช้แสงอินฟราเรดย่านใกล้ (Near-infrared) ที่มีช่วงความยาวคลื่นประมาณ 800 ถึง 2500 nm มาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ โดยอาศัยหลักการที่ว่าสารประกอบทางเคมีต่าง ๆ จะดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นต่างกัน ทำให้เกิดรูปแบบสเปกตรัมเฉพาะที่สามารถใช้ในการระบุและหาปริมาณสารประกอบในวัสดุต่าง ๆ ได้ สามารถใช้หลักการนี้กับวัสดุหลายหลายประเภท เช่น อาหาร ยา เครื่องสำอาง ไปจนถึงผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร NIRS เป็นวิธีการที่น่าสนใจในการตรวจวัดความบริสุทธิ์ของน้ำผึ้งที่ปลอมปนด้วยวัสดุอื่น ๆ เทคนิค NIRS สามารถตรวจวัดการปลอมปนน้ำผึ้งที่ถูกปลอมปนได้เป็นอย่างดี ตัวอย่างเช่น น้ำผึ้งที่ถูกปลอมปนด้วยน้ำเชื่อมข้าวโพดฟรุกโทสสูง (Chen et al., 2011) น้ำเปล่าและน้ำหมักแอปเปิล (Raypah et al., 2022) อย่างไรก็ดีคลื่นแสงในช่วงอินฟราเรดย่านใกล้ไม่สามารถนำมาในการตรวจสอบทางเคมีได้โดยตรงจำเป็นต้องผ่านกระบวนการทางคณิตศาสตร์และสถิตที่เรียกว่า Chemometric เทคนิคนี้มุ่งเน้นในการดำเนินการทางคณิตศาสตร์เพื่อให้มีความเข้าใจและมีการอธิบายที่ดีต่อข้อมูลที่เกิดจากกระบวนการทางเคมีและการวัดหรือการวิเคราะห์ในกรณีที่ข้อมูลมีความซับซ้อน โดยมักนำเทคนิคทางสถิติเข้ามาช่วยในการทำนาย วิเคราะห์ความสัมพันธ์ ตรวจสอบความถูกต้อง หรือแยกแยะข้อมูลที่ซับซ้อน Chemometrics มักถูกนำมาใช้ร่วมกับเทคนิค NIRS (Zhu et al., 2019) เพื่อวิเคราะห์และควบคุมคุณภาพของสารเคมี โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมเคมี อาหาร และเกษตร ซึ่งมีความต้องการในการวิเคราะห์และควบคุมคุณภาพสูง และต้องการผลการวิเคราะห์ที่รวดเร็วและสะดวกต่อการใช้งานในสภาพแวดล้อมการผลิตและทดสอบต่างๆ Chemometrics ถูกนำเข้ามาในกระบวนการ NIRS เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการวัดด้วยระบบ NIRS อย่างมีประสิทธิภาพ (Wu et al., 2016) เนื่องจากข้อมูลที่ได้จาก NIRS มักจะมีจำนวนมิติที่มากและซับซ้อน การใช้ Chemometrics ช่วยในการลดมิติของข้อมูล กระบวนการ Pre-processing หรือเตรียมและปรับปรุงข้อมูลก่อนนำข้อมูลไปวิเคราะห์ เลือกคุณลักษณะที่สำคัญ (feature selection) และสร้างโมเดล

ทำนาย (prediction model) เพื่อควบคุมคุณภาพและตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ รวมถึงช่วยให้ผู้ใช้สามารถทำนายคุณภาพและคุณสมบัติของสารได้ด้วยความแม่นยำ

สำหรับในปัจจุบันวิทยาการข้อมูลและปัญญาประดิษฐ์ซึ่งเป็นศาสตร์ทางวิทยาการคอมพิวเตอร์ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในด้านการเกษตรอย่างแพร่หลาย เทคนิค Machine learning หรือการเรียนรู้ของเครื่องเป็นศาสตร์ทางวิทยาการข้อมูลและปัญญาประดิษฐ์ที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างแบบจำลอง NIRS โดยใช้ข้อมูลสเปกตรัมแสงอินฟราเรดย่านใกล้ การเรียนรู้ของเครื่องมีขั้นตอนในการดำเนินการตั้งแต่ การเก็บรวบรวมข้อมูล การจัดการข้อมูล การสร้างแบบจำลอง การประเมินแบบจำลอง นำแบบจำลองไปใช้ในทางปฏิบัติ มีงานวิจัยจำนวนมากที่ประยุกต์ใช้การเรียนรู้ของเครื่องในการสร้างแบบจำลอง NIRS สำหรับผลิตผลทางการเกษตรและอาหาร เช่น artificial neural network (ANN), support vector machine (SVM), Principal component analysis (PCA), linear discriminant analysis (LDA) และ k-nearest neighbors algorithm (k-NN) (Kaufmann et al., 2022) เป็นต้น ในการสร้างแบบจำลองเพื่อให้อัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่องมีประสิทธิภาพสูงสุด วิธีการที่สำคัญที่สุดคือการปรับไฮเปอร์พารามิเตอร์ให้เหมาะสม (Fine-tuning hyperparameter) ซึ่งถือเป็นกระบวกการที่ทำเกิดการเรียนรู้ของอัลกอลิทึมจากข้อมูลที่ป้อนเข้า ไฮเปอร์พารามิเตอร์ในอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่องคือพารามิเตอร์ที่มีค่าควบคุมกระบวนการเรียนรู้ และกำหนดค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่เรียนรู้โดยอัลกอริทึมการเรียนรู้ คำนำหน้า 'hyper_' บ่งชี้ว่าเป็นพารามิเตอร์ 'ระดับบนสุด' คือพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดในการควบคุมกระบวนการเรียนรู้และสร้างแบบจำลองที่เป็นผลมาจากกระบวนการนั้น (Gahm et al., 2022)

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการศึกษาการใช้เทคนิคเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ ร่วมกับกระบวนการ machine learning และการปรับไฮเปอร์พารามิเตอร์ให้เหมาะสมช่วยในการทำนายความบริสุทธิ์ของน้ำผึ้ง ซึ่งจะเป็นแนวทางในการรับรองความบริสุทธิ์และคุณภาพของน้ำผึ้งส่งผลต่อความน่าเชื่อถือการค้าขายน้ำผึ้งทั้งในประเทศและต่างประเทศได้

## อุปกรณ์และวิธีการ

*ตัวอย่างทดลอง*

ตัวอย่างน้ำผึ้งและวัสดุปลอมปนโดยในงานวิจัยนี้ใช้น้ำเชื่อมอ้อย ถูกซื้อจากห้างสรรพสินค้า เตรียมตัวอย่างการปลอมปนที่ผสมน้ำผึ้งและน้ำเชื่อมอ้อยด้วยอัตราส่วนต่าง ๆ ทั้งสิ้น 14 ระดับ 0, 1, 2, 3, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 และ 100%w/w ในการผสมแต่ละครั้งตัวอย่างถูกคนให้เข้ากันด้วยเครื่องกวนสาร (Magnetic Stirrer) เป็นเวลา 5 นาที ก่อนการวัดสเปกตรัม การทดลองดำเนินการในห้องอุณหภูมิ 25 °C ตลอดการทดลอง

*การบันทึกข้อมูลสเปกตรัมเนียร์อินฟราเรด*

บันทึกสเปกตรัมเนียร์อินฟราเรดจากตัวอย่างทั้งหมด แต่ละตัวอย่างจะถูกแบ่งออกเป็น 10 ส่วนเท่า ๆ กัน ตัวอย่างถูกเทลงในหลอดแก้วทรงกระบอกและกดทับด้วยแท่นอลูมิเนียมเพื่อวัดสเปกตรัม สเปกตรัมของตัวอย่างจะถูกบันทึกด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer (MPA, Bruker, Germany) ที่ความยาวคลื่น 12,500–4,000 $cm^{-1}$ (800–2,500 nm) ในโหมด reflectance มีสเปกตรัมทั้งสิ้น 2203 สเปกตรัมต่อข้อมูล ด้วยความละเอียดในการวัด 8 $cm^{-1}$ Fig. 1 แสดงการเก็บข้อมูลเนียร์อินฟราเรดด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer (MPA, Bruker, Germany)




**Fig. 1** Near infrared data collection using an FT-NIR spectrometer (MPA, Bruker, Germany)

*การสร้างแบบจำลอง*

ข้อมูลสเปกตรัมจำนวน 140 ตัวอย่าง (สเปกตรัมของน้ำผึ้งบริสุทธิ์ 10 ตัวอย่าง น้ำเชื่อมบริสุทธิ์ 10 ตัวอย่าง และน้ำผึ้งปลอมปนที่ 12 ระดับการปลอมปนจำนวน 120 ตัวอย่าง) ถูกนำไปผ่านกระบวนการ Pre-processing เทคนิคต่าง ๆ ประกอบด้วย Smoothing ใช้เพื่อลดสัญญาณรบกวนในข้อมูลสเปกตรัม, standard normal variate (SNV) ใช้เพื่อลดอิทธิพลของการกระเจิงแสง, Min-Max normalization และ mean normalization ใช้เพื่อปรับแก้กลุ่มของสเปกตรัมเพื่อให้ได้สเปกตรัมที่มีจุดสำคัญเด่นมากขึ้น, savitzky-golay (SG) derivative ลำดับที่ 1 และลำดับ 2 ใช้เพื่อลดสัญญาณรบกวนข้อมูล ทำให้สัญญาณราบเรียบและยังคงสเปกตรัมเหมือนสเปกตรัมเริ่มต้น, multiplication scatter correction (MSC) เพื่อลดการกระเจิงแสงของสเปกตรัม NIR และ Detrending ใช้เพื่อปรับแก้แนวโน้มหรือลดความโน้มเอียงของสเปกตรัม (วารุณี และคณะ, 2555) หลังจากนั้นแบ่งออกเป็นชุดสร้างแบบจำลอง (training set) และชุดทดสอบแบบจำลอง (testing set) ด้วยอัตราส่วน 80:20 ตามลำดับ แบ่งข้อมูลด้วยการสุ่มเป็นชุดสร้างแบบจำลองและชุดทดสอบแบบจำลองด้วยคำสั่ง train_test_split จากการเขียนโปรแกรมด้วยภาษา Python ข้อมูลชุดสร้างแบบจำลองถูกใช้สร้างแบบจำลองในการตรวจสอบการปลอมปนสร้างด้วยเทคนิค partial least square regression (PLSR), support vector machine (SVM), Artificial neural network (ANN) และ Principal Component neural network (PC-NN) การปรับไฮเปอร์พารามิเตอร์ให้เหมาะสมจะดำเนินการผ่านข้อมูลชุดสร้างแบบจำลองด้วยวิธีการ 5-fold cross-validation โดยค่าพารามิเตอร์ในแต่ละแบบจำลอง (Hyperparameter) แสดงใน Table 1 เงื่อนไขในการตรวจสอบและเลือกพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดจะวัดจากค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยที่ต่ำสุด (root mean square error) จากนั้นแบบจำลองที่ได้ถูกนำมาทดสอบทำนายข้อมูลชุดสร้างแบบจำลองและชุดทดสอบแบบจำลอง สมรรถนะของแบบจำลองถูกรายงานด้วยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (coefficient of determination) ของชุดสร้างแบบจำลองและชุดทดสอบแบบจำลอง ($R^2_{training}$ และ $R^2_{testing}$) ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของชุดสร้างแบบจำลองและชุดทดสอบแบบจำลอง ($RMSE_{training}$ และ $RMSE_{testing}$) การดำเนินการ Pre-processing และการสร้างแบบจำลองใช้การเขียนโปรแกรมด้วยภาษา Python 3.9.12 ร่วมกับการใช้ package ทางการจัดการข้อมูล สถิติและการเรียนรู้ของเครื่อง ได้แก่ numpy 1.23.4, scipy 1.9.3 pandas 1.4.4 และ scikit-learn 1.0.2

**Table 1** Hyperparameter value that is searched with the GridSearchCV command

| Algorithm | Hyper-parameter | Turning range |
|---|---|---|
| PLS | n_components | 1-20 |
| SVM | kernel | linear, poly, rbf, sigmoid |
| | degree | 2-6 |
| | gamma | 0.001-1 |
| | coef0 | 0.0-0.3 |
| ANN | activation | identity, logistic, tanh, relu |
| | solver | adam, lbfgs, sgd |
| | hidden_layer_sizes | 400, 500 |
| PC-NN | activation | identity, logistic, tanh, relu |
| | solver | adam, lbfgs, sgd |
| | hidden_layer_sizes | 5, 10, (5,10) |

Note: PLS is partial least square regression, SVM is support vector machine, ANN is Artificial neural network, PC-NN is Principal Component neural network.

**ผลและวิจารณ์ผลการทดลองผล**

**Table 2** Statistical parameters of salinity for training and testing set

| Data set | N | Min (%w/w) | Max (%w/w) | Mean (%w/w) | SD (%w/w) |
|---|---|---|---|---|---|
| Training set | 112 | 0 | 100 | 62.0 | 33.4 |
| Test set | 28 | 0 | 100 | 53.3 | 38.0 |

Table 2 แสดงค่าสูงสุด ต่ำสุด เฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของชุดข้อมูลสร้างแบบจำลองและชุดข้อมูลสดสอบแบบจำลอง โดยค่าต่ำสุดและสูงสุดของสองชุดข้อมูลคือ 0 %w/w และ 100 %w/w ตามลำดับ ในชุดข้อมูลสร้างแบบจำลองมีค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น 62.0 %w/w และ 33.4 %w/w ตามลำดับ ในชุดข้อมูลทดสอบแบบจำลองมีค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น 53.3 %w/w และ 38.0 %w/w ตามลำดับ

จาก Fig. 2 แสดงสเปกตรัมของตัวอย่างน้ำผึ้งด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer ในความบริสุทธิ์ต่างๆ ที่ 12500–4000 $cm^{-1}$ (800-2500 nm) พบการดูดซับที่พีค 8300 $cm^{-1}$ (1205 nm) สัมพันธ์กับการสั่นสะเทือนของ C—H stretch second overtone ที่เลขคลื่น 6830 $cm^{-1}$ (1464 nm) สอดคล้องกับการสั่นสะเทือนของ O—H stretch first overtone ของน้ำ การสั่นสะเทือนในรูปแบบ O—H stretch + O—H deformation) ของน้ำเกิดขึ้นที่เลขคลื่น 5155 $cm^{-1}$ (1940 nm) การดูดกลืนบริเวณ 4760 $cm^{-1}$ (2100 nm) เป็นการสั่นสะเทือนของพันธะ 2×O—H deformation + 2×C—O stretch พบในสารประเภทแป้ง น้ำตาล รวมถึงซูโครสในน้ำผึ้ง และที่เลขคลื่น 4385 $cm^{-1}$ (2280 nm) เป็นการสั่นสะเทือนของ C—H stretch + C—H deformation ของน้ำตาลในน้ำผึ้งและน้ำเชื่อม (ปานมนัส, 2557)

Table 3 แสดงผลการทำนายการปลอมปนของน้ำเชื่อมในน้ำผึ้งด้วย machine learning โดยในแบบจำลอง partial least square regression (PLSR) ได้กระบวนการ Preprocessing ที่เหมาะสมคือวิธี standard normal variate (SNV)

และได้ค่าแสดงสมรรถนะในการทำนายของแบบจำลองดังนี้ $R^2_{training}$ = 0.98, $R^2_{testing}$ = 0.98, $RMSE_{training}$ = 4.01 %w/w และ $RMSE_{testing}$ = 4.97 %w/w ในแบบจำลอง support vector machine (SVM) ได้กระบวนการ Preprocessing ที่เหมาะสมคือวิธี standard normal variate (SNV) และได้ค่าแสดงสมรรถนะในการทำนายของแบบจำลองดังนี้ $R^2_{training}$ = 0.99, $R^2_{testing}$ = 0.98, $RMSE_{training}$ = 3.86 %w/w และ $RMSE_{testing}$ = 4.67 %w/w ในแบบจำลอง artificial neural network (ANN) ได้กระบวนการ Preprocessing ที่เหมาะสมคือวิธี min-max normalization และได้ค่าแสดงสมรรถนะในการทำนายของแบบจำลองดังนี้ $R^2_{training}$ = 0.99, $R^2_{testing}$ = 0.98, $RMSE_{training}$ = 3.01 %w/w และ $RMSE_{testing}$ = 4.69 %w/w และ principal component neural network (PC-NN) ได้กระบวนการ Preprocessing ที่เหมาะสมคือวิธี multiplication scatter correction (MSC) และได้ค่าแสดงสมรรถนะในการทำนายของแบบจำลองดังนี้ $R^2_{training}$ = 0.99, $R^2_{testing}$ = 0.99, $RMSE_{training}$ = 3.68 %w/w และ $RMSE_{testing}$ = 3.22 %w/w ผลการทำนายแสดงให้เห็นว่าการใช้เทคนิค NIRS ร่วมกับวิธี machine learning ที่ผ่านการปรับปรุงข้อมูลจากวิธี SNV สามารถทำนายความบริสุทธิ์ของน้ำผึ้งได้ดีเช่นเดียวกัน ค่า Optimal parameter ที่ได้ของแต่ละแบบจำลองแสดงให้เห็นดัง Table 2 และผลการทำนายและค่าจริงของตัวอย่างน้ำผึ้งที่ความบริสุทธิ์ต่างๆ

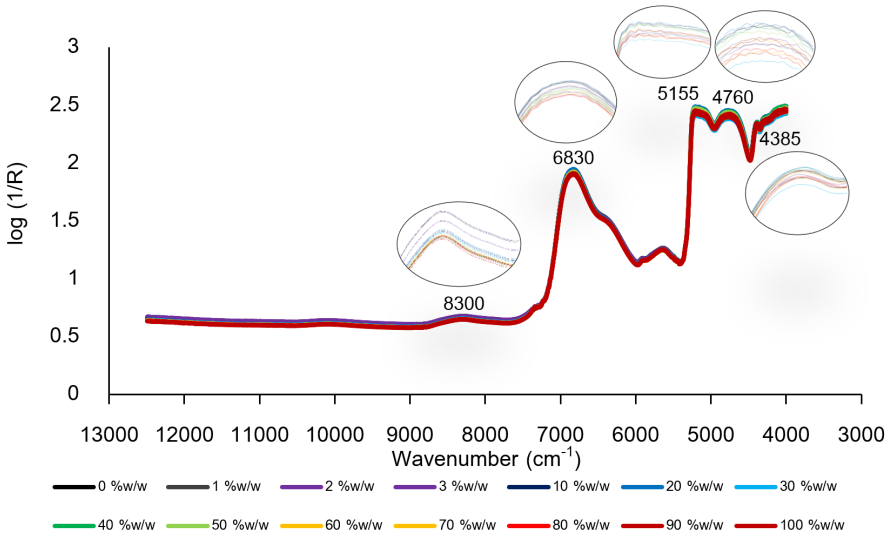



**Fig. 2** Spectrum of honey sample using FT-NIR spectrometer, at concentration levels 0, 1, 2, 3, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 and 100 %w/w.

จาก Table 3 จะเห็นได้ว่า PC-NN ให้สมรรถนะในการทำนายที่ดีที่สุด ซึ่งเทคนิคนี้เป็นการลดมิติของข้อมูลสเปกตรัมเนียร์อินฟราเรดโดยนำข้อมูลสเปกตรัมมาลดมิติด้วยเทคนิค Principal component analysis (PCA) และใช้ ค่า Principal component จำนวน 20 PC มาใช้ในการสร้างแบบจำลอง ซึ่งข้อดีทำให้การประมวลผลใช้ทรัพยากรในการคำนวณต่ำ และใช้เวลาในการประมวลผลน้อยกว่า เทคนิคนี้เคยแสดงความสำเร็จในงานวิจัยก่อนหน้ามาแล้ว เช่น การหาปริมาณของการเจือปนของน้ำผึ้งอย่างรวดเร็วด้วยวิธี visible-near infrared spectroscopy กับ chemometrics (González et al., 2018)

**Table 3** prediction results of honey adulterated by machine learning approaches

| Algorithm | Preprocessing | Optimal parameter | $R_c^2$ | $R_p^2$ | RMSECV (%w/w) | RMSEP (%w/w) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| PLS | SNV | n_components=5 | 0.98 | 0.98 | 4.01 | 4.97 |
| SVM | SNV | coef0=0.03<br>degree=5<br>gamma=0.01<br>kernel='poly' | 0.99 | 0.98 | 3.86 | 4.67 |
| ANN | Min-Max normalization | Activation= 'identity'<br>Solver= 'lbfgs'<br>hidden_layer_sizes= 500 | 0.99 | 0.98 | 3.01 | 4.69 |
| PC-NN | MSC | Activation= ' relu'<br>Solver= 'lbfgs'<br>hidden_layer_sizes= 10 | 0.99 | 0.99 | 3.68 | 3.22 |

Note: SNV คือ standard normal variate, MSC คือ multiplication scatter correction.

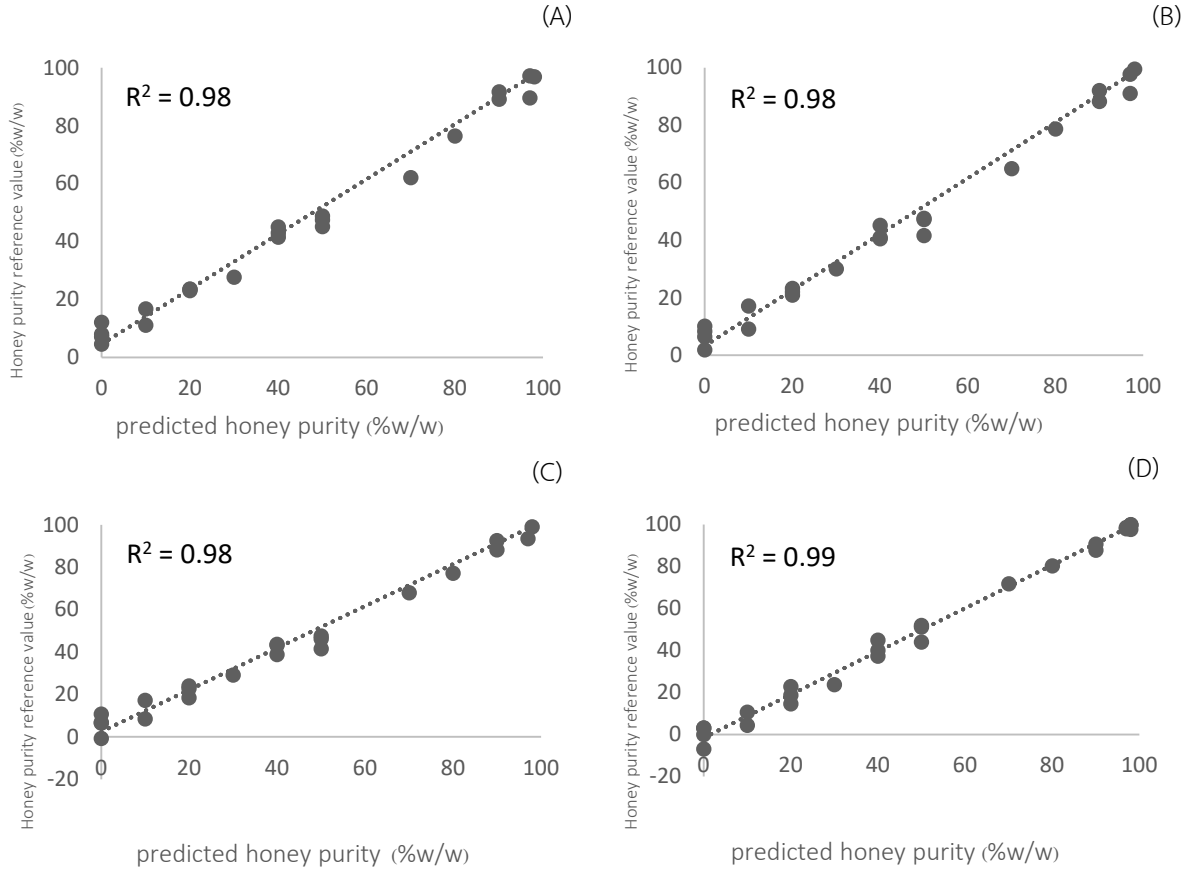



**Fig. 3** Scatter plots of predicted vs. reference honey purity by PLS (A), SVM (B), ANN (C), PC-NN (D)

**สรุป**

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการใช้กระบวนการ Pre-processing มาปรับปรุงข้อมูลสเปกตรัมการปลอมปนของน้ำผึ้งด้วยเทคนิคเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ ร่วมกับกระบวนการ machine learning ผลการศึกษาเห็นได้ว่าการใช้ Pre-processing เพื่อปรับปรุงข้อมูลทำให้การทำนายของแบบจำลองให้มีผลที่แม่นยำ ได้ผลการทำนายที่ดีที่สุดจากแบบจำลอง Principal Component neural network (PC-NN) คือ $R^2_{testing}$ = 0.99, $R^2_{testing}$ = 0.99, RMSECV = 3.68 และ RMSEP = 3.22 วิธีการ PC-NN นั่นมีข้อดีคือการลดมิติของตัวแปรจะทำให้ลดทรัพยากรที่ใช้ในการคำนวนให้น้อยลง ซึ่งจะส่งผลให้ลดระยะเวลาการทำนายค่าความบริสุทธิ์ของน้ำผึ้งให้สามารถทำนายผลแบบ Real Time ได้ นอกจากนั้นยังได้ค่า Hyperparameter ที่เหมาะสมของแต่ละแบบจำลองอีกด้วย ผลการทดลองที่ได้นี้จะช่วยให้การตรวจสอบการปลอมปนในน้ำผึ้งด้วยวิธีสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ ร่วมกับกระบวนการ machine learning ที่ผ่านการปรับปรุงข้อมูลด้วยวิธีการ Preprocessing มีความน่าเชื่อถือ และแม่นยำมากขึ้น ซึ่งส่งผลต่อความน่าเชื่อถือการค้าขายน้ำผึ้งทั้งในประเทศและต่างประเทศได้

**กิตติกรรมประกาศ**

งานวิจัยได้รับทุนอุดหนุนจากกองทุนวิจัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง หมายเลขสัญญาทุน 2565-02-01-094

**เอกสารอ้างอิง**

ปานมนัส ศิริสมบูรณ์. 2557. การวิเคราะห์องค์ประกอบหลักของน้ำผึ้งโดยใช้เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. สำนักหอสมุดกลาง.

วารุณี ธนะแพสย์, ศุมาพร เกษมสำราญ, ศิวลักษณ์ ปฐวีรัตน์. 2555 เทคโนโลยีอินฟราเรดย่านใกล้และการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร.

สมิต อินทร์ศิริพงษ์, เจนศักดิ์ เอกบูรณะวัฒน์, ขวัญใจ อินทร์ศิริพงษ์. 2549 การศึกษาเทคนิคและวิธีการทำให้น้ำตาลสดเข้มข้นเทียบเคียงน้ำผึ้ง. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, DDC: 664.1.

Chen, L., Xue, X., Ye, Z., Zhou, J., Chen, F., Zhao, J. 2011. Determination of Chinese honey adulterated with high fructose corn syrup by near infrared spectroscopy. Food Chem. 128: 1110–1114.

Gahm, C., Uzunoglu, A., Wahl, S., Ganschinietz, C., Tuma, A. 2022. Applying machine learning for the anticipation of complex nesting solutions in hierarchical production planning. Eur. J. Oper. Res. 296: 819–836.

González, M.F., Bellido, E.E., Cueto, L.G., Palma, M., Barroso, C.G., Barbero, G.F. 2018. Rapid quantification of honey adulteration by visible-near infrared spectroscopy combined with chemometrics. Talanta. 188: 288–292.

Kaufmann, K.C., Sampaio, K.A., García-Martín, J.F., Barbin, D.F. 2022. Identification of coriander oil adulteration using a portable NIR spectrometer. Food Control. 132. 108536.

Naila, A., Flint, S.H., Sulaiman, A.Z., Ajit, A., Weeds, Z. 2018. Classical and novel approaches to the analysis of honey and detection of adulterants. Food Control. 90: 152–165.

Raypah, M.E., Zhi, L.J., Loon, L.Z., Omar, A.F. 2022. Near-infrared spectroscopy with chemometrics for identification and quantification of adulteration in high-quality stingless bee honey. Chemom. Intell. Lab. Syst. 224: 104540. doi.org/10.1016/j.chemolab.2022.104540

Song, X., She, S., Xin, M., Chen, L., Li, Y., Heyden, Y.V., Rogers, K.M., Chen, L. 2020. Detection of Adulteration in Chinese monofloral honey using 1H nuclear magnetic resonance and chemometrics. J. Food Compos. Anal. 86: 103390.

Wu, T., Chen, H., Lin, Z. 2016. Identification and quantitation of melamine in milk by near-infrared spectroscopy and chemometrics. Int. J. Spectrosc. 2016: 6184987. doi.org/10.1155/2016/6184987

Xu, J., Liu, X., Cao, Y. 2020. A comprehensive analysis of 13C isotope ratios data of authentic honey types produced in China using the EA-IRMS and LC-IRMS. J. Food Sci. Technol. 57: 1216–1232.

Zhu, M.Z., Wen, B., Wu, H., et al. 2019. The quality control of tea by near-infrared reflectance (NIR) spectroscopy and chemometrics. Int. J. Spectrosc. Vol. 2019: 8129648 doi.org/10.1155/2019/8129648

# คอมพิวเตอร์วิทัศน์สำหรับระบุต้นทุเรียนด้วยอัลกอริทึม YOLO

## Computer vision for Identification of Durian Tree with YOLO Algorithm

**บุณยกร อุดมสิน, ธีรภัทร์ แพงวาปี, ณัฐชนน ฤาชา, รวิภัทร ลาภเจริญสุข***

Boonyakorn Udomsin, Theerapat Pangwapee, Nutchanon Luecha, Ravipat Lapcharoensuk*

ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

Department of Agricultural Engineering, School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: ravipat.la@kmitl.ac.th

**บทคัดย่อ**

โครงงานนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้คอมพิวเตอร์วิทัศน์สำหรับระบุต้นทุเรียนด้วยอัลกอริทึม YOLOv8 แบบจำลองใช้เพื่อจำแนกต้นทุเรียนและสิ่งที่ไม่ใช่ต้นทุเรียน ข้อมูลรูปภาพต้นทุเรียนและสิ่งที่ไม่ใช่ต้นทุเรียน จำนวน 18,000 รูป โดยแบ่งเป็นรูปต้นทุเรียน 10,000 รูปและไม่ใช่ต้นทุเรียน 8,000 รูป ถูกดำเนินการ Preprocessing และ Augmentation เพื่อปรับปรุงคุณภาพและเพิ่มรูปภาพเป็น 54,000 รูป ข้อมูลแบ่งออกเป็นชุดสร้างแบบจำลอง 45,000 รูป และชุดทดสอบแบบจำลอง 9,000 รูป แบบจำลองด้วยอัลกอริทึม YOLOv8 แสดงสมรรถนะของชุดทดสอบแบบจำลองคือ Precision = 0.94985, Recall = 0.96083 ผลการทำนายรูปภาพที่ถ่ายมาใหม่จำนวน 100 รูปแสดง Precision = 0.8665, Recall = 0.953 จากผลการทดลองสามารถเป็นแนวทางในจำแนกต้นทุเรียนกับต้นไม้ชนิดอื่นด้วยเทคนิคคอมพิวเตอร์วิทัศน์ผ่านอัลกอริทึม YOLOv8 ได้

**คำสำคัญ**: การระบุวัตถุ, คอมพิวเตอร์วิทัศน์, ต้นทุเรียน, อัลกอริทึม YOLOv8

**Abstract**

This project aims to use computer vision to identify durian trees using YOLOv8 algorithm. The model purposed to classify durian and non-durian trees. About 18,000 images of durian and non-durian trees divided into durian trees of 10,000 images and non-durian trees of 8,000 images, were performed by preprocessing and augmentation techniques for quality enhancement and increasing the data to 54,000 images. The data was split into a training set of 45,000 images and a Validation set of 9,000 images. The YOLOv8 algorithm presented the Precision = 0.94985 and Recall = 0.96083 for Validation set. Prediction results for the unknow images were Precision = 0.8665 and Recall = 0.953. The results cloud be the guideline for classifying durian trees and non-durian trees by computer vision based on YOLOv8 algorithm.

**Keywords**: Algorithm YOLOv8, Computer Vision, Durian tree, Identification

**คำนำ**

ในปัจจุบันประเทศไทยมีการส่งออกทุเรียนเป็นจำนวนมาก ซึ่งเป็นผลผลิตทางการเกษตรที่มีอัตราการเติบโตสูงและมีส่วนแบ่งทางการตลาดทั่วโลกอยู่ที่ร้อยละ 76 (ธนาคารแห่งประเทศไทย, 2565) และมีมูลค่าของผลผลิตที่เกษตกรขายได้ 44,235 ล้านบาท (สำนักวิจัยพัฒนาการอารักขาพืช, 2562) ส่งผลให้มีการขยายตัวของพื้นที่เพาะปลูกแปลงทุเรียนมากขึ้น และต้องการดูแลต้นทุเรียนให้เหมาะสมทั้งการให้ปุ๋ย การพ่นยา การเตรียมต้น การจัดการศัตรูพืชโรค และแมลงต่าง ๆ (กรมวิชาการเกษตร, 2563) ซึ่งการพ่นยาเป็นหนึ่งในวิธีที่สำคัญสำหรับการดูแลต้นทุเรียนโดยในปัจจุบันประเทศไทยได้มีการใช้เครื่องมือที่ช่วยในการฉีดพ่นสารเคมีเพื่อลดการใช้แรงงานคนและลดการใช้สารเคมี โดยปัญหาภายในสวนทุเรียนคือยังมีการฉีดพ่นสารเคมีในบริเวณที่ไม่ใช่ต้นทุเรียนทำให้มีต้นทุนในการผลิตมากขึ้นและการระบุจำนวนต้นทุเรียนที่เป็นโรคภายในสวนที่ถูกต้องแม่นยำ โดยในปัจจุบันภาคการเกษตรมีการดูแลผลผลิตโดยใช้เครื่องพ่นสารเคมีเพื่อการลดระยะเวลาการทำงานและเพิ่มความปลอดภัยในการทำงานมีการพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง โดยจากงานวิจัยที่ผ่านมาทั้งการควบคุมเครื่องพ่นสารเคมีหรือการตรวจจับต้นไม้ที่สามารถทำได้หลายวิธีและนำมาประยุกต์ใช้ในการตรวจจับต้นทุเรียนได้ เช่น การใช้การจำแนกรูปทำงานควบคู่กับการใช้ LiDAR เพื่อควบคุมการพ่นสารเคมี (Partel et al., 2021) และการใช้ Deep Learning เพื่อตรวจจับต้นปาล์ม (Li et al., 2017) วิธีการเหล่านี้ด้วยเทคนิคต่าง ๆ มีความแม่นยำและเชื่อถือได้สูง ที่สามารถระบุต้นไม้ต่าง ๆ ได้ แต่อย่างไรก็ตามเทคนิคเหล่านี้เป็นเทคนิคที่มีการใช้ต้นทุนสูงในการตรวจสอบ

ในปัจจุบันคอมพิวเตอร์วิทัศน์ (Computer Vision, CV) เป็นเทคโนโลยีที่เครื่องใช้ในการรับรู้ภาพโดยอัตโนมัติและอธิบายภาพได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพ และระบบคอมพิวเตอร์สามารถเข้าถึงแหล่งที่มาของข้อมูลรูปภาพและวิดีโอที่ โดยคอมพิวเตอร์วิทัศน์มีการใช้ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) และการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) เพื่อประมวลผลข้อมูลอย่างแม่นยำสำหรับการระบุวัตถุ ตลอดจนการจำแนกประเภท การตรวจสอบและการตรวจจับซึ่งกระบวนการเหล่านี้ถูกนำมาใช้ในการเกษตรเพื่อเพิ่มความสะดวกในภาคการเกษตรและช่วยแก้ปัญหาต่าง ๆ เช่น การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ, การตรวจหาโรคพืช, การคาดการณ์ผลผลิตของพืชผล, การตรวจจับแมลง และในด้านอุตสาหกรรมการเกษตรพบว่ามีการใช้ปัญญาประดิษฐ์มากขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งรวมถึงการใช้คอมพิวเตอร์วิทัศน์สำหรับการตรวจสอบพืชผลและผลผลิตและการตรวจจับข้อบกพร่องของผลิตภัณฑ์ ด้วยอุปกรณ์ทางกลที่เหมาะสมและเทคโนโลยีนี้สามารถช่วยประหยัดเวลาได้ คอมพิวเตอร์วิทัศน์เป็นวิธีการที่น่าสนใจสำหรับการระบุต้นทุเรียนได้เป็นอย่างดี ตัวอย่างเช่น คอมพิวเตอร์วิทัศน์แบบตามเวลาจริงสำหรับการตรวจจับและติดตามลำต้นของต้นไม้ (Well and Chung, 2023 ), การตรวจจับต้นไม้บนถนนผ่านการเรียนรู้เชิงลึก (Xie et al., 2019)

การเรียนรู้เชิงลึก หรือ Deep Learning คือวิธีการเรียนรู้เลียนแบบการทำงานของโครงข่ายประสาทของมนุษย์โดยนำระบบโครงข่ายประสาท (Neural Network) มาซ้อนกันหลายชั้น ซึ่งได้มีการประยุกต์ใช้งานในปัจจุบันโดยได้มีการนำมาใช้กับผลไม้หลากหลายชนิด ซึ่งทุเรียนเป็นหนึ่งในผลไม้ที่ได้มีการนำเทคนิคการเรียนรู้เชิงลึกมาใช้งานเพื่อวัตถุประสงค์ต่าง ๆ เช่น การใช้เทคนิคการเรียนรู้เชิงลึกเพื่อแยกประเภทที่สามารถแยกแยะความแตกต่างระหว่างพันธุ์ทุเรียนประเภทต่าง ๆ ซึ่งมีการใช้ภาพทั้งหมด 800 ภาพ โดยมีค่า Accuracy ของ training set = 82.50% (Lim and Chuah, 2018), การจำแนกพันธุ์ทุเรียนด้วยวิธีการเรียนรู้เชิงลึกอัลกอริธึมโดยเปรียบเทียบ Machine learning ที่แม่นยำกับอัลกอริธึมการเรียนรู้เชิงลึก Convolutional Neural Networks ที่สามารถแยกคุณสมบัติต่างๆ ได้โดยอัตโนมัติ เพื่อกำหนดอัลกอริทึมที่เหมาะสมสำหรับระบบการจำแนกทุเรียน โดยมีค่า Accuracy ของ อัลกอริทึม CNN = 98.96% (Teo et al., 2024), การจำแนกประเภทต้นทุเรียนตามใบทุเรียน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแอปพลิเคชัน Android สำหรับ

การระบุประเภทต้นทุเรียนโดยมีค่า Accuracy ของ training set = 86.00%, validation = 77.78% และ testing set = 66.67% (Halim et al., 2023)

ปัจจุบันยังได้มีการนำอัลกอริทึมหลายชนิดเพื่อมาช่วยในการทำงาน และหนึ่งในที่นิยมคือ อัลกอริทึม YOLO หรือ You Only Look Once ซึ่งที่มีความโดดเด่นเรื่องความเร็วและความถูกต้อง และความโดดเด่นของ YOLO คือ สามารถ detect แม้กระทั่งวัตถุที่มันซ้อนกันได้ด้วย โดยมีโครงสร้างที่ค่อนข้างซับซ้อนของ grid ในแต่ละชั้นที่เล็กลงเรื่อย ๆ ในแต่ละ Layers มีการใช้งานอย่างแพร่หลายโดยมีการทำงานจากการส่งภาพวัตถุเข้าไปในวิธีการเรียนรู้เพียงครั้งเดียว โดยใช้หลักการเรียนรู้เชิงลึกอย่างโครงข่ายประสาทแบบคอนโวลูชัน CNN ที่ช่วยทำให้ YOLO มีความแม่นยำในเกณฑ์ที่ดีมาก ซึ่ง YOLO ได้รับความนิยมในงานการมองเห็นของเครื่อง (Computer vision) เป็นอย่างมากโดยในปัจจุบันได้มีการพัฒนาจนมา YOLO version ที่ 8 ซึ่งความแม่นยำและความเร็วสูงที่เหนือชั้นของ YOLOv8 ทำให้โมเดลคอมพิวเตอร์วิทัศน์โดดเด่นจากเวอร์ชันก่อนหน้า ถือเป็นความสำเร็จครั้งสำคัญเนื่องจากสามารถตรวจจับวัตถุได้แบบเรียลไทม์โดยไม่มีความล่าช้า ไม่เหมือนในเวอร์ชันก่อน ๆ และยังมีการนำมาใช้ในงานวิจัยด้านการเกษตรต่าง ๆ เช่น ระบบตรวจจับสัตว์รบกวนที่ใช้ YOLO เพื่อการเกษตรแม่นยำ (Lippi et al., 2021), การตรวจจับต้นไม้อัตโนมัติจากภาพสามมิติที่สร้างขึ้นใหม่จาก 360° Spherical Camera โดยใช้ YOLO v2 (Itakura and Hosoi, 2020) และอัลกอริธึมการตรวจจับผลไม้เชอร์รี่โดยใช้ YOLO-v4 (Gai et al., 2021) เป็นต้น

ดังนั้นเป้าหมายของโครงการนี้จึงมุ่งเน้นการพัฒนาแบบจำลองเพื่อระบุต้นทุเรียนโดยใช้คอมพิวเตอร์วิทัศน์สำหรับระบุต้นทุเรียนด้วยอัลกอริทึม YOLOv8 ซึ่งจะเป็นแนวทางในการตรวจสอบต้นทุเรียนจากภาพให้สามารถคัดแยกต้นทุเรียนออกจากพันธุ์ไม้อื่น ๆ หรือวัตถุต่าง ๆ ที่ไม่ใช่ต้นทุเรียนเพื่อที่จะทำการตรวจสอบจำนวนต้นทุเรียนที่ถูกต้องภายในสวนทุเรียนสำหรับวางแผนการใช้สารเคมีเพื่อลดต้นทุนการผลิตและการดูแลสวนทุเรียนได้

## อุปกรณ์และวิธีการ

*ข้อมูลภาพต้นทุเรียน*

เก็บรวบรวมข้อมูลจากนสวนของเกษตรกรในจังหวัดระยอง จำนวน 18 ราย โดยต้นทุเรียนมีอายุตั้งแต่ 4-8 ปี ขึ้นไป และมีความสูงเฉลี่ย 6 เมตร โดยเก็บทั้งรูปภาพและสื่อเคลื่อนไหวของต้นทุเรียนและสิ่งแวดล้อมรอบ ๆ โดยใช้กล้องดิจิทัล (Fujifilm X-T10, Fujifilm, Japan) และได้รวบรวมจากสื่อออนไลน์ต่าง ๆ โดยจำนวนข้อมูลที่เก็บมาได้จากเป็นรูปภาพจำนวน 24,929 รูป และสื่อเคลื่อนไหวความยาวรวม 9 ชั่วโมง 46 นาที 33 วินาที และนำสื่อเคลื่อนไหวมาแยกแต่ละเฟรมให้เป็นรูปภาพ รวมรูปภาพที่ได้ทั้งหมดจำนวน 164,927 รูป ซึ่งได้ผลจากเก็บข้อมูลดัง Fig. 1

(A) (B)



**Fig. 1** Images of durian trees (A) and non-durian (B)

*การเตรียมข้อมูลรูปภาพ*

การเตรียมข้อมูลรูปภาพของต้นทุเรียนเพื่อนำมาสร้างแบบจำลองโดยเตรียม Dataset และสุ่มเลือกรูปมา 18,000 รูป ทำการ Label หรือ กำกับรูปภาพ โดยแบ่งเป็นรูปต้นทุเรียน 10,000 รูป ไม่ใช่ต้นทุเรียน 8,000 รูป และแบ่งกลุ่มที่ Label ออกเป็น 2 กลุ่ม คือ “Durian”, “Non_Durian” ดัง Fig. 2

การทำ Preprocessing และ Augmentation ทำได้โดยการนำรูปที่ Label เสร็จแล้วมาทำการ Resize (Image Compression) เป็นขนาด 640×640 และทำการ Flip รูปในลักษณะด้านแนวนอน ทำการ Crop รูปที่ขนาด 0–38% ของรูปเดิมและทำการ Rotation ระหว่าง -17º และ +17º โดยอาศัย Roboflow จากกระบวนการดังกล่าวทั้งหมดจะทำให้ได้รูปเพิ่มขึ้น 3 เท่าจากจำนวนเดิมและรูปทั้งหมดที่ผ่านกระบวนการมาได้ทั้งสิ้น 54,000 รูป ดัง Fig. 3

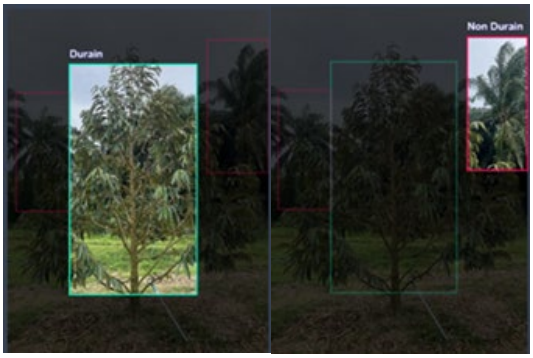



**Fig. 2** Labeling of collected images is separated into “Durian” and “Non_Durian” to be used in deep learning



**Fig. 3** Preprocessing and Augmentation using the Roboflow platform

*การสร้างแบบจำลองโดยใช้ YOLOv8*

การสร้างแบบจำลองด้วยอัลกอริทึม YOLOv8 จะประกอบด้วย Backbone, Neck และ Head แสดงใน Fig. 4

*1. Backbone*

YOLOv8 ใช้ CSPDarknet53 ที่แก้ไขแล้วเป็นเครือข่ายหลักและจะรับค่าคุณลักษณะต่างๆ ซึ่งจะถูกสุ่มตัวอย่าง 5 ครั้งเพื่อให้ได้คุณลักษณะที่แตกต่างกัน 5 แบบ ว่าเป็น B1–B5 ดังใน Fig. 4A โดยโมดูล Cross Stage Partial (CSP) ในเครือข่ายแกนหลักเดิมถูกแทนที่ด้วยโมดูล C2f ดังที่แสดงใน Fig. 4F โดยโมดูล C2f ใช้การเชื่อมต่อแบบไล่ระดับเพื่อเพิ่มการไหลของข้อมูลของเครือข่ายการแยกคุณสมบัติโดยยังคงรักษาน้ำหนักที่เบาไว้โมดูล CBS ดำเนินการหมุนวนกับข้อมูลที่รับค่าตามมาโดยการทำให้เป็นแบบแบตช์ และสุดท้ายจะเปิดใช้งานสตรีมข้อมูลโดยใช้ SiLU เพื่อรับผลลัพธ์ที่ได้ดังแสดงใน Fig. 4G และเครือข่ายหลักก็ใช้ spatial pyramid pooling fast (SPPF) เพื่อรวมคุณลักษณะที่รับเข้ากับแมปขนาดคงที่นำค่าออกที่ขนาดสามารถปรับได้ เมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างของ spatial pyramid pooling (SPP), SPPF ช่วยลด

ความพยายามในการคำนวณและมีเวลาแฝงที่ต่ำกว่าโดยการเชื่อมต่อตามลำดับการรวมชั้นสูงสุด 3 ชั้น ดังแสดงใน Fig. 4D (Wang et al., 2023)

*2. Neck*

YOLOv8 ได้รับแนวคิดจาก PANet และมีการออกแบบโครงสร้าง PAN-FPN ดังที่แสดงใน Fig.4B โดยเมื่อเทียบกับโครงสร้าง Neck ของ YOLOv5 และ YOLOv7 จะเห็นได้ว่า YOLOv8 จะมีการลบ Convolution หลังจากการสุ่มตัวอย่างในโครงสร้าง PAN ที่คงไว้ซึ่งประสิทธิภาพดั้งเดิมในขณะที่ได้ยังได้น้ำหนักเบา เราใช้ P4-P5 และ N4-N5 เพื่อแสดงถึงคุณสมบัติที่แตกต่างกัน 2 ระดับในโครงสร้าง PAN และ FPN ตามลำดับและ FPN แบบทั่วไปใช้วิธีการจากบนลงล่างเพื่อถ่ายทอดข้อมูลความหมายเชิงลึก FPN ช่วยเพิ่มข้อมูลความหมายของโดยการรวม B4-P4 และ B3-P3 แต่ข้อมูลการแปลวัตถุบางส่วนจะหายไป ถึงแก้ปัญหานี้ด้วย PAN-FPN โดยการเพิ่ม PAN ให้กับ FPN PAN เพื่อช่วยเพิ่มการเรียนรู้เกี่ยวกับสถานที่ข้อมูลโดยการรวม P4-N4 และ P5-N5 เพื่อรับรู้ถึงการปรับปรุงเส้นทางในรูปแบบจากบนลงล่างPAN-FPN โดยการสร้างโครงสร้างเครือข่ายจากบนลงล่างและจากล่างขึ้นบน ซึ่งตระหนักถึงการเสริมข้อมูลตำแหน่งตื้นและข้อมูลความหมายเชิงลึกผ่านการผสมผสานคุณสมบัติทำให้เกิดความหลากหลายและความสมบูรณ์ (Wang et al., 2023)

*3. Head*

ส่วนการตรวจจับของ YOLOv8 ใช้โครงสร้างส่วน Head ที่แยกออกจากกันดังแสดงใน Fig. 4E โครงสร้าง Head แยกส่วนใช้ 2 สาขาแยกกันสำหรับการจำแนกวัตถุและทำนายการถดถอยของขอบเขตกรอบ และใช้ Different Loss Functions สำหรับงานทั้ง 2 ประเภท โดยสำหรับงานการจำแนกประเภท จะใช้ Binary Cross-Entropy Loss (BCE Loss) สำหรับงานการถดถอยขอบเขตกล่องที่คาดการณ์ไว้ โดยสำหรับการ Distribution Focal Loss (DFL) และ CIOU มีการรับงานโครงสร้างการตรวจจับนี้สามารถปรับปรุงความแม่นยำในการตรวจจับและเร่งความเร็วได้การบรรจบกันของโมเดล YOLOv8 เป็นโมเดลการตรวจจับแบบไม่มีจุดยึดที่ระบุอย่างกระชับตัวอย่างเชิงบวกและเชิงลบ (Wang et al., 2023)

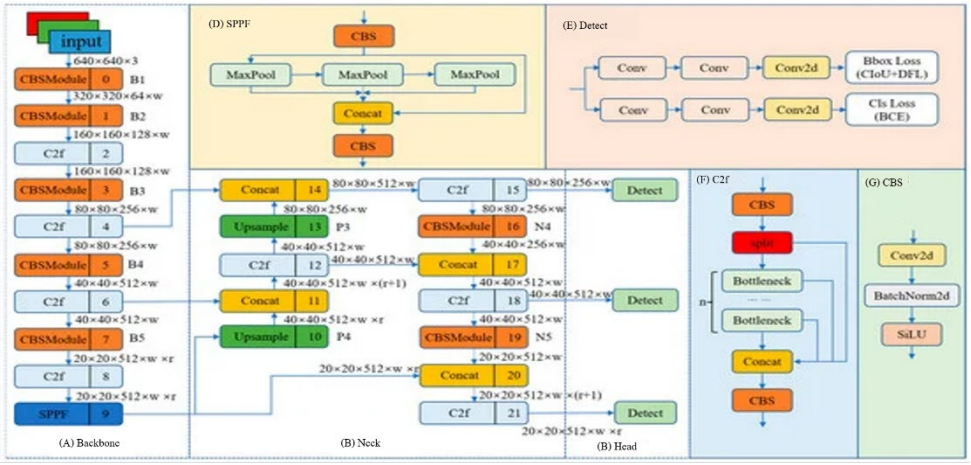



**Fig. 4** The network structure of YOLOv8. Parameters are used to represent the size of the feature map. The size of the model can be controlled by setting the values of w and r to meet the needs of different application scenarios. (Wang et al., 2023)

โดยจากรูปที่เตรียมมาแล้วจำนวน 54,000 รูป จะทำการแบ่งข้อมูลออกเป็นชุดสร้างแบบจำลอง (Training et) 45,000 รูป และ ชุดทดสอบแบบจำลอง (Validation set) 9,000 รูป โดยใช้อัลกอริทึม YOLOv8 การสร้างแบบจำลองใช้การเขียนโปรแกรมด้วยภาษา Python 3.9.12 ผ่านแพลตฟอร์ม google colab จากนั้นแบบจำลองที่ถูกสร้างขึ้นถูกนำมาทดสอบสมรรถนะด้วยชุดทดสอบแบบจำลอง (Validation set) และรายงานผลด้วยค่า Precision และ Recall เพื่อ

พิจารณาความสามารถในการแยกต้นทุเรียนออกจากสิ่งที่ไม่ใช่ทุเรียนโดยค่า Precision จะแสดงถึงในผลการทำนายที่เป็นต้นทุเรียนทั้งหมดแบบจำลองทำนายว่าเป็นต้นทุเรียนได้อย่างถูกต้องมากน้อยแค่ไหนและค่า Recall จะแสดงถึงในผลการทำนายที่ทั้งถูกและผิดแบบจำลองทำนายว่าเป็นต้นทุเรียนได้อย่างถูกต้องมากน้อยแค่ไหน

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP+FP} \quad (1)$$

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP+FN} \quad (2)$$

เมื่อ True Positive (TP) คือ สิ่งที่ทำนายตรงกับสิ่งที่เกิดขึ้น กรณีทำนายว่าจริงและสิ่งที่เกิดขึ้นเป็นจริง; False Positive (FP) คือ สิ่งที่ทำนายไม่ตรงกับสิ่งที่เกิดขึ้น กรณีทำนายว่าจริงแต่สิ่งที่เกิดขึ้นไม่จริง และ False Negative (FN) คือ สิ่งที่ทำนายไม่ตรงกับสิ่งที่เกิดขึ้นจริง กรณีทำนายว่าไม่จริงแต่สิ่งที่เกิดขึ้นจริง

**ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง**

ข้อมูลรูปภาพในผลการทดลองเป็นข้อมูลชุดเดียวกันกับข้อมูลรูปภาพในขั้นตอนการทดลอง โดยผลการทดลองมีค่าการลดลงของ Loss ใน Learning Curve จากการทำแบบจำลองจาก Training Set และ Validation Set ประกอบด้วย Box, Class, dfl (Distribution Focal Loss) โดยค่า Learning Curve ของ Box จะแสดงถึงความถูกต้องของการระบุกรอบของวัตถุ ค่า Learning Curve ของ Class จะแสดงถึงความถูกต้องในการจำแนกของวัตถุ และ Learning Curve ของ dfl โดยจะให้ความสำคัญ Class ที่มีจำนวนตัวอย่างน้อยให้ Prediction ที่มั่นใจมาก หรือให้มีน้ำหนักน้อยลง เทียบกับสัดส่วน Loss ซึ่งจากผลการทำแบบจำลองโดยยิ่งค่า Loss ของแบบจำลองมีค่าน้อยลงแสดงว่าแบบจำลองมีการเรียนรู้ที่ดีและลักษณะเส้นของกราฟสามารถบอกถึงการ Underfitting โดยบ่งบอกว่าแบบจำลองไม่สามารถเรียนรู้ได้จาก Training Dataset หรือการ Overfitting จะบ่งบอกว่าแบบจำลองมีการเรียนรู้ที่ดีเกินไปจาก Training Dataset แต่ไม่สามารถนำไปใช้กับข้อมูลชุดอื่นได้ โดยกราฟ Learning Curve ของโมเดลทั้ง Box, Class, และ dfl ไม่เกิดการ Overfitting หรือ Underfitting เมื่อเปรียบเทียบกับค่าของ Train และ Validation โดยมีแนวโน้มค่าความผิดพลาดลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงต้น และหลังจากนั้นเริ่มลดลงช้าลง พบว่าจุด Elbow point ของ Learning curve สำหรับ Box, Class, และ dfl อยู่ที่ Epochs ที่ 3 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถเรียนรู้และทำนายได้อย่างถูกต้องทั้งในชุดข้อมูลที่เคยเจอและชุดข้อมูลที่ไม่เคยเจอ ดังที่แสดงใน Fig. 5, Fig. 6 และ Fig. 7

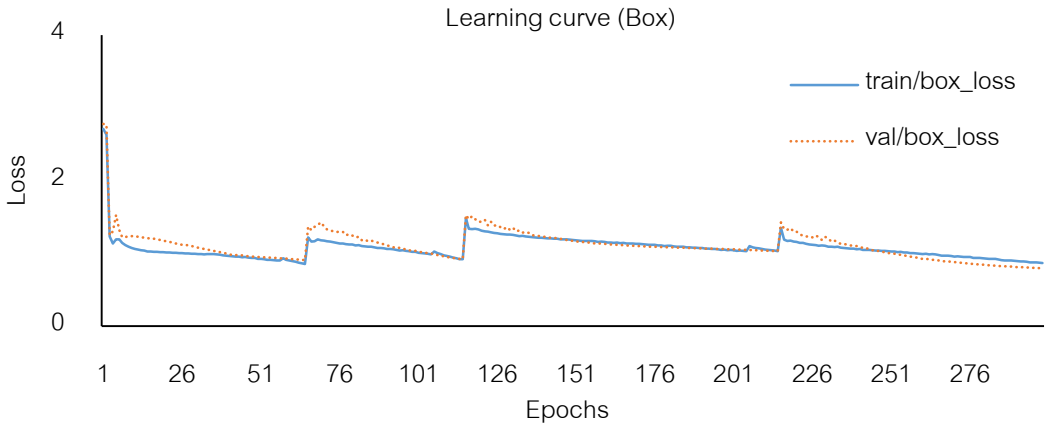



**Fig. 5** Graph of decreasing learning curve value of box in training set and validation set

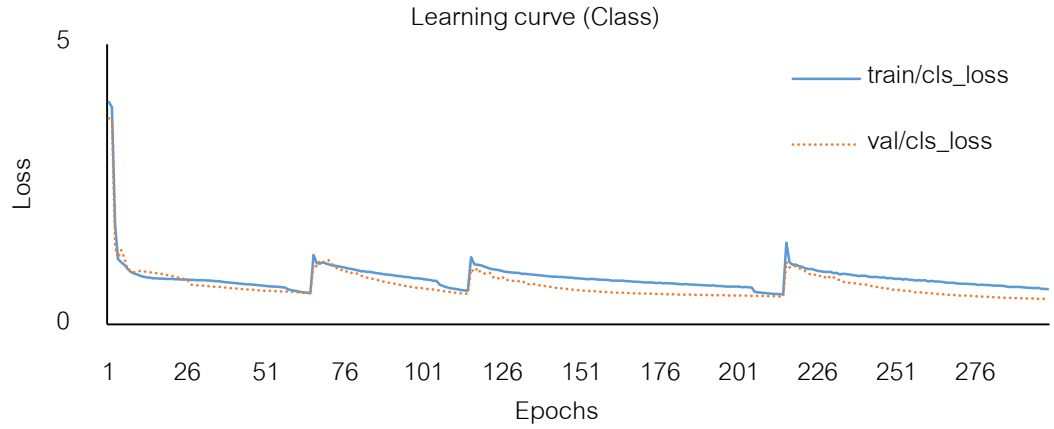



**Fig. 6** Graph of decreasing Learning Curve value of Class in Training set and Validation set

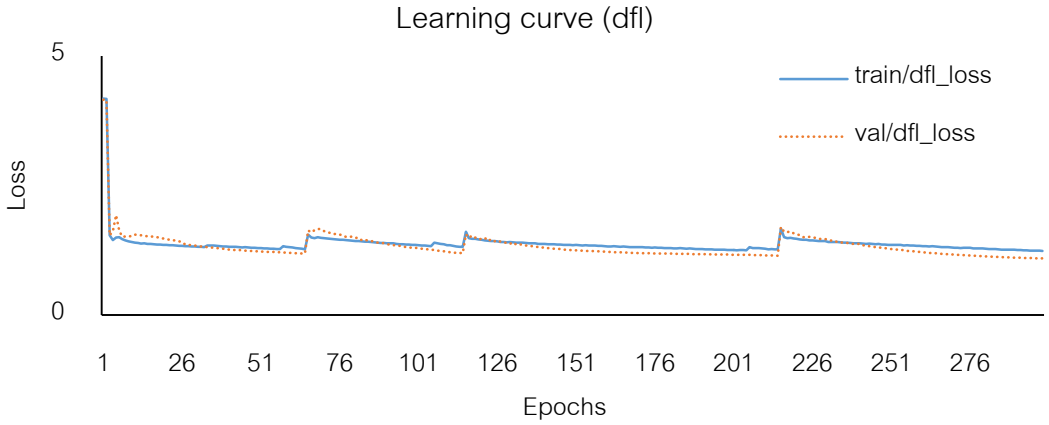



**Fig. 7** Graph of decreasing Learning Curve value of Distribution Focal Loss in Training set and Validation set

ค่าสมรรถนะของแบบจำลองโดยใช้ข้อมูลที่เก็บรวบรวมมาโดยจะทดสอบแบ่งออกเป็นชุด Validation set มีค่า Precision = 0.94985, Recall = 0.96083 และ Unknow Set จะเป็นข้อมูลที่ไม่ได้อยู่ในชุดข้อมูล Training Set จำนวน 100 รูป มีค่า Precision = 0.8665, Recall = 0.953 โดยจะทดสอบเป็นค่า Precision และ Recall ซึ่งจากการทดสอบแบบจำลองของทั้ง Validation set และ Unknow Set มีสมรรถนะที่ค่อนข้างสูงและสามารถระบุต้นทุเรียนแยกออกจากวัตถุอื่น ๆ ได้ดี ดังที่แสดงใน Table 1 โดยหากเปรียบเทียบกับการใช้อัลกอริทึมการเรียนรู้เชิงลึก YOLOv4 สำหรับการตรวจจับดอกแอปเปิ้ลในสภาพแวดล้อมทางธรรมชาติแบบเรียลไทม์และแม่นยำ (Wu et al., 2020) มีค่าสมรรถนะ Precision = 0.8943, Recall = 0.9815 จะเห็นได้ว่าในการใช้อัลกอริทึม YOLO มีสมรรถนะที่สูงและตรวจจับวัตถุได้แม่นยำและรวดเร็วและในการเปรียบเทียบกับการตรวจจับและติดตามลำต้นของต้นไม้ไม้โดยใช้อัลกอริทึม state-of-the-art neural network-based detection (SOTA DNNs) (Wells and Chung, 2023) โดยมีค่า Average Precision = 0.87 จะเห็นได้ว่าแบบจำลองสามารถตรวจจับต้นไม้ได้อย่างถูกต้องและแม่นยำแต่งานวิจัยจะไม่สามารถระบุแยกพันธุ์ไม้ต่าง ๆ ได้ อีกทั้งยังพบว่ามีปัญหาในการปรับขนาดของ Bounding Box ในระหว่างการตรวจจับและมีการลดความละเอียดขณะ

ตรวจจับเพื่อเพิ่มความรวดเร็วในการตรวจจับ โดยในงานวิจัยนี้ไม่พบปัญหาเหล่านี้แต่หากต้องการเพิ่มสมรรถนะของแบบจำลองอาจจะทำได้โดยการใช้อัลกอริทึมการเรียนรู้เชิงลึกตัวอื่น ๆ

**Table 1** The Performance of the model for Identification between non-durian and durian

| Type of data | Precision | Recall |
|---|---|---|
| Validation set | 0.94985 | 0.96083 |
| Unknow set | 0.86650 | 0.95300 |

## สรุป

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการระบุต้นทุเรียนด้วยอัลกอริทึม YOLOv8 ในการแยกต้นทุเรียนออกจากสิ่งที่ไม่ใช่ต้นทุเรียนโดยการใช้คอมพิวเตอร์วิทัศน์ และสร้างแบบจำลองด้วยเทคนิคการเรียนรู้เชิงลึก จากการทดลองใช้งานพบว่าแบบจำลองสามารถตรวจจับและแยกต้นทุเรียนได้โดยมีค่าสมรรถนะของ Validation set คือ Precision = 0.94985, Recall = 0.96083 และค่าสมรรถนะของ Unknow set คือ Precision = 0.86650, Recall = 0.95300 โดยอัลกอริทึม YOLO มีข้อดีคือความเร็วในการตรวจจับวัตถุซึ่งก็คือ ต้นทุเรียนออกจากสิ่งที่ไม่ใช่ต้นทุเรียน ซึ่งสามารถใช้เป็นแนวทางในการระบุต้นทุเรียนเพื่อใช้ในการวางแผนการใช้สารเคมีหรือการนับจำนวนต้นทุเรียนภายในสวนเพื่อดูแลสวนได้

## กิตติกรรมประกาศ

ได้รับทุนอุดหนุนจากกองทุนวิจัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง [2566-02-01-053]

## เอกสารอ้างอิง

กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2563. การจัดการการผลิตทุเรียน. https://www.doa.go.th/hort/wp-content/uploads/2020/01/การผลิตทุเรียน.pdf. 1 ธันวาคม 2566

ธนาคารแห่งประเทศไทย. 2565. ผลไม้ไทยสุดฮอตรุกตลาดโลกฝ่าโควิด-19. https://www.bot.or.th/content/dam/bot/documents/th/research-and-publications/articles-and-publications/articles/pdf/Article_25May2022.pdf. 1 ธันวาคม 2566

สำนักวิจัยพัฒนาการอารักขาพืช กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2562. แมลง-ไร ศัตรูทุเรียน. สำนักวิจัยพัฒนาการอารักขาพืช กรมวิชาการเกษตร. กรุงเทพมหานคร

Gai, R., Chen, N., Yuan, H.A. 2021. Detection algorithm for cherry fruits based on the improved YOLO-v4 model. Neural Comput. Appl. 35: 13895–13906. doi.org/10.1007/s00521-021-06029-z Itakura and Hosoi, 2020

Halim, N.A.H.A., Suhaila, S., Taujuddin, N.S.A.M. Hazli, R. 2023. Durian Tree type identification based on durian leaves. J. Electrical Electron. Eng. Res. doi.org/10.30880/eeee.2023.04.01.066

Itakura, K., Hosoi, F. 2020. Automatic tree detection from three-dimensional images reconstructed from 360° Spherical Camera Using YOLOv2. Remote Sens. 12: 988. doi.org/10.3390/rs12060988

Partel, V., Costa, L., Ampatzidis, Y. 2021. Smart tree crop sprayer utilizing sensor fusion and artificial intelligence. Comput. Electron. Agr. 2021. doi.org/10.1016/j.compag.2021.106556

Li, W., Fu, H., Yu, L., Cracknell. 2017. Deep learning based oil palm tree detection and counting for high-resolution remote sensing images. Remote Sens. 9: 22. doi.org/10.3390/rs9010022

Lim, M.G., Chuah, J.H. 2018. Durian types recognition using deep learning techniques. In 2018 9th IEEE Control and System Graduate Research Colloquium (ICSGRC) 3–4 August 2018, Shah Alam, Malaysia. doi:10.1109/ICSGRC.2018.8657535

Lippi, M., Bonucci, N., Carpio, R.F., Contarini, M., Speranza, S., Gasparri, A. 2021. A yolo-based pest detection system for precision agriculture. In: 29th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED), 22–25 June 2021, Puglia, Italy. doi: 10.1109/MED51440.2021.9480344

Teo, C.B., Ting, Y.H., Atanda, A.F. 2024. Durian Species Classification Using Deep Learning Method. Green Intelligent Systems and Applications 4: 1–10. doi:10.53623/gisa.v4i1.352

Wang, G., Chen, Y., An, P., Hong, H., Hu, J., Huang, T. 2023. UAV-YOLOv8: A small-object-detection model based on improved YOLOv8 for UAV aerial photography scenarios. Sensors 23: 7190. doi.org/10.3390/s23167190

Well, L.A., Chung, W. 2023. Real-Time computer vision for tree stem detection and tracking. Forests 14: 267. doi.org/10.3390/f14020267

Wu, D., Lv, S., Jiang, M., Song, H. 2020. Using channel pruning-based YOLO v4 deep learning algorithm for the real-time and accurate detection of apple flowers in natural environments. Comput. Electron. Agr. doi.org/10.1016/j.compag.2020.105742

Xie, Q., Li, D., Yu, Z., Zhou, J., Wang, J. 2019. Detecting trees in street images via deep learning with attention module. IEEE Trans. Instrum. Meas. 69: 5395–5406. doi: 10.1109/TIM.2019.2958580

# อุปกรณ์ควบคุมหัวฉีดเครื่องพ่นสารเคมีด้วยลมพัดโดยใช้เทคนิคคอมพิวเตอร์วิทัศน์

## Adaptive nozzle control system of airblast sprayer using computer vision technique

**ธีรภัทร์ แพงวาปี, บุณยกร อุดมสิน, ณัฐชนน ฤาชา, รวิภัทร ลาภเจริญสุข***

Theerapat Pangwapee, Boonyakorn Udomsin, Nutchanon Luecha, Ravipat Lapcharoensuk*

ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

Department of Agricultural Engineering, School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520

*Corresponding author. E-mail address: ravipat.la@kmitl.ac.th

**บทคัดย่อ**

งานนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างอุปกรณ์ควบคุมหัวฉีดเครื่องพ่นสารเคมีด้วยลมพัดโดยใช้เทคนิคคอมพิวเตอร์วิทัศน์ เพื่อฉีดพ่นสารเคมีในบริเวณต้นทุเรียนอย่างแม่นยำ แบบจำลอง Deep learning เพื่อตรวจจับทุเรียนถูกพัฒนาขึ้นเพื่อตรวจจับต้นทุเรียน กล้องดิจิตอล 2 ตัวสำหรับรับภาพซ้ายและขวาถูกติดตั้งกับอุปกรณ์ โซลินอยด์วาล์วถูกใช้เพื่อควบคุมการฉีดพ่น อุปกรณ์สำหรับประมวลผลคือบอร์ดคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก Jetson Nano การทดสอบสมรรถนะดำเนินการทดลองฉีดพ่นในสวนทุเรียนจำนวน 2 แถวซ้ายและขวาฝั่งละ 10 ต้น การทดลองดำเนินการ 3 ซ้ำ ความเร็วของรถแทรกเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง 0.417 m $s^{-1}$ ซึ่งได้ผลการทดลองแสดงสมรรถนะในการฉีดพ่นด้วยค่า Precision = 0.652, Recall = 0.983, Accuracy = 0.729 และ Capacity 9.9375 rai $hr^{-1}$ อุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถลดการใช้ปริมาณสารเคมีลงได้ 27% จากข้อมูลทั้งหมดนี้ทำให้อุปกรณ์ควบคุมหัวฉีดพ่นเครื่องพ่นสารเคมีด้วยลมพัดโดยเทคนิคคอมพิวเตอร์วิทัศน์แสดงความเป็นไปได้ในการควบคุมการฉีดพ่นสารเคมีแก่ต้นทุเรียนได้อย่างแม่นยำ

**คำสำคัญ**: การควบคุมหัวฉีดพ่น, เกษตรแม่นยำ, คอมพิวเตอร์วิทัศน์, เครื่องพ่นสารเคมีด้วยลมพัด

**Abstract**

This study aims to design and develop an adaptive nozzle control system for airblast sprayer using computer vision technique for precision spraying agrochemicals in the durian orchard. The Deep Learning model was developed for detecting durian trees. Two digital cameras for image acquisition from the left and right sides were connected to the device. The solenoid valve is used to control spraying. The processor was a Jetson Nano minicomputer. The performance testing was carried out in the durian orchard in 2 rows on the left and right sides with 10 trees on each side. The experiment was done 3 replications. The speed of the tractor for experiment was 0.417 m $s^{-1}$. The results showed performance for spaying with precision = 0.652, recall = 0.983, accuracy = 0.729 and Capacity = 9.9375 rai $hr^{-1}$. The developed device could reduce used agrochemical about 27%. All the above information, the adaptive nozzle control system of airblast sprayer using computer vision technique presented possibility to precisely control the spraying.

**Keywords**: Airblast sprayer, Computer vision technique, Nozzle control system, Precision agriculture

**คำนำ**

ทุเรียนของไทยปัจจุบันเป็นผลไม้ที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างสูงทั้งการบริโภคในประเทศและส่งออกไปต่างประเทศ ซึ่งมีมูลค่าการส่งออกที่สูงมากถึง 3.5 พันล้านเหรียญสหรัฐ มีอัตราการขยายตัวของการส่งออกสูงถึงร้อยละ 68 ภายในปี 2564 (กรมศุลกากร, 2565) ซึ่งมีส่วนแบ่งทางตลาดร้อยละ 76 ของโลก (International Trade Center, 2565) ส่งผลให้ทุเรียนมีการขยายตัวสูง จากข้อมูลในปี 2566 จะพบว่า ทุเรียนมีเนื้อที่ให้ผลเพิ่มขึ้นจากปีที่แล้ว 79,802 ไร่ หรือร้อยละ 8.18 ผลผลิตเพิ่มขึ้นจากปีที่แล้ว 204,382 ตัน หรือร้อยละ 15.33 (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2566) แต่ราคาของทุเรียนยังมีราคาสูง เนื่องจากทุเรียนเป็นพืชที่ต้องได้รับการดูแลอย่างพิเศษ และหลากหลายขั้นตอนได้แก่ การเตรียมพื้นที่ปลูก การให้น้ำ การพลางแสง การตัดแต่งและควบคุมทรงพุ่ม การให้ปุ๋ย การพ่นยา การเตรียมต้น การจัดการศัตรูพืช โรค และแมลงต่าง ๆ (กรมวิชาการเกษตร, 2563) ซึ่งมีสาเหตุหลักของราคาทุเรียนที่สูงขึ้นเนื่องจากการสูญเสียต้นทุเรียนจากโรค แมลง และศัตรูพืช และการบำรุงให้ทุเรียนออกผลผลิต ดังนั้นเกษตรกรชาวสวนทุเรียนจึงสารเคมีในการฉีดพ่นเพื่อกำจัดโรค แมลง และศัตรูพืชต่างๆ รวมถึงยังใช้สารเคมีในฉีดพ่นเพื่อบำรุงให้ต้นทุเรียนสามารถออกผลผลิตได้ โดยมีการใช้ปริมาณสารเคมีจำนวนมากจึงทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น โดยมูลค่าสารเคมีที่ใช้ในการฉีดพ่นใช้ปริมาณ 30,000 บาทต่อไร่ต่อปี (ศูนย์ข้อมูลวิจัยและประเมินค่าอสังหาริมทรัพย์ไทย,2564) ซึ่งมีเทคนิคการพ่นที่หลากหลาย คือ การพ่นด้วยเครื่องยนต์พ่นสารแบบแรงดันสูง พ่นด้วยเครื่องยนต์พ่นสารแบบใช้แรงลมขนาดใหญ่ (เครื่องแอร์บลาสท์, Airblast) (สำนักวิจัยพัฒนาการอารักขาพืช, 2562) และมีเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับสำหรับพ่นยา แต่ในแต่ละเทคนิคการฉีดพ่นนั้นมีข้อจำกัดและข้อด้อยที่ต่างกัน โดยการฉีดพ่นสารแบบแรงดันสูงนั้นต้องใช้กำลังคนในการฉีดพ่นซึ่งทำให้เกิดการสิ้นเปลืองเนื่องด้วยการฉีดพ่นของแต่ละบุคคลมีความต่างกันและอาจเกินความจำเป็นอีกทั้งยังมีอันตรายจากการสัมผัสและใกล้สารเคมีโดยตรงและยังใช้เวลานานในการทำงาน แต่ในส่วนของเครื่องแอร์บลาสท์นั้นช่วยลดแรงงานในการฉีดพ่นและยังได้รับอันตรายจากสารเคมีที่น้อยลง แต่การใช้สารเคมีต้องใช้ในปริมาณมากในฉีดพ่น เนื่องจากระหว่างที่เครื่องแอร์บลาสท์นั้นทำงานจะทำการฉีดพ่นสารเคมีตลอดเวลา แต่ในสวนทุเรียนนั้นมักมีช่องว่างระหว่างต้น ฉะนั้นทำให้เมื่อแอร์บลาสท์ทำงานอย่างต่อเนื่องส่งผลให้เกิดการสิ้นเปลืองสารเคมีโดยเปล่าประโยชน์ ซึ่งส่งผลให้มูลค่าของสารเคมีที่ใช้นั้นสูงขึ้น และในส่วนของอากาศยานไร้คนขับสารเคมีส่งผลอันตรายต่อผู้ฉีดน้อยมาก แต่สารเคมีที่ใช้ลดลงแต่เป็นความเข้นข้นที่เพิ่มมากขึ้น และการใช้งานฉีดพ่นยังไม่เป็นที่ยอมรับในหมู่เกษตรกรเนื่องจากการฉีดพ่นนั้นสามารถฉีดพ่นได้ในบริเวณยอดของทุเรียน ส่งผลให้ไม่ครอบคลุมทั่วทั้งต้น เกษตรกรจึงไม่นิยมใช้

ในปัจจุบันเกษตรกรชาวสวนทุเรียนไทย มีการใช้เครื่องมือในการช่วยฉีดพ่นสารเคมีเพื่อลดการใช้แรงงาน และเพิ่มความปลอดภัยในการฉีดพ่น ซึ่งเทคนิคที่เป็นที่นิยมใช้ คือ เครื่องพ่นสารเคมีโดยใช้ลมพัดหรือ Airblast (เธียรชัย สันดุษฎี, 2542) ซึ่งเป็นที่แพร่หลายในการฉีดพ่นสารเคมีในสวนทุเรียน และยังสามารถใช้ในพืชชนิดอื่นได้เช่นเดียวกัน แต่อย่างไรก็ตามเครื่องพ่นสารเคมีโดยใช้ลมพัดมีข้อจำกัดหลายอย่างตามที่กล่าวไว้ข้างต้น จึงต้องการในการพัฒนาเพื่อสร้างความสะดวกและมีประสิทธิภาพมากขึ้น อีกทั้งประเทศไทยนั้นเริ่มก้าวเข้าสู่การเกษตรที่เรียกว่า เกษตรแม่นยำ (Precision Agriculture) เป็นรูปแบบการเกษตรที่นำเทคโนโลยีและการจัดการข้อมูลมาใช้ในการบริหารจัดการทางการเกษตรให้มีความเหมาะสมและแม่นยำขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ปัจจัยการผลิต ทำให้ช่วยลดต้นทุนและเพิ่มผลผลิตทั้งปริมาณและคุณภาพ รวมถึงใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าและรักษาสภาพแวดล้อม (สำนักงานเลขาธิการสภาผู้แทนราษฎร, 2565) ดังนั้นเครื่องพ่นสารเคมีด้วยลมพัดจึงควรได้รับการปรับปรุงให้เป็นการทำเกษตรแบบแม่นยำ โดยการพ่นที่เฉพาะเจาะจงบริเวณทรงพุ่มเพื่อลดปริมาณการใช้สารเคมีที่ไม่จำเป็น ซึ่งสามารถทำได้โดยการควบคุมการฉีดพ่นนำเทคโนโลยีมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมการฉีดพ่นให้แม่นยำ เช่น การใช้ Deep Learning ในการตรวจจับลูกทุเรียนและนับจำนวนลูก

ทุเรียนที่อยู่บนต้นทุเรียน (Azizi et al., 2023) การ Convolutional Neural Network ในการแยกพันธ์ทุเรียนจากใบของทุเรียน (Halim et al., 2023) การใช้ Lidar ควบคู่กับ Machine Vision ในการตรวจจับต้นไม้และควบคุมการพ่นสารเคมี (Partel et al., 2021) การใช้ Deep Learning ในการตรวจจับพืชเพื่อควบคุมอัตราการฉีดพ่นสารเคมีให้แก่พืช (Hussain et al., 2020) การใช้ Deep Learning ในการตรวจจับวัชพืชและโรคพืชเพื่อควบคุมอัตราการฉีดพ่นสารเคมีในบริเวณที่ต้องการ (Farooque et al., 2023) และยังมีการใช้เทคนิค Computer Vision เพื่อควบคุมการกำจัดวัชพืชและควบคุมการให้น้ำ (Chang, 2018) จากการค้นคว้างานวิจัยในอดีตยังไม่มีการนำเทคนิค Computer vision มาจำแนกต้นทุเรียนซึ่งเป็นเรื่องท้าทายเนื่องจากมีความยากในการจำแนกต้นไม้ที่มีลักษณะใกล้เคียงกันและยังไม่มีการนำเทคนิคเหล่านี้มาใช้ในการควบคุมการฉีดพ่นแบบแม่นยำสำหรับต้นทุเรียน สามารถนำเทคโนโลยีเหล่านี้มาประยุกต์ใช้ได้ในการควบคุมให้เครื่องพ่นสารเคมีด้วยลมพัดสามารถทำงานได้อย่างแม่นยำและมีประสิทธิภาพ จะส่งผลให้ลดการใช้สารเคมีในการฉีดพ่นสารเคมีได้และเพิ่มประสิทธิในการฉีดพ่น

ดังนั้นเป้าหมายของงานนี้จะออกแบบและสร้างอุปกรณ์สำหรับควบคุมหัวฉีดพ่นสารเคมีของเครื่องพ่นสารเคมีด้วยลมพัดโดยใช้เทคนิคคอมพิวเตอร์วิทัศน์ เพื่อจะควบคุมการฉีดพ่นให้ฉีดพ่นสารเคมีของเครื่องพ่นสารเคมีด้วยลมพัดให้ฉีดพ่นแบบแม่นยำและในบริเวณที่เป็นต้นทุเรียน เพื่อลดการใช้สารเคมีในการฉีดพ่นให้น้อยลง พร้อมทั้งทดสอบประสิทธิภาพการทำงานอุปกรณ์ควบคุมหัวฉีดเครื่องพ่นสารเคมีด้วยลมพัดโดยใช้เทคนิคคอมพิวเตอร์วิทัศน์ และยกระดับมาตราฐานการทำเกษตรไทยให้เป็นการทำการเกษตรแบบแม่นยำ (Precision Agriculture) และช่วยลดภาระการลงทุนของเกษตรกรและเพิ่มความสะดวกในการเข้าถึงเทคโนโลยีให้กับเกษตรกร ซึ่งจะเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่ทำให้เกษตรกรสามารถใช้เทคโนโลยีเพื่อบริหารจัดการทางการเกษตรได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

**อุปกรณ์และวิธีการ**

*แบบจำลองและโปรแกรมควบคุม*

เลือกใช้แบบจำลองที่ได้จากการสร้างแบบจำลองโดยใช้เทคนิคการเรียนรู้เชิงลึก โดยใช้ YOLOv8 ซึ่งเป็นอัลกอริทึมที่ประสบความสำเร็จเป็นอย่างมาก และถูกพัฒนาจากรุ่นก่อนให้มีความล้ำสมัยและให้ความแม่นยำและความเร็วในการตรวจจับสูง โดยมีโครงสร้างส่วนใหญ่ประกอบด้วย backbone, neck และ head (Wang et al., 2023) แสดงดัง Fig. 1 ที่ผ่านการสร้างแบบจำลองสำหรับตรวจจับต้นทุเรียนมาสำเร็จแล้ว โดยมีการจำแนกเป้าหมายที่ต้องการออกเป็น 2 กลุ่ม คือ “Durian”, “Non_Durian” มาใช้งาน จากนั้นจะสร้างโปรแกรมสำหรับควบคุมการทำงาน แบ่งออกเป็น 3 ส่วน 1.การทำงานหลักจะควบคุมอุปกรณ์โดยการอ่านค่าจากกล้องและทำการใช้แบบจำลองสำหรับตรวจวัตถุที่อยู่ในภาพดัง Fig. 2 จากนั้นจะเรียกใช้ Function ในส่วนที่ 2. Function Solenoid Valve จะควบคุมการเปิดปิดของโซลินอยด์วาล์วฝั่งซ้ายและขวาแยกกัน โดยจะทำงานก็ต่อเมื่อตรวจจับวัตถุในฝั่งนั้น ๆ แล้วเป็นวัตถุใน Class “Durain” จะมีการควบคุมให้โซลินอยด์วาล์วเปิด และปิดในบริเวณที่เป็น Class “Non_Durian” ดัง Fig. 3 และในส่วนที่ 3.จะใช้ในการตรวจสอบค่าสีก่อนการทำงาน ในกรณีที่มีวัตถุอื่น ๆ หรือสิ่งสกปรกมาบดบัง จะมีการแจ้งเตือนที่ไปยังไฟสถานะ และไม่สามารถทำงานได้ จนกว่าจะแก้ไขให้กล้องนั้นพร้อมใช้งาน ดัง Fig. 4

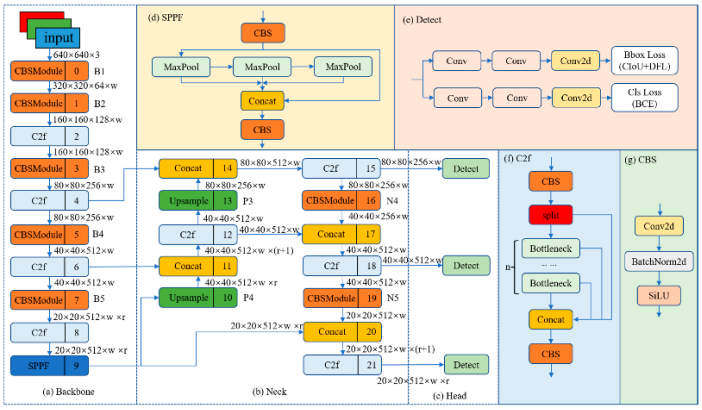



**Fig. 1** The network structure of YOLOv8. Parameters are used to represent the size of the feature map. The size of the model can be controlled by setting the values of w and r to meet the needs of different application scenarios. (Wang et al., 2023)

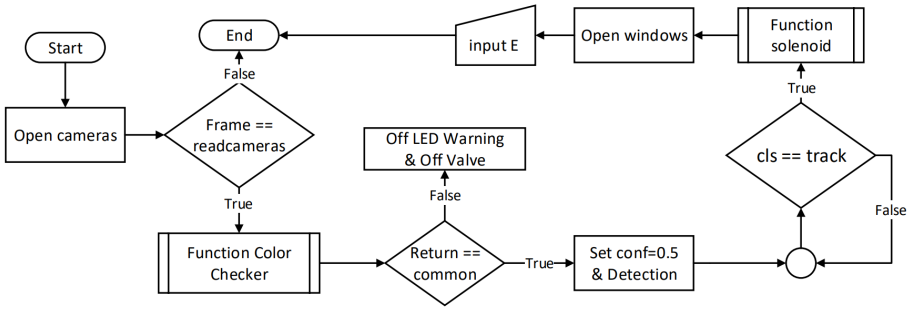



**Fig. 2** Flowchart of the main program

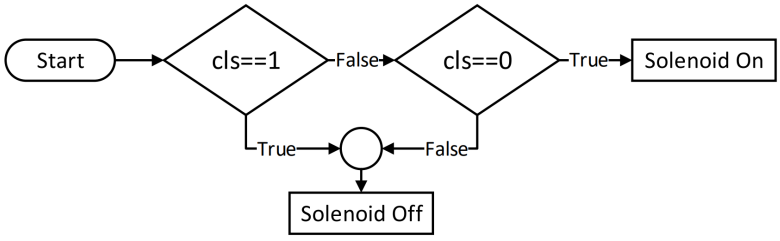



**Fig. 3** Flowchart of function solenoid valve

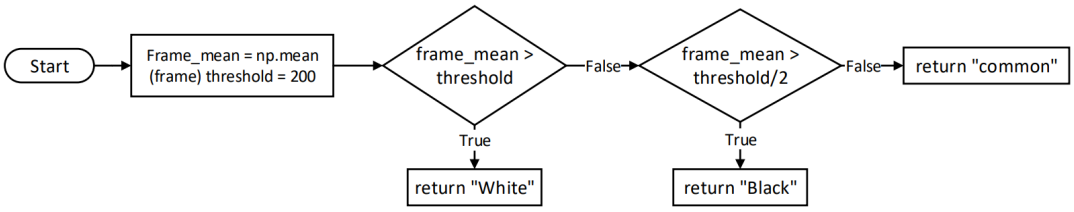



**Fig. 4** Flowchart of function color checker

*ออกแบบและสร้างอุปกรณ์ควบคุม*

มีลักษณะของเครื่องเป็นกล่องพลาสติกปิด เพื่อป้องกันละอองสารเคมี ไอน้ำ และฝุ่นต่าง ๆ และมีกล้องที่ต่อไว้ภายนอก ภายในกล่องจะมีคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก (Jetson Nano Developer Kit, NVIDIA, USA) รีเลย์ และวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้านใน สำหรับควบคุมการทำงานของโซลินอยด์วาล์ว ด้านข้างของกล่องควบคุมจะมีช่องสำหรับต่อสายไป

ยังโซลินอยด์และรับไฟเข้าและมีไฟสำหรับแสดงผลการทำงาน จากนั้นทำการสร้างอุปกรณ์ไว้ดังที่ออกแบบ ซึ่งจะมีหลักการทำงานดังนี้ คือกล้องดิจิตอล (Logitech C270 HD Webcam, Logitech, Switzerland) จะทำการถ่ายภาพแล้วส่งข้อมูลเข้ามายังคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก จากนั้นตรวจสอบภาพที่ถูกป้อนเข้ามาว่าตรวจพบต้นทุเรียนหรือไม่ ในกรณีที่ตรวจเจอต้นทุเรียน คอมพิวเตอร์ขนาดเล็กจะส่งสัญญาณไปยังรีเลย์เพื่อให้รีเลย์ต่อวงจรเพื่อนำไฟจากแบตเตอรี่ของเครื่องพ่นสารเคมีด้วยลมพัด ไปจ่ายให้ยังโซลินอยด์วาล์วซึ่งจะทำให้โซลินอยด์วาล์วเปิด ทำให้หัวพ่นสารเคมีพ่นสารเคมีออกมาเพื่อฉีดพ่นไปยังต้นทุเรียนที่ได้ตรวจสอบเจอในข้างต้น และในกรณีที่ตรวจไม่เจอต้นทุเรียน คอมพิวเตอร์ขนาดเล็กก็ไม่ส่งสัญญาณใด ๆ ออกมายังรีเลย์ทำให้โซลินอยด์วาล์วปิดและไม่พ่นสารเคมีออกไป โดยเป็นไปตามแผนผังการทำงานดัง Fig. 5

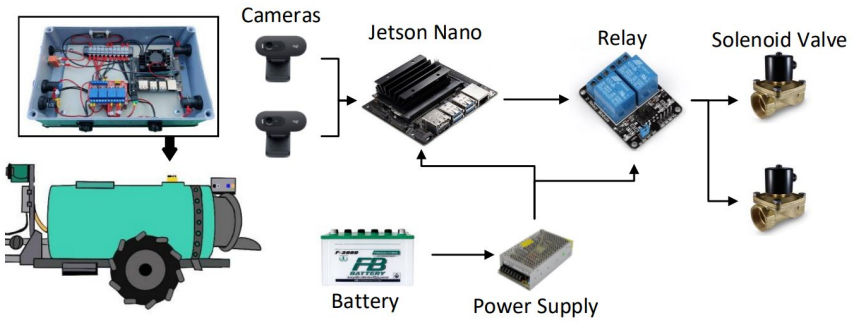



**Fig. 5** Schematic chart of Adaptive nozzle control system of airblast sprayer

*การทดสอบประสิทธิภาพการทำงาน*

ทำการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมหัวฉีดพ่นสารเคมีไปยังเครื่องพ่นสารเคมีด้วยลมพัดโดยติดตั้งส่วนอุปกรณ์ควบคุมไปยังส่วนท้ายของเครื่องยนต์ และติดตั้งกล้องไว้ด้านบนของเครื่องยนต์โดยใช้แผ่นยางรองในตำแหน่งที่ติดตั้งกล้องเพื่อลดแรงสั่นสะเทือนของกล้องในส่วนกล้องจะมี 2 กล้อง จะติดตั้งไปทั้งซ้ายและขวา จากนั้นติดตั้งโซลินอยด์วาล์วเพื่อควบคุมสารเคมีทั้ง 2 ฝั่ง และการทำงานทั้งหมดจะใช้ไฟจากแบตเตอรี่ของเครื่องพ่นสารเคมีด้วยลมพัด จากนั้นทำการทดลอง โดยมีการออกแบบการทดลองดังนี้ โดยทดลองที่สวนทุเรียนในตำบลกระแสบน อำเภอแกลง จังหวัดระยอง อายุต้นทุเรียนโดยประมาณ 8 ปี จะทดลอง 2 แถว แถวละ 3 ซ้ำ ยาว 100 เมตร แต่ละแถวจะทดลองฉีดพ่นได้ 2 ฝั่ง คือ ซ้ายและขวา ฝั่งละ 10 ต้น ดัง Fig. 6 จะแบ่งการทดลองออกเป็น 20 ช่องการทดลอง การทดลองดำเนินการโดยการฉีดพ่นน้ำโดยใช้อุปกรณ์ที่ติดตั้ง รถจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.417 เมตรต่อวินาที ซึ่งจะทดสอบความถูกต้องของการฉีดพ่น โดยจะแบ่งเป็น 4 กรณี เพื่อทดสอบประสิทธิภาพ จะใช้น้ำเปล่าในการฉีดพ่นเพื่อความปลอดภัยในการทดลอง และใช้การประเมินผลด้วย Confusion matrix โดยมีตัวแปรดังนี้ True Positive (TP) = สิ่งที่ทำนายตรงกับสิ่งที่เกิดขึ้นจริง ในกรณีทำนายว่าต้นทุเรียน สิ่งที่เกิดขึ้นคือ ฉีดพ่น, True Negative (TN) = สิ่งที่ทำนายตรงกับสิ่งที่เกิดขึ้น ในกรณีทำนายว่าไม่ใช่ต้นทุเรียน สิ่งที่เกิดขึ้นคือ ไม่ฉีดพ่น, False Positive (FP) = สิ่งที่ทำนายไม่ตรงกับสิ่งที่เกิดขึ้น คือทำนายว่าต้นทุเรียน สิ่งที่เกิดขึ้นคือ ไม่ฉีดพ่น, False Negative (FN) = สิ่งที่ทำนายไม่ตรงกับที่เกิดขึ้นจริง คือทำนายว่าไม่ต้นทุเรียน สิ่งที่เกิดขึ้นคือ ฉีดพ่น สามารถแบ่งสัดส่วนได้ดัง Table 1 สามารถประเมินประสิทธิภาพของอุปกรณ์ควบคุมหัวฉีดพ่นสารเคมีได้จาก Confusion matrix ได้ตามสูตร ดังนี้



**Fig. 6** Experimental field for testing the performance of the Adaptive nozzle control system of airblast sprayer

Precision แสดงเป็นอัตราส่วนระหว่างค่าที่อุปกรณ์ฉีดพ่นถูกต้อง (TP) ต่อค่าการทำงานฉีดพ่นของอุปกรณ์ (TP+FP)

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP+FP} \quad (1)$$

Recall แสดงเป็นอัตราส่วนระหว่างค่าที่อุปกรณ์ฉีดพ่นถูกต้อง (TP) ต่อค่าของกลุ่มทุเรียน (TP+FN)

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP+FN} \quad (2)$$

Accuracy แสดงเป็นอัตราส่วนระหว่างค่าที่อุปกรณ์ทำงานถูกต้อง (TP+TN) ต่อค่าที่อุปกรณ์ทำงานทั้งหมด (TP+TN+FP+FN)

$$\text{Accuracy} = \frac{TP+TN}{TP+FP+TN+FN} \quad (3)$$

**Table 1** Confusion matrix

| | | Spraying | |
|---|---|---|---|
| | | Spray | Non_Spray |
| Target | Durian | พ่นบริเวณ “Durian” (TP) | ไม่พ่นบริเวณ “Durian” (FN) |
| | Non_Durian | พ่นบริเวณ “Non_Durian” (FP) | ไม่พ่นบริเวณ “Non_Durian” (TN) |

**ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง**

จากการทดสอบอุปกรณ์ควบคุมหัวฉีดพ่นสารเคมีของเครื่องพ่นสารเคมีชนิดลมพัด ได้ผลจากการทดสอบดังแสดงใน Table 2 จากตารางพบว่าอุปกรณ์ฉีดพ่นบริเวณต้นทุเรียนถูกต้อง 118 ครั้ง จากทั้งหมด 120 ครั้ง ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีความถูกต้องอย่างมาก และสำหรับบริเวณที่ไม่ใช่ต้นทุเรียนซึ่งต้องไม่ฉีดพ่นและอุปกรณ์ควบคุมไม่ให้มีการฉีดพ่น 57 ครั้ง ของอุปกรณ์ควบคุมหัวฉีดพ่นสารเคมี ค่า Precision Recall และ Accuracy แสดงใน Table 3 จากตารางได้ผลการทดสอบดังนี้ Precision เท่ากับ 0.656, Recall เท่ากับ 0.983 และ Accuracy เท่ากับ 0.729 มีสมรรถนะใกล้เคียงกันหากเทียบกับงานวิจัยอื่น เช่น การใช้กล้อง RGB สำหรับระบุทรงพุ่มต้นแอปเปิล (Hocevar et al., 2016) มีข้อจำกัดในเรื่องความแปรปรวนของรูปร่างและขนาดของต้นไม้ การใช้อัลกอริทึม Tiny-YOLOv3 สำหรับตรวจวัชพืช (Hussain et al., 2020) มีค่าสมรรถนะ Precision=0.86, Recall=0.79 และ F1Score=0.78 จะเห็นได้ว่าการทำงานมีสมรรถนะสูงแต่ในงานวิจัยใช้สำหรับตรวจวัชพืชที่อยู่ผิวดินทำให้สามารถติดตั้งกล้องไว้มุมสูงเพื่อง่ายต่อการตรวจจับวัชพืช

**Table 2** Results of confusion matrix

| | | Spraying | |
|---|---|---|---|
| | | Spray | Non_Spray |
| Target | Durian | 118 | 2 |
| | Non_Durian | 63 | 57 |

**Table 3** Results of precision, recall and accuracy

| | Precision | Recall | Accuracy |
|---|---|---|---|
| Performance | 0.656 | 0.983 | 0.729 |

Table 4 แสดงค่ากำลังการผลิต (Capacity) ปริมาณสารเคมีที่ใช้ (Volume of agrochemicals) และต้นทุนของสารเคมีที่ใช้ (Cost of agrochemicals) ก่อนและหลังการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมหัวฉีดพ่นสารเคมี ได้กำลังการผลิตเท่ากับ 9.375 rai $hr^{-1}$ ทั้งก่อนและหลังติดตั้ง ๆ จากการสำรวจภายในสวนทุเรียนทราบว่าระยะของทรงพุ่มเป็น 63.43% และระยะของช่องว่างระหว่างต้นทุเรียน (Distance between the durian trees) เป็น 36.57% ของระยะทางทั้งหมดภายในสวนทุเรียน และการสัมภาษณ์เกษตรกร การะเกตุ แพงวาปี, (2566) กล่าวว่าค่าใช้จ่ายสำหรับค่าสารเคมี (Cost of agrochemicals) เฉลี่ย 2.675 บาทต่อลิตร และการใช้สารเคมีโดยทั่วไปมีปริมาณ (ซึ่งกำหนดเป็น ปริมาณสารเคมีก่อนติดตั้ง (Volume of agrochemicals before installed, $V_{before}$)) เฉลี่ยเท่ากับ 1,333.33 L $hr^{-1}$ หรือ 142.22 L $rai^{-1}$ หลังติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมหัวฉีดพ่นสารเคมีมีปริมาณการใช้สารเคมีเท่ากับ 977.83 L $hr^{-1}$ หรือ 104.30 L $rai^{-1}$ คิดจากปริมาณการใช้สารหลังติดตั้ง (Volume of agrochemicals after installed, $V_{after}$) จากสมการที่ 4 และราคาของที่จ่ายต่อการฉีดพ่นก่อนติดติ้งเท่ากับ 380.45 บาทต่อไร่ และหลังติดตั้ง 279.01 บาทต่อไร่ สามารถนำข้อมูลจากตารางไปคิดจุดคุ้มทุนได้ ดังแสดงใน Fig. 6 จากภาพเป็นการคิดจุดคุ้มทุนในการสร้างอุปกรณ์ควบคุมหัวฉีดพ่นสารเคมี ซึ่งค่าใช้จ่ายคงที่ที่ใช้สร้างอุปกรณ์รวมมูลค่าเท่ากับ 30,000 บาท และจากข้อมูลใน Table 4 ทำให้ทราบว่าปริมาณการใช้สารเคมีที่ลดลงได้ (Volume of agrochemicals that can be reduced, $V_{reduced}$) เท่ากับ 37.92 L $rai^{-1}$ มูลค่าของสารเคมีที่ลดลงไปได้มีมูลค่าเท่ากับ 101.44 บาทต่อไร่ คิดได้จากสมการที่ 5 ซึ่งนำมาหาจุดคุ้มทุนได้ จุดคุ้มทุน คือ 296 ไร่

$$V_{after} = V_{before} - (V_{after} \times Accuracy \times Distance\ between\ the\ durian\ trees) \quad (4)$$

$$Save\ cost = V_{redduced} \times Cost\ of\ agrochemicals \quad (5)$$

**Table 4** Comparison of capacity, volume of agrochemicals and cost of agrochemicals before and after installed adaptive nozzle control system

| | Adaptive nozzle control system | |
|---|---|---|
| | Before Install | After Install |
| Capacity (Rai $hr^{-1}$) | 9.375 | 9.375 |
| Volume of agrochemicals (L $hr^{-1}$) | 1333.33 | 977.83 |
| Volume of agrochemicals (L $Rai^{-1}$) | 142.22 | 104.30 |
| Cost of agrochemicals (Baht $Rai^{-1}$) | 380.45 | 279.01 |

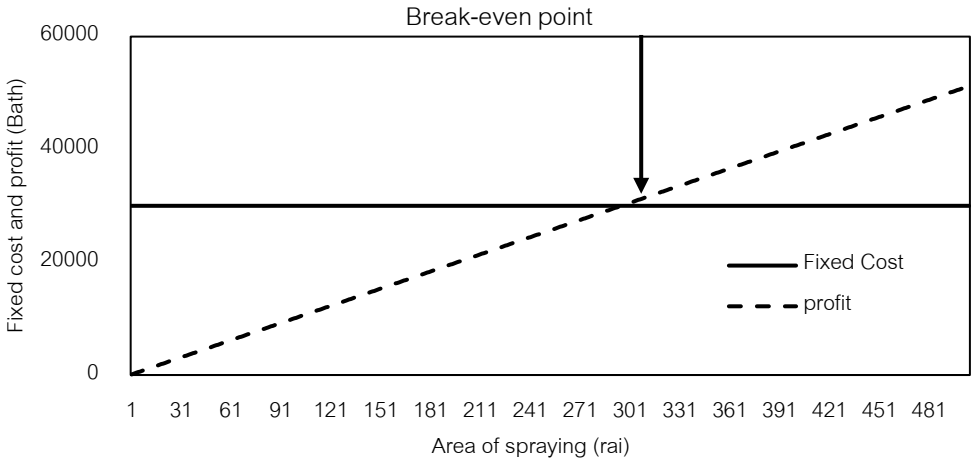



Fig. 7 The graph shows the break-even point

## สรุป

อุปกรณ์ควบคุมหัวฉีดพ่นสารเคมีของเครื่องพ่นสารเคมีโดยใช้เทคนิคการเรียนรู้เชิงลึกจากการทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์พบว่า อุปกรณ์สามารถควบคุมการฉีดพ่นสารเคมีได้ค่าความแม่นยำของการทำงาน ได้ค่า Precision = 0.652, Recall = 0.983, Accuracy = 0.729 ผลของประสิทธิภาพแสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ควบคุมหัวฉีดพ่นสารเคมีสามารถฉีดพ่นได้ในบริเวณทุเรียนได้แบบแม่นยำ แต่ในบริเวณที่ไม่ใช่ทุเรียนยังมีประสิทธิภาพไม่แม่นยำเท่าที่ควร เนื่องจากความผิดพลาดของการฉีดพ่น เกิดจากบริเวณช่องว่างระหว่างแถวที่ติดเครื่องพ่นสารเคมีนั้นมีต้นทุเรียนจากแถวถัดไปติดมาในบริเวณช่องว่าง อุปกรณ์จึงตรวจจับได้และทำการฉีดพ่น จึงทำให้มีการฉีดพ่นไปในบริเวณนั้น ๆ ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพไม่ดีเท่าที่ควร ซึ่งสามารถยอมรับได้เนื่องจากต้นทุเรียนได้รับสารเคมีทั้งหมด จึงทำให้ไม่เกิดความเสียหายแก่ต้นทุเรียน แต่ยังมีการสิ้นเปลืองของปริมาณสารเคมี ซึ่งสามารถแก้ปัญหาได้ด้วยการติดตั้งตั้ง Sensor ในการวัดระยะเข้าไปร่วมด้วย เช่น Lidar เพื่อทำการวัดระยะต้นที่ต้องการฉีดพ่น หรืออาจใช้ Depth Camera เพื่อรับภาพและวัดระยะในการฉีดพ่นสารเคมี เพื่อให้อุปกรณ์ควบคุมหัวฉีดพ่นสารเคมีสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงและแม่นยำ จากการเปรียบเทียบกำลังการผลิต ปริมาณสารเคมีที่ใช้ และต้นทุนของสารเคมีก่อนและหลังติดตั้ง ได้กำลังการผลิตเท่ากับ 9.375 rai $hr^{-1}$ ทั้งก่อนและหลังติดตั้ง ๆ มีปริมาณการใช้สารเคมีหลังติดตั้งเท่ากับ 977.83 L $hr^{-1}$หรือ 104.30 L $rai^{-1}$ ลดปริมาณการใช้สารเคมี 355.50 L $hr^{-1}$ หรือ 37.92 L $rai^{-1}$ และต้นทุนสารเคมีที่จ่ายต่อการฉีดพ่นหลังติดตั้ง 279.01 บาทต่อไร่ ลดต้นทุนลงได้ 101.44 บาทต่อไร่ หรือประมาณ 27 % มีลงทุนสร้างอุปกรณ์ควบคุมหัวฉีดพ่นมีค่าใช้จ่าย 30,000 บาท และจะมีจุดคุ้มทุนอยู่ที่ 296 ไร่ ในการฉีดพ่น ซึ่งเป็นปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับการใช้งานหลักของเกษตร ดังนั้นจึงมีความคุ้มค่าต่อการลงทุนและนำไปใช้งาน เพื่อแก้ปัญหาการใช้สารเคมีที่ไม่จำเป็นและเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการฉีดพ่น

## กิตติกรรมประกาศ

ได้รับทุนอุดหนุนจากกองทุนวิจัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง [2566-02-01-052]

**เอกสารอ้างอิง**

การะเกตุ แพงวาปี ให้สัมภาษณ์, 1 สิงหาคม 2566. ธีรภัทร์ แพงวาปี ผู้สัมภาษณ์. ปริมาณการใช้สารเคมี ค่าใช้จ่ายในการใช้สารเคมีและปัญหาของการฉีดพ่นสารเคมีในสวนทุเรียน. สวนทุเรียนของนางการะเกตุ ต.กระแสบน อ.แกลง จ.ระยอง.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2566. กระทรวงเกษตรฯ เห็นชอบผลพยากรณ์ปริมาณการผลิตสินค้าเกษตร ปีเพาะปลูก 2566/67. https://www.oae.go.th/view/1/รายละเอียดข่าว/ข่าวทั้งหมด/42329/TH-TH, 13 สิงหาคม 2566.

สำนักวิจัยพัฒนาการอารักขาพืช กรมวิชาการเกษตร. 2562 เอกสารวิชาการ แมลง-ไร ศัตรูทุเรียน,บริษัท นิวธรรมดาการพิมพ์ (ประเทศไทย) จำกัด กรุงเทพฯ

Azizi, A.H.A., Asuhaimi, F.A., Sahrim, M., Lazim, I.M., Rozmi, A.M., Ismail, W.Z.W., Jamaludin, J., Ismail, I., Balakrishnan, S.R. 2023. Durian detection and counting system using deep learning. Eng. Sci. Technol. 18: 2470–2477

Farooque, A.A., Hussain, N., Schumann, A.W., Abbas, F., Afzaal, H., McKenzie-Gopsill, A., Esau, T., Zaman, Q., Wang, X. 2023. Field evaluation of a deep learning-based smart variable-rate sprayer for targeted application of agrochemicals. Smart Agricultural Technology 3: 2772–3755. doi.org/10.1016/j.atech.2022.100073.

Halim, N.A.H.A., Suhaila, S., Taujuddin, N.S.A.M. Hazli, R. 2023. Durian tree type identification based on durian leaves. EEEE 4: 551–558 doi.org/10.30880/eeee.2023.04.01.066

Chang, C.I., Lin, K.M. 2018. Smart agricultural machine with a computer vision-based weeding and variable-rate irrigation scheme. Robotics 7: 38. doi.org/10.3390/robotics7030038

Mahmud, M.S., Zahid, A., He, L., Choi, D., Krawczyk, G., Zhu, H. 2021. LiDAR-sensed tree canopy correction in uneven terrain conditions using a sensor fusion approach for precision sprayers. Comput. Electron. Agric. 191: 106565. doi.org/10.1016/j.compag.2021.106565

Hocevar, M., B. Širok, B., Jejcic, v., Godeša, T., Lešnik, M. Stajnko, D. 2010. Design and testing of an automated system for targeted spraying in orchards. J. Plant Dis. Prot. 117: 71–79.

Hussain, N., Farooque, A. A., Schumann, A. W., McKenzie-Gopsill, A., Esau, T., Abbas, F., Acharya, B. and Zaman, Q. 2020. Design and development of a smart variable rate sprayer using deep learning. Remote Sens. 12: 4091. doi.org/10.3390/rs12244091

Partel, V., Costa, L., Ampatzidis, Y. 2021. Smart tree crop sprayer utilizing sensor fusion and artificial intelligence. Comput. Electron. Agric. 191: 106556. doi.org/10.1016/j.compag.2021.106556

Wang, G., Chen, Y., An, P., Hong, H., Hu, J., Huang, T. 2023. UAV-YOLOv8: A small-object-detection model based on improved YOLOv8 for UAV aerial photography Scenarios. Sensors 23: 7190. https://doi.org/10.3390/s23167190

# การศึกษาประสิทธิภาพและความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคากรณีศึกษาเขตพื้นที่สถานีผลิตน้ำ การประปาส่วนภูมิภาค

# Studying the performance and economic cost benefit of installing a solar rooftop system, a case study in the water production station area Provincial Waterworks Authority

**ณัฐรัฐ พงศ์โพธิ์เงิน***, **นาตยา คล้ายเรือง**

Nattarat Pongpongern*, Nattaya Klairuang

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าคณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา ชลบุรี 20230

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering at Sriracha, Kasetsart University Sriracha Campus, Chon Buri 20230

*Corresponding author. E-mail address: nattaratpong1337@gmail.com

**บทคัดย่อ**

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาของสถานีผลิตน้ำบางพระ 2 การประปาส่วนภูมิภาค เพื่อเปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งก่อนและหลังติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โดยพิจารณาจากค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า ค่าไฟฟ้าที่ลดลงหลังการติดตั้ง และความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ เพื่อวิเคราะห์การใช้พลังงานไฟฟ้าโดยมีการจำลองการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาตามที่กำหนดในแต่ละอาคาร จากนั้นทำการเปรียบเทียบค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าแต่ละเดือนเป็นเวลาหนึ่งปีเพื่อดูผลประหยัดที่เกิดขึ้น และในส่วนสุดท้ายจะเป็นการวิเคราะห์ความคุ้มค่าด้านเศรษฐศาสตร์ จากผลการศึกษาพบว่ามูลค่าปัจจุบันสุทธิมีค่าเป็นบวก อัตราผลตอบแทนภายในมากกว่าอัตราคิดลด และระยะเวลาคืนทุนน้อยกว่าอายุโครงการแสดงให้เห็นว่ามีความคุ้มค่าในด้านการลงทุน

**คำสำคัญ**: ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา, พลังงานจากแสงอาทิตย์, ผลประหยัด

**Abstract**

In this research, the objective is to study the efficiency of the solar power generation system on the roof of Bang Phra 2 Water Production Station, provincial Waterworks Authority. To compare electrical energy use before and after installing the solar power generation system. By considering the power factor value, Reduced electricity costs after installation and economic values. To analyze electrical energy, use by simulating the installation of a solar power generation system on the roof as specified in each building. Then compare monthly electricity usage for one year to see the resulting savings. And in the last part, there will be an analysis of economic worthiness. From the results of the study, it was found that the net present value was positive. The internal rate of return is greater than the discount rate. And the payback period is less than the project life, showing that it is worthwhile in terms of investment.

**Keywords**: Economical results, Solar energy, Solar power generation system

**คำนำ**

เนื่องจากในปัจจุบันนั้นยังคงต้องมีการนำเข้าของพลังงานจากต่างประเทศเพื่อให้เพียงพอกับความต้องการภายในประเทศ พลังงานทางเลือกจึงเป็นหนทางหนึ่งในการดึงศักยภาพจากธรรมชาติเพื่อมาเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า และเป็นการลดการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศเป็นการลดค่าใช้จ่ายของประเทศได้ ซึ่งเป็นการสนับสนุนการพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกที่สอดคล้องกับนโยบายของกระทรวงพลังงาน นอกจากนั้นความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ยของประเทศไทยมีค่าสูงสามารถนำไปใช้ประโยชน์เป็นพลังงานได้ทุกพื้นที่ในประเทศ แต่จะต้องมีการออกแบบระบบให้มีความเหมาะสมมีความสอดคล้องกับความต้องการพลังงานไฟฟ้า (กระทรวงพลังงาน, 2563) การออกแบบติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่เหมาะสมนั้นมีความสำคัญมากเพราะนอกจากกจะช่วยเรื่องประหยัดในส่วนของเงินทุนแล้วยังต้องคำนึงผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้า เช่น เรื่องของคุณภาพทางไฟฟ้า แรงดัน หรือค่าของตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่จะได้รับผลกระทบจากการติดตั้งด้วย เช่นในการวิจัยของ Dhandis R.Jintaka et al. (2019) ที่ได้ศึกษาการวิเคราะห์ความผันผวนของแรงดันไฟฟ้า และค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเนื่องจากการผลิตพลังงานจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในระบบจำหน่าย เป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและมากขึ้นของการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในระบบจำหน่ายส่งผลอย่างมากต่อการควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายเนื่องจากแสงอาทิตย์มีการแผ่รังสีความร้อนที่ไม่คงที่ และอาจก่อให้เกิดความผันผวนของค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่ต่ำกว่าเกณฑ์และส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบได้ การวิเคราะห์ความคุ้มค่าในการการลงทุนติดตั้งเป็นสิ่งสำคัญมากที่จะทำให้สามารถประเมินได้ว่าเราควรที่จะลงทุนติดตั้งหรือไม่ เช่นในงานวิจัยของ สุรกิจ ทองสุก และคณะ (2561) ที่มีการวิเคราะห์ผลทางเศรษฐศาสตร์เพื่อประเมินในเรื่องของความคุ้มค่าในการลงทุนโดยการคำนวณผ่านโปรแกรมเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการติดตั้งจริงแสดงให้เห็นว่าระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการติดตั้งจริงมีระยะเวลาในการคืนทุนที่เร็วกว่าข้อมูลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมเพียงเล็กน้อยเนื่องมาจากปัจจัยภายนอกอื่นที่มีการเปลี่ยนแปลง ส่วนในเรื่องของกำลังผลิตไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมและข้อมูลจากระบบที่มีการติดตั้งจริงมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเช่นกัน เนื่องมาจากปัจจัยภายนอกที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า นอกจากนั้นยังพบว่าเมื่อกำลังผลิตติดตั้งมีขนาดใหญ่ขึ้นทำให้ต้นทุนของระบบต่ำลง ดังงานวิจัยของ ราชันย์ และคณะ (2562)

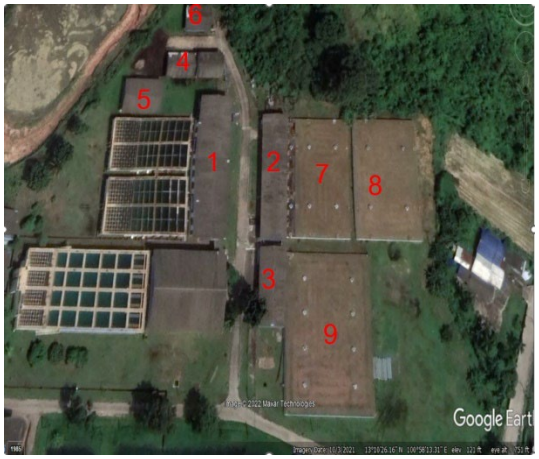
**อุปกรณ์และวิธีการ**

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพที่เกิดจากติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงงานแสงอาทิตย์บนหลังคาของสถานีผลิตน้ำเพื่อเปรียบเทียบผลประหยัดที่เกิดขึ้น รวมถึงวิเคาะห์ผลกระทบค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และศึกษาด้านความคุ้มทางด้านการลงทุนในการติดตั้ง โดยจะแบ่งขั้นตอนในการศึกษาดังนี้

1. *พื้นที่ที่ใช้ในการศึกษา*

พื้นที่ที่ใช้ศึกษาติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงงานแสงอาทิตย์บนหลังคาคือ สถานีผลิตน้ำ บางพระ2 การประปาส่วนภูมิภาค จังหวัดชลบุรี ดังแสดงใน Fig. 1 ตำแหน่งที่ตั้ง ละติจูดที่ 13.22 °N 100.97 °E ภายในสถานีประกอบไปด้วยอาคารหลายๆอาคารเพื่อใช้สำหรับกระบวนการผลิตน้ำเพื่อส่งจ่ายไปยังผู้ใช้น้ำ อาคารต่างๆมีพื้นที่หลังคาในปริมาณที่

เหมาะสมแก่การติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาสำหรับใช้การผลิตไฟฟ้าสำหรับใช้ภายในสถานี และความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ในบริเวณพื้นที่อยู่ในระดับเหมาะแก่การติดตั้ง




1.Water filtration plant

2.High lift pump station

3.Scada control room

4.Chemical storage 7x24 m.

5.Chemical storage 9.5x15 m.

6.Chlorine gas storage

7-9.Clear water tank

**Fig.1** Location of various buildings in the water production station

*2. การวิเคราะห์ด้านความต้องการไฟฟ้าและลักษณะการใช้ไฟฟ้า*

การวิเคราะห์ความต้องการใช้ไฟฟ้าของสถานีผลิตน้ำในการศึกษานี้จะใช้ข้อมูลจากการใช้พลังงานไฟฟ้าจริงจากมิเตอร์ AMR ของการไฟฟ้า เฉพาะช่วงเวลา 9.00.–17.00 น.ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่เราใช้ในการศึกษานี้เนื่องจากเป็นเวลาที่ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคามีการสร้างพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ที่เหมาะสม โดยจะได้ค่าการใช้กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยของทั้งสถานีผลิตน้ำออกมา คือ 351.6 กิโลวัตต์ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วลักษณะการใช้ไฟฟ้าของสถานีผลิตน้ำบางพระ 2 นี้ค่อนข้างจะคงที่ดังนั้นจึงสามารถที่นำค่าการใช้กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยนี้มาเพื่อหาขนาดการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาที่เหมาะสมได้

*3. ความเหมาะสมของการติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแสงอาทิตย์บนหลังคา*

ก่อนการออกแบบติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา ต้องทราบปริมาณความต้องการไฟฟ้าของอาคารที่ต้องการการให้มีการชดเชยการใช้ไฟฟ้าระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา ซึ่งปริมาณความต้องการไฟฟ้าติดตั้งรวมทั้งหมดของสถานีผลิตน้ำ คือ 1,655.85 กิโลวัตต์ ซึ่งอุปกรณ์ส่วนใหญ่เป็นปั๊ม และมอเตอร์ เนื่องจากจำเป็นต้องใช้เพื่อการสูบจ่ายน้ำเป็นหลัก โดยแบ่งภาระทางไฟฟ้าของอาคารเพื่อใช้ในการหาขนาดติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาที่เหมาะสม คือ โรงกรองน้ำ โรงสูบน้ำแรงสูง โรงเก็บจ่ายสารเคมี ขนาด 7×24 ตารางเมตร และ 9.5×15 ตารางเมตร อาคารควบคุมระบบระยะไกล และโรงเก็บจ่ายแก๊สคลอรีน แต่เนื่องจากเปอร์เซนต์ของความต้องการไฟฟ้าของโรงจ่ายสารเคมีทั้งสองที่ อาคารควบคุมระบบระยะไกล และโรงเก็บจ่ายแก๊สคลอรีมีระดับเปอร์เซนต์ของความต้องการไฟฟ้าน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณความต้องการไฟฟ้าติดตั้งทั้งหมดจึงทำการรวมความต้องการไฟฟ้าของทั้งสามอาคารนี้เพื่อหาขนาดติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาที่เหมาะสมดัง Table 1 ดังนี้

**Table 1** Amount of electrical load for each building

| Building | electrical load (kW) | Percent of load (%) |
|---|---|---|
| Water filtration plant | 568.75 | 34.35 |
| High lift pump station | 1026.4 | 62 |
| gathering station | | |
| Chemical storage 7x24 m | 16.5 | 1 |
| Chemical storage 9.5x15 m | 22.5 | 1.36 |
| Chlorine gas storage | 14.8 | 0.89 |
| Scada control room | 6.9 | 0.42 |
| Total load of gathering station | 60.7 | 3.67 |
| Total | 1655.85 | 100 |

การกำหนดขนาดกำลังผลิตติดตั้งสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา กำหนดโดยใช้ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยต่อปีของสถานีผลิตน้ำ ซึ่งข้อมูลการใช้ไฟฟ้าพบว่ามีการใช้กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยต่อปีเท่ากับ 351.6 kW ดังนั้นกำลังผลิตตั้งที่ใช้ในการศึกษากำหนดให้มีค่าเท่ากับ 351.6 kW โดยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้เป็นแผงชนิดโมโนคริสตัลไลน์ ขนาดกำลังไฟฟ้าสูงสุด 410 W ต่อแผง แรงดันไฟฟ้าสูงสุดต่อแผง 44.5 V กระแสไฟฟ้าสูงสุดต่อแผง 9.23 A ที่สภาวะทดสอบมาตรฐาน (STC: Standard Test Conditions) อินเวอเตอร์แบบต่อเชื่อมระบบจำหน่าย(Grid connected inverter) ที่มีกำลังไฟฟ้ากระแสสลับขาออก 100 kW แรงดันไฟฟ้าขาออก 400 V และ กำลังไฟฟ้ากระแสสลับขาออก 20 kW แรงดันไฟฟ้าขาออก 400 V โดยสัดส่วนของการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาแต่ละอาคารนั้นมาจากการการคำนวณตามระดับความต้องไฟฟ้าในแต่ละอาคาร

*4. กระบวนการทดสอบเปรียบเทียบค่าไฟก่อนและหลังติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา*

4.1 ค่าไฟฟ้าก่อนการติดตั้ง

ทำการรวมข้อมูลพลังงานไฟฟ้า (kWh) ที่ใช้ภายใน 1 วันของสถานีผลิตน้ำจากมิเตอร์ AMR โดยแบ่งเป็นวันทำงานกับวันหยุดจากนั้นคำนวณออกมาเป็นค่าไฟฟ้าที่ใช้ภายใน 1เดือน

4.2 ค่าไฟฟ้าหลังการติดตั้ง

ในการคำนวณค่าไฟฟ้าที่ได้หลังจากการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงงานแสงอาทิตย์บนหลังคานั้นจะทำการศึกษาโดยเลือกช่วงเวลาคือ 9.00–17.00 น.ในการทดสอบค่าไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงงานแสงอาทิตย์บนหลังคาโดยการจำลองผ่านโปรแกรม ในส่วนของโปรแกรมที่ใช้สำหรับจำลองจะใช้แค่การศึกษาการไหลกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบและค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา รวมถึงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเท่านั้น โดยขนาดติดตั้งระบบตามที่หาขนาดไว้เบื้องต้นเท่ากับ 351.6 kW โดยแต่ละบัสจะมีความต้องการไฟฟ้าตามอาคารนั้นๆ เชื่อมต่ออยู่ ดัง Fig. 2 ค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงงานแสงอาทิตย์บนหลังคาในสถานีถูกจำลองผ่านไดอะแกรมของโปรแกรม ซึ่งค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้ในแต่ละช่วงเวลาตามที่กำหนดจะไม่เท่ากันเนื่องมาจากค่าความเข้มแสงที่ไม่เท่ากันในแต่ละช่วงเวลา จากนั้นรวมข้อมูลพลังงานไฟฟ้า (kWh) ที่

ใช้ภายใน 1 วันของสถานีผลิตน้ำจากมิเตอร์ AMR และส่วนของผลประหยัดที่เกิดจากการผลิตกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาในช่วงเวลาที่กำหนด และรวมเป็น ข้อมูลค่าไฟฟ้าภายใน 1วันโดยค่าไฟฟ้าที่ได้นี้จะรวมกับค่าไฟฟ้าในช่วงเวลาที่ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ไม่มีการผลิตกระแสไฟฟ้าและช่วงเวลาที่ไม่ได้พิจราณาภายใน 1วัน รวมเป็น 24 ชั่วโมง โดยแบ่งเป็นวันทำงานกับวันหยุดเช่นเดียวกับก่อนการติดตั้งระบบ จากนั้นคำนวณออกมาเป็นค่าไฟฟ้าของแต่ละเดือนตลอดทั้งปี

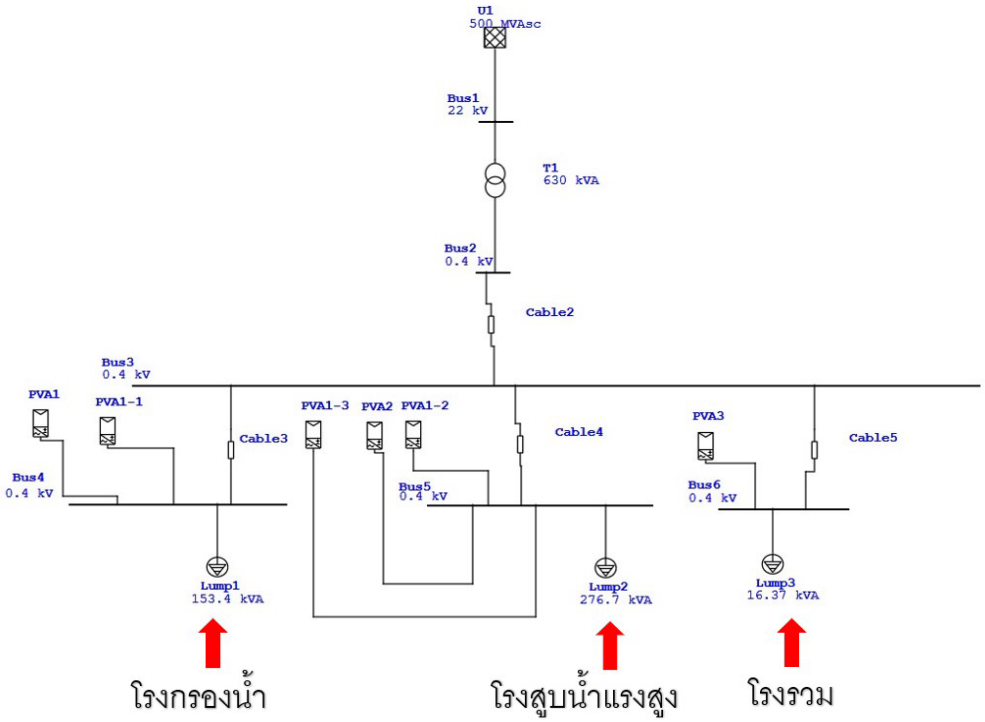



**Fig. 2** Model of installing solar cell in the station

4.3 ค่าตัวประอบกำลังไฟฟ้าก่อนและหลังการติดตั้ง

นอกจากการจำลองการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาในระบบของสถานีผลิตน้ำผ่านโปรแกรมเพื่อเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้า และค่าไฟฟ้าที่ใช้ทั้งก่อนและหลังติดตั้งแล้วยังมีการศึกษาในเรื่องผลกระทบกับค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าซึ่งถือว่าเป็นค่าที่มีความสำคัญต่อระบบไฟฟ้าเนื่องจากจะส่งผลต่อเรื่องของคุณภาพไฟฟ้าในระบบด้วยเนื่องจากการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาเข้ากับระบบจำหน่ายนั้นทำให้มีความต้องการการใช้กำลังไฟฟ้าจริงจากการไฟฟ้าลดลง ขณะที่กำลังไฟฟ้าเสมือนมีค่าเท่าเดิมส่งผลให้ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าลดลงทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของหม้อแปลงลดลง

*5. การวิเคราะห์ด้านความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ในการลงทุนติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์*

การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางด้านการเงินนั้นจะต้องการนำข้อมูลในส่วนของต้นทุนที่ใช้ในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาทั้งหมดมาเพื่อประเมินออกมาเป็นค่าของตัวแปรต่างๆ ที่นำมาใช้เพื่อตัดสินใจในการลงทุน ซึ่งเงินส่วนของต้นทุนโดยรวมอยู่ที่ 11,935,600 บาท รายละเอียดแสดงดัง Table 2

**Table 2** Total cost of solar system

| Cost items | Cost (Bath) |
|---|---|
| Cost of solar panels | 5,274,000 |
| Cost of inverter | 1,230,600 |
| Cost of equipment for wiring systems and inverter work | 1,054,800 |
| Other cost | 4,376,200 |
| Total cost | 11,935,600 |

นอกจากการประเมินในส่วนของต้นทุนการติดตั้งระบบแล้วยังมีการคิดในส่วนของต้นทุนค่าบำรุงรักษาระบบโดยมีค่าเปลี่ยนแปลงตามอัตราเงินเฟ้อ และอัตราราค่าเบี้ยประกันภัยที่คงที่ จากนั้นนำข้อมูลทั้งหมดที่ได้จากการวิเคราะห์มาคำนวณเพื่อประเมินออกมาให้อยู่ในรูปของตัวแปรทางการเงินที่ใช้ในการตัดสินใจเรื่องของความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ในการลงทุนติดตั้งระบบได้แก่

1. มูลค่าปัจจุบันสุทธิ(net present value, NPV) ซึ่งควรมีค่าเป็นบวก
2. อัตราผลตอบแทนภายใน (internal rate of return, IRR) ซึ่งควรจะมีค่ามากกว่าอัตราคิดลด
3. ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period, PB) ซึ่งควรจะมีระยะเวลาน้อยกว่าอายุโครงการ

ผลจากการศึกษาถ้าจะมีความคุ้มค่าทางการเงินในการติดตั้งระบบก็ต่อเมื่อเข้าหลักเกณฑ์ตามที่กำหนดเบื้องต้น

**ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง**

จากการจำลองการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาในวันทำงานและวันหยุดผ่านโปรแกรมดังที่แสดงใน Table 3 ซึ่งเป็นผลการจำลองที่ยกตัวอย่างผลของเดือนมกราคมมาเพียงแค่หนึ่งเดือน โดยใช้ข้อมูลสภาพอากาศและความเข้มแสงอาทิตย์จริงในปีที่ทำการศึกษา ค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ในแต่ละช่วงเวลามีค่าไม่เท่ากันเนื่องจากค่าความเข้มแสงอาทิตย์ที่ไม่เท่ากัน ในช่วงเวลาเที่ยงถึงบ่ายโมงจะเป็นช่วงเวลาที่มีค่าความเข้มแสงอาทิตย์สูงที่สุดทำให้ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงงานแสงอาทิตย์บนหลังคาผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงที่สุดในช่วงนี้ทำให้ประหยัดการใช้ไฟไปได้มาก และจากการศึกษาพบว่าภายในหนึ่งปีสามารถประหยัดค่าไฟได้ 3,350,380 บาท นอกจากการจำลองการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงงานแสงอาทิตย์บนหลังคาเพื่อวิเคราะห์ค่ากำลังไฟฟ้าแล้วยังมีการวิเคราะห์ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปหลังจากการติดตั้งระบบโดยจะมีค่าต่ำสุดประมาณ 0.33 เกิดขึ้นเวลาเที่ยงถึงบ่ายโมงเนื่องจากเป็นช่วงเวลาที่ระบบมีการผลิตกำลังไฟฟ้ามากที่สุด ในส่วนของการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ในการลงทุน ผลการศึกษาได้จากข้อมูลต้นทุนการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงงานแสงอาทิตย์บนหลังคา รวมถึงผลประหยัดที่เกิดค่าไฟที่ลดลงหลังจากการติดตั้งระบบ ดังแสดงใน Table 4 เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการศึกษาทั้งหมดมาวิเคราะห์เพื่อประเมินความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ในการลงทุนผ่านตัวแปรทาการเงินที่กำหนด โดยจะกำหนดให้อัตราคิดลด คือ อัตราที่คำนวณจากต้นทุนของเงินทุนเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก (WACC) เนื่องจากแหล่งที่มาของเงินทุนในโครงการมาจาก 2 แหล่ง คือการกู้ยืมและเงินทุนจากเจ้าของ ซึ่งอัตราคิดลดที่ได้จากการคำนวณมีค่าเท่ากับร้อยละ 8.53

**Table 3** Electrical power consumption before and after installation on working day and holiday

| January | light intensity(kW/m2) | | Work day | | Holiday | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Time | Work day | Holiday | kW | | kW | |
| | | | Before | After | Before | After |
| 9.00 น. | 792 | 793 | 362.4 | 118.4 | 361.2 | 117.0 |
| 10.00 น. | 877 | 876 | 363.6 | 93.4 | 362.4 | 92.5 |
| 11.00 น. | 921 | 919 | 384.0 | 100.2 | 388.8 | 105.6 |
| 12.00 น. | 940 | 937 | 358.8 | 70.3 | 367.55 | 79.5 |
| 13.00 น. | 938 | 934 | 360.0 | 71.0 | 351.6 | 63.9 |
| 14.00 น. | 915 | 910 | 352.8 | 71.0 | 355.2 | 74.9 |
| 15.00 น. | 865 | 857 | 361.2 | 94.7 | 354.0 | 90.0 |
| 16.00 น. | 768 | 755 | 352.8 | 116.3 | 354.0 | 121.4 |
| 17.00 น. | 563 | 537 | 387.6 | 214.8 | 360 | 222.8 |

**Table 4** Electricity cost before and after installation in 1 year

| Month | Electric cost (Bath) | | |
|---|---|---|---|
| | Before | After | Save cost |
| January | 1,239,328.07 | 962,025.32 | 277,302.76 |
| February | 1,110,357.24 | 842,923.46 | 267,433.79 |
| March | 1,287,534.43 | 990,537.21 | 296,997.22 |
| April | 1,176,915.56 | 881,401.47 | 295,514.09 |
| May | 1,216,218.17 | 912,244.76 | 303,973.41 |
| June | 1,207,717.04 | 940,615.45 | 267,101.59 |
| July | 1,210,202.02 | 927,101.62 | 283,100.41 |
| August | 1,249,338.40 | 954,982.60 | 294,355.80 |
| September | 1,210,011.06 | 923,076.93 | 286,934.12 |
| October | 1,254,562.98 | 977,978.19 | 276,584.79 |
| November | 1,272,513.76 | 1,024,987.51 | 247,526.25 |
| December | 1,246,451.49 | 992,895.73 | 253,555.77 |
| Total | 13,434,698.75 | 11,330,770.25 | 3,350,379.99 |

1. มูลค่าปัจจุบันสุทธิ(NPV) ที่ได้จากการวิเคราะห์ มีค่ามากกว่าศูนย์บ่งบอกถึงว่าโครงการมีความคุ้มค่าทางการเงินในการลงทุนเนื่องจากมูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดรับมากกว่ามูลค่าปัจจุบันของเงินลงทุนที่จ่ายไปแสดงว่าเจ้าของโครงการได้รับผลประโยชน์มากกว่าความต้องการขั้นต่ำที่กำหนดไว้

2. อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) ที่ได้จากการวิเคราะห์มีค่ามากกว่าอัตราคิดลดแบบ WACC บ่งบอกถึงว่าโครงการมีความคุ้มค่าทางการเงินในการลงทุน โดยค่าอัตราผลตอบแทนที่ได้เท่ากับ ร้อยละ 31

3. ระยะเวลาในการคืนทุนของโครงการ(PB) ที่ได้จากการวิเคราะห์มีค่าน้อยกว่าอายุของโครงการซึ่งอายุของโครงการกำหนดให้อยู่ที่ 25 ปี โดยระยะเวลาในการคืนทุนของโครงการเท่ากับ 4 ปี 3 เดือน

**สรุปผล**

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาของสถานีผลิตน้ำ บางพระ 2 การประปาส่วนภูมิภาค เพื่อเปรียบเทียบการใช้กำลังไฟฟ้าก่อนและหลังติดตั้ง ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า รวมถึงค่าไฟฟ้าที่ลดลงจะเห็นได้ว่าลักษณะการใช้ไฟเฉลี่ยของสถานีผลิตน้ำนั้นค่อนข้างจะคงที่ และกำลังไฟฟ้าที่ใช้หลังจากการติดตั้งระบบนั้นจะไม่เท่ากันในแต่ละช่วงเวลาเนื่องจากค่าความเข้มแสงอาทิตย์ที่ต่างกันพบว่าในช่วงเวลาเที่ยงถึงบ่ายโมงจะเป็นเวลาที่ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคามีการผลิตพลังงานไฟฟ้ามากที่สุดเนื่องจากเป็นช่วงเวลาที่มีความแสงอาทิตย์มากที่สุดทำให้มีการใช้กำลังไฟฟ้าจากการไฟฟ้าน้อยสุด แต่การติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคานั้นจะส่งผลต่อค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าทำให้ค่าลดลงจากภาวะปกติก่อนการติดตั้ง และพบว่าค่าไฟฟ้าภายใน 1 ปีก่อนการติดตั้ง จะอยู่ที่ 13,434,699 บาท และหลังติดตั้งอยู่ที่ 11,330,770 บาท สามารถประหยัดไปได้ 3,350,380 บาท และในส่วนสุดท้ายคือผลการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ชี้ให้เห็นว่าการลงทุนติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคามีความคุ้มค่าทางการเงินในการลงทุนตามผลการศึกษา

**กิตติกรรมประกาศ**

ขอขอบคุณหน่วยงานการประปาส่วนภูมิภาค เขต 1ในการเอื้อเฟื้อข้อมูลสำหรับการศึกษาครั้งนี้ทำให้บทความนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ และทำให้บทความนี้เกิดประโยชน์แก่ผู้อ่านได้มากที่สุด

**เอกสารอ้างอิง**

Jintaka, D.R., Ridwan, M., Kusuma, A.A., et al. 2019. Analysis of voltage and power factor fluctuation due to photovoltaic generation in distribution system model. In: International Conference on Technologies and Policies in Electric Power & Energy. 21–22 October 2019, Yogyakarta, Indonesia.

สุรกิจ ทองสุก, อรรถพล เจ่าพิทักษ์กุล. 2561. การศึกษาประสิทธิภาพและความคุ้มทุนของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา. วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ 10: 157–169

ราชันย์ ชูชาติ. 2562. การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางการเงินของโครงการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ กรณีศึกษาโรงงานผลิตไม้ยางพาราแปรรูปในจังหวัดตรัง, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

กระทรวงพลังงาน. 2563. แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2561–2580 (AEDP2018)

# Identifying the influential factors on the waste separation behavior of university students for sustainable solid waste management

Nine Yawai Phyo Ei[a], Nattapon Leeabai[b,*]

[a]Master of Engineering Program in Sustainable Energy and Resources Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

[b]Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: fengnpl@ku.ac.th

**Abstract**

Human behavior is an important factor in addressing environmental problems with a sustainable approach. The determinant factors on human waste separation behavior were investigated to tackle solid waste management issues. Therefore, this study aims to examine the key factors that influence the waste separation behavior of students at Kasetsart University (KU) in Thailand and various universities in Myanmar. The extended theory of planned behavior model was applied to identify the main influential factors on the students' waste separation intention. Questionnaire surveys were conducted at KU with 441 respondents and in Myanmar with 429 respondents. The results showed that the perceived behavior control (PBC) ($\beta$= 0.839) was the strongest predictor for the intention of KU students, whereas attitude ($\beta$= 0.702) was the most influential factor on Myanmar students. In gender analysis, the intention of female students in KU was determined by the information publicity ($\beta$= 0.832). Female students showed a stronger positive intention compared to male students in Myanmar. Based on this finding, students have a positive attitude and belief in their abilities to separate solid waste at source. The findings of this study can provide valuable indicators for waste management authorities in Myanmar and Thailand.

**Keywords:** Gender, Solid waste management, Theory of planned behavior, University students, Waste source-separation

## Introduction

In the present day, the rate of solid waste generation is significantly increasing, and the global generation of municipal solid waste (MSW) is expected to reach 2.6 billion tons per year in 2030 (Kaza et. al., 2018). When these accelerated solid wastes are not properly managed, it can not only lead to various environmental issues but also have an impact on public health. In order to mitigate these problems, effective waste management practices are crucial. One effective way to mitigate this problem is waste separation at the source. Source separation not only increase the recycling efficiencies but also reduce the greenhouse gas emissions from further processes i.e., landfilling and incineration (Dong et al., 2013; Liikanen et al., 2017).

In Thailand, the recycling rate of MSW is merely 9% which is significantly lower than the global average of 13.5% (Kaza et al., 2018). The low recycling rate indicates that waste separation at source is still not sufficient in Thailand. In Myanmar, the MSW management is still at the preliminary stage and there are no specific waste separation activities at source. Therefore, valuable indicators and strategies that encourage and persuade the public are required to implement a waste separation system in Thailand and Myanmar.

It has been revealed that waste separation efficiency can be improved by environmental education, awareness campaigns, policies, and initiating incentives programs (Sukholthaman and Sharp, 2016). To implement effective waste separation activities, it is important to understand and analyze human perceptions and behaviors (Hu et al., 2021). Human behavior is influenced by many factors including demographic variables and psychological factors. In terms of psychological factors, theory of planned behavior (TPB) model is widely applied to understand and predict human behavior (Ajzen, 1991). In TPB model, behavioral intention is a central factor to predict the behavior of a person. Behavioral intentions are largely influenced by three main determinants: attitude, subjective norm, and perceived behavioral control (PBC). According to the TPB, PBC can directly predict behavior along with intention. The original TPB model is enhanced by combining it with additional predictors that are relevant to the specific context and background of the research problem (Li et al., 2018). It was found that waste separation behavior is also controlled by additional factors, including situational factors, knowledge, and information publicity (Vassanadumrongdee and Kittipongvises, 2018; Wang et al., 2019; Pongpunpurt et al., 2022). A deficiency in information related to certain behaviors can hinder individuals from executing these behaviors (Pettigrew et al., 2001). Therefore, the information publicity factor was considered as an additional factor in the enhanced TPB model of this study.

In fact, there are no studies using the TPB model to predict university students' behavioral intention towards waste separation in Myanmar and such studies have been limited in Thailand. This study aims to identify the influencing factors on waste separation intention among university students at Kasetsart University (KU) in Thailand and various universities in Myanmar using TPB model. The findings of this study can provide valuable indicators for waste management authorities in Myanmar and Thailand in implementing source separation practices.

## Materials and Methods

*Design of behavioral questionnaire*

The questionnaire consisted of five sections which are attitude, subjective norm, perceived behavioral control, information publicity, and intention. Some questions were selected from the relevant studies and question items in each variable were mainly designed for waste to energy, composting, and recycling as shown in Table 1. A five-point Likert response scale was applied to measure the perceptive of respondents for each question. In which, 1 indicates “strongly disagree” and 5 indicates “strongly agree”. Demographic information was also collected such as age, gender, and the field of education.

**Table 1** List of behavior questions

| Factors | Measurement items | Remark |
|---|---|---|
| Attitude | It is necessary for me to waste separation. | (Ghani et al., 2013) |
| | Managing waste without separation can cause severe environmental pollution problems. | (Wang et al., 2019) |
| | Processing waste into energy for public is good for environment. | This study |
| | Waste composting is useful and can reduce greenhouse gas emissions. | This study |
| Subjective norms | The extent to which my friends influence me to segregate the wastes at source. | (Mak et al., 2019) |
| | The laws and regulations of waste separation could restrain me. | (Wang, 2021) |
| | Most people in my community are aware of the benefits of converting waste to energy. | This study |
| | I feel guilty about food wasting when I think of the numerous people who do not have reliable access to edible food. | (Soorani and Ahmadvand, 2019) |
| Perceived behavioral control | I am very interested in converting waste to energy. | This study |
| | I am very happy that the separation of waste at source can help improve the recycling rate. | (Wang, 2021) |
| | The extent to which I am confident about waste segregation. | This study |
| | The decision to separate my food waste at source is entirely up to me. | (Ghani et al., 2013) |
| Information publicity | I can obtain information about the types of waste that can be recycled and how to segregate the waste in my everyday life. | (Wang et al., 2019) |
| | The information publicized about waste separation is understandable and has clear messages. | |
| | Promoting various types of information publicity campaigns for waste separation in Thailand or Myanmar is important. | This study |

**Table 1** (Continued) List of behavior questions

| Factors | Measurement items | Remark |
|---|---|---|
| | Separating waste for energy conversion would be easy, if the bin indicated icon and name of target wastes. | This study |
| Intention | I am willing to separate the waste appropriately. | This study |
| | I intend to notify my friends, family, and neighbors to separate the waste before disposing. | (Soorani and Ahmadvand, 2019) |
| | I am willing to dedicate my time to separating food waste into the compostable bin. | This study |
| | I will make an effort to separate my waste once it will be able to convert waste into energy. | This study |

*Data collection and analysis*

In these surveys, the respondents were university students at Kasetsart University (KU, Bangkhen) in Thailand and various universities in Myanmar. The number of sufficient sample size was calculated by using Krejcie and Morgan (1970) method. The minimum required sample size was 380 of 36,778 persons for KU's respondents and 362 of 6,161 persons for Myanmar respondents, with a 95% confidence level. Proportionate stratified random sampling was applied to ensure a balanced representation of all faculties for KU, and random sampling method was used for Myanmar. The required data was collected from 4$^{th}$ September 2023 to 4$^{th}$ October 2023. The questionnaire was distributed by using online media for Myanmar while field survey was performed at KU. Participants were asked in their native languages, Thai, and Burmese. There were 441 respondents (25.7% male, 72.5% female and 1.8% unspecified) for KU and 429 respondents (28% male, 71.1% female and 0.9% unspecified) for Myanmar.

The data analysis was performed by using Excel® add-in software. The reliability of behavioral factors was analyzed by using Cronbach's alpha to assess the internal consistency of a test. The value ranges from 0 to 1 and cut-off acceptable value can vary depending on the context (Hinton et al., 2014). Linear regression analysis was applied to evaluate the effect of influential factors on behavioral intention in TPB based on the whole sample, and gender and educational field. However, the factors that influence across the academic fields for Myanmar was not analyzed. Independent sample t test analysis (Welch's t test) was employed to examine the significant difference in behavioral factors between male and female students. The analysis was tested at 5% and 10% significant level.

## Results and Discussion

*Reliability of behavioral factors*

The results of reliability of behavioral factors for each section are shown in Table 2. The Cronbach's alpha coefficient values were between 0.5–0.8 expect PBC in Myanmar, which are considered moderate reliability (Hinton et al., 2014).

**Table 2** Cronbach's alpha coefficient for each of the factors for students in KU and Myanmar

| | Attitude | Subjective norm | Perceived behavioral control | Information publicity | Intention |
|---|---|---|---|---|---|
| KU | 0.69 | 0.66 | 0.63 | 0.6 | 0.81 |
| Myanmar | 0.64 | 0.52 | 0.45 | 0.50 | 0.70 |

*Behavior factors influencing waste separation intention*

The linear regression analysis of TPB model showed that attitude, subjective norms, PBC, and information publicity factors had positive effects on the intention to perform waste separation at source. As shown in Fig. 1, PBC ($\beta = 0.84$, $p < 0.05$) was the strongest predictor of intention. This result aligned with the other studies (White et al., 2009; Hasan et al., 2015), indicating that PBC significantly influenced the intention of students to reduce plastic waste consumption. PBC is related to individuals' self-efficiency and control belief in their actions. The results suggested that the behavior of KU students is strongly influenced by their confidence in performing waste separation. Meanwhile, attitude ($\beta = 0.7$) was the most crucial factor for Myanmar students' waste separation intention. This result agreed the notion that attitude is considered as the strongest indicator of an individual's intention (Ajzen, 1991). Universities in Myanmar have environmental clubs that spread awareness regarding environmental conservation. Additionally, there are environmental activities and campaigns both on social media and onsite to advocate environmental awareness. Organizations such as the Thant Myanmar, the Prevent Plastics Myanmar, and the Recyglo Myanmar are partnering with universities and youth groups to educate students at the university level about waste management (RecyGlo, 2024; Thant Myanmar, 2024; Prevent Plastics, 2024). These initiatives might be the reasons that Myanmar students have strong attitudes towards waste separation intentions. However, there are inadequate facilities and systems for waste sorting such as trash bins and visual prompts. It might hinder their performances and beliefs compared with KU's students. In addition, KU has implemented waste separation activities and projects. For example, waste bank project, waste separation bin contest, and waste sorting point in Kasetsart fair may increase the students' confidence in waste segregation performance (Kasetsart University, 2022). These factors could contribute to the differing intentions between Myanmar students and Thai students.

Overall, subjective norm ($\beta = 0.6$ for Thai, and $\beta = 0.23$ for Myanmar) was the weakest impact on students' intention, and this result was contrasted with previous studies (Vassanadumrongdee and

Kittipongvises, 2018; Pongpunpurt et al., 2022). It could be concluded that people in this study can prioritize their personal beliefs rather than societal norms.

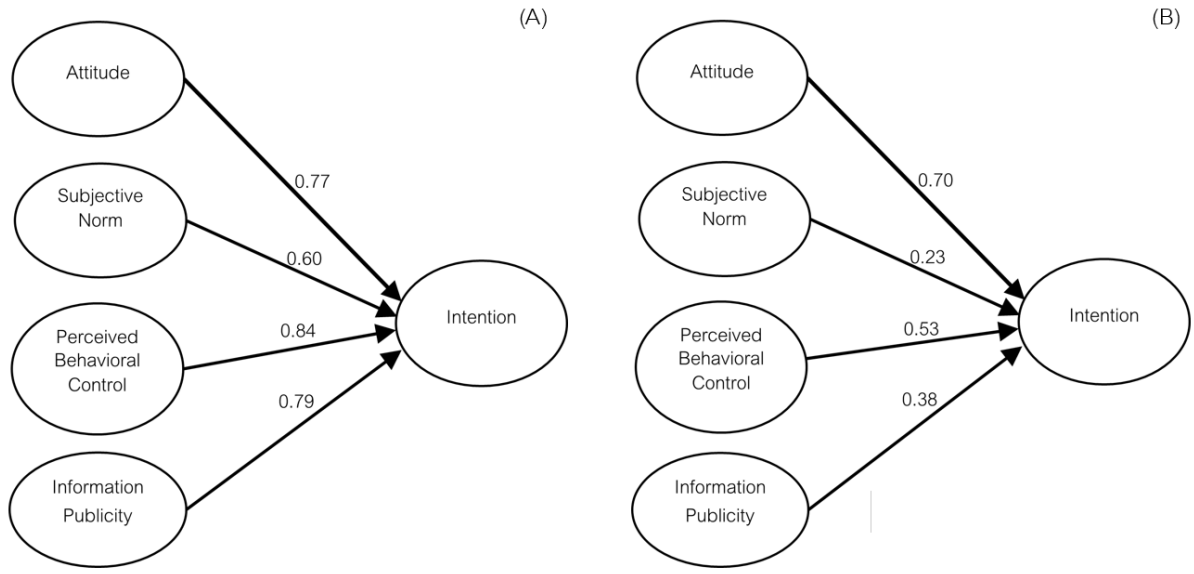



**Fig. 1** Factors influencing on waste separation intention: (A) KU and (B) Myanmar universities

*Behavior factors influencing waste separation intention according to gender*

According to the result of Welch's t test (Table 3), the significant difference of attitudes, PBC and information publicity toward waste separation intention between female and male was found ($p$ = 0.047 for attitude, $p$ = 0.095 for PBC, $p$ = 0.09 for IP). The results suggested that female students of KU have more positive attitudes and information toward waste separation intention compared with male students. Conversely, male students have more control beliefs than female students. This study revealed that the mean values of attitude, subjective norm, and information publicity for females were higher than those for males. On the other hand, the mean values of PBC and intention variables for males were greater than those for females. Therefore, the differential practices may encourage the effective waste separation for male and female students of KU. For the students of Myanmar (MM), there are no significant differences for all variables between female and male students. However, it was slightly found that females were more likely to engage in separation behavior than male students. This effect might be caused by the traditional responsibility of females in Myanmar culture for household waste disposal, minimizing waste, and excessive consumption (Aye, 2018).

As the result of analysis of influential factors with respect to gender (Table 4), PBC (β=0.83) was the strongest predictor to predict the male students of KU' waste separation intention. It was found that the intention of KU's female students was influenced by the combination of PBC and information publicity (β=0.83). In contrast, attitude (β=0.65, β=0.73) was the largest contribution to explain the intention towards waste separation for both male and female students in Myanmar. It can be concluded that female students' intention was influenced by PBC, information publicity and attitude factors, whereas PBC and attitude were the influential factors on the male students' intention to sort the waste.

**Table 3** Welch's t test result

| | *n (KU)* | M | df | t | *p* | *n(MM)* | M | df | t | *p* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Female (Attitude) | 319 | 4.51 | 172 | 1.68 | 0.047** | 305 | 4.47 | 202 | 0.74 | 0.23 |
| Male (Attitude) | 114 | 4.41 | | | | 120 | 4.43 | | | |
| Female (Subjective norm) | 319 | 3.81 | 192 | 0.02 | 0.49 | 305 | 3.52 | 198 | 0.86 | 0.20 |
| Male (Subjective norm) | 114 | 3.80 | | | | 120 | 3.45 | | | |
| Female (PBC) | 319 | 4.16 | 216 | -1.31 | 0.095* | 305 | 4.25 | 197 | 1.06 | 0.14 |
| Male (PBC) | 114 | 4.23 | | | | 120 | 4.20 | | | |
| Female (IP) | 319 | 4.30 | 188 | 1.37 | 0.09 | 305 | 3.93 | 224 | 0.05 | 0.48 |
| Male (IP) | 114 | 4.22 | | | | 120 | 3.93 | | | |
| Female (Intention) | 319 | 4.10 | 270 | -1.06 | 0.15 | 305 | 4.46 | 228 | 0.00 | 0.50 |
| Male (Intention) | 114 | 4.01 | | | | 120 | 4.46 | | | |

Remarks: **5% significant level, *10% significant level, PBC = Perceived behavioral control, IP= Information publicity, M = mean

**Table 4** Behavior factors influencing waste separation intention with respect to gender

| Factors | Male (KU) | Female (KU) | Male (MM) | Female (MM) |
|---|---|---|---|---|
| Attitude | 0.73 | 0.77 | 0.65 | 0.73 |
| Subjective norm | 0.53 | 0.61 | 0.25 | 0.22 |
| Perceived behavioral control | 0.83 | 0.83 | 0.44 | 0.58 |
| Information publicity | 0.72 | 0.83 | 0.39 | 0.37 |

*Behavior factors influencing waste separation intention with respect to educational field*

The result (Table 5) showed that PBC was the strongest predictor to predict the students' intention to segregate the waste in most faculties, whereas attitude was the most influential factor for group 1 and 2 faculties. It could be a reason that students in these two faculties are related to environment and animal studies that could lead to awareness of consequences of waste issue.

**Table 5** Behavior factors influencing waste separation intention with respect to educational field

| Items | Group 1 | Group 2 | Group 3 | Group 4 | Group 5 | Group 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Attitude | 0.88 | 1.42 | 0.77 | 0.70 | 0.67 | 0.67 |
| Subjective norm | 0.40 | 0.72 | 0.65 | 0.62 | 0.62 | 0.56 |
| Perceived behavioral control | 0.74 | 0.98 | 0.80 | 0.78 | 0.99 | 0.85 |
| Information publicity | 0.86 | 1.15 | 0.78 | 0.71 | 0.75 | 0.74 |

Remarks: Group 1– Agriculture, Fishery and Forestry, Group 2 - Veterinary Technology and Veterinary Medicine, Group 3 – Social Science, Economics, and Business administration, Group 4 -Humanities and Education, Group 5 – Science, Agricultural Industry, and Environment, Group 6 – Engineering and Architecture

## Conclusion

This study investigated the crucial factors that influence university students' waste source separation intention. The results revealed that all factors had positive effects on the intention. Among all factors, the most influential factors were attitude, PBC, and information publicity according to whole sample, gender, and education field. It was found that students are willing to participate in waste separation when they have access to information and different waste bin types easily. Therefore, different waste bin types for source separation should be provided to enhance public participation in waste separation. Moreover, information publicity, education, and incentive programs should also be offered to increase waste separation rate. The findings of this study can support the design strategies to implement waste separation at source and plan of waste management.

## Acknowledgements

This research fund was supported by Faculty of Engineering, Kasetsart University, Thailand (New researcher in Ph.D. level, 66/05/ENV). The surveys were collected by students who contribute to the Sustainable Trash Management Research and Development Laboratory (Trash Lab). The author would like to deeply thank National Research Council of Thailand for scholarship and Dr.Nattapon Leeabai for his grateful advice.

## References

Ajzen, I. 1991. The theory of planned behavior. Organizational behavior and human decision processes. 50: 179–211.

Aye, T.T. 2018. The role of rural women in environmental management in Myanmar: A case study of ngaputaw township. Open Science Journal 3. doi.org/10.23954/osj.v3i1.1075

Dong, J., Ni, M., Chi, Y., Zou, D., Fu, C. 2013. Life cycle and economic assessment of source-separated MSW collection with regard to greenhouse gas emissions: A case study in China. Environ Sci Pollut Res Int. 20: doi.org/10.1007/s11356-013-1569-1

Ghani, W.A.W.A.K., Rusli, I.F., Biak, D.R.A., Idris, A. 2013. An application of the theory of planned behaviour to study the influencing factors of participation in source separation of food waste. Waste Manage 33 (5): 1276–1281.

Hasan, S.N.M.S., Harun, R., Hock, L.K. 2015. Application of theory of planned behavior in measuring the behavior to reduce plastic consumption among students at Universiti Putra Malaysia, Malaysia. Procedia Environ. Sci. 30: 195–200.

Hinton, P.R., McMurray, I., Brownlow, C. 2014. SPSS explained. 2nd ed. Routledge. London, UK.

Jiarong, H., Tang, K., Qian, X., Sun, F., Zhou, W. 2021. Behavioral change in waste separation at source in an international community: An application of the theory of planned behavior. Waste Manage 135: 397–408.

Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P. Woerden, F.V. 2018. What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050. World Bank Publications.

Krejcie, R.V., Morgan, D.W. 1970. Determining sample size for research activities. Educ. Psychol. Meas. 30: 607–610. doi.org/10.1177/001316447003000308.

Li, J., Zuo, J., Cai, H., Zillante, G. 2018. Construction waste reduction behavior of contractor employees: An extended theory of planned behavior model approach. J. Clean Prod. 172: 1399–1408.

Liikanen, M., Havukainen, J., Hupponen, M. Horttanainen, M. 2017. Influence of different factors in the life cycle assessment of mixed municipal solid waste management systems–A comparison of case studies in Finland and China. J. Clean Prod. 154: 389–400.

Mak, T.M., Iris, K., Wang, L., Hsu, S.-C., Tsang, D.C., Li, C., Yeung, T.L., Zhang, R., Poon, C.S. 2019. Extended theory of planned behaviour for promoting construction waste recycling in Hong Kong. Waste Manage 83: 161–170.

Thant Myanmar. 2024. Environmental Education (Higher Education/University Level). Myanmar. https://thantmyanmar.org/edu/university, 20 January 2024.

Pettigrew, K.E., Fidel, R., Bruce, H. 2001. Conceptual frameworks in information behavior. Annu. Rev. Inform. Sci. 35: 43–78.

Prevent Plastics. 2024. Sustainable waste management. Myanmar, https://preventplastics.org/component-type/sustainable-waste-management/. 20 January 2024.

Pongpunpurt, P., Muensitthiroj, P., Pinitjitsamut, P., Chuenchum, P., Painmanakul, P., Chawaloesphonsiya, N., Poyai, T. 2022. Studying waste separation behaviors and environmental impacts toward sustainable solid waste management: A case study of bang chalong housing, samut prakan, Thailand. Sustainability 14: 5040.

RecyGlo. 2024. Recyglo Myanmar. Myanmar, https://www.recyglo.com/recyglomyanmar. 20 January 2024.

Soorani, F., Ahmadvand, M. 2019. Determinants of consumers' food management behavior: Applying and extending the theory of planned behavior. Waste Manage 98: 151–159.

Sukholthaman, P., Sharp, A. 2016. A system dynamics model to evaluate effects of source separation of municipal solid waste management: A case of Bangkok, Thailand. Waste Manage 52: 50–61.

Kasetsart University. 2022. Recycling Program for University Waste. Thailand, https://vehicle.ku.ac.th/index.html/wp-content/uploads/2022/01/KU-waste.pdf. 20 January 2024.

Vassanadumrongdee, S., Kittipongvises, S. 2018. Factors influencing source separation intention and willingness to pay for improving waste management in Bangkok, Thailand. Sustain. Environ. Res. 28: 90–99.

Wang, S., Wang, J., Zhao, S., Yang, S. 2019. Information publicity and resident's waste separation behavior: An empirical study based on the norm activation model. Waste Manage 87: 33–42.

Wang, X. 2021. Analysis of influencing mechanism on waste separation behavior in Shanghai. Sustain. Energy Technol. Assess. 47: 101479.

White, K.M., Smith, J.R., Terry, D.J., Greenslade, J.H., McKimmie, B.M. 2009. Social influence in the theory of planned behaviour: the role of descriptive, injunctive, and in-group norms. Br. J. Soc. Psychol. 48: 135–158.

# Microfibres shedding from polyamide fabric by sequent washing process

Fauzul Rizqa[a], Sucheela Polruang[b]

[a]Department of Sustainable Energy and Resources Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

[b]Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: fauzul.r@ku.th

**Abstract**

The increased amount of plastic production results in a huge volume of plastic waste in the aquatic environment even in the smaller size called microplastics (MP). The major source of MP is from the production and domestic washing process in textiles in the form of microfibres (MF). Due to the fast fashion trend, synthetic fibre such as polyamide has dominated in textile market. Therefore, to reduce textile waste, some large fashion firms have introduced recycling schemes. However, the environmental impact of recycled textiles has not been clear yet. In this research, not only the number but also the size of released MF from the sequent washing process of both original (PA) and recycled polyamide (R-PA) fabric are investigated. The plain weave fabric specimens were washed up to 20 cycles, according to ISO 4484-1:2023 under some modifications. The results revealed that woven PA fabric released 13.6-fold more fibres than R-PA in cycle 0. In the first washing cycle terms, PA fabric contributed to the highest MF shedding roughly 10628.10±884.14 fibres/kg. Nevertheless, there was a reduction in MF shedding with the increasing washing cycles. As a result of average size, R-PA shed longer and larger fibres than PA fabric.

**Keywords**: Microfibre, Original polyamide, Recycled polyamide, Washing process

## Introduction

As Boucher and Friot (2017) stated, plastics have been widely used and their production has accelerated exponentially, to more than 200 million tons per year because of low cost and high durability. This huge number is closely tied to the production and consumption of textile materials. Furthermore, the fast fashion phenomenon is a notable reason for the increment of synthetic fibres in textile industries. Thus, most fashion brands produce many garments and waste rapidly. A case in point, Thailand as the 11$^{th}$ largest Asian exporter, produces and exports a tremendous volume of fabrics as well as apparel to many countries in the world (Thailand Board of Investment, 2018). In 2021, global polyamide (PA) production was stated at 5.87 million metric tons and 15–104 fibres/m$^3$ were found in a wastewater treatment plant (WWTP) in Thailand (Maw et al., 2022; Statista Research Department, 2023). In addition, Browne et al. (2010) explained that fibres from domestic washing of synthetic textiles were the highest source of MP due to the shedding process and led to WWTP. As a result, some industries have tried to reduce plastic waste through recycling schemes. Recycling could minimize the usage number of raw materials as well as energy costs (Özkan and Gündoğdu, 2021). However, the usage of recycling materials is still unclear whether they have a significantly negative impact on the environment or not.

In some previous studies, most researchers analyzed the shedding of microfibres (MF) from the washing process of original fabric type such as polyester. Özkan and Gündoğdu (2021) observed three washing cycles of knitted fabric from original (PES) and recycled polyester (R-PES) yarns under similar washing conditions based on ISO 105-C06:2010 standard. The authors found that R-PES fabric released MF 2.3-fold higher than PES. Moreover, Rathinamoorthy and Raja Balasaraswathi (2022b) revealed significant MF reduction was observed in PES knitted fabric during the first 15 wash cycles and remained stable after the 15$^{th}$ cycle. Otherwise, Berruezo et al. (2020) investigated there was an unstable level in MF shedding by washing plain weaves PES up to 5 cycles. Consequently, to further understand the effect of the washing process on MF shedding, this study intends to compare the number and size of released MF from the washing process for both original (PA) and recycled polyamide (R-PA) fabric in sequent washing.

## Materials and Methods

*Preparation of fabric specimens*

The specimens were cut to dimensions of 8 cm × 14 cm using scissors from each type of PA fabric sheet. Four specimens for each cycle and type were prepared with a final size of 4 cm × 10 cm. All edges of specimens were folded double hem and sewed with cotton thread to avoid fibres and thread release during washing (ISO 4484-1:2023). In advance of the washing process, the specimens were analyzed by Fourier Transform Infrared (FTIR) spectrometer to confirm the materials. To remove possible particles from the surface, the specimens were pre-washed with distilled water.

*Washing and drying of fabric specimens*

According to ISO 4484-1:2023 and Ferreira et al. (2020), first, each specimen was put in a 250 mL Erlenmeyer flask filled with 200 mL of distilled water. In each wash cycle, the flasks were shaken using a shaker at 140 rpm for 30 minutes. Fabric specimens were washed up to 20 cycles and each cycle was carried out in four flasks. This research was set out with “cycle 0” by soaking the specimens for 30 minutes (without shaking) to know the initial MF loss before washing. Wash water and fabric specimens were taken after cycles 0, 1, 10, and 20 for analysis. For wash water sampling, the wash water of three flasks (total 600 mL) was collected into a glass bottle with a metal lid. The whole collected wash water was filtered and analyzed by stereo microscope whereas the wash water in the remaining flask was measured by pH meter and conductivity meter. Meanwhile, the fabric specimens were dried in an oven at 60°C for 2–3 hours. After drying, fabric specimens were washed in the next cycle. Duplicate experiments were performed for each type of fabric. Additionally, a control was prepared for each set, where the procedure was almost the same as the experimental set. However, for this control set, specimens were only soaked in distilled water without shaking.

*Counting and imaging*

The MF shedding was identified and counted using the filtration process. First, the 600 mL of collected wash water samples were filtered through cellulose and GF/C filter paper with a diameter of 47 mm using a vacuum pump at room temperature. All filter papers were weighed and dried at 105°C for an hour before and after filtration. Next, the filter papers were put in the desiccator to cool the temperature and avoid humidity (Kaeokhiao & Polruang, 2021).

In addition, to count the number of fibres, the filter papers were examined by a stereo microscope (Olympus SZ61) with 10x–50x magnification. The image of each fibre was taken by ImageView software which connected with the stereo microscope and the captured images corresponded to 100% of the total surface on the filter paper. Last, ImageJ software was used to measure the length and diameter of the fibres.

*Quality assurance*

During the experiment and analysis, the sample contamination was minimized. Prior to use, all the apparatus was cleaned with distilled water. The specimens and filter papers were kept inside the aluminium foil and stored in a dry place. Moreover, laboratory gloves and coat were worn during the experiment and analysis (ISO 4484-1:2023). To assess the level of contamination from external sources, two sets of control samples were prepared.

## Results and Discussion

*Comparison between MF shedding of original and recycled polyamide fabrics*

Table 1 demonstrates the MF shedding of both plain weave PA and R-PA fabric in consecutive washes. The results indicate that PA fabric releases 13.6 times more fibres (23123.73±12048.07 fibres/kg) than R-PA

(1706.48±804.44 fibres/kg) in cycle 0. According to Vassilenko et al. (2021), the highest initial MF shedding from textile was due to the presence of loose fibres during the manufacturing process. In contrast with Özkan and Gündoğdu (2021), the authors found the R-PES knitted releases higher (368094.07 fibres/kg) than PES (167436.58 fibres/kg). In addition, Yang et al. (2019) who reported the MF shedding only from the original fabric, they estimated the most released MF is from original plain PA fabric in the 32.736 to 43.564 fibres/kg range. Hence, the woven R-PA fabric is more sustainable instead of the PA and R-PES knitted due to less MF shedding and emissions especially during production process as well as can reduce the volume of waste than the original material.

**Table 1** Number of MF shedding based on the fabric type and sequent washing

| Type of fabric | Number of released MF (fibres/kg) | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Cycle 0 | | Cycle 1 | | Cycle 10 | | Cycle 20 | |
| | (I) | (II) | (I) | (II) | (I) | (II) | (I) | (II) |
| PA | 14604.46 | 31643.00 | 11253.28 | 10002.91 | 6329.38 | 10127.00 | 6251.56 | 8752.18 |
| Mean±SD | 23123.73±12048.07 | | 10628.10±884.14 | | 8228.20±2685.33 | | 7501.88±1768.21 | |
| R-PA | 1137.65 | 2275.31 | ND | ND | ND | ND | ND | ND |
| Mean±SD | 1706.48±804.44 | | 0.0±0.00 | | 0.0±0.00 | | 0.0±0.00 | |

ND: not detected (detection limit is 1 fibre in 600 mL wash water)

*Effect of sequent washing on MF shedding*

In the first cycle, PA fabric sheds the highest number of MF about 10628.10±884.14 fibres/kg (Table 1) followed by the reduction of MF shedding in the $10^{th}$ and $20^{th}$ cycles up to 23% and 29%, respectively. Not only the manufacturing process, but also other factors such as thermal insulation, absorbency and density affect the MF shedding. As stated by Cooke (2011), the lower thermal insulation and absorbency of PA affected more MF shedding in wash water.

Nonetheless, there is no detected MF from R-PA fabric likely due to lower density ($\rho$ = 1100 kg/m$^3$) than PA ($\rho$ = 1140–1150 kg/m$^3$). The lower density was correlated with the greater water absorbency and ability to trap air which influenced the less release (Song and Mandal, 2016).

*Effect of fabric type and size of released MF*

In the case of MF size, each fibre was measured in length and diameter, then was calculated as the mean value. Fig. 1 below illustrates the measurement of MF size using ImageJ software.

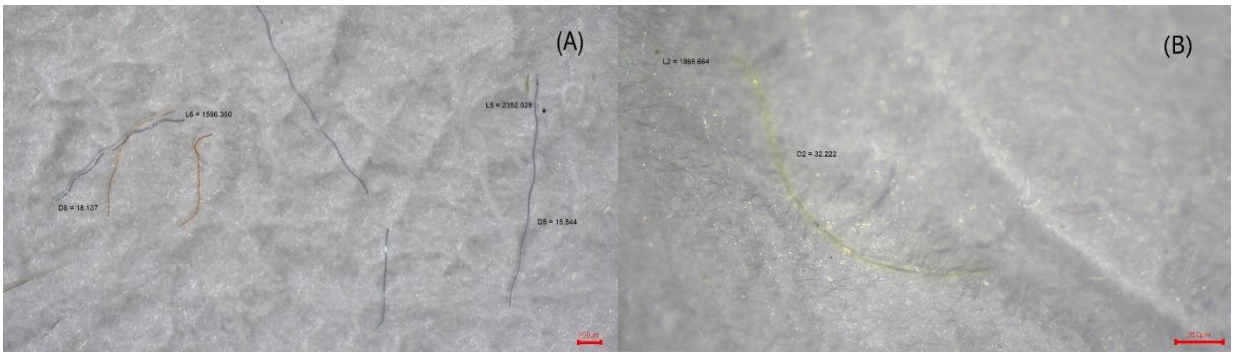



**Fig. 1** Microfibres loss from (A) PA (original); (B) R-PA (recycled polyamide) fabric
Note: The red bar indicates 250μm.

First, the average length of MF shedding varies from 0.2279 mm to 1.5432 mm in all cycles. During the washing cycles of PA and R-PA fabric, the length of released fibres is highly variant. Before calculating as an average, the maximum and minimum lengths are 6.0026 mm and 0.0253 mm for PA, whilst 1.8697 mm and 0.3575 mm for R-PA fabric. In cycle 0 terms, R-PA releases longer (1.3060±0.2721 mm) fibres than PA (0.9831±0.7921 mm). This result is in line with Frost et al. (2020) that recycled fibres shed longer than the original because of the higher elongation behavior which the fibres tend to elongate with external force instead of breaking and shed as fibres. Whereas, in consecutive washes, PA fabric distinctly releases between 0.3967±0.0646 mm and 0.8656±0.8932 mm in average length.

Furthermore, according to the data collection of PA and R-PA fabric, the diameter of shed MF is in the range of 0.0056–0.0365 mm and 0.0116–0.0322 mm, respectively. Then, most fibres are 0.01–0.02 mm in diameter. As previous average length analysis, the average diameter of R-PA fabric is also wider roughly 0.0237±0.0025 mm than PA.

Thus, MF shedding from washing process will end up in the aquatic environment as well as can be ingested by marine animals even human body that can threaten the metabolism (Periyasamy and Tehrani-Bagha, 2022). Cox et al. (2019) estimated 74,000–121,000 fibres per person were found in Canada during inhalation. Then, around 36.5% of measured 504 fishes had synthetic polymer ingested. Fibres are also found both in returnable and single-use plastic bottles around 118±88 particles/L and 14±14 particles/L, respectively as well as 367 particles/kg in Himalayan rock salt (Kim et al., 2018; Kosuth et al., 2018).

*FTIR analysis*

To confirm the composition of polyamide fabric, specimens were analyzed using FTIR spectrometer (Bruker Alpha II). Each spectrum is automatically searched and matched to the spectra from the database. The identity is determined based on matching peak wavenumber positions in the spectral range of 4000 $cm^{-1}$ to 400 $cm^{-1}$.

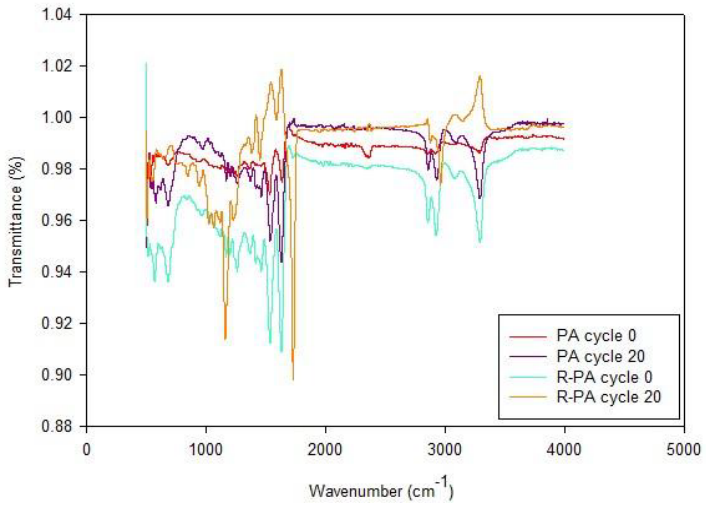



**Fig. 2** FTIR spectra original and recycled polyamide fabric

Fig. 2 represents FTIR spectra of PA and R-PA fabric in cycles 0 and 20. In both cycles of R-PA fabric, there are some significant contrasts. Both spectra of R-PA generate the greatest and lowest percentage of transmittance up to 1.02% and 0.90%, respectively. Otherwise, a spectrum of PA illustrates few differences. Jung et al. (2018) indicated the characteristics of peak absorptions of PA were 3298 $cm^{-1}$ (N–H stretch), 2932 $cm^{-1}$ and 2858 $cm^{-1}$ (CH stretch), 1634 $cm^{-1}$ (C=O stretch), 1538 $cm^{-1}$ (NH bend, C–N stretch), 1199 $cm^{-1}$ ($CH_2$ bend), 687 $cm^{-1}$ (NH bend, C=O bend). It can be concluded that R-PA fabric has more amide compounds as well as absorbed molecules especially hydrogen bonding which effects the less fibres loss than PA.

Because of the abovementioned results and reasons, the MF shedding from washing process greatly affect the Sustainable Development Goals (SDGs) framed by United Nations (UN) to promote sustainability especially related to the production and consumption of garment (Rathinamoorthy & Raja Balasaraswathi, 2022a). Moreover, Global Fashion Agenda makes a commitment toward a circular fashion system by the implementation of design strategies for cyclability. Additionally, this current topic has gained much importance due to social awareness to the marine ecosystems as well as to address the challenges even enhance the achievement of the SDGs 3 (good health and well-being), 6 (clean water and sanitation), 12 (responsible consumption and production), 14 (life below water), and 15 (life on land).

## Conclusion

This current study denotes the plain weave PA fabric sheds more fibres (23123.73±12048.07 fibres/kg) than R-PA (1706.48±804.44 fibres/kg) in the initial cycle prior to the washing process. Besides, PA fabric is the major source of MF shedding around 10628.10±884.14 fibres/kg in the first cycle than R-PA which is caused by the manufacturing process and lower thermal insulation as well as absorbency. Nevertheless, there is a declining trend of released MF together with the increasing number of washing cycles. Eventually, reducing the

shed MF since the raw material stage by choosing the sustainable material and production process is one of the immense implementations to face the SDGs' issues.

**Conflict of Interest**

The authors declare that there are no conflicts of interest.

**Acknowledgements**

This research was conducted with a grant from Thailand Advanced Institute of Science and Technology and Tokyo Institute of Technology (TAIST-Tokyo Tech) and Faculty of Engineering Kasetsart University as the financial supporter.

**References**

Berruezo, M., Bonet-Aracil, M., Montava, I., Bou-Belda, E., Díaz-García, P., Gisbert-Payá, J. 2020. Preliminary study of weave pattern influence on microplastics from fabric laundering. Text. Res. J. 91: 1037–1045. doi:10.1177/0040517520965708

Boucher, J., Friot, D. 2017. Primary microplastics in the oceans: a global evaluation of sources. IUCN. doi:https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2017.01.en

Browne, M.A., Galloway, T.S., Thompson, R.C. 2010. Spatial patterns of plastic debris along estuarine shorelines. J. Environ. Sci. Technol. 44: 3404–3409. doi:10.1021/es903784e

Cooke, B. 2011. 2 - The physical properties of weft knitted structures. In: K.F. Au (Ed.), Advances in Knitting Technology, Woodhead Publishing, 37–49 pp.

Cox, K.D., Covernton, G.A., Davies, H.L., Dower, J.F., Juanes, F., Dudas, S.E. 2019. Human consumption of microplastics. Environ. Sci. Technol. 53: 7068–7074. doi:10.1021/acs.est.9b01517

Ferreira, D.d.D., Galvão, T.D., Appoloni, C.R. 2020. Total reflection X-ray fluorescence spectrometry determination of titanium dioxide released from UV-protective textiles during wash. J. Appl. Radiat. Isot. 165: 109345. doi:https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2020.109345

Frost, H., Zambrano, M.C., Leonas, K., Pawlak, J.J., Venditti, R.A. 2020. Do recycled cotton or polyester fibers influence the shedding propensity of fabrics during laundering? AATCC J. Res. 7: 32–41. doi:10.14504/ajr.7.S1.4

ISO 4484-1. 2023. Textiles and textile products- microplastics from textile sources- Part 1: Determination of material loss from fabrics during washing.

Kaeokhiao, S., Polruang, S. 2021. Fibrous microplastics released from washing process of polyester fabric. In: Proceedings of The 59th KU Annual Conference, Bangkok, Thailand, 403–411 pp.

Kim, J.-S., Lee, H.-J., Kim, S.-K., Kim, H.-J. 2018. Global pattern of microplastics (MPs) in commercial food-grade salts: Sea salt as an indicator of seawater MP pollution. Environ. Sci. Technol. 52: 12819–12828. doi:10.1021/acs.est.8b04180

Kosuth, M., Mason, S.A., Wattenberg, E.V. 2018. Anthropogenic contamination of tap water, beer, and sea salt. PLOS ONE. 13: e0194970. doi:10.1371/journal.pone.0194970

Maw, M.M., Boontanon, S.K., Jindal, R., Boontanon, N., Fujii, S. 2022. Occurrence and removal of microplastics in activated sludge treatment systems: A case study of a wastewater treatment plant in Thailand. Engineering Access. 8: 106–111. doi:10.14456/mijet.2022.15

Özkan, i, Gündoğdu, S. 2021. Investigation on the microfiber release under controlled washings from the knitted fabrics produced by recycled and virgin polyester yarns. J. Text I. 112: 264–272. doi:10.1080/00405000.2020.1741760

Periyasamy, A.P., Tehrani-Bagha, A. 2022. A review on microplastic emission from textile materials and its reduction techniques. Polym. Degrad. Stab. 199: 109901. doi:https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2022.109901

Rathinamoorthy, R., Raja Balasaraswathi, S. 2022a. Factors influencing microfiber shedding—Role of textile and apparel characteristics. In: Rathinamoorthy R., Raja Balasaraswathi, S. (Eds.), Microfiber Pollution, Singapore: Springer Nature Singapore, pp. 69–105.

Rathinamoorthy, R., Raja Balasaraswathi, S. 2022b. Investigations on the impact of handwash and laundry softener on microfiber shedding from polyester textiles. J. Text I. 113: 1428–1437. doi:10.1080/00405000.2021.1929709

Song, G., Mandal, S. 2016. 3 - Testing and evaluating the thermal comfort of clothing ensembles. In: Wang, L. (Ed.), Performance Testing of Textiles, Woodhead Publishing, 39–64 pp.

Statista Research Department. 2023. Production of polyamide fibers worldwide from 1975 to 2021. https://www.statista.com/statistics/649908/polyamide-fiber-production-worldwide/

Thailand Board of Investment. 2018. Thailand: Textile Industry. https://www.boi.go.th/upload/content/Textile_industry_24012018_47831_5ae68da76c7f2.pdf

Vassilenko, E.I., Watkins, M., Chastain, S.G., Mertens, J., Posacka, A.M., Patankar, S., Ross, P.S.J.P.O. 2021. Domestic laundry and microfiber pollution: Exploring fiber shedding from consumer apparel textiles. 16.

Yang, L., Qiao, F., Lei, K., Li, H., Kang, Y., Cui, S., An, L. 2019. Microfiber release from different fabrics during washing. Environ. Pollut. 249: 136–143. doi:https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.03.011

# Bio-carrier (Fine Polyurethane Sponge Media) investigations with enriched Anammox cultures

Patcharaporn Phocharoen[a], Pongsak (Lek) Noophan[a,*], Sineenat Thaiboonrod[b]

[a]Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

[b]Environmental Nanotechnology Research Team National Nanotechnology Center (NANOTEC), National Science and Technology Development Agency (NSTDA)

*Corresponding author. E-mail address: fengpsn@ku.ac.th

**Abstract**

There were three phases of research works. First phase, the suitability of five different materials as biocarriers for anammox, fine and coarse polyurethane (PU) sponge media, Melamine, Scotch Brite, and Loofah were investigated with reactors of enriched anammox cultures. The reactor with fine PU sponge media exhibited the highest efficiency in removing ammonia and nitrite concentrations, reaching 87%. This efficiency was attributed to the high containment of biomass, with a measured MLVSS of 1414 mg/L during the 15-d start-up period. Microscopic analysis results by using Stereo Microscope and Scanning Electron Microscope (SEM) strongly revealed that the fine PU sponge could be significant abundance of biomass associated with nitrogen removal efficiency. Second phase of the experiment, the fine PU sponge media displayed the highest resistance to nutrient scarcity. It was able to recover within one day after 15-d starvation condition and 5 days after 30-d starvation condition. In the third phase of the experiment, the fine PU sponge media showcased its potential as a beneficial component in mitigating dissolved oxygen (DO)-related issues. The inhibition value was notably low when compared to suspended bacteria.

**Keywords**: Anammox, Biocarriers, Polyurethane sponge

**Introduction**

Nitrogen is a vital nutrient for life; however, its increase through human activities and the discharge of domestic, agricultural, and industrial wastewaters lead to an excess of nutrients in the environment. This, in turn, has significant impacts on terrestrial and aquatic ecosystems, as well as human health. These impacts manifest as eutrophication, a decline in biodiversity, and adverse effects on the respiratory system of humans. Therefore, nitrogen management on both removal and recovery is crucial. There are various methods available to mitigate nitrogen-related issues the one of that is anammox process offers a solution to nitrogen-related issues. It involves the use of autotrophic bacteria that perform ammonia oxidation in an anaerobic state, utilizing nitrite as an electron acceptor and producing nitrogen gas as a byproduct. This process helps reduce the cost associated with adding carbon sources or energy for oxygenation. Moreover, anammox can remove nitrogen in wastewater, bypass the formation of nitrate ($NO_3^-$) and convert nitrite ($NO_2^-$) to $N_2$ gas with $NH_4^+$ as the electron donor and $NO_2$ as the electron acceptor under anaerobic condition. The stoichiometric conversion of $NO_2$ and $NH_4^+$ to $N_2$ gas without production of cell material and $NO_3^-$ is shown below:

$$NH_4^+ + 1.32NO_2^- + 0.066HCO_3^- + 0.13H^+ \rightarrow 1.02N_2 + 0.26NO_3^- + 0.066CH_2O_{0.5}N_{0.15} + 2.03H_2O$$

However, it is worth noting that anammox has a slow growth rate, with a yield of 0.11gVSS/g$NH_4^+$-N (Strous, Kuenen, & Jetten, 1999), and it is sensitive to environmental conditions. The optimal operating temperature ranges from 30°C to 40°C, and the pH should be maintained between 6.7 and 8.3. Additionally, it is essential to control the dissolved oxygen levels below 0.7 mg/L ( (Dosta, et al., 2008), (Talan, Tyagi, & Drogui, 2021).

To address these challenges, an attached growth process or biofilm can be implemented. This involves the attachment of bacteria to inert media, such as rocks, gravel, sand, plastic, or other synthetic materials (Tchobanoglous, Burton, & Stensel, 2003). By doing so, the organisms can be retained in the system for a longer duration, enhancing their resilience and durability. This approach also allows for increased organism density within the system, resulting in higher overall efficiency.

These research efforts demonstrate the ongoing exploration of different materials to find the most advantage bio-carriers that suitable for the anammox treatment system about biomass containment and resistance to lack in nutrient condition. The objectives of this research work are that (phase 1) to determine bio-carriers from 5 different materials of polyurethane (PU), Melamine, Scotch Brite, and Loofah in order to use in anammox system and to investigate recovery after 15 and 30 d of starvation conditions from material that provides the best nitrogen removal.

## Materials and Methods

The experiments were divided by three phases, all details were below:

*Media preparing in order to use in Phase 1*

Polyurethane sponges (fine and coarse), Melamine sponge, Scotch Brite scouring pad from the 3M brand, and loofah were cut into small pieces measuring approximately 0.5 × 0.5 × 0.5 cm and loofah was cut into 1 × 1 × 1 cm, respectively. These pieces were then washed twice with distilled water, dried at 60°C, and stored at room temperature before they were used in an experiment. Bacteria immobilization and bioreactor operation: Anammox bacteria, an autotrophic bacterium capable of anaerobic ammonia oxidation that are known for their efficient nitrogen removal capabilities, (Liang, et al., 2023). Anammox cultures were immobilized in the different type of media first, later these immobilization media were used in this experiment.

Bioreactor operation

**Phase 1**: Biomass experiment involves five reactors, each filled with a different 10%v/v media: coarse and fine polyurethane sponges, melamine sponge, natural loofah, and Scotch Brite. The reactors are incubated for 10 d, after which the suspended bacteria were removed from the system. Once the system was in stable state, a kinetic analysis was conducted to compare the efficiency of ammonia and nitrite removals in the system.

**Phase 2**: Recovery experiment consists of two reactors: The first is Optimum media from Phase 1. The second is Suspended bacteria. All two reactors have similar mixed liquor volatile suspended solids (MLVSS) values. Reactors were hole in lack in nutrient condition at room temperature 15 and 30 d. After that, Reactors were treated in normal condition and the nitrogen removal efficiency was analysis to compare the recovery efficiency of the system.

**Phase 3**: The dissolved oxygen (DO) exposure experiment involved two reactors, the same conditions as Phase 2. During the experiment, the reactors were exposed to a DO concentration ranging from 5.3 to 5.6 mg/L for a duration of 2 hours. Subsequently, the reactors were returned to their normal operating conditions. Sample collection commenced at the start of the DO purge (0 hr) to conduct a kinetic analysis of ($NH_4^+$ and $NO_2^-$ concentrations) removal efficiency. This analysis aimed to compare the recovery efficiency of the system.

*The operating method for each phase was as follows:*

The reaction was carried out in a 500 mL volume reactor (Fig. 1). The initial nitrogen concentration of the synthetic culture is 15 mmoL, with an ammonia to nitrite ratio of approximately 1:1.32 mmoL/L. The Sequencing Batch Reactors (SBRs) are operated at room temperature (approximately 25°C) with a hydraulic retention time (HRT) of 48 hr. The operational steps include removing half of the water (250 $m^3$) from the system, adding synthetic water to reach the original volume, purging the system with a 5% carbon dioxide and 95% argon

mixture for 1 min to displace dissolved oxygen and maintain an anaerobic state, and activating the stirring impeller by turning on the motor switch.

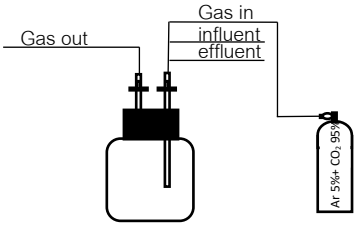



**Fig. 1** Reactor working volume 500 mL

*Analytical method*

Water quality detection and quantity of microorganism

Nitrite-nitrogen, ammonia-nitrogen Use the standard method. Samples were collected at 0 and 24 hr in normal performance testing. and samples were collected every 0, 1, 3, 5 and 7 hr when performing the kinetics of all experimental series. The Mixed Liquor Volatile Suspended Solids (MLVSS) was also determined using the standard method. The concentration of microorganisms on the media (Volatile attached-growth biomass, VAGBS: gVSS/gMedia) was analyzed by the method by (Song, et al., 2019) according to Equation 1.

$$VAGBS = \frac{m_b - m_d}{m_c} \quad (1)$$

$M_b$ = sum of the weight of filter membrane and microorganism from a carrier dried at 105°C

$M_c$ = weight of the carrier after removal of microorganism dried at 105°C

$M_d$ = sum of the weight of filter membrane and microorganism from a carrier dried at 550°C

*Biocarrier characterization*

The structure of the media was analyzed by Stereo Microscope and detailed characterization of the media that before and after operation was analyzed by scanning electron microscopy (SEM). Prior to SEM analysis, samples must be prepared according to (Shitu, et al., 2020)

**Result and discussion**

Performance of the nitrogen removal in Phase 1: Results from the experiment in Phase 1 showed that the reactor with fine polyurethane (PU) foam as the middle layer exhibited the highest overall efficiency in removing ammonia and nitrite, reaching 87%. The reactor with Scotch Brite as the middle layer achieved a slightly lower efficiency of 83%. The reactor with Melamine sponge efficiency is 59%. On the other hand, the coarse polyurethane sponge and loofah media hardly removed any ammonia and nitrite, with insignificant differences of 0.04% and 1.46% respectively. All results of nitrogen removal from Phase 1 are shown in Fig. 2

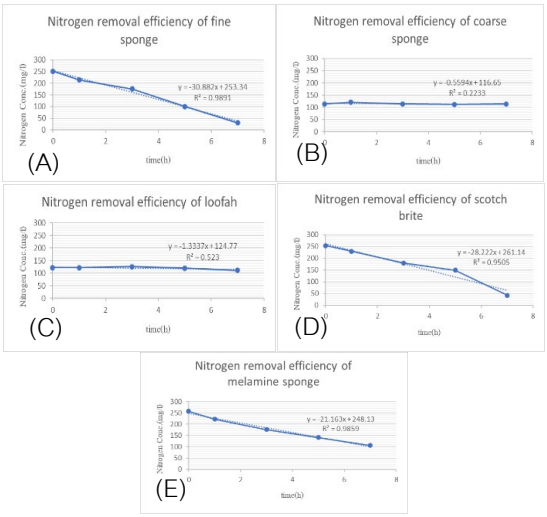



**Fig. 2** The kinetic of ammonia and nitrite removal efficiencies: Fine PU sponge (A); Coarse PU sponge (B); Loofah (C); Scotch Brite (D); Melamine sponge (E)

Due to variations in the biomass density of the attached microorganisms on the media, the system's performance is affected. The biomass density can be analyzed by the value of mixed liquor volatile suspended solids (MLVSS), which correlates with the nitrogen treatment efficiency of the system. Specifically, the fine polyurethane (PU) sponge exhibits the highest density of attached microorganisms. The Scotch Brite media shows a significant number of suspended microorganisms in the reactor, indicating that microorganisms easily detach from the media. The melamine sponge, coarse PU sponge and loofah follow in sequence, showing lower biomass density. The results of mixed liquid volatile suspended solids (MLVSS) in reactors of each material are presented in Table 1.

**Table 1** Mixed Liquid Volatile Suspended Solids (MLVSS) in reactors of each material

| Sample | MLVSS of slip suspended (mg/L) | VAGBS[a] (gVSS/gMedia) | Weight of total 10% media (g) | MLVSS on media [b] (mg/L) | Total MLVSS [c] (mg/L) |
|---|---|---|---|---|---|
| Fine sponge | 60 | 0.744 | 0.9102 | 1354 | 1,414 |
| Coarse sponge | 130 | 0.077 | 1.0101 | 155 | 285 |
| Loofah | 120 | 0.071 | 0.272 | 38 | 158 |
| Scotch brite | 370 | 0.091 | 2.604 | 476 | 846 |
| Melamine sponge | 100 | 1.310 | 0.1914 | 502 | 602 |

[a] VAGBS: volatile attached-growth biomass

[b] MLVSS on media (mg/L) = (column 3 × column 4) × 2 × 1000

[c] Total MLVSS (mg/L) = column 2 + column 5

*Characterization of Biocarriers*

Analysis Results Using a Stereo Microscope

The results obtained from observing the samples using a stereo microscope indicate that the fine PU sponge, Melamine, and the Scotch Brite have a significant number of attached bacteria, indicating a dense population. When compared to the coarse PU sponge and loofah material. It is evident that the fine sponge has many small-sized bacteria attached to the surface surrounding the sponge, while the Scotch Brite, with its larger pores, has a significant number of larger-sized bacteria attached.

However, based on the previously mentioned MLVSS analysis, it is apparent that the bacteria attached to the Scotch Brite easily detached from the carrier material. Therefore, it can be concluded that the fine PU sponge, as the carrier material, is more suitable than the Scotch Brite in terms of system efficiency and the quantity of attached bacteria on the carrier surface. The stereo microscope observation of the carrier samples in the system after 30 days are presented in Fig. 3.

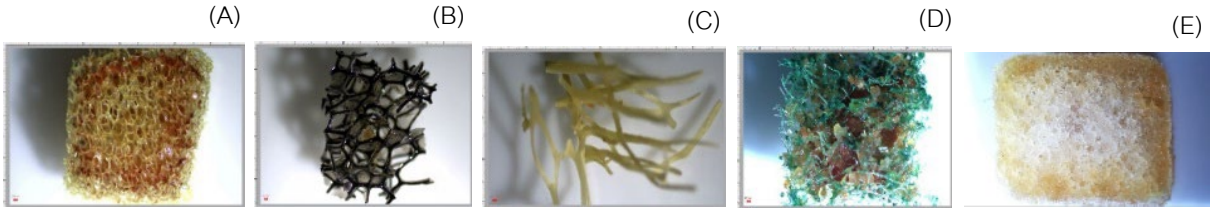



**Fig. 3** The stereo microscope observation of the carrier samples in the system after 30 days: Fine PU sponge (A); Coarse PU sponge(B); Loofah (C); Scoth Brite (D); Melamine sponge (E)

Analysis Results Using a scanning electron microscopy (SEM) of each medium are shown in Figs. 4-8.

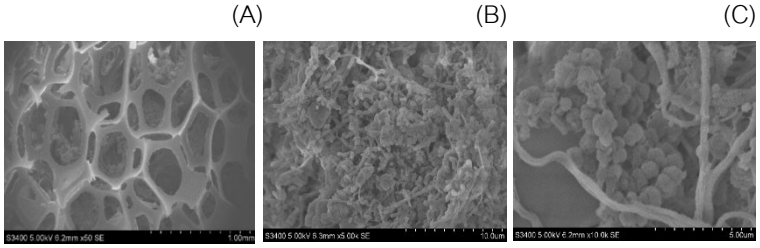



**Fig.4** The specific SEM analysis of the fine PU sponge samples with bacterial attachment: 50x (A); 5kx (B); 10kx (C)

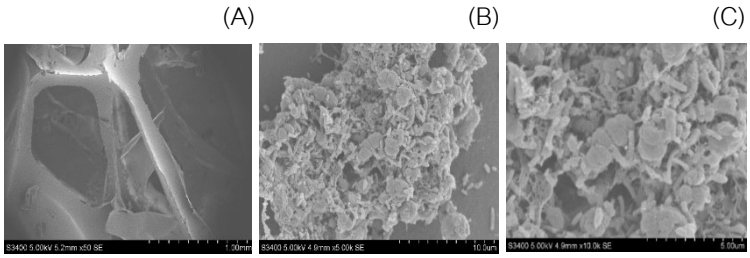



**Fig. 5** The specific SEM analysis of the coarse PU sponge samples with bacterial attachment: 50x (A); 5kx (B); 10kx (C)

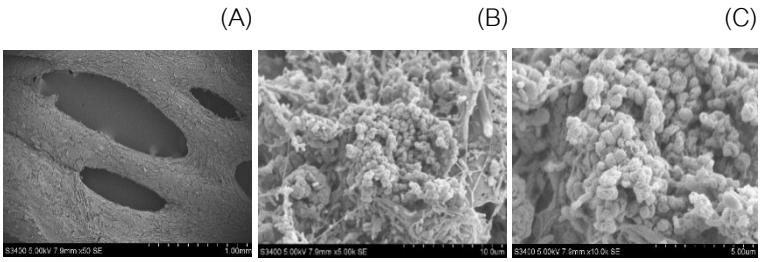



**Fig.6** The specific SEM analysis of the loofah samples with bacterial attachment: 50x (A); 5kx (B); 10kx (C)

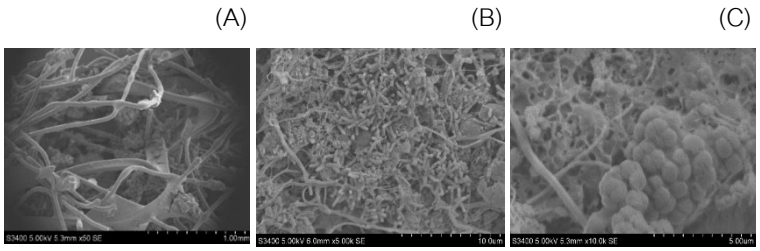



**Fig. 7** The specific SEM analysis of the Scotch Brite samples with bacterial attachment: 50x (A); 5kx (B); 10kx (C)

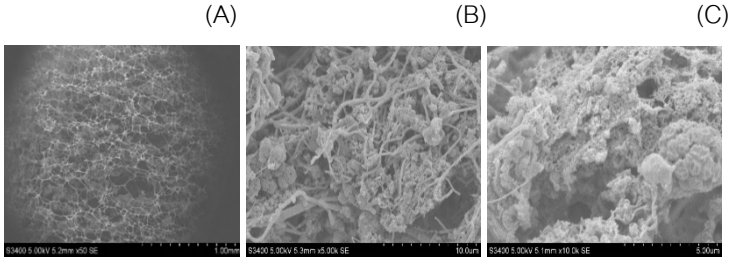



**Fig. 8** The specific SEM analysis of the Melamine sponge samples with bacterial attachment: 50x (A); 5kx (B); 10kx (C)

Phase 2: Based on the results of phase 1, it was concluded that the fine PU sponge provided the highest nitrogen removal efficiency and the highest biomass attachment density to the carrier. Therefore, in Phase 2, the fine PU sponge was used to recovery experiment compare with suspended-growth of anammox bacteria.

**Table 2** The result of recovery day after starvation condition

| Starvation condition | Recovery (d) | |
|---|---|---|
| (d) | Fine PU sponge | suspended-growth |
| 15 | 1 | 4 |
| 30 | 5 | 10 |

Table 2 is the result for lack in nutrient 15 d condition shows that reactor of fine PU sponge is the fastest recovery in 1 d. Following that reactor of suspended -growth of anammox bacteria (4 d) after starvation condition (30 d) shows that reactor of fine PU sponge is the fastest recovery in 5 d. Following that reactor of suspended -growth of anammox bacteria (10 d).

According to this result, the use of a fine PU sponge reactor exhibits the highest resistance to conditions of food scarcity. According to the hypothesis, the resilience of attached growth to shock loads, derived from

diffusion-limited conditions, constitutes a significant advantage. In cases of prolonged nutrient deficiency, followed by the reintroduction of the original feed, attached growth demonstrates a faster recovery and more effective handling of shock loads when compared to suspended growth (Tchobanoglous et al., 2003). Additionally, it has the capability to maintain bacteria in a stable state.

Phase 3: The results of the dissolved oxygen (DO) exposure experiment revealed that the inhibitions of DO to enriched anammox cultures with fine PU sponge and suspended-growth reactors were average values of 33.9% [(32.9+34.9)/2] and 59.5% [(58.5+60.5)/2], respectively, see Fig 9. The fine PU sponge media is able to protect enriched anammox cultures from DO effect better than without media (the suspended-growth reactor). This result strongly recommends that the fine PU sponge is effective in limiting the impact of DO on enriched annamox bacteria, highlighting its potential as a beneficial component in preventing DO-related issues. The fine PU sponge would be powerfully suggested to use as medium for laboratory-scale system of anammox investigation in future researches.

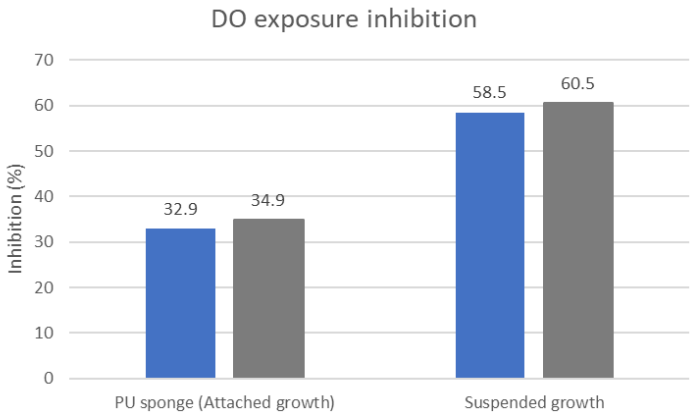



**Fig. 9** The result of DO exposure inhibition

## Conclusion

In conclusion, the findings of this study indicate that the use of fine PU sponge as a media has proven to be highly efficient in removing ammonia and nitrite. This is attributed to the rich population of microorganisms present on the carriers. Furthermore, the second phase of the experiment demonstrated that the fine PU sponge media displayed superior resistance to nutrient scarcity, evident both one day and five days after a 15-day and 30-day starvation condition, respectively. The results from the third phase further emphasize the fine PU sponge media's potential as a valuable component in addressing dissolved oxygen (DO)-related issues. Hence, based on these results, it is recommended that the fine PU sponge media be implemented in laboratory-scale anammox processes.

## Acknowledgements

This work was supported by Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok, Thailand (under innovation scholarship).

**References**

Dosta, J., Fernández, I., Vázquez-Padín, J.R., Mosquera-Corral, A., Campos, J.L., Mata-Álvarez, J., Méndez, R. 2008. Short- and long-term effects of temperature on the Anammox process. Hazardous Materials, 154, 688–693.

Liang, E., Ali, A., Su, J., Xu, L., Huang, T., Yang, Y., Liu, Y. 2023. Treatment of micro-polluted water with low C/N ratio by immobilized bioreactor using PVA/sintered ores@sponge cube: Performance effects and potential removal pathways. Sci. Total Environ. 870: 162003.

Shitu, A., Zhu, S., Qi, W., Tadda, M.A., Liu, D., Ye, Z. 2020. Performance of novel sponge biocarrier in MBBR treating recirculating aquaculture systems wastewater: Microbial community and kinetic study. J. Environ. Manage. 275: 111264.

Song, Z., Zhang, X., Hao Ngo, H., Guo, W., Song, P., Zhang, Y. Guo, J. 2019. Zeolite powder based polyurethane sponges as biocarriers in moving bed biofilm reactor for improving nitrogen removal of municipal wastewater. Sci. Total Environ. 651: 1078–1086.

Strous, M., Kuenen, J.G., Jetten, M.S. 1999. Key physiology of anaerobic ammonium oxidation. Appl. Environ. Microbiol. 3248–3250.

Talan, A., Tyagi, R.D., Drogui, P. 2021. Critical review on insight into the impacts of different inhibitors and performance inhibition of anammox process with control strategies. Environ. Techno. Inno. 23: 101553.

Tchobanoglous, G., Burton, F.L., Stensel, H.D. 2003. Wastewater engineering treatment and reuse ($4^{th}$ Ed.). Beijing: McGraw-Hill Companies, Inc.

# การศึกษาสารอินทรีย์ละลายน้ำเป้าหมายของคลอรีนในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำประปา กรณีน้ำดิบมีปริมาณสาหร่ายอุดตันบ่อกรองสูง วิเคราะห์โดยฟลูออเรสเซนต์สเปกโทรสโคปี

# The study of chlorine-targeted dissolved organic matter in the water treatment processes in a case of a high algae-clogged filtration system analyzed by fluorescence spectroscopy

**เดชชนะ ชาติวัฒนานนท์***, **วิทรัช ยุทธวงศ์**

Dechana Chatwatananont*, Vitharuch Yuthawong

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: ch.dechana@gmail.com

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาสารอินทรีย์ละลายน้ำที่มีคุณสมบัติเรืองแสงได้ (Fluorescence Dissolved Organic Matter, FDOM) ที่ทำปฏิกิริยากับคลอรีนในโรงงานผลิตน้ำประปา ในกรณีน้ำดิบมีปริมาณสาหร่ายสูง อุดตันที่กระบวนการกรอง ส่งผลให้ลักษณะของ FDOM และการทำปฏิกิริยาต่อคลอรีนเปลี่ยนแปลง ทำการวิเคราะห์โดยฟลูออเรสเซนต์สเปกโทรสโคปีด้วย Excitation Emission Matric (EEM) ร่วมกับ Fluorescence index Freshness index และ Humification index จากนั้นจำลองการฆ่าเชื้อโรค โดยให้คลอรีนอิสระคงเหลือเท่ากับ 3.0 mg/L ภายหลังจากการทดลองเพื่อศึกษาสัดส่วนของ FDOM ที่ทำปฏิกิริยากับคลอรีน ผลการศึกษาจาก EEM และดัชนีฟลูออเรสเซนต์ บ่งชี้ว่า FDOM ในน้ำดิบ น้ำหลังตกตะกอน และน้ำหลังฆ่าเชื้อโรค มีลักษณะ FDOM คล้ายกรดฮิวมิกและฟลูวิก ในขณะที่น้ำหลังกรองมีลักษณะ FDOM ที่แตกต่างจากตัวอย่างอื่นๆ และมีลักษณะทางฟลูออเรสเซนต์คล้ายกับสารพลอยได้ละลายน้ำจากจุลชีพ (Soluble Microbial by-product, SMP) การจำลองการฆ่าเชื้อโรคพบว่าคลอรีนทำปฏิกิริยากับ FDOM กลุ่มคล้ายกรดฮิวมิกและฟลูวิกในน้ำดิบ ทำปฏิกิริยาน้อยมากในน้ำหลังตกตะกอน และทำปฏิกิริยากับ FDOM กลุ่มคล้าย SMP ในน้ำหลังกรอง สรุปได้ว่าในช่วงเวลาที่สาหร่ายสูงภายในทรายกรองนั้นเกิด FDOM ที่มีลักษณะคล้ายกับ SMP ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับคลอรีนได้ เนื่องจากสารดังกล่าวเป็นสารที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ การศึกษานี้จึงเสนอแนะให้มีการเฝ้าระวังสารพลอยได้จากการฆ่าเชื้อโรคกลุ่มฮาโลอะซิโตไนไตรล์ (Haloacetonitriles, HANs) เป็นพิเศษในช่วงสาหร่ายสูง

**คำสำคัญ**: คลอรีน, ฟลูออเรสเซนต์สเปกโทรสโคปี, ระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำ, สารอินทรีย์ละลายน้ำ

**Abstract**

This study investigated reaction between fluorescence dissolved organic matter (FDOM) and chlorine in a water treatment plant, in a case of a high algae-clogged sand filtration. The phenomenon may cause the reactivity of chlorine to change towards different portion of FDOM. Fluorescence Spectroscopy with excitation emission matrix (EEM) was used to analyze FDOM characteristics at each treatment stage, along with fluorescence index, freshness index, and humification index. Chlorination experiment were conducted with 3.0 mg/L free residual chlorine at the end of the experiment to specify portion of FDOM reacting with chlorine. Results from EEM and fluorescence indices indicated that raw water, clarified water, and chlorinated water were akin to humic and fulvic acids FDOM, while filtered water had a recognizable distinct FDOM whose fluorescent character was similar to soluble microbial by-products (SMP). Chlorination experiment showed high reactivity of humic and fluvic acid like FDOM in raw water, low reactivity in clarified water, and high reactivity of SMP like FDOM in filtered water. In summary, high algal content in sand filtration system could lead to reaction with SMP like FDOM which evidently reacted with chlorine. Since SMPs are nitrogenous DOM, it is advised to be more beware of haloacetonitriles (HANs), which are disinfection by-product.

**Keywords**: Chlorine, Dissolved organic matter, Fluorescence spectroscopy, Water treatme

**คำนำ**

น้ำเป็นทรัพยากรพื้นฐานสำหรับการดำรงชีพของมนุษย์ แหล่งน้ำธรรมชาติมีสิ่งปนเปื้อนมากมาย ไม่ปลอดภัยหากใช้อุปโภคบริโภคโดยตรง หน่วยงานภาครัฐมีหน้าที่ผลิตน้ำประปาสะอาด ปราศจากสี กลิ่น เชื้อโรค และสารก่อภูมิแพ้ โดยยึดมาตรฐานคุณภาพน้ำจากกรมอนามัย (กรมอนามัย, 2563) กระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำทั่วไปมี 5 ขั้นตอนคือ การสร้างตะกอน (Coagulation) การรวมตะกอน (Flocculation) การตกตะกอน (Sedimentation) การกรอง (Filtration) และการฆ่าเชื้อโรค (Disinfection) มุ่งเน้นการปรับปรุงคุณภาพด้านกายภาพ (รส กลิ่น และสี) และการกำจัดเชื้อโรค แต่ไม่ได้คำนึงถึงด้านเคมี (อาทิเช่น สารอินทรีย์ธรรมชาติ และความเค็ม) สารอินทรีย์ธรรมชาติที่ส่งผลต่อกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำคือสารอินทรีย์ละลายน้ำ (Dissolved Organic Matter, DOM) DOM คือสารอินทรีย์ที่คงเหลืออยู่หลังจากการกรองด้วยกระดาษกรองรูพรุนขนาด 0.1–0.7 μm (Danielsson, 1982) DOM สามารถจำแนกได้ตามแหล่งกำเนิดคือ สารอินทรีย์จากการชะละลายซากพืช ซากสัตว์ (Allochthonous DOM) และสารอินทรีย์ที่เกิดการกิจกรรมของจุลชีพภายในแหล่งน้ำ (Autochthonous DOM) DOM เป็นสารที่มีโครงสร้างโมเลกุลหลากหลาย ตั้งแต่โครงสร้างพื้นฐาน (กรดอะมิโน กรดไขมัน คาร์โบไฮเดรท และไฮโดรคาร์บอน) จนถึงสารที่มีโครงสร้างซับซ้อนไม่แน่นอน (กรดฮิวมิกและกรดฟลูวิก) ในกระบวนฆ่าเชื้อโรค คลอรีนจะทำปฏิกิริยากับทุกองค์ประกอบในน้ำ รวมทั้ง DOM ด้วย เกิดเป็นสารพลอยได้จากการฆ่าเชื้อ (Disinfection by-products, DBPs) (Fooladvand et al., 2011) อาทิเช่น สารไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethanes, THMs) กรดฮาโลอะซิติก (Haloacetic Acids, HAAs) และ ฮาโลอะซิโตไนไตรลส์ (Haloacetonitriles, HANs) ซึ่งเป็นสารก่อให้เกิดมะเร็ง (Grünwald et al., 2002; Latifoglu, 2016)

โรงงานผลิตน้ำประปาบางเขนมีกำลังผลิต 4.0 $Mm^3$/day ใช้กระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำประปาแบบทั่วไป (Conventional water treatment processes) ประกอบไปด้วยกระบวนการรวมตะกอนและตกตะกอนโดยใช้ถัง Clarifier กระบวนการทรายกรองเร็ว (Rapid sand filtration) และกระบวนการฆ่าเชื้อโรคโดยใช้คลอรีน (Chlorine disinfection) โรงงานผลิตน้ำประปาบางเขนนั้นประสบปัญหาการอุดตันของสาหร่ายในบ่อกรอง ซึ่งทำให้ต้องเพิ่มความถี่ของการล้างย้อนชั้นทรายกรอง และยังมีความเสี่ยงของน้ำที่ผ่านชั้นทรายกรองมีสารอินทรีย์ที่สาหร่ายปล่อยออกมาปนเปื้อนไปด้วย ซึ่งสารอินทรีย์ดังกล่าวสามารถทำปฏิกิริยากับคลอรีนในกระบวนการฆ่าเชื้อ จึงมีความเสี่ยงที่จะทำให้เกิดสาร DBPs อีกด้วย

สาหร่ายเป็นพืชขนาดเล็กที่เจริญเติบโตในแหล่งน้ำผิวดิน สามารถเล็ดลอดเข้าสู่กระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำได้ สาหร่ายบางกลุ่มส่งผลกระทบต่อการปรับปรุงคุณภาพน้ำ อาทิเช่นกลุ่ม Aulacoseira และ Skeletonema (Joh et al., 2011) เป็นต้น คือการอุดตันบ่อกรอง นอกจากนั้นการดำรงชีพของสาหร่ายยังปลดปล่อยสารอินทรีย์ละลายน้ำ (Soluble microbial by-products, SMP) (Zhuang et al., 2016) ส่งผลให้ความต้องการสารเคมีเพิ่มขึ้น (Shen et al., 2011) ปริมาณสาหร่ายในแหล่งน้ำแปรผันไปตามฤดู ฤดูที่ปริมาณสาหร่ายสูงคือฤดูร้อน ไม่มีฝน และน้ำมีความขุ่นต่ำ ทำให้สาหร่ายสังเคราะห์แสงและเจริญเติบโตได้ดี กลับกันหากเป็นฤดูฝน น้ำมีความขุ่นสูง จะมีปริมาณสาหร่ายต่ำ

การวิเคราะห์ DOM สามารถทำได้หลายวิธี การวิเคราะห์ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ (Dissolved Organic Carbon, DOC) บ่งบอกปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนโดยรวมในน้ำตัวอย่าง DOM บางกลุ่มจะมีคุณสมบัติดูดกลืนแสง (Colored Dissolved Organic Matter, CDOM) สามารถประเมินความเป็นอะโรมาติกของโครงสร้างโมเลกุลจากการวัดการดูดกลืนแสงยูวี นิยมใช้ความยาวคลื่นเท่ากับ 254 nm (UV Absorbance 254 nm, $UV_{254}$) และการดูดกลืนคลื่นแสงจำเพาะ (Specific UV Absorbance, SUVA) คืออัตราส่วนระหว่าง $UV_{254}$ และ DOC เป็นดัชนีประเมินสารประกอบฮิวมิกในน้ำ (Weishaar et al., 2003) จากการศึกษาก่อนหน้านี้ (Kitis et al., 2002; Westerhoff et al., 2004; Hua et al., 2015) พบว่า SUVA มีความสัมพันธ์และเป็นสัดส่วนกับสาร DBPs และสามารถใช้เป็น Indicator ของการเกิด DBPs ได้

สารอินทรีย์ละลายน้ำบางกลุ่มยังมีคุณสมบัติเรืองแสง (Fluorescence Dissolved Organic Matter, FDOM) เมื่อถูกกระตุ้นด้วยคลื่นแสง (Excitation wavelength) จะปลดปล่อยพลังงานและเรืองแสง (Emission wavelength) วัดเป็นความเข้มแสง (Intensity) สามารถนำมาสร้างกราฟฟลูออเรสเซนต์สเปคโทรสโคปีแบบสามมิติ (Excitation and Emission Matrix spectroscopy, EEM) ใช้ในการวิเคราะห์ DOM เชิงคุณภาพ อาทิเช่น แหล่งกำเนิด ประสิทธิภาพการกำจัดของกระบวนปรับปรุงคุณภาพน้ำ แนวโน้มการทำปฏิกิริยา และยังสามารถใช้วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง FDOM กับการเกิดของสาร DBPs ได้อีกด้วย (Coble, 1996; Korshin and Fabbricino, 2004; Lavonen et al., 2015; Fan et al., 2020; Go et al., 2021)

งานวิจัยนี้ทำการศึกษา FDOM ในน้ำดิบและน้ำระหว่างกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำแบบทั่วไป ของโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน และสัดส่วนของ FDOM ที่สามารถทำปฏิกิริยากับคลอรีน โดยเก็บตัวอย่างน้ำจากโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขนประกอบไปด้วย น้ำดิบ น้ำหลังตกตะกอน น้ำหลังทรายกรอง และน้ำหลังกระบวนการฆ่าเชื้อ สารอินทรีย์ในน้ำตัวอย่างถูกวิเคราะห์ด้วย ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอน การดูดกลืนแสง และลักษณะทางฟลูออเรสเซนต์ ทำการจำลองการฆ่าเชื้อโรค (Chlorination) เพื่อวิเคราะห์ FDOM ที่สามารถทำปฏิกิริยากับคอลรีนได้ และทำการเปรียบเทียบลักษณะของ FDOM ก่อนและหลังการเติมคลอรีน ผลจากการศึกษานี้จะเป็นประโยชน์ต่อการปรับปรุงระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น อาทิเช่นใช้ในการเฝ้าระวังสารอินทรีย์ในน้ำดิบ การวัดประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในแต่ละกระบวนการ และการควบคุมการเกิด DBPs จาก DOM ที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน

## อุปกรณ์และวิธีการ

*การเก็บน้ำตัวอย่าง*

เก็บน้ำตัวอย่างจากโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน การประปานครหลวง ทำการเก็บน้ำตัวอย่างวันที่ 27 กรกฎาคม 2566 บริเวณน้ำดิบ (BK1) น้ำหลังตกตะกอน (BK2) น้ำหลังกรอง (BK3) และน้ำหลังฆ่าเชื้อ (BK4) แสดงดัง Fig. 1 น้ำตัวอย่างกรองด้วยกระดาษกรอง 0.3 μm (GF-75, Advantec) ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 550 °C เป็นเวลา 5-6 ชั่วโมง หลังจากการกรอง น้ำตัวอย่างถูกเก็บในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 °C เพื่อรอการวิเคราะห์ต่อไป

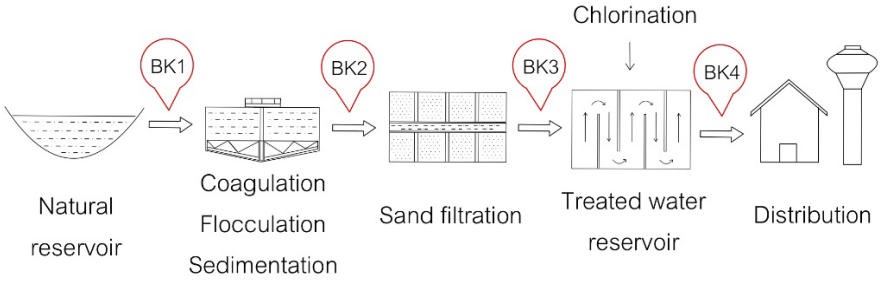



**Fig. 1** Sampling point BK1, BK2, BK3 and BK4 in a Bangkhen water treatment plant

*การวิเคราะห์พารามิเตอร์พื้นฐาน*

ลักษณะของ DOM จะแสดงด้วยการวิเคราะห์สารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ การดูดกลืนแสงยูวี และการดูดกลืนแสงยูวีจำเพาะ โดยใช้น้ำตัวอย่างที่ผ่านการกรอง การวิเคราะห์ DOC กระทำตาม Standard Method 5310B โดยใช้เครื่องวัด TOC analyzer ยี่ห้อ Shimadzu TOC-L CPH Analyzer รุ่น 5000 A ใช้รูปแบบการวัดแบบ NPOC การวิเคราะห์

$UV_{254}$ กระทำตาม Standard method 5910 โดยใช้เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible spectrophotometer) ยี่ห้อ HACH DR 5000™ UV-Vis การวิเคราะห์ SUVA จากอัตราส่วนของ $UV_{254}$ และ DOC

*การวิเคราะห์ฟลูออเรสเซนต์สเปกโทรสโคปี*

การวิเคราะห์คุณสมบัติฟลูออเรสเซนต์กระทำตาม Jutaporn and Coronell (2017) วัดความเข้มแสง (Intensity) ด้วยเครื่อง Fluorescence spectrometer ยี่ห้อ JASCO FP-8200 ให้แสงกระตุ้น (Excitation wavelength, Ex) ที่ความยาวคลื่น 200–500 nm และวัดการเรืองแสง (Emission wavelength, Em) ที่ความยาวคลื่น 250–550 nm โดยการเพิ่มความยาวคลื่นแสงเพิ่มครั้งละ 5 และ 1 nm สำหรับ Ex และ Em ตามลำดับ นำข้อมูลมาสร้างกราฟ 3 มิติ (Excitation and Emission Matrix spectroscopy, EEM) โดยแกน X Y และ Z คือ Em Ex และ Intensity ตามลำดับ จำแนก FDOM ด้วยการเปรียบเทียบการเรืองแสงกับการแบ่งพื้นที่กราฟ (Reginal Integration) ตามคุณสมบัติทางเคมีจาก FDOM มาตราฐาน (Chen et al., 2003) แสดงดัง Fig. 2 ร่วมกับการวิเคราะห์ดัชนีการเรืองแสง (Fluorescence indices) ประกอบด้วย Fluorescence index (FI) เป็นดัชนีชี้วัดแนวโน้มของแหล่งกำเนิดของสารอินทรีย์ FI มีค่าตั้งแต่ 1.3–1.8 สำหรับ Allochthonous DOM และ Autochthonous DOM ตามลำดับ (McKnight et al., 2001) Freshness index (BIX) เป็นดัชนีบ่งชี้ความสดใหม่และกิจกรรมทางชีวภาพของสารอินทรีย์ (Huguet et al., 2009) Humification index (HIX) ใช้บ่งชี้ระดับการย่อยสลายของสารอินทรีย์ (Ohno, 2002) วิธีการคำนวณดัชนีอ้างอิงตามการศึกษาที่ผ่านมา (Lavonen et al., 2015)

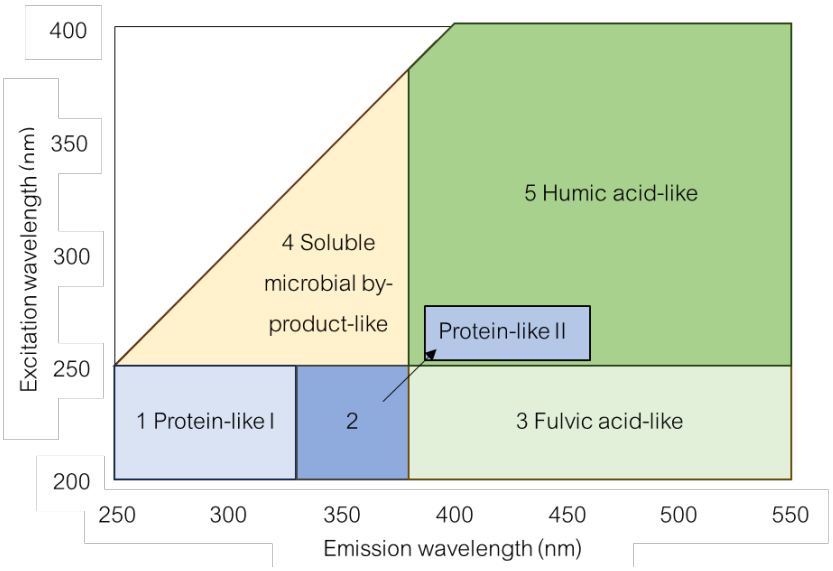



**Fig.2** Reginal integration of Excitation-Emission wavelength classified by DOM chemical properties

*การจำลองการฆ่าเชื้อโรค*

วิเคราะห์หาสารเป้าหมายในการทำปฏิกิริยาของคลอรีนสามารถทำได้โดยการจำลองการฆ่าเชื้อโรค (Chlorination) ตาม Standard Method 5710B แต่ใช้ระยะเวลาบ่มเพียง 24 ชั่วโมง เพื่อจำลองสถานการณ์การเติมคลอรีนให้ใกล้เคียงกับการปรับปรุงคุณภาพน้ำประปา กระทำโดยเติมโซเดียมไฮโปคลอไรด์ (NaOCl) ความเข้มข้นเท่ากับ 1.6 เท่าของ DOC (Yee et al., 2006) ต้องการให้คลอรีนอิสระคงเหลือเท่ากับ 3.0 mg/L เพื่อให้แน่ใจว่าจะมีคลอรีนความเข้มข้นเพียงพอจนสิ้นสุดการทำปฏิกิริยา เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการ Chlorination ทำการวิเคราะห์น้ำตัวอย่างด้วยพารามิเตอร์พื้นฐาน และคุณสมบัติฟลูออเรสเซนต์อีกครั้ง เพื่อเปรียบเทียบก่อน-หลังทำ Chlorination การทำปฏิกิริยาของ

คลอรีนต่อ FDOM สามารถคำนวณได้จากผลต่าง EEM ของก่อนและหลังการทำ Chlorination หากผลเป็นบวกแสดงถึงคลอรีนสามารถทำปฏิกิริยาและลด FDOM นั้นได้ หากผลเป็นลบแสดงถึงการเกิดสารพลอยได้จากการฆ่าเชื้อ

**ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง**

*ลักษณะของสารอินทรีย์ภายในระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำ*

การวิเคราะห์พารามิเตอร์พื้นฐานพบว่า DOC และ SUVA ของน้ำดิบมีค่าเท่ากับ 3.12 mg/L และ 2.34 L/mg-m ตามลำดับ ค่า SUVA ที่ค่อนข้างต่ำ (มีค่าอยู่ระหว่าง 2–4 L/mg-m) แสดงให้เห็นว่า DOM ในน้ำดิบมีลักษณะเป็นสารคละกันระหว่างสารอินทรีย์ที่มีขนาดโมเลกุลสูงและต่ำ และมีลักษณะชอบ-ไม่ชอบน้ำ (Hydrophilic, Hydrophobic) ผสมกัน (Matilainen et al., 2010) เมื่อน้ำดิบผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำพบว่าค่า DOC มีค่าลดลงจาก 3.13 mg/L ในน้ำดิบ (BK1) เป็น 2.72 mg/L ในน้ำหลังตกตะกอน (BK2) 2.67 mg/L ในน้ำหลังทรายกรอง (BK3) และ 2.65 mg/L ในน้ำหลังฆ่าเชื้อโรค (BK4) DOC สูงสุดที่น้ำดิบ เปลี่ยนแปลง -13.1% เมื่อผ่านกระบวนการตกตะกอน และเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยจนสิ้นสุดกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำ ค่า SUVA เท่ากับ 2.34 L/mg-m (BK1) 1.27 L/mg-m (BK2) 1.54 L/mg-m (BK3) และ 1.28 L/mg-m (BK4) ค่า SUVA มีความเปลี่ยนแปลงสูงสุดภายจากกระบวนการตกตะกอนที่ -45.6% กระบวนการตกตะกอนเป็นกลไกที่สามารถลดสารโมเลกุลใหญ่ สารที่มีโครงสร้างเป็นอะโรมาติก ทำให้ DOC และ SUVA ลดลง ในกระบวนการกรอง DOC เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย แต่ SUVA เพิ่มขึ้น (+20.6%) สาเหตุจากในขั้นตอนนี้สามารถลด DOM กลุ่มโครงสร้างอะลิฟาติกได้ ทำให้สัดส่วนของ DOM กลุ่มโครงสร้างอะโรมาติกเพิ่มขึ้น หลังจากกระบวนการฆ่าเชื้อโรค เมื่อคลอรีนทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารอินทรีย์นั้นไม่สามารถทำปฏิกิริยาได้สมบูรณ์ แต่สามารถเปลี่ยนโครงสร้างสารอินทรีย์ได้ แสดงให้เห็นจาก DOC ลดลงเล็กน้อย (-0.7%) แต่ SUVA ลดลงอย่างชัดเจน (-16.5%) สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ (Baghoth et al., 2011; Lavonen et al., 2015; Yuthawong et al., 2023)

กราฟแสดงผลการวิเคราะห์ EEM ของ BK1 BK2 BK3 และ BK4 แสดงดังภาพที่ Fig. 3A 3D 3G และ 3J ตามลำดับ พบว่า EEM ของ BK1 มี Region ที่โดดเด่นคือ Region 3 และ 5 นั้นคือ FDOM ของ Fulvic และ Humic acid-like ซึ่งเป็นลักษณะที่โดดเด่นของสารอินทรีย์ในแม่น้ำ (Osburn et al., 2012; Tungsudjawong et al., 2020; Han et al., 2021) และมีลักษณะสอดคล้องกับสารอินทรีย์ภายในคลองประปาและน้ำดิบของโรงผลิตน้ำประปาบางเขนเมื่อปี พ.ศ. 2564 (Peansawang et al., 2018; Yuthawong et al., 2023)

ผลการวิเคราะห์ EEM ของตัวอย่าง BK2 เมื่อผ่านกระบวนการตกตะกอนพบว่าโดยรวมความเข้มของแสงฟลูออเรสเซนต์ลดลงอย่างมาก โดยพบ FDOM Region 3 และ 5 เพียงเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่ากระบวนการตกตะกอนมีความสามารถกำจัด DOM จำพวก Fulvic และ Humic acid-like ออกจากน้ำ โดยสารดังกล่าวนั้นเป็นสารโมเลกุลค่อนข้างใหญ่และมีโครงสร้างเป็นอะโรมาติกสูง (Uyguner and Bekbolet, 2005) ซึ่งสอดคล้องกับผลวิเคราะห์ของ DOC และ SUVA ที่แสดงให้เห็นว่า DOM ที่มีโครงสร้างเป็นอะโรมาติกถูกกำจัดออกโดยกระบวนการตกตะกอน

ผลการวิเคราะห์ EEM ของ ตัวอย่าง BK3 พบ FDOM โดดเด่นคือ Region 4 (Soluble microbial by-product-like) และพบ FDOM Region 2 3 และ 5 เล็กน้อย โดย FDOM Region 4 เพิ่มขึ้นนั้นอาจจะเกิดจากการอุดตันของสาหร่ายในทรายกรอง เนื่องจากช่วงเวลาที่เก็บน้ำตัวอย่างมีปริมาณสาหร่ายอุดบ่อกรองสูงกว่าเกณฑ์ (ตรวจพบ 12,800 units / 100 mL โดยเกณฑ์ไม่เกิน 8,000 units / 100 mL, ข้อมูลจากการประปานครหลวง) ซึ่งกิจกรรมของสาหร่ายนั้นสามารถการปลดปล่อย DOM (Zhuang et al., 2016) ส่งผลให้ DOM เหล่านี้เล็ดลอดเข้าสู่กระบวนการถัดไปได้

EEM ของ BK4 พบ FDOM Region 3 และ 5 เล็กน้อย และไม่พบ FDOM Region 4 แสดงให้เห็นว่าคลอรีนสามารถทำปฏิกิริยาและลด FDOM Region 4 ได้ดี โดยทั่วไปสารพลอยได้จากการฆ่าเชื้อ (Disinfection by-products,

DBPs) เช่น สารไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethanes, THMs) และกรดฮาโลอะซิติก (Haloacetic Acids, HAAs) จะเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารประกอบฮิวมิก Region 3 และ 5 (Jutaporn et al., 2019; Korshin and Fabbricino, 2004) แต่ในกรณีที่สาหร่ายสูงนั้น (การศึกษาปัจจุบัน) อาจทำให้คลอรีนไปทำปฏิกิริยากับ DBP Precursor กลุ่ม SMP ส่งผลให้เกิด DBPs กลุ่มอื่นได้ อาทิกลุ่มฮาโลอะซิโตไนไตรล์ (Haloacetonitriles, HANs) และ Nitrogenous DBPs อื่นๆ (Fang et al., 2010; Hua et al., 2020)

ค่า FI เท่ากับ 1.30 1.33 1.34 และ 1.37 ค่า BIX เท่ากับ 0.74 0.68 1.23 และ 0.72 ค่า HIX เท่ากับ 0.92 0.92 0.79 และ 0.92 สำหรับ BK1 BK2 BK3 และ BK4 ตามลำดับ ค่า FI มีแนวโน้มสูงขึ้นตามกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำแสดงถึงสารอินทรีย์ในระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำมีแนวโน้มคล้ายกับ Autochthonous DOM มากขึ้น ซึ่งมีโครงสร้างเป็นอะโรมาติกต่ำ BIX ลดลงหลังตกตะกอน เพิ่มขึ้นหลังกรอง และลดลงหลังฆ่าเชื้อ สาเหตุจากกระบวนการตกตะกอนสามารถลดสารอินทรีย์จากสาหร่ายและกิจกรรมทางชีวภาพได้บางส่วน แต่เนื่องจากปริมาณสาหร่ายสูง เจริญเติบโตบนผิวบ่อกรอง จึงมีกิจกรรมทางชีวภาพสูงขึ้นหลังกระบวนการกรอง สุดท้ายในกระบวนการฆ่าเชื้อโรค คลอรีนทำปฏิกิริยากับ DOM จากสาหร่าย BIX จึงลดลง HIX มีค่าใกล้เคียงกันในระดับสูงสำหรับ BK1 BK2 และ BK4 บ่งชี้ว่า DOM มีสัดส่วนของสารประกอบฮิวมิกสูง ยกเว้น BK3 มีค่า HIX ต่ำ สาเหตุจากมีสัดส่วนสารอินทรีย์จากสาหร่ายเพิ่มขึ้น

*ลักษณะของสารอินทรีย์หลังจากการจำลองการฆ่าเชื้อโรค*

หลังจากการทำ Chlorination วิเคราะห์พารามิเตอร์พื้นฐานพบว่าค่า DOC มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยหลังจากการ Chlorination โดยมีค่าเท่ากับ 3.21 mg/L (BK1 $Cl_2$) 2.79 mg/L (BK2 $Cl_2$) และ 2.81 mg/L (BK3 $Cl_2$) เมื่อเทียบกับ DOC ก่อน Chlorination พบการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย (+2.5% +2.5% และ +5.3% ตามลำดับ) ไม่สอดคล้องกับทฤษฎีที่ DOC ควรลดลงเมื่อทำปฏิกิริยากับคลอรีน แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาของคลอรีนไม่ได้ทำการ Mineralize สารอินทรีย์ แต่เป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือโครงสร้างของ DOM แต่เนื่องจากการทำ Chlorination มีการเติมบัฟเฟอร์และสารหยุดปฏิกิริยา นำไปสู่การเพิ่มขึ้นของ DOC ได้ ในทางกลับกันค่า SUVA มีค่าลดลงอย่างมากโดยมีค่าเท่ากับ 0.84 L/mg-m (BK1 $Cl_2$) 0.48 L/mg-m (BK2 $Cl_2$) และ 0.50 L/mg-m L/mg-m (BK3 $Cl_2$) ค่า SUVA ของตัวอย่างน้ำหลังจากการ Chlorination ที่มีค่าลดลงอย่างชัดเจน (-64.1% -62.5% และ -67.6% สำหรับ BK1 BK2 และ BK3) การลดลงของค่า SUVA แสดงให้เห็นว่า สัดส่วนโครงสร้างที่เป็นอะโรมาติกของ DOM สามารถทำปฏิกิริยากับคลอรีนและถูกทำลายลงไปหลังจากผ่านกระบวนการฆ่าเชื้อโรค (Westerhoff et al., 2004; Wenk et al., 2013)

การวิเคราะห์ฟลูออเรสเซนต์สเปกโทรสโคปีหลังจากการทำ Chlorination พบว่า EEM ของ BK1 $Cl_2$ BK2 $Cl_2$ และ BK3 $Cl_2$ (Figs. 3B 3E และ 3H) มีค่าความเข้มของ FDOM ต่ำในทุก Region กล่าวคือคลอรีนสามารถทำปฏิกิริยากับ FDOM ได้ในทุก Region

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของ FDOM ก่อนและหลังการ Chlorination พบว่า FDOM ที่สามารถทำปฏิกิริยากับคลอรีนได้นั้นมีลักษณะแตกต่างกันในแต่ละตัวอย่าง โดย FDOM Region 3 และ 5 ในน้ำดิบ (BK1) สามารถทำปฏิกิริยากับคลอรีน (Fig. 3C) ในขณะเดียวกัน FDOM ในน้ำหลังกระบวนการตกตะกอน (BK2) นั้น FDOM แทบจะไม่เกิดปฏิกิริยากับคลอรีนเลย (Fig. 3F) และ FDOM ในน้ำหลังกระบวนการกรอง (BK3) FDOM Region 4 สามารถทำปฏิกิริยากับคลอรีนได้อย่างมาก และพบการทำปฏิกิริยากับ FDOM ที่อยู่ใน Region 3 และ 5 เช่นเดียวกันกับ BK1 นอกจากนั้นยังการทำปฏิกิริยากับ Region 2 ที่เป็น FDOM ที่เพิ่มเข้ามาภายหลังจากกระบวนการกรอง (Fig. 3I)

ผลการศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นความสามารถให้การกำจัด DBP precursor จำพวกหนึ่งของกระบวนการตกตะกอน และชี้ให้เห็นถึงปัญหาของกระบวนการกรองซึ่งอาจจะก่อให้เกิด DBP precursor อีกจำพวกหนึ่ง ซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากการอุดตันของทรายกรองที่เกิดจากสาหร่าย อย่างไรก็ดี ผลการวิเคราะห์ FDOM นั้นไม่สามารถจำแนกสารเป็นชนิดจำเพาะได้ ในการวิเคราะห์ชนิดและแหล่งกำเนิดของสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นหลังจากกระบวนการกรองจำเป็นต้องใช้เครื่องมือวิเคราะห์ที่สามารถจำแนกลักษณะโครงสร้างของสารอินทรีย์ได้ต่อไป

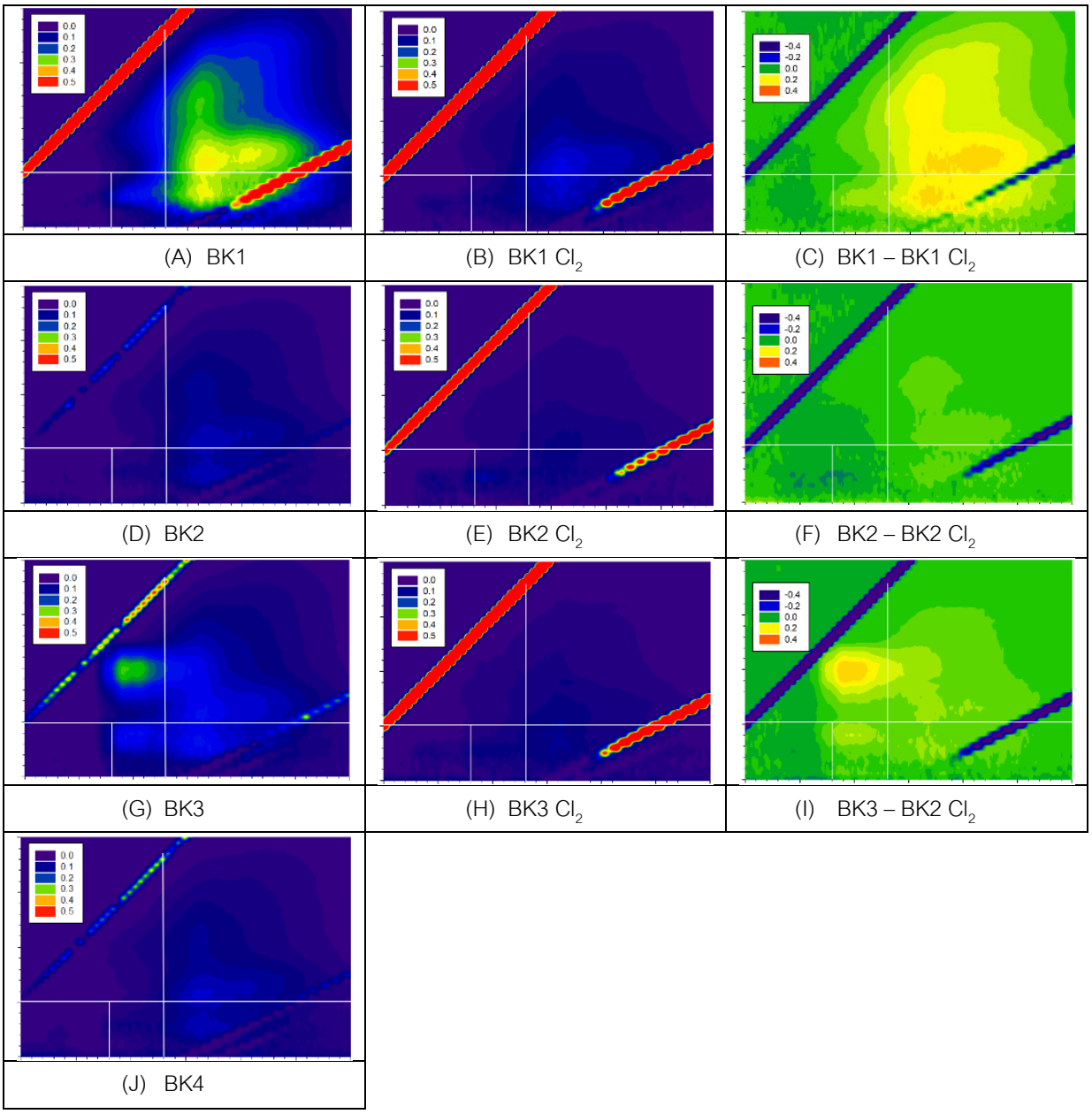



**Fig. 3** EEM before chlorination, after chlorination, and differential EEM of each water treatment stage, BK1 for raw water, BK2 for sedimented water, BK3 for filtered water, and BK4 for chlorinated water

**สรุป**

สารอินทรีย์ละลายน้ำมีการเปลี่ยนแปลงตามกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำของโรงงานผลิตน้ำประปา โดยในน้ำดิบตั้งต้น สารอินทรีย์มีลักษณะผสมระหว่างอะโรมาติกและแอลิฟาติก และ FDOM มีลักษณะเป็น Humic และ Fulvic acid-like ซึ่งเป็นลักษณะของสารอินทรีย์ในแหล่งน้ำผิวดิน เมื่อผ่านกระบวนการตกตะกอน สารอินทรีย์ที่มีลักษณะอะโรมาติกมีค่าลดลง และ ความเข้มของ FDOM ลดลงในทุก Region หลังจากนั้นมีค่าค่อนข้างคงที่หลังจากผ่านกระบวนการทรายกรองและกระบวนการฆ่าเชื้อ

การจำลองการฆ่าเชื้อโดยใช้น้ำจากกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำแสดงให้เห็นสัดส่วนของ DOM และ FDOM ที่สามารถทำปฏิกิริยากับคลอรีนได้นั้น (DBP precursor) เปลี่ยนแปลงไปตามกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำ โดยทั่วไปกระบวนการฆ่าเชื้อโรคลดคาร์บอนอินทรีย์ได้เล็กน้อย ไม่สามารถออกซิไดซ์ได้สมบูรณ์ แต่สามารถทำลายโครงสร้างโมเลกุลของสารอินทรีย์ให้มีความเป็นอะโรมาติกลดลงได้ สังเกตได้จาก DOC เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย แต่ SUVA ลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยในน้ำดิบ DOM และ FDOM ที่เป็น DBP precursor มีลักษณะเป็นอะโรมาติก และมีลักษณะคล้ายกับ Fulvic และ Humic acid-like (Region 3 และ 5) เมื่อน้ำดิบผ่านกระบวนการตกตะกอนแล้วนั้นจะส่งผลให้ DBP Precursor ลดลงอย่างเห็นได้ชัด อย่างไรก็ดี หลังจากน้ำผ่านกระบวนการทรายกรอง DBP precursor อีกกลุ่มหนึ่งได้อุบัติขึ้น โดยมีลักษณะ FDOM เป็น Soluble microbial by-products-like (Region 4) ซึ่งอาจจะมีแหล่งกำเนิดมาจากสาหร่ายที่อุดตันชั้นทรายกรองในช่วงของการเก็บตัวอย่าง แสดงให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้ว่าจะเกิด DBPs กลุ่มอื่นนอกเหนือจาก THMs ที่อยู่นอกเหนือจากมาตรฐานน้ำประปา เสนอแนะให้มีการเฝ้าระวัง DBP กลุ่มฮาโลอะซิโตไนไตรล์ (Haloacetonitriles, HANs) เป็นพิเศษในช่วงสาหร่ายสูง

การวิเคราะห์ฟลูออเรสเซนต์สเปกโทรสโคปีด้วย EEM ในระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำประปา เป็นการวิเคราะห์ที่มีศักยภาพในการตรวจติดตามและเฝ้าระวังการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของ FDOM อีกทั้งการวิเคราะห์นี้เป็นการวิเคราะห์ที่ทำได้อย่างรวดเร็ว มีการเตรียมตัวอย่างที่เรียบง่ายจึงอาจจะใช้เป็นการวิเคราะห์ตรวจสอบคุณภาพน้ำแบบ Real-time monitoring เพื่อรับมือกับ FDOM ที่เปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลในน้ำดิบ การวัดประสิทธิภาพการกำจัด FDOM ในแต่ละกระบวนการ และแนวโน้มการเกิด DPB กลุ่มต่างๆ จาก Precursor ที่ปรากฏก่อนทำการฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปา

**กิตติกรรมประกาศ**

ขอขอบคุณโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน ที่อนุเคราะห์ตัวอย่างน้ำที่ใช้ในการวิจัย และการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

**เอกสารอ้างอิง**

กรมอนามัย. 2563. เกณฑ์คุณภาพน้ำประปาดื่มได้. กรมอนามัย. กระทรวงสาธารณสุข. กรุงเทพฯ

Baghoth, S.A., Sharma, S.K., Guitard, M., Heim, V., Croué, J.P., Amy, G.L. 2011. Removal of NOM-constituents as characterized by LC-OCD and F-EEM during drinking water treatment. J. Water. Supply. Res. T. 60: 412–424. doi.org/10.2166/aqua.2011.059

Chen, W., Westerhoff, P., Leenheer, J.A., Booksh, K. 2003. Fluorescence excitation-emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter. Environ. Sci. Technol. 37: 5701–5710. doi.org/10.1021/es034354c

Coble, P.G. 1996. Characterization of marine and terrestrial DOM in seawater using excitation-emission matrix spectroscopy. Mar. Chem. 51: 325–346. doi.org/10.1016/0304-4203(95)00062-3

Danielsson, L.G. 1982. On the use of filters for distinguishing between dissolved and particulate fractions in natural waters. Water. Res. 16: 179–182. doi.org/10.1016/0043-1354(82)90108-7

Fan, Z., Yang, H., Li, S., Yu, X. 2020. Tracking and analysis of DBP precursors' properties by fluorescence spectrometry of dissolved organic matter. Chemosphere. 239: 124790. doi.org/10.1016/j.chemosphere. 2019.124790

Fang, J., Yang, X., Ma, J., Shang, C., Zhao, Q. 2010. Characterization of algal organic matter and formation of DBPs from chlor(am)ination. Water. Res. 44: 5897–5906. doi.org/10.1016/j.watres.2010.07.009

Fooladvand, M., Ramavandi, B., Zandi, K., Ardestani, M. 2011. Investigation of trihalomethanes formation potential in Karoon River water, Iran. Environ. Monit. Assess. 178: 63–71. doi.org/10.1007/s10661-010-1672-4

Go, R., Yang, H.-L., Kan, C.-C., Ong, D., Garcia-Segura, S., de Luna, M. 2021. Natural organic matter removal from raw surface water: benchmarking performance of chemical coagulants through excitation-emission fluorescence matrix spectroscopy analysis. Water-Sui. 13: 146. doi.org/10.3390/w13020146

Grünwald, A., Šťastný, B., Slavíčková, K., Slavíček, M. 2002. Formation of haloforms during chlorination of natural waters. Acta. Polytech. 42. doi.org/10.14311/334

Han, Z., Xiao, M., Yue, F., Yi, Y., Mostofa, K. 2021. Seasonal variations of dissolved organic matter by fluorescent analysis in a typical river catchment in Northern China. Water-Sui. 13: 494. doi.org/10.3390/w13040494

Hua, G., Reckhow, D.A., Abusallout, I. 2015. Correlation between SUVA and DBP formation during chlorination and chloramination of NOM fractions from different sources. Chemosphere. 130: 82–89. doi.org/10.1016/j. chemosphere.2015.03.039

Hua, L.C., Chao, S.J., Huang, K., Huang, C. 2020. Characteristics of low and high SUVA precursors: Relationships among molecular weight, fluorescence, and chemical composition with DBP formation. Sci. Total. Environ. 727: 138638. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138638

Huguet, A., Vacher, L., Relexans, S., Saubusse, S., Froidefond, J.M., Parlanti, E. 2009. Properties of fluorescent dissolved organic matter in the Gironde Estuary. Org. Geochem. 40: 706–719. doi.org/10.1016/j. orggeochem.2009.03.002

Joh, G., Choi, Y.S., Shin, J.-K., Lee, J. 2011. Problematic algae in the sedimentation and filtration process of water treatment plants. J. Water. Supply. Res. T. 60: 219–230. doi.org/10.2166/aqua.2011.035

Jutaporn, P., Coronell, O. 2017. Characterization of Ultrafiltration Membrane Foulant Using Fluorescence Signature of Natural Organic Matter in Surface Water. Thai Environmental Engineering Journal 31: 1–9.

Jutaporn, P., Laolertworakul, W., Armstrong, M.D., Coronell, O. 2019. Fluorescence spectroscopy for assessing trihalomethane precursors removal by MIEX resin. Water. Sci. Technol. 79: 820–832. doi.org/10.2166/wst.2019.036

Kitis, M., Karanfil, T., Wigton, A., Kilduff, J.E. 2002. Probing reactivity of dissolved organic matter for disinfection by-product formation using XAD-8 resin adsorption and ultrafiltration fractionation. Water. Res. 36: 3834–3848. doi.org/10.1016/s0043-1354(02)00094-5

Korshin, G.V., Fabbricino, M. 2004. Probing the mechanisms of NOM chlorination using fluorescence: formation of disinfection by-products in Alento River water. Wa. Sci. Technol. 4: 227–233. doi.org/10.2166 /ws.2004.0082

Latifoglu, A. 2016. Formation of trihalomethanes by the disinfection of drinking water. Indoor. Built. Environ. 12: 413–417. doi.org/10.1177/1420326x03037000

Lavonen, E.E., Kothawala, D.N., Tranvik, L.J., Gonsior, M., Schmitt-Kopplin, P., Kohler, S.J. 2015. Tracking changes in the optical properties and molecular composition of dissolved organic matter during drinking water production. Water Res. 85: 286–294. doi.org/10.1016/j.watres.2015.08.024

Matilainen, A., Vepsalainen, M., Sillanpaa, M. 2010. Natural organic matter removal by coagulation during drinking water treatment: a review. Adv. Colloid. Interface. Sci. 159: 189–197. doi.org/10.1016/ j.cis.2010.06.007

McKnight, D.M., Boyer, E.W., Westerhoff, P.K., Doran, P.T., Kulbe, T., Andersen, D.T. 2001. Spectrofluorometric characterization of dissolved organic matter for indication of precursor organic material and aromaticity. Limnol. Oceanogr. 46: 38–48. doi.org/10.4319/lo.2001.46.1.0038

Ohno, T. 2002. Fluorescence inner-filtering correction for determining the humification index of dissolved organic matter. Environ. Sci. Technol. 36: 742–746. doi.org/10.1021/es0155276

Osburn, C.L., Handsel, L.T., Mikan, M.P., Paerl, H.W., Montgomery, M.T. 2012. Fluorescence tracking of dissolved and particulate organic matter quality in a river-dominated estuary. Environ. Sci. Technol. 46: 8628–8636. doi.org/10.1021/es3007723

Peansawang, P., Leungprasert, S., Tungsudjawong, K. 2018. Investigation of humic acids concentration in different seasons in a raw water canal, Bangkok, Thailand. Wa. Sci. Technol. 18: 1727–1738. doi.org/10.2166/ws.2017.235

Shen, Q., Zhu, J., Cheng, L., Zhang, J., Zhang, Z., Xu, X. 2011. Enhanced algae removal by drinking water treatment of chlorination coupled with coagulation. Desalination. 271: 236–240. doi.org/10.1016/j. desal.2010.12.039

Tungsudjawong, K., Leungprasert, S., Jutaporn, P. 2020. Tracking seasonal changes of natural organic matter in a water treatment plant in Bangkok using EEM-PARAFAC approach. Songklanakarin Journal of Science & Technology 43: 1244–1251.

Uyguner, C.S., Bekbolet, M. 2005. Implementation of spectroscopic parameters for practical monitoring of natural organic matter. Desalination. 176: 47–55. doi.org/10.1016/j.desal.2004.10.027

Weishaar, J.L., Aiken, G.R., Bergamaschi, B.A., Fram, M.S., Fujii, R., Mopper, K. 2003. Evaluation of specific ultraviolet absorbance as an indicator of the chemical composition and reactivity of dissolved organic carbon. Environ. Sci. Technol. 37: 4702–4708. doi.org/10.1021/es030360x

Wenk, J., Aeschbacher, M., Salhi, E., Canonica, S., von Gunten, U., Sander, M. 2013. Chemical oxidation of dissolved organic matter by chlorine dioxide, chlorine, and ozone: effects on its optical and antioxidant properties. Environ. Sci. Technol. 47: 11147–11156. doi.org/10.1021/es402516b

Westerhoff, P., Chao, P., Mash, H. 2004. Reactivity of natural organic matter with aqueous chlorine and bromine. Water. Res. 38: 1502–1513. doi.org/10.1016/j.watres.2003.12.014

Yee, L.F., Abdullah, M P., Ata, S., Ishak, B. 2006. Dissolved organic matter and its impact on the chlorine demand of treated water. The Malaysian Journal of Analytical Sciences. 10: 243–250.

Yuthawong, V., Thongnueaha, C., Phungsai, P. 2023. Changes in optical properties and molecular composition of dissolved organic matter and formation of disinfection by-products during conventional water treatment processes. Environ. Sci.-Wat. Res. 9: 161–175. doi.org/10.1039/d2ew00609j

Zhuang, L.-L., Wu, Y.-H., Espinosa, V. M. D., Zhang, T.-Y., Dao, G.-H., Hu, H.-Y. 2016. Soluble Algal Products (SAPs) in large scale cultivation of microalgae for biomass/bioenergy production: A review. Renew. Sust. Energ. Rev. 59: 141–148. doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.352

# สาขาอุตสาหกรรมเกษตร

(Subject: Agro-Industry)

---

# ภาคบรรยาย

(Oral Presentation)

# Modification of rice/soy protein-polyphenol complexes to enhance foaming properties

Pawadee Ko-amornsup, Prisana Suwannaporn*

Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: prisana.s@ku.th

**Abstract**

Proteins and polyphenols could engage in complex formation that could alter functional properties such as foaming properties. This study focused on examining the foaming properties of rice and soy protein hydrolysate (RPH and SPH) complexed with various polyphenols; anthocyanidin (An), (-)-Epigallocatechin-3-gallate (EGCG), chlorogenic acid (CA), resveratrol (Rr), and quercetin (Qc) through non-covalent and covalent conjugation method (free radical and alkaline). The higher degrees of hydrolysis (DH12) the higher foaming capacity. However, protein hydrolysate complexing with polyphenols show little affected in foaming stability. The highest foaming properties found in the covalent conjugation via free radical method using quercetin in soy protein, and anthocyanin in rice protein. This research contributing insights toward enhancing foaming capacity in food applications.

**Keywords**: Foaming properties, Protein-polyphenol complexes, Rice protein, Soy protein

## Introduction

Foaming agents play a crucial role in beer and beverage industry that influencing the quality of foam formation, stability, and overall sensory experience. In the food industry, traditional foaming agents such as low-molecular-weight surfactants, milk, egg white protein, and saponin have been widely used. However, these agents may contain animal-based components or allergens, which can pose health concerns. (Townsend and Nakai, 1983). Recent advancements in technology have led to the development of alternative foaming agents, including those derived from plant-based sources. One such agent is polyphenols, which are naturally occurring compounds with multiple phenolic rings and hydroxyl groups. These compounds exhibit structural diversity and amphiphilic properties, making them suitable for use as foaming agents in the food industry (Phan et al., 2014; Cao et al., 2018).

The formation of polyphenol-protein complexes can be established through the covalent and non-covalent bonding (Jiang et al., 2019; Meng and Li, 2021). These interactions result in structural modifications that significantly impact on emulsifying and foaming properties (Cao et al., 2018; Zhang et al., 2022b). Polyphenols can undergo autoxidation in alkaline environment or in the presence of oxidizing agents, result in the formation of electrophilic o-quinones. These o-quinones can undergo consecutive condensation reactions or covalently bind to proteins. Amino acid side chains containing free thiol groups and amino groups are particularly susceptible to covalent modification by polyphenols. Furthermore, quinones can condense and modify amino acid side chains, leading to changes in their reactivity. The non-covalent interaction between polyphenols and proteins occurs through reversible associations facilitated by hydrogen bonds, **π -π** interactions, and hydrophobic interactions. These non-covalent interactions contribute to the binding of polyphenols to proteins, allowing for reversible associations (Keppler et al., 2020).

In this study, we aim to investigate the complexing method of protein-polyphenol on the foaming properties of rice and soy protein hydrolysate, with a focus on the impact of covalent and non-covalent interactions between the two on foaming properties. Additionally, we will explore the effect of different polyphenols on the foaming properties of rice and soy protein-polyphenol complexes. The study will compare the foaming properties of various polyphenols, including anthocyanin, EGCG, chlorogenic acid, resveratrol, and quercetin when bound to rice and soy protein hydrolysates. The findings of this research will provide valuable insights into the potential of protein-polyphenol complexes as foaming agent from plant-based in the food industry.

## Materials and Methods

### *Protein hydrolysate*

Protein isolate powder (1 g) was added to 100 mL of distilled water. The mixture was continuously stirred for 2 hr at room temperature to ensure complete rehydration, incubated at 50°C, and adjusted pH to 8.0 using 2 M NaOH. The mixture was mixed with 2.4 L of alcalase and the enzyme:protein ratio was 1:100. The

base volume was used to maintain a constant pH to achieve a degree of hydrolysis (DH) of 0, 6, and 12. The resultant hydrolysate was heated at 95°C for 10 mins to inactivate enzyme and cooled down to room temperature. Finally, the mixture was adjusted to pH 7.0 (Gomes and Kurozawa, 2021). The DH is defined as the percentage of peptide bonds cleaved to the total number of bonds per unit weight ($h_{tot}$) as showed in Equation 1.

$$DH = B \times N_b / (M_p \times \alpha \times h_{tot}) \times 100 \quad (1)$$

where: B is the base consumption (mL); Nb is the normality of the base; Mp is the mass of protein (g); htot is the total number of peptide bonds in the protein substrate; 7.40 meq/g for rice protein (Zhao et al., 2020) and 7.8 meq/g for soybean protein (Nwachukwu and Aluko, 2019).; $\alpha$ is the average degree of dissociation of the $\alpha$-$NH_2$ groups. Which is assumed to be 0.885 at pH 8.0 and 50°C for both proteins (Liu et al., 2019).

*Formation of protein-polyphenol complexes*

For the free radical method, 10 ml of protein hydrolysate solution at pH 7 was added with 0.1 mL of $H_2O_2$ and 0.25 g of ascorbic acid. The mixture was maintained at 25°C for 2 hr, after that 0.2% (w/w) of polyphenols (An, EGCG, CA, Rr, and Qc) were added to the solution and incubated at 4°C for 24 hr. For the alkaline method, 10 mL of protein hydrolysate solution was adjusted to pH 9 using 1 M NaOH, allowed to equilibrate for 3 hr, added polyphenols 0.2% (w/w), and incubated at 4°C for 24 hr to allow interaction between the protein and polyphenols (Vasava et al., 2022). For non-covalent bonding complexation, protein hydrolysate was complexed by incubating with 0.2% (w/w) polyphenols at 25°C for 2 hr to allow non-covalent binding between proteins and polyphenols (Zhang et al., 2022a), Control was conducted similarly using all methods without added polyphenols.

*Foam stability and capacity*

The foaming properties of protein-polyphenol complexes were determined in both foam capacity (FC) and foam stability (FS) (Meng and Li, 2021). Samples (10 mL) was transferred into a 50 mL centrifuge tube and homogenized using a high-speed homogenizer (T25 digital ULTRA-TURRAX, IKA, Germany) at 13,000 rpm for 1 min at room temperature. The total volume after whipping was immediately measured to calculate the FC. The samples were then allowed to stand undisturbed for 30 mins to measure for FS. FC and FS were determined using the following Equations 2 and 3:

$$FC\ (\%) = \frac{V_0 - V}{V} \times 100 \quad (1)$$

$$FS\ (\%) = \frac{V_{30}}{V_0} \times 100 \quad (2)$$

Where: V is the foam volume before homogenization, $V_0$ is the foam volume at 0 time after homogenization, and $V_{30}$ is the foam volume at 30 min after homogenization.

*Statistical analyses*

All experiments were performed in duplicate and the measurement was done for 4 times. The results were reported as mean±standard deviation. An analysis of variance was performed using a randomized completely block design. The mean difference was determined by Duncan's multiple range test ($p < 0.05$) using IBM SPSS Statistics for Windows, Version 26.0. (IBM Corp., NY, USA).

**Results and Discussion**

*Effect of degree of hydrolysis on foaming properties*

Table 1 illustrates a clear correlation between increasing degree of hydrolysis (DH) and higher foam production. This aligns with findings by Don et al. (1991) that optimal foam capacity was observed at DH levels of 10–12%, beyond which higher DH values resulted in a notable decrease in foaming stability. These observations can be attributed to the enzymatic action of proteases during hydrolysis, leading to the disruption of the protein network and the elimination of cross-linkages that resisted solubility. Consequently, the reduced molecular weight of the protein enhances solubility and foaming properties. Moreover, protein hydrolysis was found to increase the surface activity of the hydrolyzed mixture due to the decreased molecular size of proteins. This reduction accelerates the diffusion rate of hydrolyzed proteins toward the interface, exposing hydrophobic areas and yielding peptides with increased amphiphilicity, facilitating the adsorption at the air-water interface. This phenomenon is likely attributed to the increased availability of proteins for adsorption at the interface (Don et al., 1991).

Conversely, the decline in foaming stability following hydrolysis can be attributed to changes in the microdomains at the air-water interface for protein hydrolysates. These hydrolysates exhibit smaller microdomains and increased monolayer segregation as DH increases, resulting in decreased monolayer thickness. The segregation of protein microdomains hampers the formation of a coherent film with high free energy, adversely impacting the stabilization of the interfacial film, as indicated by Rodríguez et al. (2007). The low monolayer thickness also has negative effects on the stabilization of the interfacial film. Additionally, extensive hydrolysis might result in peptides that are too small and may lose their amphiphilicity, thus affecting surface activity (Xia et al., 2022).

Notably, initially, rice and soy proteins exhibited similar foam capacity and stability values at DH 0. However, the foaming capacity of rice protein significantly increased at DH 6, while soy protein did not show a significant increase. This difference may be linked to the reduction in molecular masses of proteins. Protein hydrolysates generally promote foam formation due to their lower molecular weight, facilitating faster diffusion of molecules to fluid interfaces between the air and water phases. Soy protein at DH 6 did not exhibiting a significant increase, this could be attributed to the distinct hydrophilic character of the amino acids in the native protein compared to those generated during the hydrolysis process (Conde et al., 2005). Interestingly, the notable differences between the amino acid composition of the protein and the 6% hydrolysate, despite having a very similar polypeptide composition, correspond to hydrophobic amino acids. This observation aligns with the findings of Conde et al. (2005), who reported that sunflower protein isolate and its hydrolysate at 5.6% exhibited very similar polypeptide compositions, specifically concerning hydrophobic amino acids such as Met and Trp. Additionally, the presence of methionine in rice protein could potentially supplement insufficient amino acids in soy protein formulations.(Lee et al., 2022).

**Table 1** Effect of degree of hydrolysis on foaming properties

| Protein | DH (%) | Foaming properties | |
|---|---|---|---|
| | | Foam capacity (%) | Foam stability (%) |
| Rice | 0 | 125.01±0.01$^{c}$ | 97.74±0.06$^{a}$ |
| | 6 | 300.02±0.01$^{b}$ | 87.45±0.07$^{c}$ |
| | 12 | 325.01±0.00$^{a}$ | 93.94±0.26$^{b}$ |
| Soy | 0 | 125.01±0.01$^{b}$ | 97.74±0.06$^{a}$ |
| | 6 | 125.02±0.01$^{b}$ | 66.64±0.05$^{b}$ |
| | 12 | 150.01±0.01$^{a}$ | 60.04±0.06$^{c}$ |

$^{a\text{-}c}$ indicates significant differences in the same type of protein ($p < 0.05$)

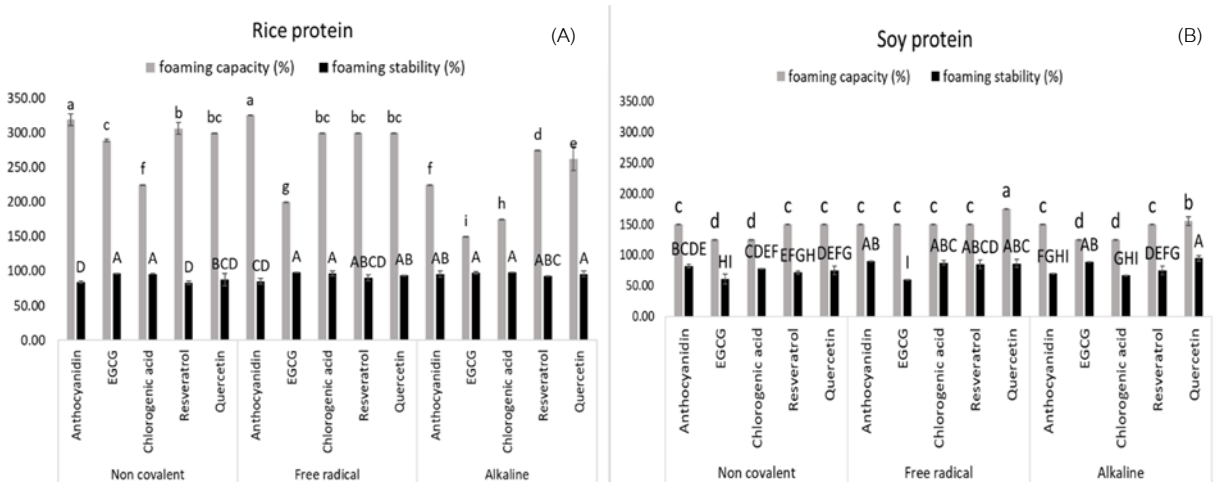
*Effect of polyphenol complex on foaming properties of protein*

From Table 1, a protein hydrolysate at DH of 12 was selected for complexation with polyphenols. For foaming capacity, rice protein hydrolysate complexed with anthocyanin using the noncovalent and free radical methods was improved (Fig. 1A). This outcome might be linked to the increased reactivity of flavonoids with a higher number of hydroxyl substituents (Rawel et al., 2002). Despite improvements in foaming capacity, anthocyanidin displayed a decrease in foaming stability in non-covalent and free radical methods, potentially due to excessive aeration levels leading to thinning of the liquid film between foam bubbles, mechanical deformation, and decreased foam stability (Thuy et al., 2022).

Fig. 1B illustrates that in soy protein hydrolysis, non-covalent and alkaline methods show minimal differences in foaming capacity. However, the free radical method enhances foaming properties, including

foaming capacity, and foaming stability with quercetin. This superiority might be attributed to the free radical method's facilitation of covalent bond formation, particularly with phenolic dimers possessing lower redox potential (Pan et al., 2022). However, possibly due to the enhanced reactivity of hydroxy substituents with tryptophan side chains in proteins (Rawel et al., 2002). Moreover, the enhancement in foaming capacity could be attributed to conformational changes in the protein structure, exposing previously buried hydrophilic regions, and the covalent blockade of hydrophobic residues like tryptophan due to the introduction of hydrophilic carboxyl residues from polyphenols (Rawel et al., 2002).

Interestingly, the polyphenol complex formed via alkaline methods tended to have quite low foaming capacities for both proteins. This may be due to the formation of high molecular weight polymers known as tannins. Tannins are formed when phenolic compounds react with the polypeptide amino acid chain via covalent bonding in the presence of oxygen and an alkaline environment. These tannins can cause the protein to precipitate, which can negatively impact the foam properties of the complex (Feng et al., 2023; Tian et al., 2023).




[a-d] indicates a significant difference in foaming capacity values in the same method for protein–polyphenol complexation. ($p < 0.05$)

[A-C] indicates a significant difference in foaming stability in the same method to complexed between protein and polyphenol ($p < 0.05$)

**Fig. 1** Foaming properties of protein hydrolysate DH12-polyphenol complexes

## Conclusion

The highest foaming capacity is achieved at a high degree of hydrolysis (DH12) for both rice and soy proteins. Consequently, the foaming capacity of rice protein hydrolysate complexed with anthocyanin showed improvement exclusively in the free radical method and non-covalent bond. In the soy protein hydrolysate, the free radical method was used with quercetin, which demonstrated promising results for both foam capacity and

stability. In conclusion, the experimental results suggest that the degree of hydrolysis and the type of polyphenol bound to the protein have a significant impact on the foaming properties of protein-polyphenol complexes. These findings have potential implications for the use of protein-polyphenol complexes in various industrial applications, particularly in the food and beverage industry.

**References**

Cao, Y., Xiong,Y.L., Cao, Y., True, A.D. 2018. Interfacial properties of whey protein foams as influenced by preheating and phenolic binding at neutral ph. Food Hydrocolloids. 82: 379–387.

Conde, J.M., del Mar Yust Escobar, M., Pedroche Jiménez, J.J., Rodríguez, F.M., Rodríguez Patino, J.M. 2005. Effect of enzymatic treatment of extracted sunflower proteins on solubility, amino acid composition, and surface activity. J. Agric. Food Chem. 53: 8038–8045.

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

Feng, Y., Jin, C., Lv, S., Zhang, H., Ren, F., Wang, J. 2023. Molecular mechanisms and applications of polyphenol-protein complexes with antioxidant properties: A review. Antioxidants 12: 1577.

Gomes, M.H.G., Kurozawa, L.E. 2021. Influence of rice protein hydrolysate on lipid oxidation stability and physico-chemical properties of linseed oil microparticles obtained through spray-drying. LWT. 139: 110510.

Jiang, Z., Li, M., Zhao, J., Wang, X., Yu, P., Qayum, A., Li, A., Hou, J. 2019. Effects of ultrafiltration and hydrolysis on antioxidant activities of maillard reaction products derived from whey protein isolate and galactose. LWT 113: 108313.

Keppler, J.K., Schwarz, K., van der Goot, A.J. 2020. Covalent modification of food proteins by plant-based ingredients (polyphenols and organosulphur compounds): A commonplace reaction with novel utilization potential. Trends Food Sci. Technol. 101: 38–49.

Lee, J.-S., Choi, I., Han, J. 2022. Construction of rice protein-based meat analogues by extruding process: Effect of substitution of soy protein with rice protein on dynamic energy, appearance, physicochemical, and textural properties of meat analogues. Food Res. Int. 161: 111840.

Liu, C., Bhattarai, M., Mikkonen, K.S., Heinonen, M. 2019. Effects of enzymatic hydrolysis of fava bean protein isolate by alcalase on the physical and oxidative stability of oil-in-water emulsions. J. Agric. Food Chem. 67: 6625–6632.

Meng, Y., Li, C. 2021. Conformational changes and functional properties of whey protein isolate-polyphenol complexes formed by non-covalent interaction. Food Chem. 364: 129622.

Nwachukwu, I.D., Aluko, R.E. 2019. A systematic evaluation of various methods for quantifying food protein hydrolysate peptides. Food Chem. 270: 25–31.

Pan, X., Fan, F., Ding, J., Li, P., Sun, X., Zhong, L., Fang, Y. 2022. Altering functional properties of rice protein hydrolysates by covalent conjugation with chlorogenic acid. Food Chem 14: 100352.

Phan, H.T.T., Yoda, T., Chahal, B., Morita, M., Takagi, M., Vestergaard, M.d.C. 2014. Structure-dependent interactions of polyphenols with a biomimetic membrane system. Biochim. Biophys. Acta 1838: 2670–2677.

Rawel, H.M., Czajka, D., Rohn, S., Kroll, J. 2002. Interactions of different phenolic acids and flavonoids with soy proteins. Int. J. Biol. Macromol. 30: 137–150.

Rodríguez J.M.R., Miñones Conde, J., Linares, H.M., Pedroche, J.J.J., Carrera C.S., Pizones, V., Rodríguez, F.M. 2007. Interfacial and foaming properties of enzyme-induced hydrolysis of sunflower protein isolate. Food Hydrocolloids 21: 782–793.

Thuy, N.M., Tien, V.Q., Tuyen, N.N., Giau, T.N., Minh, V.Q., Tai, N.V. 2022. Optimization of mulberry extract foam-mat drying process parameters. Molecules 27: 8570.

Tian, R., Han, X., Tian, B., Li, G., Sun, L., Tian, S., Qin, L., Wang, S. 2023. Effects of covalent binding of different polyphenols on structure, rheology and functional properties of whey protein isolate. LWT. 184: 114968.

Townsend, A.-A., Nakai, S. 1983. Relationships between hydrophobicity and foaming characteristics of food proteins. J. Food Sci. Technol. 48: 588–594.

Xia, W., Botma, T.E., Sagis, L.M.C., Yang, J. 2022. Selective proteolysis of β-conglycinin as a tool to increase air-water interface and foam stabilising properties of soy proteins. Food Hydrocolloids 130: 107726.

Zhao, M., Xiong, W., Chen, B., Zhu, J., Wang, L. 2020. Enhancing the solubility and foam ability of rice glutelin by heat treatment at ph12: Insight into protein structure. Food Hydrocolloids 103: 105626.

Zhang, N., Zhang, X., Zhang, Y., Li, Y., Gao, Y., Li, Q., Yu, X. 2022a. Non-covalent interaction between pea protein isolate and catechin: Effects on protein structure and functional properties. Food Funct. 13: 12208–12218.

Zhang, Z., Li, X., Sang, S., McClements, D.J., Chen, L., Long, J., Jiao, A., Jin, Z., Qiu, C. 2022b. Polyphenols as plant-based nutraceuticals: Health effects, encapsulation, nano-delivery, and application. Foods 11: 2189.

# ผลของการผสมสตาร์ชข้าวเหนียวและสตาร์ชมันสำปะหลังต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชเพสท์

# Effect of blending waxy rice starch and tapioca starch on physicochemical properties of starch paste

**มณฑิชา ถุงเงิน, น้ำฝน ลำดับวงศ์***

Monticha Toong-ngern, Namfone Lumdubwong*

ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: faginfl@ku.ac.th

**บทคัดย่อ**

การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชผสม ประกอบด้วยสตาร์ชข้าวเหนียว (WS) สตาร์ชมันสำปะหลัง (TS) และสตาร์ชผสมที่มีอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 5 อัตราส่วน (0/100, 25/75, 50/50, 75 /25 และ 100/0) จากการศึกษาพบว่า ปริมาณแอมิโลส (AM) ของสตาร์ชผสมมีค่าอยู่ระหว่าง 6.21% ถึง 18.65% ซึ่งต่ำกว่าปริมาณ AM ที่คำนวณตามอัตราส่วนน้ำหนักของ WR และTS สมบัติการพองตัวของสตาร์ชผสมแสดงความสัมพันธ์ผกผันกับปริมาณ AM และไม่เป็นไปตามอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสตาร์ชผสม นอกจากนี้ สมบัติความหนืด (pasting properties) ของสตาร์ชผสมไม่สัมพันธ์กับปริมาณ AM สตาร์ชผสมมีความต้านทานแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นและเกิด retrogradation ลดลง เมื่อเทียบกับ TS สตาร์ชผสม WR75TS25 มีสมบัติความหนืดเหนือกว่า TS โดยมีค่า breakdown (BD) และค่า setback (SB) ต่ำกว่า TS และค่าความหนืดสุดท้าย (FV) สูงกว่า TS ($p < 0.05$) และสตาร์ชผสม WR75TS25 ยังแสดงสมบัติความคงตัวจากการคืนรูปจากเยือกแข็งที่ดี โดยมี %syneresis ต่ำกว่า TS ($p < 0.05$) หลังจากการแช่เยือกแข็งในวงจรที่ 5

**คำสำคัญ**: ซินเนอรีซิส, เซ็ทแบค, เบรกดาวน์, สตาร์ชผสม

**Abstract**

The objective of this study was to investigate the physicochemical properties of starch blends consisting of waxy rice starch (WS), tapioca starch (TS), and blended starch at five weight ratios (0/100, 25/75, 50/50, 75/25, and 100/0). The determined amylose (AM) content of the blends ranged from 6.21% to 18.65%, which was lower than the AM content calculated based on the weight ratios of the parental starches. It was found that swelling properties of starch blends show an inverse relationship with their amylose content. In addition, their pasting properties were not proportionally corresponded to the AM content and swelling properties of the weight ratios of the blends. The starch blends enhanced shear resistance of the paste and reduced retrogradation, compared to those of the parental TS. The WR75TS25 blend outperformed TS in terms of low breakdown (BD) and setback (SB) and high final viscosity (FV) ($p < 0.05$). The WR75TS25 blend also displayed a superior freeze-thaw stability as the syneresis was lower than TS ($p < 0.05$) after five freezing cycles.

**Keywords**: Breakdown, Setback, Starch blends, Syneresis

**คำนำ**

สตาร์ชถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมอาหาร เพื่อให้ได้คุณลักษณะเนื้อสัมผัส ลักษณะปรากฏ และความคงตัวของผลิตภัณฑ์อาหาร การผสมสตาร์ชธรรมชาติที่แตกต่างกัน เป็นวิธีหนึ่งที่ทำให้เกิดสมบัติของสตาร์ชแบบใหม่ที่เป็นทางเลือกที่ปลอดภัยต่อผู้บริโภค มีต้นทุนการผลิตต่ำเปรียบเทียบกับการผลิตสตาร์ชดัดแปรทางเคมี โดยใช้หลักการของสมบัติทางกายภาพและเคมีของสตาร์ชแต่ละชนิด ที่ต่างกันและมีลักษณะเฉพาะตัว ขึ้นอยู่กับลักษณะทางสัณฐานวิทยาและโครงสร้างโมเลกุลของสตาร์ช ตัวอย่างสมบัติทางกายภาพและเคมีของสตาร์ช ได้แก่ อุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชัน กำลังการพองตัว สมบัติด้านความหนืด และสมบัติทางกระแสวิทยา และเมื่อทำการผสมสตาร์ชธรรมชาติดังกล่าวเข้าด้วยกัน มีรายงานถึงการส่งผลต่อสมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ช โดยสตาร์ชผสมสามารถแสดงอิทธิพลเป็นไปในทิศทาง additive effect หรือ non-additive effect ขึ้นอยู่กับชนิดของสตาร์ช อัตราส่วนผสม และปริมาณสตาร์ชในระบบเป็นปัจจัยหลัก โดยเมื่อสตาร์ชแต่ละชนิดในส่วนผสมมีอิทธิพลต่อกันและไม่สามารถทำนายสมบัติเชิงหน้าที่จากอัตราส่วนน้ำหนักที่ใช้ผสม ผลที่ได้นับเป็น non-additive effect ในทางตรงกันข้าม นับเป็น additive effect เมื่อสามารถทำนายสมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ชผสมตามอัตราส่วนน้ำหนักของสตาร์ชแต่ละชนิด (Waterschoot et al., 2015) จากการสำรวจเอกสาร พบว่า สามารถผสมสตาร์ชเพื่อให้ได้สมบัติของเจล/เพสท์ที่ต้องการ เช่น พฤติกรรมความหนืดที่ดีขึ้น ให้เนื้อสัมผัส มีความคงตัวจากการคืนรูปจากเยือกแข็ง Sun and Yoo (2015) รายงานว่าอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นของสตาร์ชมันสำปะหลังระหว่างสตาร์ชผสมของสตาร์ชข้าวและมันสำปะหลังทำให้เจลมีความแข็งแรงยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น และทนต่อแรงเฉือน Charoenrein and Preechathammawong (2012) พบว่า การผสมแป้งข้าวเหนียวและสตาร์ชมันสำปะหลัง 1–2% (w/w) ในสตาร์ชข้าวสามารถลด %syneresis ของสตาร์ชเจลได้ Detchewa et al. (2012) ศึกษาผลของการใช้แป้งผสมจากแป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียวต่อคุณภาพของเส้นสปาเก็ตตี้ พบว่า สามารถลดการเกิด retrogradation และปรับปรุงลักษณะปรากฏของพื้นผิวเส้นสปาเก็ตตี้ จะเห็นว่าสตาร์ชผสมสร้างสมบัติที่หลากหลายในการใช้งานและปรับปรุงสมบัติทางเคมีกายภาพได้หากเลือกชนิดสตาร์ชและอัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักที่เหมาะสมของสตาร์ช

เป็นที่ทราบว่าเจล/เพสท์สตาร์ชข้าวเหนียวมีความคงตัวจากการคืนรูปจากเยือกแข็งสูง (Hsieh et al., 2019) แต่มีราคาสูงเทียบกับสตาร์ชชนิดอื่น ขณะที่สตาร์ชมันสำปะหลังมีราคาถูก แต่เจล/เพสท์มีความใสและมีสมบัติด้านความหนืดคล้ายกับสตาร์ชข้าวเหนียว (Lin et al., 2013) อย่างไรก็ตาม เจล/เพสท์มันสำปะหลังมีการต้านทานแรงเฉือนต่ำ เกิด retrogradation และ syneresis สูง ด้วยเหตุดังกล่าวหากใช้สตาร์ชผสมระหว่างมันสำปะหลังและข้าวเหนียวน่าจะมีโอกาสลดต้นทุนการผลิต และปรับปรุงสมบัติเชิงหน้าที่บางประการของสตาร์ชได้ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลการผสมสตาร์ชข้าวเหนียวและสตาร์ชมันสำปะหลังต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชเพสท์ผสมเพื่อนำไปใช้เป็นส่วนผสมของอาหาร

**อุปกรณ์และวิธีการ**

*วัตถุดิบ*

สตาร์ชข้าวเหนียว (waxy rice starch; WR) และสตาร์ชมันสำปะหลัง (tapioca starch; TS) จากบริษัท บูรพาพรอสเพอร์ จำกัด, สารมาตรฐานแอมิโลสจากบริษัท ซิกม่า-อัลดริช (ประเทศไทย) จำกัด

*การเตรียมตัวอย่างสตาร์ชผสม*

เตรียมสตาร์ชผสมจากสตาร์ชธรรมชาติ สตาร์ชข้าวเหนียว และสตาร์ชมันสำปะหลัง อัตราส่วนโดยน้ำหนัก 5 อัตราส่วน ได้แก่ (0/100, 25/75, 50/50, 75/25, และ 100/0) ได้เป็นสตาร์ชผสม WR0TS100; WR25TS75; WR50TS50; WR75TS25; WR100TS0 ตามลำดับ

*การวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลส*

วิเคราะห์ปริมาณแอมิโลส (AM) โดยหลักการเกิดปฏิกิริยาสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีน ตามวิธีการของ Chrastil (1987)

*การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพและสมบัติด้านความหนืดของเพสท์*

วิเคราะห์กำลังการพองตัวและการละลายของสตาร์ชที่ความเข้มข้นของสตาร์ช 2% w/v ตามวิธีการของ Ranathunga et al. (2023) วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของสตาร์ชด้วยเครื่อง differential scanning calorimetry (DSC) ตามวิธีการของ Hsieh et al. (2019) โดยใช้อัตราส่วนสตาร์ชต่อน้ำ 1:2.5 (w/w) ตัวอย่างบรรจุใน crucible สแตนเลส ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 10–140°C ที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10°C/min วิเคราะห์สมบัติด้านความหนืดของเพสท์ด้วยเครื่อง rapid visco analyzer (RVA) ความเข้มข้นของสตาร์ช 6% w/v ตามวิธีการของ Lumdubwong and Seib (2000) และวิเคราะห์ความคงตัวจากการคืนรูปจากเยือกแข็งของสตาร์ชเพสท์ (6% w/v) ตามวิธีการของ Charoenrein et al. (2008) โดยแช่แข็งตัวอย่างที่อุณหภูมิ -18°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง สลับกับการทำละลายที่อุณหภูมิห้อง 2 ชั่วโมง นำไปเหวี่ยงเพื่อแยกน้ำออกจากเจลที่ความเร็วรอบ 100×g เป็นเวลา 15 นาที คำนวณ % syneresis ตาม Equation 1

$$\%\text{Syneresis} = \frac{\text{Weight of separated liquid from gel}}{\text{Total wt. of gel before centrifuging}} \text{X100} \quad (1)$$

*การวิเคราะห์ทางสถิติ*

วางแผนการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติแบบ completely randomized design (CRD) จากการทดลอง 2 ซ้ำ ข้อมูลที่ได้จากการทดลองนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของแต่ละกลุ่มทดลองโดยใช้ Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์สถิติ IBM SPSS Statistics Version 19.0

**ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง**

*ปริมาณแอมิโลสและสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชและสตาร์ชผสม*

เมื่อทำการวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลสของ WR TS และสตาร์ชผสม (WR/TS) ด้วยหลักการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนสีน้ำเงิน ระหว่างแอมิโลสและไอโอดีน พบว่า TS มีปริมาณแอมิโลส 36.45% สูงกว่า WR ที่มีปริมาณแอมิโลส 1.77% อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) (Table 1) WR มีปริมาณแอมิโลสใกล้เคียงกับการรายงานของ Lu et al. (2009) สำหรับ TS พบว่ามีปริมาณแอมิโลสสูงกว่า TS หลายสายพันธุ์ที่รายงานโดย Charles et al. (2005) ทั้งนี้อาจเป็นผลของแอมิโลเพกตินที่มีสายโซ่ยาวในการสร้างสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีน (Clerici et al., 2019) ในส่วนของสตาร์ชผสม

พบว่า มีปริมาณแอมิโลสอยู่ระหว่าง 6.21% ถึง 18.65% และค่าที่วิเคราะห์ได้ต่ำกว่าปริมาณแอมิโลสที่คำนวณโดยอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสตาร์ชที่ผสมกัน บ่งชี้ว่าปริมาณแอมิโลสของสตาร์ชผสม (WR/TS) มีลักษณะเป็น non-additive effect

ผลการวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนของ WR และTS พบว่า อุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนซ์ใกล้เคียงกัน โดยอุณหภูมิเริ่มต้นการเกิดเจลาติไนเซชัน ($T_o$) ของ TS (66.95ºC) สูงกว่า WR (65.65 ºC) ~1ºC ($p < 0.05$) แต่อุณหภูมิสูงสุด ($T_p$) อุณหภูมิสุดท้าย ($T_c$) ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่าง $T_c$ และ $T_o$ และเอนทาลปีของการเกิดเจลาติไนเซชัน ($\Delta H$) ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p \geq 0.05$) (Table 2) สอดคล้องกับรายงานของ Boonkor et al. (2022) ที่พบว่า TS และ WR มีสมบัติทางความร้อนไม่แตกต่างกัน

**Table 1** Amylose content and predicted values of amylose content of native starches and starch blends

| Sample | Amylose content (%) (measured values) | Amylose content (%) (predicted values) |
|---|---|---|
| WR | 1.77±0.00$^{e}$ | 1.77 |
| TS | 36.45±0.80$^{a}$ | 36.45 |
| WR25TS75 | 18.65±1.15$^{b}$ | 27.78 |
| WR50TS50 | 13.51±0.35$^{c}$ | 19.11 |
| WR75TS25 | 6.21±0.06$^{d}$ | 10.44 |

Means in the same column with different letters are significantly different ($p < 0.05$).

**Table 2** Gelatinization properties of native starches

| Sample | Gelatinization properties[A] | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | $T_o$ (°C) | $T_p$ (°C) | $T_c$ (°C) | $T_c$ - $T_o$ (°C) | $\Delta H$ (J/g) |
| WR | 65.56±0.06$^{b}$ | 72.67±0.00$^{a}$ | 82.27±0.18$^{a}$ | 16.71±0.13$^{a}$ | 12.14±0.04$^{a}$ |
| TS | 66.95±0.05$^{a}$ | 73.25±0.11$^{a}$ | 83.62±0.01$^{a}$ | 16.68±0.04$^{a}$ | 12.61±0.35$^{a}$ |

Means in the same column with different letters are significantly different ($p < 0.05$).

[A]$T_o$ = onset temperature of gelatinization; $T_p$ = peak temperature; $T_c$ = conclusion temperature.

*กำลังการพองตัวและความสามารถในการละลายของสตาร์ชและสตาร์ชผสม*

กำลังการพองตัวของสตาร์ชเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสและความหนืดของสตาร์ชเพสท์/เจล ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณแอมิโลส แอมิโลเพกติน และขนาดแกรนูล โดยแอมิโลเพกตินเป็นปัจจัยหลักที่ส่งเสริมการพองตัวของสตาร์ชแกรนูล เป็นผลให้แกรนูลแตกออกได้ง่ายหากสตาร์ชมีปริมาณแอมิโลเพกตินมาก ในขณะที่แอมิโลสจำกัดการพองตัวของสตาร์ชแกรนูล (Yu et al., 2012) มีรายงานว่า สตาร์ชแกรนูลที่มีขนาดใหญ่ทำให้กำลังพองตัวเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากมีความสามารถในการกักเก็บน้ำมากกว่าสตาร์ชแกรนูลขนาดเล็กเมื่อเปรียบเทียบกับสตาร์ชที่มีปริมาณแอมิโลสใกล้เคียงกัน (Lin et al., 2013; Sun and Yoo, 2015) นอกจากนี้กำลังการพองตัวของสตาร์ชแกรนูลยังขึ้นอยู่กับชนิดของโครงสร้างของแอมิโลเพกติน (Vamadevan and Bertoft, 2020) ทั้งนี้กำลังการพองตัวของสตาร์ชแกรนูล เพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัดเมื่ออุณหภูมิของระบบสูงกว่าอุณหภูมิเจลาติไนเซชัน จากการทดลองพบว่า กำลังการพองตัวของ WR สูงกว่า TS

($p < 0.05$) (Fig. 1) และเพิ่มสูงขึ้นเป็นสองเท่าที่อุณหภูมิ 65ºC ซึ่งเป็นอุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดเจลาติไนซ์ (onset gelatinization temperature) WR มีปริมาณแอมิโลเพกตินสูง และมีแกรนูลขนาดเล็ก มีกำลังการพองตัวสูงกว่า TS ที่มีปริมาณแอมิโลเพกติน ต่ำกว่าและมีแกรนูลขนาดกลาง สอดคล้องกับการรายงานของ Boonkor et al. (2022) บ่งชี้ถึงอิทธิพลของแอมิโลเพกตินที่มากกว่าขนาดแกรนูล สำหรับสตาร์ชผสม WRTS พบว่า ที่อุณหภูมิ 75ºC และ 85ºC กำลังการพองตัวของส่วนสตาร์ชผสมทั้งหมดมีแนวโน้มสูงขึ้นตามสัดส่วนของ WR ($p < 0.05$) กล่าวได้ว่ากำลังการพองตัวของสตาร์ชผสมถูกควบคุมโดยสตาร์ชที่มีแอมิโลเพกตินสูง แต่ค่ากำลังการพองตัวดังกล่าว มีลักษณะเป็น non-additive effect เนื่องจากไม่สามารถคำนวณได้จากสัดส่วนน้ำหนักของ WR ที่อุณหภูมิ 95ºC พบว่า กำลังการพองตัวของสตาร์ชผสมไม่ต่างกันในแต่ละสูตรผสม และเท่ากับกำลังการพองตัวของ WR ($p \geq 0.05$) แสดงถึงแนวโน้มว่าสตาร์ชผสมสามารถให้ลักษณะเนื้อสัมผัสหากใช้เป็นส่วนผสมอาหารที่ทำให้สุกโดยการนึ่ง (steaming) หรือกระบวนการแปรรูปอาหารโดยใช้ความร้อน และไม่มีการกวนที่อุณหภูมิ 95°C ลักษณะเนื้อสัมผัสของ starch-based food ที่เป็นเจลแข็งแรง ยืดหยุ่น เกิดขึ้นเมื่อสตาร์ชเกิดการเจลลาติไนซ์ และเย็นตัวลง โมเลกุลแอมิโลสจัดเรียงตัวใหม่เป็นโครงข่ายสามมิติและอุ้มน้ำไว้ทำให้เกิดเจล รวมถึงการพองตัวของสตาร์ชแกรนูลยังทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมระหว่างแอมิโลสและแอมิโลเพกติน และเจลมีเนื้อสัมผัสแน่นขึ้นเมื่อสตาร์ชเย็นตัวลง เนื่องจากเกิด retrogradation

ความสามารถในการละลายของสตาร์ชในช่วงอุณหภูมิ 55°C–95°C แปรผันตรงกับระดับอุณหภูมิ (Fig. 1) และการละลายของตัวอย่างเพิ่มขึ้นเมื่อถึงอุณหภูมิเจลาติไนเซชัน ($T_o$) โดย TS มีความสามารถในการละลายสูงกว่า WR อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) สอดคล้องกับปริมาณแอมิโลสของตัวอย่าง (Table 1) เนื่องจากความสามารถในการละลายมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับปริมาณแอมิโลส และ amylose leaching (Ranathunga et al., 2023) ความสามารถในการละลายของสตาร์ชผสมเพิ่มขึ้นตามระดับอุณหภูมิ และมีแนวโน้มว่าความสามารถในการละลายของสตาร์ชผสมถูกควบคุมจาก TS อย่างไรก็ตามความสามารถในการละลายของสตาร์ชผสม ไม่สามารถคำนวณได้จากสัดส่วนน้ำหนักของ TS

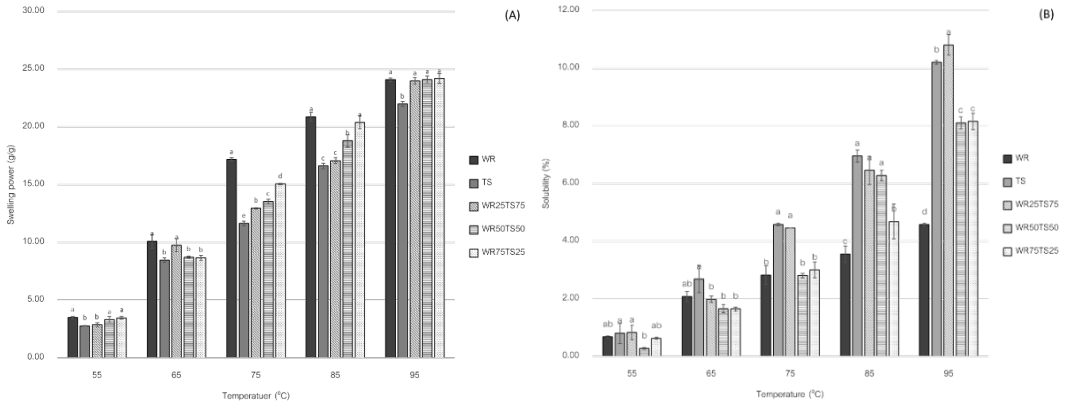



**Fig. 1** Swelling power (A); and Solubility (B) of native starches and their blends

*สมบัติความหนืด (pasting properties) ของสตาร์ชและสตาร์ชผสม*

มีรายงานว่า สมบัติด้านความหนืดของสตาร์ชเพสท์ได้รับอิทธิพลจากปัจจัยหลายประการ เช่น ความเข้มข้นของสารละลาย ปริมาณแอมิโลส ขนาดของสตาร์ชแกรนูล amylose leaching กำลังการพองตัว และความแกร่งของสตาร์ชแกรนูล (granule rigidity) (Waterschoot et al., 2015) จากการทดลองพบว่า อุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิดความหนืดของสตาร์ชเพสท์ (pasting temperature; PT) ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่แกรนูลเริ่มพองตัว มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชัน

(onset temperature; $T_o$) ของ WR และ TS ที่ได้จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ประมาณ 5°C–6°C และความหนืดสูงสุด (PV) ขณะให้ความร้อน (peak viscosity; PV) ของ WR สูงกว่า TS ($p < 0.05$) โดยมีค่า 1,504 cP และ 1,105 cP ตามลำดับ สอดคล้องกับกำลังการพองตัวของสตาร์ช เพสท์ของ WR มีค่า breakdown (BD) (ผลต่างระหว่างค่า PV และ Trough viscosity, T) ต่ำกว่าเพสท์ TS บ่งชี้ว่า WR ที่มีขนาดแกรนูลเล็กมีความแกร่งของแกรนูลสูงกว่า TS ที่มีแกรนูลขนาดใหญ่ ทำให้ทนต่อแรงเฉือนได้มากกว่า และค่า setback (SB) ของสตาร์ช TS ซึ่งเป็นค่าแสดงถึงการจัดเรียงตัวใหม่ของโมเลกุลแอมิโลสหลังจากแกรนูลแตกออกด้วยแรงเฉือน แสดงถึงการเกิดเจล และ/หรือ retrogradation ของแอมิโลส สูงกว่า WR บ่งชี้ถึงแนวโน้มการเกิด retrogradation ของสตาร์ชเพสท์ TS ที่สูงกว่า WR ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Hsieh et al. (2019) สำหรับความหนืดสุดท้าย (final viscosity, FV) ของ WR ที่สูงกว่าเพสท์ TS คาดว่าเกิดจาก granule remnant ของ WR และน้ำหนักโมเลกุลของแอมิโลเพกตินที่สูงกว่าแอมิโลสประมาณ 10 เท่า

ถึงแม้ว่าสมบัติด้านความหนืด (pasting properties) สอดคล้องกับกำลังการพองตัวของสตาร์ช ปริมาณแอมิโลส และขนาดสตาร์ชแกรนูล นักวิจัยพบว่าสมบัติด้านความหนืดของสตาร์ชเพสท์ผสม (WR/TS) (pasting profile) มีลักษณะเป็นแบบ non-additive effect กล่าวคือ ไม่ขึ้นกับอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสตาร์ชผสมแต่เพียงอย่างเดียว Table 3 แสดงให้เห็นว่าสตาร์ชผสมในอัตราส่วนผสมที่ต่างกัน สามารถเพิ่มสมบัติการต้านแรงเฉือน ลดการเกิด retrogradation และให้ความหนืดสุดท้ายสูงกว่า TS โดยสตาร์ชผสม WR25TS75 WR50TS50 และ WR75TS25 มีค่า BD น้อยกว่า TS ($p < 0.05$) สตาร์ชผสมที่มี WR 25-50% (WR25TS75 WR50TS50) มีค่า BD ต่ำและไม่แตกต่างกับ WR อย่างมีนัยสำคัญ ($p \geq 0.05$) ซึ่งคาดว่าสาเหตุมาจาก WR ที่มีแกรนูลขนาดเล็กและแกร่งกว่า TS ช่วยปรับปรุงสมบัติการต้านทานแรงเฉือนของสตาร์ชผสมให้เทียบเท่าหรือดีกว่าเพสท์ TS อย่างเดียว ทั้งนี้สตาร์ชผสม WR75TS25 ให้ค่า FV สูง เทียบเท่ากับ WR ($p \geq 0.05$) WR25TS75 และ WR50TS50 มีค่า FV ลดต่ำลง และไม่แตกต่างทางสถิติกับ TS ($p < 0.05$) แต่ WR50TS50 มีค่า FV เทียบเท่ากับ WR75TS25 ($p \geq 0.05$) กล่าวได้ว่า สตาร์ชผสมที่มี WR 25–75% มีค่า SB ต่ำกว่า TS ($p < 0.05$) และการผสม WR สามารถลดการเกิด retrogradation ของสตาร์ชเพสท์ (TS) สอดคล้องกับการรายงานของ Detchewa et al. (2012) ที่รายงานว่าค่า SB และค่าเอนทัลปีการเกิด retrogradation ของแป้งผสมระหว่างแป้งข้าวและข้าวเหนียวลดลงเมื่ออัตราส่วนของแป้งข้าวเหนียวเพิ่มขึ้น นักวิจัยให้เหตุผลว่ามาจากปริมาณแอมิโลสของระบบที่มีโมเลกุลเป็นเส้นตรงลดลง การเกิด double helices ซึ่งทำให้เกิด retrogradation จึงลดลงด้วย รวมถึงโมเลกุลของแอมิโลเพกตินที่มีโครงสร้างเป็นโซ่กิ่งขัดขวางการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแอมิโลส

**Table 3** Pasting properties of native starches and starch blends

| Sample | Peak viscosity (cP) | Trough viscosity (cP) | Breakdown (cP) | Final viscosity (cP) | Setback (cP) | Peak Time (min) | Pasting Temperature (°C) *ns |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| WR | 1504±4.95$^{a}$ | 1297±1.41$^{a}$ | 207±3.54$^{cd}$ | 1406±4.24$^{a}$ | 109±2.83$^{d}$ | 8.00±0.04$^{b}$ | 70.38±0.04 |
| TS | 1105±5.66$^{c}$ | 732±6.36$^{d}$ | 374±0.71$^{a}$ | 1177±0.00$^{c}$ | 446±6.36$^{a}$ | 7.70±0.14$^{b}$ | 70.43±0.04 |
| WR25TS75 | 1071±17.68$^{c}$ | 834±3.54$^{c}$ | 237±21.21$^{c}$ | 1161±1.41$^{c}$ | 328±4.95$^{b}$ | 8.27±0.00$^{a}$ | 70.40±0.00 |
| WR50TS50 | 1152±63.35$^{c}$ | 955±82.61$^{c}$ | 208±16.26$^{d}$ | 1246±91.92$^{bc}$ | 291±11.31$^{c}$ | 7.60±0.18$^{b}$ | 70.63±0.39 |
| WR75TS25 | 1342±46.67$^{b}$ | 1063±31.11$^{b}$ | 279±15.56$^{b}$ | 1353±41.01$^{ab}$ | 290±9.90$^{c}$ | 7.60±0.10$^{b}$ | 70.36±0.04 |

Means in the same column with different letters are significantly different ($p < 0.05$).

*ความคงตัวจากการคืนรูปจากเยือกแข็งของสตาร์ชเพสท์*

Hsieh et al. (2019) รายงานไว้ว่า WR สามารถกักเก็บน้ำในสตาร์ชเพสต์ได้ มี %syneresis ต่ำกว่า 50% จนถึงวงจรการแช่เยือกแข็ง 8–9 รอบ และจากผลการทดลองพบว่า TS มีสัดส่วนการแยกตัวของน้ำ (%syneresis) สูงกว่า WR ($p < 0.05$) ทั้ง 5 รอบวงจรการแช่เยือกแข็ง (Table 4) แสดงถึงความคงตัวจากการคืนรูปจากเยือกแข็ง (freeze thaw stability) ของ TS ที่ต่ำกว่า WR สอดคล้องกับปริมาณแอมิโลส และค่า SB บ่งชี้ถึงแอมิโลส TS ที่มีรูปร่างโมเลกุลเป็นเส้นตรง และมีขนาดโมเลกุลค่อนข้างใหญ่ เมื่อเกิดอันตรกิริยากับน้ำ เกิดโครงร่างตาข่ายของเพสท์/เจลที่แข็งแรง และใช้เวลานานกว่าที่จะเคลื่อนตัวแยกจากน้ำ แต่เมื่อเกิดการแยกตัวแล้ว โมเลกุลที่เป็นเส้นตรงสามารถเกิดการจัดเรียงตัวใหม่เป็น double helices ได้ดีและมีปริมาณมาก เกิด retrogradation สูง เป็นผลให้ปริมาณน้ำที่แยกออกมามีปริมาณมาก ขณะที่ WR มีแอมิโลเพกตินที่มีน้ำหนักโมเลกุลใหญ่กว่าแอมิโลสมาก แต่มีรูปร่างเป็นกิ่งสั้น ความสามารถในการจัดเรียงตัวใหม่เกิดเป็น double helices เกิดได้จากโซ่กิ่งด้านนอก (external chains) ของแอมิโลเพกตินเท่านั้น เป็นผลให้เกิด retrogradation ได้ต่ำกว่าและช้ากว่า ส่งผลให้มี %syneresis ต่ำ (Zhu et al., 2020) สำหรับสตาร์ชผสม พบว่า WR สามารถเพิ่มความเสถียรในการคืนรูปจากเยือกแข็งของสตาร์ชเพสท์ได้ WR75TS25 มี %syneresis ต่ำกว่า TS ($p < 0.05$) ทั้ง 5 รอบวงจรการแช่เยือกแข็ง การผสม WR ที่ 50% ช่วยปรับปรุงความเสถียรในการคืนรูปจากเยือกแข็งของสตาร์ชได้ในวงจรที่ 4 และ 5 จากค่า % syneresis ของ WR50TS50 ที่ต่ำกว่า TS ในวงจรที่ 4 และ 5 ที่ 5.88% และ 11.20% ($p < 0.05$) และการผสม WR ที่ 25% ช่วยลดการเกิด syneresis ได้เล็กน้อยในวงจรการแช่เยือกแข็งรอบที่ 1 และ2 โดย %syneresis ของ WR25TS75 ต่ำกว่า TS ($p < 0.05$) 0.12% และ 6.94% ตามลำดับ และแสดงลักษณะคล้าย TS เมื่อเข้าสู่วงจรการแช่เยือกแข็งรอบที่ 3 และในวงจรการแช่เยือกแข็งรอบที่ 5 %syneresis ของ WR25TS75 ต่ำกว่า TS ($p<0.05$) ~7.77% ปรากฏการณ์ดังกล่าว คาดว่ามาจากกิ่งของโมเลกุลแอมิโลเพกติน WR ที่เพิ่มขึ้นในสตาร์ชผสม รวมถึงเม็ดแป้งที่แตกบางส่วน (fragmented granules) ของ WR ขัดขวางการจัดเรียงตัวใหม่เป็น double helices ของแอมิโลส TS ในสตาร์ชผสม เป็นผลให้การเกิด retrogradation และ %syneresis ลดลง

**Table 4** Syneresis values of native starches paste and blend starch paste (6.0%, w/v) for each freeze thaw cycle

| Sample | Syneresis (%) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Cycle 1 | Cycle 2 | Cycle 3 | Cycle 4 | Cycle 5 |
| WR | 0.00±0.00$^{c}$ | 0.72±0.01$^{b}$ | 0.69±0.01$^{c}$ | 0.97±0.22$^{d}$ | 3.82±0.68$^{e}$ |
| TS | 0.62±0.04$^{a}$ | 7.85±0.89$^{a}$ | 17.56±1.36$^{a}$ | 50.33±4.40$^{a}$ | 64.61±1.20$^{a}$ |
| WR25TS75 | 0.50±0.02$^{b}$ | 0.91±0.23$^{b}$ | 19.86±0.61$^{a}$ | 51.89±0.77$^{a}$ | 56.84±0.63$^{b}$ |
| WR50TS50 | 0.58±0.05$^{a}$ | 0.65±0.01$^{b}$ | 19.38±0.63$^{a}$ | 44.45±2.01$^{b}$ | 53.49±0.93$^{c}$ |
| WR75TS25 | 0.45±0.01$^{b}$ | 0.68±0.06$^{b}$ | 13.48±1.39$^{b}$ | 35.48±0.71$^{c}$ | 32.68±0.60$^{d}$ |

Means in the same column with different letters are significantly different ($p<0.05$).

## สรุป

สตาร์ชผสม WR และ TS สามารถปรับปรุงสมบัติความหนืด การต้านทานแรงเฉือน และเพิ่มความคงตัวจากการคืนรูปจากเยือกแข็งของสตาร์ชเพสท์ โดยสามารถเลือกใช้สตาร์ชผสมตามอัตราส่วนผสมที่ให้คุณลักษณะที่ต้องการได้ WR50TS50 มีความหนืดสุดท้าย (FV) เทียบเท่ากับ TS ($p \geq 0.05$) แต่มีความต้านทานแรงเฉือนสูงกว่า ($p < 0.05$)

ลด %syneresis ในวงจรที่ 4 และ 5 ขณะที่ WR75TS25 ให้ความหนืดและต้านทานแรงเฉือนสูง และมี % syneresis ต่ำกว่า TS หลังการคืนรูปจากการแช่เยือกแข็งทั้ง 5 รอบ ($p < 0.05$) นอกจากนี้ WR25TS75 ยังสามารถลด %syneresis หลังการคืนรูปจากการแช่เยือกแข็งได้ 2 รอบ ($p < 0.05$) ในวงจรที่ 1 และ 2 แสดงถึงความเป็นไปได้ในการใช้สตาร์ชธรรมชาติผสมเพื่อนำไปใช้เป็นส่วนผสมของอาหาร เพื่อให้ความข้นหนืด หรือให้เนื้อสัมผัส ลดการแยกน้ำในผลิตภัณฑ์อาหารแช่เยือกแข็ง

**กิตติกรรมประกาศ**

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการนำเสนอผลงานวิจัยคณะอุตสาหกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

**เอกสารอ้างอิง**

Boonkor, P., Sagis, L.M.C., Lumdubwong, N. 2022. Pasting and rheological properties of starch paste/gels in a sugar-acid system. Foods 11: 4060.

Charles, A.L., Chang, Y.H., Ko, W.C., Sriroth, K., Huang, T.C. 2005. Influence of amylopectin structure and amylose content on the gelling properties of five cultivars of cassava starches. J. Agric. Food Chem. 53: 2717–2725.

Charoenrein, S., Preechathammawong, N. 2012. Effect of waxy rice flour and cassava starch on freeze–thaw stability of rice starch gels. Carbohydr. Polym. 90: 1032–1037.

Charoenrein, S., Tatirat, O., Muadklay, J. 2008. Use of centrifugation–filtration for determination of syneresis in freeze–thaw starch gels. Carbohydr. Polym. 73: 143–147.

Chrastil, J. 1987. Improved colorimetric determination of amylose in starches or flours. Carbohyd. Res. 159: 154–158.

Clerici, M.T.P.S., Sampaio, U.M., Schmiele, M. 2019. Identification and analysis of starch. In: Clerici, M.T.P.S., Schmiele, M. (Eds.). Starches for Food Application. Academic Press. Cambridge, MA, USA, pp. 23–69.

Detchewa, P., Thongngam, M., Naivikul, O. 2012. Physicochemical and thermal properties of non-waxy rice flour as affected by waxy rice flour and its influence on textural and cooking properties of rice spaghetti. Int. Proc. Chem. Biol. Environ. Eng. 39: 235–239.

Hsieh, C.-F., Liu, W., Whaley, J.K., Shi, Y.-C. 2019. Structure and functional properties of waxy starches. Food Hydrocolloids 94: 238–254.

Lin, J.-H., Kao, W.-T., Tsai, Y.-C., Chang, Y.-H. 2013. Effect of granular characteristics on pasting properties of starch blends. Carbohydr. Polym. 98: 1553–1560.

Lu, Z.-H., Sasaki, T., Li, Y.-Y., Yoshihashi, T., Li, L.-T., Kohyama, K. 2009. Effect of amylose content and rice type on dynamic viscoelasticity of a composite rice starch gel. Food Hydrocolloids 23: 1712–1719.

Lumdubwong, N., Seib, P.A. 2000. Rice starch isolation by alkaline protease digestion of wet-milled rice flour. J. Cereal Sci. 31: 63–74.

Ranathunga, A., Suwannaporn, P., Kiatponglarp, W., Wansuksri, R., Sagis, L.M.C. 2023. Molecular structure and linear-non linear rheology relation of rice starch during milky, dough, and mature stages. Carbohydr. Polym. 312: 120812.

Sun, D., Yoo, B. 2015. Effect of tapioca starch addition on rheological, thermal, and gelling properties of rice starch. LWT. 64: 205–211.

Vamadevan, V., Bertoft, E. 2020. Observations on the impact of amylopectin and amylose structure on the swelling of starch granules. Food Hydrocolloids 103: 105663.

Waterschoot, J., Gomand, S.V., Fierens, E., Delcour, J.A. 2015. Starch blends and their physicochemical properties. Starch 67: 1–13.

Yu, S., Ma, Y, Menager, L., Sun, D.-W. 2012. Physicochemical properties of starch and flour from different rice cultivars. Food Bioprocess Technol. 5: 626–637.

Zhu, B., Zhan, J., Chen, L., Tian, Y. 2020. Amylose crystal seeds: Preparation and their effect on starch retrogradation. Food Hydrocolloids 105: 105805.

# ผลของการแทนที่ไขมันในเค้กเนยสดด้วยผงมะพร้าวจากอุตสาหกรรมกะทิ UHT

## Impact of coconut powder from UHT coconut milk industry as a fat replacer in butter cakes

**ธนพร จรบุรมย์, ปิติพร ฤทธิเรืองเดช*, ปภาวริน หล่อลีฬหา**

Thanaphon Chonburom, Pitiporn Ritthiruangdej*, Papawarin Lowleraha

ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Product Development, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: pitiporn.r@ku.th

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของการแทนที่เนยด้วยผงมะพร้าว (CP) จากอุตสาหกรรมกะทิ UHT ต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของเค้กเนยสด โดยการแทนที่เนยในระดับที่แตกต่างกัน 4 ระดับ (0, 5, 10 และ 15%) ผลการวิจัยพบว่าการแทนที่เนยด้วย CP ส่งผลทำให้ค่าความหนืดของแบทเทอร์เค้กเพิ่มสูงขึ้น ($p < 0.05$) และสามารถลดปริมาณไขมันลงได้ 12% โดยเค้กสูตรควบคุมมีปริมาณไขมัน 32.86% ในขณะที่ตัวอย่าง 15% CP มีปริมาณไขมัน 28.86% แบทเทอร์แสดงพฤติกรรมการไหลแบบ non-Newtonian มีค่า Flow behavior index อยู่ในช่วง 0.41–0.47 การเพิ่ม CP ช่วยเพิ่มปริมาณ fiber, ash และ protein ของเค้กได้ ($p < 0.05$) นอกจากนี้ยังมีผลทำให้ค่า L*, hardness และ chewiness เพิ่มขึ้น แต่ค่า springiness และ cohesiveness ลดลง ($p < 0.05$) งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า CP จากอุตสาหกรรมกะทิ UHT สามารถใช้เป็นสารทดแทนไขมันทางเลือกในผลิตภัณฑ์เค้กเพื่อเป็นการเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการให้กับเค้กได้ อย่างไรก็ตามการเพิ่ม CP ส่งผลต่อเนื้อสัมผัสและลักษณะปรากฏของเค้ก จึงจำเป็นต้องศึกษาการยอมรับทางประสาทสัมผัสเพิ่มเติม

**คำสำคัญ**: กากมะพร้าว, การแทนที่, เค้กเนยสด, ผงมะพร้าว

**Abstract**

This study investigated the effect of substituting butter with coconut powder (CP) from UHT coconut milk on the physicochemical properties of butter cake. CP was added to butter cake at four different substitution levels (0, 5, 10, and 15%). The results showed that CP addition significantly increased batter viscosity ($p < 0.05$) and lower fat content ($p < 0.05$) from 32.86% in the control cake to 28.86% in the cake with 15% CP, representing a 12% decrease. The batter exhibited non-Newtonian flow behavior, with the flow behavior index (n) between 0.41–0.47. CP addition also increased significantly ($p < 0.05$) fiber, ash, and protein content. Additionally, CP addition significantly increased ($p < 0.05$) L*, hardness and chewiness but decreased cohesiveness and springiness. These findings suggest that CP from UHT coconut milk industry could be used as an alternative fat replacer in cake products to enhance the nutritional value of the cake. However, CP addition also affected the texture and appearance of the cake, warranting further investigation through sensory acceptance studies.

**Keywords**: Butter cake, Coconut powder, Residual grated coconut, Substitution

**คำนำ**

มะพร้าว *(Cocos nucifers* Linn.*)* เป็นพืชยืนต้นในตระกูล Palm มีแหล่งกำเนิดจากทวีปเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ และมีแหล่งเพาะปลูกที่สำคัญคือประเทศอินโดนีเซีย, ฟิลิปปินส์, อินเดีย และศรีลังกา (Pham, 2016) ประเทศไทยมีแหล่งมะพร้าวที่สำคัญคือจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ มะพร้าวที่เพาะปลูกในไทยสามารถแบ่งออกได้ 3 ประเภทตามวัตถุประสงค์การใช้ประโยชน์ ได้แก่ มะพร้าวอุตสาหกรรมหรือมะพร้าวแกง, มะพร้าวเพื่อบริโภคสด และมะพร้าวผลิตน้ำตาล (สถาบันวิจัยพืชสวน, 2563) กะทิเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการคั้นเนื้อมะพร้าวแก่ขูดโดยปราศจากความร้อน แต่เนื่องจากมีสารอาหารอยู่เป็นจำนวนมากส่งผลให้เกิดการเสื่อมเสียได้ง่าย จึงมีการนำเทคโนโลยี Ultra high temperature (UHT) ซึ่งเป็นการให้ความร้อนสูง (135–154°C) ในระยะเวลาสั้น (1–8 วินาที) จนสามารถทำลายเชื้อก่อโรคได้และทำการบรรจุแบบปลอดเชื้อ (aseptic packaging) ทำให้ผลิตภัณฑ์สามารถเก็บรักษาได้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 6–9 เดือน (Chavan et al., 2016) กะทิกล่องสำเร็จรูปนับว่าเป็นหนึ่งในสินค้าส่งออกที่สำคัญของประเทศไทย โดยในปี พ.ศ. 2565 มีมูลค่าการส่งออกสูงถึง 2,142 ล้านบาท (สำนักงานเศรษฐกิจเกษตร, 2565) จึงทำให้มีปริมาณกากมะพร้าวหลงเหลือจากการผลิตเป็นจำนวนมาก

กากมะพร้าวที่เหลือจากกระบวนการผลิตน้ำกะทิมีปริมาณมาก 25–40% เมื่อคำนวณจากปริมาณเนื้อมะพร้าวสดทั้งหมด แต่มักถูกกำจัดทิ้งหรือนำไปแปรรูปเป็นอาหารสัตว์ (Bawalan, 2000) อย่างไรก็ดีกากมะพร้าวเป็นแหล่งของสารอาหารที่จำเป็น ประกอบไปด้วย เถ้า 3.1%, ไขมัน 10.9%, โปรตีน 12.1%, คาร์โบไฮเดรตทั้งหมด 70.3% และมีปริมาณใยอาหารมากถึง 60.9% แบ่งเป็นใยอาหารที่สามารถละลายน้ำได้ 3.8% และใยอาหารที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ 57.1% (Ferranti and Velotto, 2023) โดยมีงานวิจัยที่มีการศึกษาผลของการนำผงมะพร้าวไปใช้แทนที่แป้งสาลีในผลิตภัณฑ์ขนมอบ เช่น เค้ก (Srivastava and Semwal, 2015) และคัพเค้กปราศจากกลูเตน (Hopkin et al., 2022)

เค้กเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้รับความนิยมทั่วโลก มีส่วนประกอบหลักคือ แป้งสาลี, ไขมัน, ไข่ไก่ และน้ำตาล ส่งผลให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีพลังงานสูงแต่คุณค่าทางโภชนาการต่ำ อุดมไปด้วยน้ำตาลและไขมัน โดยทั่วไปไขมันในเค้กมีที่มาจากเนย, มาการีน, เนยขาวและน้ำมันพืช ทำหน้าที่จับอากาศและทำให้ฟองอากาศภายในแบทเทอร์เสถียร เมื่อนำไปอบจะได้เนื้อสัมผัสนุ่มตรงกับความต้องการของผู้บริโภค (Therdthai, 2022) แต่หากรับประทานมากเกินไปจะเป็นการเพิ่มโอกาสในการเกิดโรคอ้วน, โรคเบาหวาน และโรคหัวใจได้ จึงได้มีการศึกษาการแทนที่ไขมันด้วยวัตถุดิบอื่น ๆ ได้แก่น้ำ, โปรตีน และคาร์โบไฮเดรต ทั้งนี้ใยอาหารจัดอยู่ในกลุ่มคาร์โบไฮเดรต จึงถูกนำมาใช้แทนที่ไขมันในผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ อย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีความสามารถในการจับกับน้ำและความสามารถในการเพิ่มความหนืดสูง เป็นผลดีต่อการแทนที่ไขมันในผลิตภัณฑ์ เช่น การใช้ใยอาหารจากเปลือกส้มแทนที่ไขมันในไอศกรีมช็อกโกแลต และการแทนที่ไขมันด้วยเปลือกแตงโมในผลิตเค้ก (Al-Sayed et al., 2013) และจากงานวิจัยของ Santana et al. (2011) ที่ศึกษาการใช้ผงมะพร้าวแทนที่ไขมัน, นม, อิมัลซิไฟเออร์ และสารให้ความคงตัวในไอศกรีมช็อกโกแลต พบว่าผงมะพร้าวมีความสามารถในการเกิดโฟมและความสามารถในการเป็นอิมัลซิไฟเออร์ซึ่งสามารถใช้ในการผลิตไอศกรีมหรือผลิตภัณฑ์ขนมอบได้

งานวิจัยนี้จึงได้นำกากมะพร้าวอบแห้งที่เป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมกะทิ UHT มาบดเป็นผงมะพร้าวและใช้แทนที่เนยในผลิตภัณฑ์เค้กเนยสด แต่เนื่องจากผงมะพร้าวมีปริมาณใยอาหารสูงซึ่งอาจส่งผลต่อคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของเค้กได้จึงได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพในผลิตภัณฑ์เค้กเนยสดเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาเค้กเนยสดที่มีปริมาณไขมันต่ำและมีคุณค่าทางโภชนาการสูง นอกจากนี้ยังเป็นการนำผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมน้ำกะทิอย่างกากมะพร้าวมาพัฒนาต่อยอดเพื่อเพิ่มมูลค่าและนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอาหารต่อไป

**อุปกรณ์และวิธีการ**

*วัตถุดิบ*

กากมะพร้าวอบแห้งได้รับความอนุเคราะห์ให้การสนับสนุนจากบริษัท อำพลฟูดส์ โพรเซสซิ่ง จำกัด และวัตถุดิบในการผลิตเค้กซื้อจากตลาดบางเขน กรุงเทพฯ ได้แก่ เนยแท้ชนิดเค็ม (บริษัท เคซีจี คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน), แป้งเค้ก (บริษัท แหลมทองสหการ จำกัด), น้ำตาลไอซิ่ง (บริษัท ไทยรุ่งเรือง คอร์ปอเรชัน จำกัด), เอสพี (บริษัท ยูไนเต็ดฟลาวส์มิลล์ จำกัด (มหาชน), กลิ่นวานิลลา (บริษัทแม็คคอร์มิค (ประเทศไทย) จำกัด) และเกลือป่น (บริษัท ปรุงทิพย์ จำกัด)

*การวางแผนการทดลอง*

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของการแทนที่เนยด้วยผงมะพร้าวต่อสมบัติทางเคมี (องค์ประกอบเคมีโดยประมาณ), และสมบัติด้านกายภาพ (สีและเนื้อสัมผัส) ของผลิตภัณฑ์เค้กเนยสด และพฤติกรรมการไหลของแบทเทอร์เค้ก วางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) โดยผันแปรปริมาณผงมะพร้าวแทนที่เนย 4 ระดับ ได้แก่ 0, 5, 10 และ 15% สูตรพื้นฐานของเค้กเนยสดมีดังนี้ ไข่ไก่ 328 g, แป้งเค้ก 300 g, เนยแท้ชนิดเค็ม 300 g, น้ำตาลไอซิง 260 g ,นมสด 100 g, เอสพี 24 g, กลิ่นวานิลลา 6 g และเกลือ 4 g กรรมวิธีในการผลิตเค้กมีดังนี้ เริ่มจากนำแป้งเค้ก, น้ำตาลไอซิ่งและเกลือร่อนผสมกัน ทำการตีผสมด้วยเครื่องผสมอาหาร (5KSM150PSEWH, KitchenAid, Thailand) ใช้หัวตีแบบใบพายคนผสมเป็นเวลา 30 วินาที จากนั้นนำไปผสมกับนมสด, ไข่ไก่ และกลิ่นวานิลลา ตีด้วยความเร็วระดับ 2 เป็นเวลา 1 นาที ผสมให้ส่วนผสมเข้ากันจึงเติมเอสพีลงไปปั่นผสมด้วยความเร็วระดับ 7 เป็นเวลา 4 นาที ผสมต่อด้วยความเร็วระดับ 4 เป็นเวลา 4 นาที ค่อย ๆ เติมเนยที่ละลายแล้วลงไปผสมกับส่วนผสมที่เหลือโดยไม่จับเวลา และตีผสมด้วยความเร็วระดับ 2 เป็นเวลา 4 นาที เทแบทเทอร์เค้ก 290 g ลงไปในพิมพ์ (ปริมาตร 610 mL) จากนั้นนำไปอบในเตาอบไฟฟ้า (EO-70K, Sharp, Thailand) ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 40 นาที นำเค้กที่อบแล้วไปวางบนพักบนตะแกรง 1 ชั่วโมง เก็บในถุงซิปล็อกเป็นเวลา 1 คืน ก่อนนำไปวิเคราะห์สมบัติด้านเคมีและกายภาพ

*การเตรียมผงมะพร้าว*

นำผงมะพร้าวอบแห้งมาปั่นให้ละเอียดด้วยเครื่องบดสมุนไพร (PG300, Spring Green Evolution, Thailand) จากนั้นนำไปร่อนผ่านตะแกรงขนาด 60 mesh บรรจุในถุงอะลูมิเนียมฟอยล์และเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง ผงมะพร้าวที่ได้เมื่อนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณตามวิธีการของ AOAC (2000) แล้วพบว่า มีความชื้น 7.55±0.12%, โปรตีน 5.23±0.10%, ไขมัน 44.25±0.40%, ใยอาหาร 15.57±0.13%, เถ้า 0.93±0.03% และคาร์โบไฮเดรต 26.45±0.16%

*การวิเคราะห์สมบัติด้านเคมีและด้านกายภาพของเค้กเนยสด*

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของเค้ก ได้แก่ moisture content (%), protein (%), fat (%), ash (%) และ crude fiber (%) ตามวิธีการของ AOAC (2000) และคำนวณปริมาณ carbohydrate (%) จากสูตร 100 – (% moisture content + % protein + % fat + % ash + % crude fiber) ทำการวัดสิ่งทดลองละ 3 ซ้ำ ทำการวิเคราะห์ค่าสีของเค้กด้วยเครื่อง Spectrophotometer (UltraScan Pro, Konica Minolta, United Stage) วัดค่าสีผิวนอกของเค้กโดยไม่บดตัวอย่าง กำหนดแหล่งกำเนิดแสง D65 มุมมองในการวัด 10° บันทึกค่า L* (ค่าความสว่างมีค่าระหว่าง 0 (มืด) -100 (สว่าง)) ค่า a* (เครื่องหมาย + หมายถึงสีแดง และเครื่องหมาย – หมายถึงสีเขียว) b* (เครื่องหมาย + หมายถึงสีเหลือง และเครื่องหมาย – หมายถึงสีน้ำเงิน) ทำการวัดสิ่งทดลองละ 6 ซ้ำ และวิเคราะห์ด้านเนื้อสัมผัสเค้กด้วยเครื่อง

Texture analyzer (TA.XT Plus, Stable Micro Systems Ltd., United Kingdom) นำตัวอย่างขนาด 25 mm × 25 mm × 25 mm มาวัดค่าด้วยวิธี Texture profile analysis (TPA) ใช้หัววัดทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 mm ภายใต้พารามิเตอร์ดังนี้ Trigger load 20 g, Test speed 2 mm/s, Pretest speed 2 mm/s, Distance Target 12.5 mm (50% ของความหนาของตัวอย่างเค้กเนยสด) บันทึกค่า Hardness (N), Springiness, Cohesiveness และ Chewiness (Nmm) ทำการวัดสิ่งทดลองละ 10 ซ้ำ ทำการวัดค่าปริมาตรจำเพาะโดยการนำเค้กที่พักให้เย็นเป็นเวลา 1 ชั่วโมงมาชั่งน้ำหนักและบันทึกค่าปริมาตรเค้กหาโดยการแทนที่ด้วยงา คำนวณปริมาตรจำเพาะของเค้กจากอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของเค้ก ($cm^3$) ต่อน้ำหนักเค้ก (g) ทำการวัดสิ่งทดลองละ 3 ซ้ำ และวิเคราะห์ค่าความหนืดและพฤติกรรมของไหลของแบทเทอร์ด้วยเครื่อง Brookfield viscometer (DV-III Ultra, Brookfield, USA) ควบคุมอุณหภูมิที่ 25±1 องศาเซลเซียส วัดความหนืดในช่วง 2–50 rpm โดยใช้หัววัดเข็มเบอร์ 21 บันทึกค่าความเค้นเฉือน (Shear stress, Pa), อัตราการเฉือน (Shear rate, 1/s) และค่าความหนืดปรากฏ (Apparent viscosity, Pa.s) จากนั้นศึกษาพฤติกรรมการไหลของแบทเทอร์เค้ก โดยการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า Shear stress และ Shear rate ด้วยสมการ Power law วัดค่าความหนืดสิ่งทดลองละ 3 ซ้ำ

*การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ*

นำข้อมูลค่าสมบัติทางเคมีและกายภาพมาวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยวิธี Analysis of variance (ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่นทางสถิติร้อยละ 95 โดยใช้โปรแกรม SPSS

**ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง**

Table 1 แสดงค่าองค์ประกอบเคมีโดยประมาณของตัวอย่างเค้กเนยสดที่แทนที่ไขมันด้วยผงมะพร้าว (Coconut powder, CP) ในระดับที่แตกต่างกัน เมื่อพิจารณาพบว่าการแทนที่เนยด้วยผงมะพร้าว ส่งผลให้ปริมาณไขมันและคาร์โบไฮเดรตลดลง ($p < 0.05$) และส่งผลให้ปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น ($p < 0.05$) โดยอยู่ในช่วง 25.59% –28.14% เนื่องจากผงมะพร้าวมีองค์ประกอบของใยอาหารซึ่งมีจำนวนหมู่ไฮดรอกซิลอยู่เป็นจำนวนมากในโครงสร้าง จึงมีคุณสมบัติในการจับกับน้ำได้มากขึ้นผ่านพันธะไฮโดรเจน ดังนั้นเค้กจึงสูญเสียน้ำได้น้อยลงในระหว่างการอบ (Lin, 2022) นอกจากนี้กระบวนการคั้นน้ำกะทิส่งผลทำให้เกิดความเสียหายในโครงสร้างแบบรังผึ้งของกากมะพร้าวจึงเป็นการเพิ่มพื้นที่ในการดูดซับน้ำเข้ามาในโครงสร้างของผงมะพร้าวได้ดียิ่งขึ้น (Raghavendra et al., 2006) เมื่อพิจารณาปริมาณโปรตีนและเถ้าของเค้กพบว่าปริมาณโปรตีนและเถ้าเพิ่มขึ้น ($p < 0.05$) ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณโปรตีนและแร่ธาตุที่มีอยู่ในผงมะพร้าว จากงานวิจัยของ Waziri (2013) พบว่าเนื้อมะพร้าวมีองค์ประกอบของ Na และ K เป็นจำนวนมาก โดยมีปริมาณ 7,809 µg/g และ 6.14 µg/g ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีองค์ประกอบของ Ca, Mg, Fe และ Zn

**Table 1** Chemical compositions of butter cakes substituted with different levels of coconut powder (CP)

| Coconut powder (%CP) | Moisture (%) | Protein (%) | Fat (%) | Fiber (%) | Ash (%) | Carbohydrate (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0% | 25.59±0.09$^{c}$ | 8.90±0.00$^{b}$ | 32.86±0.09$^{a}$ | 0.62±0.11$^{c}$ | 0.98±0.01$^{d}$ | 31.07±0.05$^{a}$ |
| 5% | 27.35±0.04$^{b}$ | 9.17±0.02$^{b}$ | 30.72±0.09$^{b}$ | 0.79±0.09$^{c}$ | 1.02±0.03$^{c}$ | 30.89±0.07$^{a}$ |
| 10% | 27.40±0.06$^{b}$ | 9.56±0.05$^{b}$ | 30.10±0.10$^{c}$ | 1.19±0.11$^{b}$ | 1.46±0.03$^{b}$ | 30.43±0.06$^{ab}$ |
| 15% | 28.14±0.12$^{a}$ | 10.79±0.65$^{a}$ | 28.68±0.05$^{d}$ | 1.49±0.08$^{a}$ | 1.51±0.01$^{a}$ | 23.39±0.71$^{b}$ |

$^{a-d}$Means±SD in the same column followed by different superscripts is significantly different ($p < 0.05$).

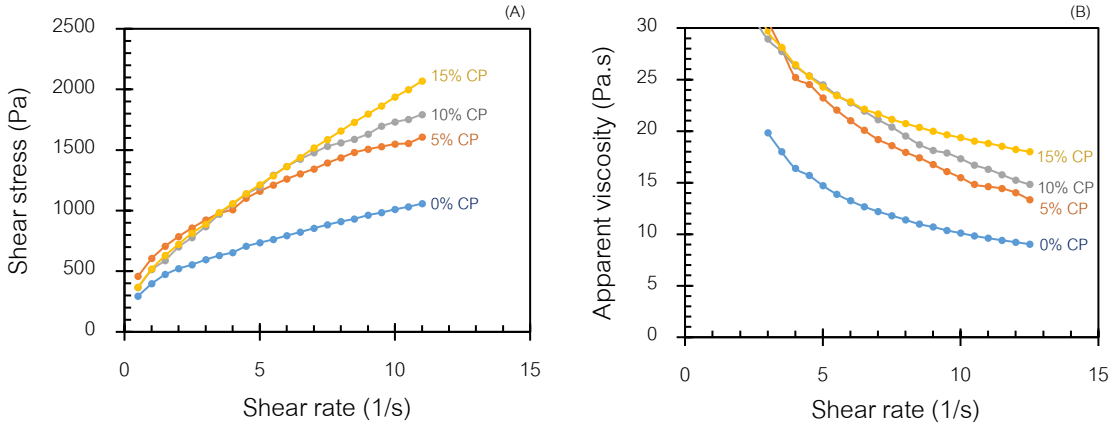



**Fig. 1** Effect of coconut powder (CP) substitution on shear stress and apparent viscosity of butter cake batter

เมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่าง shear stress และ shear rate ของแบทเทอร์ที่มีปริมาณการแทนที่เนยด้วยผงมะพร้าวที่แตกต่างกันดัง Fig. 1 ร่วมกับผลการใช้สมการ Power law อธิบายความสัมพันธ์ดังกล่าวใน Table 2 พบว่าสมการ Power law สามารถอธิบายพฤติกรรมการไหลของแบทเทอร์ทุกสิ่งทดลองได้ดีมาก ($R^2$ = 0.98-0.99) โดยแบทเทอร์ ทุกสิ่งทดลองแสดงพฤติกรรมการไหลแบบซูโดพลาสติก (Pseudoplastic) เนื่องจากดัชนีการไหล (Flow behavior index; n) อยู่ในช่วง 0.40–0.54 ซึ่งน้อยกว่า 1 (Rapp, 2017) เมื่อพิจารณาค่าดัชนีความข้นเหลว (Consistency index; K) ของแบทเทอร์ที่สามารถอธิบายถึงความหนืดได้พบว่าค่าความหนืดเพิ่มขึ้นตามปริมาณผงมะพร้าวที่เพิ่มขึ้นดัง Fig. 1B สอดคล้องกับผลการวิจัยของ Gomez et al. (2010) ที่พบว่าแบทเทอร์มีความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่อเติมใยอาหาร และความหนืดที่เพิ่มขึ้นยังเป็นผลมาจากขนาดอนุภาคและชนิดของใยอาหารที่ใช้ โดยใยอาหารอนุภาคเล็กจะส่งผลทำให้มีความหนืดมากกว่าใยอาหารอนุภาคใหญ่ นอกจากนี้ในขณะที่ปั่นผสม ใยอาหารที่มีขนาดอนุภาคใหญ่สามารถจับกับอากาศได้น้อยจึงส่งผลทำให้ปริมาตรของเค้กลดลงเมื่อนำไปอบ

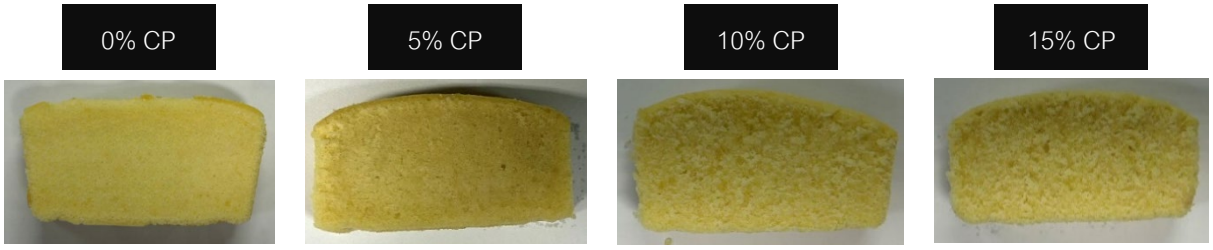
**Table 2** Effect of of coconut powder (CP) substitution on the flow characteristics of butter cake batter

| Coconut powder (%CP) | Consistency index (K) (Pa $s^n$) | Flow behavior index (n) | $R^2$ |
|---|---|---|---|
| 0% | 0.196±0.00[b] | 0.405±0.03[a] | 0.998 |
| 5% | 0.236±0.01[ab] | 0.458±0.02[a] | 0.999 |
| 10% | 0.248±0.03[ab] | 0.473±0.10[a] | 0.993 |
| 15% | 0.276±0.03[a] | 0.540±0.06[a] | 0.981 |

[a-b]Means±SD in the same column followed by different superscripts is significantly different ($p < 0.05$).

**Table 3** Color properties, textural properties, and specific volume of butter cakes substituted with different levels of coconut powder (CP)

| Parameters | 0% CP | 5% CP | 10% CP | 15% CP |
|---|---|---|---|---|
| L* | 70.20±0.05[d] | 71.02±0.25[c] | 75.24±0.33[b] | 76.88±0.30[a] |
| a* | 9.78±0.69[a] | 7.37±0.28[b] | 5.59±0.24[c] | 5.36±0.08[c] |
| b* | 40.02±1.13[a] | 35.99±0.39[b] | 32.72±0.54[c] | 29.82±0.25[d] |
| Hardness (N) | 13.77±1.11[c] | 15.04±0.71[c] | 18.19±0.52[b] | 22.60±1.17[a] |
| Cohesiveness | 0.60±0.00[a] | 0.49±0.01[b] | 0.41±0.01[c] | 0.41±0.04[c] |
| Springiness | 0.90±0.00[a] | 0.89±0.00[a] | 0.85±0.01[b] | 0.85±0.01[c] |
| Chewiness (Nmm) | 6.73±0.34[c] | 6.87±0.16[c] | 8.35±0.29[b] | 9.43±0.61[a] |
| Specific volume ($cm^3$/g) | 6.93±0.11[a] | 6.58±0.15[b] | 6.39±0.12[b] | 6.36±0.06[b] |




[a-d]Means±SD in the same row followed by different superscripts is significantly different ($p < 0.05$)

**Fig. 2** Cross-sectional images of butter cakes substituted with different levels of coconut powder (CP)

Table 3 และ Fig. 2 แสดงค่าสี L*, a* และ b* ของผิวด้านนอกของเค้กและคุณสมบัติทางเนื้อสัมผัสของเค้กเนยสดที่แทนที่ด้วย CP ในปริมาณที่แตกต่างกัน การเติม CP ส่งผลทำให้ค่า L* เพิ่มขึ้น แต่ค่า a* และ b* ลดลง ($p < 0.05$) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Hanafi et al. (2022) ที่พบว่าไอศกรีมมีความสว่างมากขึ้น ค่าความเป็นสีเหลือง (b*) และค่าความเป็นสีแดง (a*) ลดลงเมื่อเติมผงมะพร้าวลงไปและจาก Table 3 เมื่อเพิ่มปริมาณ CP ส่งผลทำให้ค่า Hardness และ Chewiness เพิ่มขึ้น ($p < 0.05$) ทั้งนี้สำหรับเค้กเนยโครงสร้างโฟมเกิดจากการตีเนยให้ขึ้นฟู โดยไขมันทำหน้าที่ในการจับกับอากาศและรักษาอากาศไว้ภายในโครงสร้างป้องกันการรวมตัวกันโพรงอากาศในระหว่างการอบ (Pancharoen, 2018) ดังนั้นการลดปริมาณไขมันจึงทำให้โครงสร้างอ่อนแอ ประกอบกับใยอาหารที่เข้าไปขัดขวางการเกิดโครงสร้างโฟมในระหว่างการผสมส่งผลทำให้โครงสร้างไม่แข็งแรง (Paraskevopoulou, 2020) ขณะเดียวกันค่า Cohesiveness และ

Springiness ลดลง ($p < 0.05$) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Nakov et al. (2022) ที่ศึกษาการแทนที่แป้งสาลีด้วยผงกากองุ่นในผลิตภัณฑ์เค้ก แล้วพบว่าค่า Cohesiveness และ Springiness ลดลง ($p < 0.05$) สวนทางกับค่า Hardness และ Chewiness ที่เพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เมื่อพิจารณาจาก Table 3 พบว่า คุณสมบัติทางเนื้อสัมผัสที่เปลี่ยนแปลงไปมีความสัมพันธ์กับปริมาตรจำเพาะที่ลดลงเมื่อปริมาณผงมะพร้าวเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Borneo et al. (2010) ที่พบว่าปริมาตรของเค้กลดลงเมื่อแทนที่ไขมันด้วยเจลจากเมล็ดเจีย ซึ่งเป็นผลมาจากผลิตภัณฑ์มีโครงสร้างโพรงอากาศน้อยลงและหนาแน่นขึ้น

## สรุป

จากผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการแทนที่เนยในผลิตภัณฑ์เค้กเนยสดด้วยผงมะพร้าวสามารถปรับปรุงคุณค่าทางโภชนาการ และส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพของเค้กเนยสดได้ โดยส่งผลทำให้ปริมาณไขมัน, คาร์โบไฮเดรต, ค่า a*, ค่า b* ปริมาตรจำเพาะ, Cohesiveness, และ Springiness ลดลง ในขณะเดียวกันปริมาณใยอาหาร, เถ้า, โปรตีน, ความหนืดของแบทเทอร์, Hardness และ Chewiness เพิ่มสูงขึ้น ($p < 0.05$) อย่างไรก็ตามควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในด้านการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสในด้านความชอบและการยอมรับเพื่อหาระดับที่เหมาะสมในการแทนที่เนยด้วยผงมะพร้าว รวมไปการศึกษาอายุการเก็บ

## กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับการสนับสนุนทุนนำเสนอผลงานในการประชุมวิชาการแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 62 และขอบคุณบริษัท อำพลฟูดส์ โพรเซสซิ่ง จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์กากมะพร้าวอบแห้งในการวิจัย

## เอกสารอ้างอิง

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2565. สารสนเทศเศรษฐกิจการเกษตรรายสินค้า. สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

สถาบันวิจัยพืชสวน กรมวิชาการเกษตร. 2563. สถานการณ์การผลิตมะพร้าว. กรมวิชาการเกษตร. กรุงเทพฯ.

Al-Sayed, H.M., Ahmed, A.R. 2013. Utilization of watermelon rinds and sharlyn melon peels as a natural source of dietary fiber and antioxidants in cake. Ann. Agric. Sci. 58: 83–95.

Bawalan, D.D. 2000. The economics of production, utilization and marketing of coconut flour from coconut milk residue. CORD. 16: 34–34.

Borneo, R., Aguirre, A., León, A.E. 2010. Chia (*Salvia hispanica L.*) gel can be used as egg or oil replacer in cake formulations. J. Am. Diet. Assoc. 110: 946–949.

Caballero, B., Finglas, P., Toldrá, F. 2015. Milk: Processing of milk. Encyclopedia of food and health. Academic Press. Cambridge, MA, USA, pp. 729–735.

Chavan, R.S., Sehrawat, R., Mishra, V. 2016. Milk: Processing of Milk. Encyclopedia of Food and Health. Academic Press. Cambridge, MA, USA, pp.729-735.

De Moraes Crizel, T., Jablonski, A., de Oliveira Rios, A., Rech, R., Flôres, S.H. 2013. Dietary fiber from orange byproducts as a potential fat replacer. LWT. 53: 9–14.

Ferranti, P., Velotto, S. 2023. Coconut and oli palm based ingredients. Sustainable Food Science - A Comprehensive Approach 2023: 229-241.

Gómez, M., Moraleja, A., Oliete, B., Ruiz, E., Caballero, P.A. 2010. Effect of fibre size on the quality of fibre enriched layer cakes. LWT. 43: 33–38.

Hanafi, F.N.A., Kamaruding, N.A., Shaharuddin, S. 2022. Influence of coconut residue dietary fiber on physicochemical, probiotic (*Lactobacillus plantarum ATCC 8014*) survivability and sensory attributes of probiotic ice cream. LWT. 154: 112725.

Hopkin, L., Broadbent, H., Ahlborn, G.J. 2022. Influence of almond and coconut flours on Ketogenic, Gluten-Free cupcakes. Food Chem. 13: 100182.

Nakov, G., Brandolini, A., Hidalgo, A., Ivanova, N., Stamatovska, V., Dimov, I. 2020. Effect of grape pomace powder addition on chemical, nutritional and technological properties of cakes. LWT 134: 109950.

Pancharoen, M.S., Limanond, B., Vattanakul, S. 2018. Role of ingredient combination on butter cake qualities. Ph.D. thesis, Thammasat University. Bangkok, Thailand.

Paraskevopoulou, A., Anagnostara, I., Bezati, G., Rizou, T., Pavlidou, E., Vouvoudi, E., Kiosseoglou, V. 2020. Water extraction residue from maize milling by-product as a potential functional ingredient for the enrichment with fibre of cakes. LWT. 129: 109604.

Pham, L.J. 2016. Coconut (*Cocos nucifera*). In: McKeon, T., Hayes, D.G., Hildebrand, D., Weselake, R. (Eds.). Industrial Oil Crops. Academic Press and AOCS Press. Cambridge, MA, USA, pp. 231–241.

Raghavendra, S.N., Swamy, S.R., Rastogi, N.K., Raghavarao, K.S.M.S., Kumar, S., Tharanathan, R.N. 2006. Grinding characteristics and hydration properties of coconut residue: A source of dietary fiber. J. Food Eng. 72: 281–286.

Rapp, B.E. 2017. Fluids. In: Microfluidics: Modelling, Mechanics and Mathematics. Elsevier. Amsterdam, the Netherlands, pp. 243–236.

Santana, I.A., Ribeiro, E.P., Iguti, A.M. 2011. Evaluation of green coconut (*Cocos nucifera L.*) pulp for use as milk, fat and emulsifier replacer in ice cream. Procedia Food Sci. 1: 1447–1453.

Srivastava, Y., Semwal, A.D. 2015. Effect of virgin coconut meal (VCM) on the rheological, micro-structure and baking properties of cake and batter. J. Food Sci. Technol. 52: 8122–8130.

Therdthai, N. 2022. Sugar, salt and fat reduction of bakery products. In: Advances in Food and Nutrition Research, Vol. 99. Academic Press. Cambridge, MA, USA, pp. 283-327.

Waziri, M., Audu, A.A., Suleiman, F. 2013. Analysis of some mineral elements in major coconut cultivars in Nigeria. J. Nat. Sci. 3: 7–11.

# ผลของผงฝรั่งที่ใช้แทนที่ไขมันต่อคุณภาพทางกายภาพ เคมี และประสาทสัมผัสของไส้กรอก

# Effect of guava powder as a fat substitute on physical, chemical, and sensory quality of sausages

**วิชุนันท์ ลีวรรณ์, ปิติพร ฤทธิเรืองเดช*, นันทวัน เทอดไทย**

Vichunan Leewan, Pitiporn Ritthiruangdej*, Nantawan Therdthai

ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Product Development, Faculty of Agro-Industy, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: pitiporn.r@ku.th

**บทคัดย่อ**

ไส้กรอกเป็นผลิตภัณฑ์จากเนื้อสัตว์แปรรูปยอดนิยมที่มีปริมาณไขมันสูง การศึกษานี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการแทนที่ไขมันหมูด้วยผงฝรั่ง (GP) ในไส้กรอก เพื่อลดปริมาณไขมันและเพิ่มใยอาหารโดยทำการแทนที่ไขมันหมูด้วย GP ในไส้กรอกที่ 0, 6, 9, 12% แล้วนำมาวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี กายภาพ และประสาทสัมผัสของไส้กรอก การเพิ่มระดับ GP ส่งผลให้ค่า L*, hardness, springiness, cohesiveness, gumminess, chewiness, ความชื้น, โปรตีน, เถ้า และใยอาหารเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่า pH และปริมาณไขมันลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ไส้กรอกที่แทนที่ไขมันด้วย GP 6% เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคเทียบเท่ากับไส้กรอกควบคุม ($p > 0.05$) การแทนที่ไขมันหมูด้วย GP ที่ 9% และ 12% ส่งผลให้ได้ไส้กรอกเสริมใยอาหารที่มีปริมาณใยอาหาร 5.37–10.13% การศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่า GP เป็นสารทดแทนไขมันในผลิตภัณฑ์ไส้กรอกได้โดยส่งผลให้ปริมาณไขมันลดลงและมีใยอาหารเพิ่มขึ้น จึงช่วยเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการ

**คำสำคัญ**: ไขมัน, ผงฝรั่ง, ใยอาหารหยาบ, ไส้กรอก

**Abstract**

Sausage is a popular processed meat product with a high fat content. This study investigated the feasibility of replacing pork fat with guava powder (GP) in sausage to reduce fat content and increase fiber. Sausages were formulated with 0, 6, 9 and 12% GP. The physical, chemical, and sensory properties of the sausages were evaluated. Increasing GP levels significantly increased L*, hardness, springiness, cohesiveness, gumminess, chewiness, moisture, protein, ash, and crude fiber, while significantly decreasing pH and fat content ($p \leq 0.05$). When 6% GP replaced fat, the sausage was equally acceptable to consumers as the control sample ($p > 0.05$). Replacing pork fat with GP at 9% and 12% resulted in fiber-fortified sausages with 5.37–10.13% fiber content. These findings suggest that GP is a viable fat substitute in sausage products, leading to reduced fat content and increased fiber, thereby enhancing the nutritional value.

**Keywords**: Crude fiber, Fat, Guava powder, Sausage

**คำนำ**

ฝรั่ง (*Psidium guajava Linn.*) เป็นผลไม้ที่อุดมไปด้วยวิตามินและแร่ธาตุหลากหลายชนิด โดยจัดเป็นผลไม้ที่มีวิตามินซีสูงที่สุด โดยฝรั่ง 100 กรัม มีวิตามินซีสูงถึง 228 มิลลิกรัม นอกจากนี้ยังพบเส้นใยอาหาร 5.4 กรัม โปรตีน 2.55 กรัม ไขมัน 0.95 กรัม และคาร์โบไฮเดรต 14.3 กรัม (USDA, 2019) ซึ่งการรับประทานฝรั่งแบบสดทำให้มีคุณค่าทางโภชนาการสูง ส่งเสริมสุขภาพที่ดี และลดโอกาสในการเกิดโรคต่าง ๆ อาทิเช่น โรคความดันโลหิตสูง โรคเบาหวาน บำรุงเหงือกและฟัน เป็นต้น ฝรั่งจัดได้ว่าเป็นพระเอกแห่งผลไม้ เนื่องจากราคาของฝรั่งมีราคาที่ดี ต้นทุนการผลิตต่ำ จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้เกษตรกรหันมาสนใจในการปลูกฝรั่งมากขึ้นทั้งยังเป็นผลไม้ที่เจริญเติบโตง่ายและได้ผลผลิตอย่างรวดเร็ว ออกดอกติดผลตลอดทั้งปี ทำให้มีผลผลิตฝรั่งเป็นจำนวนมากจึงมีการแปรรูปเพื่อถนอมอาหารหรือเพิ่มมูลค่า ได้แก่ การทำเป็นน้ำผลไม้ โดยการทำน้ำฝรั่งด้วยวิธีการสกัดเย็นเป็นวิธีการแปรรูปฝรั่งอีกทางหนึ่ง ซึ่งจากกระบวนการทำน้ำฝรั่งสกัดเย็นจะมีกากฝรั่งซึ่งเป็นส่วนเหลือทิ้งและเป็นแหล่งของใยอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อร่างกาย โดยมีงานวิจัยที่นำกากฝรั่งมาทำเป็นผงแล้วนำไปใช้เพิ่มเส้นใยให้แก่ผลิตภัณฑ์กลุ่มขนมอบ เช่น ขนมปัง (Bushara et al., 2016) คัพเค้ก (Khalifa et al., 2016) คุกกี้ เค้ก และขนมปัง (พัชรี และคณะ, 2542) แต่ยังไม่พบงานวิจัยที่นำผงฝรั่งมาใช้ในผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์แปรรูป

ไส้กรอก (Sausage) เป็นการแปรรูปผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์โดยการบดเนื้อสัตว์ให้ละเอียดผสมกับเกลือ น้ำตาล เครื่องเทศ ฯลฯ แล้วนำไปบรรจุในไส้ของสัตว์หรือสังเคราะห์เพื่อขึ้นรูป ไส้กรอกมีหลากหลายชนิด เช่น ไส้กรอกรมควัน ไส้กรอกสด ไส้กรอกสุก ไส้กรอกแห้ง และไส้กรอกกึ่งแห้ง เนื้อสัตว์ที่มักนำมาทำไส้กรอก ได้แก่ เนื้อหมู เนื้อไก่ เนื้อวัว และเนื้อปลา เป็นต้น (ศิริลดา, 2558) ไส้กรอกจัดเป็นอาหารที่มีปริมาณไขมันสูงถึง 26.6% (USDA, 2019) ซึ่งไขมันช่วยให้ไส้กรอกมีลักษณะเนื้อสัมผัสนุ่ม ชุ่มฉ่ำ และรสชาติดี แต่การบริโภคไส้กรอกเป็นปริมาณมากติดต่อกันเป็นระยะเวลานานเสี่ยงต่อการเกิดโรคอ้วนและภาวะคอเลสเตอรอลในเลือดสูง ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดโรคหัวใจและหลอดเลือด โรคไม่ติดต่อเรื้อรังตามมาได้ (กรมอนามัย, 2565) ซึ่งในปัจจุบันมีงานวิจัยที่ศึกษาการแทนที่ไขมันด้วยใยอาหารชนิดต่าง ๆ ได้แก่ ใยอาหารจากกากแอปเปิ้ล (Choi et al., 2016), เมล็ดแฟลกซ์และผงมะเขือเทศ (Ghafouri-Oskuei et al., 2019) และ *Makgeolli Lees* (Park et al., 2016) เป็นต้น ดังนั้นมีความเป็นไปได้ในการนำผงฝรั่งซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการผลิตน้ำฝรั่งสกัดเย็นมาใช้แทนที่ไขมันในไส้กรอก ในงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจนำผงฝรั่งมาแทนที่ไขมันในไส้กรอกเพื่อลดไขมันและเสริมใยอาหารให้แก่ไส้กรอก โดยการใช้กากฝรั่งที่เหลือจากกระบวนการทำน้ำฝรั่งสกัดเย็นมาอบแห้งเพื่อทำเป็นผงฝรั่ง ซึ่งประโยชน์ที่ได้จากงานวิจัยนี้จะช่วยลดของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตน้ำฝรั่งสกัดเย็นและเป็นการเพิ่มมูลค่าให้แก่กากฝรั่ง อีกทั้งยังเป็นการตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคในปัจจุบันที่ต้องการอาหารเพื่อสุขภาพ

**อุปกรณ์และวิธีการ**

*การเตรียมผงฝรั่งและวัตถุดิบที่ใช้ในการทำไส้กรอก*

นำกากฝรั่งสายพันธุ์กิมจูที่ได้จากการสกัดเย็นมานึ่งด้วยไอน้ำให้ความร้อนเพื่อฆ่าเชื้อเริ่มต้นและยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ Polyphenol oxidase (PPO) ที่อุณหภูมิน้ำเดือด เป็นเวลา 15 นาที แล้วนำไปอบด้วยตู้อบลมร้อน (Frecon ix, Japan) ที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา12 ชั่วโมง เมื่ออบแล้วทำการบดด้วยเครื่อง Hammer mill (AP-S, Hosokawa micron, Japan) ที่มีตะแกรงร่อนขนาด 100 mesh จากนั้นนำผงฝรั่งบรรจุใส่ถุงอลูมิเนียมฟอยล์ปิดปากถุงให้สนิทและเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4°C (Shin and Choi, 2022)

เนื้อหมูและมันหมู (บริษัท ซีพีเอฟ จำกัด), น้ำแข็ง, เกลือ (บริษัท อุตสาหกรรมเกลือบริสุทธิ์ จำกัด), โซเดียมไนไตรท (ผงเพรก),โซเดียมอิริโธรเบท,โซเดียมไตรพอลิฟอสเฟต และโปรตีนถั่วเหลืองไอโซเลต (บริษัท กรุงเทพเคมี จำกัด), โมโนโซเดียมกลูตาเมต (บริษัท อายิโนะโมะโต๊ะ (ประเทศไทย) จำกัด), น้ำตาล (บริษัท น้ำตาลมิตรผล จำกัด), กลิ่นควัน (บริษัท พีทีเค โซลูชั่น แอนด์ ซัพพลายส์ จำกัด), พริกไทยป่น (บริษัท ไร่ธัญญะ จำกัด), เมล็ดผักชีป่นและลูกจันทน์ป่น (บริษัท เคโอศิริ อินเตอร์เทรด จำกัด), กระเทียมผงและผงปาปริก้า (บริษัท อาจจิตต์อินเตอร์เนชั่นแนลเพ็พเพอร์แอนด์สไปซ์ จำกัด) มาโจแรม, ไทม์ป่น, กานพลู (บริษัท เคโอศิริ อินเตอร์เทรด จำกัด), ไทม์ป่น ยี่ห้อคุณศิริ (บริษัท เคโอศิริ อินเตอร์เทรด จำกัด) และไส้คอลลาเจนขนาด 22 มิลลิเมตร (บริษัท พีทีเค โซลูชั่น แอนด์ ซัพพลายส์ จำกัด)

*การวางแผนการทดลอง*

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของการแทนที่ไขมันด้วยผงฝรั่งต่อคุณภาพทางกายภาพ (ค่าสีและเนื้อสัมผัส), คุณภาพทางเคมี (ค่า pH และองค์ประกอบทางเคมี) และคุณภาพด้านประสาทสัมผัสของไส้กรอก วางแผนการทดลองโดยผันแปรปริมาณผงฝรั่งแทนที่ไขมันหมู 4 ระดับ ได้แก่ 0, 6, 9 และ 12% ซึ่งสูตรพื้นฐานของไส้กรอกดัดแปลงจากสูตรไส้กรอกแฟรงค์เฟอร์เตอร์ของกรมปศุสัตว์ (กรมปศุสัตว์, 2546) มีส่วนประกอบดัง Table 1

**Table 1** Ingredients of guava powder (GP)-fortified sausage

| Ingredients (%) | 0%GP | 6%GP | 9%GP | 12%GP |
|---|---|---|---|---|
| Pork hip | 44.52 | 44.52 | 44.52 | 44.52 |
| Fat | 36.43 | 34.24 | 33.15 | 32.06 |
| Guava powder | 0.00 | 2.19 | 3.28 | 4.37 |
| Ice | 14.99 | 14.99 | 14.99 | 14.99 |
| Salt | 0.53 | 0.53 | 0.53 | 0.53 |
| Sodium nitrite | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 |
| Sodium erythrobate | 0.22 | 0.22 | 0.22 | 0.22 |
| Sodium tripolyphosphate | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 |
| Soy protein isolate | 1.05 | 1.05 | 1.05 | 1.05 |
| MSG | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.12 |
| Sugar | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 |
| Smoke flavor | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 |
| Spices | 0.83 | 0.83 | 0.83 | 0.83 |

สภาวะในการผลิตไส้กรอกที่ใช้ปริมาณส่วนผสม 3 กิโลกรัมมีดังนี้ ใส่น้ำแข็งแล้วปั่นผสมในเครื่องปั่นผสม (CM-14, Mainca, Spain) เป็นเวลา 1 นาที เพื่อให้ได้อุณหภูมิประมาณ 10°C แล้วใส่เนื้อหมูที่แช่แข็ง เกลือ โซเดียมไนไตรท (ผงเพรก) โซเดียมอีริโธรเบท และโซเดียมไตรพอลิฟอสเฟต ปั่นผสมเป็นเวลา 3 นาที จากนั้นเติมมันหมูแช่แข็งและเครื่องปรุงที่เหลือ โดยในระหว่างการปั่นผสมให้เติมน้ำแข็งนาทีที่ 4, 5, 6, 7 แล้วปั่นต่อจนถึง 9 นาที เพื่อให้ส่วนผสมมี

เนื้อเนียนละเอียด แล้วนำไปบรรจุในไส้คอลลาเจนด้วยเครื่องบรรจุไส้กรอก (FC-12, Mainca, Spain) บรรจุให้มีขนาดความยาว 100 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปใส่ตู้รมควัน (CS700, Kerres, Germany) โดยใช้สภาวะ ดังนี้ Drying fast hot 65°C เป็นเวลา 15 นาที, Hot smoke 65°C เป็นเวลา 20 นาที, Cooking 77°C เป็นเวลา 30 นาที และ Shower เป็นเวลา 5 นาที แล้วนำตัวอย่างไส้กรอกที่ได้ไปวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี กายภาพ และทางประสาทสัมผัส

*การวิเคราะห์คุณภาพทางเคมีและกายภาพของไส้กรอก*

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณ ได้แก่ ความชื้น ไขมัน เถ้า โปรตีน และใยอาหารหยาบ ตามวิธีการของ AOAC (2000) และคำนวณปริมาณคาร์โบไฮเดรตจาก 100 ลบด้วยผลรวมของปริมาณความชื้น ไขมัน เถ้า โปรตีน และใยอาหารหยาบ, คำนวณปริมาณแคลอรี่โดยการนำค่าไขมันที่วิเคราะห์ได้คูณ 9 ค่าโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตที่วิเคราะห์ได้คูณ 4,วิเคราะห์ค่า pH ที่อุณหภูมิห้อง 25°C โดยใช้เครื่อง pH meter (SevenGo, Metler Toledo, Schwerzenbach, Switzerland), วิเคราะห์ค่าสี ระบบ CIE L*a*b* ของไส้กรอก โดยการหั่นไส้กรอกผ่าครึ่ง แล้วนำไปวัดค่าสีโดยใช้เครื่อง Spectophotometer (Ultrascan pro, Konica Minolta, United States) บันทึกค่าความสว่าง (CIE L* value โดยสีดำมีค่าเท่ากับ 0 สีขาวมีค่าเท่ากับ 100) ค่าความเป็นสีแดง (CIE a* value ค่าบวกแสดงความเป็นสีแดงและค่าลบแสดงความเป็นสีเขียว) ค่าความเป็นสีเหลือง (CIE b* value ค่าบวกแสดงความเป็นสีเหลืองและค่าลบแสดงความเป็นสีน้ำเงิน) และวิเคราะห์ด้านเนื้อสัมผัส ด้วยเครื่อง Texture analyzer (TA.XT Plus, Stable Micro Systems Ltd., United Kingdom) และหั่นไส้กรอกความสูง 20 มิลลิเมตร แล้วนำไปวัดค่าโดยใช้วิธี Texture profile analysis (TPA) และหัววัดแบบ P/50 โดยกำหนดสภาวะในการวัดดังนี้ pre-test speed 2.0 mm/s, post-test speed 5.0 mm/s, maximum load 2 kg, head speed 2.0 mm/s, distance 12.0 mm, force 5 g บันทึกค่า hardness (N), springiness (mm), cohesiveness, gumminess (N) และ chewiness (N) และประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส ด้วยวิธี 9 –point hedonic scale test (คะแนนเท่ากับ 1 คือ ไม่ชอบมากที่สุด และคะแนนเท่ากับ 9 คือ ชอบมากที่สุด) โดยใช้ผู้ทดสอบจำนวน 50 คน ประเมินความชอบคุณลักษณะด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น เนื้อสัมผัส รสชาติ กลิ่นรส และความชอบโดยรวม

*การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ*

นำข้อมูลค่าคุณภาพทางเคมี กายภาพ และทางประสาทสัมผัส มาวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล (Analysis of variance, ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's new multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยใช้โปรแกรม SPSS

**ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง**

Table 2 แสดงค่าองค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของไส้กรอกที่แทนที่ไขมันหมูด้วยผงฝรั่งปริมาณ 0, 6, 9 และ 12% เมื่อปริมาณผงฝรั่งที่ใช้แทนที่ไขมันเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณความชื้น โปรตีน และใยอาหารหยาบเพิ่มขึ้น ($p \leq 0.05$) ส่วนปริมาณไขมันและคาร์โบไฮเดรตลดลง ($p \leq 0.05$) โดยปริมาณไขมันของไส้กรอกลดลงจาก 20.24% ในสูตรควบคุมเป็น 7.5% ในสูตรที่ใช้ผงฝรั่งแทนที่ไขมัน 12% สอดคล้องกับค่าคุณภาพทางเคมีของผงฝรั่งที่ใช้ในการวิจัยนี้ ซึ่งมีความชื้น 6.91%, โปรตีน 9.87%, ไขมัน 0.64%, เถ้า 3.22% และใยอาหารหยาบสูงถึง 47.35% งานวิจัยของ Verma et al. (2013) พบว่าผงฝรั่งมีปริมาณใยอาหารประเภทไม่ละลายน้ำสูงถึง 42.56% ซึ่งคุณสมบัติของใยอาหารประเภทไม่ละลายน้ำมีคุณสมบัติดูดจับกับน้ำได้ดี และเมื่อพิจารณาจาก Table 2 พบว่าการแทนที่ไขมันด้วยผงฝรั่ง 9–12% ส่งผลให้

ไส้กรอกมีปริมาณใยอาหารอยู่ในช่วง 2.55–4.53 กรัม/100 กรัม ซึ่งปริมาณใยอาหารเพิ่มขึ้นเป็น 1.60–2.85 เท่าจากสูตรควบคุม (0% GP) จึงสามารถกล่าวอ้างทางโภชนาการได้ว่าเป็นไส้กรอกเสริมใยอาหาร โดยการกล่าวอ้างจะต้องมีปริมาณใยอาหารไม่น้อยกว่า 3 กรัม/100 กรัม และเป็นการเพิ่มใยอาหารขึ้นเมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์อื่นที่เป็นอาหารชนิดเดียวกันหรือคล้ายคลึงกัน โดยเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 25% ขึ้นไป (ประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 182, 2541)

ค่า pH เป็นค่าที่บ่งบอกถึงคุณภาพของเนื้อสัตว์ โดยเนื้อสดควรจะควบคุมให้ค่า pH อยู่ในช่วง 5.5–6.2 หากพบว่าค่าต่ำกว่านี้อาจจะบ่งบอกได้ว่าคุณภาพของเนื้อสัตว์ไม่มีคุณภาพ (Hannainstruments, 2022) จากการทดลองพบว่า เมื่อปริมาณผงฝรั่งที่แทนที่ไขมันเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า pH ลดลง ($p \leq 0.05$) เนื่องจากผงฝรั่งมี pH เท่ากับ 4.28 และยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Choi et al. (2016) ที่พบว่าการลดปริมาณไขมันในไส้กรอกไก่ด้วยกากแอปเปิ้ลส่งผลให้ค่า pH ในแบตเตอร์และไส้กรอกลดลง เนื่องจากใยอาหารจากกากแอปเปิ้ลมีค่า pH เท่ากับ 5.37

**Table 2** Chemical compositions (%dry basis) of guava powder (GP)-fortified sausage

| Chemical composition | 0% GP | 6% GP | 9% GP | 12% GP |
|---|---|---|---|---|
| Moisture (%) | 49.62±0.09$^{d}$ | 50.43±0.08$^{c}$ | 51.04±0.00$^{b}$ | 51.82±0.06$^{a}$ |
| Fat (%) | 20.24±0.25$^{a}$ | 18.07±0.45$^{b}$ | 14.70±0.05$^{c}$ | 7.50±0.31$^{d}$ |
| Ash (%) | 4.69±0.83$^{b}$ | 5.26±0.13$^{ab}$ | 5.35±0.00$^{ab}$ | 6.23±0.04$^{a}$ |
| Protein (%) | 18.81±0.11$^{d}$ | 20.77±0.06$^{c}$ | 21.39±0.06$^{b}$ | 22.70±0.35$^{a}$ |
| Fiber (%) | 1.59±0.09$^{d}$ | 2.55±0.07$^{c}$ | 3.76±0.37$^{b}$ | 4.53±0.28$^{a}$ |
| Carbohydrate (%) | 5.06±1.17$^{b}$ | 2.94±0.35$^{c}$ | 3.76±0.37$^{bc}$ | 7.24±0.28$^{a}$ |
| Calories (Kcal) | 334.07 | 319.78 | 297.07 | 255.36 |
| pH | 6.32±0.30$^{a}$ | 6.06±0.02$^{b}$ | 6.06±0.02$^{b}$ | 6.00±0.00$^{c}$ |

$^{a-e}$ Mean±SD in the same roll followed by different superscripts are statistically different ($p \leq 0.05$)

สีของไส้กรอกเป็นคุณลักษณะที่ส่งผลต่อการยอมรับของผู้บริโภค จาก Table 3 พบว่าเมื่อปริมาณผงฝรั่งที่แทนที่ไขมันเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า L* (ค่าความสว่างลดลง) ลดลง ($p \leq 0.05$) ส่วนค่า a* (สีแดง) และ b* (สีเหลือง) เพิ่มขึ้น ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับไส้กรอกชุดควบคุม เนื่องจากผงฝรั่งที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีค่า L*, a* และ b* เท่ากับ 57.40 , 4.62 และ 12.86 ตามลำดับ นอกจากนี้ผงฝรั่งยังส่งผลต่อเนื้อสัมผัสของไส้กรอก โดยค่า hardness , springiness, cohesiveness, gumminess และ chewiness เพิ่มขึ้น ($p \leq 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Choi et al. (2016) ที่พบว่าใยอาหารจากกากแอปเปิ้ลเมื่อนำไปแทนที่ไขมันส่งผลให้ค่า hardness, cohesiveness, gummines และ chewiness เพิ่มขึ้น และนอกจากนี้ยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Choe and Kim (2019) ที่พบว่าการแทนที่ไขมันด้วยหนังไก่และใยอาหารจากข้าวสาลีส่งผลให้ค่า hardness , springiness, gumminess และ chewiness เพิ่มขึ้น ($p \leq 0.05$) หน้าที่สำคัญของไขมันสัตว์นั้นทำให้ไส้กรอกมีเนื้อสัมผัสนุ่ม ชุ่มฉ่ำ เพิ่มรสชาติ และทำให้ไส้กรอกมีสีสว่างมากยิ่งขึ้น (พิษณุ, 2554) ดังนั้นเมื่อลดปริมาณไขมันในการทำไส้กรอกจึงส่งผลให้ค่าความสว่างของไส้กรอกลดลง ( Fig. 1) และเนื้อสัมผัสของไส้กรอกแข็งขึ้น นอกจากนี้ปริมาณใยอาหารเพิ่มขึ้นยังส่งผลต่อเนื้อสัมผัสของไส้กรอก เนื่องจากใยอาหารมีคุณสมบัติในการดูดซับน้ำ น้ำมัน และการพองตัวที่ส่งผลต่อโครงสร้างสามมิติของคุณสมบัติรีโอโลยีของแบตเตอร์

โดยการกระจายตัวของแบตเตอร์จะมีส่วนของชั้นไขมันและอนุภาคของใยอาหารกระจายอยู่ตามเมทริกซ์โปรตีน เมื่อทำให้โปรตีนสุกจนเกิดเจลจึงส่งผลให้เจลมีความแข็งเพิ่มขึ้น (Barretto et al., 2015)

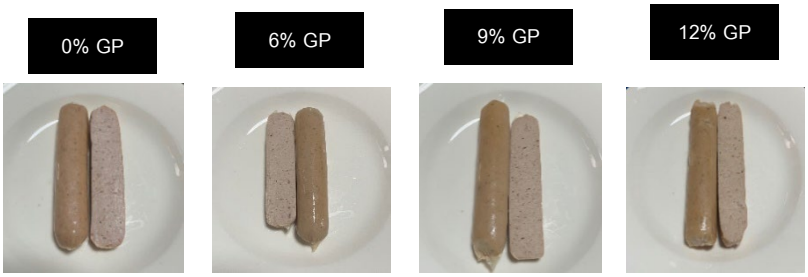



**Fig. 1** Images of fiber-fortified sausage from guava powder (GP)

**Table 3** Physical qualities of guava powder (GP)-fortified sausage

| Physical qualities | 0% GP | 6% GP | 9% GP | 12% GP |
|---|---|---|---|---|
| L* | 72.10±0.84$^{a}$ | 70.14±1.05$^{b}$ | 69.23±0.96$^{b}$ | 66.63±1.81$^{c}$ |
| a* | 4.62±0.24$^{c}$ | 4.72±0.03$^{c}$ | 5.42±0.14$^{b}$ | 5.67±0.10$^{b}$ |
| b* | 12.86±0.19$^{d}$ | 14.62±0.22$^{c}$ | 17.69±0.37$^{b}$ | 17.84±0.52$^{b}$ |
| Hardness (N) | 37.06±4.55$^{c}$ | 40.82±2.17$^{bc}$ | 43.56±3.30$^{b}$ | 52.60±7.16$^{a}$ |
| Springiness (mm) | 0.86±0.10$^{b}$ | 0.89±0.04$^{ab}$ | 0.93±0.03$^{a}$ | 0.91±0.03$^{ab}$ |
| Cohesiveness | 0.83±0.05$^{b}$ | 0.84±0.05$^{b}$ | 0.90±0.03$^{a}$ | 0.90±0.03$^{a}$ |
| Gumminess (N) | 29.78±4.33$^{c}$ | 30.05±3.81$^{c}$ | 36.89±3.42$^{b}$ | 43.65±4.21$^{a}$ |
| Chewiness (N) | 26.57±4.53$^{c}$ | 27.62±2.71$^{c}$ | 33.03±3.26$^{b}$ | 39.74±3.75$^{a}$ |

$^{a-d}$ Mean±SD in the same roll followed by different superscripts are statistically different ($p \leq 0.05$)

Table 4 แสดงผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส โดยประเมินความชอบคุณลักษณะด้านสี ลักษณะปรากฏ กลิ่นรส รสชาติ และความชอบโดยรวม พบว่าไส้กรอกที่แทนที่ไขมันด้วยผงฝรั่งปริมาณ 6%, 9% และ 12% ได้รับคะแนนความชอบในคุณลักษณะด้านสี เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมแตกต่างจากไส้กรอกควบคุม ($p \leq 0.05$) โดยมีแนวโน้มลดลง อย่างไรก็ตามคะแนนความชอบยังอยู่ในระดับปานกลาง (ในช่วงคะแนน 7.00–7.86) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Huang et al. (2011) ที่พบว่าไส้กรอกที่แทนที่ไขมันด้วยข้าวสาลีและใยอาหารจากข้าวโอ๊ตได้คะแนนความชอบอยู่ในช่วง 7.0 สำหรับรสชาติ เนื้อสัมผัส และรสชาติ แต่เมื่อแทนที่ข้าวสาลีและใยอาหารจากข้าวโอ๊ตในไส้กรอกมากขึ้นจะส่งผลต่อคะแนนทางประสาทด้านต่าง ๆ ลดลงตามลำดับ เมื่อพิจารณาผลใน Table 4 จึงคัดเลือกสูตรไส้กรอกที่แทนที่ไขมันด้วยผงฝรั่งที่ระดับ 9% เป็นสูตรที่เหมาะสมเนื่องจากระดับการแทนที่นี้สามารถเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการในด้านใยอาหาร ลดไขมัน และไส้กรอกยังเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคได้

**Table 4** Sensory evaluation of guava powder (GP)-fortified sausage

| Sensory attributes | 0% GP | 6% GP | 9% GP | 12% GP |
|---|---|---|---|---|
| Appearance | 7.78±0.84$^{a}$ | 7.48±1.26$^{a}$ | 7.64±1.19$^{a}$ | 7.42±0.95$^{a}$ |
| Color | 7.64±1.19$^{a}$ | 7.60±1.12$^{ab}$ | 7.14±1.25$^{bc}$ | 7.00±1.23$^{c}$ |
| Odor | 7.40±1.31$^{a}$ | 7.26±1.40$^{a}$ | 7.76±1.08$^{a}$ | 7.38±1.24$^{a}$ |
| Texture | 7.86±1.16$^{a}$ | 7.28±1.58$^{b}$ | 7.60±1.08$^{ab}$ | 7.38±1.24$^{ab}$ |
| Taste | 7.78±1.15$^{a}$ | 7.48±1.40$^{a}$ | 7.62±1.23$^{a}$ | 7.26±1.23$^{a}$ |
| Flavor | 7.72±0.95$^{a}$ | 7.26±1.59$^{a}$ | 7.58±1.11$^{a}$ | 7.36±1.06$^{a}$ |
| Overall liking | 7.74±0.96$^{a}$ | 7.36±1.45$^{ab}$ | 7.64±1.01$^{ab}$ | 7.24±1.08$^{b}$ |

$^{a-b}$Mean±SD in the same roll followed by different superscripts are statistically different ($p \leq 0.05$)

## สรุป

จากผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าผงฝรั่งที่เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการสกัดน้ำฝรั่งสามารถใช้ในการปรับปรุงคุณค่าทางโภชนาการของไส้กรอก โดยส่งผลให้ปริมาณไขมันลดลง ในทางกลับกันปริมาณใยอาหารเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณผงฝรั่งส่งผลต่อค่า L*, hardness , springiness, cohesiveness, gumminess และ chewiness เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ส่วนค่า pH ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) และจากการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสพบว่าเมื่อไส้กรอกที่มีการแทนที่ไขมันด้วยผงฝรั่งปริมาณ 9% มีค่าคะแนนความชอบคุณลักษณะด้านลักษณะปรากฏ กลิ่นรส เนื้อสัมผัส รสชาติ กลิ่น และความชอบโดยรวม ไม่แตกต่างจากไส้กรอกชุดควบคุม ($p > 0.05$) และปริมาณไขมันลดลงถึง 27.37% และมีปริมาณใยอาหารเพิ่มขึ้น 2.36 เท่า ซึ่งสามารถกล่าวอ้างทางโภชนาการว่าเป็นไส้กรอกเสริมใยอาหารได้และนอกจากนี้ควรมีการศึกษาอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์เพิ่มเติม

## กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคณะอุตสาหกรรมการเกษตร สำหรับการสนับสนุนทุนนำเสนอผลงานในการประชุมวิชาการแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 62

## เอกสารอ้างอิง

กรมปศุสัตว์. 2546. ผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์. สำนักพัฒนาการปศุสัตว์และถ่ายทอดเทคโนโลยี. กรมปศุสัตว์. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

กรมอนามัย. 2565. กรม อ. เผยกินไส้กรอกทอด 1 ชิ้น เทียบเท่าน้ำมัน 3 ช้อนชา กินมาก สะสมนาน เสี่ยงอ้วนและคอเลสเตอรอลสูง. https://multimedia.anamai.moph.go.th/news/070265/, 24 กุมภาพันธ์ 2566.

กระทรวงสาธารณสุข. ประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 182) พ.ศ. 2541 เรื่อง ฉลากโภชนาการ. ราชกิจจานุเบกษา ฉบับประกาศทั่วไป เล่มที่ 115 ตอนที่ 47 ง (ลงวันที่ 11 มิถุนายน 2541).

พิษณุ วิเชียรสวรรค์. 2554. หน้าที่ส่วนผสมๆ ต่างในการทำไส้กรอก. http://tujournals.tu.ac.th/tstj/detailart.aspx?ArticleID=685, 24 กุมภาพันธ์ 2566.

พัชรี สาตรา. 2542. การพัฒนาสูตรขนมอบเสริมใยอาหาร โดยใช้กากฝรั่งและเม็ดฝรั่ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยมหิดล.

วิชาเกษตร. 2559. ฝรั่ง. http://www.bktl.ac.th/news-detail__252022, 24 กุมภาพันธ์ 2566.

ศิริลดา ไกรลมสม. 2558. การพัฒนาไส้กรอกกะเพราไก่ลดไขมันโดยใช้แป้งบุกร่วมกับแซนแทนกัม. วารสารเกษตร 31: 77–87.

AOAC. 2000. Official Methods of Analysis of AOAC, 17th ed. Association of Official Analytical Chemists. Rockville, MD, USA.

Barretto, A.C., Pacheco, M.T., Polonio, M.A. 2015. Effect of the addition of wheat fiber and partial pork back fat on the chemical composition, texture and sensory property of low-fat bologna sausage containing inulin and oat fiber. Food Sci. Technol. 35: 100–107.

Bushara, A.M., Mustafa, A. A., Elfaki, H.A., Abdelhakam, K. E., Eibaid, A.I. 2016. Effect of adding guava powder to wheat flour on bread making. J. Acad. Ind. Res. 4: 216–220.

Choe, J., Kim, H.Y. 2019. Quality characteristics of reduced fat emulsion-type chicken sausages using chicken skin and wheat fiber mixture as fat replacer. Poultry Sci. 98: 2662–2669.

Choi, Y.S., Kim, Y.B., Hwang, K.E., Song, D.H., Ham, Y.K., Kim, H.W., Sung, J.M., Kim, C.J. 2016. Effect of apple pomace fiber and pork fat levels on quality characteristics of uncured, reduced-fat chicken sausages. Poultry Sci. 95: 1465–1471. doi.org/10.3382/ps/pew096

Chopda, C.A., Barrett, D.A. 2001. Optimization of guava juice and powder production. Department of Food Science and Technology, University of California. Davis, CA, USA.

Ghafouri-Oskuei, H., Javadi, A., Saeidi Asl, M.R., Azadmard-Damirchi, S., Armin, M. 2019. Quality properties of sausage incorporated with flaxseed and tomato powders. Meat Sci. 161: 107957.

Hannainstruments. 2022. การวัดค่า pH ในเนื้อสัตว์. https://www.hannathailand.com/2022/09/29/%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B8%A7%E0%B8%B1%E0%B8%94%E0%B8%84%E0%B9%88%E0%B8%B2-ph-%E0%B9%83%E0%B8%99%E0%B9%80%E0%B8%99%E0%B8%B7%E0%B9%89%E0%B8%AD%E0%B8%AA%E0%B8%B1%E0%B8%95%E0%B8%A7%E0%B9%8C/, 2 พฤศจิกายน 2566.

Huang, S.C., Tsai, Y.F., Chen, C.M. 2011. Effects of wheat fiber, oat fiber, and inulin on sensory and physico-chemical properties of Chinese-style sausages. Asian Austral. J. Anim. Sci. doi: 10.5713/ajas.2011.10317

Khalifa, I., Barakat, H., El-Mansy, H.A., Soliman, S.A. 2016. Influencing of guava processing residues incorporation on cupcake characterization. J. Nutr. Food Sci. doi.org/10.4172/2155-9600.1000513

Park, K.S., Choi, Y.S., Kim, H.Y., Kim, H.W., Song, D.H., Hwang, K.E., Choi, S.G., Kim, C.J. 2012. Quality characteristics of chicken emulsion sausages with different levels of makgeolli lees fiber. KOSFA. 32: 54–61. doi.org/10.5851/kosfa.2012.32.1.54

Shin, S.H., Choi, W.S. 2022. Physiochemical properties of chicken breast sausage with red ginseng marc powder. Food Sci. Anim. Resour. 42: 486–503.

United States Department of Agriculture. 2019. Guava. https://fdc.nal.usda.gov/fdc-app.html#/food-details/173044/nutrients, 24 February 2023.

United States Department of Agriculture. 2019. Sausage. https://fdc.nal.usda.gov/fdc-app.html#/food-details/172954/nutrients, 24 February 2023.

Verma, A.K., Rajkumar, v., Banerjee, R., Biswas, S., Das, A.K. 2013. Guava (*Psidium guajava* L.) powder as an antioxidant dietary fibre in sheep meat nuggets. Asian Austral. J. Anim. Sci. 26: 886–895.

# ปริมาณไขมันที่เป็นของแข็งในรูปผลึก พฤติกรรมการตกผลึกและการหลอมเหลว และลักษณะโครงสร้างผลึกของเนยโกกุมผสมเนยโกโก้

# Solid fat content, crystallization and melting behavior and crystal structure of kokum butter and cocoa butter blends

**กรรณิการ์ อำไพ*, โสภาค สอนไว, ปราโมทย์ คูวิจิตรจารุ**

Kannika Aumpai*, Sopark Sonwai, Pramote Khuwijitjaru

ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม 73000

Department of Food Technology, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Nakhon Pathom 73000, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: aumpai_k@su.ac.th

**บทคัดย่อ**

เนยโกโก้ (cocoa butter, CB) เป็นวัตถุดิบสำคัญในผลิตภัณฑ์ เนื่องจากความผันแปรทางสภาพอากาศและเหตุผลทางเศรษฐกิจต่าง ๆ ส่งผลให้ปริมาณผลผลิตของ CB มีอย่างจำกัด ทำให้อุตสาหกรรมการผลิตช็อคโกแลตมองหาไขมันทดแทนเนยโกโก้ที่สามารถเข้ากันได้กับเนยโกโก้และมีสมบัติทางกายภาพคล้ายกับเนยโกโก้ งานวิจัยนี้ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเนยโกกุม (kokum butter, KB) มาใช้เป็นไขมันทดแทนเนยโกโก้ชนิด cocoa butter equivalent (CBE) โดยศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพและพฤติกรรมการตกผลึกของ KB และไขมันผสมระหว่าง KB และ CB ที่อัตราส่วนต่าง ๆ พบว่า การผสม KB ในปริมาณไม่เกิน 15% (โดยน้ำหนัก) ลงใน CB ไม่ส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและพฤติกรรมการตกผลึกของ CB อย่างมีนัยสำคัญ และไขมันผสม KB/CB ที่อัตราส่วน 15/85 แสดงโครงสร้างผลึกที่เหมือนกับ CB บ่งชี้ได้ว่า KB มีศักยภาพสำหรับนำมาใช้เป็น CBE ได้

**คำสำคัญ**: การตกผลึก, เนยโกกุม, เนยโกโก้

**Abstract**

Cocoa butter (CB) is the main fat ingredient in chocolate products. Due to economic reasons and climate and environment change, the production of CB is limited. This lead some chocolate and confectionery industries to look for alternative fats that are compatible with physical properties of CB. This research studied the possibility for using kokum butter (KB) as cocoa butter equivalent (CBE). The physicochemical properties and crystallization and melting behavior of KB, CB, and the KB/CB blends in different ratios were characterized. Adding 15% (wt) KB or lower to CB did not significantly change the properties and crystallization behavior to CB. The 15/85 blend of KB/CB exhibited polymorphic structure comparable to CB, suggesting that KB can be used as CBE.

**Keywords**: Cocoa butter, Crystallization, Kokum butter

**คำนำ**

เนยโกโก้ (cocoa butter, CB) เป็นไขมันชนิดหนึ่งซึ่งเป็นวัตถุดิบที่สำคัญในผลิตภัณฑ์ช็อคโกแลต มีสมบัติเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง (20–25°C) และหลอมละลายจนหมดที่อุณหภูมิร่างกาย CB มีองค์ประกอบของกรดไขมันหลักอยู่ 3 ชนิด คือ กรดสเตียริก (stearic acid, S) กรดโอเลอิก (oleic acid, O) และกรดปาล์มิติก (palmitic, P) และมีองค์ประกอบของไตรเอซิลกลีเซอรอล (triacylglycerol, TAG) หลักอยู่ 3 ชนิด ได้แก่ 1,3-dipalmitoyl-2-oleoyl-glycerol (POP, 13.8%–21.8%), 1(3)-palmitoyl-3(1)stearoyl-2-oleoyl-glycerol (POS, 26.3%-44.8%) และ 1,3-distearoyl-2-oleoyl-glycerol (SOS, 20.0%-29.4%) (Jahurul et al., 2020) นอกจากนี้ CB ยังสามารถตกผลึกได้ถึง 6 โครงสร้าง (โครงสร้าง I-VI) อย่างไรก็ตาม มีเพียงแค่โครงสร้าง V ($\beta_2$) เท่านั้นที่เป็นที่ต้องการในช็อคโกแลต เนื่องจากทำให้ผลิตภัณฑ์ช็อคโกแลตมีคุณสมบัติที่เป็นที่ต้องการ เช่น ความมันวาว ความแข็งเปราะ มีสมบัติในการแกะออกจากแม่พิมพ์ได้ดี มีเนื้อสัมผัสเรียบเนียน และทนต่อการเกิดฝ้าขาวบนผิวช็อคโกแลต (fat bloom) (Beckett, 2008; Sonwai et al., 2014) ปัจจุบันความต้องการของขนมหวาน ลูกอม และช็อคโกแลตมีเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ปริมาณผลผลิตของ CB นั้นลดลงเนื่องจากการผันแปรทางสภาพภูมิอากาศ (Jahurul et al., 2013; Yamoneka et al., 2018) ส่งผลให้ CB มีราคาที่สูงขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงมีอุตสาหกรรมที่กำลังมองหาไขมันพืชชนิดอื่น ๆ ที่สามารถทดแทน CB ได้

ไขมันทดแทนเนยโกโก้ชนิด cocoa butter equivalent (CBE) เป็นไขมันทดแทนเนยโกโก้ที่มีสมบัติทางเคมีและทางกายภาพที่คล้ายกับ CB จึงทำให้สามารถนำมาให้ทดแทน CB ได้ทุกอัตราส่วนโดยไม่ทำให้สมบัติของช็อคโกแลตเปลี่ยนแปลงไป (Kang et al., 2013; Bahari and Akoh, 2018) โดยทั่วไปแล้ว CBE ผลิตได้จากการผสมระหว่างไขมันที่อุดมไปด้วย TAG ชนิด POP กับไขมันที่อุดมไปด้วย TAG ชนิด SOS (Talbot, 2009) ซึ่งสามารถได้มาจากไขมันจากเมล็ดพืช 6 ชนิด ได้แก่ โกกุม (kokum) อิลิเป้ (illipé) แซล (sal) เชีย (shea) ปาล์ม (palm) และมะม่วง (mango) (Beckett, 2008; Bootello et al., 2012)

เนยโกกุม (kokum butter, KB) จากเนื้อในเมล็ดของโกกุม ซึ่งเป็นต้นไม้ที่มีขนาดเล็กในประเทศอินเดีย KB ประกอบด้วยกรดสเตียริก (50.0%–60.0%) และกรดโอเลอิก (26.0%–40.0%) และมี TAG ชนิด SOS เป็นองค์ประกอบหลัก (Jeyarani and Reddy, 2010; Vidhate and Singhal, 2013; Nagavekar et al., 2019) งานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพและพฤติกรรมการตกผลึกของ KB และไขมันผสมระหว่าง KB และ CB ที่อัตราส่วนต่าง ๆ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำ KB มาใช้เป็น CBE แม้ว่าปริมาณผลผลิตของ CB (5,000–10,000 ตันต่อปี) จะลดลงในทุกปี แต่ยังคงสูงกว่าของ KB (1,000 ตันต่อปี) จึงทำให้ KB นั้นอาจมีราคาที่สูงกว่าได้

**อุปกรณ์และวิธีการ**

*วัตถุดิบที่ใช้*

KB จาก Pioneer Enterprise (ประเทศอินเดีย) และ CB ทางการค้าจาก MC Foods Co., Ltd. (ประเทศไทย)

*การเตรียมตัวอย่างไขมันผสม*

เตรียมไขมันผสมโดยนำ KB และ CB มาให้ความร้อนในอ่างน้ำร้อน (water bath, Memmert, Germany) ที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 10 นาที เพื่อทำลายผลึก จากนั้นผสมไขมันทั้งสองชนิดในอัตราส่วน KB/CB เท่ากับ 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40, 50/50, 40/60, 30/70, 20/80, 15/85, 10/90 และ 0/100 (% โดยน้ำหนัก) และเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4°C เพื่อนำไปวิเคราะห์สมบัติด้านต่าง ๆ ตามวิธีที่แสดงในหัวข้อถัดไป

*การศึกษาปริมาณไขมันที่เป็นของแข็งในรูปผลึก*

ศึกษาปริมาณไขมันที่เป็นของแข็งในรูปผลึก (solid fat content, SFC) ตามอุณหภูมิระหว่าง 15°C และ 40°C โดยใช้เครื่อง pulse-nuclear magnetic resonance (p-NMR) spectrometer (Minispec-mq20, Bruker, Karlsruhe, Germany) ตามวิธีของ American Oil Chemists' Society (AOCS) Official Method Cd l6b-93 (AOCS, 2017) ตัวอย่างจะถูกให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80°C เพื่อให้เกิดการละลายทั้งหมด จากนั้นบรรจุใส่หลอด NMR ให้มีความสูงประมาณ 4 เซนติเมตร นำตัวอย่างไปหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นไขมันเหลวจะถูกเทมเพอร์ (tempered) ให้ไปอยู่ในโครงสร้างแบบ $\beta$ โดยการนำไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 0°C เป็นเวลา 2 hr ตามด้วย 26°C เป็นเวลา 48 hr และ 0°C เป็นเวลา 2 hr จากนั้นนำไปเก็บที่อุณหภูมิที่ต้องการจะวัดค่า SFC (15–40°C) เป็นเวลา 1 hr แล้วทำการวัดค่า %SFC แล้วนำมาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า %SFC (แกน y) และอุณหภูมิ (แกน x)

*การศึกษาพฤติกรรมการตกผลึกและการหลอมเหลว*

ศึกษาพฤติกรรมการตกผลึกและการหลอมเหลวของตัวอย่างด้วย Differential scanning calorimeter (DSC) (DSC 8000, PerkinElmer Co., Norwalk, CT, USA) ตามวิธีการของ AOCS Official Method Cj 1-94 (AOCS, 1997) บรรจุตัวอย่างประมาณ 3–5 มิลลิกรัมลงใน DSC aluminum pan (ความจุ 30 ไมโครลิตร) และปิดผนึกอย่างแน่นหนา ตัวอย่างจะถูกให้ความร้อนตั้งแต่ 20 ถึง 80°C ที่อัตรา 30°C/นาที และคงไว้ที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นจึงลดอุณหภูมิลงจนถึง -60°C ที่อัตรา 10°C/นาที และคงไว้ที่ -60°C เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นตัวอย่างจะถูกให้ความร้อนไปจนถึงอุณหภูมิ 80°C ที่อัตรา 5°C/นาที เทอร์โมแกรมของการตกผลึกและการหลอมเหลวจะถูกสร้างขึ้นในระหว่างการทำให้เย็นลงและให้ความร้อนตามลำดับ ซึ่งจะถูกวิเคราะห์โดยซอฟต์แวร์ที่มาพร้อมกับเครื่อง DSC (Pyris software, Perkin-Elmer, Shelton, CT, USA)

*การศึกษาลักษณะปรากฏผลึก*

ศึกษาลักษณะปรากฏผลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบ polarized light microscopy (PLM) (Carl Zeiss Microscopy GmbH, Jena, Germany) ที่ติดตั้งพร้อมกล้องถ่ายภาพดิจิตอล Canon (Canon EOS 700D, Canon Inc., Taipei, Taiwan) ตัวอย่างไขมันจะถูกนำไปหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นใช้ไมโครปิเปตดูดตัวอย่างไขมันเหลวปริมาตร 15 ไมโครลิตร ลงบนกระจกสไลด์และปิดด้วย cover slip นำตัวอย่างไปเก็บที่ตู้ควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 22°C เป็นเวลา 24 hr ทำการส่องดูผลึกด้วยกำลังขยายของเลนส์ใกล้วัตถุเท่ากับ 20 เท่า ร่วมกับถ่ายภาพผลึกและนำมาวัดขนาดผลึกด้วยโปรแกรม Image J version 1.52a

*การศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึก*

ศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกของ CBE และ CB ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer, XRD) (Hecus S3-MICROcaliX, Hecus X-ray System GmbH, Graz, Austria) ตัวอย่างจะถูกนำไปหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 10 นาที และนำไปบรรจุในหลอดควอตซ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 1.0 มิลลิเมตร (1.0 mm O.D. quartz capillaries) (Charles Supper Company, Inc., Natick, MA, USA) โดยใช้เข็มและไซริงค์ (20 ไมโครลิตร) จากนั้นนำไปบ่มโดยเก็บที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 2 hr ตามด้วย 24°C เป็นเวลา 48 hr และ 4°C เป็นเวลา 2 hr แล้วทำการวัดค่าโดยใช้การสแกนแบบมุมกว้าง (wide angle X-ray scattering, WAXS) จาก 15° 2$\theta$ ถึง 35° 2$\theta$ สแกนด้วยความเร็ว ~20° 2$\theta$/นาที และความกว้างของการสแกนเป็น 0.01° 2$\theta$

*การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ*

ทุกการทดลองได้ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างทั้งหมด 3 ซ้ำ และนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วย Analysis of Variance with Least Significant Difference (ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วย Duncan ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$)

**ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง**

SFC มีผลต่อสมบัติทางกายภาพและเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์เป็นอย่างมาก (Kang et al., 2013) การเปลี่ยนแปลงของค่า SFC ตามอุณหภูมิของ KB, CB และไขมันผสม KB/CB แสดงดัง Fig. 1 SFC ของไขมันทุกตัวอย่างมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ที่อุณหภูมิ 15–25°C ค่า SFC ของ CB อยู่ที่ 64–79% ที่อุณหภูมิสูงกว่า 25°C ค่า SFC ของ CB ลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากมีการหลอมเหลวเกิดขึ้น และหลอมเหลวจนหมดที่อุณหภูมิ 35°C เนื่องจาก KB มีปริมาณ SOS (55.21%) ที่สูง ทำให้ KB มีค่า SFC สูง (> 70%) ที่อุณหภูมิ 20–25 °C และค่อย ๆ ลดลงที่อุณหภูมิสูงกว่า 30°C เส้นกราฟของ KB ในงานวิจัยนี้มีความใกล้เคียงกับของ KB ที่ได้รายงานไว้โดย Bebarta et al. (2013) SFC ของไขมันผสม KB/CB มีค่าสูงกว่า CB ที่อุณหภูมิสูงกว่า 25°C เมื่อปริมาณ KB ในสัดส่วนไขมันผสมลดลง ส่งผลให้ SFC ที่วัดในทุกอุณหภูมิมีค่าลดลง เนื่องจากมีการลดลงของ TAG ที่มีจุดหลอมเหลวสูง (SOS) ในไขมันผสมจาก 55.21% เป็น 23.39% ในไขมันผสมที่มี KB 10%

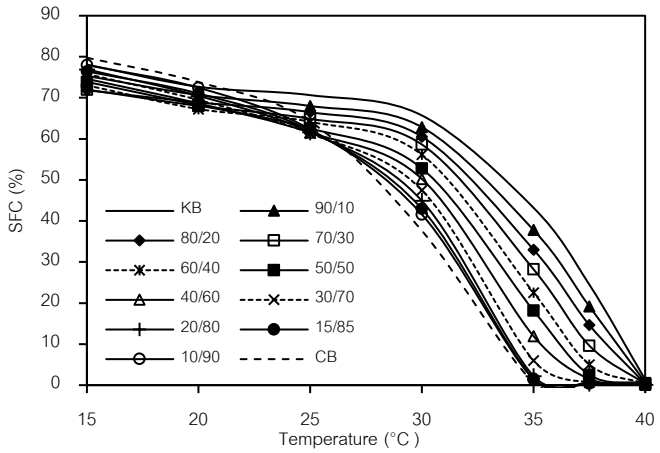



**Fig. 1** Solid fat content measured at 15–40°C of KB, CB, and the KB/CB blends with different ratios (%wt)

เทอร์โมแกรมของการตกผลึกและการหลอมเหลวของ KB, CB และไขมันผสม KB/CB แสดงดัง Table 1 และ Fig. 2 CB เริ่มตกผลึกที่อุณหภูมิ 15.6°C (crystallization onset temperature, $T_{co}$) และแสดงพีคการตกผลึกหลัก 1 พีคที่อุณหภูมิ 10.4 °C (peak I, Fig. 2A) KB เริ่มตกผลึกที่อุณหภูมิสูงสุด (22.6°C) เนื่องจากมีปริมาณ SOS อยู่มาก และแสดงพีคการตกผลึกหลักที่อุณหภูมิ 14°C (peak I) ไขมันผสม KB/CB แสดงพีคการตกผลึก 1 พีคเช่นเดียวกับ CB และ KB เมื่อปริมาณ KB ในไขมันผสมลดลงจาก 90% จนถึง 10% อุณหภูมิของพีคการตกผลึกลดลงจาก 13.9°C ไป 11.0°C ($p < 0.05$) มีเพียงไขมันผสมที่มี KB 10% ที่แสดง $T_{co}$ ที่คล้ายกับ CB ($p > 0.05$) และไขมันผสมที่มี KB 10%–20% แสดงอุณหภูมิของพีคการตกผลึกที่ใกล้เคียงกับ CB ($p < 0.05$)

เทอร์โมแกรมการหลอมเหลวของ CB มี 1 พีคที่อุณหภูมิ 19.5°C (peak II) ซึ่งมีไหล่พีคอยู่ทางด้านอุณหภูมิที่ต่ำกว่า (Fig. 2B) KB แสดงพีคการดูดความร้อนที่อุณหภูมิ 22.7°C (peak II) และมีไหล่พีคอยู่ทางด้านอุณหภูมิที่ต่ำกว่าตามด้วยพีคการคายความร้อน (ลูกศร A) บ่งชี้ให้เห็นว่ามีผลึกเกิดขึ้นบางส่วนในระหว่างการหลอมเหลวและเกิดการตกผลึกไปในโครงสร้างที่เสถียรมากขึ้น (Calligaris et al., 2008) หลังจากนั้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นต่อไป KB แสดงพีคการดูดความร้อนที่อุณหภูมิ 30.6°C (peak III) และละลายจนหมดที่อุณหภูมิ 33.3°C เมื่อปริมาณ KB ในไขมันผสมลดลงจาก 40% จนถึง 10% พฤติกรรมการหลอมเหลวแสดงพีคการหลอมเหลว 1 พีค และไขมันผสมที่มี KB 10%–15% แสดงอุณหภูมิการหลอมเหลวเหมือนกับ CB ($p > 0.05$)

**Table 1** DSC crystallization and melting parameters of KB, CB, and KB/CB blends with different ratios (%wt)

| Sample | Crystallization | | | Melting | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $T_{co}$ (°C) | $T_{p(I)}$ (°C) | $\Delta H_c$ (J/g) | $T_{p(II)}$ (°C) | $T_{p(III)}$ (°C) | $T_{mc}$ (°C) | $\Delta H_m$ (J/g) |
| KB | 22.6±0.6$^{a}$ | 14.0±0.0$^{a}$ | 99.1±0.4$^{b}$ | 22.7±0.1$^{a}$ | 30.6±0.0$^{a}$ | 33.3±0.1$^{a}$ | 120.1±3.0$^{a}$ |
| 90/10 | 21.6±0.1$^{b}$ | 13.9±0.0$^{b}$ | 98.1±0.9$^{bc}$ | 21.4±0.0$^{b}$ | 30.6±0.0$^{a}$ | 33.3±0.0$^{a}$ | 111.7±2.1$^{b}$ |
| 80/20 | 20.7±0.7$^{bc}$ | 13.4±0.0$^{c}$ | 98.6±0.5$^{bc}$ | 21.3±0.2$^{b}$ | 29.9±0.0$^{b}$ | 32.9±0.2$^{ab}$ | 105.1±1.3$^{cd}$ |
| 70/30 | 20.2±0.9$^{c}$ | 13.5±0.0$^{c}$ | 99.0±0.1$^{b}$ | 21.4±0.0$^{b}$ | 28.8±0.1$^{c}$ | 32.3±0.1$^{b}$ | 105.1±0.4$^{cd}$ |
| 60/40 | 20.5±0.6$^{c}$ | 12.7±0.0$^{d}$ | 97.3±0.5$^{c}$ | 20.7±0.1$^{c}$ | 27.8±0.1$^{d}$ | 30.2±0.2$^{c}$ | 105.5±0.8$^{c}$ |
| 50/50 | 20.4±0.7$^{c}$ | 12.6±0.1$^{e}$ | 97.2±1.8$^{c}$ | 20.5±0.1$^{d}$ | 25.8±0.4$^{e}$ | 30.8±0.6$^{c}$ | 103.3±3.7$^{cd}$ |
| 40/60 | 18.5±0.3$^{d}$ | 12.3±0.0$^{f}$ | 95.6±0.3$^{d}$ | 20.3±0.0$^{e}$ | | 29.2±1.0$^{d}$ | 103.6±0.5$^{cd}$ |
| 30/70 | 17.0±0.3$^{ef}$ | 11.9±0.0$^{g}$ | 101.9±0.1$^{a}$ | 20.2±0.0$^{e}$ | | 28.4±0.1d$^{e}$ | 103.9±1.0$^{cd}$ |
| 20/80 | 17.1±0.1$^{ef}$ | 11.3±0.0$^{h}$ | 101.5±0.2$^{a}$ | 19.8±0.0$^{f}$ | | 28.4±0.1d$^{e}$ | 103.8±0.9$^{cd}$ |
| 15/85 | 17.5±0.0$^{de}$ | 11.1±0.0$^{i}$ | 101.7±0.2$^{a}$ | 19.5±0.1$^{g}$ | | 28.1±0.7$^{e}$ | 101.2±3.5$^{cd}$ |
| 10/90 | 16.2±0.0$^{fg}$ | 11.0±0.0$^{j}$ | 101.0±0.2$^{a}$ | 19.5±0.0$^{g}$ | | 27.0±0.3$^{f}$ | 100.5±0.4$^{d}$ |
| CB | 15.6±0.1$^{g}$ | 10.4±0.0$^{k}$ | 101.7±0.7$^{a}$ | 19.5±0.0$^{g}$ | | 26.7±0.2$^{f}$ | 96.2±0.7$^{e}$ |

$T_{co}$ is the crystallization onset temperature, $T_p$ is the crystallization or melting peak temperature, $T_{mc}$ is the melting completion temperature, $\Delta H$ is the enthalpy of crystallization or melting. Values with different letters in the same column are significantly different ($p < 0.05$). I-III indicate the locations of the crystallization and melting peaks in Fig. 2.

ภาพถ่ายผลึกของ KB, CB และไขมันผสม KB/CB แสดงดัง Fig. 3 ผลึกของ CB มีลักษณะเป็นทรงกลม (spherulites) (33±1 μm) ที่ประกอบจากผลึกรูปเข็ม (needle-like) แผ่ออกมาจากจุดศูนย์กลาง โครงสร้างผลึกของ KB เป็นทรงกลมขนาดเล็ก (32±4 μm) เมื่อปริมาณ CB ในไขมันผสมเพิ่มขึ้น ไขมันผสมที่มี KB 70%–90% แสดงผลึกทรงกลมบริเวณพื้นหลังผสมกับมีผลึกทรงกลมขนาดใหญ่ที่มีความสว่างมากกว่าจำนวนหนึ่ง ไขมันผสมที่มี KB 40%–60% แสดงผลึกแบบเม็ดละเอียด (fine granular) บริเวณพื้นหลังผสมกับผลึกทรงกลมขนาดใหญ่ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความแตกต่างของ TAG และความไม่เข้ากันของไขมันผสม ทำให้เกิด phase separation ในขณะที่ไขมันผสมที่มี KB 10%–30% แสดงลักษณะผลึกที่คล้ายกับ CB โดยไขมันผสมที่มี KB 10%–15% แสดงลักษณะผลึกที่คล้ายกับของ CB มากที่สุด

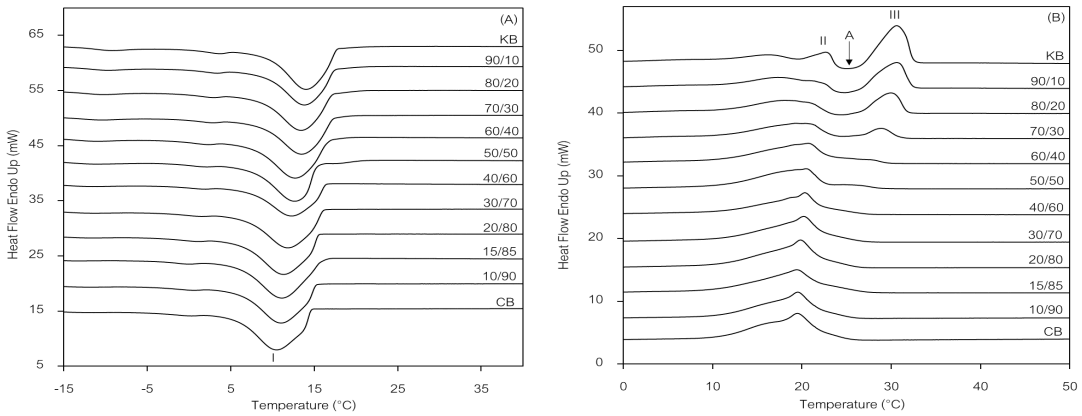



**Fig. 2** DSC crystallization thermogram (A); DSC melting thermogram of KB, CB, and KB/CB blends with different ratios (%wt)

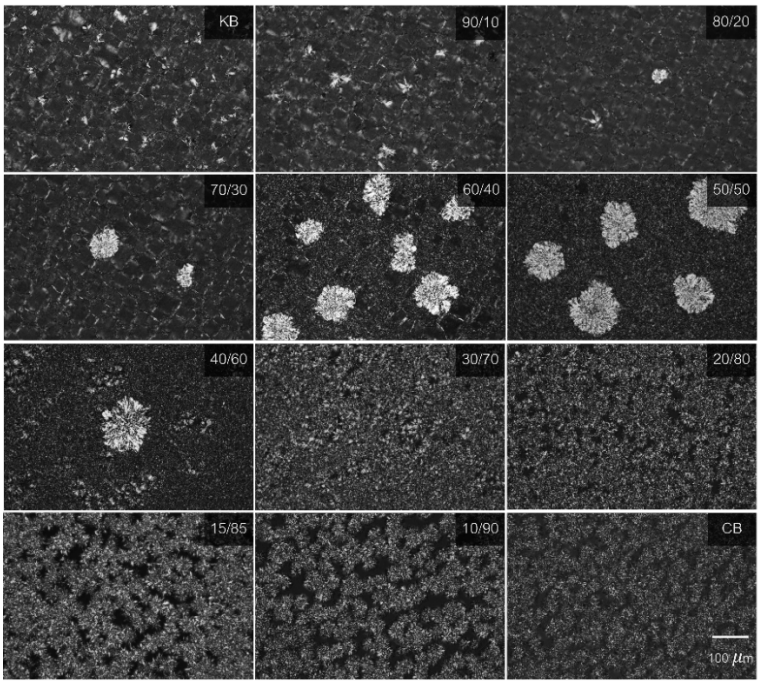



**Fig. 3** Crystal microstructure of KB, CB, and the KB/CB blends with different ratios (%wt)

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าไขมันผสม KB/CB ที่อัตราส่วน 10/90 และ 15/85 แสดง SFC ตามอุณหภูมิและพฤติกรรมการตกผลึกและการหลอมเหลวที่คล้ายกับ CB บ่งบอกได้ว่าการเติม KB ในปริมาณน้อยกว่า 15% ลงใน CB ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติด้านต่าง ๆ และพฤติกรรมการตกผลึกของ CB ดังนั้น เพื่อที่จะศึกษาการใช้ KB เป็น CBE ในปริมาณสูงสุดที่อนุญาตให้ใช้ในช็อคโกแลตตามกฎหมายข้อบังคับด้านช็อคโกแลตของสหภาพยุโรป (European Union Chocolate Directive (2000/36/EC)) การศึกษาโครงสร้างผลึกจึงศึกษาเฉพาะไขมันผสมในอัตราส่วน 15/85 โดยรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของไขมันผสม KB/CB (15/85) และ CB แสดงดัง Fig. 4 CB แสดงพีคการเลี้ยวเบนที่เด่นสุดที่ 4.60 Å และพีคการเลี้ยวเบนที่เด่นชัดปานกลางอีก 4 พีคที่ 3.98, 3.87, 3.75 และ 3.67 Å ซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างผลึกแบบที่ V ($\beta_2$) ไขมันผสม KB/CB แสดงพีคการเลี้ยวเบนที่เด่นชัดมากที่ 4.60 Å และพีคการเลี้ยวเบนที่เด่นชัดปานกลางอีก 4 พีคคล้ายกับของ CB แสดงให้เห็นว่าไขมันผสมนี้ตกผลึกในโครงสร้าง $\beta_2$ เหมือนกัน และชี้ให้เห็นว่า

การเติม KB ในปริมาณ 15% ลงใน CB ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของ CB ดังนั้น KB จึงเหมาะที่จะนำมาใช้เป็น CBE

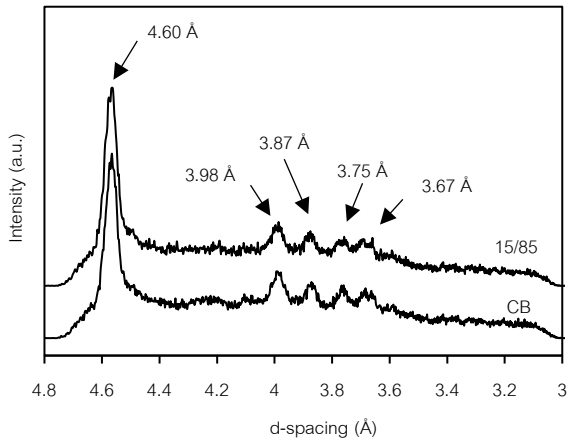



**Fig. 4** X-ray diffraction patterns in WAXS of KB/CB (15/85) blend and CB

## สรุป

การผสมของ KB ในปริมาณไม่เกิน 15% (โดยน้ำหนัก) ลงใน CB ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการตกผลึกของ CB อย่างมีนัยสำคัญ และไขมันผสม KB/CB ที่อัตราส่วน 15/85 แสดงโครงสร้างผลึกที่เหมือนกับ CB บ่งชี้ได้ว่า KB สามารถนำมาใช้เป็น CBE ได้ในปริมาณไม่เกิน 15% (โดยน้ำหนัก)

## เอกสารอ้างอิง

AOCS. 1997. Official Methods and Recommended Practices of the American Oil Chemists' Society, 6th ed. American Oil Chemists' Society. Champaign, IL, USA.

AOCS. 2017. Official Methods and Recommended Practices of the American Oil Chemists' Society, 7th ed. American Oil Chemists' Society. Champaign, IL, USA.

Bahari, A., Akoh, C.C. 2018. Texture, rheology and fat bloom study of 'chocolates' made from cocoa butter equivalent synthesized from illipe butter and palm mid-fraction. LWT. 97: 349–354. doi.org/10.1016/j.lwt.2018.07.013

Bebarta, B., Jhansi, M., Kotasthane, P., Sunkireddy, Y.R. 2013. Medium chain and behenic acid incorporated structured lipids from sal, mango and kokum fats by lipase acidolysis. Food Chem. 136: 889–894. doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.08.051

Beckett, S.T. 2008. The Science of Chocolate, 2nd ed. The Royal Society of Chemistry. RSC Publishing. Cambridge, UK.

Bootello, M.A., Hartel, R.W., Garcés, R., Martínez-Force, E., Salas, J.J. 2012. Evaluation of high oleic-high stearic sunflower hard stearins for cocoa butter equivalent formulation. Food Chem. 134: 1409–1417. doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.03.040

Calligaris, S., Arrighetti, G., Barba, L., Nicoli, M.C. 2008. Phase transition of sunflower oil as affected by the oxidation level. J. Am. Oil Chem. Soc. 85: 591–598. doi.org/10.1007/s11746-008-1241-y

Jahurul, M.H.A., Norazlina, M.R., Azzatul, F.S., et al. 2020. Hard fats improve the physicochemical and thermal properties of seed fats for applications in confectionery products. Food Rev. Int. 36: 601–625. doi.org/10.1080/87559129.2019.1657443

Jahurul, M.H.A., Zaidul, I.S.M., Norulaini, N.A.N., Sahena, F., Jinap, S., Azmir, J., Sharif, K.M., Omar, A.K.M. 2013. Cocoa butter fats and possibilities of substitution in food products concerning cocoa varieties, alternative sources, extraction methods, composition, and characteristics. J. Food Eng. 117: 467–476. doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.09.024

Jeyarani, T., Reddy, S.Y. 2010. Effect of enzymatic interesterification on physicochemical properties of mahua oil and kokum fat blend. Food Chem. 123: 249–253. doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.04.019

Kang, K.K., Jeon, H., Kim, I.-H., Kim, B.H. 2013. Cocoa butter equivalents prepared by blending fractionated palm stearin and shea stearin. Food Sci. Biotechnol. 22: 347–352. doi.org/10.1007/s10068-013-0087-8

Nagavekar, N., Kumar, A., Dubey, K., Singhal, R.S. 2019. Supercritical carbon dioxide extraction of kokum fat from *Garcinia indica* kernels and its application as a gelator in oleogels with oils. Ind. Crops. Prod. 138: 111459. doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.06.022

Sonwai, S., Kaphueakngam, P., Flood, A. 2014. Blending of mango kernel fat and palm oil mid-fraction to obtain cocoa butter equivalent. J. Food Sci. Technol. 51: 2357–2369. doi.org/10.1007/s13197-012-0808-7

Talbot, G. 2009. Vegetable fats. In: Beckett, S.T. (Ed.). Industrial Chocolate Manufacture. John Wiley & Sons. UK, 415–433.

Vidhate, G.S., Singhal, R.S. 2013. Extraction of cocoa butter alternative from kokum (*Garcinia indica*) kernel by three phase partitioning. J. Food Eng. 117: 464–466. doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.10.051

Yamoneka, J., Malumba, P., Lognay, G., Béra, F., Blecker, C., Danthine, S. 2018. Enzymatic inter-esterification of binary blends containing *Irvingia gabonensis* seed fat to produce cocoa butter substitute. Eur. J. Lipid Sci. Technol. 120: 1700423. doi.org/10.1002/ejlt.201700423

# Extraction of Thai vanilla pods assisted by high pressure processing for application in peanut milk

Issariya Promjan, Wannasawat Ratphitagsanti*, Withida Chantrapornchai

Department of Product Development, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: wannasawat.r@ku.th

**Abstract**

High pressure processing (HPP) is employed to extract vanillin (4-hydroxy-3-methoxybenzaldehyde) from under-graded Thai vanilla pods. Shaking water bath and maceration (conventional methods; CE) were compared with HPP in term of energy usage and extraction efficiency. This research was carried out to investigate HPP assisted extraction of vanillin and its application in peanut milk. Small pieces of Thai vanilla pods were submerged in 35% ethanol before subjected to various HPP conditions (200–600 MPa for 10–30 min). Vanillin content, antioxidant activities, total phenolic content, extraction efficiency and color were determined. Peanut milk was formulated based on a 2×2 factorial design in CRD to examine raw materials (raw and roast peanut) and sugar levels (2.5 and 4.5%). Results showed that CE by shaking water bath at 55°C for 9 hr provided the highest vanillin content (41.68±2.50 mg/g). HPP (600 MPa for 30 min) could extract 25.31±1.13 mg/g at extraction efficiency (33.75±1.52 mg/kW×hr). Vanillin contents were correlated to antioxidant activities and total phenolic contents. Roasted peanut was preferred with high overall liking score but 2.5 and 4.5% of sugar addition were not significantly different ($p > 0.05$). HPP assisted extraction required low energy consumption and reduced time for high efficiency of vanilla extraction.

**Keywords**: Nonthermal processing, Plant-based milk, *Vanilla planifolia*

## Introduction

Peanut milk is derived from the peanut kernel. It is considered as a plant-based or dairy-free product, making it suitable for people on a plant-based diet or those allergic to lactose in cow's milk. Beany flavor in plant-based milk is considered undesirable or off flavor to consumers. Therefore, flavoring agents, such as chocolate, vanilla, strawberry, and cocoa, are used to help reduce this off flavor (Diarra et al., 2005).

Vanilla (*Vanilla planifolia* Andrews) is cultivated in countries around the world, such as Mexico, Tahiti, India, Indonesia, Madagascar, and even Thailand, where vanilla cultivation has become an economic herb. The part used to impart the vanilla flavor is the pod. Vanilla pods are harvested and cured until they develop their unique flavor (McCormick, 2018). Vanilla is commonly used to enhance flavor in food, beverages, and confectionary. It possesses antimicrobial properties that may inhibit the growth of *Escherichia coli* and *Lactobacillus plantarum* (Baqueiro-Peña and Guerrero-Beltrán, 2017). Additionally, it has anti-inflammatory properties and prevention of cancer cell growth. Main chemical of vanilla that provides its unique flavor and taste is vanillin (4-hydroxy-3-methoxybenzaldehyde), which is present in cured vanilla pods, constituting 1-3% of the pod's dry weight. Other important substances are vanillic acid, p-hydroxybenzaldehyde, and p-hydroxybenzoic acid (Guzman and Zara, 2006; Baqueiro-Peña and Guerrero-Beltrán, 2017). Traditionally, vanilla pods are extracted using ethanol solvent due to its convenience and long-term storage capability. Vanilla can also be synthesized from corn sugar (glucose), pine wood (coniferyl alcohol lignin), and by-products of petroleum processing (guaiacol) (Rasoamandrary et al., 2013).

Extraction is a process that separates desired compounds from plant tissue. Several factors influence the efficiency of extraction, such as extraction method, type of solvent, temperature, time, and pressure. Extraction methods are divided into conventional and novel extraction. Conventional extraction such as maceration, soxlet and solvent extraction requires high energy and long extraction time. Meanwhile, low energy and short extraction time is typically obtained by novel extraction (e.g., microwave extraction, ultrasonic extraction, high-pressure extraction) (Jha and Sit, 2022). High-pressure assisted extraction relies predominantly on the mechanical impact of a rapid pressure change. This process enhances both the penetration of the solvent into the plant materials and the release of intracellular products by disrupting the cell walls (Chen et al., 2009).

## Materials and Methods

### *Preparation of Thai vanilla pods*

Vanilla pods were harvested in 2021 (Mae Fah Luang Foundation, Chiang Rai, Thailand) and under-graded pods were used to extract vanillin. The pods were cut into 0.25±0.05 cm in length (Rasoamandrary et al., 2013).

*Conventional extraction by shaking water bath and maceration*

Vanilla (10 g) were soaked in 100 mL of 35% ethyl alcohol using shaking water bath (model WNB 29, Memmert, Memmert GmbH&Co. KG, Germany) at 25 and 55°C for 3–15 hr and maceration at room temperature (32±2°C) for 3–24 hr, filtered through Whatman no.1 filter paper and evaporated by rotary evaporator (model R-300, Buchi, BÜCHI Labortechnik AG, Switzerland). The crude extracts were kept in amber bottles and refrigerated at 3-5°C.

*High-pressure assisted extraction*

Vanilla (10 g) were soaked in 100 mL of 35% ethyl alcohol in PET bottle using high pressure processing equipment (model HPP600MPa/5L, Bao Tou KeFA High Pressure Technology Co., Ltd., China) at 200–600 MPa and room temperature for 10–30 min, filtered through Whatman no.1 filter paper and evaporated by rotary evaporator. The crude extracts were kept in amber bottles and refrigerated at 3–5°C.

*Determination of vanillin contents*

Vanillin contents were analyzed by the method of AOAC (2012). The volume of crude extract (10 mL) was adjusted to 100 mL with distilled water. Then, 2 mL of diluted sample was mixed with 2 mL of 0.1 N sodium hydroxide (NaOH) and adjusted the volume to 100 mL. The blank sample was prepared by 2 mL of 0.1 N NaOH and volumetrically added distilled water to 100 mL. The absorbance was measured at 348 nm using UV-visible spectrophotometer (model UV-1900, Shimadzu, Shimadzu Corporation, Japan). Vanillin contents were determined using standard vanillin calibration curve as mg/g.

*Determination of antioxidant activities and total phenolic content*

$DPPH^{\bullet}$ (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl) radical scavenging activity was determined by the modified method of Maduwanthi and Marapana (2021). DPPH (Alfa Aesar, United Kingdom) of 0.0028 g was mixed with 100 mL of ethyl alcohol. The crude extract (1,850 µL) was then mixed with 150 µL of DPPH reagent. The absorbance was measured at 517 nm using UV-visible spectrophotometer after incubating in dark for 30 min at room temperature. The scavenging activity was determined using standard Trolox calibration curve as mg Trolox/g sample.

$ABTS^{\bullet+}$ (2,2'-azino-bis (3-ethylbenzthiazoline-6-sulphonic acid)) radical scavenging assay was determined by the modified method of Dudonne et al. (2009). ABTS reagent was prepared by mixing 0.7 mM ABTS (Sigma-Aldrich, Germany) with 2.45 mM potassium persulfate at a ratio of 1:0.5 and kept in dark for 12–16 hr at room temperature. The reagent was diluted with ethanol until the absorbance (0.700±0.02) at 734 nm was obtained. The crude extract (100 µL) was mixed with 10 mL ABTS reagent. The absorbance was measured at 734 nm using UV-visible spectrophotometer after incubating in dark for 6 min at room temperature. Reduction of $ABTS^{\bullet+}$ radicals were determined using standard Trolox calibration curve as mg Trolox/g sample.

FRAP assay was determined by the method of Kubola and Siriamornpun (2008). FRAP reagent was prepared by mixing 10 mL of 10 mM TPTZ (2,4,6-tris(2-pyridyl)-S-triazine), 100 mL of 300 mM acetate buffer, 10 mL of 20 mM ferric chloride and 12 mL of distilled water. Then, 1.8 mL FRAP reagent and 180 µL distilled water was mixed with the crude extract (60 µL). The absorbance was measured at 593 nm after reaction mixture was incubated in dark at 37°C for 4 min. The FRAP values were determined using standard Trolox calibration curve as mg Trolox/g sample.

Total phenolic content of crude vanilla extract was determined using Folin-Ciocalteu methods (Gong et al., 2012). The crude extract (0.5 mL) was mixed with 2.5 mL of 0.2 M Folin-Ciocalteu reagent and 2 mL of sodium carbonate (Ajax Finechem Co. Ltd, Australia). The absorbance was measured at 754 nm using UV-visible spectrophotometer after incubating in dark for 2 hr at room temperature. Total phenolic contents were determined using standard calibration curve as mg gallic acid equivalent (GAE)/g sample.

*Extraction efficiency of Thai vanilla extract*

Extraction efficiency was calculated as described by Piyapanrungrueang et al. (2016). Equation 1 and Equation 2 was used to determine energy consumed and extraction efficiency of each extraction method, respectively.

$$\text{Energy per gram (kW} \times \text{hr)} = \text{Power} \times \text{Time} \quad (1)$$

$$\text{Extraction efficiency } \left(\frac{\text{mg}}{\text{kW} \times \text{hr}}\right) = \frac{\text{Vanillin } \left(\frac{\text{mg}}{\text{g}}\right)}{\text{Energy } \left(\frac{\text{kW} \times \text{hr}}{\text{g}}\right)} \times 100 \quad (2)$$

*Preparation of peanut milk*

Peanut milk was prepared with either raw or roasted peanut. Roasting condition was employed at 170°C for 20 min. Initially, 100 g of raw or roasted peanuts were soaked in water for 6–8 hr. After draining, peanuts were washed several times. Seed coat was removed before blending the peanuts with 750 mL of drinking water using a blender (Electrolux, E7TB1-84SM, Sweden). Peanut milk was filtered with cheesecloth, then formulated with 0.8 g (0.11%) of salt and 18.75 g (2.5%) or 33.75 g (4.5%) of sugar. It was heated for 20 min at boiling temperature. Peanut milk was stored in a refrigerator at 3–5°C.

*Quality measurement of peanut milk*

Peanut milk prepared with raw or roasted beans was evaluated for pH, total soluble solids (TSS), viscosity and color. Protein content was determined following AOAC (2012). pH was measured using pH meter (model C1010PK, Consort, Cleaver Scientific, United Kingdom). TSS was recorded using refractometer (model Pal-α, Atago, Atago Co., Ltd., Japan) and viscosity was analyzed using viscometer (AMETEK Brookfield, Brookfield DV III, Brookfield Corporation, USA) by UL adapter with rotation speed at 100 rpm.

*Sensory evaluation of peanut milk*

Peanut milk was served to 40 untrained panelists at age of 18 years or over who were not allergic to nuts and consumed plant-based milk. Sensory analysis was carried out on these attributes (color, homogeneity, viscosity, beany flavor, sweetness and overall liking) using 9-point hedonic scale.

*Statistical analyses*

Data was analyzed using analysis of variance and Duncan's multiple range test (DMRT) at a significant level of $p < 0.05$ with IBM SPSS Statistics version 28 software (Thaisoftup Co. Ltd., Thailand). All experiments were carried out in triplication. Results were reported as mean ± standard deviation.

**Results and Discussion**

*Effect of conventional and high pressure assisted extraction on vanillin content*

Vanillin was described as the major volatile compound of vanilla. Regardless of extraction time, crude vanilla extract by shaking water bath possessed higher amount of vanillin than those obtained from maceration. The highest vanillin content was reached at 41.68±2.50 mg/g after 9 hr of extraction (Table 1), then decreasing with further extraction times. Pan et al. (2012) also found that increased extraction time resulted in an increase in flavonoid compounds from hawthorn seeds, which later decreased with extended time. On the other hand, maceration provided vanillin content ranging from 18.53±1.21 to 22.31±1.10 mg/g. High amount of vanillin content was obtained by shaking water bath because agitation could enhance solvent permeability which increased rate of mass transfer. In addition, increasing extraction temperature also enhanced solubility of the solvent (Wu et al., 2001).

The vanillin content ranged from 14.78±0.71 to 25.31±1.13 mg/g (Table 2). Pressure at 600 MPa for 30 min resulted in the highest vanillin content (25.31±1.13 mg/g). Increasing pressure levels prominently increased vanillin content, while pressure-holding times did not affect vanillin content at low pressure level (200 MPa). HPP-assisted extraction of corilagin content from longan pericarp found that increasing pressures from 200 to 500 MPa ranged from 5.9 to 9.62 mg/g (Prasad et al., 2009). Instant pressure transfer occurred on the plant material, which could facilitate mass transfer and enhance solvent permeability, leading to the disruption of plant's cell wall and the release of bioactive compounds (Prasad et al., 2009)

**Table 1** Vanillin content of conventional treated vanilla extract by shaking water bath (55°C) and maceration (room temperature)

| Extraction time (hr) | Vanillin content (mg/g) | |
|---|---|---|
| | Shaking water bath | Maceration |
| 3 | 31.55±0.23$^{c}$ | 20.64±1.57$^{abc}$ |
| 6 | 34.09±1.40$^{bc}$ | 22.31±1.10$^{a}$ |
| 9 | 41.68±2.50$^{a}$ | 19.40±1.81$^{bc}$ |
| 12 | 33.03±1.16$^{c}$ | 18.53±1.21$^{c}$ |
| 15 | 36.90±2.27$^{b}$ | - |
| 18 | - | 20.30±0.98$^{abc}$ |
| 24 | - | 21.38±1.98$^{ab}$ |

$^{a-c}$ Different letters in the same column indicated that the samples were statistically different ($p < 0.05$).

**Table 2** Vanillin content of HPP treated vanilla extract at 200 and 600 MPa for 10, 20, and 30 min

| Pressure (MPa) | Pressure-holding time (min) | Vanillin content (mg/g) |
|---|---|---|
| 200 | 10 | 15.41±0.79$^{c}$ |
| | 20 | 14.48±0.71$^{c}$ |
| | 30 | 15.04±0.35$^{c}$ |
| 600 | 10 | 19.95±1.43$^{b}$ |
| | 20 | 20.58±2.18$^{b}$ |
| | 30 | 25.31±1.13$^{a}$ |

$^{a-c}$ Different letters in the same column indicated that the samples were statistically different ($p < 0.05$).

*Comparison of different extraction methods and determination of extraction efficiency*

The vanilla crude extract by conventional methods was compared with HPP. Antioxidant activities (based on DPPH$^{\bullet}$, ABTS$^{\bullet+}$ and FRAP assays) obtained from shaking water bath were 29.48±0.09, 14.77±0.47 and 43.54±0.32 mg Trolox/g, respectively (Table 3). Total phenolic content was 40.55±1.79 mg GAE/g which was the highest following by HPP-assisted extraction (26.98±2.13 mg GAE/g) and maceration (23.68±1.92 mg GAE/g). Vanillin content was correlated to antioxidant activities and total phenolic contents because vanillin is a phenolic substance with antioxidation in plasma (Tai et al., 2011; Zhao et al., 2017). Antioxidant activities and total phenolic contents of vanilla extracts from maceration and HPP were insignificantly different ($p > 0.05$).

**Table 3** Antioxidant activities and total phenolic content of vanilla extract treated by conventional and HPP extraction methods

| Extraction method | Time (hr) | DPPH$^{\bullet}$ | ABTS$^{\bullet+}$ | FRAP | Total phenolic content |
|---|---|---|---|---|---|
| | | (mg Trolox/g) | | | (mg GAE/g) |
| Shaking water bath (55°C) | 9 | 29.48±0.09$^{a}$ | 14.77±0.47$^{a}$ | 43.54±0.32$^{a}$ | 40.55±1.79$^{a}$ |
| Maceration (room temperature) | 6 | 17.21±1.41$^{b}$ | 10.85±0.65$^{b}$ | 28.15±0.44$^{b}$ | 23.68±1.92$^{b}$ |
| HPP (600 MPa) | 0.5 | 17.99±0.10$^{b}$ | 11.98±0.70$^{b}$ | 29.37±0.42$^{b}$ | 26.98±2.13$^{b}$ |

$^{a-b}$ Different letters in the same column indicated that the samples were statistically different ($p < 0.05$).

Extraction efficiency was calculated by energy consumption to extract vanillin content from the vanilla pods (Table 4). HPP provided the highest extraction efficiency of 33.75±1.52 mg/kW×hr with the lowest energy used (0.75 kW× hr). Shaking water bath and maceration had comparably low extraction efficiency (1.55±0.05 to 2.51±0.02 mg/kW×hr) and consumed high amount of energy (14.40 to 16.20 kW× hr). Jadhav et al. (2009) investigated the extraction efficiency between conventional method (Soxhlet extraction) and ultrasound assisted extraction (UAE) of vanillin content and found that UAE had higher efficiency, which could release 140 ppm of vanillin in 1 hr. In contrast, Soxhlet extraction released vanillin (180 ppm) in 8 hr.

**Table 4** Extraction efficiency of vanillin by conventional methods and HPP-assisted extraction

| Extraction method | Time (hr) | Power (W) | Energy (kW× hr) | Extraction efficiency (mg/kW×hr) |
|---|---|---|---|---|
| Shaking water bath (55°C) | 6 | 1800 | 16.20 | 2.51±0.02$^{b}$ |
| Maceration (room temperature) | 9 | 2400 | 14.40 | 1.55±0.05$^{b}$ |
| HPP (600 MPa) | 0.5 | 1500 | 0.75 | 33.75±1.52$^{a}$ |

$^{a-b}$ Different letters in the same column indicated that the samples were statistically different ($p < 0.05$).

*Product characteristics and sensory evaluation of peanut milk*

Protein content of different prepared peanut milks was significantly different ($p < 0.05$), while amount of sugar and interaction term (between raw material and amount of sugar) showed no significant difference ($p > 0.05$). For TSS of peanut milk, amount of sugar and interaction term did not significantly affect ($p > 0.05$). Raw peanut milk had higher protein content (3.30±0.09 to 3.42±0.05%) than that of roasted peanut milk (2.85±0.10 to 2.93±0.07%). Roasting could potentially cause a change in protein structure of peanuts, reducing protein solubility (Kopper et al., 2005). Peanut milk prepared from both raw materials had pH values ranging from 6.65 to 6.77. Increasing sugar content in the peanut milk formulation resulted in increasing TSS of the beverages ($p < 0.05$). Peanut milk made of raw peanut had the highest viscosity of 8.81±0.10 mPa•s. Tang et al. (2023) reported that red bean milk consisted of high amylose and protein contents, leading to its elevated viscosity, which contributed to better stability.

**Table 5** Quality characteristics of peanut milk preparing by raw and roasted peanut

| Raw material | Sugar (%) | Protein (%) | pH | TSS (°Brix) | Viscosity (mPa•s) |
|---|---|---|---|---|---|
| Raw peanut | 0 | 3.32±0.10[a] | 6.77 | 2.53±0.06[e] | 8.81±0.10[a] |
| | 2.5 | 3.30±0.09[a] | 6.73 | 5.37±0.06[b] | 6.25±0.34[c] |
| | 4.5 | 3.42±0.05[a] | 6.70 | 7.13±0.06[a] | 7.04±0.13[b] |
| Roasted peanut | 0 | 2.85±0.10[b] | 6.65 | 2.77±0.06[d] | 4.37±0.10[d] |
| | 2.5 | 2.93±0.07[b] | 6.69 | 5.17±0.06[c] | 4.33±0.08[d] |
| | 4.5 | 2.87±0.10[b] | 6.69 | 7.20±0.10[a] | 4.31±0.16[d] |

[a-d] Different letters in the same column indicated that the samples were statistically different ($p < 0.05$).

Table 6 shows results from sensory evaluation of peanut milk. Liking scores of 2.5% sugar of raw or roasted peanut milk were found significantly different of most attributes ($p < 0.05$), except for beany flavor ($p > 0.05$). Roasted peanut milk (2.5 and 4.5% sugar) showed insignificantly different of liking scores of all attributes ($p > 0.05$), indicating that both formulations could be used for further addition of crude vanilla extract from Thai vanilla pods.

**Table 6** Liking score of peanut milk preparing by raw and roasted peanut using 9-point hedonic scale

| Peanut | Sugar (%) | Color | Homogeneity | Viscosity | Beany flavor | Sweetness | Overall liking |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Raw | 2.5 | 6.5±1.8[b] | 6.9±1.4[b] | 6.1±1.5[b] | 5.7±1.9[b] | 6.3±1.8[b] | 5.9±1.8[b] |
| | 4.5 | 6.7+1.7[ab] | 7.3±1.0[ab] | 5.9±1.7[b] | 6.1±1.9[b] | 6.6±1.7[ab] | 6.3±1.4[ab] |
| Roasted | 2.5 | 7.2±1.3[a] | 7.5±0.9[a] | 7.4±1.5[a] | 6.4±2.3[ab] | 7.1±1.4[a] | 6.9±1.9[a] |
| | 4.5 | 7.4±1.3[a] | 7.5±1.0[a] | 7.4±1.2[a] | 7.2±1.5[a] | 7.0±1.2[a] | 7.0±1.3[a] |

[a-b] Different letters in the same column indicated that the samples were statistically different ($p < 0.05$).

## Conclusions

Vanilla extract is commonly used in food and beverages in its liquid form, allowing for long-term storage and convenient use. HPP-assisted extraction could enhance the efficiency of extracting flavors from under-graded Thai vanilla pods. Raw peanut was selected for preparation of peanut milk, which the addition of crude vanilla extract would potentially induce sweet sensation.

## Conflict of Interest

The authors declare that there are no conflicts of interest.

**Acknowledgements**

The research funding from Kasetsart University Research and Development Institute (KURDI) was greatly appreciated through *Fundamental Fund* for the fiscal year 2022 under the grant number FF(KU)12.65. In addition, the financial support to Miss Issariya Promjan was kindly acknowledged from Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University.

**References**

AOAC. 2012. Official Methods of Analysis. Association of Official Analytical Chemists, Washington DC, USA.

Baqueiro-Peña, I., Guerrero-Beltrán, J.Á. 2017. Vanilla (*Vanilla planifolia* Andr.), its residues and other industrial by-products for recovering high value flavor molecules: A review. J. Appl. Res. Med. Aromat. Plants 6: 1–9.

Chen, R., Meng, F., Zhang, S., Liu, Z. 2009. Effects of ultrahigh pressure extraction conditions on yields and antioxidant activity of ginsenoside from ginseng. J. Sep. Pur. Technol. 66: 340–346.

Diarra, K., Nong, Z. G., Jie, C. 2005. Peanut milk and peanut milk based products production: A review. Crit. Rev. Food Sci. Nutr. 45: 405–423.

Dudonne, S., Vitrac, X., Coutiere, P., Woillez, M., Mérillon, J.M. 2009. Comparative study of antioxidant properties and total phenolic content of 30 plant extracts of industrial interest using DPPH, ABTS, FRAP, SOD, and ORAC assays. J. Agr. Food Chem. 57: 1768–1774.

Gong, Y., Liu, X., He, W. H., Xu, H.G., Yuan, F., Gao, Y.X. 2012. Investigation into the antioxidant activity and chemical composition of alcoholic extracts from defatted marigold (*Tagetes erecta* L.) residue. Fitoterapia 83: 481–489.

Guzman, C.C., Zara, R.R. 2006. Vanilla. In: Peter, K.V. (Ed.). Handbook of Herbs and Spices, Vol. 2. Woodhead Publishing. Oxford, UK.

Jadhav, D., Rekha, B.N., Gogate, P.R., Rathod, V.K. 2009. Extraction of vanillin from vanilla pods: A comparison study of conventional soxhlet and ultrasound assisted extraction. J. Food Eng. 93: 421–426.

Jha, A.K., Sit, N. 2022. Extraction of bioactive compounds from plant materials using combination of various novel methods: A review. Trends Food Sci. Technol. 119: 579–591.

Kopper, R.A., Odum, N.J., Sen, M., Helm, R.M., Stanley, J.S., Burks, A. 2005. Peanut protein allergens: The effect of roasting on solubility and allergenicity. J. Int. Arch. Allergy Immunol. 136:16–22.

Kubola, J., Siriamornpun, S. 2008. Phenolic contents and antioxidant activities of bitter gourd (*Momordica charantia* L.) leaf, stem and fruit fraction extracts *in vitro*. J. Food Chem. 110: 881–890.

Maduwanthi, S.D.T., Marapana, R. 2021. Total phenolics, flavonoids and antioxidant activity following simulated gastro-intestinal digestion and dialysis of banana (*Musa acuminata* AAB) as affected by induced ripening agents. J. Food Chem. 339: 1–6.

McCormick, D. 2018. Characterisation of vanilla extracts based on sensory properties and chemical composition. Ph.D. thesis, Food Technology, Massey University, Palmerston North, New Zealand.

Pan, G., Yu, G., Zhu, C., Qiao, J. 2012. Optimization of ultrasound-assisted extraction (UAE) of flavonoids compounds (FC) from hawthorn seed (HS). J. Ultrason. Sonochem. 19: 486–490.

Piyapanrungrueang, W., Chantrapornchai, W., Haruthaithanasan, V., Sukatta, U., Aekatasanawan, C. 2016. Comparison of anthocyanin extraction methods from high anthocyanin purple corn cob hybrid: KPSC 901, and quality of the extract powder. J. Food Process. Preserv. 40: 1125–1133.

Prasad, K.N., Yang, B., Zhao, M., Wei, X., Jiang, Y., Chen, F. 2009. High pressure extraction of corilagin from longan (*Dimocarpus longan* Lour.) fruit pericarp. J. Sep. Pur. Technol. 70: 41–45.

Rasoamandrary, N., Fernandes, A.M., Bashari, M., Masamba, K., Xueming, X. 2013. Improved extraction of vanillin 4-hydroxy-3-methoxybenzaldehyde from cured vanilla beans using ultrasound assisted extraction: A comparison of ultrasound- assisted and hot water bath extraction. Akademik Gıda 11: 6–14.

Tai, A., Sawano, T., Yazama, F. 2011. Antioxidant properties of ethyl vanillin *in vitro* and *in vivo*. J. Biosci. Biotechnol. Biochem. 75: 2346–2350.

Tang, J., Cui, L., Zhang, S., Wang, L., Hou, D., Zhou, S. 2023. A novel plant-based milk alternative made from red kidney bean (*Phaseolus vulgaris* L.): Effects of cultivars on its stability and sensory properties. J. Food Biosci. 103362.

Wu, J., Lin, L., Chau, F.T. 2001. Ultrasound-assisted extraction of ginseng saponins from ginseng roots and cultured ginseng cells. J. Ultrason. Sonochem. 8: 347–352.

Zhao, D., Sun, J., Sun, B., Zhao, M., Zheng, F., Huang, M., Sun, X., Li, H. 2017. Intracellular antioxidant effect of vanillin, 4-methylguaiacol and 4-ethylguaiacol: Three components in Chinese Baijiu. J. Rsc. Adv. 7: 46395–46405.

# Modifying solid behaviour of mungbean-adlay mixed flour paste at ambient temperature

**Montree Sreemak, Parichat Hongsprabhas***

Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: parichat.h@ku.th

**Abstract**

This study investigated the potential use of mungbean flour mixed with adlay flour for their use as structuring network holding oil droplets at room temperature. It was found that the mixed flour paste containing 50% (w/v) solid possessed viscoelastic solid behaviour (G' > G") at 35°C. The decrease in protein content lowered the G' values of mixed flour paste ($p < 0.05$). The addition of 4% rice bran stearin (RBS) lowered the modulus at the crossover point significantly ($p < 0.05$). However, alkali-salt treatment to enhance protein solubilities and ionize starch molecules to obtain modified mungbean-adlay composite (MMA) resulted in the composite paste having higher G' and G" values even in the presence of 4% RBS, suggesting that the modification support MMA to form strong solid structure. Adding $CaCl_2$ up to 70 mM further crosslinked the negatively charged proteins and starch molecules and strengthened the solid behaviour of composite paste at 35°C capable of holding oil droplets. Overall, this study shows that the solid behaviour of mixed flour could be modified by the alteration of ionized groups of protein and starch molecules that further interacts via $Ca^{2+}$-crosslinking holding the oil droplets even at 35°C.

**Keywords**: Adlay, Alkali-salt modification, $CaCl_2$, Lipid, Mungbean

## Introduction

Mungbean (*Vigna radiata L.*) is a legume that contains 28% protein (Vindika and Wijesekara, 2021) while adlay, also known as Job's tear or Coix (*Coix lacryma-jobi L.*), is a cereal with similar characteristics to corn (Huang et al., 2016). Dechkunchorn and Thongngam (2016) reported a protein content in adlay as 13.28% and the dominant in the alcohol-soluble fraction prolamin is called coixin. Waxy adlay contained high content of amylopectin of an average molecular weight is $10^7$–$10^8$ g/mol (Ab'lah and Tin, 2020). In contrast, mungbean contains globulins, the salt-soluble proteins, as major proteins and high content of amylose in starch fraction (Israkarn and Hongsprabhas, 2017).

The food matrix is an assembly of chemical and physical interactions of nutrients and non-nutrients, e.g., protein, carbohydrates, lipids, etc., which can be modified to improve various aspects such as texture, flavour, digestibility, etc. (Thomas et al., 2018). Dobson et al. (2023) recently reported the self-supporting matrix produced by protein-starch interaction at low temperature. The hardness and storage modulus for a cold-set thermally inhibited (TI) waxy maize starch and pea protein could be increased when protein was raised. The composite structure of TI-pea protein was more ductile at high protein concentration.

An alkali condition could change the molecular structure of a protein by unfolding, making it easier to entangle and construct the protein network, which could hold liquid or oil droplets in the structure (Wang et al., 2022). This study hypothesized that the solid behaviour of mixed flour composite could be promoted by manipulating the negatively charged groups in protein molecules or ionized groups of starch molecules at ambient temperature before cooking. The insights into the structuring process of mixed flour could help designing the solid matrices holding all the components at low temperature.

## Materials and Methds

### *Materials*

Dehulled mungbean (Raitip, Thanya Farm Co., Ltd., Nonthaburi, Thailand) and dehulled adlay grains were purchased from Marketing Organization for Farmers (MOF) in Bangkok, Thailand. Dehulled mungbean grain was dried milled by a rotor mill (Retsch, Type SR300 rostfrei, New Jersey, USA). The adlay flour was soak in water for overnight and wet-milled by a supermass colloider (Super Masscolloider, MKPB6-2, Masuko Sangyo Co., Ltd., Japan), discarded the water and dried at 60°C for 6 hr in a tray-dryer (Hot air oven, HB-24A, Bangkok, Thailand). Both flours were stored at -18°C before used. Mungbean flour contained 23.22% protein, while adlay flour contained 14.99% protein (AOAC, 2019). Rice bran stearin oil (RBS) from the winterizing step in the refining process was purchased from Surin Bran Oil Co. (Buri Ram, Thailand). The main fatty acids are oleic acid, palmitic acid, and linoleic acid, respectively. The first melting temperature range is -24°C to 5°C and the second period is 15 °C to 38 °C (Latawan and Hongsprabhas, 2021).

*Effect of flour ratio on viscoelastic properties of mixed flour paste*

Ten grams of composite powder composed of mungbean flour (M) mixed with adlay flour (A) at a different ratio of 10:0, 7:3, 4:6, and 2:8 (g/g), designated as mungbean-adlay composite (MA), were mixed with distilled water to obtain 50% (w/v) of MA slurries containing different contents of protein ranging from 8.78 to 11.71% protein (w/v). The MA paste was heated at 60°C for 10 min to hydrate the mixed flours at the temperature below gelatinization temperature of mungbean and adlay starches and denaturation temperatures of mungbean and adlay proteins, cooled down to 27°C and equilibrated for 30 min before amplitude sweep test as described below. The minimum protein content of flour composite would be selected to test if the solid behaviour of mixed flour could hold the lipid fraction.

*Effect of rice bran stearin (RBS) on viscoelastic properties of mixed flour paste*

The RBS was heated at 80°C for 1 min to melt all the solid fraction and immediately mixed with the selected hydrated MA paste (60°C) to obtain 4% fat (w/w) using a vortex mixer, cooled down to 27°C and equilibrated for 30 min to partially solidify lipid fraction before amplitude sweep test as described below.

*Preparation of modified mungbean-adlay (MMA) composite by alkali-salt treatment*

Five hundred grams of dehulled mungbean grains were soaked in 1,000 mL alkali-salt solution containing 5% $NaHCO_3$ and 2% NaCl for 8 hr 27°C to solubilize mungbean proteins, hydrate water, ionize carboxylic side chain of polypeptides and hydroxyl group of starch (Israkarn and Hongsprabhas, 2017). Soaked grains were milled by a supermass colloider using a 1 mm gap size, allowed the interactions to proceed for overnight to obtain alkali-salt treated mungbean (MM) slurries. Seven hundred grams of MM slurries, composed of 230 g milled mungbean and water, were added with 350 g of adlay flour sorbent to get a composite containing mungbean to adlay of 4:6 weight ratio. The mixed flour was designated as a modified-mungbean-adlay (MMA) composite, dried at 60°C for 6 h to a moisture content below 5 %. Dried MMA was milled and sifted through a sieve No.30 (600 µm) and stored at -18°C before used. The pH of reconstituted MMA flour was 10.39±0.4.

*Effect of alkali-salt treatment on viscoelastic properties of mixed flour paste*

The MMA paste mixed with melt 4% (w/w) RBS as a previous method was added with 1 mL of distilled water, 250 mM, or 500 mM $CaCl_2$ stock solutions, to obtain a final concentration of 0, 35, or 70 mM $CaCl_2$, and the final total solid of paste was 20% (w/v) as described above, cooled down to 27 °C and equilibrated for 30 min to partially solidify lipid fraction and allow $Ca^{2+}$ to crosslink negatively charged macromolecules (protein and ionized starch) before amplitude sweep test as described below.

*Amplitude sweep test*

Twenty grams sample paste readily for analysis without flour precipitation were prepared and analysed by an Anton Paar Modular Compact Rheometer (Physica MCR301, Anton Paar GmbH, Ostfildern, Germany).

The geometry used was a parallel plate with a 50 mm diameter (PP-50). A sample of around 3.5 mL was put onto the bottom plate, and the gap was 1 mm. The test was performed at strain 0.01% to 100% with the frequency of 1 Hz at 35°C as described earlier by Latawan and Hongsprabhas (2021). The values of storage modulus (G'), loss modulus (G") over the 0.01 – 100 % strain were recorded to determine the linear viscoelastic range (LVR) and the crossover point modulus and strain to differentiate the solid behaviour of the paste.

Amplitude sweep test record the change of G' and G" during the strain increase. Moduli values from the sample are constant in the Linear viscoelastic region (LVR), which is the range of tests that can be operated without destroying the solid structure and could be used to describe viscoelastic behaviour of solid and fluid. At the crossover point, where G' equals G", the solid structure would deform and transition from solid to fluid (Anton Paar, 2023)

*Statistical analysis*

A single-factor experimental design was used in this study using a randomized block design for each independent variable. All experiments were carried out using the MA and MMA powder from two separate trials. The analyses will be carried out in triplicates. The results were analyzed by the Analysis of Variance (ANOVA) or t-test and post hoc Duncan's multiple range test (DMRT) when appropriate. All results were analyzed by SPSS (version 26) using significant differences established at $p < 0.05$.

**Results and Discussion**

*Effect of flour ratio on viscoelastic behaviour of mixed flour paste in amplitude sweep test*

The linear viscoelastic range (LVR) of mixed flour paste containing different protein contents is within 0.63% strain as shown in Fig. 1. All mixed flour composites possessed viscoelastic solid structure within the LVR since the storage modulus (G') was higher than the loss modulus (G") within the LVR.

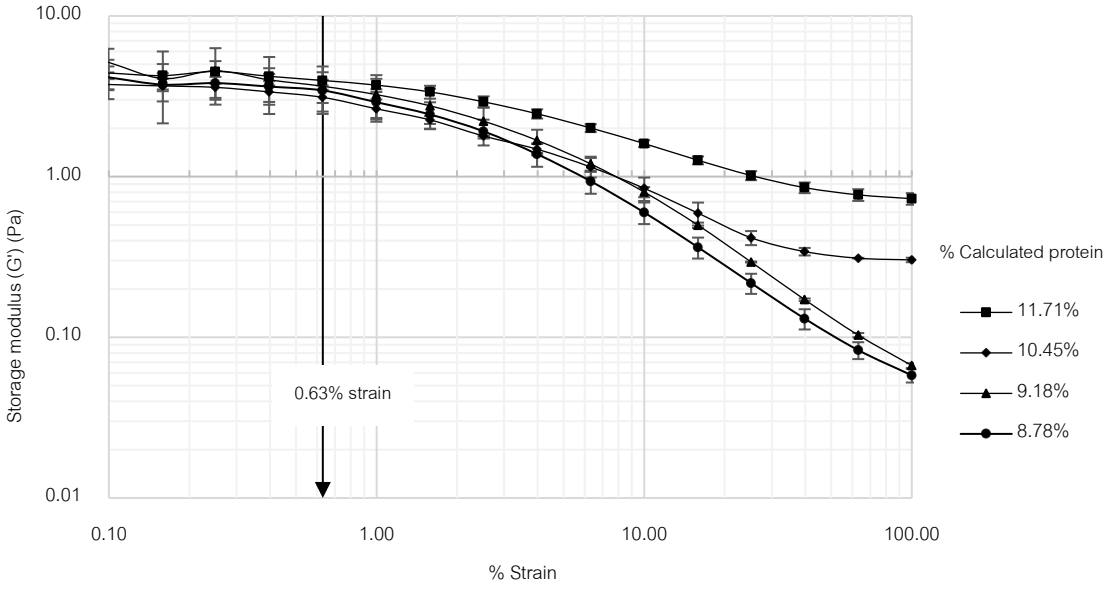



**Fig.** 1 Storage modulus (G') of mungbean-adlay composite paste (MA) different calculated protein content during amplitude sweep at 1 Hz and 35°C

Mixing mungbean and adlay flour reduced the total protein content in mixed flour. Although the paste containing 50% (w/v) solid had similar G', the loss modulus (G") reduced significantly as shown in Table 1. This suggested that the decrease in mungbean protein content and the increase in adlay amylopectin favour viscous behaviour of mixed flour pastes. The moduli at the crossover point reported in Table 1 also indicated that the increasing adlay flour content reduced physical stability of solid structure of the composite. Therefore, a composite containing mungbean flour to adlay flour of 4:6 ratio, i.e. 9.18% protein, was chosen for further investigation since this ratio had quite weak solid structure while the ratio of 2:8 (8.78 % protein) was too weak for sample handling.

**Table 1** Effect of weight ratio between mungbean flour and adlay flour on viscoelastic properties of composite paste (50% w/v) modulus at 35 °C

| Composite ratio (g/g) | | Calculated protein content (% w/v) | Modulus at 0.63% strain | | Modulus at the crossover point (Pa) |
|---|---|---|---|---|---|
| Mungbean | Adlay | | G' (Pa) | G" (Pa) | |
| 10 | 0 | 11.71 | 3.97±0.70$^{a}$ | 2.10±0.22$^{a}$ | 1.60±0.01$^{a}$ |
| 7 | 3 | 10.45 | 3.11±0.81$^{a}$ | 1.52±0.46$^{b}$ | 1.45±0.50$^{b}$ |
| 4 | 6 | 9.18 | 3.65±1.69$^{a}$ | 1.29±0.50$^{bc}$ | 1.15±0.78$^{c}$ |
| 2 | 8 | 8.78 | 3.44±0.80$^{a}$ | 0.93±0.20$^{c}$ | 0.92±0.04$^{d}$ |

* Means±SD in the same column followed by different superscripts are significantly different ($p < 0.05$)

*Effect of rice bran stearin (RBS) on viscoelastic properties of mixed flour paste in amplitude sweep test*

Addition of RBS further weakened solid structure of the mixed flour composite paste as shown in Table 2. It should be noted that the melting point of RBS was below 35°C. The presence of 4% (w/w) RBS did not alter the G' and G" at 0.63% strain but lowered the modulus at the crossover point significantly ($p < 0.05$), suggesting that the oil droplets lubricated the solid components such as protein network and swollen starch granules, inhibited starch gelatinization, and reduced the entanglement of leached amylose (Li et al., 2014; Chen et al., 2022).

**Table 2** Effect of rice bran stearin (RBS) addition on viscoelastic properties of mungbean-adlay (MA) composite paste at 35°C

| RBS content (% w/w) | Modulus at 0.63% strain | | Modulus at the crossover point (Pa) |
|---|---|---|---|
| | G' (Pa) | G" (Pa) | |
| 0 | 3.65±1.20[a] | 1.29±0.35[a] | 1.15±0.06[a] |
| 4 | 1.67±0.01[a] | 0.95±0.04[a] | 0.76±0.04[b] |

* Means±SD in the same column followed by different superscripts are significantly different ($p < 0.05$)

*Effect of alkali-salt treatment on viscoelastic properties of mixed flour paste in amplitude sweep test*

The modification of mungbean flour using alkali-salt treatment resulted in the stronger paste of modified mungbean-adlay composite (MMA) containing 4% RBS compared to the MA paste added with RBS as shown in Table 3. The increase in the viscoelastic solid behaviour, even in the presence of RBS, suggested that denatured protein and ionized starch from alkali-salt treatment could form strong structures holding the oil droplets even at 35 °C.

**Table 3** Effect of alkali-salt treatment on viscoelastic properties of mungbean-adlay (MA) and modified mungbean-adlay composite (MMA) at 35°C

| Type of flour | Fat content (% w/w) | Modulus at 0.63% strain | | Crossover point | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | G′ (Pa) | G″ (Pa) | % Strain | Modulus (Pa) |
| MA | 4 | 1.67±0.01[a] | 0.95±0.04[b] | 3.99±0.00[a] | 0.76±0.04[b] |
| MMA | 4 | 6.17±1.62[a] | 3.63±0.82[a] | 4.00±0.00[a] | 3.01±0.04[a] |

* Means ± SD in the same column followed by different superscripts are significantly different ($p < 0.05$)

Addition of $CaCl_2$ in modified-mungbean-adlay composite (MMA) further crosslinked the negatively charged protein and starch molecules as shown in Fig. 2. The roles of $Ca^{2+}$-crosslinking were evident in the G' values rather than the G". The reinforcement of the solid behaviour could be due to the crosslinking of protein-

protein, protein-starch, and starch-starch via $Ca^{2+}$ since these polymers were negatively charged, thus protein and starch network were strengthened even in the presence of RBS droplets.

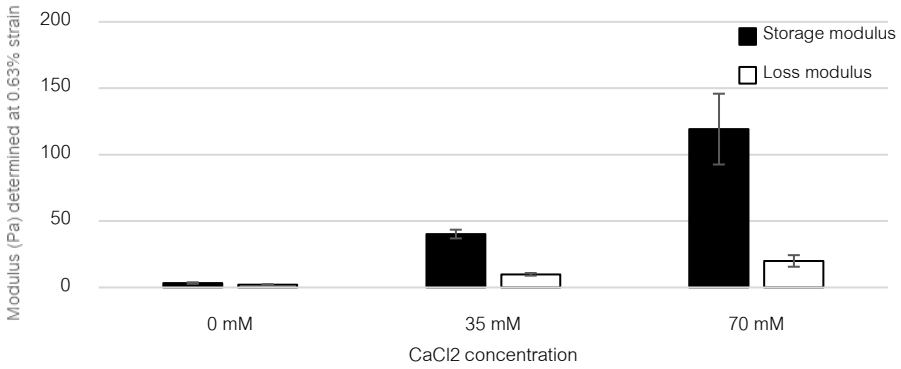



**Fig. 2** Effect of $CaCl_2$ on viscoelastic properties of the modified-mungbean-adlay paste during amplitude sweep at 1 Hz and 35°C

## Conclusion

Manipulating the negatively charged groups in protein molecules or ionized groups of starch molecules at ambient temperature could promote the solid behaviour of mixed composite. However, the appearance of melted lipids (RBS) in the mungbean-adlay composite would decrease the strength of a composite structure, that might lubricate the composite network at ambient temperature. This study shows, for the first time, that $Ca^{2+}$-crosslinking can be used to strengthen the composite structure of protein-starch-lipid even at temperature below denaturation of proteins and gelatinization temperature of starches. The mechanical response of composite structure upon heating at different heating rate is underway to get more insights on the roles of composite structure during structure-forming process upon cooking.

## Conflict of Interest

The authors declare that there are no conflicts of interest.

## Acknowledgements

The financial support from the research grant “Converting rice paddy monoculture to complex agroforestry for the restoration of wetland ecosystem and sustainable food systems: a case study of Singhanat Subdistrict, Lat Bua Luang District, Phra Nakhon Si Ayutthaya” project is gratefully acknowledged.

## References

Ab’lah, N., Tin, W.W. 2020. Starch as Oral Colon-Specific Nano- and Microparticulate drug carriers. In: AlMaadeed, M.A.A., Ponnamma, D., Carignano, M.A. (Eds). Polymer Science and Innovative Applications. Carignano, Italy, pp. 287–330.

Anton Paar. 2023. Amplitude sweeps. https://wiki.anton-paar.com/th-th/amplitude-sweeps/, 12 December 2023.

AOAC. 2019. Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists, 21st Ed. AOAC. Washington DC, USA.

Chen, Q., Zhang, J., Zhang, Y., Wang, Q. 2022. Effect of fatty acid saturation degree on the rheological properties of pea protein and its high-moisture extruded product quality. Food Chem. 390: 133139. doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133139

Dechkunchorn, M., Thongngam, M. 2016. Characterization of flour, starch and protein from white and black adlay cultivars. VRU Research and Development Journal Science and Technology 11: 31–40.

Dobson, S., Laredo, T., Marangoni, A.G. 2022. Particle filled protein-starch composites as the basis for plant-based meat analogues. Current Research in Food Science 5: 892–903. doi: 10.1016/j.crfs.2022.05.006

Huang, Y., Corke, H., Li, J.S. 2016. Coix: Overview, 2nd ed. In: Colin, W., Harold, C., Koushik, S., Jon, F. (Eds.). Encyclopedia of Food Grains. Academic Press. Oxford, UK, pp. 184–89.

Israkarn, K., Hongsprabhas, P. 2017. Effect of $CaCl_2$ on the formation of Ca-induced starch aggregates and spherulitic structure in dried starch film. Dry. Technol. 35: 1552–1560. doi.org/10.1080/07373937.2016.1261889

Latawan, R., Hongsprabhas, P. 2021. Chemical and physical properties of rice bran stearin, palm kernel oil, coconut oil and influences of glyceryl monostearate on their viscoelastic properties. In: Proceedings of 59th Kasetsart University Annual Conference. Bangkok, Thailand, pp. 646–654. [in Thai]

Li, E., Sushil, D., Jovin, H. 2014. Effects of grain milling on starch structures and flour/starch properties. Starch 66: 1–2. doi.org/10.1002/star.201200224

Thomas, G., Kalla, A.M., Kumar, A. 2018. Food matrix: A new tool to enhance nutritional quality of food. J. Pharmacogn. Phytochem. 7: 1011–1014.

Vindika, S., Wijesekara, I. 2021. Flour properties of whole and dehulled mung beans (*Vigna Radiata*) and development of food gels incorporated with Kithul (*Caryota Urenus*) flour. Vidyodaya Journal of Science 21: 1. doi.org/10.31357/vjs.v24i01.4959

Wang, Y., Zhao, J., Zhang, S., Zhao, X., Liu, Y., Jiang, J., Xiong, Y.L. 2022. Structural and rheological properties of mung bean protein emulsion as a liquid egg substitute: The effect of pH shifting and calcium. Food Hydrocolloids 126: 107485. doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107485

# Preparation and chemical composition of flour from yam (*Dioscorea alata* L.) tuber and application of yam flour in crispy waffle product

**Phatsanan Kudeedang, Namfone Lumdubwong, Pinthip Rumpagaporn***

Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. Email address: pinthip.r@ku.th

**Abstract**

Yams, *Dioscorea alata* L., are cultivated in specific regions of Thailand, such as Chaiyaphum Province. Within households, yam consumption is prevalent, and simple cooking techniques like boiling and steaming are commonly employed. Yams stand out as a carbohydrate source, making them an excellent choice for extracting high-quality flour. Presently, there is a limited amount of research dedicated to yam processing and application. One significant challenge faced during processing is the issue of browning that occurs after peeling the tuber. This study aimed to explore different pretreatment methods for browning reduction in yam flour and investigate the impact of yam flour and composite flour in crispy waffles on the textural properties. According to yam flour color measurement, the pretreatment step of soaking in NaCl (3% w/v, 5 min) proved more effective in reducing browning than the blanching method (60°C, 5 min). The crispy waffle formulations, utilizing varying ratios of yam flour to cassava flour (100:0, 85:15, 70:30, and 55:45), were studied. The results revealed changes in textural properties, notably increased hardness compared to a wheat flour formulation. In summary, the pretreatment process is crucial in minimizing browning in yam flour preparation, highlighting the potential of yam flour for crispy waffle production.

**Keywords**: Crispy waffle, Flour, Pretreatment, Yam

## Introduction

Yams (*Dioscorea* spp.), belonging to both the edible and inedible species, serve as a staple diet in West Africa. Approximately fifteen species of yam have been extensively cultivated for human consumption, with examples including D. *alata* and D. *rotundata* (Degras, 1993). As of 2021, cultivation spanned over 8.8 million hectares, predominantly in West African nations such as Nigeria, Benin, Ghana, and Cote d'Ivoire, contributing to over 90% of the total output volume. The production volume reached 75 million tons in 2021 (FAOSTAT, 2022).

*Dioscorea alata* L. has been cultivated in limited regions in Thailand, particularly in Chaiyaphum province. In local households, yam tubers are predominantly prepared using simple heating methods such as boiling or steaming. However, there is currently a lack of studies related to the processing techniques specific to this yam variety. A notable concern with this tuber is the occurrence of browning after the peeling process, adversely affecting both the nutritional content and sensory characteristics of the yams (Adegoke et al., 2017). Pretreatments, including blanching and soaking in a NaCl solution, improved the color of potato chips (Santis et al., 2007). Consequently, the pretreatment that reduced browning may influence the color of yam flour, impacting the overall appearance and color of crispy waffles. In our preliminary study, crispy waffles made from 100% yam flour encountered issues with crispness. Furthermore, Say et al. (2021) reported that an increase in the ratios of cassava starch was associated with crispness and hardness in crispy crackers. Therefore, adding cassava flour may have the potential to improve the crispness of crispy waffles. The objective of this study was to explore the effect of yam tuber pretreatment on browning reduction to promote usage of yam flour. The impact of incorporating yam flour and composite flour (a mixture of yam flour and cassava flour) into a crispy waffle product was examined, specifically focusing on textural properties and some physical properties.

## Materials and Methods

### *Materials*

The yam (*Dioscorea alata* L.) tuber, known as Mun Jao Phrao, was acquired from a farm in Chaiyaphum Province. It was harvested on March 25, 2023, with an average weight of 200–300 grams per tuber. Essential ingredients, including wheat flour, cassava flour, eggs, salted butter, sugar, milk, vanilla extract, and baking powder (double acting, Best Foods), were procured from a local supermarket. All chemicals and solvents used were of analytical reagent (AR) grade and purchased from Elago Enterprises Pty Ltd., RCI Labscan Co., Ltd., and Sigma-Aldrich (Thailand) Co., Ltd.

### *Preparation of yam (Dioscorea alata L.) flour*

Using a technique modified from Gebre-Mariam and Schmidt (1998), the yam tubers were first washed and then cut. Subsequently, the skins were peeled off and washed with tap water. The tubers were then sliced into thin sheets approximately 2–3 mm thick, soaked in water for 10 minutes, rinsed again (using a 1:1 w/v ratio),

and left to soak in water while awaiting drying in a tray dryer (Kluaynamthaitowop Company Limited, Thailand). The drying process took place over 4–5 hours at 50°C in a tray dryer. A rotor mill (Retsch Type SR300, UK) equipped with a 0.2 mm filter was used to grind dried chips into fine flour. The obtained flour underwent sieving with a 100-mesh sieve and was stored in an aluminum foil bag.

*Yam flour preparation by pretreatment with sodium chloride solution*

The yam tuber was prepared following the previously mentioned procedure, with the additional of an extra step. A 3% w/v sodium chloride (NaCl) solution was selected based on preliminary experiments by Santis et al. (2007). The sliced yam was immersed in a 3% w/v sodium chloride (NaCl) solution for 5 minutes at room temperature (25–30°C) after soaking in water for 10 minutes and rinsing. Subsequently, the samples were soaked in water for another 10 minutes and then dried in a tray dryer.

*Yam flour preparation by pretreatment with blanching in hot water.*

The yam tuber was prepared following the previously mentioned procedure, which included additional steps after soaking the samples in water for 10 minutes and rinsing. These extra steps involved placing the sliced yam in hot water at 60°C for 5 minutes and then soaking it in cold water mixed with ice for 90 seconds (Santis et al., 2007). Subsequently, the samples were soaked in water for another 10 minutes and dried in a tray dryer.

*Color measurement*

Color of crispy waffles was determined using the method described by Collado et al. (1997) that utilized an Ultrascan Pro Spectrophotometer with the CIE system. The results were reported as L* value or brightness (0 = black, 100 = white), a* value or redness (+a = red, -a = green), b* value or yellowness (+b = yellow, -b = blue), and C* value representing the color intensity. Additionally, the browning index value was calculated using Equation 1 (Collado et al., 1997).

$$\text{Browning index} = \frac{[100(x - 0.31)]}{0.172}, \; x = \frac{(a^* + 1.75L^*)}{(5.645L^* + a^* - 3.012b^*)} \quad (1)$$

*Chemical composition analysis*

The chemical composition of yam flour, including moisture, protein, fat, ash, and crude fiber, was analyzed using standard procedures (AOAC, 2012). Total carbohydrate content was determined by the difference method.

*Preparation of crispy waffles*

**Table 1** Formulation of crispy waffles made from wheat flour, yam flour, and cassava flour

| Ingredient (%) | Control | Yam flour:Cassava flour | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 100:0 | 85:15 | 70:30 | 55:45 |
| Wheat flour | 45.6 | - | - | - | - |
| Yam flour | - | 45.6 | 38.8 | 31.9 | 25.1 |
| Cassava flour | - | - | 6.8 | 13.7 | 20.5 |
| Egg | 16.7 | 16.7 | 16.7 | 16.7 | 16.7 |
| Salted butter | 15.3 | 15.3 | 15.3 | 15.3 | 15.3 |
| Sugar | 16.0 | 16.0 | 16.0 | 16.0 | 16.0 |
| Milk | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Vanilla extract | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 |
| Baking powder | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Adapting the methodology of Kaewmak et al. (2020), the preparation involved weighing the ingredients based on the formula in Table 1. Flour and baking powder were blended in a bowl, and then combined melted butter, eggs, milk, and vanilla extract in another bowl. The sugar was gradually added while using a mixer at speed 1 for 1 minute. Subsequently, the flour and baking powder mixture was poured into the mixing bowl. Then, the mixer speed was increased to 2, and mixing continued for an additional 3 minutes. The batter was allowed to rest for 30 minutes at room temperature. The waffle maker was preheated to a temperature of 135±5°C for 1–2 minutes. The batter was weighed at 9 grams and shaped into a round form. The prepared batter was then placed into the waffle maker and cooked for 3-3.5 minutes until golden and crisp. Each formulation was conducted with three replications.

*Textural measurement*

The hardness, fracture distance, fracture force gradient, and peak count were analyzed using a Texture Analyzer (TA-XTplus) according to the method described by Wang et al. (2012) and Zou et al. (2013). The Texture Analyzer was equipped with a 5-kg load cell and operated in compression mode with a ball probe (P/0.25s) and supported with a crisp fracture support rig (HDP/CFS). The measurements were conducted at a speed of 1 millimeter/second for both the pre-test and test time, and at a speed of 5 millimeters/second for the post-test. The probe was pressed down to a height of 10 millimeters, with a trigger force set at 5.0 grams. Three replications were carried out, with each replication involving the analysis of six pieces of crispy waffles.

*Spread ratio, diameter and thickness*

The spread ratio, diameter, and thickness were determined according to the method described by Naseer et al. (2021). The diameter and thickness of the crispy waffles were measured using a vernier caliper.

Three pieces of crispy waffles obtained from each formulation replication, and two different positions of each piece, were selected for diameter and thickness measurements. The spread ratio was calculated using Equation 2.

$$\text{Spread ratio} = \frac{\text{Diameter (mm)}}{\text{Thickness (mm)}} \quad (2)$$

*Experimental design and statistical analysis*

A Completely Randomized Design (CRD) experiment was used, and 3 replications of each experiment were conducted in this study. The obtained data were subjected to statistical one-way analysis of variance (ANOVA) to compare mean differences. Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) was employed at a confidence level of 95 percent using the SPSS software version 26 for Windows.

**Results and Discussion**

*Color measurement*

The effect of pretreatment on the color of yam flour is shown in Fig. 1. As a result of the pretreatment involving blanching at 60°C or soaking in a 3% NaCl solution, the L* values of yam flour increased, while the a*, b*, and browning index exhibited a decrease compared to the untreated condition, as detailed in Table 2. Enzymatic and non-enzymatic reactions were responsible for the occurrence of browning in yam (Abano and Amoah, 2015). Enzymatic browning in yams occurred due to the oxidation of polyhydric phenols by polyhydric phenol oxidases when yams were cut and exposed to the air (Ozo et al., 1984). During drying, the formation of brown pigment in yams was attributed to non-enzymatic browning, resulting from reactions between reducing sugars and nitrogenous compounds known as the Maillard reaction (Abano and Amoah, 2015). The yam flour pretreated with a NaCl solution exhibited the lowest browning index (11.14), differing significantly ($p \leq 0.05$) from blanching (18.68) and control (20.28) pretreatments (Table 2). This effect was likely due to reduced polyphenol oxidation, resulting from the inhibition of polyphenol oxidase (PPO) activity by sodium chloride, as observed in apple slices (Li et al., 2015). Chloride, a PPO inhibitor whose inhibitory action depends on the enzyme source, was frequently used to prevent fruits from discoloring during cooking. Although chloride might act as noncompetitive or uncompetitive inhibition, the precise mechanism remained unclear (Lim et al., 2012). Additionally, during the drying process, the presence of retained NaCl might contribute to minimizing browning associated with the Maillard reaction in flour. This was supported by the study of Kwak and Lim in 2004, wherein the introduction of NaCl to the reaction model resulted in a significant reduction in the color density of Maillard browning products. Blanching helped reduce enzymatic browning by inactivating or denaturing the enzymes responsible for the reaction (Loannou and Ghoul, 2013). Although the browning index of flour prepared by blanching pretreatment was slightly lower than the control, it was not significantly different (Table 2). Choosing

a 3% NaCl solution for yam pretreatment over blanching was preferred due to lower energy consumption and cost-effectiveness. This method was chosen for processing yam flour to produce crispy waffles since it did not require hot water or ice in the pretreatment steps and had a low cost for NaCl.

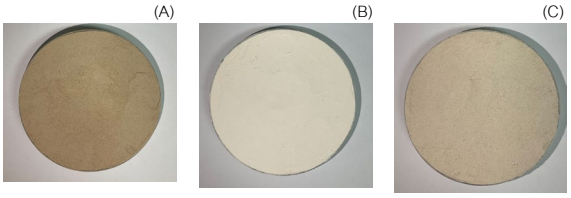



**Fig.1** Yam flour with no pretreatment (A); pretreatment with 3% NaCl solution (B); and pretreatment with blanching (C)

**Table 2** L*, a*, b* values and browning index of yam flour prepared by different pretreatment

| Pretreatment | L* | a* | b* | Browning index |
|---|---|---|---|---|
| No pretreatment (Control) | 70.12±6.06$^{b}$ | 2.14±0.81$^{a}$ | 11.74±1.42$^{a}$ | 20.28±4.91$^{a}$ |
| 3% NaCl solution | 81.57±2.73$^{a}$ | 0.70±0.21$^{b}$ | 9.39±0.70$^{b}$ | 11.14±1.52$^{b}$ |
| Blanching | 75.20±1.58a$^{b}$ | 1.67±0.58a$^{b}$ | 10.65±0.60$^{ab}$ | 18.68±2.35$^{a}$ |

$^{a-b}$ Mean values in the same column with different letters are significantly different ($p \leq 0.05$).

**Table 3** Chemical composition of yam flour prepared by soaking in a 3% NaCl solution

| Chemical composition (%) (wet basis) | Moisture | Fat | Crude fiber | Ash | Protein | Total carbohydrate |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Yam flour | 8.76±0.22 | 0.47±0.12 | 2.20±0.49 | 3.10±0.25 | 6.22±0.14 | 81.47±0.26 |

*Chemical composition of yam flour*

The chemical composition of the yam flour prepared by soaking in a 3% NaCl solution is presented in Table 3. These findings were consistent with the study by Panpraneecharoen and Singphan (2019), which reported that carbohydrates in native yam varieties were present in high quantities, ranging from approximately 77–83%. Yams also exhibited a protein content of 4–6% and a fat content of 0.04–0.34%. It is important to note that these values may vary depending on the yam variety. Rugchati (2005) examined the chemical composition of flour derived from three local yam varieties typically found in Thailand: water yam (*D. alata*), yam (*D. alata*), and yam (*D. esculenta*). The results revealed that the flour from these yams contained protein, fiber, fat, ash, and carbohydrates in the ranges of 4.80–7.20%, 0.43–1.22%, 0.01–0.02%, 1.77–3.10%, and 89–92%, respectively.

*Textural measurement*

Crispy waffles made from yam flour and mixtures of yam flour and cassava flour exhibited higher hardness and fracture force gradient values than the control. In addition, peak count indicated a crispy texture, where a higher peak count correlated with enhanced crispiness. An increase in the proportions of cassava starch was associated with higher peak count and hardness, particularly in crispy crackers (Say et al., 2021). Conversely, the peak count of waffles in our study did not exhibit a significant increase as the proportion of cassava flour increased. A significant increase in hardness observed in the crispy waffle formulation with a higher ratio of cassava flour may be attributed to the thickening capacity of cassava flour. Additionally, the higher water absorption of cassava flour compared to other flours, such as wheat, maize, and cowpea flour (Oladunmoye et al., 2010), is likely to influence the viscosity of the waffle batter. As a result, the presence of air-filled cavities generated by baking powder was lower in the viscous waffle batter, contributing to the higher hardness of the crispy waffles (Table 4).

**Table 4** Hardness, fracture distance, fracture force gradient, and peak count of crispy waffles made from wheat flour, yam flour, and mixtures of yam flour and cassava flour

| Yam flour: Cassava flour | Hardness (N) | Fracture distance (mm)$^{ns}$ | Fracture force gradient (N/mm) | Peak Count$^{ns}$ |
|---|---|---|---|---|
| Control (Wheat flour) | 5.23±0.92$^{d}$ | 1.96±0.41 | 2.74±0.76$^{c}$ | 8.47±1.19 |
| 100:0 | 7.10±1.15$^{c}$ | 2.02±0.40 | 3.55±0.67$^{c}$ | 8.60±0.99 |
| 85:15 | 9.23±1.87$^{b}$ | 1.99±0.45 | 4.72±0.98$^{b}$ | 9.00±1.69 |
| 70:30 | 9.86±3.49$^{ab}$ | 2.10±0.55 | 4.77±1.58$^{b}$ | 9.33±1.45 |
| 55:45 | 11.02±2.79$^{a}$ | 2.01±0.53 | 5.64±1.55$^{a}$ | 8.47±1.48 |

$^{a-d}$ Mean values in the same column with different letters are significantly different ($p \leq 0.05$)

$^{ns}$ Mean values in the same column are not significantly different ($p > 0.05$)

**Table 5** Diameter, thickness and spread ratio of crispy waffles made from wheat flour, yam flour, and mixtures of yam flour and cassava flour

| Yam flour:Cassava flour | Diameter (mm) | Thickness (mm)$^{ns}$ | Spread ratio |
|---|---|---|---|
| Control (Wheat flour) | 82.99± 2.67$^{a}$ | 3.23±0.25 | 25.88±2.35$^{a}$ |
| 100:0 | 83.24±1.75$^{a}$ | 3.24±0.20 | 25.77±1.83$^{a}$ |
| 85:15 | 78.78± 2.00$^{b}$ | 3.34±0.39 | 23.85±2.77$^{b}$ |
| 70:30 | 76.76±2.58$^{c}$ | 3.30±0.32 | 23.48±2.70b$^{c}$ |
| 55:45 | 74.75±1.96$^{d}$ | 3.48±0.38 | 21.73±2.73$^{c}$ |

$^{a-c}$ Mean values in the same column with different letters are significantly different ($p \leq 0.05$)

$^{ns}$ Mean values in the same column are not significantly different ($p > 0.05$)

*Spread ratio, diameter and thickness*

In comparison to both the control and the 100% yam flour formula, the diameter of the crispy waffles made from a blend of yam flour and cassava flour exhibited a significant decrease ($p \leq 0.05$), as shown in Table 5. The thickness of these crispy waffles demonstrated variation, ranging from 3.23 to 3.48 mm, with no significant difference ($p > 0.05$). The substitution of cassava flour for yam flour led to a significant reduction in the crispy waffles spread ratio ($p \leq 0.05$). These alterations in diameter, thickness, and spread ratio could be ascribed to the viscosity of the waffle batter, as documented in the study on cookie dough by Pareyt et al. (2009). However, it is imperative to achieve an appropriate viscosity to ensure that the waffle maintains its intended structure and texture while attaining the desired level of crispiness.

## Conclusion

Pretreatment by soaking yam in a 3% NaCl solution before flour processing caused the most significant reduction in browning compared to the control and blanching pretreatment ($p \leq 0.05$). The substitution of yam flour and a mixture of yam flour and cassava flour (in ratios of 100:0, 85:15, 70:30, and 55:45) for wheat flour significantly caused an increase in hardness of crispy waffles. The crispy waffle recipe using 100% yam flour was quite similar to the sample made from wheat flour with slightly higher hardness. Therefore, the yam tuber (*Dioscorea alata* L.) or Mun Jao Phrao has the potential to be used as flour for crispy waffle products. However, a sensory evaluation and chemical composition analysis of the crispy waffles are necessary and will be addressed in future studies.

## Conflict of Interest

The authors declare that there are no conflicts of interest.

## Acknowledgements

The authors express gratitude to the Department of Food Science and Technology for providing experimental facilities. Additionally, sincere appreciation is extended to the Faculty of Agro-Industry at Kasetsart University for awarding an academic presentation scholarship.

## References

Abano, E.E., Amoah, R.S. 2015. Microwave and blanch-assisted drying of white yam (Dioscorea rotundata). Food Sci. Nutr. 3: 586–596. doi: 10.1002/fsn3.249

Adegoke, G.O., Odebadeu, A.O., Afolabi, M.O. 2017. Control of browning of yam (*Dioscorea rotundata*) and sweet potato (*Ipomoea batatas*) using African cardamon (*Aframomum danielli*), turmeric (*Curcuma longa*) and Clove (*Syzygiumnn aromaticum*). J. Food Ind. 1: 52–58. doi: 10.5296/jfi.v1i1.12277

AOAC. 2012. Official Methods of Analysis, 19th ed. Association of Official Analytical Chemistry. Arlington, VA, USA.

Collado, L.S., Mabesa, L.B., Corke, H. 1997. Genetic variation in color of sweet potato flour related to its use in wheat-based composite flour products. Cereal Chem. 74: 183–187.

Degras, L. 1993. The Yam. A Tropical Root Crop. Macmillan Press Ltd. London, UK.

FAOSTAT. 2022. Yam. https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL, 16 June 2022.

Gebre-Mariam, T., Schmidt, P.C. 1998. Some physico-chemical properties of Dioscorea starch from Ethiopia. Starch 50: 241–246.

Kaewmak, N. Chupeerach, C., Suttisansanee, U., Siriwan, D., Chamchan, R., Khemthong, C., On-nom, N. 2020. Production and quality evaluation of low glycemic index crispy waffle from whole wheat flour supplemented with type 4-resistant starch and sacred lotus stamen. Food Res. 4: 1–8.

Kwak, E.J., Lim, S.I. 2004. The effect of sugar, amino acid, metal ion, and NaCl on model Maillard reaction under pH control. Amino Acids 27: 85–90. doi.org/10.1007/s00726-004-0067-7

Lim, G.G.F., Imura, Y., Yoshimura, E. 2012. Substrate inhibition competes with halide inhibition in polyphenol oxidase. Protein J. 31: 609–614. doi: 10.1007/s10930-012-9442-5

Li, Y., Wills, R.B.H., Golding, J.B. 2015. Sodium chloride, a cost-effective partial replacement of calcium ascorbate and ascorbic acid to inhibit surface browning on fresh-cut apple slices. LWT 64: 503–507. doi: 10.1016/j.lwt.2015.05.010

Loannou, I., Ghoul, M. 2013. Prevention of enzymatic browning in fruit and vegetables. Eur. Sci. J. 9: 310–341.

Naseer, B., Naik, H.R., Hussain, S.Z., Zargar, I. 2021. Effect of carboxymethyl cellulose and baking conditions on in-vitro starch digestibility and physico-textural characteristics of low glycemic index gluten-free rice cookies. LWT. 141: 110885.

Oladunmoye, O.O., Akinoso, R., Olapade, A.A. 2010. Evaluation of some physical–chemical properties of wheat, cassava, maize and cowpea flours for bread making. J. Food Qual. 33; 693–708. doi: 10.1111/j.1745-4557.2010. 00351.x

Ozo, O.N., Caygill, J.C., Coursey, D.G. 1984. Phenolics of five yam (dioscorea) species. Phytochemistry 23: 329–331. doi: 10.1016/s0031-9422(00)80327-1

Papraneecharoen, S., Singphan, N. 2019. Chemical properties and ethanol fermentation from *Dioscorea* sp. Phranakhon Rajabhat Research Journal 14: 105–116.

Pareyt, B., Talhaoui, F., Kerckhofs, G., Brijs, K., Goesaert, H., Wevers, M., Delcour, J.A. 2009. The role of sugar and fat in sugar-snap cookies: Structural and textural properties. J. Food Eng. 90: 400–408. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2008.07.01

Rugchati, O. 2005. Physicochemical Properties of Starch from Tubers of some *Dioscorea* spp. in Thailand. Ph.D. thesis, Graduate school, Kasetsart University. Bangkok, Thailand.

Santis, N., Mendoza, F., Moyano, P., Pedreschi, F., Dejmek, P. 2007. Soaking in a NaCl solution produce paler potato chips. LWT. 40: 307–312. doi: 10.1016/j.lwt.2005.09.020

Say, M., Fuangpaiboon, N., Hirunsorn, P. 2021. Composite flour cracker enriched with banana flour: Formulation optimization and properties. Asia-Pacific Journal of Science and Technology 27: APST-27-03-10.

Wang, Y., Zhang, M., Mujumdar, A.S. 2012. Influence of green banana flour substitution for cassava starch on the nutrition, color, texture and sensory quality in two types of snacks. LWT. 47: 175–182.

Zou, K., Teng, J., Huang, L., Dai, X., Wei, B. 2013. Effect of osmotic pretreatment on quality of mango chips by explosion puffing drying. LWT. 51: 253–259. doi.org/10.1016/j.lwt.2012.11.005

# การเปรียบเทียบฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระและยับยั้งแอลฟา-กลูโคซิเดส ในสารสกัดสมุนไพรไทย: การสำรวจความสัมพันธ์กับปริมาณฟลาโวนอยด์และฟีนอลิกรวม

# Comparison of antioxidant activity and alpha-glucosidase inhibitory effects in Thai herbal extracts: Correlation analysis with total flavonoid and phenolic content

**ณิชกานต์ มนต์ภาณีวงศ์, ศรัณยู อุ่นทวี, สุดาทิพย์ จันทร, ชนัญ ผลประไพ***

Nichkarn Monphaneewong, Saranyou Oontawee, Sudathip Chantorn, Chanan Phonprapai*

ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ปทุมธานี 12120

Department of Biotechnology, Faculty of Science and Technology, Thammasat University, Pathum Thani 12120, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: chanan@tu.ac.th

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นในการหาค่าสหสัมพันธ์ของปริมาณสารประกอบรวม ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ และการยับยั้งแอลฟา-กลูโคซิเดส สำหรับคัดกรองสารสกัดจากพืชสมุนไพร 5 ชนิด ได้แก่ ผลมะขามป้อม ผลสมอไทย ผลสมอพิเภก แก่นฝาง และรากชะเอมเทศ เพื่อเป็นทางเลือกในการรักษาผู้ป่วยภาวะน้ำตาลในเลือดสูง โดยพืชแต่ละชนิดทำการสกัดด้วยวิธีการแช่ในตัวทำละลายเอทานอล 95 เปอร์เซ็นต์ (95EtOH) เอทานอล 70 เปอร์เซ็นต์ (70EtOH) เอทานอล 50 เปอร์เซ็นต์ (50EtOH) เมทานอล (MeOH) และเอทิลอะซิเตท (EtOAc) จากการศึกษาพบว่า ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระสามารถนำมาเป็นเกณฑ์ในการคัดเลือกพืชสมุนไพรที่มีประสิทธิภาพในการยับยั้งเอนไซม์แอลฟา-กลูโคซิเดส โดยมีความสัมพันธ์เชิงบวก ทั้งสัมพันธ์กับปริมาณสารประกอบรวม สารสกัดที่มีปริมาณสารประกอบสูงจะมีความสามารถในการยับยั้งที่สูง ผลการทดลองทำให้ทราบว่าฝางมีศักยภาพเหมาะสมที่จะพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อนำไปใช้บรรเทาภาวะน้ำตาลในเลือดสูง

**คำสำคัญ**: การต้านอนุมูลอิสระ, ค่าสหสัมพันธ์, ภาวะน้ำตาลในเลือดสูง, สมุนไพรไทย, แอลฟา-กลูโคซิเดส

**Abstract**

This study concentrates on identifying correlation values among total compound quantities, antioxidant activity, and the capability to inhibit the alpha-glucosidase enzyme. The investigation involves screening extracts from five different herbal plants, which include Indian Gooseberry fruit (IGB), Chebulic Myrobalan fruit (CML), Beleric Myrobalan fruit (BML), Sappanwood heartwood (SPW), and Licorice root (LCR) suggesting a potential alternative treatment for individuals with hyperglycemia. All plant varieties have undergone extraction by immersion in solvents such as 95% ethanol (95EtOH), 70% ethanol (70EtOH), 50% ethanol (50EtOH), methanol (MeOH), and ethyl acetate (EtOAc). The research has revealed that antioxidant activity can serve as a criterion for choosing herbal plants effective in inhibiting the alpha-glucosidase enzyme, showing a positive correlation with the total compound content. Extracts with elevated compound levels exhibit stronger inhibitory capabilities. The experimental findings indicated the potential development of SPW extracts into a product for alleviating hyperglycemia.

**Keywords**: Alpha-glucosidase, Antioxidant activity, Correlation, Herbal extract, Hyperglycemia

**คำนำ**

เอนไซม์แอลฟา-กลูโคซิเดส (EC 3.2.1.20) เป็นเอนไซม์ที่ย่อยคาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อนให้เป็นน้ำตาลกลูโคสและดูดซึมน้ำตาลกลูโคสผ่านทางผนังลำไส้เล็ก หากมีการดูดซึมน้ำตาลในเลือดมากเกินไปอาจก่อให้เกิดภาวะน้ำตาลในเลือดสูง จนไม่สามารถควบคุมระดับน้ำตาลได้ (Wu et al., 2014) ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระของร่างกายลดลง เกิดการสะสมของอนุมูลอิสระในร่างกาย นำไปสู่ภาวะเครียดออกซิเดชัน (oxidative stress) ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่เกี่ยวข้องกับการเกิดโรคแทรกซ้อนอื่น ๆ สารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) จะช่วยต่อต้านอนุมูลอิสระ เพื่อไม่ให้อนุมูลอิสระสร้างความเสียหายให้กับเซลล์ ทำให้ระบบภูมิคุ้มกันในร่างกายทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น (Poppel and Golddbohm, 1995)

สารยับยั้งเอนไซม์แอลฟา-กลูโคซิเดส (Alpha-glucosidase inhibitors; AGIs) เช่น อะคาร์โบส (Acarbose) หรือเมทฟอร์มิน (Metformin) เป็นยาที่ใช้ในการรักษาผู้ป่วยที่มีภาวะน้ำตาลในเลือดสูง ซึ่งอาจป้องกันโรคเบาหวานชนิดที่ 2 โดยชะลอกระบวนการย่อยคาร์โบไฮเดรตให้เป็นน้ำตาล ส่งผลให้ระดับน้ำตาลในเลือดหลังรับประทานอาหารลดลง (Minshun et al., 2019) แต่ในการรักษาโดยใช้ยาในกลุ่มนี้ติดต่อกันเป็นเวลานานจะทำให้เกิดผลข้างเคียงต่อผู้ป่วย เช่น ภาวะตับเป็นพิษ ท้องอืด ท้องเฟ้อ และคลื่นไส้ (Singh et al., 2023) เพื่อลดผลข้างเคียงดังกล่าว ผู้วิจัยสนใจศึกษาแหล่งของสารออกฤทธิ์ยับยั้งเอนไซม์แอลฟา-กลูโคซิเดสและมีฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระจากพืชสมุนไพร 5 ชนิด ได้แก่ ผลมะขามป้อม ผลสมอไทย ผลสมอพิเภก แก่นฝาง และรากชะเอมเทศ ซึ่งมีรายงานว่ามีสารประกอบจากธรรมชาติที่สามารถใช้ในการลดการดูดซึมของน้ำตาลได้

มะขามป้อม (*Phyllanthus emblica* L.) เป็นพืชในวงศ์ Euphorbiaceae มีการนำไปใช้ประโยชน์ทางเภสัชวิทยา ไม่ว่าจะเป็นการต้านอนุมูลอิสระ ต้านเบาหวาน และต้านการอักเสบ สารประกอบสำคัญที่พบในการสกัดผลมะขามป้อมด้วยเอทานอล ได้แก่ ฟลาโวนอยด์ (flavonoid) อัลคาลอยด์ (alkaloid) ซาโปนิน (saponin) และแทนนิน (tannin) (Sumalatha, 2013) สมอไทย (*Terminalia chebula*) เป็นพืชในวงศ์ Combretaceae ประกอบด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ เช่น โพลีฟีนอล (polyphenol) ฟลาโวนอยด์ (flavonoid) เทอร์พีนอยด์ (terpenoid) อัลคาลอยด์ (alkaloid) และไกลโคไซด์ (glycoside) นอกจากนั้นยังพบว่าสกัดสมอไทยด้วยเมทานอลสารสกัดที่ได้จะอุดมด้วยไตรเทอร์พีนอยด์ มีฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระที่ดีสูงกว่าการใช้เอทานอล และสารสกัดยังมีความสามารถในการยับยั้งเอนไซม์แอลฟา-กลูโคซิเดสด้วย (Chang and Lin, 2012; Lee et al., 2017) สมอพิเภก (*Terminalia bellirica*) เป็นพืชในวงศ์ Combretaceae ประกอบด้วยสารสำคัญ เช่น ฟลาโวน (flavone) กรดแกลลิค (gallic acid) และกรดเอลลาจิก (ellagic acid) เป็นส่วนใหญ่ ที่สามารถต้านอนุมูลอิสระและลดระดับน้ำตาลโดยการยับยั้งเอนไซม์แอลฟา-กลูโคซิเดสได้ (Lobo et al., 2010) ชะเอมเทศ (*Glycyrrhiza glabra*) เป็นพืชวงศ์ Leguminosae มีสารพฤกษเคมี เช่น ไตรเทอร์ปีน (triterpene) พอลีแซคคาไรด์ (polysaccharide) ไกลโคไซด์ (glycoside) และกรดกลีเซอไรซิก (glycyrrhizic acid) โดยสารฟลาโวนอยด์ในรากของชะเอมเทศมีความสามารถในการยับยั้งเอนไซม์แอลฟา-กลูโคซิเดส และต้านอนุมูลอิสระ (Maione et al., 2015) ฝาง (*Caesalpinia sappan* L.) เป็นพืชวงศ์ Leguminosae โดยองค์ประกอบทางเคมีของแก่นฝางประกอบด้วย สารประกอบ ฟีนอล (phenolic compound) ฟลาโวน (flavone) และสารบราซิลิน (brazilin) ที่พบเป็นองค์ประกอบหลักของแก่นฝาง มีฤทธิ์ทางชีวภาพที่หลากหลาย เช่น การต้านอนุมูลอิสระ ฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรีย และมีความสามารถที่จะช่วยลดระดับน้ำตาลได้ (Gao et al., 2015) ดังนั้นผู้วิจัยได้ทำการศึกษาค่าสหสัมพันธ์เพียร์สัน (Oontawee et al., 2023) เพื่อเปรียบเทียบตัวแปรตาม 2 ตัวแปรระหว่างปริมาณสารประกอบรวม ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ และความสามารถในการยับยั้งเอนไซม์แอลฟา-กลูโคซิเดส เพื่อคัดเลือกสารสกัดสมุนไพรที่มีศักยภาพในการลดระดับน้ำตาลในเลือดสำหรับนำไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ต่อไป

**อุปกรณ์และวิธีการ**

*การเตรียมสารสกัดสมุนไพร*

นำชิ้นส่วนสมุนไพรแห้ง ได้แก่ ผลมะขามป้อม ผลสมอไทย ผลสมอพิเภก แก่นฝาง และรากชะเอมเทศ จากบริษัท สมุนไพรท่าพระจันทร์ จำกัด มาอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ให้น้ำหนักคงที่ บดด้วยเครื่องปั่นผลไม้ จากนั้นนำผงพืชสมุนไพรที่ได้มาร่อนผ่านตะแกรงที่มีรูขนาด 600 µm ทำการสกัดพืชสมุนไพรด้วยวิธีการแช่หมัก โดยใช้ทั้งหมด 5 ตัวทำละลาย ได้แก่ 95EtOH, 70EtOH, 50EtOH, MeOH และ EtOAc และใช้อัตราส่วนผงพืชสมุนไพรต่อตัวทำละลายเป็น 1 ต่อ 10 (3 g : 30 mL) จากนั้นนำไปวางไว้ในที่มืดที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 3 วัน แล้วนำมากรองด้วยตัวกรองเซลลูโลส อะซิเตทขนาดรูพรุน 0.45 µm ทำการระเหยตัวทำละลายออกจนหมดในตู้อบลมร้อนอุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส จนสารสกัดมีลักษณะเป็นของเหลวหนืด เก็บไว้ในหลอดแก้วทึบแสงที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบ ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระและฤทธิ์การยับยั้งเอนไซม์แอลฟา-กลูโคซิเดสต่อไป

*การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวม*

การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวม (total phenolic content, TPC) ด้วยวิธี Folin-Ciocalteu ที่ดัดแปลงจาก Oontawee et al. (2023) มีการใช้กรดแกลลิกเป็นฟีนอลิกมาตรฐาน ทำการเตรียมสารสกัดโดยละลายสารสกัดด้วย 99.98EtOH ปรับความเข้มข้นของสารสกัดเป็น 1 mg/mL และทำการเจือจางสารสกัดด้วยน้ำปราศจากไอออนจนได้เป็นสารละลายที่มีความเข้มข้น 0.1 mg/mL ทำการวิเคราะห์ TPC โดยใช้สารละลายตัวอย่าง ปริมาตร 50 µL ทำการเจือจางสารสกัด 2 เท่า (2-fold serial dilution) ในไมโครเพลทด้วย 10EtOH ให้ได้สารสกัด 4 ความเข้มข้น (0.00625–0.05 mg/mL) จำนวน 3 ซ้ำ แล้วนำมาผสมกับ 100 µL ของ Folin-Ciocalteu reagent ความเข้มข้น 0.4 M จากนั้นทำการเติมโซเดียมคาร์บอเนต ($Na_2CO_3$) ความเข้มข้น 7.5 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 75 µL บ่มในที่มืดที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ค่าความยาวคลื่น 700 nm ด้วยเครื่องอ่านไมโครเพลท (BioTek, PowerWave XS2, USA) ส่วนสารมาตรฐานกรดแกลลิกนั้นได้เตรียมเป็น 7 ความเข้มข้น (0.00078125–0.05 mg/mL) และมีการทำปฏิกิริยาเช่นเดียวกับสารตัวอย่าง คำนวณ TPC ตาม Equation 1

$$\text{TPC (mg GAE/g extract)} = (S_E / S_{GAE}) \times 1000 \quad (1)$$

Where; TPC of the extracts is expressed as mg gallic acid equivalents (GAE) per gram of dry plant material. $S_E$ ; Slope of extract and $S_{GAE}$ ; Slope of gallic acid.

*การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์รวม*

การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์รวม (total flavonoid content, TFC) ด้วยวิธี Aluminum chloride ที่ดัดแปลงจาก Pekal and Pyrzynska (2014) มีการใช้สารเคอร์ซิตินเป็นฟลาโวนอยด์มาตรฐาน เตรียมสารละลายวิธีเดียวกับการเตรียมในการวิเคราะห์ TPC จากนั้นใช้สารสกัดปริมาตร 80 µL เจือจางสารสกัด 2 เท่า ในไมโครเพลทด้วย 10EtOH ให้ได้สารสกัด 4 ความเข้มข้น (0.00625–0.05 mg/mL) จำนวน 3 ซ้ำ ผสมกับโซเดียมไนไตรท์ ($NaNO_2$) ความเข้มข้น 3% ปริมาตร 50 µL จากนั้นทำการเติมอลูมิเนียมคลอไรด์ ($AlCl_3$) ความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 50 µL ท้ายที่สุดทำการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 1.0 M ปริมาตร 50 µL เขย่าและบ่มไว้ในที่มืดที่

อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ค่าความยาวคลื่น 510 nm ส่วนสารมาตรฐานเคอร์ซิตินนั้นได้เตรียมเป็น 7 ความเข้มข้น (0.00078125–0.05 mg/mL) และทำปฏิกิริยาเช่นเดียวกับสารตัวอย่าง คำนวณ TFC ตาม Equation 2

$$TFC\ (mg\ QE/g\ extract) = (S_E / S_{QE}) \times 1000 \quad (2)$$

Where; TFC is expressed as mg quercetin equivalents (QE) per gram of dry plant material.
$S_E$; Slope of extract and $S_{QE}$; Slope of quercetin.

*การวิเคราะห์ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ*

วิเคราะห์ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant activity; AOA) ด้วยวิธี DPPH assay ที่ดัดแปลงจาก Oontawee et al. (2023) ทำการเตรียมสารสกัดโดยทำการละลายสารสกัดด้วย 99.98EtOH ปรับความเข้มข้นของสารสกัดเป็น 1 mg/mL และทำการเจือจาง 10 เท่า จนได้เป็นสารละลายที่มีความเข้มข้น 0.1 mg/mL จากนั้นนำสารสกัดตัวอย่างปริมาตร 100 µL ทำการเจือจาง 2 เท่าในไมโครเพลทด้วย 99.98EtOH ให้ได้สารสกัด 7 ความเข้มข้น (0.78125 - 50 µg/mL) จำนวน 3 ซ้ำ และเติมอนุมูล 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) ความเข้มข้น 1.2 mM ปริมาตร 100 µL โดยตัวควบคุมสีจะทำการเติมเอทานอลแทน DPPH และตัวควบคุม DPPH จะเติมตัวทำละลายของสารสกัดแทนสารสกัด จากนั้นบ่มในที่มืดที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 520 nm คำนวณค่า AOA ตาม Equation 3 จากนั้นนำไปคำนวณค่าความเข้มข้นในการยับยั้ง 50 เปอร์เซ็นต์ (inhibitory concentration at 50%; $IC_{50}$) ด้วยโปรแกรม R-Studio 1.0.143 โดยในการวิจัยนี้ใช้กรดแอสคอบิก (Ascobic acid, AA) เป็นสารต้านอนุมูลอิสระมาตรฐาน เปรียบเทียบค่า AOA กับสารสกัดตัวอย่าง

$$AOA\ (\%) = [(\ OD_{DPPH} - (OD_E - OD_C)] / OD_{DPPH}) \times 100 \quad (3)$$

Where; AOA is expressed as inhibitory concentration at 50% ($IC_{50}$).
$OD_{DPPH}$ ; Optical density of DPPH, $OD_E$; Optical density of extract and $OD_C$; Optical density of control.

*การวิเคราะห์ฤทธิ์การยับยั้งเอนไซม์แอลฟา-กลูโคซิเดส*

วิเคราะห์ฤทธิ์การยับยั้งเอนไซม์แอลฟา-กลูโคซิเดส (Alpha glucosidase inhibitory activity; AGD) จาก *Saccharomyces cerevisiae* ด้วยวิธีที่ดัดแปลงจาก Shihabudeen et al. (2011) โดยทำการละลายสารสกัดด้วยไดเมททิลซัลฟอกไซด์ (DMSO) ปรับความเข้มข้นของสารสกัดเป็น 1 mg/mL จากนั้นเจือจางสารสกัดด้วย DI water จนได้เป็นสารละลายที่มีความเข้มข้น 0.1 mg/mL วิเคราะห์ฤทธิ์การยับยั้งโดยใช้สารละลายตัวอย่าง 50 µL เจือจางสารสกัด 2 เท่าในไมโครเพลทด้วย 99.98EtOH ให้ได้สารสกัด 7 ความเข้มข้น (0.78125–50 µg/mL) จำนวน 3 ซ้ำ และเติมเอนไซม์แอลฟา-กลูโคซิเดส 0.1 U/mL ที่ละลายในฟอสเฟตบัฟเฟอร์ พีเอช 6.8 ปริมาตร 50 µL ทำการบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นทำการเติมซับสเตรต *p*-nitrophenyl-α-D-glucopyranoside ความเข้มข้น 1.25 mM ปริมาตร 50 µL บ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที หยุดปฏิกิริยาโดยการเติม $Na_2CO_3$ ความเข้มข้น 1 M ปริมาตร 80 µL วัดค่าดูดกลืนแสงที่ค่าความยาวคลื่น 415 nm คำนวณค่า AGD ตาม Equation 4 จากนั้นนำไป

คำนวณค่า $IC_{50}$ ด้วยโปรแกรม R-Studio 1.0.143 โดยในการวิจัยนี้ใช้สารละลายมาตรฐานอะคาร์โบส (Acarbose) เปรียบเทียบค่า AGD กับสารสกัดตัวอย่าง

$$AGD\ (\%) = [(OD_{NP} - (OD_E - OD_C)]/OD_{NP}) \times 100 \quad (4)$$

Where; AGD is expressed as Inhibitory concentration at 50% ($IC_{50}$).

$OD_{NP}$ ; Optical density of substate, $OD_E$; Optical density of extract and $OD_C$; Optical density of control.

*การวิเคราะห์ทางสถิติ*

งานวิจัยนี้แสดงข้อมูลในรูปแบบ ค่าเฉลี่ย±ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย และได้ใช้สถิตินอนพาราเมตริก (non-parametric statistics) ในการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระหว่าง 2 กลุ่มการทดลองด้วย Wilcoxon signed-rank test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 นอกจากนี้ยังได้วิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน (Pearson's correlation coefficient) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตาม 2 ตัวแปร

**ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง**

*การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบของสารสกัดสมุนไพร*

การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวม (TPC) พบว่า สารสกัดแก่นฝางที่สกัดด้วยทุกตัวทำละลายมีปริมาณสูงที่สุด โดยสามอันดับแรกที่มีปริมาณมากที่สุดสกัดด้วย 95EtOH 70EtOH และMeOH มีค่า 471.63±40.28 453.81±6.96 และ 417.61±21.98 mg GAE/g extract ตามลำดับ (Fig. 1A) สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์รวม (TFC) เช่นเดียวกับ TPC พบว่าสารสกัดแก่นฝางที่สกัดด้วยทุกความเข้มข้นมีปริมาณที่สูงที่สุด (Fig. 1B) โดยสามอันดับแรกที่พบมากที่สุดสกัดด้วย 95EtOH 70EtOH และ MeOH มีค่า 443.59±32.03 405.13±22.20 และ 359.08±17.86 mg QE/g extract ตามลำดับ เมื่อมาดูความสัมพันธ์ระหว่าง TPC และ TFC พบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ 0.905 นั่นคือสารสกัดที่มีค่า TPC สูงจะมีค่า TFC ที่สูงด้วย ทั้งนี้ยังไม่พบการรายงานถึงค่าสหสัมพันธ์ระหว่าง TPC และ TFC ของสารสกัดแก่นฝาง แต่มีรายงานการเปรียบเทียบ TPC และ TFC ของสารสกัดแก่นฝางและผลมะขามป้อม พบว่า สารสกัดแก่นฝางมีปริมาณสารประกอบที่สูงกว่าสารสกัดผลมะขามป้อม (Oontawee et al., 2023)

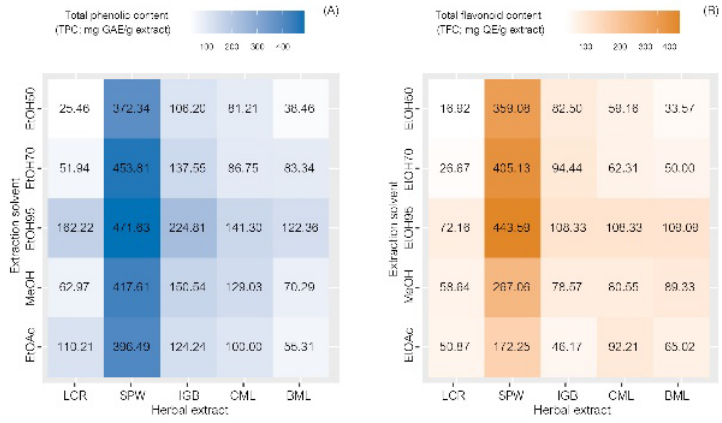



**Fig. 1** (A) Total phenolic content (mg GAE/g extract); (B) Total flavonoid content (mg QE/g extract) from medicinal plants extracted with various solvents

*การวิเคราะห์ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ*

การวิเคราะห์ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ (AOA) ด้วยวิธี DPPH ของสารสกัดจากพืชสมุนไพร รายงานผลเป็นค่า $IC_{50}$ หมายถึง ความเข้มข้นของสารต้านอนุมูลอิสระที่ทำให้ความเข้มข้นของอนุมูลอิสระลดลง 50 เปอร์เซ็นต์ โดยพิจารณาจากค่าที่มีค่าน้อยจะมีค่า AOA ที่สูง ผลการทดลองพบว่าค่า $IC_{50}$ ของสารสกัดแก่นฝางที่สกัดด้วย MeOH มีค่า 2.95±0.22 µg/mL ซึ่งมีฤทธิ์สูงที่สุด รองลงมาคือสารสกัดผลมะขามป้อมและสารสกัดแก่นฝางที่สกัดด้วย 95EtOH มีค่า 2.96±0.36 และ3.07±0.29 µg/mL ตามลำดับ สำหรับค่า $IC_{50}$ ของสารต้านอนุมูลอิสระมาตรฐาน ได้แก่ กรดแอสคอบิก (AA) มีค่า 3.39±0.10 µg/mL (Fig. 2)

จากการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่าง TPC และ AOA มีค่า -0.335 แสดงให้เห็นว่าสารสกัดที่มีค่า TPC สูงจะทำให้ค่า $IC_{50}$ ของการต้านอนุมูลอิสระลดลง (ยับยั้งได้ดีขึ้น) ทั้งนี้เนื่องจากสารประกอบฟีนอลิกมีโครงสร้างของหมู่ฟีนอลที่สามารถรับอิเล็กตรอนจากอนุมูลอิสระ ดังนั้น TPC จึงสอดคล้องกับ AOA (Bendary et al., 2013) เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Chaudhari and Mahajan (2015) ที่ศึกษาพืชสมุนไพรในอินเดียจำนวน 20 ชนิด รายงานผลว่าผลสมอไทย สมอพิเภก และผลมะขามป้อมมีคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระที่สูงสัมพันธ์กับการมีอยู่ของปริมาณฟีนอลิกรวมและปริมาณฟลาโวนอยด์รวมในปริมาณที่สูงตามการวิเคราะห์สหสัมพันธ์เพียร์สัน นอกจากนี้ในงานวิจัยของ Kaenu and Kongkham (2021) ได้ศึกษาผลของสารสกัดแก่นฝางด้วยเอทานอลต่อความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ พบว่า แก่นฝางที่สกัดด้วย 95EtOH ประกอบด้วย brazilin, alkaloid, tannin และ saponin ซึ่งอาจมีส่วนในการต้านอนุมูลอิสระ โดยปริมาณฟีนอลิกรวมมีความสัมพันธ์กับความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.01$)

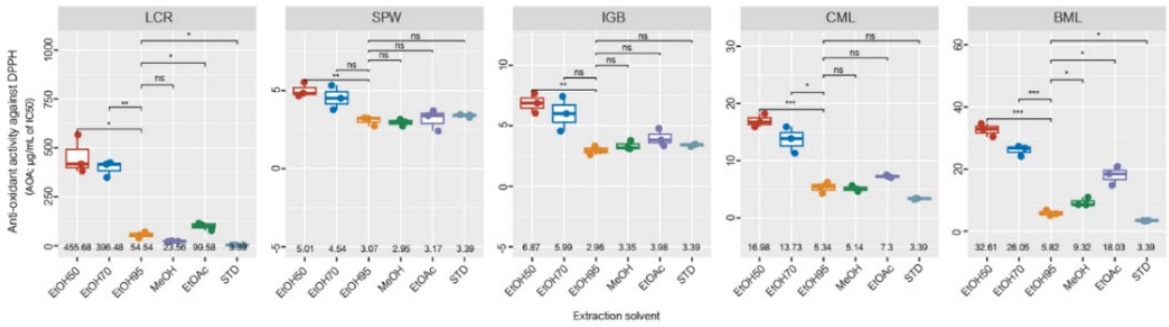



**Fig. 2** Box-and-wishker plots of AOA; A quantitative measure representing the amount of $IC_{50}$ of extracts derived from medicinal plants using a variety of solvents

*การวิเคราะห์กิจกรรมการยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์แอลฟา-กลูโคซิเดส*

การวิเคราะห์กิจกรรมการยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์แอลฟา-กลูโคซิเดส (AGD) พบว่าค่า $IC_{50}$ ของสารสกัดแก่นฝางที่สกัดด้วย 95EtOH มีค่า 18.38±2.87 µg/mL ซึ่งมีค่า AGD ที่สูงที่สุด รองลงมาคือสารสกัดแก่นฝางที่สกัดด้วย MeOHและ70EtOH มีค่า 23.42±1.99 และ 27.10±3.39 µg/mL ตามลำดับ สำหรับค่า $IC_{50}$ ของสารมาตรฐานอะคาร์โบส มีค่า 10.17±0.24 µg/mL (Fig. 3) เมื่อเปรียบเทียบกันในปัจจัยของพืชสมุนไพร พบว่า สารสกัดผลมะขามป้อม ผลสมอไทย ผลสมอพิเภท และแก่นฝาง มีค่า AGD สูงใกล้เคียงกัน

จากการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน มีค่าสัมประสิทธ์สหสัมพันธ์ระหว่าง AGD และ AOA อยู่ที่ 0.646 จะเห็นได้ว่า สารสกัดที่มีค่า AOA สูงจะมีค่า AGD ที่สูงด้วย สำหรับ AGD กับ TPC และ TFC มีค่าสัมประสิทธ์อยู่ที่ -0.437 และ -0.415 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าสารสกัดที่มีปริมาณ TPC และTFC สูงจะทำให้ค่า $IC_{50}$ ของ AGD ลดลง จากงานวิจัยของ Artanti et al. (2023) พบว่าเมื่อสกัดแก่นฝางด้วยเอทานอล สารสกัดจะมีความสามารถในการยับยั้งแอลฟา-กลูโคซิเดส โดยปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์ของสารสกัดสัมพันธ์กับการออกฤทธิ์ของสารมาตรฐานอะคาร์โบสในการยับยั้งแอลฟากลูโคซิเดส

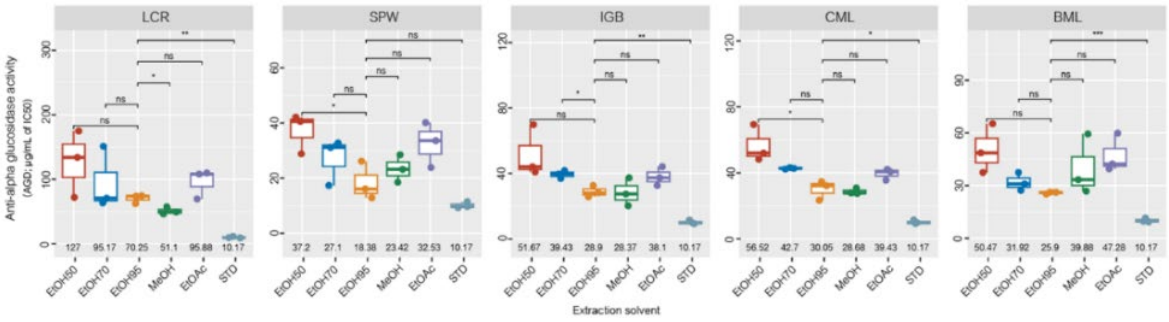



**Fig. 3** Box-and-wishker plots of AGD; A quantitative measure representing the amount of $IC_{50}$ of extracts derived from medicinal plants using a variety of solvents

## สรุป

จากการคัดกรองสารสกัดจากพืชสมุนไพรเพื่อนำไปยับยั้งเอนไซม์แอลฟา-กลูโคซิเดส ศึกษาความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ รวมถึงปริมาณฟีนอลิกรวมและฟลาโวนอยด์รวม โดยทำการสกัดพืชด้วยวิธีการแช่ใน 5 ตัวทำละลาย แสดงให้เห็นว่าสารสกัดแก่นฝางที่สกัดด้วย 95EtOH ให้ AOA สูง เทียบกับสารต้านอนุมูลอิสระมาตรฐานกรดแอสคอบิก

โดยมีค่า $IC_{50}$ อยู่ที่ 2.96±0.36 µg/mL และ 3.39±0.10 µg/mL ตามลำดับ อีกทั้งยังมี AGD ที่สูง ใกล้เคียงกับสารละลายมาตรฐานอะคาร์โบส มีค่า $IC_{50}$ อยู่ที่ 18.38±2.87 µg/mL และ 10.17±0.24 µg/mL ตามลำดับ สัมพันธ์กับการมีอยู่ของ TPC ที่สูง โดยมีค่า 471.63±40.28 mg GAE/g extract และ TFC สูง มีค่า 443.59±32.03 mg QE/g extract จากข้อมูลค่าสหสัมพันธ์ของปริมาณสารประกอบรวม ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ และความสามารถในการยับยั้งเอนไซม์แอลฟา-กลูโคซิเดส พบว่าสารสกัดที่มีค่า AOA สูงจะมีความสามารถในการยับยั้งเอนไซม์แอลฟา-กลูโคซิเดสสูง และปริมาณฟีนอลิกรวมเกี่ยวข้องกับฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ ดังนั้น สารสกัดแก่นฝางสกัดด้วย 95EtOH จึงมีความน่าสนใจนำไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อประยุกต์ใช้ในการบรรเทาภาวะน้ำตาลในเลือดสูงต่อไป

**กิตติกรรมประกาศ**

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนจากทุนบัณฑิตเรียนดีเพื่อการศึกษาต่อระดับบัณฑิตศึกษา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ตามบันทึกข้อตกลงเลขที่ 09/2563)

**เอกสารอ้างอิง**

Artanti, N., Dewijanti, I.D., Muzdalifah, D., Windarsih, A., Suratno, S., Handayani, S. 2023. Alpha glucosidase inhibitory activity of combination of *Caesalpinia sappan* L. and *Garcinia mangostana* extract. J. Appl. Pharm. Sci. 13: 189–198. doi.org/10.7324/JAPS.2023.117478

Bendary, E., Francis, R.R., Ali, H.M.G., Sarwat, M.I., El Hady, S. 2013. Antioxidant and structure–activity relationships (SARs) of some phenolic and anilines compounds. Ann. Agric. Sci. 58: 173–181.

Chang, C.L., Lin, C.S. 2012. Phytochemical composition, antioxidant Activity, and neuroprotective effect of *Terminalia chebula* Retzius extracts. Evid. Based Complement. Alternat. Med. 2012: 125247.

Chaudhari, G., Mahajan, R. 2015. Comparative antioxidant activity of twenty traditional Indian medicinal plants and its correlation with total flavonoid and phenolic content. Int. J. Pharm. Sci. Rev. Res. 30: 105–111.

Gao, X.J., Wang, T.C., Zhang, Z.C., Cao, Y.G., Zhang, N.S., Guo, M.Y. 2015. Brazilin plays an anti-inflammatory role with regulating Toll-like receptor 2 and TLR 2 downstream pathways in *Staphylococcus aureus*-induced mastitis in mice. Int. Immunopharmacol. 27: 130–137.

Kaenu, A., Kongkham, S. 2021. Effect of ethanolic extraction and partial purification on phenolic compounds content and antioxidant capacities of *Caesalpinia sappan* Heartwood. TJST.10: 96–108.

Lee, D.Y., Kim, H.W., Yang, H., Sung, S.H. 2017. Hydrolyzable tannins from the fruits of *Terminalia chebula* Retz and their α-glucosidase inhibitory activities. Phytochemistry 137: 109–116. doi.org/10.1016/j.phytochem.2017.02.006

Lobo, V.C., Phatak, A., Chandra, N. 2010. Antioxidant availabiltiy of Beheda (*Terminalia bellerica* (Roxb.)) in relation to its medicinal uses. Pharmacogn. J. 2: 338–344. doi.org/10.1016/S0975-3575(10)80106-3

Maione, F., Russo, R., Khan, H., Mascolo, N. 2016. Medicinal plants with anti-inflammatory activities. Nat. Pro. Res. 30: 1343–1352. doi.org/10.1080/14786419.2015.1062761

Minchun, Z., Rilu, F., Mei, Y., Cheng, Q., Zheng, W., Wei, L., Jing, M. 2019. Effects of metformin, acarbose, and sitagliptin monotherapy on gut microbiota in Zucker diabetic fatty rats. BMJ Open Diabetes Res. Care. 7: e000717. doi.org/10.1136/bmjdrc-2019-000717

Shihabudeen, H.M.S., Priscilla, D.H, Thirumurugan, K. 2011. Cinnamon extract inhibits α-glucosidase activity and dampens postprandial glucose excursion in diabetic rats. Nutr. Metab. 8: 46. doi.org/10.1186/1743-7075-8-46

Oontawee, S., Phonprapai, C., Itharat, A., Asasutjarit, R., Davies, N.M. 2023. Mucus-penetrating nanovesicles encapsulating a novel anti-inflammatory recipe as a transmucosal remedy: Herbal extract preparation, synergistic combination, and niosomal encapsulation. J. Herb. Med. 40: 100670. doi.org/10.1016/j.hermed.2023.100670

Pekal, A., Pyrzynska, K. 2014. Evaluation of aluminium complexation reaction for flavonoid content assay. Food Anal. Methods. 7: 1776–1782. doi.org/10.1007/s12161-014-9814-x

Singh, A., Singh, K., Sharma, A., Kaur, K., Kaur, K., Chadha, R., Bedi, P.M.S. 2023. Recent developments in synthetic α-glucosidase inhibitors: A comprehensive review with structural and molecular insight. J. Mol. Struct. 1281: 135115. doi.org/10.1016/j.molstruc.2023.135115

Sumalatha, D. 2013. Antioxidant and antitumor activity of *Phyllanthus emblica* in colon cancer cell lines. Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci. 2: 189–195.

Wu, Y., Ding, Y., Tanaka, Y., Zhang, W. 2014. Risk factors contributing to type 2 diabetes and recent advances in the treatment and prevention. Int. J. Med. Sci. 11: 1185–1200. doi.org/10.7150/ijms.10001

van Poppel, G., Goldbohm, R.A. 1995. Epidemiologic evidence for beta-carotene and cancer prevention. Am. J. Cli. 62: 1393–1402. doi.org/10.1093/ajcn/62.6.1393S

# สาขาทรัพยากรธรรมชาติ และสิ่งแวดล้อม

(Subject: Natural Resources And Environment)

---

# ภาคบรรยาย

(Oral Presentation)

# Chemically and biologically changing in the oxidation pond system for municipal wastewater treatment

Chalisa Tudsanaton[a,b], Thanit Pattamapitoon[a,*], Sathapat Saneha[a], Parkin Maskulrath[a]

[a]Department of Environmental Science, Faculty of Environment, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

[b]The King's Royally Initiated Laem Phak Bia Environmental Research and Development Project, Chaipattana Foundation, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding Author. E-mail address: Thanit.pa@ku.th

**Abstract**

The LERD project's community wastewater treatment system consists of a sedimentation pond, three oxidation ponds, and a stabilization pond, which relies mainly on the process of treating organic substances contaminated in wastewater with a biological process. Studies have shown that the amount of dissolved oxygen in water is an important parameter that determines the changes in nutrients by different microbial groups. In the sedimentation pond, anaerobic degradation of nitrogen can be found through the denitrification process because it is a pond with a high concentration of organic substances. In the oxidation pond and stabilization pond, aerobic degradation of organic substances by heterotrophic bacteria can be found, resulting in inorganic substances as products, which will be uptake by autotrophic bacteria (cyanobacteria/phytoplankton), resulting in an increased of DO and Chlorophyll-a and a decrease BOD, $NH_3$, $NO_3^-$, and total bacteria. This study concludes that the amount of nutrients is an important factor in the change of bacteria community within the wastewater treatment system under different function.

**Keywords**: Biodegradation, Biological treatment, Domestic wastewater, Oxidation pond, Water quality

## Introduction

The urbanization and increase in human activities due to the growing population have resulted in increased water use as more than 80% of the domestic water usage are converted into community domestic wastewater (Sirianuntapiboon, 2020). Such wastewater contains organic substances that can be decomposed through natural processes, consisting of proteins, carbohydrates, and fats. However, if such wastewater is released into the source natural water sources it will directly cause polluted environmental problems. To solve this problem, wastewater has been collected into various wastewater treatment systems in accordance to the appropriateness of the wastewater characteristics and topographical features. In such example, Thailand is located in the humid tropics making the climate suitable for the growth and organic decomposition activities of various bacteria to eliminate organic contaminants in wastewater mentioned. The community wastewater treatment system using the oxidation pond system is therefore one system that is popular. Having the location of the pond being in the open with no shade, sunlight and wind are the natural processes that supports the treatment of domestic wastewater. In popular design, many oxidation pond systems use an overflow system that allows for the water to flows through the weir from one pond to the next. As in each pond, different activities of decomposing organic matter by various groups of bacteria working together in appropriate conditions according to the role and function of each pond. Such examples can be seen with the oxidation ponds system of The King's royally initiated Laem Phak Bia Environmental Research and Development (LERD) Project, where the design of the oxidation ponds consisted of the Sedimentation Pond, whose main function is sedimentation. Therefore, it is the pond with the highest depth, resulting in anaerobic degradation. Three Oxidation ponds with the main function of decomposing organic substances using oxygen by various groups of bacteria working together and receiving oxygen for use as a terminal electron acceptor of aerobic bacteria from the photosynthesis process of cyanobacteria and phytoplankton. Lastly the Stabilization Pond, having main function of adjusting water conditions close to natural conditions and eliminating pathogenic microorganisms through natural processes before releasing into natural water sources. From having each pond performing different function, this study aims to look into the dynamic of the chemical and biological water qualities of a wastewater treatment system using the oxidation ponds system.

## Materials and Methods

### *Study site*

The domestic wastewater oxidation ponds is location at The King's Royally Initiated Laem Pak Bia Environmental Research and Development (LERD) Project, Ban Laem Sub-distract, Laem Phak Bia District, Phetchaburi Province, Thailand. (UTM 1442240-1443480 N and 0619271-0619271 E). The treatment system is a series of 5 consecutive ponds, consisting of 1 sedimentation pond, 3 oxidation ponds, and 1 stabilization pond, receiving community domestic wastewater from the Phetchaburi Municipality. Wastewater is collected from the municipal sewage system and transfer to a collection facility within the municipality at the Ban Khlong

Yang, as at the collection site also acts as a pumping station which transfer the wastewater through closed HDPE pipes for a distance of 18 kilometers into the LERD project, as shown in Fig. 1.

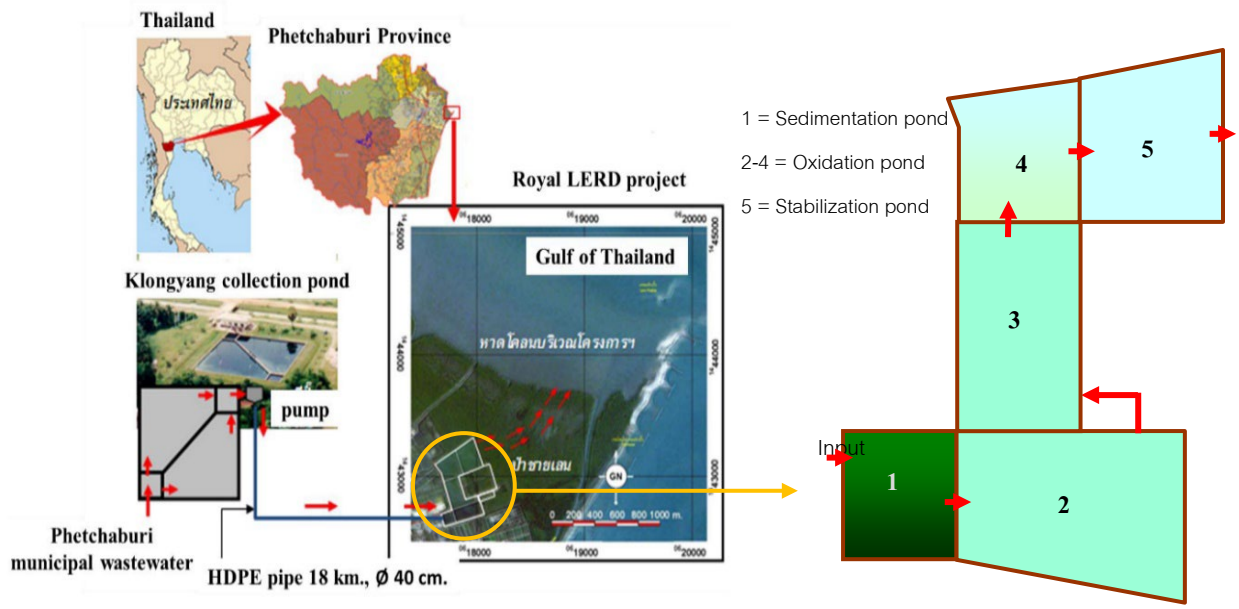



Fig. 1 Location of study site in the oxidation pond area of the LERD project

*Sample collection*

Wastewater samples were collected in the community wastewater treatment system using 3 ponds as a representative, consisting of a 1) the sedimentation pond (pond no.1), the oxidation pond (pond no.2) and a stabilization pond (pond no.5), during the dry season between 11:00 a.m. - 2:00 p.m. (Srichomphu et al, 2020). The samples were collected using a water sampler at 30 cm. from surface, transferred in a Polyethylene (PE) plastic bottle and maintain samples at 4°C for chemical water quality analysis and using the aseptic technique for analyzing Total bacteria and bacterial diversity with Next generation sequencing technique (NGS) collected.

*Sample analysis*

In the chemical analysis, the parameter that were analyzed were; Dissolved oxygen (DO), Biochemical oxygen demand (BOD), Nitrate-nitrogen ($NO_3^-$-N), Ammonia-nitrogen ($NH_3$-N), and Ortho-phosphorus ($PO_4^{3-}$) under the standard of the APHA, AWWA and WFE (2017). The biological parameters were Chlorophyll-a (Wintermans and De Mots, 1965; Saijo, 1975) and Total bacteria (TB) (APHA, AWWA and WFE, 2017). Prior to the analysis, the data acquire from the laboratory were then placed in the statical analysis under the process of Analysis of Variance (ANOVA)and compared the variance by the DMRT method under the confident intervals of 95% ($p < 0.05$)

## Results and Discussion

*Water quality*

Water quality is an indicator of organic biodegradation activity in the presence or absence of oxygen. The sedimentation pond is a pond that receives wastewater from a closed HDPE pipe after the transfer distance of 18 km, a within the pipeline an anaerobic condition is present (DO < 1.0 mg/L) (Dinicola, 2006; Zhang and Jinjarak et al., 2018; Zhang, 2018). As a result, the water entering the sedimentation pond has a low amount of dissolved oxygen (DO), however, after the retention time in the sedimentation pond (~7 days), when the water overflows through rectangular weir crest into the oxidation pond and later into the stabilization pond. The open design of the system allows for no shade covering the system, resulting in all the ponds receiving full sunlight in which the process supports the addition of oxygen from the process of photosynthesis by phytoplankton and the thermosiphon process (diffusion of oxygen into the water due to temperature differences). The additional oxygen addition was also achieved through the overflow process of the rectangular weir crest which was design to have the water overflow with the thickness that is in the range of 5–7 cm (Poommai, 2013; Noikondee et al., 2019; Srichomphu et al., 2024), resulting in the amount of dissolved oxygen increasing in the pond accordingly.

With such changes, it was found that there was a statistically significant difference ($p < 0.05$) (Table 1) of the Biochemical oxygen demand (BOD) that is decreasing by the pond sequence with statistical significance. Where the concentration was 31.17±8.49, 27.29±5.43, and 9.10±1.80 mg/L from sedimentation pond, oxidation pond, and stabilization pond, respectively. As a result, the aerobic heterotrophic bacteria have a decreased demand for dissolved oxygen, as this can be explained by the decreased BOD contributes to the increased amount of dissolved oxygen and also result of aerobic degradation by the aerobic heterotrophic bacteria to decrease in parallel with the total change bacteria (Fig. 2) as number of bacteria is proportional to the amount of nutrients that the cells can use. It was found that the highest amount was in the sedimentation pond and decreased significantly with the pond order being that there was $1.78\times10^{4}\pm8.89\times10^{3}$, $1.18\times10^{3}\pm5.30\times10^{2}$ and $1.97\times10^{3}\pm4.15\times10^{2}$ cfu/mL in sedimentation pond, oxidation pond, and stabilization pond, respectively. Lastly, the reduction of bacteria in wastewater treatment systems can also be influenced by solar radiation. (Pattamapitoon et al., 2013)

**Table 1** Duncan's statically of water qualities in Oxidation Pond system

| Ponds | Parameters | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | DO±S.D. (mg/L) | BOD±S.D. (mg/L) | $NH_3$±S.D. (mg/L) | $NO_3^-$±S.D. (mg/L) | TB±S.D. (cfu/mL) | Chl-a±S.D. (µg/mL) |
| Sedimentation | $2.26±3.67^{c}$ | $31.17±8.49^{a}$ | $1.82±0.14^{a}$ | $0.63±0.13^{b}$ | $1.78×10^{4}±8.89×10^{3a}$ | $13.44±4.23^{ab}$ |
| Oxidation | $5.86±2.65^{b}$ | $27.29±5.43^{a}$ | $1.44±0.17^{b}$ | $1.34±0.72^{a}$ | $1.18×10^{3}±5.30×10^{2b}$ | $10.61±7.23^{b}$ |
| Stabilization | $11.41±1.65^{a}$ | $9.10±1.80^{b}$ | $0.28±0.06^{c}$ | $0.41±0.19^{b}$ | $1.97×10^{3}±4.15×10^{2b}$ | $16.10±0.77^{a}$ |
| F-test | * | * | * | * | * | * |

* = Statistical variances at a level of 95% confidence

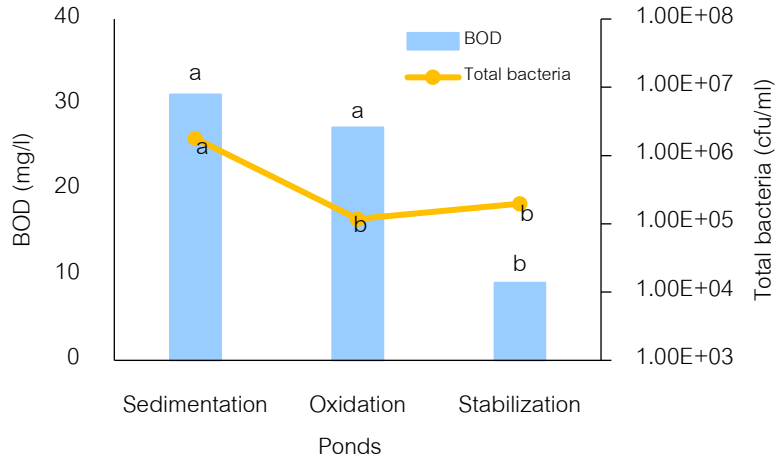



**Fig. 2** BOD and Total bacteria in Oxidation pond system

In the organic decomposition activities, the main product is carbon dioxide and other inorganic substances in the nitrogen group that includes ammonia ($NH_3$) from the ammonification process and nitrate ($NO_3^-$) from the nitrification process (Gao et al., 2003). The ammonification process is a process can be seen dominating in sedimentation pond under the lower level of dissolved oxygen, this concentration decreased significantly in the pond sequence. On the other hand, sedimentation ponds have the lowest nitrate content due to loss of nitrogen through the denitrification process of Denitrifying bacteria. When the water flows into the oxidation pond and stabilization pond the higher level of dissolved oxygen will oxidize ammonia to nitrate through the nitrification process by Ammonia oxidizing bacteria (AOB) and Nitrite oxidizing bacteria (NOB), also known as Nitrifying bacteria, which corresponds to the increased amount of nitrate. This is also in parallel with the growth phytoplankton and bacteria using nitrogen as a food source, which is classified as A type of macronutrient, both in the form of $NH_3$ and $NO_3^-$ (Saneha et al, 2023), the statistically significant of the increase of the quantity chlorophyll-a also confirms this phenomenon.

*Bacteria diversity*

The LERD project's municipal wastewater treatment system uses a process to treat organic substances contaminated in wastewater mainly through a biological process relying on the work of microorganisms. Especially in the group of aerobic bacteria and facultative anaerobic bacteria, which are classified as a heterotroph group. However, the decomposition of organic matter using oxygen produces organic products. Such inorganic substances are consumed by autotrophs or cyanobacteria/phytoplankton in the system. A study of bacterial diversity using 16s rRNA in sedimentation ponds, oxidation pond, and stabilization ponds (Fig. 3) found that bacteria in the phylum Proteobacteria is the dominant phylum that can be found in every pond due to its related to organic matter degradation and nutrient cycling (Nascimento et al., 2018). Bacteria in the phylum Proteobacteria, Bacteriota, Desulfpbacterota and Campilobacterota was found to have decrease in the quantity in the pond sequence. On the other hand, bacteria in the phylum Planctomycetota, Firmicutes, Patescibacteria, Chloroflexi, Acidobacteriota, Cyanobacteria, and SAR324_clade increased in abundance in the respective ponds, as shown in Fig. 3, as this was the result of changes in BOD and nitrogen concentrations directly affecting changes in the bacterial community (Wang et al., 2020) in which BOD and nitrogen-containing organic substances (proteins) that are classified as carbon and nitrogen sources. These nutrients are important for growth, energy and various activities of bacteria. However, the increase Cyanobacteria in the pond sequence, which were the mainly oxygen producers has also suggested to be accounted for more than 80% of the oxygen measured in the water (Yin et al., 2021) as this was in consistent with the increased amount of dissolved oxygen in the pond sequence (Table 1).

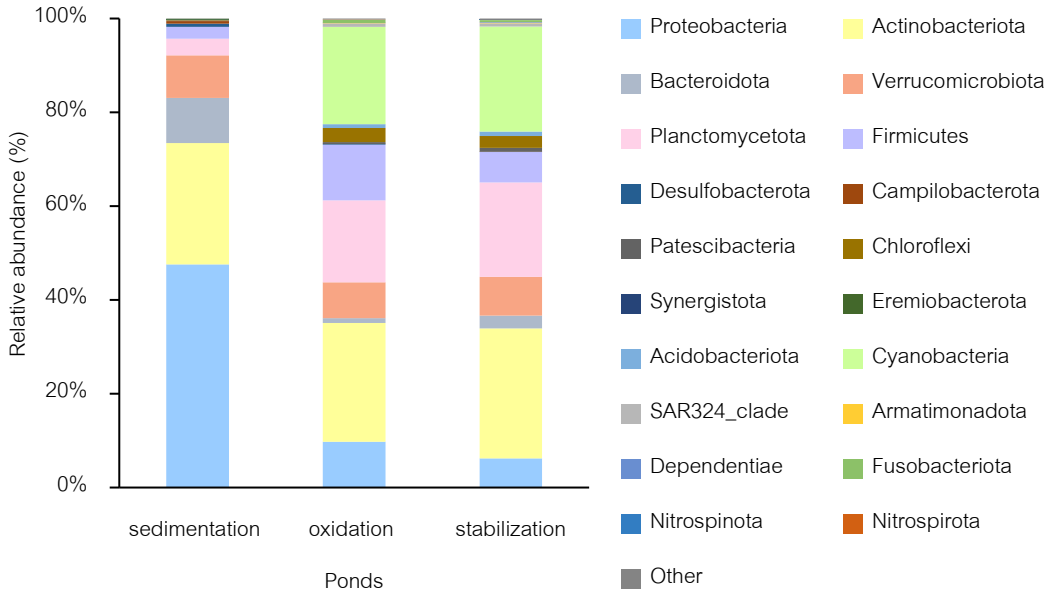



**Fig. 3** Relative abundance of the phyla obtained in Oxidation Pond system

## Conclusion

Dissolved oxygen is regarded as the main factor influencing chemical changes, particularly in macronutrients such as carbon and nitrogen groups. In the wastewater treatment system, the presence of bacterial in the system affects the biological changes, influencing both the quantity and diversity in the system as this occurs within the context of a natural treatment process.

## Conflict of Interest

The authors declare that there are no conflicts of interest.

## Acknowledgements

The authors of this research would like the appreciate The King's Royally Initiated Laem Phak Bia Environmental Research and Development Project as well as the professors of the Department of Environmental Science Faculty of Environment Kasetsart University, Thailand for their support of this research.

## References

APHA, AWWA, WEF. 2017. Standard Method for the Examination of Water and Wastewater, 23th ed. America Public Health Association. Washington DC, USA.

Dinicola, R.S. 2006. Evidence for Chloroethene Biodegradation in Ground Water at Former Building 957 Drum Storage Area. Area 2, Operable Unit 2, Naval Undersea Warfare Center, Division Keyport, US Department of the Interior, US Geological Survey. Washington, DC, USA.

Gao, D.W., Peng, Y.Z., Liang, H., Wang, P. 2003. Using oxidation–reduction potential (ORP) and pH value for process control of shortcut nitrification–denitrification. J. Environ. Sci. Health 38: 2933–2942. doi: 10.1081/ese-120025842

Jinjaruk, T., Chunkao, K., Pongput, K., et al. 2018. HDPE pipeline length for conditioning anaerobic process to decrease BOD in municipal wastewater. Environ. Asia 11: 31–44. doi: 10.14456/ea.2018.3

Nascimento, A.L., Souza, A.., Andrade, P.A.M., Andreote, F.D., Coscione, A.R., Oliveira, F.C., Regitano, J.B. 2018. Sewage sludge microbial structures and relations to their sources, treatments, and chemical attributes. Front. Microbiol. 9: 1462. doi: 10.3389/fmicb.2018.01462

Noikondee, R., Chunkao, K., Bualert, S., Pattamapitoon, T. 2019. Evaluation of dissolvef oxygen statification in an oxidation pond for community wastewater treatment through King's Royally initiated "Nature by Nature" process. Environ. Asia 12: 169–177. doi: 10.14456/ea.2019.19

Pattamapitoon, T., Pramote, S., Pakkong, P., Chunkao, K. 2013. Nature of solar radiation as encouraged to produce an increment of dissolved oxygen and hydrogen peroxide in oxidation ponds for community wastewater treatment at H.M.The King's LERD Project Site in Phetchaburi province, Thailand. Mod. Appl. Sci. 7: 26–41. doi: 10.5539/mas.v7n6p26

Poommai, S. 2013. Mathematical modeling of community wastewater treatment under regulation of flow depth over weir crest of oxidation pond. Ph.D. thesis, Faculty of Environment, Kasetsart University. Bangkok, Thailand.

Saijo, Y., 1975. A method for determination of chlorophyll. Jpn. J. Limnol. 36: 103–109.

Saneha, S., Pattamapitoon, T., Bualert, S., et al. 2023. Relationship between bacteria and nitrogen dynamics in wastewater treatment oxidation ponds. Glob. J. Environ. Sci. Manag. 9: 707–718. doi: 10.22034/gjesm.2023.04.04

Sirianuntapiboon, S. 2020. Domestic wastewater. Vocational Education Central Region Journal 4: 1–10.

Srichomphu, M., Pattamapitoon, T., Phewnil, O., Chunkao, K., Chanthasoon, C. 2020. Optimal sampling interval for qualitative analysis of phytoplankton on community wastewater treatment systems. The 17th National Kasetsart University Kamphaeng Saen Conference. Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus, Nakhon Pathom, Thailand. [in Thai]

Srichomphu, M., Phewnil, O., Pattamapitoon, T., Chaichana, R., Chunkao, K., Warrarum, W., Dampin, N., Maskurath, P. 2024. Role of *Cylindrospermopsis* sp. in vertical nitrogen changes observed in tropical oxidation wastewater treatment ponds. Glob. J. Environ. Sci. Manag. 10: 287–300. doi: 10.22034/gjesm.2024.01.18

Tudsanaton, C., Pattamapitoon, T., Phewnil, O., Wararum, W., Saneha, s., Sukchinda, S., Khonesavanh, S., Maskulrath. 2023. Effect of pond depth on water quality and bacterial vertical variability in oxidation pond. In: Proceedings of the 61st Kasetsart University Annual Conference. Bangkok, Thailand, pp. 845–853. [in Thai]

Wang, Q., Liang, J., Zhang, S., et al. 2020. Characteristics of bacterial populations in an industrial scale petrochemical wastewater treatment plant: Composition, function and their association with environmental factors. Environ. Res. 189: 109939. doi: 10.1016/j.envres.2020.109939

Wintermans, J.F.G.M., de Mots, A. 1965. Spectrophotometric characteristics of chlorophyll *a* and *b* and their pheophytins in ethanol. Biochim. Biophys. Acta 109: 448–453. doi: 10.1016/0926-6585(65)90170-6

Zhang, X., Zhang, J. 2018. Effect of dissolved oxygen on biological denitrification using biodegradable plastic as the carbon source. IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. 121: 032015.

# ผลของการเติมวัสดุหมักที่มีแหล่งไนโตรเจนเป็นวัสดุหมักร่วมกับกากไขมันเพื่อการทำปุ๋ยหมัก

Effect of adding nitrogen sources as co-composting materials with grease waste to make compost

**อิสริยาภรณ์ เอนกบุญ**[a], **นพวรรณ เสมวิมล**[a,b,*], **ธนิศร์ ปัทมพิฑูร**[a,b], **วัชรพงษ์ วาระรัมย์**[a,b], **จุลบุตร จันทร์สูรย์**[b], **ศิวนาถ ไทยภักดี**[b]

Itsareeyaporn Anakeboon[a], Noppawan Semvimol[a,b,*], Thanit Pattamapitoon[a,b], Watcharapong Wararam[a,b], Chulabut Chanthasoon[b], Siwanat Thaipakdee[b]

[a]ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900
[b]โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ มูลนิธิชัยพัฒนา กรุงเทพฯ 10900
[a]Department of Environmental Science, Faculty of Environment, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand
[b]The King's Royally Initiated Laem Phak Bia Environmental Research and Development Project, The Chaipattana Foundation, Bangkok 10900, Thailand
*Corresponding author. E-mail address: Noppawan.sem@ku.th

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาผลของการเติมวัสดุหมักที่มีแหล่งไนโตรเจนเป็นวัสดุหมักร่วมกากไขมันเพื่อการทำปุ๋ยหมัก เนื่องจากจุลินทรีย์ใช้ไนโตรเจนเป็นธาตุอาหารหลักที่สำคัญในกระบวนการย่อยสลาย ดังนั้นการทดลองนี้ใช้เศษอาหารและมูลไก่เป็นแหล่งไนโตรเจนในการหมักร่วมกับกากไขมันเพื่อการทำปุ๋ยหมัก โดยวางแผนทดลองจำนวน 3 ตำรับ คือ T1 (กากไขมัน ธูปฤาษี มูลไก่), T2 (กากไขมัน เศษอาหาร ธูปฤาษี) และ T3 (กากไขมัน เศษอาหาร ธูปฤาษี มูลไก่) ทำการหมักวัสดุตามตำรับการทดลองสลับด้วยดินนา 2 ชั้น ระยะเวลา 48 วัน จากผลการศึกษาพบว่าตำรับ T3 เป็นตำรับทดลองที่ดีที่สุด โดยปุ๋ยที่ได้มีความชื้นร้อยละ 16.5 อินทรียวัตถุร้อยละ 33.61 ไนโตรเจนทั้งหมด ฟอสฟอรัสทั้งหมดและโพแทสเซียมทั้งหมด เท่ากับ ร้อยละ 1.00 ,1.00 และ 1.18 ตามลำดับและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน เท่ากับ 20.49: 1 เห็นได้ว่าการเติมเศษอาหารและมูลไก่เป็นวัสดุหมักที่มีแหล่งไนโตรเจนหมักร่วมกับกากไขมันนั้นมีความเหมาะสมและปุ๋ยที่ได้มีคุณภาพเป็นไปตามมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตร

**คำสำคัญ**: กากไขมัน, ปุ๋ยหมัก, วัสดุหมักร่วม, เศษอาหาร, แหล่งไนโตรเจน

**Abstract**

The objective of this research was to study the effect of adding nitrogen sources as co-composting materials with grease waste to make compost. Nitrogen sources are important macronutrients for the degradation process by microorganisms. Therefore, this experiment used food waste and chicken manure as co-composting materials with grease waste to make compost. There are 3 treatments: T1 (grease waste, Typha, chicken manure), T2 (grease waste, Typha, food waste), and T3 (grease waste, Typha, food waste, chicken manure). The composting procedure was alternated between two layers of soil and compost materials for 48 days. The results of the study found that T3 was the best treatment. The quality of the compost was 16.5% moisture, 33.61% organic matter, total N 1.00%, total P 1.00%, total K 1.18% by weight, and C/N ratio of 20.49:1. It can be seen that adding food waste and chicken manure that contain nitrogen sources as co-composting materials with grease waste was appropriate, and the quality of the compost was following with the organic fertilizer standards of the Department of Agriculture.

**Keywords**: Co-composting materials, Compost, Food waste, Grease waste, Nitrogen source

**คำนำ**

ปัจจุบันอาคารบ้านพัก ร้านค้าและตลาดสดมีกิจกรรมการประกอบอาหารจากครัวเรือนและร้านอาหาร ส่งผลให้เกิดของเสียที่ลอยขึ้นสู่ผิวน้ำจำพวกไขมันและน้ำมัน จึงทำให้มีกากไขมันเหลือทิ้งจากถังดักไขมันเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยไขมันจะแข็งตัวและแยกออกจากน้ำก่อตัวเป็นชั้นบนสุด ของเสียจำพวกกากไขมันหากไม่จัดการตักออกมักถูกชะล้างละลายออกมาปนเปื้อนอยู่กับน้ำเสีย โดยอาจละลายผสมอยู่ในน้ำและลอยตัวอยู่เหนือน้ำปรากฏเป็นคอลลอยด์อยู่ในน้ำ (นัทพงศ์, 2557) คราบไขมันจึงเป็นสาเหตุหลักของปัญหาน้ำเสียชุมชนหากไม่ได้รับการจัดการที่เหมาะสมและถูกต้องตามหลักสุขาภิบาลอาจก่อให้เกิดการปนเปื้อนของคราบไขมันลงในแหล่งน้ำ และอาจปิดกั้นการส่องผ่านของแสงลงสู่แหล่งน้ำ ทำให้น้ำเกิดการเน่าเสียได้ แนวทางการจัดการกากไขมันเหลือทิ้งที่ตักออกจากถังดักไขมันที่ถูกต้องนั้นส่วนใหญ่นำไปฝังกลบอย่างถูกหลักสุขาภิบาล หรือมีการเผาทำลายกากไขมันในเตาเผาที่ถูกสุขลักษณะหรือโรงงานที่ขึ้นทะเบียนกับกรมโรงงานอุตสาหกรรม (กรมควบคุมมลพิษ, 2551; Nitayapat et al., 2014; Gilis et al., 2023)

การนำกากไขมันมาทำปุ๋ยหมักเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่นำของเสียมาใช้ประโยชน์ การนำกากไขมันมาทำปุ๋ยหมักนั้นไม่จำเป็นต้องทำความสะอาดกากไขมันก่อนจึงเป็นวิธีที่ค่าใช้จ่ายต่ำ และได้ผลผลิตปุ๋ยเพื่อใช้ประโยชน์ทางการเกษตร (สุเทพ และคณะ, 2558) แต่เนื่องจากกากไขมันเป็นสารอินทรีย์ที่ประกอบด้วย สารประกอบไฮโดรคาร์บอน กลีเซอไรด์ สเตียรอยด์ และกรดไขมันมีความเสถียรสูงจึงยากต่อการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ (พันธวัศ และคณะ, 2562) ต้องใช้เวลาในการย่อยสลายนานทั้งยังมีปริมาณธาตุอาหารหลัก ได้แก่ปริมาณไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมที่ค่อนข้างต่ำ ส่งผลให้แบคทีเรียทำงานได้อย่างไม่มีประสิทธิภาพ เนื่องจากกิจกรรมการย่อยสลายปุ๋ยนั้นส่งผลให้อัตราส่วนไนโตรเจนต่อคาร์บอนสูงขึ้น (Tudsanaton et al., 2020) ดังนั้น การเติมแหล่งไนโตรเจนจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญในกระบวนการย่อยสลาย เนื่องจากแบคทีเรียเหล่านี้มีการใช้สารอินทรีย์เป็นแหล่งพลังงาน โดยสามารถตรึงไนโตรเจนจากอากาศเปลี่ยนให้เป็นสารประกอบไนโตรเจนที่มีประโยชน์ต่อพืชได้ (Tangsombatvichit et al., 2021) บวกกับแหล่งคาร์บอนที่ได้จากกากไขมัน ทำให้เกิดการย่อยสลายภายในกองปุ๋ยหมักส่งผลให้กากไขมันนั้นเปลี่ยนเป็นสารอนินทรีย์ที่เป็นธาตุอาหารจะทำให้ปุ๋ยหมักมีระดับธาตุอาหารเพิ่มขึ้นและเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานของปุ๋ยอินทรีย์บวกกับย่นระยะเวลาในการหมักปุ๋ยอีกด้วย

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเน้นการศึกษาผลของการเติมวัสดุหมักที่มีแหล่งไนโตรเจนในการเป็นวัสดุหมักร่วมกับกากไขมันเพื่อการทำปุ๋ยหมักและได้ตำรับวัสดุหมักที่เหมาะสมที่ให้ปุ๋ยหมักที่มีคุณภาพเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์

**อุปกรณ์และวิธีการ**

*การศึกษาคุณภาพของวัสดุหมักและกำหนดสัดส่วนวัสดุหมักที่ใช้ในการวิจัย*

*การเตรียมอุปกรณ์และวัสดุสำหรับทำปุ๋ยหมัก*

กระบวนการทำปุ๋ยหมักได้ดำเนินการตามวิธีการหมักขยะอินทรีย์ในกล่องคอนกรีตของโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ โดยเป็นวิธีการฝังกลบประยุกต์ด้วยการใช้บ่อคอนกรีตทรงกระบอก (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 เซนติเมตร สูง 40 เซนติเมตร) วางจำนวน 2 วงต่อกัน โดยใช้เทคนิคการหมักสลับชั้นระหว่างวัสดุหมักและดินนา บริเวณก้นบ่อมีท่อระบายน้ำชะขยะที่ปูทับด้วยถ่านไม้และทรายหยาบรองพื้นบ่อมีความหนาที่ 10 เซนติเมตร ชั้นที่ 1 ใส่วัสดุหมัก 25 กิโลกรัมทับด้วยดินนา 10 กิโลกรัม และชั้นที่ 2 ใส่วัสดุหมัก 25 กิโลกรัม ทับด้วยดินนา 15 กิโลกรัม ทำการหมักเป็นเวลา 48 วัน

กากไขมันที่นำมาใช้ได้มาจากครัวเรือน ร้านอาหาร และตลาดสดจากบริเวณพื้นที่กองทัพอากาศดอนเมือง กรุงเทพฯ ซึ่งกากไขมันที่ได้จากแต่ละแหล่งนำมาผสมกันโดยทำการกรองแยกน้ำออกให้ได้มากที่สุด มีการใช้กากไขมันต่อวัสดุหมักร่วมในอัตราส่วน 2:1 ดังนั้น วัสดุหมัก 50 กิโลกรัม ประกอบด้วย กากไขมัน 35 กิโลกรัม และวัสดุหมักร่วม 15 กิโลกรัม เศษอาหารที่ใช้นำมาสับให้มีขนาด 2–3 เซนติเมตร มูลไก่ที่เป็นก้อนนำมาบดให้แตก ใส่ธูปฤาษีเพื่อเพิ่มช่องว่างและการระบายอากาศในกองปุ๋ย ใช้เฉพาะส่วนของใบและลำต้นหั่นเป็นท่อนขนาด 1–2 นิ้ว รายละเอียดปริมาณวัสดุหมักที่ใช้ดังแสดงใน Table 1 และ Fig. 1 กำหนดตำรับการทดลองเป็น 3 ตำรับ ดังนี้ T1 คือ กากไขมัน ธูปฤาษี มูลไก่, T2 คือ กากไขมัน เศษอาหาร ธูปฤาษี, T3 คือ กากไขมัน เศษอาหาร ธูปฤาษี มูลไก่ แต่ละตำรับการทดลองทำจำนวน 3 ซ้ำ กากไขมันและวัสดุหมักทั้งหมดถูกคลุกเคล้าให้เข้ากันก่อนนำมาแบ่งเป็นสองส่วนเพื่อวางแบ่งชั้นและกลบทับด้วยดินนา

**Table 1** Treatment and amount of compost materials in each treatment

| Treatment | Compost materials (kg) | | | | Net weight (kg) |
|---|---|---|---|---|---|
| | Grease waste | Food waste | *Typha angustifolia* L. | Chicken manure | |
| T1 | 35 | 0 | 10 | 5 | 50 |
| T2 | 35 | 5 | 10 | 0 | 50 |
| T3 | 35 | 5 | 5 | 5 | 50 |

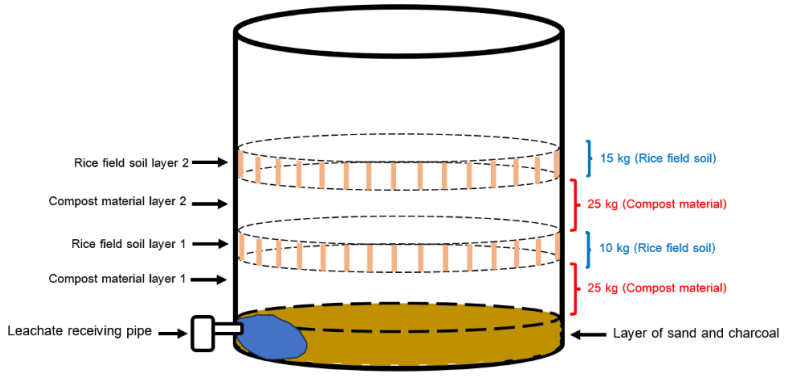



**Fig. 1** Landfill compost method applied using a cylindrical concrete pond

*การเก็บข้อมูล*

วิเคราะห์คุณภาพวัสดุหมักที่ใช้ ประกอบด้วย กากไขมัน เศษอาหาร ธูปฤาษี และมูลไก่ ระหว่างการหมักทำการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทุกวันเวลา 7 นาฬิกา รดน้ำ 1.5 ลิตร จำนวน 1 ครั้ง/สัปดาห์ ตลอดระยะเวลาการหมักเพื่อควบคุมความชื้นของกองปุ๋ยหมักให้มีค่าประมาณ 40–60% เนื่องจากความชื้นจะทำให้สารอินทรีย์ที่อยู่ในกองปุ๋ยละลายน้ำเพื่อเป็นอาหารแก่การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในกองปุ๋ยหมักได้ (Sánchez et al., 2017) ภายหลังสิ้นสุดการหมักที่ระยะเวลา 48 วัน เก็บตัวอย่างปุ๋ยที่ได้จากแต่ละตำรับเพื่อวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมี โดยพารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์ (กรมวิชาการเกษตร, 2548) ดังแสดงใน Table 2

**Table 2** Parameters and analytical methods

| Parameters | Analytical Method |
|---|---|
| Fat, Oil and Grease | Soxhlet Extraction |
| Free Fatty Acid | In house method: Base on AOAC 940.25 (2012) |
| pH | pH meter |
| Electrical Conductivity | Electrical Conductivity meter |
| Organic carbon | Walkey and Black method |
| Total Nitrogen | Micro Kjeldahl Digestion |
| Total Phosphorus | Spectrophotometry |
| Total Potassium | Atomic absorption spectrophotometer (AAS) |
| C/N ratio | C/N =OC (%) / Total N (%) |

**ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง**

คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุหมัก ประกอบด้วย กากไขมัน เศษอาหาร ธูปฤาษี และมูลไก่ แสดงดัง Table 3 ผลการวิเคราะห์ พบว่า เศษอาหารและธูปฤาษีเป็นวัสดุหมักที่มีความชื้นสูง รองลงมาเป็นกากไขมันเนื่องจากมีการผึ่งไขมันก่อนนำมาใช้เป็นวัสดุหมัก ในส่วนของกากไขมัน มีองค์ประกอบกรดไขมันอิสระ ร้อยละ 26.24 โดยน้ำหนัก และมีค่าไขมันและน้ำมัน 324,409.8 มิลลิกรัม/กิโลกรัม มีความเป็นกรด (pH = 4.9) เศษอาหารและมูลไก่ที่นำมาเป็นแหล่งไนโตรเจน พบว่า เศษอาหารมีคาร์บอนอินทรีย์ ร้อยละ 53.3 และมีธาตุอาหาร N P K สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ ส่วนมูลไก่มีคาร์บอนอินทรีย์ ร้อยละ 33.2 แต่พบว่ามูลไก่มีฟอสฟอรัส ร้อยละ 4.2 และโพแทสเซียม ร้อยละ 2.3 ธูปฤาษีใช้เพื่อการเพิ่มช่องว่างในการระบายอากาศให้แก่กองปุ๋ยหมักและป้องกันไม่ให้วัสดุหมักมีการจับตัวกันแน่นเกินไป เห็นได้ว่าคุณสมบัติของวัสดุหมักชนิดต่างๆ ที่นำมาใช้มีความเหมาะสมเป็นวัสดุหมักร่วมกับกากไขมัน เนื่องจากกากไขมันมีปริมาณไนโตรเจนฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมต่ำ ดังนั้น การหมักร่วมกับวัสดุหมักที่มีแหล่งไนโตรเจนสูงจะช่วยส่งเสริมให้เกิดกระบวนการย่อยสลายภายในกองปุ๋ยได้ดีขึ้น เนื่องจากที่จุลินทรีย์ใช้ไนโตรเจนเป็นธาตุอาหารหลักที่สำคัญในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ให้กลายเป็นปุ๋ยหมัก (พันธวัศ และคณะ, 2562)

**Table 3** The characteristics of compost materials

| Parameters | Compost Materials | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Grease waste | Food waste | *Typha angustifolia* L. | Chicken manure |
| Fat, Oil and Grease (mg/kg) | 324,409.8 | - | - | - |
| Free Fatty Acid (%w/w) | 26.24 | - | - | - |
| Moisture (%) | 53.1 | 83.4 | 86.2 | 36.3 |
| Salinity (ppt) | 0.4 | 3.6 | 12.3 | 6.8 |
| pH | 4.9 | 6.5 | 6.3 | 8.6 |
| EC (dS/m) | 0.3 | 6.5 | 6.7 | 7.2 |
| Organic matter (%) | 70.3 | 91.7 | 85.8 | 57.1 |
| Organic carbon (%) | 40.8 | 53.3 | 49.9 | 33.2 |
| Total Nitrogen (%) | 0.7 | 3.1 | 0.8 | 1.3 |
| Total Phosphorus (%) | 0.3 | 0.8 | 0.4 | 4.2 |
| Total Potassium (%) | 0.03 | 1.9 | 1.9 | 2.3 |
| C/N ration | 58.0: 1 | 17.5: 1 | 61.4: 1 | 25.5: 1 |

ปุ๋ยหมักอาศัยการทำงานของสิ่งมีชีวิตหลายชนิด ได้แก่ แบคทีเรีย รา ไส้เดือน และแมลง โดยกระบวนการย่อยสลายจะเกิดขึ้นหลังจากวัสดุที่ใช้หมักมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความชื้น และการระบายอากาศที่เหมาะสม (นันทวัน, 2556) อุณหภูมิเป็นตัวการบ่งชี้ในการติดตามกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นภายในกระบวนการย่อยสลาย อุณหภูมิภายในกองปุ๋ยหมักจะสูงขึ้นจากกระบวนการเมตาบอลิซึมของจุลินทรีย์และย่อยสลายได้ดีจนทำให้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวัสดุหมักในกองปุ๋ยหมักเพิ่มขึ้น งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของกองปุ๋ยหมักทุกวันช่วง 07.00 น. ตลอดระยะเวลาการหมัก พบว่า อุณหภูมิเริ่มต้นเฉลี่ยทั้ง 3 หน่วยการทดลองอยู่ที่ 32.7°C และอุณหภูมิค่อย ๆ เพิ่มสูงขึ้น โดยพบว่าอัตราส่วน T1 T2 และ T3 มีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 42.6 41.8 และ 39.6 องศาเซลเซียส ในวันที่ 19–21 ของการหมัก ดังแสดงใน Fig. 3 ซึ่งชี้ให้เห็นว่าช่วงสัปดาห์ที่ 3 เป็นระยะที่มีการย่อยสลายอย่างต่อเนื่องและมีการย่อยสลายสูงสุด เนื่องจากแบคทีเรียเจริญเติบโตได้ดี ทำให้มีความร้อนที่เป็นผลิตภัณฑ์จากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ถูกปลดปล่อยออกมาในกองปุ๋ยหมัก ส่งผลให้ในกองปุ๋ยหมักมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น (ชาลิสา, 2564) โดยหน่วยการทดลองที่มีอุณหภูมิสูงที่สุดคือ T1 หลังจากอุณหภูมิสูงสุดแล้วพบว่าในแต่ละหน่วยการทดลองอุณหภูมิลดลงเรื่อย ๆ โดย T1 ลดลงอย่างต่อเนื่องไวกว่าตำรับอื่น ส่วน T3 ถึงอุณหภูมิสูงน้อยกว่าตำรับอื่นแต่มีช่วงอุณหภูมิคงที่ที่ 37–39 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 10 วัน จากการทดลองอุณหภูมิที่ลดลงแสดงถึงการที่สารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งอาหารในกระบวนการย่อยสลายนั้นเริ่มลดลงตามสภาพปัจจัยแวดล้อมและแหล่งอาหารตามลำดับ

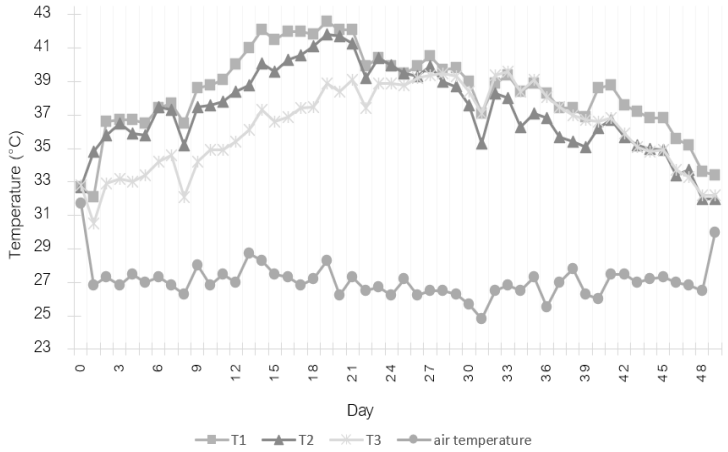



**Fig. 3** Temperature profiles during 3 treatment methods and air temperature

จากการศึกษาผลของการทำปุ๋ยหมักจากกากไขมันด้วยการเพิ่มวัสดุหมักที่มีไนโตรเจนเช่น มูลไก่ และเศษอาหารในการหมักร่วม กล่าวได้ว่า เมื่อสิ้นสุดกระบวนการหมักซึ่งใช้ระยะเวลา 48 วัน ในงานวิจัยนี้ใช้ความคงที่ของอุณหภูมิที่ลดลง จนใกล้เคียงกับอุณหภูมิอากาศ และใช้อัตราส่วน C:N เป็นเกณฑ์ในการกำหนดวันสิ้นสุดของการหมัก (Singh et al., 2016) จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างปุ๋ยที่ได้จากแต่ละตำรับการทดลองและทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติของปุ๋ยหมักกับเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตร ประกอบด้วย ความชื้น, ความเป็นกรดด่าง, การนำไฟฟ้า, อินทรียวัตถุ, อินทรีย์คาร์บอน, C/N ratio และธาตุอาหารหลัก ได้แก่ ไนโตรเจนทั้งหมด ฟอสฟอรัสทั้งหมด และโพแทสเซียมทั้งหมด ผลที่ได้ดังแสดงใน Table 4 ผลการศึกษาพบว่า สัดส่วน T1 (กากไขมัน ธูปฤาษี มูลไก่) คุณสมบัติปุ๋ยส่วนใหญ่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ ยกเว้นค่าไนโตรเจนทั้งหมดและ C/N ratio 25.98: 1 ไม่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ เนื่องจากมีค่าอินทรีย์คาร์บอนที่สูงกว่าไนโตรเจนค่อนข้างมากทำให้ C/N ratio สูง ทั้งนี้หากต้องการให้ค่า C/N ratio ต่ำกว่า 20: 1 ตามมาตรฐานอาจต้องทำการหมักต่อไปอีกอย่างน้อย 2 สัปดาห์เพื่อให้ปุ๋ยหมักที่ได้มีความเสถียรพร้อมที่จะถูกนำไปใช้ประโยชน์ (พันธวัศ และคณะ, 2562) แต่การหมักเป็นระยะเวลานานจะพบปัญหาค่าธาตุอาหารต่าง ๆ ของปุ๋ยหมักจะลดลงเมื่ออายุการหมักนานขึ้น เนื่องจากก่อให้เกิดการย่อยสลายของปุ๋ยต่อไปได้อีก (Al-Bataina et al., 2016) สำหรับสัดส่วน T2 (กากไขมัน เศษอาหาร ธูปฤาษี) มีค่าความเป็นกรดอ่อน (pH = 5.45) มีค่าอินทรียวัตถุร้อยละ 16.99 และไนโตรเจนทั้งหมด เท่ากับ 0.52 ซึ่งทั้งสามค่านี้ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ที่กำหนดไว้ แต่ค่าความชื้น การนำไฟฟ้า ฟอสฟอรัสทั้งหมด โพแทสเซียมทั้งหมดและ C/N ratio อยู่เกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ ซึ่งไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ประโยชน์เนื่องจากมีไนโตรเจนทั้งหมดต่ำจึงเหมาะที่จะถูกนำไปใช้ประโยชน์ในการเป็นวัสดุปรับปรุงดิน สำหรับสัดส่วน T3 (กากไขมัน เศษอาหาร ธูปฤาษี มูลไก่) พบว่ามีคุณสมบัติซึ่งอยู่เกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ที่กำหนดไว้ทั้งหมด แสดงให้เห็นว่าสัดส่วนของวัสดุหมักที่ใช้เป็นแหล่งไนโตรเจนซึ่งประกอบด้วย เศษอาหารและมูลไก่ ส่งเสริมกระบวนการย่อยสลายของสารอินทรีย์ในกองปุ๋ยหมักได้ดีที่สุด

**Table 4** The comparison of quality of compost materials and compost in each treatment

| Parameters | Standard by DOA | Quality of Compost Materials | | | Quality of Compost | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | T1 | T2 | T3 | T1 | T2 | T3 |
| Moisture (%) | ≤30 | 69.7* | 72.5* | 68.8* | 17.0 | 19.0 | 16.5 |
| pH | 5.5-8.5 | 5.40* | 4.93* | 5.56 | 5.69 | 5.45* | 5.63 |
| EC (dS/m) | ≤10 | 4.16 | 3.20 | 4.10 | 2.62 | 2.29 | 2.39 |
| Organic matter (%) | ≥20 | 58.76 | 129.66 | 63.64 | 37.04 | 16.99* | 33.61 |
| Organic carbon (%) | - | 34.16 | 75.38 | 37.00 | 21.54 | 9.88 | 19.54 |
| Total Nitrogen (%) | ≥1 | 1.44 | 1.39 | 1.52 | 0.85* | 0.52* | 1.00 |
| Total Phosphorus (%) | ≥0.5 | 1.03 | 0.44* | 1.06 | 1.00 | 0.62 | 1.00 |
| Total Potassium (%) | ≥0.5 | 0.63 | 0.30* | 0.68 | 1.24 | 1.21 | 1.18 |
| C/N ration | ≤20: 1 | 23.72: 1* | 54.23: 1* | 24.34: 1* | 25.98: 1* | 19.26: 1 | 20.49: 1 |

* = Not within the organic fertilizer standards according to the Department of Agriculture

จากผลการทดลองพบว่าสัดส่วน T3 (กากไขมัน เศษอาหาร ธูปฤาษี มูลไก่) มีกระบวนการย่อยสลายของสารอินทรีย์เกิดได้ดีที่สุด เห็นได้ว่าการใช้มูลไก่และเศษอาหารเป็นแหล่งไนโตรเจนภายนอก ช่วยส่งเสริมการย่อยสลายและส่งผลให้ปุ๋ยหมักที่ได้มีธาตุอาหารเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ และช่วยลดระยะเวลาในการทำปุ๋ยหมักได้ ทั้งนี้การใส่เศษอาหารเพียงอย่างเดียวโดยไม่ใส่มูลไก่ (T2) ช่วยส่งเสริมการย่อยสลายเช่นกันเนื่องจากเศษอาหารมีไนโตรเจนที่สูงกว่าวัสดุอื่น แต่ปุ๋ยหมักที่ได้มีธาตุอาหารต่ำเนื่องจากมีความชื้นในกองปุ๋ยที่สูงทำให้ไนโตรเจนเกิดการ Denitrification ไปกับบรรยากาศ หรือการใช้มูลไก่เพียงอย่างเดียวแต่ไม่มีการใส่เศษอาหารร่วมด้วย (T1) ส่งผลให้กระบวนการย่อยสลายใช้ระยะเวลานาน และอาจส่งผลให้ค่าธาตุอาหารลดลงเนื่องจากการหมักขยะอินทรีย์เป็นระยะเวลานานส่งผลให้เกิดการสูญเสียธาตุอาหารในปุ๋ยหมักได้ (Tudsanaton et al., 2020)

**สรุป**

การเติมวัสดุหมักที่มีไนโตรเจนสูงในการหมักร่วมกับกากไขมันเพื่อการทำปุ๋ยหมัก มีผลต่อการส่งเสริมกระบวนการย่อยสลาย และการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทั้งทางกายภาพและทางเคมีของปุ๋ยหมัก ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น ความเป็นกรดด่าง การนำไฟฟ้า อินทรียวัตถุ ไนโตรเจนทั้งหมด ฟอสฟอรัสทั้งหมด โพแทสเซียมทั้งหมดและ C/N ratio นอกจากนี้ เนื่องจากกากไขมันมีความชื้นสูงและจับตัวเป็นก้อน การใส่ธูปฤาษีลงไปเพื่อเป็นวัสดุพยุงช่วยให้เกิดช่องว่างในการระบายอากาศนั้น ส่งเสริมให้การความชื้นในกองมีความเหมาะสมต่อกระบวนการย่อยสลาย ดังนั้น การเติมมูลไก่และเศษอาหารเป็นวัสดุหมักร่วมและเป็นแหล่งไนโตรเจนให้แก่จุลินทรีย์ และการใช้วัสดุพยุงเพื่อเพิ่มช่องว่างในกองปุ๋ย มีความเหมาะสมในการเพิ่มประสิทธิภาพกากไขมันให้ได้ปุ๋ยหมักที่มีคุณสมบัติเป็นไปตามมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ช่วยลดระยะเวลาในการหมักได้

**กิตติกรรมประกาศ**

ผลงานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัย “การผลิตปุ๋ยหมักจากกากไขมันด้วยเทคนิคการหมักผสมเศษอาหารร่วม” ซึ่งได้รับทุนสนับสนุนและสถานที่ในการทำวิจัยจากโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ มูลนิธิชัยพัฒนา ทางผู้ทำวิจัยและคณะขอขอบคุณทางโครงการฯ ที่ช่วยให้งานวิจัยประสบผลสำเร็จ

**เอกสารอ้างอิง**

กรมควบคุมมลพิษ. 2551. คู่มือแนวทางการจัดการน้ำมันและไขมันจากบ่อดักไขมันและการนำไปใช้ประโยชน์ สำหรับชุมชน. กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ.

กรมวิชาการเกษตร. 2548. มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ พ.ศ. 2548. สำนักเลขาธิการคณะรัฐมนตรี. กรุงเทพฯ.

ชาลิสา ทัศนาธร. 2564. การย่อยสลายเปลือกทุเรียนโดยแบคทีเรียประจำถิ่น. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นัทพงศ์ จันทมาศ. 2557. กากไขมันเหลือใช้ไม่ไร้ประโยชน์: การใช้ประโยชน์จากของเสียเหลือทิ้ง. วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย 8: 47–53.

นันทวัน ฤทธิ์เดช. 2556. ข้อควรพิจารณาก่อนทำปุ๋ยหมัก. วารสารวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยขอนแก่น 41: 595–606.

พันธวัศ สัมพันธ์พานิช, กรองแก้ว ทิพยศักดิ์, เพ็ญรดี จันทร์ภิวัฒน์. 2562. การแปรรูปกากไขมันเป็นปุ๋ยหมักด้วยกระบวนการปรับปรุงคุณภาพขั้นต้น: กรณีศึกษาโรงแรมในพื้นที่เกาะสมุยจังหวัดสุราษฎร์ธานี. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา 24: 326–339.

สุเทพ ศิลปานันทกุล, รัชกร นามกร, พิศิษฐ์ วัฒนสมบูรณ์, ธวัช เพชร ไทย. 2558. การผลิตปุ๋ยหมักร่วมจากกากตะกอนน้ำทิ้งเศษผักและกากไขมัน. วารสารการพัฒนาชุมชนและคุณภาพชีวิต 3: 95–103.

Al-Bataina, B.B., Young, T.M., Ranieri, E. 2016. Effects of compost age on the release of nutrients. International Soil and Water Conservation Research 4: 230–236.

Gilis, B., Waeghe, E., Cop, N., De Sitter, K., van Bogaert, I., Cornet, I. 2023. The effect of growth inhibiting compounds of grease trap waste on Candida tropicalis ATCC 20962. Biochem. Eng. J. 195: 108935.

Sánchez, Ó.J., Ospina, D.A., Montoya, S. 2017. Compost supplementation with nutrients and microorganisms in composting process. Waste Manag. 69: 136–153.

Singh, S., Nain, L. 2014. Microorganisms in the conversion of agricultural wastes to compost. Proc. Indian Natn. Sci. Acad. 80: 473–481.

Nitayapat, N., Chitprasert, P. 2014. Characterisation of FOGs in grease trap waste from the processing of chickens in Thailand. Waste Manag. 34: 1012–1017.

Tangsombatvichit, P., Tiammongkol, T., Konganan, N. 2021. Immobilized free nitrogen-fixing bacteria *Azotobacter* in natural materials and its effect on growth of *Brassica Chinensis* in soil. RMUTP Research Journal 15: 158–168.

Tudsanaton, C., Pattamapitoon, T., Phewnil, O., Semvimol, N., Wararam, W., Chanthasoon, C., Thaipakdee, S. 2021. Limiting factors of durian rind composting by natural technology during the wet period. Ecol. Environ. Conserv. 27: 590–598.

# คุณลักษณะของน้ำเสียโรงงานผลิตขนมไทย จังหวัดเพชรบุรี ที่มีความเป็นไปได้ในการผลิตก๊าซชีวภาพ

## The characteristics of wastewater from Thai dessert factory, Phetchaburi province with the possibility of biogas production

**ณภัทร งามสิริเกียรติ[a], นพวรรณ เสมวิมล[a,b,*], ธนิศร์ ปัทมพิฑูร[a,b], อรอนงค์ ผิวนิล[a,b], จุลบุตร จันทร์สูรย์[b], นิรุต อุปนันท์[b], ภาวิน วิจิตรตระการ[b]**

Napat Ngamsirikiat[a], Noppawan Semvimol[a,b], Thanit Pattamapitoon[a,b], Onanong Phewnil[a,b], Chulabut Chanthasoon[b], Nirut Uppanunt[b], Pavin Wichittrakarn[b]

[a]ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[b]โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องจากพระราชดำริ มูลนิธิชัยพัฒนา กรุงเทพฯ 10900

[a]Department of Environmental science, Faculty of Environmental, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

[b]The King's Royally Initiated Leam Phak Bia Environment Research and Development Project, Chaipattana Foundation, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: Noppawan.sem@ku.th

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้ศึกษาคุณลักษณะของน้ำเสียโรงงานผลิตขนมไทยที่มีความเป็นไปได้ในการผลิตก๊าซชีวภาพ สำหรับเป็นแนวทางการใช้ประโยชน์จากของเสีย ทำการศึกษาพารามิเตอร์ ได้แก่ ค่าความเป็นกรดด่าง ปริมาณของแข็งทั้งหมด ปริมาณของแข็งระเหยง่าย และอัตราส่วนธาตุอาหาร COD:N:P โดยเทียบกับคุณลักษณะน้ำเสียที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ คือ 100:2.2:0.4 จากการศึกษาพบว่า คุณลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการผลิตขนมไทยมีสภาพเป็นกรด (pH 4.09) มีค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมี ปริมาณของแข็งทั้งหมด ปริมาณของแข็งระเหยง่าย เท่ากับ 5,333±301.70, 3,013±252.00, 2,369 ± 325.89 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ อัตราส่วนธาตุอาหาร COD:N:P เท่ากับ 100:0.9:0.09 แสดงให้เห็นว่าน้ำเสียมีอัตราส่วนธาตุอาหารและความเป็นกรดด่างไม่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ แนวทางการแก้ไขคือการใช้เทคนิคการหมักร่วมโดยการเติมวัสดุที่มีธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในสัดส่วนที่เหมาะสมเพื่อปรับปรุงคุณลักษณะของน้ำเสีย นอกจากนี้ควรปรับค่าความเป็นกรดด่างให้อยู่ในช่วง 6.5–7.5 และหาระยะเวลาเก็บกักที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

**คำสำคัญ**: การย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศ, ก๊าซชีวภาพ, น้ำเสีย, น้ำเสียโรงงานขนมไทย, ธาตุอาหาร

**Abstract**

This study focuses on the characteristics of wastewater from a Thai dessert factory with the possibility of biogas production as a guideline for waste utilization. The parameters are used, such as pH, total solids, volatile solids, and nutrient ratio in the form of COD: N: P, to be compared with the appropriate wastewater characteristics for biogas production as 100: 2.2: 0.4. From the study of wastewater characteristics, it was found that wastewater from the Thai dessert production process was acidic (pH 4.09), the chemical oxygen demand, total solids, and volatile solids were 5,333±301.70, 3,013±252.00, and 2,369 ± 325.89 mg/L. The ratio of COD: N: P was 100: 0.9: 0.09, showing that wastewater quality has lower nutrient values and pH levels that were unsuitable for biogas production and utilization. Therefore, the solution was to use co-fermentation techniques by adding materials with high nitrogen and phosphorus nutrients in appropriate proportions to improve wastewater characteristics. In addition, the pH value should be adjusted to be in the range of 6.5–7.5 and to determine suitable hydraulic retention time for biogas production for further use.

**Keywords**: Anaerobic digestion, Biogas, Nutrients, Thai dessert factory wastewater, Wastewater

**คำนำ**

จังหวัดเพชรบุรีถือเป็นแหล่งผลิตขนมไทยที่มีชื่อเสียงและเป็นที่ยอมรับของประเทศไทยเนื่องด้วยความพร้อมและคุณภาพของวัตถุดิบที่ใช้ในการทำขนมไทย เช่น น้ำตาลโตนด มะพร้าว และเผือก เป็นต้น ประกอบกับภูมิปัญญาของคนท้องถิ่น จึงก่อให้เกิดการรวมกลุ่มของผู้คนในท้องถิ่นเพื่อการประกอบอาชีพทำขนมไทยจนมีบทบาทสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจของจังหวัดเพชรบุรี มีการลงทุนจากคนในพื้นที่ และนอกพื้นที่ทำให้เกิดการพัฒนาเป็นแหล่งอุตสาหกรรมขนมไทยขนาดย่อมหลายพื้นที่ชุมชนของจังหวัดเพชรบุรี แต่นอกจากผลิตภัณฑ์ที่ได้แล้วยังก่อให้เกิดน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนสารอินทรีย์จากวัตถุดิบและขั้นตอนการล้างอุปกรณ์ เมื่อถูกระบายลงสู่คลองหรือท่อน้ำสาธารณะโดยไม่ผ่านระบบบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียจะถูกย่อยสลายโดยกลุ่มจุลินทรีย์ ทำให้ระดับออกซิเจนละลายน้ำลดลง เกิดน้ำเน่าเสียจนไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้ในที่สุด (สำนักจัดการคุณภาพน้ำ, 2560) ดังนั้น จึงมีความจำเป็นต้องมีระบบการจัดการน้ำเสียที่มีเหมาะสม เพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งก่อนระบายลงสู่คลองหรือท่อน้ำสาธารณะ

น้ำเสียโรงงานผลิตขนมไทยมีความเข้มข้นสารอินทรีย์สูง จึงจำเป็นต้องมีการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศเพื่อลดความเข้มข้นของสารอินทรีย์ก่อนที่จะบำบัดด้วยวิธีการอื่นต่อไป สารอินทรีย์ซึ่งถือเป็นแหล่งพลังงานและอาหารให้กับจุลินทรีย์ในระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศในการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำเสียรูปให้เปลี่ยนรูปไปเป็นก๊าซชีวภาพประกอบด้วยก๊าซมีเทน ($CH_4$) เป็นองค์ประกอบหลักประมาณร้อยละ 50-70 รองลงมาคือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ($CO_2$) และก๊าซอื่นๆ ตามลำดับ (Ahmmad and Haque, 2014; Padi et al., 2014) ซึ่งองค์ประกอบของก๊าซที่เกิดขึ้นนั้นขึ้นกับอิทธิพลจากปัจจัยหลายอย่าง เช่น ค่าความเป็นกรด-ด่าง สภาพด่าง และอุณหภูมิ เป็นต้น (Yebo et al., 2011) แต่อย่างไรก็ตามหนึ่งในปัจจัยที่มีความสำคัญต่อกระบวนการย่อยสลายและประสิทธิภาพการเกิดก๊าซชีวภาพ คือ ปริมาณธาตุอาหาร ที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบ (Zheng et al., 2014) และยังส่งผลต่อปัจจัยต่าง ๆ ของกระบวนการย่อยสลาย โดยธาตุอาหารที่สำคัญคือ ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส โดยปริมาณธาตุอาหารที่จุลินทรีย์ชนิดไม่ใช้อากาศต้องการในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ควรมีอัตราส่วน COD:N:P อย่างน้อยที่สุดเท่ากับ 100: 2.2: 0.4 (กรมพลังงานทดแทน, 2542ก) ดังนั้น การบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศและสามารถได้ผลผลิตเป็นก๊าซชีวภาพเป็นทางเลือกที่น่าสนใจและเป็นวิธีการที่สามารถจัดการน้ำเสียที่ปนเปื้อนสารอินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพและยั่งยืน อีกทั้งยังเป็นแนวทางการใช้ประโยชน์ของเสียและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Bennich and Belyazid, 2017)

งานวิจัยครั้งนี้จึงสนใจศึกษาความเป็นไปได้ของการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานผลิตขนมไทย โดยจะทำการศึกษาปริมาณธาตุอาหารและองค์ประกอบต่าง ๆ ในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตขนมไทย เพื่อดูความเหมาะสมของคุณลักษณะน้ำเสียในการผลิตก๊าซชีวภาพและหาแนวทางในการปรับปรุงคุณภาพน้ำเสียให้มีคุณลักษณะที่เอื้อต่อการผลิตก๊าซชีวภาพโดยกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ ผลที่ได้รับจากงานวิจัยคือ การสร้างแนวทางการใช้ประโยชน์น้ำเสียของโรงงานผลิตขนมไทย และได้แนวทางเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพสำหรับเป็นพลังงานทางเลือกหมุนเวียนในการกลับมาใช้ภายในกระบวนการผลิตได้

**อุปกรณ์และวิธีการทดลอง**

*การเก็บตัวอย่างน้ำเสีย*

ตัวอย่างน้ำเสียได้รับความอนุเคราะห์จากโรงงานผลิตขนมไทยทรัพย์สกุล จังหวัดเพชรบุรี ซึ่งมีน้ำเสียเกิดขึ้นปริมาณ 2,400 ลิตรต่อวัน จากกระบวนการผลิตขนมไทย เช่น ทองหยิบ ทองหยอด ฝอยทอง และหม้อแกง เป็นต้น ทำการสุ่มเก็บตัวอย่างน้ำเสียในช่วงระยะเวลาหลังเสร็จสิ้นกระบวนการผลิตขนมไทยทั้งหมดในแต่ละวัน จำนวน 3 ครั้ง จากบ่อ

รวบรวมน้ำเสียของโรงงาน ซึ่งเป็นบ่อพักน้ำเสียที่มีการผสมน้ำเสียเก่าและน้ำเสียใหม่ที่เกิดขึ้นในแต่ละวันก่อนรอไหลเข้าสู่กระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศต่อไป เก็บตัวอย่างน้ำปริมาณ 1 ลิตร ใส่ในขวดพลาสติกเก็บตัวอย่าง จำนวน 4 ขวด รักษาตัวอย่างด้วยการห่อกระดาษอลูมิเนียมและแช่เย็นที่อุณหภูมิ 4°C จากนั้นนำไปวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ

*การวิเคราะห์องค์ประกอบสารอินทรีย์ในน้ำเสีย*

ดำเนินการวิเคราะห์องค์ประกอบสารอินทรีย์ในน้ำเสียตามวิธีมาตรฐานของ APHA, AWWA and WPCE (1998) โดยมีพารามิเตอร์สำหรับการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสีย คือ ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ความต้องการออกซิเจนทางเคมี (chemical oxygen demand: COD) ปริมาณของแข็งทั้งหมด (total solids: TS) ปริมาณของแข็งระเหยง่าย (volatile solids: VS) ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (total nitrogen: TN) และปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (total phosphorus: TP) เพื่อนำค่าที่ได้มาใช้สำหรับการคำนวนอัตราส่วนธาตุอาหารที่จำเป็นต่อจุลินทรีย์ในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้อากาศ วิธีการวิเคราะห์แสดงดัง Table 1

**Table 1** Water quality parameters and analytical methods

| Parameters | Units | Analytical method |
|---|---|---|
| pH | - | pH Meter |
| Chemical Oxygen Demand (COD) | mg/L | Close Reflux Method |
| Total Solids (TS) | mg/L | Gravimetric Method |
| Volatile Solids (VS) | mg/L | Gravimetric Method |
| Total Nitrogen (TN) | mg/L | (TKN+ Nitrate+ Nitrite) |
| - TKN | | Kjeldahl Method |
| - Nitrate | | Brucine Method |
| - Nitrite | | Colorimetric Method |
| Total Phosphorus (TP) | mg/L | Ascorbic acid |

*ความเป็นไปได้ในการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานขนมไทย*

การศึกษาความเป็นไปได้ผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานผลิตขนม โดยศึกษาข้อมูลเชิงปริมาณขององค์ประกอบธาตุอาหารในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตขนมไทย เทียบกับปัจจัยสภาวะคุณภาพน้ำที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ คือ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และอัตราส่วนธาตุอาหาร COD:N:P เพื่อใช้เป็นแนวทางในการวางแผนและปรับปรุงคุณภาพน้ำจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ เพื่อการผลิตก๊าซชีวภาพ

**ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง**

น้ำเสียโรงงานผลิตขนมไทยที่ใช้ในการวิจัยเก็บตัวอย่างจากบ่อรวบรวมน้ำเสีย มีลักษณะทางกายภาพ คือ มีสีเหลืองน้ำตาลและมีกลิ่นเหม็นเปรี้ยว เนื่องจากมีการเกิดกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในบ่อรวบรวมน้ำเสีย ซึ่งสอดคล้องกับคุณลักษณะน้ำเสียที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 4.09±0.26 ค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมี (COD) 5,333±301.70 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) 3,013±252.00 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงดัง Table 2

เห็นได้ว่า น้ำเสียมีความเป็นกรด มีค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมีสูง ค่าคุณภาพน้ำในส่วนของสารอินทรีย์ที่เป็นไนโตรเจนทั้งหมดและฟอสฟอรัสมีค่าเท่ากับ 48.4±6.47 และ 4.8±0.35 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งมีค่าค่อนข้างต่ำ ซึ่งธาตุอาหารในน้ำมีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อการเจริญเติบโตและกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์แบบไม่ใช้อากาศ (Cao et al., 2020)

**Table 2** Quality of wastewater from Thai dessert factory

| Parameters | Units | Wastewater quality |
|---|---|---|
| pH | - | 4.09±0.26 |
| Chemical Oxygen Demand (COD) | mg/L | 5,333±301.70 |
| Total Solids (TS) | mg/L | 3,013±252.00 |
| Volatile Solids (VS) | mg/L | 2,369±325.89 |
| Total Nitrogen (TN) | mg/L | 48.4±6.47 |
| Total Phosphorus (TP) | mg/L | 4.8±0.35 |

ทั้งนี้ จุลินทรีย์ที่ทำการย่อยสลายสารอินทรีย์เพื่อเปลี่ยนรูปไปเป็นก๊าซชีวภาพในระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ คือ กลุ่มจุลินทรีย์ Methanogens ซึ่งมีความอ่อนไหวต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) โดย pH ที่เหมาะสมควรมีค่าอยู่ในช่วง 6.5–7.5 (Hajji et al., 2016) เพราะเมื่อมีค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำกว่า 6.5 จุลินทรีย์ Methanogens จะไม่สามารถจะเจริญเติบโตและมีจำนวนลดลง ในขณะที่ค่าความเป็นกรด-ด่างสูงกว่า 7.5–8.0 จะทำให้จุลินทรีย์ Methanogens มีประสิทธิภาพการย่อยสลายลดลงเช่นเดียวกันและหากค่าความเป็นกรด-ด่างสูงขึ้นถึง 9.0 ระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์จะหยุดทำงาน (เกรียงศักดิ์, 2543) ดังนั้น หากกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศมีสภาวะไม่เหมาะสมต่อกลุ่มจุลินทรีย์ Methanogens จะส่งผลต่อคุณภาพและองค์ประกอบก๊าซที่เกิดขึ้น ซึ่งคุณภาพของก๊าซชีวภาพขึ้นอยู่กับสัดส่วนร้อยละของก๊าซมีเทน (Kumanowska et al., 2017) เนื่องจากส่งผลต่อค่าความร้อนสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ ซึ่งเกณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้แทนแก๊สหุงต้มคือ ควรมีค่าก๊าซมีเทนประมาณร้อยละ 55–70 คิดเป็นค่าความร้อนต่ำและค่าความร้อนสูง 29.45 และ 33.32 MJ/Kg (กลิ่นประทุม และคณะ, 2564)

ลักษณะของตัวอย่างน้ำเสียโรงงานผลิตขนมไทยในงานศึกษาวิจัยครั้งนี้มีค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 4.09±0.26 ซึ่งอยู่ในช่วงค่าความเป็นกรด จากงานวิจัยของ Ali et al. (2019) ที่มีการศึกษาผลของค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ต่อคุณภาพของก๊าซชีวภาพ โดยพบว่าค่า pH ที่ลดต่ำลงหรือเป็นกรดมากขึ้น จะส่งผลให้องค์ประกอบก๊าซมีเทนลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Mao et al. (2017) พบว่าค่า pH ที่เพิ่มขึ้นหรือมีความเป็นด่างมากขึ้น ส่งผลให้องค์ประกอบก๊าซมีเทนลดลงเช่นกัน ดังนั้นหากต้องการก๊าซชีวภาพที่มีค่าความร้อนเพียงพอต่อการนำไปใช้ประโยชน์ควรควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ให้อยู่ในช่วง 6.5–7.5 เพื่อให้มีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด

การควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) มีหลายแนวทางการแก้ไข โดยแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจคือ การเพิ่มระยะเวลากเก็บกัก (HRT) และลดอัตราการป้อนสารอินทรีย์เข้าระบบ เนื่องจากกลุ่มจุลินทรีย์ Methanogens ในกระบวนการสร้างมีเทนจะนำกรดไขมันระเหยง่าย ซึ่งเป็นสาเหตุการลดลงของค่าความเป็นกรด-ด่างในระบบ ไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตก๊าซมีเทนจนทำให้เกิดภาวะสมดุล มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) สูงขึ้นอยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับการทำงานของกลุ่มจุลินทรีย์ Methanogens และส่งผลต่อองค์ประกอบก๊าซมีเทนที่ได้ (Montaes et al., 2014)

ผลวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสียโรงงานผลิตขนมไทยแสดงในรูปซีโอดี (COD) มีค่าเท่ากับ 5,333±301.70 mg/L มีปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) และของแข็งระเหยง่าย (VS) 3,013±252.00 และ 2,369±325.89 mg/L ตามลำดับ อัตราส่วนธาตุอาหารของน้ำเสียโรงงานผลิตขนมไทย COD: N: P เท่ากับ 100: 0.9: 0.09 เมื่อเทียบคุณลักษณะของน้ำเสียกับงานวิจัยของ Singharat et al. (2017) ที่ทำการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานเบเกอรี่ มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์แสดงในรูปซีโอดี (COD) ปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) และของแข็งระเหย (VS) เท่ากับ 5,360±792, 4,230±65.6 และ 2,887±113.7 mg/L ตามลำดับ ที่อัตราส่วนธาตุอาหาร COD: N: P เท่ากับ 100: 2.3: 1.4 มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเฉลี่ยเท่ากับ 0.481 l/g VS removed และองค์ประกอบก๊าซมีเทนเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 55.8±6.4 และจากงานวิจัยของ Bokhary et al. (2021) ที่ทำการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยใช้อัตราส่วนธาตุอาหาร COD: N: P เท่ากับ 100:2.6:1 มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเฉลี่ยเท่ากับ 0.054-0.334 l/g MLSS removed และองค์ประกอบก๊าซมีเทนเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 56.57±1.91

ผลจากการเปรียบเทียบอัตราส่วนธาตุอาหารกับงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น พบว่าอัตราส่วนธาตุอาหารของน้ำเสียโรงงานผลิตขนมไทย COD: N: P เท่ากับ 100: 0.9: 0.09 นั้นมีปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่ต่ำกว่า ซึ่งอัตราส่วนธาตุอาหารที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพควรมีค่า COD: N: P เท่ากับ 100: 2.2: 0.4 เนื่องจากธาตุอาหารมีผลต่อการเจริญเติบโตและประสิทธิภาพกระบวนการย่อยสลายของกลุ่มจุลินทรีย์ Methanogens (Vidal et al., 2000)

อย่างไรก็ตามการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าน้ำเสียจากกระบวนการผลิตขนมไทยมีมีปริมาณสารอินทรีย์เพียงพอต่อการดำเนินกระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์แบบไม่ใช้อากาศ แต่เนื่องจากคุณลักษณะของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตขนมไทยมีความเป็นกรด และอัตราส่วนธาตุอาหารต่ำกว่าความต้องการของจุลินทรีย์กลุ่ม Methanogens หากทำการบำบัดแบบไร้อากาศ อาจส่งผลต่อคุณภาพและองค์ประกอบของก๊าซที่ได้ ซึ่งอาจจะทำให้ได้องค์ประกอบก๊าซมีเทนในปริมาณน้อย ทั้งนี้สามารถดำเนินการแก้ไขได้ด้วยวิธีการหมักร่วม (co-digestion) กับวัสดุอื่นที่มีธาตุอาหารสูง ซึ่งเป็นการปรับสมดุลอัตราส่วนธาตุอาหารรวมถึงค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสียจากโรงงานขนมไทยให้มีความเหมาะสม สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการเกิดก๊าซชีวภาพและองค์ประกอบก๊าซมีเทนทำให้มีค่าความร้อนเพียงพอต่อการนำไปใช้ประโยชน์ได้ โดยจากงานวิจัยของ Castillo et al. (2006) ทำการเปรียบเทียบผลผลิตก๊าซมีเทนที่ได้ระหว่างการหมักแบบชนิดเดียวและการหมักแบบร่วมของสารตั้งต้น 3 ชนิด คือ มูลโค ขยะอินทรีย์จากชุมชน และของเสียจากโรงงานผ้าฝ้าย พบว่าการหมักร่วมมีผลผลิตก๊าซมีเทนสูงกว่าการหมักแบบแยกชนิดเดียว รวมถึงส่งผลต่อประสิทธิภาพอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการหมักแบบแยกชนิด (Dieu et al., 2015; Paudel et al., 2017) และจากงานวิจัยของ Khadka et al. (2022) รายงานว่าอัตราส่วนการหมักร่วมระหว่างมูลโคและของเสียอินทรีย์มีผลต่อปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้ โดยพบว่าอัตราส่วนของแข็งระเหยง่ายระหว่างของเสียอินทรีย์ต่อมูลโค 1:1 จะเกิดผลผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด ทั้งนี้อัตราส่วนการหมักร่วมยังขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น คุณลักษณะของเสียที่แตกต่างกัน และช่วงค่าความเป็นกรดด่าง ที่ศึกษาต่างกัน รวมถึงวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์ เป็นต้น

ดังนั้น เมื่อพิจารณาถึงค่าความเป็นกรด-ด่างและอัตราส่วนของธาตุอาหารของน้ำเสียโรงงานผลิตขนมไทยเทียบกับงานวิจัยต่าง ๆ แสดงให้เห็นว่าน้ำเสียโรงงานผลิตขนมไทยมีความเป็นไปได้ในการผลิตก๊าซชีวภาพ แต่คุณภาพของก๊าซชีวภาพที่ได้ยังไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ประโยชน์ จึงต้องมีการปรับปรุงคุณลักษณะน้ำด้วยวิธีการหมักร่วมกับวัสดุที่มีธาตุอาหารสูงและหาระยะเวลาเก็บกัก (HRT) ที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศให้เป็นไปตามเกณฑ์ที่เหมาะสม

**สรุป**

จากการดำเนินศึกษาวิจัยลักษณะธาตุอาหารของน้ำเสียโรงงานผลิตขนมไทย พบว่า น้ำเสียโรงงานผลิตขนมไทยมีสภาพเป็นกรด จึงต้องควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ให้อยู่ในช่วง 6.5–7.5 ซึ่งเป็นค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่เหมาะสมสำหรับการทำงานของจุลินทรีย์ในการผลิตก๊าซชีวภาพ นอกจากนี้น้ำเสียโรงงานผลิตขนมไทยมีอัตราส่วนธาตุอาหาร COD: N: P เท่ากับ 100: 0.9: 0.09 ซึ่งมีปริมาณธาตุอาหารต่ำ ซึ่งจุลินทรีย์แบบไม่ใช้อากาศสามารถดำเนินการย่อยสลายสารอินทรีย์เป็นก๊าซชีวภาพได้ แต่คุณภาพของก๊าซชีวภาพที่ได้จะมีองค์ประกอบก๊าซมีเทนไม่เพียงพอต่อการนำไปใช้ประโยชน์ จึงจำเป็นต้องปรับสมดุลอัตราส่วนธาตุอาหารในน้ำเสียด้วยการเพิ่มปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสโดยเติมวัสดุหมักร่วมลงในน้ำเสีย เพื่อให้ได้อัตราส่วนธาตุอาหารที่มีความเหมาะสม และควรมีระยะเวลาเก็บกักที่เหมาะสมต่อกระบวนการสร้างก๊าซชีวภาพ เพื่อให้ได้ก๊าซชีวภาพที่มีคุณภาพสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

**เอกสารอ้างอิง**

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. 2564. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับ ก๊าซชีวภาพ. ศูนย์บริการวิชาการด้านพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. กรุงเทพฯ.

กลิ่นประทุม ปัญญาปิง, รสสุคนธ์ จะวะนะ, ขนิษฐา ราชบังเทิง, ธิดารัตน์ พิสิฐชัยกร, ธีรเมธ นาปรัง. 2564. การอัดก๊าซชีวภาพในถังบรรจุก๊าซและการใช้หุงต้ม. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา 6: 12–17. doi: 10.14456/rmutlengj.2021.2.

เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2542. การบำบัดน้ำเสีย (Wastewater Treatment). พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักพิมพ์สยามสเตชั่นเนอรี่ซัพพลายส์. กรุงเทพฯ.

ไพเชษฐ์ ธรรมภาณ. 2541. ผลของระยะเวลากักเก็บน้ำของถังปฏิกิริยาสร้างกรดต่อการบำบัดน้ำเสียมูลสุกรโดยกระบวนการบำบัดแบบไร้ออกซิเจนสองขั้นตอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

สำนักจัดการคุณภาพน้ำ. 2560. คู่มือระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน. กรมควบคุมมลพิษ, กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพฯ.

Ahmmad, R.M., Haque, S. 2014. Providing electricity by digester types on biogas productions from municipal solid waste in Dhaka city, Bangladesh. International Journal of Energy, Information and Communications 5: 13–22. doi: 10.14257/ijeic.2014.5.3.02

Ali, S., Hua, B., Huang, J.J., Droste, R.L., Zhou, Q., Zhao, W., Chen, L. 2019. Effect of different initial low pH conditions on biogas production, composition, and shift in the aceticlastic methanogenic population. Bioresour. Technol. 289: 121579. doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121579

APHA, AWWA, WEF. 2012. Standard methods for the examination of water and wastewater, 22nd. American Public Health Association, Washington DC, USA.

Bennich, T., Belyazid, S. 2017. The route to sustainability-prospects and challenges of the bio-based economy. Sustainability 9: 887. doi: 10.3390/su9060887

Bokhary, A., Leitch, M., Liao, B. 2021. Effect of organic loading rate on the biological performance of the thermophilic anaerobic membrane bioreactor treating pulp and paper primary sludge. Clean Techn. Enviro.n Policy 23: 2669–2681. doi.org/10.21203/rs.3.rs-195625/v1

Cao, L., Keener, H., Huang, Z., Liu, Y., Ruan, R., Xu, F. 2020. Effects of temperature and inoculation ratio on methane production and nutrient solubility of swine manure anaerobic digestion. Bioresour. Technol. 299: 122552. doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122552

Castillo, M.E.F., Cristancho, D.E., Arellano, A.V. 2006. Study of the operational conditions for anaerobic digestion of urban solid wastes. Waste Manag. 26: 546–556. doi.org/10.1016/j.wasman.2005.06.003

Delgenes, J.P., Rustrian, E., Bernet, N., Moletta, R. 1997. Combined biodegradation of carbon, nitrogen and phosphorus from wastewaters. J. Mol. Catal. B Enzym. 5: 429–433.

Dieu, T.T.M., Van, N.B., Trus, T.T.T. 2015. Biogas recovery from anaerobic digestion of starched food refuse what would be proper conditions?. International Journal of Innovative Science, Engineering and Technology 2: 519–527.

Hajji, A., Rhachai, M., Garoum, M., Laaroussi, N. 2016. The effects of pH, temperature and agitation on biogas production under mesophilic regime. In: Proceeding 3rd International Conference on Renewable Energies for Developing Countries. Salé - Médina, Morocco.

Hussain, A., Kumar, P., Mehrotra, I. 2015. Nitrogen and phosphorus requirement in anaerobic process: A review. Environ. Eng. Manag. J. 14: 769–780.

Khadka, A., Parajuli, A., Dangol, S., Thapa, B., Sapkota, L., Carmona-Martínez, A.A., Ghimire, A. 2022. Effect of the substrate to inoculum ratios on the kinetics of biogas production during the mesophilic anaerobic digestion of food waste. Energies 15: 834. doi.org/10.3390/en15030834

Kumanowska, E., UruñuelaSaldaña, M., Zielonka, S., Oechsner, H., 2017. Two-stage anaerobic digestion of sugar beet silage: The effect of the pH-value on process parameters and process efficiency. Bioresour. Technol. 245: 876–883.

Mao, C., Zhang, T., Wang, X., Feng, Y., Ren, G., Yang, G. 2017. Process performance and methane production optimizing of anaerobic co-digestion of swine manure and corn straw. Sci Rep. 7: 9379. doi: 10.1038/s41598-017-09977-6

Montaes, S., Perez, M., Solera, R. 2014. Anaerobic mesophilic co-digestion of sewage sludge and sugar beet pulp lixiviation in batch reactor: Effect of pH control. Chem. Eng. J. 255: 492–499.

Padi, R.K., Chimphango, A., Roskilly, A.P. 2022. Economic and environmental analysis of waste-based bioenergy integration into industrial cassava starch processes in Africa. Sustain. Prod. Consum. 31: 67–81. doi.org/ 10.1016/j.spc.2022.02.002.

Paudel, S., Kang, Y., Yoo, Y.-S., Seo, G.T. 2017. Effect of volumetric organic loading rate (OLR) on H2 and CH4 production by two-stage anaerobic co-digestion of food waste and brown water. Waste Manag. 61: 484–493. doi.org/10.1016/j.wasman.2016.12.013.

Singharat, K., Sangkarak, S., Pongsuk, O., Junyapoon, S. 2017. Biogas production from bakery wastewater in two-stage anaerobic digestion system. Curr. Appl. Sci. Technol. 17: 103–112.

Vidal, G., Carvalho, A., Méndez, R., Lema, J.M. 2000. Influence of the content in fats and proteins on the anaerobic biodegradability of dairy wastewaters. Bioresour. Technol. 74: 231–239.

Yebo, L., Park, S., Zhu, J. 2011. Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste. Renew. Sustain. Energy Rev. 15: 821–826.

Zhang, B., Zhang, L.L., Zhang, S.C., Shi, H.Z., Cai, W.M. 2005. The influence of ph on hydrolysis and acidogenesis of kitchen wastes in two-phase anaerobic digestion. Environ. Technol. 26: 329–340. doi: 10.1080/09593332608618563

# Hydrochemical characteristics and groundwater quality assessment along the coastal aquifer in Rayong province, Thailand

Sirilak Lorchuenwong[a,*], Srilert Chotpantarat[a,b]

[a]Department of Geology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

[b]Center of Excellence in Environmental Innovation and Management of Metals (EnvIMM), Environmental Research Institute, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: meiow_siri@hotmail.com

**Abstract**

Hydrochemical characteristics and groundwater quality assessment can help to understand groundwater quality affected by contamination in the coastal aquifer. To determine the groundwater quality contamination in the coastal aquifer using hydrochemical characteristics assessment. The outcomes were explained with the results from hydrochemical characteristics, Piper diagram, and Hydrochemical Facies Evolution Diagram, which were employed to estimate the groundwater quality from the contamination of the coastal aquifer. This research collected 7 groundwater samples to analyze major ions. Following ion concentration analysis, the CBR were calculated and the calculation results of 7 groundwater samples in each season were used for data interpretation and discussion. The results of the hydrochemical characteristics assessment that were interpreted from the Piper plot diagram, present the majority groups of all groundwater samples in both seasons can be classified into four types. Moreover, the interpretation results from the HFE-Diagram show that groundwater samples are also contaminated by the influence of seawater along the coastal line in Rayong Province. This has proven that seawater intrusion was found along the coastal line, these findings provide important information on groundwater contamination. Therefore, relevant agencies can use these findings to plan for groundwater use in the coastal area of the Rayong Province.

**Keywords:** Groundwater contamination, Hydrochemical characteristics assessment, Hydrochemical facies evolution diagram (HFE-Diagram), Piper diagram, Seawater intrusion

## Introduction

Groundwater contamination is a serious environmental issue and an important problem of groundwater quality deterioration in aquifers. Salinity in groundwater is an important problem that may arise from natural factors such as water-rock interactions during rock weathering, groundwater recharge, evaporation and dissolution of minerals, and seawater intrusions, including ion exchange and adsorption. There are also factors that influence groundwater quality caused by human activities, such as groundwater contamination from agriculture, groundwater overfilling and pumping (Li et al., 2019), as well as improper sewage disposal and urbanization (Shi et al., 2018). There are many factors of salinity in groundwater that affect the hydrochemical characteristics of groundwater. Key indicators for estimating salinity in groundwater are the types of pollution delivered to groundwaters including Chlorides ($Cl^-$) and Total Dissolved Solids (TDS). Groundwater hydrochemical characteristics study is therefore significant for the groundwater classification. Thus, many methodologies are employed to comprehend the hydrochemical processes of groundwater that affect the salinity and quality of groundwater (Hiscock, 2009).

However, it is necessary to classify groundwater contamination areas from the effects of seawater intrusion. The purpose of the current research was to conduct a study of groundwater quality by using the hydrochemical facies assessments of groundwater on coastal aquifers in the Rayong Province as the Piper diagram, and the HFE-Diagram. As a result, the findings of this study will be useful in determining the extent of groundwater contamination in Rayong Province. This will lead to planning to solve the problem of groundwater contamination and the development of groundwater resources to promote community growth and urban extension of the Rayong province.

## Materials and Methods

### *Research area and physiography*

Research area's location covers a part of three Districts: Nikhom Phatthana, Ban Khai, and Mueang Rayong, in Rayong Province, Thailand. It lies between latitudes $12^{o}$ 35' to $12^{o}$ 48' N and longitudes $101^{o}$ 9' to $101^{o}$ 26' E. The geography of the research area can be classified into three major topographic characteristics, normally flat to undulating terrain, and high-relief mountainous The high-level mountains located in the eastern section of the area have an elevation high range above 200 m.MSL, which are the recharge area sources for the surface water, whereas the vast plains cover in the southern part of the area with a low elevation between 0-100 m.MSL. The research area boundary is displayed on the map in Fig. 1.

### *Geologic setting*

In terms of geological features of the research area has been reported by the Department of Mineral Resources (2007) as shown in Fig. 2. The geologic unit consists of unconsolidated sediments such as gravel, sand, silt, and clay: alluvial deposit, colluvial deposit, coastal wave deposit, and coastal tide deposit.

In contrast, consolidated rocks consist of Silurian-Devonian metamorphic to Carboniferous-Permian sedimentary rocks, and Triassic granite rock was primarily located toward the eastern project zone.

*Hydrogeologic setting*

A digitized hydrogeologic map at a scale of 1: 100,000 was composed and summarized by the DGR in 1995. Hydrogeological units in the research area are comprised of the important unconsolidated sediment aquifer as a colluvium aquifer whereas the major consolidated rock aquifer was a granitic aquifer, as shown in Fig. 3.

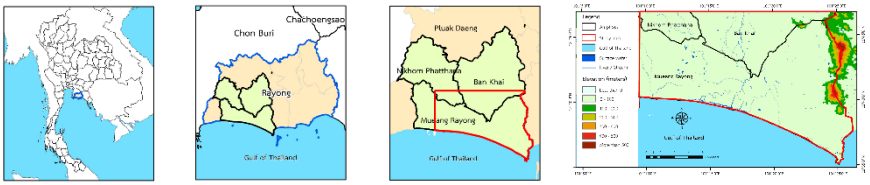



**Fig. 1** Location map of the study area: Nikhom Phatthana, Mueang Rayong, and Ban Khai Districts, Rayong province, Thailand

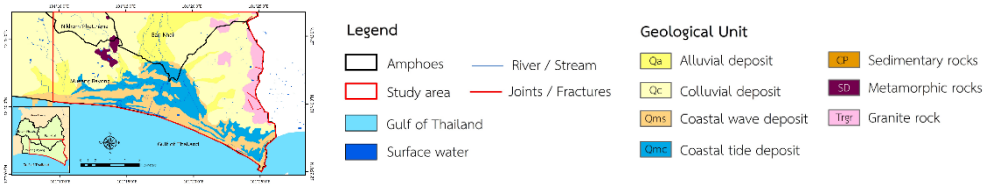



**Fig. 2** Geological map showing the major geologic features in the area

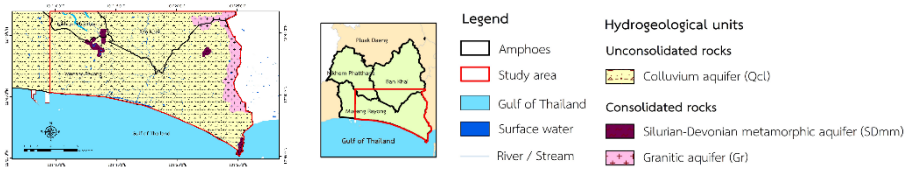



**Fig. 3** Hydrogeological units map showing the main aquifers in the study area

*Groundwater sampling and Laboratory analysis*

We collected a total of 7 groundwater samples from active open wells, and monitoring wells in March 2021 and November 2021 as shown in Fig. 4. Furthermore, we preliminarily measured groundwater quality in the field: watercolor, water odor, pH, specific conductivity, TDS, temperature (recorded from a conductivity meter), depth of groundwater well, depth to water levels, etc. In each station, we collected groundwater samples in 3 polyethylene bottles that had to be carefully collected with no air bubbles appearing in the bottle, consisting of bottles of 1,000 mL. and 240 mL. with no acid added for analysis in major ions and 1 bottle of 240 mL. For analysis total arsenic with added nitric acid ($HNO_3$ concentration 1:1).

After water sampling, all groundwater samples were delivered and analyzed in the laboratory of the DGR. Groundwater samples were analyzed for concentrations of important cations ($Ca^{2+}$, $Na^{+}$, $K^{+}$, $Mg^{2+}$) as well

as anions ($HCO_3^-$, $SO_4^{2-}$, $Cl^-$, $F^-$) Moreover, ions of $Mn^-$, total Fe, $NO_3^-$, and TDS were also analyzed for interpretation and discussion. However, we focus on the standard method for the water examination and wastewater (22nd Edition) which is the method of sample collecting, preserving, and analyzing groundwater samples and has been improved by the APHA (2012).

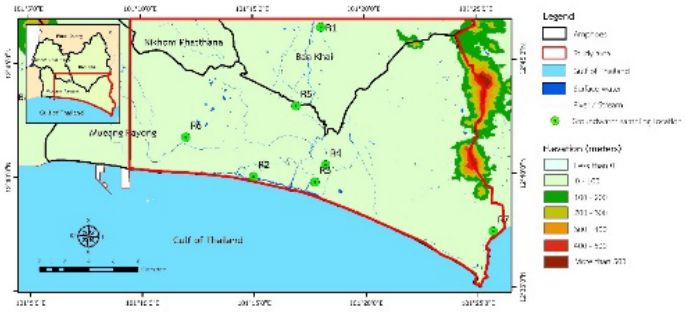



**Fig. 4** Locations of groundwater sampling

*Hydrochemical characteristics*

*Piper diagram*

The Hill-Piper tri-linear diagram is a diamond diagram that was developed by Hill and Piper (1944). It was helpfully used to assess the percentage composition of the principal cations and anions. The diamond grid component consists of ions such as $Ca^{2+}$, $Mg^{2+}$, and ($Na^+$ + $K^+$) as well as $Cl^-$, $SO_4^{2-}$, and ($CO_3^{2-}$ + $HCO_3^-$). Correspondingly, the diamond grid component can be used to explain the water types to show the nature of groundwater quality such as NaCl type, $NaHCO_3$ type, etc. as shown in Fig. 5.

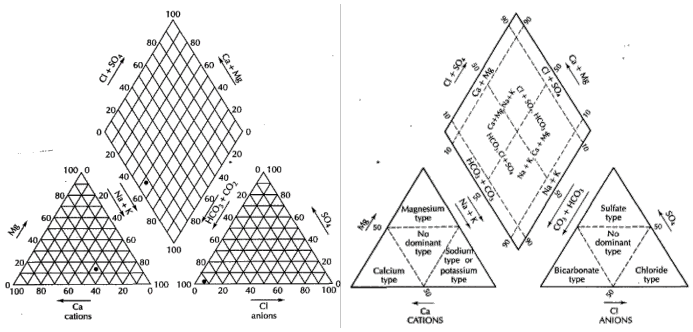



**Fig. 5** Hydrogeochemical facies using piper diagram

*Hydrochemical facies evolution diagram (HFE-D)*

In consideration, the ion exchange mechanism causes seawater intrusion into groundwater. Hydrochemistry of the saltwater intrusion and recovery stages of seawater intrusion were interpreted using the HFE-Diagram. It can be substituted for other hydrochemical diagrams because it has the benefit of allowing for the identification of hydrochemical facies without the need for aggregation, as well as the display of probable

sample groups and evolution patterns in the aquifer (Giménez-Forcada, 2019). Figs. 6A and 6B show an application of the HFE-D that provides an understanding of the key hydrochemical processes that occur in a specific aquifer. The hydrochemical facies are computed as a percentages function of the two principal anions and cations, which are calculated as a proportion of the total both ions with meq/L values of concentration, and for the sum of anions and cations, respectively. However, each facies are called after the dominant anion and cation which account for more than half of the total cations and anions, respectively. Simply explained, the HFE-D reflects the percentages of the four most significant ions and their combinations in each instance (Giménez-Forcada, 2014).

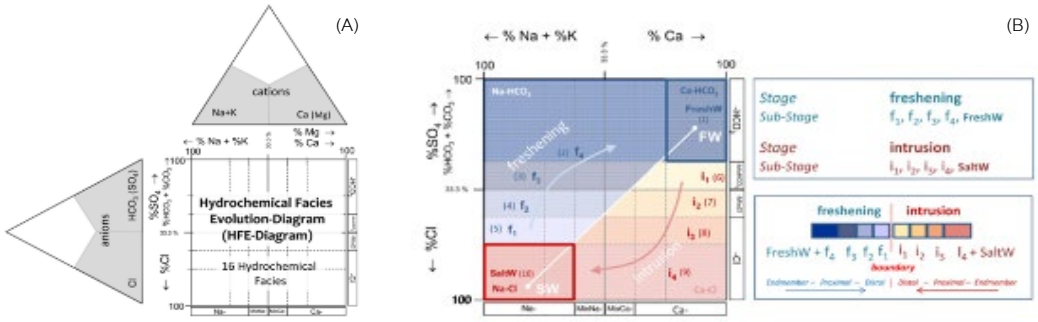



**Fig. 6** (A) Presenting the main characteristics of the HFE-Diagram; (B) representing stages and substages during intrusion and freshening periods in the diagram

## Results and Discussion

*Charge balance error (CBE)*

To determine the hydrogeochemical characteristics and to study the quality of groundwater. The chemical analyses for charge ion balance error were checked to ensure high suitable water quality analysis. An analysis results have units of milligram per liter (mg/L) and all cations and anions from the analysis were converted and expressed in the units of milliequivalents per liter (meq/L). The computed results revealed that the CBE values of all groundwater samples will corroborate the reliability of this analysis. The calculated CBE for each water sample is calculated using the Equation 1:

$$CBE = \frac{\sum cations - \sum anions}{\sum cations + \sum anions} \times 100\% \quad (1)$$

Chemical analysis of groundwater samples in unconsolidated aquifers collected and analyzed to determine hydrochemical characteristics, 7 groundwater samples were collected in March 2021 and November 2021, respectively. Following ion concentration analysis, the CBE was calculated to ensure that the standard error for each sample was considered acceptable by the CBE values with a limit of 10% (ALS Environmental,

2014). The results of the CBE calculation for all samples ranged from -1.07 to 1.05 in the dry season and -0.77 to 8.62 in the wet season, with the 7 groundwater samples in both seasons indicating that this analysis is used for discussion and interpretation.

*A statistical of the chemical parameters*

A statistical summary of the water chemistry parameters for all groundwater samples (n = 7) and the basic statistics described twelve variables' statistics as a mean, maximum, and minimum that is compared to the upper limit submitted by the WHO (World Health Organization, 2011) and is shown in Table 1. It is discovered that the average of the groundwater sample analyses in unconsolidated aquifers revealed that the concentrations of each parameter are relatively high in both seasons and there is a significant difference in exceeding WHO standards, except for nitrate and fluoride. Especially, the cations and anions concentrations in the unconsolidated aquifer state a huge variability in both seasons. The pH values range from nearly neutral to slightly alkaline with ranges from 6.9 to 7.8 (average 7.4) in the dry season, and from 5.7 to 7.8 (average 7.0) in the wet season. Furthermore, the electrical conductivity (EC) values state a huge variability from 308 to 43,600 µS/cm in the dry season, and from 69 to 32,000 µS/cm in the wet season with an average value of 13,436 µS/cm and 11,468 µS/cm, respectively. Approximately 57.1% in both seasons with high TDS, calcium, sodium, and chloride concentrations above WHO standards. The TDS values were recorded as 200 to 28,300 mg/L with an average of 8,720 mg/L in the dry season and ranged from 45 to 20,800 mg/L with an average of 7,458 mg/L in the wet season. However, the maximum TDS concentration is found in the south along the coastal line. Some of the groundwater may mix with the residual water in the groundwater or be affected by seawater intrusion that results in a relatively high TDS, sodium, and chloride content in coastal areas.

*Piper diagram*

Notwithstanding, the following figure of the Piper diagram helps to get a general vision of groundwater during the dry and rainy seasons, which is shown in Figs. 7A and 7B, respectively. We can interpret the hydrochemical facies from the Piper diagram by using data from groundwater samples and chemical analyses collected in the area, in which the diagram shows the main anion is bicarbonate and chloride, while the cation is dominated by calcium sodium, and potassium. However, the types of groundwater in the dry seasons can be classified into three types as follows: Ca-$HCO_3^-$ type, Ca-Na-$HCO_3^-$-Cl type, and Na-Cl type that the groundwater types of Ca-$HCO_3^-$, and Ca-Na-$HCO_3^-$-Cl with the groundwater composition belonging to the freshwater quality. Moreover, we can be classified into four types in the rainy seasons consisting of Ca-$HCO_3^-$ type, Ca-Na- $HCO_3^-$ type as well as Ca-Na-$HCO_3^-$-Cl type, and Na-Cl type which the types of groundwater Ca-$HCO_3^-$ type, Ca-Na-$HCO_3^-$ type, and Ca-Na-$HCO_3^-$-Cl type with the groundwater composition belonging to the freshwater quality were found in the western, eastern, and northern of the study area, respectively. Meanwhile, the Na-Cl type is commonly found in the southern part of the study along the coastal line.

In general, Ca-$HCO_3^-$, and Ca-Na-$HCO_3^-$ groundwater type is typical fresh groundwater and Na-Cl type is typical seawater intrusion (Appelo and Postma, 2009); or indicates seawater influences (mixing) that are also found in coastal aquifers influenced by seawater (Wang and Jiao, 2012; Chandrajith et al., 2016). Therefore, this can be summarized by the fact that these groundwater samples are likely influenced by the seawater origin that is found in the south along the coastal line area as shown in Figs. 8A and 8B.

**Table 1** Summarizes the water chemistry parameters in the unconsolidated aquifers of the twelve variables considered for the two sampling periods

| Statistical | pH | EC | TDS | $Ca^{2+}$ | $Mg^{2+}$ | $Na^+$ | $K^+$ | $HCO_3^-$ | $SO_4^{2-}$ | $Cl^-$ | $NO_3^-$ | $F^-$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Units | | (µs/cm) | | | | | (mg/L) | | | | | |
| Standard WHO | 7.0-8.5 | 2,000 | 600 | 75 | 30 | 200 | 12 | 120 | 250 | 250 | 50 | 1.5 |
| March 2021 – (N=7 wells) | | | | | | | | | | | | |
| Mean | 7.4 | 13,436 | 8,720 | 235 | 324 | 2,498 | 78 | 381 | 508 | 4,686 | 8 | 0.3 |
| Max | 7.8 | 43,600 | 28,300 | 580 | 1,200 | 8,800 | 270 | 890 | 1,400 | 16,000 | 31 | 0.5 |
| Min | 6.9 | 308 | 200 | 34 | 2 | 8.3 | 3.6 | 115 | 1 | 9.6 | <0.9 | 0.1 |
| No. well >WHO | 1 | 3 | 4 | 4 | 3 | 4 | 6 | 6 | 3 | 4 | 0 | 0 |
| %>WHO | 14.3 | 42.9 | 57.1 | 57.1 | 42.9 | 57.1 | 85.7 | 85.7 | 42.9 | 57.1 | 0 | 0 |
| November 2021 – (N=7 wells) | | | | | | | | | | | | |
| Mean | 7.0 | 11,468 | 7,458 | 269 | 260 | 2,136 | 65 | 328 | 434 | 4,053 | 5 | 0.3 |
| Max | 7.8 | 32,000 | 20,800 | 690 | 880 | 6,100 | 190 | 638 | 1,200 | 12,000 | 14 | 0.4 |
| Min | 5.7 | 69 | 45 | 1 | 3 | 8 | 4 | 21 | 4 | 8 | 0.8 | 0.1 |
| No. well >WHO | 3 | 3 | 4 | 4 | 3 | 4 | 5 | 6 | 3 | 4 | 0 | 0 |
| %>WHO | 42.9 | 42.9 | 57.1 | 57.1 | 42.9 | 57.1 | 71.4 | 85.7 | 42.9 | 57.1 | 0 | 0 |

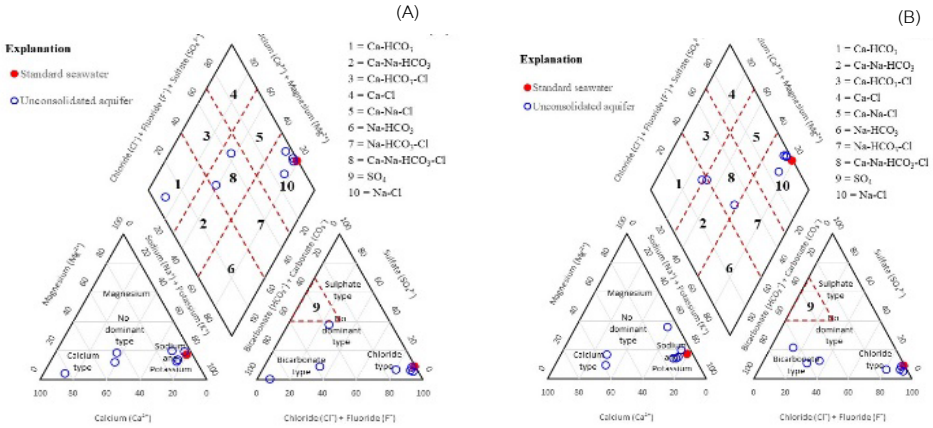



**Fig. 7** Piper plot diagram of the analyzed groundwater samples for the two periods. (A) March 2021; (B) November 2021

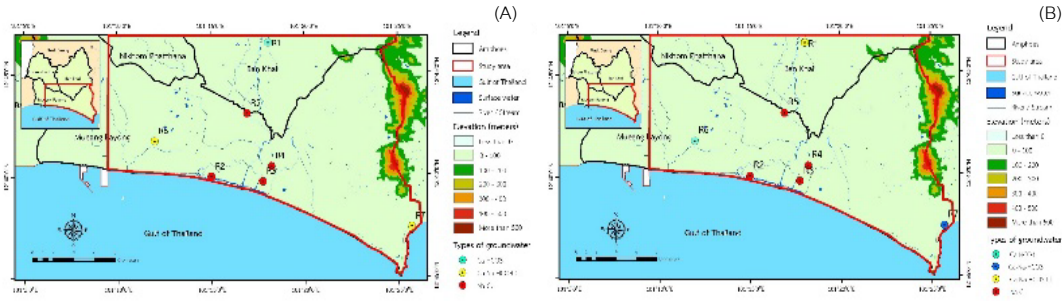



**Fig. 8** Hydrochemical facies distribution from the Piper plot diagram (A) March 2021; and (B) November 2021

*Hydrochemical facies evolution diagram (HFE-Diagram)*

As a result of the HFE-Diagram suggests that all water samples are both freshwater (blue color) and saline water (red color). Mostly, groundwater samples in the research area were located close to NaCl-type that located on the intrusion area in the HFE-Diagram, suggesting the saltwater incursion phase from freshwater to seawater (substage i1-i4) while some groundwater samples were freshening progress from seawater to freshwater (substage f1-f4) as displayed in Figs. 9A and 9B. In summary, comparing the groundwater classification on the HFE-Diagram of the unconsolidated aquifers in March 2021 and November 2021, we found that there is the same number of groundwater samples that saline water quality in the intrusion stage (substage i4) in both seasons. In sum, the groundwater quality in this study does not significantly change with the season. Moreover, the HFE-Diagram shows that the 4 groundwater samples in both seasons are focused on the NaCl facie that is found in the southern of the area along the coastal line. This can be summarized that these saline groundwater contaminations may be caused by natural factors such as seawater intrusions, etc.

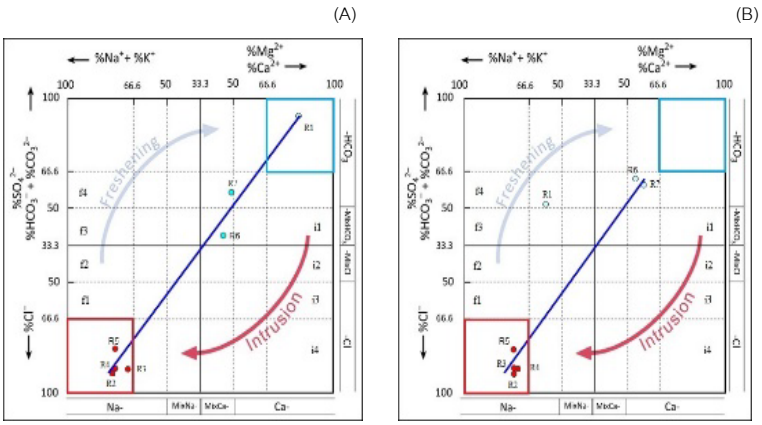



**Fig. 9** Represented groundwater samples on HFE-Diagram. Blue rounds represent samples of freshwater and red rounds represent samples of saline water. (A) March 2021; and (B) November 2021

**Conflict of Interest**

The authors declare that there are no conflicts of interest.

**Acknowledgements**

Sirilak Lorchuenwong is very grateful to be thankful for our appreciation to the Department of Geology, Faculty of Science, Chulalongkorn University as well as wish to acknowledge financial support for my research in 2021 from the 90th Anniversary of Chulalongkorn University fund, Ratchadaphiseksomphot Endowment Fund (GCUGR1125641210000M), Chulalongkorn University (90_48_1_64_033), the Thailand Science Research and Innovation Fund Chulalongkorn University, and the National Research Council of Thailand (NRCT): NRCT5-RSA63001-06, Chulalongkorn University (90_48_1_64_033). Furthermore, for supporting some of the data, we also thank the Department of Groundwater Resources.

**References**

ALS Environmental Limited (ALS). 2014. Ionic balance calculations. https://www.alsenvironmental.co.uk/mediauk/pdf/datasheets/wastewater/als_ww_ionic_balance_v3.pdf, 15 April 2016.

American Public Health Association (APHA). 2012. Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, 22nd ed. American Public Health Association. Washington DC, USA.

Appelo, C.A.J., Postma, D. 2009. Geochemistry, groundwater and pollution. Sediment. Geol. 220: 241–270.

Chandrajith, R., Diyabalanage, S., Premathilake, K.M., Hanke, C., Van, G.R., Barth, J.A. 2016. Controls of evaporative irrigation return flows in comparison to seawater intrusion in coastal karstic aquifers in northern Sri Lanka: evidence from solutes and stable isotopes. Sci. Total Environ. 548-549: 421–428.

DGR. 1995. Groundwater Map at Provincial Project, Scale 1: 100,000, Chon Buri and Rayong Province. Department of Groundwater Resources, Ministry of Natural Resource and Environment. Bangkok, Thailand.

DMR. 2007. Mineral Resource in Rayong Province, Thailand. Department of Mineral and Resource, Ministry of Natural Resource and Environment. Bangkok, Thailand.

Fetter, C.W. 2001. Applied Hydrogeology, 4th ed. Prentice-Hall, Upper Saddle River. New Jersey, NJ, USA.

Gimenez-Forcada, E. 2014. Space/time development of seawater intrusion: A study case in Vinaroz coastal plain (Eastern Spain) using HFE-diagram, and spatial distribution of hydrochemical facies. J. Hydrol. 517: 617–627.

Gimenez-Forcada, E. 2019. Use of the Hydrochemical Facies Diagram (HFE-D) for the evaluation of salinization by seawater intrusion in the coastal Oropesa Plain: Comparative analysis with the coastal Vinaroz Plain, Spain. HydroResearch 2: 76–84.

Hiscock, K.M. 2009. Hydrogeology: Principles and Practice. JohnWiley & Sons, New York, NY, USA.

Li, Z., Yang, Q., Yang, Y., Ma, H., Wang, H., Luo, J. 2019. Isotopic and geochemical interpretation of groundwater under the influences of anthropogenic activities. J. Hydrol. 576: 685–697.

Piper, M. 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. Am. Geophy. Union 25: 914–923.

Shi, X., Wang, Y., Jiao, J.J., Zhong, J., Wen, H., Dong, R. 2018. Assessing major factors affecting shallow groundwater geochemical evolution in a highly urbanized coastal area of Shenzhen City, China. Journal of Geochemical Exploration 184: 17–27.

Wang, Y., Jiao, J.J., 2012. Origin of groundwater salinity and hydrogeochemical processes in the confined quaternary aquifer of the Pearl River Delta, China. J. Hydrol. 438: 112–124.

World Health Organization. 2011. Guidelines for Drinking-Water Quality, 4th ed. World Health Organization. Geneva, Switzerland.

# คุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมีตามระดับความลึกในระบบการบำบัดน้ำเสียในระบบบ่อผึ่งร่วมกับผักตบชวา

# Physical and chemical water quality at various depths in a wastewater treatment system using oxidation ponds combined with water hyacinths

**วรัญดา ไตรกิศยาโสภณ**[a], **อรอนงค์ ผิวนิล**[a,b,*], **วัชรพงษ์ วาระรัมย์**[a,b], **ธนิศร์ ปัทมพิฑูร**[a,b], **มัลลิกา ศรีชมภู**[b], **อัจฉรา นาไชยบูรณ์**[b]

Warunda Thrikisayasopon[a], Onanong Phewnil[a,b,*], Watcharapong Wararam[a,b], Thanit Pattamapitoon[a,b], Manlika Srichomphu[b], Utchara Nachaiboon[b]

[a]ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[b]โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ มูลนิธิชัยพัฒนา กรุงเทพฯ 10900

[a]Department of Environment Science, Faculty of Environment, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

[b]The King's Royally Initiated Laem Phak Bia Environmental Research and Development Project, Chaipattana Foundation, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: onanong.p@ku.th

**บทคัดย่อ**

การวิจัยนี้ศึกษาคุณภาพน้ำเสียชุมชนที่บำบัดโดยผักตบชวาในบ่อผึ่งของโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ ที่มีขนาดกว้าง 5 เมตร ยาว 118 เมตร ลึก 1.2 เมตร ตามระดับความลึกที่ 30 และ 60 เซนติเมตรจากผิวน้ำ ผักตบชวาปลูกในแพสี่เหลี่ยม ขนาด 2×2 เมตร แพละ 9 ต้น จำนวน 15 แพ คิดเป็นพื้นที่ปกคลุมผิวน้ำร้อยละ 10 เป็นเวลา 10 สัปดาห์ ในเดือนธันวาคม พ.ศ. 2564 - เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ.2565 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำพบว่า ที่ระดับความลึก 30 และ 60 เซนติเมตร สารแขวนลอยมีค่า 14.87±5.60 และ 18.47±7.99 mg/L ความสกปรกในรูปบีโอดีมีค่า 5.72±0.81 และ 5.42±0.89 mg/L ออร์โธฟอสเฟตมีค่า 1.48±0.09 และ 1.48±0.09 mg/L ไนเตรทมีค่า 0.21±0.05 และ 0.23±0.08 mg/L ในขณะที่อินทรีย์ไนโตรเจนและแอมโมเนียมทั้งสองระดับมีค่า 2.58±0.64 และ 0.12±0.18 mg/L ตามลำดับ จากคุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมีทั้ง 2 ระดับ มีค่าไม่แตกต่างกันอย่าง มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) บ่งชี้ว่า ระดับความลึกไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียชุมชนด้วยบ่อผึ่งร่วมกับการใช้ผักตบชวา

**คำสำคัญ**: คุณภาพน้ำ, น้ำเสียชุมชน, บ่อผึ่ง, ผักตบชวา, ระดับความลึกของน้ำ

**Abstract**

The objective of this research was to study the water quality improvement using water hyacinth from the water surface. Samples were collected in an oxidation pond at The King's Royally Initiated Laem Phak Bia Environmental Research and Development Project that measured 5 meters wide, 118 meters long, and 1.2 meters deep. Water hyacinth was planted in square plots measuring 2×2 meters, with a total of 15 plots, covering 10% of the water surface area for a duration of 10 weeks in December 2021- February 2022. the levels of suspended solids were 14.87±5.60 and 18.47±7.99 mg/L. Turbidity in the form of biological oxygen demand (BOD) had values of 5.72±0.81 and 5.42±0.89 mg/L. Orthophosphate levels were consistent at 1.48±0.09 mg/L, and nitrate levels were 0.21±0.05 and 0.23±0.08 mg/L.Meanwhile for both depth levels, organic nitrogen and ammonium had values of 2.58±0.64 mg/L, and 0.12±0.18 mg/L, respectively. In terms of both physical and chemical water quality, there were no statistically significant differences between the two depth levels ($p > 0.05$).Therefore, it can be concluded that the water depth did not have a significant impact on the efficiency of community wastewater treatment using the combination of the pond and water hyacinth.

**Keywords**: Community wastewater, Oxidation pond, Water depth, Water hyacinth, Water quality

**คำนำ**

ปัจจุบันน้ำเสียชุมชนถือเป็นหนึ่งในปัญหาสำคัญต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งปัญหาเกิดจากกิจกรรมประจำวันของประชาชนที่อาศัยอยู่ในชุมชน โดยปัญหาดังกล่าวนี้มีสิ่งสกปรกที่เป็นลักษณะเด่นอยู่ในรูปของสารอินทรีย์ อย่างสารประกอบไนโตรเจน ฟอสฟอรัส สารแขวนลอย และมีค่าบีโอดีที่ปนเปื้อนสูงขึ้นอยู่กับคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไปกับประเภทของแหล่งกำเนิด หากไม่มีการบำบัดน้ำเสียเบื้องต้นก่อนปล่อยออกสู่แหล่งน้ำสาธารณะจะทำให้แหล่งน้ำเน่าเสียและเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ มลพิษของในแหล่งน้ำเป็นปัญหาร้ายแรงความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นตามระดับความลึกของสารประกอบซึ่งได้มาจากกิจกรรมของมนุษย์จะช่วยส่งเสริมระบบนิเวศทางน้ำแบบยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) (Correll et al., 1988; Sedlak et al., 1991) รวมถึงการได้รับอิทธิพลจากแสงก็เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งเสริมให้เกิดการสะพรั่งของสาหร่าย (algae bloom) (ศิริพร, 2566) ก่อให้เกิดการขาดแคลนออกซิเจนที่ละลายในน้ำโดยเฉพาะในเวลากลางคืนสร้างความอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ โดยกระบวนการบำบัดน้ำเสียในปัจจุบันเน้นกระบวนการการย่อยสลายสารอินทรีย์ และการใช้พืชลอยน้ำ (floating plant) คือ ผักตบชวา (Water hyacinths *Eichhornia crassipes*) เป็นวิธีหนึ่งที่สามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้ มีความสามารถในการดูดซับสารอนินทรีย์ในปริมาณที่สูงและเจริญเติบโตได้แม้อยู่ในแหล่งน้ำเสีย รวมทั้งธาตุอาหารต่างๆ ที่ปนเปื้อนอยู่เป็นสารประกอบอนินทรีย์ในรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ นอกจากนี้ผักตบชวายังเป็นพืชที่มีความคงทนต่อสภาพแวดล้อมช่วงกว้าง (Hossain et al., 2015) ดังนั้นจึงมีความสนใจศึกษาผลคุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมีตามระดับความลึกที่ 30 และ 60 เซนติเมตร เพื่อดูว่าความยาวรากของผักตบชวามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำในระบบการบำบัดน้ำเสียแบบบ่อผึ่ง เพื่อนำผลจากการวิจัยไปใช้ประโยชน์ในการวางแผนในการใช้ผักตบชวาในการบำบัดน้ำเสียชุมชนให้มีประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุด

**อุปกรณ์และวิธีการ**

*พื้นที่ศึกษาวิจัย*

การศึกษาวิจัยดำเนินงานในบ่อผึ่ง โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ ตำบลแหลมผักเบี้ย อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี พิกัด N13.0475460 , E100.0847592 มีขนาดกว้าง 5 เมตร ความยาว 118 เมตร ความลึก 1.2 เมตร โดยแบ่งพื้นที่คลองตามระยะทางเป็น 5 โซน ได้แก่ 0–30 เมตร (Zone A), 31-50 เมตร (Zone B), 51–70 เมตร (Zone C), 71–90 เมตร (Zone D), และ 91–118 เมตร (Zone E) (Fig. 1)

*การเก็บตัวอย่าง*

ดำเนินงานในคลองกักเก็บน้ำเสียทำการปลูกผักตบชวา โดยแพที่ใช้ทำจากท่อ PVC ขนาดแพ 4 ตารางเมตร ซึ่งมีความยาว 2 ตารางเมตร และความกว้าง 2 ตารางเมตร จำนวน 15 แพ (คิดเป็นร้อยละ 10 ของพื้นที่ผิวน้ำ) ขวางลำน้ำแต่ละแพมีระยะห่างกัน 5 เมตร ทำการปลูกผักตบชวาแพละ 9 ต้น (Fig. 1)

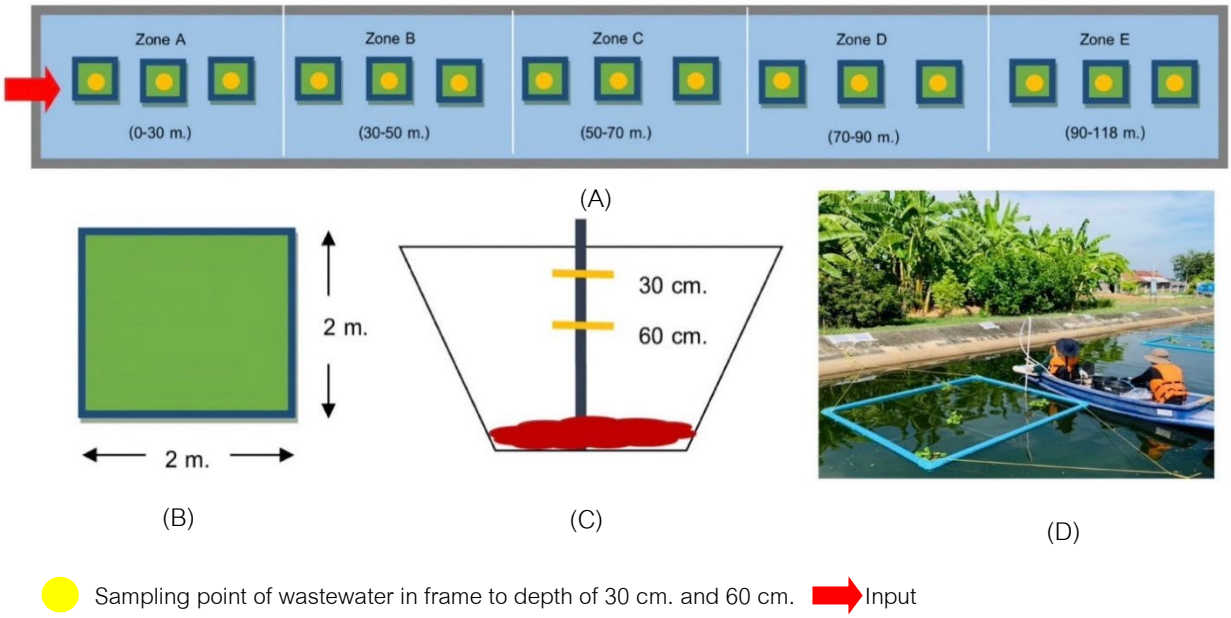



**Fig. 1** Experimental plots of Phetchaburi Municipal Wastewater Treatment with Water Hyacinth; (A); Frame of Water Hyacinth (B); Sampling Points of Wastewater (C); Research station (D)

กำหนดจุดเก็บน้ำกระจายทั่วทั้งบ่อจำนวน 15 จุด เพื่อเป็นตัวแทนแต่ละระดับในบริเวณแพที่ระดับความลึก 30 และ 60 เซนติเมตรจากผิวน้ำ (Fig. 1) ในช่วงเวลา 10.00–14.00 น. ด้วยวิธีการจ้วง (Grab-sampling) ร่วมกับการเก็บแบบผสมรวม (Composite-sampling) ใส่ขวดโพลีเอทีลีน (PE) ขนาด 1 ลิตร เก็บรักษาน้ำตัวอย่างด้วยการห่อกระดาษอะลูมิเนียมฟอยล์แล้วนำมาแช่ในถังน้ำแข็งที่อุณหภูมิ 4°C จากนั้นนำน้ำตัวอย่างไปวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการเคมีด้วยวิธีมาตรฐานของ APHA, AWWA and WPCF (2017) โดยมีพารามิเตอร์ดังนี้ ค่าความสกปรกในรูปบีโอดี (BOD) mg/L, ไนโตรเจนในรูปทีเคเอ็น (TKN) mg/L, แอมโมเนียม-ไนโตรเจน ($NH_4^+$-N) mg/L, ไนเตรท ($NO_3^-$-N) mg/L, ออร์โธ-ฟอสเฟต ($PO_4^{3-}$) mg/L และสารแขวนลอย (SS) mg/L สัปดาห์ละครั้ง เป็นระยะเวลา 10 สัปดาห์ ตั้งแต่เดือนธันวาคม พ.ศ. 2564–เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ.2565

*การวิเคราะห์ข้อมูล*

วิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติ ใช้วิธีวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) และ T-Test เพื่อหาความแตกต่างของข้อมูล ด้วยโปรแกรม SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) version 26.0 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

**ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง**

*คุณภาพน้ำ*

หลังจากปลูกผักตบชวาในหน่วยทดลองระยะเวลา 10 สัปดาห์ พบว่าความสกปรกในรูปบีโอดีมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาทั้งในระดับที่ 30 และ 60 เซนติเมตรจากผิวน้ำมีค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดอยู่ที่ 17.73±1.62, 5.72±0.81และ 17.76±1.20, 5.42±0.89 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ค่าสูงสุดมีค่าอยู่ในสัปดาห์ที่ 1 และค่าต่ำสุดในสัปดาห์ที่ 10 จะเห็นได้

ว่าค่าความสกปรกในรูปบีโอดีตามระดับความลึกทั้ง 2 ระดับมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) (Fig. 2) เนื่องจากผักตบชวามีโครงสร้างของรากที่เหมาะสม ลักษณะโครงสร้างของรากยาวถือเป็นตัวกรองแบบชีวภาพ (biological filtration agent) (Wolverton et al., 1982) เหมาะสำหรับการเป็นแหล่งอาศัยของจุลินทรีย์แบบใช้ออกซิเจนในแหล่งน้ำเสีย และจุลินทรีย์รอบรากพืชจะทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์รวมถึงเปลี่ยนรูปมลสารในน้ำเสียให้เป็นสารอนินทรีย์หรือธาตุอาหารพืชซึ่งอยู่ในรูปที่ผักตบชวาสามารถนำไปใช้ในการเจริญเติบโตได้ อีกทั้งผักตบชวามีการสังเคราะห์แสงมีการดึงออกซิเจนผ่านทางใบ ลำต้น ลงสู่ราก และปลดปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ ดังนั้นจึงส่งผลให้ปริมาณความสกปรกในรูปบีโอดีในน้ำเสียชุมชนมีปริมาณลดลง (สุทธิดา และคณะ, 2564)

อินทรีย์ไนโตรเจน (TKN) แอมโมเนียม-ไนโตรเจน ($NH_4^+$-N) มีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาของการทดลองทั้งระดับที่ 30 และ 60 เซนติเมตรจากผิวน้ำ โดยอินทรีย์ไนโตรเจน (TKN) มีค่าสูงสุด และค่าต่ำสุด 10.64±7.01, 2.58±0.64 และ 7.28±3.17, 2.58±0.94 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ (Fig. 2) แอมโมเนียม ($NH_4^+$) มีค่าสูงสุด และค่าต่ำสุด 1.88±0.49, 0.12±0.18 และ 2.11±0.64, 0.12±0.10 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ (Fig. 2) เนื่องจากอินทรีย์ไนโตรเจน (TKN) ถูกย่อยสลายเปลี่ยนรูปไปเป็นสารอนินทรีย์ในรูปของแอมโมเนียม ($NH_4^+$) โดยปฏิกิริยาไนตริฟิเคชั่น (ไพรัช ,2557) เนื่องด้วยแอมโมเนียม ($NH_4^+$) เป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับ Nitrogenous nutrient ชนิดอื่นๆ ผักตบชวาจึงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้โดยตรง (เชษฐพงษ์, 2558) อีกทั้งไนโตรเจนในน้ำเสียเป็นธาตุอาหารที่พืชและจุลินทรีย์ต้องการเป็นอย่างมาก ผักตบชวาจึงมีการดูดดึงธาตุอาหาร ถือเป็นปัจจัยที่สำคัญของการเจริญเติบโตของพืช (Qin et al., 2016) และ ไนเตรท ($NO_3^-$) มีค่าสูงสุด และค่าต่ำสุด 2.44±0.38, 0.21±0.05 และ 2.59±0.31, 0.23±0.08 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ (Fig. 2) แต่สัปดาห์ที่ 7–8 ปริมาณไนเตรท ($NO_3^-$) มีค่าเพิ่มสูงขึ้นและค่อย ๆ ลดลงในสัปดาห์ ที่ 9–10 ทั้งในระดับที่ 30 และ 60 เซนติเมตรจากผิวน้ำเนื่องจากในสภาวะแบบมีออกซิเจน (aerobic) แอมโมเนียม ($NH_4^+$) จะถูกออกซิไดซ์ (oxidizing) เปลี่ยนให้อยู่ในรูปของไนเตรต ($NO_3^-$) ผ่านกลไกไนตริฟิเคชัน (nitrification) (Kuenen et al., 1988) รวมถึงมีผักตบชวาบางส่วนเริ่มตายลงทำให้มีปริมาณไนเตรต ($NO_3^-$) เพิ่มสูงขึ้นซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ (วชิรญาณ์,2566) จะเห็นได้ว่าอินทรีย์ไนโตรเจน (TKN) แอมโมเนียม ($NH_4^+$) และไนเตรท ($NO_3^-$) ที่ระดับน้ำทั้ง 2 ระดับไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ออร์โธฟอสเฟต ($PO_4^{3-}$) ทั้งในระดับที่ 30 และ 60 เซนติเมตรจากผิวน้ำไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) และมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาแบบต่อเนื่อง มีค่าสูงสุด และค่าต่ำสุด 2.13±0.07, 1.48±0.09 และ 2.13±0.06, 1.48±0.09 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ (Fig. 2) จัดเป็นธาตุอาหารที่ส่งเสริมให้ผักตบชวามีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว (ณัฐกร, 2562) เนื่องจากรากของผักตบชวาต้องการดึงดูดออร์โธฟอสเฟต ($PO_4^{3-}$) ส่งผ่านไปยังเนื้อเยื่อเพื่อนำไปสะสมไว้ในเซลล์ และใช้ในการเจริญเติบโตเพื่อแตกไหลและออกดอก (Valipour et al., 2015)

สารแขวนลอย (SS) ทั้งในระดับที่ 30 และ 60 เซนติเมตรจากผิวน้ำมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลา เนื่องจากผักตบชวามีระบบรากเป็นรากฝอยแตกออกจากโคนต้นเป็นจำนวนมากจึงทำหน้าที่เป็นตัวกรอง หรือตัวสกัดกั้นของแข็งแขวนลอยต่าง ๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียชุมชนได้ดี (สุทธิดา และคณะ, 2564) มีค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดอยู่ที่ 34.00±7.79, 14.87±5.60 และ 32.80±5.80, 18.47±7.99 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ (Fig. 2) ซึ่งน้ำเสียชุมชนที่นำมาบำบัดมีค่าสารแขวนลอย (SS) เริ่มต้นสูงเกินเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งชุมชนที่กำหนดไว้ไม่เกิน 30 มิลลิกรัม/ลิตร (กรมควบคุมมลพิษ, 2560) แต่จะเห็นได้ว่าหลักจากสัปดาห์ที่ 6 สารแขวนลอย (SS) ทั้งในระดับที่ 30 และ 60 เซนติเมตรเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้ง แต่ยังคงอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานเนื่องจากส่วนใหญ่เป็นซากสาหร่ายที่ตาย เกิดขึ้นโดยผักตบชวาที่เจริญเติบโตคลุมพื้นที่ผิวน้ำทำให้แสงไม่สามารถส่องผ่านลงสู่แหล่งน้ำเพื่อให้สาหร่ายสามารถสังเคราะห์แสงได้ (Wolverton et al., 1982)

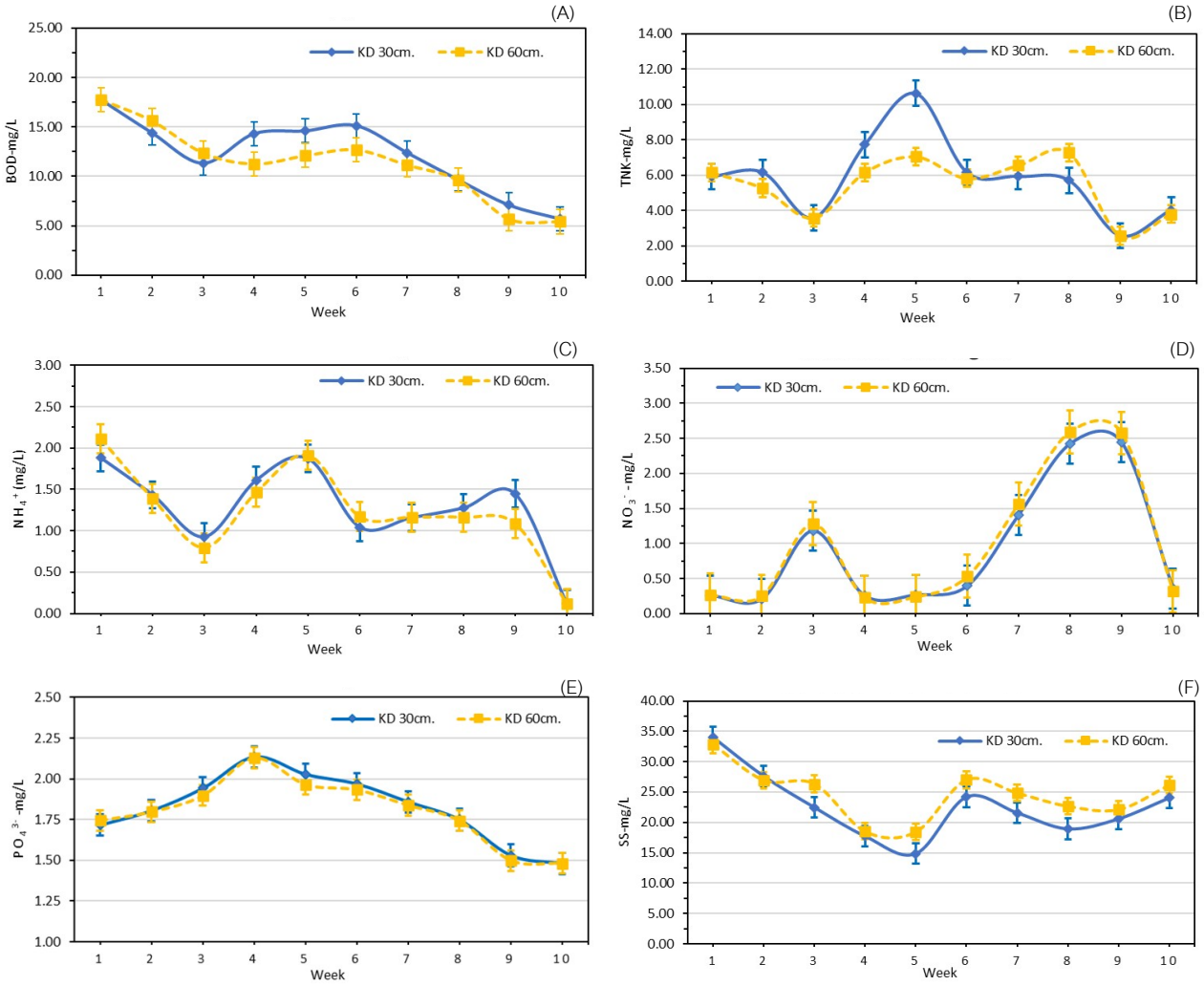



**Fig. 2** Biochemical Oxygen Demand (A); Total Kjeldahl Nitrogen (B); Ammonium-Nitrogen (C); Nitrate-Nitrogen (D); Ortho-Phosphate (E); Suspended Solids (F)

## สรุป

การใช้ผักตบชวาในการบำบัดน้ำเสียชุมชนเป็นวิธีหนึ่งที่มีความนิยมอย่างแพร่หลาย โดยผักตบชวามีความสามารถบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่ปนเปื้อนมาในน้ำได้ดี ซึ่งเป็นผลมาจากการทำงานของระบบรากผักตบชวา การทดลองนี้จึงมุ่งเน้นการศึกษาคุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมีตามระดับความลึกจากผิวน้ำหลังการบำบัดด้วยผักตบชวา โดยทดลองปลูกผักตบชวาบริเวณบ่อผึ่งให้ครอบคลุม 10% ของพื้นที่ผิวน้ำทั้งหมด พบว่า ปริมาณของแข็งแขวนลอย ความสกปรกในรูปบีโอดี อินทรีย์ไนโตรเจน แอมโมเนียมไนโตรเจน ไนเตรตไนโตรเจน และออร์โธฟอตเฟตไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติทั้ง 2 ระดับความลึก อันได้แก่ 30 และ 60 เซนติเมตร ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ระดับความลึกไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมี เนื่องจากรากของผักตบชวาสามารถนำพาออกซิเจนจากอากาศลงสู่บริเวณราก จึงทำให้บริเวณที่ระดับความลึก 60 เซนติเมตรได้รับออกซิเจน ทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีเช่นเดียวกันกับที่ระดับความลึก 30 เซนติเมตร

**กิตติกรรมประกาศ**

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ มูลนิธิชัยพัฒนาสำหรับทุนสนับสนุนการศึกษาวิจัย อนุเคราะห์เจ้าหน้าที่และสถานที่ในการเก็บข้อมูลวิจัยและวิเคราะห์ตัวอย่าง กลุ่มวิจัยวิทยาศาสตร์ชุมชนเชิงนิเวศ (Eco-Science Community Group) ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับการสนับสนุนสถานที่วิเคราะห์ข้อมูลการวิจัย และบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับทุนการศึกษาในโครงการเรียนล่วงหน้าของบัณฑิตวิทยาลัย

**เอกสารอ้างอิง**

กรมควบคุมมลพิษ. 2560. คู่มือระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพฯ.

เชษฐพงษ์ เมฆสัมพันธ์. 2558. สรีรวิทยาและนิเวศวิทยาของแพลงก์ตอนพืชทะเล. คณะประมง, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ณัฐกร อินทรวิชะ, ภาณุชัย ประมวล. 2562. การบำบัดน้ำเสียชุมชนที่มีการปเปื้อนของฟอสฟอรัสด้วยดินในสภาวะน้ำขัง. วารสารวิจัยและพัฒนา วไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ 14: 22–32.

วชิรญาณ์ ยิ้มสวัสดิ์, อรอนงค์ ผิวนิล, วัชรพงษ์ วาระรัมย์, มัลลิกา ศรีชมภู, วรัญดา ไตรกิศยาโสภณ, อัจฉรา นาไชยบูรณ์. 2566. ระยะเวลาที่เหมาะสมต่อการกำจัดบีโอดี ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสจากน้ำเสียชุมชนด้วยผักตบชวาในสภาวะการปล่อยของเหลวเป็นศูนย์. ใน: รายงานการประชุมทางวิชาการมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 61. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

ศิริพร หมากสุข, ธนิศร์ ปัทมพิฑูร, อรอนงค์ ผิวนิล, มัลลิกา ศรีชมภู, ชาลิสา ทัศนาธร, ภาคิน มาสกุลรัตน์. 2566. ผลของพื้นที่ปกคลุมผิวน้ำของผักตบชวาต่อชนิดและปริมาณของแพลงก์ตอนพืชในระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน. ครั้งที่ 61. การประชุมวิชาการ. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

สุทธิดา พุทโธสง, ปวีณา แอบเพชร, วินิภา ศรีมูล. 2564. ประสิทธิภาพของผักตบชวาและจอกในการบำบัดน้ำเสียชุมชนด้วยระบบการปลูกแบบไร้ดินจำลอง. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยมหาสารคาม 40: 415–421.

APHA; AWWA; WEF. 2007. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23rd ed. American Public Health Association. Washington DC, USA.

Correll, D.L. 1988. The role of phosphorus in the Eutrophication of Receiving water. A review. J. Environ. Qual. 27: 261–266.

Hossain, M.E., Sikder, H., Kabir, M.H., Sarma, S.M. 2015. Nutritive of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*). J. Anim. Feed Res. 5: 40–44.

Kuenen, J.G., Robertson, L.A. 1988. Ecology of nitrification and denitrification. In: Cole, J.A., Ferguson, S.J. (Eds.). The Nitrogen and Sulphur Cycles. Cambridge University Press. Cambridge, UK, pp. 181–218.

Qin, H., Zhang, Z., Liu, M., Wang, Y., Wen, X., Zhang, Y., Yan, S. 2016. Site test of phytoremediation of an openpond contaminated with domestic sewage using water hyacinth and water lettuce. Ecol. Eng. 95: 753–762.

Sedlak, R.I. 1991. Phosphorus and Nitrogen Removal form Municiple Wastewater (Principle and Practice), 2nd ed. Lewis Publishers. New York, NY, USA.

Valipour, A., Raman, V.K., Ahn, Y.H. 2015. Effectiveness of domestic wastewater treatment using a bio-hedge water hyacinth wetland system. Water 7: 329–347.

Wolverton, B.C., Macdonald, R.C. 1982. The Role of Vacular Aquatic Plants in Wastewater Treatment the Herbarist. The Herb Society of America. Boston, MA, USA.

# ผลของความลึกต่อออกซิเจนละลายน้ำและกระบวนการย่อยสลายทางชีววิทยาในระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนแบบบ่อผึ่ง

Effect of depth on dissolved oxygen and biodegradable in oxidation pond wastewater treatment

**จินต์จุฑา นาคขุนทด**[a], **ธนิศร์ ปัทมพิฑูร**[a,b,*], **อรอนงค์ ผิวนิล**[a,b], **วัชรพงษ์ วาระรัมย์**[a,b], **ชาลิสา ทัศนาธร**[b], **มัลลิกา ศรีชมภู**[b]

Jinjutha Nakkhuntod[a], Thanit Pattamapitoon[a,b,*], Onanong Phewnil[a,b], Watcharapong Wararam[a,b], halisa Tudsanaton[b], Manlika Srichompu[b]

[a]ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 1900

[b]โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ มูลนิธิชัยพัฒนา กรุงเทพฯ 1900

[a]Department of Environment Science, Faculty of Environment, Kasetsart University, Bangkok 10700, Thailand

[b]The King's Royally Initiated Laem Phak Bia Environmental Research and Development Project, Chaipattana Foundation, Bangkok 10700, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: thanit.pa@ku.th

**บทคัดย่อ**

การศึกษามีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของความลึกต่อออกซิเจนละลายน้ำและกระบวนการย่อยสลายทางชีววิทยาในระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนแบบบ่อผึ่ง โดยเก็บตัวอย่างน้ำเสียตามระดับความลึกแบ่งตามการละลายของออกซิเจนในแนวดิ่ง ที่ความลึก 3 ระดับ บ่อตกตะกอน ได้แก่ 30, 125 และ 200 cm และบ่อผึ่งที่ 1 ได้แก่ 30, 100 และ125 cm. รวมถึงบริเวณน้ำเข้า-ออก ของแต่ละบ่อ ต่อเนื่อง 3 วัน ในช่วงเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2566 เพื่อวิเคราะห์ DO, pH, BOD, EC, TDS, SS, ORP และTB พบว่า DO มีแนวโน้มลดลงตามความลึกสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงปริมาณแอโรบิกแบคทีเรียส่งผลต่อรูปแบบกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพตามความลึก โดยในบ่อตกตะกอนและบ่อผึ่งที่ 1 ที่มีอัตราส่วนระหว่างแอโรบิกและฟัคคัลเททีฟ เท่ากับ 2:1 และ 3:0 สามารถบำบัด BOD ได้จากกระบวนการ Mineralization ที่เกิดจากแอโรบิกแบคทีเรีย ซึ่งในบ่อตกตะกอนมีค่า BOD ลดลงจาก 14.70 เหลือ 8.10 mg/L คิดเป็นร้อยละ 44.89 และบ่อผึ่งที่ 1 ลดลงจาก 20.85 เหลือ 5.10 mg/L คิดเป็นร้อยละ 75.54 ตามลำดับ

**คำสำคัญ**: กระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ, ระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนแบบบ่อผึ่ง, ออกซิเจนละลายน้ำ

**Abstract**

This study focuses on the effects of depth on dissolved oxygen and biodegradable in oxidation pond wastewater treatment. For this study, wastewater samples were collected according to depth, divided according to vertical oxygen dissolution at 3 depth levels, sedimentation ponds are 30, 125 and 200 cm. and oxidation pond no.1 are 30, 100 and 125 cm, including the water inlet and outlet areas of each pond for 3 consecutive days during November 2023 to analyze DO, pH, BOD, EC, TDS, SS, ORP and TB. The result found dissolved oxygen tends to decrease with depth in relation to changes population of aerobic bacteria Affects the pattern of the biodegradation process according to the depth. This study found that the sediment pond and oxidation pond no.1 with a aerobic to facultative ratios of 2:1 and 3:0 there was the ability to treat BOD as a result of the Mineralization process by aerobic bacteria. BOD values decreased from 14.70 to 8.10 mg/L representing 44.89 percent in sediment pond and oxidation pond no.1 decreased from 20.85 to 5.10 mg/L representing 75.54 percent, respectively.

**Keywords**: Biodegradation, Dissolved oxygen, Oxidation pond

**คำนำ**

ระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนแบบบ่อผึ่ง เป็นเทคโนโลยีในการบำบัดน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนจากสารอินทรีย์ โดยอาศัยกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ทางชีววิทยา ซึ่งเกิดจากการดำเนินกิจกรรมรวมกันระหว่างแพลงก์ตอนพืช แสงและแบคทีเรีย โดยเมื่อน้ำเสียชุมชนถูกส่งเข้ามาในระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนแบบบ่อผึ่งของโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ จากระดับความลึกของบ่อและการแบ่งชั้นน้ำตามออกซิเจนละลายน้ำ (Noikondee et al., 2019) ส่งผลให้รูปแบบของกระบวนการย่อยสลายทางชีววิทยาที่เกิดขึ้นในบ่อสามารถเกิดได้ทั้งการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจน และการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน บริเวณชั้นน้ำด้านบนซึ่งได้รับอิทธิพลจากรังสีแสงอาทิตย์จะเกิดกระบวนการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจน (aerobic digestion) โดยแบคทีเรียกลุ่มแอโรบิกจะใช้ออกซิเจนที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์แสง (photosynthesis) ของแพลงก์ตอนพืชมาเป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ให้อยู่ในรูปสารอนินทรีย์ (Saneha et al., 2023) นอกจากนี้ในบริเวณที่มีความลึกเพิ่มขึ้นซึ่งมีออกซิเจนไม่เพียงพอให้แอโรบิกแบคทีเรียสามารถนำไปดำเนินกิจกรรมการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจนได้ ส่งผลให้รูปแบบการย่อยสลายเปลี่ยนเป็นแบบไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic digestion) ซึ่งเกิดจากแบคทีเรียกลุ่มฟัคคัลเททีฟ และแอนแอโรบิก (Clampett and McGarry, 1966; Scavia et al., 2003; Diaz and Rosenberg, 2008) แบคทีเรียในกลุ่มดังกล่าวจะย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ให้กลายเป็นแก๊ส ซึ่งแก๊สบางชนิดมีกลิ่นไม่พึงประสงค์ ($H_2S$ หรือ ไฮโดรเจนซัลไฟด์) จะก่อให้เกิดเป็นมลพิษทางกลิ่นอันส่งผลเสียต่อสุขภาพของมนุษย์ อย่างไรก็ดีจากระดับความลึกที่มีความแตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ อาทิ เช่น ปากีสถาน มีระดับความลึกบ่อ 2.5 m และอินเดีย มีระดับความลึกบ่อ 1.8 m เป็นต้น (Traravathy et al., 2014; Hafiz et al., 2017) เมื่อในบ่อมีอัตราส่วนระหว่างแอโรบิก และแอนแอโรบิกที่ไม่เหมาะสม นำไปสู่ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียที่ลดลงคุณภาพน้ำไม่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน (กรมควบคุมมลพิษ, 2560) ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการศึกษาผลของความลึกต่อออกซิเจนละลายน้ำ และกระบวนการย่อยสลายทางชีววิทยาในระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนแบบบ่อผึ่ง เพื่อให้มีความเข้าใจและสามารถอธิบายถึงปรากฏการณ์การย่อยสลายทางชีววิทยาที่เกิดขึ้นในระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนแบบบ่อผึ่ง

**อุปกรณ์และวิธีการ**

*พื้นที่ศึกษาวิจัย*

ระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนแบบบ่อผึ่งของโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ ตำบลแหลมผักเบี้ย อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี พิกัด N13.0481156, E100.0877033 ในช่วงพฤศจิกายน (dry period) ปี 2566 โดยระบบบำบัดจะประกอบไปด้วยบ่อ 5 บ่อ ดังนี้ บ่อตกตะกอน (sediment pond), บ่อผึ่งที่ 1 (oxidation pond no.1), บ่อผึ่งที่ 2 (oxidation pond no.2), บ่อผึ่งที่ 3 (oxidation pond no.3) และบ่อปรับสภาพ (stabilization pond)

*การเก็บตัวอย่าง*

เก็บตัวอย่างในบริเวณระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนแบบบ่อผึ่งของโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ โดยจะเก็บตัวอย่างที่จุดกึ่งกลางของบ่อตกตะกอน และบ่อผึ่งที่ 1 ซึ่งมีความลึกบ่อเท่ากับ 2.5 m และ 2.0 m. ตามลำดับ เก็บตัวอย่างน้ำเสียตามระดับความลึกแบ่งตามการละลายของออกซิเจนในแนวดิ่ง (Noikondee et al., 2019) ที่ความลึก 3 ระดับ บ่อตกตะกอน ได้แก่ 30, 125 และ 200 cm และบ่อผึ่งที่ 1 ได้แก่ 30, 100

และ 150 cm รวมถึงบริเวณน้ำเข้า-ออก ของแต่ละบ่อ ที่ช่วงเวลา 10.00–14.00 น. ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่คุณภาพน้ำมีค่าคงที่ (มัลลิกา, 2564) ต่อเนื่องเป็นเวลา 3 วัน ในเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2566 มีจุดเก็บตัวอย่างทั้งหมด 9 จุด (Fig. 2) โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำด้วยวิธีจ้วงเก็บ (grab sampling) โดยใช้กระบอกเก็บตัวอย่างน้ำ (water sampler) (Fig. 1) นอกจากนี้ยังทำการเก็บรักษาตัวอย่างน้ำที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส จากนั้นนำมาวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางเคมี และชีววิทยายังห้องปฏิบัติการเคมีสิ่งแวดล้อมโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริต่อไป



**Fig.1** water sampler for grab sample

*การวิเคราะห์ตัวอย่าง*

นำไปตัวอย่างน้ำที่ได้ดำเนินการเก็บไปวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางเคมีตามวิธีมาตรฐาน (APHA, AWWA and WPCF, 2017) มีพารามิเตอร์ ดังนี้ ออกซิเจนละลายน้ำ (dissolved oxygen; DO หน่วย mg/l) ความเป็นกรด-ด่าง (potential of hydrogen; pH) บีโอดี (biochemical oxygen demand; BOD หน่วย mg/l) ของแข็งแขวนลอย (suspended solids; SS หน่วย mg/l) การนำไฟฟ้า (electrical conductivity; EC หน่วย µS/cm) และของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (total dissolved solids; TDS หน่วย mg/L) ด้วยเครื่อง EC meter และตรวจวัด ศักยภาพในการให้-รับอิเล็กตรอน (oxidation reduction potential; ORP หน่วย mV) ด้วยเครื่อง ORP meter รวมถึงมีการวิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรียทั้งหมด (total bacteria; TB หน่วย CFU/ml) ด้วยวิธีการ dilution plate count (คณาจารย์ภาควิชาจุลชีววิทยา, 2554) สำหรับอัตราส่วนของชนิดแอโรบิกแบคทีเรียและฟัคคัลเททีฟแบคทีเรียแปรผลตามปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (Clampett and McGarry, 1966)

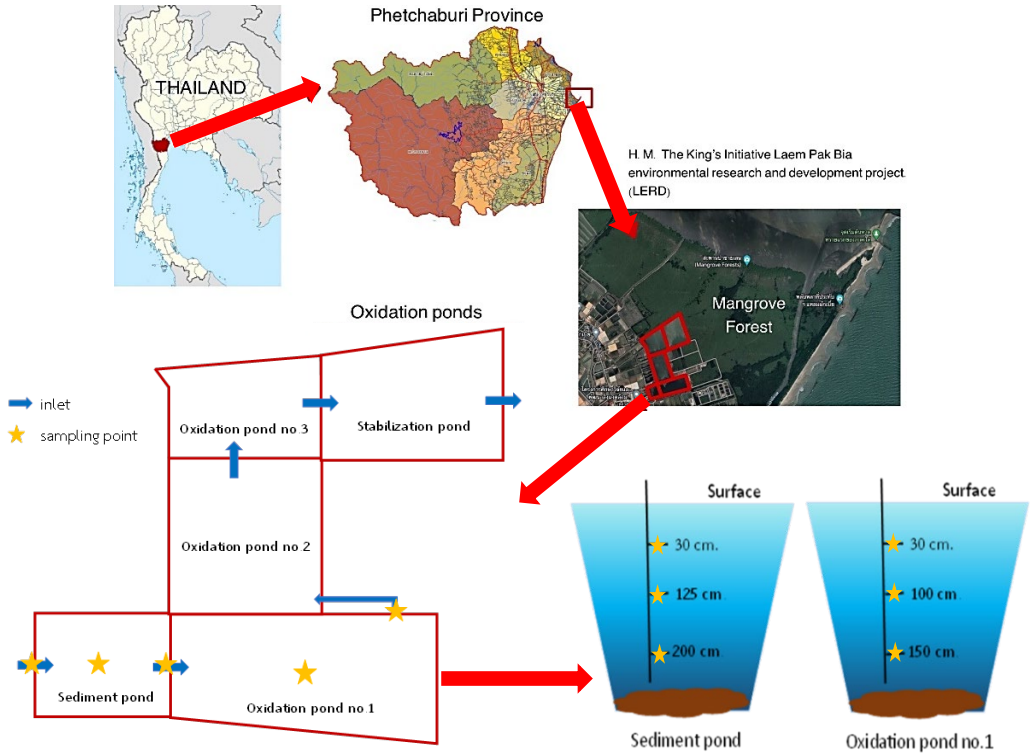



**Fig. 2** Location at Laem Phak Bia, Ban Laem District, Phetchaburi province, and sampling station

**ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง**

*ผลของความลึกต่อการละลายของออกซิเจนในบ่อบำบัดน้ำเสีย*

จากการศึกษาผลของความลึกต่อการละลายของออกซิเจนในบ่อบำบัด อันประกอบด้วยบ่อตกตะกอนและบ่อผึ่งที่ 1 พบว่าออกซิเจนละลายน้ำมีค่าลดลงตามความลึก ตั้งแต่ที่ระดับ 30 cm โดยบ่อตกตะกอนที่ความลึก 30, 125 และ200 cm มีค่า DO เท่ากับ 6.61, 0.47 และ 0.03 mg/L ตามลำดับ และบ่อผึ่งที่ 1 ที่ความลึก 30, 100 และ150 cm มีค่า DO เท่ากับ 7.35, 6.77 และ 3.47 mg/L ตามลำดับ (Table 1) ซึ่งออกซิเจนภายในบ่อนั้นได้มาจากกระบวนการสังเคราะห์แสงของแพลงก์ตอนพืช เมื่อระดับความลึกเพิ่มขึ้นอัตราการสังเคราะห์แสงเพื่อผลิตออกซิเจนของแพลงก์ตอนพืช จึงมีค่าลดลงตามความลึก นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอโรบิกแบคทีเรีย โดยแบคทีเรียกลุ่มดังกล่าวจะใช้ออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายในกระบวนการย่อยสลายทางชีววิทยาแบบใช้ออกซิเจน เมื่อออกซิเจนละลายน้ำลดลงแบคทีเรียจึงมีแหล่งพลังงานที่ไม่เพียงพอต่อการดำเนินกิจกรรมการย่อยสลาย ส่งผลให้ปริมาณแบคทีเรียมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณออกซิเจน (Fig. 3) นอกจากนี้หากแบ่งแอโรบิก ฟัคคัลเททีฟ และแอนแอโรบิกด้วยระดับออกซิเจนตามความลึกในแต่ละบ่อพบว่า บ่อตกตะกอนที่ความลึก 30 ถึง 125 cm มีค่า DO เท่ากับ 6.61 และ 0.47 mg/L เป็นแอโรบิก และที่ความลึก 200 cm มีค่า DO เท่ากับ 0.03 mg/L ซึ่งไม่เพียงพอต่อการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจน (DO ≤ 0.24 mg/L) เป็นฟัคคัลเททีฟ (Clampett and McGarry, 1966) ในส่วนของบ่อผึ่งที่ 1 ที่ความลึก 30, 100 และ 150 cm มีค่า DO เท่ากับ 7.35, 6.77 และ 3.45 mg/L ตามลำดับ ซึ่งเพียงพอต่อการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจน ดังนั้นบ่อตกตะกอนและบ่อผึ่งที่ 1 ซึ่งมีความลึกของบ่อ เท่ากับ 2.5 และ 2.0 m จึงมีอัตราส่วนระหว่างแอโรบิก และฟัคคัลเททีฟ เท่ากับ 2:1 และ 3:0 ตามลำดับ นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของแอโรบิกแบคทีเรียที่ความลึก 125 cm ในบ่อตกตะกอน เป็นผลมาจากการแตกตัวของโมเลกุลน้ำและออกซิเจนกลายเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ซึ่งมีความสามารถในการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย

(Pattamapitoon et al., 2020) ที่ความลึก 30 cm แอโรบิกแบคทีเรียจึงลงมาอยู่ในสภาวะที่มีความเหมาะสมส่งผลให้ที่ความลึก 125 cm มีปริมาณแอโรบิกแบคทีเรียเพิ่มสูงขึ้นกว่าที่ความลึก 30 cm. ซึ่งมี DO มากกว่า

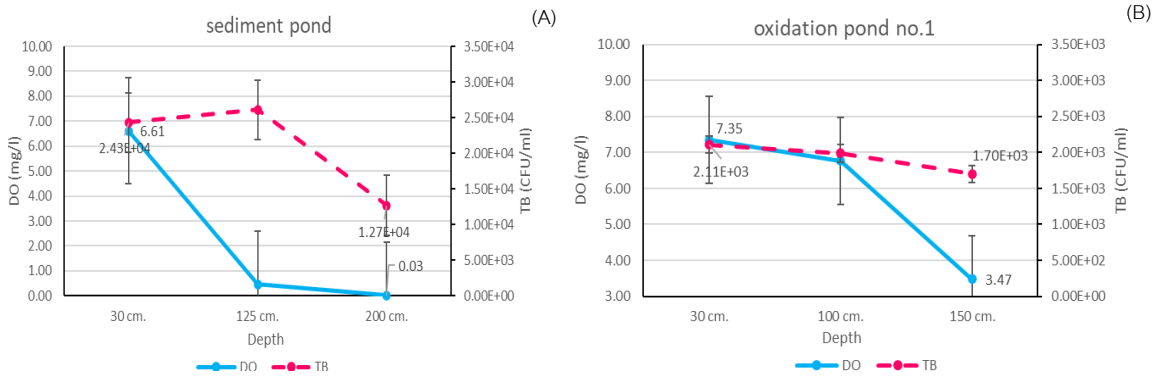



**Fig. 3** Relationship between dissolve oxygen and total bacteria in sediment pond (A); and oxidation pond no.1 (B)

*คุณภาพน้ำตามความลึก*

คุณภาพน้ำที่ตรวจวิเคราะห์ได้สามารถอธิบายรูปแบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นภายในบ่อ อันนำไปสู่ประสิทธิภาพในการบำบัดบีโอดีที่ปนเปื้อนมาในน้ำเสีย พบว่าในบ่อตกตะกอน และบ่อผึ่งที่ 1 มีค่า pH ลดลงตามความลึก โดยแพลงก์ตอนพืชจะเจริญได้ดีในน้ำที่มีสภาพเป็นกลาง – ด่างสูง (ลัดดา, 2543; Sukchinda et al., 2019) สัมพันธ์กับค่า SS ที่มีค่าสูงสุดเท่ากับ 18.56 และ 19.44 mg/L ที่ความลึก 30 cm เมื่อแพลงก์ตอนพืชเจริญเติบโตได้ดีทำให้เกิดกระบวนการสังเคราะห์แสงเพื่อผลิตออกซิเจนสูง สัมพันธ์กับ DO และ BOD มีแนวโน้มลดลงตั้งแต่ที่ความลึก 30 cm (Fig. 4) สอดคล้องกับค่า EC และTDS ที่เพิ่มขึ้น มีค่าสูงสุดเท่ากับ 616.33 µS/cm และ 412.67 mg/L ในส่วนของ ORP สามารถบอกถึงกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เกิดขึ้น ประกอบด้วย Mineralization, Nitrification และ Denitrification มีค่า ORP อยู่ในช่วง 50–250, 100–350 และ -50–50 mV ตามลำดับ (Gerardi, 2015) สัมพันธ์กับการศึกษากลุ่มแบคทีเรียของสถาปัตย์ (2566) โดยที่ความลึก 30 และ 125 cm ของบ่อตกตะกอน และความลึก 30, 100 และ 150 cm ของบ่อผึ่งที่ 1 ซึ่งเป็นแอโรบิกพบแบคทีเรียในกลุ่ม Hgcl_clade และ CL500-29 marine แบคทีเรียในกลุ่มดังกล่าวมีบทบาทสำคัญในกระบวนการ Mineralization ที่เปลี่ยนสารอินทรีย์ไนโตรเจนให้เป็นสารอนินทรีย์ไนโตรเจน รวมถึงพบแบคทีเรียกลุ่ม Flavobacterium และ Pirellulaceae ที่มีบทบาทในกระบวนการ Nitrification นอกจากนี้ที่ความลึก 200 cm ของบ่อตกตะกอนซึ่งเป็นฟัคคัลเททีฟยังพบ Comamonadaceae แบคทีเรียกลุ่มเด่นที่มีบทบาทสำคัญต่อการเกิดกระบวนการ Denitrification เพื่อเปลี่ยนรูปสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนไปเป็นแก๊ส ดังแสดง Table 1 และ Table 2

**Table 1** Wastewater quality in sediment pond

| Parameters | Input | Sediment pond | | | Output |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 30 cm | 125 cm | 200 cm | |
| pH | 7.48±0.45 | 7.81±0.33 | 7.59±0.35 | 7.25±0.14 | 7.82±0.21 |
| EC (µS/cm) | 541.33±17.21 | 532.00±3.46 | 538.00±4.58 | 554.33±11.06 | 531.33±1.53 |
| TDS (mg/L) | 367.33±19.66 | 356.33±2.31 | 360.33±3.06 | 371.00±7.55 | 356.33±0.58 |
| SS (mg/L) | 14.33±3.38 | 18.56±4.07 | 15.11±2.17 | 15.00±2.33 | 17.33±3.06 |
| ORP (mV) | 74.03±84.41 | 125.70±102.11 | 65.03±72.25 | -10.00±235.71 | 170.30±45.13 |
| DO (mg/L) | 3.18±0.45 | 6.61±3.35 | 0.47±0.55 | 0.03±0.01 | 6.27±2.74 |
| BOD (mg/L) | 16.50±14.85 | 14.70±16.55 | 8.10±3.82 | 13.50±2.97 | 8.10±2.97 |

**Table 2** Wastewater quality in oxidation pond no.1

| Parameters | Input | Oxidation pond no.1 | | | Output |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 30 cm | 100 cm | 150 cm | |
| pH | 7.82±0.21 | 8.56±0.17 | 8.48±0.12 | 8.30±0.14 | 8.38±0.13 |
| EC (µS/cm) | 531.33±1.53 | 590.67±15.31 | 584.67±1.53 | 616.33±46.54 | 593.33±13.65 |
| TDS (mg/L) | 356.33±0.58 | 395.67±10.02 | 392.00±1.00 | 412.67±30.66 | 397.67±8.96 |
| SS (mg/L) | 17.33±3.06 | 19.44±9.05 | 12.89±3.01 | 11.00±1.67 | 10.56±2.36 |
| ORP (mV) | 170.30±45.13 | 154.10±37.95 | 161.97±20.99 | 177.53±3.95 | 169.63±20.33 |
| DO (mg/L) | 6.27±2.74 | 7.35±2.80 | 6.77±2.25 | 3.47±1.43 | 4.50±2.02 |
| BOD (mg/L) | 8.10±2.97 | 20.85±0.64 | 7.95±0.64 | 5.10±0.42 | 8.70±1.27 |

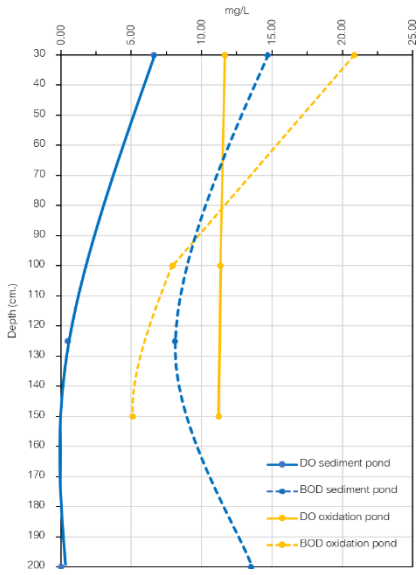



**Fig. 4** relationship between dissolve oxygen and biochemical oxygen demand in sediment pond and oxidation pond no.1.

*อัตราส่วนแอโรบิก และฟัคคัลเททีฟต่อการบำบัดบีโอดีตามความลึกในระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนแบบบ่อผึ่ง*

จากการศึกษาอัตราส่วนแอโรบิก และฟัคคัลเททีฟต่อการบำบัดบีโอดีตามความลึกในระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนแบบบ่อผึ่ง พบว่าบ่อตกตะกอนที่มีอัตราส่วนระหว่างแอโรบิก และฟัคคัลเททีฟ เท่ากับ 2:1 ค่า BOD มีแนวโน้มลดลงตั้งแต่ที่ความลึก 30–125 cm โดยมีค่าลดลงจาก 14.70 เหลือ 8.10 mg/L และเพิ่มขึ้นความลึก 200 cm มีเท่ากับ 13.50 mg/L ค่า BOD ที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากหน้าที่หลักของบ่อที่ใช้ในการตกตะกอนส่งผลให้ที่ความลึก 200 cm เกิดการทับถมของตะกอนที่ก้นบ่อ ค่า BOD จึงเพิ่มขึ้น ในส่วนของบ่อผึ่งที่ 1 ซึ่งมีอัตราส่วนระหว่างแอโรบิก และฟัคคัลเททีฟ เท่ากับ 3:0 BOD มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ที่ความลึก 30–150 cm จาก 20.85 เหลือ 5.10 mg/L โดยการลดลงของ BOD ทั้งในบ่อตกตะกอน และบ่อผึ่งที่ 1 เป็นผลมาจากการเกิดกระบวนการ Mineralization ของแอโรบิกแบคทีเรีย ซึ่งสอดคล้องกับค่า ORP ที่อยู่ในช่วง 50–250 ดัง Fig. 5

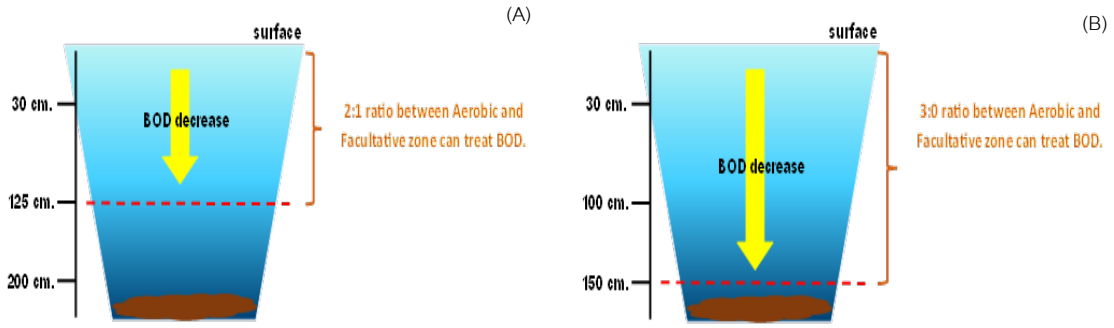



Fig. 5 Ratio between aerobic and facultative zone to treat BOD in sediment pond (A); and oxidation pond no.1 (B)

## สรุป

ระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนแบบบ่อผึ่ง มีค่า BOD ลดลงตั้งแต่ในบ่อตกตะกอน โดยจากการเก็บข้อมูลตัวเลขพบว่าบ่อตกตะกอนนอกจากมีหน้าที่หลักในการตกตะกอนสารอินทรีย์ยังสามารถลดค่า BOD ได้ที่ความลึก 30–125 cm. จาก 14.70 เหลือ 8.10 mg/L มีอัตราส่วนระหว่างแอโรบิก และฟัคคัลเททีฟเป็น 2:1 ส่วนของความลึกทั้งหมด และบ่อผึ่งที่ 1 ซึ่งมีหน้าที่ในการบำบัด BOD สามารถลด BOD ได้ทุกความลึก โดยมีค่าลดลงจาก 20.85 เหลือ 5.10 mg/L มีอัตราส่วนระหว่างแอโรบิก และฟัคคัลเททีฟเป็น 3:0 ส่วนของความลึกทั้งหมด ซึ่งการลดลงของ BOD เกิดจากการทำงานของแอโรบิกแบคทีเรียผ่านกระบวนการ Mineralization ส่งผลให้ระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนแบบบ่อผึ่งมีความสามารถในการบำบัด BOD ตามความลึก ระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนแบบบ่อผึ่งควรมีอัตราส่วนระหว่างแอโรบิก และฟัคคัลเททีฟอย่างน้อย 2:1 จึงมีความสามารถในการบำบัด BOD

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ และคณาจารย์ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ รวมถึงเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการที่ให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนในการทำวิจัยครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

**เอกสารอ้างอิง**

กรมควบคุมมลพิษ. 2560. คู่มือระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพฯ.

คณาจารย์ภาควิชาจุลชีววิทยา. 2554. จุลชีววิทยาปฏิบัติการ. เจ้าพระยาระบบการพิมพ์. กรุงเทพฯ.

มัลลิกา ศรีชมภู. 2564. ช่วงเวลาเก็บตัวอย่างที่เหมาะสมต่อการวิเคราะห์ปริมาณแพลงก์ตอนพืช. ใน: การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 18 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม.

ลัดดา วงศ์รัตน์. 2543. แพลงก์ตอนพืช. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

สถาปัตย์ เสน่หา. 2566. การเปลี่ยนแปลงกลุ่มแบคทีเรียของน้ำเสียชุมชน จากแหล่งกำเนิดท่อ HDPE และบ่อผึ่ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาเอก. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

APHA, AWWA, WPCF. 2017. Standard Method for the Examination of Water and Wastewater, 23th ed. American Public Health Association. Washington DC, USA.

Clampett, J.B., McGarry, M.G. 1966. Sewage Treatment in High Rate Oxidation Ponds under Australian Condition. Water Research Laboratory, The University of New South Wales. New South Wales, Australia.

Diaz, R.J., Rosenberg, R. 2008. Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. Science 321: 926–929.

Gerardi, M.H. 2015. The Biology and Troubleshooting of Facultative Lagoons. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, NJ, USA.

Hafiz, Q.A., Amir, F., Muzaffar, A. 2017. Monitoring the wastewater treatment efficiency of oxidation ponds at Chokera, Faisalabad. HAL Open Science 36: 987–994.

Noikondee, R., Chunkao, K., Bualert, S., Pattamapitoon, T. 2019. Evaluation of dissolve oxygen stratification in an oxidation pond for community wastewater treatment through King's Royally initiated "Nature by Nature" process. Environment Asia 12: 169–177.

Pattamapitoon, T., Sirirote, P., Pakkong, P., Chunkao, K. 2013. Nature of solar radiation as encouraged to produce an increment of dissolved oxygen and hydrogen peroxide in oxidation ponds for community wastewater treatment at H.M.The King's LERD project site in Phetchaburi province, Thailand. Mod. App. Sci. 7: 1913–1844. doi: 10.539/mas.v7n6p26

Saneha, S., Pattamapitoon, T., Bualert, S., et al. 2023. Relationship between bacteria and nitrogen dynamics in wastewater treatment oxidation ponds. Glob. J. Environ. Sci. Manag. 9: 707–718.

Scavia, D., Rabalais, N.N., Turner, R.E., Justic, D., Wiseman, W.J.Jr. 2003. Predicting the response of gulf of Mexico hypoxia to variations in Missisippi River nitrogen load. Limnol. Ocean. 48: 951–956.

Sukchinda, S., Bualert, S., Phewnil O., Pattamapitoon, T., Srichomphu, M. 2019. Effect of solar radiation on cyanobacteria bloom in oxidation ponds community wastewater treatment at the King's Royally initiated Laem Phak Bia environmental research and development project Phetchaburi Thailand. Environment Asia 12: 54–61. doi: 10.14456/ea.2019.45

Traravathy, N.C., Krishnamoorthy, M. 2014. Impact of IRON on the biodiversity of algae and protozoa in oxidation ponds. International Journal of Pharma Medicine and Biological Science 3: 2278–5221.

# อิทธิพลของรังสีแสงอาทิตย์ต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณแอโรบิคแบคทีเรียในระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนแบบบ่อผึ่ง

## Influence of solar radiation on aerobic bacteria in oxidation pond community wastewater treatment system

**มณินทร ภูรัตนาอรุณ**[a], **ธนาทิพย์ กันศรี**[a], **ธนิศร์ ปัทมพิฑูร**[a,b,*], **ชาลิสา ทัศนาธร**[a,b], **จินต์จุฑา นาคขุนทด**[a]
Maninthorn Phurattanaroon[a], Thanatip Kansri[a], Thanit Pattamapitoon[a,b,*], Chalisa Tudsanaton[a,b], Jinjitha Nakkhuntod[a]
[a]ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900
[b]โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ มูลนิธิชัยพัฒนา เพชรบุรี 76100
[a]Department of Environmental Science, Faculty of Environment, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand
[b]The King's Royally Initiated Laem Phak Bia Environmental Research and Development Project, Chaipattana Foundation, Phetchaburi 76100, Thailand
*Corresponding author. E-mail address: thanit.pa@ku.th

**บทคัดย่อ**

การศึกษาอิทธิพลของรังสีแสงอาทิตย์ต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณแอโรบิคแบคทีเรียในบ่อบำบัดน้ำเสียชุมชนแบบบ่อผึ่ง มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณแอโรบิคแบคทีเรียตามความลึกและความสัมพันธ์ระหว่างแบคทีเรียและคุณภาพน้ำเสียชุมชน โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียชุมชนในบ่อตกตะกอน และบ่อผึ่งที่ 1 ที่ความลึก 2 ระดับ คือบริเวณที่แสงส่องถึงมีความลึก 30 เซนติเมตรจากผิวน้ำ และบริเวณที่แสงส่องไม่ถึงมีความลึก 200 และ 150 เซนติเมตรในบ่อตกตะกอนและบ่อผึ่งที่ 1 ตามลำดับ โดยในบ่อตกตะกอน และบ่อผึ่งที่ 1 พบว่าแบคทีเรียในกลุ่มที่ใช้ออกซิเจนมีปริมาณลดลงตามความลึกจาก $2.43\times10^4$ CFU/mL เป็น $1.27\times10^4$ CFU/ml และ $2.11\times10^3$ CFU/mL เป็น $1.58\times10^3$ CFU/mL ตามลำดับ เนื่องจากออกซิเจนนั้นถูกนำมาใช้ในกระบวนการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจน ส่งผลให้ออกซิเจนละลายน้ำลดลงจาก 6.61 เป็น 0.03 mg/L และ 7.35 เป็น 3.47 mg/L ตามลำดับ ทั้งยังส่งผลให้ค่าบีโอดีและค่าทีเคเอ็นลดลงตามไปด้วย เนื่องจากเกิดกระบวนการแอมโมนิฟิเคชันและไนตริฟิเคชันโดยแบคทีเรียกลุ่มที่ใช้ออกซิเจนในบริเวณที่แสงส่องถึง และเกิดกระบวนการ ดีไนตริฟิเคชันในบริเวณที่แสงส่องไม่ถึง
**คำสำคัญ**: น้ำเสียชุมชน, แบคทีเรีย, รังสีแสงอาทิตย์

**Abstract**

This study aims to investigate the impact of solar radiation on variations in aerobic bacteria quantities within a community wastewater treatment oxidation pond. The objective is to quantify the correlation between aerobic bacteria concerning depth and wastewater quality. The analysis involved collecting community wastewater samples from sedimentation ponds and the first oxidation pond at two depths: 30 centimeters below the water surface (considered the photic zone) and 200 and 150 centimeters deep in the sedimentation and desiccant ponds, respectively (the aphotic zone). In both the sedimentation pond and pond 1, the results indicated a decline in aerobic bacteria levels with depth, reducing from $2.43\times10^4$ CFU/mL to $1.27\times10^4$ CFU/mL and $2.11\times10^3$ CFU/mL to $1.58\times10^3$ CFU/mL, respectively. This decrease corresponded to a reduction in dissolved oxygen levels from 6.61 to 0.03 mg/L and 7.35 to 3.47 mg/L. This reduction in oxygen is attributed to aerobic digestion processes, consequently impacting the decrease in Biological Oxygen Demand (BOD) and Total Kjeldahl Nitrogen (TKN). The decline in these values suggests that ammonification and nitrification primarily occur in the photic zone, while the aphotic zone exhibits dominance in the denitrification process.
**Keywords**: Bacteria, Community wastewater, Solar radiation

**คำนำ**

จากการเพิ่มขึ้นของประชากรโลกในปัจจุบัน ส่งผลให้เกิดการขยายตัวของเมืองและการใช้ทรัพยากรน้ำมากขึ้น โดยน้ำเป็นปัจจัยสำคัญต่อการดำเนินชีวิตและกิจกรรมต่าง ๆ ทั้งในการอุปโภค บริโภค การคมนาคม และการประกอบอาชีพของประชากร จากกิจกรรมเหล่านี้ก่อให้เกิดปัญหาน้ำเสีย (กรมควบคุมมลพิษ, 2560) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในแหล่งชุมชน ซึ่งน้ำเสียในแหล่งชุมชนนั้นมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ เมื่อปล่อยลงสู่แหล่งน้ำโดยไม่ผ่านการบำบัดจะทำให้แหล่งน้ำธรรมชาติเน่าเสียและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยรอบ เช่น ไม่สามารถใช้เพื่อการอุปโภค บริโภคได้ และส่งกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ให้แก่ชุมชน ดังนั้นจึงควรมีการบำบัดน้ำเสียให้มีคุณภาพน้ำในเกณฑ์มาตรฐานก่อนปล่อยลงสู่ธรรมชาติ อย่างไรก็ตามวิธีการบำบัดน้ำเสียนั้นมีหลากหลายวิธี ได้แก่ การบำบัดทางเคมี, การบำบัดทางชีวภาพ และการบำบัดทางกายภาพ เนื่องจากน้ำเสียที่เกิดขึ้นเป็นน้ำเสียชุมชน ซึ่งมีสารประกอบอินทรีย์เป็นหลัก ดังนั้นจึงเลือกใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อผึ่งในการใช้บำบัดน้ำชุมชน เนื่องจากระบบบ่อบำบัดน้ำเสียแบบบ่อผึ่ง เป็นระบบบำบัดทางชีวภาพแบบใช้ออกซิเจนและเป็นระบบเปิดที่รังสีแสงอาทิตย์ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการขับเคลื่อนกระบวนการบำบัด โดยเมื่อแสงอาทิตย์ส่องลงมายังผิวน้ำในระบบบำบัดน้ำเสียจะก่อให้เกิดการแบ่งชั้นน้ำขึ้น โดยบริเวณที่แสงส่องถึง(Photic zone) ที่ระดับความลึกไม่เกิน 30 เซนติเมตรจากผิวน้ำ(Noikondee et al., 2019; Srichomphu et al., 2020) นั้นเกิดกระบวนการสังเคราะห์แสงของแพลงก์ตอนพืชในการเพิ่มปริมาณออกซิเจนในบ่อบำบัดน้ำเสียชุมชน มีผลให้ปริมาณออกซิเจนละลายมีปริมาณเพิ่มขึ้น กลุ่มแบคทีเรียที่ใช้ออกซิเจน (aerobic bacteria) อาศัยออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนเพื่อใช้ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบใช้ออกซิเจนให้เป็นสารอนินทรีย์ (Irfan, 2022) ในบริเวณที่แสงส่องไม่ถึง (Aphotic zone) ที่ระดับความลึกมากว่า 150 เซนติเมตรจากผิวน้ำ มีปริมาณออกซิเจนที่ลดลง ส่งผลให้เกิดกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนของกลุ่มแบคทีเรียที่ไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic bacteria) ก่อให้เกิดแก๊ส (Irfan, 2022) เช่น แก๊สแอมโมเนีย ($NH_3$) นั้นสามารถละลายน้ำได้และเปลี่ยนเป็น แอมโมเนียม ($NH_4^+$) ซึ่งสามารถถูกเปลี่ยนรูปด้วยกลุ่มแบคทีเรียที่ใช้ออกซิเจน ในบริเวณที่แสงส่องถึงผ่านกระบวนการไนตริฟิเคชัน (nitrification) เปลี่ยนเป็น ไนเตรต ($NO_3^-$) จากนั้นแพลงก์ตอนพืชจะนำไปใช้ในการเจริญเติบโต ในบริเวณที่แสงส่องไม่ถึง ที่ระดับความลึกมากกว่า 150 เซนติเมตรจากผิวน้ำ ไนเตรตนั้นจะถูกกำจัดออกระบบบำบัดน้ำเสีย ในรูปแก๊สไนโตรเจน ($N_2$) ผ่านกระบวนการดีไนตรีฟิเคชัน (denitrification) (ธงชัย, 2545) แต่โดยส่วนมากแล้วในปัจจุบันระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนแบบบ่อผึ่ง นั้นถูกออกแบบภายใต้ต้นไม้ หรืออาคารสูง จนเกิดร่มเงาจากต้นไม้หรืออาคารสูง ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียนั้นไม่ดีเท่าที่ควร ( Wallace et al., 2016) และจากงานวิจัยของ Pattamapitoon et al. (2013) ได้ทำการศึกษาวิจัยที่ระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนแบบบ่อผึ่งซึ่งเป็นพื้นที่โล่งแจ้ง และพบว่ารังสีแสงอาทิตย์นั้นมีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย สามารถบำบัดความสกปรกในรูปบีโอดี จาก 37.8 เหลือ 27.1 mg/L

ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการศึกษาอิทธิพลของรังสีแสงอาทิตย์ต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแบคทีเรียในบ่อบำบัดน้ำเสียชุมชนแบบบ่อผึ่ง รวมถึงความสัมพันธ์ระหว่างแบคทีเรียและคุณภาพน้ำตามความลึกในบ่อตกตะกอนและบ่อแฟคคัลเททีฟของระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อผึ่ง เพื่อให้สามารถอธิบายการทำงานร่วมกันของกลุ่มแบคทีเรียในบริเวณที่แสงส่องถึงและบริเวณที่แสงส่องไม่ถึง

**อุปกรณ์และวิธีการ**

*พื้นที่ศึกษาวิจัย*

พื้นที่การศึกษาคือ ระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนแบบบ่อผึ่งของโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ ตำบลแหลมผักเบี้ย อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี พิกัด N13.0482143, E100.0875112 ซึ่งจะมีการรับน้ำเสียจากสถานีรวบรวมน้ำเสียบ้านคลองยาง เข้าสู่ท่อ HDPE น้ำเสียจะไหลเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อผึ่งของโครงการทั้ง 5 บ่อ น้ำเสียจะไหลเข้าสู่บ่อตกตะกอนเป็นบ่อแรก จากนั้นไหลเข้าสู่บ่อผึ่งที่ 1 บ่อผึ่งที่ 2 บ่อผึ่งที่ 3 และบ่อปรับสภาพ และแต่ละบ่อจะมีปริมาตรบ่อที่แตกต่างกัน ดังนี้ บ่อตกตะกอนมีปริมาตรบ่อประมาณ 21,455.7 $m^3$ บ่อผึ่งที่ 1 มีปริมาตรบ่อประมาณ 48,652.8 $m^3$ บ่อผึ่งที่ 2 มีปริมาตรบ่อประมาณ 61,284.6 $m^3$ บ่อผึ่งที่ 3 มีปริมาตรบ่อประมาณ 53,136.0 $m^3$ และบ่อปรับสภาพจะมีปริมาตรบ่อประมาณ 60,384.1 $m^3$ (ธนิศร์, 2556) โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำและเชื้อแบคทีเรียในบริเวณบ่อตกตะกอนและบ่อผึ่งที่ 1 ซึ่งแบ่งเป็นบริเวณที่แสงส่องถึงและบริเวณที่แสงส่องไม่ถึง

*การเก็บตัวอย่าง*

การเก็บตัวอย่างน้ำเสียและเชื้อแบคทีเรียด้วยขวดสีชาปลอดเชื้อในการเก็บเชื้อแบคทีเรีย เป็นเวลา 3 วัน ซึ่งจะเก็บตัวอย่างน้ำที่บริเวณกึ่งกลางบ่อ โดยใช้วิธีการแบบจ้วงเก็บ (grab sampling) ที่ระดับความลึกไม่เกิน 30 เซนติเมตร และใช้กระบอกเก็บตัวอย่าง (water sampler) ที่ระดับความลึก 150 และ 200 เซนติเมตร (Noikondee et al., 2019; Srichomphu et al., 2020)ในบ่อผึ่งที่ 1 และบ่อตกตะกอน (Fig.1) โดยเก็บในช่วงเวลา 10.00–14.00 น. (มัลลิกา, 2558) เนื่องจากคุณภาพน้ำที่ได้จะมีค่าคงที่ และเกิดกระบวนการย่อยสลายของแบคทีเรียสูงสุด (Pattamapitoon et al., 2013) โดยจะเก็บตัวอย่างในวันที่ 8–10 พฤศจิกายน พ.ศ. 2566 เวลา 12.00 น. ของแต่ละวัน จากนั้นเก็บรักษาตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อนำไปวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการจุลชีววิทยาสิ่งแวดล้อม โดยมีพารามิเตอร์ในการวิเคราะห์ คือ ค่าโออาร์พี (oxidation reduction potential; ORP), ออกซิเจนละลายน้ำ (dissolved oxygen; DO), บีโอดี (biochemical oxygen demand; BOD), ไนโตรเจนทั้งหมด (total kjeldahl nitrogen; TKN), ไนเตรต ($NO_3^-$) และแอมโมเนีย ($NH_3$)

*การวิเคราะห์ตัวอย่าง*

การวิเคราะห์ปริมาณเชื้อแบคทีเรียจะใช้วิธีการ dilution plate count โดยการนำตัวอย่างมาทำการเจือจางด้วยวิธีการ serial dilution technique เพื่อทำการนับจำนวนแบคทีเรียที่ไม่เกิน 30–300 โคโลนี หลังจากนั้นนำตัวอย่างไปทำการเพาะเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อ plate count agar (PCA) (ขวัญมิตร และปิยมาศ, 2560) ด้วยวิธีการ spread plate และนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส (กัญจนา, 2554) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการนับจำนวนโคโลนีและรายงานผลเป็น CFU/mL และนำตัวอย่างน้ำไปทำการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางเคมีด้วยวิธีมาตรฐาน (APHA, AWWA and WEF, 2017)

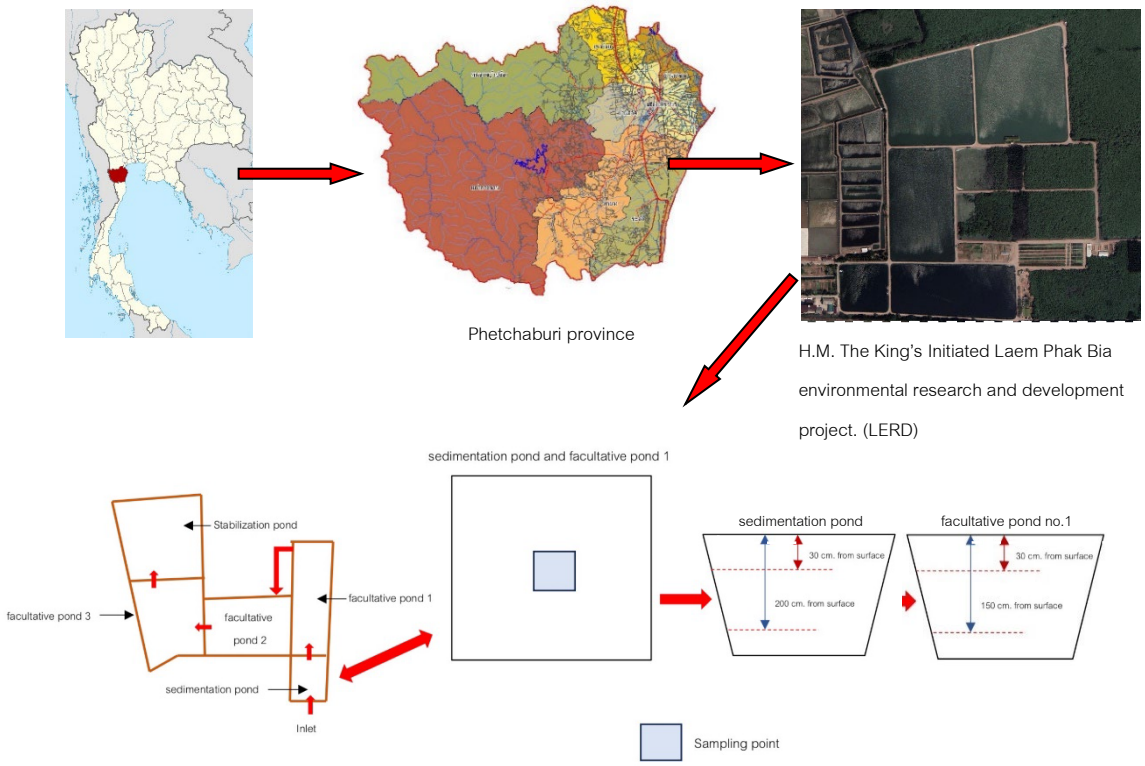



**Fig. 1** Location at Laem Phak Bia, Ban Laem District, Phetchaburi Province and sampling station

## ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

*ปริมาณแบคทีเรียทั้งหมด*

จากการวิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรียในกลุ่มที่ใช้ออกซิเจนทั้งหมดในระบบบ่อบำบัดน้ำเสียชุมชนแบบผึ่ง พบว่าบริเวณที่แสงส่องถึงในบ่อตกตะกอนมีปริมาณแบคทีเรียทั้งหมด $2.43\times10^4$ CFU/mL ส่วนในบ่อผึ่งที่ 1 พบปริมาณแบคทีเรียทั้งหมด $2.11\times10^3$ CFU/mL และบริเวณที่แสงส่องไม่ถึง ในบ่อตกตะกอนพบปริมาณแบคทีเรียทั้งหมด $1.27\times10^4$ CFU/ml ส่วนในบ่อผึ่งที่ 1 พบปริมาณแบคทีเรียทั้งหมด $1.58\times10^3$ CFU/mL เห็นได้ชัดว่าในบริเวณที่แสงส่องถึงมีปริมาณแบคทีเรียทั้งหมดมากกว่าบริเวณที่แสงส่องไม่ถึง เนื่องจากปริมาณออกซิเจนละลายน้ำที่เกิดจากกระบวนการสังเคราะห์แสงของแพลงก์ตอนพืชในบ่อตกตะกอนและบ่อผึ่งที่ 1 บริเวณที่แสงส่องถึงอยู่ในช่วง 6.61 และ 7.35 mg/L ตามลำดับ ซึ่งมีมากกว่าบริเวณที่แสงส่องไม่ถึงในช่วง 0.03 และ 3.47 mg/L ตามลำดับ ทำให้ปริมาณแบคทีเรียของทั้ง 2 ความลึกแตกต่างกัน จึงเห็นได้ชัดว่ารังสีแสงอาทิตย์นั้นมีผลต่อปริมาณของกลุ่มแบคทีเรียแบบใช้ออกซิเจนในระบบบ่อบำบัดน้ำเสียชุมชน (Fig. 2)

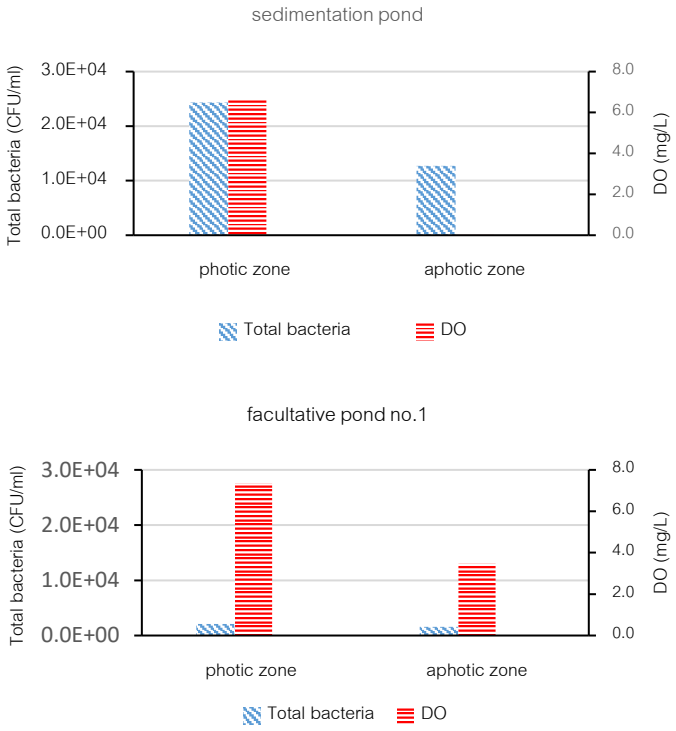



**Fig. 2** Comparison of the total bacteria with the amount of dissolved oxygen between photic and aphotic zone

*คุณภาพน้ำทางเคมี*

คุณภาพน้ำที่ตรวจวัดได้ทำให้ทราบถึง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ บีโอดี โออาร์พี ทีเคเอ็น แอมโมเนียและไนเตรตทั้งบ่อตกตะกอนและบ่อผึ่งที่ 1 ดังแสดง Table 1 ซึ่งสามารถบ่งบอกถึงกระบวนการทำงานร่วมกันของแบคทีเรียในการบำบัดน้ำเสียชุมชนทั้ง 2 ชั้นน้ำ โดยการแบ่งชั้นน้ำ จะแบ่งตามระดับความลึก 30 เซนติเมตรจากผิวน้ำ และมากกว่า 150 เซนติเมตรจากผิวน้ำ ซึ่งในแต่ละระดับจะเกิดกระบวนการที่แตกต่างกัน และจากงานวิจัยของ มัลลิกา (2560) ได้รายงานว่าไซยาโนแบคทีเรียนั้นส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำสูง จากกระบวนการสังเคราะห์แสงและยังมีผลต่อคุณภาพน้ำอื่น ๆ เช่น ค่าบีโอดี แอมโมเนีย ให้มีค่าสูงตาม จึงนำกระบวนการสังเคราะห์แสงโดยแพลงก์ตอนพืชมาอธิบายร่วมด้วย ในบ่อตกตะกอน และบ่อผึ่งที่ 1 พบว่าบริเวณที่แสงส่องถึง ค่าทีเคเอ็นของทั้ง 2 บ่อ นั้นลดลงจาก 3.58 เป็น 3.24 และ 2.15 เป็น 1.09 mg/L ตามลำดับ เนื่องจากในบริเวณที่แสงส่องถึงมีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ 6.61 และ 7.35 mg/L ซึ่งมีค่ามากกว่า บริเวณที่แสงส่องไม่ถึง 0.03 และ 3.47 mg/L ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tudsnaton (2023) ที่รายงานว่าในบริเวณที่แสงส่องถึงนั้นมีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำสูงกว่า เนื่องจากเกิดกระบวนการสังเคราะห์แสงโดยแพลงก์ตอนพืช ส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนสูงขึ้น ดังนั้นบริเวณที่แสงส่องถึงจึงเกิดกระบวนการแอมโมนิฟิเคชันเปลี่ยนสารอินทรีย์ ไนโตรเจนให้อยู่ในรูปแอมโมเนีย โดยในบ่อตกตะกอน และบ่อผึ่งที่ 1 บริเวณที่แสงส่องถึงนั้นมีค่าโออาร์พี เท่ากับ +114.87 และ +154.10 mV และในบริเวณที่แสงส่องไม่ถึง มีค่าโออาร์พีเท่ากับ -23.33 และ +177.53 mV (Gerardi et al., 2015) ตามลำดับ ค่าโออาร์พีของทั้ง 2 ชั้นมีการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกันเนื่องจากค่าโออาร์พีมีความสัมพันธ์กับปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ ในบริเวณที่แสงส่องถึงมีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำสูง เพราะเกิดกระบวนการสังเคราะห์โดยแพลงก์ตอนพืช ส่งผลให้ค่าโออาร์พีสูงตาม (Wang et al., 2022) และในบริเวณที่แสงส่องไม่ถึงในบ่อตกตะกอน มีค่าเป็นลบ เนื่องจากปริมาณออกซิเจนละลายน้ำลดลง เกิดกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน

และในบ่อผึ่งที่ 1 มีค่าเป็นบวก เนื่องจากค่าบีโอดีลดลง เกิดกระบวนการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจน ส่งผลให้ค่าโออาร์พีของทั้ง 2 ชั้นนั้นแตกต่างกัน ดังนั้นในบริเวณที่แสงส่องถึง จึงเกิดกระบวนการไนติฟิเคชัน โดยแอมโมเนียจะเปลี่ยนเป็นไนเตรต (ชุตาภา, 2562) ส่งผลให้ค่าไนเตรตของทั้งสองบริเวณในบ่อตกตะกอนมีค่าไม่แตกต่างกัน โดยมีค่า 0.18 mg/L ส่วนในบ่อผึ่งที่1 บริเวณที่แสงส่องถึงมีค่า 0.15 mg/L บริเวณที่แสงส่องไม่ถึง มีค่า 0.18 mg/L และในบริเวณที่แสงส่องไม่ถึงจึงเกิดกระบวนการดีไนติฟิเคชัน โดยดีไนตริไฟอิงแบคทีเรีย ไนเตรตจะเป็นตัวรับอิเล็กตรอนแทนออกซิเจนได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สไนโตรเจน (ธงชัย, 2545) ซึ่งสามารถลอยขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศได้ ส่งผลให้ปริมาณไนโตรเจนนั้นลงลด และจากงานวิจัยของ Saneha (2023) ได้รายงานกลุ่มแบคทีเรียในกระบวนการดีไนตริไฟอิงแบคทีเรีย อาทิเช่น *Verrucomicrobiota* นั้นสามารถลดปริมาณไนโตรเจนได้ ดังนั้นแบคทีเรียจึงช่วยบำบัดไนโตเจนในน้ำเสียชุมชนได้ และนอกจากนี้ยังเกิดกระบวนการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจน ส่งผลให้ค่าบีโอดีของทั้ง 2 บ่อลดลงจาก 26.40 เป็น 13.50 และ 20.85 เป็น 5.10 mg/L ตามลำดับ โดยสารอินทรีย์จะถูกย่อยสลายโดยแบคทีเรียกลุ่มแฟคคัลเททีฟ ทำให้ค่าบีโอดีลดลงในบริเวณที่แสงส่องไม่ถึง

จากผลคุณภาพน้ำทางเคมีนี้ยังส่งผลให้ปริมาณแบคทีเรียของทั้ง 2 บ่อลดลงจาก $2.43\times10^{4}$ เป็น $1.27\times10^{4}$ CFU/mL และ $2.11\times10^{3}$ เป็น $1.58\times10^{3}$ CFU/mL ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่ารังสีแสงอาทิตย์นั้นมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณและคุณภาพน้ำเสียชุมชนในระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อผึ่ง

**Table 1** wastewater quality in wastewater treatment between photic zone and aphotic zone

| Parameter | Sedimentation Pond | | Facultative Pond 1 | |
|---|---|---|---|---|
| | Photic zone (30 cm.) | Aphotic zone (200 cm.) | Photic zone (30 cm.) | Aphotic zone (200 cm.) |
| ORP (mV) | +114.87 | -23.33 | +154.10 | +177.53 |
| DO (mg/L) | 6.61 | 0.03 | 7.35 | 3.47 |
| BOD (mg/L) | 26.40 | 13.50 | 20.85 | 5.10 |
| TKN (mg/L) | 3.58 | 3.24 | 2.15 | 1.09 |
| $NH_3$ (mg/L) | 0.52 | 1.87 | 0.02 | 0.06 |
| $NO_3^-$ (mg/L) | 0.18 | 0.18 | 0.15 | 0.18 |

**สรุป**

จากการศึกษาอิทธิพลของรังสีแสงอาทิตย์ต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณแบคทีเรียที่ใช้ออกซิเจน พบว่าบริเวณที่แสงส่องถึงเกิดกระบวนการสังเคราะห์แสงของแพลงก์พืช ทำให้ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำและปริมาณแบคทีเรียที่ใช้ออกซิเจนเพิ่มขึ้น แบคทีเรียจึงนำออกซิเจนมาใช้ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ ส่งผลให้ค่าแอมโมเนียลดลง แต่เมื่อเข้าสู่บริเวณที่แสงส่องไม่ถึงพบว่าปริมาณแบคทีเรียที่ใช้ออกซิเจนทั้งหมดนั้นลดลง จึงมีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำที่น้อยกว่า ทำให้แบคทีเรียกลุ่มแฟคคัลเททีฟนั้นเกิดกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ ส่งผลให้ค่าไนเตรตและไนโตรเจนทั้งหมดลดลงเนื่องจากเกิดกระบวนการดีไนติฟิเคชันในสภาวะไร้อากาศ จึงแสดงให้เห็นว่าบริเวณที่แสงส่องถึงและบริเวณที่แสงส่องไม่ถึงมีส่วนช่วยในการลดปริมาณธาตุอาหารที่อาจส่งผลเสียต่อแหล่งน้ำและสามารถบำบัดน้ำเสียชุมชนได้อีกด้วย

**กิตติกรรมประกาศ**

ขอขอบคุณโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ และคณาจารย์ทั้งจากภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ตลอดจนเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องในการให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนในการทำวิจัยครั้งนี้

**เอกสารอ้างอิง**

กรมควบคุมมลพิษ. 2560. คู่มือระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ.

กัญจนา ธีระกุล. 2554. จุลชีววิทยาปฏิบัติการ, พิมพ์ครั้งที่ 6. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ

ขวัญมิตร รู้จัก, ปิยมาศ แจ่มศรี. 2560. การทวนสอบ PCA และ R2A สำหรับการตรวจจำนวนจุลินทรีย์. วารสารกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์. 594: 242–251.

ชุติภา มงคลอุปถัมภ์. 2562. การบำบัดน้ำเสียความเข้มข้นทีเคเอ็นสูงโดยระบบร่วมถังโปรยกรองและถังกรองกึ่งไร้อากาศ. วิทยานิพนธ์ปริญญาเอก, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

ธนิศร์ ปัทมพิฑูร. 2556. ปรากฏการณ์ทางธรรมชาติของรังสีแสงอาทิตย์ต่อการลดปริมาณแบคทีเรียโคลิฟอร์มและแบคทีเรียก่อโรคในระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อผึ่ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาเอก, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ธงชัย พรรณสวัสดิ์. 2545. การกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทางชีวภาพ. สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย. กรุงเทพฯ.

มัลลิกา ศรีชมภู. 2558. อิทธิพลของรังสีดวงอาทิตย์ในฤดูหนาวต่อการเจริญของไซยาโนแบคทีเรียใน ระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนแบบบ่อผึ่ง โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ จังหวัดเพชรบุรี ประเทศไทย. ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

American Public Health Association (APHA), American Water Work Association (AWWA) and Water Environment Federation (WEF). 2017. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23rd ed. American Public Health Association. USA.

Gerardi, M.H. 2015. The Biology and Troubleshooting of Facultative Lagoons. John Wiley & Sons Inc. Pennsylvania, PA, USA.

Irfan, A. 2022. Microbiological profile of aerobic and anaerobic bacteria. Arch. Clin. Microbiol. 13: 1–3.

Noikondee, R., Chunkao, K., Bualert, S., Pattamapitoon, T. 2019. Evaluation of dissolved oxygen stratification in an oxidation pond for community wastewater treatment through King's RoyallyInitiated "Nature by Nature" process. EvironmentAsia 12: 169–177. doi.org/10.14456/ea.2019.19

Pattamapitoon, T., Sirirote, P., Pakkong, P., Chunkao, K. 2013. Nature of solar radiation as encouraged to produce an increment of dissolved oxygen and hydrogen peroxide in oxidation ponds for community wastewater treatment at H.M. The King's LERD Project Site in Phetchaburi province, Thailand. Mod. App. Sci. 7: 26–41.

Saneha, S., Pattamapitoon, T., Bualert, S., et al. 2023. Relationship between bacteria and nitrogen dynamics in wastewater treatment oxidation ponds. Glob. J. Environ. Sci. Manag. 9: 707–718.

Srichomphu, M., Pattamapitoon, T., Phewnil, O., Chunkao, K., Chanthasoon. C. 2020. Optimal Sampling Interval for Qualitative Analysis of Phytoplankton on Community Wastewater. In: The 17th National Kasetsart University Kampheang Saen Conference. Nakhon Pathom, Thailand, pp. 2971–2979.

Tudsnaton, C., Pattamapitoon, T., Phewnil, O., Wararum, W., Saneha, S., Sukchinda, S., Khonesavanh, S., Maskulrath, P. 2023. Effect of pond depth on water quality and bacterial vertical variability in oxidation pond. In: Proceedings of 61st Kasetsart University Annual Conference: Science, Engineering and Architecture, Agro-Industry, Natural Resources and Environment. Prachacheun Research Network. Pathum Thani. Thailand, pp. 845–853.

Wallace, J., Champagne, P., Hall, G. 2016. Time series relationships between chlorophyll-a, dissolved oxygen, and pH in three facultative wastewater stabilization ponds. Environ. Sci. Water Res. Technol. 2: 1032–1040.

Wang X., Wu, Y., Chen, N., Piao, H., Sun, D., Ratnaweera, H., Maletskyi, Z., Bi, X. 2022. Characterization of oxidation-reduction potential variations in biological wastewater treatment processes: A study from mechanism to application. Processes 10: 1–11. doi.org/ 10.3390/pr10122607

# อิทธิพลของรังสีแสงอาทิตย์ต่อประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนในระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อผึ่ง

## Influence of solar radiation on treatment efficiency of nitrogen in oxidation pond community wastewater treatment system

**ต้นน้ำ คลอดแคล้ว**[a], **ปิยนุช เงางาม**[a], **ธนิศร์ ปัทมพิฑูร**[a,b,*], **ชาลิสา ทัศนาธร**[b], **จินต์จุฑา นาคขุนทด**[a], **มัลลิกา ศรีชมภู**[b]

Tonnam Klodkleaw[a], Piyanut Ngaongam[a], Thanit Pattamapitoon[a,b,*], Chalisa Tudsanaton[b], Jinjutha Nakkhuntod[a], Manlila Srichomphu[b]

[a]ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[b]โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ มูลนิธิชัยพัฒนา เพชรบุรี 76100

[a]Department of Environmental Science, Faculty of Environment, Kasetsart University, Bangkok 10900,Thailand

[b]The King's Royally Initiated Laem Phak Bia Environmental Research and Development Project, Chaipattana Foundation, Phetchaburi 76100, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: thanit.pa@ku.th

**บทคัดย่อ**

การศึกษาอิทธิพลของรังสีแสงอาทิตย์มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียชุมชนแบบบ่อผึ่งระหว่างบริเวณที่แสงส่องถึงและบริเวณที่แสงส่องไม่ถึง โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำก่อนเข้าระบบบำบัดบ่อตกตะกอน และบ่อผึ่งที่ 1 โดยเก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ 2 ระดับความลึก ได้แก่ บริเวณที่แสงส่องถึงคือ 30 เซนติเมตร จากผิวน้ำ สำหรับบริเวณที่แสงส่องไม่ถึงในบ่อตกตะกอนและบ่อผึ่งที่ 1 ที่ระดับ 200 และ 150 เซนติเมตร จากผิวน้ำตามลำดับ จากการศึกษาพบว่า บริเวณที่แสงส่องถึงทั้งบ่อตกตะกอนและบ่อผึ่งที่ 1 มีประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนีย คิดเป็นร้อยละ 46.94 และ 97.96 ตามลำดับ เนื่องจากเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชั่น ในขณะที่บริเวณที่แสงส่องไม่ถึง เกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชั่น และกระบวนการซัลไฟต์ฟอร์เมชั่น ทำให้บริเวณที่แสงส่องไม่ถึงทั้งบ่อตกตะกอนและบ่อผึ่งที่ 1 มีประสิทธิภาพในการบำบัดทีเคเอ็น คิดเป็นร้อยละ 10.25 และ 70.08 ตามลำดับ และมีประสิทธิภาพในการบำบัดซัลเฟต คิดเป็นร้อยละ 32.97 และ 10.36 ตามลำดับ

**คำสำคัญ**: น้ำเสียชุมชน, ไนโตรเจน, ระบบบำบัดน้ำเสีย, รังสีแสงอาทิตย์

**Abstract**

This study examines the impact of solar radiation on municipal wastewater treatment efficiency in oxidation ponds, comparing the photic and aphotic zones. Wastewater samples were collected from different points in the treatment system: the influent, the sedimentation pond, and the oxidation pond. Wastewater Samples were taken at 30 cm depth for the photic zone, 200 cm for the sedimentation pond, and 150 cm for the oxidation pond. Results showed an effective treatment of ammonia levels in the photic areas of both ponds, accounting for 46.94% and 97.96% in the sedimentation and oxidation ponds, respectively, due to nitrification process. In the aphotic zone, denitrification occurred, as this is evident through sulfite formation. The treatment efficiency for TKN in the sedimentation and oxidation ponds was 10.25% and 70.08%, and for sulfate, 32.97% and 10.36%, respectively.

**Keywords**: Domestic wastewater, Nitrogen, Solar radiation, Wastewater treatment system

**คำนำ**

ปัจจุบันมีการเพิ่มขึ้นของประชากรจำนวนมาก น้ำเป็นปัจจัยสำคัญในการดำรงชีวิตของมนุษย์ ทั้งด้านการอุปโภคบริโภค รวมถึงการประกอบอาชีพต่าง ๆ ส่งผลให้เกิดกิจกรรมการใช้น้ำมากขึ้น จึงทำให้เกิดปัญหาน้ำเสียตามมา โดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำเสียจากแหล่งชุมชน ซึ่งมีสารอินทรีย์ปนเปื้อนสูง (กรมควบคุมมลพิษ, 2560) หากไม่มีการบำบัดน้ำเสียดังกล่าวก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำจะส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศแหล่งน้ำ ทำให้ค่าความสกปรกในรูปบีโอดี (biochemical oxygen demand; BOD) สูงขึ้นและค่าออกซิเจนละลายน้ำ (dissolved oxygen; DO) ลดต่ำลง เนื่องจากในแหล่งน้ำมีการปนเปื้อนสารอินทรีย์สูงแบคทีเรียจะนำออกซิเจนอิสระที่ละลายอยู่ในน้ำมาใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ สิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในระบบนิเวศแหล่งน้ำได้รับผลกระทบ รวมถึงประชาชนที่อาศัยอยู่บริเวณใกล้เคียงแหล่งน้ำก็ได้รับผลกระทบตามไปด้วย เช่น เกิดกลิ่นเหม็นบริเวณแหล่งน้ำเสีย รวมถึงผลกระทบทางสุขภาพและความเป็นอยู่ของมนุษย์ ดังนั้นจึงควรมีการบำบัดน้ำเสียเพื่อลดผลกระทบก่อนปล่อยสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ อย่างไรก็ตามระบบบำบัดน้ำเสียมีด้วยกันหลายวิธี เช่น ระบบบำบัดน้ำเสียทางกายภาพ ระบบบำบัดน้ำเสียทางเคมี และระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ เนื่องจากน้ำเสียที่เกิดขึ้นเป็นน้ำเสียที่มาจากแหล่งชุมชน ที่มีการปนเปื้อนของสารอินทรีย์สูง จึงเลือกใช้วิธีบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ โดยใช้เทคโนโลยีธรรมชาติ คือระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อผึ่ง เนื่องจากเป็นหนึ่งในระบบบำบัดน้ำเสียที่มีประสิทธิภาพ มีค่าดำเนินงานไม่สูง ดูแลง่าย และมีการประยุกต์ใช้ในประเทศไทย โดยระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อผึ่งมีพลังงานขับเคลื่อนสำคัญในกระบวนการบำบัดสารอินทรีย์คือ รังสีแสงอาทิตย์ เพื่อทำให้เกิดการสังเคราะห์แสงของแพลงก์ตอนพืชโดยส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำเพิ่มขึ้น ซึ่งแบคทีเรียก็จะใช้ก๊าซออกซิเจนเหล่านี้ในกระบวนการหายใจและกระบวนการเมตาบอลิซึม (Grosse, 2012) อย่างไรก็ดีระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อผึ่งแต่ละแห่งมีระดับความลึกที่ไม่แน่นอน จึงทำให้เกิดการแบ่งชั้นน้ำเป็น 2 บริเวณคือบริเวณที่แสงส่องถึง (photic zone) และบริเวณที่แสงส่องไม่ถึง (aphotic zone) ส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำไม่เท่ากัน จึงเกิดกระบวนการย่อยสลายแตกต่างกัน กล่าวคือ บริเวณที่แสงส่องถึง เกิดกระบวนการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจน (aerobic digestion) ทำให้แบคทีเรียกลุ่มที่ใช้ออกซิเจนนำออกซิเจนมาใช้ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ไนโตรเจนให้กลายเป็นสารอนินทรีย์ไนโตรเจนด้วยกระบวนการแอมโมนิฟิเคชั่น (ammonification) จากนั้นแอมโนเนียมจะถูกออกซิไดซ์ให้กลายเป็น ไนไตรท์ หลังจากนั้นไนไตรท์จะถูกออกซิไดซ์อีกครั้งให้กลายเป็นไนเตรตด้วยกระบวนการไนตริฟิเคชั่น (nitrification) และในบริเวณที่แสงส่องไม่ถึง มีปริมาณออกซิเจนค่อนข้างต่ำหรืออยู่ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน ส่งผลให้เกิดกระบวนการย่อยสลายของแบคทีเรียกลุ่มที่ไม่ใช้ออกซิเจน อีกทั้งยังสามารถเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชั่น (denitrification) โดยในปฏิกิริยาจะใช้ไนเตรทเป็นตัวรับอิเล็กตรอนแทนออกซิเจน เกิดเป็นก๊าซไนโตรเจน จึงทำให้สามารถลดปริมาณไนเตรทในน้ำเสียลงได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาอิทธิพลของรังสีแสงอาทิตย์ต่อประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนในระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อผึ่ง

**อุปกรณ์และวิธีการ**

*พื้นที่การศึกษาวิจัย*

ดำเนินการเก็บตัวอย่างน้ำเสียในระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อผึ่งของโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ย อันเนื่องมาจากพระราชดำริ ตำบลแหลมผักเบี้ย อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี พิกัด N13.0475460, E100.0847592 ในช่วงเดือนพฤศจิกายน ปี พ.ศ.2566 โดยเก็บตัวอย่างน้ำบริเวณน้ำเข้าบ่อตกตะกอน บ่อตกตะกอนและบ่อผึ่งที่ 1แสดงดัง Fig.1

*การเก็บตัวอย่างน้ำ*

เก็บตัวอย่างน้ำเสีย 3 บริเวณ ได้แก่ น้ำเสียจากเทศบาลเมืองเพชรบุรีก่อนไหลเข้าสู่บ่อตกตะกอน น้ำเสียในบ่อตกตะกอน (sedimentation pond) และน้ำเสียในบ่อผึ่งที่ 1 (facultative pond 1) ของโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำโดยวิธีการจ้วงเก็บ (grab sampling) ในบริเวณที่แสงส่องถึง และใช้วิธีการเก็บโดยกระบอกเก็บตัวอย่างน้ำ (water sampler) ในบริเวณที่แสงส่องไม่ถึง จะทำการเก็บตัวอย่างน้ำบริเวณกลางบ่อ โดยในบ่อตกตะกอนเก็บตัวอย่างน้ำที่ 2 ระดับความลึก คือ ระดับความลึก 30 เซนติเมตรจากผิวน้ำ เป็นบริเวณที่แสงส่องถึง และที่ระดับความลึก 200 เซนติเมตร เป็นบริเวณที่แสงส่องไม่ถึง และในบ่อผึ่งที่ 1 เก็บตัวอย่างน้ำที่ระดับความลึก 30 เซนติเมตรและ 150 เซนติเมตรเป็นความลึกที่แสงส่องถึงและแสงส่องไม่ถึงตามลำดับ แสดงดัง Fig. 2 เนื่องจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อผึ่งในแต่ละบ่อมีระดับความลึกที่ไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับบทบาทหน้าที่ของแต่ละบ่อบำบัด ซึ่งบ่อตกตะกอนมีหน้าที่ในการตกตะกอนดังนั้นมวลน้ำจึงต้องมีความนิ่ง ทำให้บ่อตกตะกอนมีความลึกมากกว่าบ่อผึ่งที่ 1 โดยบ่อตกตะกอนมีความลึก 2.1 เมตร และบ่อผึ่งที่ 1 มีความลึก 1.6 เมตร (ธนิศร์, 2556) ดังนั้นในบริเวณที่แสงส่องไม่ถึงของบ่อตกตะกอนจึงต้องเก็บที่ระดับความลึกที่มากกว่าบ่อผึ่งที่ 1 โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำในช่วงเวลา 10.00–14.00 น. ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่คุณภาพน้ำคงที่ (มัลลิกา, 2564) และทำการเก็บตัวอย่างน้ำเป็นระยะเวลา 3 วัน จากนั้นนำน้ำตัวอย่างมาวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการเคมีสิ่งแวดล้อมของโครงการพระราชดำริแหลมผักเบี้ยฯ ตามวิธีมาตรฐานของ (APHA, AWWA and WFE, 2017) ได้แก่ ความเป็นกรดด่าง (positive potential of the hydrogen ions; pH) อุณหภูมิ (temperature) ของแข็งละลายในน้ำ (total dissolved solids; TDS) ค่าการนำไฟฟ้าในน้ำ (electrical conductivity; EC) ออกซิเจนละลายน้ำ (dissolved oxygen; DO) โออาร์พี (oxidation reduction potential; ORP) ออกซิเจนที่แบคทีเรียใช้ในการหายใจ (biochemical oxygen demand; BOD) ไนโตรเจนในรูปทีเคเอ็น (total kjeldahl nitrogen; TKN) ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (suspended solid; SS) แอมโมเนีย (ammonia; $NH_3$) ไนเตรท (nitrate; $NO_3^-$) ซัลเฟต (sulfate; $SO_4^{2-}$) และซัลไฟด์ (sulfide; $S_2^-$)

*การวิเคราะห์ข้อมูล*

คำนวณประสิทธิภาพการบำบัดระหว่างบริเวณที่แสงส่องถึงและบริเวณที่แสงส่องไม่ถึง (Equation 1)

$$\% \text{ Removal efficiency} = \frac{\text{Influence} - (\text{Effluence of photic zone or Effluence of aphotic zone})}{\text{Influence}} \times 100 \quad (1)$$

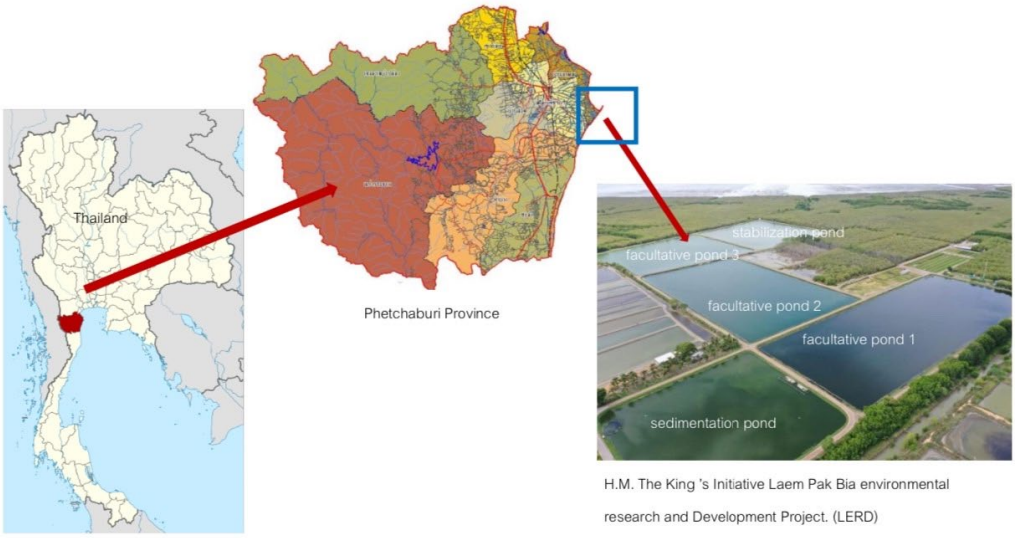



**Fig. 1** Location of study site in the oxidation pond area of the LERD project

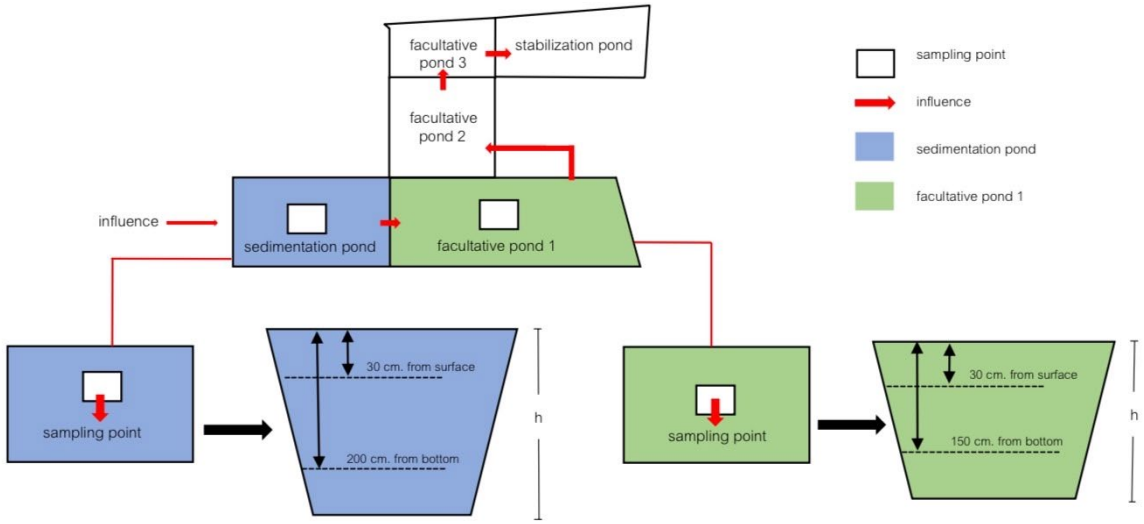



**Fig. 2** Sampling station between photic zone and aphotic zone of sedimentation ponds and facultative pond 1

## ผลและวิจารณ์การทดลอง

*คุณภาพน้ำ*

จากการตรวจวัดคุณภาพน้ำพบว่า ความเป็นกรด-ด่าง บริเวณที่แสงส่องถึงมีค่ามากกว่าบริเวณที่แสงส่องไม่ถึง เนื่องจากในบริเวณที่แสงส่องถึงได้รับอิทธิพลจากแสงอาทิตย์ ทำให้แพลงก์ตอนพืชเพิ่มจำนวนมากขึ้น ส่งผลให้คุณภาพน้ำในบริเวณที่แสงส่องถึงมีค่าเป็นด่างมากกว่าในบริเวณที่แสงส่องไม่ถึง (Srichomphu, 2023) อีกทั้งอุณหภูมิในบริเวณที่แสงส่องถึงมีค่ามากกว่าบริเวณที่แสงส่องไม่ถึงเนื่องจากรังสีแสงอาทิตย์สามารถส่งผ่านพลังงานความร้อนมายังผิวน้ำ (ฤทัยรัตน์, 2563) ทำให้บริเวณผิวน้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้นเพราะได้รับรังสีแสงอาทิตย์โดยตรง อีกทั้งของแข็งที่ละลายในน้ำ ในบริเวณที่แสงส่องไม่ถึงมากกว่าบริเวณที่แสงส่องถึง เนื่องจากบริเวณที่แสงส่องไม่ถึง มีการสะสมของตะกอนประกอบกับมีค่าออกซิเจนละลายน้ำค่อนข้างต่ำ เกิดกระบวนการย่อยสลายของแบคทีเรียกลุ่มฟาคัลเททีพ (facultative bacteria)

ทำให้ได้สารประกอบอนินทรีย์ละลายน้ำ โดยมีค่าของแข็งละลายน้ำในบ่อตกตะกอน และบ่อผึ่งที่ 1 ในบริเวณที่แสงส่องไม่ถึง เท่ากับ 371.00 mg/L และ 412.67 mg/L ตามลำดับ (Arthur, 1983; Droste, 1997) สำหรับค่าโออาร์พี (ORP) บริเวณที่แสงส่องถึงในบ่อตกตะกอนและบริเวณที่แสงส่องถึงและแสงส่องไม่ถึงของบ่อผึ่งที่ 1 มีค่าเท่ากับ +114.87 mV,+155.10 mV และ +177.53 mV ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าน้ำในบริเวณนี้เกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจนและเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชั่น ในขณะที่บริเวณที่แสงส่องไม่ถึงของบ่อตกตะกอนมีค่า โออาร์พี เท่ากับ -20.30 mV แสดงให้เห็นว่าบริเวณที่แสงส่องไม่ถึงของบ่อตกตะกอนเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชั่นและกระบวนการซัลไฟต์ฟอร์เมชั่น (sulfide formation) ดังที่แสดงใน Table 1

**Table 1** wastewater quality in wastewater treatment between photic zone and aphotic zone

| Parameter | Influence | Effluence of Sedimentation Pond | | | | Effluence of Facultative Pond 1 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Photic | Efficiency (%) | Aphotic | Efficiency (%) | Photic | Efficiency (%) | Aphotic | Efficiency (%) |
| pH | 7.48 | 7.81 | - | 7.24 | - | 8.55 | - | 8.30 | - |
| Temp(°C) | 31.73 | 31.63 | - | 30.30 | - | 31.57 | - | 31.03 | - |
| TDS (mg/L) | 370.33 | 356.33 | - | 371.00 | - | 395.67 | - | 412.67 | - |
| EC (µS/cm) | 541.33 | 532.00 | - | 554.33 | - | 590.67 | - | 613.33 | - |
| DO (mg/L) | 3.18 | 6.61 | - | 0.03 | - | 7.35 | - | 3.47 | - |
| ORP(mV) | +74.03 | +114.87 | - | -23.3 | - | +155.10 | - | +177.53 | - |
| BOD(mg/L) | 27.00 | 26.40 | 2.20 | 13.50 | 50.00 | 20.85 | 22.78 | 5.10 | 81.48 |
| TKN (mg/L) | 3.61 | 3.58 | 0.83 | 3.24 | 10.25 | 2.15 | 40.44 | 1.08 | 70.08 |
| $NH_3$(mg/L) | 0.98 | 0.52 | 46.94 | 1.87 | - | 0.02 | 97.96 | 0.06 | 93.90 |
| $NO_3^-$(mg/L) | 0.13 | 0.18 | - | 0.18 | - | 0.15 | - | 0.18 | - |
| $SO_4^{2-}$(mg/L) | 17.56 | 13.86 | 22.70 | 11.77 | 32.97 | 15.38 | 12.41 | 15.74 | 10.36 |
| $S^{2-}$(mg/L) | 0.62 | 0.53 | - | 0.91 | - | 0.64 | - | 0.59 | - |

จาก Table 1 พบว่าบริเวณที่แสงส่องถึงในบ่อผึ่งที่ 1 มีค่าออกซิเจนละลายน้ำเพิ่มขึ้น จาก 3.18 mg/L เป็น 7.35 mg/L ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการสังเคราะห์แสงของแพลงก์ตอนพืช ทำให้เกิดกระบวนการแอมโมนิฟิเคชั่น ซึ่งจะเป็นการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ไนโตรเจนหรือทีเคเอ็นให้เปลี่ยนเป็น แอมโมเนีย ส่งผลให้ค่าทีเคเอ็นลดลงจาก 3.61 mg/L เหลือ 2.15 mg/L และมีประสิทธิภาพในการบำบัดคิดเป็นร้อยละ 40.44 อีกทั้งบริเวณที่แสงส่องถึงทั้งในบ่อตกตะกอนและบ่อผึ่งที่ 1 มีค่าโออาร์พีเท่ากับ +114.87 mV และ +155.10 mV ตามลำดับ ทำให้เกิดกระบวนการไนตริฟิเคชั่น โดย Nitrifying bacteria จะใช้ออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนเพื่อออกซิไดซ์ แอมโมเนียเป็นไนเตรท (Lu et al., 2012) ส่งผลให้ค่าแอมโมเนียบริเวณที่แสงส่องถึงลดลงในบ่อตกตะกอนและบ่อผึ่งที่ 1 จาก 0.98 mg/L เหลือ 0.52 mg/L และ 0.02 mg/L ตามลำดับ และมีประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนีย คิดเป็นร้อยละ 46.94 และ 97.96 ตามลำดับ ในขณะที่บริเวณที่แสงส่องไม่ถึงในบ่อตกตะกอนมีค่าออกซิเจนละลายน้ำลดต่ำลง จาก 3.18 mg/L เหลือ 0.03 mg/L และมีค่าโออาร์พีเท่ากับ -23.30 mV ทำให้เกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชั่นในบริเวณที่แสงส่องไม่ถึง โดยในปฏิกิริยาจะใช้ไนเตรทเป็นตัวรับอิเล็กตรอนแทนออกซิเจน เกิดเป็นก๊าซไนโตรเจน ส่งผลให้ค่าทีเคเอ็นลดลงบริเวณที่แสงส่องไม่ถึงในบ่อตกตะกอนจาก 3.61 mg/L เหลือ 3.24 mg/L และมีประสิทธิภาพในการบำบัด ทีเคเอ็น คิดเป็นร้อย 10.25 (สมทิพย์ และคณะ, 2553) ในขณะที่บริเวณที่แสงส่องไม่ถึงของบ่อผึ่งที่ 1 มีค่าออกซิเจนละลายน้ำเท่ากับ 3.47 mg/L และค่าโออาร์พีที่ตรวจวัดได้ มี

ค่าเท่ากับ +177.53 mV ทำให้เกิดกระบวนการไนตริฟิเคชั่นเช่นเดียวกันกับบริเวณที่แสงส่องถึง ส่งผลให้ค่าแอมโมเนียบริเวณที่แสงส่องไม่ถึงของบ่อผึ่งที่ 1 ลดลงจาก 0.98 mg/L เหลือ 0.06 mg/L และมีประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียคิดเป็นร้อยละ 70.08 แสดงดัง Fig. 3

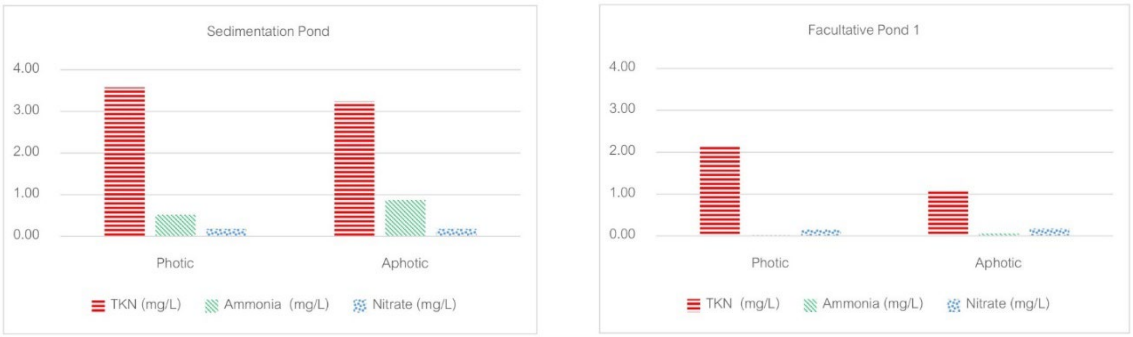



**Fig. 3** Nitrogen concentration between photic zone and aphotic zone of sedimentation ponds and facultative pond 1

สำหรับประสิทธิภาพในการบำบัดความสกปรกในรูป บีโอดี บริเวณที่แสงส่องถึงในบ่อตกตะกอนและบ่อผึ่งที่ 1 คิดเป็นร้อยละ 2.20 และ 22.78 เนื่องจากบริเวณที่แสงส่องถึงเกิดกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบใช้ออกซิเจน ในขณะที่บริเวณที่แสงส่องไม่ถึงในบ่อตกตะกอนมีประสิทธิภาพในการบำบัด บีโอดี คิดเป็นร้อยละ 50.00 เนื่องจากบริเวณที่แสงส่องไม่ถึงมีปริมาณออกซิเจนที่ลดต่ำลง ทำให้เกิดกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ของแบคทีเรียกลุ่มแฟคคัลเททีฟ ทำให้ได้สารอนินทรีย์เกิดขึ้น สอดคล้องกับค่าของแข็งละลายน้ำที่เพิ่มขึ้นในบริเวณที่แสงส่องไม่ถึง โดยบริเวณที่แสงส่องถึงและบริเวณที่แสงส่องไม่ถึงมีค่าของแข็งละลายน้ำเท่ากับ 356.33 mg/L และ 371.00 mg/L ตามลำดับ ในขณะที่บริเวณที่แสงส่องไม่ถึงของบ่อผึ่งที่ 1 มีประสิทธิภาพในการบำบัดบีโอดีคิดเป็นร้อยละ 81.48 เนื่องจากพบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 8.30 ซึ่งมีความเป็นด่างอ่อน ส่งผลให้แพลงก์ตอนสามารถเพิ่มจำนวนและเพิ่มค่าออกซิเจนละลายน้ำได้ ทำให้บริเวณที่แสงส่องไม่ถึงของบ่อผึ่งที่ 1 เกิดกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบใช้ออกซิเจน อีกทั้งประสิทธิภาพในการบำบัดซัลเฟต บริเวณที่แสงส่องถึงและบริเวณที่แสงส่องไม่ถึงในบ่อตกตะกอนคิดเป็นร้อยละ 22.70 และ 32.97 ตามลำดับ และในบ่อผึ่งที่ 1 คิดเป็นร้อยละ 12.41 และ 10.36 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า บริเวณที่แสงส่องไม่ถึงโดยเฉพาะบ่อตกตะกอนที่มีความลึกมากกว่าบ่อผึ่งที่ 1 มีประสิทธิภาพในการบำบัด ซัลเฟต ได้ดีกว่าบริเวณที่แสงส่องถึงเนื่องจากบริเวณที่แสงส่องไม่ถึง มีค่าออกซิเจนละลายน้ำที่ต่ำลง ทำให้เกิดกระบวนการซัลไฟต์ฟอร์เมชั่น โดยซัลเฟตจะถูกรีดิวซ์เปลี่ยนไปเป็นซัลไฟต์และไฮเดรเจนซัลไฟต์ ($H_2S$ ) (สถาปัตย์, 2566) สอดคล้องกับค่าซัลไฟต์ที่มีค่าเพิ่มขึ้นในบ่อตกตะกอนจาก 0.53 mg/L เป็น 0.91 mg/L

## สรุป

รังสีแสงอาทิตย์มีอิทธิพลต่อกระบวนการสังเคราะห์แสงของแพลงก์ตอนพืช ทำให้ค่าออกซิเจนละลายน้ำเพิ่มมากขึ้นในบริเวณที่แสงส่องถึง เกิดกระบวนการแอมโมนิฟิเคชั่น ไนตริฟิเคชั่น และกระบวนการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจน ส่งผลให้ค่า ทีเคเอ็น แอมโมเนีย และบีโอดี ลดลงตามลำดับ ทำให้บริเวณที่แสงส่องถึงมีประสิทธิภาพในการบำบัดค่าทีเคเอ็น แอมโมเนียและบีโอดี ในขณะที่บริเวณที่แสงส่องไม่ถึงมีค่าออกซิเจนละลายน้ำลดต่ำลงในบ่อตกตะกอน จึงทำให้เกิดกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ของแบคทีเรียแบบไม่ใช้ออกซิเจนส่งผลให้เกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชั่นรวมถึง

กระบวนการซัลไฟต์ฟอร์เมชั่น ส่งผลให้ค่าทีเคเอ็นและซัลเฟตลดลง ตามลำดับ ทำให้บริเวณที่แสงส่องไม่ถึงมีประสิทธิภาพในการบำบัดทีเคเอ็นและซัลเฟต จึงแสดงให้เห็นว่ารังสีแสงอาทิตย์มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย

**กิตติกรรมประกาศ**

ขอขอบคุณโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ และคณาจารย์ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ รวมถึงเจ้าหน้าที่ที่ให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนในการทำวิจัยครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

**เอกสารอ้างอิง**

กรมควบคุมมลพิษ. 2560. คู่มือระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพฯ.

ธนิศร์ ปัทมพิฑูร. 2566. ปรากฏการณ์ทางธรรมชาติของรังสีแสงอาทิตย์ต่อการลดปริมาณแบคทีเรียโคลิฟอร์มและแบคทีเรียก่อโรคในระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อผึ่ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาเอก. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ

มัลลิกา ศรีชมภู. 2564. ช่วงเวลาเก็บตัวอย่างที่เหมาะสมต่อการวิเคราะห์ปริมาณแพลงก์ตอนพืช. ใน: การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 18 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม.

ฤทัยรัตน์ น้อยคนดี. 2563. ระดับความลึกที่ก๊าซออกซิเจนจมลงตามแนวดิ่งโดยกลไกเทอร์โมไซฟอนในระบบ บ่อบำบัดน้ำเสียชุมชนตามแนวพระราชดำริด้วยกระบวนการธรรมชาติช่วยธรรมชาติ. วิทยานิพนธ์ปริญญาเอก. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ

สถาปัตย์ เสน่หา. 2556. การเปลี่ยนแปลงกลุ่มแบคทีเรียของน้ำเสียชุมชน จากแหล่งกำเนิดท่อ HDPE และบ่อผึ่ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาเอก, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ

สมทิพย์ ด่านธีรวนิชย์, เจิดจรรย์ ศิริวงศ์, พนาลี ชัวกิดาการ, ภทรธร เอื้อกฤดาธิการ, ธันวดี เตชะภัททวรกุล. 2553. คุณภาพน้ำและการจัดการ (Water Quality and Management). โรงพิมพ์จอยพริ้นท์. สงขลา

APHA, AWWA, WFE. 2017. Standard Method for the Examination of Water and Wastewater, 23rd ed. American Public Health Association. Washington, DC, USA.

Arthur, J.P. 1983. Notes on the design and operation of waste stabilization ponds in warm climates of developing countries. World Bank Technical Paper No. 7. The World Bank, Washington DC, USA,

Droste, R.L. 1997. Theory and Practice of Water and wastewater Treatment. John Wiley and Sons, New York, NY, USA.

Grosse, J. 2012. Oxidation Pond. Alternative Green Today and Sea-Today-LLC. Florida, FL, USA,

Lu, L., Tan, H., Luo, G., Liang, W. 2012. The effects of Bacillus subtilis on nitrogen recycling from aquaculture solid waste using heterotrophic nitrogen assimilation in sequencing batch reactors. Bioresour. Technol. 124: 180–185. doi: 10.1016/j.biortech.2012.07.084

Srichomphu, M., Phewnil, O., Pattamapitoon, T., Chaichana, R., Chunkao, K., Wararam, W., Dampin, N., Maskulrath, P. 2023. Role of *Cylindrospermopsis* sp. in vertical nitrogen changes observed in tropical oxidation wastewater treatment ponds, Glob. J. Environ. Sci. Manag. 10: 1–14.

# การเปลี่ยนแปลงของค่าออกซิเจนละลายน้ำด้วยเครื่องกลเติมอากาศชัยพัฒนารุ่น RX-5B และ C

# Changes in dissolved oxygen values by the Chaipattana aerator, model RX-5B and C

**พรณัฐชา เดชร่มโพธิ์ทอง**[a] , **กิตติชัย ดวงมาลย์**[a,*], **ภาคิน มาสกุลรัตน์**[a.b]

Pornnatcha Dechromphothong[a], Kittichai Duangmal [a,*], Parkin Maskulrath[a.b]

[a]ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[b]โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ มูลนิธิชัยพัฒนา กรุงเทพฯ 10700

[a]Department of Environment Science, Faculty of Environment, Kasetsart University, Bangkok 10900

[b]The King's Royally Initiated Laem Phak Bia Environmental Research and Development Project, Chaipattana Foundation, Bangkok 10700, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: kittichai.d@ku.ac.th

**บทคัดย่อ**

ปัจจุบันปัญหาแหล่งน้ำเสียถูกพบเห็นเพิ่มมากขึ้น จากกิจกรรมการใช้น้ำของมนุษย์ส่งผลให้ระบบการฟอกตัวเองของแหล่งน้ำไม่มีความสามารถเพียงพอกับความสกปรกที่เกิดขึ้น จึงมีการนำเทคโนโลยีอย่างเครื่องกลเติมอากาศมาใช้ในการเติมอากาศให้แหล่งน้ำเป็นการเพิ่มค่าออกซิเจนให้กับแหล่งน้ำ ทำให้จุลินทรีย์มีออกซิเจนเพียงพอต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ และทำให้คุณภาพของน้ำดีขึ้น จากการทดลองติดตั้งเครื่องกลเติมอากาศชัยพัฒนารุ่น RX-5 ในบ่อน้ำโรงเรียนกาสรกสิวิทย์และบ่อน้ำข้างสระจุฬาภรณ์วลัยลักษณ์ เพื่อดูผลการเปลี่ยนแปลงของค่าออกซิเจนละลายน้ำหลังการเติมอากาศด้วยเครื่องกลเติมอากาศ ผลพบว่าที่ระยะ 2–3 ม.ในระดับความลึก 0.30 ม. ทั้งสองพื้นที่ทดลอง เครื่องกลรุ่น 5C สามารถเปลี่ยนแปลงค่าออกซิเจนละลายน้ำเพิ่มขึ้นหลังการเปิดเครื่องกลได้ดีกว่ารุ่น 5B โดยพบว่าในบ่อน้ำข้างสระจุฬาภรณวลัยลักษณ์ที่มีค่าความสกปรกในรูปบีโอดีสูงกว่า จึงมีการเติมออกซิเจนละลายน้ำได้น้อยกว่าบ่อน้ำโรงเรียนกาสรกสิวิทย์

**คำสำคัญ**: ค่าความสกปรกของน้ำ, เครื่องกลเติมอากาศ, ออกซิเจนละลายน้ำ

**Abstract**

In recent times, the quality of water sources has significantly decreased as a result of human activities. Containing wastewater, the water sources do not have sufficient capacity for self-purification. As a mitigation, technologies, such as mechanical aeration machines, are adopted to aerate water sources, increasing oxygen value. Consequently, microorganisms have enough oxygen to decompose organic matter and finally improve the water quality. An experiment on a related subject was conducted at the pond of Kasornkasivit School in Sra Kaew Province and the one next to Chulabhorn Walailak Pool at Kasetsart University in Bangkok to see changes in dissolved oxygen levels before and after installing the RX-5 aeration machine. The results have shown that, at a distance of 2 m. and a depth of 0.30 m., the 5C aeriation machines are more powerful than the 5B aeriation machines at both sites, with higher changing rates in the dissolved oxygen levels. However, BOD level is higher in the pond next to Chulabhorn Walailak Pool. The dissolved oxygen is, therefore, less added in this pond than the one at Kasornkasivit School.

**Keywords**: Biochemical oxygen deman, Dissolved oxygen, Mechanical aeration

**คำนำ**

ทรัพยากรน้ำนับว่ามีความสำคัญอย่างยิ่งในการดำรงชีวิตของมนุษย์และสิ่งมีชีวิต ปัจจุบันการเพิ่มขึ้นของประชากรทำให้มีความต้องการใช้น้ำมากขึ้น เมื่อมีการใช้น้ำ ปริมาณน้ำเสียที่ตามมาเพิ่มมากขึ้น หากไม่มีการบำบัดให้มีสถานภาพที่เหมาะสม จะทำให้มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และท้ายที่สุดผลกระทบนี้จะหมุนเวียนกลับมาสู่มนุษย์ (Zhu, 2006) อย่างไรก็ดีธรรมชาติมีความสามารถในการฟอกตัวเอง (self-purification) ทำให้มีการควบคุมค่าความสกปรกในรูปของปริมาณสารอินทรีย์หรือค่าความสกปรกในรูปของบีโอดีให้อยู่ในความสมดุล (Ostroumov, 2016) โดยกระบวนการฟอกตัวเองของน้ำ มีจุลินทรีย์เป็นผู้ย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำ ทั้งนี้เพื่อเป็นตัวขับเคลื่อนการย่อยสลายของจุลินทรีย์นั้น ออกซิเจนคือหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่มีบทบาทต่อการบำบัด โดยดัชนีชี้วัดปริมาณออกซิเจนในน้ำหรือออกซิเจนละลายน้ำ จะถูกเติมจากการพัดพาอากาศลงไปในน้ำโดยธรรมชาติ ได้แก่ การพัดของลม การระเหยของน้ำทำให้เกิดความเย็นและน้ำมีความหนักจะจมตัวลง (Thermosiphon process) และกระบวนการการสังเคราะห์แสง (Photosynthesis process) ของพืชน้ำและสาหร่ายน้ำ (Plankton) เป็นต้น

อย่างไรก็ดีจากการเพิ่มขึ้นของประชากรที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้มีการเพิ่มขึ้นของการปลดปล่อยน้ำเสีย โดยหากไม่มีการจัดที่ถูกต้อง น้ำเสียจะถูกปลดปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ ทั้งนี้การปนเปื้อนของสารอินทรีย์ที่มาจากน้ำเสียชุมชน มีค่าเกินกว่าความสามารถที่แหล่งน้ำจะสามารถฟอกตัวเองการใช้ตัวช่วยทางเทคโนโลยี การเติมอากาศมักจะถูกนำมาใช้เป็นการแก้ไขและรักษาสมดุลของแหล่งน้ำ การเติมอากาศด้วยเครื่องกล ซึ่งมีรูปแบบการเติมที่หลากหลายวิธีการ เช่น การเติมอากาศที่ผิวหน้าน้ำ การเติมอากาศที่ใต้น้ำ การเติมอากาศและน้ำ แต่ละวิธีจะได้ผลการเติมออกซิเจนละลายน้ำที่แตกต่างกันไป การเติมอากาศด้วยเครื่องกล RX-5 เป็นเครื่องกลเติมอากาศแบบหัวฉีด (Jet Aerator) มีขนาดเล็กกะทัดรัด เหมาะกับพื้นที่ที่มีความลึกของบ่อไม่มาก (1.5–2.5 เมตร) ติดตั้งและขนย้ายสะดวก (มูลนิธิชัยพัฒนา, 2549) งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะทำการการทดสอบความสามารถของการเติมอากาศ(ออกซิเจนละลายน้ำ)ของเครื่องเติมอากาศชัยพัฒนารุ่น RX-5B และ 5C ให้กับแหล่งน้ำ เพื่อเสนอความสามารถที่เหมาะสมในการเติมอากาศในเวลาและสถานที่ที่มีคุณภาพน้ำต่างกัน

**อุปกรณ์และวิธีการ**

*อุปกรณ์*

การวิจัยครั้งนี้ได้เปรียบเทียบความสามารถในการเติมออกซิเจนของเครื่องกลเติมอากาศชัยพัฒนา RX-5 เป็นเครื่องกลเติมอากาศระบบอัดและดูดอากาศลงใต้น้ำ ประกอบด้วย 2 รุ่น (Fig. 1, Fig. 2)




**Fig. 1** Chaipattana aerator, model RX-5B



**Fig. 2** Chaipattana aerator, model RX-5C

เครื่องกลเติมอากาศชัยพัฒนารุ่น RX-5B (Water pump) หลักการทำงานของเครื่องจะใช้ความเร็วของน้ำดึงอากาศจากภายนอกสู่ภายใน เมื่อมอเตอร์ได้รับแรงดันไฟฟ้าขนาด 360 โวลต์ เพลามอเตอร์จะทำการส่งกำลังการหมุนไปยังเพลาส่งกำลัง ทำให้ใบพัดตีน้ำหมุนตามเพลา เมื่อใบพัดตีน้ำในขณะที่น้ำท่วมอยู่ก็จะสร้างสุญญากาศขึ้นหลังใบพัด และจะดูดอากาศมาจากท่อ อากาศที่ถูกดูดซึ่งปนมากับน้ำก็จะถูกส่งออกไป เมื่อใบพัดตีน้ำให้แตกกระจายก็จะทำให้เกิดฟองอากาศและถูกผลักดันให้ไหลไปกับคลื่นน้ำ ฟองอากาศที่จมอยู่ใต้ผิวน้ำนั้นจะทำให้ออกซิเจนถูกถ่ายเทลงไปในน้ำเสีย (มูลนิธิชัยพัฒนา, 2549)

เครื่องกลเติมอากาศชัยพัฒนารุ่น RX-5C (Water pump + Air pump) เป็นรุ่นที่มีการพัฒนาจากรุ่น 5B เปลี่ยนเป็นมอเตอร์แรงดันไฟฟ้าขนาด 220 โวลต์ มีหลักการทำงาน คือ มอเตอร์ไฟฟ้าจะทำให้ใบพัดปั๊มน้ำหมุน ระบบสูบน้ำทำงานจะดูดน้ำที่ส่วนล่างของบ่อขึ้นไปตามท่อดูดน้ำที่ปลายทางออกท่อดูดน้ำ เมื่อไหลผ่านตรงจุด Venturi น้ำมีความเร็วสูงเกิดสุญญากาศจะดูดอากาศจากภายนอกผสมกับน้ำ (มูลนิธิชัยพัฒนา, 2549)

*พื้นที่การศึกษา*

การศึกษาครั้งนี้ได้ทำการเปรียบเทียบความสามารถของการเติมออกซิเจนของเครื่องกลเติมอากาศชัยพัฒนาทั้ง 2 รุ่น โดยได้ทำการติดตั้งไว้ใน 2 พื้นที่ ได้แก่

*พื้นที่ที่ 1:* บ่อน้ำของโรงเรียนกาสรกสิวิทย์ จ.สระแก้ว มีความกว้างของบ่อ 50–70 เมตร ยาว 150 เมตร ลึก 2.5 เมตร เป็นบ่อน้ำธรรมชาติ ทำหน้าที่เก็บน้ำไว้ใช้ประโยชน์ในโรงเรียน ดำเนินการเก็บตัวอย่างวันที่ 18–20 พฤศจิกายน 2564 ทำการติดตั้งเครื่องกลเติมอากาศที่กลาง สถานภาพปัจจุบันของน้ำในสระมีคุณภาพน้ำเป็นไปตามมาตรฐานคุณภาพน้ำผิวดินประเภทที่ 1–2 สามารถใช้เพื่อการอุปโภคบริโภค การอนุรักษ์สัตว์น้ำ และการประมง แต่สามารถใช้ประโยชน์เพื่อการเกษตรได้

*พื้นที่ที่ 2:* บ่อน้ำข้างสระน้ำจุฬาภรณวลัยลักษณ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ มีความกว้างบ่อ 25–29 เมตร ความยาว 89 เมตร ความลึก 2.5 เมตร เป็นแหล่งน้ำรองรับน้ำทิ้งจากอาคารโดยรอบ ได้แก่ อาคารศูนย์เรียนรวม 4 อาคารจักรพันธุ์เพ็ญศิริ และสระว่าน้ำจุฬาภรณวลัยลักษณ์ ดำเนินการเก็บตัวอย่างน้ำวันที่ 20–24 กุมภาพันธ์ 2565 ทำการติดตั้งเครื่องกลเติมอากาศที่กลางบ่อ สถานภาพปัจจุบันของน้ำในสระมีคุณภาพน้ำไม่เป็นไปตามมาตรฐานคุณภาพน้ำผิวดินประเภทที่ 2

*วิธีการ*

*การทดลองที่ 1 ณ โรงเรียนกาสรกสิวิทย์ จ.สระแก้ว* ได้มีการแบ่งการทดลองเป็น 2 ขั้นตอน

ขั้นตอนที่ 1 การหาระยะเวลาการอิ่มตัวของอากาศในน้ำด้วยการเติมออกซิเจนด้วยเครื่องกลเติมอากาศรุ่น RX-5B/C โดยทำการเลือกจุดเก็บน้ำที่ระยะ 1, 2 และ 3 ม. จากตัวเครื่องกลเติมอากาศฝั่งที่มีการเติมอากาศที่ความลึก 3 ระดับ ได้แก่ ผิวน้ำ (0.30 ม.จากผิวน้ำ) กลางน้ำ (1.8 ม.) และท้องน้ำ (2.1 ม.) โดยจะทำการวัดค่าออกซิเจนละลายน้ำก่อนเปิดเครื่องและทุก 15 นาทีหลังเปิดเครื่อง ตามจุดเก็บข้างต้น จำนวน 3 ซ้ำ โดยมีสมมติฐานที่จะหาความอิ่มตัวของอากาศในน้ำที่มีอากาศเติมเข้าไปหลังจากเปิดเครื่อง การตอบสมมติฐานของขั้นตอนนี้จะได้รับการยืนยันทางสถิติเมื่อปริมาณออกซิเจนคงที่และไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาการเติมที่ระดับนัยยะสำคัญ 0.05

ขั้นตอนที่ 2 เป็นการหาความสามารถของกังหันน้ำชัยพัฒนาในการเติมออกซิเจนทั้งระยะทางและความลึก หลังจากได้คำตอบจากขั้นตอนที่ 1 แล้ว ผลลัพธ์จะนำมาขยายขอบเขตเชิงพื้นที่ เพื่อหารัศมีและความลึก ที่เครื่องกลเติมอากาศสามารถเติมอากาศได้ ขั้นตอนนี้ได้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำก่อนและหลังเปิดเครื่อง (กำหนดจากผลลัพธ์ของขั้นตอน

ที่ 1) การกำหนดจุดเก็บแบ่งออกเป็น 4 มุม แต่ละมุมจะมีรัศมีการวัดห่างจากตัวเครื่อง 5 ม. และทำการวัดออกซิเจนละลายน้ำที่ระยะทุก 1 ม. ในแต่ละเมตรจะวัดออกซิเจนในแนวดิ่ง ตามระดับความลึก 3 ระดับ ได้แก่ 0.3, 1.8 และ 2.1 ม. จนถึงระยะ 5 ม. (Fig. 3) การตรวจวัดแบ่งเป็น 2 เวลา คือ 12.00 เป็นตัวแทนของช่วงเวลาที่มีแสง (กลางวัน) และ 01.00 เป็นตัวแทนของช่วงเวลาที่ไม่มีแสง (กลางคืน) เพื่อเป็นการตัดปัจจัยการเติมออกซิเจนจากการสังเคราะห์ด้วยแสงของแพลงก์ตอนพืช (Ichimura and Aruga, 1958) แบ่งการวัดออกเป็น 4 มุมรอบเครื่อง โดยกำหนดให้มุม A คือจุดน้ำพ่น (มีการพ่นน้ำ) จุดที่เหลือ (B C และ D)

*การทดลองที่ 2* ณ บ่อน้ำข้างสระน้ำจุฬาภรณวลัยลักษณ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ โดยการทดลองครั้งนี้จะเป็นการนำผลการศึกษาจากการทดลองที่ 1 มาประยุกต์ในน้ำที่มีคุณภาพต่ำกว่าการทดลองที่ 1 โดยมีการวางแผนเก็บตัวอย่างทุกระยะ 1 เมตร ทิศทางด้านหน้าเครื่องเติมอากาศ รวมระยะ 10 ม. ที่ระดับความลึก 0.3, 1.0 และ 2.0 ม. ทำการเก็บตัวอย่างน้ำก่อนและหลังเปิดเครื่องกลเป็นเวลา 1 ชม. ทำการเก็บตัวอย่างตัวแทนกลางวันและกลางคืน โดยมีการอ้างอิงจากผลการทดลองครั้งที่ 1 บ่อน้ำโรงเรียนกาสรกสิวิทย์

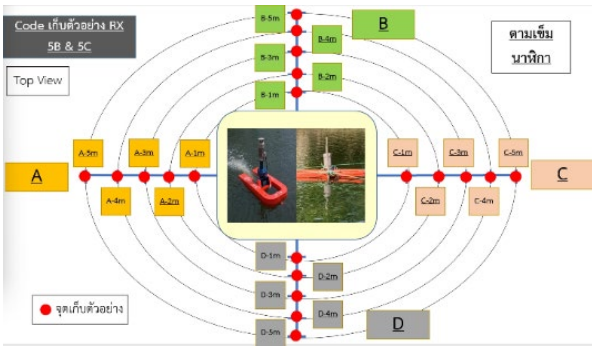



**Fig. 3** Sample collection point

*ดัชนีการตรวจวัดคุณภาพน้ำ*

ดัชนีการตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำที่เลือกใช้เป็นดัชนีแสดงถึงศักยภาพของเครื่องกลเติมอากาศ ประกอบด้วย ค่าออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolve Oxygen; DO) อุณหภูมิ (Temperature) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และค่าความนำไฟฟ้า (EC) ส่วนค่าดัชนีคุณภาพน้ำอื่น ๆ ประกอบด้วย ความสกปรกในรูปบีโอดี (Biological Oxygen Demand; BOD) ทำการเก็บตัวอย่างด้วยขวดโพลีเอทิลีนขนาด 1,000 มิลลิลิตร ที่ระดับความลึกที่กำหนดไว้ จากนั้นเก็บรักษาตัวอย่างน้ำที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อนำไปวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ โดยใช้วิธีการตามที่อธิบายไว้ใน Standard Method for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA and WEF, 2017)

**ผลและวิจารณผลการทดลอง**

*บ่อน้ำกาสรกสิวิทย์ จ.สระแก้ว*

*การทดลองขั้นตอนที่ 1* ระยะเวลาการอิ่มตัวของออกซิเจนในแหล่งน้ำธรรมชาติโดยการเปิดใช้งานเครื่องกลเติมอากาศในการเปรียบเทียบปริมาณออกซิเจนละลายน้ำในจุดที่น้ำพ่นของเครื่องกลเติมอากาศรุ่น RX-5C/B ซึ่งตามทฤษฎีเป็นจุดที่สามารถเติมออกซิเจนมากที่สุดผลจากการทดลองพบว่าหลังการเปิดเครื่องและตรวจวัดออกซิเจนละลายน้ำทุก 15 นาทีตามระยะทางและความลึกที่กำหนด พบว่าระยะเวลาการอิ่มตัวของออกซิเจนละลายน้ำที่ระยะ 1 เมตรจาก

ตัวเครื่อง อยู่ที่ 60 นาที ผลจากการเปรียบเทียบทางสถิติแสดงให้เห็นถึงค่าออกซิเจนละลายน้ำที่เปลี่ยนแปลงแบบไม่มีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ค่าออกซิเจนละลายน้ำที่ตรวจวัดได้ที่ความลึก 0.3 เมตร ของระยะ 1 เมตรจากเครื่องมีการเพิ่มขึ้นดังสมการ $y = 7.2483e^{0.0004x}$ แสดงให้เห็นว่าระยะเวลา 60 นาที คือจุดอิ่มตัวของน้ำ (ค่าออกซิเจนละลายน้ำคงที่)

*จากการทดลองเครื่องกลเติมอากาศรุ่น RX-*5B ในฝั่งที่มีการเติมอากาศ (จุด A) ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงปริมาณออกซิเจนในระยะ 1–5 เมตร จากเครื่องที่ระดับความลึก 0.3, 1.8 และ 2.1 เมตร อยู่ที่ 0.32 มก./ล. ในช่วงกลางวัน และ 0.25 มก./ล. ในช่วงกลางคืน อัตราการเพิ่มขึ้นของออกซิเจนละลายน้ำที่ตรวจวัดได้แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นที่ระดับ 0.3 และ 1.8 เมตร อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และจะมีอิทธิพลสงสุดในระยะ 1–3 เมตร โดยมีค่าออกซิเจนละลายน้ำเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 0.22, 0.26 และ 0.18 มก./ล. ในเวลากลางวันและ 0.19, 0.26 และ 0.16 มก./ล. ในเวลากลางคืน และอีก 3 ฝั่งที่อยู่รอบกังหัน (จุด B, C และ D) พบว่าอิทธิพลของการเติมอากาศด้วยเครื่องรุ่น 5B ไม่ส่งผลให้ออกซิเจนในน้ำอีก 3 ฝั่ง (จุด B, C และ D) เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามอิทธิพลของการแพร่ออกซิเจนละลายน้ำจากฝั่งที่มีการเติมออกซิเจนสามารถทำให้ค่าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำเฉลี่ยของทั้ง 3 ฝั่งนี้ (จุด B, C และ D) เพิ่มขึ้นที่ 0.11, 0.10 และ 0.07 มก./ล. ในช่วงกลางวัน และ 0.12, 0.02 และ 0.07 มก./ล. ในช่วงกลางคืน ทั้งนี้จากการนำค่าการเพิ่มขึ้นของออกซิเจนมาเข้าสมการทางสถิติ พบว่าการเติมออกซิเจนในฝั่งที่มีการพ่นน้ำสามารถ ออกซิเจนละลายน้ำสามารถขยายอิทธิพลได้ไกลกว่า 5 เมตร) (Fig. 4)

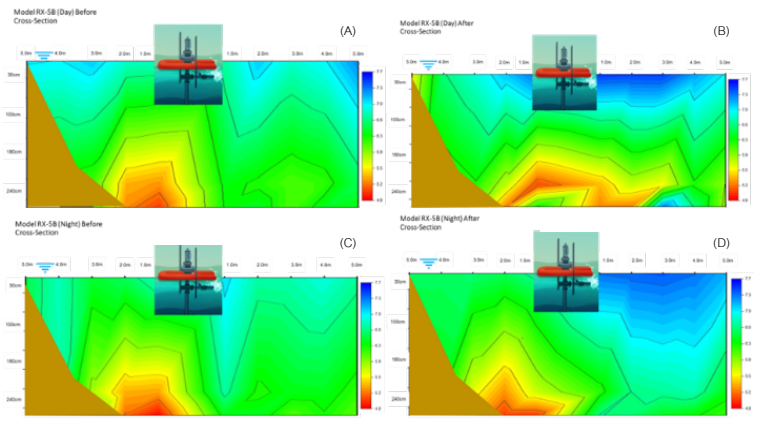



**Fig. 4** The amount of dissolved oxygen in the cutoff angle before and after turning on the Chaipattana turbine model RX-5B: (A) During the day before turning on the machine; (B) During the daytime after turning on the machine for 1 hour; (C) During the night before turning on the machine; (D) During the nighttime after turning on the machine for 1 hour

*จากการทดลองเครื่องกลเติมอากาศรุ่น RX-5C* พบว่าออกซิเจนละลายน้ำที่ระยะ 1–5 เมตร และความลึก 0.3, 1.8และ 2.1 เมตรมีค่าเฉลี่ยเพิ่มขึ้นที่ 0.30, 0.37 และ 0.31 มก./ล. ในช่วงกลางวัน และ 0.3, 0.33 และ 0.27 มก./ล. ในช่วงกลางคืน เมื่อทำการเปรียบเทียบรุ่น RX-5C และ RX-5B ด้านการเติมออกซิเจนละลายน้ำจะพบว่าเครื่องกลเติม-อากาศรุ่น RX-5C มีศักยภาพในการเติมอากาศมากกว่า RX-5B ทั้งนี้ประสิทธิภาพของการเติมออกซิเจนของอีก 3 ฝั่งรอบเครื่องพบว่าการออกแบบของกังหันน้ำรุ่นนี้ไม่สามารถเพิ่มออกซิเจนละลายน้ำให้กับแหล่งน้ำโดยตรงได้ แต่การเติมออกซิเจนให้บริเวณรอบกังหันจะเป็นการพึ่งระบบการแพร่ของออกซิเจนจากฝั่งที่มีการพ่นน้ำ (Vagnoni et al., 2019) ทั้งนี้

ด้วยการประยุกต์เครื่องกลรุ่น 5C ที่เลียนแบบรุ่น 5B ที่มีการติดตั้งท่อลงไป 1 เมตร จากผิวน้ำจะทำให้การเติมออกซิเจนเป็นการเติมที่ระยะผิวน้ำที่ความลึก 0.30 และ 1.80 เมตร และมีอิทธิพลมากที่สุดในระยะ 1–3 เมตร (Fig. 5)

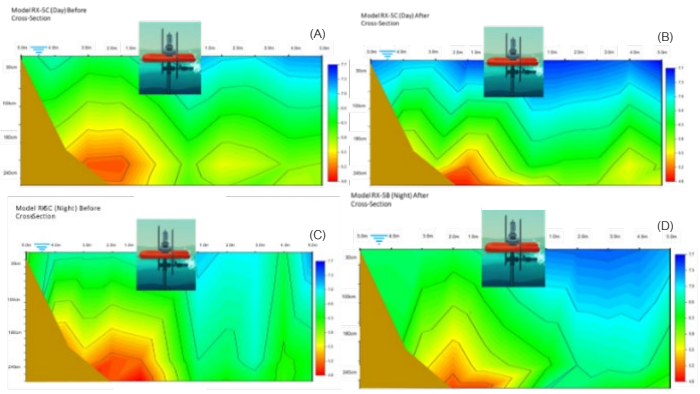



Fig. 5 The amount of dissolved oxygen in the cutoff angle before and after turning on the Chaipattana turbine model RX-5C: (A) During the day before turning on the machine; (B) During the daytime after turning on the machine for 1 hour; (C) During the night before turning on the machine; (D) During the nighttime after turning on the machine for 1 hour

*การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเติมอากาศกลางวันและกลางคืน*

จากการศึกษาพบว่าผลของการเปลี่ยนแปลงค่าออกซิเจนละลายน้ำภายหลังการเปิดเครื่องในช่วงเวลากลางวันจะพบว่าปริมาณการเพิ่มขึ้นของออกซิเจนละลายน้ำมีค่ามากกว่าตอนกลางคืน ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากการสังเคราะห์แสงของแพลงก์ตอนพืชที่อยู่ในน้ำ (Yang et al., 2020) เพื่อหาค่าเฉลี่ยของการผลิตออกซิเจนละลายน้ำด้วยกระบวนการสังเคราะห์แสง ได้ทำการนำค่าปริมาณออกซิเจนในเวลากลางคืนมาหักลบกับค่าที่ได้ช่วงกลางวัน จากช่วงระยะเวลาที่ศึกษา พบว่าอัตราการเติมออกซิเจนละลายน้ำในช่วงสังเคราะห์แสงมีค่า 0.11–0.32 มก./ล.

ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของการเติมอากาศด้วยเครื่องกลเติมอากาศสะท้อนด้วยค่าดัชนีคุณภาพน้ำคือปริมาณค่าออกซิเจนละลายน้ำ (DO) ดังนั้นจึงใช้ค่าออกซิเจนละลายน้ำ (DO) เป็นตัวแสดงความสามารถการเติมอากาศของเครื่องกลเติมอากาศ

*บ่อน้ำข้างสระจุฬาภรณวลัยลักษณ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์*

จากการตรวจวัดค่าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำพบว่าค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงปริมาณออกซิเจนในระยะ 1–10 เมตร จากเครื่องที่ระดับความลึก 0.3, 1.8 และ 2.1 เมตร ของเครื่องกลเติมอากาศรุ่น RX-5B อยู่ที่ -0.30 มก./ล. ในช่วงกลางวัน และ -0.21 มก./ล. และเครื่องกลเติมอากาศรุ่น RX-5C ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงปริมาณออกซิเจน อยู่ที่ -0.14 มก./ล. ในช่วงกลางวัน และ -0.10 มก./ล. แสดงให้เห็นถึงค่าการลดลงของออกซิเจนละลายน้ำดังกล่าว โดยการลดลงนี้เกิดขึ้นจากการที่มีการแทนที่ของมวลน้ำที่มีค่าความสกปรกในรูปของบีโอดีสูง 9.1±0.37 มก./ล. โดยค่าบีโอดี แสดงให้เห็นถึงความต้องการออกซิเจนละลายน้ำ (DO) ของจุลินทรีย์ที่อยู่ในน้ำ ส่งผลให้ออกซิเจนละลายน้ำ (DO)ที่ถูกเติมลงมาได้ถูกนำไปใช้ (Fig. 6)

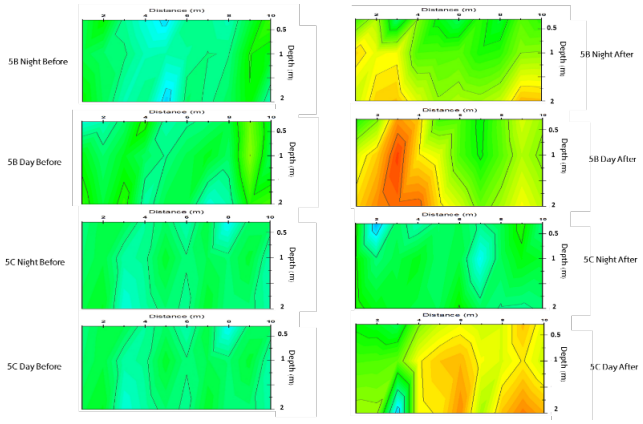



**Fig. 6** Dissolved oxygen content in the cutting angle before and after the RX-5 aerator

*การเติมออกซิเจนละลายน้ำในคุณภาพน้ำที่แตกต่างกัน*

การเปรียบเทียบการเติมออกซิเจนละลายน้ำของเครื่องกลเติมอากาศรุ่น RX-5 ที่ติดตั้งทั้งที่โรงเรียนกาสรณ์กสิวิทย์ และที่บ่อน้ำข้างสระจุฬาภรณวลัยลักษณ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ค่าความสกปรกของสารอินทรีย์ในรูปบีโอดีของบ่อน้ำข้างสระจุฬาภรณวลัยลักษณ์มีค่า BOD 9.1±0.37 มก./ล. ซึ่งมีค่าสูงกว่าโรงเรียนกาสรกสิวิทย์ที่มี BOD 1.79±0.13 มก./ล. ส่งผลให้น้ำมีความหนืดสูงเนื่องมาจากค่าความสกปรกของน้ำ จากงานวิจัยของ Xu et al. (2014) พบว่าน้ำเสียหรือน้ำที่มีค่าความสกปรกสูงจะมีความหนืดของน้ำประมาณ 2–3 เท่าของน้ำที่อุณหภูมิเดียวกัน ดังนั้นการเติมอากาศโดยเครื่องกลเติมอากาศในบ่อน้ำมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จึงมีความเป็นไปที่ช้ากว่า บ่อน้ำโรงเรียนกาสรกสิวิทย์ ที่ระยะเวลา 1 ชั่วโมง ทั้งนี้ค่าความสกปรกยังมีความสัมพันธ์กับความต้องการออกซิเจนละลายน้ำและจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้น (Sahu et al., 2023) โดยอากาศที่ถูกเติมจากเครื่องกลเติมอากาศจะถูกนำไปใช้ในกระบวนการย่อยสลายทางเคมีและชีวภาพ ส่งผลให้การเปิดเครื่องกลเติมอากาศในระยะเวลา 1 ชั่วโมงนั้นยังไม่สามารถแสดงผลถึงค่าออกซิเจนละลายที่เปลี่ยนไปของแหล่งน้ำดังกล่าว

*การเปรียบเทียบค่าออกซิเจนละลายน้ำด้วยเครื่องกลเติมอากาศชัยพัฒนารุ่น RX-5B and C*

การเติมอากาศด้วยเครื่องกลเติมอากาศชัยพัฒนารุ่น RX-5 จาก (Table 1) น้ำในบ่อโรงเรียนกาสรกสิวิทย์ ของรุ่น 5B มีการเปลี่ยนแปลงของค่าออกซิเจนละลายน้ำจาก 7.12±0.08 มก./ล. เป็น 7.43±0.05 มก./ล. มีค่าออกซิเจนละลายน้ำเพิ่มขึ้น 0.31 มก./ล. ที่ระยะ 3 เมตร ในระดับความลึก 0.30 ม. ในช่วงกลางวัน และจาก 6.74±0.02 มก./ล. เป็น 7.36±0.05 มก./ล. มีค่าออกซิเจนละลายน้ำเพิ่มขึ้น 0.61 มก./ล. ที่ระยะ 2 เมตร ในระดับความลึก 0.30 ม. ในช่วงกลางคืน และรุ่น 5C มีการเปลี่ยนแปลงของค่าออกซิเจนละลายน้ำจาก 7.16±0.03 มก./ล. เป็น 7.71±0.09 มก./ล. มีค่าออกซิเจนละลายน้ำเพิ่มขึ้น 0.55 มก./ล. ที่ระยะ 3 เมตร ในระดับความลึก 0.30 ม. ในช่วงกลางวัน และจาก 6.85±0.05มก./ล. เป็น 7.63±0.09 มก./ล. มีค่าออกซิเจนละลายน้ำเพิ่มขึ้น 0.78 มก./ล. ที่ระยะ 2 เมตร ในระดับความลึก 0.30 ม. ในช่วงกลางคืน

การเติมอากาศด้วยเครื่องกลเติมอากาศชัยพัฒนารุ่น RX-5 ทำให้น้ำในบ่อข้างสระจุฬาภรณวลัยลักษณ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ของรุ่น 5B มีการเปลี่ยนแปลงของค่าออกซิเจนละลายน้ำจาก 2.67±0.18 มก./ล. เป็น 2.85±0.13 มก./ล. มีค่าออกซิเจนละลายน้ำเพิ่มขึ้น 0.18 มก./ล. ที่ระยะ 2 เมตร ในระดับความลึก 0.30 ม. ในช่วงกลางวัน และจาก 3.26±0.12 มก./ล. เป็น 3.84±0.10 มก./ล. มีค่าออกซิเจนละลายน้ำเพิ่มขึ้น 0.58 มก./ล. ที่ระยะ 2 เมตร ในระดับความลึก 0.30 ม. ในช่วงกลางคืน และรุ่น 5C มีการเปลี่ยนแปลงของค่าออกซิเจนละลายน้ำในช่วงกลางวันจาก 3.50±0.09 มก./ล. เป็น 3.37±0.29 มก./ล. มีค่าออกซิเจนละลายน้ำเพิ่มขึ้น 0.21 มก./ล. ที่ระยะ 2 เมตร ในระดับความลึก 0.30 ม.

ในช่วงกลางคืน และจาก 3.17±0.03 มก./ล. เป็น 4.35±0.08 มก./ล. มีค่าออกซิเจนละลายน้ำเพิ่มขึ้น 0.85 มก./ล. ที่ระยะ 2 เมตร ในระดับความลึก 0.30 ม. แต่ในขณะเดียวกันการเปลี่ยนแปลงค่าออกซิเจนละลายน้ำของบ่อน้ำข้างสระจุฬาภรณวลัยลักษณ์ นอกจากค่าออกซิเจนละลายน้ำที่เพิ่มขึ้นในระยะที่กล่าวไปข้างต้น จะพบว่าที่ระยะอื่น ๆ นอกจากที่กล่าวไปจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าออกซิเจนละลายน้ำที่เพิ่มขึ้นไม่สูงมาก หรือมีการเปลี่ยนแปลงของค่าออกซิเจนละลายน้ำที่ลดลงหลังการเปิดเครื่องกลเติมอากาศทั้ง 2 รุ่น

**Table 1** The difference in dissolved oxygen of the aeration machine at Kasornkasiwit School pond (KS) and the pond next to Chulabhorn pond (KU)

| Model | Distance | Depth | KS Different DO (mg/l) | | Distance | Depth | KU Different DO (mg/l) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | (m) | (m) | Day | Night | (m) | (m) | Day | Night |
| 5B | 3 | 0.30 | 0.31 | 0.61 | 2 | 0.30 | 0.18 | 0.58 |
| 5C | 2 | 0.30 | 0.55 | 0.78 | 2 | 0.30 | 0.21 | 0.85 |

**สรุป**

ดังนั้นเมื่อดูจากค่าคุณภาพน้ำอย่างค่าความสกปรกในรูปบีโอดีของบ่อน้ำโรงเรียนกาสรกสิวิทย์และบ่อน้ำข้างสระน้ำจุฬาภรณวลัยลักษณ์มีค่าแตกต่างกัน โดยมีค่าบีโอดี 1.79±0.13 มก./ล. และ 9.1±0.37 มก./ล. ตามลำดับ ส่งผลให้ค่าออกซิเจนละลายน้ำที่มีอยู่ก่อนเปิดเครื่องกลของบ่อน้ำทั้งสองเองแตกต่างกันไปด้วย บ่อน้ำโรงเรียนกาสรกสิวิทย์มีค่าออกซิเจนละลายน้ำก่อนการเปิดเครื่องอยู่ 6–7 มก./ล. หลังการเปิดเครื่องมีออกซิเจนละลายน้ำ 6-8 มก./ล. จากการศึกษาเองจึงพบว่าการปิดเครื่องกลเติมอากาศให้ทำงานภายในระยะเวลา 1 ชั่วโมง สามารถเติมอากาศให้กับน้ำจนอิ่มตัวได้ แต่ในขณะที่บ่อน้ำข้างสระจุฬาภรณวลัยลักษณ์เอง มีค่าออกซิเจนละลายน้ำเริ่มต้นอยู่ที่ 2–4 มก./ล. และหลังการเปิดเครื่องกลเติมอากาศไป 1 ชั่วโมง ค่าออกซิเจนละลายน้ำอยู่ที่ประมาณ 3-4 มก,/ล. พบว่าการเติมอากาศ 1 ชั่วโมงด้วยเครื่องกลเติมอากาศให้กับแหล่งน้ำที่มีค่าความสกปรกในรูปบีโอดีที่สูงขึ้นจากการศึกษาแรก ยังไม่สามารถเติมอากาศให้กับแหล่งน้ำจนอิ่มตัวได้

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าออกซิเจนละลายน้ำด้วยเครื่องกลเติมอากาศรุ่น RX-5BและC พบว่าทั้งในบ่อน้ำโรงเรียนกาสรกสิวิทย์และบ่อน้ำข้างสระจุฬาภรณวลัยลักษณ์เอง รุ่น 5C มีความสามารถในการเปลี่ยนแปลงค่าออกซิเจนให้เพิ่มขึ้นได้สูงกว่ารุ่น 5B และรุ่น 5C สามารถทำงานได้ดีที่ระดับความลึก 0.30 ม. และจากในบ่อน้ำข้างสระจุฬาภรณวลัยลักษณ์ที่มีความสกปรกในรูปบีโอดีค่อนข้างสูง รุ่น 5B สามารถเติมอากาศให้เพิ่มขึ้นได้ที่ระยะใกล้เครื่อง 1–2 ม.ที่ระกับความลึก 0.30–1 ม. แต่ในระยะ 3–5 ม.จากตัวเครื่องกลับทำให้ค่าออกซิเจนละลายน้ำลดลง ในขณะที่รุ่น 5C สามารถเปลี่ยนแปลงค่าออกซิเจนละลายน้ำให้เพิ่มได้ดีที่ระยะ 1–5 ม.และที่ระดับความลึก 0.30 ม. แต่ยังไม่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าออกซิเจนให้เพิ่มขึ้นได้ที่ระดับความลึก 1–2 ม.

**กิตติกรรมประกาศ**

ขอขอบคุณโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ย อันเนื่องมาจากพระราชดำริ คณะอาจารย์ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ตลอดจนเจ้าหน้าที่และเพื่อน ๆ ที่ให้ความช่วยเหลือสนับสนุนการทำวิจัยในครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

**เอกสารอ้างอิง**

มูลนิธิชัยพัฒนา. 2549. เครื่องกลเติมอากาศแบบอัดอากาศและดูดน้ำ RX-5. https://www.chaipat.or.th/publication/publish-document/mechanical-fill-the-air-rx-5c.html. 20 ธันวาคม 2566.

APHA, AWWA, WPCF. 2017. Standard Method for the Examination of Water and Wastewater, 23th ed. American Public Health Association. Washington DC, USA.

Fair, G.M., Geyer, J.C., Okun, D.A. 1971. Elements of Water Supply and Wastewater Disposal. Wiley. New Jersey, NJ, USA.

Ichimura, S., Yusho, A. 1958. Some Characteristics of photosynthesis of fresh water phytoplankton. Bot. Mag. Tokyo 71: 841–842.

Ostroumov, S.A. 2016. Water quality and conditioning in natural ecosystems: Biomachinery theory of self-purification of water. Russ. J. Gen. Chem. 87: 3199–3204.

Sahu, P., Londhe, S.N., Kulkarni, P.S. 2023. Modelling dissolved oxygen and biochemical oxygen demand using data-driven techniques. Environ. Eng. Res. 28: 210541.

Vagnoni, E., Andolfatto, L., Guillaume, R., Leroy, P., Avellan, F. 2019. Oxygen diffusion through air–water free surfaces in a pump–turbine operating in condenser mode. Int. J. Multiph. Flow. 112: 183–192. doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2018.11.011

Xu, Y., Wu, Y., Sun, Q. 2014. Flow characteristics of the raw sewage for the design of sewage-source heat pump systems. Sci. World 2014: 503624. doi.org/10.1155/2014/503624

Yang, X., Liu, L., Yin, Z., Wang, X., Wang, S., Ye, Z. 2020. Quantifying photosynthetic performance of phytoplankton based on photosynthesis–irradiance response models. Environ. Sci. Eur. 32: 24.

Zhu, L. 2006. Remote sensing monitoring and assessment of water quality for lakes. Ph.D. thesis, Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences. Beijing, China.

# ผลของการขุดลอกตะกอนต่อคุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมีในบ่อบำบัดน้ำเสียชุมชนของเทศบาลเมืองเพชรบุรี

# Impact of sediment dredging on the physical and chemical water quality in community wastewater treatment ponds of Phetchaburi municipality

**วลีสิริ จันชะนะกิจ**[a], **อรอนงค์ ผิวนิล**[a,b,*], **อรปรีญา วงษ์เปี้ย**[a], **มัลลิกา ศรีชมภู**[b] , **ภาวิน วิจิตรตระการ**[b]
Varesili Chanchanakit[a], Onanong Phewnil[a,b,*], Onpreeya Wongpia[b], Manlika Srichomphu[b], Pavin Wichittrakarn[b]
[a]ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900
[b]โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ มูลนิธิชัยพัฒนา เพชรบุรี 76100
[a]Department of Environment Science, Faculty of Environment, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand
[b]The King's Royally Initiated Laem Phak Bia Environmental Research and Development Project, Chaipattana Foundation, Phetchaburi 76100, Thailand
*Corresponding author. E-mail address: onanong.p@ku.th

**บทคัดย่อ**

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเปรียบเทียบคุณภาพน้ำและประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียระหว่างก่อนการขุดลอกและภายหลังการขุดลอกตะกอนของระบบบำบัดน้ำเสียเทศบาลเมืองเพชรบุรี โดยใช้ข้อมูลคุณภาพน้ำทุติยภูมิและเก็บตัวอย่างน้ำในปีปัจจุบัน ได้แก่ ก่อนและหลังขุดลอกครั้งที่ 1 พ.ศ. 2552–2554 และ พ.ศ. 2556–2559 ก่อน-หลังการขุดลอกตะกอนครั้งที่ 2 พ.ศ. 2560–2564 และหลังขุดลอกตะกอน พ.ศ. 2566 เก็บตัวอย่างน้ำ 6 จุด วิเคราะห์หาค่าของแข็งแขวนลอย (SS) ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ไขมันและน้ำมัน (FOG) ออกซิเจนละลายน้ำ (DO) ความสกปรกในรูปบีโอดี (BOD) ไนโตรเจนทั้งหมด (TN) และฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) ผลการศึกษาพบว่า คุณภาพน้ำทิ้งทางกายภาพและเคมีอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียรวมของชุมชน และภายหลังการขุดลอกตะกอนมีประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียที่ดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังนั้น ระบบบ่อบำบัดน้ำเสียชุมชนจึงต้องขุดลอกตะกอนออกเพื่อให้ระบบบำบัดน้ำเสียมีประสิทธิภาพในการบำบัดอย่างต่อเนื่อง
**คำสำคัญ**: การขุดลอกตะกอน, คุณภาพน้ำ, ตะกอนน้ำเสีย, น้ำเสียชุมชน, ระบบบ่อผึ่ง

**Abstract**

The research aimed to compare water quality and wastewater treatment efficiency before and after sediment dredging in Phetchaburi Municipality's wastewater treatment system. Water samples collected pre-post dredging 1 in the years 2009–2011 and 2013–2016 and pre-post dredging 2 in the year 2017–2022 and 2023 were analyzed for parameters such as Suspended Solids (SS), pH, Fat, Oil, and Grease (FOG), Dissolved Oxygen (DO), Biochemical Oxygen Demand (BOD), Total Nitrogen (TN) and Total Phosphorus (TP) Results showed that the water quality met standards for effluent from the community wastewater treatment system. However, post-dredging, there was a significant improvement in wastewater treatment efficiency at a 95% confidence level. Hence, sediment dredging was deemed necessary to maintain the treatment system's efficiency.
**Keywords**: Community wastewater, Lagoon treatment system, Sediment dredging, Water quality

**คำนำ**

ปัจจุบันการใช้น้ำมีอยู่เกือบทุกกิจกรรมในการดำเนินชีวิตของมนุษย์ จึงก่อให้เกิดน้ำเสียปริมาณมากและหนึ่งในประเภทน้ำเสียที่มีปริมาณมากที่สุด คือ น้ำเสียชุมชน ลักษณะน้ำเสียชุมชนประกอบด้วย สารอินทรีย์ที่มีความเข้มข้นสูง สารอนินทรีย์ และสารปนเปื้อนอื่น ๆ ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องมีการบำบัดน้ำเสียชุมชนเพื่อให้น้ำมีคุณภาพที่ดีขึ้นสามารถปล่อยลงสู่แหล่งธรรมชาติได้ หรือนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่อีกครั้งได้ ปัจจุบันประเทศไทยมีระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน 202 แห่ง โดยมีน้ำเสียเข้าระบบ 621,604 ล้านลูกบาศก์เมตร/ปี คิดเป็นร้อยละ 45 ของปริมาณน้ำเสียทั้งหมด (กรมควบคุมมลพิษ, 2566) ส่วนน้ำเสียที่ไม่ได้ผ่านการบำบัดส่วนมากก็จะถูกปล่อยลงสู่แม่น้ำหรือตามแหล่งน้ำธรรมชาติอื่น ๆ หนึ่งในระบบบำบัดน้ำเสียที่นิยมใช้กันมากที่สุด คือ ระบบบ่อผึ่ง เป็นระบบบำบัดน้ำเสียแบบใช้ออกซิเจน หลักการบำบัดน้ำเสียระบบบ่อผึ่งอาศัยกระบวนธรรมชาติช่วยธรรมชาติ และให้น้ำเสียใหม่ที่เข้ามาดันมวลน้ำเก่าที่ผ่านการบำบัดแล้วในบ่อไหลล้นผ่านทางสันขอบบ่อตามแรงโน้มถ่วงไปยังบ่อถัดไปอย่างต่อเนื่อง อย่างเช่น ระบบบ่อผึ่งของโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมากจากพระราชดำริ ที่ประกอบด้วย 5 บ่อ (บ่อตกตะกอน บ่อผึ่งที่ 1, 2, 3 และบ่อปรับสภาพ) โดยเมื่อเริ่มรับน้ำเสียเข้ามาในบ่อตกตะกอนกักพักน้ำเสียไว้ในบ่อ และให้น้ำไหลล้นดันมวลน้ำจากล่างบ่อขึ้นมาที่ด้านบนแต่ละบ่อ ในน้ำเสียมีแบคทีเรียกลุ่มที่ใช้ออกซิเจนทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียให้เป็นสารอนินทรีย์ ซึ่งเป็นธาตุอาหารของแพลงก์ตอนพืช ซึ่งแพลงก์ตอนพืชเหล่านี้ทำหน้าที่ในกระบวนการสังเคราะห์แสงผลิตออกซิเจนละลายน้ำในระบบ และอีกกระบวนการผลิตออกซิเจนในระบบคือ กระบวนการเทอร์โมไซฟอน และมีการปล่อยปลานิลเพื่อควบคุมปริมาณแพลงก์ตอนในอัตราส่วน 4 ตัว/ตารางเมตรผิวน้ำ (นฤชิต, 2554) น้ำเสียในแต่ละบ่อควรมีระยะเวลากักพัก (Hydraulic Retention Time; HRT) อย่างน้อย 5–7 วัน ให้เกิดกระบวนการบำบัดที่มีประสิทธิภาพ (สตรีไทย, 2544) น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดและมีคุณภาพดีแล้วจะปล่อยเข้าป่าชายเลนและลงอ่าวไทยต่อไป ข้อดีของระบบบ่อผึ่งคือเป็นระบบที่มีต้นทุนน้อย บำรุงรักษาง่าย และมีประสิทธิภาพดี ไม่สิ้นเปลืองพลังงานเพราะใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์ ข้อเสียคือต้องใช้พื้นที่มากจึงไม่เหมาะกับเมืองใหญ่ และในช่วงฤดูฝนที่มีแสงแดดน้อยอาจทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลงเกิดกลิ่นเหม็นได้ และในการบำรุงรักษาระบบเพื่อรักษาประสิทธิภาพการบำบัดด้วยการขุดลอกตะกอนนั้นก็เป็นสิ่งจำเป็นเช่นกัน เพราะถ้าในระบบมีการสะสมของตะกอนมากเกินไปก็จะลดความจุของระบบลงและส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียอีกด้วย หลังการขุดลอกตะกอนควรติดตามตรวจสอบคุณภาพน้ำทางกายภาพและทางเคมีอย่างต่อเนื่อง เพื่อรักษาประสิทธิภาพการบำบัดของระบบ ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุของการศึกษาวิจัยครั้งนี้เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมีก่อนและหลังการขุดลอกตะกอน และเพื่อเป็นแนวทางการจัดการระบบบ่อผึ่งบำบัดน้ำเสียที่ยั่งยืนต่อไป

**อุปกรณ์และวิธีการ**

*พื้นที่ศึกษาวิจัย*

ระบบบ่อบำบัดน้ำเสียชุมชนของเทศบาลเมืองเพชรบุรี ตั้งอยู่ที่โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลม-ผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ ตำบลแหลมผักเบี้ย อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี โดยนำข้อมูลคุณภาพน้ำทุติยภูมิย้อนหลัง แบ่งเป็นก่อนและหลังการขุดลอกตะกอน 2 ครั้ง คือ การขุดลอกครั้งที่ 1 พ.ศ. 2555 ข้อมูลก่อนขุดลอกตะกอนตั้งแต่ พ.ศ. 2552–2554 และหลังขุดลอกตะกอนตั้งแต่ พ.ศ. 2556–2559 ซึ่งมีการขุดลอกและปรับโครงสร้างบ่อผึ่งที่ 2 (บ่อลำดับที่ 3) และปรับระดับสันขอบทางน้ำล้นให้มีระดับต่างกับบ่อลำดับถัดไป 30 เซนติเมตร ใช้ระยะเวลาดำเนินการ 1 ปี ส่วนการขุดลอกครั้งที่ 2 พ.ศ. 2565 ใช่ข้อมูลคุณภาพน้ำก่อนขุดลอกตะกอนตั้งแต่ พ.ศ. 2560–2564 และหลังขุดลอก

ตะกอนตั้งแต่ พ.ศ. 2566 (สิงหาคม-พฤศจิกายน พ.ศ. 2566) ใช้ระยะเวลาในการดำเนินการ 1 ปีเช่นกัน แต่การขุดลอกตะกอนมีการปรับเพิ่มระดับทางน้ำล้นให้สูงกว่าบ่อลำดับถัดไปเป็น 50 เซนติเมตร ดังแสดงลักษณะพื้นที่ศึกษาวิจัยใน Fig. 1 และ Table 1

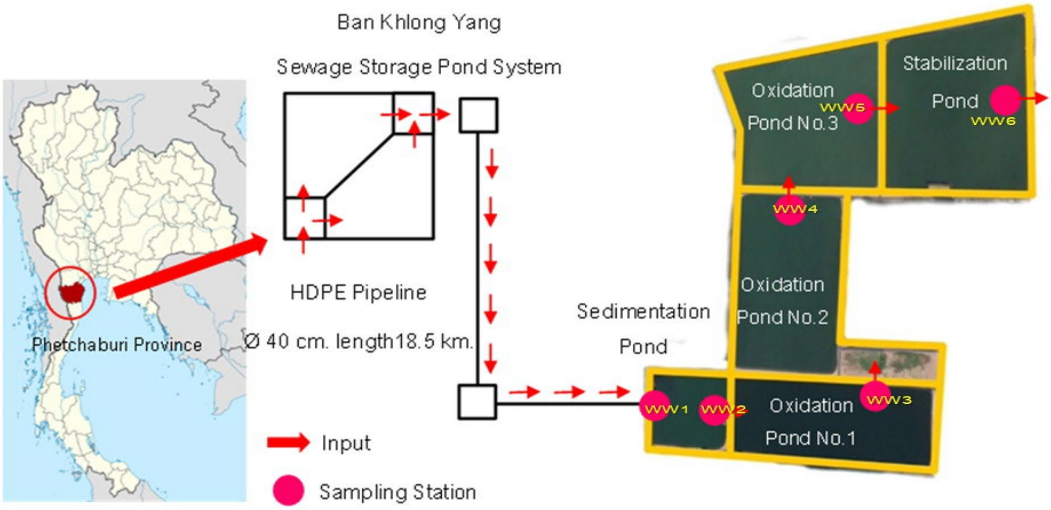



**Fig. 1** Study site at The Royally King's Initiative Laem Pak Bia Environmental Research and Development Project (LERD Project), Laem Phak Bia, Ban Laem district, Phetchaburi province

**Table 1** Characteristic of Lagoon Treatment System of The King's Royally Initiated Laem Pak Bia Environmental Research and Development Project in B.E. 2552–2566

| Pond | Deep (m) | | | Surface area ($m^2$) | | | Volume of Water ($m^3$) | | | Hydraulic Retention Time (day) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 2552 | 2556 | 2566 | 2552 | 2556 | 2566 | 2552 | 2556 | 2566 | 2552 | 2556 | 2566 |
| Sedimentation Pond | 2.3 | 2.4 | 2.5 | 10,217 | 10,200 | 9,933 | 23,499 | 24,800 | 20,786 | 8 | 5 | 5.38 |
| Oxidation Pond No.1 | 2.0 | 2.2 | 2.0 | 30,480 | 28,800 | 28,701 | 60,816 | 64,200 | 54,804 | 19 | 12 | 10.54 |
| Oxidation Pond No.2 | 1.9 | 1.9 | 1.8 | 34,898 | 32,200 | 50,276 | 66,306 | 62,200 | 55,071 | 13 | 15 | 10.58 |
| Oxidation Pond No.3 | 1.8 | 1.7 | 1.6 | 35,424 | 33,900 | 72,508 | 63,763 | 57,300 | 51,506 | 15 | 15 | 9.90 |
| Stabilization Pond | 1.7 | 1.4 | 1.4 | 43,131 | 42,900 | 44,426 | 73,323 | 60,900 | 52,310 | 27 | 17 | 10 |
| Total | | | | | | | 287,707 | 251,847 | 234,474 | 82 | 64 | 46.40 |

Adapted from สตรีไทย (2544); ธนวัฒน์ (2557); โครงการแหลมผักเบี้ยฯ (2566)

*การกำหนดจุดเก็บและการเก็บตัวอย่างน้ำ*

กำหนดจุดเก็บน้ำที่บริเวณทางน้ำเข้า-ออก ของบ่อบำบัดน้ำเสีย (WW1-WW6) ได้แก่ น้ำเข้าระบบบ่อตกตะกอน (WW1) น้ำออกจากบ่อตกตะกอน (WW2) น้ำออกจากบ่อผึ่งที่ 1 (WW3) น้ำออกจากบ่อผึ่งที่ 2 (WW4) น้ำออกจากบ่อผึ่งที่ 3 (WW5) และน้ำออกจากบ่อปรับสภาพ (WW6) ดังแสดงใน Fig.1 โดยเก็บตัวอย่างน้ำที่ระดับน้ำ 30 เซนติเมตรจากผิวน้ำ ในช่วงเวลา 10.00–14.00 น. ด้วยวิธีการจ้วง (Grab-Sampling) ใส่ขวดโพลีเอทีลีน (Poly ethylene; PE) ขนาด 1 ลิตร จำนวน 3 ขวด ทำการตรวจวัดคุณภาพน้ำภาคสนาม คือ ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ(Dissolved Oxygen; DO) และเก็บรักษาตัวอย่างห่อด้วยอลูมิเนียมฟอยล์และนำไปวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการตามวิธีมาตรฐานของ APHA, AWWA and WEF(2017) โดยวิเคราะห์พารามิเตอร์ ดังนี้ ของแข็งแขวนลอย (Suspended Solids; SS) ความสกปรกในรูปบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand; BOD) ความเป็นกรด-ด่าง (pH) น้ำมันและไขมัน (Fat, Oil and Grease; FOG) ไนโตรเจนทั้งหมด (Total Nitrogen; TN) และฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total Phosphorus; TP)

*การวิเคราะห์ข้อมูล*

วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติค่าเฉลี่ย (average) ความแปรปรวนหรือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation; SD) และ เปรียบเทียบความแตกต่าง (Paired t-test) คุณภาพน้ำก่อน-หลังขุดลอกตะกอนด้วยโปรแกรม Microsoft Excel

**ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง**

*ลักษณะของตะกอนในระบบบ่อบำบัดน้ำเสีย*

จากการศึกษาข้อมูลทุติยภูมิจากงานวิจัยของเสกสรรค์ (2543) ซึ่งวิเคราะห์ตัวอย่างตะกอนจากบ่อบำบัดน้ำเสียของโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ พบว่าตะกอนในระบบบ่อบำบัดน้ำเสียมีการผันแปรไม่แน่นอน เนื่องจากมีหลายปัจจัยมาเกี่ยวข้อง ได้แก่ ปริมาณน้ำเสียที่เข้าระบบ ความเร็วในการไหล คุณภาพน้ำ ระยะเวลาในการกักพักน้ำเสีย ปริมาณแพลงก์ตอน ตลอดจนความผันแปรของสภาพภูมิอากาศ โดยในระบบบ่อบำบัดน้ำเสีย พบว่า คุณภาพของเนื้อตะกอนจัดเป็นเนื้อดินประเภทร่วนปนทราย (อนุภาคทราย 70% ทรายแป้ง 18% และดินเหนียว 12%) มีปริมาณอินทรียวัตถุและธาตุอาหารพืชเป็นจำนวนมาก (อินทรียวัตถุ 12.77% ฟอสฟอรัส 175 mg/kg โพแทสเซียม 370 mg/kg และแมกนีเซียม 777 mg/kg) โดยตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบบำบัดน้ำเสียส่วนใหญ่เกิดจากตะกอนที่ถูกพัดพามากับน้ำเสียและกระบวนการธรรมชาติที่อาศัยการสังเคราะห์แสงของแพลงก์ตอนพืชและสาหร่าย ซึ่งเป็นกระบวนการหนึ่งที่ช่วยเติมออกซิเจนให้กับน้ำเสียเพื่อให้แบคทีเรียนำไปใช้เป็นตัวรับอิเล็กตรอนในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยแพลงก์ตอนมีการเจริญเติบโตมากในช่วงผ่านบ่อตกตะกอน และตายลงในบ่อผึ่งที่ 1 และ 2 จากนั้นเมื่อผ่านเข้าบ่อผึ่งที่ 3 จึงมีปริมาณลดลง เนื่องจากแพลงก์ตอนพืชจะมีอายุขัยเฉลี่ยประมาณ 7–10 วัน เมื่อสิ้นสุดวงชีวิตแพลงก์ตอนก็จะตายลงและเกิดเป็นตะกอนรวมทั้งเซลล์ของแบคทีเรีย ซึ่งมีความสัมพันธ์ต่อคุณภาพน้ำในรูปของสารอินทรีย์ และปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียที่เพิ่มมากขึ้น ลักษณะของตะกอนในบ่อบำบัดน้ำเสียมีลักษณะแตกต่างจากตะกอนน้ำกร่อยบริเวณปากแม่น้ำ ซึ่งตะกอนนั้นเกิดมาจากการทับถมของตะกอนที่ถูกพัดพามาจากแม่น้ำ โดยมากจะพบปริมาณเหล็ก กำมะถัน ฟอสฟอรัสและไนโตรเจนสูง (Riel et al., 2022) ทั้งนี้ตะกอนในบ่อน้ำธรรมชาติจะมีปริมาณอนุภาคดินเหนียว (clay) และอินทรียวัตถุ (organic matter) ที่เกิดจากของเสียในสภาวะสภาวะ eutrophic (Peris-Mora et al., 1994)

*คุณภาพน้ำในระบบบ่อบำบัดน้ำเสียก่อนและหลังการขุดลอกตะกอน*

คุณภาพน้ำก่อนขุดลอกตะกอนครั้งที่ 1 (พ.ศ. 2552–2554) และหลังขุดลอกตะกอนครั้งที่ 1 (พ.ศ. 2556–2559) ของน้ำเข้าบ่อตกตะกอน (WW1) น้ำออกจากบ่อตกตะกอน (WW2) น้ำออกจากบ่อผึ่งที่ 1 (WW3) บ่อผึ่งที่ 2 (WW4) บ่อผึ่งที่ 3 (WW5) และบ่อปรับสภาพ (WW6) พบว่า ของแข็งแขวนลอยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะทาง เนื่องจากในระหว่างที่น้ำเดินทางมาในเส้นท่อจากสถานีรวบรวมน้ำเสียบ้านคลองยางระยะทางประมาณ 18.5 กิโลเมตร เกิดกระบวนการย่อยสลายของ anaerobic bacteria ในช่วงต้น แล้วเกิดกระบวนการ nitrification ในช่วงใกล้เดินทางถึงบ่อตกตะกอนในพื้นที่โครงการฯ เนื่องจากมีช่องว่างในเส้นท่อส่งน้ำเสีย รวมทั้งเกิดกระบวนการ biological phosphorus release (สถาปัตย์, 2566) ส่งผลให้สารอินทรีย์เปลี่ยนเป็นสารอนินทรีย์ธาตุอาหารพืชพร้อมใช้ในปริมาณสูง และเมื่อตะกอนหนักตกตะกอนที่ปนเปื้อนกับน้ำมาตกตะกอน ทำให้น้ำใสขึ้น แสงอาทิตย์จึงส่องลงมาในระบบได้มากขึ้น ทั้งสองปัจจัยดังกล่าวจึงเป็นสาเหตุกระตุ้นการเจริญเติบโตของแพลงก์ตอนพืชในระบบบ่อผึ่ง (มัลลิกา, 2558) เป็นผลให้ของแข็งแขวนลอยเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเจริญเติบโตแพลงก์ตอนพืช ส่วนการขุดลอกครั้งที่ 2 คุณภาพน้ำก่อนขุด (พ.ศ. 2560–2564) และหลังขุด (พ.ศ. 2566) พบว่า มีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับการขุดลอกตะกอนในครั้งที่ 1 ในช่วงบ่อตกตะกอนจนถึงบ่อผึ่งที่ 2 แต่กลับมีแนวโน้มลดลงในบ่อผึ่งที่ 3 และบ่อปรับสภาพ เนื่องจากปริมาณธาตุอาหารพืชจำพวกไนโตรเจนมีค่าลดลงและมีค่าน้อยกว่าในช่วงการขุดลอกตะกอนครั้งที่ 1 เนื่องจากระยะเวลาการกักพักของน้ำในบ่อลดลงส่งผลให้กระบวนการเปลี่ยนรูปของอินทรีย์ไนโตรเจนเป็นนอนินทรีย์ในรูปที่สาหร่ายกับเชื้อนำไปใช้ได้ซึ่งถ้าระยะเวลาการกักพักนานเกินไปสาหร่ายและเชื้อที่ตายจะปลดปล่อยไนโตรเจนจากเซลล์ออกมาอีกครั้งส่งผลต่อคุณภาพน้ำ (Fig. 2) ทั้งนี้ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำทิ้งที่บำบัดแล้วมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งชุมชนซึ่งกำหนดค่าไม่เกิน 50 mg/L (กรมควบคุมมลพิษ, 2560) ส่วนค่าไขมันและน้ำมัน (FOG) ในน้ำในช่วงก่อนและหลังการขุดลอกตะกอนครั้งที่ 1 และระยะก่อน-หลังการขุดลอกครั้งที่ 2 มีแนวโน้มลดลงตามระยะทางเช่นเดียวกัน เนื่องจากกระบวนการย่อยสลายของ aerobic bacteria และ facultative bacteria ในระบบบ่อผึ่งที่เปลี่ยนสารอินทรีย์เป็นสารอินทรีย์ (สถาปัตย์, 2566) และอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานซึ่งกำหนดค่าไม่เกิน 5 mg/L (กรมควบคุมมลพิษ, 2560) อย่างไรก็ดี จะเห็นได้ว่าภายหลังจากขุดลอกตะกอนทั้ง 2 ครั้งทำให้ปริมาณของแข็งแขวนลอยลดลงเมื่อเทียบกับช่วงก่อนการขุดลอก แต่พบว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$)

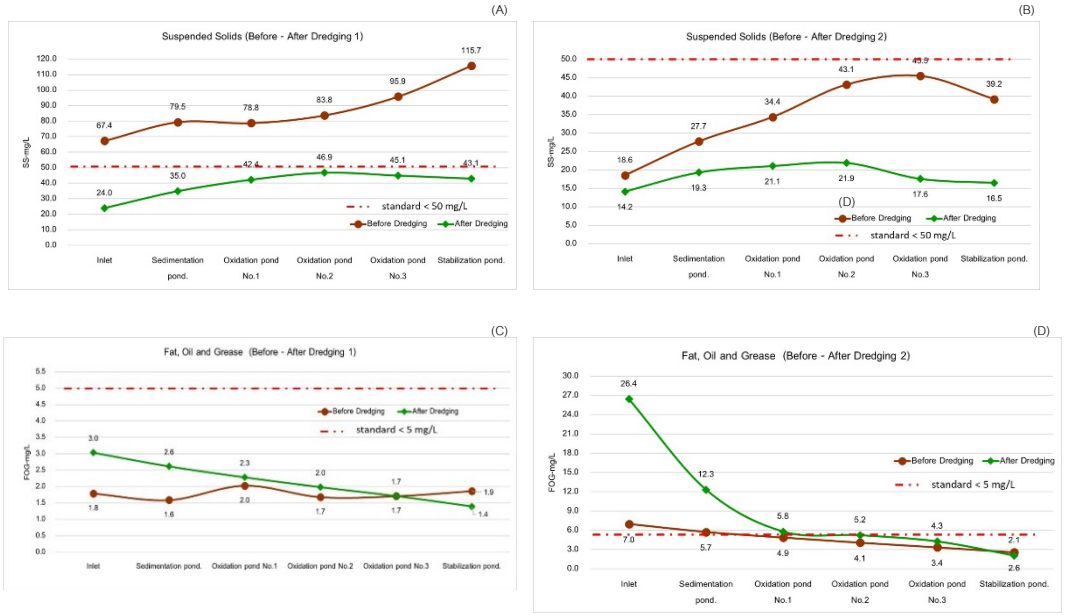



**Fig. 2** The Quantity of Suspended Solids (SS) and Fat, Oil and Grease (FOG) in The Community Wastewater Lagoon Treatment System Before and After Dredging Sediment: SS Before-After Dredging Sediment in B.E. 2552–2559 (A); SS Before-After Dredging Sediment in B.E. 2560–2566 (B); FOG Before-After Dredging Sediment in B.E. 2552–2559 (C); FOG Before-After Dredging Sediment in B.E. 2560–2566 (D)

ความเป็นกรดและด่าง(pH) มีแนวโน้มมีค่าเพิ่มขึ้นจากน้ำเข้าบ่อตกตะกอน (inlet) จนถึงน้ำออกจากบ่อปรับสภาพ (WW6) ซึ่งภายหลังการขุดลอกทั้ง 2 ครั้งมีค่า pH เพิ่มขึ้นเล็กน้อย (Fig. 3) เนื่องจากแพลงก์ตอนพืชที่เจริญเติบโตมาก เมื่อสังเคราะห์แสงมีการดึงคาร์บอนไดออกไซด์จากบรรยากาศลงมาเปลี่ยนเป็นไบคาร์บอเนตรวมกันกับน้ำแตกตัวเป็นกรดคาร์บอนิกและไฮโดรเจนออกไซด์ทำให้น้ำเป็นด่าง pH เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ดีค่า pH ยังมีค่าเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียรวมของชุมชนซึ่งกำหนดค่าระหว่าง 5.5–9.9 (กรมควบคุมมลพิษ, 2560)

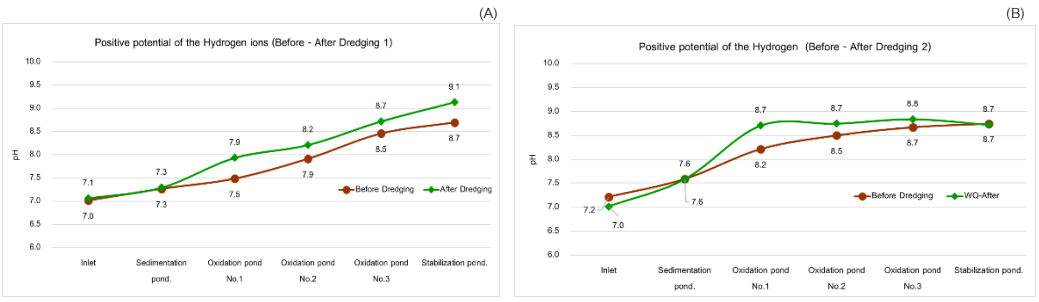



**Fig. 3** The Quantity of pH in The Community Wastewater Lagoon Treatment System Before and After Dredging Sediment: Before-After Dredging Sediment in B.E. 2552-2559 (A); Before-After Dredging Sediment in B.E. 2560-2566 (B)

ค่าออกซิเจนละลายน้ำ (DO) พบว่า มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นจากน้ำเข้าบ่อผึ่ง (WW1) จนถึงน้ำออกบ่อปรับสภาพ (WW6) เนื่องจากกระบวนการสังเคราะห์แสงของแพลงก์ตอนพืช ซึ่งถ้าแพลงก์ตอนพืชมีความหนาแน่นสูงปริมาณออกซิเจนละลายน้ำก็เพิ่มสูงขึ้นด้วย (มัลลิกา, 2558) และอยู่ในเกณฑ์ที่กรมประมงกำหนดต้องมากกว่า 5 mg/L สิ่งมีชีวิตน้ำจืดจึงจะสามารถดำรงอยู่ได้ (กรมประมง, 2566) และส่งผลต่อค่าความสกปรกของน้ำในรูปบีโอดี (BOD) ซึ่งในการขุดลอกตะกอนครั้งที่ 1 และ 2 พบว่า มีแนวโน้มลดลง ซึ่งสอดคล้องกับค่าออกซิเจนละลายที่เพิ่มขึ้นจากบ่อตกตะกอนจนถึงบ่อปรับสภาพ เนื่องจาก aerobic bacteria ในระบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลต่อคุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดมีค่าไม่เกิน 20 mg/L ตั้งแต่บ่อผึ่งที่ 3 (WW5) เป็นต้นไป ซึ่งมีค่าเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียรวมของชุมชน (กรมควบคุมมลพิษ, 2560) เมื่อเปรียบเทียบก่อนและหลังการขุดลอกตะกอนทั้ง 2 ครั้ง พบว่าการขุดลอกตะกอนมีผลทำให้ค่าออกซิเจนละลายน้ำเพิ่มขึ้น และค่าบีโอดีลดลงอย่างเห็นได้ชัด และมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$) การขุดลอกตะกอนจะช่วยทำให้การเกิดมีเทนลดลงจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในตะกอน ทำให้เกิดก๊าซเรือนกระจก เมื่อขุดลอกตะกอนออกจะทำให้ methanogen ลดลงตลอดจนปริมาณแอมโมเนียมและออกซิเจนที่ผิวน้ำเพิ่มขึ้นได้ (Tu et al., 2021; Nijman et al., 2022)

ค่าปริมาณธาตุอาหารในรูปของไนโตรเจนทั้งหมด (TN) พบว่าการขุดลอกตะกอนครั้งที่ 1 และ 2 พบว่ามีแนวโน้มลดลงตามระยะทาง เนื่องจากกระบวนการย่อยสลายของ aerobic bacteria ร่วมกับการเปลี่ยนรูปของสารอนินทรีย์ และการดูดดึงไปใช้ของแพลงก์ตอนพืช เช่นเดียวกันกับฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) โดยมีค่าไนโตรเจนทั้งหมดไม่เกิน 20 และฟอสฟอรัสทั้งหมดไม่เกิน 2 mg/L ซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งของระบบบำบัดน้ำเสียรวมของชุมชน (กรมควบคุมมลพิษ, 2560) เมื่อเปรียบเทียบก่อนและหลังขุดลอกตะกอนพบว่า ภายหลังการขุดลอกตะกอนทำให้ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดลดลงในการขุดลอกทั้ง 2 ครั้ง แต่ค่าฟอสฟอรัสทั้งหมดลดลงภายหลังการขุดลอกครั้งที่ 1 แต่กลับมีค่าสูงกว่าก่อนการขุดลอกในครั้งที่ 2 อาจเกิดอัตราการใช้ฟอสฟอรัสของแพลงก์ตอนพืชในบ่อผึ่งที่ 2 ถึงบ่อปรับสภาพในช่วงหลังขุดลอกตะกอนมีน้อยกว่าก่อนขุดลอก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงก่อนขุดลอกจะเกิดแพลงก์ตอนบลูมจาก cyanobacteria จึงทำให้การลดลงของฟอสฟอรัสจึงมากกว่าช่วงหลังขุดลอกในครั้งที่ 2 อย่างไรก็ดี งานวิจัยอื่นระบุว่าการขุดลอกตะกอนทำให้ปริมาณอินทรียวัตถุ (OM) ไนโตรเจนทั้งหมด (TN) ไนโตรเจนอนินทรีย์ละลายน้ำ (dissolved inorganic nitrogen) โดยทำให้เกิดสภาพรีดอกซ์ระหว่างชั้นตะกอนกับน้ำ ลดการเกิด nitrogen mineralization, nitrogen fixation, denitrification, anaerobic ammonia oxidation (anammox) และฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) ลดลง (Zhong et al., 2021; Kang et al., 2023; Zhang et al., 2023) การขุดลอกตะกอนยังช่วยลดการบลูมของ cyanobacteria และทำให้คุณภาพดีขึ้นได้ (Pokorny and Hauser; 2002)

*ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียก่อนและหลังการขุดลอกตะกอน*

ประสิทธิภาพในการบำบัดค่าความสกปรกในรูปของบีโอดีของระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อผึ่ง พบว่า การขุดลอกตะกอนสามารถบำบัดค่าความสกปรก (BOD) ได้ดีกว่าก่อนขุดลอกตะกอน ทั้ง 2 ครั้ง ประสิทธิภาพการบำบัดทั้งระบบก่อนขุดและหลังขุดครั้งที่ 1 คิดเป็นร้อยละ 57.3 และ 69.3 ครั้งที่ 2 คิดเป็นร้อยละ 75.0 และ 80.7 ตามลำดับ แต่ละครั้งของการขุดลอกพบว่าประสิทธิภาพมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05 เนื่องจากบ่อตกตะกอนสามารทำหน้าที่ตกตะกอนหนักได้มากขึ้น ส่งผลดีต่อบ่อถัดมาในการบำบัดทำให้น้ำใสขึ้นแสงส่องลงในน้ำได้มากขึ้นเกิดกระบวนการทำงานของแพลงก์ตอนพืชร่วมกับแบคทีเรียในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบใช้ออกซิเจน ส่งผลให้ค่าความสกปรกในรูปของบีโอดีมีแนวโน้มที่ลดลงตามระยะทาง การขุดลอกครั้งที่ 1 พบว่าช่วงก่อนขุด

ลอกตะกอนบริเวณจุดเก็บตัวอย่าง 6 จุด มี % removal ของ BOD 36.8, 31.4, 25.6, 7.4, 7.9 และ 1.3 ตามลำดับ และหลังการขุดลอกตะกอนเท่ากับ 41.9, 26.3, 24.9, 21.0, 16.3 และ 16.3 ตามลำดับ พบว่าภายหลังการขุดลอกตะกอนค่า BOD ลดลงอย่างต่อเนื่องโดยเฉพาะบริเวณบ่อตกตะกอนและช่วงผ่านไปยังบ่อผึ่งที่ 1 โดยหลังการขุดลอกตะกอนมีค่าลดลงถึงร้อยละ 5.5 และ 0.7 ตามลำดับ ส่วนข้อมูลการขุดลอกตะกอนครั้งที่ 2 พบว่า % removal ของ BOD มีค่า 43.6, 41.2, 20.9, 28.1, 16.3 และ 10.7 ตามลำดับ และภายหลังการขุดลอกตะกอนมีค่าอยู่ที่ 26.1, 66.4, 6.1, 8.4, 7.1 และ 27.9 ตามลำดับ กล่าวได้ว่าหลังการขุดลอกตะกอนบ่อตกตะกอนมีประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียที่ดีขึ้น เนื่องจากบ่อตกตะกอนที่พบว่ามีค่าความสกปรกสูงที่สุดแต่เมื่อน้ำเสียได้ผ่านการบำบัดของบ่อตกตะกอนแล้วค่า BOD ได้ถูกกำจัดไปลดลงถึงร้อยละ 60.3 และเมื่อเทียบข้อมูลก่อนและหลังการขุดลอกตะกอนครั้งที่ 2 ภายในบ่อเดียวกันของบ่อผึ่งที่ 1 บ่อผึ่งที่ 2 และบ่อผึ่งที่ 3 พบว่าหลังการขุดลอกBODลดลงมากกว่าร้อยละ 14.8, 19.7 และ 9.2 ตามลำดับ (Fig. 4)

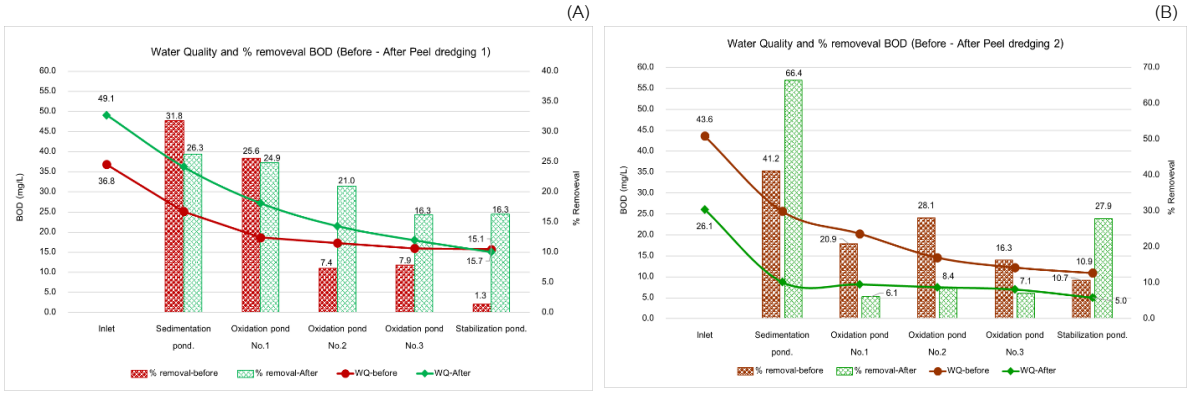



**Fig. 4** Water quality and BOD removal efficiency in oxidation ponds: before and after dredging 1 (A); before and after dredging 2 (B)

## สรุป

จากการศึกษาคุณภาพน้ำภายหลังการขุดลอกตะกอนของระบบบ่อบำบัดน้ำเสียแบบบ่อผึ่งของโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ ตำบลบ้านแหลม อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี ผลการศึกษาพบว่าการขุดลอกตะกอนมีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของระบบบ่อผึ่ง การขุดลอกตะกอนสามารถลดค่าความสกปรก (BOD) ได้มากขึ้นทั้งระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อผึ่ง โดย BOD ที่ลดลงมีความสัมพันธ์กับกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย และภายหลังการขุดลอกตะกอนบ่อตกตะกอนมีประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียที่ดีขึ้น ทำให้น้ำในบ่อตกตะกอนใสขึ้นและการขุดลอกตะกอนครั้งที่ 2 ค่า BOD ลดลงถึงร้อยละ 60.3 และยังมีผลทำให้ค่า BOD ลดลงในบ่อผึ่งที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงประโยชน์ของการขุดลอกตะกอนในการปรับปรุงประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของระบบบ่อผึ่งและบ่อตกตะกอนได้อย่างชัดเจน ดังนั้นเพื่อรักษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียควรมีการขุดลอกตะกอนภายในระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อผึ่งต่อไป

## กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ มูลนิธิชัยพัฒนาสำหรับทุนสนับสนุนการศึกษาวิจัย อนุเคราะห์เจ้าหน้าที่และสถานที่ในการเก็บข้อมูลวิจัยและวิเคราะห์

ตัวอย่าง และขอขอบคุณกลุ่มวิจัยวิทยาศาสตร์ชุมชนเชิงนิเวศ (Eco-Science Community Group) ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับการสนับสนุนสถานที่วิเคราะห์ข้อมูลการวิจัย

**เอกสารอ้างอิง**

กรมควบคุมมลพิษ. 2560. คู่มือระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพฯ.

กรมควบคุมมลพิษ. 2566. ข้อมูลระบบบำบัดน้ำ. DSPOT Database System for Publicly Owned Treatment works.

กรมประมง. 2566. น้ำ....คุณสมบัติของน้ำกับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ. สำนักงานประมงจังหวัดสระบุรี. สระบุรี.

โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ. 2566. ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อ ใน: รายงานประจำปีงบประมาณ2566โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ. โครงการแหลมผักเบี้ยฯ. กรุงเทพฯ, หน้า 23-30.

ธนวัฒน์ จินจารักษ์. 2557. สมดุลน้ำในระบบบ่อผึ่งบำบัดน้ำเสียของโครงการพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ จังหวัดเพชรบุรี ประเทศไทย. วิทยานิพนธ์. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

นฤชิต ดำปิน. 2554. แบบจำลองอัตราความหนาแน่นการปล่อยปลานิล (*Oreochromis niloticus*) ในบ่อบำบัดน้ำเสียแบบบ่อผึ่ง โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ย อันเนื่องมาจากพระราชดำริ ตำบลแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี. วิทยานิพนธ์ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

มัลลิกา ศรีชมภู. 2558. อิทธิพลของรังสีแสงอาทิตย์ในฤดูหนาวต่อการเจริญเติบโตของไซยาโนแบคทีเรียในระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนแบบบ่อผึ่งโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ จังหวัดเพชรบุรี ประเทศไทย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สตรีไทย สถิติ. 2544. ระยะเวลาและจำนวนบ่อผึ่ง ที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจากเทศบาลเมืองเพชรบุรี ตำบลแหลมผักเบี้ย อำเภอบ้านแหลม จังหวัด เพชรบุรี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยนเรศวร.

สถาปัตย์ เสน่หา. 2566. การเปลี่ยนแปลงกลุ่มแบคทีเรียของน้ำเสียชุมชน จากแหล่งกำเนิดท่อ HDPE และบ่อผึ่ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาเอก, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

เสกสรรค์ เทพพิทักษ์. 2543. การสะสมตะกอนในระบบรวบรวมน้ำเสีย และระบบบ่อบำบัดน้ำเสีย จังหวัดเพชรบุรี. วิทยานิพนธ์. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ

APHA, AWWA, WFE. 2017. Standard Method for the Examination of Water and Wastewater, 23rd ed. American Public Health Association. Washington DC, USA.

Kang, L., Haasler, S., Mucci, M., Korving, L., Dugulan, A., Prot, T., Waajen, G., Lürling, M. 2023. Comparison of dredging, lanthanum-modified bentonite, aluminium-modified zeolite, and FeCl2 in controlling internal nutrient loading. Water Res. 244: 120391.

Nijman, T.P.A., Lemmens, M., Lurling, M., Kosten, S., Welte, C., Veraart, A.J. 2022. Phosphorus control and dredging decrease methane emissions from shallow lakes. Sci. Total Environ. 847: 157584.

Peris-Mora, E., Monzó, J., Payá, J., Mesa, J.M. 1994. The assessment of pollutant charge of dredged sediments as a tool to minimize adverse environmental effects. In: Goumans, J.J.J.M., van der Sloot, H.A., Aalbers, G. (Eds). Environmental Aspects of Construction with Waste Materials. Elsevier. Amsterdam, the Netherlands, pp. 929–938.

Pokorný, J., Hauser, V. 2002. The restoration of fish ponds in agricultural landscapes. Ecol. Eng. 18: 555–574.

Riel, M.C., Vonk, J.A., Verdonschot, R.C.M., Ferrús Muñoz, J.F., Verdonschot, P.F.M. 2022. Using dredged sediments to support wetland plant development in a constructed delta lake. Ecol. Eng. 178: 106568.

Tu, Q., Lu, Y., Zhao, Y., Duan, C., Huang, J., Fang, Y., Li, B., Zhao, H. 2021. Long-term effect of sediment on the performance of a pilot-scale duckweed-based waste stabilization pond. Sci. Total Environ. 770: 145216.

Zhang, Q., Huang, J., Ji, Y., Zhang, J., Zhang, S., Gao, J. 2023. How sediment dredging alters phosphorus dynamics in a lowland rural river. J. Environ. Sci. 147: 189–199.

Zhong, J., Wen, S., Zhang, L., Wang, J., Liu, C., Yu, J., Zhang, L., Fan, C. 2021. Nitrogen budget at sediment–water interface altered by sediment dredging and settling particles: Benefits and drawbacks in managing eutrophication. J. Hazard. Mat. 406: 124691.

# การประเมินการเปลี่ยนแปลงบริการระบบนิเวศ: กรณีศึกษา โครงการเหมืองแร่หินอุตสาหกรรมชนิดหินปูน ตำบลหนองโอ่ง อำเภออู่ทอง จังหวัดสุพรรณบุรี

# Assessment of ecosystem service changes: A case study of The Industrial Limestone Mining Project in Nong Ong Sub-district, U Thong district, Suphan Buri province

**จินตนา แถวนาชุม*, นพพล อรุณรัตน์, สุกัญญา เสรีนนท์ชัย, อุทัย เจริญวงศ์**

Jintana Thaewnachum*, Noppol Arunrat, Sukanya Sereenonchai, Uthai Chareonwong

คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล นครปฐม 73170

Faculty of Environment and Resource Studies, Mahidol University, Nakhon Pathom 73170, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: jintana55576@gmail.com

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการประเมินการเปลี่ยนแปลงบริการระบบนิเวศ: กรณีศึกษา โครงการเหมืองแร่หินอุตสาหกรรมชนิดหินปูน ตำบลหนองโอ่ง อำเภออู่ทอง จังหวัดสุพรรณบุรี โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินของโครงการเหมืองแร่ต่อสภาพพื้นที่เกษตรกรรม และประเมินมูลค่าบริการระบบนิเวศ โดยวิธีการนำข้อมูลการใช้ที่ดิน (Land Use) ในระหว่างปี พ.ศ. 2549–2564 และทำการประเมินบริการระบบนิเวศ ทั้ง 4 ด้าน ได้แก่ การควบคุมกลไกของระบบ การสนับสนุน การเป็นแหล่งผลิต และวัฒนธรรม พบว่า ในระหว่างปี พ.ศ. 2549–2564 มีแนวโน้มการลดลงของพื้นที่พืชไร่ ไม้ยืนต้น ไม้ผล พื้นที่นา สถานที่เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ และพื้นที่ป่าสมบูรณ์ แนวโน้มการเพิ่มขึ้นพบว่าพื้นที่เบ็ดเตล็ดเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย และพบว่ามีการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้างอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งโครงการเหมืองแร่ส่งผลต่อมูลค่าบริการระบบนิเวศอย่างมีนัยสำคัญ มีพื้นที่ป่าไม้ลดลง การทำเหมืองแร่ทำให้สภาพภูมิประเทศเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ส่งผลต่อมูลค่าบริการระบบนิเวศลดลง

**คำสำคัญ**: การบริการระบบนิเวศ, พื้นที่เกษตรกรรม, เหมืองแร่หินปูน

**Abstract**

This research focuses on the assessment of ecosystem service changes: a case study of the industrial limestone mining project in Nong Ong Subdistrict, U Thong District, Suphan Buri province. The objectives include examining land use changes caused by the mining project and their impact on surrounding agricultural areas, as well as assessing the value of ecosystem services. The assessment, based on land use data from 2006 to 2021, covers all four dimensions of ecosystem services: regulating, supporting, provision, and cultural. Over the period from 2006 to 2021, there was a noticeable decline in the areas of field crop, perennial, orchard, paddy field, and aquaculture land. Conversely, there was a slight increase in miscellaneous land, and a significant rise was observed in urban and built-up areas. The mining project has had a substantial and statistically significant impact on the value of environmental system services. The reduction in dense forest due to mining activities has led to changes in the landscape and a decrease in the overall value of environmental system services.

**Keywords**: Agricultural land, Ecosystem service, Limestone mining

**คำนำ**

แร่เป็นทรัพยากรที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศไทยอย่างมาก จากลักษณะทางภูมิศาสตร์ของประเทศไทยมีทรัพยากรที่หลากหลาย เช่น ตะกั่ว สังกะสี ลิกไนต์ หินปูน และยิปซัม เป็นต้น (กรมทรัพยากรธรณี, 2547) การจะนำแร่ขึ้นมาใช้ประโยชน์ต้องมีการทำเหมืองแร่ด้วยวิธีการอย่างใดอย่างหนึ่งตามหลักวิชาการ ในปัจจุบันประเทศไทยมีการทำเหมืองหลัก ๆ 2 วิธี ได้แก่ การทำเหมืองเปิด (Surface Mining) และการทำเหมืองใต้ดิน (Underground Mining) การทำเหมืองแร่ภายใต้พระราชบัญญัติแร่ พ.ศ. 2560 ต้องมีมาตรการในการป้องกัน ฟื้นฟู และควบคุมการดำเนินการขั้นตอนต่าง ๆ ตั้งแต่การสำรวจ การแต่งแร่ และขั้นตอนอื่น ๆ ไม่ให้ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งในระบบนิเวศจะมีนิเวศบริการเกิดขึ้นเป็นต้นทุนทางธรรมชาติที่มีคุณค่ามหาศาล ให้ประโยชน์ทั้งทางตรงและทางอ้อม มีความสำคัญในการเสริมสร้างทุนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม การทำเหมืองแร่ในหลายพื้นที่ส่งผลต่อการบริการระบบนิเวศในประเทศไทย โครงสร้างและองค์ประกอบของระบบนิเวศเสื่อมโทรม ทำให้ไม่สามารถทำหน้าที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ การประเมินการเปลี่ยนแปลงบริการระบบนิเวศของโครงการเหมืองแร่จึงมีความสำคัญอย่างมาก เนื่องจากบริการระบบนิเวศมีความสามารถในการควบคุมกลไกทางธรรมชาติและภัยพิบัติ สนับสนุนผลประโยชน์ของมนุษย์ทั้งทางตรงและทางอ้อมที่ควรจะได้รับจากระบบนิเวศ การประเมินบริการระบบนิเวศด้านต่าง ๆ และประเมินมูลค่าตามหลักการทางเศรษฐศาสตร์ สามารถแสดงผลข้อมูลในรูปแบบที่สามารถเข้าใจได้ง่าย ทำให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงบริการระบบนิเวศทั้งก่อนและหลังจากมีโครงการเหมืองแร่ รวมทั้งนำข้อมูลการประเมินบริการระบบนิเวศไปวางแผนการใช้ที่ดินได้ในอนาคต ซึ่งในตำบลหนองโอ่ง อำเภอู่ทอง จังหวัดสุพรรณบุรี เป็นอีกหนึ่งพื้นที่ที่มีการทำเหมืองแร่หินปูน มีลักษณะของการทำเหมืองเป็นกลุ่มเหมืองขนาดใหญ่ แม้ว่าจะมีมาตรการป้องกันและแก้ไขผลกระทบสิ่งแวดล้อมและมาตรการติดตามตรวจสอบผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่จะต้องปฏิบัติตามรายงานการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่กำหนด และมาตรการเพิ่มเติมอื่น ๆ แต่ก็อาจจะได้รับผลกระทบจากการทำเหมือง และอาจจะเกิดการสะสมของมลพิษเข้าสู่ร่างกายในระยะยาวได้ รวมถึงอาจจะส่งผลต่อพื้นที่เกษตรกรรมของชุมชน ทำให้ผลผลิตทางการเกษตรไม่มีคุณภาพและบริเวณพื้นที่เกษตรกรรมมีสภาพพื้นที่ที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ถ้าไม่มีการปฏิบัติตามมาตรการป้องกันและแก้ไขผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่ดี

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการประเมินการเปลี่ยนแปลงบริการระบบนิเวศ กรณีศึกษาโครงการเหมืองแร่หินอุตสาหกรรมชนิดหินปูน ตำบลหนองโอ่ง อำเภอู่ทอง จังหวัดสุพรรณบุรี หลังจากที่โครงการเหมืองแร่เกิดขึ้น สภาพพื้นที่เกษตรกรรมมีการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินในทิศทางใด ในการคัดเลือกพื้นที่ศึกษานี้ เนื่องจากบริเวณตำบลหนองโอ่งอยู่ระหว่างตรงกลางของกลุ่มเหมืองหลายโครงการที่ยังคงเปิดดำเนินกิจการอยู่ และเป็นโครงการที่ต้องมีการติดตามและเฝ้าระวังคุณภาพสิ่งแวดล้อมอย่างต่อเนื่อง โดยรอบพื้นที่โครงการติดกับพื้นที่ป่าสงวนแห่งชาติป่าเขาตะโกปิดทองและป่าเขาเพชรน้อย พื้นที่โดยรอบโครงการส่วนใหญ่เป็นพื้นที่ป่าไม้ พื้นที่ชุมชน และพื้นที่เกษตรกรรมประเภทอ้อย ข้าวโพด มันสำปะหลัง และทำนาข้าว เป็นต้น นอกจากนี้ ยังมีพื้นที่ประกอบการเหมืองแร่ และพื้นที่โรงโม่ บด หรือย่อยหิน บริเวณใกล้เคียงพื้นที่อีกหลายแห่ง ซึ่งในอำเภอู่ทองส่วนใหญ่พบว่าเป็นพื้นที่เกษตรกรรม ถ้าการดำเนินการของโครงการเหมืองแร่ส่งผลต่อสภาพพื้นที่เกษตรกรรมในระยะยาวก็อาจจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินและผลผลิตทางการเกษตร จากการศึกษาของ ศุภกานต์ และคณะ (2563) ได้มีการศึกษาการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินในพื้นที่ลุ่มน้ำแม่ตาวที่มีการทำเหมืองแร่สังกะสี อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก โดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการรับรู้จากระยะไกล พบว่า พื้นที่ลุ่มน้ำแม่ตาวตอนบนฝั่งขวาก่อนเริ่มทำเหมืองมีการใช้ที่ดินเป็นพื้นที่ป่าธรรมชาติและการเกษตรแบบยังชีพ และในระยะการทำเหมืองและภายหลังจากการปิดเหมือง พบว่าเป็นพื้นที่เหมืองแร่และพื้นที่ป่าปลูก การทำเกษตรกรรมมีการเปลี่ยนแปลงไปเพื่อการค้า และพื้นที่ป่าธรรมชาติลดลงอย่างต่อเนื่อง แต่มีการปลูกป่าฟื้นฟูพื้นที่เหมืองแร่ทดแทนในพื้นที่ใกล้เคียง จึงทำให้พื้นที่ป่าไม้เพิ่มขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นที่จะต้องมีการประเมินการเปลี่ยนแปลงบริการระบบนิเวศ และประเมิน

มูลค่าการบริการระบบนิเวศต่อสภาพพื้นที่เกษตรกรรมหลังจากการดำเนินโครงการเหมืองแร่ และเป็นแนวทางที่ถูกต้องตามหลักวิชาการที่ผู้ประกอบการสามารถนำไปปฏิบัติในการบริหารจัดการสถานประกอบการเหมืองแร่ และเป็นการแสดงความรับผิดชอบต่อชุมชนบริเวณใกล้เคียง และชุมชนยังสามารถนำไปวางแผนการใช้ที่ดิน เพื่อเสริมสร้างขีดความสามารถในการแข่งขันและเพิ่มมูลค่าผลผลิตทางการเกษตรในอนาคตได้อีกด้วย

**อุปกรณ์และวิธีการ**

*เครื่องมือด้านเทคนิค*

โปรแกรมระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ ได้แก่ ArcGIS เวอร์ชั่น 10.8 โปรแกรมการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ได้แก่ Microsoft Office และ SPSS เวอร์ชั่น 23.0 (Statistical Package for the Social Science) Application LDD on Farm คอมพิวเตอร์ และกล้องดิจิทัล

*ข้อมูลทุติยภูมิ*

ข้อมูลการใช้ที่ดิน (Land Use) ตำบลหนองโอ่ง อำเภออู่ทอง จังหวัดสุพรรณบุรี ระหว่างปี พ.ศ. 2549–2564 ข้อมูลเชิงเลขแผนที่ชุดดินจำแนกใหม่ตามระบบอนุกรมวิธานดิน 2546 มาตราส่วน 1:50,000 แผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดิน มาตราส่วน 1: 4,000 ข้อมูลเศรษฐกิจการเกษตร ข้อมูลการทำเหมืองแร่ของโครงการในตำบลหนองโอ่ง แผนที่ภูมิประเทศของกรมแผนที่ทหาร จังหวัดสุพรรณบุรี ระวาง 4937I มาตราส่วน 1:50,000 พระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อม พ.ศ. 2535 และที่แก้ไขเพิ่มเติม พ.ศ. 2561 (ฉบับที่ 2) พระราชบัญญัติแร่ พ.ศ. 2560 และคู่มือมาตรฐานคุณภาพสิ่งแวดล้อม

*การประเมินการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน*

ดำเนินการนำข้อมูลการใช้ที่ดินตำบลหนองโอ่ง อำเภออู่ทอง จังหวัดสุพรรณบุรี ระหว่างปี พ.ศ. 2549–2564 จากกรมพัฒนาที่ดิน มาวิเคราะห์แนวโน้มข้อมูลการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินและจำแนกประเภทของการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินแบ่งออกเป็น 5 ประเภท ได้แก่ ประเภทที่ 1 พืชไร่ ไม้ยืนต้น ไม้ผล ประเภทที่ 2 พื้นที่เบ็ดเตล็ด ประเภทที่ 3 พื้นที่นา สถานที่เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ประเภทที่ 4 ป่าสมบูรณ์ และประเภทที่ 5 พื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้าง โดยการใช้เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศ (Geographic Information System) ช่วยในการทำงานเกี่ยวกับกระบวนการจัดการข้อมูลในเชิงตำแหน่งที่ประมวลผลออกมาด้วยระบบคอมพิวเตอร์ โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลที่อยู่ในฐานข้อมูล ซึ่งปัจจัยที่จะนำมาช่วยในการวิเคราะห์เพิ่มเติม ได้แก่ ข้อมูลคุณภาพของดิน ลักษณะภูมิประเทศ ลักษณะภูมิอากาศ และประเภทของการทำเกษตรกรรม

*การสำรวจพื้นที่ภาคสนาม*

การสำรวจพื้นที่ภาคสนาม โดยการลงพื้นที่ดำเนินการสำรวจ สังเกต พร้อมทั้งจดบันทึกข้อมูลพิกัดจุดโดยรอบพื้นที่ตำบลหนองโอ่งจำนวน 50 จุด แต่ละจุดจะกระจายในแต่ละหมู่บ้านในตำบลหนองโอ่ง อำเภออู่ทอง จังหวัดสุพรรณบุรี ให้ครอบคลุมทุกประเภทการใช้ที่ดิน ซึ่งจะอ้างอิงข้อมูลการใช้ที่ดินของกรมพัฒนาที่ดินในช่วงปี พ.ศ. 2562–2564 เนื่องจากเป็นฐานข้อมูลในปีปัจจุบัน และนำพิกัดจุดเข้าสู่โปรแกรมระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ ArcGIS เวอร์ชั่น 10.8 เพื่อเป็นการยืนยันข้อมูลการใช้ที่ดินที่เป็นปัจจุบันมากที่สุดและตรวจสอบความสอดคล้องกับข้อมูลของกรมพัฒนาที่ดิน

*การประเมินมูลค่าบริการระบบนิเวศ*

การประเมินบริการระบบนิเวศ ตาม Millenium Ecosystem Assessment (2005) จะแบ่งออกเป็น 4 ด้าน ได้แก่ การเป็นแหล่งผลิต (Provisioning Services) การควบคุมกลไกทางธรรมชาติ (Regulating Services) การบริการด้านวัฒนธรรม (Cultural Services) และบริการด้านการเป็นแหล่งสนับสนุน (Supporting Services) (Table 1) การประมาณมูลค่าบริการระบบนิเวศถูกนำมาใช้สำหรับประเมินมูลค่าแต่ละประเภทการใช้ที่ดินที่มีการประมาณค่าสัมประสิทธ์สำหรับประเภทการใช้ที่ดินที่มีความแตกต่างกันที่เกิดจากการรวบรวมปัจจัยในแต่ละกิจกรรมของมนุษย์ และที่มีการปรับปรุงแก้ไขจาก Mamat และคณะ (2018) โดย สุวิทย์ และคณะ (2562) โดยที่ ESV หมายถึงมูลค่าบริการระบบนิเวศโดยประมาณ, VCij หมายถึงค่าสัมประสิทธิ์ของประเภทการใช้ที่ดิน โดยมูลค่าของบริการระบบนิเวศ i ของการใช้ที่ดินประเภท j, D หมายถึงมูลค่าของบริการระบบนิเวศที่มีมาตรฐาน โดยมีปัจจัยเทียบเท่า D คือ 276.14 USD และ Pj หมายถึงพื้นที่ (เฮกตาร์) ของการใช้ที่ดินประเภท ซึ่งสามารถประเมินมูลค่าบริการระบบนิเวศได้ตามสูตรการคำนวณดังต่อไปนี้ (Equations 1–2)

$$VCij = D \times VCij \quad (1)$$

$$ESV = \sum(VCij \times Pj) \quad (2)$$

Where; ESV = Estimated Ecosystem Service Value

VCij = Per unit value of land use type i for land use type j

D = Standardized value of ecosystem service, with the equivalence factor D as 276.14 USD

Pj = Area (hectares) of land use type j

**Table 1** Coefficient value for different LULC type for ESV estimation

| Ecosystem Services category | Ecosystem Services function | Ecosystem service value of each LULC type (USD/ha/year) | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Urban and built-up area | Paddy field | Field crop | Forest land | Water body | Marsh And swamp | Range land | Unused land |
| Regulating services | *1)* Gas regulation | 0 | 74.7 | 74.7 | 299.4 | 0 | 268.9 | 104 | 4.2 |
| | *2)* Climate regulation | 0 | 133.0 | 133 | 282.1 | 68.7 | 2,554.7 | 108 | 9.0 |
| | *3)* Waste treatment | 0 | 245.0 | 245 | 119.2 | 2,719.0 | 2,716.0 | 91.5 | 18.0 |
| Supporting Services | *1)* Soil formation | 0 | 218.1 | 218.1 | 278.6 | 1.5 | 255.5 | 155 | 11.8 |
| | *2)* Biodiversity protection | 0 | 106.1 | 106.1 | 312.6 | 372 | 373.5 | 130 | 27.7 |
| Provision Services | *1)* Water supply | 0 | 89.6 | 89.6 | 283.5 | 3,047.7 | 2,315.6 | 105 | 4.8 |
| | *2)* Food production | 0 | 149.4 | 149.4 | 22.9 | 14.9 | 44.8 | 29.8 | 1.4 |
| | *3)* Raw materials | 0 | 14.9 | 14.9 | 206.5 | 1.5 | 10.5 | 25 | 2.8 |
| Cultural services | 1) Recreation and culture | 12.7 | 1.5 | 1.5 | 144.2 | 648.4 | 829.2 | 60.3 | 16.6 |
| Total | | 12.7 | 1,032.3 | 1,032.3 | 1,949.0 | 6,873.7 | 9,368.7 | 808.6 | 96.3 |

**Source:** Ongsomwang et al. (2019)

การคำนวณมูลค่าบริการระบบนิเวศ โดยจะทำการแบ่งช่วงของการคำนวณออกเป็น 6 ช่วง ได้แก่ ช่วงที่ 1 ปี พ.ศ. 2549–2550 (แทนรหัส P1) ช่วงที่ 2 ปี พ.ศ. 2551–2552 (แทนรหัส P2) ช่วงที่ 3 ปี พ.ศ. 2553–2556 (แทนรหัส P3) ช่วงที่ 4 ปี พ.ศ. 2558–2559 (แทนรหัส P4) ช่วงที่ 5 ปี พ.ศ. 2560–2561 (แทนรหัส P5) และช่วงที่ 6 ปี พ.ศ. 2562–2564 (แทนรหัส P6) ทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของข้อมูลการใช้ที่ดินทั้งหมด 6 ช่วง เพื่อให้ทราบถึงความแตกต่างของการใช้ที่ดินแต่ละประเภท โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ SPSS และนำเทคนิคการวิเคราะห์ความแปรปรวนมาทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับความแตกต่างของค่าเฉลี่ยกรณีประชากรมากกว่า 2 กลุ่ม กำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05

**ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง**

*การประเมินการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน*

การประเมินการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินจากฐานข้อมูลของกรมพัฒนาที่ดินทั้งหมด 6 ช่วง (แสดงดัง Figs. 1, 2 and 3) จากผลการศึกษา พบว่า ในระหว่างช่วง P1 (พ.ศ. 2549–2550) จนถึง ช่วง P6 (พ.ศ. 2562–2564) ประเภทการใช้ที่ดินที่มีแนวโน้มการลดลงของพื้นที่ ได้แก่ มีพื้นที่พืชไร่ ไม้ยืนต้น ไม้ผล จำนวนลดลง จาก 132,071.74 ไร่ เหลือ 77,463.00 ไร่ พื้นที่นา สถานที่เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ มีจำนวนลดลง จาก 29,228.63 ไร่ เหลือ 26,285.00 ไร่ และป่าสมบูรณ์ มีจำนวนลดลง จาก 15,256.33 ไร่ เหลือ 12,058.00 ไร่ ตามลำดับ และในระหว่างช่วง P1 (พ.ศ. 2549–2550) จนถึง ช่วง P6 (พ.ศ. 2562–2564) ประเภทการใช้ที่ดินที่มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ ได้แก่ พื้นที่เบ็ดเตล็ด จำนวน 5,670.60 ไร่ เป็น 7,978 ไร่ ซึ่งมีการเพิ่มขึ้นของพื้นที่เพียงเล็กน้อย และพบว่าพื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้างมีพื้นที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญจากจำนวน 90,879.73 ไร่ เป็น 248,959 ไร่ ตามลำดับ ซึ่งพื้นที่ของการทำเหมืองแร่ บ่อขุด จะรวมอยู่ในส่วนของพื้นที่เบ็ดเตล็ด รวมถึงทุ่งหญ้าและไม้ละเมาะ แหล่งน้ำธรรมชาติ แหล่งน้ำที่สร้างขึ้น และพื้นที่เบ็ดเตล็ดอื่น (Table 2)

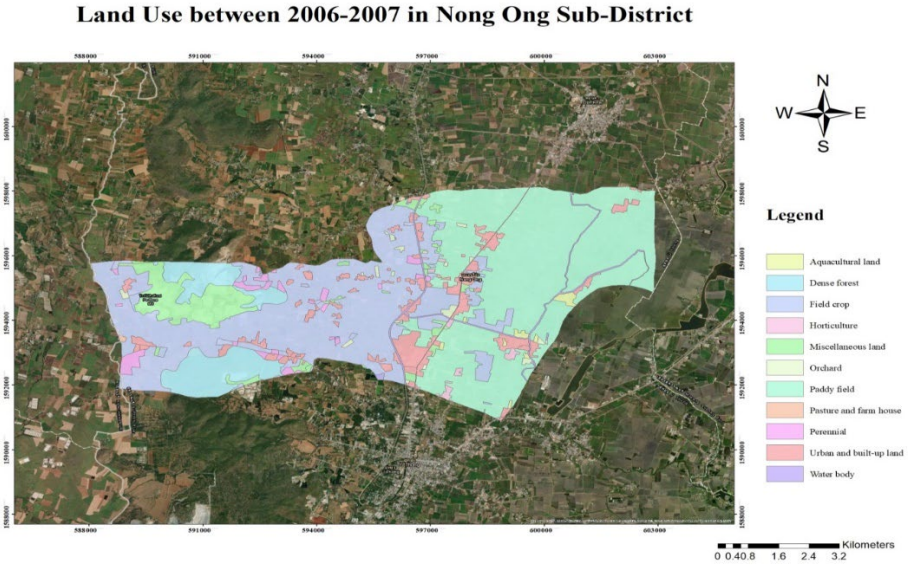



**Fig. 1** Land use between 2006–2007 in Nong Ong sub-district

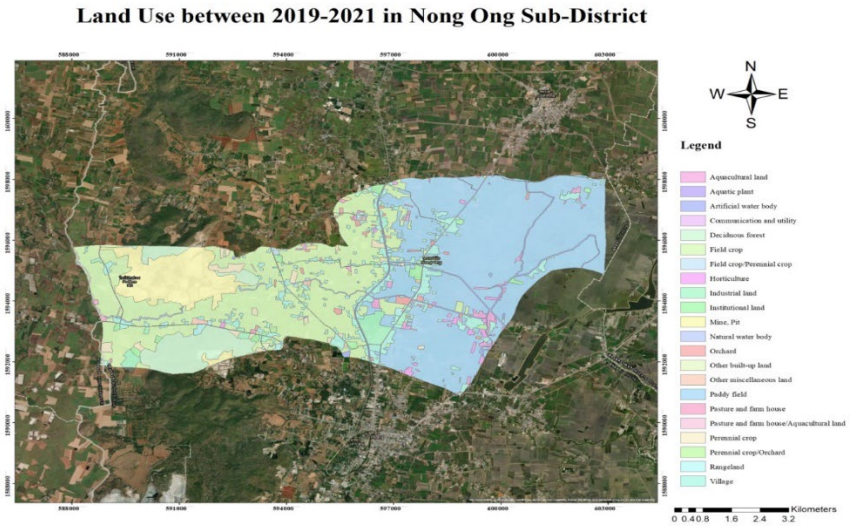



**Fig. 2** Land use between 2019–2021 in Nong Ong sub-district

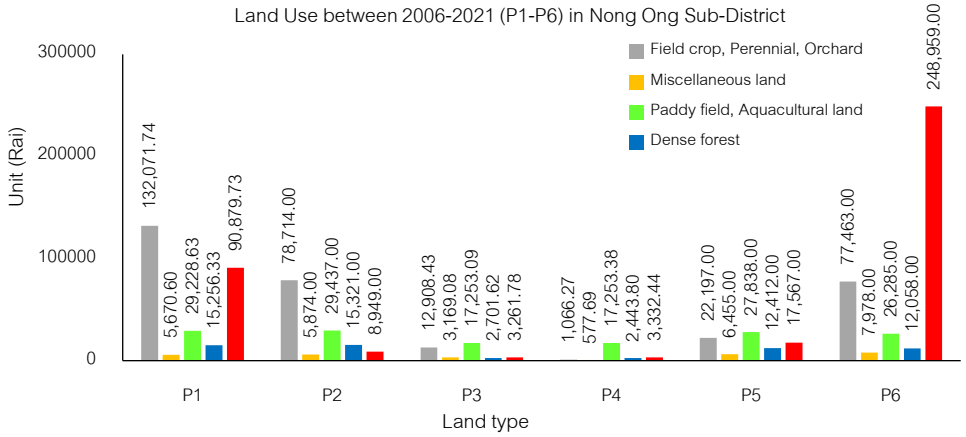



**Fig. 3** Land use between 2006–2021 (P1-P6) in Nong Ong sub-district

**Table 2** Land use and land cover change matrix between P1 to P6

| LULC type | P1 (rai) | P2 (rai) | P3 (rai) | P4 (rai) | P5 (rai) | P6 (rai) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Field crop, Perennial, Orchard | 132,071.74. | 78,714 | 12,908.43 | 1,066.27 | 22,197 | 77,463 |
| Miscellaneous land | 5,670.60 | 5,874 | 3,169.08 | 577.69 | 6,455 | 7,978 |
| Paddy field, Aquacultural land | 29,228.63 | 29,437 | 17,253.09 | 17,253.38 | 27,838 | 26,285 |
| Dense forest | 15,256.33 | 15,321 | 2,701.62 | 2,443.80 | 12,412 | 12,058 |
| Urban and built-up land | 90,879.73 | 8,949 | 3,261.78 | 3,332.44 | 17,567 | 248,959 |

โครงการเหมืองแร่ในพื้นที่ตำบลหนองโอ่งในปัจจุบันที่ยังเปิดดำเนินการมีทั้งหมด 6 โครงการ ซึ่งมีการทำเหมืองมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2545 ต่อเนื่องมาโดยตลอด และยังพบว่าบริเวณพื้นที่ตำบลหนองโอ่งมีคำขอประทานบัตรที่จะดำเนินการทำเหมืองอีกจำนวนมากในอนาคต (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2566) และพบว่าโครงการเหมืองแร่จำนวน 4 แปลง มีพื้นที่ทั้งหมดตั้งอยู่ในเขตพื้นที่ป่าไม้สงวนแห่งชาติ ป่าทุ่งดินดำและป่าเขาตาเก้าเต็มทั้งแปลง พื้นที่โครงการส่วนใหญ่อยู่ในเขตประกาศแหล่งหินอุตสาหกรรม เขาปากช่อง เขาชายธง เขาตาเก้า เขาโกปิดทอง และอยู่ในพื้นที่จำแนกคุณภาพน้ำชั้นที่ 2, 3, 4 และ 5 อีกจำนวน 2 แปลง ตั้งอยู่ในบริเวณเขาโกปิดทอง และอยู่ในพื้นที่เขตป่าสงวนแห่งชาติ ป่าเขาโกปิดทอง และป่าเพชรน้อย ประเภทป่าเศรษฐกิจ (Zone E) ในตำแหน่งที่กำหนดให้เป็นแหล่งหินอุตสาหกรรม เขาปากช่อง เขาชายธง เขาตาเก้า เขาโกปิดทอง ซึ่งต้องปฏิบัติตามเงื่อนไขการอนุญาตภายใต้พระราชบัญญัติป่าสงวนแห่งชาติ พ.ศ. 2507 และที่แก้ไขเพิ่มเติม และจากการประเมินการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน พบว่า ในช่วง P1 ถึง P6 มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของจำนวนพื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้างสูงที่สุด จากจำนวน 90,879.73 ไร่ เป็น 248,959.00 ไร่ (Table 2) ประกอบไปด้วย พื้นที่สถานีคมนาคม คิดเป็นร้อยละ 98.15 ของพื้นที่ทั้งหมดในช่วงปีล่าสุดของ P6 รองลงมา คือ พื้นที่ชุมชน คิดเป็นร้อยละ 1.32 และพื้นที่อุตสาหกรรม คิดเป็นร้อยละ 0.36 ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นในทุกช่วงปี การขยายตัวของโรงงานอุตสาหกรรมและสิ่งอำนวยความสะดวกด้านคมนาคมอาจเป็นปัจจัยสำคัญในการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ชุมชนอย่างรวดเร็ว เช่น โรงงานน้ำตาล โรงงานปุ๋ย และโรงงานแปรรูปการเกษตร เป็นต้น และจากการลงพื้นที่สำรวจภาคสนาม พบว่ามีพื้นที่ชุมชน อาคารพาณิชย์ สถานที่ราชการ และโรงงานในพื้นที่ตำบลหนองโอ่ง โดยส่วนใหญ่พบอยู่ในบริเวณหมู่ที่ 1 บ้านคณฑี หมู่ที่ 2 บ้านหนองโอ่ง และหมู่ที่ 6 บ้านโคกสำโรง เป็นต้น รองลงมา คือ พื้นที่พืชไร่ ไม้ยืนต้น ไม้ผล ในช่วง P6 พบว่า มีจำนวน 77,463 ไร่ ลดลงจากช่วง P1 จำนวน 54,608.74 ไร่ แต่ในปีปัจจุบัน ยังพบว่ามีการใช้ที่ดินประเภทนี้เป็นอันดับสอง มีการปลูกจำพวกอ้อย ข้าวโพด มันสำปะหลัง ซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจ และเป็นหนึ่งในแผนพัฒนาจังหวัดสุพรรณบุรี พ.ศ. 2566–2570 (สำนักงานจังหวัดสุพรรณบุรี, 2566) และพื้นที่นาข้าวมีพื้นที่คงที่ในทุกช่วงปี เนื่องจากอำเภอดูทอง มีชั้นความเหมาะสมในการทำนาข้าวอย่างมาก มีแม่น้ำ ลำคลอง หนอง บึง อยู่บริเวณโดยรอบพื้นที่ตำบลหนองโอ่ง บริเวณที่มีการทำนาข้าวมาก จะพบอยู่ในบริเวณพื้นที่ทางทิศตะวันออกและทิศใต้ของตำบลหนองโอ่ง และพื้นที่การใช้ที่ดินที่น้อยสุด คือ พื้นที่เบ็ดเตล็ด เป็นพื้นที่ที่ไม่มีความเหมาะสมในการทำกิจกรรมใด ๆ พบเพียงจำนวน 7,978.00 ไร่ ซึ่งจากการลงสำรวจพื้นที่ภาคสนามพบว่ามีความสอดคล้องกับข้อมูลการใช้ที่ดินของกรมพัฒนาที่ดินในปีปัจจุบัน และประเทศไทยได้มีการกำหนดยุทธศาสตร์ชาติ 20 ปี (พ.ศ. 2561–2580) ยุทธศาสตร์ที่ 2 ในด้านการสร้างความสามารถในการแข่งขัน มีเป้าหมายให้ประเทศสามารถยกระดับการผลิตทางการเกษตรเพื่อสร้างมูลค่าให้สูงขึ้น ยังเป็นหนึ่งในเป้าหมายของการพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable Development Goals) เป้าหมายที่ 12 การผลิตและการบริโภคที่ยั่งยืน

จากข้อมูลข้างต้น พบว่า การดำเนินโครงการเหมืองแร่ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2545 จนถึงปีปัจจุบัน ไม่ได้ส่งผลต่อพื้นที่เกษตรกรรมแต่อย่างใด ยังคงมีการทำเกษตรกรรมในพื้นที่และมีจำนวนเพิ่มมากขึ้น และหากพบว่าโครงการเหมืองแร่มีการดำเนินการที่ส่งผลกระทบต่อพื้นที่เกษตรกรรมของชาวบ้านจะต้องมีการยุติการทำเหมืองและแก้ไขเหตุที่เกิดขึ้นให้แล้วเสร็จก่อนที่จะสามารถดำเนินการทำเหมืองต่อได้ ในปัจจุบันยังคงมีการเปิดดำเนินการปกติ จึงพบว่าโครงการเหมืองแร่ไม่ได้ส่งผลต่อพื้นที่เกษตรกรรมของชาวบ้านแต่อย่างใด รวมถึงจากข้อมูลการตรวจวัดคุณภาพสิ่งแวดล้อมของกรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่เพื่อติดตามและเฝ้าระวังคุณภาพสิ่งแวดล้อม ประกอบไปด้วย การตรวจวัดปริมาณฝุ่นละอองรวม (TSP) ระดับเสียงเฉลี่ย 24 ชั่วโมง ระดับเสียงสูงสุด และแรงสั่นสะเทือนจากการระเบิด จำนวน 5 สถานี พบว่า การตรวจวัดคุณภาพสิ่งแวดล้อมในช่วงที่ดำเนินการตรวจวัด มีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่. กองบริหารสิ่งแวดล้อม, 2566) จากการศึกษาของ สุวิทย์ และคณะ (2562)

ได้มีการศึกษาผลกระทบของการใช้ที่ดินและการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินต่อมูลค่าบริการระบบนิเวศ กรณีศึกษาอำเภอเมืองขอนแก่น ประเทศไทย พบว่า ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินต่อมูลค่าบริการระบบนิเวศแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ในแต่ละประเภทของการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินตามพื้นที่ พื้นที่นาและพืชไร่ลดลง ในทางตรงกันข้าม การขยายตัวของเมืองและพื้นที่ก่อสร้างมีการเพิ่มขึ้นอย่างมาก ดังนั้น มูลค่าบริการระบบนิเวศทั้งหมดจึงลดลงอย่างมาก และการเปลี่ยนแปลงของระบบนิเวศการเกษตร เช่น นาข้าวและพืชไร่ ส่งผลกระทบอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงของมูลค่าบริการระบบนิเวศในพื้นที่ศึกษา นอกจากนี้ การใช้ที่ดินและนักวางผังเมืองควรพยายามลดผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินต่อการบริการระบบนิเวศในระหว่างกระบวนการวางแผน และคาดว่าจะสามารถใช้เป็นแนวทางสำหรับการใช้ที่ดินและวางแผนการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินที่เหมาะสม เพื่อสร้างสมดุลให้กับการพัฒนาเศรษฐกิจและความสมบูรณ์ของระบบนิเวศในอนาคต รวมถึงควรตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์ท้องถิ่นของบริการระบบนิเวศของการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินแต่ละประเภทด้วย

*การประเมินมูลค่าบริการระบบนิเวศ*

โครงการเหมืองแร่ส่งผลต่อมูลค่าบริการระบบนิเวศอย่างมีนัยสำคัญ จากผลการศึกษา พบว่าพื้นที่โครงการเหมืองแร่มีจำนวนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในทุกช่วงปี (Table 3) โดยการทำเหมืองแร่มีการใช้พื้นที่ป่าไม้ในการดำเนินการ และจากการประเมินการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินมีพื้นที่ป่าไม้จำนวนลดลงตั้งแต่ปี 2549 จนถึงปัจจุบัน การขุดแร่ขึ้นมาใช้ประโยชน์ ทำให้สภาพภูมิประเทศเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ส่งผลต่อมูลค่าบริการระบบนิเวศ ป่าไม้ลดลงอย่างรวดเร็วในด้านการควบคุมกลไกการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศอย่างเห็นได้ชัดเจน และเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้างที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ จากปี พ.ศ. 2549 ถึง พ.ศ. 2564 จาก 90,879.73 ไร่ เป็น 248,959 ไร่ ทำให้มูลค่าบริการระบบนิเวศลดลงถึง 1.28 ล้านบาท เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้างอย่างรวดเร็ว พื้นที่ส่วนใหญ่ที่พบว่ามีมูลค่าบริการระบบนิเวศลดลง ได้แก่ การปลูกพืชไร่ ไม้ยืนต้น ไม้ผล นาข้าว และพื้นที่ป่าไม้ ในขณะที่พื้นที่เบ็ดเตล็ด พื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้างมีมูลค่าบริการระบบนิเวศเพิ่มขึ้นในด้านวัฒนธรรม จากแผนปฏิบัติด้านการพัฒนาอุตสาหกรรมจังหวัดสุพรรณบุรี พ.ศ. 2566 (สำนักงานอุตสาหกรรมจังหวัดสุพรรณบุรี, 2566) มีแนวโน้มที่จะผลักดันในการพัฒนาสถานประกอบการอุตสาหกรรมและเหมืองแร่ให้เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ด้วยหลักการ BCG Model และการเพิ่มมูลค่า ลดต้นทุนการผลิต ผลิตภัณฑ์สินค้าการเกษตรและสินค้าเกษตรแปรรูปเพื่อการบริโภคและส่งออก รวมถึงส่งเสริม พัฒนาอุตสาหกรรมเกษตรแปรรูป ให้ได้มาตรฐาน ซึ่งการพัฒนาอย่างรวดเร็วของอุตสาหกรรมส่งผลทำให้มูลค่าบริการระบบนิเวศลดลงจากอดีต และการประเมินมูลค่าบริการระบบนิเวศมีความสำคัญต่อการวางแผนบริหารจัดการการใช้ที่ดินและการวางกลยุทธ์ในการเพิ่มขีดความสามารถในการพัฒนาระดับพื้นที่ให้มีประสิทธิภาพ เพื่อให้เกิดความยั่งยืน ตามเป้าหมายของการพัฒนาที่ยั่งยืน เป้าหมายที่ 12 การผลิตและการบริโภคที่ยั่งยืน รวมถึงสะท้อนให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงสภาพพื้นที่โดยรอบตำบลหนองโอ่งและการให้ความสำคัญต่อระบบนิเวศ เพื่อให้เกิดการฟื้นฟูและการอนุรักษ์พื้นที่ที่เกิดความเสียหายได้ ควรจะให้ความสำคัญในการฟื้นฟูพื้นที่ป่าไม้เป็นอันดับต้น เพื่อที่จะเพิ่มมูลค่าบริการระบบนิเวศที่ลดลงอย่างมาก เนื่องจากป่าไม้มีความสำคัญอย่างมากในการให้บริการระบบนิเวศและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของพื้นที่การใช้ที่ดินทั้ง 5 ประเภท พบว่า พื้นที่การใช้ที่ดินไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 จากการศึกษาของ Xiong et al. (2022) พบว่า การทำเหมืองแร่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินในพื้นที่เมือง มูลค่าบริการระบบนิเวศแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญภายใต้การเปลี่ยนแปลง การใช้ที่ดินที่แตกต่างกัน รวมถึงมีผลต่อทิศทางและระดับของการเปลี่ยนแปลงของมูลค่าบริการระบบนิเวศทั้งหมด มีผลกระทบต่อกระบวนการทำลายความหลากหลายทางชีวภาพ การขยายพื้นที่เมืองมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของมูลค่าบริการระบบนิเวศในเมืองอู่ฮั่น การลดลง

ของพื้นที่ที่เป็นนิเวศจะทำให้เกิดความเสี่ยงต่อสิ่งแวดล้อม สิ่งที่สำคัญกว่านั้น คือความสัมพันธ์ระหว่างการพัฒนาและการป้องกันนิเวศในกระบวนการใช้ที่ดิน รัฐบาลให้ความสนใจมากขึ้นในการปลูกข้าวและเพิ่มพื้นที่ป่าไม้ ของพื้นที่นิเวศเพื่อป้องกันแนวโน้มของการลดลงของมูลค่าบริการระบบนิเวศในประเทศจีน

**Table 3** Ecosystem service values by ecosystem service function between P1 to P6

| Ecosystem services category | Ecosystem services function | Ecosystem service values (million baht) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | P1 (2006-2007) | P2 (2008-2009) | P3 (2010-2013) | P4 (2015-2016) | P5 (2017-2018) | P6 (2019-2021) |
| Regulating services | 1) Gas regulation | 26,796 | 20,454 | 4,933 | 3,386 | 12,048 | 18,349 |
| | 2) Climate regulation | 727,638 | 30,235 | 7,733 | 5,101 | 16,450 | 27,816 |
| | 3) Waste treatment | 66,726 | 45,821 | 12,511 | 7,714 | 22,312 | 43,481 |
| Supporting services | 1) Soil formation | 63,599 | 45,010 | 12,470 | 7,542 | 23,266 | 42,002 |
| | 2) Biodiversity protection | 529,853 | 26,476 | 6,655 | 4,386 | 15,087 | 24,153 |
| Provision services | 1) Water supply | 30,281 | 22,664 | 5,610 | 3,764 | 12,936 | 20,538 |
| | 2) Food production | 39,379 | 26,620 | 7,364 | 4,499 | 12,512 | 25,425 |
| | 3) Raw materials | 8,969 | 7,723 | 1,636 | 1,256 | 5,358 | 6,536 |
| Cultural services | 1) Recreation and culture | 5,942 | 4,162 | 852 | 696 | 3,535 | 8,355 |
| Total | | 1,499,183 | 229,165 | 59,764 | 38,344 | 123,504 | 216,655 |

## สรุป

การทำเหมืองแร่ในพื้นที่ตำบลหนองโอ่งตั้งแต่ปี พ.ศ. 2545 จนถึงปีปัจจุบัน จากการประเมินการเปลี่ยนแปลงบริการระบบนิเวศทั้งหมด 6 ช่วง พบว่า โครงการเหมืองแร่ไม่ได้ส่งผลต่อพื้นที่เกษตรกรรมแต่อย่างใด ยังคงมีการทำเกษตรกรรมในพื้นที่บริเวณโดยรอบโครงการเหมืองแร่ เช่น ปลูกจำพวกอ้อย ข้าวโพด มันสำปะหลัง เป็นต้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงการใช้ดินที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น คือ พื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้างอย่างมีนัยสำคัญ รองลงมาเป็นพื้นที่เบ็ดเตล็ด และพื้นที่ที่ลดลง คือ พืชไร่ ไม้ยืนต้น ไม้ผล พื้นที่นา สถานที่เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ และป่าสมบูรณ์

โครงการเหมืองแร่ส่งผลต่อมูลค่าบริการระบบนิเวศอย่างมีนัยสำคัญ พื้นที่โครงการเหมืองแร่มีจำนวนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในทุกช่วงปี เนื่องจากมีการใช้พื้นที่ป่าไม้ในการทำเหมืองแร่ ทำให้สูญเสียทรัพยากรป่าไม้ลดลงอย่างรวดเร็ว การทดแทนทรัพยากรป่าไม้ให้เหมือนเดิมจะต้องใช้ระยะเวลาที่ยาวนาน ทรัพยากรป่าไม้มีมูลค่าบริการระบบนิเวศอย่างมากในด้านการควบคุมกลไกการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ เป็นพื้นที่กักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งมีศักยภาพในการดูดซับก๊าซเรือนกระจกค่อนข้างสูง และจากการประเมินการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินมีพื้นที่ป่าไม้ลดลงตั้งแต่ปี 2549 จนถึงปัจจุบัน ส่งผลต่อมูลค่าบริการระบบนิเวศ และการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้างอย่างรวดเร็ว ทำให้มูลค่าบริการระบบนิเวศของพื้นที่พืชไร่ ไม้ยืนต้น ไม้ผล และนาข้าวลดลง ในขณะที่พื้นที่เบ็ดเตล็ด พื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้างมีมูลค่าบริการระบบนิเวศเพิ่มขึ้นในการบริการด้านวัฒนธรรม การประเมินมูลค่าบริการระบบนิเวศมีความสำคัญต่อการวางแผนในการบริหารจัดการการใช้ที่ดินเพื่อให้เกิดความยั่งยืน ตามเป้าหมายของการพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable Development Goals) เป้าหมายที่ 12 การผลิตและการบริโภคที่ยั่งยืน รวมถึงสะท้อนให้เห็นถึงการ

เปลี่ยนแปลงสภาพพื้นที่โดยรอบตำบลหนองโอ่ง และการให้ความสำคัญต่อระบบนิเวศควรกำหนดเป้าหมายการฟื้นฟูพื้นที่ป่าไม้เป็นอันดับต้น เพื่อที่จะสามารถเพิ่มมูลค่าบริการระบบนิเวศที่ลดลงอย่างมาก

**กิตติกรรมประกาศ**

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ดีผู้วิจัยขอขอบคุณทุนสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์บางส่วน จากคณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล รวมถึงต้องขอขอบพระคุณกรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ กรมพัฒนาที่ดิน และหน่วยงานอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องที่เป็นส่วนหนึ่งในความสำเร็จที่มีความสำคัญของการจัดทำฐานข้อมูลต่าง ๆ ที่ช่วยให้ผู้วิจัยสามารถนำข้อมูลมาใช้ในการวิเคราะห์และเป็นองค์ความรู้ทางวิชาการได้เป็นอย่างดี

**เอกสารอ้างอิง**

กรมทรัพยากรธรณี. 2547. ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับทรัพยากรแร่. https://www.dmr.go.th/แร่/ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับทรัพยากรแร่/, 26 พฤศจิกายน 2566.

กรมพัฒนาที่ดิน. 2566. ข้อมูลการใช้ที่ดิน (Land Use). https://dinonline.ldd.go.th/, 26 พฤศจิกายน 2566.

กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่. 2566. ระบบภูมิสารสนเทศอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่. https://gisweb.dpim.go.th/main/gispage.aspx?no_link=28477%2F16282&type_link=concession, 2 ธันวาคม 2566.

ศุภกานต์ ธิเตจ๊ะ และคณะ. 2563. การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่ลุ่มน้ำแม่ตาวที่มีการทำเหมืองแร่สังกะสี อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก โดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการรับรู้จากระยะไกล. https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/KKUSciJ/article/view/250150/169652

สถาบันเทคโนโลยีและสารสนเทศเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน. 2566. การทบทวนของบริการระบบนิเวศ (Ecosystem Service Review: ESR). https://www.nstda-tiis.or.th/methodology_developm/esr/, 26 พฤศจิกายน 2566.

สุวิทย์ อ่อมสมหวัง, สุระ พัฒนเกียรติ, อเนก ศรีสุวรรณ. 2562. ผลกระทบของการใช้ที่ดินและการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินต่อมูลค่าบริการระบบนิเวศ กรณีศึกษาอำเภอเมืองขอนแก่น ประเทศไทย. https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/ennrj/article/view/205627/143067, 2 ธันวาคม 2566.

สำนักงานจังหวัดสุพรรณบุรี. 2560. แผนพัฒนาจังหวัดสุพรรณบุรี พ.ศ. 2566–2570 (ฉบับทบทวน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2567. https://ww1.suphanburi.go.th/strategic, 2 ธันวาคม 2566.

สำนักงานอุตสาหกรรมจังหวัดสุพรรณบุรี. 2566. แผนปฏิบัติการด้านการพัฒนาอุตสาหกรรมจังหวัดสุพรรณบุรี ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2566. https://suphanburi.industry.go.th/th/cms-of-138, 2 ธันวาคม 2566.

Mamat, A., Halik, Ü., Rouzi, A. 2018. Variations of ecosystem service value in response to land-use change in the Kashgar Region, Northwest China. Sustainability 10: 200–217.

Ongsomwang, S., Pattanakiat, S., Srisuwan, A. 2019. Impact of land use and land cover change on ecosystem service values: A case study of Khon Kaen City, Thailand. Environ. Nat. Resour. J. 17: 43–58.

World Resources Institute. 2005. Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystem and Human Well-being: Synthesis. Island Press. Washington, DC, USA.

Xiong, Y., Li, H., Fu, M., Ma, X., Wang, L. 2022. Evaluation of ecosystem service change patterns in a mining-based city: A case study of Wu'an City. Land 11: 895.

# ระยะเวลาของฝนสะสมที่ส่งผลต่อการรุกล้ำของน้ำเค็มในแม่น้ำบางปะกง

## Duration of accumulated rainfall affecting seawater intrusion in Bang Pakong River

**สวรส เรืองรักษ์**[a], **ปวีร์ คล่องเวสสะ**[a,*], **ศรีเลิศ โชติพันธรัตน์**[b], **อาทิตยา ช่างด้วง**[a]

Sawarod Ruangrak[a], Pawee Klongvessa[a], Srilert Chotpantarat[b], Athitaya changduang[a]

[a]ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[b]ภาควิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330

[a]Department of Environmental Technology and management, Faculty of Environment, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

[b]Department of Environmental Management, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: ecpwk@ku.ac.th

**บทคัดย่อ**

ลุ่มน้ำบางปะกงมักประสบปัญหาการรุกล้ำของน้ำเค็ม ปัญหาดังกล่าวได้รับอิทธิพลส่วนหนึ่งจากปัจจัยทางอุทกวิทยา การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบจากฝนที่มีต่อการรุกล้ำของน้ำเค็มในแม่น้ำบางปะกงและหาระยะเวลาของฝนสะสมที่สัมพันธ์กับความเค็มของน้ำในแม่น้ำมากที่สุด การศึกษาใช้วิธีการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สันระหว่างปริมาณฝนสะสมในระยะเวลาต่าง ๆ กับความเค็มของน้ำในแม่น้ำที่ 13 สถานี ในช่วงเดือนมีนาคม พ.ศ. 2536–กรกฎาคม พ.ศ. 2565 ผลการศึกษาพบว่าความเค็มของน้ำในแม่น้ำจะน้อยเมื่อปริมาณฝนมาก ระยะเวลาของฝนสะสมที่สัมพันธ์กับความเค็มของน้ำมากที่สุดแตกต่างกันไปตามสถานีคือประมาณ 70 วัน สำหรับสถานี BK01 และ BK02 ประมาณ 90–110 วัน สำหรับสถานี BK03, BK04, BK06, BK07, BK08, BK09, BK9.5, BK11 และ BK13 และประมาณ 130–150 วัน สำหรับสถานี BK15 และ BK16 นอกจากนี้ ความเค็มของน้ำในแม่น้ำยังสัมพันธ์กับฝนสะสมในระยะเวลาประมาณ 7 วันอีกด้วย แต่ความสัมพันธ์ไม่ชัดเจนมากเมื่อเทียบกับกรณีของฝนสะสมระยะยาว

**คำสำคัญ**: การรุกล้ำของน้ำเค็ม, ความเค็ม, ฝนสะสม, แม่น้ำบางปะกง

**Abstract**

Bang Pakong River Basin frequently experiences a problem of seawater intrusion. This problem is partially affected by hydrological factors. Therefore, this study aims to evaluate the intrusion of effects of rainfall on seawater into the Bang Pakong River and to find the period of accumulated rainfall that is more related to the salinity of the water in the river. Pearson's correlation coefficients between the accumulated rainfall over different time periods and the salinity of the water in the river were calculated at 13 stations during March 1993–July 2022. The results show that the salinity of the amount of water was low when the rainfall was high. The period of accumulated rainfall that was most related to the salinity of the water varies according to the station as follows: approximately 70 days for the stations BK01 and BK02, 90–110 days for the stations BK03, BK04, BK06, BK07, BK08, BK09, BK9.5, BK11 and BK13, and 130–150 days for the stations BK15 and BK16. Additionally, the salinity of the water in the river was also related to the accumulated rainfall over approximately 7 days, but the correlation was not very strong in comparison to the case of accumulated rainfall over the long period.

**Keywords**: Accumulated rainfall, Bang Pakong River, Salinity, Seawater intrusion

**คำนำ**

การรุกล้ำของน้ำเค็ม (seawater intrusion) เป็นปัญหาที่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม เช่น ทำให้พืชไม่สามารถเจริญเติบโตได้ ทำให้น้ำดิบที่นำไปผลิตน้ำประปามีความเค็มและไม่สามารถนำไปอุปโภคบริโภคได้ รวมถึงทำให้ระบบนิเวศของแม่น้ำเสียหาย (ณัฐวุฒิ และวิษุวัฒก์, 2557) ปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดปัญหานี้ ได้แก่ ระดับน้ำทะเลที่หนุนสูงซึ่งมีสาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021) ในช่วง 25 ปีที่ผ่านมา (พ.ศ. 2528–2552) ระดับน้ำทะเลในอ่าวไทยแนวมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น (Sojisuporn et al., 2013) จึงทำให้น้ำเค็มสามารถรุกล้ำเข้าไปในแม่น้ำได้มากขึ้น

หนึ่งในพื้นที่ของประเทศไทยที่มักประสบปัญหาการรุกล้ำของน้ำเค็มคือลุ่มน้ำบางปะกงและมีหลายการศึกษาที่ศึกษาปัญหาดังกล่าว อภิศักดิ์ (2554) พบว่าน้ำทะเลรุกล้ำเข้าไปในแม่น้ำบางปะกงมากที่สุดในฤดูแล้ง แต่ไม่เกินกิโลเมตรที่ 18 จากปากแม่น้ำ ส่วนในฤดูฝน น้ำทะเลรุกล้ำเข้าไปถึงกิโลเมตรที่ 12 ในช่วงเวลาน้ำขึ้นสูงสุดและไม่เกินกิโลเมตรที่ 9 ในช่วงเวลาน้ำลงต่ำสุด ในช่วงที่เกิดฝนตกหนักและเกิดอุทกภัย ปากแม่น้ำบางปะกงอาจมีสภาพเป็นพื้นที่น้ำจืด ผลการศึกษาคุณภาพน้ำทะเลบริเวณปากแม่น้ำบางปะกงของอนุกูล และ เผชิญโชค (2555) พบว่าความเค็มของน้ำเป็นหนึ่งในพารามิเตอร์คุณภาพน้ำที่มีการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลอย่างมีนัยสำคัญ การติดตามค่าความเค็มของน้ำในแม่น้ำบางปะกงในระยะเวลา 10 ปี (พ.ศ. 2553–2562) โดยศุภนาถ และเพ็ญรดี (2564) พบว่าในฤดูแล้ง น้ำจัดเป็นน้ำกร่อย แม่น้ำบางปะกงทั้งลำน้ำมีค่าความเค็มในน้ำสูงเกินเกณฑ์มาตรฐานของค่าความเค็มในน้ำดิบสำหรับการผลิตน้ำประปา ซึ่งกำหนดให้ค่าความเค็มไม่เกิน 0.25 ppt (ค่าเฉลี่ยความเค็มของน้ำบริเวณต้นน้ำอยู่ที่ 6.28 ppt) แต่เมื่อถึงฤดูฝน ซึ่งปริมาณน้ำจืดในแม่น้ำเพิ่มมากขึ้น น้ำในแม่น้ำสามารถผลักน้ำทะเลไม่ให้รุกล้ำเข้ามาในแม่น้ำได้ ค่าความเค็มของน้ำมีค่าลดลงจนน้ำถูกจัดให้เป็นน้ำจืดได้ ทั้งนี้ปัจจัยสำคัญที่ทำให้ปัญหาน้ำเค็มรุกล้ำแม่น้ำบางปะกงรุนแรงมากขึ้นในปัจจุบัน นอกเหนือไปจากลักษณะทางภูมิศาสตร์ของบริเวณปากแม่น้ำซึ่งเป็นพื้นที่ราบลุ่มและมีการขึ้นลงของน้ำทะเลแล้ว ความต้องการใช้น้ำที่เพิ่มขึ้นตามจำนวนประชากรยังทำให้ปริมาณน้ำจืดในแม่น้ำบางปะกงที่ผลักน้ำเค็มลดลง และการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศซึ่งส่งผลให้ระดับน้ำทะเลสูงขึ้นยังทำให้น้ำทะเลรุกล้ำเข้าสู่แม่น้ำบางปะกงได้มากขึ้นอีกด้วย นอกจากปัจจัยดังกล่าวแล้ว ผลจากการศึกษาโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนิท และสุนารี (2566) ยังพบว่าการสร้างเขื่อนส่งผลให้น้ำเค็มรุกเข้าไปในบริเวณปากแม่น้ำเป็นระยะทางเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย

บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากการรุกล้ำของน้ำเค็มมากที่สุดคือบริเวณปากแม่น้ำและพื้นที่ราบลุ่มที่ได้รับอิทธิพลจากการขึ้น-ลงของน้ำทะเลตลอดเวลาเนื่องจากน้ำทะเลสามารถรุกล้ำเข้าไปในแม่น้ำได้ง่าย (ศุภนาถ และเพ็ญรดี, 2564) ปัจจัยที่ส่งผลต่อการรุกล้ำของน้ำเค็มมีทั้งปัจจัยทางธรรมชาติ เช่น การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate Change) ซึ่งส่งผลให้ระดับของน้ำทะเลเพิ่มสูงขึ้น การกัดเซาะชายฝั่ง การกระจายตัวของฝน และระยะเวลาของฤดูแล้งที่ยาวนานขึ้น และปัจจัยจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การสูบน้ำบาดาลที่มากเกินไปซึ่งส่งผลให้ระดับน้ำและแรงดันน้ำใต้ดินลดลง ทำให้น้ำเค็มสามารถดันตัวเข้าไปในแม่น้ำได้มากขึ้น และการทำอุตสาหกรรมและการเกษตรที่ขยายตัวเพิ่มมากขึ้น (มนตรี และคณะ, 2565)

ปัจจัยทางอุทกวิทยาเป็นหนึ่งในปัจจัยที่ส่งผลต่อการรุกล้ำของน้ำเค็ม และมีการศึกษาเป็นจำนวนมากที่ใช้แบบจำลองทางอุทกวิทยาในการศึกษาปัญหาดังกล่าว (ณัฐวุฒิ และวิษุวัฒก์, 2557; วิชญาณี และจิระวัฒน์, 2563; อำนาจ, 2563) ฝนเป็นหนึ่งในปัจจัยทางอุทกวิทยาที่มีบทบาทในการบรรเทาปัญหาการรุกล้ำของน้ำเค็มเนื่องจากน้ำจากฝนก่อให้เกิดการไหลของน้ำในแม่น้ำ (Streamflow) ซึ่งช่วยผลักน้ำเค็มไม่ให้รุกล้ำเข้ามาในพื้นที่ (อารียา, 2561) ทั้งนี้กระบวนการเกิดน้ำในแม่น้ำแบ่งออกเป็นกระบวนการที่เกิดจากฝนที่ตกลงมาในแม่น้ำโดยตรง (channel precipitation) น้ำผิวดิน (overland flow) น้ำใต้ผิวดิน (subsurface flow) และน้ำใต้ดิน (groundwater flow) น้ำที่เกิดจาก 3 กระบวนการ

แรกเป็นน้ำที่ไหลมาถึงแม่น้ำอย่างรวดเร็ว ซึ่งเรียกว่าน้ำท่าจริง (Direct runoff) ส่วนน้ำที่เกิดจากน้ำใต้ดินเป็นน้ำที่ไหลมาถึงแม่น้ำในเวลาที่ช้ากว่า ซึ่งเรียกว่าน้ำฐาน (Baseflow) ดังนั้นเวลาในการเคลื่อนที่ของน้ำจากจุดที่เกิดฝนไปยังทางออกของลุ่มน้ำจึงแตกต่างกันไปตามเส้นทางซึ่งอาจเป็นตั้งแต่ไม่กี่วันจนถึงหลักปี (อารียา, 2561)

จากที่กล่าวมาข้างต้น ถึงแม้ว่าฝนจะมีส่วนช่วยในการผลักน้ำเค็ม แต่กระบวนการตั้งแต่การเกิดฝนจนกระทั่งน้ำจากฝนไปผลักน้ำเค็มต้องใช้เวลา งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบจากฝนที่มีต่อการรุกล้ำของน้ำเค็มในแม่น้ำบางปะกงและหาระยะเวลาของฝนสะสมที่สัมพันธ์กับความเค็มมากของน้ำในแม่น้ำมากที่สุด

## อุปกรณ์และวิธีการ

*รวบรวมข้อมูล*

การศึกษานี้ใช้ข้อมูลฝนที่สถานีตรวจวัดอากาศปราจีนบุรี (430201) สถานีตรวจวัดอากาศฉะเชิงเทรา (423301) และสถานีตรวจวัดอากาศชลบุรี (459201) ในช่วงปี พ.ศ. 2533 – พ.ศ. 2565 (ค.ศ.1990 – ค.ศ. 2022) ซึ่งตรวจวัดโดยกรมอุตุนิยมวิทยา และข้อมูลความเค็มของน้ำในแม่น้ำบางปะกงที่สถานีตรวจวัดคุณภาพน้ำ 13 สถานีได้แก่สถานี BK01 BK02, BK03, BK04, BK06, BK07, BK08, BK09, BK9.5, BK11, BK13, BK15 และ BK16 ในช่วงในช่วงเดือนมีนาคม พ.ศ.2536 (ค.ศ. 1993) – กรกฎาคม พ.ศ. 2565 (ค.ศ. 2022) ซึ่งตรวจวัดโดยกรมควบคุมมลพิษ รายละเอียดของสถานีตรวจวัดคุณภาพน้ำแสดงดัง Table 1 และ Fig. 1 สถานี BK01 และ BK02 ตั้งอยู่บริเวณปากแม่น้ำซึ่งเป็นพื้นที่ชุมชนและมีพื้นที่ที่เป็นป่าบางส่วน สถานี BK03 และ BK04 เป็นบริเวณที่พื้นที่ส่วนใหญ่เป็นพื้นที่ป่าและการเกษตร มีชุมชนบางส่วน สถานี BK06 และ BK07 เป็นบริเวณชุมชนเมือง สถานี BK08 เป็นบริเวณตอนกลางของแม่น้ำที่มีชุมชนส่วนใหญ่ตั้งอยู่ติดกับแม่น้ำ มีบางส่วนเป็นพื้นที่การเกษตร สถานี BK09 และ BK9.5 ตั้งอยู่บริเวณเขื่อนบางปะกง พื้นที่ส่วนใหญ่เป็นพื้นที่การเกษตร สถานี BK11 และ BK13 เป็นบริเวณชุมชน มีท่าเรือติดกับแม่น้ำและมีการทำการเกษตร และสถานี BK15 และ BK16 ตั้งอยู่ในเป็นบริเวณต้นน้ำของแม่น้ำบางปะกงซึ่งเป็นบริเวณที่แม่น้ำนครนายกกับแม่น้ำปราจีนบุรีบรรจบกัน

**Table 1** Water quality monitoring station used in the study

| Station | Area | Latitude | Longitude | Distance from the Mouth of the River (km) |
|---|---|---|---|---|
| BK01 | Bang Pakong District | 13.475892 | 100.982136 | 2 |
| BK02 | Bang Pakong District | 13.485164 | 101.002723 | 9 |
| BK03 | Bang Pakong District | 13.548533 | 101.000791 | 22 |
| BK04 | Ban Pho District | 13.599876 | 101.076435 | 30 |
| BK06 | Mueang District | 13.659370 | 101.063126 | 50 |
| BK07 | Mueang District | 13.688008 | 101.077248 | 57 |
| BK08 | Mueang District | 13.699818 | 101.108834 | 62 |
| BK09 | Mueang District | 13.693563 | 101.131790 | 70 |
| BK9.5 | Mueang District | 13.707130 | 101.135200 | 68 |
| BK11 | Bang Khla District | 13.728924 | 101.207702 | 82 |
| BK13 | Bang Khla District | 13.778151 | 101.202884 | 96 |
| BK15 | Bang Nam Priao District | 13.870321 | 101.145871 | 117 |
| BK16 | Ban Sang District | 13.893299 | 101.162638 | 122 |

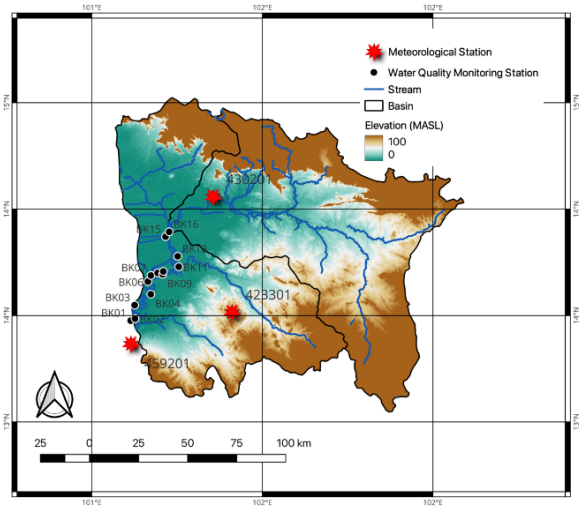



Fig. 1 The locations of meteorological stations and water quality monitoring stations in Bang Pakong River Basin

*เตรียมข้อมูล*

การเตรียมข้อมูลประกอบด้วยการเตรียมข้อมูลฝนและการเตรียมข้อมูลความเค็มของน้ำในแม่น้ำ การเตรียมข้อมูลฝนเริ่มจากการประมาณค่าข้อมูลฝนรายวันที่ขาดหายไปในแต่ละสถานีด้วยวิธี Inverse Distance Weighting (IDW) ซึ่งเป็นการเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักโดยให้สถานีที่อยู่ใกล้มีน้ำหนักมากกว่าสถานีที่อยู่ไกล (กีรติ, 2552) จากนั้นคำนวณปริมาณฝนเฉลี่ยของพื้นที่ในแต่ละวันโดยใช้วิธีรูปหลายเหลี่ยมของธีเอสเสน (Thiessen Polygon) ซึ่งมีวิธีการคือแบ่งพื้นที่ออกเป็นส่วน ๆ ตามสถานีวัดน้ำฝนที่อยู่ใกล้ที่สุดแล้วเฉลี่ยปริมาณฝนโดยถ่วงน้ำหนักตามขนาดของแต่ละส่วนของพื้นที่ (กีรติ, 2552) สำหรับการเตรียมข้อมูลความเค็มของน้ำในแม่น้ำ มีการคัดกรองข้อมูลโดยการตัดข้อมูลที่มีค่าผิดปกติออก

*วิเคราะห์ข้อมูล*

การวิเคราะห์ข้อมูลเริ่มจากการคำนวณปริมาณฝนสะสมในระยะเวลาต่าง ๆ ตั้งแต่ 1 วัน ถึง 180 วัน จากนั้นหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฝนสะสมในระยะเวลาต่าง ๆ กับค่าความเค็มของน้ำในแม่น้ำที่ทั้ง 13 สถานี โดยการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน แล้วเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพื่อหาระยะเวลาสะสมของฝนที่สัมพันธ์กับความเค็มของน้ำในแม่น้ำมากที่สุด วิธีการทำนองเดียวกันนี้ได้ถูกใช้ในงานวิจัยทางอุทกวิทยาต่าง ๆ เช่น การหาระยะเวลาสะสมของฝนที่สัมพันธ์กับปริมาณน้ำในแม่น้ำ (Klongvessa and Chotpantarat, 2022)

**ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง**

ปริมาณฝนเฉลี่ยของพื้นที่ในแต่ละวันในช่วงปี พ.ศ. 2533 – พ.ศ. 2565 (ค.ศ.1990 – ค.ศ. 2022) แสดงดัง Fig. 2 ในช่วงเวลาดังกล่าว ปริมาณฝนรวมรายปีมีค่าเฉลี่ย 1616.7 มิลลิเมตร และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 252.5 มิลลิเมตร ปริมาณฝนมากในช่วงเดือนพฤษภาคม–ตุลาคม และน้อยในช่วงเดือนพฤศจิกายน–เมษายน

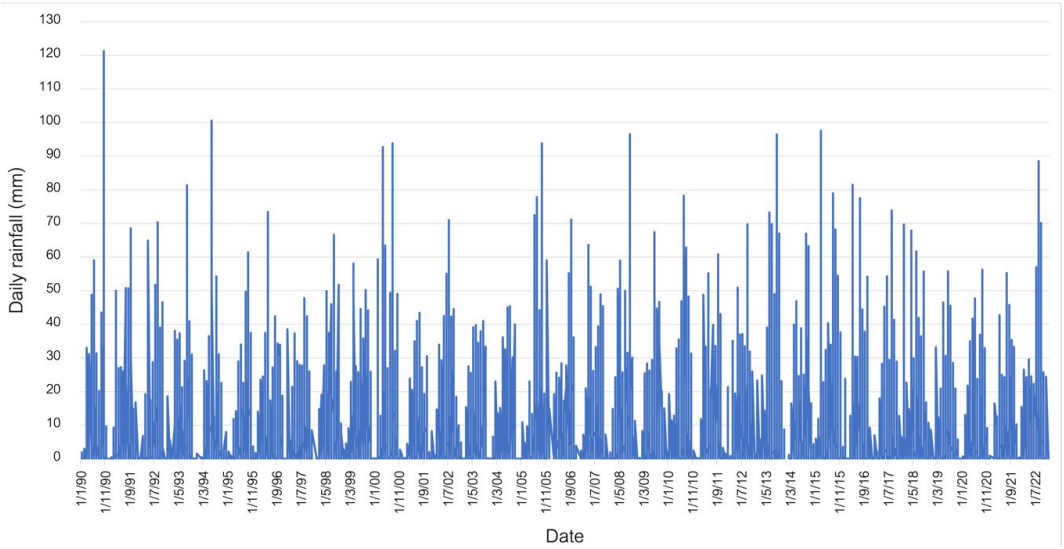



**Fig. 2** Average rainfall in the study area during 1990–2022

ความเค็มของน้ำในแม่น้ำแสดงดัง Fig. 3 จะเห็นได้ว่าความเค็มของน้ำมีค่าสูงในบริเวณปากแม่น้ำและลดลงตามระยะห่างจากปากแม่น้ำ นอกจากนี้ความเค็มของน้ำยังเปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาลอีกด้วย โดยในช่วงฤดูแล้ง (เดือนพฤศจิกายน–เมษายน) ความเค็มของน้ำจะสูงกว่าในช่วงฤดูฝน (เดือนพฤษภาคม–ตุลาคม) ความเค็มของน้ำสูงสุดที่พบที่สถานี BK01, BK02, BK03, BK04, BK06, BK07, BK08, BK09, BK9.5, BK11, BK13, BK15 และ BK16 มีค่า 40.0, 38.0, 36.0, 35.0, 29.3, 31.0, 27.0, 26.3, 30.0, 24.8, 24.2, 21.3 และ 20.0 ppt ตามลำดับ

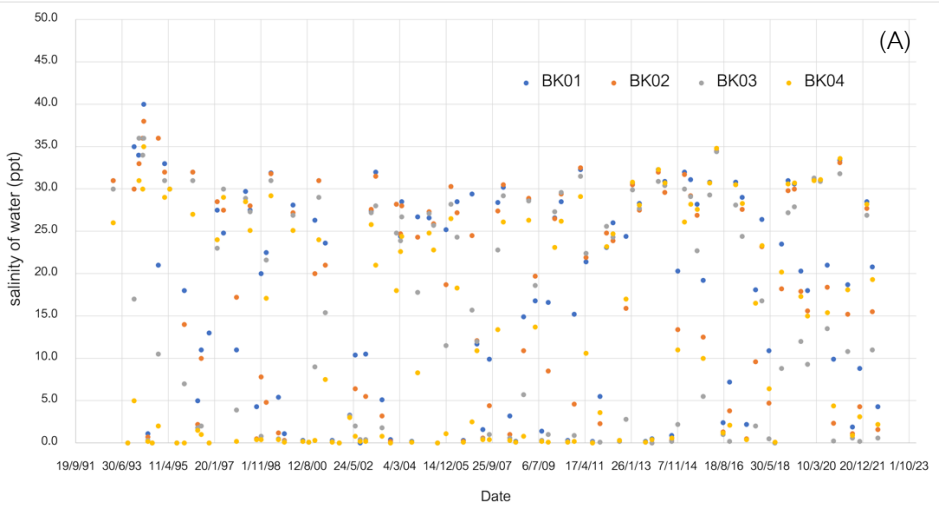





**Fig. 3** Salinity of water at stations (A) BK01, BK02, BK03, and BK04; (B) BK06, BK07, BK08, BK09, and BK9.5 and (C) BK11, BK13, BK15, and BK16

ผลจากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฝนกับความเค็มของน้ำในแม่น้ำแสดงดัง Fig. 4 จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฝนกับความเค็มของน้ำในแม่น้ำมีค่าน้อยกว่า 0 ที่ทุกสถานี นั่นคือเมื่อปริมาณฝนมาก ความเค็มของน้ำที่ทุกสถานีจะน้อย ที่เป็นเช่นนี้เพราะน้ำจากฝนมีส่วนช่วยในการผลักน้ำเค็มโดยการไหลไปสมทบกับน้ำในแม่น้ำ ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับงานวิจัยต่าง ๆ ในพื้นที่ (อภิศักดิ์, 2554; ศุภนาถ และเพ็ญรดี, 2564) ซึ่งพบว่าน้ำทะเลรุกล้ำเข้าไปในแม่น้ำบางปะกงมากที่สุดในฤดูแล้ง ในช่วงเวลาดังกล่าว น้ำมีลักษณะเป็นน้ำกร่อย ส่วนในฤดูฝนหรือช่วงที่เกิดฝนตกหนัก ปริมาณน้ำจืดในแม่น้ำจะมาก น้ำในแม่น้ำจึงสามารถผลักน้ำทะเลไม่ให้รุกล้ำเข้ามาในแม่น้ำได้ ค่าความเค็มของน้ำในแม่น้ำจึงน้อย

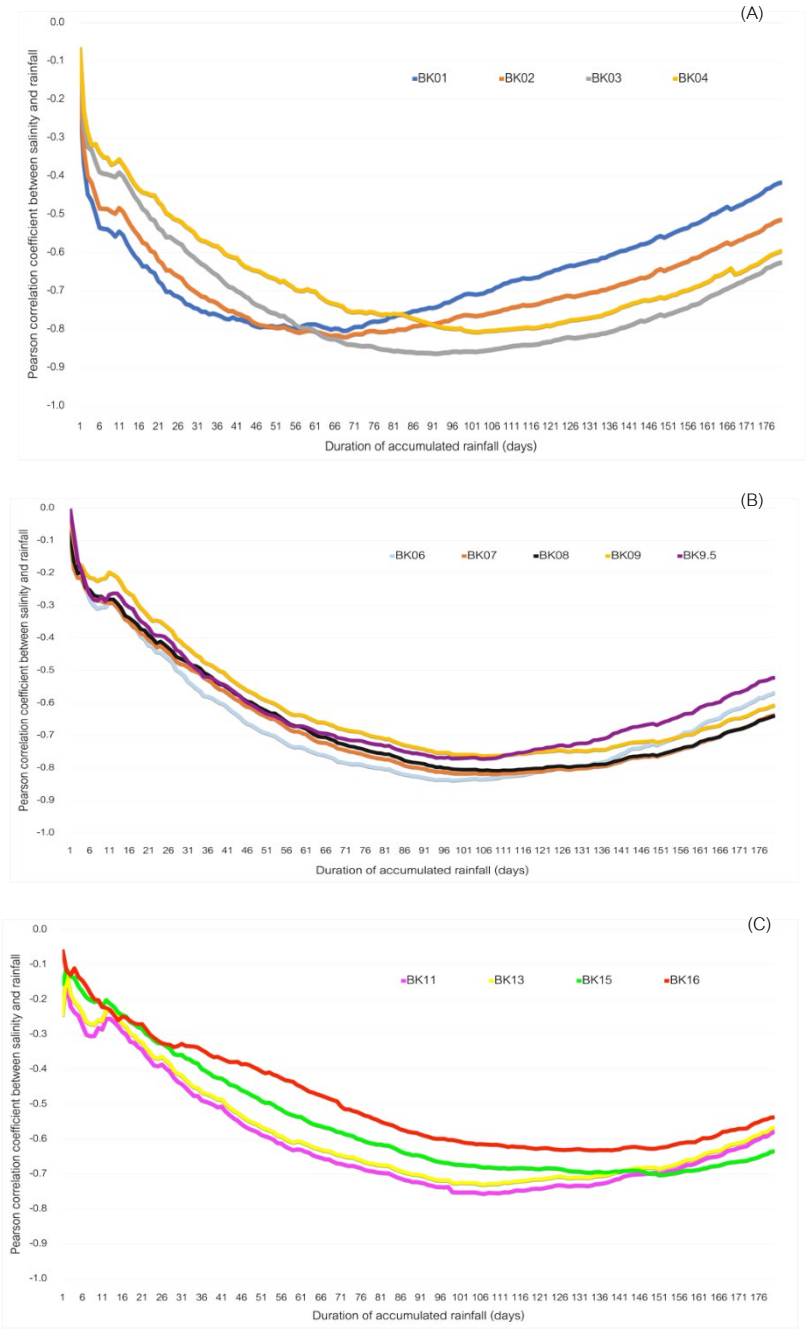



**Fig. 4** Correlation coefficient between accumulated rainfall and salinity of the water at stations (A) BK01, BK02, BK03 and BK04; (B) BK06, BK07, BK08, BK09, and BK9.5; and (C) BK11, BK13, BK15, and BK16

เมื่อพิจารณาช่วงเวลาของฝนสะสมที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฝนกับความเค็มของน้ำในแม่น้ำต่างจาก 0 มากที่สุด พบว่าช่วงเวลาดังกล่าวแตกต่างกันไปตามสถานี นั่นคือช่วงเวลาของฝนสะสมที่สัมพันธ์กับความเค็มของน้ำมากที่สุดแตกต่างกันไปตามสถานีคือประมาณ 70 วัน สำหรับสถานี BK01 และ BK02 ประมาณ 90–110 วัน สำหรับสถานี BK03, BK04, BK06, BK07, BK08, BK09, BK9.5, BK11 และ BK13 และประมาณ 130–150 วัน สำหรับสถานี BK15 และ BK16 จะเห็นได้ว่าในบริเวณที่อยู่ใกล้ปากแม่น้ำ ปริมาณฝนที่สัมพันธ์กับความเค็มมากที่สุดคือปริมาณฝนสะสมในระยะเวลาที่ไม่นานเมื่อเทียบกับในบริเวณที่อยู่ห่างจากปากแม่น้ำ ที่เป็นเช่นนี้เพราะเวลาที่น้ำเค็มรุกล้ำเข้ามาถึงบริเวณปากแม่น้ำสั้นกว่าเวลาที่น้ำเค็มรุกล้ำเข้ามาถึงบริเวณที่อยู่ไกลจากปากแม่น้ำ ระยะเวลาที่น้ำจากฝน

สามารถสะสมตัวเพื่อผลักน้ำเค็มในบริเวณปากแม่น้ำจึงน้อยกว่าระยะเวลาที่น้ำจากฝนสามารถสะสมตัวเพื่อผลักน้ำเค็มในบริเวณที่อยู่ห่างจากปากแม่น้ำ นอกจากนี้ยังพบว่าที่ช่วงเวลาของฝนสะสมประมาณ 7 วัน ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฝนกับความเค็มของน้ำต่างจาก 0 มากกว่าเมื่อเทียบกับที่ช่วงเวลาใกล้เคียง นั่นคือความเค็มของน้ำในแม่น้ำมีความสัมพันธ์กับปริมาณฝนสะสมในระยะเวลาประมาณ 7 วัน อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์นี้ไม่ชัดเจนมากเมื่อเทียบกับกรณีของฝนสะสมระยะยาว ซึ่งคาดว่าช่วงเวลาสะสมของฝนระยะสั้นนี้สัมพันธ์กับน้ำที่ไหลบนผิวดิน ขณะที่ช่วงเวลาสะสมของฝนระยะยาวสัมพันธ์กับน้ำที่ไหลใต้ผิวดิน (อารียา, 2561)

## สรุป

เมื่อปริมาณฝนมาก ความเค็มของน้ำในแม่น้ำบางปะกงจะน้อย ที่เป็นเช่นนี้เพราะน้ำจากฝนมีส่วนช่วยในการผลักน้ำเค็มโดยการไหลไปสมทบกันน้ำในแม่น้ำ และในบริเวณใกล้ปากแม่น้ำ ปริมาณฝนที่สัมพันธ์กับความเค็มของน้ำมากที่สุดคือปริมาณฝนสะสมในระยะเวลาประมาณ 70 วัน ระยะเวลานี้ไม่นานเมื่อเทียบกับบริเวณที่อยู่ไกลจากปากแม่น้ำซึ่งความเค็มของน้ำสัมพันธ์กับปริมาณฝนสะสมในระยะเวลา 90–150 วัน ที่เป็นเช่นนี้เพราะเวลาที่น้ำเค็มรุกล้ำเข้ามาถึงบริเวณที่อยู่ไกลจากปากแม่น้ำนานกว่าเวลาที่น้ำเค็มรุกล้ำเข้ามาถึงบริเวณที่อยู่ใกล้ปากแม่น้ำ นอกจากนี้ยังมีช่วงเวลาสะสมของฝนระยะสั้นที่สัมพันธ์กับความเค็มของน้ำซึ่งได้แก่ช่วงเวลาประมาณ 7 วัน แต่ความสัมพันธ์ไม่ชัดเจนมากเมื่อเทียบกับกรณีของฝนสะสมระยะยาว ซึ่งคาดว่าช่วงเวลาสะสมของฝนระยะสั้นนี้สัมพันธ์กับน้ำที่ไหลบนผิวดิน ขณะที่ช่วงเวลาสะสมของฝนระยะยาวสัมพันธ์กับน้ำที่ไหลใต้ผิวดิน

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนบางส่วนจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## เอกสารอ้างอิง

กีรติ ลีวัจนกุล. 2552. อุทกวิทยา, พิมพ์ครั้งที่ 3. SPEC. ปทุมธานี.

ณัฐวุฒิ อินทบุตร, วิษุวัฒก์ แต้สมบัติ. 2557. การรุกล้ำของความเค็มและการแพร่กระจายความเค็มตามความยาวของลำน้ำในแม่น้ำท่าจีน เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเล. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 3: 71–86.

มนตรี ผลสินธ์, ปิยากร ดำคุ้ม, มนัสชยา เนื่องจุ้ย, เพ็ญรดี จันทร์ภิวัฒน์. 2565. ผลกระทบของการรุกล้ำน้ำเค็มต่อพื้นที่เกษตรกรรม. วารสารสิ่งแวดล้อม 26: 1–9.

วิชญาณี อื้อรัตน์, จิระวัฒน์ กณะสุต. 2563. การวิเคราะห์การรุกตัวของน้ำเค็มในแม่น้ำบางปะกงโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ MIKE 11. ใน: รายงานการประชุมวิชาการด้านการชลประทานและการระบายน้ำแห่งชาติ ครั้งที่ 13. กรมชลประทาน. นนทบุรี, หน้า 45–61.

ศุภนาถ เห็นสว่าง, เพ็ญรดี จันทร์ภิวัฒน์. 2564. จับตาค่าความเค็มของแม่น้ำบางปะกง...แม่น้ำสายหลักของพื้นที่ระเบียงเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก. วารสารสิ่งแวดล้อม 25: 1–7.

สนิท วงษา, สุนารี เสือทุ่ง. 2566. ผลกระทบการก่อสร้างเขื่อนต่อน้ำเค็มและทรัพยากรน้ำในลุ่มน้ำบางปะกงตอนล่าง. ใน: รายงานการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 2. ภูเก็ต, หน้า WRE21-1-WRE21-8.

อนุกูล บูรณประทีปรัตน์, เผชิญโชค จินตเศรณี. 2555. คุณภาพน้ำทะเลบริเวณปากแม่น้ำบางปะกง พ.ศ. 2545. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา 17: 116–129.

อภิศักดิ์ โพธิ์ปั้น. 2554. ผลกระทบของการรุกล้ำของน้ำทะเลต่อความเค็มของดิน และการใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่ลุ่มน้ำบางปะกง จังหวัดฉะเชิงเทรา. คณะเทคโนโลยีการเกษตร, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. กรุงเทพฯ.

อารียา ฤทธิมา. 2561. เอกสารคำสอน วศยธ 323 อุทกวิทยา. ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยมหิดล. กรุงเทพฯ.

อำนาจ ชิดไธสง. 2563. การประเมินสถานการณ์ความเค็มของน้ำในแม่น้ำและของดินในพื้นที่ลุ่มน้ำบางปะกงและแม่กลองจากการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเล. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. กรุงเทพฯ.

Intergovernmental Panel on Climate Change. 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Cambridge, New York, NY, USA.

Klongvessa, P., Chotpantarat, S. 2022. Determination of rainfall data for direct runoff prediction in monsoon region: A case study in the Upper Yom basin. Natural Hazards 111: 2193–2218.

Sojisuporn, P., Sangmanee, C., Wattayakorn, G. 2013. Recent estimate of sea-level rise in the Gulf of Thailand. Maejo International Journal of Science and Technology 7:106–113.

# การประยุกต์ใช้ข้อมูลจากระบบตรวจสอบพื้นที่ปลูกไม้มีค่าเพื่อการปรับปรุงงานเพาะชำกล้าไม้ของกรมป่าไม้

## Applying data from value tree site-matching system for tree nursery work improvement of Royal Forest Department

**ปัณฑารีย์ แสงไสยาศน์, ชาคริต ณ ตะกั่วทุ่ง*, ลัดดาวรรณ เหรียญตระกูล**
Pantaree Saengsaiyat, Chakrit Na Takuathung*, Laddawan Rianthakool
คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900
Faculty of Forestry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand
*Corresponding author. E-mail address: chakrit.n@ku.ac.th

**บทคัดย่อ**

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลงานเพาะชำกล้าไม้ และข้อมูลความสนใจในการปลูกต้นไม้จากระบบพื้นที่เหมาะสมปลูกไม้มีค่าในแต่ละช่วงเวลา เพื่อใช้เป็นข้อเสนอแนะเพิ่มเติมในการจัดการงานด้านการเพาะชำกล้าไม้ให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น โดยใช้โปรแกรมสารสนเทศภูมิศาสตร์ในการวิเคราะห์ข้อมูลจากงานด้านการเพาะชำกล้าไม้ซึ่งสร้างพื้นที่ความรับผิดชอบจากการ buffer ตามหลักเกณฑ์ที่กำหนด รวมถึงการวิเคราะห์ข้อมูลร่วมกันระหว่างงานด้านการเพาะชำกล้าไม้ และความสนใจในการปลูกต้นไม้จากระบบพื้นที่เหมาะสมปลูกไม้มีค่าเพื่อทราบความสนใจในพื้นที่ความรับผิดชอบของจุดแจกกล้าไม้ และใช้โปรแกรม Microsoft Excel ในการจัดเรียงข้อมูลจากผลการศึกษา พบว่ามีพื้นที่นอกเขตความรับผิดชอบของจุดแจกกล้าไม้ รวมทุกประเภทการใช้ประโยชน์ ทั้งสิ้น 69,661.91 ตารางกิโลเมตร การตรวจสอบพื้นที่ปลูกจากระบบพื้นที่เหมาะสมปลูกไม้มีค่า ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2563 ถึง 9 มีนาคม 2566 รวม 72,123 ครั้ง การวิเคราะห์ข้อมูลจุดแจกกล้าไม้ร่วมกับข้อมูลจากระบบพื้นที่เหมาะสมปลูกไม้มีค่า พบว่าภาคกลางเป็นภาคที่มีการจัดสรรงบประมาณเพื่อเพาะชำกล้าไม้เป็นอันดับ 2 และมีความสนใจปลูกต้นไม้เป็นอันดับที่ 1 ในทางกลับกันภาคใต้มีการจัดสรรงบประมาณเป็นลำดับที่ 4 แต่มีความสนใจปลูกต้นไม้เป็นลำดับที่ 2

**คำสำคัญ**: การเพาะชำกล้าไม้, ความสัมพันธ์, ระบบพื้นที่เหมาะสมปลูกไม้มีค่า

**Abstract**

The research study a relationship between tree nursery work data and interested in growing tree data from value tree site-matching system in each period to suggest and manage the tree nursery work. Data analysis methods is categorizing data by Microsoft Excel and creating a buffer from location of tree nursery operation and count a value of tree site-matching effectively in a buffer of tree nursery operation by GIS. The results of the study found sum outside area of tree nursery operation in Thailand is 69.661.91 sq km. Tree planting interest data from 2020 to 9 March 2023 total 72,123 times. Data from analysis a relationship between tree nursery operation and tree planting interest data from Site-Matching application found that in central region had a second volume of seedling in tree nursery operation area from all and had the most demand of interest data from Site-Matching Application but in southern region had a 4th place of a volume seedling in tree nursery operation area opposite with a demand of interest data from Site-Matching Application is a second form all

**Keywords**: Relationship, Site-matching application, Tree nursery operation

**คำนำ**

นโยบายป่าไม้แห่งชาติ พ.ศ. 2562 ได้มีการกำหนดกรอบนโยบายเพื่อดำเนินการส่งเสริมการพัฒนาทางด้านป่าไม้ โดยความร่วมมือจากภาคเอกชนร่วมด้วย งานด้านการเพาะชำกล้าไม้ จึงมีความสำคัญในการส่งเสริมให้กรมป่าไม้สามารถดำเนินงานตามกรอบนโยบายป่าไม้แห่งชาติที่มีการกำหนดไว้ได้ ศูนย์เพาะชำกล้าไม้ และสถานีเพาะชำกล้าไม้ได้มีการจัดทำแผนการดำเนินการเพาะชำกล้าไม้ เพื่อส่งเสริมการดำเนินการกิจกรรมต่าง ๆ ทั้งภาครัฐและเอกชน แต่เนื่องด้วยงบประมาณที่มีอยู่อย่างจำกัด จึงให้กรมป่าไม้ต้องดำเนินการเพาะชำกล้าไม้ตามที่แต่ละส่วนงานได้จัดทำแผนการดำเนินการเพาะชำกล้าไม้ไว้ ซึ่งอาจจะมีปริมาณที่ไม่เพียงพอต่อความต้องการ รวมถึงอาจมีการเพาะชนิดพันธุ์ไม้ที่เกษตรกรมีความต้องการแต่ไม่เหมาะสมในการดำเนินการปลูกในพื้นที่บริเวณที่ดำเนินการของศูนย์เพาะชำกล้าไม้ หรือสถานีเพาะชำกล้าไม้ นั้น ๆ

ในปัจจุบันกรมป่าไม้ร่วมกับคณะวนศาสตร์ ได้มีการจัดทำระบบพื้นที่เหมาะสมปลูกไม้มีค่า (https://site-matching.forest.go.th/) (สุทัศน์ และคณะ, 2562) เพื่อพัฒนาระบบฐานข้อมูลสำหรับให้เกษตรกร ประชาชน หรือผู้สนใจลงทุนในด้านการปลูกสร้างสวนป่าไม้เศรษฐกิจ สามารถคัดเลือกชนิดพันธุ์ที่เหมาะสมต่อการปลูกในพื้นที่ของตน จากสถิติการใช้งานทำให้ทราบตำแหน่งของจุดตรวจสอบ ซึ่งสะท้อนความสนใจการปลูกต้นไม้ของประชาชน การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ผลการดำเนินงานด้านการเพาะชำกล้าไม้ของจุดแจกกล้าไม้ กรมป่าไม้ ร่วมกับข้อมูลการตรวจสอบจากระบบพื้นที่เหมาะสมปลูกไม้มีค่า ด้านความสอดคล้อง และความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ เพื่อเป็นแนวทางในการจัดทำแผนการดำเนินงานในด้านการเพาะชำกล้าไม้ ให้เหมาะสมกับพื้นที่แต่ละพื้นที่

**อุปกรณ์และวิธีการ**

*อุปกรณ์*

1. ข้อมูลผลการปฏิบัติงานเพาะชำกล้าไม้จากศูนย์เพาะชำกล้าไม้ ในช่วงปีงบประมาณ 2563–2565 โดยรวบรวมจากส่วนผลิตกล้าไม้ สำนักส่งเสริมการปลูกป่า กรมป่าไม้

2. ข้อมูลระบบพื้นที่ปลูกไม้มีค่า (ที่อยู่ https://site-matching.forest.go.th /)

3. อุปกรณ์วิเคราะห์ข้อมูล ได้แก่ คอมพิวเตอร์ ซอฟต์แวร์ที่เกี่ยวข้อง ประกอบด้วย โปรแกรม Microsoft Excel และโปรแกรมสารสนเทศภูมิศาสตร์

*วิธีการ*

*1. เก็บรวบรวมข้อมูล*

1.1 รวบรวมข้อมูลผลการดำเนินงานเพาะชำกล้าไม้ของจุดแจกกล้าไม้ กรมป่าไม้ (ศูนย์เพาะชำกล้าไม้ และสถานีเพาะชำกล้าไม้) ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลชนิดพันธุ์กล้าไม้ ทุกกิจกรรม/โครงการ/แผนงานในแต่ละปีงบประมาณที่จุดแจกกล้าไม้ กรมป่าไม้ แต่ละแห่งผลิต, ข้อมูลจำนวนกล้าไม้แต่ละชนิด ทุกกิจกรรม/โครงการ/แผนงานในแต่ละปีงบประมาณของจุดแจกกล้าไม้ กรมป่าไม้ และข้อมูลพิกัดที่ตั้งของจุดแจกกล้าไม้ ของกรมป่าไม้

1.2 รวบรวมข้อมูลจากระบบพื้นที่ปลูกไม้มีค่า สำนักเศรษฐกิจการป่าไม้ กรมป่าไม้ ที่แสดงผลบนเว็บไซต์ จากที่อยู่ https://site-matching.forest.go.th ซึ่งประกอบด้วยค่าพิกัดของจุดที่มีการตรวจสอบบนเว็บไซต์ ระยะเวลาที่มีการดำเนินการตรวจสอบข้อมูลจากเว็บไซต์จำนวนจุดของการเข้าตรวจสอบพื้นที่ในเว็บไซต์

*2. การวิเคราะห์ข้อมูล*

2.1 วิเคราะห์ข้อมูลด้านการเพาะชำกล้าไม้

สร้างขอบเขตความรับผิดชอบของจุดแจกกล้าไม้ กรมป่าไม้ โดยการพิกัดที่ตั้งของแต่จุดแจกกล้าไม้ มาสร้างชั้นข้อมูล polygon โดยกำหนด buffer รัศมี 100 กิโลเมตร ในกรณีของศูนย์เพาะชำกล้าไม้ และรัศมี 50 กิโลเมตร ในกรณีสถานีเพาะชำกล้าไม้ และจุดแจกกล้าไม้อื่น ๆ จากค่าพิกัดของจุดแจกกล้าไม้ (กรมป่าไม้, 2566) ซึ่งอนุมานพื้นที่ความรับผิดชอบจากหลักเกณฑ์การจัดตั้งสถานีเพาะชำกล้าไม้ และศูนย์เพาะชำกล้าไม้ (กรมป่าไม้, 2564)

ทำการ clip ชั้นข้อมูลจากข้อที่ 1 และชั้นข้อมูลขอบเขตประเทศไทยเพื่อสร้าง polygon ที่แสดงชั้นข้อมูลบริเวณที่ไม่อยู่ในความรับผิดชอบของจุดแจกกล้าไม้ของกรมป่าไม้ พร้อมคำนวนพื้นที่ที่อยู่นอกเขตความรับผิดชอบของจุดแจกกล้าไม้กรมป่าไม้ ร่วมกับพื้นที่ทั้งหมดของภูมิภาคนั้น ๆ

วิเคราะห์ความหนาแน่นของพื้นที่ที่มีการซ้อนทับกันของชั้นข้อมูลที่มีการสร้างขึ้นจากจุดพิกัดของจุดแจกกล้าไม้ กรมป่าไม้ ด้วยชุดคำสั่ง Multipart to single part และเลือกเฉพาะบริเวณที่มีการซ้ำกันตั้งแต่ 2 layer

2.2 วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากจุดตรวจสอบจากระบบพื้นที่ปลูกไม้มีค่า

นำเข้าพิกัดจุดตรวจสอบความเหมาะสมในการปลูกไม้มีค่า วิเคราะห์ช่วงเวลาการเข้าถึงในแต่ละช่วงเดือน และช่วงฤดูกาล เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาระบบพื้นที่ปลูกไม้มีค่า

2.3 วิเคราะห์ข้อมูลร่วมกันระหว่างข้อมูลการดำเนินงานด้านการเพาะชำกล้าไม้ กรมป่าไม้ และข้อมูลจากจุดตรวจสอบจากระบบพื้นที่ไม้มีค่า

นำข้อมูลจากข้อ 1 และข้อ 2 มาซ้อนทับกันโดยใช้ชุดคำสั่ง Count point in Polygon และส่งออกข้อมูลเพื่อวิเคราะห์จุดการเข้าถึงในบริเวณพื้นที่ในความรับผิดชอบ และนอกเขตความรับผิดชอบของจุดแจกกล้าไม้ กรมป่าไม้

**ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง**

*ผลการรวบรวมข้อมูล*

*1. ผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้านการเพาะชำกล้าไม้*

จากการวิเคราะห์การจัดตั้งจุดแจกกล้าไม้ กรมป่าไม้ พบว่าพื้นที่ที่อยู่นอกเขตความรับผิดชอบของจุดจากการวิเคราะห์การจัดตั้งจุดแจกกล้าไม้ กรมป่าไม้พบว่าประเทศไทยพื้นที่ที่อยู่นอกความรับผิดชอบของจุดแจกกล้าไม้ กรมป่าไม้ รวมเนื้อที่ 69,661.91 ตารางกิโลเมตร หรือ 43,538,695 ไร่ 2 งาน 78 ตารางวา โดยภูมิภาคที่มีพื้นที่อยู่นอกความรับผิดชอบของจุดแจกกล้าไม้ กรมป่าไม้ มากที่สุด คือ ภาคตะวันตกโดยมีเนื้อที่ที่อยู่นอกความรับผิดรวม 20,839.35 ตารางกิโลเมตร หรือ 13,024,596 ไร่ 2 งาน 72 ตารางวา ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 38.22 ของพื้นที่ภาคตะวันตก เนื่องจากสภาพภูมิประเทศมีทิวเขาสูงสลับกับหุบเขาแคบ จึงอาจทำให้สภาพพื้นที่ทั่วไปไม่เหมาะกับการจัดตั้งจุดแจกกล้าไม้ โดยทิวเขาวางแนวจากเหนือไปใต้ซึ่งเป็นบริเวณที่อยู่นอกพื้นที่ความรับผิดชอบของจุดแจกกล้าไม้ และมีจำนวนน้อยกว่าด้วยหลักเกณฑ์ที่กรมป่าไม้กำหนด (กรมป่าไม้, 2564) และภูมิภาคที่มีพื้นที่ที่อยู่นอกความรับผิดชอบของจุดแจกกล้าไม้ กรมป่าไม้ น้อยที่สุด คือ ภาคตะวันออก โดยมีเนื้อที่ที่อยู่นอกความรับผิดรวม 1,331.43 ตารางกิโลเมตร หรือ 832,142 ไร่ 3 งาน 30 ตารางวา ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 3.86 ของพื้นที่ภาคตะวันออกทั้งหมด เนื่องจากสภาพภูมิประเทศส่วนใหญ่เป็นที่ราบ และมี

การกระจายของสถานที่ตั้งจุดแจกกล้าไม้มีระยะห่างตามหลักเกณฑ์การจัดตั้ง(กรมป่าไม้, 2564) เมื่อสร้างขอบเขตพื้นที่ความรับผิดชอบจากพิกัดแล้วจึงทำให้มีพื้นที่นอกความรับผิดชอบของจุดแจกกล้าไม้น้อยที่สุด แสดงดัง Table 1

**Table 1** Outside area of Tree Nursery Operation in Thailand

| No | region | Outside area of Tree Nursery Operation in Thailand | | | | Percent |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Square kilometer ($km^2$) | Rai | Ngan | Square Wa | |
| 1 | Central | 7,118.66 | 4,449,163 | 2 | 30 | 7.82 |
| 2 | Western | 20,839.35 | 13,024,596 | 2 | 72 | 38.22 |
| 3 | Eastern | 1,331.43 | 832,142 | 3 | 30 | 3.86 |
| 4 | Northeastern | 15,525.92 | 9,703,700 | 0 | 20 | 9.26 |
| 5 | Southern | 12,532.73 | 7,832,953 | 2 | 11 | 17.40 |
| 6 | Northern | 12,313.82 | 7,696,139 | 0 | 15 | 12.79 |
| Sum | | 69,661.91 | 43,538,695 | 2 | 78 | 13.50 |

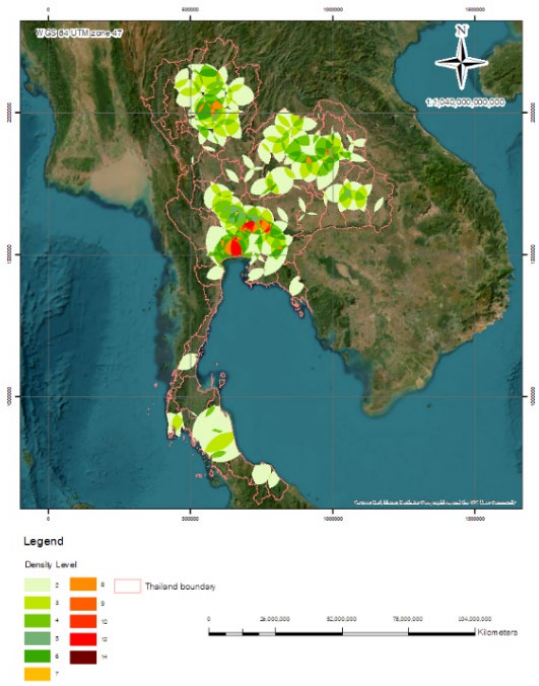



**Fig. 1** Density level of tree nursery operation

จากการวิเคราะห์ขอบเขตความรับผิดชอบของจุดแจกกล้าไม้ กรมป่าไม้ พบว่าในแต่ละเขตความรับผิดมีการซ้อนทับกันระหว่างเขตความรับผิดชอบซึ่งแสดงออกเป็นรายภูมิภาค ดังแสดงใน Fig. 1 ซึ่งในบริเวณภาคกลางมีการซ้อนทับของเขตความรับผิดชอบมากที่สุดถึง 14 ชั้นข้อมูล ในบริเวณจังหวัดสระบุรี รวมที่มีการซ้อนทับในภาคกลางเนื้อที่ 21,973,773.55 ตารางกิโลเมตร หรือ 13,733 ไร่ 2 งาน 43 ตารางวา เนื่องจากภาคกลางมีจำนวนจุดแจกกล้าไม้ต่อพื้นที่ภูมิภาคในสัดส่วนที่มาก รวมถึงในบางจังหวัดมีการจัดตั้งจุดแจกกล้าไม้มากกว่า 1 แห่ง จึงทำให้มีอัตรา

การซ้อนทับกันสูง และบริเวณภาคใต้มีจำนวนการซ้อนทับของเขตความรับผิดชอบของจุดแจกกล้าไม้น้อยที่สุด คิดเป็นเนื้อที่ 2,524,454,418 ตารางกิโลเมตร หรือ 1,577,784 ไร่ 04 ตารางวา เนื่องจากภูมิภาคเป็นการวางตัวตามแนวยาวเมื่อสร้างพื้นที่เขตความรับผิดชอบของจุดแจกกล้าไม้ในรูปแบบวงกลมจึงทำให้เกิดความซ้อนทับกันกว่าภูมิภาคอื่น รวมถึงการจัดตั้งจุดแจกกล้าไม้ในอดีตไม่มีระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์เข้ามาช่วยในการตรวจสอบระยะห่างตามหลักเกณฑ์ให้ครอบคลุมในทุกด้านจึงอาจทำให้เกิดความซ้อนทับของพื้นที่เขตความรับผิดชอบของจุดแจกกล้าไม้ได้

*2. ผลการวิเคราะห์ข้อมูลระบบพื้นที่เหมาะสมปลูกไม้มีค่า*

นำข้อมูลจากระบบพื้นที่เหมาะสมปลูกไม้มีค่ามาวิเคราะห์การเข้าถึงเพื่อทราบช่วงเวลาในการตรวจสอบพื้นที่ต่าง ๆ ดัง Table 2 พบว่าช่วงเดือนที่มีการเข้าถึงในระบบพื้นที่ปลูกไม้มีค่า ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2563–2566 มากที่สุด คือ เดือนกุมภาพันธ์ และน้อยที่สุดในช่วงเดือนตุลาคม โดยปี พ.ศ. ที่มีการเข้าถึงระบบพื้นที่ปลูกไม้มีค่ามากที่สุดคือ ปี พ.ศ. 2565 (ข้อมูล ณ วันที่ 9 มีนาคม 2566) หรือเปรียบเทียบกับฤดูกาลในประเทศไทย ซึ่งแบ่งออกเป็นฤดูร้อน ช่วงกลางเดือนกุมภาพันธ์ถึงประมาณกลางเดือนพฤษภาคม ฤดูฝน กลางเดือนพฤษภาคมถึงประมาณกลางเดือนตุลาคม และฤดูหนาว กลางเดือนตุลาคมถึงประมาณกลางเดือนกุมภาพันธ์ ซึ่งแต่ละฤดูต้องอาศัยช่วงเวลาของมรสุมจึงอนุมานช่วงเวลาโดยเฉลี่ยจากกรมอุตุนิยมวิทยา จาก Fig. 2 แสดงให้เห็นว่าในช่วงฤดูหนาวมีการใช้ระบบพื้นที่ปลูกไม้มีค่า เพื่อตรวจสอบพื้นที่ที่มีความเหมาะสมมากที่สุด และในช่วงฤดูฝน มีการเข้าถึงระบบพื้นที่ปลูกไม้มีค่าน้อยที่สุด จากข้อมูลในช่วงปี พ.ศ. 2563–2566

**Table 2** Number of interests data from Site-matching application

| Year | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | Sum |
|---|---|---|---|---|---|
| Month | number of access | number of access | number of access | number of access | |
| January | 0 | 168 | 3,388 | 1,142 | 4,698 |
| February | 0 | 55 | 16,834 | 915 | 17,804 |
| March | 0 | 330 | 2,820 | 7,470 | 10,620 |
| April | 0 | 7,353 | 1,417 | 0 | 8,770 |
| May | 0 | 3,135 | 2,320 | 0 | 5,455 |
| June | 0 | 2,157 | 1,599 | 0 | 3,756 |
| July | 0 | 1,299 | 1,476 | 0 | 2,775 |
| August | 0 | 1,301 | 1,185 | 0 | 2,486 |
| September | 7 | 4,493 | 899 | 0 | 5,399 |
| October | 167 | 1,094 | 807 | 0 | 2,068 |
| November | 19 | 1,603 | 866 | 0 | 2,488 |
| December | 3,517 | 1,577 | 710 | 0 | 5,804 |
| Sum | 3,710 | 24,565 | 34,321 | 9,527 | 72,123 |

* Data at 9 March 2023

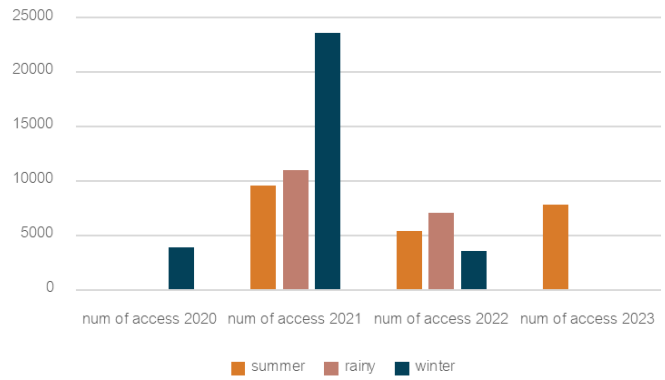



**Fig. 2** Number of interests data from Site-matching application in season of Thailand

*3. ผลการวิเคราะห์ข้อมูลร่วมกันระหว่างข้อมูลการดำเนินงานด้านการเพาะชำกล้าไม้ กรมป่าไม้ และข้อมูลจากจุดตรวจสอบจากระบบพื้นที่ไม้มีค่า (กรมป่าไม้, 2566)*

**Table 3** Number of interests data from Site-matching application in area tree nursery operation

| No | Region | Num of Interests Data from Site-Matching Application in Area Tree Nursery Operation |
|---|---|---|
| 1 | Central | 18,837 |
| 2 | Western | 6,353 |
| 3 | Eastern | 6,208 |
| 4 | Northeastern | 14,114 |
| 5 | Southern | 8,259 |
| 6 | Northern | 12,969 |
| 7 | Interest Data out of area Tree Nursery Operation | 5,383 |
| Sum | | 72,123 |

* Data at 9 March 2023

จาก Table 3 พบว่าภูมิภาคที่มีการเข้าถึงระบบพื้นที่ปลูกไม้มีค่ามากที่สุด คือ ภาคกลาง จำนวน 18,837 จุด และน้อยที่สุด คือ ภาคตะวันออก จำนวน 6,208 จุด และมีการเข้าถึงระบบในพื้นที่ปลูกไม้มีค่าที่อยู่นอกเขตความรับผิดชอบของจุดแจกกล้าไม้ กรมป่าไม้ มากถึงจำนวน 5,383 จุด โดยภูมิภาคที่มีการเข้าถึงระบบนอกเขตความรับผิดชอบของจุดแจกกล้าไม้มากที่สุด คือ ภาคใต้ จำนวน 1,787 จุด ซึ่งสอดคล้องกับพื้นที่นอกเขตความรับผิดชอบของจุดแจกกล้าไม้ที่เมื่อคิดต่อพื้นที่ทั้งภูมิภาคแล้ว ภาคใต้สัดส่วนมากเป็นลำดับที่ 2 จึงอาจทำให้ไม่ครอบคลุมการเข้าถึงในระบบพื้นที่ปลูกไม้มีค่าตามที่แสดงผล และน้อยที่สุด คือ ภาคตะวันออก จำนวน 93 จุด เนื่องจากภาคตะวันออกเป็นพื้นที่ที่มีพื้นที่นอกเขตความรับผิดชอบน้อยที่สุดจึงอาจอนุมานได้มีความต้องการเพียงพอในเขตความรับผิดชอบของจุดแจกกล้าไม้ นอกจากนี้ยังมีจุดที่ไม่ได้อยู่ในขอบเขตประเทศไทย จำนวน 85 จุด ซึ่งอาจเกิดจากความคลาดเคลื่อนในการเข้าตรวจสอบระบบพื้นที่ปลูกไม้มีค่า

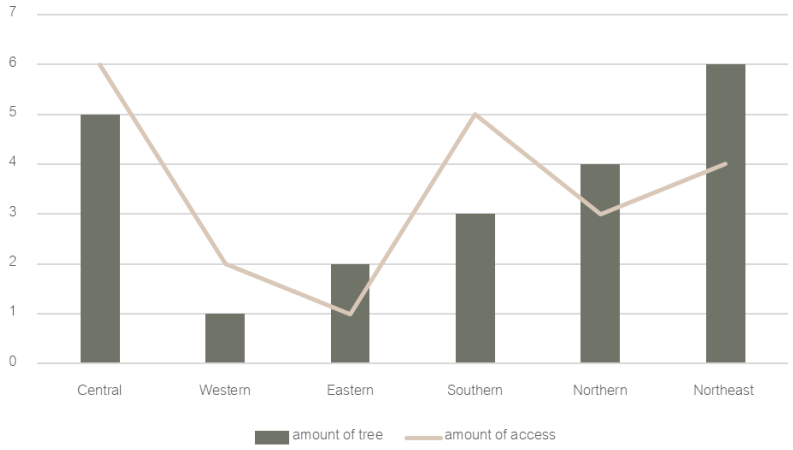



**Fig. 3** Compare a number of tree in tree nursery operation with number of data interest from Site-matching application

จาก Fig. 3 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างจำนวนกล้าไม้ที่จุดแจกกล้าไม้ผลิต และจำนวนการเข้าถึงจากระบบพื้นที่ปลูกไม้มีค่า พบว่าภาคตะวันออกเฉียงเหนือได้รับงบประมาณเพื่อเพาะชำกล้าไม้เป็นอันดับที่ 1 แต่มีความต้องการจากระบบพื้นที่ปลูกไม้มีค่าอยู่ที่อันดับที่ 3 ภาคกลางได้รับการจัดสรรงบประมาณเพื่อเพาะชำกล้าไม้เป็นอันดับที่ 2 และมีการเข้าถึงระบบพื้นที่ปลูกไม้มีค่าในบริเวณภาคกลางมากที่สุดเป็นอันดับ 1 มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกันแสดงให้เห็นถึงการจัดสรรงบประมาณเพื่อสนับสนุนความต้องการในพื้นที่ที่มีความต้องการมากได้อย่างเหมาะสม ภาคเหนือได้รับการจัดสรรงบประมาณเพื่อเพาะชำกล้าไม้เป็นอันดับที่ 3 มีการเข้าถึงระบบพื้นที่ปลูกไม้มีค่าในบริเวณภาคเหนือเป็นอันดับที่ 4 ภาคใต้ได้รับการจัดสรรงบประมาณเพื่อเพาะชำกล้าไม้เป็นอันดับที่ 4 แต่มีการเข้าถึงระบบพื้นที่ปลูกไม้มีค่าในบริเวณภาคใต้มากเป็นอันดับที่ 2 เพื่อให้เป็นไปตามความต้องการที่สำรวจได้จากการเข้าถึงระบบพื้นที่เหมาะสมปลูกไม้มีค่าควรมีการจัดสรรงบประมาณให้ใกล้เคียงกับบริเวณที่มีความต้องการในภูมิภาคมากขึ้น ภาคตะวันออก ได้รับการจัดสรรงบประมาณเพื่อเพาะชำกล้าไม้เป็นอันดับที่ 5 และมีการเข้าถึงระบบพื้นที่ปลูกไม้มีค่าน้อยที่สุดเป็นอันดับที่ 6 และภาคตะวันตกได้รับการจัดสรรงบประมาณเพื่อเพาะชำกล้าไม้เป็นอันดับที่ 6 และมีการเข้าถึงระบบพื้นที่ปลูกไม้มีค่าเป็นอันดับที่ 5

## สรุป

จากการศึกษาจุดแจกกล้าไม้ กรมป่าไม้ พบว่าพื้นที่นอกเขตความรับผิดชอบของจุดแจกกล้าไม้รวมทั้งประเทศ มีเนื้อที่ 69,661.91 ตารางกิโลเมตร หรือ 43,538,695 ไร่ 2 งาน 78 ตารางวา และมีพื้นที่ซ้อนทับระหว่างแต่ละจุดเพาะชำกล้าไม้มากที่สุด 14 ชั้นข้อมูล ในบริเวณจังหวัดสระบุรี จากข้อมูลการเข้าถึงระบบพื้นที่เหมาะสมปลูกไม้มีค่า พบว่าช่วงเดือนที่มีการเข้าถึงในระบบพื้นที่ปลูกไม้มีค่า ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2563–2566 รวมกว่า 72,123 ครั้ง (ข้อมูล ณ วันที่ 9 มีนาคม 2566) และเมื่อรวมในรายปีพบว่ามีการเข้าถึงระบบเพิ่มมากขึ้นทุกปีในช่วงเวลาเดียวกัน และเมื่อแบ่งช่วงเดือนออกเป็นฤดูกาลตามช่วงเวลาที่กรมอุตุนิยมวิทยาคาดการณ์จะพบว่าจากสถิต 3 ปี (พ.ศ. 2563–2566) ฤดูหนาวมีการเข้าถึงระบบพื้นที่เหมาะสมปลูกไม้มีค่ามากที่สุด และเมื่อนำข้อมูลจากจุดแจกกล้าไม้ กรมป่าไม้ มาวิเคราะห์ร่วมกับข้อมูลจากระบบพื้นที่เหมาะสมปลูกไม้มีค่าแสดงให้เห็นว่าภาคกลางเป็นภาคที่มีการจัดสรรงบประมาณเพื่อเพาะชำกล้าไม้ได้เหมาะสมกับความต้องการกล้าไม้ซึ่งสำรวจจากระบบพื้นที่เหมาะสมปลูกไม้มีค่า และภาคใต้เป็นภาคที่ต้องมีการจัดสรรงบประมาณให้เหมาะสมกับบริเวณที่มีความต้องการสูงจากการเข้าใช้ระบบพื้นที่เหมาะสมปลูกไม้มีค่า ดังนั้นเพื่อให้ระบบพื้นที่เหมาะสม

ปลูกไม้มีค่าสามารถใช้ได้อย่างเต็มประสิทธิภาพควรมีการประชาสัมพันธ์ระบบพื้นที่เหมาะสมปลูกไม้มีค่า รวมถึงเก็บข้อมูลให้เป็นปัจจุบัน เพื่อให้ผลการวิเคราะห์มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้กรมป่าไม้ยังสามารถใช้ประโยชน์จากระบบพื้นที่เหมาะสมปลูกไม้มีค่า โดยการให้จุดแจกกล้าไม้แต่ละแห่งสามารถเลือกชนิดพันธุ์กล้าไม้จากระบบพื้นที่เหมาะสมในบริเวณที่จุดแจกกล้าไม้นั้นตั้งอยู่ เพื่อให้การดำเนินงานของกรมป่าไม้ และระบบพื้นที่เหมาะสมปลูกไม้มีค่ามีการทำงานที่สอดรับกันและสะดวกต่อผู้เข้าใช้ระบบพื้นที่เหมาะสมปลูกไม้มีค่า

**เอกสารอ้างอิง**

กรมป่าไม้. 2564. ขออนุมัติแก้ไขเพิ่มเติมหลักเกณฑ์การตรวจสอบพื้นที่ขอจัดตั้งศูนย์เพาะชำกล้าไม้ สถานีเพาะชำกล้าไม้ และกำหนดหน้าที่รับผิดชอบของศูนย์เพาะชำกล้าไม้ สถานีชำกล้าไม้. 2 กรกฎาคม 2564.

กรมป่าไม้. หน่วยงานที่ติดต่อขอรับกล้าไม้. 2566. https://www.forest.go.th/nursery/requestseedling/seedlingnurserylocation/, 7 ตุลาคม 2566.

สุทัศน์ เล้าสกุล, วรพรรณ หิมพานต์, ชาคริต ณ ตะก่ัวทุ่ง, สุวรรณ ตั้งมิตรเจริญ, อังคณา ทองคำ, จักรี มีแลบ. 2562. รายงานการวิจัย การพัฒนาฐานข้อมูลชนิดไม้มีค่าที่เหมาะสมกับสภาพพื้นที่ พ.ศ. 2562. กรมป่าไม้, กรุงเทพฯ.

# การพัฒนาฐานข้อมูลเพื่อยกระดับการจัดการเสือโคร่งในกรงเลี้ยงในประเทศไทย

## Database development for enhancing captive tiger management in Thailand

**ทศพร ลักขณาศรี, ชาคริต ณ ตะกั่วทุ่ง, ขรรค์ชัย ประสานัย, เดชฤทธิ์ สิทธิบาล**

Thodsaphon Lakkanasri, Chakrit Na Takuathung, Khanchai Prasanai[a], Detrit Sittibal

ภาควิชาวิศวกรรมป่าไม้ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Forest Engineering, Faculty of Forestry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: thodsaphon.la@ku.th

**บทคัดย่อ**

การเลี้ยงเสือโคร่งในประเทศไทย ต้องมีการขึ้นทะเบียนกับกรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช โดยแจ้งคำร้องให้เจ้าหน้าที่ทราบเพื่อตรวจสอบ เดิมใช้วิธีแจ้งกับสำนักบริหารพื้นที่อนุรักษ์ใกล้เคียงที่รับผิดชอบ หรือสายด่วน 1362 และส่งแบบฟอร์มทั้งเป็นอิเล็กทรอนิกส์หรือกระดาษให้กรมอุทยานแห่งชาติฯ ซึ่งใช้เวลาและหลายขั้นตอน เพื่ออำนวยความสะดวกให้กับผู้แจ้งคำร้องและเจ้าหน้าที่ และการจัดเก็บข้อมูลให้เป็นระบบมากขึ้น การจัดทำฐานข้อมูลในครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาฐานข้อมูล และพัฒนาระบบบริหารจัดการเสือโคร่งในกรงเลี้ยง โดยใช้ภาษาต่าง ๆ เช่น HTML, CSS, PHP และ SQL เป็นต้น ในการพัฒนา และใช้โปรแกรม MySQL ในการจัดการฐานข้อมูล ผลการวิจัยด้านการออกแบบและพัฒนาฐานข้อมูล พบว่า ฐานข้อมูลประกอบด้วยตารางเก็บข้อมูล 18 ตาราง ส่วนติดต่อผู้ใช้ประกอบไปด้วย 7 ส่วนใหญ่ ๆ เมื่อผู้ใช้งานทั่วไปได้ลงทะเบียนและเข้าสู่ระบบ สามารถเข้าถึงได้เพียงหน้าหลัก และหน้าแจ้งคำร้องเท่านั้น หากบัญชีที่เข้าใช้คือเจ้าหน้าที่ จะสามารถเข้าถึง หน้าสำหรับเจ้าหน้าที่ และหน้าสรุปรายงานเพิ่มเติมได้ เมื่อให้เจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องกับงานด้านเสือโคร่ง ได้ทดลองใช้งานฐานข้อมูล พบว่าการใช้งานฐานข้อมูลนี้มีความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก

**คำสำคัญ**: ฐานข้อมูล, โปรแกรมประยุกต์บนเว็บ, แผนที่ออนไลน์, เสือโคร่ง

**Abstract**

Raising tigers in Thailand requires registration with the Department of National Parks, Wildlife and Plant Conservation (DNP). Tiger owners must submit applications data to the officer and let them verify. Initially, submissions were made at Protected Area Regional Office or through the emergency hotline 1362, followed by the transfer of forms, either as an electronic document or paper document to the DNP. This process involved multiple steps and time-consuming, In order to facilitate the tiger owners and the work of the DNP more systematic, the objective of the research was to develop a database and management system for tigers in captivity using various languages such as HTML, CSS, PHP, and SQL. MySQL was employed for database management. The research revealed that the database comprised 18 tables, while the user interface consisted of seven main sections. Registered users able to access the homepage and notification page, while authorized officials have additional access to dedicated officer pages and summary reports. After testing this database with officers involved in tigers, it was found that overall satisfaction was high.

**Keywords**: Database, Tigers, Web application, Web mapping

**คำนำ**

จากการลดลงของประชากรเสือโคร่งอย่างมาก และการสูญพันธุ์ของชนิดพันธุ์ย่อยจนปัจจุบันเหลือเพียง 6 ชนิดพันธุ์ย่อย (มูลนิธิสืบนาคะเสถียร, 2560) จึงทำให้ต้องมีการอนุรักษ์เสือโคร่งขึ้นในหลายพื้นที่ เช่น โครงการความร่วมมือระหว่างอุทยานแห่งชาติกุยบุรี กรมอุทยานแห่งชาติสัตว์ป่า และพันธุ์พืช และองค์การกองทุนสัตว์ป่าโลกสากล (World Wide Fund for Nature : WWF) ประเทศไทย เพื่อสำรวจประชากรเสือโคร่งและสัตว์ที่เป็นเสือโคร่ง (WWF, 2009) ในปัจจุบัน เสือโคร่งพบได้เพียง 13 ประเทศ ซึ่งรวมประเทศไทย แต่ประชากรเสือโคร่งที่มีอยู่ในประเทศไทยพบจำนวน 148–189 ตัว ในป่าธรรมชาติ (กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช, 2567) อนุสัญญาว่าด้วยการค้าระหว่างประเทศซึ่งชนิดสัตว์ป่าและพืชป่าที่ใกล้สูญพันธุ์ (The Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora: CITES) จึงกำหนดให้เสือโคร่งอยู่ในบัญชีที่ 1 คือ ชนิดพันธุ์ที่ใกล้สูญพันธุ์ ห้ามทำการค้าโดยเด็ดขาด (CITES, 2022)

แต่ยังมีประชากรเสือโคร่งบางส่วนที่อาศัยอยู่ในกรงเลี้ยง ไม่ว่า กรมอุทยานแห่งชาติฯ สวนสัตว์เอกชน สวนสัตว์ของหน่วยงานรัฐ หน่วยงานอื่น ๆ หรือแม้แต่จากส่วนบุคคลก็ตาม การเก็บข้อมูลจึงมีทั้งเอกสารอิเล็กทรอนิกส์และกระดาษ รูปแบบเอกสารไม่ได้มีลักษณะไปในทางเดียวกัน ทำให้การสืบค้นข้อมูลเสือโคร่งนั้นเป็นไปได้ยากยิ่งขึ้น เนื่องจากเอกสารที่มีอยู่ มีข้อมูลไม่ครบถ้วนสมบูรณ์ การนับจำนวนจริงของเสือโคร่งจึงยากยิ่งขึ้น หากมีฐานข้อมูลที่หน่วยงานที่เกี่ยวข้องสามารถเข้าใช้งานได้ การทำงานต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นการแจ้งการเกิด ตาย โอนย้าย การตรวจสอบ การเก็บตัวอย่างพันธุกรรม คดีที่เกี่ยวข้องกับเสือโคร่ง การสรุปสถิติรายงานผล ก็จะเป็นไปในแนวทางเดียวกัน การควบคุมและตรวจสอบการครอบครองเสือโคร่งในกรงเลี้ยงสำหรับเจ้าหน้าที่วางแผนได้ง่ายขึ้น

การพัฒนาฐานเสือโคร่งในกรงเลี้ยงในครั้งนี้จัดทำขึ้นบนเว็บไซต์ฐานข้อมูล โดยอาศัยการพัฒนาฐานข้อมูล MySQL ซึ่งเป็นฐานข้อมูลที่เก็บรวบรวมข้อมูลในรูปแบบตาราง โดยการแบ่งข้อมูลเป็นแถว และในแต่ละแถวแบ่งออกเป็นคอลัมภ์ เพื่อเชื่อมโยงระหว่างข้อมูลในตารางกับข้อมูลในคอลัมภ์ที่กำหนด แทนการเก็บข้อมูลที่แยกออกจากกัน โดยไม่มีความเชื่อโยงกัน นอกจากนี้เป็นฐานข้อมูลที่เข้าถึงได้โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย อีกทั้งยังใช้การอย่างแพร่หลาย (Letkowski, 2014) โดยฐานข้อมูลดังกล่าวจะรวบรวมข้อมูลเสือโคร่งเดิมที่มีอยู่แล้ว และสามารถเพิ่มข้อมูลเสือที่มีการเกิดใหม่ได้ และยังตรวจสอบได้ว่า เสือโคร่งนั้นอยู่ในการครอบครองของหน่วยงานใด และฐานข้อมูลนี้ยังมีข้อมูลอื่น ๆ เช่น ข้อมูลรหัสพันธุกรรม ข้อมูลการโอนย้ายเสือโคร่ง ข้อมูลการกระทำผิดเกี่ยวกับเสือโคร่ง เป็นต้น อีกทั้งยังมีการแสดงผลในรูปแบบแผนที่ออนไลน์ ที่แสดงตำแหน่งสถานที่ที่ครอบครองเสือโคร่งอีกด้วย

**อุปกรณ์และวิธีการ**

*อุปกรณ์*

ในการพัฒนาข้อมูลประกอบไปด้วย 1) เครื่องคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก 2) เว็บเบาร์เซอร์ Google Chrome 3) โปรแกรมจำลอง Web server (AppServ) 4) โปรแกรม Microsoft Visual Studio Code 5) โปรแกรมจัดการฐานข้อมูล MySQL 6) โปรแกรม FileZilla 7) โปรแกรม Microsoft office และ 8) ข้อมูลเสือโคร่งในกรงเลี้ยงและซากเสือโคร่ง

*วิธีการ*

*ค้นคว้าและรวบรวมข้อมูลเสือโคร่งในกรงเลี้ยง*

ข้อมูลที่จัดเก็บ เช่น ข้อมูลประจำตัวเสือโคร่ง ข้อมูลภาพถ่ายลวดลาย ข้อมูลรหัสพันธุกรรม ข้อมูลการแจ้งเปลี่ยนโอนย้าย ข้อมูลการตรวจสอบการครอบครอง ข้อมูลแผนการควบคุมประชากร ข้อมูลการครอบครองซาก เป็นต้น

*ออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้*

สำหรับผู้ใช้สามารถใช้งานฐานข้อมูลได้สะดวก ประกอบด้วย หน้าแรก หน้าลงทะเบียนและเข้าสู่ระบบ หน้าแสดงผล หน้าแบบฟอร์มการกรอกข้อมูล และหน้าสรุปข้อมูล

*ออกแบบฐานข้อมูล*

สำหรับเก็บข้อมูลและแสดงผล ประกอบไปด้วย ตารางกิจกรรม การแจ้งคำร้อง การแจ้งคำร้องเกิด การแจ้งคำร้องตายและโอนย้าย เสือที่รับรอง ซากเสือ ทำลายเสือ สถานที่ การครอบครอง การนำตรวจ การโอนย้าย พันธุกรรม คดี ของกลางคดี ผู้ต้องหาคดี ประวัติการเข้าใช้ รายชื่อผู้ลงทะเบียน และรายชื่อผู้ลงทะเบียนที่เปลี่ยนแปลงข้อมูล

*การสร้างฐานข้อมูล*

ออกแบบแบบจำลองที่ใช้อธิบายโครงสร้างของฐานข้อมูล (ER-diagram) จากนั้นทำการเขียนเว็บไซต์ฐานข้อมูล โดยใช้โปรแกรม Microsoft Visual Studio Code เพื่อสร้างเป็นเว็บไซต์ฐานข้อมูล ซึ่งภาษาที่ใช้เขียนได้แก่ HTML, CSS, PHP, SQL เป็นต้น และทำการทดสอบเว็บไซต์และนำขึ้นบนเซิร์ฟเวอร์เพื่อการใช้งาน

*ประเมินการใช้งานฐานข้อมูล*

โดยกลุ่มตัวอย่างเป็นเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องกับงานด้านเสือโคร่ง เช่น เจ้าหน้าที่รับผิดชอบงานด้านการแจ้งครอบครองสัตว์ป่าคุ้มครองแต่ละสำนักบริหารพื้นที่อนุรักษ์ เจ้าหน้าที่ปฏิบัติงานสถานีเพาะเลี้ยงสัตว์ป่า เจ้าหน้าที่ศูนย์ช่วยเหลือ เจ้าหน้าที่ศูนย์นิติวิทยาศาสตร์ เจ้าหน้าที่ศูนย์ข้อมูลอาชญากรรม จำนวน 16 คน โดยให้ทดลองใช้งานฐานข้อมูล และทำแบบประเมินความพึงพอใจ จาก Google form จำแนกความพึงพอใจไว้ 5 ระดับ คือ มากที่สุด มาก ปานกลาง น้อย และน้อยที่สุด ทำการวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เพื่อแปลความหมายผลการวิเคราะห์

**ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง**

*การออกแบบฐานข้อมูล*

จากการรวบรวมข้อมูลเสือโคร่งเพื่อพัฒนาฐานข้อมูลเสือโคร่งในกรงเลี้ยงได้สร้างความสัมพันธ์ ER-Diagram โดยมีตารางเก็บข้อมูลทั้งหมด 18 ตาราง มีการเชื่อมโยงความสัมพันธ์ดัง Fig. 1

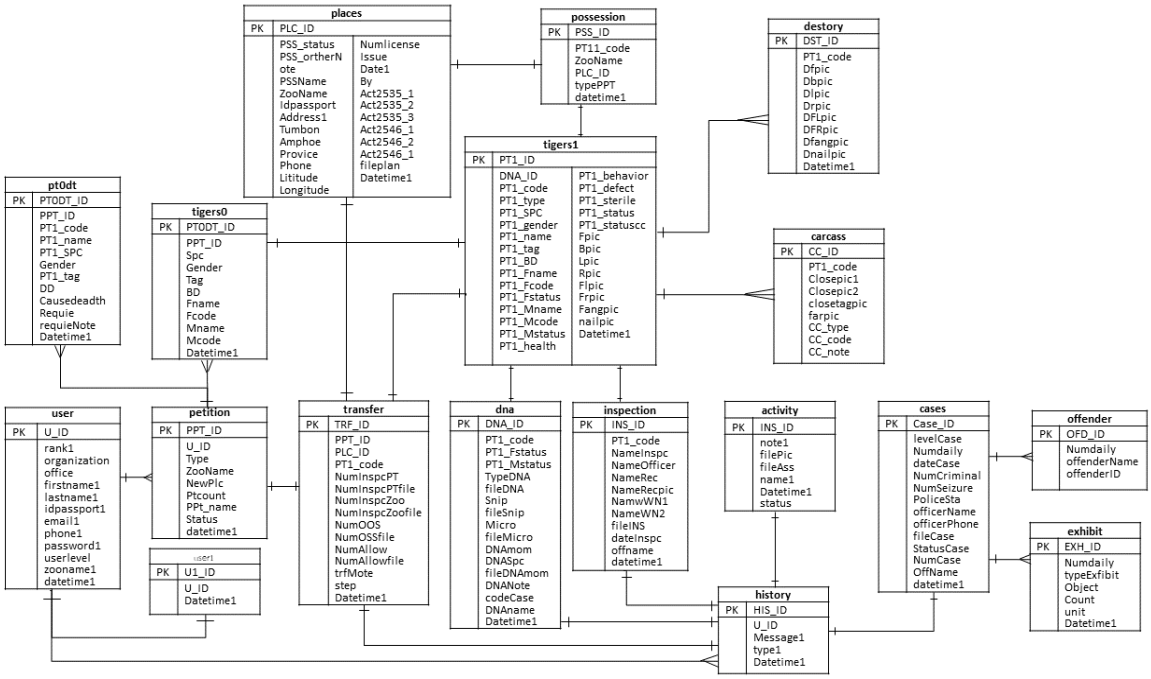



**Fig. 1** ER-Diagram of the constructed database

ซึ่งลำดับการใช้งานฐานข้อมูล (Fig. 2) คือ ลงทะเบียนเข้าใช้งานฐานข้อมูลนี้ โดยมีผู้ดูแลฐานข้อมูลคอยตรวจสอบ หากเป็นผู้ใช้งานทั่วไปจะเข้าถึงได้เพียงหน้าหลัก ซึ่งจะแสดงข้อมูลเบื้องต้น เช่น ตำแหน่งที่ตั้งของสถานที่จำนวนเสือโคร่งทั้งหมด สถานที่ครอบครองทั้งหมดที่มีในฐานข้อมูล เป็นต้น และหน้าแจ้งคำร้อง สำหรับบุคคลหรือหน่วยงานที่มีการครอบครองเสือโคร่ง ที่ต้องการแจ้งคำร้องให้เจ้าหน้าที่ตรวจสอบ ในกรณีที่มีเสือโคร่งเกิด กรอกข้อมูลในเมนูการเกิด กรณีเสือโคร่งตาย กรอกข้อมูลเมนูการตาย และหากต้องการโอนย้ายเสือโคร่ง กรอกข้อมูลในหน้าการโอนย้าย เมื่อกรอกข้อมูลครบถ้วนแล้ว คำร้องจะถูกส่งไปยังหน้าสำหรับเจ้าหน้าที่ ในเมนูการแจ้งเตือน เมื่อเจ้าหน้าที่รับเรื่องแล้ว จะไปตรวจสอบในพื้นที่ต่อไป สำหรับบัญชีที่เป็นเจ้าหน้าที่ สามารถเข้ามายังหน้าสำหรับเจ้าหน้าที่ และหน้าสรุปรายงานได้ โดยหน้าสำหรับเจ้าหน้าที่จะเป็นหน้าสำหรับการกรอกข้อมูลต่าง ๆ แบ่งเป็น 6 เมนู คือ 1) อัตลักษณ์ สำหรับกรอกข้อมูลอัตลักษณ์เสือโคร่ง 2) การโอนย้าย สำหรับกรอกข้อมูลการโอนย้ายของเสือโคร่ง 3) พันธุกรรม สำหรับที่กรอกข้อมูลพันธุกรรมเพื่อระบุพันธุกรรมของเสือโคร่งนั้น ๆ 4) คดี เป็นส่วนที่กรอกข้อมูลกระทำความผิดเกี่ยวกับเสือโคร่ง 5) การตรวจ เป็นส่วนที่ต้องการนำเสนอเช่น การลงพื้นที่ตรวจสอบ การประชุมต่าง ๆ เป็นต้น และ 6) การแจ้งเตือน แจ้งเตือนรายละเอียดต่าง ๆ เช่น ประวัติการกรอกข้อมูลของเจ้าหน้าที่ การแจ้งเตือนเมื่อรูปภาพเสือโคร่งครบ 2 ปี เพื่อเปลี่ยนรูปภาพใหม่ การแจ้งเตือนของคำร้องจากหน้าแจ้งคำร้อง และประวัติการเข้าใช้ระบบของผู้ใช้ทั้งหมด สำหรับหน้าสรุปรายงาน เป็นหน้าสรุปข้อมูลต่าง ๆ ที่เจ้าหน้าที่ได้กรอกข้อมูลจากหน้าสำหรับเจ้าหน้าที่ โดยจะแสดงข้อมูลในรูปแบบกราฟและรูปแบบตาราง ซึ่งประกอบไปด้วย 8 เมนู คือ 1) เมนูทั้งหมด 2) เมนูส่วนบุคคล 3) เมนูสวนสัตว์เอกชน 4) เมนูสวนสัตว์ของหน่วยงานรัฐ 5) เมนูกรมอุทยานแห่งชาติ 6) เมนูหน่วยงานรัฐอื่น ๆ 7) เมนูพันธุกรรม และ 8) เมนูคดี โดยที่ 1) เมนูทั้งหมดยังสามารถดูรายละเอียดเสือโคร่งทั้งหมดเป็นรายตัวและสามารถอัพเดตข้อมูลเสือโคร่งตัวนั้น ๆ ได้ และเมนูที่ 8) ก็สามารถดูรายละเอียดทั้งหมดของคดีเป็นรายคดีโดยที่สามารถอัพเดตข้อมูลคดีนั้น ๆ ได้เช่นกัน

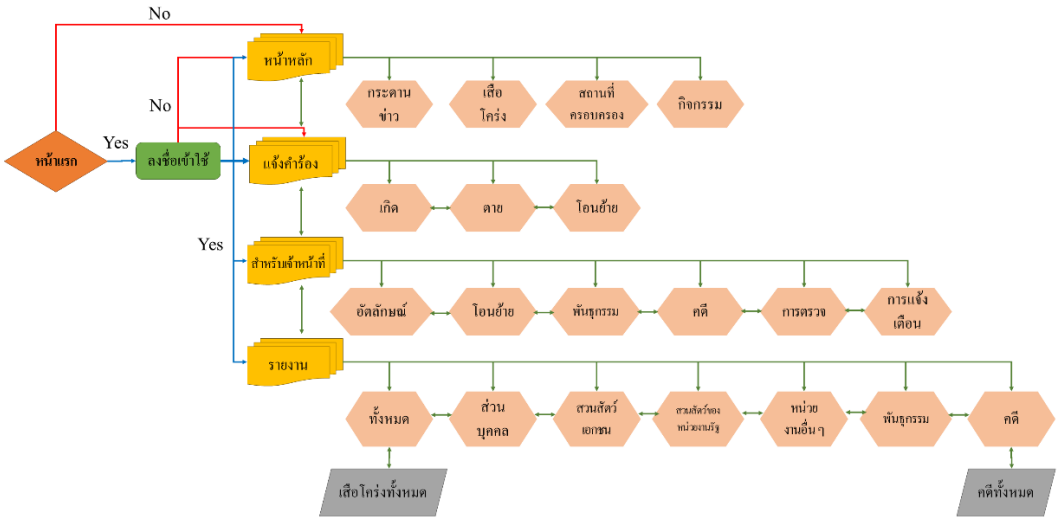



**Fig. 2** The structure of the website database

*ส่วนติดต่อผู้ใช้*

หน้าแรก (Fig. 3) เป็นหน้าสำหรับบ่งบอกถึงชื่อของเว็บไซต์ฐานข้อมูล และเป็นหน้าสำหรับเข้าหน้าหลักและเข้าสู่ระบบ

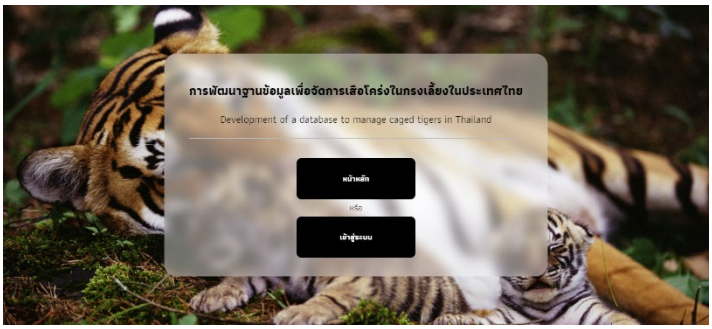



**Fig. 3** Homepage of captive tiger database website

หน้าลงทะเบียน (Fig. 4) เป็นหน้าสำหรับลงทะเบียนเพื่อเข้าใช้ฐานเว็บไซต์ฐานข้อมูล หากลงทะเบียนแล้วเข้าสู่ระบบจะสามารถใช้งานได้เพียงหน้าหลักและหน้าแจ้งคำร้อง หากตรวจสอบว่าชื่อที่ลงทะเบียนเป็นเจ้าหน้าที่จะปรับสิทธิให้สามารถใช้งานหน้าสำหรับเจ้าหน้าที่และหน้าสรุปรายงานเพิ่มเติมได้

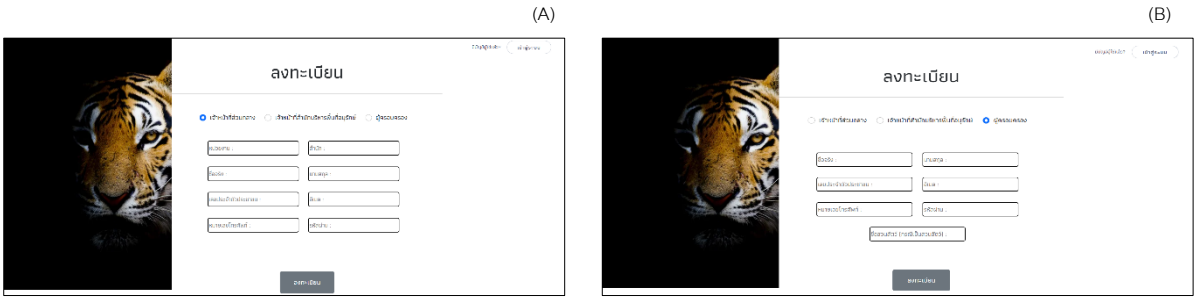



**Fig. 4** Register page of website captive tiger database: (A) For officer; (B) For personal

หน้าเข้าสู่ระบบ (Fig. 5)เป็นหน้าสำหรับเข้ากรอกข้อมูลเลขบัตรประชาชนและรหัสผ่านเพื่อเข้าสู่ระบบเว็บไซต์ฐานข้อมูล

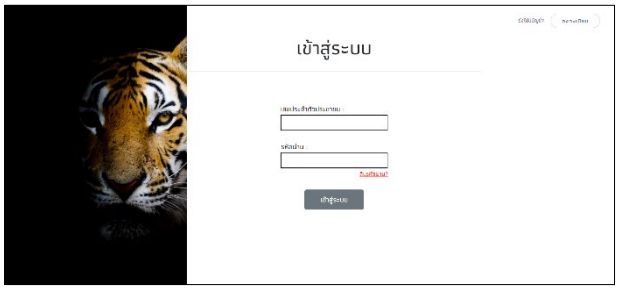



**Fig. 5** Login page of website captive tiger database

หน้าหลัก (Fig. 6) เป็นหน้าที่แสดงผลข้อมูลเบื้องต้น จะประกอบด้วยแผนที่แสดงตำแหน่งสถานที่ที่มีการครอบครองเสือโคร่ง อีกทั้งยังมีเมนูกระดานข่าว เป็นส่วนที่บอกภารกิจต่าง ๆ ที่ได้ทำ เมนูเสือโคร่ง เป็นส่วนที่บอกจำนวนเสือโคร่งทั้งหมด และแยกตามชนิดพันธุ์ ทั้งยังมีกราฟเส้นที่แสดงจำนวนตามชนิดพันธุ์ในปีปัจจุบัน และตารางที่แสดงรายชื่อเสือโคร่งทั้งหมด เมนูสถานที่ครอบครอง เป็นส่วนที่บอกจำนวนสถานที่ที่ครอบครองเสือโคร่งทั้งหมด และแบ่งตามประเภทการครอบครองทั้ง 5 ประเภท คือ ส่วนบุคคล สวนสัตว์เอกชน สวนสัตว์ของหน่วยงานรัฐ กรมอุทยานแห่งชาติฯ และหน่วยงานรัฐอื่น ๆ ทั้งยังมีกราฟแท่งแสดงจำนวนสถานที่ครอบครองตามประเภทในปีปัจจุบัน และตารางบอกจำนวนเสือโคร่งตามสถานที่ครอบครอง ทั้ง 5 ประเภท และเมนูกิจกรรม เป็นส่วนที่บอกกิจกรรมทั้งหมด โดยแบ่งเป็นการแจ้งคำร้อง คดี และการตรวจ ทั้งยังมีกราฟเส้นที่บอกจำนวนของแต่ละกิจกรรมในปัจจุบัน และปฏิทินที่แสดงแต่ละวันมีการทำกิจกรรมใดบ้าง

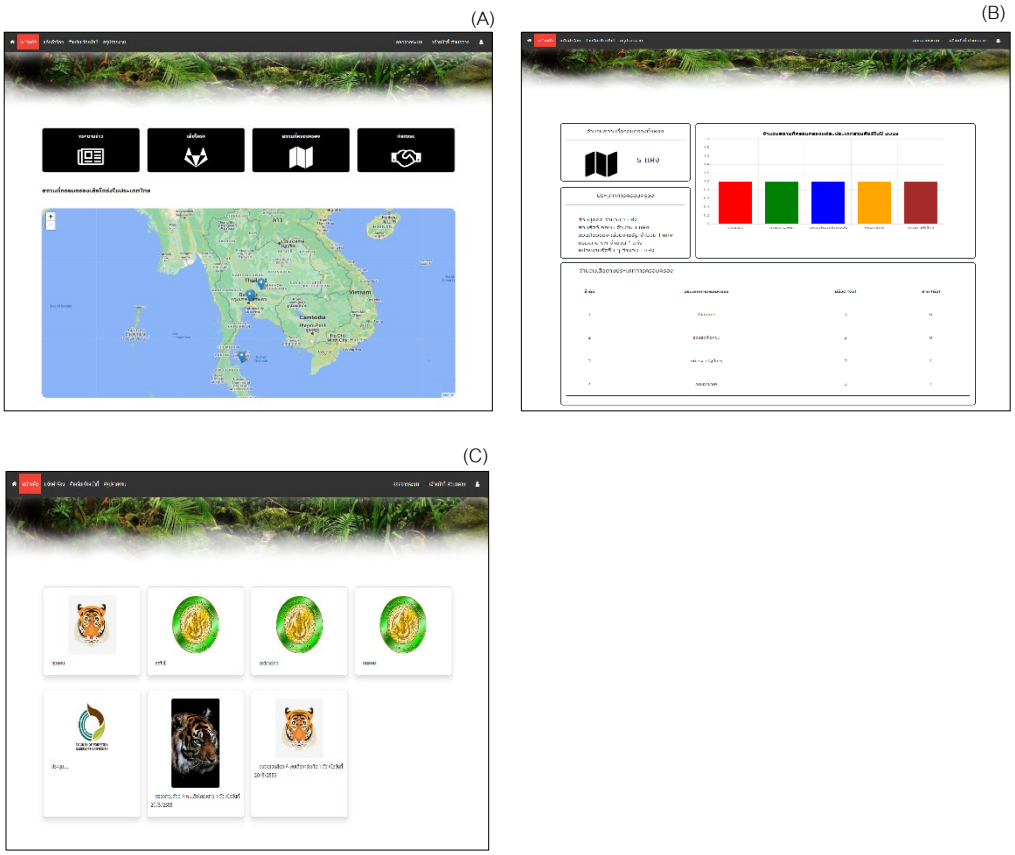



**Fig. 6** Example of main page: (A) Location of the place on the map; (B) News menu, (C) Place menu

หน้าการแจ้งคำร้อง (Fig. 7) เป็นหน้าสำหรับการแจ้งคำร้องประกอบไปด้วย 3 เมนู คือ 1) การเกิด ในกรณีที่เสือโคร่งเกิด 2) การตาย ในกรณีที่เสือโคร่งตาย และ 3) การโอนย้าย ในกรณีที่เสือโคร่งมีการโอนย้าย

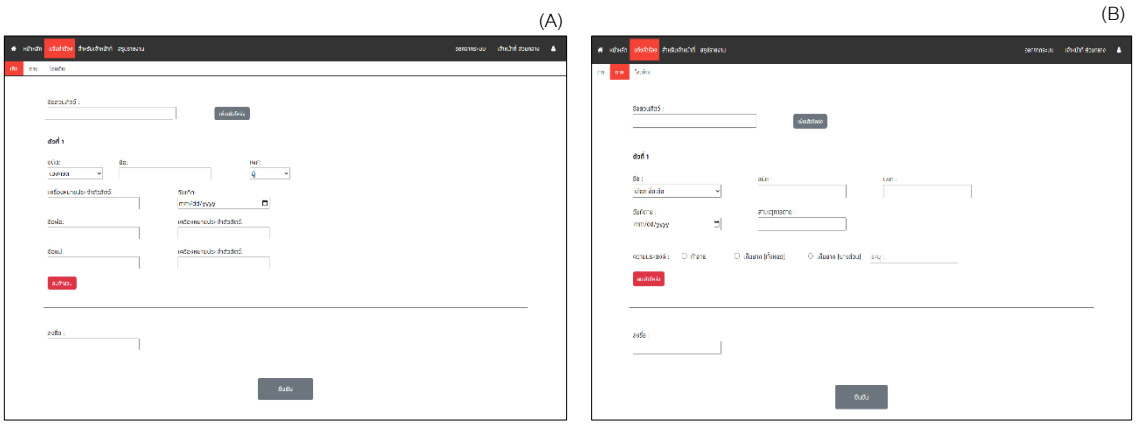



**Fig. 7** Example form submission page: (A) Form birth; (B) Form death

หน้าสำหรับเจ้าหน้าที่ (Fig. 8) เป็นหน้าสำหรับเจ้าหน้าที่ในการกรอกข้อมูล ประกอบไปด้วย 6 เมนู คือ 1) อัตลักษณ์ สำหรับกรอกข้อมูลเสือที่ได้รับข้อมูลจากการแจ้งคำร้องเกิดและตาย และลงพื้นที่ตรวจสอบเรียบร้อยแล้ว 2) โอนย้าย สำหรับกรอกข้อมูลที่ได้รับจากการแจ้งคำร้องโอนย้าย และลงพื้นที่ตรวจสอบเรียบร้อยแล้ว 3) พันธุกรรม

สำหรับกรอกข้อมูลพันธุกรรมของเสือโคร่งตัวนั้น ๆ 4) คดี สำหรับกรอกข้อมูลที่มีการกระทำความผิดที่เกี่ยวข้องกับเสือโคร่ง 5) การตรวจ สำหรับการกรอกข้อมูลการลงพื้นที่ หรือการประชุมต่าง ๆ ซึ่งจะปรากฏไปยังหน้ากระดานข่าว และ 6) การแจ้งเตือน สำหรับแจ้งเตือนถึงผู้ที่เข้าระบบใช้งาน การแจ้งคำร้องต่าง ๆ แจ้งประวัติผู้ที่กรอกข้อมูล และแจ้งเตือนเปลี่ยนรูปภาพเมื่อเสือโคร่งนั้นมีการบันทึกภาพ ครบ 2 ปีแล้ว

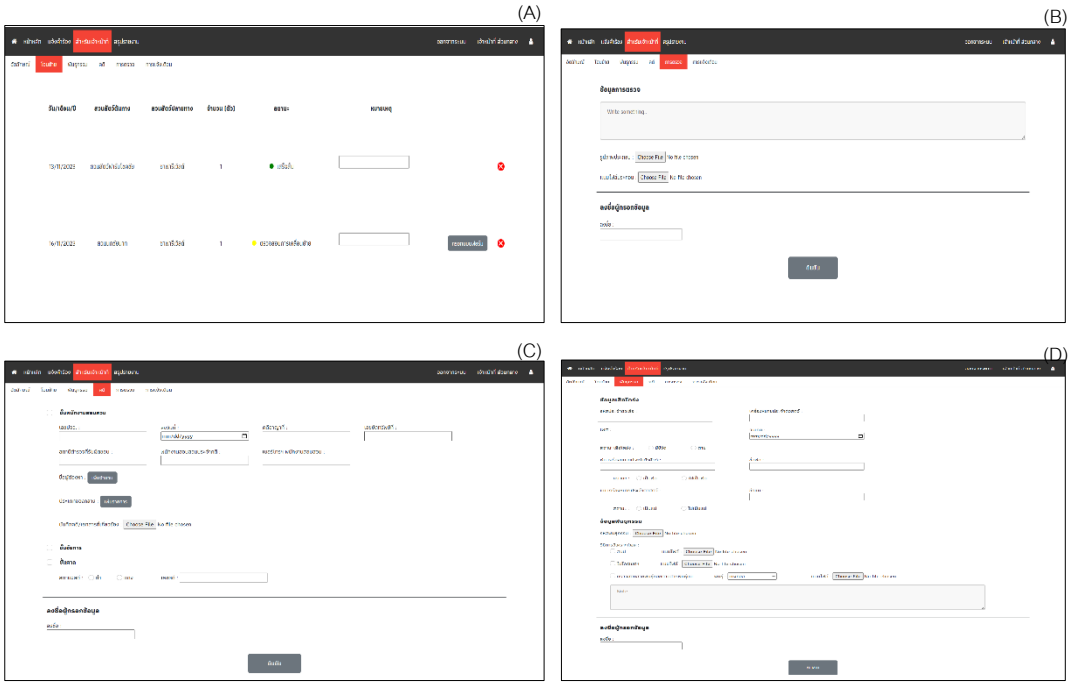



**Fig. 8** Example for officer page: (A) Transfer page; (B) Inspection page; (C) Case page; (D) DNA page

หน้าสรุปรายงาน (Fig. 9) เป็นหน้าที่สรุปข้อมูลต่าง ๆ จากฐานข้อมูล ออกมาในรูปแบบกราฟแท่ง กราฟเส้น กราฟวงกลม และตาราง เพื่อให้เจ้าหน้าที่สามารถนำข้อมูลไปใช้วางแผนหรือรายงานต่อไปได้ง่าย ซึ่งจะประกอบไปด้วย 8 เมนู คือ 1) สรุปรายงานทั้งหมด 2) สถานที่ครอบครองส่วนบุคคล 3) สถานที่ครอบครองสวนสัตว์เอกชน 4) สถานที่ครอบครองสวนสัตว์ของหน่วยงานรัฐ 5) สถานที่ครอบครองกรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช 6) สถานที่ครอบครองหน่วยงานรัฐอื่น ๆ 7) สรุปรายงานพันธุกรรม และ 8) สรุปรายงานคดี

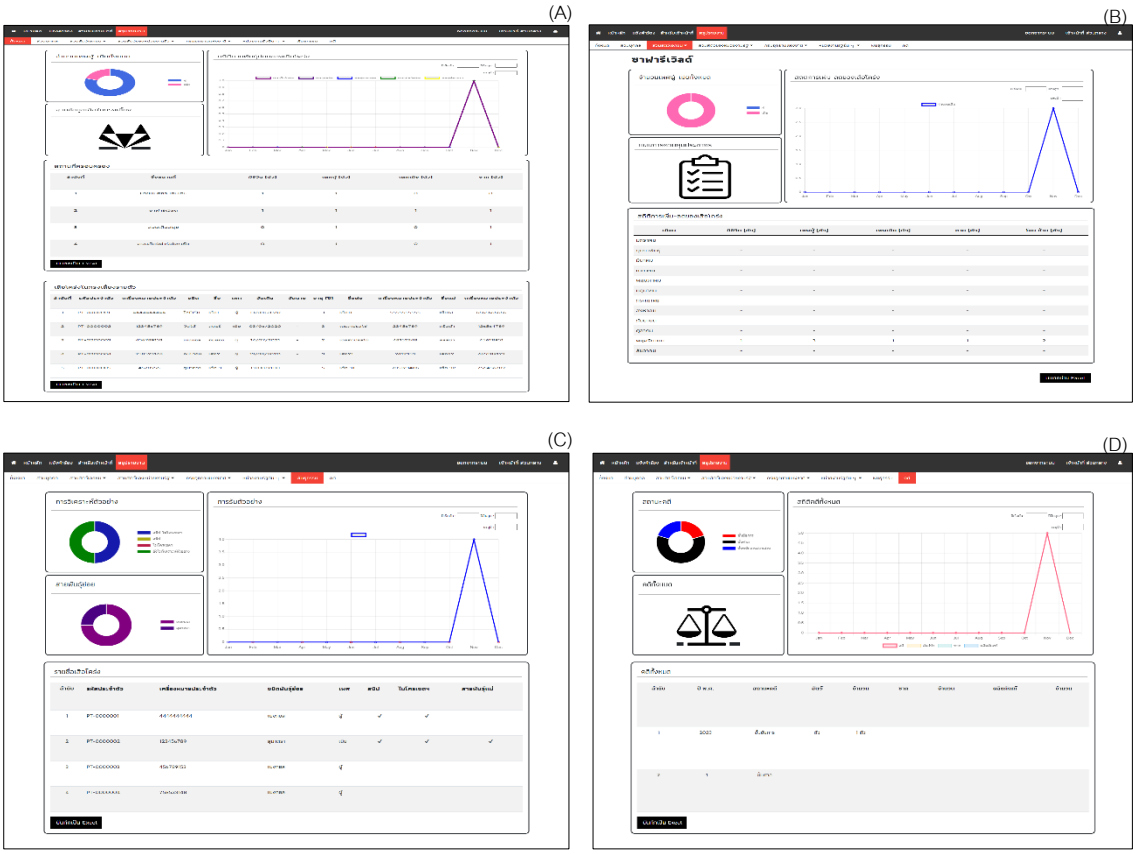



**Fig. 9** Example report summary page: (A) Total summary page; (B) Private zoo summary page; (C) DNA summary page; (D) Case summary page

*การประเมินการใช้งานฐานข้อมูล*

โดยแบ่งหัวข้อออกเป็น 3 ด้าน คือ 1) ด้านการนำเข้าข้อมูล มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.35 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.21 อยู่ในระดับความพึงพอใจมาก มีข้อเสนอแนะการเพิ่มเติมข้อมูลสำหรับการกรอก การแนบไฟล์เอกสาร เพื่อครอบคลุมในการทำงาน 2) ด้านการแสดงผลของข้อมูล มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.45 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.09 อยู่ในระดับความพึงพอใจมาก มีข้อเสนอแนะเรื่องข้อมูลที่แสดงผลยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่ และ 3) ด้านภาพรวมของฐานข้อมูล มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.59 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.28 อยู่ในระดับความพึงพอใจมากที่สุด มีข้อเสนอแนะเรื่องการต่อยอดให้ระบบมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น โดยรวมฐานข้อมูลนี้มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.47 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.21 อยู่ในระดับความพึงพอใจมาก

## สรุป

การพัฒนาฐานข้อมูลเสือโคร่งในกรงเลี้ยงในครั้งนี้ อาศัยการพัฒนาฐานข้อมูล MySQL โดยใช้ภาษาต่าง ๆ เช่น ภาษา HTML, CSS, JavaScript, PHP, SQL เป็นต้น ในการสร้างฐานข้อมูลเสือโคร่งในกรงเลี้ยง และได้ออกแบบฐานข้อมูลโดยใช้แบบจำลองที่ใช้อธิบายโครงสร้างฐานข้อมูล (ER-diagram) โดยมีตารางเก็บข้อมูลทั้งหมด 18 ตาราง และได้มีการออกแบบโครงสร้างของเว็บไซต์ฐานข้อมูลในแต่ละหน้าให้เชื่อมโยงกัน เพื่อให้ผู้ใช้สามารถเข้าใจได้ง่ายและใช้งานง่ายไม่ซับซ้อน โดยจะแบ่งระดับผู้ใช้ออกเป็น 2 ระดับ คือระดับผู้ใช้งานเพื่อให้เข้าถึงได้เฉพาะหน้าหลักและการแจ้งคำร้อง และระดับเจ้าหน้าที่สามารถเข้าถึงหน้าสำหรับเจ้าหน้าที่และหน้าสรุปรายงานเพิ่มเติมได้ เพื่อให้การกรอกข้อมูลนั้น

มีเพียงเจ้าหน้าที่เข้าถึงได้เท่านั้น นอกจากนี้ในส่วนติดต่อผู้ใช้ก็ประกอบไปด้วย หน้าแรก ที่บ่งบอกถึงชื่อฐานข้อมูลและมีเมนูหน้าหลักและเข้าสู่ระบบ หน้าลงทะเบียนและเข้าสู่ระบบ เพื่อให้ผู้ใช้ได้ลงทะเบียนและเข้าสู่ระบบ หน้าหลักและเมนูต่าง ๆ สำหรับดูข้อมูลเบื้องต้น หน้าแจ้งคำร้อง สำหรับการแจ้งคำร้องเพื่อให้เจ้าหน้าที่รับเรื่อง หน้าสำหรับเจ้าหน้าที่เพื่อให้เจ้าหน้าที่กรอกข้อมูลในเมนูต่าง ๆ และหน้าสรุปรายงาน สำหรับสรุปข้อมูลที่กรอกไป โดยแสดงผลในรูปแบบกราฟต่าง ๆ และรูปแบบตาราง เมื่อให้เจ้าหน้าที่กรมอุทยานแห่งชาติฯ ได้ทดลองใช้งานฐานข้อมูล ผลการประเมินความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก โดยมีข้อเสนอแนะเรื่องเพิ่มเติมข้อมูลในการกรอก การแนบไฟล์เอกสารต่าง ๆ การแสดงผลที่ยังมีความคลาดเคลื่อน และพัฒนาระบบให้มีความสมบูรณ์มากขึ้น เพื่อสามารถนำไปใช้งานได้จริง

**กิตติกรรมประกาศ**

การพัฒนาฐานข้อมูลครั้งนี้ ได้รับทุนสนับสนุนจาก สมาคมอนุรักษ์สัตว์ป่า (WCS) ประเทศไทย ขอขอบพระคุณกรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช ที่สนับสนุนข้อมูลและการออกแบบฐานข้อมูล

**เอกสารอ้างอิง**

กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช 2567. ฮือฮา ชุมพร พบเสือโคร่งหากินข้ามประเทศไทย-เมียนมาร์ พล.ต.อ.พัชรวาทฯ สั่งเร่งสำรวจเพื่อคุ้มครองและอนุรักษ์สายพันธุ์เสือโคร่งอินโดจีน. http://news.dnp.go.th/news/26320, 25 มกราคม 2567.

มูลนิธิสืบนาคะเสถียร. 2560. รู้จัก 6 ชนิดพันธุ์ย่อยของ ‘เสือโคร่ง’. https://www.seub.or.th/bloging/knowledge/รู้จัก-6-ชนิดพันธุ์ย่อยข/, 10 ตุลาคม 2564.

CITES. 2022. Statement concerning a circular issued by China’s State Council on the use of rhinoceroses and tigers and their products. https://cites.org/eng/news/statement-concerning-a-circular-issued-by-chinas-state-council-on-the-use-of-rhinoceroses-and-tigers-and-their-products_08112018, 9 December 2023.

Letkowski, J. 2014. Doing database design with MySQL. J. Technol.Res. 6: 1–15.

WWF. 2009. เสือโคร่งขนิดพันธุ์ที่ใกล้สูญพันธุ์. https://wwf.panda.org/es/?184742/Tiger, 9 December 2023.

# ความชุกชุมและการใช้ประโยชน์พื้นที่สัตว์เหยื่อเสือโคร่งในอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่

## Abundance and habitat utilization of tiger prey species in Khao Yai National Park

**ปกรณ์ คำสุดแสง***, **วรงค์ สุขเสวต**, **สมพร พากเพียร**

Pakon Kamsudsang*, Warong Suksavate, Somporn Pakpian

ภาควิชาชีววิทยาป่าไม้ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Forest Biology, Faculty of Forestry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: pakon.kam@ku.th

**บทคัดย่อ**

การศึกษาความชุกชุมและการใช้ประโยชน์พื้นที่สัตว์เหยื่อเสือโคร่งในอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ มีการศึกษามากกว่า 10 ปีแล้ว ซึ่งสถานีวิจัยสัตว์ป่าดงพญาเย็น-เขาใหญ่ ได้เริ่มทำการสำรวจระหว่างปี พ.ศ. 2562–2565 มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความชุกชุมและติดตามการใช้ประโยชน์พื้นที่ป่าของสัตว์เหยื่อเสือโคร่งโดยการตั้งกล้องดักถ่ายภาพ จำนวน 264 จุด คิดเป็น 14,034 กับดักคืน มีค่าความชุกชุมเฉลี่ยของ หมูป่า (*Sus scorfa*) เก้ง (*Muntiacus muntjak*) กระทิง (*Bos gaurus*) และ กวาง(*Rusa unicolor*) เท่ากับ 5.64, 4.18, 2.79 และ 1.74 ตามลำดับ จากการวิเคราะห์การใช้ประโยชน์พื้นที่ป่าพบว่าค่าความชุกชุมเฉลี่ยสูงสุดของ กระทิง มีค่าสูงสุดอยู่ในพื้นที่ป่าผสมผลัดใบ กวางป่ามีค่าสูงสุดอยู่ในพื้นที่ทุ่งหญ้า ส่วนเก้ง และหมูป่ามีค่าสูงสุดอยู่ในพื้นที่ป่าดิบเขา การศึกษาครั้งนี้เป็นการติดตามระยะยาวเพื่อจัดเตรียมข้อมูลในการสนับสนุนการจัดการถิ่นที่อยู่ของสัตว์ป่าและการอนุรักษ์ในอนาคตต่อไป

**คำสำคัญ**: การใช้พื้นที่อาศัย, กลุ่มป่าดงพญาเย็น-เขาใหญ่, ความชุกชุม, อุทยานแห่งชาติเขาใหญ่

**Abstract**

Abundance and habitat utilization of tiger prey species in Khao Yai National Park (KYNP) have been studing for 10 years. Monitoring tiger and their prey populations, however, have been studied since 2019–2022 by the Dong Phayayen-Khao Yai Wildlife Research Station. Our objectives aim to understand the habitat use of tiger prey species in KYNP, which is poorly understood. We used camera traps for monitoring wildlife by setting 264 locations, totaling 14,034 trap-nights. The average abundance indices of wild boar (*Sus scorfa*), muntjac (*Muntiacus muntjak*), gaur (*Bos gaurus*), and sambar deer (*Rusa unicolor*) were 5.64, 4.18, 2.79, and 1.74, respectively. Focusing on the habitat utilization of tiger prey species, gaur and sambar deer had the highest average abundance index in the mixed deciduous forest. Muntjac and wild boar had the highest average abundance index in the hill evergreen forest. This study is the long-term monitoring for understanding the abandance and habitat of tiger prey species in KYNP, which could enhance the wildlife habitat management and conservation in the future.

**Keywords**: Abundance, Dong Phayayen - Khao Yai Forest Complex, Habitat utilization, Khao Yai National Park

**คำนำ**

ปัจจุบันป่าไม้ในประเทศไทยถูกทำลายลงอย่างมาก พื้นที่ป่าหลายแห่งถูกบุกรุกและแบ่งแยกออกจากกัน ทำให้เกิดผลกระทบต่อถิ่นอาศัยของพรรณพืชและสัตว์ป่า ส่งผลให้เกิดการสูญเสียความหลากหลายทางชีวภาพ (Office of Natural Resources and Environmental Policy and Planning, 2007) การป้องกันและการอนุรักษ์สัตว์ป่าที่เป็นดัชนีชี้วัดความสมบูรณ์ของระบบนิเวศเป็นแนวทางที่จะสามารถรักษาความหลากหลายทางชีวภาพในระบบนิเวศได้ หนึ่งในชนิดที่สามารถวัดความสมบูรณ์ของระบบนิเวศได้ คือ เสือโคร่ง (*Panthera tigris*) ซึ่งปัจจุบันมีจำนวนประชากรของเสือโคร่งถูกจัดให้อยู่ในสถานภาพใกล้สูญพันธุ์ (Endangered) ในระดับโลก (Goodrich et al., 2022) ในประเทศไทยประชากรกลุ่มใหญ่ของเสือโคร่งมีการกระจายอยู่มากในผืนป่าตะวันตก ทั้งนี้กลุ่มป่าดงพญาเย็น-เขาใหญ่เป็นพื้นที่ที่มีศักยภาพอย่างมากในด้านการอนุรักษ์และฟื้นฟูจำนวนประชากรเสือโคร่ง (องค์การกองทุนสัตว์ป่าโลกสากล, 2560) มีแนวโน้มที่ประชากรจะเพิ่มมากขึ้นหากมีการจัดการบนพื้นฐานทางนิเวศวิทยา

กลุ่มป่าดงพญาเย็น-เขาใหญ่ ประกอบไปด้วยพื้นที่อนุรักษ์จำนวน 5 แห่ง คือ อุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ อุทยานแห่งชาติทับลาน อุทยานแห่งชาติปางสีดา อุทยานแห่งชาติตาพระยา และเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าดงใหญ่ มีขนาดพื้นที่รวมกันประมาณ 6,300 ตารางกิโลเมตร ซึ่งสถานีวิจัยสัตว์ป่าดงพญาเย็น-เขาใหญ่ ได้ดำเนินการ ศึกษาวิจัยติดตามจำนวนประชากรเสือโคร่งด้วยการติดตั้งกล้องดักถ่ายภาพอัตโนมัติอย่างเป็นระบบครอบคลุมทั่วทั้งผืนป่า ตั้งแต่ช่วงปี พ.ศ. 2562 เป็นต้นมา ในช่วงเวลาก่อนหน้านี้การศึกษาประชากรเสือโคร่งในผืนป่าดงพญาเย็น-เขาใหญ่ยังขาดแคลนจนกระทั่ง Ash et al. (2021) ได้เริ่มเข้ามาทำการศึกษา และได้รายงานการพบเสือโคร่งผ่านกล้องดักถ่ายภาพระหว่างปี พ.ศ. 2551 ถึง พ.ศ. 2560 ในสามพื้นที่อนุรักษ์ คือ อุทยานแห่งชาติทับลาน อุทยานแห่งชาติปางสีดา และเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าดงใหญ่ ทั้งนี้การรายงานดังกล่าวไม่พบเสือโคร่งในพื้นที่อุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ และอุทยานแห่งชาติตาพระยา ซึ่งก่อนหน้านี้ ชุติอร และคณะ (2545) ได้เคยรายงานการพบเสือโคร่งบริเวณคลองอีเฒ่า และถือเป็นครั้งสุดท้ายที่มีการรายงานการพบเสือโคร่งในพื้นที่อุทยานแห่งชาติเขาใหญ่

เสือโคร่ง ถือเป็นเป็นสัตว์ผู้ล่าที่เป็นดัชนีชี้วัดความสมบูรณ์ของระบบนิเวศ เนื่องจากเสือโคร่งใช้พื้นที่อาศัยขนาดใหญ่ เสือโคร่งสามารถล่าเหยื่อเป็นอาหารมากถึง 16 ชนิด ตั้งแต่สัตว์ขนาดใหญ่ เช่น กระทิง (*Bos gaurus*) วัวแดง (*Bos javanicus*) กวางป่า (*Rusa unicolor*) จนถึงสัตว์ขนาด เล็กลงไป เช่น ลิ่นชวา (*Manis javanica*) (Simcharoen et al., 2018) ทั้งนี้ข้อมูลที่ได้จากการตั้งกล้องติดตามประชากรเสือโคร่งของสถานีวิจัยสัตว์ป่าดงพญาเย็น-เขาใหญ่ได้แสดงให้เห็นว่าในผืนป่าดงพญาเย็น-เขาใหญ่มีสัตว์ป่าที่สามารถเป็นเหยื่อที่สำคัญต่อเสือโคร่ง เช่น กระทิง วัวแดง กวางป่า หมูป่า เก้ง เป็นต้น

การอนุรักษ์เสือโคร่งเพื่อรักษาไว้ซึ่งความหลากหลายทางชีวภาพในกลุ่มป่าดงพญาเย็น-เขาใหญ่ จำเป็นต้องมีข้อมูลเชิงวิทยาศาสตร์ที่สำคัญทั้งด้านชีววิทยาและนิเวศวิทยาของเสือโคร่ง โดยเริ่มจากข้อมูลพื้นฐานของชนิดสัตว์ที่เป็นเหยื่อของเสือโคร่งในพื้นที่ซึ่งจะนำไปสู่การศึกษาด้านอื่น ๆ รวมถึงการวางแผนเพื่อการจัดการพื้นที่ให้คงไว้ซึ่งความอุดมสมบูรณ์ โดยที่ผ่านมาอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ยังขาดการศึกษาวิจัยข้อมูลพื้นฐานในเรื่องเหยื่อหลักของเสือโคร่ง ดังนั้นการศึกษาในครั้งนี้จึงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับข้อมูลพื้นฐานเพื่อการวางแผนจัดการพื้นที่ ในอนาคตหากมีเสือโคร่งกลับมาในพื้นที่อุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ข้อมูลชุดนี้จะมีส่วนช่วยสำคัญในการเตรียมพร้อมเพื่อจัดการพื้นที่ในภายภาคหน้า

**อุปกรณ์และวิธีการ**

*อุปกรณ์*

1. อุปกรณ์ Global Positioning System (GPS)
2. แผนที่
3. แบบฟอร์มบันทึกข้อมูลตำแหน่งกล้องดักถ่ายภาพ
4. กล้องดักถ่ายภาพ
5. โปรแกรม R Studio
6. โปรแกรม QGIS
7. โปรแกรม Camera trap file manager

*วิธีการ*

*1. การรวบรวมข้อมูล*

1.1 สถานีวิจัยสัตว์ป่าดงพญาเย็น-เขาใหญ่สำรวจประชากรเสือโคร่งด้วยการตั้งกล้องดักถ่ายภาพตั้งแต่เดือนพฤศจิกายนปี พ.ศ. 2562 ถึงเดือนกรกฎาคมปี พ.ศ. 2565 (Fig. 1) โดยตำแหน่งกล้องดักถ่ายภาพถูกกำหนดขึ้นให้ครอบคลุมทั้งพื้นที่ และมีระยะห่างระหว่างแต่ละจุดตั้งกล้องดักถ่ายภาพประมาณ 3–5 กิโลเมตร (Phumanee et al., 2021) การกำหนดจุดตั้งกล้องดักถ่ายภาพ ใช้ข้อมูลการเส้นทางเดินลาดตะเวน หรือทางด่านสัตว์ในพื้นที่มาเป็นข้อมูลพื้นฐานการตัดสินใจในการกำหนดจุด และใช้โปรแกรม QGIS ในการกำหนดจุด

1.2 ในการเข้าถึงแต่ละจุดตั้งกล้อง เราใช้อุปกรณ์ GPS ในการนำทางไปยังจุดตั้งกล้องที่กำหนด จากนั้นทำการค้นหาพื้นที่จุดตั้งกล้องดักถ่ายภาพที่เหมาะสม ส่วนใหญ่เป็นถนน หรือเส้นทางเดินขนาดเล็กในป่า เนื่องจากเสือโคร่งมักเลือกใช้พื้นที่ประเภทนี้ในการเดินทาง (Karanth and Nichols, 1998) กล้องดักถ่ายภาพถูกตั้งทั้งหมดสองตัวซึ่งอยู่ฝั่งตรงข้ามกัน แต่ไม่หันหน้าเข้าหากันโดยตรง (Karanth and Nichols, 1998) มีระยะห่างระหว่างกล้องประมาณ 3–6 เมตร และตั้งสูงเหนือพื้นดินประมาณ 50–60 เซนติเมตร โดยตั้งทั้งสิ้นประมาณปีละ 70 จุดแต่ละจุดมีระยะเวลาในการตั้งประมาณ 45 วันซึ่งตั้งในช่วงเวลาใกล้เคียงกัน

1.3 ข้อมูลทั่วไปที่สำคัญของแต่ละจุดตั้งกล้องถูกบันทึกในแบบฟอร์มบันทึกข้อมูล โดยข้อมูลที่ถูกบันทึกประกอบไปด้วย ชื่อพื้นที่อนุรักษ์ ชื่อหน่วยพิทักษ์ที่รับผิดชอบในเขตพื้นที่ ชื่ออุปกรณ์ GPS ที่ใช้ โซน UTM (Universal Transverse Mercator) พิกัด X และ Y ระยะห่างระหว่างกล้อง ความสูงกล้องแต่ละตัว เวลาที่กล้องเริ่มทำงาน ชนิดป่า

1.4 กล้องดักถ่ายภาพจะทำงานโดยอัตโนมัติเมื่อมีการคลื่อนไหวผ่านหน้ากล้อง ตัวกล้องดักถ่ายภาพสามารถทำงานได้ทั้งในเวลากลางวัน และเวลากลางคืน ทั้งนี้กล้องดักถ่ายภาพบางรุ่นสามารถบันทึกได้ทั้งภาพ และวีดีโอ กล้องดักถ่ายภาพทุกตัวจะถูกตั้งไว้ในพื้นที่อย่างน้อย 30 วัน หลังจากนั้นทำการเก็บกลับมาเพื่อทำการวิเคราะห์โดยการคัดแยกภาพสัตว์แต่ละชนิดผ่านโปรแกรม Camera trap file manager

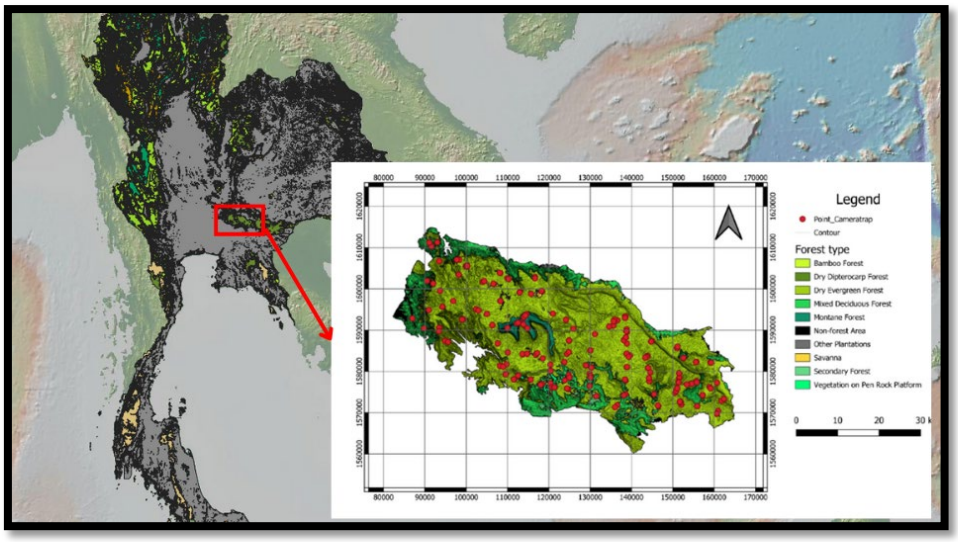



**Fig. 1** Forest area and camera locations in Khao Yai National Park between 2019–2022

*2. การวิเคราะห์ข้อมูล*

2.1 วิเคราะห์จำนวนประชากรของสัตว์เหยื่อเสือโคร่งที่พบเห็นผ่านกล้อง Camera trap ในผืนป่าดงพญาเย็น – เขาใหญ่

2.2 วิเคราะห์จำนวนประชากรจากโปรแกรม R โดยใช้เวลา 30 นาที ในการแยกความเป็นอิสระของสัตว์ในแต่ละภาพออกจากกัน (O'Brien et al., 2003)

2.3 วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยการหาค่า Relative Abundance Index (Equation 1) เพื่อใช้เปรียบเทียบความชุกชุมของสัตว์เหยื่อเสือโคร่งในพื้นที่อุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ ที่มีการติดตั้งกล้องดักถ่ายภาพสัตว์ป่าอัตโนมัติ (วิทยา และคณะ, 2015)

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความชุกชุมสัมพัทธ์ (\% RAI)} = \frac{\text{จำนวนครั้งที่ถ่ายภาพเหยื่อของเสือโคร่งได้} \times 100}{\text{จำนวนกล้องที่ทำการวางต่อคืน} \times \text{จำนวนวัน}} \quad (1)$$

**ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง**

ผลจากการตั้งกล้องดักถ่ายภาพอัตโนมัติในพื้นที่อุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ ระหว่างปี พ.ศ. 2562–2565 จำนวนทั้งสิ้น 264 จุด( Fig. 1) คิดเป็น 14,034 กับดักคืน โดยคำนวนค่าความชุกชุมเฉลี่ยเรียงจากมากไปน้อยของ หมูป่า เก้ง กระทิง และ กวาง ได้ 5.64, 4.18, 2.79 และ 1.74 ตามลำดับ (Table 1) ซึ่งผลที่ได้นั้นแตกต่างจาก Khoewsree et al. (2020) ที่ได้กล่าวถึงค่าความชุกชุมของสัตว์กินพืชในพื้นที่อุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ โดยชนิดที่มีค่าความชุกชุมมากที่สุดคือ หมูป่า (22.6) รองลงมา คือ กวางป่า (21.95) กระทิง (17.21) และเก้ง (07.19) ตามลำดับ ซึ่งอาจเป็นเพราะจำนวนประชากรของสัตว์นั้นมีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละปี หรืออาจเป็นเพราะจำนวนจุดในการตั้งกล้องนั้นไม่เท่ากันจึงทำให้ค่าความชุกชุมไม่สอดคล้องกัน

ทั้งนี้เมื่อนำข้อมูลค่าความชุกชุมระหว่างปี พ.ศ. 2562–2565 มาเปรียบเทียบกันโดย พบว่าค่าความชุกชุมของกระทิงและกวางป่า มีค่าความชุกชุมที่เพิ่มขึ้นในทุก ๆ ปี (Table 1) ส่วนค่าความชุกชุมของเก้งและหมูป่า นั้นมีการเปลี่ยนแปลงในทุก ๆ ปี โดยปีที่มีค่าความชุกชุมมากที่สุดของเก้ง นั้นได้แก่ พ.ศ. 2564 อยู่ที่ 6.31 (Table 1) และค่าความชุกชุมของหมูป่า มากที่สุด ได้แก่ ปี พ.ศ. 2563 อยู่ที่ 7.98 (Table 1)

**Table 1** The number of camera traps, trap nights, and the average of relative abundance (%) of tiger prey species during 2019-2024 at Khao Yai National Park

| Year | Camera traps | Trap nights | % RAI Gaur | % RAI Red muntjac | % RAI Sambar | % RAI Wild boar |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 2019 | 83 | 4290 | 1.44 | 3.96 | 0.01 | 4.49 |
| 2020 | 72 | 4998 | 2.45 | 3.57 | 0.90 | 7.98 |
| 2021 | 66 | 3049 | 3.17 | 6.31 | 3.02 | 3.68 |
| 2022 | 43 | 1697 | 4.12 | 2.89 | 3.02 | 6.42 |
| Total | 264 | 14,034 | - | - | - | - |
| Average | - | - | 2.79 | 4.18 | 1.74 | 5.64 |

เมื่อนำผลจากการคำนวณค่าความชุกชุมของสัตว์เหยื่อเสือโคร่งมาจำแนกประเภทป่าตามบริเวณจุดตั้งกล้องเพื่อสำรวจการเข้าไปใช้ประโยชน์ของสัตว์เหยื่อเสือโคร่งพบว่า กระทิงนั้นมีค่าความชุกชุมเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ 8.12 และ 5.31 ในพื้นที่ป่าผสมผลัดใบ และป่าดิบเขา ตามลำดับ (Fig. 2) สอดคล้องกับ Ambica and Mathur (2021) กล่าวว่า ปัจจัยความหนาแน่นของเรือนยอดที่น้อยกว่า 30 เปอร์เซ็นต์ รวมไปถึงป่าผสมผลัดใบและทุ่งหญ้ามีผลต่อการใช้ประโยชน์ของกระทิงอย่างมาก

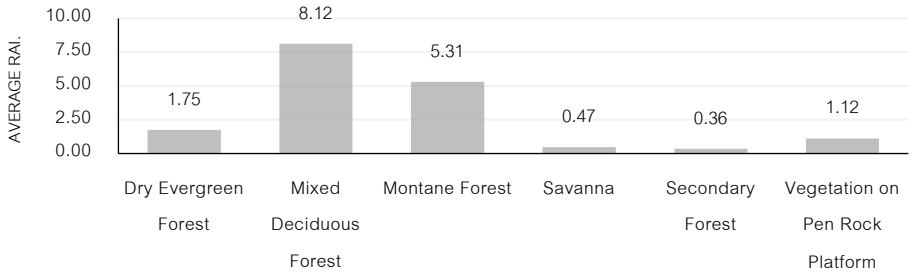



**Fig. 2** The average abundance of gaur in different forest types within Khao Yai National Park

เก้งในพื้นที่นั้นมีค่าความชุกชุมเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ 5.29 และ 4.48 ในพื้นที่ป่าดิบเขา และทุ่งหญ้า ตามลำดับ (Fig. 3) ซึ่งแตกต่างจาก อัมพรพิมล ประยูร และคณะ (2555) ได้กล่าว ในพื้นที่อุทยานแห่งชาติทับลานนั้น มีความถี่ในการพบเก้งมากที่สุดในป่าเบญจพรรณ ป่าดิบแล้ง และป่าดิบชื้น ตามลำดับ โดย Hemami et al. (2004) ได้กล่าวว่า เก้งมีแนวโน้มความสัมพันธ์กับพื้นที่ที่มีความหลากหลายของพืชอาหารบนพื้นดิน ทั้งนี้ไม่พบหลักฐานใดที่แสดงว่าเก้งหลีกเลี่ยงพื้นที่เปิดโล่ง

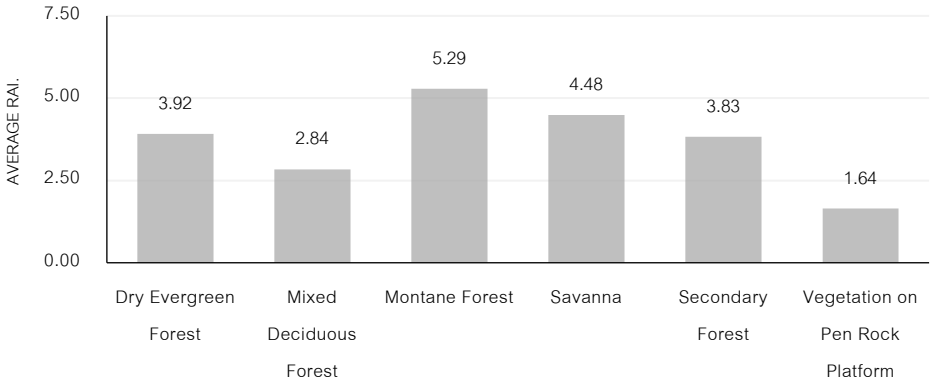



**Fig. 3** The average abundance of red muntjac in different forest types within Khao Yai National Park

ส่วนกวางป่าในพื้นที่นั้นมีค่าความชุกชุมเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ 8.37 และ 0.54 ในพื้นที่ป่าแบบทุ่งหญ้า และป่าดิบแล้ง ตามลำดับ (Fig. 4) ซึ่งสอดคล้องกับ Bagchi et al. (2003) ได้กล่าวว่า กวางชอบพื้นที่ทุ่งหญ้า และพุ่มไม้หนาแน่นใกล้แหล่งน้ำในประเทศอินเดีย

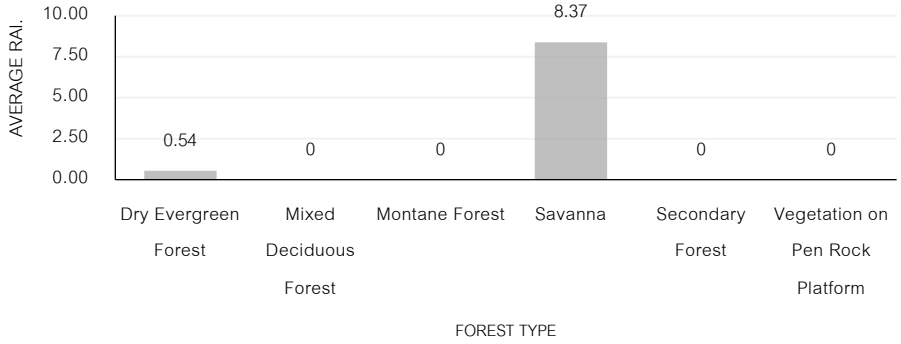



**Fig. 4** The average abundance of sambar in different forest types within Khao Yai National Park

ส่วนหมูป่าในพื้นที่มีค่าความชุกชุมเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ 7.88 และ 7.29 ในพื้นที่ป่าดิบเขา และทุ่งหญ้า ตามลำดับ (Fig. 5) ซึ่งแตกต่างจาก พงศ์เทพ และคณะ (2557) ที่กล่าวไว้ว่า ประเภทป่า ที่พบหมูป่าสูงสุดเป็นป่าประเภทป่าปลูก ป่าเต็งรัง และป่าดิบแล้ง ตามลำดับ อาจเป็นเพราะสภาพปัจจัยแวดล้อมที่แตกต่างกันจึงทำให้หมูป่าในอุทยานแห่งชาติกลับชุกชุมได้ดีที่ป่าประเภทดิบเขา และทุ่งหญ้า

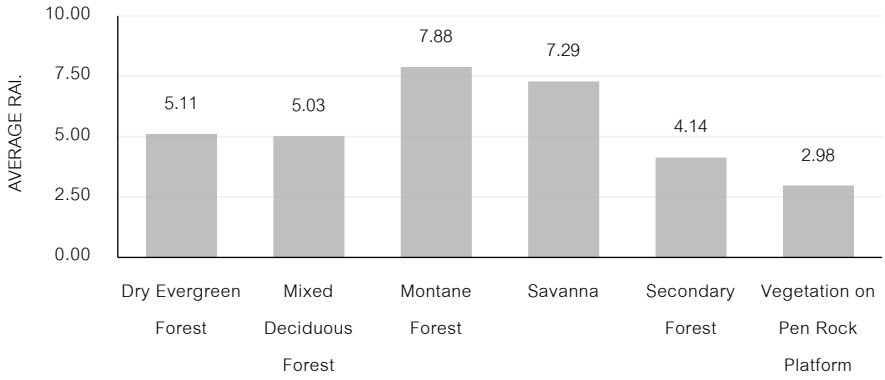



**Fig. 5** The average abundance of Wild boar in different forest types within Khao Yai National Park

## สรุป

การตั้งกล้องดักถ่ายภาพสัตว์ป่าบริเวณพื้นที่อุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ เพื่อศึกษาเหยื่อของเสือโคร่ง จำนวนทั้งสิ้น 264 จุด คิดเป็น 14,034 กับดักคืน พบว่าค่าความชุกชุมเฉลี่ยของ หมูป่า เก้ง กระทิง และ กวาง เท่ากับ 5.64, 4.18, 2.79 และ 1.74 ตามลำดับ ทั้งนี้เมื่อนำข้อมูลค่าความชุกชุมระหว่างปี พ.ศ. 2562–2565 มาเปรียบเทียบกัน พบว่าค่าความชุกชุมของกระทิงและกวางป่า มีค่าความชุกชุมที่เพิ่มขึ้นรายปีตาม ส่วนค่าความชุกชุมของเก้งและหมูป่า มีการเปลี่ยนแปลงในทุก ๆ ปี โดยปีที่มีค่าความชุกชุมมากที่สุดของเก้ง ได้แก่ พ.ศ. 2564 อยู่ที่ 6.31 และค่าความชุกชุมของหมูป่า ซึ่งปีที่มีค่าความชุกชุมมากที่สุดได้แก่ พ.ศ. 2563 อยู่ที่ 7.98 จากการศึกษาโดยเน้นไปที่การใช้ประโยชน์พื้นที่ป่าพบว่า กระทิงมีค่าความชุกชุมเฉลี่ยสูงสุดอยู่ในพื้นที่ป่าแบบผสมผลัดใบ กวางป่าในพื้นที่มีค่าความชุกชุมเฉลี่ยสูงสุดอยู่ในพื้นที่ป่าแบบทุ่งหญ้า ส่วนเก้งและหมูป่าในพื้นที่มีค่าความชุกชุมเฉลี่ยสูงสุดอยู่ ในพื้นที่ป่าดิบเขา โดยข้อมูลที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้สามารถนำไปปรับใช้ในการวางแผนพัฒนาศักยภาพของพื้นที่ให้เหมาะสมและเพียงพอต่อสัตว์เหยื่อเพื่อรองรับการขยายพื้นที่อยู่อาศัยของเสือโคร่งจากพื้นอุทยานแห่งชาติ และเขตรักษาพันธุ์ที่ข้างเคียง

## กิตติกรรมประกาศ

รายงานความชุกชุมและการใช้ประโยชน์พื้นที่ของสัตว์เหยื่อเสือโคร่งในอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ ตัวผู้วิจัยต้องขอบพระคุณทางกรมอุทยานแห่งชาติ พันธุ์พืช และสัตว์ป่า สถานีวิจัยสัตว์ป่าดงพญา เย็น – เขาใหญ่ ที่สนับสนุนข้อมูลในการทำวิจัย องค์การแพนเทอรา เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ และเอเชียใต้ ที่สนับสนุนอุปกรณ์ภาคสนามในการลงพื้นที่เก็บข้อมูล และ ผศ.ดร.วรงค์ สุขเสวต อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน ที่ให้ข้อเสนอแนะ ตรวจสอบ และแก้ไข จนกระทั่งการวิจัยครั้งนี้สำเร็จด้วยดี ผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่งไว้ ณ ที่นี้

## เอกสารอ้างอิง

ชุติอร กาญวัฒนะกิจ, แอนโทนี เจ ไลแนม, สตีเฟน กาล์สเตอร์, อลงกต ชูแก้ว, กฤษณา แก้วปลั่ง, ชุมพล สุขเกษม. 2545. การติดตามสำรวจสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมและนกขนาดใหญ่ในอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่. Journal of Wildlife in Thailand 10: 97–105.

พงศ์เทพ สุวรรณวารี, นริศ ภูมิภาค พันธ์, ทักษิณ อาชวาคม. 2557. รายงานการวิจัยความเสียหายต่อระบบนิเวศ และพืชผลทางการเกษตรโดยหมูป่า (*Sus scrofa*) ในสถานีวิจัยสิ่งแวดล้อมสะแกราช และพื้นที่โดยรอบ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

วิทยา เทือกเถาว์, รองลาภ สุขมาสรวง, อนรรฆ พัฒนวิบูลย์. 2015. ความชุกชุมและการใช้พื้นที่อาศัยของสมเสร็จ (*Tapirus indicus*) ในเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าห้วยขาแข้ง. วารสารสัตว์ป่าเมืองไทย 22: 71–79.

อัมพรพิมล ประยูร, นริศ ภูมิภาคพันธ, รองลาภ สุขมาสรวง, บุษบง กาญจนสาขา. 2555. ความชุกชุมและพื้นที่อาศัยที่เหมาะสมของหมาใน (*Cuon alpinus*) และเหยื่อหลักในอุทยานแห่งชาติทับลาน.วารสารสัตว์ป่าเมืองไทย 19: 23–40.

องค์การกองทุนสัตว์ป่าโลกสากล. 2560. ผืนป่าดงพญาเย็น-เขาใหญ่ “บ้านหลังที่ 2 ของเสือโคร่ง อินโดจีน”. https://wwf.panda.org/es/?307490/tiger%5Fnew%5Fhome, 27 มกราคม 2567.

Ambica, P., Vinod, M.B. 2012. Predicting potential distribution of gaur (*Bos gaurus*) in Tadoba-Andhari Tiger Reserve, Central India. J. Life Sci. 6: 1041–1049.

Ash, E., Kaszta, Z., Noochdumrong, A., et al. 2021. Opportunity for Thailand’s forgotten tigers: assessment of the Indochinese tiger *Panthera tigris* corbetti and its prey with camera-trap surveys. Oryx 55: 204–211.

Bagchi, S., Goyal, S.P., Sankar, K. 2003. Prey abundance and prey selection by tigers (*Panthera tigris*) in a semi-arid, dry deciduous forest in western India. J. Zool. 260: 285–290.

Goodrich, J., Wibisono, H., Miquelle, D., et al. 2022. *Panthera tigris*. The IUCN Red List of threatened species https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2022-1.RLTS.T15955A214862019.en, 31 August 2022.

Hemami, M., Watkinson, A., Dolman, P. 2004. Habitat selection by sympatric muntjac (*Muntiacus reevesi*) and roe deer (*Capreolus capreolus*) in a lowland commercial pine forest. Forest Ecol. Manag. 194: 49–60.

Karanth, K.U., Nichols, J.D. 1998. Estimation of tiger densities in India using photographic captures and recaptures. Ecology 79: 2852–2862.

Khoewsree, N., Charaspet, K., Sukmasuang, R., Songsasen, N., Pla-ard, M., Thongbantum, J., Kongchaloem, W., Srinopawan, K. 2020. Abundance, prey, and activity period of dholes (*Cuon alpinus*) in Khao Yai National Park, Thailand. Biodiversitas 21: 345–354.

O’Brien, T.G., Kinnaird, M.F., Wibisono, H.T. 2003. Crouching tigers, hidden prey: Sumatran tiger and prey populations in a tropical forest landscape. Anim. Conserv. 6: 131–139.

Office of Natural Resources and Environmental Policy and Planning. 2007. Thailand Red Data: Vertebrates. Ministry of Natural Resources and Environment. Bangkok, Thailand.

Phumanee, W., Steinmetz, R., Phoonjampa, R., Weingdow, S., Phokamanee, S., Bhumpakphan, N., Savini, T. 2021. Tiger density, movements, and immigration outside of a tiger source site in Southeast Asia. Conservation Science and Practice 3: e560.

Simcharoen, A., Simcharoen, S., Duangchantrasiri, S., Bump, J., Smith, J.L.D. 2018. Tiger and leopard diets in western Thailand: Evidence for overlap and potential consequences. Food Webs 15: e00085.

# สาขาวิทยาศาสตร์

(Subject: Science)

---

# ภาคโปสเตอร์

(Poster Presentation)

# การทดสอบประสิทธิภาพของระบบโครงสร้างผนังอาคารและการประเมินค่าความไม่แน่นอน

## Structural performance testing of curtain wall systems and uncertainty evaluation

**กัณตีมา วาริพันธน์**[a,b], **นพฤทธิ์ จินันทุยา**[a], **วิวัฒน์ วงศ์ก่อเกื้อ**[a,*]

Kantima Variphunt [a,b], Noparit Jinuntuya[a], Wiwat Wongkokua[a,*]

[a]ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[b]บริษัท แคสแคล จำกัด สมุทรปราการ 10280

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

[b]Kaskal Co.,Ltd., Samutprakarn 10280, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: wiwat.w@ku.ac.th

**บทคัดย่อ**

การทดสอบประสิทธิภาพของโครงสร้างผนังอาคาร โดยเฉพาะความแข็งแรง สามารถทำได้โดยใช้ทรานสดิวเซอร์ตรวจวัดการกระจัดแบบหม้อแปลงดิฟเฟอร์เรนเชียลแปรผันตรง (LVDT) เป็นเครื่องมือวัดค่าความโก่งตัวของวัสดุเมื่อถูกแรงกระทำ โดยทำการวัด 3 ตำแหน่งพร้อมกัน ในด้านกว้างของผนัง โดยในการทดสอบจะมีค่าความโก่งตัวสูงสุดที่ยอมรับได้ที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน แต่เนื่องจากผลการทดสอบค่าความโก่งตัวที่ได้จะต้องรวมค่าความไม่แน่นอนของผลการวัดและ LVDT ก็ต้องได้รับการเทียบมาตรฐานด้วย ในงานวิจัยได้ทำการเทียบมาตรฐาน LVDT โดยใช้หัวไมโครมิเตอร์แบบดิจิตอลและเกจบล็อก เป็นเครื่องมือวัดมาตรฐาน การเทียบมาตรฐานจะทำอุณหภูมิสภาวะแวดล้อม 25°C โดยทำการเทียบมาตรฐานจำนวน 20 จุด สำหรับ LVDT แต่ละตัว จากนั้นจึงนำ LVDT จำนวน 3 ตัว มาใช้ในการทดสอบกับโครงการตัวอย่างจำนวน 5 โครงการ โดยผลที่วัดได้จาก LVDT จะต้องรวมค่าแก้ด้วย จากผลการทดสอบที่ได้พบว่า ค่าความโก่งตัวเมื่อรวมกับค่าความไม่แน่นอนแล้ว ผ่านเกณฑ์การยอมรับทุกโครงการ อย่างไรก็ตาม มีอยู่หนึ่งโครงการถ้าไม่รวมค่าแก้จะไม่ผ่านเกณฑ์ยอมรับ แต่เมื่อรวมค่าความไม่แน่นอนแล้วจะสามารถตัดสินให้ยอมรับหรือไม่ยอมรับแบบมีเงื่อนไขได้

**คำสำคัญ**: การทดสอบประสิทธิภาพของผนังอาคาร, ค่าความโก่งตัว, ทรานสดิวเซอร์ตรวจวัดการกระจัดแบบหม้อแปลงดิฟเฟอร์เรนเชียลแปรผันตรง

**Abstract**

Structural performance testing, especially strength, can be conducted using a linear variable differential transformer (LVDT). This instrument measures deflection when interacting with force. The measurement is performed at three points simultaneously along the width of the wall. The maximum permissible deflection is specified. However, the testing results must include an uncertainty value. The LVDT has also been calibrated using a digital micro-head and gauge block as standards. The calibration ambient temperature was 25 °C. There were 20 calibration points for each sensor. Three LVDTs have been used for five example projects. The measured result by the LVDT must include the associated correction. The results showed that the deflections of every project were conform. However, there was one project for which the deflection would be nonconforming if the correction were not applied. When combined with the uncertainty, the decision would be a pass or fail with conditions.

**Keywords**: Deflection, Linear variable differential transformer, Performance test of curtain wall

**คำนำ**

ระบบผนังอาคารเป็นองค์ประกอบสำคัญของอาคารทุกชนิด ไม่ว่าจะเป็นบ้านเดี่ยว ตึกแถวหรืออาคารสูง มีหน้าที่หลักคือใช้ป้องกันลมและฝน ปัจจุบันมีการพัฒนาและใช้เทคโนโลยีขั้นสูงกับระบบผนังอาคาร โดยเฉพาะเมื่อถูกนำมาใช้เป็นองค์ประกอบหลักของเปลือกอาคารขนาดใหญ่ และอาคารสูงต่าง ๆ เนื่องจากแต่ละองค์ประกอบของตัวระบบผนังมีความละเอียดอ่อน จึงต้องการความรู้ความชำนาญทั้งทางด้านการออกแบบและการติดตั้ง นอกจากความสวยงามสอดคล้องกับแบบของอาคารและเหมาะสมกับการใช้งานแล้ว ยังมีเรื่องของความแข็งแรงคงทนที่จะต้องนำมาพิจารณาด้วย

ระบบผนังอาคารที่ดี จะต้องผ่านการทดสอบคุณภาพเพื่อให้ได้การรับรองมาตรฐานในการใช้งาน จึงต้องมีข้อกำหนดในการออกแบบ ไม่ว่าจะเป็นการยืดหรือหดตัวตามความร้อน การแกว่งตัวและเคลื่อนไหวของตัวอาคาร ระบบการส่งน้ำและระบบการแสงสว่างภายในตัวอาคาร ซึ่งความสามารถของห้องปฏิบัติการทดสอบจำเป็นต้องได้รับการรับรองเช่นเดียวกันตามมาตรฐานสากล (ISO/IEC 17025, 2017) ซึ่งสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ได้ออกเป็นมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก.17025 ซึ่งเป็นข้อกำหนดทั่วไปว่าด้วยความสามารถห้องปฏิบัติการในการดำเนินการทดสอบและ/หรือเทียบมาตรฐาน ซึ่งมาตรฐานนี้สามารถที่จะนำมาใช้ได้กับทุกหน่วยงานหรือองค์กรที่มีการดำเนินกิจกรรมการทดสอบและหรือเทียบมาตรฐาน

ตามมาตรฐานนี้ จะต้องมีการพิจารณาค่าความไม่แน่นอนของผลการวัดปริมาณต่างๆ ที่ดำเนินการทดสอบ หากการทดสอบนั้นให้ผลเป็นค่าของปริมาณ จะต้องประเมินค่าความไม่แน่นอนของผลการวัดประกอบการตัดสินผลการทดสอบนั้นด้วย ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างผนังอาคาร โดยผลการทดสอบเป็นค่าความโก่งตัว จึงมีการประเมินค่าความไม่แน่นอนจากปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกระทบ (JCGM 100: 2008 GUM 1995 with minor corrections, 2008) เพื่อใช้ประกอบในการตัดสินผลการทดสอบโดยเปรียบเทียบผลการตัดสินผลการทดสอบ ระหว่างกรณีที่พิจารณารวมและไม่รวมค่าความไม่แน่นอน

**อุปกรณ์และวิธีการ**

เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดสอบค่าความโก่งตัว คือ ทรานสดิวเซอร์ตรวจวัดการกระจัดแบบหม้อแปลงดิฟเฟอร์เรนเชียลแปรผันตรง (LVDT) ซึ่งก่อนที่จะนำมาใช้ทดสอบ จำเป็นต้องได้รับการเทียบมาตรฐานก่อน เครื่องมือวัดมาตรฐานที่นำมาใช้ในการการเทียบมาตรฐาน LVDT ได้แก่ แท่นยึดอุปกรณ์ หัวไมโครมิเตอร์แบบดิจิตอล เกจบล็อก กล่องรับข้อมูลเร้าเตอร์รับข้อมูลและ LVDT แสดงดัง Fig. 1

การเทียบมาตรฐานสามารถทำได้โดยการควบคุมและรับข้อมูลผ่านคอมพิวเตอร์ โดยเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์กับเร้าเตอร์รับข้อมูลโดยใช้สายแลน เปิดระบบเราเตอร์และกล่องรับข้อมูล เชื่อมต่อคอมพิวเตอร์กับ DAQ master ผ่านระบบไร้สาย ต่อ LVDT และสายสัญญาณเข้ากับกล่องส่งสัญญาณที่มีหมายเลขตรงกัน เปิดโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จะปรากฏหน้าจอดัง Fig. 2A จากนั้นจึงเลือก Transducer Setup ปรากฏหน้าจอดัง Fig. 2B เลือกเปิดเฉพาะหมายเลขของ LVDT ที่ต้องการทำการเทียบมาตรฐาน กดเลือก Calibration เพื่อเริ่มกระบวนการเทียบมาตรฐาน

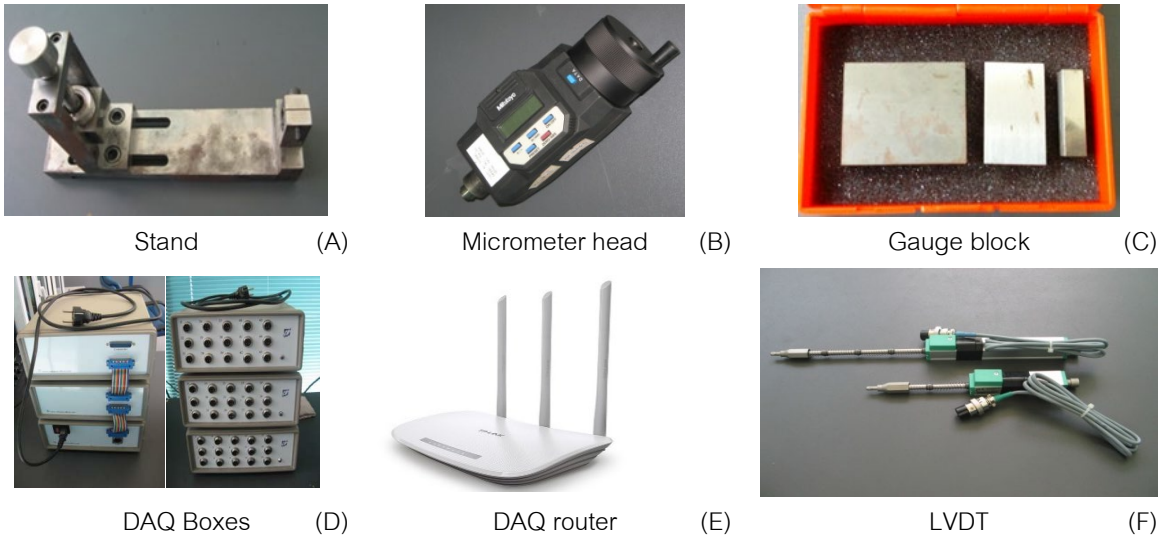



**Fig. 1** Insturments for LVDT calibration including stand (A), micrometer head (B), gauge block (C), DAQ boxes (D), DAQ ruoter (E) and LVDT (F)

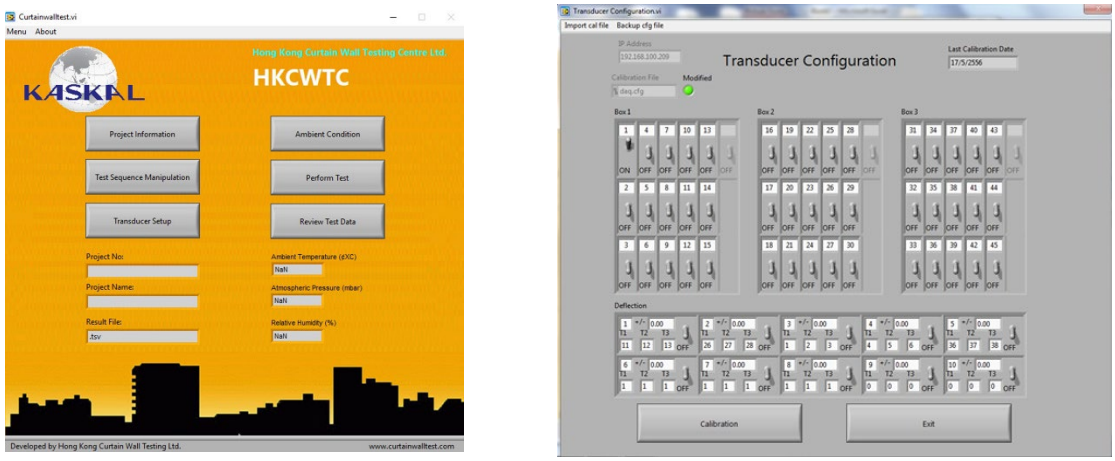



**Fig. 2** User interface of the CurtainWallTest software (A) and transucer setup (B) for the LVDT calibration

Fig. 3 แสดงหน้าจอการเทียบมาตรฐาน เริ่มจากใส่หมายเลขของ LVDT ที่ต้องการเทียบมาตรฐานในช่อง Transducer No. ปรับระยะไมโครมิเตอร์ไปที่ระยะสั้นที่สุด ปรับให้ปลายของ LVDT แตะปลายแกนไมโครมิเตอร์ หมุนปรับไมโครมิเตอร์ให้ค่าที่ปรากฏในช่อง Current Volt มีค่าประมาณ 0.015 V ตั้งค่าศูนย์ในไมโครมิเตอร์ (Set Zero) กด Set ในช่องถัดจาก Zero Volt หมุนปรับไมโครมิเตอร์ให้เต็มพิสัย เช่น 50 mm, 75 mm หรือ 100 mm (สำหรับระยะ 100 mm ให้เสริมด้วยเกจบล็อกขนาด 50 mm ส่วนระยะ 75 mm ให้เสริมด้วยเกจบล็อกขนาด 25 mm ระหว่างปลายของ LVDT กับปลายแกนไมโครมิเตอร์) กดเลือก Set ตรงช่องถัดจาก Cal Volt ใส่ตัวเลขพิสัยของตัวทรานสดิวเซอร์ในช่อง Cal Range เช่น 50, 75 หรือ 100 กด Update เพื่อบันทึกข้อมูลเพื่อสร้างสมการสำหรับการเทียบมาตรฐาน ทำการเทียบมาตรฐานตามจุดเทียบมาตรฐานต่างๆ ตามที่กำหนดไว้ วัดซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนและความไม่แน่นอนมาตรฐาน

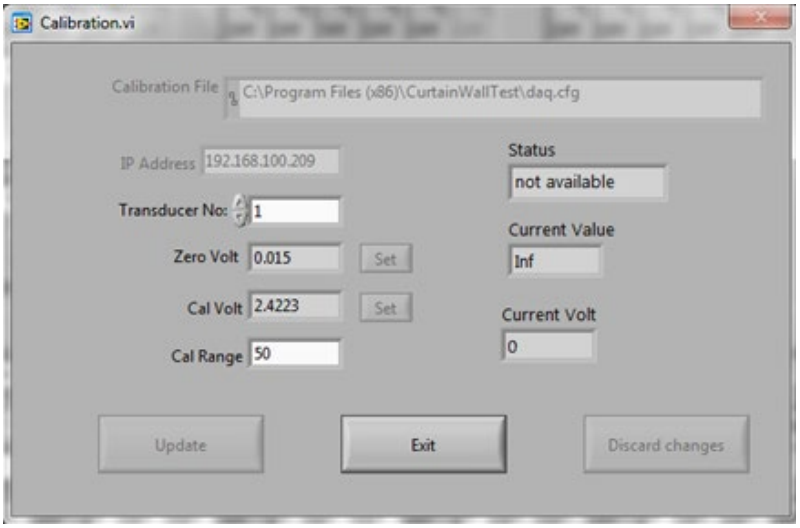



Fig. 3 User interface of the calibration software

การทดสอบความโก่งของระบบผนังอาคาร เริ่มจากการจำลองการติดตั้งระบบผนังอาคารให้ใกล้เคียงกับการใช้งานในสถานการณ์จริง ใช้ LVDT จำนวน 3 ตัว ติดตั้งในด้านกว้างของระบบผนังอาคาร ตามตำแหน่ง A, B และ C เมื่อกำหนดให้ตำแหน่ง A อยู่ห่างจากขอบผนังทางด้านซ้าย 20 mm ตำแหน่ง B อยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของผนัง และตำแหน่ง C อยู่ห่างจากขอบผนังทางด้านขวา 20 mm โดยทั้ง 3 ตำแหน่งอยู่ในแนวเดียวกันในทิศทางตั้งฉากกับด้านยาวของระบบผนังอาคาร จากนั้นจึงทำการอัดอากาศเพื่อให้เกิดแรงกระทำกับผนังอาคาร ทำการวัดการโก่งตัวส่งผลให้ LVDT ซึ่งสัมผัสอยู่กับผนังอาคารขยับตาม ค่าการโก่งตัว $x$ สามารถหาได้จาก Equation 1 โดยสามารถประเมินความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม $u_{\chi}(x)$ ได้จาก Equation 2:

$$x = x_{\mathrm{B}} - \frac{(x_{\mathrm{A}} + x_{\mathrm{X}})}{2} \tag{1}$$

Where; $x_{\mathrm{A}}$ is the measured length of the left LVDT, $x_{\mathrm{B}}$ is the measured length of the middle LVDT, $x_{\mathrm{X}}$ is the measured length of the right LVDT

$$u_{\chi}(x) = \sqrt{u^2(x_{\mathrm{B}}) + \frac{u^2(x_{\mathrm{A}})}{4} + \frac{u^2(x_{\mathrm{X}})}{4}} \tag{2}$$

Where; $u(x_{\mathrm{A}})$ ισ the standard uncertainty of the indication $x_{\mathrm{A}}$, $u(x_{\mathrm{B}})$ is the standard uncertainty of the indication $x_{\mathrm{B}}$, $u(x_{\mathrm{X}})$ is the standard uncertainty of the indication $x_{\mathrm{X}}$

**ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง**

ความไม่แน่นอนของการเทียบมาตรฐาน LVDT สำหรับแต่ละค่าความยาว สามารถประเมินได้จากแบบจำลองของการถ่ายทอดความไม่แน่นอน Laaneots (2011) โดยเริ่มจากความสัมพันธ์ของการเทียบมาตรฐาน ระหว่าง LVDT และเครื่องมือวัดมาตรฐาน ได้แก่ หัวไมโครมิเตอร์แบบดิจิตอล และ เกจบล็อก โดยพิจารณาปริมาณที่มีผลกระทบต่าง ๆ ที่เกิดจากเครื่องมือวัดรวมถึงปริมาณที่มีผลกระทบจากสภาพแวดล้อมภายในห้องปฏิบัติการเทียบมาตรฐาน การเทียบมาตรฐานของ LVDT เขียนได้เป็นค่าความคลาดเคลื่อน $e$ ตาม Equation 3 และแบบจำลองของการถ่ายทอดความไม่แน่นอน $u(e)$ ตาม Equation 4:

$$e = l_i - (l_{\sigma} + \delta l_{\mu} + \delta l_{\gamma} + \Lambda \bar{\alpha} \Delta T) + \delta l_{ix} \tag{3}$$

Where; $l_i$ is the indication of the LVDT, $l_\sigma$ is the standard length, $\delta l_\mu$ is the correction of the standard digital micrometer head, $\delta l_g$ is the correction of the standard gauge block, L is the nominal length, $\bar{\alpha}$ is the average thermal expansion coefficient of the standard digital micrometer head and the standard gauge block, $\Delta T$ is the temperature difference from the reference temperature of 20°C, $\delta l_{ix}$ is the resolution of the LVDT

$$u_\chi(e) = \sqrt{u^2(l_i) + u^2(\delta l_\mu) + u^2(\delta l_\gamma) + (\Lambda\bar{\alpha})^2 u^2(\Delta T) + (\Lambda\Delta T)^2 u^2(\bar{\alpha}) + u^2(\delta l_{ix})} \quad (4)$$

Where; $u(l_i)$ is the standard uncertainty of the indication of the LVDT, $u(\delta l_\mu)$ is the standard uncertainty of the correction applied to the standard digital micrometer head, $u(\delta l_\gamma)$ is the standard of the correction applied to the standard gauge block, $u(\Delta T)$ is the standard uncertainty of the corrected temperature difference from the reference temperature of 20°C, $u(\bar{\alpha})$ is the standard uncertainty of the average thermal expansion coefficient, $u(l_{ix})$ is the standard uncertainty of the resolution of the LVDT

ตัวอย่างการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อน, $e$, และประเมินความไม่แน่นอนมาตรฐาน, $u_\chi(e)$, ของการเทียบมาตรฐาน LVDT สำหรับความยาว 25 mm แสดงดัง Table 1 ซึ่งประกอบด้วยแหล่งกำเนิดของความไม่แน่นอน ค่าประมาณที่วัดได้ ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐาน สัมประสิทธิ์ความไว และการกระจายความน่าจะเป็น เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวตามเส้นเฉลี่ย $\bar{\alpha}$ ของหัวไมโครมิเตอร์แบบดิจิตอบและเกจบล็อกเหล็กที่ใช้ในการเทียบมาตรฐานมีค่าเท่ากับ $11.5\times10^{-6}$ °C$^{-1}$ มีความไม่แน่นอนมาตรฐานเท่ากับ $1\times10^{-6}$ °C$^{-1}$ เมื่อการเทียบมาตรฐานทำอุณหภูมิสภาวะแวดล้อม 25°C และควบคุมอุณหภูมิให้มีค่าบวกลบไม่เกิน 2°C ทำให้ต้องแก้ค่าเนื่องจากผลของอุณหภูมิที่แตกต่างไปจากอุณหภูมิอ้างอิง 5°C ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.00144 mm และความไม่แน่นอนมาตรฐานของค่าแก้ของอุณหภูมิเท่ากับ 0.000332 mm

**Table 1** Estimate error, $e$, and combined uncertainty, $u_c(e)$, of 25 mm for the LVDT calibration

| Source of uncertainty | Estimate value /mm | Standard uncertainty/mm | Sensitivity coefficient | Distribution |
|---|---|---|---|---|
| Indication of the LVDT, $l_i$ | 24.99 | 0.0067 | 1 | Normal |
| Standard length, $l_\sigma$ | 25.00 | | | |
| Correction of the standard micrometer head, $\delta l_\mu$ | -0.0005 | 0.00035 | -1 | Normal |
| Correction of the standard gauge block, $\delta l_\gamma$ | -0.00004 | 0.00022 | -1 | Rectangle |
| Correction of the temperature difference from the reference temperature of 20°C, $\Delta T$ | 0.00144 | 0.000332 | $-\Lambda\bar{\alpha}$ | Rectangle |
| Correction of the average thermal expansion coefficient, $\bar{\alpha}$ | 0.00 | 0.00007 | $-\Lambda\Delta T$ | Rectangle |
| Resolution of the LVDT; 0.01 mm, $\delta l_{ix}$ | 0.00 | 0.00289 | 1 | Rectangle |
| $e$ $\alpha\nu\delta$ $u_\chi(e)$ | -0.011 | 0.007 | | |

ตัวอย่างผลการเทียบมาตรฐานของ LVDT จำนวน 21 ค่าความยาว ในช่วง 0 mm ถึง 100 mm โดยเพิ่มความยาวครั้งละ 5 mm แสดงดัง Table 2 ประกอบด้วย ค่าที่ระบุ ค่าที่อ่านได้จาก LVDT ค่าความคลาดเคลื่อน และค่าความไม่แน่นอนขยาย

**Table 2** Calibration results of the LVDT

| Nominal value /mm | LVDT /mm | □ /mm | □(□) /mm |
|---|---|---|---|
| 0 | 0.00 | 0.001 | 0.006 |
| 5 | 5.00 | 0.000 | 0.009 |
| 10 | 9.99 | -0.010 | 0.009 |
| 15 | 14.99 | -0.010 | 0.009 |
| 20 | 19.97 | -0.031 | 0.009 |
| 25 | 24.96 | -0.041 | 0.009 |
| 30 | 29.96 | -0.041 | 0.009 |
| 35 | 34.95 | -0.051 | 0.015 |
| 40 | 39.95 | -0.052 | 0.015 |
| 45 | 44.95 | -0.052 | 0.015 |
| 50 | 49.97 | -0.032 | 0.006 |
| 55 | 54.97 | -0.033 | 0.006 |
| 60 | 59.97 | -0.033 | 0.006 |
| 65 | 64.97 | -0.033 | 0.009 |
| 70 | 69.97 | -0.034 | 0.009 |
| 75 | 74.98 | -0.024 | 0.009 |
| 80 | 79.99 | -0.014 | 0.006 |
| 85 | 84.99 | -0.014 | 0.006 |
| 90 | 90.00 | -0.005 | 0.009 |
| 95 | 95.01 | 0.005 | 0.009 |
| 100 | 99.99 | -0.015 | 0.009 |

จากการทดสอบระบบผนังอาคารของโครงการตัวอย่างจำนวน 5 โครงการ โดยใช้วิธีทดสอบตามมาตรฐาน (ASTM E330/E330M-14, 2021) โดยค่าความโก่งที่ได้จากการทดสอบเป็นไปตาม Equation 1 และมีค่าความไม่แน่นอนตาม Equation 2 เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้กับเกณฑ์การยอมรับที่ตกลงใช้ร่วมกัน คือความกว้างของผนังอาคารที่นำมาทดสอบหารด้วย 90 ได้ผลการทดสอบและการตัดสินผลการทดสอบเมื่อเทียบการเกณฑ์การยอมรับแสดงดัง Table 3 จากผลการทดสอบพบว่าทั้ง 5 โครงการ ผ่านการเกณฑ์การยอมรับตามที่กำหนด อย่างไรก็ตาม โครงการ B ถ้าไม่รวมค่าแก้จากการเทียบมาตรฐานของ LVDT จะส่งผลให้ค่าความโก่งเท่ากับ 25.00 mm และเมื่อรวมค่าความไม่แน่นอน จะได้ช่วงความโก่งเท่ากับ 24.99 mm ถึง 25.01 mm ทำให้ต้องตัดสินว่าจะยอมรับหรือไม่ยอมรับแบบมีเงื่อนไข

**Table 3** Performance test of curtain wall system results and decisions of five projects

| Project | Deflection/mm | Uncertainty/mm | Allowance/mm | Decision |
|---|---|---|---|---|
| A | 2.01 | 0.01 | 11.22 | Conform |
| B | 24.99 | 0.01 | 25.00 | Conform |
| C | 12.91 | 0.01 | 14.84 | Conform |
| D | 18.40 | 0.01 | 25.00 | Conform |
| E | 4.57 | 0.01 | 17.22 | Conform |

## สรุป

การทดสอบความแข็งแรงของระบบผนังกระจก สามารถทำได้โดยการวัดค่าความโก่งตัว เมื่อจำลองการติดตั้งระบบผนังกระจกให้มีลักษณะคล้ายกับการใช้งานจริง เนื่องจากการทดสอบแต่ละครั้งมีค่าใช้จ่ายสูง จึงจำเป็นต้องทำด้วยความละเอียดรอบคอบและเป็นไปข้อกำหนดของมาตรฐานการทดสอบ ในการทดสอบนี้ LVDT ที่ใช้ในการทดสอบจะได้รับการเทียบมาตรฐาน ซึ่งผลการเทียบมาตรฐานประกอบด้วย ค่าความคลาดเคลื่อนและค่าความไม่แน่นอน เพื่อนำไปใช้ในการแก้ค่าผลที่ได้จากการทดสอบ และประเมินว่าผลการทดสอบสอดคล้องกับเกณฑ์การยอมรับหรือไม่ จากผลการทดสอบระบบผนังอาคารของโครงการตัวอย่างจำนวน 5 โครงการ พบว่าสอดคล้องกับเกณฑ์การยอมรับทุกโครงการ

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยได้รับการสนับสนุนจากหน่วยปฏิบัติการวิจัยมาตรวิทยาและฟิสิกส์ของอุปกรณ์ (MPiR) ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และ บริษัท แคสแคล จำกัด

## เอกสารอ้างอิง

ASTM E330/E330M-14, 2021. Standard test method for structural performance of exterior windows, doors, skylights and curtain walls by uniform static air pressure difference.

ISO/IEC 17025, 2017. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories.

JCGM 100: 2008 GUM 1995 with minor corrections, 2008. Evaluation of measurement data – guide to the expression of uncertainty in measurement.

Laaneots, R., Mathiesen, O. 2011. An introduction to metrology. Tallinna Raamatutrükikoda, Estonia.

# ระบบชั่งน้ำหนักผู้ป่วยติดเตียงแบบแยกส่วนและการเทียบมาตรฐาน

## Weighting system for bedridden patients and calibration

**ภัค ชลนากิจกุล**[a,b], **ศักดิ์ชัย ชมโคกกรวด**[a], **นพฤทธิ์ จินันทุยา**[a], **วิวัฒน์ วงศ์ก่อเกื้อ**[a,*]

Pak Chonnakijkul[a,b], Sakchai Chomkokard, Noparit Jinuntuya, Wiwat Wongkokua[a,*]

[a]ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[b]บริษัท อุตสาหกรรมการบิน จำกัด กรุงเทพฯ 10210

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

[b]Thai Aviation Industries Co., Ltd., Bangkok 10210, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: wiwat.w@ku.ac.th

**บทคัดย่อ**

น้ำหนักของผู้ป่วยมีความสำคัญต่อการพิจารณาปริมาณยาที่ใช้ในการรักษาของแพทย์ รวมถึงการติดตามภาวะโภชนาการ ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการออกแบบและสร้างระบบชั่งน้ำหนักสำหรับผู้ป่วยติดเตียง โดยใช้เครื่องชั่งแบบแยกส่วนจำนวน 4 เครื่อง ในการชั่งล้อทั้ง 4 ล้อของเตียงผู้ป่วย โดยเครื่องชั่งแต่ละเครื่องจะส่งค่าน้ำหนักไปยังหน่วยประมวลผลกลางแบบไร้สาย ทำการประมวลผลข้อมูลโดยคำนวณค่าน้ำหนักของเตียงออกมา โดยจะต้องทำการชั่งเตียงเปล่าก่อนที่จะเคลื่อนย้ายผู้ป่วยขึ้นนอนบนเตียง หลังจากนั้นจึงชั่งเตียงพร้อมผู้ป่วยอีกครั้ง แล้วนำค่าน้ำหนักผู้ป่วยพร้อมเตียงหักลบกับค่าน้ำหนักของเตียงเปล่า จึงจะได้น้ำหนักของผู้ป่วย โดยที่การชั่งน้ำหนักของเตียงเปล่าจะทำครั้งแรกเพียงครั้งเดียว การเทียบมาตรฐานเครื่องชั่งสามารถทำได้ตามวิธีมาตรฐาน UKAS Lab 14 ซึ่งได้ความไม่แน่นอนขยายของการเทียบมาตรฐานมวลเท่ากับ 0.52 kg ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

**คำสำคัญ**: การเทียบมาตรฐาน, ความไม่แน่นอน, เครื่องชั่งน้ำหนัก, ผู้ป่วยติดเตียง

**Abstract**

Weight is important for considering medicine dosage and nutrition planning. In this research, we designed and constructed a weighing system for bedridden patients. The system consists of four parts, corresponding to the four wheels of the patient bed. Each balance wirelessly sends the weight to the central processing unit for computing the bed's weight. The bed should be weighed before moving the patient onto it and then weighed again. The weight of the bed, including the patient, was subtracted from the weight of the empty bed to determine the patient's weight. The empty bed was weighed only once. The balances were calibrated based on the standard UKAS LAB 14 method. The expanded uncertainty of the mass calibration is 0.52 kg, with a confidence level of 95%.

**Keywords**: Balance, Bedridden patient, Calibration, Uncertainty,

**คำนำ**

ปัจจุบันการรักษาผู้ป่วยในโรงพยาบาล มีความจำเป็นต้องใช้ข้อมูลพื้นฐานที่ได้จากการวัดปริมาณต่าง ๆ ของผู้ป่วยได้แก่ ความดันโลหิต น้ำหนักและส่วนสูง เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับแพทย์ผู้ให้การรักษา แต่ในบางกรณีการวัดปริมาณเหล่านี้ไม่สามารถทำได้เนื่องจากข้อจำกัดบางประการ เช่น กรณีผู้ป่วยติดเตียง สามารถวัดความดันโลหิตและส่วนสูงได้ แต่จะไม่สามารถวัดน้ำหนักได้ การวัดน้ำหนักมีความสำคัญต่อการพิจารณาปริมาณยาที่ใช้ในการรักษาของแพทย์ รวมถึงการติดตามภาวะโภชนาการของผู้ป่วย

การประเมินภาวะโภชนาการของผู้ป่วยติดเตียง เป็นส่วนหนึ่งในการรักษาและฟื้นฟู ซึ่งการชั่งน้ำหนักสามารถทำให้การติดตามภาวะโภชนาการของผู้ป่วยเป็นไปอย่างมีระบบ การรักษาความสมดุลของการบริโภคและความต้องการสารอาหาร อาจส่งผลถึงการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาจากภาวะโภชนาการผิดปกติ เมื่อได้รับปริมาณสารอาหารที่บริโภคมากหรือน้อยกว่าความต้องการของร่างกาย

เนื่องจากผู้ป่วยติดเตียงไม่สามารถยืนหรือเดินได้ การชั่งน้ำหนักผู้ป่วยอาจจำเป็นต้องชั่งพร้อมเตียง โดยทั่วไปสามารถทำได้โดยการเข็นเตียงผู้ป่วยไปขึ้นเครื่องชั่งน้ำหนักที่มีขนาดใหญ่กว่าเตียง แต่มีข้อจำกัดคือ ความไม่สะดวกในการเคลื่อนย้ายเตียงผู้ป่วย งานวิจัยนี้จึงได้ทำการออกแบบและสร้างเครื่องชั่งน้ำหนักสำหรับผู้ป่วยติดเตียงแบบแยกส่วนสำหรับชั่งล้อของเตียงผู้ป่วยทั้ง 4 ล้อ รวมถึงการเทียบมาตรฐานเครื่องชั่ง ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการรักษาผู้ป่วยติดเตียงตามโรงพยาบาลต่างๆ

**อุปกรณ์และวิธีการ**

ระบบชั่งน้ำหนักผู้ป่วยแบบแยกส่วนประกอบด้วยหน่วยประมวลผลกลาง มีการเชื่อมต่อแบบไร้สายกับเครื่องชั่งน้ำหนักจำนวน 4 เครื่อง สำหรับชั่งล้อของเตียงผู้ป่วยทั้ง 4 ล้อ แต่ละเครื่องประกอบด้วยตัวรับรู้แบบสเตรนเกจจำนวน 4 ตัว เชื่อมต่อกันแสดงดัง Fig. 1A โดยตำแหน่งสาย E+ และ E- คือตำแหน่งในการจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงขั้วบวกและลบตามลำดับ และตำแหน่งสาย A+ และ A- คือตำแหน่งในการวัดความต่างศักย์ของวงจรตัวรับรู้ทั้ง 4 ตัว จากน้ำหนักที่ล้อของเตียงผู้ป่วย ซึ่งตัวรับรู้แต่ละตัวจะประกอบด้วยตัวต้านทาน 2 ตัว ซึ่งตัวหนึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มมวลกำหนดให้เป็นค่าความต้านทาน R+ และอีกหนึ่งจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มมวล กำหนดให้เป็นค่าความต้านทาน R- ทำให้มีตัวต้านทานรวมทั้งหมด 8 ตัว จะเห็นได้ว่าเป็นการต่อวงจรแบบ Wheatstone bridge มีวงจรสมมูลแสดงดัง Fig. 1B โดยค่าความต้านทาน R+ มีค่าเท่ากับ 1.001462 kΩ และ R- มีค่าเท่ากับ 1.00232 kΩ ตำแหน่งการวางตัวรับรู้เป็น บนซ้าย (UL) บนขวา (UR) ล่างซ้าย (LL) และล่างขวา (LR)

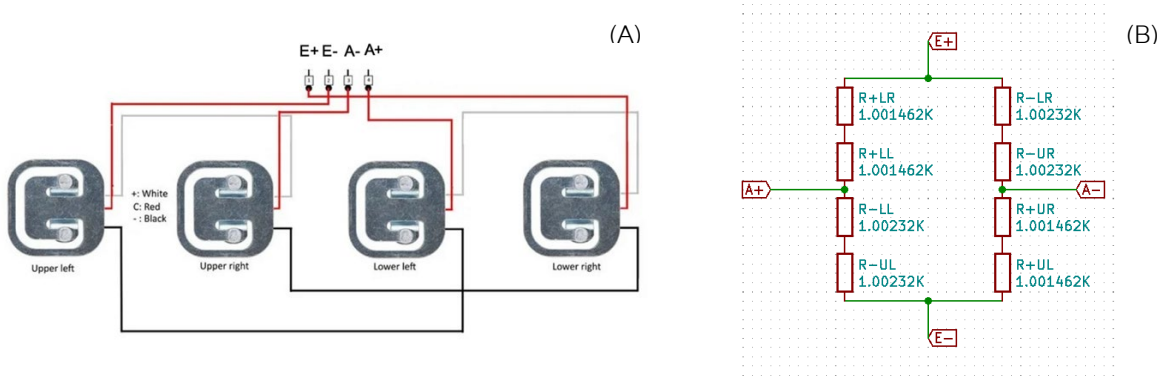



**Fig. 1** Wiring diagram of four sensors for each balance (A) and equivalence circuit (B)

เมื่อจ่ายความต่างศักย์ $E_0$ ให้กับวงจร จะเกิดความต่างศักย์ที่ตำแหน่ง A+ เท่ากับความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวต้านทาน R-LL และ R-UL จะได้ความต่างศักย์ ? ที่ A+ เทียบกับ E- มีค่าตาม Equation 1:

$$V_{\square} = \frac{2.00464}{4.007564} E_0 \quad (1)$$

ในทำนองเดียวกัน จะได้ความต่างศักย์ศักย์ $V$ ที่ A- เทียบกับ E- มีค่าตาม Equation 2:

$$V_{\square} = \frac{2.002924}{4.007564} E_0 \quad (2)$$

ดังนั้นความต่างศักย์ของวงจรขาออกในขณะที่ไม่มีมวลมากดทับ จะมีค่าตาม Equation 3

$$V_{\square} - V_{\square} = 0.00042819\, E_0 \quad (3)$$

ตัวรับรู้แต่ละตัวสามารถรับน้ำหนักได้ 50 kg ซึ่งเครื่องชั่งประกอบด้วยตัวรับรู้จำนวน 4 ตัวต่อหนึ่งเครื่อง ส่งผลให้เครื่องชั่งแต่ละเครื่องสามารถรับน้ำหนักได้ 200 kg ในแต่ละล้อของเตียง ในการชั่งน้ำหนักผู้ป่วยที่อยู่บนเตียงจะใช้เครื่องชั่งจำนวน 4 เครื่อง ในกรณีที่ผู้ป่วยอยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางเตียงจะสามารถชั่งน้ำหนักผู้ป่วยพร้อมเตียงได้สูงสุด 800 kg ซึ่งเป็นพิสัยที่เพียงพอสำหรับชั่งน้ำหนักของผู้ป่วยทั้งหมด เนื่องจากโดยปกติแล้วเตียงผู้ป่วยจะมีน้ำหนักประมาณ 80 kg ถึง 170 kg และน้ำหนักผู้ป่วยที่เป็นผู้ใหญ่มีช่วงน้ำหนัก 28 kg ถึง 230 kg ซึ่งจะได้พิสัยของน้ำหนักผู้ป่วยพร้อมเตียงรวมเป็น 128 kg ถึง 400 kg แต่ในทางปฏิบัติผู้ป่วยจะไม่อยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางเตียงเสมอไป ซึ่งพิสัยของเครื่องชั่งได้เผื่อกรณีนี้ไว้แล้ว

เครื่องชั่งแต่ละเครื่องจะใช้แบตเตอรี่ Li-ion ความต่างศักย์ 3.7 V จำนวน 2 ก้อน เป็นแหล่งจ่ายพลังงาน ซึ่งสามารถชาร์ตได้ รูปแบบของเครื่องชั่งน้ำหนัก 1 เครื่องจากจำนวนทั้งหมด 4 เครื่อง และหน่วยประมวลผลกลางแสดงดัง Fig. 2A และ Fig. 2B ตามลำดับ

(A) (B)

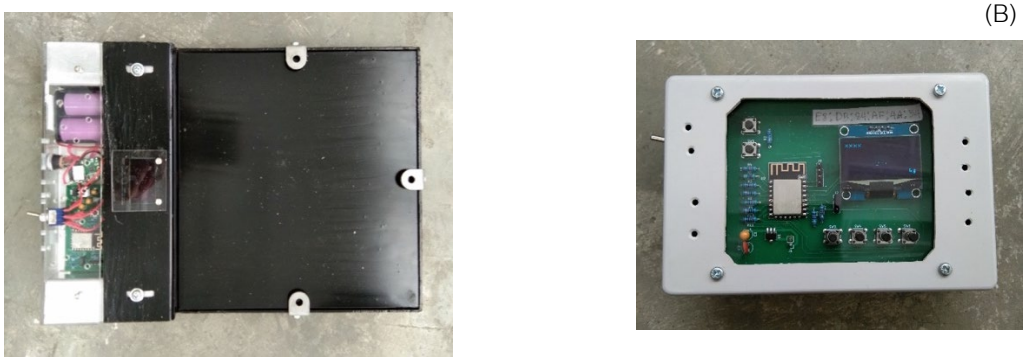


**Fig. 2** A balance out of four (A) and the central processing unit (B)

ก่อนที่จะนำเครื่องชั่งไปใช้งานจำเป็นต้องเทียบมาตรฐานเครื่องชั่งแต่ละเครื่องก่อน โดยใช้ตุ้มน้ำหนักที่ผ่านการเทียบมาตรฐานแล้วเป็นเครื่องมือวัดมาตรฐาน และการเทียบมาตรฐานสามารถทำได้โดยวิธีการมาตรฐาน (UKAS LAB 14, 2022) แสดงดัง Fig. 3 เนื่องจากเครื่องชั่งมีพื้นผิวที่ใช้รับน้ำหนักขนาดกว้างยาวเป็น 19 cm × 20 cm ทำให้สามารถรับตุ้มน้ำหนักสูงสุดได้จำกัด จึงทำการเทียบมาตรฐานจำนวน 5 ค่าน้ำหนักได้แก่ 22.69 kg, 45.36 kg, 68.04 kg, 90.72 kg และ 136.08 kg ซึ่งครอบคลุมการใช้งานจริงของเครื่องชั่งแต่ละเครื่อง เนื่องจากเครื่องชั่งแต่ละเครื่องมีพิสัย 200 kg แต่การใช้งานจริง ค่าสูงสุดอยู่ที่ประมาณครึ่งหนึ่งของพิสัยคือ 100 kg

การชั่งน้ำหนักผู้ป่วยติดเตียง เริ่มจากวางเครื่องชั่งใต้ล้อเตียงผู้ป่วยแต่ละล้อจนครบ 4 ล้อ จากนั้นจึงเปิดการทำงานของเครื่องชั่งทั้งหมด พร้อมทั้งเปิดการทำงานของหน่วยประมวลผลกลาง ซึ่งหน่วยประมวลผลกลางจะทำการรับข้อมูลจากเครื่องชั่งทั้ง 4 เครื่องผ่านระบบการรับส่งข้อมูลแบบไร้สาย นำมาประมวลผลน้ำหนักเตียงเปล่า ซึ่งจะทำครั้งแรกเพียงครั้งเดียว บันทึกค่าไว้ จากนั้นจึงนำเตียงที่ทราบค่าน้ำหนักแล้วไปใช้กับผู้ป่วย เมื่อต้องการชั่งน้ำหนักผู้ป่วยจะสามารถทำได้โดยการชั่งน้ำหนักผู้ป่วยในขณะที่นอนอยู่บนเตียง ทำการชั่งน้ำหนักด้วยกระบวนการเช่นเดียวกันกับการชั่งน้ำหนักเตียงเปล่า ผลที่ได้จากการชั่งสามารถคำนวณค่าน้ำหนักผู้ป่วย ? ตาม Equation 4 และสามารถประเมินความไม่แน่นอนรวม $u_\chi(m)$ ตาม Equation 5 (JCGM 100, 2008)

$$m = m_1 + m_2 + m_3 + m_4 - (m_{10} + m_{20} + m_{30} + m_{40}) \quad (4)$$

Where; $m_1, m_2, m_3, m_4$ are the weights at the wheel number 1, 2, 3 and 4 respectively and $m_{10}, m_{20}, m_{30}, m_{40}$ are the weights at the wheel number 1, 2, 3 and 4 respectively of the empty bed

$$u_\chi(m) = \sqrt{u^2(m_1) + u^2(m_2) + u^2(m_3) + u^2(m_4) + u^2(m_{10}) + u^2(m_{20}) + u^2(m_{30}) + u^2(m_{40})} \quad (5)$$

Where; $u(m_1), u(m_2), u(m_3)$ and $u(m_4)$ are the standard uncertainties of the weights at the wheel number 1, 2, 3 and 4 respectively and $u(m_{10}), u(m_{20}), u(m_{30})$ and $u(m_{40})$ are the standard uncertainties of the weights at the wheel number 1, 2, 3 and 4 respectively of the empty bed



Fig. 3 Demonstrate the calibration method of the balance

**ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง**

ความไม่แน่นอนของการเทียบมาตรฐานเครื่องชั่ง สามารถประเมินได้จากแบบจำลองของการถ่ายทอดความไม่แน่นอน Laaneots (2011) โดยเริ่มจากความสัมพันธ์ของการเทียบมาตรฐาน ระหว่างเครื่องชั่งน้ำหนักและตุ้มน้ำหนักมาตรฐาน โดยพิจารณาปริมาณที่มีผลกระทบต่างๆ ที่เกิดจากเครื่องมือวัดรวมถึงปริมาณที่มีผลกระทบจากสภาพแวดล้อมภายในห้องปฏิบัติการเทียบมาตรฐาน การเทียบมาตรฐานของเครื่องชั่ง เขียนได้เป็นค่าความคลาดเคลื่อน $e$ ตาม Equation 6 และแบบจำลองของการถ่ายทอดความไม่แน่นอน $u_\chi(e)$ ตาม Equation 7:

$$e = m_i - (m_\sigma + \delta m_\sigma + \delta D_\sigma) + \delta m_{\square} + \delta m_{ix} \quad (6)$$

Where; $m_i$ is the indication of the balance, $m_s$ is the weight standard, $\delta m_\sigma$ is the correction applied to the weight standard, $\delta D_s$ is the drift of the last calibration of the weight standard, $\delta m_{d0}$ is the zero correction of the balance, $\delta m_{ix}$ is the resolution of the balance

$$u_\chi(e) = \sqrt{u^2(m_i) + u^2(\delta m_\sigma) + u^2(\delta D_\sigma) + u^2(\delta m_{\square}) + u^2(\delta m_{ix})} \quad (7)$$

Where; $u(m_i)$ is the standard uncertainty of the indication of the balance, $u(\delta m_\sigma)$ is the standard uncertainty of the correction applied to the weight standard, $u(\delta D_\sigma)$ ιστ the standard uncertainty of the drift of the last calibration, $u(\delta m_{\square})$ is the standard uncertainty of the zero correction of the balance, $u(\delta m_{ix})$ is the standard uncertainty of the resolution of the balance

ตัวอย่างตารางประเมินค่าความคลาดเคลื่อน, $e$, และความไม่แน่นอนมาตรฐาน, $u_\chi(e)$, ของเครื่องชั่ง สำหรับน้ำหนัก 22.69 kg แสดงดัง Table 1 ซึ่งประกอบด้วย แหล่งกำเนิดของความไม่แน่นอน ค่าประมาณที่วัดได้ ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐาน สัมประสิทธิ์ความไว และการกระจายความน่าจะเป็น

**Table 1** Estimate error, $e$, and combined uncertainty, $u_\chi(e)$, of 22.69 kg for the weight calibration

| Source of uncertainty | Estimate value /kg | Standard uncertainty/kg | Sensitivity coefficient | Distribution |
|---|---|---|---|---|
| Indication of the balance, $m_i$ | 22.70 | 0.025 | 1 | Normal |
| The weight standard, $m_\sigma$ | 22.69 | | | |
| Correction of weight standard, $\delta m_\sigma$ | 0.011 | 0.00018 | -1 | Normal |
| Drift of the last calibration, $\delta D_\sigma$ | 0.00061 | 0.00035 | -1 | Rectangle |
| Zero correction of the balance, $\delta m_{d0}$ | 0.1 | 0.06 | 1 | Rectangle |
| Resolution of the balance; 0.1 kg, $\delta m_{ix}$ | 0.00 | 0.029 | 1 | Rectangle |
| $e$ and $u_\chi(e)$ | 0.099 | 0.069 | | |

ตัวอย่างผลการเทียบมาตรฐานเครื่องชั่ง โดยใช้ตุ้มน้ำหนักมาตรฐานขนาดตุ้มละ 50 lb จำนวน 5 ตุ้ม เพิ่มตุ้มน้ำหนักครั้งละ 1 ตุ้ม แปลงหน่วยให้เป็น kg จะได้จุดทดสอบจำนวน 6 จุด คือ 0.0 kg, 22.69 kg, 45.36 kg, 68.04 kg, 90.72 kg และ 113.41 kg แสดงดัง Table 2

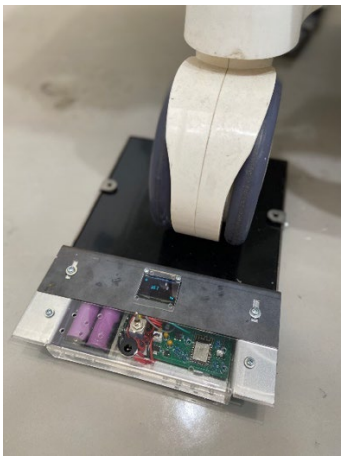
**Table 2** Calibration results of the balance

| Test Point | | $e$ | $U(e)$ | MPE |
|---|---|---|---|---|
| Weight applied /kg | Balance /kg | /kg | /kg | /kg |
| 0.00 | 0.0 | 0.00 | 0.12 | 1.0 |
| 22.69 | 22.7 | 0.10 | 0.14 | 1.0 |
| 45.36 | 45.4 | 0.12 | 0.14 | 1.0 |
| 68.04 | 68.1 | 0.13 | 0.14 | 1.0 |
| 90.72 | 90.8 | 0.14 | 0.14 | 1.0 |
| 113.41 | 113.4 | 0.04 | 0.13 | 1.0 |

จาก Table 2 จะเห็นได้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้นตามจำนวนตุ้มน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น แต่ลดลงเมื่อเพิ่มไปถึงก้อนที่ 5 ซึ่งเป็นผลมาจากค่าความคลาดเคลื่อนของตุ้มน้ำหนักแต่ละก้อนรวมกัน ส่วนค่าความไม่แน่นอนขยายมีค่าใกล้เคียงกันตลอดพิสัยที่ทำการเทียบมาตรฐาน

เมื่อนำเครื่องชั่งไปทดสอบใช้งานกับเตียงผู้ป่วย แสดงดัง Fig. 4 ชั่งได้น้ำหนัก 171.6 kg และเมื่อมีผู้ทดสอบนั่งอยู่บนเตียงชั่งได้ 233.0 kg จะได้น้ำหนักของผู้ทดสอบเท่ากับ 61.4 kg มีค่าความไม่แน่นอนขยายเท่ากับ 0.4 kg สอดคล้องกับค่าน้ำหนักที่ผู้ทดสอบที่ชั่งได้จากเครื่องชั่งแบบยืนชั่งคือ 61.4 kg โดยผลการทดสอบนี้ยังไม่ได้รวมค่าแก้ของเครื่องชั่งแต่ละเครื่อง หากพิจารณาความไม่แน่นอนขยายเทียบกับเกณฑ์ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ยอมรับได้ (MPE) คือ 1.0 kg พบว่ามีค่ามากกว่า 1:3 การแก้ค่าความคลาดเคลื่อนของผลการวัดที่ได้จากเครื่องชั่งแต่ละเครื่องจึงเป็นสิ่งจำเป็น ที่จะช่วยให้มั่นใจว่าผลการวัดที่ได้ไม่เกินเกณฑ์ MPE

(A)





(B)

**Fig 4.** A wheel of the patient bed on a balance (A) and the patient bed on the balances (B)

## สรุป

การชั่งน้ำหนักผู้ป่วยติดเตียง สามารถทำได้โดยใช้เครื่องชั่งน้ำหนักแบบแยกส่วน ซึ่งประกอบด้วยเครื่องชั่งจำนวน 4 เครื่อง และหน่วยประมวลผลกลางแบบไร้สาย ซึ่งการเทียบมาตรฐานสามารถทำได้โดยใช้ตุ้มน้ำหนักมาตรฐานทำให้ได้ค่าความคลาดเคลื่อน และความไม่แน่นอนของการเทียบมาตรฐาน เมื่อนำไปทดสอบการใช้งานจริงพบว่าเครื่องชั่งสามารถวัดค่าได้แม่นยำภายใต้ขอบเขตของความไม่แน่นอน อย่างไรก็ตามเนื่องจากอัตราส่วนความไม่แน่นอนขยายต่อ MPE มีค่าเกินเกณฑ์ที่ควรจะเป็นคือไม่เกิน 1:3 อย่างไรก็ตามการใช้ค่าแก้กับผลการวัดที่ได้จะช่วยให้เกิดความเชื่อมั่นว่าความคลาดเคลื่อนของค่าน้ำหนักจะไม่เกินเกณฑ์ตามที่กำหนด

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยได้รับการสนับสนุนจากหน่วยปฏิบัติการวิจัยมาตรวิทยาและฟิสิกส์ของอุปกรณ์ (MPiR) ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ พ.ท.หญิง พญ. สิรกานต์ เตชะวณิช หัวหน้าหน่วยโภชนศาสตร์คลินิก โรงพยาบาลพระมงกุฎเกล้า และ บริษัท อุตสาหกรรมการบิน จำกัด

## เอกสารอ้างอิง

JCGM 100: 2008 GUM 1995 with minor corrections, 2008. Evaluation of measurement data – guide to the expression of uncertainty in measurement.

Laaneots, R., Mathiesen, O. 2011. An introduction to metrology. Tallinna Raamatutrükikoda, Estonia.

UKAS LAB 14, 2022. Guidance on the calibration of weighing machines used in testing and calibration laboratories.

# การย่อยสลายสารกำจัดวัชพืช 2,4-dichlorophenoxyacetic acid โดยแบคทีเรียที่คัดแยกจากดินแปลงปลูกอ้อย

# Degradation of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid herbicide by bacteria isolated from soil of sugarcane fields

**สนธยา ขำติ้บ***, **จิตรา เกาะแก้ว**, **กนกอร บุญพา**, **อำนาจ เอี่ยมวิจารณ์**

Sontaya Khamtib*, Jitra Kokaew, Kanokon Bunpha, Amnat Eamvijarn

กลุ่มวิจัยปฐพีวิทยา กองวิจัยพัฒนาปัจจัยการผลิตทางการเกษตร กรมวิชาการเกษตร กรุงเทพฯ 10900

Research Group of Soil Science, Division of Agriculture Production Science Research and Development, Department of Agriculture, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: skbiot@gmail.com

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อคัดแยกและทดสอบการย่อยสลาย 2,4-dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D) ของแบคทีเรียที่คัดแยกได้ จากการคัดแยกแบคทีเรียย่อยสลายสารกำจัดวัชพืช 2,4-D จากดินแปลงปลูกอ้อยด้วยวิธีการเลือกเพิ่มปริมาณเฉพาะแบคทีเรียย่อยสลายสารกำจัดวัชพืช 2,4-D (selective technique) สามารถคัดแยกแบคทีเรียย่อยสลายสารกำจัดวัชพืช 2,4-D จำนวน 30 ไอโซเลท คัดเลือกแบคทีเรียที่สามารถเจริญได้ดีที่สุดจำนวน 5 ไอโซเลท เพื่อจัดจำแนกชนิดด้วยการเปรียบเทียบลำดับนิวคลีโอไทด์บริเวณ 16S rRNA gene พบว่า แบคทีเรีย ทั้ง 5 ไอโซเลท คือ *Priestia aryabhattai* HKK-4, *Priestia aryabhattai* HKK-6, *Priestia megaterium* HKK-10, *Peribacillus acanthi* HSB-11 และ *Peribacillus acanthi* HSB-15 เมื่อนำแบคทีเรียทั้งหมดไปทดสอบการย่อยสลาย 2,4-D ในอาหารเหลว Minimal salt medium (MSM) ที่มีส่วนผสมของ 2,4-D ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า *P. megaterium* HKK-10 มีศักยภาพในการย่อยสลายสารกำจัดวัชพืช 2,4-D ที่สุด คือสามารถย่อยสลาย 2,4-D เพื่อใช้ในการเจริญเติบโต เท่ากับ 73.31% หลังบ่มเป็นเวลา 24 ชม. และ 96.47% หลังบ่มเป็นเวลา 48 ชม. ในขณะที่ *P. aryabhattai* HKK-4, *P. aryabhattai* HKK-6, *P. acanthi* HSB-11 และ *P. acanthi* HSB-15 สามารถย่อยสลาย 2,4-D ได้เกิน 90% หลังจากบ่มเป็นเวลา 72 ชม.

**คำสำคัญ**: การย่อยสลายทางชีวภาพ, จุลินทรีย์ดิน, สารกำจัดวัชพืช

**Abstract**

The objective of this study is to isolate and characterize bacteria capable of utilizing 2,4-dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D) as the sole carbon and energy source. Initially, thirty isolates of bacteria with the ability to degrade 2,4-D were screened from soil of sugarcane fields, and the top five isolates showing the best growth were selected for further classification based on the sequence analysis of the 16S rRNA gene. These five selected bacteria were identified as *Priestia aryabhattai* HKK-4, *Priestia aryabhattai* HKK-6, *Priestia megaterium* HKK-10, *Peribacillus acanthi* HSB-11 and *Peribacillus acanthi* HSB-15. Subsequently, the 2,4-D degradation of these bacteria was tested in Minimal Salt Medium (MSM) containing 250 mg/L of 2,4-D. The results indicated that *P. megaterium* HKK-10 demonstrated the highest degradation potential, with 2,4-D degradation percentages of 73.31% and 96.47% after 24 and 48 hr. of cultivation, respectively.

**Keywords**: Biodegradation, Herbicide, Soil microorganism

**คำนำ**

2,4-dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D) เป็นสารกำจัดวัชพืชในกลุ่ม Chlorinated phenoxy compound ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย เพื่อกำจัดวัชพืชใบกว้าง (broad-leaf weed) วัชพืชจะดูดซึม 2,4-D เข้าทางใบและเคลื่อนย้ายไปยังเนื้อเยื่อเจริญที่ปลายยอด ส่งผลให้วัชพืชมีการเจริญเติบโตผิดปกติ ทำให้ใบหงิกงอ และตายในที่สุด (Kelley and Riechers, 2007) ส่วน 2,4-D ที่ปนเปื้อนในดินจะมีค่าครึ่งชีวิต (half-life) ที่สั้นอยู่ในช่วง 1.7 ถึง 13.1 วัน (Wilson et al., 1997; Gaultier and Farenhorst, 2007; Fu et al., 2009) แต่สามารถเคลื่อนที่และแพร่กระจายได้ง่ายในดินโดยการชะ (leaching) ทำให้ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในวงกว้าง (Bollag et al., 1968) การตกค้างและการแพร่กระจายของ 2,4-D ในดิน ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ มากมาย เช่น อินทรียวัตถุ อนุภาคดิน ค่าความเป็นกรด-ด่าง อุณหภูมิ ค่าศักย์ของน้ำ และปริมาณจุลินทรีย์ในดิน เป็นต้น (Voog and Groffman, 1997; Boivin et al., 2005) แบคทีเรียในดิน เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญมากในการย่อยสลายและควบคุมการแพร่กระจาย 2,4-D ในดิน เนื่องจากแบคทีเรียในดินหลายสกุล เช่น *Bacillus*, *Cupriavidus*, *Delftia*, *Flavobaterium*, และ *Pseudomonas* เป็นต้น (Gonod et al., 2006; González et al., 2012; Chang et al., 2015; Farag et al., 2021) มีความสามารถในการใช้ 2,4-D เป็นแหล่งคาร์บอนและพลังงาน ในการเจริญเติบโต ทำให้การตกค้างของ 2,4-D ในดินลดลง และยังช่วยลดการแพร่กระจายของ 2,4-D อีกด้วย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะคัดแยกแบคทีเรียที่มีศักยภาพย่อยสลายสารกำจัดวัชพืช 2,4-D จากดินในแปลงอ้อยที่ปนเปื้อน 2,4-D และทดสอบการย่อยสลาย 2,4-D ในอาหารเหลว โดยแบคทีเรียที่คัดแยกได้

**อุปกรณ์และวิธีการ**

*การคัดแยกแบคทีเรียย่อยสลายสารกำจัดวัชพืช 2,4-D*

เก็บตัวอย่างดินที่ระดับความลึก 0–20 เซนติเมตร จากแปลงทดสอบผลกระทบของการใช้สารกำจัดวัชพืช 2,4-D ต่อจุลินทรีย์ดินในแปลงปลูกอ้อยของศูนย์วิจัยพืชไร่สุพรรณบุรี (14°16'16.5"N 99°50'26.0"E) และแปลงเกษตรกรจังหวัดขอนแก่น (16°27'46.4"N 102°20'11.0"E) หลังฉีดพ่นสารกำจัดวัชพืช 2,4-D อัตรา 200 กรัมสารออกฤทธิ์ต่อไร่ เป็นเวลา 7 วัน เพื่อคัดแยกแบคทีเรียย่อยสลายสารกำจัดวัชพืช 2,4-D ด้วยวิธีการเลือกเพิ่มปริมาณเฉพาะแบคทีเรียย่อยสลายสารกำจัดวัชพืช 2,4-D (selective technique) โดยชั่งตัวอย่างดิน 100 กรัม ใส่ในขวดแก้วสีชา จากนั้นเติม 2,4-D 0.5 กรัม บ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 15 วัน เพื่อเพิ่มจำนวนจุลินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายสารกำจัดวัชพืช 2,4-D จากนั้นนำตัวอย่างดินมาคัดแยกแบคทีเรียย่อยสลายสารกำจัดวัชพืช 2,4-D ด้วยเทคนิค Spread plate บนอาหาร Nutrient agar (NA) เลือกโคโลนีที่มีลักษณะแตกต่างกันในแต่ละตัวอย่างมาทำให้บริสุทธิ์ด้วยเทคนิค Cross streak บนอาหาร NA นำแบคทีเรียทั้งหมดที่คัดแยกได้ทดสอบการเจริญในอาหาร Minimal salt medium (MSM) (Zabaloy and Gómez 2014) ที่มีส่วนผสมของ 2,4-D ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อคัดเลือกแบคทีเรียที่สามารถเจริญได้ดีที่สุดจำนวน 5 ไอโซเลท ไปจัดจำแนกชนิดแบคทีเรีย

*การจัดจำแนกแบคทีเรียย่อยสลายสารกำจัดวัชพืช 2,4-D*

การจัดจำแนกแบคทีเรียย่อยสลายสารกำจัดวัชพืช 2,4-D ด้วยการเปรียบเทียบความคล้ายคลึงของลำดับนิวคลีโอไทด์บริเวณ 16S rRNA gene ของแบคทีเรียย่อยสลายสารกำจัดวัชพืช 2,4-D ที่คัดแยกได้กับแบคทีเรียในฐานข้อมูล GenBank บนเว็บไซด์ของ National Center for Biotechnology Information (NCBI) ตามวิธีของ สนธยา (2561) และสร้างความสัมพันธ์เชิงวิวัฒนาการ (Phylogenetic tree) ลำดับนิวคลีโอไทด์บริเวณ 16S rRNA gene ของแบคทีเรียย่อยสลายสารกำจัดวัชพืช 2,4-D ที่คัดแยกได้และแบคทีเรียในฐานข้อมูล GenBank โดยใช้โปรแกรม MEGA 11

(Tamura et. al., 2021) เลือกวิธีการจัดกลุ่มแบบ Neighbor-Joining method (Saitou and Nei, 1987) ทำการ bootstrapping 1,000 ซ้ำ (Felsenstein, 1985) ส่วนการศึกษาทางสัณฐานวิทยา เริ่มต้นโดยนำแบคทีเรียย่อยสลายสารกำจัดวัชพืช 2,4-D มาทำให้บริสุทธิ์ด้วยเทคนิค Cross streak บนอาหาร Nutrient agar บ่มที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ใช้ลวดเขี่ยเชื้อแตะโคโลนีแบคทีเรีย เสมียร์ลงบนแผ่นสไลด์ ย้อมสีแกรมด้วยสีย้อมแกรม (K001-1KT, Hi Media, Mumbai, India) ตามวิธีการ Hucker method (Doetsch, 1981) นำไปส่องภายใต้กล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า เพื่อตรวจสอบการติดสีแกรมและลักษณะรูปร่างของเซลล์แบคทีเรีย

*การทดสอบการย่อยสลายสารกำจัดวัชพืช 2,4-D*

นำแบคทีเรียย่อยสลายสารกำจัดวัชพืช 2,4-D ที่คัดแยกได้ มาทดสอบการย่อยสารกำจัดวัชพืช 2,4-D ตามวิธีของ Zabaloy and Gómez (2014) โดยทำการศึกษาในขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 มิลลิลิตร ใช้ปริมาตรในการทดสอบ (working volume) 153 มิลลิลิตร ซึ่งประกอบด้วย แบคทีเรียแขวนลอย ($10^7$ โคโลนีต่อมิลลิลิตร) ปริมาตร 3 มิลลิลิตร และอาหาร MSM ที่มีส่วนผสมของ 2,4-D ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 150 มิลลิลิตร บ่มบนเครื่องบ่มเขย่าความเร็ว 150 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เก็บตัวอย่างน้ำหมักหลังจากบ่มเป็นเวลา 0 12 24 48 72 และ 96 ชั่วโมง ปั่นแยกเซลล์แบคทีเรียออกจากตัวอย่างน้ำหมักด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง ที่ความเร็ว 10,000 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที แยกส่วนใสเพื่อวิเคราะห์ปริมาณสารกำจัดวัชพืช 2,4-D ที่เหลือในอาหาร MSM ด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น 285 นาโนเมตร (González et al. 2012) ส่วนความเข้มข้นของแบคทีเรียวิเคราะห์ตามวิธีของ Chang et al. (2015) โดยการวัดค่าความทึบแสง (optical density) ด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร

**ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง**

*แบคทีเรียย่อยสลายสารกำจัดวัชพืช 2,4-D ที่คัดแยกได้*

จากการคัดแยกแบคทีเรียจากดินแปลงทดสอบการใช้สารกำจัดวัชพืช 2,4-D ในแปลงอ้อยจังหวัดสุพรรณบุรีและขอนแก่น สามารถคัดแยกแบคทีเรียได้จำนวน 30 ไอโซเลท แบ่งเป็นแบคทีเรียที่คัดแยกได้จากแปลงทดสอบจังหวัดสุพรรณบุรี 15 ไอโซเลท และแปลงทดสอบจังหวัดขอนแก่น 15 ไอโซเลท แบคทีเรียทั้งหมดถูกนำไปทดสอบความสามารถการเจริญในอาหาร MSM (Zabaloy and Gómez 2014) ที่มี 2,4-D ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นแหล่งคาร์บอนและพลังงาน จากการศึกษาพบว่า แบคทีเรียทั้ง 30 ไอโซเลท สามารถเจริญได้ในอาหาร MSM ที่มี 2,4-D ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีค่าความทึบแสง ที่ 600 นาโนเมตร (OD600) อยู่ในช่วง 0.011±0.001 ถึง 0.097±0.009 ซึ่งไอโซเลทที่สามารถเจริญได้ดีที่สุด คือ HKK-4 (OD600 เท่ากับ 0.097±0.009) (Table 1) รองลงมาได้แก่ HSB-11, HKK-6, HKK-10 และ HSB-15 ตามลำดับ ซึ่งแบคทีเรียทั้ง 5 ไอโซเลท ถูกนำไปทดสอบการย่อยสลายสารกำจัดวัชพืช 2,4-D ในอาหารเหลว และจัดจำแนกชนิด

**Table 1** Bacteria growth in Minimal salt medium (MSS) with 2,4-D at 100 mg/L

| Isolates code | Optical densities at 600 nm | Isolates code | Optical densities at 600 nm |
|---|---|---|---|
| HSB-1 | 0.030±0.005* | HKK-1 | 0.085±0.010 |
| HSB-2 | 0.069±0.012 | HKK-2 | 0.078±0.010 |
| HSB-3 | 0.015±0.002 | HKK-3 | 0.084±0.008 |
| HSB-4 | 0.072±0.016 | HKK-4 | 0.097±0.009 |
| HSB-5 | 0.066±0.001 | HKK-5 | 0.046±0.005 |
| HSB-6 | 0.020±0.002 | HKK-6 | 0.093±0.016 |
| HSB-7 | 0.066±0.008 | HKK-7 | 0.067±0.006 |
| HSB-8 | 0.087±0.001 | HKK-8 | 0.049±0.006 |
| HSB-9 | 0.063±0.002 | HKK-9 | 0.011±0.001 |
| HSB-10 | 0.081±0.004 | HKK-10 | 0.090±0.004 |
| HSB-11 | 0.094±0.013 | HKK-11 | 0.068±0.013 |
| HSB-12 | 0.086±0.005 | HKK-12 | 0.074±0.009 |
| HSB-13 | 0.068±0.007 | HKK-13 | 0.025±0.002 |
| HSB-14 | 0.023±0.001 | HKK-14 | 0.076±0.010 |
| HSB-15 | 0.088±0.009 | HKK-15 | 0.081±0.001 |

* mean ± SD (n = 3)

*จัดจำแนกชนิดแบคทีเรียย่อยสลายสารกำจัดวัชพืช 2,4-D*

ผลการเปรียบเทียบลำดับนิวคลีโอไทด์บริเวณ 16S rRNA gene ของแบคทีเรียย่อยสลายสารกำจัดวัชพืช 2,4-D ที่คัดแยกได้กับแบคทีเรียในฐานข้อมูล GenBank พบว่า ลำดับนิวคลีโอไทด์บริเวณ 16S rRNA gene ของแบคทีเรียไอโซเลท HKK-4 (1,392 นิวคลีโอไทด์) และ HKK-6 (1,397 นิวคลีโอไทด์) มีความคล้ายคลึง *Priestia aryabhattai* B8W22 (EF114313.2) 99.78% และ 99.71% ตามลำดับ แบคทีเรียไอโซเลท HKK-10 (1,412 นิวคลีโอไทด์) มีความคล้ายคลึง *Priestia megaterium* NBRC 15308 (JJMH01000057.1) 99.65% ส่วนแบคทีเรียไอโซเลท HSB-11 (1,398 นิวคลีโอไทด์) และ HSB-15 (1,401 นิวคลีโอไทด์) มีความคล้ายคลึง *Peribacillus acanthi* L28 (MT516450.1) 99.07% และ 99.29% ตามลำดับ (Table 2)

ผลการศึกษาความสัมพันธ์เชิงวิวัฒนาการของแบคทีเรียย่อยสลายสารกำจัดวัชพืช 2,4-D ไอโซเลท HKK-4 HKK-6 HKK-10 และแบคทีเรียในสกุล *Priestia* พบว่า แบคทีเรียย่อยสลายสารกำจัดวัชพืช 2,4-D ไอโซเลท HKK-4 และ HKK-6 มีความสัมพันธ์เชิงวิวัฒนาการอย่างใกล้ชิดกับ *Priestia aryabhattai* ที่สุด (Fig. 1) ขณะที่แบคทีเรียย่อยสลายสารกำจัดวัชพืช 2,4-D ไอโซเลท HKK-10 มีความสัมพันธ์เชิงวิวัฒนาการอย่างใกล้ชิดกับ *Priestia megaterium* ที่สุด (Fig. 1) ส่วนการศึกษาความสัมพันธ์เชิงวิวัฒนาการของแบคทีเรียย่อยสลายสารกำจัดวัชพืช 2,4-D ไอโซเลท HSB-11 HSB-15 และแบคทีเรียในสกุล *Peribacillus* พบว่า แบคทีเรียย่อยสลายสารกำจัดวัชพืช 2,4-D ไอโซเลท HSB-11 และ HSB-15 มีความสัมพันธ์เชิงวิวัฒนาการอย่างใกล้ชิดกับ *Peribacillus acanthi* ที่สุด (Fig. 2)

ผลการย้อมแกรมแบคทีเรียทั้ง 5 ไอโซเลท ด้วยคริสตัลไวโอเลต (crystal violet) และซาฟรานิน (safranin) พบว่าแบคทีเรียทั้ง 5 ไอโซเลท ติดสีม่วงของคริสตัลไวโอเลต กล่าวคือแบคทีเรียทั้ง 5 ไอโซเลท เป็นแบคทีเรียแกรมบวก (Gram positive) และมีรูปร่างเป็นท่อน (rod shape) (Fig. 3)

**Table 2** Identification of 2,4-D degrading bacteria by 16s rRNA gene

| Isolates | No. nucleotide | Results sequence comparison with GenBank database | | |
|---|---|---|---|---|
| | (bp) | Most closely bacteria species | Identities (%) | Accession number |
| HKK-4 | 1,392 | *Priestia aryabhattai* B8W22 | 99.78 | EF114313.2 |
| HKK-6 | 1,397 | *Priestia aryabhattai* B8W22 | 99.71 | EF114313.2 |
| HKK-10 | 1,412 | *Priestia megaterium* NBRC 15308 | 99.65 | JJMH01000057.1 |
| HSB-11 | 1,398 | *Peribacillus acanthi* L28 | 99.07 | MT516450.1 |
| HSB-15 | 1,401 | *Peribacillus acanthi* L28 | 99.29 | MT516450.1 |

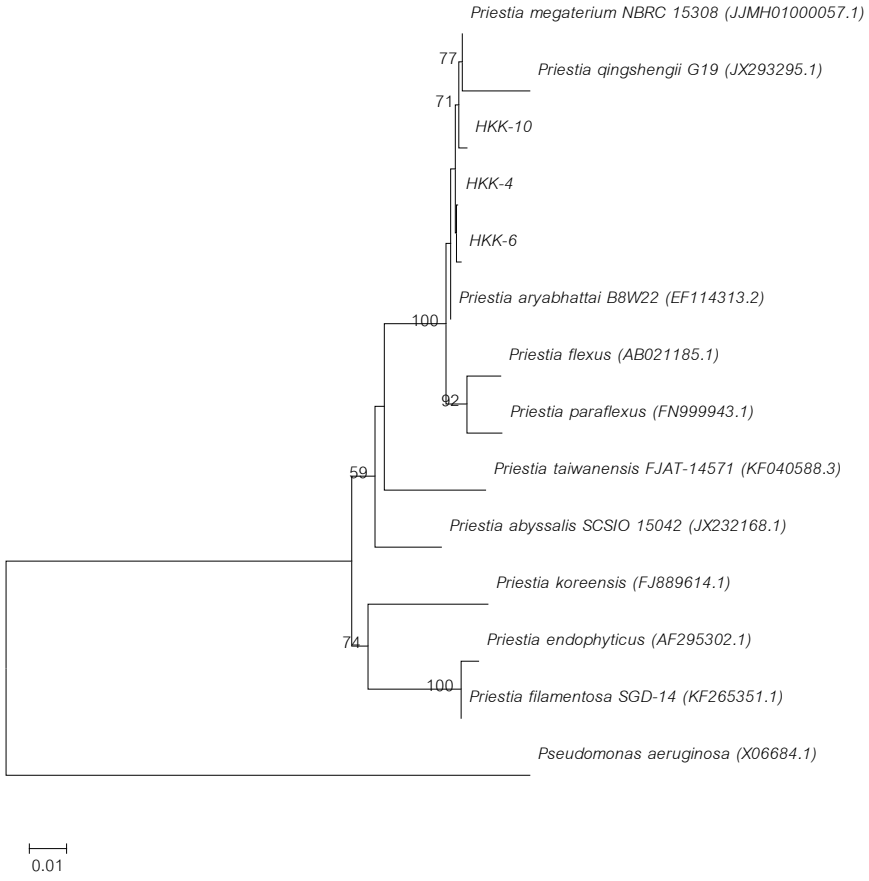



**Fig. 1** Phylogenetic trees showing the relationship between strain HKK-4, HKK-6, HKK-10 and related species based on 16S rRNA gene. *Pseudomonas aeruginosa* (X06684.1) was used as the outgroup. The bar corresponds to a 1 % difference in nucleotide sequence. The numbers shown next to the nodes indicate percent bootstrap values from 1,000 iterations.

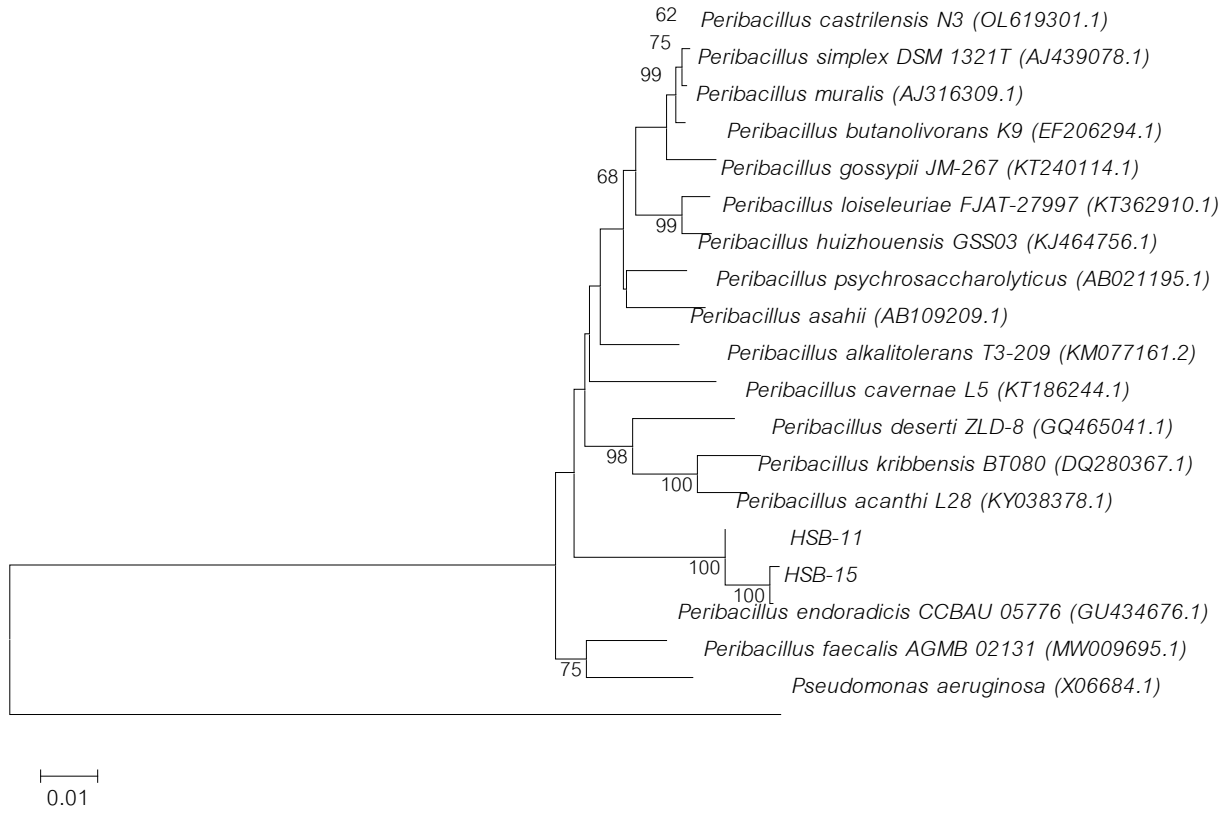



**Fig. 2** Phylogenetic trees showing the relationship between strain HSB-11, HSB-15 and related species based on 16S rRNA gene. *Pseudomonas aeruginosa* (X06684.1) was used as the outgroup. The bar corresponds to a 1 % difference in nucleotide sequence. The numbers shown next to the nodes indicate percent bootstrap values from 1,000 iterations.

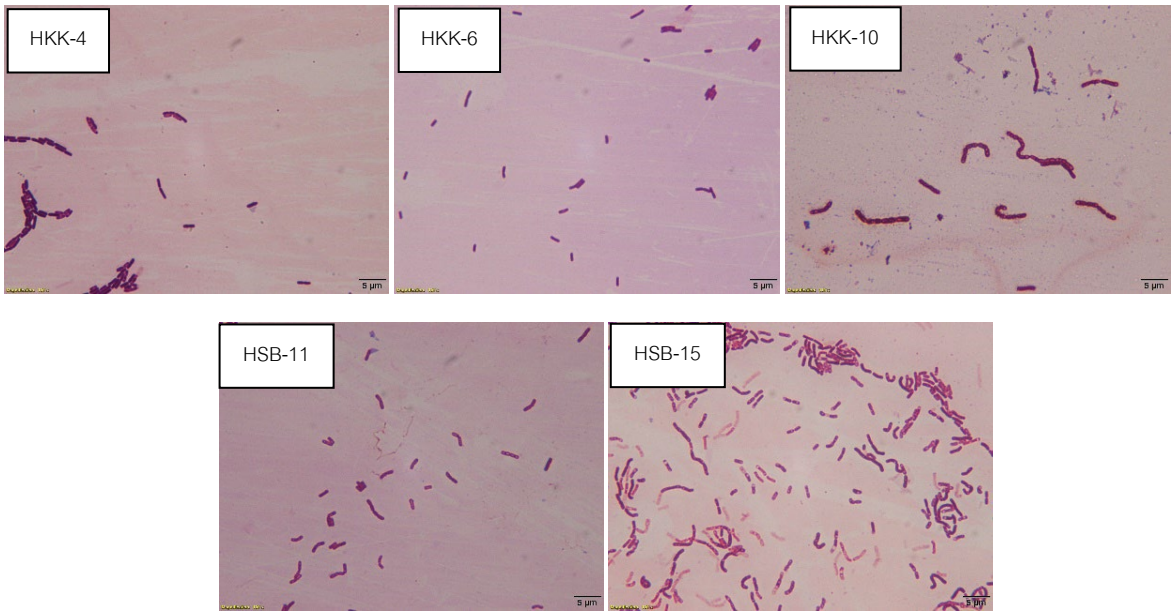



**Fig. 3** Gram-staining of strain HKK-4, HKK-6, HKK-10, HSB-11 and HSB-15 observation under light microscope at 1,000 X magnification.

*การย่อยสลายสารกำจัดวัชพืช 2,4-D โดยแบคทีเรียที่คัดแยกได้*

ผลการทดสอบการย่อยสลายสารกำจัดวัชพืช 2,4-D ตามวิธีของ Zabaloy and Gómez (2014) พบว่า แบคทีเรียที่คัดแยกได้ทั้ง 5 ไอโซเลท (HKK-4, HKK-6, HKK-10, HSB-11 และ HSB-15) มีความสามารถย่อยสลายสารกำจัดวัชพืช 2,4-D เพื่อใช้เป็นแหล่งคาร์บอนและพลังงานในการเจริญเติบโต (Fig. 4) *P. megaterium* HKK-10 เป็นแบคทีเรียที่มีศักยภาพในการย่อยสลายสารกำจัดวัชพืช 2,4-D ที่สุด คือสามารถย่อยสลาย 2,4-D เพื่อใช้ในการเจริญเติบโต เท่ากับ 73.31% หลังบ่มเป็นเวลา 24 ชม. และ 96.47% หลังบ่มเป็นเวลา 48 ชม. (Fig. 4) ในขณะที่ *P. aryabhattai* HKK-4, *P. aryabhattai* HKK-6, *P. acanthi* HSB-11 และ *P. acanthi* HSB-15 สามารถย่อยสลาย 2,4-D ได้เกิน 90% หลังจากบ่มเป็นเวลา 72 ชม. (Fig. 4) *P. megaterium* (ชื่อเดิม *Bacillus megaterium*) เป็นแบคทีเรียที่มีรายงานการคัดแยกได้จากตัวอย่างดินในพื้นที่ปนเปื้อนสารกำจัดวัชพืช และสามารถย่อยสลายสารกำจัดวัชพืชได้หลากหลายชนิด เช่น 2,4-D ไกลโฟเซต (glyphosate) อะทราซีน (atrazine) อะลาคลอร์ (alachlor) เมโทลาคลอร์ (metolachlor) (Wang et al., 2008; Zhu et al., 2019) เพื่อให้ได้มาซึ่งธาตุต่าง ๆ เช่น คาร์บอน ฟอสฟอรัส ไนโตรเจน หรือกำมะถัน สำหรับใช้ในการเจริญเติบโต (Singh et al., 1999) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับผลการทดลอง โดยจะพบว่าปริมาณแบคทีเรียเพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณสารกำจัดวัชพืช 2,4-D ลดลง เมื่อระยะเวลาการเพาะเลี้ยงดำเนินไป

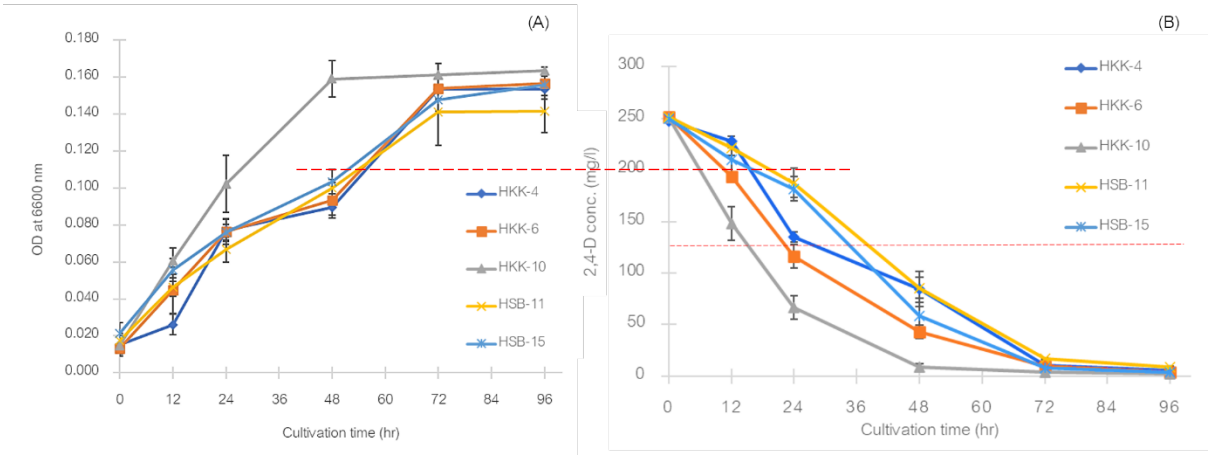



**Fig. 4** Cell growth (A) and amount of 2,4-D remaining (B) during cultivation of strain HKK-4, HKK-6, HKK-10, HSB-11 and HSB-15 in MSM containing 250 mg 2,4-D /L.

## สรุป

*Priestia aryabhattai* HKK-4, *Priestia aryabhattai* HKK-6, *Priestia megaterium* HKK-10, *Peribacillus acanthi* HSB-11 และ *Peribacillus acanthi* HSB-15 เป็นแบคทีเรียที่คัดแยกได้จากดินแปลงทดสอบการใช้สารกำจัดวัชพืช 2,4-D ในแปลงอ้อยจังหวัดสุพรรณบุรีและขอนแก่น ซึ่งแบคทีเรียทั้ง 5 ไอโซเลท มีศักยภาพในการย่อยสลายสารกำจัดวัชพืช 2,4-D ในอาหารเหลว MSM นอกจากนี้ยังถูกจัดอยู่ใน Risk group 1 ซึ่งมีความเสี่ยงในการก่อโรคต่ำมาก ทำให้สามารถนำไปต่อยอดเพื่อพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์แบคทีเรียย่อยสลายสารกำจัดวัชพืช 2,4-D ในดินได้

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณด้านวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) ตามกรอบการสนับสนุนงานวิจัยมูลฐาน (Fundamental Fund) จากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ของกรมวิชาการเกษตร ตามรหัสการทดลอง FF65-58-02-65-00-03-65

**เอกสารอ้างอิง**

สนธยา ขำติ๊บ. 2561. การจัดจำแนกจุลินทรีย์ละลายฟอสเฟตโดยใช้เทคนิคทางอณูชีววิทยา. ใน: ผลการปฏิบัติงานประจำปี 2561 เล่ม 1. กองวิจัยพัฒนาปัจจัยการผลิตทางการเกษตร กรมวิชาการเกษตร. กรุงเทพฯ, หน้า 134–140.

Boivin, A., Amellal, S., Schiavon, M., Genuchten, M.T.V. 2005. 2,4-Dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D) sorption and degradation dynamics in three agricultural soils. Environ. Pollut. 138: 92–99. doi.org/10.1016/j.envpol.2005.02.016

Bollag, J.M., Hellings, C.S., Alexander, M. 1968. 2,4-D metabolism: enzymatic hydroxylation of chlorinated phenols. J. Agric. Food Chem. 16: 826–828. doi.org/10.1021/jf60159a037

Chang, Y.C., Reddy, M.V., Umemoto, H., Sato, Y., Kang, M.H., Yajima, Y., Kikuchi, S. 2015. Bio-augmentation of *Cupriavidus* sp. CY-1 into 2,4-D contaminated soil: Microbial community analysis by culture dependent and in dependent techniques. Plos ONE 10: e0145057.

Doetsch, R.N. 1981. Determinative methods of light microscopy. Manual of Methods for General Bacteriology. American Society for Microbiology. Washington, D.C.

Farag, A.M., Fawzy, A., El-Naggar, M.Y., Ghanem, K.M. 2021. Biodegradation and enhancement of 2,4-dichlorophenol by marine halophilic *Bacillus subtilis* AAK. Egypt. J. Aquat. Res. 47: 117–123. doi.org/10.1016/j.ejar.2021.04.005

Felsenstein, J. 1985. Confidence limits on phylogenies: An approach using the bootstrap. Evolution 39: 783–791.

Fu, F.F., Xiao, L.X., Wang, W., et al., 2009. Study on the degradation of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D) and 2-methyl-chloro-phenoxyacetic sodium (MCPA sodium) in natural agriculture soil of Fuzhou, China using capillary electrophoresis. Sci. Total Environ. 407: 1998–2003. doi.org/10.1016/j.scitotenv. 2008.11.023

Gaultier, J.D., Farenhorst, A. 2007. 2,4-D mineralization in soil profiles of a cultivated hummocky landscape in Manitoba, Canada. J. Environ. Sci. Health, Part B. 42: 255–264. doi.org/10.1080/03601230701229148

Gonod, L.V., Laurent, F.M., Chenu, C. 2006. 2,4-D impact on bacterial communities, and the activity and genetic potential of 2,4-D degrading communities in soil. FEMS Microbiol. Ecol. 58: 529–537. doi.org/10.1111/j.1574-6941.2006.00159.x

González, A.J., Gallego, A., Gemini, V.L., Papalia, M., Radica, M., Gutkind, G., Planes, E., Korol, S.E. 2012. Degradation and detoxification of the herbicide 2,4-dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D) by an indigenous *Delftia* sp. strain in batch and continuous systems. Int. Biodeter. Biodegr. 66: 8–13. doi.org/10.1016/j.ibiod.2011.09.010

Kelley, K.B., Riechers, D.E. 2007. Recent developments in auxin biology and new opportunities for auxinic herbicide research. Pestic. Biochem. Physiol. 89: 1–11. doi.org/10.1016/j.pestbp.2007.04.002

Singh, B.K., Kuhad, R.C., Singh, A., Lal, R., Triapthi, K.K. 1999. Biochemical and molecular basis of pesticide degradation by microorganisms. Crit. Rev. Biotechnol. 19: 197–225. doi.org/10.1080/0738-859991229242

Saitou, N., Nei, M. 1987. The neighbor-joining method: A new method for reconstructing phylogenetic trees. Mol. Biol. Evol. 4: 406–425. doi.org/10.1093/oxfordjournals.molbev.a040454

Tamura, K., Stecher, G., Kumar, S. 2021. MEGA 11: Molecular Evolutionary Genetics Analysis Version 11. Mol. Biol. Evol. 38(7): 3022–3027. doi.org/10.1093/molbev/msab120

Voog, G., Groffman, P.M. 1997. Relationships between microbial biomass and dissipation of 2,4-D and dicamba in soil. Biol. Fertil. Soils 24: 106–110.

Wang, Y.S., Liu, J.C., Chen, W.C., Yen, J.H. 2008. Characterization of acetanilide herbicides degrading bacteria isolated from tea garden soil. Microb. Ecol. 55: 435–443. doi.org/10.1007/s00248-007-9289-z

Wilson, W.D., Geronimo, J.J., Armbruster, A. 1997. 2,4-D dissipation in field soils after application of 2,4-D dimethylamine salt and 2,4-D 2-ethylhexyl ester. Environ. Toxicol. Chem. 16: 1236–1246.

Zabaloy, M.C., Gómez, M.A. 2014. Isolation and characterization of indigenous 2,4-D herbicide degrading bacteria from an agricultural soil in proximity of Sauce Grande River, Argentina. Ann. Microbiol. 64: 969–974. doi.org/10.1007/s13213-013-0731-9

Zhu, J., Fu, L., Jin, C., Meng, Z., Yang, N. 2019. Study on the isolation of two atrazine-degrading bacteria and the development of a microbial agent. Microorganisms 80: 1–11. doi.org/10.3390/microorganisms 7030080

# การค้นหาสมุนไพรและเห็ดที่มีฤทธิ์ยับยั้งการติดเชื้อไวรัสเยื่อบุช่องท้องแมวอักเสบ

# Characterization for herbs and mushrooms that have the ability to inhibit feline infectious peritonitis virus infection

**วิวรรธน์ กลั่นแก้ว**[a], **เกียรติทวี ชูวงศ์โกมล**[b,*]

Wiwat Klankaew[a], Kiattawee Choowongkomon[b,*]

[a]ภาควิชาพันธุวิศวกรรมและชีวสารสนเทศ คณะบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[b]ภาควิชาชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[a]Interdisciplinary Program in Genetic Engineering and Bioinformatics, Graduate School, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

[b]Department of Biochemistry, Faculty of Science, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

*Corresponding author. E-mail address: fsciktc@ku.ac.th

**บทคัดย่อ**

Feline infectious peritonitis (FIP) เป็นไวรัสที่กลายพันธุ์มากจาก Feline coronavirus (FCoV) เป็นสมาชิกอยู่ในวงศ์ตระกูล Coronaviridae และสกุล Alphacoronavirus เป็นไวรัส RNA ที่มี single-stranded positive-sense ซึ่งในปัจจุบันแมวที่ติดเชื้อไวรัส FIP มีอัตราการตายเกือบจะ 100% งานวิจัยนี้จึงมีความสนใจใน เห็ด และ สมุนไพร เพื่อนำมาศึกษาหาสารสกัดที่สามารถยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ FIP main protease ซึ่งพบว่ามีสารสกัดเห็ดและสารสกัดสมุนไพรหลายชนิดที่ยับยั้งการทำงานของ FIP main protease มากกว่า 50% ซึ่งสามารถหาค่า %Relative inhibition ของสารสกัดจากข่า อัญชัน ละหุ่ง หม่อน เทียนกิ่ง ได้อยู่ที่ 92.34% 76.51% 71.17% 60.85% และ 51.30% ตามลำดับ ซึ่งสารสกัดจาก เห็ดเข็มทอง เห็ดกระดุมบราซิล เห็ดไมตาเกะ เห็ดเยื่อไผ่ ได้อยู่ที่ 91.72% 84.57% 74.62% และ 58.18% ตามลำดับ ดังนั้นจากงานวิจัยครั้งนี้เราพบว่าสารสกัดสมุนไพรและสารสกัดเห็ด มีความสามารถในการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ FIP main protease ที่เป็นเอนไซม์สำคัญของไวรัสซึ่งอาจนำไปสู่การรักษาการติดเชื้อไวรัสเยื่อบุช่องท้องแมวอักเสบในอนาคต

**คำสำคัญ**: ไวรัสเยื่อบุช่องท้องแมว, สมุนไพร, เห็ด, เอนไซม์

**Abstract**

Feline infectious peritonitis (FIP) is a virus that has mutated from the Feline coronavirus (FCoV), a member of the family of feline infectious peritonitis (FIP). Coronaviridae and the genus Alphacoronavirus are single-stranded positive-sense RNA viruses. At present, cats infected with the FIP virus have a death rate of almost 100%. This research is therefore interested in mushrooms and herbs and studies extracts that can inhibit the activity of the FIP main protease enzyme, Extracts from many types of mushrooms and herbal extracts that inhibited the activity of FIP main protease by more than 50%, which could find the % relative inhibition value of extracts from galangal, butterfly pea, castor bean, mulberry, and Henna at 92.34% 76.51% 71.17% 60.85% and 51.30% respectively, and the extracts from golden needle mushroom, Brazilian mushroom, maitake mushroom, and bamboo mushroom were 91.72% 84.57% 74.62% and 58.18% respectively. Therefore, from this research, it was found that herbal extracts and mushroom extracts can inhibit the activity of the FIP main protease enzyme, which is an important enzyme of the virus. This may lead to future treatments for feline peritonitis virus infections.

**Keywords**: Enzyme, Feline infectious peritonitis, Herbs, Mushrooms

**คำนำ**

โรคเยื่อบุช่องท้องอักเสบในแมว หรือชื่อภาษาอังกฤษ Feline Infectious Peritonitis [FIP] เป็นเชื้อไวรัสที่มีการกลายพันธุ์จาก FCoV ไปเป็น FIP นั้นมีรายงานว่าพบเพียง 5% และพบมากในกลุ่มแมวที่เลี้ยงรวมกันหลายตัวมากกว่าแมวเลี้ยงเดี่ยว โดยส่วนมาก แมวที่ติดเชื้อ FCoV มักจะไม่แสดงอาการผิดปกติที่จำเพาะ อาจพบเพียงอาการซึม เบื่ออาหาร หายใจผิดปกติ อาจมีอาเจียนหรือท้องเสียไม่รุนแรงบ้างในบางครั้งแต่เมื่อไรก็ตาม เมื่อพัฒนากลายเป็นเชื้อ FIP อาการทางคลินิกถูกแบ่งตามพยาธิกำเนิดออกเป็น 3 แบบได้แก่ แบบเปียก (effusive form/ wet form), แบบแห้ง (non-effusive form/ dry form) และแบบผสม(mixed form) โดย FIP จัดเป็นโรคที่เกิดจากการตอบสนองทางภูมิคุ้มกันของร่างกาย (immune mediated) ซึ่งโรคเยื่อบุช่องท้องอักเสบในแมว (Feline infectious peritonitis, FIP) เป็นไวรัสสายเดี่ยว RNA (single-stranded RNA) ที่มีขนาดใหญ่ สามารถเกิดการกลายพันธุ์ได้ง่ายและรวดเร็ว และมีต้นกำเนิดของโรคจากการกลายพันธุ์ของเชื้อ Feline enteric coronavirus (FECV) ซึ่งก่อโรคไม่รุนแรง มาเป็น Feline infectious peritonitis virus (FIPV) โดยมีการเปลี่ยนแปลงเซลล์เป้าหมาย (target cells) จาก epithelial cells ของลำไส้ไปเป็นเซลล์ในระบบภูมิคุ้มกัน ได้แก่ monocyte หรือ macrophage ซึ่งชักนำให้เกิด Immune mediated vasculitis และแสดงอาการของโรคที่รุนแรง โดยอาการทางคลินิกสามารถแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่ 1) effusive FIP เป็นประเภทที่มี fibrinous serositis และ pyogranulomatous effusion พบมีน้ำสะสมในช่องท้อง และ/หรือช่องอก 2) non-effusive มี pyogranulomatous มากในอวัยวะต่างๆ มักพบวิการในระบบประสาทส่วนกลาง (CNS) และ/หรือในตา ส่วนอาการทางคลินิกอื่นๆ คล้ายคลึงกับประเภทที่ 1 หรืออาจทำให้เกิดประเภทที่ 3 คือเกิดทั้ง ประเภทที่ 1 และ 2 รวมกัน (Mixed form) ซึ่ง FIP เป็นโรคที่มีอัตราการตายสูงและยังไม่มีรายงานข้อบ่งชี้ถึงอาการในระยะแรกของโรค (Addie et al., 2009; Pederson, 2009; Drechsler et al., 2011) และยังไม่มีการรักษาให้หายขาดได้

พืชที่ใช้ทำเป็นเครื่องยา สมุนไพรกำเนิดมาจากธรรมชาติและมีความหมายต่อชีวิตมนุษย์โดยเฉพาะ ในทางสุขภาพ อันหมายถึงทั้งการส่งเสริมสุขภาพและการรักษาโรค ความหมายของยาสมุนไพรในพระราชบัญญัติยา พ.ศ. 2510 ได้ระบุว่า ยาสมุนไพร หมายความว่า ยาที่ได้จากพฤกษาชาติสัตว์หรือแร่ธาตุ ซึ่งมิได้ผสมปรุงหรือแปรสภาพ เช่น พืชก็ยังเป็นส่วนของราก ลำต้น ใบ ดอก ผล ฯลฯ ซึ่งพืชแต่ละชนิดนั้นจะมีคุณสมบัติทางยาที่ต่างกันออกไป และ เห็ด (mushrooms) คือ ชีวอินทรีย์ (living Micro-organism) จัดอยู่อาณาจักรฟังไจ (Kingdom Fungi) ซึ่งสารสำคัญที่พบในเห็ด ได้แก่ เทอร์พีนอยด์และบีตา กลูแคน ที่เป็นตัวช่วยกระตุ้นระบบภูมิคุ้มกันให้ทำงานได้อย่างสมดุล นอกจากนี้ ยังพบว่าสารจากเห็ดมีผลต่อ พรีไบ-โอติก (Prebiotics) ที่อยู่ในระบบทางเดินอาหาร ทำให้เกิดสารที่เรียกว่า "สารสร้างสมดุล" (adaptogens) สารนี้จะช่วยทำให้เกิดสมดุลในร่างกายเมื่อเกิดความเครียด ประเทศจีนและญี่ปุ่น เป็นประเทศที่มีการใช้เห็ดเป็นยามากที่สุด แต่ปัจจุบันประเทศที่เริ่มมีการพัฒนาใช้เห็ดเป็นยามีเพิ่มมากขึ้น เช่น ยาต้านไวรัส (anti-viral agent) ยาเพิ่มภูมิคุ้มกัน (immune potentiating agent) สารที่มีคุณสมบัติดังกล่าวนี้ส่วนใหญ่สกัดได้จากเส้นใยเห็ด (mycelium) หรือ ดอกเห็ด (fruiting body) ที่มีคุณสมบัติทางยา

แต่การศึกษาในปัจจุบันยังไม่ทราบกลไกการทำงานของสารสกัดจากสมุนไพรและสารสกัดจากเห็ดในการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ FIP main protease ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การนำสารสกัดจากสมุนไพรและสารสกัดจากเห็ดมาใช้ในการศึกษาความสามารถในการยับยั้งการติดเชื้อจากไวรัสหรือใช้ในการศึกษาการรักษาหลังจากการติดเชื้อจากไวรัส โดยทำควบคู่กับการทดสอบการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ FIP main protease ที่เป็นเอนไซม์สำคัญในไวรัส เพื่อใช้เป็นประโยชน์ในการรักษาทางการแพทย์และเพื่อศึกษาต่อยอดฤทธิ์ของสารสกัดจากสมุนไพรและเห็ดในการยับยั้งการติดเชื้อไวรัสเยื่อบุช่องท้องแมวอักเสบในอนาคต

**อุปกรณ์และวิธีการ**

*ตัวอย่างสารสกัดจากสมุนไพรและเห็ด*

ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบมีสารสกัดจากสมุนไพร 5 ชนิด ได้แก่ 1) ข่า (galangal), 2) อัญชัน (butterfly pea), 3) ละหุ่ง (castor bean), 4) หม่อน (mulberry), 5) เทียนกิ่ง (Henna) และ สารสกัดจากเห็ด 4 ชนิด ได้แก่ 1) เห็ดเข็มทอง (golden needle mushroom), 2) เห็ดกระดุมบราซิล (brazilian mushroom), 3) เห็ดไมตาเกะ (maitake mushroom), 4) เห็ดเยื่อไผ่ (bamboo mushroom) ที่ความเข้มข้น 10 µg/mL ละลายด้วย 100% DMSO

*Expression and purification of FIP protease* (Wang et al., 2016)

ทำการสังเคราะห์ยีน FIP main protease เข้าไปในเวคเตอร์ pGEX-4T-3 โดยทำการปรับลำดับเบสให้สามารถแสดงออกได้ในแบคทีเรีย Escherichia coli แต่ลำดับกรดอะมิโนยังคงเดิมหลังจากนั้นเมื่อได้ยีน FIP main protease ที่อยู่ในเวคเตอร์ pGEX-4T-3 ทำการเลี้ยง E.coli BL21(DE3) ที่มียีน FIP main protease ในอาหารเลี้ยงเชื้อเหลว (LB Broth) ที่อุณหภูมิ 37° C จนครบ 4 ชั่วโมงหรือวัดค่าดูดกลืนแสงที่ $OD_{600}$ ได้ 0.8 หลังจากนั้นทำการเหนี่ยวนำให้เกิดการแสดงออกของโปรตีนด้วย 0.4 mM Isopropyl β- d-1-thiogalactopyranoside (IPTG) หรือก็คือโมเลกุลเลียนแบบของ allolactose ซึ่งเป็นเมตาโบไลต์ของแลคโตสที่กระตุ้นการถอดรหัสของ lac operon ใน E.coli BL21(DE3) ที่อุณหภูมิ 16° C เป็นเวลา18–20 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการปั่นตกด้วย centrifuge 9000 rpm เป็นเวลา 5 นาที หลังจากนั้นเติม lysis buffer ที่ประกอบไปด้วย 50 mM Tris-HCl (pH 8.0) 300 mM sodium chloride และ 0.5% Triton-X และทำการแตกเซลล์ E. coli BL21(DE3) ด้วยเครื่อง Sonicator ที่ 30% AMPL เป็นเวลา 30 นาที และทำการปั่นตกด้วย centrifuge 14,000 rpm ที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 50 นาที หลังจากนั้นนำโปรตีนที่ได้จากการปั่นตกไปกรองด้วย Nylon Syringe Filter 0.22 µm และนำโปรตีนที่ผ่านกรองมาทำบริสุทธิ์ด้วย 2 คอลัมน์ โดยเริ่มจาก Ni2+ affinity column แล้วตามด้วย Resources column และตรวจสอบความบริสุทธิ์ของโปรตีนด้วยวิธี Sodium Dodecyl Sulfate polyacrylamide gel electrophoresis (SDS-PAGE) (Májek, Riedelová-Reicheltová, Pecánková, & Dyr, 2013) โดยนำโปรตีนที่ผ่านการทำให้บริสุทธ์ เติม 4X loading dry แล้วนำไปต้มที่ 95°C เพื่อให้โปรตีนเสียสภาพเป็นเวลา 5 นาที หลังจากนั้นทำการหยอดโปรตีนใส่แผ่น polyacrylamide gel ที่มีความเข้มข้นของ polyacrylamide อยู่ 12% เป็นเวลา 1 ชั่วโมงและทำการย้อมด้วย staining (Coomassie blue) เป็นเวลา 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการ Destain เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อดูแบรนด์โปรตีนที่เกิดขึ้นบน polyacrylamide gel

*การตรวจสอบผลของการยับยั้งเอนไซม์ FIP main protease*

โดยการใช้ Fluorometric Assay ซึ่งทำการเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์ ประกอบด้วย 20 mM Tris-HCl pH.7.5, 100 mM NaCl, 2 mM DTT, 0.05 mM EDTA ปริมาตร 100 mL หลังจากนั้นเตรียมเอนไซม์ FIP main protease จากการทำบริสุทธิ์ ความเข้มข้น 1 µM ในสารละลายบัฟเฟอร์ ละลายสารตั้งต้นชนิด Dabcyl-KTSAVLQSGFRKM-E(Edans) ในตัวทำละลาย 100% (v/v) DMSO ทำการเจือจางสารตั้งต้นด้วยบัฟเฟอร์ที่ประกอบด้วย 20 mM Tris – HCl pH7.5, 100 mM NaCl, 1 mM EDTA, 2 mM DTT ที่มีความเข้มข้นสุดท้ายในปฏิกิริยาเป็น 40 µM หลังจากนั้นตรวจสอบการทำงานของเอนไซม์ FIP main protease โดยใช้ 384 well plate ที่ประกอบด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ บ่มกับเอนไซม์ FIP main protease ต่อมาทำการเติมสารยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ (inhibitor) ซึ่งมี Lopinavir เป็นตัวควบคุมเชิงบวกเพื่อใช้เปรียบเทียบกับสารสกัดจากสมุนไพรและสารสกัดจากเห็ดโดยใช้ที่มีความเข้มข้นสุดท้ายในปฏิกิริยาเป็น 10 µg/mL

และเริ่มต้นปฏิกิริยาโดยเติมสารตั้งต้นที่มีความเข้มข้นสุดท้ายในปฏิกิริยาเป็น 40 µM วัดค่าความเข้มแสงที่เพิ่มขึ้นของ Fluorescence substrate โดยกำหนดให้ค่าความยาวคลื่นของรังสีที่เกิดการดูดกลืน (excitation wavelength) 340 nm และความยาวคลื่นของรังสีที่เปล่งออกมา (emission wavelength) 430 nm เป็นเวลา 30 นาที ด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสงชนิด Fluorescence Microplate reader วัดค่าความเข้มแสงที่เพิ่มขึ้นของ Fluorescence substrate ต่อหน่วยวินาที จากนั้นสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Relative Fluorescence Units/sec โดยใช้โปรแกรม GraphPad version 8.0

$$\% \text{ Relative inhibition} = \left( \frac{V_0 \text{ enz} - V_0 \text{ Inhibitor}}{V_0 \text{ enz}} \right) \times 100 \qquad (1)$$

นำค่าร้อยละการยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์ (% Relative inhibition) ที่ได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์กับความเข้มข้นต่างๆของสารยับยั้ง โดยใช้โปรแกรม GraphPad version 8.0

**ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง**

งานวิจัยนี้ต้องการค้นหาสารสกัดจากสมุนไพรหรือสารสกัดจากเห็ดที่มีความสามารถในการยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์ FIP main protease โดยสารสกัดจากสมุนไพรที่นำมาใช้ ได้แก่ สารสกัดจากข่า อัญชัน ละหุ่ง หม่อน และ เทียนกิ่ง จากผลการทดสอบการยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์ FIP main protease พบว่าเมื่อทดสอบกับสารสกัดจากสมุนไพรทั้ง 5 ชนิด ที่มีความเข้มข้น 10 µg/mL พบว่าสารสกัดจากสมุนไพรทั้ง 5 ชนิดมีความสามารถในการยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์ FIP main protease ได้มากกว่า 50% ซึ่งได้ผลการทดลอบแสดงดัง Table 1, Fig. 1 และสารสกัดจากเห็ดที่นำมาใช้ ได้แก่ สารสกัดจาก เห็ดเข็มทอง เห็ดกระดุมบราซิล เห็ดไมตาเกะ เห็ดเยื่อไผ่ จากผลการทดสอบการยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์ FIP main protease พบว่าเมื่อทดสอบกับสารสกัดจากเห็ดทั้ง 4 ชนิด ที่มีความเข้มข้น 10 µg/mL พบว่าสารสกัดจากเห็ดทั้ง 4 ชนิดมีความสามารถในการยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์ FIP main protease ได้มากกว่า 50% ซึ่งได้ผลการทดลอบแสดงดัง Table 2, Fig. 2

**Table 1** Percentage of enzyme activity inhibition FIP main protease at a concentration of 1 µM and herbal extracts at a concentration of 10 µg/ml. (n = 3 for each group)

| Sample Name | % Relative inhibition |
|---|---|
| Lopinavir | 99.81 |
| galangal | 92.34 |
| Butterfly pea | 76.51 |
| Castor bean | 71.17 |
| mulberry | 60.85 |
| Henna | 51.30 |

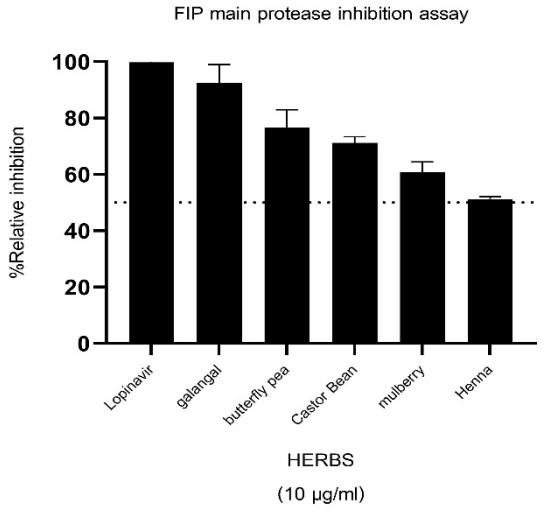



**Fig. 1** The graph shows the percentage of enzyme activity inhibition FIP main protease at a concentration of 1 µM and herbal extracts at a concentration of 10 µg/ml. (n = 3 for each group)

**Table 2** Percentage of enzyme activity inhibition FIP main protease at a concentration of 1 µM and mushrooms extracts at a concentration of 10 µg/ml. (n = 3 for each group)

| Sample Name | % Relative inhibition |
|---|---|
| Lopinavir | 99.81 |
| golden needle mushroom | 91.72 |
| Brazilian mushroom | 84.57 |
| maitake mushroom | 74.62 |
| bamboo mushroom | 58.18 |

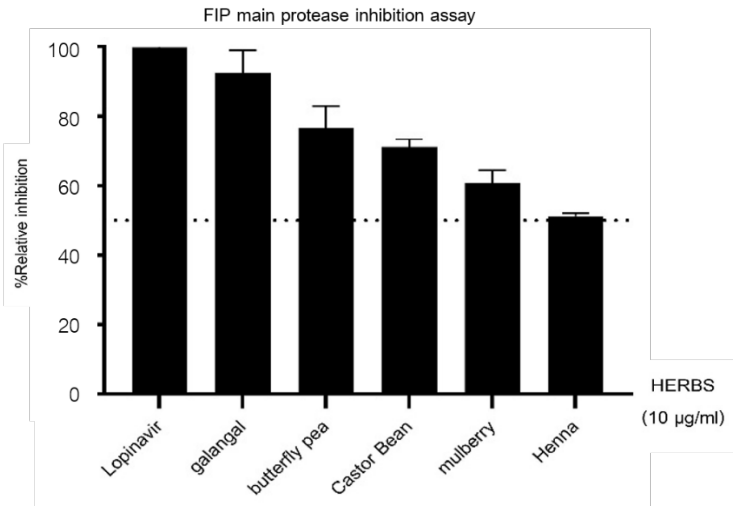



**Fig. 2** The graph shows the percentage of enzyme activity inhibition FIP main protease at a concentration of 1 µM and mushrooms extracts at a concentration of 10 µg/ml. (n = 3 for each group)

## สรุป

จากผลการทดสอบฤทธิ์ของสารสกัดจากสมุนไพรที่ความเข้มข้น 10 µg/mL และ สารสกัดจากเห็ดที่ความเข้มข้น 10 µg/mL มีความสามารถในการยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์ FIP main protease มากกว่า 50% ได้แก่ สารสกัดจากข่า อัญชัน ละหุ่ง หม่อน เทียนกิ่ง ได้อยู่ที่ 92.34% 76.51% 71.17% 60.85% และ 51.30% ตามลำดับ และสารสกัดจากเห็ดเข็มทอง เห็ดกระดุมบราซิล เห็ดไมตาเกะ เห็ดเยื่อไผ่ ได้อยู่ที่ 91.72% 84.57% 74.62% และ 58.18% ตามลำดับ แม้เรายังไม่ทราบกลไกการทำงานของสารสกัดที่ได้จากสมุนไพรและเห็ดที่ส่งผลต่อกิจกรรมของเอนไซม์ FIP main protease แต่จากการทดสอบ เราพบว่าสารสกัดจากสมุนไพรและเห็ดนั้นมีความสามารถในการยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์ FIP main protease ได้ ซึ่งจากผลงานวิจัยนี้จะเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษากลไกการยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์ FIP main protease ที่เป็นเอนไซม์สำคัญในการเพิ่มจำนวนของไวรัสและอาจนำไปสู่การค้นพบเป้าหมายใหม่ในการใช้สารสกัดจากสมุนไพรและสารสกัดจากเห็ดที่นำไปประยุกต์ใช้ในการรักษาแมวที่ติดเชื้อในอนาคต

## กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ บริษัท อีสเทิร์น เฮิร์บ จำกัด (EASTERN HERB CO.,LTD) ที่สนับสนุนสมุนไพรและเห็ดที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ ทำให้การวิจัยในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และ ขอขอบคุณ คณะวิทยาศาสตร์ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ในการปฏิบัติงานวิจัย

## เอกสารอ้างอิง

Májek, P., Riedelová-Reicheltová, Z., Pecánková, K., Dyr, J.E. 2013. Improved coomassie blue dye-based fast staining protocol for proteins separated by SDS-PAGE. PLoS One, 8: e81696. doi:10.1371/journal.pone.0081696

Wang, F., Chen, C., Liu, X., Yang, K., Xu, X., Yang, H. 2016. Crystal structure of feline infectious peritonitis virus main protease in complex with synergetic dual inhibitors. J. Virol. 90: 1910–1917. doi:10.1128/jvi.02685-15

# การศึกษาผลกระทบของตำรับสมุนไพรไทยเพื่อใช้ในการต้านการอักเสบในแบบจำลองเซลล์ปอดที่เหนี่ยวนำให้เกิดการอักเสบด้วยลิโพโพลีแซคคาร์ไรด์

# Investigation of the anti-inflammatory properties of Thai herbal pharmacopoeia using a lung cell model that has been induced by lipopolysaccharide (LPS)

**ภูมินทร์ ฉ่ำสดใส**[a,*], **เกียรติทวี ชูวงศ์โกมล**[b]

Phumin Chamsodsai[a,*], Kiattawee Choowongkomon[b]

[a]ภาควิชาพันธุวิศวกรรมและชีวสารสนเทศ คณะบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[b]ภาควิชาชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[a]Interdisciplinary Program in Genetic Engineering and Bioinformatics, Graduate School, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

[b]Department of Biochemistry, Faculty of Science, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

*Corresponding author. E-mail address: fsciktc@ku.ac.th

**บทคัดย่อ**

การวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของการเหนี่ยวนำเซลล์มะเร็งปอดด้วย Lipopolysaccharide (LPS) ที่ทำให้เกิดการอักเสบหรือภาวะการบาดเจ็บที่ปอดแบบเฉียบพลัน (Acute Lung Injury หรือ ALI) และทดสอบประสิทธิภาพของตำรับสมุนไพรไทยในการต้านการอักเสบนี้ การค้นคว้าเน้นการสกัดสารสมุนไพรไทยที่อาจมีฤทธิ์ต้านการอักเสบเมื่อนำมาใช้กับเซลล์ที่ได้รับผลกระทบจาก LPS ผลการทดลองชี้ให้เห็นถึงความสามารถในการลดการอักเสบที่เกิดขึ้นจาก LPS ของตำรับสมุนไพรไทยที่เลือกไว้ ผลลัพธ์การทดลองเบื้องต้นเสนอข้อมูลที่สนับสนุนแนวคิดในการนำสมุนไพรไทยมาใช้ในการบรรเทาการอักเสบที่เกี่ยวข้องกับเซลล์มะเร็งปอด โดยตำรับสมุนไพรไม่แสดงความเป็นพิษต่อเซลล์แมคโครฟาจ โดยเซลล์แมคโครฟาจมีอัตราการรอดมากกว่า 80% เมื่อทำการวัดปริมาณไนตริคออกไซด์ของเซลล์แมคโครฟาจที่กระตุ้นให้เกิดการอักเสบด้วย LPS พบว่าตำรับสมุนไพรไทยทั้ง 3 ชนิดสามารถลดปริมาณไนตริคออกไซด์ที่เกิดขึ้นได้โดยมีปริมาณของไนตริคออกไซด์อยู่ในช่วง 1-10 ไมโครโมลาร์

**คำสำคัญ**: เซลล์แมคโครฟาจ, ภาวะการบาดเจ็บที่ปอดแบบเฉียบพลัน, ลิโพโพลีแซคคาไรด์

**Abstract**

This study looked at the effects of Thai herbal formulae on lipopolysaccharide-induced lung cancer cells. The lipopolysaccharide (LPS), which has been shown to cause inflammation or acute lung injury (ALI), is used to gauge how effectively Thai herbal formulae work as an anti-inflammatory. The study concentrated on identifying Thai herbal components that, when administered to LPS-affected cells, may have anti-inflammatory properties. The outcomes demonstrated the herbal formula's capacity to lessen inflammation brought on by LPS. A few preliminary findings from Thailand point to evidence in favor of employing Thai herbs to reduce inflammation caused by lung cancer cells. The macrophage cells did not exhibit any toxicity from the herbal compound. Over 80% of the macrophage cells were able to survive. All three varieties of Thai herbal formulae were found to be effective in lowering the amount of nitric oxide present in macrophage cells induced with inflammation using lipopolysaccharide at nitric oxide levels between 1 and 10 micromolar.

**Keywords**: Acute lung injury, Lipopolysaccharide, Macrophage cell

**คำนำ**

ALI ย่อมาจากคำว่า Acute Lung Injury คือ ภาวะอักเสบในปอดที่เกิดขึ้นในระยะเวลาสั้น ๆ เป็นภาวะที่เกิดขึ้นเมื่อเกิดการอักเสบรุนแรงในเนื้อเยื่อของปอด ทำให้เกิดความบวมและเสื่อมสภาพในส่วนของถุงลม (alveoli) และหลอดลม (bronchioles) ทำให้เกิดภาวะขาดออกซิเจนในเลือด นอกจากนี้ยังมีการคั่งของน้ำในปอดเพิ่มขึ้น ทำให้ปอดไม่สามารถรับลมหายใจเพียงพอเพื่อส่งออกซิเจนและระบายก๊าซคาร์บอนไดออกจากร่างกาย สภาวะนี้อาจเกิดจากหลายสาเหตุ เช่น การติดเชื้อ, ความร้อนหรือความหนาแน่นในอากาศ, การบาดเจ็บทางเส้นเลือดในปอด และอื่น ๆ สำหรับผู้ที่เป็น ALI อาจต้องมีการให้การรักษาอย่างเร่งด่วน รวมถึงการให้ความช่วยเหลือในการหายใจ การให้ออกซิเจน และการรักษาภาวะที่เกิดขึ้นร่วม มีการตรวจพบมานานกว่า 50 ปี มีคำจำกัดความที่แตกต่างกันแต่สิ่งที่รู้จักในชื่อ ALI ถูกจัดเป็นอาการที่อยู่ในประเภทของกลุ่มอาการหายใจลำบากเฉียบพลัน (Acute respiratory distress syndrome : ARDS) โดยอาการดังกล่าวเป็นเหตุในการเจ็บป่วยและเสียชีวิตที่สำคัญในกลุ่มของผู้ป่วยวิกฤต โดยผู้ป่วยส่วนใหญ่ที่อยู่ในภาวะ ALI สามารถแสดงอาการได้ในหลายระยะตั้งแต่หายใจลำบากในระยะสั้นไปจนถึงภาวะระบบหายใจล้มเหลว โดยสาเหตุของภาวะ ALI มีการวินิจฉัยทางคลินิกแสดงให้เห็นถึงภาวะการขาดออกซิเจน หายใจลำบากและระบบการหายใจทำงานมากขึ้น ในประเทศสหรัฐอเมริกามีกรณีของผู้ป่วยที่เกิดภาวะ ALI เกิดขึ้นกว่า 200,000 รายต่อปี และมีอัตราการเสียชีวิตมากกว่า 10% ของการเข้ารับการรักษาในกรณีของผู้ป่วยหนัก และคิดเป็น 4% ของการรักษาในโรงพยาบาลทั้งหมด (Mowery et al., 2020) ในปัจจุบันแนวทางในการรักษาภาวะ ALI มีหลายแนวทางขึ้นอยู่กับสาเหตุและระดับความรุนแรงของอาการ รวมไปถึงการให้ยาชนิดยาต้านการแข็งตัวของเส้นเลือด ยาขับน้ำ และยาต้านอักเสบ เป็นต้น ยาต้านอักเสบจึงเป็นสิ่งที่ได้รับความสนใจโดยมีการมุ่งเป้าหมายไปที่การต้านการเกิดการอักเสบของปอดเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดภาวะปอดอักเสบที่นำไปสู่ภาวะ ALI และ ARDS ต่อไป การรักษาอาจต้องดำเนินการอย่างถี่ถ้วนเพื่อควบคุมสภาพของปอดและความเสี่ยงในการพัฒนาเป็นภาวะที่รุนแรงยิ่งขึ้น ARDS ซึ่งเป็นภาวะที่รุนแรงกว่า ALI และสามารถทำให้เกิดความเสียหายรุนแรงในเนื้อเยื่อปอดและร่างกายได้

สมุนไพรไทย คือชนิดของสมุนไพรหรือพืชที่มีคุณสมบัติทางยาและมีการใช้งานทางการแพทย์และทางวิทยาการในประเทศไทยตลอดหลายร้อยปี สมุนไพรไทยเป็นส่วนสำคัญของวัฒนธรรมและการแพทย์แผนการรักษาทางการแพทย์แผนการรักษาไทยและมีบทบาทสำคัญในการรักษาโรคและเสริมสุขภาพของคนไทยสมุนไพรไทยมักเป็นพืชที่เจริญเติบโตในสภาพธรรมชาติของประเทศไทยและมีคุณสมบัติทางยาที่พิเศษ เช่น ราก ลำต้น ใบ ดอก และผลของสมุนไพรไทยนำมาใช้ในการรักษาอาการเจ็บป่วย โรคต่าง ๆ และเพื่อเสริมสร้างสุขภาพ (Choowongkomon, 2023)

**อุปกรณ์และวิธีการ**

*ตัวอย่างสมุนไพร*

ตัวอย่างที่ใช่ในการทดสอบมี 3 ชนิด ได้แก่ 1) สารสกัดเคอร์รา (Kerra extract), 2) สารสกัดมิโนซา (Minoza extract) และ 3) สารสกัดเคเอส (KS extract) ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ละลายด้วย 100% DMSO

*การทดสอบความเป็นพิษต่อเซลล์ (MTT assay) ของตำรับสมุนไพรไทย ต่อเซลล์แมคโครฟาจ (RAW264.7 Cell)*

เพาะเลี้ยงเซลล์แมคโครฟาจบนจานเพาะเลี้ยงเซลล์ ด้วยอาหารเลี้ยงเซลล์ชนิด Dulbecco's Modified Eagle's Medium (DMEM), 10% Fetal Bovine serum (FBS), 1% Antibiotics และ 1% Glutamine ในตู้บ่มที่อุณหภูมิ 37°C และ 5% $CO_2$ ในระหว่างการเพาะเลี้ยงทำการเปลี่ยนอาหารเลี้ยงเซลล์ทุก ๆ 2 วัน จากนั้นนำเซลล์แมคโครฟาจ และเซลล์มะเร็งปอดมาเลี้ยงในถาดหลุมชนิด 96 หลุม ที่ความหนาแน่นเซลล์ $1 \times 10^5$ เซลล์ต่อหลุม แล้วทำการบ่มในตู้บ่มที่อุณหภูมิ

37°C และ 5% $CO_2$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เติมอาหารที่เลี้ยงเซลล์ที่มีส่วนประกอบของสารทดสอบที่มีความเข้มข้น 10, 100 และ 1000 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตรแล้วทำการบ่มในตู้บ่มที่อุณหภูมิ 37°C และ 5% $CO_2$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการเติม MTT reagent ที่ความเข้มข้นสุดท้าย 0.5 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร แล้วทำการบ่มในตู้บ่มที่อุณหภูมิ 37°C และ 5% $CO_2$ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ดูดอาหารเลี้ยงเซลล์ออกทั้งหมด แล้วทำการเติม DMSO และวัดค่าดูดกลืนแสงด้วย Microplate reader ที่ความยาวคลื่น 570/630 นาโนเมตร ทำการทดสอบเป็นจำนวน 3 ซ้ำและทำการวิเคราะห์ทางสถิติ

*การวัดปริมาณไนตริคออกไซด์ (Nitric oxide assay) ของเซลล์แมคโครฟาจ*

เลี้ยงเซลล์แมคโครฟาจในถาดหลุมชนิด 96 หลุม ที่ความหนาแน่นเซลล์ $1\times10^5$ เซลล์ต่อหลุมแล้วทำการบ่มในตู้บ่มที่อุณหภูมิ 37°C และ 5% $CO_2$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เติมอาหารที่เลี้ยงเซลล์ที่มีส่วนประกอบของสารทดสอบที่มีความเข้มข้น 10, 100 และ 1000 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร แล้วทำการบ่มในตู้บ่มที่อุณหภูมิ 37°C และ 5% $CO_2$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทำการเติม LPS ที่มีความเข้มข้นสุดท้าย 1 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร แล้วทำการบ่มในตู้บ่มที่อุณหภูมิ 37°C และ 5% $CO_2$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำการดูดอาหารเลี้ยงเซลล์ออกมาปริมาตร 25 ไมโครลิตร แล้วทำการเติม Sulfanilamide reagent ปริมาตร 25 ไมโครลิตร แล้วบ่มในที่มืดเป็นเวลา 10 นาที แล้วจึงเติม NED reagent ปริมาตร 25 ไมโครลิตร แล้วบ่มในที่มืดเป็นเวลา 10 นาที และวัดค่าดูดกลืนแสงด้วย Microplate reader ที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร ทำการทดสอบเป็นจำนวน 3 ซ้ำและทำการวิเคราะห์ทางสถิติ

**ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง**

งานวิจัยนี้ต้องการค้นหาตำรับสมุนไพรไทยที่มีความสามารถในการต้านการอักเสบ โดยตำรับสมุนไพรไทยที่นำมาใช้ในงานวิจัย ได้แก่ เคอร์รา, มิโนซา และเคเอส จากการทดสอบความเป็นพิษต่อเซลล์ (MTT assay) ของตำรับสมุนไพรไทย ต่อเซลล์แมคโครฟาจพบว่าเมื่อทดสอบกับตำรับสมุนไพรทั้ง 3 ชนิดที่มีความเข้มข้น 10, 100 และ 1000 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ตำรับสมุนไพรข้างต้นไม่แสดงความเป็นพิษต่อเซลล์แมคโครฟาจหรือแสดงความเป็นพิษเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยเซลล์แมคโครฟาจมีอัตราการรอดมากกว่า 80% ซึ่งได้ผลการทดสอบแสดงดัง Fig. 1 เมื่อทำการวัดปริมาณไนตริคออกไซด์ของเซลล์แมคโครฟาจที่ถูกกระตุ้นให้เกิดการอักเสบด้วย LPS พบว่าตำรับสมุนไพรไทยทั้ง 3 ชนิดที่มีความเข้มข้น 10, 100 และ 1000 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร สามารถลดปริมาณไนตริคออกไซด์ที่เกิดขึ้นได้ดีโดยมีปริมาณของไนตริคออกไซด์อยู่ในช่วง 1–10 ไมโครโมลาร์ แสดงให้เห็นว่าตำรับสมุนไพรไทยทั้ง 3 ชนิดมีความสามารถในการต้านการอักเสบในเซลล์แมคโครฟาจที่ถูกกระตุ้นให้เกิดการอักเสบด้วย LPS ได้ ซึ่งได้ผลการทดสอบแสดงดัง Fig. 2

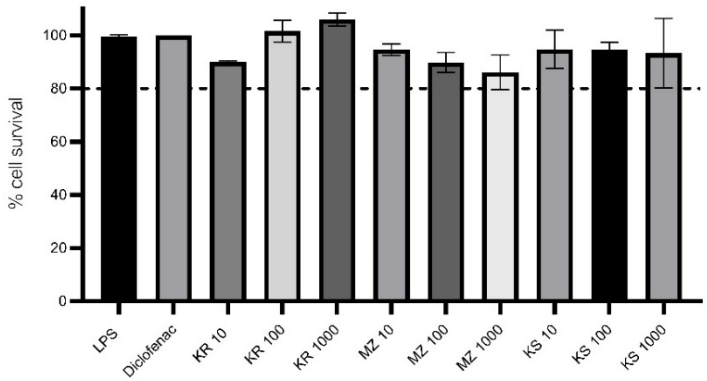



**Fig. 1** Measurement of MTT assay. Effect of Thai Herbal Pharmacopoeia with RAW264.7 cell treatment by Kerra, Minoza and KS (concentration of 10, 100 and 1000 µg/mL) after 24 hr (n = 3 for each group)

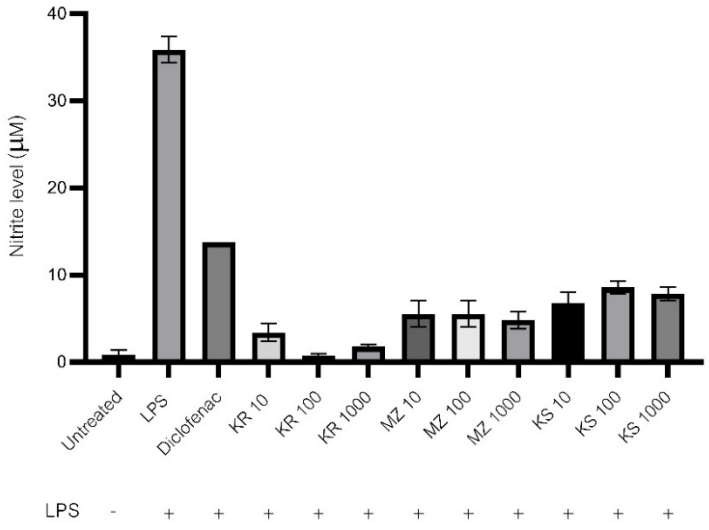



Fig. 2 Measurement of Nitric oxide level of LPS-stimulated macrophages compared to unstimulated cells. NO assay with RAW264.7 cell pre-treatment by Kerra, Minoza and KS (concentration of 10, 100 and 1000 µg/mL) after 24 hr (n = 3 for each group)

## สรุป

จากผลการทดสอบสรุปได้ว่าตำรับสมุนไพรไทยทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ เคอร์รา, มิโนซา และเคเอสเมื่อทำการทดสอบความเป็นพิษต่อเซลล์แมคโครฟาจ พบว่าเมื่อทดสอบกับตำรับสมุนไพรทั้ง 3 ชนิดที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน ตำรับสมุนไพรข้างต้นไม่แสดงความเป็นพิษต่อเซลล์แมคโครฟาจหรือแสดงความเป็นพิษเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ในขณะที่การวัดปริมาณไนตริคออกไซด์ของเซลล์แมคโครฟาจที่ถูกกระตุ้นให้เกิดการอักเสบด้วย LPS พบว่าตำรับสมุนไพรไทยทั้ง 3 ชนิดที่มีความแตกต่างกันสามารถลดปริมาณไนตริคออกไซด์ที่เกิดขึ้นได้ดีมากโดยมีปริมาณไนตริคออกไซด์ที่ใกล้เคียงกับเซลล์แมคโครฟาจที่ไม่ผ่านการกระตุ้นด้วย LPS

## กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ บริษัท อีสเทิร์น เฮิร์บ จำกัด (EASTERN HERB CO.,LTD) ที่สนับสนุนตำรับสมุนไพรที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ ทำให้การวิจัยในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และ ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ในการปฏิบัติงานวิจัย

## เอกสารอ้างอิง

Mowery, N.T., Terzian, W.T.H., Nelson, A.C. 2020. Acute lung injury. Curr Probl Surg, 57: 100777. doi:10.1016/j.cpsurg.2020.100777

Choowongkomon. K., Choengpanya. K., Pientong, C., et al. 2023. The Inhibitory Effect of Kerra™, KS™, and Minoza™ on Human Papillomavirus Infection and Cervical Cancer. Medicina (Kaunas). 59: 2169. doi:10.3390/medicina59122169

# การทำสารแคนนาบิไดออลให้บริสุทธิ์ในอุตสาหกรรมกัญชง (*Cannabis sativa L.*)

# CBD Purification in Industrial Hemp (*Cannabis sativa L.*)

**บุษกร ชูทอง, พิเชษฐ อนุรักษ์อุดม, วีรชัย พุทธวงศ์***

Bussakorn Chuthong, Piched Anuragudom, Weerachai Pudthawong*

ภาควิชาวิทยาศาสตร์กายภาพ และวัสดุศาสตร์ สาขาวิชาเคมี คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน นครปฐม 73140

Department of Physical and Material Science, Chemistry, Faculty of Liberal Arts and Science,

Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus, Nakorn Pathom 73140, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: faaswcp@ku.ac.th

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้ศึกษาการสกัดและการแยก CBD จากพืชกัญชงสายพันธุ์ ACDC น้ำมันสกัดหยาบได้จากการสกัดด้วยเทคนิคคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวดน้ำมันสกัดที่ได้มีปริมาณ CBD เท่ากับ 64.27%w/w ทำการเปลี่ยนโมเลกุลของสาร CBDA เป็น CBD โดยผ่านกระบวนการ Decarboxylation พบว่าปริมาณ CBDA ส่วนใหญ่ถูกเปลี่ยนไปเป็นสาร CBD ที่อุณหภูมิ 150.0 °C ในระยะเวลา 120 นาที ใช้เทคนิค Molecular Distillation ในการกลั่นแยกได้สาร CBD เท่ากับ 67.03%w/w แล้วทำการตกผลึกโดยใช้เฮกเซน พบว่า CBD ที่แยกได้ เมื่อนำมาตกผลึกมีความบริสุทธิ์ 99.24%w/w โดยทำการตรวจสอบด้วยเทคนิค High Performance Liquid Chromatography (HPLC) สาร CBD ที่แยกได้ไม่พบการปนเปื้อนของโลหะหนักและ เชื้อจุลินทรีย์ *Clostridium spp*., *Salmonella spp., Staphylococcus aureus* และ *Escherichia coli* ซึ่งเหมาะสำหรับการใช้ในอุตสาหกรรมที่ผลิต CBD ที่มีคุณภาพและปลอดภัยสูง

**คำสำคัญ**: กัญชง, การสกัด Supercritical $CO_2$, CBD Isolate, HPLC

**Abstract**

In this work, the study on the extraction and separation of CBD from the ACDC hemp plants was performed. Supercritical $CO_2$ extraction crude oil contained 64.27%w/w of CBD. CBDA was converted to CBD through decarboxylation. It was found that most of CBDA was converted to CBD at 150.0 °C in 120 min. The distillation contained 67.03%w/w of CBD by using molecular distillation technique. CBD was crystallized in hexane. The purity of the crystallized CBD isolate was 99.24%w/w. This was obtained by using the High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) technique. CBD Isolate was not found to have heavy metal and microbial contamination of *Clostridium spp*., *Salmonella spp*., *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli*. Therefore, CBD isolated in this study is suitable for use in industries to produce of high-quality and safe CBD.

**Keywords**: CBD Isolate, Hemp, HPLC, Supercritical $CO_2$ Extraction

**คำนำ**

ปัจจุบันได้มีการนำความรู้เกี่ยวกับสมุนไพรที่มีในตำหรับแพทย์แผนไทยโบราณมาใช้ในการรักษาโรคหลายชนิด กัญชง หรือ เฮมพ์ (*Cannabis Sativa L. Subsp. Sativa*) จัดเป็นพืชสมุนไพรที่มีความสำคัญและเป็นพืชเศรษฐกิจในการผลิตปัจจัยสี่ของมนุษย์พืชกัญชงสามารถสังเคราะห์สารประกอบที่สำคัญ คือ สารประกอบแคนนาบินอยด์ (Cannabinoids) ชนิดต่างๆที่มีโครงสร้างทางเคมีแตกต่างกันองค์ประกอบหลักคือ สารแคนนาบิไดออล (Cannabidiol, CBD) และสารเตตราไฮโดรแคนนาบินอล (Tetrahydrocannabinol, THC) ซึ่งมีสารที่เป็นไอโซเมอร์ (Isomer) กัน คือ Delta-9-tetrahydrocannabinol ($\Delta^9$-THC) มีฤทธิ์ทางด้านจิตประสาท ทำให้เกิดอารมณ์เคลิบเคลิ้มและเป็นสุข ถ้าเสพโดยการสูบจะออกฤทธิ์แรงกว่าการรับประทาน และ Delta-8-tetrahydrocannabinol ($\Delta^8$-THC) ไม่มีฤทธิ์ต่อจิตประสาท จึงไม่จัดเป็นสารเสพติด และสารชนิดอื่นในกลุ่มเดียวกัน เช่น Cannabinol (CBN) เป็นสารที่ได้จากการออกซิเดชันของ $\Delta^9$-THC มีฤทธิ์ทำให้เกิดการเสพติด Cannabichromene (CBC), Cannabigerol (CBG) (Fischedick, Hazekamp *et al.* 2010) และมีการสังเคราะห์สารที่เป็นอนุพันธ์ของสาร CBD และ THC ใหม่อีกหลายชนิด ในปี ค.ศ. 1995 ได้ค้นพบว่าสาร CBD มีปฏิสัมพันธ์กับตัวรับในระบบเอ็นโดแคนาบินอยด์ (Endocannabinoid System, ECS) ในร่างกายของมนุษย์ โดยสาร CBD สามารถตอบโต้ด้วยการลดผลกระทบทางจิตประสาทของสาร THC ได้จริง สารสกัดแบบ Broad Spectrum CBD (สารสกัด CBD ที่ผ่านการแยกสาร THC ออกแล้ว) ต่างจากสารสกัดแบบ Full-Spectrum (สารสกัดที่มีสาร CBD THC และสารประกอบอื่นๆรวมอยู่ด้วยกัน) เพราะสามารถให้ประโยชน์ที่มากกว่าในผลของทางการรักษาที่เรียกว่า “Entourage Effect ” ได้โดยไม่มีความเสี่ยงจากสาร THC ที่มีผลกระทบต่อจิตประสาท (Marinotti and Sarill, 2020)

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาได้มีความสนใจเพิ่มมากขึ้นในผลิตภัณฑ์ที่มีสารแคนนาบิไดออล (CBD) ซึ่งดึงดูดนักลงทุนจำนวนมากในด้านธุรกิจอุตสาหกรรม การสกัดและการแยกสารสกัดในอุตสาหกรรมมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการใช้ในด้านเภสัชกรรม ทางการแพทย์และอุตสาหกรรมอาหาร ปัจจุบันเทคนิคการสกัดคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด (Supercritical $CO_2$ Extraction) เป็นวิธีสกัดที่ได้รับความนิยมมากเนื่องจากมีความสามารถในการแยกสารประกอบที่ออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากกัญชงได้สูง, ไม่มีตัวทำละลายตกค้างและได้ผลผลิตที่สูงขึ้น (Qamar et al., 2021) สารสกัด CBD จะต้องผ่านการทำให้บริสุทธิ์เพื่อให้ได้ไอโซเลท (CBD isolate) ที่มีความบริสุทธิ์ (Purity) เกือบร้อยเปอร์เซ็นต์ ดังนั้นการศึกษาวิจัยทางวิทยาศาสตร์จำเป็นต้องดำเนินการเพื่อปรับปรุงวิธีการสกัดและการแยกสาร CBD จากพืชกัญชงที่สามารถนำไปปฏิบัติการผลิตในระดับอุตสาหกรรมได้

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการสกัดและการแยกสาร CBD ในระดับอุตสาหกรรม ให้บริสุทธิ์ 99.00% ปราศจากการปนเปื้อนของโลหะหนักและเชื้อจุลินทรีย์ จากพืชกัญชงสายพันธุ์ ACDC (Alternative Cannabinoid Dietary Cannabis) ซึ่งเป็นสายพันธุ์ที่มีองค์ประกอบของปริมาณสาร CBD สูงและมีสาร THC ปริมาณน้อย โดยในการศึกษาครั้งนี้จะมุ่งไปที่วิธีการสกัดแบบคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด (Supercritical $CO_2$ Extraction) การเปลี่ยนโมเลกุลของสารประกอบ CBDA และ THCA ผ่านกระบวนการดีคาร์บอกซิเลชัน (Decarboxylation) นอกจากนี้ยังใช้เทคนิคการกลั่นแยกสารระดับโมเลกุล (Molecular Distillation) (Chen and Pan 2021) และการตกผลึกสาร ตรวจสอบวิเคราะห์ด้วยเทคนิค High-Performance Liquid Chromatography (HPLC)

**อุปกรณ์และวิธีการ**

*พืชที่ใช้ศึกษา*

ช่อดอกกัญชง (*Cannnabis sativa L. Subsp.*) สายพันธุ์ ACDC จากสถานีวิจัยกัญชง บริษัท ดับบลิวพี ไซเอนซ์ จำกัด อำเภอสามพราน จังหวัดนครปฐม

*สารเคมี*

เอทานอล (Ethanol 95%, $C_2H_5OH$, Food Grade) เฮกเซน (Hexane, $C_6H_{14}$, Commercial Grade) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Dioxide, $CO_2$, Purity 99.99%) อะซิโตน (Acetone, $C_3H_6O$, Commercial Grade) น้ำแข็งแห้ง (Dry Ice, Food Grade) สารมาตรฐานสารประกอบแคนนาบินอยด์ (Cannabinoid Mixture (Neutrals) – 8 Component, ความเข้มข้น > 90%, Cerilliant)

*เครื่องมือ*

เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง (AND รุ่น EJ-610) เครื่องโซนิคเตอร์ (Ultrasonic bath, VGT-1613T) เครื่องวิเคราะห์ความชื้น (PONPE, 400MB Series) เครื่องสกัดคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด (Supercritical $CO_2$ Extraction Machine, LINUO 300 ลิตร) เครื่องปฏิกรณ์แก้วแบบแจ็คเก็ต (Jacketed Glass Reactor, China) เครื่องระเหยแบบฟิล์มบางสำหรับการกลั่นโมเลกุลแบบทางสั้น (Wiped-film evaporator for short-path and molecular distillation, DOVMX) เครื่องตกผลึก (Jacketed Crystallization Reactor, China) เครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (High Performance Liquid Chromatometer, HPLC รุ่น CTO-10AS Shimadazu) เครื่องสเปกโตรมิเตอร์มวลพลาสมาแบบเหนี่ยวนำคู่ (Inductively coupled plasma-mass spectrometry, ICP-MS รุ่น Agilent7900)

*การเตรียมชีวมวล*

อบช่อดอกกัญชงสายพันธุ์ ACDC ด้วยเตาอบที่อุณหภูมิ 65.0°C เป็นระยะเวลา 60 นาที และวัดความชื้นด้วยเครื่องวัดความชื้นให้มีความชื้นไม่เกินร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก จากนั้นบดช่อดอกกัญชงด้วยเครื่องบดเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง นำไปวิเคราะห์ตรวจปริมาณสารประกอบแคนนาบินอยด์ทั้งหมดในช่อดอกด้วยเครื่อง HPLC ก่อนจะนำไปสกัดในกระบวนการต่อไป

*กระบวนการสกัดสารแคนนาบิไดออลด้วยวิธีสกัดคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด (Supercritical $CO_2$ Extraction)*

ชั่งตัวอย่างช่อดอกกัญชงสายพันธุ์ ACDC ที่บดแล้ว 10.00 กิโลกรัม ใส่เข้าถังสกัด ทำการสกัดด้วยเครื่องสกัดคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด (Supercritical $CO_2$ Extraction) โดยใช้ความดันในการสกัดที่ 9.4 เมกะปาสคาล อุณหภูมิที่ใช้ 35.6 °C และอัตราการไหลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 241.6 ลิตรต่อชั่วโมง เก็บน้ำมันกัญชง (Crude Oil) ที่ได้ไปวิเคราะห์ตรวจสอบปริมาณสารแคนนาบิไดออล (CBD) และสารแคนนาบินอยด์ทั้งหมดด้วยเครื่อง HPLC (สภาวะการทำงานของเครื่อง คือ Mobile phase A ใช้เป็น Ultrapure water และ Mobile phase B ใช้เป็น Acetonitrile ผสมกับ Phosphoric acid โดยใช้อัตราส่วนเป็น 30:70 อัตราการไหล 1,500 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิ Oven อยู่ที่ 40°C ความยาวคลื่น 220 นาโนเมตร และใช้ระยะเวลาในการวิเคราะห์ 15 นาที) หากกากยังมีปริมาณสารคงเหลืออยู่ให้ทำการสกัดซ้ำนำสารสกัด Crude Oil ที่ได้ไปใช้ในกระบวนการต่อไป

*การเปลี่ยนสภาพทางเคมีสารแคนนาบิไดออล (CBD) ด้วยกระบวนการดีคาร์บอกซิเลชัน(Decarboxylation)*

นำ Crude Oil ที่ได้จากการสกัดมาใส่ในเครื่องเครื่องปฏิกรณ์แก้วแบบแจ็คเก็ต (Jacketed Glass Reactor) ทำการดีคาร์บอกซิเลชัน (Decarboxylation) โดยใช้อุณหภูมิสูงที่ 150 °C เป็นเวลา 120 นาที นำสารสกัดที่ทำการดีคาร์บอกซิเลชันแล้ว (Full Spectrum) ไปวิเคราะห์ตรวจสอบด้วยเครื่อง HPLC เพื่อไปใช้ในกระบวนการต่อไป

*การแยกสารแคนนาบิไดออล (CBD) จากสารประกอบอื่นด้วยวิธีการกลั่นระดับโมเลกุล (Molecular Distillation)*

นำ Full-Spectrum (สารสกัดที่มีสาร CBD THC และสารประกอบอื่นๆรวมอยู่) ที่ได้ผ่านการทำกระบวนการให้ความร้อนแล้วมาทำการกลั่นระดับโมเลกุลด้วยเครื่องระเหยแบบฟิล์มบางสำหรับการกลั่นโมเลกุลแบบทางสั้น (Wiped-film evaporator for short-path and molecular distillation) โดยใช้สภาวะความดันที่ 0.1 มิลลิบาร์ อุณหภูมิเครื่องระเหยที่ 150.0 °C และอุณหภูมิคอนเดนเซอร์ภายในที่ 70.0 °C ความเร็วในการหมุนสูงสุด 90 รอบต่อนาที นำส่วนที่แยกได้ของสารแคนนาบินอยด์ (ประกอบด้วย CBD, THC และ CBN เป็นต้น) ไปทำการแยกอีกครั้งโดยใช้สภาวะเดิมเพื่อแยกสาร THC ออกเพื่อให้ได้ Broad Spectrum (สารสกัด CBD ที่ปราศจากสาร THC) นำไปตรวจสอบด้วยเครื่อง HPLC เพื่อไปใช้ในกระบวนการตกผลึกต่อไป

*การตกผลึกสารแคนนาบิไดออล (CBD Isolate)*

นำ Broad Spectrum จากวิธีการกลั่นระดับโมเลกุลที่ได้จากการกลั่นแยกสาร THC ออกแล้วมาตกผลึกด้วยเครื่อง Crystallization Reactor โดยใช้ตัวทำละลายเฮกเซนปริมาตร 4.00 ลิตร ที่อุณหภูมิ -20.0 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำ CBD isolate ที่ตกผลึกได้ไปอบที่อุณหภูมิ 30.0 °C และนำไปตรวจสอบความบริสุทธิ์ด้วยเครื่อง HPLC

*การตรวจสอบหาสารปนเปื้อนโลหะหนักและเชื้อจุลินทรีย์*

นำสาร CBD Isolate ที่บริสุทธิ์แล้วไปวิเคราะห์ตรวจสอบหาการปนเปื้อนของสารโลหะหนัก ได้แก่ สารหนู (Arsenic, As) แคดเมียม (Cadmium, Cd) ตะกั่ว (Lead, Pb) และ ปรอท (Mercury, Hg) ด้วยเครื่อง ICP-MS (วิธีทดสอบอ้างอิง In-house method TE-CH-134 based on AOAC (2019)) และเชื้อจุลินทรีย์ *Clostridium spp.*, *Escherichia coli*, *Salmonella spp.* และ *Staphylococcus aureus* โดยใช้วิธีทดสอบ Most Probable Number (MPN)

**ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง**

จากการนำช่อดอกกัญชงสายพันธุ์ ACDC ทำการอบด้วยเครื่องเตาอบที่อุณหภูมิ 65.0 °C ระยะเวลา 60 นาที และวัดความชื้น พบว่า ช่อดอกมีความชื้นเท่ากับร้อยละ 2.22 โดยน้ำหนัก ไม่เกินตามกำหนดไว้ที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ผลวิเคราะห์การตรวจสอบปริมาณสารแคนนาบินอยด์ที่อยู่ในช่อดอกกัญชงสายพันธุ์ ACDC ก่อนสกัด โดยใช้เครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (High Performance Liquid Chromatography, HPLC) พบว่ามีสารประกอบแคนนาบินอยด์ที่สำคัญทั้งหมด 8 ชนิดได้แก่ CBDA, CBG, CBD, CBC, CBN, THCV, THC และ THCA-A มีปริมาณสาร CBDA, CBD, THCA-A และ THC เท่ากับ 9.67%w/w, 6.39%w/w, 0.39%w/w และ 0.31%w/w ตามลำดับ (Fig. 1) ในการสกัดช่อดอกกัญชงสายพันธุ์ ACDC จำนวน 10.00 กิโลกรัม โดยจะใช้เครื่องสกัด Supercritical $CO_2$ เป็นระบบการอัด $CO_2$ ที่มีสถานะเป็นของเหลวที่ความบริสุทธิ์ 99.5% (Food grade) จากสภาวะการทำงานของเครื่องสกัด ภาวะวิกฤติยิ่งยวด (Supercritical state) ในระบบจะใช้ความดันในการสกัดที่ 9.4 เมกะปาสคาล อุณหภูมิที่ใช้ 35.6 °C และอัตราการไหลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 241.6 ลิตรต่อชั่วโมง มีการใช้เอทานอลความเข้มข้น 95.0% ช่วย

ในการไหลออกของน้ำมันสกัด หรือ Crude Oil ที่ได้ ใช้ระยะเวลาในการสกัดทั้งหมด 120 นาที พบว่า Crude Oil มีปริมาณสาร CBD 64.27%w/w (Fig. 2) ได้ผลผลิตร้อยละ 95.60% จากการสกัดช่อดอกกัญชง สายพันธุ์ ACDC เมื่อทำการดีคาร์บอกซิเลชัน (Decarboxylation) เมื่อถูกดีคาร์บอกซิเลตที่อุณหภูมิสูง 150°C เป็นเวลา 120 นาที พบว่า การเปลี่ยนสาร CBDA เป็น CBD ก่อนและหลังดีคาร์บอกซิเลชัน สาร CBDA มีปริมาณความเข้มข้นลดลง 35.79%w/w ลดลงเหลือ 0.45%w/w ในขณะที่ปริมาณความเข้มข้นของสาร CBD เพิ่มขึ้นจาก 30.24%w/w เป็น 54.53%w/w นอกจากนั้นพบว่าสาร CBN มีปริมาณเพิ่มขึ้น (Fig. 3) อาจเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของ THC หรือดีคาร์บอกซิเลชันของ CBNA ซึ่งมาจากการเกิดออกซิเดชันของ THCA (Peschel, 2016) สารประกอบแคนนาบินอยด์ใน Broad Spectrum ที่ทำการแยกได้จากวิธีการกลั่นระดับโมเลกุล (Molecular Distillation)โดยใช้สภาวะความดันที่ 0.1 มิลลิบาร์ อุณหภูมิเครื่องระเหยที่ 150.0°C และอุณหภูมิคอนเดนเซอร์ภายในที่ 70.0°C ความเร็วในการหมุนสูงสุด 90 รอบต่อนาที มีสารสำคัญทั้งหมด 5 ชนิดได้แก่ CBDV, CBG, CBD, CBC และ CBN มีปริมาณความเข้มข้นสาร CBD เท่ากับ 67.03%w/w (Fig. 4) มีผลผลิตร้อยละ 90.95% เมื่อทำการตกผลึกโดยใช้ตัวทำละลายเฮกเซนปริมาตร 4.00 ลิตร ที่อุณหภูมิ -20.0°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง อบที่อุณหภูมิ 30.0°C ได้มีการรายงานว่าเมื่อ CBD Isolate ทำการตกผลึกเพิ่มซ้ำหลายครั้งจะทำให้ความบริสุทธิ์ของสาร CBD Isolate เพิ่มมากขึ้น (Teräsvalli, 2020) โดยใช้สภาวะแบบเดิมพบว่าปริมาณความเข้มข้นของสาร CBD Isolate ที่ตกผลึกได้ทั้งหมด 3 ครั้ง มีความบริสุทธิ์ เท่ากับ 99.24%w/w (Fig. 5) มีผลผลิตร้อยละ 96.67% สาร CBD Isolate ที่บริสุทธิ์ เมื่อนำมาตรวจสอบหาสารปนเปื้อนโลหะหนักและเชื้อจุลินทรีย์ พบว่า ไม่พบการปนเปื้อนสารโลหะหนัก ได้แก่ สารหนู (Arsenic, As) แคดเมียม (Cadmium, Cd) ตะกั่ว (Lead, Pb) และปรอท (Mercury, Hg) (Table 1) และไม่พบการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ *Clostridium spp*., *Salmonella spp*. และ *Staphylococcus aureus* และ *Escherichia coli* (Table 2) ดังนั้นการศึกษาวิจัยนี้แตกต่างจากงานวิจัยก่อนหน้า คือ ได้มีการปรับสภาวะให้เหมาะสมกับปริมาณช่อดอกและปริมาณของผลผลิตที่สกัดได้ เช่น การดีคาร์บอกซิเลชัน (Decarboxylation) โดยใช้อุณหภูมิสูงที่ 150°C เป็นเวลา 30 นาที (Aleksandrov and Janevik-Ivanovska 2022) เมื่อนำไปตรวจสอบ พบว่า การเปลี่ยนแปลงสภาพทางเคมีของสาร CBDA เป็น CBD ก่อนและหลังดีคาร์บอกซิเลชันไม่ต่างกัน เนื่องจากปริมาณ สาร Full Spectrum ที่ได้จากการสกัดมีปริมาณที่มากจึงเพิ่มเวลาในการทำกระบวนการดีคาร์บอกซิเลชันจากเวลา 30 นาที เป็นเวลา 120 นาที ที่อุณหภูมิเดิม 150°C มีการตรวจสอบหาสารปนเปื้อนโลหะหนักและเชื้อจุลินทรีย์ เพื่อเพิ่มศักยภาพของ CBD Isolate สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตยา อาหารเสริม และเครื่องสำอางได้ และเป็นวิธีการที่ใช้ได้ผลในการผลิต CBD Isolate ตามกฎหมายประกาศกระทรวงสาธารณสุขอาหารและยา

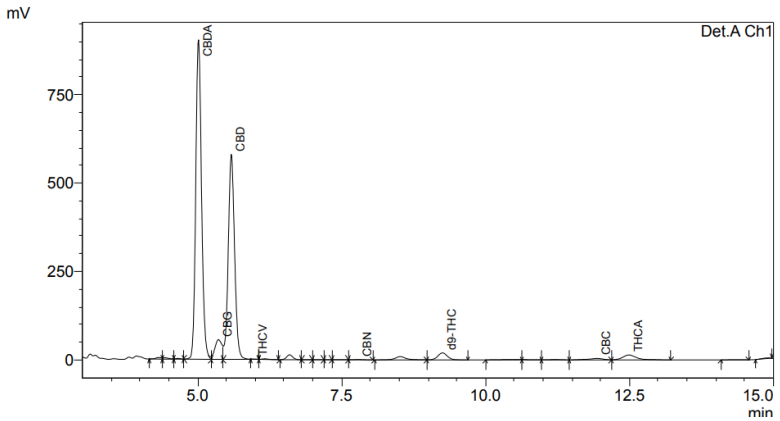



**Fig. 1** HPLC chromatogram (detection at 220 nm wavelength) of cannabinoid compounds in ACDC strain hemp inflorescences

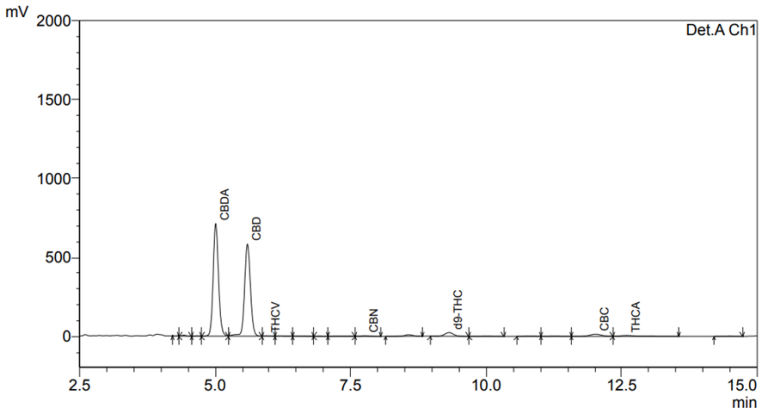



**Fig. 2** HPLC chromatogram (detection at 220 nm wavelength) of cannabinoid compounds in crude oil from supercritical $CO_2$ extraction

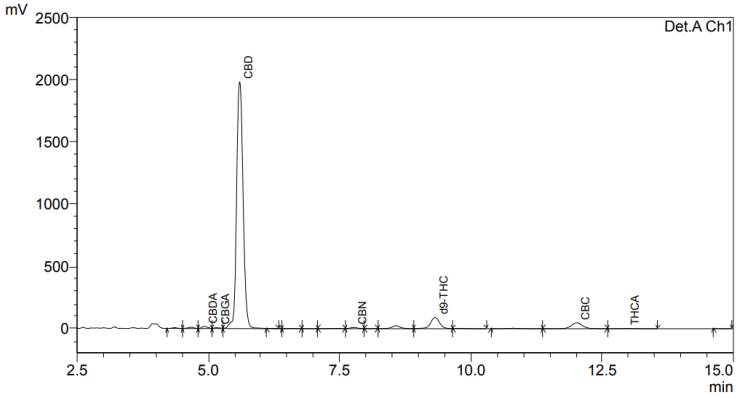



**Fig. 3** HPLC chromatogram (detection at 220 nm wavelength) of cannabinoid compounds in full-spectrum from decarboxylation

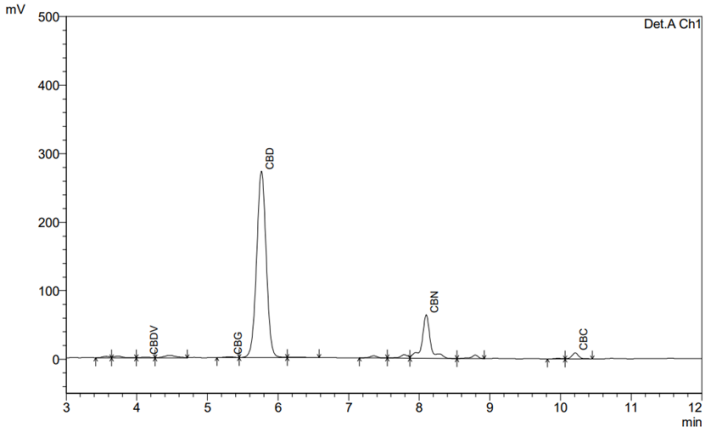



**Fig. 4** HPLC chromatogram (detection at 220 nm wavelength) of cannabinoid compounds in broad spectrum from molecular distillation

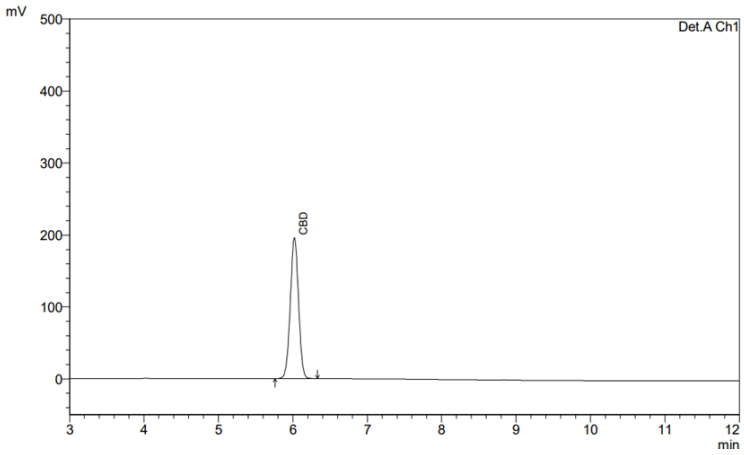



**Fig. 5** HPLC chromatogram (detection at 220 nm wavelength) of CBD isolate 99.24%

**Table 1** Heavy metal contaminants in CBD isolate

| Element | Result | Unit | LOD | Reference method |
|---|---|---|---|---|
| Arsenic (As) | Not Detected | mg/kg | 0.050 | In-house method TE-CH-134 based on AOAC (2019) 986.15 |
| Cadmium (Cd) | Not Detected | mg/kg | 0.020 | In-house method TE-CH-134 based on AOAC (2019) 999.10 |
| Lead (Pb) | Not Detected | mg/kg | 0.050 | In-house method TE-CH-134 based on AOAC (2019) 999.10 |
| Mercury (Hg) | Not Detected | mg/kg | 0.020 | In-house method TE-CH-134 based on AOAC (2019) 974.14 |

**Table 2** Antibacterial test results for CBD isolate

| Pathogen | Result | Unit | LOD | Reference method |
|---|---|---|---|---|
| *Clostridium spp.* | Not Detected | per 0.1 g | 0.050 | In-house method based on British Pharmacopoeia 2020 |
| *Escherichia coli* | <3.0 | MPN/g | 0.020 | FDA BAM Online, 2020 |
| *Salmonella spp.* | Not Detected | per 25 g | 0.050 | British Pharmacopoeia 2020 |
| *Staphylococcus aureus* | Not Detected | per 0.1 g | 0.020 | In-house method based on British Pharmacopoeia 2020 |

## สรุป

การสกัดช่อดอกกัญชง(*Cannabis sativa L. Subsp.*) สายพันธุ์ ACDC ด้วยวิธี Supercritical $CO_2$ Extraction การเปลี่ยนโมเลกุลสาร CBDA เป็น CBD ผ่านกระบวนการดีคาร์บอกซิเลชัน (Decarboxylation) การแยกสาร THC ออกจาก CBD ด้วยวิธีการกลั่นระดับโมเลกุล (Molecular Distillation) และการตกผลึกโดยใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ เป็นวิธีการสกัดและการแยกที่ทำให้ได้ CBD Isolate มีความบริสุทธิ์ 99.24%w/w ปราศจากการปนเปื้อนของโลหะหนักได้แก่ สารหนู

(Arsenic, As) แคดเมียม (Cadmium, Cd) ตะกั่ว (Lead, Pb) และปรอท (Mercury, Hg) และเชื้อจุลินทรีย์ *Clostridium spp*., *Salmonella spp*. *Staphylococcus aureus* และ *Escherichia coli* สามารถนำไปปฏิบัติในการผลิตระดับอุตสาหกรรมได้จริง และเป็นไปตามหลักเกณฑ์ของกฎระเบียบการผลิตอาหารและเครื่องสำอางของสาร CBD จากกัญชง

**กิตติกรรมประกาศ**

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิทยาศาสตร์กายภาพ และวัสดุศาสตร์ สาขาวิชาเคมี ห้องปฏิบัติการวิจัยกัญชงและกัญชาทางด้านวิทยาศาสตร์ คณะศิลปะศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน และบริษัท ดับบลิว พี ไซเอนซ์ จำกัด ที่ได้สนับสนุนทุนสำหรับงานวิจัยรวมทั้งห้องปฏิบัติการและอุปกรณ์ ในการทำงานวิจัยในครั้งนี้

**เอกสารอ้างอิง**

Aleksandrov, M., Janevik-Ivanovska, E. 2022. The role and importance of the decarboxylation process in the production of quality full-spectrum cannabis extract for medicinal purposes. Acta Medica Balkanica International Journal of Medical Sciences 7: 119–128.

Chen, C., Pan, Z. 2021. Cannabidiol and terpenes from hemp–ingredients for future foods and processing technologies. Journal of Future Foods 1: 113–127. doi.org/10.1016//j.jfutfo.2022.01.001

Fischedick, J.T., Hazekamp, A., Erkelens, T., Choi, Y.H., Verpoorte, R. 2010. Metabolic fingerprinting of *Cannabis sativa L*., cannabinoids and terpenoids for chemotaxonomic and drug standardization purposes. Phytochemistry 71: 2058–2073. doi.org/10.1016/j.phytochem.2010.10.001

Marinotti, O., Sarill, M. 2020. Differentiating full-spectrum hemp extracts from CBD isolates: Implications for policy, safety and science. J. Diet Suppl.17: 517–526. doi.org/10.1080/19390211. 2020.1776806

Peschel, W. 2016. Quality control of traditional cannabis tinctures: pattern, markers, and stability. Scientia pharmaceutica 84: 567–584. doi:10.3390/scipharm84030567

Qamar, S.,Torres, Y.J., Parekh, H.S., Falconer, J.R. 2021. 2021. Extraction of medicinal cannabinoids through supercritical carbon dioxide technologies: A review. J. Chromatogr. 1167: 122581. doi.org/10.1016/j. jchromb.2021.122581

Teräsvalli, H. 2020. Extraction and purification of cannabidiol. B.Sc. thesis, Faculty of Chemical Engineering, L appeenranta University of Technology. Lahti, Finland.

# การประเมินศักยภาพน้ำบาดาลในพื้นที่แอ่งน้ำบาดาลชลบุรี-ระยอง

## Groundwater potential assessment of the Chonburi-Rayong basin

**มณธิดา เสริมสิทธิพร**[a], **ศรีเลิศ โชติพันธรัตน์**[b,c,*]

Monthida Sermsitthipor[a], Srilert Chotpantarat[b,c,*]

[a]สาขาวิชาโลกศาสตร์ ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

[b]ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านนวัตกรรมสิ่งแวดล้อมและการจัดการโลหะ สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

[a]Earth Science, Department of Geology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Phayathai Road, Pathum Wan 10330, Thailand

[b]Center of Excellence in Environmental Innovation and Management of Metals (EnvIMM), Environmental Research Institute, Chulalongkorn University, Phayathai Road, Pathumwan, Bangkok 10330, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: Srilert.c@chula.ac.th

**บทคัดย่อ**

การประเมินศักยภาพน้ำบาดาลเป็นส่วนสำคัญของการสำรวจน้ำบาดาลอย่างมีประสิทธิภาพ น้ำบาดาลเป็นทรัพยากรที่สามารถใช้ประโยชน์ได้ทั้งอุตสาหกรรมและการเกษตรอย่างมีประสิทธิภาพ การศึกษานี้มีการใช้ ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) ด้วยกระบวนการวิเคราะห์ตามลาดับชั้น (Analytic Hierarchy Process, AHP) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์และสร้างปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมทางภูมิศาสตร์ ที่มีผลต่อศักยภาพน้ำบาดาล โดยการนาปัจจัยต่างๆ มาแปลงเป็นแผนที่เฉพาะเรื่องเพื่อทาแผนที่ศักยภาพน้าบาดาล โดยวิธีของ AHP จะมีการให้คะแนนลำดับความสำคัญของปัจจัยต่างๆ ในการคำนวนความเป็นไปได้ที่จะเกิดน้ำบาดาลในพื้นที่ จากการศึกษาได้แผนที่ศักยภาพน้ำบาดาลได้มีการตรวจสอบความถูกต้องด้วยพื้นที่ใต้เส้นโค้ง ที่มีค่าความแม่นยำ 0.612 (61.2%) ถือว่ามีค่าความแม่นยำที่ยอมรับได้

**คำสำคัญ**: กระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น, ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์, ศักยภาพน้ำบาดาล

**Abstract**

Assessment of groundwater potential is an important part of effective groundwater exploration. Groundwater is a resource that can effectively provide water for both industry and agriculture. The current study used by geographic information systems (GIS) analytical hierarchy process (AHP). The technique was used to analyze and generate the geographic environmental factors that affects groundwater potential. Take the factors and convert them into thematic maps to mapping the groundwater potential map. The analytical hierarchy process method is mostly based on various factors to help calculate the possibility of groundwater in the area. From the study, the groundwater potential map was validation with ROC/AUC (The Receiver operating characteristic/Area under curve) with an accuracy value of 0.612 (61.2%), considered to have an accepted value.

**Keywords**: Groundwater potential, Geographic information systems, Analytical hierarchy process

**คำนำ**

น้ำบาดาลเป็นแหล่งน้ำที่อยู่ลึกลงไปใต้พื้นดินซึ่งเกิดจากสภาพทางธรณีวิทยาและอุทกธรณีวิทยาของพื้นที่ ปัจจัยทางกายภาพ ปัจจัยทางภูมิศาสตร์และปัจจัยที่เกิดจากมนุษย์ มีผลต่อคุณภาพและปริมาณน้ำบาดาล ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสภาวะการเติมน้ำบาดาล คุณภาพ และการใช้น้ำบาดาล ซึ่งน้ำบาดาลเป็นทรัพยากรที่สามารถใช้ได้ในฤดูแล้ง มีคุณภาพน้ำที่ดี โดยนำไปใช้เพื่อวัตถุประสงค์ต่าง ๆ เช่น การอุปโภคบริโภค กิจกรรมทางการเกษตรและอุตสาหกรรมทั่วโลก (UNESCO, 2015) วัตถุประสงค์เพื่อศึกษา การประเมินศักยภาพน้ำบาดาลในพื้นที่แอ่งน้ำบาดาลชลบุรี – ระยอง เทคนิคการสำรวจระยะไกล (RS) และระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการทำนายศักยภาพของน้ำบาดาลได้ ซึ่งช่วยเพิ่มความแม่นยำของแผนที่ (Nguyen and Srilert, 2023) ในการเตรียมข้อมูลสำหรับทำแผนที่ปัจจัยที่ส่งผลต่อศักยภาพน้ำบาดาล และให้ได้ผลลัพธ์เป็นแผนที่ทำนายศักยภาพน้ำบาดาล เพื่อเป็นประโยชน์ในการทำงานวิจัยและการพัฒนาศักยภาพน้ำบาดาลในพื้นที่ศึกษา โดยพื้นที่ศึกษาจะคลอบคลุมพื้นที่สองจังหวัด ได้แก่ ชลบุรี และระยอง ซึ่งเป็นจังหวัดที่อยู่ในเขตอุตสาหกรรมที่สำคัญของประเทศภาคตะวันออก (EEC) ดังนั้นการพัฒนาศักยภาพของแหล่งน้ำบาดาลในพื้นที่จึงมีความสำคัญต่อทั้งการเป็นอยู่ของประชาชนและเศรษฐกิจของประเทศ

**อุปกรณ์และวิธีการ**

*1. พื้นที่ศึกษา*

ลักษณะภูมิประเทศของแอ่งน้ำบาดาลชลบุรี-ระยอง ประกอบด้วยที่ราบชายฝั่งที่เกิด จากการทับถมของตะกอนบริเวณแอ่งลุ่มน้ำระยองและที่ราบสลับเนินเขาและภูเขา มีลักษณะเป็นลอนลูกคลื่นสูง ต่ำสลับกันไปรวมกับพื้นที่ทิวเขา 2 แนว คือ ทิวเขาชะเมาทางทิศตะวันออก ซึ่งสูงจากระดับน้ำทะเล 1,035 ม. และทิวเขาที่อยู่ขอบทางตะวันออกของแอ่งเป็นแนวยาวจาก อ.เมือง ขึ้นไปทางเหนือจนสุดเขตจังหวัด เป็นเนินเขา ที่เตี้ยกว่า คือ เขาขุนอิน เขาจอมแห เขางวงช้าง ในเขต อ.บ้านค่าย และเขาท่าฉุด เขายายดา เขาตะเภาคว่ำ ในเขต อ.เมือง มีแม่น้ำสำคัญ คือ แม่น้ำระยองหรือแม่น้ำคลองใหญ่ยาวประมาณ 50 กม. ไหลผ่านท้องที่ อ.ปลวกแดง อ.บ้านค่าย อ.เมือง ไหลลงสู่ทะเลที่ ต.ปากน้ำ อ.เมือง จ.ระยอง ในส่วนของลักษณะภูมิประเทศของแอ่งน้ำบาดาลชลบุรีมีการผสมผสานกัน 3 แบบ ทั้งที่ราบลูกคลื่นและ เนินเขา ที่ราบชายฝั่งทะเล และพื้นที่สูงชันและภูเขา ที่ราบลูกคลื่นและเนินเขาพบได้ในเขต อ.ศรีราชา อ.บางละมุง และ อ.สัตหีบ ซึ่งพื้นที่นี้มีลักษณะสูงๆ ต่ำๆ คล้ายลูกระนาด ในปัจจุบันพื้นที่นี้ส่วนใหญ่ถูกใช้ไปในการปลูกมันสำปะหลัง สำหรับที่ราบชายฝั่งทะเลที่อยู่ทางขอบแอ่งด้านตะวันตกนั้นพบตั้งแต่ อ.เมือง ถึง อ.สัตหีบ เป็นที่ราบแคบๆ ชายฝั่งทะเล มีภูเขาลูกเล็กๆ สลับเป็นบางตอน ส่วนพื้นที่สูงชันและภูเขานั้นอยู่ทางขอบแอ่งด้าน ตะวันออก ตั้งแต่ อ. เมือง และ อ. ศรีราชา ที่เป็นต้นน้ำของอ่างเก็บน้ำบางพระ ซึ่งเป็นแหล่งน้ำหลักที่ใช้อุปโภคบริโภค ดัง Fig. 1

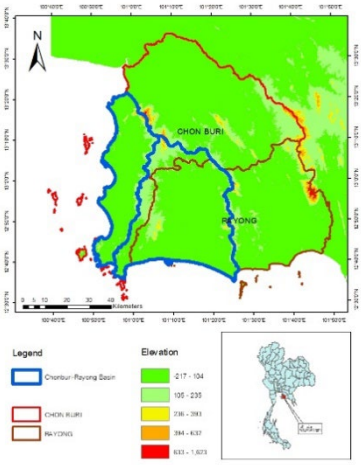



**Fig.1** Study area : Chonburi-Rayong Basin

2. *การจัดลำดับชั้นในการวิเคราะห์ปัญหา (Analytic Hierarchy Process, AHP)*

การจัดลำดับชั้นในการวิเคราะห์ปัญหา ใช้เพื่อกาหนดน้าหนักของแผนที่เฉพาะเรื่อง (Saaty, 1980) Saaty's AHP เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในด้านการจัดการทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เป็นเทคนิคในการตัดสินใจเลือกหรือเรียงลำดับทางเลือกของปัญหาที่ต้องใช้การตัดสินใจที่ซ้ำซ้อนโดยสร้างรูปแบบการตัดสินใจให้เป็นโครงสร้างลำดับชั้น และนาข้อมูลที่ได้จากความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญมาวิเคราะห์สรุปแนวทางเลือกที่เหมาะสม โดยการให้ลาดับคะแนนจากผู้เชี่ยวชาญ ตั้งแต่ระดับคะแนน 1–9 (Saaty, 1980) ซึ่งค่าความสำคัญของแต่ละลำดับคะแนน แสดงใน Table 1

**Table 1** Paired comparison value

| Intensity of Importance | Definition |
|---|---|
| 1 | Equal importance |
| 2 | Equal to moderate importance |
| 3 | Moderate importance |
| 4 | Moderate to strong importance |
| 5 | Strong importance |
| 6 | Strong to very strong importance |
| 7 | Very strong importance |
| 8 | Very to extremely strong importance |
| 9 | Extremely strong importance |

แนะนำว่าอัตราส่วนความสอดคล้อง (Consistency Ratio, CR) ควรน้อยกว่า 0.1 (Saaty, 1980) ซึ่งจะแสดงถึงระดับความสอดคล้องที่เหมาะสมกับการเปรียบเทียบคู่ของแผนที่เฉพาะเรื่องที่ให้ค่าความแม่นยาที่ดีในการทานายความน่าจะเป็นของน้ำบาดาลในพื้นที่

ดัชนีความสอดคล้อง (Consistency Index, CI)

$$CI = \frac{(\lambda max - n)}{(n-1)} \quad (1)$$

อัตราส่วนความสอดคล้อง (Consistency Ratio, CR)

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2)$$

ค่า RI (Random Index) คือดัชนีสุ่มที่มีค่าขึ้นอยู่กับลำดับของเมทริกซ์

จำนวนของแผนที่เฉพาะเรื่อง (Thematic map) ขึ้นอยู่กับความพร้อมของข้อมูลในพื้นที่ศึกษา หลายสาเหตุที่ส่งผลต่อการกระจายและการต่ออายุของน้ำบาดาล สถานการณ์น้ำบาดาลของภูมิภาคใดภูมิภาคหนึ่งอาจแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการเกิดและการเติมน้ำบาดาล (Mahmoud, 2016) การตรวจสอบความถูกต้องของแผนที่ศักยภาพน้ำบาดาล The Receiver Operating Characteristic (ROC) ใช้เพื่อกำหนดความแม่นยาของพื้นที่ เส้นโค้ง ROC ถือเป็นการนำเสนอแบบกราฟิกของการแลกเปลี่ยนระหว่างอัตราค่าลบเท็จ (แกน X) และอัตราเท็จบวก (แกน Y) สำหรับการตัดค่าที่เป็นไปได้ทั้งหมด ในการวิเคราะห์เส้นโค้ง ROC พื้นที่ภายใต้เส้นโค้ง (Area Under Curve, AUC) แสดงให้เห็นถึงความแม่นยำของระบบการคาดการณ์โดยอธิบายถึงความสามารถของระบบในการคาดการณ์การเกิดขึ้นที่ถูกต้องหรือการไม่เกิดของเหตุการณ์ ที่กาหนดไว้ล่วงหน้า ยิ่งพื้นที่ภายใต้เส้นโค้ง มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงถึงแบบจำลองนั้นมีความแม่นยำมาก และการตรวจสอบความถูกต้องเป็นกระบวนการที่สำคัญที่สุดในการสร้างแบบจำลองหากไม่มีการตรวจสอบความถูกต้องแบบจาลองจะขาดความน่าเชื่อถือ (Chung and Fabbri, 2003) สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องจะใช้การวิเคราะห์ และสร้างพื้นที่ภายใต้เส้นโค้ง โดยที่ AHP เป็นแบบจาลองฐานความรู้ของผู้เชี่ยวชาญ มีประโยชน์มากสาหรับการแก้ปัญหาที่ซับซ้อน (Pourghasemi, 2012) เทคนิค GIS, RS ใช้ร่วมกับ AHP เป็นเครื่องมือบูรณาการที่มีประโยชน์สาหรับการประเมินศักยภาพน้ำบาดาล (Jha et al., 2010)

*3. ขั้นตอนการดำเนินงาน*

*3.1 รวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลที่เกี่ยวข้อง*

เป็นการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature review) การรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลทุติยภูมิต่างๆ และคัดเลือกปัจจัยที่นิยมใช้ในการศึกษาเกี่ยวกับการทาแผนที่ศักยภาพน้ำบาดาลมาใช้

*3.2 เตรียมข้อมูลการทำแผนที่เฉพาะเรื่อง*

นำข้อมูลที่ได้มาทำเป็นแผนที่ในพื้นที่ศึกษา โดยแบ่งเป็นแผนที่เฉพาะเรื่อง 4 ปัจจัย ได้แก่ ความหนาแน่นของรอยแตก การใช้ประโยชน์ที่ดิน ลักษณะธรณีสัณฐานวิทยา ความลาดชัน ซึ่งได้แผนที่เฉพาะเรื่องออกมาดังนี้

ความหนาแน่นของรอยแตก (Lineament Density) (Fig. 2) แสดงถึงพื้นที่ของความหนาแน่นจากการแตกหักซึ่งส่งผลให้เพิ่มความพรุนและการซึมผ่านทุติยภูมิ

การใช้ประโยชน์ที่ดิน (Land use and land cover) (Fig. 3) ให้ข้อมูลจำเป็นเกี่ยวกับความชื้นในดิน น้ำใต้ดิน น้ำผิวดิน ฯลฯ พื้นที่ป่าและเกษตรกรรมมีน้ำในสัดส่วนที่สูงกว่าที่ดินที่สร้างขึ้น ที่ดินแห้งแล้งและพื้นหิน มีการกำหนดน้ำหนักที่สูงสำหรับผืนป่าพื้นที่เกษตรกรรมและแหล่งน้ำ มีการกำหนดน้ำหนักที่ต่ำสำหรับที่ดินที่สร้างขึ้นและที่ดินเสียและพื้นผิวหิน

ลักษณะธรณีสัณฐานวิทยา (Geomorphology) (Fig. 4) ธรณีสัณฐานวิทยาแสดงถึงลักษณะภูมิประเทศและภูมิประเทศของพื้นที่และเป็นหนึ่งในปัจจัยหลักที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการกำหนดขอบเขตศักยภาพน้ำใต้ดิน ให้ข้อมูลเกี่ยวกับการกระจายของลักษณะภูมิประเทศที่หลายหลากตลอดจนกระบวนการต่าง ๆ เช่น การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ การเคลื่อนที่ของน้ำ การแช่แข็งและการละลาย เป็นต้น

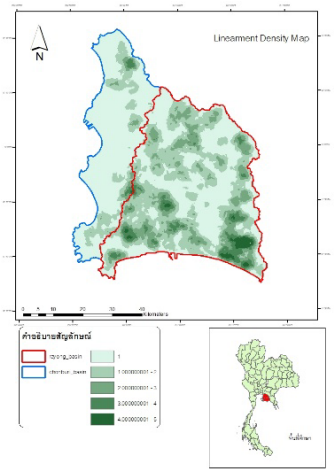



Fig. 2 Lineament density map

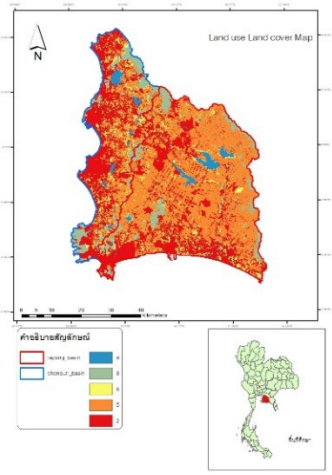



Fig. 3 Land used and land cover map

ความลาดชัน (Slope) (Fig. 5) ความลาดชันเป็นลักษณะภูมิประเทศที่สำคัญซึ่งแสดงออกถึงความสูงชันของพื้นผิวดิน ให้ข้อมูลจำเป็นเกี่ยวกับลักษณะของกระบวนการไหลบ่าของพื้นผิวและอัตราการแทรกซึมที่ได้รับอิทธิพลจากความลาดชันของพื้นผิวเป็นหลัก

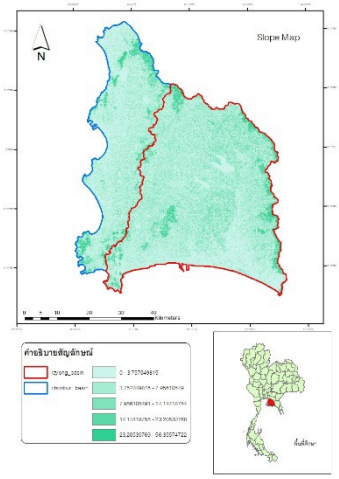



Fig. 4 Geomorphology map

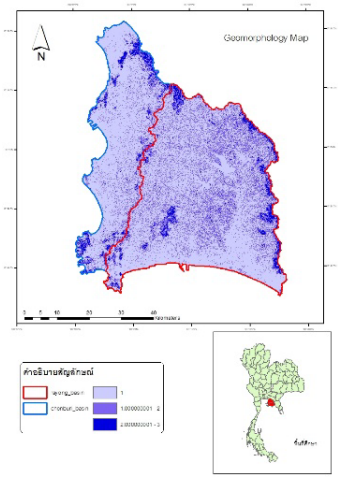



Fig. 5 Slope map

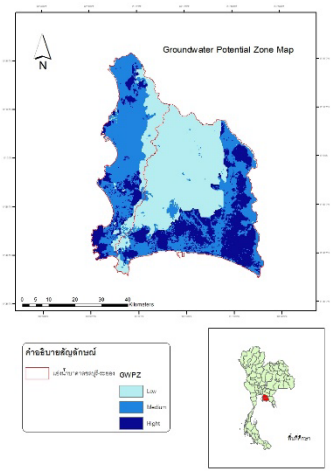



Fig. 6 Groundwater potential map

**ผลและวิจารณ์การทดลอง**

การให้ค่าน้ำหนักของแต่ละปัจจัยที่ใช้ทำแผนที่เฉพาะเรื่อง โดยดัชนีศักยภาพแบ่งออกเป็น ศักยภาพต่ำที่สุด ศักยภาพต่ำ ศักยภาพปานกลาง ศักยภาพสูงและศักยภาพสูงที่สุด ด้วยการแบ่งแบบ Quartile interval โดยพื้นที่ที่มีศักยภาพสูงส่วนใหญ่จะอยู่ทางด้านฝั่งทิศตะวันออกของแอ่งบาดาลระยอง ส่วนพื้นที่ที่มีศักยภาพต่ำส่วนใหญ่จะกระจายตัวอยู่ในพื้นที่แอ่งชลบุรี ซึ่งสอดคล้องกับสภาพทางอุทกธรณีวิทยาและการกระจายตัวของปริมาณน้ำฝนในพื้นที่ศึกษา (Fig. 6)

**ตรวจสอบความถูกต้อง**

ในการทดสอบความถูกต้องของแผนที่แสดงศักยภาพน้ำบาดาลโดยการศึกษาครั้งนี้จะใช้ SPSS ช่วยในการทำค่าพื้นที่ใต้กราฟ หรือ Area under curve (AUC) พบว่าจากการเปรียบเทียบกับค่า Specific capacity (เป็นค่าที่คำนวนได้จาก ปริมาณน้ำของบ่อบาดาล/ระยะน้ำลด) กับค่า Groundwater potential zones พบว่าแผนที่ศักยภาพน้ำบาดาล

มีประสิทธิภาพโดยรวมสูงถึง 0.612 หรือ 61.2% โดยที่ค่าใกล้เคียง 1 จะถือเป็นค่าความแม่นยำที่ดี (Fig. 7) สรุปได้ว่าประสิทธิภาพการทำนายจากแผนที่ศักยภาพน้ำบาดาลที่ได้โดยวิธีการ AHP นั้นมีความน่าเชื่อถือที่ดี

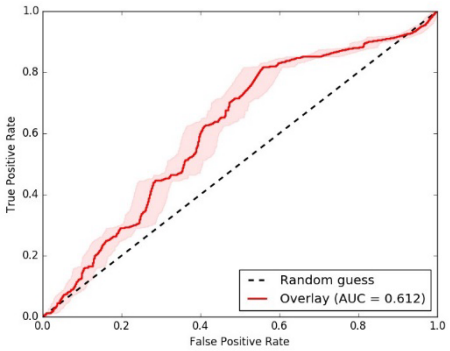



Fig 7. Accuracy value of data

## สรุปผล

จากการทำข้อมูลแผนที่ศักยภาพโดยใช้ปัจจัย 4 ปัจจัย ซึ่งได้ใช้วิธีกระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้นในการให้คะแนนน้ำหนักของแต่ละปัจจัย และทำการผสมกันโดยใช้ด้วยเทคนิคการซ้อนทับข้อมูล พบว่าพื้นที่ศักยภาพสูงส่วนใหญ่จะอยู่ทางด้านทิศะวันออกของบริเวณแอ่งน้ำบาดาลระยอง ส่วนพื้นที่ศักยภาพต่ำส่วนใหญ่จะอยู่บริเวณแอ่งน้ำดาลชลบุรี ซึ่งมีความสอดคล้องกับสภาพทางธรณีสันฐานวิทยาและความหนาแน่นของรอยแตกในพื้นที่ศึกษา และจากทำการสร้างกราฟความโค้ง ROC เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของตัวแผนที่ พบว่าตัวแผนที่นี้มีความแม่นยำอยู่ที่ร้อยละ 61.2% ซึ่งแผนที่ศักยภาพน้ำบาดาลนี้ สามารถทำให้ประชาชนในพื้นที่ใช้ประโยชน์จากน้ำ บาดาลได้อย่างมีประสิทธิภาพและยั่งยืน สามารถช่วย แก้ไขปัญหาการขาดแคลนน้ำได้ รวมทั้งใช้ประโยชน์ใน ด้านอุตสาหกรรม การเกษตร และใช้ในชีวิตประจำวัน เพื่อพัฒนาให้ประชาชนในพื้นที่มีความเป็นอยู่ที่ดีขึ้น

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาโลกศาสตร์ และ ภาควิชาธรณีวิทยา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และขอขอบคุณงบประมาณสนับสนุนการวิจัยจากกองทุนวิทยาศาสตร์วิจัย นวัตกรรม (ววน.) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับการวิจัยนี้และขอขอบคุณ คณะผู้ทรงคุณวุฒิ ผู้เชี่ยวชาญ ทุกท่านที่ให้คำแนะนำในการปรับปรุงบทความ ทาให้บทความฉบับนี้สมบูรณ์มากขึ้น สุดท้ายนี้ขอขอบคุณบิดา มารดา ที่สนับสนุนและเป็นกาลังใจ และทุกท่านที่คอยช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ ที่มิได้กล่าวนาม ณ โอกาสนี้

## เอกสารอ้างอิง

Chung, C.-Jo F., Andrea, G. 2003. Fabbri. Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping. Natural Hazards 30: 451–472.

Jha, M.K., Chowdary, V.M., Chowdhury, A. 2010. Groundwater assessment in Salboni Block, West Bengal (India) using remote sensing, geographical information system and multi-criteria decision analysis techniques. Hydrogeology journal 18: 1713–1728.

Mahmoud, S.H., Alazba, A.A. Integrated remote sensing and GIS-based approach for deciphering groundwater potential zones in the central region of Saudi Arabia. Environ. Earth Sci. 75: 1–28.

Thanh, N.N., Chotpantarat, S. 2023. Geographic Information system and remote sensing in deciphering groundwater potential zones. In: Balaji, E., Veeraswamy, G., Mannala, P., Madhav, S. (Eds) Emerging Technologies for Water Supply, Conservation and Management. Springer Water. Springer, Cham. doi.org/10.1007/978-3-031-35279-9_7

Hamid Reza, P., Pradhan, B., Gokceoglu, C. 2012. Application of fuzzy logic and analytical hierarchy process (AHP) to landslide susceptibility mapping at Haraz watershed, Iran. Natural hazards 63: 965–996.

Saaty, T. 1994. How to make a decision: The analytic hierarchy process. Interfaces 24: 19–43, http://www.jstor.org/stable 25061950, 16 February 2021.

UNESCO. 2015. Groundwater. https://en.unesco.org/themes/water-security/hydrology/groundwater, 25 April 2021.

# สาขาวิศวกรรมศาสตร์
# และสถาปัตยกรรมศาสตร์
# (Subject: Engineering
# and Architecture)

---

# ภาคโปสเตอร์
# (Poster Presentation)

# การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยควบคุมการไหลของน้ำกับปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดน้ำในแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่าง

# Study of the relationship between water flow controlling factors and Total Dissolved Solids (TDS) in the lower elevation Chao Phraya River.

**กัญจน์ กุณฑูป***, **สัญญา สิริวิทยาปกรณ์**

Gun Koontoop*, Sanya Sirivithayapakorn

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: gun.koo@ku.ac.th

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์เบื้องต้นระหว่างปัจจัยควบคุมการไหลของน้ำ ได้แก่ อัตราการไหล และน้ำขึ้น-ลง กับของแข็งที่ละลายทั้งหมด (Total Dissolved Solids, TDS) ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้สำคัญของคุณภาพน้ำ เนื่องจาก TDS สามารถบอกปริมาณของสารละลายอนินทรีย์ และมีความสัมพันธ์กับความเค็มในน้ำ งานวิจัยนี้ได้เก็บตัวอย่างน้ำในแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่าง เดือนกุมภาพันธ์-ตุลาคม 2566 โดยเก็บที่ผิวน้ำ และความลึกกึ่งกลางแม่น้ำในช่วงน้ำขึ้น-ลง และรวบรวมข้อมูลอัตราการไหลและระดับน้ำขึ้น-ลง จากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ในช่วงเวลาที่ศึกษาพบอัตราการไหลในช่วง 80-1,218 $m^3/s$ และระดับน้ำขึ้น-ลงในช่วง -1.96-2.54 m จากผลการทดลองพบ TDS ความเข้มข้นสูง (177.0-192.5 mg/L) ในช่วงอัตราการไหล 117-293 $m^3/s$ ที่ระดับน้ำ -1.96-2.15 m จากการวิเคราะห์เบื้องต้นพบว่า TDS ความเข้มข้นสูงเกิดจากอิทธิพลของอัตราการไหลต่ำ (100-300 $m^3/s$) มากกว่าระดับน้ำขึ้น-ลง

**คำสำคัญ**: การไหลของน้ำ, คุณภาพน้ำ, แม่น้ำเจ้าพระยา

**Abstract**

The objective of the study is to perform preliminary analysis of the relationship between water flow controlling factors, including flow rate and tide, with the total dissolved solids (TDS). TDS is an important indicator of water quality because it can indicate the amount of inorganic solutes. It also has a relationship with the salinity in the water. In this study, water samples were collected for 8 months (February-October 2023) at the surface and at the middle-depth of the river. During the sampling period, the river had a flow rate in the range of 80-1,218 $m^3/s$ and the tide level were in the range of -1.96-2.54 m. The TDS in the high concentration range (177.0-192.5 mg/L) were found in the flow rate of 117-293 m3/s with the tidal level of -1.96-2.15 m. The results indicated that high TDS was more influenced by low water flow rate than the tidal level.

**Keywords**: Chao Phraya River, water flow controlling factors, water quality

**คำนำ**

จังหวัดพระนครศรีอยุธยาเป็นจังหวัดที่มีความอุดมสมบูรณ์ด้านทรัพยากรน้ำ มีแหล่งน้ำผิวดินที่สำคัญ ได้แก่ แม่น้ำเจ้าพระยา ไหลผ่านในทางทิศตะวันตกเฉียงเหนือ รวมความยาวประมาณ 55 กิโลเมตร มีความกว้างประมาณ 85-90 เมตร ไหลจากทิศเหนือลงสู่อ่าวไทย โดยแม่น้ำเจ้าพระยาเป็นแหล่งน้ำที่สำคัญสายหนึ่งของจังหวัดพระนครศรีอยุธยา ทั้งในด้านเกษตรกรรม ด้านคมนาคมขนส่งทางน้ำ ด้านอุตสาหกรรม การอุปโภค และการบริโภค ในขณะเดียวกันพบว่าคุณภาพน้ำในแม่น้ำเจ้าพระยาส่วนใหญ่อยู่ในเกณฑ์พอใช้ มีบางพื้นที่ที่มีคุณภาพน้ำเสื่อมโทรม จากสถิติของสำนักงานทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ในปี 2565 พบว่า จังหวัดพระนครศรีอยุธยามีสถิติการร้องเรียนปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมในเรื่องมลพิษด้านคุณภาพน้ำ โดยปัญหาที่เกิดการร้องเรียนเป็น 5 อันดับแรกจากปัญหาทั้งหมด ซึ่งอาจเกิดจากกิจกรรมทางน้ำต่างๆ เช่น การระบายน้ำทิ้งจากแหล่งชุมชนลงสู่แหล่งน้ำ การขาดระบบกำจัดกากของเสียจากการทำปศุสัตว์ รวมถึงน้ำเสียจากแหล่งอุตสาหกรรม เป็นต้น

อย่างไรก็ตามนอกเหนือจากปัญหาดังกล่าว คุณภาพน้ำในแม่น้ำเจ้าพระยามีการแปรผันตามอิทธิพลทางธรรมชาติ และสามารถได้รับผลกระทบจากปัจจัยทางกายภาพอื่นๆที่สำคัญในทางอ้อม เช่น อิทธิพลจากการหนุนของน้ำเค็ม ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate Change) ที่ส่งผลให้เกิดระดับของน้ำทะเลเพิ่มสูงขึ้น การเกิดการกัดเซาะชายฝั่ง รวมไปถึงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณ รูปแบบ การกระจายตัวของฝน และระยะเวลาของฤดูแล้งที่ยาวนานขึ้น (มนตรี, 2565) จากผลกระทบในช่วงฤดูแล้งดังกล่าว พบว่า มีปัจจัยที่สามารถทำนายหรือควบคุมได้ ได้แก่ น้ำขึ้น-น้ำลง ที่เกิดจากอิทธิพลทางธรรมชาติ และการไหลของน้ำในแม่น้ำ ที่เกิดจากฤดูกาลหรือการเปิด-ปิดประตูน้ำ ส่งผลต่อปริมาณน้ำและความเร็วในการไหล

ดังนั้นการศึกษาวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ความสัมพันธ์เบื้องต้นระหว่างปัจจัยควบคุมการไหลของน้ำ ได้แก่ อัตราการไหล และน้ำขึ้น-น้ำลง กับปริมาณของแข็งที่ละลายทั้งหมด (Total Dissolved Solids, TDS) ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้สำคัญในการวัดคุณภาพของน้ำ เนื่องจาก TDS สามารถบ่งบอกถึงปริมาณของสารละลายอนินทรีย์ในน้ำ อีกทั้งมีความสัมพันธ์กับความเค็มในน้ำ หากได้รับอิทธิพลจากการแพร่เข้ามาของเกลือจากน้ำทะเล จะทำให้มีค่า TDS สูงขึ้น ซึ่งหากน้ำในแม่น้ำที่ไหลมาจากต้นน้ำลดลง ผนวกกับน้ำทะเลที่หนุนสูงขึ้น ก็จะทำให้ความเค็มจากน้ำทะเลแพร่จากปากแม่น้ำเข้ามายังแม่น้ำที่อยู่บนแผ่นดินไกล (ศีลาวุธ, 2564) การศึกษานี้มีประโยชน์ในการทำความเข้าใจและทำความรู้จักกับความสัมพันธ์ของปัจจัยควบคุมการไหลกับปริมาณของ TDS ในรูปแบบการตรวจวัดแบบพื้นฐานที่อาจเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้ในสำหรับวางแผนและบริหารจัดการคุณภาพน้ำต่อไป

**วิธีการศึกษา**

*กำหนดพื้นที่ศึกษาและวันที่เก็บตัวอย่าง*

*กำหนดพื้นที่ศึกษา*

กำหนดเก็บตัวอย่าง 2 จุด ได้แก่ บริเวณสะพานอโยธา (AT) และสะพานเกาะเรียน (KR) ระยะห่างระหว่างจุดเก็บประมาณ 1 กิโลเมตร อยู่ห่างจากปากแม่น้ำประมาณ 135 กิโลเมตร แสดงดัง Fig. 1 โดยเก็บที่ความลึก 2 แบบ คือ ความลึกผิวแม่น้ำประมาณ 20–30 เซนติเมตร (AT.1, KR.1) และความลึกกึ่งกลางแม่น้ำประมาณ 2–3 เมตร (AT.2, KR.2) พื้นที่โดยรอบมีสภาพทั่วไปเป็นแหล่งของชุมชนขนาดเล็ก ใกล้กับจุดเชื่อมต่อกันระหว่างแม่น้ำป่าสักกับแม่น้ำเจ้าพระยา อยู่ห่างไกลกับแหล่งชุมชนหนาแน่น พื้นที่โรงงานอุตสาหกรรม และเป็นเส้นทางสัญจรของเรือขนส่งสินค้า กำหนดให้จุดเก็บตัวอย่างอยู่ห่างจากแหล่งกำเนิดมลพิษจากมนุษย์ ซึ่งเป็นตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้

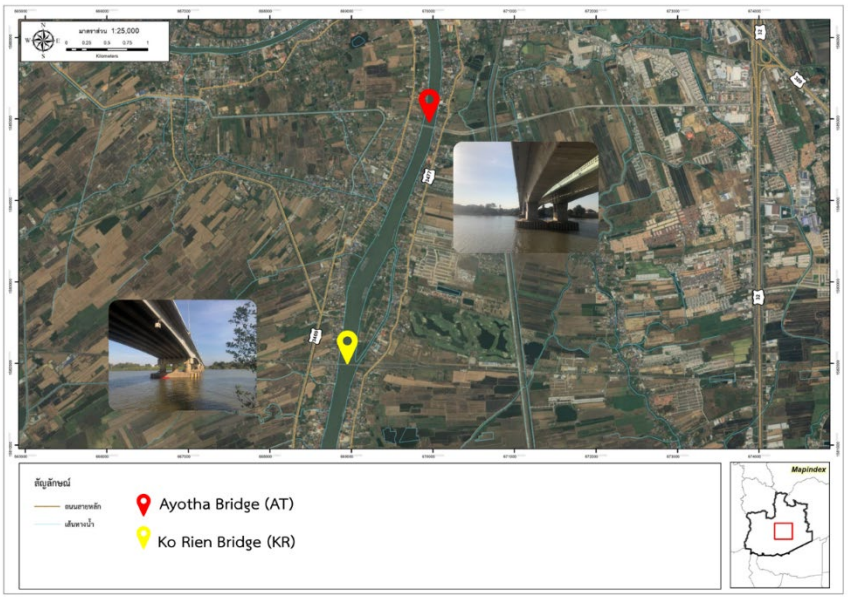



Fig. 1 sampling points

*กำหนดวันที่เก็บตัวอย่าง*

เก็บตัวอย่างคุณภาพน้ำรวบรวมข้อมูลเป็นเวลา 8 เดือน โดยเริ่มตั้งแต่เดือนกุมภาพันธ์-ตุลาคม 2566 ครอบคลุมฤดูแล้ง และฤดูฝน โดยเก็บตัวอย่างเดือนละ 2 ครั้ง แบ่งเป็นช่วงน้ำกำลังขึ้น และช่วงน้ำกำลังลง ตามการคำนวณโดยกรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือบริเวณสถานีกองบัญชาการกองทัพเรือ 2566 วันที่เก็บตัวอย่างแสดงดัง Table 1

**Table 1** Sampling schedule

| Date / Period | Dry Season | | | | | Rainy Season | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Feb | Mar | Apr | May | Jun | Jul | Aug | Sep | Oct |
| Water Rising | TU-21 | TU-21 | WE-19 | TH-18 | TU-20 | TH-6 | WE-30 | WE-27 | - |
| Water Receding | MO-27 | WE-15 | FR-21 | SA-27 | TH-8 | - | TH-17 | FR-1 | SU-1 |

*วิธีการวิเคราะห์*

*วิธีการเก็บตัวอย่างน้ำและวิธีวิเคราะห์*

1. เก็บตัวอย่างน้ำด้วยวิธีการเก็บตัวอย่างแบบจ้วง (Grab Sampling) เป็นการเก็บตัวอย่างครั้งเดียวที่จุดเดียวในเวลาใดเวลาหนึ่งแล้วนำมาวิเคราะห์ การเก็บตัวอย่างแบบนี้จะทำให้ทราบถึงลักษณะสมบัติของแหล่งน้ำเฉพาะจุด และทำให้เห็นความผันแปรของลักษณะสมบัติและคุณภาพน้ำในจุดต่างๆได้อย่างชัดเจน (กรมควบคุมมลพิษ, 2553)

2. รวบรวมข้อมูลคุณภาพน้ำ โดยใช้เครื่องมือวัดชนิด Multiparameter (Consort C561)

3. ตรวจสอบข้อมูลปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดจากการเก็บตัวอย่าง โดยเทียบกับข้อมูลจากสถานีตรวจวัดอัตโนมัติของการประปานครหลวง (สถานีวัดบ้านแป้ง)

4. รวบรวมข้อมูล ได้แก่ อัตราการไหล และสภาวะระดับน้ำ โดยใช้ข้อมูลจากสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำและกรมอุทกศาสตร์กองทัพเรือ https://tiwrm.hii.or.th/DATA/REPORT/php/chart/chaopraya/small/chaopraya.php และ https://www.hydro.navy.mi.th/chaophraya/rtnhq.htm

5. วิเคราะห์ความสัมพันธ์จากกราฟปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดกับอัตราการไหล และสภาวะระดับน้ำ

**ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง**

*การรวบรวมข้อมูลและผลการเก็บตัวอย่าง*

การเปรียบเทียบข้อมูลการเก็บตัวอย่างปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด 64 ค่า โดยเทียบกับข้อมูลจากสถานีตรวจวัดอัตโนมัติของการประปานครหลวง (สถานีวัดบ้านแป้ง) ซึ่งเป็นสถานีตรวจวัดที่อยู่ใกล้กับจุดเก็บตัวอย่างมากที่สุด ตั้งอยู่ทางทิศใต้ ห่างออกไปประมาณ 11 กิโลเมตร พบว่า ข้อมูลอยู่ในช่วงใกล้เคียงกัน โดยข้อมูลการเก็บตัวอย่างอยู่ในช่วง 120–197 mg/L มีค่าเฉลี่ย 161.4 mg/L ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 15.1 mg/L และข้อมูลจากสถานีวัดบ้านแป้ง อยู่ในช่วง 155.7–235.7 mg/L มีค่าเฉลี่ย 195.7 mg/L และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 20.0 mg/L ตามลำดับ และจากการรวบรวมข้อมูลอัตราการไหลสถานีตรวจวัดอัตโนมัติ สถานีบางไทร (สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ, 2566) ตั้งอยู่ทางทิศใต้ของจุดเก็บตัวอย่าง มีระยะห่างประมาณ 21 กิโลเมตร พบว่า อัตราการไหลเฉลี่ยรายวันอยู่ในช่วง 80–1,218 $m^3/s$ ข้อมูลสภาวะระดับน้ำในแม่น้ำเจ้าพระยา สถานีกองบัญชาการกองทัพเรือ จากการคำนวณของกรมอุทกศาสตร์ 2566 (กรมอุทกศาสตร์กองทัพเรือ, 2566) พบว่า สภาวะระดับน้ำอยู่ในช่วง -1.96–2.54 m แสดงดัง Table 2

ทบทวนข้อมูลในช่วง 2 ปี พบว่า ในปี 2564 ความเข้มข้น TDS อยู่ในช่วง 101–341 mg/L มีอัตราการไหล 53–3,165 $m^3/L$ และระดับน้ำ -3.41–2.48 m ในปี 2565 ความเข้มข้น TDS อยู่ในช่วง 100–373 mg/L มีอัตราการไหล 90–3,156 $m^3/L$ และระดับน้ำ -3.12–2.60 m

**Table 2** Data collection and sample collection results

| Stations | AT.1 | AT.2 | KR.1 | KR.2 | Wat Ban Pang[a] | Bang Sai[b] | Royal Thai Navy Headquarters[c] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Total Dissolved Solids (mg/L) | | | | | Flow rate ($m^3/s$) | Tide (m) |
| 21 Feb 23 | 188 | 172 | 185 | 182 | 220.5 | 293 | 2.15 |
| 27 Feb 23 | 157 | 156 | 155 | 156 | 190.6 | 98 | -1.39 |
| 15 Mar 23 | 146 | 143 | 150 | 146 | 184.4 | 104 | -1.65 |
| 21 Mar 23 | 158 | 148 | 184 | 165 | 185.2 | 80 | 1.88 |
| 19 Apr 23 | 156 | 149 | 170 | 152 | 188.5 | 89 | 1.48 |
| 21 Apr 23 | 143 | 142 | 145 | 145 | 183.9 | 99 | -1.71 |
| 18 May 23 | 159 | 120 | 145 | 146 | 183.1 | 95 | 1.63 |
| 26 May 23 | 146 | 145 | 162 | 157 | 191.1 | 104 | -1.84 |
| 8 Jun 23 | 150 | 145 | 153 | 153 | 204.8 | 104 | -1.96 |
| 20 Jun 23 | 149 | 148 | 189 | 171 | 235.0 | 99 | 2.03 |
| 6 Jul 23 | 170 | 159 | 172 | 173 | 220.7 | 102 | 2.54 |
| 17 Aug 23 | 178 | 172 | 175 | 172 | 204.6 | 137 | -1.68 |
| 30 Aug 23 | 165 | 163 | 168 | 168 | 201.3 | 223 | 2.24 |
| 1 Sep 23 | 188 | 183 | 197 | 190 | 210.1 | 117 | -1.78 |
| 27 Sep 23 | 162 | 160 | 163 | 160 | 156.0 | 1,100 | 1.82 |
| 1 Oct 23 | 172 | 172 | 159 | 159 | 171.6 | 1,218 | -1.28 |
| mean | 161.7 | 154.8 | 167.0 | 162.2 | 195.7 | | |
| SD | 14.3 | 15.6 | 15.9 | 13.1 | 20.0 | | |
| max | 188 | 183 | 197 | 190 | 235 | 1,218 | 2.54 |
| min | 143 | 120 | 145 | 145 | 155.96 | 80 | -1.96 |
| Total mean | 161.4 | | | | 168.3 | | |
| Total SD | 15.1 | | | | 21.1 | | |

a = Metropolitan Waterworks Authority

b = Hydro - Informatics Institute

c = Hydrographic Department

*วิจารณ์ผลการทดลอง*

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์จากกราฟแสดงปริมาณ TDS เมื่อพิจารณาระหว่างอัตราการไหล กับสภาวะระดับน้ำในแม่น้ำเจ้าพระยา โดยให้แกน x เป็นข้อมูลสภาวะระดับน้ำขึ้น-ลง และแกน y เป็นข้อมูลอัตราการไหล สามารถแบ่งเป็น 3 รูปแบบ ได้แก่ ปริมาณ TDS เฉลี่ยระหว่างสถานี AT.1 กับ KR.1 เป็นความสัมพันธ์ที่ระดับผิวน้ำ ปริมาณ TDS เฉลี่ยระหว่างสถานี AT.2 กับ KR.2 เป็นความสัมพันธ์ที่ระดับความลึกกึ่งกลางแม่น้ำ และปริมาณ TDS เฉลี่ยทุกสถานี เป็นความสัมพันธ์โดยรวม จากเกณฑ์คุณภาพน้ำประปาดื่มได้ของกรมอนามัย 2563 กำหนดให้ปริมาณ TDS ต้องไม่เกิน 500 mg/L จากผลการเก็บตัวอย่างพบปริมาณ TDS อยู่ในช่วง 120–197 mg/L การกำหนดเกณฑ์ความเข้มข้นของ TDS จึงไม่ใช้การแบ่งเกณฑ์ตามคุณภาพน้ำ แต่จะใช้เกณฑ์ของช่วง mean และ SD แบ่งเป็นความเข้มข้น 3 ค่า (ต่ำ, กลาง, สูง) ดังนี้ Total mean-SD เป็นความเข้มข้นต่ำ ในช่วง Total mean±SD เป็นความเข้มข้นปานกลาง และ Total mean+SD เป็นความเข้มข้นสูง พบว่า ปริมาณ TDS ที่น้อยกว่า 146.3 mg/L อยู่ในเกณฑ์ความเข้มข้นต่ำ (สามเหลี่ยม,สีฟ้า) ค่าที่อยู่ในช่วง 146.3–176.5 mg/L อยู่ในเกณฑ์ความเข้มข้นปานกลาง (วงกลม,สีเขียว) และค่าที่มากกว่า 176.5 mg/L จะอยู่ในเกณฑ์ความเข้มข้นสูง (สี่เหลี่ยม,สีแดง)

ผลการทดลอง พบว่า กรณีที่ผิวแม่น้ำมีปริมาณ TDS ความเข้มข้นสูงสุดที่ 192.5 mg/L มีอัตราการไหล 117 $m^3/s$ และระดับน้ำ -1.78 m กรณีที่ความลึกกึ่งกลางลำน้ำมีปริมาณ TDS ความเข้มข้นสูงสุดที่ 186.5 mg/L มีอัตราการไหล 293 $m^3/s$ และระดับน้ำ 2.15 m และกรณีความเข้มข้นเฉลี่ยมีปริมาณ TDS ความเข้มข้นสูงสุดที่ 189.5 mg/L มีอัตราการไหล 117 $m^3/s$ และระดับน้ำ -1.78 m โดย TDS ความเข้มข้นสูงมีการกระจายอยู่ทั้งในส่วนของน้ำขึ้น และลง แสดงดัง Fig. 2

เมื่อพิจารณาที่อัตราการไหล ในกรณีที่อัตราการไหลมากกว่าปกติในช่วง 27 กันยายน และ 1 ตุลาคม 2566 เนื่องจากอยู่ในช่วงฤดูฝน พบปริมาณ TDS อยู่ในช่วงความเข้มข้นปานกลางทั้งหมด ส่วนที่อัตราการไหลช่วง 100–300 $m^3/s$ มีแนวโน้มพบ TDS ความเข้มข้นสูง ในส่วนของตำแหน่งความลึกลำน้ำ ที่ตำแหน่งผิวน้ำปริมาณ TDS มีแนวโน้มความเข้มข้นมากกว่าที่กึ่งกลางแม่น้ำ แสดงดัง Fig. 3

จากการทบทวนข้อมูลในช่วง 2 ปีย้อนหลัง พบว่า ปี 2564 ในวันที่พบความเข้มข้น TDS สูงสุดมีค่า 341 mg/L มีอัตราการไหล 119 $m^3/s$ และระดับน้ำ 1.64 m และปี 2565 ในวันที่พบความเข้มข้น TDS สูงสุดมีค่า 373 mg/L มีอัตราการไหล 378 $m^3/s$ และระดับน้ำ 1.92 m

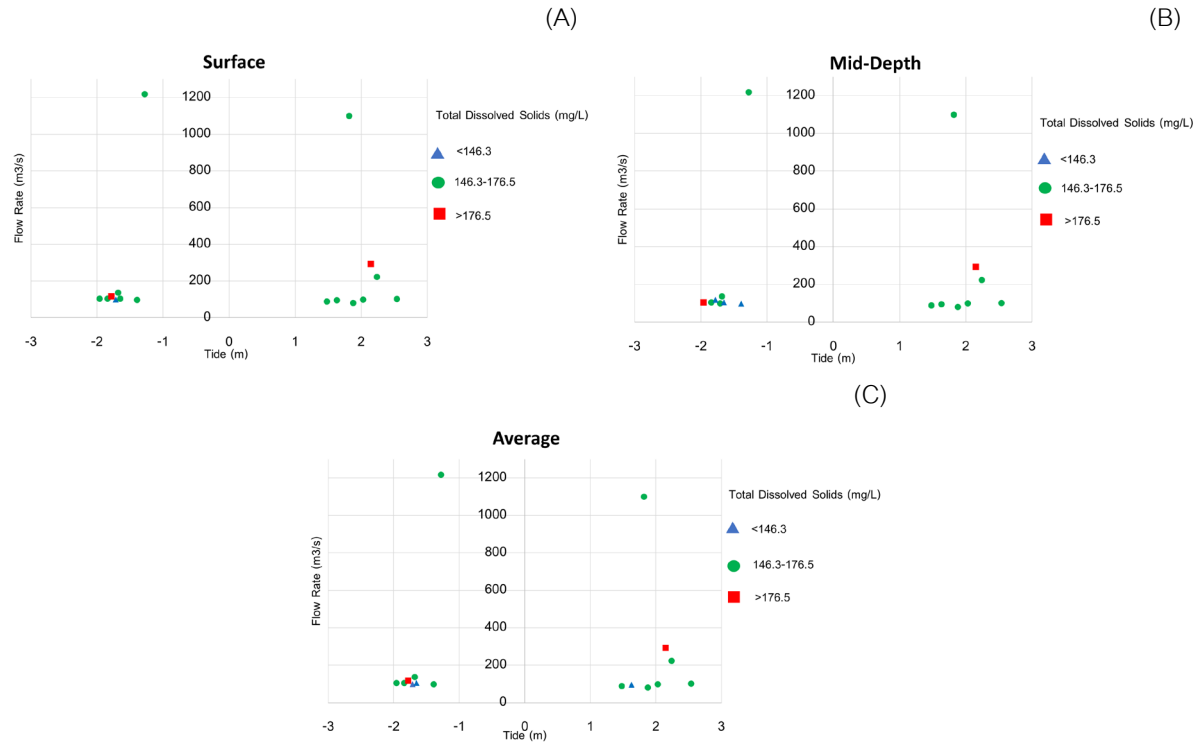



**Fig. 2** The relationship between flow rate and tide with total dissolved solids (TDS) concentration: at the surface of the river (A); at the mid-depth of the river (B); average concentration (C)

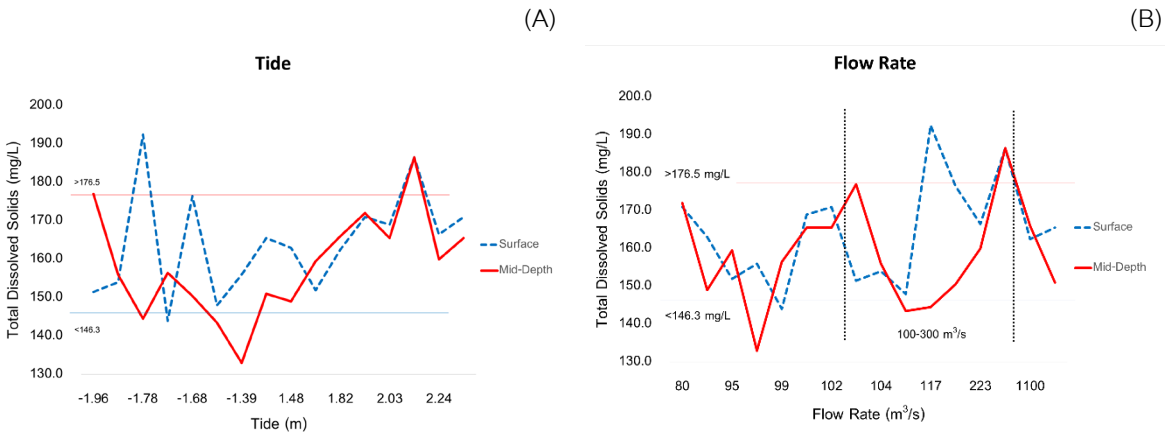



**Fig. 3** The relationship between total dissolved solids (TDS) concentration and: Tide (A); Flow rate (B)

**สรุป**

จากการทดลองสรุปเบื้องต้นได้ว่า มีแนวโน้มพบ TDS ความเข้มข้นสูง ที่อัตราการไหลต่ำ (100–300 $m^3/s$) ซึ่งพบอยู่ทั้งช่วงน้ำขึ้นและลง ดังนั้นอัตราการไหลจึงมีอิทธิพลต่อ TDS มากกว่าระดับน้ำขึ้น-ลง และน้ำขึ้นและลงไม่สามารถระบุได้ชัดเจนว่าทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณ TDS อย่างมีนัยสำคัญ ส่วนตำแหน่งความลึกของลำน้ำ ที่ตำแหน่งผิวน้ำปริมาณ TDS มีแนวโน้มความเข้มข้นมากกว่าที่กึ่งกลางแม่น้ำ แต่ไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจนจึงไม่สามารถระบุได้ว่าที่ตำแหน่งความลึกของลำน้ำ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณ TDS อย่างมีนัยสำคัญ แต่อย่างไรก็ตามข้อมูลการกระจายตัวของความเข้มข้น TDS ยังไม่ละเอียดพอที่จะสรุปได้อย่างชัดเจน เนื่องจากข้อจำกัดในเรื่องเวลาเก็บของมูล อาจต้องใช้การเก็บข้อมูลที่มีความต่อเนื่อง และอาจต้องพิจารณาปัจจัยอื่นๆ เข้ามาเสริมเพิ่มเติมด้วย และในส่วนของวิธีการวิเคราะห์เป็นวิธีที่ไม่ซับซ้อนเหมาะกับการใช้ประเมินแนวโน้มแบบเบื้องต้น สะดวกและอาจเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้ในสำหรับวางแผนและบริหารจัดการคุณภาพน้ำต่อไป

**เอกสารอ้างอิง**

กรมควบคุมมลพิษ. 2553. คู่มือวิธีปฏิบัติสำหรับการเก็บตัวอย่างน้ำจากแหล่งน้ำ. สำนักจัดการคุณภาพน้ำ. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.กรุงเทพฯ.

กรมอุทกศาสตร์กองทัพเรือ. 2566. สภาวะระดับน้ำในแม่น้ำเจ้าพระยา. https://www.hydro.navy.mi.th/chaophraya/rtnhq.htm, 13 ตุลาคม 2566.

การประปานครหลวง. 2566. โครงการระบบเฝ้าระวังคุณภาพน้ำแบบ Real Time. http://rwc.mwa.co.th/page/home/, 28 พฤศจิกายน 2566.

มนตรี ผลสินธ์, ภรัณญู รื่นกลิ่น, นุชนาถ ลาดคูบอน, ภูเบศ มีนะโรจน์. 2565. ผลกระทบของการรุกล้ำน้ำเค็มต่อพื้นที่เกษตรกรรม. วารสารสิ่งแวดล้อม 26: 2–5

ศีลาวุธ ดำรงศิริ. 2564. น้ำดื่ม เค็มได้แค่ไหน?. วารสารสิ่งแวดล้อม 25: 1–2

สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ. 2566. ติดตามสถานการณ์น้ำลุ่มน้ำเจ้าพระยา. https://tiwrm.hii.or.th/DATA/REPORT/php/chart/chaopraya/small/chaopraya.php, 17 ตุลาคม 2566.

สำนักงานจังหวัดพระนครศรีอยุธยา. 2565. บรรยายสรุปจังหวัดพระนครศรีอยุธยาประจำปี 2565. กลุ่มงานยุธศาสตร์และข้อมูลเพื่อการพัฒนาจังหวัด. กระทรวงมหาดไทย. พระนครศรีอยุธยา.

Thailand Tide Tables. 2566. ตารางน้ำขึ้นน้ำลง. https://www.thailandtidetables.com/, 10 ธันวาคม 2566.

# การศึกษาความแข็งแรงและพฤติกรรมการกัดกร่อนของรอยเชื่อมแผ่นอลูมิเนียมและทองแดงด้วยการเชื่อมแบบสลักเกลียว การเชื่อมด้วยหมุดย้ำ และการเชื่อมแบบจุด

The Study of Strength and Behavior of connection of Joint on Aluminum and Copper by Bolt, Rivet and Spot Weld

**ศรัญญา วิชาไชย**[a], **ปรัชพล เสาวภา**[a], **รติพร มั่นพรหม**[b], **ราชธีร์ เตชไพศาลเจริญกิจ**[a,*]

Saranya Wichachai[a], Prachapol Saowapa[a], Ratiporn Munprom[b], Ratchatee Techapiesancharoenkij[a,*]

[a]ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[b]บริษัท นูออโว พลัส จำกัด ถนนวิภาวดี-รังสิต กรุงเทพฯ 10900

[a]Department of Material Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

[b]Nuovo Plus Co., Ltd., Vibhavadi-Rangsit Rd, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: fengrct@ku.ac.th

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้ศึกษาเปรียบเทียบความแข็งแรงและพฤติกรรมการกัดกร่อนของรอยเชื่อมบนแผ่นอลูมิเนียมและทองแดงที่ถูกเชื่อมด้วยวิธีการที่แตกต่างกัน ประกอบด้วย สลักเกลียว การเชื่อมด้วยหมุดย้ำ และการเชื่อมความต้านทานแบบจุด ซึ่งชิ้นงานได้ออกแบบเป็นลักษณะประกบติดเพื่อทำการทดลองการดึงแบบฉีกลอก (Peeling test) โดยชิ้นงานจะถูกแช่ในสารละลายน้ำเกลือสภาวะความเข้มข้น 3.5 wt% ในระยะเวลาการแช่ที่แตกต่างกัน หลังจากนั้นนำชิ้นงานไปทดสอบแรงดึงเพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงสูงสุด จากการทดลองพบว่าการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นทำให้การยึดติดชิ้นงานเสียหาย อีกทั้งชิ้นงานรับแรงได้น้อยลงเมื่อยิ่งเพิ่มระยะเวลาในการกัดกร่อน โดยชิ้นงานที่เชื่อมด้วยวิธีการแบบสลักเกลียวเหล็กมีความแข็งแรงในการยึดติดชิ้นงานได้สูงที่สุด ชิ้นงานการเชื่อมด้วยหมุดย้ำมีความแข็งแรงในการยึดติดเป็นลำดับรองจากชิ้นงานแบบสลักเกลียว ในขณะที่ชิ้นงานการเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุดมีความแข็งแรงในการยึดติดต่ำที่สุด จากผลการทดสอบตัวอย่างทั้งหมดข้อมูลจากค่าแรงดึงแบบฉีกได้นำการวิเคราะห์โดยวิธีการทางสถิติว่าแต่ละกลุ่มตัวอย่างมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ มีความแม่นยำในความเชื่อมั่นที่ 95%

**คำสำคัญ**: การกัดกร่อน, การย้ำหมุด, การต้านทานแบบจุด, ทองแดง, สลักเกลียว, อลูมิเนียม

**Abstract**

This study examines the strength and corrosion characteristics of joints in commonly used in battery terminal materials between aluminum A1050 and copper C1100. Employing diverse joining methods, including steel bolt, blind rivet, and resistance spot welding, then T-peel specimens replicate real-world conditions. Submersion in a 3.5 wt% sodium chloride (NaCl) solution for durations ranging from 0 to 4 weeks precedes tensile testing. Moreover, the test specimens were duplicated 3 times in each test for accuracy. Corrosion significantly influences specimen integrity, directly impacting strength. Riveting connections demonstrate superior strength, contrasting with spot welding's lower performance. Statistical analyses (ANOVA and Tukey's) validate substantial differences within a 95% confidence interval.

**Keywords**: Aluminum, Blind rivet, Copper, Corrosion, Mechanical bolt, Resistance spot weld

**คำนำ**

ในปัจจุบันวงการรถยนต์ไฟฟ้า (EVs) ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากการเกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์จากการใช้รถยนต์ โดยรถไฟฟ้าขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า ไม่ทำให้เกิดไอเสียและมลภาวะทางอากาศ ช่วยลดการเกิดภาวะโลกร้อนได้ โดยชิ้นส่วนที่สำคัญสำหรับการขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้าคือ แบตเตอรี่ โดยการเลือกใช้รูปแบบของแบตเตอรี่จะขึ้นอยู่กับการใช้งาน สำหรับในงานวิจัยนี้สนใจแบตเตอรี่ในรูปแบบ Pouch Cell โดยการใช้งานในรูปแบบนี้จะเป็นการนำแบตเตอรี่หลายๆเซลล์มาต่อเข้าด้วยกันตามความต้องการการใช้งาน การเชื่อมต่อในแต่ละเซลล์ของแบตเตอรี่จะนำขั้วแบตเตอรี่ (Terminal tab) นิยมนำมาเชื่อมต่อกันด้วยวิธีการเชื่อมแบบสลักเกลียว (Bolt) ซึ่งขั้วบวกและขั้วลบของแบตเตอรี่มักใช้วัสดุที่แตกต่างกัน คืออลูมิเนียมและทองแดงตามลำดับ เนื่องจากมีคุณสมบัติทางกลศาสตร์และไฟฟ้าที่ดีเยี่ยม สามารถหาวัสดุได้ง่าย มีน้ำหนักที่เบา แต่จากการที่วัสดุสองชนิดนี้มีศักย์ไฟฟ้าที่แตกต่างกันปฏิกิริยาทางเคมีหรือการกัดกร่อนเกิดขึ้นบริเวณที่มีการสัมผัสกัน โดยปัญหาจากการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นนี้อาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของแบตเตอรี่ สร้างความเสียหายแก่ชิ้นงานบริเวณที่เชื่อมต่อกัน (Frank and Morton, 2005) วิธีการเชื่อมด้วยสลักเกลียว เป็นวิธีการเชื่อมที่ทำได้ง่าย มีราคาถูก ไม่ต้องการทักษะทางเทคนิคสูง อีกทั้งยังสามารถถอดออกมาซ่อมได้ง่าย จึงเป็นวิธีการเชื่อมต่อที่ได้รับความนิยมในวงการแบตเตอรี่ อย่างไรก็ตามการเชื่อมต่อของสลักเกลียวไม่ได้เป็นการยึดติดชิ้นงานที่ถาวรเมื่อใช้งานไปซักระยะอาจเกิดการหลวมหรือหลุด ส่งผลให้เกิดความเสียหายได้ จึงได้มีการศึกษาเทคนิคการเชื่อมต่อของขั้วแบตเตอรี่อื่นๆเพื่อแก้ปัญหานี้ เช่นวิธีการเชื่อมแบบหมุดย้ำ ที่มักใช้ในอุตสาหกรรมการบิน เป็นวิธีการเชื่อมต่อทางกลที่ดี กระบวนการเชื่อมต่อที่แข็งแรง รวดเร็วและทำได้ง่าย แต่ยังคงเกิดการกัดกร่อนจากการยึดติด (Farhangdoost et al., 2019) ต่อมามีการศึกษาวิธีการการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าหรือ การเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุด (Resistance Spot Weld) นิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตอุปกรณ์ยานยนต์ เป็นการเชื่อมต่อที่ถาวรโดยการใช้แรงกดและความร้อนสร้างรอยเชื่อม (Weidong and Jun, 2019)

งานวิจัยนี้จึงได้จำลองชิ้นงาน โดยออกแบบให้ชนิดของวัสดุเหมือนกับขั้วแบตเตอรี่ที่ใช้จริง ประกบติดกันเพื่อศึกษาลักษณะความเสียหายจากการดึงแบบฉีกลอก (peeling test) งานวิจัยนี้เริ่มจากการศึกษารูปแบบการเชื่อมแผ่นอลูมิเนียมและทองแดง ในวิธีการต่างๆโดยเน้นวิธีการที่ทำได้อย่างง่าย มีประสิทธิภาพ เหมาะกับชิ้นงาน และสามารถหาอุปกรณ์ได้สะดวก นำมาสู่การออกแบบการทดลองของ 3 วิธีการเชื่อมต่อแผ่นอลูมิเนียม A1050 และทองแดง C1100 ประกอบด้วยการเชื่อมต่อด้วยสลักเกลียว การเชื่อมต่อด้วยหมุดย้ำ และการเชื่อมต่อด้วยความต้านทานแบบจุด สำหรับอลูมิเนียม A1050 และ ทองแดง C1100 ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเกรดโลหะอุตสาหกรรมที่ใช้ทั่วไปในแบตเตอรี่ โดยชิ้นงานที่นำมาทดสอบในแต่ละวิธีการจะทำซ้ำวิธีการละ 3 ตัวอย่างเพื่อความแม่นยำในผลการทดสอบ พฤติกรรมการกัดกร่อนของวิธีการเชื่อมต่อทั้งสาม โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการเลือกใช้วิธีการเชื่อมต่อขั้วแบตเตอรี่ที่เหมาะสม

**อุปกรณ์และวิธีการ**

การออกแบบขนาดของชิ้นงานการทดสอบแรงดึงแบบฉีกลอก แผ่นอลูมิเนียม A1050 ขนาด ความกว้าง 30 มิลลิเมตร ความยาว 100 มิลลิเมตร และ ความหนา 0.3 มิลลิเมตร ทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทด (Cathode) แผ่นทองแดง A1050 ขนาด ความกว้าง 30 มิลลิเมตร ความยาว 100 มิลลิเมตร และ ความหนา 0.3 มิลลิเมตร ทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนด (Anode) ตามมาตรฐาน JIS Z 3136-1978 (ASTM International, 2000) นำแผ่นอลูมิเนียมและทองแดงมาประกบติดกัน ซึ่งลักษณะของชิ้นงานการทดสอบหาค่าแรงดึงฉีกลอกสูงสุดถูกออกแบบให้มีระยะการต่อเกย 30 มิลลิเมตร (Gage

length) โดยเชื่อมต่อเพื่อสร้างรูปร่างแบบตัวที (T-peel shape) ซึ่งได้แสดงใน Fig. 1 จำลองคล้ายกับการเชื่อมต่อของขั้วของแบตเตอรี่

1. สำหรับชิ้นงานวิธีการเชื่อมต่อด้วยความต้านทานแบบจุด ได้ใช้เงื่อนไขการเชื่อมต่อที่เหมาะสมต่อชิ้นงานอลูมิเนียม A1050 และ ทองแดง C1100 ที่มีความหนา 0.3 มิลลิเมตร ตามรายงานโดย ปรัชพล และคณะ (2566) ดำเนินการเชื่อมโดยให้ความร้อนและแรงกดลงบนขั้ว เพื่อป้องกันการเสียหายจากความร้อนมากเกินไปของแผ่นอลูมิเนียมและทองแดง แผ่นทองแดง C1100 ขนาด ความกว้าง 30 มิลลิเมตร ความยาว 30 มิลลิเมตร และ ความหนา 0.7 มิลลิเมตร นำมาเป็นบัสบาร์ (Busbar) ประกบบริเวณที่จะเชื่อมด้วยไฟฟ้าสำหรับพารามิเตอร์ที่สำคัญของอุปกรณ์เชื่อมต่อทางไฟฟ้าถูกตั้งค่าตามนี้: (i) แรงกดขั้วที่ 1.5–2 เมกะปาสคาล, (ii) ความถี่ในการเชื่อมต่อที่ 35 รอบต่อวินาที, และ (iii) กระแสการเชื่อมต่อที่ 8500 แอมแปร์ หรือ 85% ของกระแสสูงสุดที่เครื่องการเชื่อมต่อความต้านทานแบบจุด (Resistance Spot Weld machine)

2. สำหรับชิ้นงานวิธีการเชื่อมต่อด้วยสลักเกลียว จะกำหนดสกรูขนาดรู 4 มิลลิเมตรเพื่อยึดชิ้นงานด้วยสกรู M4 จากนั้นทำการขันแน่นด้วยอัตรา แรงดึงที่ 2.5 นิวตันเมตร ตามมาตรฐาน DIN 7984

3. สำหรับชิ้นงานวิธีการเชื่อมต่อด้วยหมุดย้ำ ใช้หมุดเหล็กเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 4 มิลลิเมตร ถูกยึดต่อด้วยปืนรีเว็ท (Gun rivet)

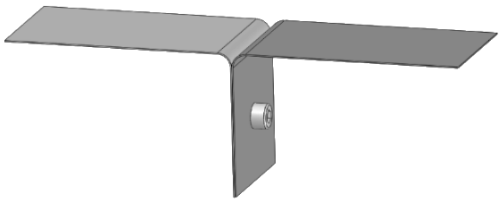


**Fig.1** Geometrical illustration of T-peel shape specimen

ชิ้นงานจะถูกแช่ในสารละลายน้ำเกลือ (NaCl) ที่สภาวะเข้มข้น 3.5 wt% ในช่วงระยะเวลาที่กำหนด (วันที่ 0, 7, 14, 21, 28) โดยวันที่ 0 เป็นชิ้นงานที่ยังไม่ได้ถูกแช่น้ำเกลือ เพื่อการสำรวจพฤติกรรมการกัดกร่อนและการทดสอบแรงดึงทางกล โดยการทดสอบแรงดึงทางกลถูกดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM E8 (Raheem, 2019) การทดสอบหาค่าแรงดึงแบบฉีกลอกสูงสุด ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงจะได้ค่าแรงสูงสุดในแต่ละชิ้นงาน และนำมาเปรียบเทียบกัน ซึ่งชิ้นงานทดสอบมีทั้งหมด 15 ชุด ประกอบด้วย 3 วิธีการ วิธีการละ 5 ช่วงระยะเวลาทดสอบ โดยทำการทดสอบตัวอย่างละ 3 ครั้ง เพื่อทำการหาค่าเฉลี่ยของแต่ละตัวอย่าง

งานวิจัยนี้มีการทดลองเป็นกลุ่มตัวอย่าง ข้อมูลจึงต้องนำมาวิเคราะห์เพื่อยืนยันว่าแต่ละกลุ่มตัวอย่างมีความแตกต่างกันจริง โดยได้นำการวิเคราะห์ทางสถิติความแปรปรวน (Analysis of Variance : ANOVA) โดยหากพบว่าผลการวิเคราะห์ มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยอย่างน้อย 1 คู่ตัวอย่าง แสดงว่ากลุ่มตัวอย่างนั้นมีความแตกต่างกันจริงอย่างมีนัยสำคัญ จากนั้นทำการทดสอบต่อไปว่า นัยสำคัญที่พบในกลุ่มตัวอย่างเกิดจากความแตกต่างของกลุ่มใดบ้าง ความต่างของค่าเฉลี่ยแต่ละคู่ของกลุ่มตัวอย่างโดยการวิเคราะห์ข้อมูลโดยวิธีการเปรียบเทียบภายหลัง (Post hoc Tukey's test) เพื่อยืนยันผลการทดลองว่ามีความแตกต่างกันจริง เปรียบเทียบแต่ละคู่ของวิธีการเชื่อมว่าเป็นอิสระต่อกัน ในช่วงความเชื่อมั่นที่ 95% โดยการแปลผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของกลุ่มตัวอย่างจะถูกนำมาแปรผลด้วยตัวอักษรที่แตกต่างกันเพื่อแสดงถึงความแตกต่างกันจริงอย่างมีนัยสำคัญในความเชื่อมั่นที่ 95% ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ตัวอักษรภาษาอังกฤษ โดย a จะแสดงถึงกลุ่มตัวอย่างที่มีค่าเฉลี่ยแรงดึงแบบฉีกลอกสูงสุด ที่มากที่สุด หากกลุ่มตัวอย่างถัดไปไม่แตกต่างกันอย่างมี

นัยสำคัญ จะมีการแปรผลที่ตัวอักษรเดียวกัน แต่หากมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ การแปรผลจะเป็นตัวอักษรถัดมา (สุพัฒน์, 2555)

**ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง**

ผลการทดสอบแรงดึงแบบฉีกลอกสูงสุดด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง ที่ระยะเวลาการแช่ในน้ำเกลือต่าง ๆ แสดงใน Fig. 2 จากผลดังกล่าว แสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มระยะเวลาการแช่ให้เกิดการกัดกร่อนชิ้นงานที่นานขึ้น จะส่งผลให้ความแข็งแรงของการยึดติดชิ้นงานลดลง ชิ้นงานจะรับแรงได้น้อยลงทั้ง 3 วิธีการเชื่อม แต่ลดลงแตกต่างกัน

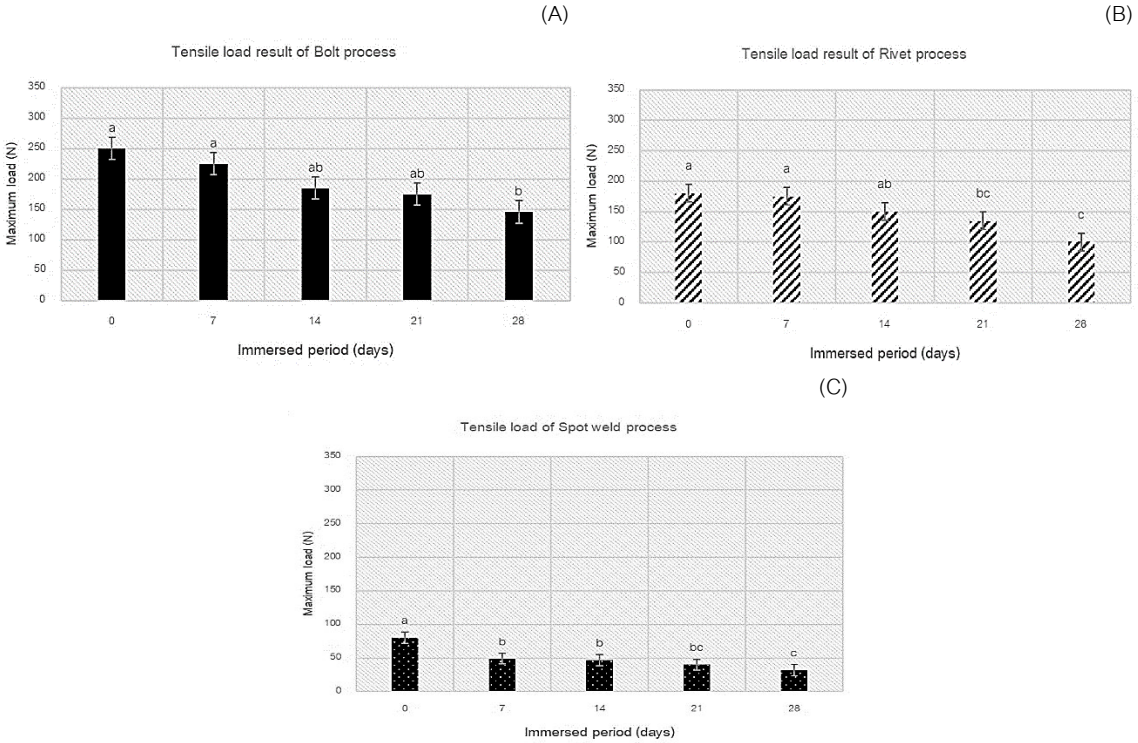



**Fig. 2** Bar chart plot of the tensile strength results for over different immersion durations with Tukey's analysis labels indicate significant ($p$ < 0.05) for (A) Mechanical steel bolt, (B) Blind steel rivet, and (C) spot welding methods

Fig. 2 แสดงกราฟแท่งของค่าเฉลี่ยแรงดึงแบบฉีกลองสูงสุดของชิ้นงานที่ถูกนำไปแช่ทั้ง 5 ช่วงเวลา (0, 7, 14, 21, และ 28 วัน) ของวิธีการเชื่อมทั้ง 3 วิธี ประกอบด้วย (A) วิธีการเชื่อมชิ้นงานแบบสลักเกลียว (B) วิธีการเชื่อมชิ้นงานแบบหมุดย้ำ และ (C) วิธีการเชื่อมชิ้นงานด้วยความต้านทานแบบจุด จากผลลัพธ์โดยรวมแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มระยะเวลาการกัดกร่อนของชิ้นงานจะส่งผลต่อให้เกิดการลดลงของความแข็งแรงรอยเชื่อม

Fig. 2A แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยแรงดึงแบบฉีกลอกสูงสุดกับระยะเวลาในการแช่ชิ้นงานการเชื่อมแบบสลักเกลียว (Bolt) พบว่าวิธีการแบบสลักเกลียวมีค่าเฉลี่ยแรงดึงแบบฉีกลอกสูงที่สุดเมื่อเทียบกับชิ้นงานวิธีการเชื่อมแบบหมุดย้ำและแบบความต้านทานแบบจุด ซึ่งแสดงถึงความแข็งแรงการยึดติดชิ้นงานที่ดีของวิธีการนี้ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน โดยในวันที่0 ของการแช่ชิ้นงานค่าเฉลี่ยแรงดึงแบบฉีกลองสูงสุดของชิ้นงานแบบสลักเกลียวอยู่ที่ประมาณ 250 นิวตัน และลดลงอย่างต่อเนื่องประมาณ 42% ของระยะเวลาในการแช่จากวันที่ 0 ถึงวันที่ 28

Fig. 2B แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยแรงดึงแบบฉีกลอกสูงสุดกับระยะเวลาในการแช่ชิ้นงานการเชื่อมแบบหมุดย้ำ (Rivet) พบว่าวิธีการเชื่อมแบบหมุดย้ำมีความแข็งแรงในการยึดติดได้ดีเป็นลำดับที่ 2 รองจากวิธีการแบบสลักเกลียว โดยในวันที่ 0 ของการแช่ชิ้นงานค่าเฉลี่ยแรงดึงแบบฉีกลองสูงสุดของชิ้นงานแบบหมุดย้ำอยู่ที่ประมาณ 175 นิวตัน และลดลงเล็กน้อยเมื่อชิ้นงานถูกแช่ไปได้ 7 วัน จากนั้นค่าเฉลี่ยแรงดึงแบบฉีกลอกได้มีการลดลงอย่างต่อเนื่องจนต่ำที่สุดในระยะเวลาการแช่ที่ 28 วัน สำหรับตัวอย่างการเชื่อมแบบหมุดย้ำค่าเฉลี่ยแรงดึงแบบฉีกลอกสูงสุดลดลงอย่างต่อเนื่องประมาณ 60% ของระยะเวลาในการแช่จากวันที่ 0 ถึงวันที่ 28

Fig. 2C แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยแรงดึงแบบฉีกลอกสูงสุดกับระยะเวลาในการแช่ชิ้นงานการเชื่อมแบบความต้านทานแบบจุด (Resistance Spot Weld) พบว่าการใช้วิธีการเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุดมีค่าเฉลี่ยแรงดึงแบบฉีกลอกต่ำที่สุดตลอดระยะเวลาการกัดกร่อนเมื่อเทียบกับวิธีการแบบสลักเกลียวและหมุดย้ำ แม้ในช่วงเวลาเริ่มต้น (วันที่ 0) ความสามารถในการรับแรงดึงประมาณ 70 นิวตัน สำหรับวิธีการเชื่อมความต้านทานแบบจุด ค่าเฉลี่ยแรงดึงแบบฉีกลอกสูงสุดได้มีการลดลงอย่างต่อเนื่องจากการแช่วันที่0 ไปวันที่ 7 และได้ลดลงเล็กน้อยในสามสัปดาห์ถัดไป ผลการทดสอบแรงดึงนี้แสดงถึงลักษณะทางกลของวิธีการเชื่อมความต้านทานแบบจุด ที่มีความเสี่ยงหากนำไปใช้ในงานที่พบเจอแรงกระทำต่อขั้วแบตเตอรี่ ความแข็งแรงในการเชื่อมของตัวอย่างวิธีการเชื่อมต้านทานแบบจุดมีการลดลงมากที่สุดในระยะเวลาการแช่น้ำเกลือประมาณ 64% ของระยะเวลาในการแช่จากวันที่ 0 ถึงวันที่ 28

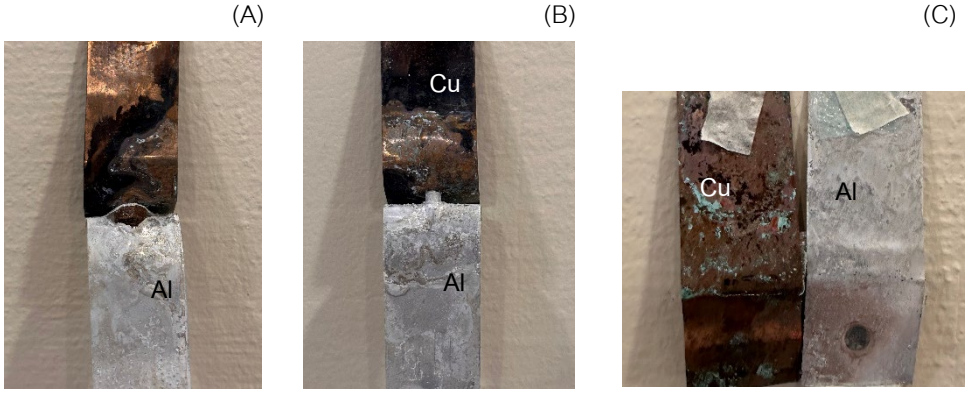



**Fig. 3** Failure modes observation of specimens which connected by (A) steel bolt, (B) steel rivet, (C) resistance spot weld

เมื่อทำการดึงชิ้นงานเรียบร้อยในทุกๆระยะเวลา ได้มีการศึกษาพฤติกรรมความเสียหายจากการถูกดึงในแต่ละวิธีการ ตามที่แสดงใน Fig. 3 แสดงรูปภาพความเสียหายของชิ้นงานที่ถูกดึงสำหรับชิ้นงานแต่ละวิธีการเชื่อมต่อ

Fig. 3A แสดงความเสียหายของชิ้นงานที่เชื่อมต่อด้วยวิธีการแบบสลักเกลียว พบว่าเกิดการฉีกขาดอย่างชัดเจนที่แผ่นอลูมิเนียม โดยถูกฉีกจากอุปกรณ์ยึดติด คือ โบวท์และนัท (Bolt and Nut) ที่ยึดแผ่นอลูมิเนียมและทองแดง เมื่อชิ้นงานเริ่มถูกดึงในแนวแรงที่ตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน แผ่นทองแดงเกิดการงอตามรอยของหัวโบวท์ (Bolt) และแผ่นอลูมิเนียมถูกฉีกจากความแข็งแรงของตัวนัท (Nut) แต่ยังคงยึดอยู่กับแผ่นอลูมิเนียมและทองแดงจึงทำให้วิธีการนี้มีค่าเฉลี่ยแรงดึงแบบฉีกลอกสูงสุด ที่สูงกว่าวิธีการแบบหมุดย้ำและแบบความต้านทานแบบจุด

Fig. 3B แสดงความเสียหายของชิ้นงานที่เชื่อมต่อด้วยวิธีการแบบหมุดย้ำ พบว่าความเสียหายจากการดึงเกิดที่อุปกรณ์การยึดติดและแผ่นอลูมิเนียม โดยแผ่นอลูมิเนียมเกิดการงอตามรอยของหัวหมุดย้ำที่ถูกยึดด้านหลัง (Tubular part of rivet) และหมุดย้ำด้านหลังได้มีการทะลุออกจากรูที่แผ่นอลูมิเนียม แสดงถึงความแข็งแรงของแผ่นอลูมิเนียมที่น้อยกว่าหัวหมุดย้ำ แต่ยังคงยึดกับแผ่นทองแดง ความเสียหายที่เกิดขึ้นทำให้วิธีการเชื่อมแบบหมุดย้ำมีการรับโหลดที่สูงกว่าวิธีการเชื่อมแบบความต้านทานแบบจุด แต่น้อยกว่าวิธีการเชื่อมแบบสลักเกลียว

Fig. 3C แสดงความเสียหายของชิ้นงานที่เชื่อมต่อด้วยวิธีการเชื่อมความต้านทานแบบจุด พบว่าความเสียหายเกิดที่บริเวณรอยเชื่อม โดยการฉีกขาดตามรอยเชื่อมที่เกิดจากการถูกดึง รอยเชื่อมจะฉีกขาดต่อเนื่อง จนหลุดออกจากกัน เนื่องจากวิธีการเชื่อมนี้ได้มีการใช้ทั้งแรงกดและความร้อนเพื่อหลอมชิ้นงานเชื่อมติดกัน อาจเกิดคุณภาพของงานเชื่อมที่ไม่สมบูรณ์ อาจเกิดโพรงอากาศ (Porosity) ทำให้รอยเชื่อมไม่แข็งแรงมากพอ มีความเปราะ หากเจอแรงกระทำ โดยเฉพาะแรงจากการฉีกดึง จะทำให้ชิ้นงานรับแรงได้ต่ำ เมื่อเทียบกับการใช้สลักเกลียวเหล็กและหมุดย้ำ (ศักดิ์ชัย และคณะ, 2012 และ Pan, et al., 2022)

**อภิปรายผลการวิจัยและสรุป**

งานวิจัยนี้ต้องการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบวิธีการเชื่อมที่เหมาะสมในการเชื่อมติดแผ่นอลูมิเนียม A1050 และทองแดง C1100 ของขั้วแบตเตอรี่ การแช่งานในน้ำเกลือ NaCl ที่มีความเข้มข้น 3.5% เป็นเวลา 4 สัปดาห์ช่วยให้สามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อน และศึกษาพฤติกรรมของกระบวนการกัดกร่อนได้ หลังจากนำไปทดสอบการดึง (Tensile test) สรุปได้ดังนี้

1. การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นทำให้ความสามารถในการรับโหลดของชิ้นงานลดลง โดยเมื่อเปรียบเทียบค่าแรงดึงแบบฉีกลอกสูงสุดของชิ้นงานระหว่างชิ้นงานการเชื่อมด้วยสลักเกลียว (Bolt), การเชื่อมด้วยหมุดย้ำ (Rivet), และการเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุด (Resistance Spot weld) โดยพบว่าวิธีการเชื่อมทั้งสลักเกลียว (Bolt) และหมุดย้ำ (Rivet) ยังคงสามารถรับโหลดได้สูงเมื่อเทียบกับชิ้นงานการเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุด (Resistance Spot weld) โดยค่าแรงดึงแบบฉีกลอกสูงสุดของชิ้นงานลดลงอย่างเห็นได้ชัด—ชิ้นงานการเชื่อมแบบสลักเกลียวเหล็ก หมุดย้ำ และการเชื่อมแบบความต้านทานจุด—ลดลงประมาณ 42.62%, 60.06% และ 63.37% ตามลำดับ ซึ่งพบว่าการกัดกร่อนมีอิทธิพลอย่างเห็นได้ชัดต่อการยึดติดชิ้นงานและยิ่งส่งผลมากขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการแช่ชิ้นงาน

2. จากการตรวจสอบวิธีการต่อทั้งสามวิธีนั้น วิธีสลักเกลียวเหล็กมีการรับแรงสูงที่สุด โดยอยู่ที่ประมาณ 250 N ในขณะที่วิธีหมุดย้ำให้ค่าโหลดรองลงมาจากชิ้นงานแบบสลักเกลียวเหล็ก เครื่องมือเหล็กที่มีความแข็งแรงสูงตรงกันข้ามกับความต้านทานแรงดึงที่ต่ำกว่าของแผ่นอลูมิเนียม ส่งผลให้มีระยะเวลาการยืดตัวก่อนที่จะเกิดความเสียหาย การจับยึดหมุดย้ำที่ไม่สมบูรณ์ในระหว่างกระบวนการแบบแมนนวลทำให้เกิดความล้มเหลวของชิ้นส่วนยึดติด หมุดย้ำหลุดออกก่อนที่ Al จะเกิดการแตกหัก

3. ผลการทดสอบค่าแรงดึงแบบฉีกลอกสูงสุดของชิ้นงานได้วิเคราะห์ด้วยวิธีการทางสถิติ ซึ่งสามารถแสดงถึงความแตกต่างของผลลัพธ์ในแต่ละวิธีการได้อย่างแม่นยำ ด้วยช่วงความเชื่อมั่นที่ 95%

**เอกสารอ้างอิง**

Frank, R., Morton, C. 2005. Comparative corrosion and current burst testing of copper and aluminum electrical power connectors. In: Fortieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005 Industry Application Conference.

Moslemi, H., Farhangdoost, K., Zamani, P. 2019. Fatigue life evaluation of single and two riveted coach peel joints using strain-life criteria, AUT J. Mech. Eng. 3: 229–234.

Weidong, C., Jun, J., Zhohua, Y., Gen, L. 2019. A review of lithium-ion battery for electric vehicle applications and beyond, Appl. Energy 158: 4363–4368.

ปรัชพล เสาวภา, ศรัญญา วิชาไชย, รติพร มั่นพรหม, ราชธีร์ เตชไพศาลเจริญกิจ. 2566. การศึกษาการเชื่อมแบบต้านทานจุดสำหรับวัสดุสองชนิดระหว่างทองแดง C1100 และอลูมิเนียม A1050. การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับชาติด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม ครั้งที่ 6. มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม. กรุงเทพฯ.

สุพัฒน์ สุกมลสันต์. 2555. การเปรียบเทียบก่อนและหลังการทดสอบรวมเพื่อการวิจัย. วารสารภาษาปริทัศน์ สถาบันภาษาจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 27: 52–68.

Raheem, Z. 2019. Designation: E8/E8M—13a Standard test methods for tension testing of metallic materials 1.

ศักดิ์ชัย จันทศรี, ไพบูลย์ แย้มเผื่อน, กิตติพงษ์ กิมะพงศ์. 2555. การศึกษาสมบัติรอยเชื่อมต้านทานแบบจุดระหว่างอลูมิเนียม AA1100 และเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี SGACD. คณะวิศวกรรมศาสตร์. ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

Pan, B., Sun, H., Shang, S.L., Banu, M., Wang, P.C., Carlson, B.E., Liu, Z.K., Li, J., 2022. Understanding formation mechanisms of intermetallic compounds in dissimilar Al/steel joint processed by resistance spot welding. J. Manuf. Process. 83: 212–222.

# สาขาอุตสาหกรรมเกษตร

(Subject: Agro-Industry)

---

# ภาคโปสเตอร์

(Poster Presentation)

# ผลของอัลบูมินจากไข่ต่อคุณภาพของผงวุ้นว่านหางจระเข้อบแห้งแบบโฟม-แมท

## Effect of egg albumin on the quality of Aloe vera gel powder by foam-mat drying

**มณชัย เดชสังกรานนท์[a]*, วีรชน ภูหินกอง[a], อมรรัตน์ สีสุกอง[a], วิภา ทัพเชียงใหม่[a], วราภรณ์ วัฒนเขจร[b], นเรศ บางศิริ[c]**

Monchai Dejsungkranont[a,*], Weerachon Phoohinkong[a], Amornrat Srisukong[a], Wipa Tupchiangmai[a], Waraporn wattanakhajorn[b], Narase Bangsisri[c]

[a]คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสวนดุสิต กรุงเทพฯ 10700

[b]คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยสวนดุสิต กรุงเทพฯ 10300

[c]สาขาอาหารและโภชนาการ วิทยาลัยอาชีวขอนแก่น ขอนแก่น 40000

[a]Faculty of Science and Technology, Suandusit University, Bangkok 10700, Thailand

[b]Faculty of Education, Suandusit University, Bangkok 10300, Thailand

[c]Program in Foods and Nutrition, Khonkaen Vocational College, Khonkaen 40000, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: mdbiotech@hotmail.com

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้ศึกษาความเข้มข้นของอัลบูมินจากไข่ที่เหมาะสมต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของผงวุ้นว่านหางจระเข้อบแห้งแบบโฟม-แมท ซึ่งเป็นการพัฒนาผลิตภัณฑ์ผงวุ้นว่านหางจระเข้อบแห้งสำหรับประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพและเพิ่มมูลค่าให้กับว่านหางจระเข้ โดยศึกษาความเข้มข้นของอัลบูมินจากไข่ที่เหมาะสมในการอบแห้งแบบโฟม-แมท ที่ระดับความเข้มข้น 1, 2 และ 3% (w/v) ต่อคุณลักษณะของผงวุ้นว่านหางจระเข้ โดยตีปั่นให้เกิดโฟมก่อนนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 60°C พบว่าการใช้อัลบูมินจากไข่ที่ระดับความเข้มข้น 3% (w/v) ทำให้ได้ผงวุ้นว่านหางจระเข้ที่มีความชื้นและปริมาณน้ำอิสระต่ำ มีความสามารถในการละลายสูง และให้ผลผลิตสูงกว่าเมื่อใช้อัลบูมินจากไข่ที่ระดับความเข้มข้น 1 และ 2% (w/v) ดังนั้นการใช้อัลบูมินจากไข่ 3% (w/v) จึงเหมาะสมในการผลิตผงวุ้นว่านหางจระเข้อบแห้งแบบโฟม-แมท

**คำสำคัญ**: การทำแห้งแบบโฟม-แมท, ว่านหางจระเข้, อัลบูมินจากไข่

**Abstract**

This study investigated the effect of egg albumin concentrations on physico-chemical properties of Aloe vera gel powder by foam-mat drying. This is the development of dried Aloe vera gel powder product for application in health food products and to add values of the Aloe vera. Studying the concentration of egg albumin at 1, 2 and 3 % (w/v) for foam-mat drying were investigated for the powder characteristics. Egg albumin mixed with the solution of Aloe vera gel powder was whipped to foam before air dried at 60ºC. The results showed that as the concentration of egg albumin increased to 3 % (w/v), the moisture content and water activity of Aloe vera gel powder were reduced while the solubility and yield had an increasing trend. Therefore, the Aloe vera gel powder adding with 3% egg albumin was optimal for foam-mat drying Aloe vera gel powder.

**Keywords**: Aloe vera, Egg albumin, Foam-mat drying

**คำนำ**

ว่านหางจระเข้เป็นพืชสมุนไพรที่มีสรรพคุณทางยา มีชื่อทางพฤกษศาสตร์ว่า *Aloe vera* (L.) Burm.f. จัดอยู่ในวงศ์ Asphoderaceae เป็นพืชล้มลุกที่มีถิ่นกำเนิดแถบทะเลเมดิเตอร์เรเนียนและตอนใต้ของทวีปแอฟริกา โดยสายพันธุ์ที่นิยมปลูกในประเทศไทยเป็นพันธุ์จากประเทศสหรัฐอเมริกา สำหรับประเทศไทยมีการเพาะปลูกว่านหางจระเข้ทั่วทุกภูมิภาคของประเทศ โดยในปี พ.ศ. 2561 มีผลผลิตรวม 97,692 ตัน จังหวัดที่มีการปลูกว่านหางจระเข้มากที่สุด คือ ประจวบคีรีขันธ์ ผลผลิตว่านหางจระเข้ส่วนใหญ่เป็นเนื้อว่านหางจระเข้ที่หั่นแบบลูกเต๋า ว่านหางจระเข้บด และวุ้นว่านหางจระเข้ องค์ประกอบทางเคมีของวุ้นว่านหางจระเข้ประกอบด้วยน้ำร้อยละ 99.19 ของแข็งร้อยละ 0.81 ซึ่งส่วนใหญ่เป็นคาร์โบไฮเดรตและเส้นใยอาหาร (ก่องกาญจน์, 2536) สารสำคัญที่เชื่อว่าก่อให้เกิดฤทธิ์ทางชีวภาพของว่านหางจระเข้คือ พอลิแซ็กคาไรด์ และสารไกลโคโปรตีน (Glycoprotein) ที่มีขนาดระหว่าง 14–70 KDa โดยว่านหางจระเข้มีสรรพคุณทั้งทางยา อาหาร และเครื่องสำอาง สามารถรักษาแผลไฟไหม้ น้ำร้อนลวก ต้านการอักเสบ ต้านแบคทีเรีย และเชื้อรา (Reynolds and Dweek, 1999) โดยกลไกการทำงานของว่านหางจระเข้ในการสมานแผลเกิดจากความสามารถในการต้านเชื้อรา ต้านแบคทีเรีย ต้านอักเสบ ปรับระบบภูมิคุ้มกันที่ผ่านกลไกของสารในกลุ่ม Cytokine, Growth factor และ Angiogenic factor (Gupta and Malhotra, 2012) นอกจากนี้ส่วนที่เป็นวุ้นหรือสารสกัดจากว่านหางจระเข้ยังมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระได้ดี ช่วยลดภาวะ Oxidative stress และเพิ่มระดับ Glutathione ในการบาดเจ็บของตับ (Kang et al., 2014)

การอบแห้งแบบโฟม-แมท (Foam-mat drying) เป็นวิธีการทำแห้งที่กำลังได้รับความสนใจในปัจจุบัน เพราะสามารถประยุกต์ใช้ได้กับเครื่องอบแห้งทั่วไปได้ ใช้เวลาในการทำแห้งน้อย ค่าใช้จ่ายต่ำเมื่อเทียบกับการอบแห้งแบบอื่น ๆ และยังช่วยรักษาคุณภาพ กลิ่น และสี ของผลิตภัณฑ์ไว้ได้ การอบแห้งโดยวิธีนี้จะตีให้ผลิตภัณฑ์เกิดเป็นโฟม จากนั้นนำโฟมที่ได้ไปเกลี่ยให้เป็นแผ่นบาง ๆ บนถาด และนำไปอบแห้ง ความร้อนจากลมร้อนจะระเหยความชื้นที่อยู่ในโฟมออกไปทำให้ผลิตภัณฑ์แห้งอย่างรวดเร็ว จากนั้นจึงบดผลิตภัณฑ์ให้เป็นผง โดยผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติในการเกิดโฟมต่ำหรือมีโปรตีนน้อยจำเป็นต้องเติมสารก่อโฟมช่วยทำให้เกิดโฟม (Foaming agent) สารก่อโฟมที่นิยมใช้ เช่น กลีเซอริล โมโนสเตียเรต (Glyceryl monostearate) เมโธเซล (Methocel) โปรตีนถั่วเหลือง (Solubilized soya protein) และอัลบูมินจากไข่ (Egg albumin; EA) (ชลลดา, 2557) โดยชนิดและปริมาณสารก่อโฟมที่ใช้ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของอาหารด้วย

จากการสืบค้นเอกสารสิ่งพิมพ์ที่เกี่ยวข้องยังไม่พบการศึกษาการผลิตผงวุ้นว่านหางจระเข้โดยวิธีอบแห้งแบบโฟม-แมท ส่วนใหญ่เป็นการศึกษาการอบแห้งแบบถาด (Tray drying) และการทำแห้งแบบพ่นฝอย (Spray drying) ซึ่งวิธีการเหล่านี้ใช้เวลาในการดำเนินการนานและไม่ช่วยถนอมคุณค่าทางโภชนาการ ดังนั้นการศึกษาและพัฒนาวิธีการผลิตผงวุ้นว่านหางจระเข้โดยการอบแห้งแบบโฟม-แมท จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ จากความสำคัญข้างต้นคณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะผลิตผงวุ้นว่านหางจระเข้โดยการอบแห้งแบบโฟม-แมท และใช้อัลบูมินจากไข่เป็นสารก่อโฟมเนื่องจากมีราคาถูก หาได้ง่ายในท้องตลาดทั่วไปและมีความปลอดภัยในการบริโภค โดยวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ ศึกษาผลของปริมาณอัลบูมินจากไข่ต่อคุณภาพของผงวุ้นว่านหางจระเข้อบแห้งแบบโฟม-แมท เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ผงวุ้นว่านหางจระเข้ที่มีคุณภาพใกล้เคียงธรรมชาติสามารถประยุกต์ใช้ได้ในผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพ และเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับว่านหางจระเข้ สามารถสร้างรายได้เพิ่มให้กับเกษตรกรในพื้นที่ต่อไป

**อุปกรณ์และวิธีการ**

*การเตรียมวุ้นว่านหางจระเข้*

การทดลองนี้ใช้ว่านหางจระเข้สายพันธุ์บาร์บาเดนซิส (*Aloe barbadensis*) จากหอมขจรฟาร์ม มหาวิทยาลัยสวนดุสิต วิทยาเขตสุพรรณบุรี เป็นวัตถุดิบหลักในการทดลอง เมื่อเก็บเกี่ยวว่านหางจระเข้แล้วจะนำมาแปรรูปภายใน 1 วัน โดยนำว่านหางจระเข้มาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำประปา จากนั้นปอกเปลือกและแยกส่วนที่เป็นวุ้นออกจากเปลือก คำนวณหาน้ำหนักวุ้นว่านหางจระเข้ที่ได้และส่วนเปลือกที่เหลือ (Yield) นำวุ้นที่ได้มาล้างด้วยน้ำหลาย ๆ ครั้ง เพื่อกำจัดส่วนที่เป็นยางออก จากนั้นนำวุ้นว่านหางจระเข้ไปปั่นละเอียดด้วยเครื่องปั่นน้ำผลไม้ (Sharp, EMC-15, Thailand) แล้วกรองผ่านผ้าขาวบางเพื่อแยกส่วนที่เป็นเนื้อวุ้นออกจากน้ำ นำเนื้อวุ้นว่านหางจระเข้ที่ได้ไปทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Thermo, Super Modulyo, USA) แล้วบดให้เป็นผงละเอียดด้วยเครื่องบดสมุนไพร คำนวณหาน้ำหนักผงวุ้นว่านหางจระเข้ที่ได้ (Yield)

*การเตรียมสารละลายผงวุ้นว่านหางจระเข้*

นำผงวุ้นว่านหางจระเข้ที่บดละเอียดจากขั้นต้นมาเตรียมให้อยู่ในรูปสารละลายที่มีความเข้มข้นของผงวุ้นว่านหางจระเข้เท่ากับ 0.1% (w/v) จากนั้นแช่เย็นที่อุณหภูมิ 4°C นาน 12 ชั่วโมง นำสารละลายผงวุ้นว่านหางจระเข้ที่ได้ไปลดขนาดด้วยวิธีการแขวนลอย (Suspension) โดยนำไปปั่นด้วยเครื่องปั่นของเหลวความเร็วสูง (IKA, T25, Germany) ที่ความเร็วรอบ 19,000 rpm เป็นระยะเวลา 5 นาที จากนั้นนำไปผ่านเข้าเครื่องโฮโมจีไนซ์ความดันสูง (Microfluidics, M-110P Microfluidize, USA) ภายใต้ความดัน 25,000 psi โดยใช้จำนวนรอบในการนำสารละลายผงวุ้นว่านหางจระเข้เข้าเครื่องโฮโมจีไนซ์ความดันสูง เท่ากับ 5 รอบ จากนั้นนำสารละลายผงวุ้นว่านหางจระเข้ที่ผ่านการลดขนาดไปวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน โดยวิธีของ Lowry et al. (1951) และใช้ Bovine serum albumin เป็นโปรตีนมาตรฐาน วิเคราะห์ปริมาณคาร์โบไฮเดรต โดยวิธี Phenol sulfuric acid (Dubois et al., 1956) และวัดขนาดอนุภาคผงวุ้นว่านหางจระเข้ด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค (Horiba, Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer LA-950, Japan)

*ศึกษาผลของอัลบูมินจากไข่ต่อคุณภาพของวุ้นว่านหางจระเข้อบแห้งแบบโฟม-แมท*

นำสารละลายผงวุ้นว่านหางจระเข้ที่ผ่านการลดขนาดขั้นต้นมาอบแห้งแบบโฟม-แมท โดยนำมาผสมกับสารก่อโฟม อัลบูมินจากไข่ที่ระดับความเข้มข้นต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ 1, 2 และ 3% (w/v) จากนั้นเติมมอลโทเด็กซ์ทริน DE 11 ที่ความเข้มข้น 10% (w/v) เพื่อเพิ่มความคงตัวของโฟม แล้วนำไปตีปั่นให้เกิดโฟมเป็นเวลา 10 นาที ด้วยเครื่องผสมอาหารโดยใช้หัวตีรูปตะกร้อที่ความเร็วสูงสุด นำโฟมที่ได้จากการตีบรรจุในถุงสำหรับบีบโดยใช้หัวที่เป็นรูกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 5 มิลลิเมตร บีบโฟมเป็นเส้นยาวต่อเนื่องบนถาด แล้วนำไปอบแห้งโดยใช้ตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60°C นาน 90 นาที ทิ้งไว้ให้เย็น จากนั้นขูดส่วนที่เหลือจากการทำแห้งแล้วบดให้เป็นผง บรรจุในถุงอลูมิเนียมฟอยล์เพื่อรอวิเคราะห์คุณภาพและคัดเลือกความเข้มข้นของของอัลบูมินจากไข่ที่เหมาะสม (Fig. 1) (ดัดแปลงจาก จิตตะวัน และคณะ, 2561)




**Fig. 1** The process of preparing foam-mat dried Aloe vera gel powder

*การวิเคราะห์ลักษณะและคุณภาพของวุ้นว่านหางจระเข้*

นำผงวุ้นว่านหางจระเข้อบแห้งแบบโฟม-แมทที่เตรียมได้ขั้นต้นมาวิเคราะห์ลักษณะและคุณภาพดังนี้

1. สังเกตลักษณะปรากฏของผงวุ้นว่านหางจระเข้
2. วัดค่าสี L* a* และ b* โดยใช้เครื่องวัดค่าสี (Fru, WF30, China)
3. ปริมาณน้ำอิสระ ($a_w$) โดยใช้เครื่องวัดปริมาณน้ำอิสระ (Novasina, LabStart-awSet, Switzerland)
4. ความชื้น โดยใช้เครื่องวัดความชื้น (Mettler Toledo, Halogen Moisture Analyzer HE53 (230V), USA)

5. ค่าพีเอช โดยใช้เครื่อง pH meter (Eutech, pH700, Singapore) ชั่งตัวอย่าง 10 กรัม ละลายในน้ำกลั่น และปรับปริมาตรเท่ากับ 100 mL จากนั้นจุ่มอิเลคโทรดลงในตัวอย่าง อ่านค่าพีเอชที่ได้ แล้วบันทึกผล

6. ผลผลิตที่ได้ โดยคำนวณจากน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ผงที่ได้ต่อน้ำหนักโฟมที่ใช้อบ (Equation 1)

$$\text{ร้อยละผลผลิต (\%Yield)} = \frac{\text{น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ผงที่ได้ (กรัม)}\times 100}{\text{น้ำหนักโฟมที่ใช้อบ (กรัม)}} \quad (1)$$

7. ความสามารถในการละลาย (Solubility) ดำเนินตามวิธีของ Jaya and das (2004) โดยชั่งตัวอย่าง 0.4 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 250 mL ที่มีน้ำกลั่น 40 mL จากนั้นกวนสารละลายด้วยเครื่องกวนที่ความเร็วระดับ 5 เป็นเวลา 5 นาที นำไปปั่นเหวี่ยงที่ 3,000×g นาน 5 นาที (Dlab, DM0412, China) ดูดเฉพาะส่วนใส 25 mL ใส่ลง Moisture can ที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอน นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 102ºC นาน 5 ชั่วโมง ค่าการละลายคำนวณในรูปร้อยละโดยน้ำหนักของตะกอนที่ไม่ละลาย

8. การกระจายตัว (Dispersibility) ดัดแปลงจากวิธีของ AL-Kahtani and Hassan (1990) โดยชั่งตัวอย่าง 2 กรัม ลงในบีกเกอร์ขนาด 150 มิลลิลิตร (อุณหภูมิห้อง) เติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร กวนด้วย Magnetic stirrer ที่ความเร็วระดับ 5 เป็นเวลา 15 วินาที ดูดตัวอย่างออกด้วยปิเปตให้ได้ปริมาตรเท่ากับ 50 มิลลิลิตร นำไปปั่นเหวี่ยงที่ 3,000×g นาน 3 นาที (Dlab, DM0412, China) ค่าความสามารถในการกระจายตัวของตัวอย่าง โดยวัดค่า Optical Density (OD) ของส่วนใสที่ความยาวคลื่น 690 nm ด้วยเครื่อง Spectrophotometer (Mapada, UV-1800, China) และใช้น้ำกลั่นเป็น Blank

9. ปริมาณโปรตีน โดยวิธีของ Lowry et al. (1951) ซึ่งใช้ bovine serum albumin เป็นโปรตีนมาตรฐาน

10. ปริมาณคาร์โบไฮเดรต โดยวิธี Phenol sulfuric acid (Dubois et al., 1956)

*การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ*

การทดลองทั้งหมดทำ 3 ซ้ำ รายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย (Mean) วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ Analysis of Variance (ANOVA) เปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

**ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง**

*ผลการเตรียมวุ้นว่านหางจระเข้และสารละลายผงวุ้นว่านหางจระเข้*

จากการนำว่านหางจระเข้สายพันธุ์บาร์บาเดนซิส (*Aloe barbadensis*) จากหอมขจรฟาร์ม มหาวิทยาลัยสวนดุสิต วิทยาเขตสุพรรณบุรี มาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตผงวุ้นว่านหางจระเข้ พบว่าว่านหางจระเข้ 100 kg จะได้ส่วนที่เป็นวุ้นว่านหางจระเข้และเปลือกว่านหางจระเข้เท่ากับ 75.85 และ 24.15 kg ตามลำดับ เมื่อนำวุ้นว่านหางจระเข้ 100 kg ไปทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง จะได้วุ้นว่านหางจระเข้แห้งเท่ากับ 1.81 kg โดยสารละลายผงวุ้นว่านหางจระเข้ความเข้มข้น 0.1% (w/v) ที่ผ่านการลดขนาดด้วยวิธีการแขวนลอย โดยนำไปปั่นด้วยเครื่องปั่นของเหลวความเร็วสูงและผ่านเข้าเครื่องโฮโมจีไนซ์ความดันสูงมีปริมาณโปรตีนและปริมาณคาร์โบไฮเดรตเท่ากับ 40.15 และ 675.30 mg/L ตามลำดับ และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยของวุ้นว่านหางจระเข้เท่ากับ 13.04 μm ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าวุ้นว่านหางจระเข้ที่ไม่ผ่านการลดขนาดประมาณ 1.50 เท่า การลดขนาดวุ้นว่านหางจระเข้ในขั้นตอนนี้จะช่วยให้วุ้นว่านหางจระเข้มีขนาดเล็กลงและมีขนาด

ใกล้เคียงกัน เนื่องจากผงวุ้นว่านหางจระเข้เมื่ออยู่ในรูปสารละลายจะเกิดการพองตัวเป็นเส้นสาย แม้จะนำมาปั่นละเอียดด้วยเครื่องปั่นน้ำผลไม้แล้วแต่ก็ยังคงมีขนาดของอนุภาคที่ใหญ่และไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นเมื่อนำไปประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพก็อาจจะทำให้ลักษณะปรากฏของผลิตภัณฑ์ไม่เป็นที่ยอมรับได้ การลดขนาดอนุภาคของวุ้นว่านหางจระเข้ก่อนการอบแห้งแบบโฟม-แมทยังช่วยให้เนื้อสัมผัสของโฟมมีความเรียบเนียนและสม่ำเสมอ เมื่อนำไปอบแห้งจะทำให้ผลิตภัณฑ์แห้งอย่างรวดเร็วและมีโครงสร้างเป็นรูพรุนที่สม่ำเสมอ ทำให้สามารถกลับคืนรูปได้เร็วขึ้น เนื่องจากได้รับอิทธิพลของคาพิลลารีช่วยให้น้ำเคลื่อนที่ไปตามรูพรุนได้ดี (ไชยภร, 2562)

*ผลของอัลบูมินจากไข่ต่อคุณภาพของวุ้นว่านหางจระเข้อบแห้งแบบโฟม-แมท*

การทดลองขั้นต่อมาได้ขยายขนาดการเตรียมสารละลายผงวุ้นว่านหางจระเข้ด้วยวิธีการแขวนลอย โดยใช้เครื่องปั่นของเหลวความเร็วสูง และเครื่องโฮโมจีไนซ์ความดันสูง เป็นเครื่องมือในการลดขนาดอนุภาคผงวุ้นว่านหางจระเข้ จากนั้นนำมาอบแห้งแบบโฟม-แมท โดยนำสารละลายผงวุ้นว่านหางจระเข้ที่เตรียมได้มาผสมกับอัลบูมินจากไข่ที่ระดับความเข้มข้น 1, 2 และ 3% (w/v) และเติมมอลโทเด็กซ์ทริน DE 11 ความเข้มข้น 10% (w/v) เพื่อเพิ่มความคงตัวของโฟม ภายหลังจากอบแห้งที่อุณหภูมิ 60°C นำผงวุ้นว่านหางจระเข้ที่บดละเอียดแล้วมาวิเคราะห์ลักษณะและคุณภาพบางประการได้ผลการทดลองดัง Fig. 2 และ Table 1 โดยพบว่าลักษณะปรากฏของผงวุ้นว่านหางจระเข้อบแห้งแบบโฟม-แมทที่ได้มีลักษณะเป็นผงสีขาว โดยมีค่าสี L* a* และ b* ใกล้เคียงกัน มีปริมาณน้ำอิสระ 0.30–0.36 ความชื้น 4.90–5.45% และค่าพีเอช 5.47–5.65

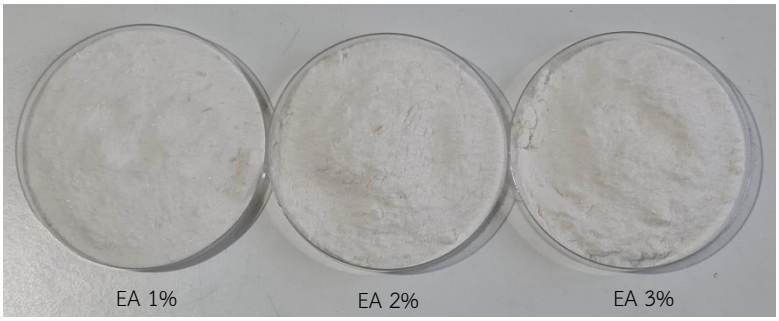



**Fig. 2** Characteristics of foam-mat dried Aloe vera gel powder using egg albumin (EA) in different quantities

**Table 1** Different qualities of foam-mat dried aloe vera agar powder using egg albumin (EA) in different quantities

| Qualities | Egg albumin (EA) (%, w/w) | | |
|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 |
| Color | | | |
| L* | 89.10±0.38$^{ns}$ | 89.55±0.30$^{ns}$ | 90.50±0.12$^{ns}$ |
| a* | -2.25±0.10$^{c}$ | -2.05±0.08$^{a}$ | -2.15±0.45$^{b}$ |
| b* | 12.55±0.38$^{a}$ | 12.35±0.75$^{a}$ | 11.65±0.75$^{b}$ |
| Water activity ($a_w$) | 0.36±0.25$^{a}$ | 0.31±0.01$^{b}$ | 0.30±0.08$^{b}$ |
| Moisture (%) | 5.45±0.01$^{a}$ | 4.90±0.35$^{c}$ | 5.02±0.24$^{b}$ |
| pH | 5.47±0.18$^{b}$ | 5.52±0.28$^{b}$ | 5.65±0.11$^{a}$ |
| Yield (%) | 18.03±0.21$^{c}$ | 19.50±0.34$^{b}$ | 20.45±0.35$^{a}$ |
| Solubility (%) | 56.18±1.27$^{c}$ | 65.35±1.50$^{b}$ | 87.60±1.30$^{a}$ |
| Dispersibility (%) | 75.35±1.25$^{b}$ | 75.25±1.00$^{b}$ | 77.30±0.34$^{a}$ |
| Protein (%) | 0.95±0.01$^{c}$ | 1.82±0.21$^{b}$ | 2.88±0.62$^{a}$ |
| Carbohydrate (%) | 87.55±0.66$^{c}$ | 88.20±0.05$^{b}$ | 89.45±0.10$^{a}$ |

$^{a-c}$means in the row with different small superscript letters indicate significant difference at $p < 0.05$ level and $^{ns}$means no significant difference at $p \geq 0.05$ level.

เมื่อพิจารณาความชื้นพบว่าการใช้อัลบูมินจากไข่ที่ระดับความเข้มข้น 1, 2 และ 3% (w/v) ให้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่มีความชื้นไม่เกิน 6% (Table 1) สอดคล้องกับประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 214 เรื่องเครื่องดื่มในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท จากการทดลองพบว่าการใช้อัลบูมินจากไข่มากขึ้นมีแนวโน้มที่ผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีปริมาณน้ำอิสระและความชื้นลดลง เนื่องจากอากาศแทรกตัวอยู่ในโครงสร้างของโฟมได้มากขึ้น โฟมจึงมีความพรุนเพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการทำแห้งและระยะเวลาการทำแห้งลดลง ดังนั้นเมื่อใช้ระยะเวลาการทำแห้งเท่ากันผลิตภัณฑ์ที่ใช้อัลบูมินจากไข่ในระดับสูงจะมีปริมาณน้ำอิสระและความชื้นต่ำกว่า (Abbasi and Azizpour, 2016) เมื่อพิจารณาค่าผลผลิตที่ได้พบว่าการใช้อัลบูมินจากไข่มากขึ้นจะส่งผลให้ผลผลิตมากขึ้นด้วย โดยการใช้อัลบูมินจากไข่ 3% (w/v) ให้ผลผลิตสูงสุดเท่ากับ 20.455% เมื่อความเข้มข้นของสารที่ก่อให้เกิดโฟมเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ผลผลิตเพิ่มขึ้นเพราะโฟมมีความคงตัวมากกว่า ดังนั้นในระหว่างการทำแห้งจึงเกิดการยุบตัวของโฟมน้อย เวลาขูดส่วนที่เหลือจากการทำแห้งออกจากถาดอบจึงมีการสูญเสียน้อยกว่าการ

ใช้ความเข้มข้นของสารที่ก่อให้เกิดโฟมน้อย ๆ (ดุจหทัย, 2548) จากผลการทดลองยังพบว่าการใช้อัลบูมินจากไข่ขาวเท่ากับ 3% (w/v) ยังส่งผลให้ผงวุ้นว่านหางจระเข้มีความสามารถในการละลาย การกระจายตัว และมีปริมาณโปรตีน และปริมาณคาร์โบไฮเดรตสูงสุดเท่ากับ 87.60, 77.30%, 2.88% และ 89.45% ตามลำดับ โดยปริมาณโปรตีนที่เพิ่มสูงขึ้นมาจากปริมาณอัลบูมินจากไข่ที่เติมลงไป โดยทั่วไปการเติมสารที่ก่อให้เกิดโฟมเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณโฟมมากขึ้นและมีความคงตัวเพิ่มขึ้น (Rajkumar et al., 2007) แต่จะทำให้ความหนาแน่นของโฟมมีแนวโน้มลดลง แต่หากสารที่ก่อให้เกิดโฟมมีความเข้มข้นมากไปจะทำให้สารผสมมีความหนืดสูงมากส่งผลให้การดักจับกับอากาศระหว่างการตีโฟมเกิดขึ้นน้อย ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับ หทัยทิพย์ และตรีสินธุ์ (2563) ที่ศึกษาผลของ Glyceryl monostearate (GMS) และอัลบูมินจากไข่ที่มีปริมาณของสารก่อโฟม GMS ความเข้มข้น 0.5% (w/v) ร่วมกับอัลบูมินจากไข่ที่ความเข้มข้น 1, 2 และ 3% (w/v) โดยพบว่าการเพิ่มระดับความเข้มข้นของอัลบูมินจากไข่ 3% (w/v) ทำให้ได้ซุปฟักทองผงมีความชื้นและปริมาณน้ำอิสระต่ำ มีความสามารถในการละลายสูง และให้ผลผลิตสูงสุด

จากผลการทดลองข้างต้นจึงสรุปได้ว่าความเข้มข้นของอัลบูมินจากไข่ที่เหมาะสมต่อการผลิตผงวุ้นว่านหางจระเข้อบแห้งแบบโฟม-แมท คือ 3% (w/w) เนื่องจากให้ค่าผลผลิต ความสามารถในการละลาย การกระจายตัว ปริมาณโปรตีน และปริมาณคาร์โบไฮเดรตสูงสุด

## สรุป

การพัฒนาผลิตภัณฑ์ผงวุ้นว่านหางจระเข้อบแห้งแบบโฟม-แมท เพื่อศึกษาความเข้มข้นของอัลบูมินจากไข่ที่เหมาะสมในการอบแห้งแบบโฟม-แมท พบว่าผงวุ้นว่านหางจระเข้อบแห้งสามารถผลิตได้ด้วยวิธีการอบแห้งแบบโฟม-แมท เมื่อใช้อัลบูมินจากไข่ช่วยในกระบวนการตีปั่นก่อนนำไปทำแห้งที่อุณหภูมิ 60°C โดยความเข้มข้นของอัลบูมินจากไข่ที่เหมาะสมคือ 3% (w/w) ทำให้ได้ผงวุ้นว่านหางจระเข้อบแห้งที่มีความชื้นและปริมาณน้ำอิสระต่ำ มีความสามารถในการละลายสูง และให้ผลผลิตสูงกว่าเมื่อใช้อัลบูมินจากไข่ที่ระดับความเข้มข้น 1 และ 2% (w/w)

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ กองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) และมหาวิทยาลัยสวนดุสิต ที่สนับสนุนทุนวิจัยประจำปีงบประมาณ 2565 และศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสวนดุสิต ที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือในการปฏิบัติการทดลอง

## เอกสารอ้างอิง

ก่องกาญจน์ อังสุภานิช. 2536. การศึกษากรรมวิธีการผลิตว่านหางจระเข้ผง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

จิตตะวัน กุโบลา, ชุลีพร บุ้งทอง, เทวิกา กีรติบูรณะ, เพียรพรรณ สุภะโคตร, จตุพัฒน์ สมัปปิโต, กมลพร สิทธิไตรย์. 2561. การผลิตเนื้อลูกตาลสุกผงโดยการทำแห้งแบบโฟมแมทและการประยุกต์ใช้ในขนมไทย. การเกษตรราชภัฏ 17: 17–26.

ชลลดา ดวงปิ่น. 2557. กระบวนการผลิตไข่ขาวเค็มผงโดยการทำแห้งแบบโฟมแมทและการนำไปใช้ประโยชน์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. กรุงเทพฯ.

ไชยภร เก็บเงิน. 2562. การพัฒนาเครื่องดื่มผงชงพร้อมดื่มจากน้ำซาวข้าวไรซ์เบอรี่. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. กรุงเทพฯ.

ดุจหทัย ฟูเจริญ. 2548. การผลิตน้ำนมข้าวโพดผงโดยวิธีการอบแห้งแบบโฟม-แมท. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. เชียงใหม่.

หทัยทิพย์ นิมิตรเกียรติไกล, ตรีสินธุ์ โพธารส. 2563. ผลของสารก่อโฟมต่อสมบัติของซุปฟักทองผงกึ่งสำเร็จรูปที่ผลิตโดยวิธีการอบแห้งแบบโฟมแมท. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 28: 790–798.

Abbasi, E., Azizpour, M. 2016. Evaluation of physicochemical properties of foam mat dried sour cherry powder. LWT. 68: 105–110.

AL-Kahtani, H.A., Hassan, B.H. 1990. Spray drying of Roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) extract. J. Food Sci. 55: 1073–1076.

Bhakta, M., Kumar, P. 2013. Mushroom polysaccharides as a potential prebiotics. Int. J. Health Sci. Res. 3: 77–84.

Douglas, L.C., Sanders, M.E. 2008. Probiotics and prebiotics in dietetics practice. J. Amer. Diet. Assoc. 108: 510–512.

Dubois, M., Gilles, K.A., Hamilton, J.K., Rebers, P.A., Smith, F. 1956. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. Anal. Chem. 28: 350–356.

Gupta, V., Malhotra, S. 2012. Pharmacological attribute of Aloe vera: Revalidation through experimental and clinical studies. Ayu. 33: 193–196.

Jaya, S., Das, H. 2004. Effect of maltodextrin, glycerol monostearate and tricalcium phosphate on vacuum dried mango powder properties. J. Food Eng. 63: 125–134.

Kang, M.C., Kim, S.Y., Kim, Y.T., et al. 2014. *In vitro* and *in vivo* antioxidant activities of polysaccharide purified from Aloe vera (*Aloe barbadensis*) gel. Carbohydr. Polym. 99: 365–371.

Lowry, O.H., Rosebrough, N.J., Farr, A.L., Randall, B.J. 1951. Protein measurement with the folin phenol reagent. J. Biol. Chem. 193: 265–275.

Rajkumar, P., Kailappan, R., Viswanathan, R., Raghavan, G.S.V. 2007. Drying characteristics of foamed alphonso mango pulp in a continuous type foam mat dryer. J. Food Eng. 79: 1452–1459.

Reynolds, T., Dweek, A.C. 1999. Aloe vera leaf gel: a review update. J. Ethnopharmacol. 68: 33–37.

Zare, F., Champagne, C.P., Simpson, B.K., Orsat, V., Boye, J.I. 2012. Effect of the addition of pulse ingredients to milk on acid production by probiotic and yoghurt starter culture. LWT. 45: 155–160.

# สมบัติพรีไบโอติกของวุ้นว่านหางจระเข้

## Prebiotic properties of Aloe vera gel

**มณชัย เดชสังกรานนท์[a]*, วีรชน ภูหินกอง[a], อมรรัตน์ สีสุกอง[a], วิภา ทัพเชียงใหม่[a], วราภรณ์ วัฒนเขจร[b], นเรศ บางศิริ[c]**

Monchai Dejsungkranont[a,]*, Weerachon Phoohinkong[a], Amornrat Srisukong[a], Wipa Tupchiangmai[a], Waraporn wattanakhajorn[b], Narase Bangsisri[c]

[a]คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสวนดุสิต กรุงเทพฯ 10700

[b]คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยสวนดุสิต กรุงเทพฯ 10300

[c]สาขาอาหารและโภชนาการ วิทยาลัยอาชีวขอนแก่น ขอนแก่น 40000

[a]Faculty of Science and Technology, Suandusit University, Bangkok 10700, Thailand

[b]Faculty of Education, Suandusit University, Bangkok 10300, Thailand

[c]Program in Foods and Nutrition, Khonkaen Vocational College, Khonkaen 40000, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: mdbiotech@hotmail.com

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติความเป็นพรีไบโอติกของวุ้นว่านหางจระเข้ (*Aloe barbadensis*) ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวุ้นว่านหางจระเข้ที่ทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งพบว่ามี ความชื้น โปรตีน ไขมัน เส้นใยอาหาร เถ้า และคาร์โบไฮเดรต เท่ากับ 4.05, 4.43, 0.22, 12.42, 11.25 และ 67.63% (w/w) ตามลำดับ การลดขนาดผงวุ้นว่านหางจระเข้ด้วยวิธีการแขวนลอย (Suspension) โดยใช้เครื่องปั่นของเหลวความเร็วสูง (High speed homogenizer) และเครื่องโฮโมจีไนซ์ความดันสูง (High pressure homogenizer) พบว่าสารละลายผงวุ้นว่านหางจระเข้ที่ความเข้มข้น 0.1% (w/v) มีโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตเท่ากับ 40.15 และ 675.30 mg/L ตามลำดับ โดยผงวุ้นว่านหางจระเข้มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 13.04 µm การทดสอบสมบัติพรีไบโอติก พบว่าผงวุ้นว่านหางจระเข้สามารถส่งเสริมการเจริญของแบคทีเรียโพรไบโอติก *Lactobacillus plantarum* TISTR 1465 และ *L. casei* TISTR 1463 ได้ การเติมสารละลายผงวุ้นว่านหางจระเข้ลงในอาหารเหลว MRS broth เท่ากับ 40% (v/v) สามารถส่งเสริมการเจริญของแบคทีเรีย *L. casei* TISTR 1463 ได้มากที่สุด เท่ากับ 8.46%

**คำสำคัญ**: พรีไบโอติก, โพรไบโอติก, ว่านหางจระเข้

**Abstract**

This research aimed to evaluate probiotic properties of Aloe vera (*Aloe barbadensis*). Analysis of the chemical composition of freeze-dried Aloe vera gel showed the content of moisture, protein, fat, dietary fiber, ash and carbohydrates of 4.05, 4.43, 0.22, 12.42, 11.25 and 67.63% (w/w) respectively. Particle size reduction of Aloe vera gel powdered by suspension method using high speed homogenizer and high pressure homogenizer. The results showed that the solution of reduced particle size of Aloe vera gel powdered (0.1% w/v) had protein and carbohydrate content of 40.15 and 675.30 mg/L, respectively. The particle size of Aloe vera gel powdered has an average particle size of 13.04 µm. The solution of Aloe vera gel powdered was further used to evaluate prebiotic properties by supplementing in MRS broth for cultivation of probiotic bacterias. The growth of *Lactobacillus plantarum* TISTR 1465 and *L. casei* TISTR 1463 seem to be promoted in MRS broth containing the solution of reduced particle size of Aloe vera gel powdered when compare with MRS broth. Adding the solution of Aloe vera gel powdered to MRS broth at a concentration of 40% (v/v) showed the most of enhance activity of *L. casei* TISTR 1463 at 8.46%.

**Keywords**: Aloe vera, Prebiotic, Probiotic

**คำนำ**

ว่านหางจระเข้เป็นพืชสมุนไพรที่มีสรรพคุณทางยา มีชื่อทางพฤกษศาสตร์ว่า *Aloe vera* (L.) Burm.f. จัดอยู่ในวงศ์ Asphoderaceae เป็นพืชล้มลุกที่มีถิ่นกำเนิดแถบทะเลเมดิเตอร์เรเนียนและตอนใต้ของทวีปแอฟริกา โดยสายพันธุ์ที่นิยมปลูกในประเทศไทยเป็นพันธุ์จากประเทศสหรัฐอเมริกา สำหรับประเทศไทยมีการเพาะปลูกว่านหางจระเข้ทั่วทุกภูมิภาคของประเทศ โดยในปี พ.ศ. 2561 มีผลผลิตรวม 97,692 ตัน จังหวัดที่มีการปลูกว่านหางจระเข้มากที่สุด คือ ประจวบคีรีขันธ์ ผลผลิตว่านหางจระเข้ส่วนใหญ่เป็นเนื้อว่านหางจระเข้ที่หั่นแบบลูกเต๋า ว่านหางจระเข้บด และวุ้นว่านหางจระเข้ องค์ประกอบทางเคมีของวุ้นว่านหางจระเข้ประกอบด้วยน้ำร้อยละ 99.19 ของแข็งร้อยละ 0.81 ซึ่งส่วนใหญ่เป็นคาร์โบไฮเดรตและเส้นใยอาหาร (ก่องกาญจน์, 2536) สารสำคัญที่เชื่อว่าก่อให้เกิดฤทธิ์ทางชีวภาพของว่านหางจระเข้คือพอลิแซ็กคาไรด์ และสารไกลโคโปรตีน (Glycoprotein) ที่มีขนาดระหว่าง 14–70 KDa โดยว่านหางจระเข้มีสรรพคุณทั้งทางยา อาหาร และเครื่องสำอาง สามารถรักษาแผลไฟไหม้ น้ำร้อนลวก ต้านการอักเสบ ต้านแบคทีเรียและเชื้อรา (จันทร์เพ็ญ และรุ้งตะวัน, 2555; Reynolds and Dweek, 1999) โดยกลไกการทำงานของว่านหางจระเข้ในการสมานแผลเกิดจากความสามารถในการต้านเชื้อรา ต้านแบคทีเรีย ต้านอักเสบ ปรับระบบภูมิคุ้มกันที่ผ่านกลไกของสารในกลุ่ม Cytokine, Growth factor และ Angiogenic factor (Gupta and Malhotra, 2012) นอกจากนี้ส่วนที่เป็นวุ้นหรือสารสกัดจากว่านหางจระเข้ยังมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระได้ดี ช่วยลดภาวะ Oxidative stress และเพิ่มระดับ Glutathione ในการบาดเจ็บของตับ (Kammoun et al., 2011; Kang et al., 2014)

พืชหลายชนิดประกอบด้วยเส้นใยอาหารซึ่งจัดเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ไม่ให้พลังงาน เมื่อเส้นใยอาหารเข้าสู่ร่างกายโดยการบริโภคจะไม่ถูกย่อยด้วยกรดในกระเพาะอาหารและเอนไซม์ในลำไส้เล็ก มีรายงานว่าเส้นใยอาหารบางชนิดมีคุณสมบัติกระตุ้นการเจริญและกิจกรรมของแบคทีเรียโพรไบโอติก (Probiotic) ที่อยู่ในระบบทางเดินอาหาร โดยเฉพาะแบคทีเรียในกลุ่ม bifidobacteria และ lactobacilli (อุทัย, 2549) ซึ่งเป็นกลุ่มของจุลินทรีย์ที่ช่วยยับยั้งแบคทีเรียฉวยโอกาสและแบคทีเรียก่อโรค จากคุณสมบัติดังกล่าวจึงอาจกล่าวได้ว่าเส้นใยอาหารบางชนิดมีสมบัติเป็นพรีไบโอติก (Prebiotic) นอกจากนี้พรีไบโอติกบางชนิดยังสามารถจับกับแบคทีเรียก่อโรคได้อย่างจำเพาะเจาะจง เช่น *Salmonella* และ *Escherichia coli* ซึ่งต่อมาจะถูกขับออกจากระบบทางเดินอาหารพร้อมกับอุจจาระ ตัวอย่างพรีไบโอติกที่มีจำหน่ายในท้องตลาด เช่น Inulin, Fructooligosaccharide, Galacto-oligosaccharide, Lactulose และ Polydextrose (Bhakta and Kumar, 2013) ผลจากการย่อยพรีไบโอติกในร่างกายยังช่วยเพิ่มภูมิคุ้มกัน ลดการติดเชื้อในลำไส้ ช่วยให้ขับถ่ายอุจจาระได้ดีขึ้น ลดความเป็นกรดในลำไส้ ช่วยให้เอนไซม์ทำงานน้อยลง และช่วยเพิ่มการนำสารอาหารไปใช้ด้วย (Douglas and Sanders, 2008)

ปัญหาอย่างหนึ่งของการปลูกว่านหางจระเข้ของไทยคือเกษตรกรไม่นิยมแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อเพิ่มมูลค่า ดังนั้นหากมีการส่งเสริมให้มีการวิจัยและสร้างนวัตกรรมด้วยการแปรรูปว่านหางจระเข้เป็นผลิตภัณฑ์ที่หลากหลายและมีมูลค่าสูง ก็จะสามารถยกระดับการพึ่งพาตนเองและพัฒนาเศรษฐกิจเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขัน ดังนั้นการศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติการเป็นพรีไบโอติกที่ช่วยส่งเสริมการเจริญของจุลินทรีย์กลุ่มโพรไบโอติกในทางเดินอาหารของวุ้นว่านหางจระเข้ เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการทำวิจัยเพื่อประยุกต์ใช้วุ้นว่านหางจระเข้ในผลิตภัณฑ์อาหารฟังก์ชันและโภชนเภสัชภัณฑ์อื่น ๆ

**อุปกรณ์และวิธีการ**

*การเตรียมวุ้นว่านหางจระเข้*

การทดลองนี้ใช้ว่านหางจระเข้สายพันธุ์บาร์บาเดนซิส (*Aloe barbadensis*) จากหอมขจรฟาร์ม มหาวิทยาลัยสวนดุสิต วิทยาเขตสุพรรณบุรี เป็นวัตถุดิบหลักในการทดลอง เมื่อเก็บเกี่ยวว่านหางจระเข้แล้วจะนำมาแปรรูปภายใน 1 วัน โดยนำว่านหางจระเข้มาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำประปา จากนั้นปอกเปลือกและแยกส่วนที่เป็นวุ้นออกจากเปลือก คำนวณหาน้ำหนักวุ้นว่านหางจระเข้ที่ได้และส่วนเปลือกที่เหลือ (Yield) นำวุ้นที่ได้มาล้างด้วยน้ำหลาย ๆ ครั้ง เพื่อกำจัดส่วนที่เป็นยางออก จากนั้นนำวุ้นว่านหางจระเข้ไปปั่นละเอียดด้วยเครื่องปั่นน้ำผลไม้ (Sharp, EMC-15, Thailand) แล้วกรองผ่านผ้าขาวบางเพื่อแยกส่วนที่เป็นเนื้อวุ้นออกจากน้ำ นำเนื้อวุ้นว่านหางจระเข้ที่ได้ไปทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Thermo, Super Modulyo, USA) แล้วบดให้เป็นผงละเอียดด้วยเครื่องบดสมุนไพร คำนวณหาน้ำหนักผงวุ้นว่านหางจระเข้ที่ได้ (Yield) และนำผงวุ้นว่านหางจระเข้ส่วนหนึ่งไปวิเคราะห์องค์ประกอบเคมี (Proximate analysis)

*การเตรียมสารละลายผงวุ้นว่านหางจระเข้*

นำผงวุ้นว่านหางจระเข้ที่บดละเอียดจากขั้นต้นมาเตรียมให้อยู่ในรูปสารละลายที่มีความเข้มข้นของผงวุ้นว่านหางจระเข้เท่ากับ 0.1% (w/v) จากนั้นแช่เย็นที่อุณหภูมิ 4°C นาน 12 ชั่วโมง นำสารละลายผงวุ้นว่านหางจระเข้ที่ได้ไปลดขนาดด้วยวิธีการแขวนลอย (Suspension) โดยนำไปปั่นด้วยเครื่องปั่นของเหลวความเร็วสูง (IKA, T25, Germany) ที่ความเร็วรอบ 19,000 rpm เป็นระยะเวลา 5 นาที จากนั้นนำไปผ่านเข้าเครื่องโฮโมจีไนซ์ความดันสูง (Microfluidics, M-110P Microfluidize, USA) ภายใต้ความดัน 25,000 psi โดยใช้จำนวนรอบในการนำสารละลายผงวุ้นว่านหางจระเข้เข้าเครื่องโฮโมจีไนซ์ความดันสูง เท่ากับ 5 รอบ จากนั้นนำสารละลายผงวุ้นว่านหางจระเข้ที่ผ่านการลดขนาดไปวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน โดยวิธีของ Lowry et al. (1951) และใช้ bovine serum albumin เป็นโปรตีนมาตรฐาน วิเคราะห์ปริมาณคาร์โบไฮเดรต โดยวิธี Phenol sulfuric acid (Dubois et al., 1956) และวัดขนาดอนุภาคผงวุ้นว่านหางจระเข้ด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค (Horiba, Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer LA-950, Japan)

*การทดสอบประสิทธิภาพของสารละลายผงวุ้นว่านหางจระเข้ที่มีต่อการเจริญของจุลินทรีย์กลุ่มโพรไบโอติก*

นำสารละลายผงวุ้นว่านหางจระเข้ที่ผ่านการลดขนาดขั้นต้นมาทดสอบสมบัติการเป็นพรีไบโอติก ซึ่งจุลินทรีย์กลุ่มโพรไบโอติกที่ใช้ทดสอบ คือ แบคทีเรีย *Lactobacillus casei* TISTR 1463 และ *L. plantarum* TISTR 1465 โดยนำสารละลายผงวุ้นว่านหางจระเข้ที่เตรียมได้ไปทดลองเลี้ยงร่วมกับแบคทีเรียดังกล่าวในอาหารเหลว MRS broth ผันแปรปริมาณสารละลายผงวุ้นว่านหางจระเข้ที่มีอยู่ในอาหาร MRS broth 5 ระดับ ได้แก่ 10, 20, 30, 40 และ 50% (v/v) เปรียบเทียบกับอาหารเหลว MRS broth ที่ไม่มีสารละลายผงวุ้นว่านหางจระเข้ หลังจากนั้นนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37°C ในสภาวะไร้อากาศ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วติดตามผลการเจริญของเชื้อ (Enhanced activity) ด้วยการวัดค่าการดูดกลืนแสง (OD) ที่ความยาวคลื่น 600 nm นำค่าที่ได้ของแต่ละเชื้อไปคำนวณด้วยสูตร Enhanced activity (%) = [(SB - CB) ÷ CB] × 100 เมื่อ CB = ค่าที่ได้จากอาหารที่ไม่ได้เติมผงวุ้นว่านหางจระเข้; SB = ค่าที่ได้จากอาหารที่เติมผงวุ้นว่านหางจระเข้ (ดัดแปลงจาก ธารทิพย์ และธนากร, 2559)

**ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง**

*ผลการเตรียมวุ้นว่านหางจระเข้*

การทดลองนี้ได้นำว่านหางจระเข้สายพันธุ์บาร์บาเดนซิส (*Aloe barbadensis*) จากหอมขจรฟาร์ม มหาวิทยาลัยสวนดุสิต วิทยาเขตสุพรรณบุรี มาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตผงวุ้นว่านหางจระเข้ ผลการทดลองแสดงดัง Fig. 1 และ Fig. 2 และ Table 1 และ Table 2 โดย Fig. 1 แสดงขั้นตอนการเตรียมวุ้นว่านหางจระเข้แห้ง ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนการล้างทำความสะอาด การปอกเปลือก การล้างด้วยน้ำกลั่น และการปั่นละเอียด จาก Fig. 2 พบว่าว่านหางจระเข้แห้งที่เตรียมได้โดยวิธีทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง มีลักษณะเป็นแผ่นบางสีขาว และจาก Table 1 พบว่าว่านหางจระเข้ 100 kg จะได้ส่วนที่เป็นวุ้นว่านหางจระเข้และเปลือกว่านหางจระเข้เท่ากับ 75.85 และ 24.15 kg ตามลำดับ เมื่อคิดเป็นน้ำหนักเริ่มต้น 100 kg จะได้วุ้นว่านหางจระเข้แห้งและเปลือกว่านหางจระเข้แห้งเท่ากับ 1.81 kg และ 10.54 kg ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผงวุ้นว่านหางจระเข้ที่ทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งแสดงดัง Table 3 โดยพบว่าประกอบด้วยความชื้น โปรตีน ไขมัน เส้นใยอาหาร เถ้า และคาร์โบไฮเดรต เท่ากับ 4.05, 4.43, 0.22, 12.42, 11.25 และ 67.63% (w/w) ตามลำดับ และพบว่าสารละลายผงวุ้นว่านหางจระเข้ความเข้มข้น 0.1% (w/v) ที่ผ่านการลดขนาดด้วยวิธีการแขวนลอยมีปริมาณโปรตีนและปริมาณคาร์โบไฮเดรตเท่ากับ 40.15 และ 675.30 mg/L ตามลำดับ โดยผงวุ้นว่านหางจระเข้ที่ผ่านการลดขนาดมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 13.04 µm ในขณะที่ผงวุ้นว่านหางจระเข้ที่ไม่ผ่านการลดขนาดมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 19.42 µm



**Fig. 1** The process of preparing Aloe vera gel



**Fig. 2** Preparation of dried Aloe vera gel by freeze-drying method

**Table 1** Yield of Aloe vera gel and Aloe vera rind from Aloe vera 100 kg

| Part of Aloe vera | Yield |
|---|---|
| Aloe vera gel (kg) | 75.85±2.15 |
| Aloe vera rind (kg) | 24.15±2.25 |

**Table 2** Yield of dried Aloe vera gel and dried Aloe vera rind from material 100 kg

| Products | Yield |
|---|---|
| Dried Aloe vera gel (kg)[1] | 1.81+0.32 |
| Dried Aloe vera rind (kg)[2] | 10.54±0.18 |

[1]Drying by freeze-drying, [2]Drying by hot air oven

**Table 3** The chemical composition of freeze-dried Aloe vera gel powdered

| Chemical composition | % (w/w) |
|---|---|
| Moisture | 4.05±0.10 |
| Protein | 4.43±0.16 |
| Lipid | 0.22±0.40 |
| Fiber | 12.42±0.00 |
| Ash | 11.25±0.10 |
| Carbohydrate | 67.63±3.71 |

*ผลการทดสอบประสิทธิภาพของสารละลายผงวุ้นว่านหางจระเข้ที่มีต่อการเจริญของจุลินทรีย์กลุ่มโพรไบโอติก*

ว่านหางจระเข้เป็นพืชสมุนไพรที่มีความปลอดภัยในการบริโภคและได้รับความสนใจอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ซึ่งการศึกษาสมบัติพรีไบโอติกของวุ้นว่านหางจระเข้ยังไม่เคยมีรายงานมาก่อน การศึกษาครั้งนี้ได้ประเมินสมบัติการเป็นพรีไบโอติกเบื้องต้นของวุ้นว่านหางจระเข้ที่ส่งเสริมการเจริญของแบคทีเรียโพรไบโอติกในกลุ่ม *Lactobacillus* โดยนำสารละลายผงวุ้นว่านหางจระเข้ที่มีความเข้มข้นของผงวุ้นว่านหางจระเข้เริ่มต้น 0.1% (w/v) และผ่านการลดขนาดด้วยวิธีการแขวนลอย มาทดสอบสมบัติการเป็นพรีไบโอติกเพื่อให้ได้ข้อมูลที่แน่นอนว่าผงวุ้นว่านหางจระเข้สามารถส่งเสริมการเจริญของแบคมีเรียโพรไบโอติกได้จริงหรือไม่ โดยนำสารละลายผงวุ้นว่านหางจระเข้ดังกล่าวมาเติมลงในอาหารเหลว MRS broth ที่ระดับต่าง ๆ กัน แล้วนำไปเพาะเลี้ยงแบคทีเรีย *Lactobacillus casei* TISTR 1463 และ *L. plantarum* TISTR 1465 เปรียบเทียบกับอาหารเหลว MRS broth ที่ไม่เติมสารละลายผงวุ้นว่านหางจระเข้ แล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37°C ในสภาวะไร้อากาศ นาน 4 ชั่วโมง แล้วติดตามการเจริญของเชื้อด้วยการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 600 nm เพื่อคำนวณหา Enhanced activity (%) ซึ่งได้ผลการทดลองแสดงดัง Table 3 เมื่อพิจารณาจากค่าการดูดกลืนแสง (OD) และ Enhanced activity พบว่าสารละลายผงวุ้นว่านหางจระเข้ที่เติมลงไปในอาหารเหลว MRS broth ไม่แสดงการ

ยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียโพรไบโอติกที่ใช้ทดสอบ แต่ในทางกลับกันช่วยส่งเสริมการเจริญของแบคทีเรียโพรไบโอติกทั้งสองชนิดได้ โดยการส่งเสริมการเจริญจะแปรผันตามความเข้มข้นของสารละลายผงวุ้นว่านหางจระเข้ที่เติมลงไปและมีแนวโน้มที่จะส่งเสริมการเจริญของแบคทีเรีย *L. casei* TISTR 1463 ได้ดีกว่า *L. plantarum TISTR 1465* โดยการเติมสารละลายผงวุ้นว่านหางจระเข้ที่ระดับความเข้มข้น 30–50% (v/v) สามารถส่งเสริมการเจริญของแบคทีเรีย *L. casei* TISTR 1463 มากที่สุด อยู่ในช่วง 8.04–8.46% ซึ่งอาจเป็นเพราะว่าในสารละลายผงวุ้นว่านหางจระเข้มีสารกลุ่มคาร์โบไฮเดรตที่ละลายน้ำได้อยู่ ทำให้แบคทีเรียกลุ่มโพรไบโอติกสามารถนำไปใช้เป็นแหล่งคาร์บอนในการเจริญได้

ผลการทดลองข้างต้นสอดคล้องกับการศึกษาของ ธรณ์ธันย์ (2557) ที่ทดลองเลี้ยงแบคทีเรีย *L. acidophilus* และ *L. plantarum* ในอาหารเหลว MRS broth ที่มีการเติมโอลิโกแซ็กคาไรด์ (FOS GG inulin และ lactulose) โดยพบว่าสารโอลิโกแซ็กคาไรด์ที่ใช้ในการทดสอบทุกชนิดไม่ยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียโพรไบโอติกแต่ช่วยส่งเสริมการเจริญโดยให้ค่าการดูดกลืนแสงของอาหารที่ใช้เพาะเลี้ยงมากกว่าอาหารควบคุม นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับการศึกษาของพันธ์ระวี และธีระยุทธ (2560) ที่รายงานว่าการเติมสารสกัดจากพุทธรักษากินหัวในอาหารเหลว MRS broth สามารถช่วยเพิ่มการเจริญของแบคทีเรียกลุ่มโพรไบโอติกเมื่อเปรียบเทียบกับอาหารควบคุม และสอดคล้องกับการศึกษาของ ชยาภรณ์ (2560) ที่รายงานว่าผลิตภัณฑ์โอลิโกแซกคาไรด์ที่ผลิตได้จากกากกาแฟที่ปรับสภาพขั้นต้นช่วยส่งเสริมการเจริญของจุลินทรีย์ผลิตกรดแลคติกเมื่อเปรียบเทียบกับอาหารควบคุม นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับการศึกษาของ ปัทมาวรรณ และคณะ (2560) ที่รายงานว่าว่านหางจระเข้ส่งผลให้แบคทีเรียที่ใช้ในการผลิตโยเกิร์ตมีอัตราการเจริญและการรอดชีวิตเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับชุดควบคุม

**Table 3** Growth promotion of bacteria *L. casei* TISTR 1463 and *L. plantarum* TISTR 1465 in MRS broth with the addition of Aloe vera gel powdered solution. After conducting anaerobic incubation for 4 hr

| Aloe vera powdered solution (%, v/v) | *L. casei* TISTR 1463 | | *L. plantarum* TISTR 1465 | |
|---|---|---|---|---|
| | OD (600 nm) | Enhanced activity (%) | OD (600 nm) | Enhanced activity (%) |
| 0 | 1.30±0.00 | - | 1.17±0.01 | - |
| 10 | 1.36±0.00 | 4.50±0.16 | 1.21±0.00 | 3.07±0.62 |
| 20 | 1.40±0.01 | 7.31±0.54 | 1.20±0.00 | 2.51±0.92 |
| 30 | 1.41±0.01 | 8.08±0.54 | 1.22±0.01 | 3.87±0.52 |
| 40 | 1.41±0.01 | 8.46±1.09 | 1.23±0.00 | 4.39±0.45 |
| 50 | 1.40±0.00 | 8.04±0.05 | 1.23±0.00 | 4.47±1.05 |

จากผลการทดลองที่ได้แม้ว่าการเพิ่มปริมาณสารละลายผงวุ้นว่านหางจระเข้สามารถช่วยส่งเสริมการเจริญของแบคทีเรียโพรไบโอติกที่นำมาทดสอบได้ แต่การเจริญที่เพิ่มขึ้นนี้อาจมาจากคาร์โบไฮเดรตที่มีสูงถึง 67.63±3.71% (w/w) ซึ่งคาร์โบไฮเดรตเหล่านี้ได้แก่ แป้ง และน้ำตาล ที่เป็นแหล่งคาร์บอนสำหรับส่งเสริมการเจริญของแบคทีเรีย ดังนั้นในการศึกษาต่อไปผู้วิจัยจะทำการศึกษาการเตรียมเส้นใยของวุ้นว่านหางจระเข้ให้บริสุทธิ์ก่อนนำไปเติมลงอาหารเหลว MRS broth เพื่อยืนยันผลว่าการส่งเสริมการเจริญของแบคทีเรียโพรไบโอติกมาจากการเป็นพรีไบโอติกของเส้นใยว่านหางจระเข้และไม่ได้มาจากแป้งหรือน้ำตาล และจะทำการวิเคราะห์คุณสมบัติการเป็นพรีไบโอติกจากการวัด Prebiotic activity ได้แก่

การทดสอบการย่อยโดยเอนไซม์ Alpha-amylase การทดสอบสมบัติในการยับยั้งจุลินทรีย์ก่อโรคในทางเดินอาหารของจุลินทรีย์โพรไบโอติกที่เจริญร่วมกับสารละลายผงวุ้นว่านหางจระเข้บนอาหารเหลวและอาหารแข็ง และการทดสอบสมบัติการต้านการย่อยของจุลินทรีย์กลุ่มไบโอติกที่เจริญร่วมกับสารละลายผงวุ้นว่านหางจระเข้ภายใต้สภาวะในทางเดินอาหาร เป็นต้น

## สรุป

การศึกษาในครั้งนี้ทำให้ทราบถึงคุณสมบัติเบื้องต้นในการเป็นพรีไบโอติกของสารละลายผงวุ้นว่านหางจระเข้ โดยสารละลายผงวุ้นว่านหางจระเข้สามารถช่วยเพิ่มจำนวนจุลินทรีย์โพรไบโอติกที่ใช้ทดสอบให้มีจานวนเพิ่มขึ้นได้ ผลการทดลองที่ได้สามารถใช้เป็นแนวทางในการศึกษาการวิเคราะห์คุณสมบัติการเป็นพรีไบโอติกจากการวัด Prebiotic activity ทั้งนี้เพื่อให้แน่ใจว่าสารละลายผงวุ้นว่านหางจระเข้มีคุณสมบัติพรีไบโอติกจริง เพื่อเป็นแนวทางการพัฒนาวุ้นว่านหางจระเข้ไปเป็นผลิตภัณฑ์อาหารฟังก์ชันและโภชนเภสัชภัณฑ์อื่น ๆ ต่อไปในอนาคต

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ กองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) และมหาวิทยาลัยสวนดุสิต ที่สนับสนุนทุนวิจัยประจำปีงบประมาณ 2565 และศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสวนดุสิต ที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือในการปฏิบัติการทดลอง

## เอกสารอ้างอิง

ก่องกาญจน์ อังสุภานิช. 2536. การศึกษากรรมวิธีการผลิตว่านหางจระเข้ผง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

จันทร์เพ็ญ ตั้งจิตรเจริญกุล, รุ้งตะวัน สุภาพผล. 2558. ว่านหางจระเข้เพื่อประโยชน์ในการสมานแผล. วารสารการแพทย์และวิทยาศาสตร์สุขภาพ 22: 53–67.

ชยาภรณ์ วงศ์ศิริเดชชัย. 2560. สมบัติการเป็นพรีไบโอติกของโอลิโกแซกคาไรด์ที่ผลิตจากกากกาแฟด้วยแมนนาเนสจาก *Bacillus* sp. GA2(1). วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. กรุงเทพฯ

ธรณ์ธันย์ สว่างวรรณ์. 2557. การทดสอบสารประกอบโอลิโกแซคคาไรด์เพื่อใช้เป็นสารพรีไบโอติก. รายงานวิจัยคณะวิทยาศาสตร์, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยราคำแหง. กรุงเทพ, หน้า 21–22.

ธารทิพย์ รัตนะ, ธนากร แสงสง่า. 2559. สมบัติต้านอนุมูลอิสระและพรีไบโอติกของเห็ดป่าสะแกราช. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 24: 538–550.

ปัทมาวรรณ ยินห้อง, เพ็ญศรี สุขแสง, เรวดี ศิริวัฒน์, วัชรี บุญลือ, รุจิราลัย พูลทวี. 2560. การศึกษาผลของการเติมผงผักผลไม้ ว่านหางจระเข้ และเม็ดแมงลักต่อการเจริญและการรอดชีวิตของแบคทีเรียในโยเกิร์ต. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ 3: 54–66.

พันธ์ระวี หมวดศรี, ธีระยุทธ เตียนธนา.2569. คุณสมบัติการเป็นสารพรีไบโอติกจากพุทธรักษากินหัว. รายงานวิจัยคณะคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์. นครสวรรค์, หน้า 23–24.

อุทัย เก้าเอี้ยน. 2549. โปรไบโอทิคส์. สงขลานครินทร์เวชสาร 24: 315–323.

Bhakta, M., Kumar, P. 2013. Mushroom polysaccharides as apotential prebiotics. Int. J. Health Sci.Res. 3: 77–84.

Douglas, L.C., Sanders, M.E. 2008. Probiotics and prebiotics in dieteticspractice. J. Amer. Diet. Assoc. 108: 510–512.

Dubois, M., Gilles, K.A., Hamilton, J.K., Rebers, P.A., Smith, F. 1956. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. Anal. Chem. 28: 350–356.

Gupta, V., Malhotra, S. 2012. Pharmacological attribute of Aloe vera: Revalidation through experimental and clinical studies. Ayu. 33: 193–196.

Kammoun, M., Miladi, S., Ben Ali, Y., Damak, M., Gargouri, Y., Bezzine, S. 2011. In vitro study of the PLA2 inhibition and antioxidants activities of Aloe vera leaf skin extracts. Lipids Health Dis. 10: 1–7.

Kang, M.C., Kim, S.Y., Kim, Y.T., et al. 2014. In vitro and in vivo antioxidant activities of polysaccharide purified from Aloe vera (*Aloe barbadensis*) gel. Carbohydr. Polym. 99: 365–371.

Lowry, O.H., Rosebrough, N.J., Farr, A.L., Randall, B.J. 1951. Protein measurement with the folin phenol reagent. J. Biol. Chem. 193: 265–275.

Reynolds, T., Dweek, A.C. 1999. Aloe vera leaf gel: A review update. J. Ethnopharmacol. 68: 3–37.

# Development of production processes for mozzarella cheese, ricotta cheese, and milk cream and quality comparison with commercial products

Phakhwan Kongchamdee, Sansiree Jansarikij, Awipa Luangpikulthong, Weerachet Jittanit*

Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: fagiwcj@ku.ac.th

**Abstract**

So far, the consumption of cheese and milk cream in Thailand has been continuously increasing. Nonetheless, the knowledge regarding the production of these products in Thailand is still not disseminated. In this study, the mozzarella cheese, milk cream, and ricotta cheese were produced with variation of some factors. The main objective was to investigate the effects of some important parameters on the production yields and qualities of these products. Mozzarella cheese was produced applying citric acid with *Streptococcus thermophillus* and *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricu*s. Adding 2 g of salt led to the texture improvement. The production yields of mozzarella cheese were rather high compared to other products produced in this study. For the milk cream production, the fat contents of milk cream samples decreased when raising the feed rate. Moreover, the fat contents of all samples produced were greater than the commercial product. Ricotta cheese with 10% milk powder addition helped in improving aroma, taste, and production yield of ricotta cheese. As a whole, the results of 9-point hedonic scale test revealed that the sensorial qualities of mozzarella cheese, milk cream, and ricotta cheese produced in this study were comparable to those of the commercial products.

**Keywords**: Cream, Milk, Mozzarella cheese, Ricotta cheese

## Introduction

The global demand for mozzarella cheese is increasing in the food industry. Statista (2022) also shows the statistics based on U.S. Census data and the Simmons National Consumer Survey regarding the coffee creamer usage in the United States from 2016 to 2020 and projections for 2024. However, non-dairy coffee creamer is a product derived from unsaturated fatty acids, which are a source of trans fatty acids that has a negative effect on the body because it increases the risk of coronary artery disease, which is a cause of death for people all over the world, including Thailand. On the other hand, milk creams are products that contain many healthful nutrients such as vitamin B2, which helps in building healthy tissues in the eyes, hair, nails, and skin. In addition, calcium and phosphorus help to make bones and teeth strong, and so on (Milky Mist, n.d.). It is well recognized that the production of milk cream generates a by-product namely skimmed milk after cream separation step. The skimmed milk can be used as a raw material for the production of ricotta cheese (Winger, 2022).

In this research, three dairy products were developed including mozzarella cheese, milk cream, and ricotta cheese. A number of important parameters in the production processes were varied. The key aim was to investigate the effects of some important parameters on the production yields and qualities of these products in order to determine the suitable production conditions. The quality attributes of these products were compared with the commercial products available in the market. The findings of this study would fulfill the knowledge gap about the processing of these products in Thailand and be beneficial information for the entrepeunour and milk processor who are interested in producing new products.

## Materials and Methods

### *Raw materials*

Raw milk and pasteurized milk used in the present study were supplied by Kasetsart University Dairy Center, Bangkok, Thailand. The milk was stored in the refrigerator at the temperature not over 8°C before using in the experiments. It is noted that Kasetsart University Dairy Center applied the heating temperature at approximately 80°C for 16 s together with homogenization for the pasteurized milk production.

### *Mozzarella cheese production*

Mozzarella cheese is prepared using 2 liters of pasteurized milk per batch. The 3.95 g of citric acid and 1 g of starter culture (*S. thermophillus* and *L. delbrueckii* subsp. *bulgaricus*, manufactured by Biena Inc., Quebec Inc., Canada) were added into the pasteurized milk. The milk sample was put in a stainless-steel pot and boiled on a gas stove to the temperature between 49–54°C with gentle stirring prior to leaving at this temperature for 60 min. After that, the sample was cooled down until reaching the temperature at around 35°C. The 0.3 g of sodium chloride salt and 0.11 g of rennet enzyme (Junket rennet tablets, Junket Foods, LLC., St. Louis, MO, USA) were then added with manual agitation before holding for 2 h in order to precipitate the curd.

The curd at the bottom of the pot was cut to cubical shape. Next, the sample was slowly stirred and heated until reaching the temperature of 40°C before maintaining at this temperature for 10 min. The liquid (whey) in the sample was drained out using a white filter cloth for 5 min in order to collect the solid (curd). There were two experimental conditions for the mozzarella cheese production that were adding and no adding 2 g of sodium chloride salt into the collected curd. The drained liquid was also boiled to the temperature of 85°C and then poured to the curd with the curd kneading at the same time. The whey was drained out while the curd was manually compressed to a spherical shape. The spherical-shaped curd, namely mozzarella cheese was soaked in the 0.7% sodium chloride salt solution at the temperature around 10°C in the refrigerator for 1 day before sensory evaluation.

*Milk cream production*

Five kgs of raw milk was applied per batch. Raw milk sample was put in a stainless-steel pot and boiled in the surrounding hot water to the temperature of 72°C with manual agitating prior to holding at this temperature for 15 s. After boiling the raw milk, the raw milk sample was cooled down under surrounding tap water to the temperature of 45°C before pouring into a disc bowl centrifuge (Armfield, model FT15, Armfield Limited, Hampshire, England) to separate cream. There were three experimental conditions by varying the feed rates in the cream separation step consisting of 150 mL, 200 mL, and 250 mL per 15 s and kept in the refrigerator at the temperature around 4°C before quality determination.

*Ricotta cheese production*

Ricotta cheese was prepared using 1 liter of skimmed milk per batch. Skimmed milk was a by-product obtained from the milk cream separation process in the previous section. There were six formulations for sample preparation (1) without added milk, 10% salt added, (2) without added milk and salt, (3) 10% pasteurized milk and 10% salt added, (4) 10% pasteurized milk added, without added salt, (5) 10% milk powder and 10% salt added, and (6) 10% milk powder added, without added salt. The skimmed milk was put in a stainless-steel pot and boiled on a gas stove with gentle stirring. When the temperature increased to around 60°C, the other ingredients were added. After the mixture reached the temperature of 86°C, the gas stove was turned off. The sample was left at ambient condition for 50 min in order to precipitate the curd. The curd was filtered using a white filter cloth together with a strainer. The curd was then covered by the white filter cloth and hung for 12 hr under room temperature. After that, the curd was manually compressed to a mold. The shaped curd, namely ricotta cheese was shielded by a food wrapping film and stored in the refrigerator at the temperature around 4°C before quality determination.

*Production yield*

The yields of the mozzarella cheese, milk cream, and ricotta cheese productions were calculated applying Equation 1.

$$\text{Production yield } (\%) = \frac{\text{Weight of product (g)}}{\text{Weight of raw materials (g)}} \times 100 \quad (1)$$

*Quality determination*

*Sensory evaluation*

The mozzarella cheese, milk cream, and ricotta cheese produced from the selected experimental conditions were examined for their sensorial attributes including overall liking, appearance, color, aroma, taste, and texture applying the 9-point hedonic scale test (1 = dislike extremely; 9 = like extremely). The commercial products of mozzarella cheese, milk cream, and ricotta cheese were chosen from the supermarket and evaluated their sensorial scores for comparison with the samples produced in this study. Thirty untrained panelists were applied in the sensory evaluation.

*Lactic acid value*

The milk cream samples were examined for their lactic acid value by titration method. The 9 ml of sample was put into a flask and then the 10 drops of 1% Phenolphthalein was added before titration with NaOH. The lactic acid value was calculated applying Equation 2. The experiments were conducted in three replications.

$$\% \text{ Lactic acid} = \frac{\text{Volume of 0.1N of NaOH solution (ml)} \times 0.009 \times 100}{\text{Volume of sample (ml)}} \quad (2)$$

*Fat content*

The fat contents of milk cream samples were determined in three replicates using Gerber method modified from Subramonian (2012).

*Statistical analysis*

Analysis of variance and Duncan's multiple range test was carried out using the SPSS software package (version 22.0; SPSS Inc.; Chicago, IL, USA).

## Results and Discussion

*Mozzarella cheese production*

Three products consisting of the mozzarella cheese manufactured in this study with and without salt addition, and the commercial mozzarella cheese (GENNARO, Loka Nature Co., Ltd., Ratchaburi, Thailand) were compared. It appeared that the mozzarella cheese produced in this study without salt addition had a bland taste. Therefore, the addition of salt was necessary to raise the product taste. In addition, the salt addition led

to the improvement of texture to be softer and more elastic. Bian et al. (2014) stated that the amounts of sodium chloride affect the water-binding properties of proteins in the mozzarella cheese leading to more flexible texture when adding salt. This also implied that salt can help preserving the moisture of the curd. However, too much concentration of salt in the cheese formulation can result in the adverse taste, lower water activity value and consequently the lactic acid bacteria inhibition; thus, the amount of added salt must be controlled. The color of the mozzarella cheese produced in this study was white while the commercial product was in cream color. The production yields of mozzarella cheese were around 11.3–12.5% that were higher than other products produced in this study.

In the experiment, *S. thermophillus* and *L. delbrueckii* subsp. *bulgaricus* were added. These cultures have a symbiotic relationship. The *S. thermophillus* normally grow rapidly during fermentation, and the diacetyl compound is formed, which affects the butter cream flavor in the final product. The *L. delbrueckii* subsp. *bulgaricus* can produce lactic acid that creates acetaldehyde, which gives the characteristic flavor of mozzarella cheese (Butsat et al., 2017). However, the addition of only these cultures required several hours for protein precipitation. Therefore, the citric acid was added to help controlling pH, reducing curd settling time, and also increasing the melting and stretch ability of mozzarella cheese. Goncalves and Cardarelli (2021) reported that the pH of milk that makes mozzarella cheese stretching well was between 5.5–5.7. The moisture loss during soaking cheese in brine solution depends on the temperature. In this study, mozzarella cheese was soaked in low temperature brine, as a result, the mozzarella cheese product lose only a little moisture and had high moisture on the surface (Kindstedt et al.,1996). Bian et al. (2014) claimed that soaking mozzarella cheese in salt water caused the osmosis of water from the mozzarella cheese and salt from the brine solution will diffuse to it, giving mozzarella cheese a salty taste.

The scores of the sensory evaluation of the mozzarella cheese produced with salt addition and the commercial mozzarella cheese are shown in Table 1. The average sensory evaluation scores of the mozzarella cheese produced with salt addition in this study were between 5.73 and 7.57 indicating the levels of neither like nor dislike to almost like very much. The score of taste aspect was the lowest whereas the highest score was obtained in aspect of color. The score for the overall liking aspect was in the level of like slightly. It was interesting that the sensory test scores of the commercial product were insignificantly different from those of the mozzarella cheese produced in this study in most aspects. Only overall liking and aroma that the mozzarella cheese produced in this study had the significantly lower than the commercial product.

*Milk cream production*

The feed rates at 150, 200, and 250 ml per 15 s provided the comparable production yields that were 4.50, 4.78, and 4.72%, respectively. The properties of milk cream samples obtained from different feed rates are shown in Table 2. The feed flow rate was deemed as an important factor that affects the efficiency of separating cream because it directly related to the retention time of milk in the separation machine and the

centrifugal force distribution. The fat contents and lactic acid values of samples and a selected commercial product (cooking cream, EMBORG, Uhrenholt A/S, Middelfart, Denmark) are also indicated in Table 2. The results showed that the fat contents of samples decreased when raising the feed rate. The explanation was that when increasing the feed rate, the mass of milk in the centrifuge would consequently increase while the motor-driving force and rotation speed of the centrifuge remained the same. As a result, the centrifugal force per sample weight and the retention time of sample were lessen. The fat contents of all samples produced in this study were greater than the chosen commercial product. It must be noted that both the fat contents and lactic acid values of samples were along with the Notification of the Ministry of Public Health Announcement No. 208 B.E. 2000 regarding creams, which specifies that the fat content must be not less than 18% by weight whereas the lactic acid value must not exceed 0.2% by weight.

**Table 1** Scores of the 9-point hedonic scale test for mozzarella cheese, milk cream mixed with the ready-to-drink coffee, and ricotta cheese samples

| Product | Sample | Overall liking | Appearance | Color | Aroma | Taste | Texture |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Mozzarella cheese | Experiment | 6.00±1.31$^{a}$ | 6.67±1.69$^{ns}$ | 7.57±1.10$^{ns}$ | 6.03±1.22$^{a}$ | 5.73±1.70$^{ns}$ | 6.23±1.85$^{ns}$ |
| | Commercial product | 6.80±1.54$^{b}$ | 6.93±1.60$^{ns}$ | 7.43±1.28$^{ns}$ | 6.97±1.40$^{b}$ | 6.53±1.91$^{ns}$ | 6.30±1.80$^{ns}$ |
| Milk cream | Experiment | 6.27±1.92$^{ns}$ | 7.43±1.33$^{ns}$ | 7.53±1.43$^{ns}$ | 7.13±1.61$^{ns}$ | 5.90±2.25$^{ns}$ | 6.93±1.82$^{ns}$ |
| | Commercial product | 6.63±1.33$^{ns}$ | 7.73±1.20$^{ns}$ | 7.43±1.67$^{ns}$ | 7.37±1.47$^{ns}$ | 6.47±2.18$^{ns}$ | 6.90±1.92$^{ns}$ |
| Ricotta cheese | Experiment (no.5) | 6.17±1.60$^{a}$ | 6.13±1.81$^{ns}$ | 6.53±1.89$^{ns}$ | 6.87±2.13$^{ns}$ | 5.60±2.46$^{ns}$ | 5.87±2.34$^{a}$ |
| | Experiment (no.6) | 5.77±1.87$^{ab}$ | 6.40±1.63$^{ns}$ | 6.67±1.65$^{ns}$ | 6.47±1.98$^{ns}$ | 4.87±2.40$^{ns}$ | 5.83±2.32$^{a}$ |
| | Commercial product | 5.30±1.97$^{b}$ | 6.17±1.93$^{ns}$ | 7.00±2.00$^{ns}$ | 6.00±2.23$^{ns}$ | 5.27±2.46$^{ns}$ | 4.77±2.75$^{b}$ |

Values expressed are mean ± SD. Values in each column within the same type of product with different lowercase superscripts are significantly different ($p \leq 0.05$). ns indicates not significantly different ($p > 0.05$).

**Table 2** The attributes of samples obtained from different feed rates in milk cream separation step

| Feed rate of raw milk | 150 mL per 15 s | 200 mL per 15 s | 250 mL per 15 s | Commercial product |
|---|---|---|---|---|
| Characteristics of the cream | Cream appearance. Creamy taste. Very viscous. | Cream appearance. Creamy taste. Less viscous. | Cream appearance. Creamy taste. Less viscous. | Cream appearance. Creamy taste. Less viscous. |
| Fat content (%) | 25±0.85$^{a}$ | 23±0.06$^{b}$ | 21±0.01$^{c}$ | 20 |
| Lactic acid value (%) | 0.060±0.017$^{c}$ | 0.063±0.006$^{bc}$ | 0.079±0.001$^{b}$ | 0.15±0.006$^{a}$ |

Fat content value of commercial product was refered from the product label.

The sample obtained from applying the feed rate at 200 mL per 15 s was selected for comparing the sensorial qualities with the commercial product as the results shown in Table 1. In the test, the milk cream was

mixed with the ready-to-drink coffee (Nescafe Americano, house blend, Nestle Thailand) with a ratio of milk cream to coffee at 1:2 by weight (450 g of milk cream to 900 g of coffee). The average sensory evaluation scores of the sample produced in this study were between 5.90 and 7.53 indicating the levels of neither like nor dislike to almost like very much. Interestingly, the sensory test scores of the commercial product were insignificantly different from those of the milk cream produced in this study in all aspects.

*Ricotta cheese production*

It appeared that the ricotta cheese produced without salt addition (formulations 2, 4, and 6) had a bland taste. Therefore, the addition of salt was necessary to raise the product taste. The production yields in case of no milk addition (formulations 1 and 2) were between 2.8–3.0% whereas they were 3.2–3.3% and 3.8–4.0% when adding 10% pasteurized milk (formulation 3 and 4) and 10% milk powder (formulations 5 and 6), correspondingly. The addition of milk powder for 10% by weight (formulations 5 and 6) led to the improvement of aroma, taste, and production yield. It was because the skimmed milk had lower solid contents especially fat than the whole milk. The addition of pasteurized milk did not result in the apparent escalation of aroma, taste, and production yield compared to the milk powder addition because it contained much more proportion of water. The texture of ricotta cheese samples produced without milk powder addition was soft and bouncy like rubber because the skimmed milk had a relatively higher proportion of protein than fat; therefore, protein aggregation occurs leading to the rubbery texture. The color of cheese samples produced with milk powder addition was cream color due to the color of the milk powder. Milk powder exposed to heat during its production leading to the acceleration of browning reaction, namely Maillard reaction. The ricotta cheese samples of formulations no. 5 and 6 were chosen for the sensory evaluation. A commercial ricotta cheese (Zanetti, Zanetti S.P.A., Bergamo, Italy) was also used for comparison. The scores of the sensory evaluation are shown in Table 1. The scores of the ricotta cheese produced with salt addition in this study was roughly at the level of neither like nor dislike to like slightly. The score of taste aspect was the lowest while the highest score was obtained in aspect of aroma. The score for the overall liking aspect was in the level of like slightly. The sensory test scores of the commercial product were insignificantly different from those of the ricotta cheese samples produced either with or without salt addition in most aspects excepting for the overall liking and texture aspects which the ricotta cheese produced with salt addition in this study had significantly higher scores.

**Conclusion**

The addition of salt was necessary to raise the mozzarella cheese product taste. The salt addition led to the improvement of texture to be softer and more elastic. The sensory test scores of the commercial product were insignificantly different from those of the mozzarella cheese produced in this study in most aspects. Only overall liking and aroma that the mozzarella cheese produced in this study had the significantly lower than the commercial product. The fat contents of milk cream samples decreased when raising the feed rate. Both the fat contents and lactic acid values of milk cream samples in this study were along with the national regulation.

The sensory test scores of the commercial product were insignificantly different from those of the milk cream produced in this study in all aspects. The ricotta cheese samples were manufactured using the skimmed milk obtained from the milk cream separation experiment. The addition of milk powder for 10% by weight led to the improvement of aroma, taste, and production yield. The sensory test scores of the commercial product were insignificantly different from those of the ricotta cheese samples produced in this study in most aspects excepting for the overall liking and texture aspects which the ricotta cheese produced with salt addition in this study had significantly higher scores than the commercial product. This research provided the knowledge regarding the production of these products for the entrepeunour and milk processor who are interested in producing new products.

**Acknowledgements**

The authors would like to express special thanks to the Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University for the scholarship provision for supporting presentation in the 62nd Kasetsart University Annual Conference. The authors are grateful to the Kasetsart University Dairy Center for their support of raw and pasteurized milk.

**References**

Bian, C., Zhang, L., Li, H., Zhang, J., Cao, R., Ji, L. 2014. Effect of different amounts of sodium chloride on the meltability of mozzarella cheese. Agric. Biotechnol. 3: 37–41.

Butsat, S., Porutso, Y., Sutthipapha, W. 2017. Fortifying of flavored fruits and antioxidant activity of yogurts. Research report. Division of Food Technology, Faculty of Agricultural Technology, Rajabhat Maha Sarakham University. Rajabhat Maha Sarakham, Thailand.

Goncalves, M.C., Cardarelli, H.R. 2021. Mozzarella cheese stretching: A minireview. Food Technol. Biotech. 59: 82–91.

Kindstedt, P.S., Larose, K.L., Gilmore, J.A., Davis, L. 1996. Distribution of salt and moisture in mozzarella cheese with soft surface defect. J. Dairy Sci. 79: 2278–2283.

Milky Mist. Benefits of using fresh cream in your diet. https://www.milkymist.com/post/benefits-of-using-fresh-cream, 2 March 2023.

Statista. 2022. U.S. population: Usage of coffee creamers from 2016 to 2024. https://www.statista.com/statistics/281805/us-households-usage-of-non-dairy-cream-substitutes-trend/, 14 September 2022.

Subramonian, S. 2012. Milk and milk products technology. http://ecoursesonline.iasri.res.in/mod/page/view.php?id=65184, 1 March 2023.

Winger, J. 2022. Practical and creative uses for whey. https://www.theprairiehomestead.com/2011/06/16-ways-to-use-your-whey.html, 21 November 2022.

# Organic solvent pretreatment on sugarcane leaves for prebiotic production

Thidarat Yordsunk[a,*], Kittipong Rattanaporn[b], Weerachet Jittanit[a], Kullanart Tongkhao[a]

[a]Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

[b]Department of Biotechnology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: thidarat.y@ku.th

**Abstract**

Sugarcane leaves (SCL) containing xylooligosaccharides (XOS) and other sugars with complex structures called lignocelluloses are a major agricultural waste biomass by-product of the sugar industry. A pretreatment step is required to convert SCL into XOS. This study evaluated SCL pretreatment methods using an organic solvent as acetic acid (AA) and distilled water (DW). A Plackett-Burman design was used to screen four significant factors including the type of solvent, solid-liquid ratio, temperature, and heating time using an 8-run statistical model. The type of solvent had a significant effect on total carbohydrate and reducing sugar contents. SCL were pretreated with 4% AA or DW at a ratio of 1:10, and heated at 121°C for 45 min. SCL pretreated with DW showed the highest reducing sugar content (1.62 mg/mL) while SCL pretreated with AA showed the highest total carbohydrate content (3.61 mg/mL). XOS content was analyzed by high performance liquid chromatography (HPLC). Pretreatment of SCL with 4% AA or DW had no significant effect on the amount of xylobiose ($p > 0.05$), while only SCL pretreated with distilled water produced xylotriose.

**Keywords**: Biomass, Lignocellulose, Pretreatment, Sugarcane leaves, Xylooligosaccharide

## Introduction

Sugarcane (*Saccharum officinarum*) is an economically important plant that accumulates sugar molecules in its stalks. The Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) reported that global sugar production in 2021/22 was 175.6 million tons with an expected increase to 177.5 million tons in 2022/23. Sugarcane cultivation in Thailand expanded by almost 50% between 2010 and 2021, leading to several million tons of agricultural waste from sugarcane leaves, tops and bagasse. Sugarcane leaves (SCL) comprise three major components as cellulose, hemicellulose, and lignin as a lignocellulose biomass (Jutakanoke et al., 2012). Hydrolysis of hemicellulose structures results in the formation of monosaccharides as xylose sugar or oligosaccharides in xylooligosaccharide (XOS) form which have potential use as a prebiotic because of their ability to improve the intestinal microbiota balance (Lin et al., 2016). Lignocellulose has a complex structure that is difficult to degrade or hydrolyze to monomer form, and a pretreatment step is required for XOS production from lignocellulose biomass to disrupt the crystal structure and improve enzymatic hydrolysis efficiency. Lignocellulose pretreatment can be performed by several processes including physical pretreatment, chemical pretreatment (acid or alkaline hydrolysis), and biological processes (microbes or enzymes) (Chen et al., 2017; Niju et al., 2019; Khan et al., 2022). Acid hydrolysis and hydrothermal methods have been widely studied to produce XOS from lignocellulose using dilute inorganic acids such as sulfuric acid, hydrochloric acid or nitric acid to increase monomer yields. These methods are low cost with high efficiency to break down the lignocellulose. However, acid pretreatment transforms the monomeric sugar into degradation products such as hydroxymethylfurfural (HMF) or furfural which show toxicity toward microbial cells (Woiciechowski et al., 2020). Therefore, this study evaluated the efficiency of thermal processes using an organic solvent for SCL pretreatment for XOS production.

## Materials and Methods

### *Materials*

Sugarcane leaves were collected from sugar factories in Nakhon Ratchasima Province, Thailand. The leaves were dried at 60°C, cut using a Cutting Mill (Retsch® SM 100, Retsch GmbH, Germany) and then sieved to 10–35 mesh particle size. The sample was kept at room temperature for further analysis. A Fortis Amino FNH-050705 (150×4.6 mm) separation column was purchased from Fortis Company (UK).

### *Chemical composition of sugarcane leaves*

The chemical composition of the sugarcane leaves was analyzed by the following standard methods extractive content (TAPPI T-204 cm-97), moisture content (TAPPI T210), holocellulose content (TAPPI T249-75), alpha (α)-cellulose content (TAPPI T203 cm-99), lignin content (TAPPI T222 cm-02), and ash content (TAPPI T211 om-93).

*Thermal pretreatment*

The study was divided into two parts. Firstly, a Plackett-Burman experimental design (PBD) was applied to identify and test four variable factors at two levels (-1 for the lower level and +1 for the higher level) comprising a total of eight experiments. The four variables at two levels are shown in Table 1. Distilled water (DW) was designated low level, and 4% acetic acid (AA) was designated high level for solid-liquid ratios 1:10 and 2:10, temperatures 121 and 135°C (15, 30 psi), and heating times 15 and 45 min. The SCL were heated using an autoclave (HICLAVE HV-85, Hirayama, Japan). Total carbohydrate and reducing sugar contents of the pretreated SCL were used as independent variables. Each trial was performed in triplicate to estimate the most important variables.

Secondly, the factors identified as having a significant effect on total carbohydrate and reducing sugar contents in the first part were tested and validated using two solvents as 4% AA and DW. The SCL sample was heated at 121°C, 15 psi for 45 min. Pretreated SCL samples were filtered by Whatman filter paper no.1 to separate the solid and liquid fractions and the liquid fraction was stored at -20°C until analysis.

**Table 1** Plackett-Burman experimental design for seven variables at high and low levels

| Trial | Solvent | Solid-liquid ratio | Temperature (°C) | Time (min) | X5 | X6 | X7 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | AA | 2:10 | 135 | 15 | +1 | -1 | -1 |
| 2 | AA | 2:10 | 121 | 45 | -1 | -1 | +1 |
| 3 | AA | 1:10 | 135 | 15 | -1 | +1 | +1 |
| 4 | DW | 2:10 | 121 | 15 | +1 | +1 | +1 |
| 5 | AA | 1:10 | 121 | 45 | +1 | +1 | -1 |
| 6 | DW | 1:10 | 135 | 45 | +1 | -1 | +1 |
| 7 | DW | 2:10 | 135 | 45 | -1 | +1 | -1 |
| 8 | DW | 1:10 | 121 | 15 | -1 | -1 | -1 |

X5-X7 are dummy factors.

*Xylooligosaccharide determination*

Xylooligosaccharide hydrolysate contents were determined by high performance liquid chromatography (HPLC). The sample was filtrated through a 0.4 μm syringe filter and injected into an HPLC system. $X_2$ and $X_3$ were eluted using acetonitrile ($CH_3CN$) and deionized water (75:25) as the mobile phase. A Fortis Amino FNH-050705 (150×4.6 mm) separation column was used at 30°C and flow rate 1 ml/min with a run time of 40 min.

*Statistical analysis*

Analysis of variance (ANOVA) was performed for the four variables, with each tested at two levels without interactions. The significance of the important factors was examined by a conventional F-test ($p \leq 0.05$).

**Results and Discussion**

*Chemical composition of SCL*

Cellulose, hemicellulose, lignin, ash, and extractives in SCL were 33.3%, 29.9%, 18.5%, 8.6%, and 4.1% respectively, similar to values reported in previous studies. Cellulose content in sugarcane straw including the tops and leaves ranged from 32.4 to 44.5%, with 24.2–30.8% hemicellulose, 12.3–36.1% lignin, 2.1–7.8% ash, and 2.5–10.6% extractives ( Luz et al., 2016; Forsan et al., 2021).

*Pretreatment of SCL*

The most important variables that influenced total carbohydrate and reducing sugar contents were statistically analyzed using PBD. Results in Table 2 showed that total carbohydrate content ranged from 3.85 to 5.00 mg/mL, with mean value of 4.51 mg/mL and standard error 0.16. Reducing sugar content ranged from 0.27 to 2.74 mg/mL with mean value of 1.20 mg/ml and standard error 0.03. ANOVA results showed that total carbohydrate and reducing sugar contents were significantly affected by the solvent used to pretreat the SCL sample ($p \leq 0.05$). No significant effect was observed for the other variables. SCL samples treated with the same solvent but heated at different temperatures and duration times showed no significant differences in total carbohydrate and reducing sugar contents. Therefore, the SCL pretreatment process was performed at a 1:10 solid-liquid ratio, with heating at 121°C, 15 psi for 45 min to reduce both sample content and electricity consumption, and higher heating times can increase total carbohydrate and reducing sugar content

Based on the PBD results, two types of solvent including 4% AA and DW were tested. Heating by an autoclave machine at 121°C, 15 psi for 45 min was conducted to determine the solvent that maximized total carbohydrate, reducing sugar and XOS contents. Results in Table 3 showed that total carbohydrate content of the SCL sample treated with AA was higher (3.61±0.01 mg/ml) than the SCL sample treated with DW (1.55±0.03 mg/ml). The reducing sugar content of the SCL sample treated with AA was lower (0.16±0.02 mg/ml) than the sample treated with DW (1.62±0.01 mg/ml) (Table 3).

**Table 2** Plackett-Burman experimental trial results

| Trial No. | Total carbohydrate content (mg/mL) | Reducing sugar content (mg/mL) |
|---|---|---|
| 1 | 5.00 ± 0.14 | 0.83± 0.01 |
| 2 | 4.80 ± 0.04 | 0.63 ± 0.06 |
| 3 | 4.59 ± 0.03 | 0.27 ± 0.00 |
| 4 | 4.75 ± 0.35 | 2.52 ± 0.05 |
| 5 | 4.70 ± 0.18 | 0.27± 0.00 |
| 6 | 3.99 ± 0.01 | 1.19± 0.01 |
| 7 | 4.42 ± 0.21 | 2.74 ± 0.06 |
| 8 | 3.85 ± 0.32 | 1.13 ± 0.02 |

LOD of total carbohydrate content = 0.003 mg/mL, LOD of reducing sugar content = 0.03 mg/mL

**Table 3** Total carbohydrate and reducing sugar contents of samples after pretreatment with 4% acetic acid or distilled water

| Trial No. | Solvent | Total carbohydrate content (mg/mL) | Reducing sugar content (mg/mL) |
|---|---|---|---|
| 1 | 4% acetic acid | 3.61 ± 0.01 | 0.16 ± 0.02 |
| 2 | Distilled water | 1.55 ± 0.03 | 1.62 ± 0.01 |

All experiments were performed in triplicate. LOD of total carbohydrate content = 0.003 mg/ml, LOD of reducing sugar content = 0.03 mg/mL.

*Xylooligosaccharide determination*

XOS contents (xylobiose:$X_2$ and xylotriose:$X_3$) obtained from the SCL hydrolysate were determined by HPLC (Fig. 1). The $X_2$ content obtained from SCL pretreated with AA was higher than the $X_2$ content obtained from SCL pretreated with DW (Table 4). The $X_3$ content of SCL pretreated with DW was higher than that recorded for 4% AA, with $X_3$ not detected in the sample pretreated with 4% AA. Forsan, Schmatz, Masarin, and Brienzo (2022) reported lower $X_3$ content in SCL treated with liquid hot water (LHW) compared to SCL treated with 0.32 and 3.68% AA under the same conditions (130°C 30 psi, 35 min), whereas the $X_2$ content of SCL treated with LHW was higher than SCL treated with 0.32 and 3.68% AA. In this study, the $X_2$ content of SCL treated with DW was lower than SCL treated with 4% AA due to the higher temperature used to pretreat the sample. Differences between the $X_2$ and $X_3$ contents for SCL treated with different solvents were due to the diverse potentials of AA and DW in XOS production. Under high temperature and pressure, the hydration of oxygen ions in DW cleaved the acetyl groups in hemicellulose and produced AA which then hydrolyzed the remaining hemicellulose, while hydronium ions from AA bound to oxygen atoms between the xylose monomers, breaking the ether bond and producing XOS of varying sizes and xylose (Deng et al., 2023).

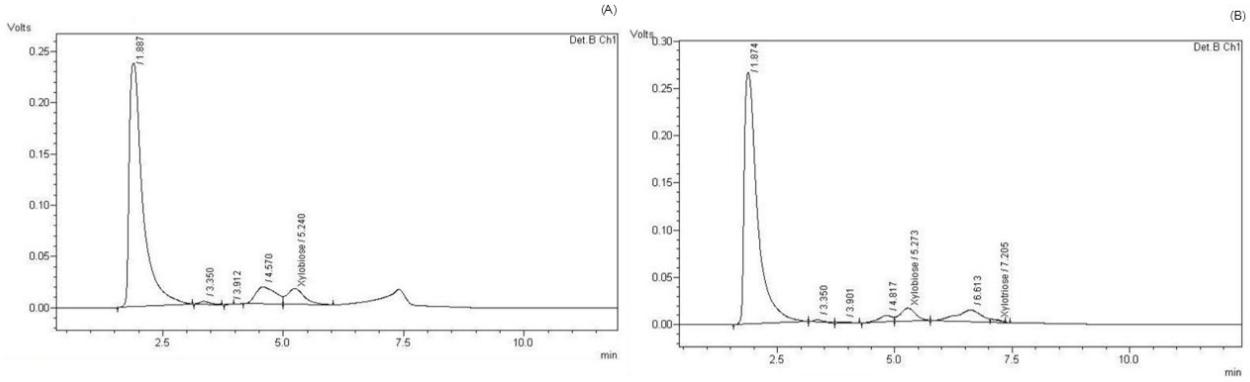



**Fig. 1** High performance liquid chromatography (HPLC) chromatogram of the extracted SCL samples: (A) 4% acetic acid (AA); and (B) distilled water (DW).

**Table 4** Xylobiose ($X_2$) and xylotriose ($X_3$) contents of SCL pretreated with 4% AA or DW.

| Sample | Xylooligosaccharide content (mg/ml) | |
|---|---|---|
| | Xylobiose | Xylotriose |
| SCL pretreated with AA | 1.15±0.20 | ND |
| SCL pretreated with DW | 0.95±0.03 | 0.24±0.01 |

ND = Not Detected, Standard xylobiose and xylotriose concentrations were between 0.2 and 1% (2,000 to 10,000 ppm),

## Conclusions

SCL pretreated with 4% AA or DW had no significant effect on the amount of xylobiose ($p$>0.05), while only SCL pretreated with DW produced xylotriose. DW was more suitable than acetic acid for XOS production as a sustainable biomass pretreatment process. Using DW reduced the capital investment cost and required less energy compared with other pretreatment processes.

## Conflicts of Interest

None declared.

## Acknowledgements

The authors would like to grateful to Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University for awarding an academic presentation.

## References

Chen, H., Liu, J., Chang, X., Chen, D., Xue, Y., Liu, P., Han, S. 2017. A review on the pretreatment of lignocellulose for high-value chemicals. Fuel Process. Technol. 160: 196–206. doi:https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.12.007

Deng, W., Feng, Y., Fu, J., Guo, H., Guo, Y., Han, B., Zhou, H. 2023. Catalytic conversion of lignocellulosic biomass into chemicals and fuels. Green Energy Environ. 8: 10–114. doi.org/10.1016/j.gee.2022.07.003

Forsan, C.F., de Freitas, C., Masarin, F., Brienzo, M. 2021. Xylooligosaccharide production from sugarcane bagasse and leaf using *Aspergillus versicolor* endoxylanase and diluted acid. Biomass Conversion and Biorefinery doi: 10.1007/s13399-021-01403-2

Forsan, C.F., Schmatz, A., Masarin, F., Brienzo, M. 2022. Xylooligosaccharide production by optimized sulfuric, acetic acid, and liquid hot water treatment of sugarcane leaves. Biomass Conversion and Biorefinery doi: 10.1007/s13399-022-03316-0

Jutakanoke, R., Leepipatpiboon, N., Tolieng, V., Kitpreechavanich, V., Srinorakutara, T., Akaracharanya, A. 2012. Sugarcane leaves: Pretreatment and ethanol fermentation by *Saccharomyces cerevisiae*. Biomass Bioenergy 39: 283–289. doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.01.018

Khan, M.U., Usman, M., Ashraf, M.A., Dutta, N., Luo, G., Zhang, S. 2022. A review of recent advancements in pretreatment techniques of lignocellulosic materials for biogas production: Opportunities and Limitations. Chem. Eng. J. Adv. 10: 100263. doi.org/10.1016/j.ceja.2022.100263

Lin, S.H., Chou, L.M., Chien, Y.W., Chang, J.S., Lin, C.I. 2016. Prebiotic Effects of Xylooligosaccharides on the Improvement of Microbiota Balance in Human Subjects. Gastroenterol Res. Pract. 2016: 5789232. doi: 10.1155/2016/5789232

Luz, S., Costa, S., Goncalves, A.R., Junior, A., Costa, S. 2016. Polypropylene composites reinforced with biodegraded sugarcane bagasse fibers: Static and dynamic mechanical properties. Mater. Res. 19. doi: 10.1590/1980-5373-MR-2015-0410

Niju, S., Swathika, M., Balajii, M. 2019. Pretreatment of lignocellulosic sugarcane leaves and tops for bioethanol production. In: Yousuf, A., Pirozzi, D., Sannino, F. Lignocellulosic Biomass to Liquid Biofuels. Academic Press. Cambridge, MA, USA, pp. 301–324.

Woiciechowski, A.L., Neto, C.J.D., Vandenberghe, L.P.d.S., Neto, D.P.d.C., Sydney, A.C.N., Letti, L.A.J., Soccol, C.R. 2020. Lignocellulosic biomass: Acid and alkaline pretreatments and their effects on biomass recalcitrance – Conventional processing and recent advances. Bioresour. Technol. 304: 122848. doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122848

# ผลของใบกัญชาต่อคุณภาพเอกซ์ทรูเดตที่มีส่วนผสมหลักจากแป้งถั่วเหลืองสกัดไขมัน

## Effect of cannabis leaf on the quality of defatted soy flour-based extrudates

**คันฉัตร สังข์ชุม, กมลวรรณ แจ้งชัด*, อนุวัตร แจ้งชัด**

Khanchat Sangchum, Kamolwan Jangchud*, Anuvat Jangchud

ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Product Development, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: fagikwj@ku.ac.th

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของกัญชาสายพันธุ์หางกระรอก และศึกษาผลของปริมาณผงใบกัญชา และปริมาณความชื้นของส่วนผสมต่อคุณภาพของเอ็กซ์ทรูเดตผลิตด้วยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน จากการศึกษาพบว่าใบกัญชามีโปรตีนร้อยละ 22.64 และปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด 23.00 mg GAE/g โดยน้ำหนักแห้ง การศึกษาผลของผงใบกัญชาทดแทนแป้งถั่วเหลืองสกัดไขมัน 4 ระดับ (ได้แก่ ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก) และความชื้นของส่วนผสม 3 ระดับ (ได้แก่ ร้อยละ 25, 35 และ 45) ต่อคุณภาพของเอ็กซ์ทรูเดต พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณผงใบกัญชาจากร้อยละ 5 เป็นร้อยละ 10 และร้อยละ 15 และเพิ่มปริมาณความชื้นของส่วนผสม ส่งผลให้เอ็กซ์ทรูเดตหลังการคืนตัวมีแนวโน้มของค่าเนื้อสัมผัสด้านความแข็ง และพลังงานในการเคี้ยวสูงขึ้น การเพิ่มปริมาณผงใบกัญชาส่งผลให้เอ็กซ์ทรูเดตมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และความสามารถในการต้านออกซิเดชัน ด้วยวิธี DPPH และ ABTS เพิ่มขึ้น ดังนั้นใบกัญชาจึงมีศักยภาพที่จะนำมาเป็นส่วนผสมในเอ็กซ์ทรูเดตเพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์เนื้อเทียม

**คำสำคัญ**: การพัฒนาผลิตภัณฑ์, ใบกัญชา, สารประกอบฟีนอลิก,เอ็กซ์ทรูชัน, เอ็กซ์ทรูเดต

**Abstract**

The objectives of this research were to study the chemical composition of cannabis leaf and to study the effect of cannabis leaf powder and moisture content of the raw material on the quality of the extruded products using the extrusion process. The result revealed that cannabis leaf powder contained 22.64% protein and 23.00 mg GAE/g db of total phenolic content. Effect of four levels of cannabis leaf powder (0, 5, 10, and 15%) and feed moisture content (25, 35, and 45%) on the quality of extrudate was investigated. It was found that increasing in feed moisture content and increasing cannabis leaf powder from 5% to 10% and 15%, the texture hardness and chewiness of the extrudate tended to increase. The increase in cannabis leaf powder resulted in an increase in the total phenolic contents of the extrudate and antioxidant capacity as determined by DPPH and ABTS assays. Therefore, cannabis leaves exhibit potential to be incorporated in extrudate for meat analog product development.

**Keywords**: Cannabis leaf, Extrudate, Extrusion process, Phenolic compounds, Product development

**คำนำ**

กัญชาเป็นพืชในกลุ่มแคนาบินอยด์สามารถออกฤทธิ์ทางชีวภาพ โดยสารที่พบมากในกัญชามี 3 ชนิด ได้แก่ delta-9-tetrahydrocannabinol (THC), cannabidiol (CBD) และ Cannabinol (CBN) กัญชาพันธุ์หางกระรอกเป็นพันธุ์ในประเทศไทยที่มีการยอมรับจากต่างประเทศ โดยเป็น 1 ใน 5 ของพันธุ์ที่ดีที่สุดในโลก (ทิพยา และคณะ, 2563) ใบกัญชามีสารประกอบฟีนอลิก ซึ่งมีบทบาทสำคัญที่มีฤทธิ์ในการต้านออกซิเดชัน และต้านอักเสบ (Aazza, 2021)

กระบวนการเอ็กซ์ทรูชันเป็นกระบวนการแปรรูปที่ใช้ความดันสูง อุณหภูมิสูงในระยะสั้น ประกอบด้วยการทำงานร่วมกันของหน่วยต่าง ๆ ภายในเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ เช่น ส่วนรับวัตถุดิบ การผสม การนวด การเฉือน การทำให้สุก และการทำให้เกิดรูปร่าง (Giles et al., 2004) ในขณะที่ผลิตภัณฑ์ที่มีโปรตีนเป็นหลัก เช่น โปรตีนเกษตรเป็นผลิตภัณฑ์อาหารที่ผลิตจากแป้งถั่วเหลืองสกัดไขมัน มีคุณค่าทางโภชนาการสูง เนื่องจากมีกรดอะมิโนที่จำเป็นต่อร่างกายครบทุกตัว โดยเฉพาะมีไลซีนสูง (สถาบันค้นคว้า และพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร, 2556) ซึ่งเอ็กซ์ทรูเดตเมื่อผ่านเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์จะมีการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้าง เกิดเป็นโครงสร้างที่มีลักษณะคล้ายเนื้อสัตว์ (Cotacallapa-Sucapuca et al., 2020) การเติมใบกัญชาในการผลิตเอ็กซ์ทรูเดตนอกจากจะให้สี และกลิ่นรสในผลิตภัณฑ์แล้ว ยังเป็นการเพิ่มสารประกอบฟีนอลิก ซึ่งมีความสามารถในการต้านออกซิเดชัน ในปัจจุบันยังไม่มีการศึกษาการใช้ประโยชน์จากใบกัญชาเป็นส่วนผสมเพื่อผลิตเอ็กซ์ทรูเดตหรือโปรตีนเกษตร โดยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของกัญชาพันธุ์หางกระรอก และศึกษาผลของปริมาณผงใบกัญชา และปริมาณความชื้นของส่วนผสมต่อคุณภาพของเอ็กซ์ทรูเดตที่ผลิตโดยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน

**อุปกรณ์และวิธีการ**

*การเตรียมตัวอย่างกัญชา และการวิเคราะห์คุณภาพของผงใบกัญชา*

*การเตรียมตัวอย่างใบกัญชา*

ใบกัญชา สายพันธุ์หางกระรอก (*Cannabis sativa* L.) อบแห้งในโรงเรือนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ จนได้ความชื้นร้อยละ 10 จากนั้นนำส่วนใบกัญชาที่แห้งแล้วไปบด และร่อนผ่านตะแกรงร่อนขนาด 80 เมช นำมาบรรจุในถุงอลูมิเนียมเคลือบพลาสติกเก็บในภาชนะปิดสนิท และนำไปวิเคราะห์คุณภาพดังนี้

*1. การวิเคราะห์คุณภาพ*

1.1 องค์ประกอบเคมีโดยประมาณ ได้แก่ ความชื้น โปรตีน ไขมัน เถ้า ใยอาหารทั้งหมด และคาร์โบไฮเดรตตามวิธีการของ AOAC (2006) โดยวัดค่า 3 ซ้ำ

1.2 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (Total phenolic compounds; TPC) ดัดแปลงวิธีการวิเคราะห์จาก Feng et al. (2021) วิธีเตรียมสารสกัดดัดแปลงจากวิธีการของ Tepsongkroh et al. (2019) รายงานผลในหน่วยมิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อน้ำหนักตัวอย่างเป็นกรัมโดยน้ำหนักแห้ง (mg of GAE/g of sample) ทำการวิเคราะห์จำนวน 3 ซ้ำ

1.3 การวิเคราะห์ความสามารถในการต้านออกซิเดชัน

1.3.1) ความสามารถในการต้านออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH radical scavenging activity (DPPH assay) ดัดแปลงวิธีวิเคราะห์ของ Feng et al. (2021) วิธีเตรียมสารสกัดผงใบกัญชา และรายงานผลตามวิธีข้อ 1.2

1.3.2) ความสามารถในการต้านออกซิเดชันด้วยวิธี ABTS radical scavenging activity (ABTS assay) ดัดแปลงวิธีวิเคราะห์ของ Leonard et al. (2021) วิธีเตรียมสารสกัดผงใบกัญชา และรายงานผลตามวิธีข้อ 1.2

1.3.3) ความสามารถในการต้านออกซิเดชันด้วยวิธี Ferric reducing antioxidant power (FRAP assay) ดัดแปลงวิธีมาจาก Cavalaro et al. (2020) วิธีเตรียมสารสกัดผงใบกัญชา และรายงานผลตามวิธีข้อ 1.2 รายงานผลในหน่วยมิลลิโมลาร์สมมูลของกรดเฟอรัสซัลเฟตต่อน้ำหนักกรัมโดยน้ำหนักแห้ง (mM of $Fe^{2+}$/g of sample) ทำการวิเคราะห์จำนวน 3 ครั้ง

1.4 วัดค่าสีระบบ CIE L* a* b* โดยใช้เครื่องวัดค่าสี UltraScan Pro Hunter lab บันทึกค่า L*, a* และ b* วัดค่าจำนวน 5 ซ้ำ

*การศึกษาผลของปริมาณผงใบกัญชา และปริมาณความชื้นของส่วนผสมต่อคุณภาพของเอ็กซ์ทรูเดตที่ผลิตโดยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน*

ทำการศึกษาโดยจัดสิ่งทดลองแฟคทอเรียล 4×3 ในแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ โดยปัจจัยแรกที่ศึกษา คือ ผงใบกัญชาทดแทนแป้งถั่วเหลืองสกัดไขมัน 4 ระดับ ได้แก่ ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนักของแป้งถั่วเหลืองสกัดไขมัน และปัจจัยที่สองคือความชื้นของส่วนผสม 3 ระดับ ได้แก่ ร้อยละ 25, 35 และ 45 ด้วยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันแบบสกรูคู่ โดยกำหนดปริมาณแป้งถั่วเหลืองสกัดไขมัน (Defatted soy flour) และโปรตีนสกัดจากถั่วเหลือง (Soy protein isolate) ในอัตราส่วนคงที่ ความเร็วรอบของสกรู เท่ากับ 600 รอบต่อนาที อุณหภูมิของบาร์เรลจากส่วนเริ่มทำการป้อนวัตถุดิบเข้าสู่เครื่องจนถึงอุณหภูมิหน้าแปลน เท่ากับ 45, 60, 95, 130, 140 และ 90 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และมีอัตราการป้อนวัตถุดิบ เท่ากับ 9.0 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหน้าแปลน 3.5 มิลลิเมตร แล้วนำเอ็กซ์ทรูเดตที่ได้ไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที หรือจนมีความชื้น ร้อยละ 10±1 จากนั้นเก็บเอ็กซ์ทรูเดตที่ผลิตได้ในถุงพลาสติก ที่อุณหภูมิห้อง (30±2องศาเซลเซียส) สำหรับวิเคราะห์คุณภาพ ดังนี้

*คุณภาพทางกายภาพ*

1. วัดค่าสี ระบบ CIE L* a* b* ตามวิธีการข้อที่ 1.4

2. ความหนาแน่นรวม (Bulk density) ดัดแปลงจากวิธีการของ Oliverira et al. (2017) คำนวณหาปริมาตรของเอ็กซ์ทรูเดต รายงานผลในหน่วย กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

3. ลักษณะเนื้อสัมผัส ดัดแปลงวิธีการของ Hong et al.(2022) ทำการวิเคราะห์เนื้อสัมผัสของเอ็กซ์ทรูเดตหลังจากคืนตัวโดยวิธี Texture profile analysis, (TPA) ด้วยเครื่อง Stable Micro System Texture Analyzer (TA.XT.plus) ที่มี load cell 50 กิโลกรัม เตรียมตัวอย่างโดยนำตัวอย่างแห้งมาทำการคืนตัวในน้ำ ที่อัตราส่วน 1: 15 แช่น้ำร้อนอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นกรองตัวอย่างผ่านตะแกรงเพื่อแยกน้ำออก เป็นเวลา 10 นาที กดตัวอย่าง 1 ชิ้นลงไป 60% ของความสูงตัวอย่าง ด้วยหัววัดตัวอย่างจำนวน 2 รอบ บันทึกค่าความแข็ง (Hardness) พลังงานในการเคี้ยว (Chewiness) และการกลับคืนสู่ขนาดและรูปร่างเดิม (Springinees) ทำการทดสอบตัวอย่างแต่ละชนิด 10 ซ้ำ

*คุณภาพทางเคมี*

1. ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (Total phenolic compounds; TPC) ตามวิธีการข้อ 1.1

2. การวิเคราะห์ความสามารถในการต้านออกซิเดชัน ตามวิธีการองค์ประกอบเคมีโดยประมาณ ข้อ 1.3

*การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ*

วิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) ANOVA ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ SPSS For window 19 version (SPSS Thailand Co., Ltd) ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติเท่ากับ 0.05 และทดสอบความแตกต่างระหว่างสิ่งทดลองด้วยวิธี Duncan's multiple-range test (DMRT)

**ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง**

*คุณภาพวัตถุดิบ*

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกัญชาพันธุ์หางกระรอก พบว่า กัญชาพันธุ์หางกระรอก มีปริมาณโปรตีน ไขมัน และเส้นใยหยาบ ร้อยละ 22.64, 3.87 และ 12.39 โดยน้ำหนักแห้งตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกัญชง ที่ได้จากการศึกษาของ Audu et al. (2014) พบว่าปริมาณโปรตีน ไขมัน และเส้นใยหยาบของใบกัญชงมีปริมาณร้อยละ 23.78, 19.97 และ18.95 โดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ทั้งนี้ความแตกต่างขององค์ประกอบทางเคมี ขึ้นอยู่กับพันธุ์ของกัญชา สภาพดินที่ใช้ในการปลูก พื้นที่ในการเพาะปลูก และสภาวะที่ใช้ในการเก็บกัญชา (Isahq et al., 2015) และจากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแป้งถั่วเหลืองสกัดไขมัน และโปรตีนสกัดจากถั่วเหลือง พบว่ามีปริมาณโปรตีน ร้อยละ 55.43 และ 87.11 ไขมัน ร้อยละ 2.13 และ 1.06 และเส้นใยหยาบ ร้อยละ 0.55 และ2.92 โดยน้ำหนักแห้งตามลำดับ และผลจากการวิเคราะห์พบว่าในใบกัญชาพันธุ์หางกระรอกมีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด 23.00 mg GAE/g db ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Aazza (2021) ที่รายงานว่าผงใบกัญชามีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดเท่ากับ 21.03 mg GAE/g

*การศึกษาผลของปริมาณผงใบกัญชา และปริมาณความชื้นของส่วนผสมต่อคุณภาพของเอ็กซ์ทรูเดตที่ผลิตโดยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน*

*ค่าสี ความหนาแน่นโดยรวม และเนื้อสัมผัสของเอ็กซ์ทรูเดต*

จากการศึกษาผลของปริมาณผงใบกัญชาที่ทดแทนแป้งถั่วเหลืองสกัดไขมัน 4 ระดับ และปริมาณความชื้นของส่วนผสม 3 ระดับ พบว่าการเพิ่มผงใบกัญชาแต่ละระดับความชื้นของส่วนผสมส่งผลให้เอ็กซ์ทรูเดตมีสีคล้ำมาก โดยค่าความสว่าง (L*) ค่าความเป็นสีแดง (a*) ค่าความเป็นสีเหลือง (b*) มีแนวโน้มลดลง ดังแสดงใน Table 1 เนื่องจากเอ็กซ์ทรูเดตมีค่าความเป็นสีเขียวเพิ่มขึ้นจากใบกัญชาที่เพิ่มลงไปในส่วนผสม สีคล้ำที่เกิดขึ้นของเอ็กซ์ทรูเดตอาจเกิดจากปฏิกิริยาเมลลาร์ดเป็นปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างน้ำตาลรีดิวซ์ และกรดอะมิโนที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสี (Lee et al., 2022) และเมื่อพิจารณาแต่ละระดับของผงใบกัญชา เมื่อลดปริมาณความชื้นส่งผลให้ค่าความสว่าง มีแนวโน้มลดลง ในขณะที่ค่าความเป็นสีแดง และค่าความเป็นสีเหลือง มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากการลดความชื้นของส่วนผสม ส่งผลให้ภายในบาร์เรลเกิดแรงเสียดทานมาก เอ็กซ์ทรูเดตจึงมีสีคล้ำที่เกิดจากปฏิกิริยาเมลล์ลาร์ด (Suri et al., 2020)

สำหรับค่าความหนาแน่น จากการศึกษาที่แต่ละระดับความชื้น ร้อยละ 25 และ 35 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณผงใบกัญชา จากร้อยละ 0 เป็นร้อยละ 5 ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) จากนั้นเมื่อเพิ่มผงใบกัญชาเป็นร้อยละ 10 และ 15 พบว่าความหนาแน่นไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) เนื่องจาก

ใยอาหารจากผงใบกัญชาไปขัดขวางการพองตัวของเอ็กซ์ทรูเดต ส่วนความชื้นของส่วนผสมที่ร้อยละ 45 พบว่าความหนาแน่นของเอ็กซ์ทรูเดตไม่แตกต่างกัน มีค่าอยู่ในช่วง (104.49–109.95 กรัม/ลบ.ซม.) ดังแสดงใน Table 1 เช่นเดียวกับการศึกษาของ Seth and Rajamanickam (2012) ศึกษาการใช้ถั่วเหลือง ข้าวฟ่าง และข้าวเจ้าเป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยว พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณข้าวฟ่างซึ่งมีใยอาหารสูง ทำให้การพองของผลิตภัณฑ์ลดลง จากการศึกษาที่แต่ละระดับของผงใบกัญชา พบว่า การลดความชื้นของส่วนผสมทำให้ความหนาแน่นของเอ็กซ์ทรูเดตมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการลดปริมาณความชื้นของส่วนผสมทำให้ความแตกต่างของความดันไอระหว่างความดันไอภายในเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์และความดันบรรยากาศมากขึ้น ส่งผลให้เอ็กซ์ทรูเดตมีการพองตัวมากขึ้น ความหนาแน่นจึงลดลง ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับ Chalermchaiwat et al. (2015) พบว่าการลดปริมาณความชื้นของส่วนผสม และความเร็วรอบของสกรูส่งผลให้เอ็กซ์ทรูเดตจากฟลาวข้าวกล้องงอกมีการพองตัวสูงขึ้น

**Table 1** Color and bulk density of Extrudates with cannabis leaf powder

| Cannabis leaf | Moisture content | Color | | | Bulk density ($g/cm^3$) |
|---|---|---|---|---|---|
| (%) | (%) | L* | a* | b* | |
| 0 | 25 | 69.43±2.19 $^{b}$ | 4.43±0.43 $^{a}$ | 20.41±0.86 $^{a}$ | 64.66±2.73 $^{e}$ |
| | 35 | 75.64±2.78 $^{a}$ | 2.65±0.16 $^{b}$ | 20.20±0.96 $^{a}$ | 80.49±3.45 $^{d}$ |
| | 45 | 76.24±1.12 $^{a}$ | 2.34±0.84 $^{bc}$ | 19.63±1.29 $^{a}$ | 104.49±6.23 $^{ab}$ |
| 5 | 25 | 60.97±1.83 $^{c}$ | 2.01±0.24 $^{cd}$ | 20.16±0.72 $^{a}$ | 82.82±3.96 $^{d}$ |
| | 35 | 62.22±1.49 $^{c}$ | 1.72±0.23 $^{d}$ | 19.59±1.21 $^{a}$ | 97.90±5.38 $^{bc}$ |
| | 45 | 62.97±0.37 $^{c}$ | 1.63±0.17 $^{d}$ | 19.35±0.82 $^{a}$ | 105.64±7.5 $^{ab}$ |
| 10 | 25 | 55.95±1.40 $^{de}$ | 1.02±0.10 $^{e}$ | 19.24±1.83 $^{a}$ | 87.07±4.07 $^{d}$ |
| | 35 | 55.97±1.13 $^{de}$ | 0.90±0.06 $^{e}$ | 18.94±1.59 $^{ab}$ | 98.57±4.91 $^{bc}$ |
| | 45 | 57.57±1.40 $^{d}$ | -0.52±0.17 $^{f}$ | 18.86±0.21 $^{ab}$ | 109.55±6.36 $^{a}$ |
| 15 | 25 | 53.52±1.41 $^{e}$ | -0.67±0.07 $^{f}$ | 18.66±1.29 $^{abc}$ | 89.69±3.99 $^{cd}$ |
| | 35 | 53.64±1.53 $^{e}$ | -0.84±0.17 $^{f}$ | 17.28±0.64 $^{bc}$ | 99.34±4.93 $^{b}$ |
| | 45 | 55.78±0.67 $^{de}$ | -0.88±0.59 $^{f}$ | 17.11±0.66 $^{c}$ | 99.34±4.93 $^{b}$ |

$^{a-f}$ Means with different superscript letters within each row are significantly different ($p \leq 0.05$)

ในระหว่างกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน เกิดความร้อน แรงเฉือน และแรงดันภายในเครื่อง ทำให้โปรตีนเสียสภาพธรรมชาติ สายโซ่ของโมเลกุลคลายตัว จากนั้นแล้วโปรตีนจะจัดเรียงตัวใหม่ เกิดพันธะเชื่อม และเกิดพอลิเมอไรเซชันระหว่างโปรตีนกับสตาร์ช หรือโปรตีนกับโปรตีนทำให้เกิดโครงสร้างใหม่ขึ้น มีผลต่อเนื้อสัมผัสของเอ็กทรูเดต (Baird and Reed, 1989) ดังนั้นโครงสร้างของเอ็กซ์ทรูเดตหลังการคืนตัวในน้ำ จะมีเนื้อลักษณะเป็นเส้นใยคล้ายกล้ามเนื้อของเนื้อสัตว์ (Zhang et al., 2018)

จากการวิเคราะห์เนื้อสัมผัสของเอ็กซ์ทรูเดตหลังการคืนตัวในน้ำ พบว่าที่ทุกระดับความชื้นเมื่อเพิ่มปริมาณผงใบกัญชาจากร้อยละ 5 เป็นร้อยละ 10 และร้อยละ 15 ส่งผลให้เอ็กซ์ทรูเดตหลังการคืนตัวมีแนวโน้มของค่าเนื้อสัมผัสด้านความแข็ง และพลังงานในการเคี้ยวสูงขึ้น โดยเอ็กซ์ทรูเดตที่ผสมผงใบกัญชาร้อยละ 15 มีค่าความแข็ง พลังงานในการเคี้ยวสูงที่สุด เท่ากับ16.31 N และ 11.56 N ตามลำดับ (Table 2) การเพิ่มปริมาณผงใบกัญชาไปลดการพองตัวของเอ็กซ์ทรูเดตเนื่องจากเส้นใยของใบกัญชาไปขัดขวางการพองตัวของโครงสร้างที่เกิดจากโมเลกุลสตาร์ชส่งผลให้มีรูพรุน

เล็กลง ทำให้ค่าความแข็งสูงขึ้น และสอดคล้องกับพลังงานในการเคี้ยวที่สูงขึ้น สำหรับการเพิ่มความชื้นที่แต่ละระดับของผงใบกัญชาพบว่าไม่มีผลต่อค่าการกลับคืนสู่ขนาดและรูปร่างเดิมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) มีค่าอยู่ในช่วง 0.91–0.93 mm เช่นเดียวกันกับ Ma and Ryu (2019) ได้ทำการศึกษาพบว่าการเพิ่มปริมาณผงชาเขียวในส่วนผสมของโปรตีนสกัดจากถั่วเหลือง กลูเตนจากข้าวสาลี และแป้งข้าวโพด ส่งผลให้เนื้อเทียมมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้น ในขณะที่การกลับคืนสู่ขนาดและรูปร่างเดิมลดลง และเมื่อความชื้นสูงขึ้น ทำให้เอ็กซ์ทรูเดตมีการพองตัวน้อยลง จึงส่งผลให้ค่าความแข็ง และพลังงานในการเคี้ยวสูงขึ้น เนื่องจากเอ็กซ์ทรูเดตหลังการคืนตัวในน้ำต้องใช้แรงและพลังงานในการบดเคี้ยวมากขึ้น เพื่อให้มีขนาดเล็กลง สำหรับเอ็กซ์ทรูเดตที่ไม่เติมผงใบกัญชา พบว่า มีค่าความแข็ง และพลังงานในการเคี้ยว อยู่ในช่วง 15.07–19.71 N และ 10.45–11.92 Nm ตามลำดับ โดยมีค่าความแข็ง และพลังงานในการเคี้ยวสูงกว่าเอ็กซ์ทรูเดตที่เติมผงใบกัญชาที่ระดับความชื้นเดียวกันของส่วนผสม ทั้งนี้เนื่องจากเกิดโครงสร้างของเส้นใยคล้ายกล้ามเนื้อได้ดี แต่การเพิ่มผงใบกัญชาจึงส่งผลให้ใยอาหารไปขัดขวางการเกิดโครงสร้างคล้ายเส้นใยของกล้ามเนื้อสัตว์

**Table 2** Texture of extrudates with cannabis leaf powder

| Cannabis leaf (%) | Moisture content (%) | Hardness(N) | Chewiness (Nm) | Springiness (mm)$^{ns}$ |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 25 | 15.07±2.95 $^{bc}$ | 10.45±2.35 $^{abc}$ | 0.93±0.05 |
| | 35 | 16.70±1.99 $^{b}$ | 10.98±1.85 $^{ab}$ | 0.93±0.05 |
| | 45 | 19.71±2.65 $^{a}$ | 11.92±2.68 $^{a}$ | 0.93±0.03 |
| 5 | 25 | 7.21±1.15 $^{f}$ | 5.43±0.80 $^{f}$ | 0.91±0.02 |
| | 35 | 9.11±1.97 $^{ef}$ | 6.96±1.39 $^{de}$ | 0.93±0.03 |
| | 45 | 10.88±1.54 $^{de}$ | 7.18±1.40 $^{de}$ | 0.93±0.04 |
| 10 | 25 | 10.12±1.75 $^{e}$ | 6.22±1.25 $^{de}$ | 0.92±0.03 |
| | 35 | 11.37±3.34 $^{de}$ | 7.23±3.52 $^{de}$ | 0.93±0.01 |
| | 45 | 13.47±2.92 $^{cd}$ | 7.90±4.51 $^{cde}$ | 0.93±0.01 |
| 15 | 25 | 14.56±1.32 $^{bc}$ | 6.90±1.74 $^{de}$ | 0.93±0.03 |
| | 35 | 15.74±1.75 $^{bc}$ | 8.97±1.98 $^{bc}$ | 0.92±0.03 |
| | 45 | 16.31±5.40 $^{bc}$ | 11.56±3.82 $^{ab}$ | 0.93±0.05 |

$^{a-f}$Means with different superscript letters within each row are significantly different ($p \leq 0.05$)

$^{ns}$Means with the same superscript letters within each row are not significantly different ($p > 0.05$)

**Table 3** Total phenolic content, antioxidant activity of extrudates with cannabis leaf powder

| Cannabis leaf (%) | Moisture content (%) | TPC (mg GAE/g db) | Antioxidant activity | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | DPPH (mg GAE/g db) | ABTS mg GAE/g db) | FRAP mg $FeSO_4$/g db) |
| 0 | 25 | 1.98±0.34 $^{c}$ | 0.18±0.01 $^{fg}$ | 0.34±0.03 $^{ef}$ | 0.09±0.01 $^{bcd}$ |
| | 35 | 1.51±0.20 $^{de}$ | 0.14±0.05 $^{gh}$ | 0.29±0.05 $^{f}$ | 0.06±0.02 $^{de}$ |
| | 45 | 1.45±0.20 $^{de}$ | 0.12±0.02 $^{i}$ | 0.23±0.02 $^{g}$ | 0.06±0.01 $^{de}$ |
| 5 | 25 | 2.06±0.09 $^{c}$ | 0.27±0.02 $^{d}$ | 0.41±0.05 $^{e}$ | 0.12±0.01 $^{b}$ |
| | 35 | 1.98±0.18 $^{c}$ | 0.24±0.05 $^{de}$ | 0.36±0.06 $^{ef}$ | 0.10±0.03 $^{bc}$ |
| | 45 | 1.87±0.06 $^{c}$ | 0.2 ±0.01 $^{ef}$ | 0.35±0.02 $^{ef}$ | 0.08±0.05 $^{bcd}$ |
| 10 | 25 | 4.77±0.57 $^{a}$ | 0.42±0.04 $^{bc}$ | 1.23±0.04 $^{ab}$ | 0.21±0.01 $^{a}$ |
| | 35 | 4.40±0.08 $^{ab}$ | 0.37±0.05 $^{c}$ | 0.85±0.03 $^{d}$ | 0.21±0.02 $^{a}$ |
| | 45 | 4.02±0.11 $^{b}$ | 0.37±0.02 $^{c}$ | 0.83±0.03 $^{d}$ | 0.20±0.01 $^{a}$ |
| 15 | 25 | 4.91±0.15 $^{a}$ | 0.53±0.02 $^{a}$ | 1.24±0.04 $^{a}$ | 0.23±0.01 $^{a}$ |
| | 35 | 4.80±0.15 $^{a}$ | 0.42±0.04 $^{b}$ | 1.13±0.13 $^{bc}$ | 0.22±0.01 $^{a}$ |
| | 45 | 4.77±0.21 $^{a}$ | 0.39±0.01 $^{bc}$ | 1.09±0.03 $^{c}$ | 0.21±0.02 $^{a}$ |

$^{a-f}$ Means with different superscript letters within each row are significantly different ($p \leq 0.05$)

จากการศึกษาพบว่าผงใบกัญชามีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกเท่ากับ 23.00 mg GAE/g db การเพิ่มปริมาณผงใบกัญชาส่งผลให้เอ็กซ์ทรูเดตมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดเพิ่มขึ้น (Table 3) ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมที่มีปริมาณกัญชา ร้อยละ 0, 5, 10 และ15 ของปริมาณแป้งถั่วเหลืองสกัดไขมันก่อนกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน มีปริมาณของสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดเท่ากับ 2.81, 3.50, 5.33 และ 6.47 mg GAE/g db ตามลำดับ เมื่อพิจารณาแต่ละระดับความชื้นของส่วนผสมพบว่ากระบวนการเอ็กซ์ทรูชันมีผลทำให้ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดลดลงเมื่อเทียบกับวัตถุดิบผสมก่อนเข้าสู่กระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน เนื่องจากอุณหภูมิ แรงเสียดทาน และความดันภายในเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์สูงขึ้น ส่งผลให้เกิดการสลายตัวเนื่องจากความร้อนของสารประกอบฟีนอลิก (Ma and Ryu, 2019)

เมื่อพิจารณาผลของความชื้นของส่วนผสมแต่ละระดับของผงใบกัญชา พบว่า การลดลงของปริมาณความชื้นของส่วนผสมทำให้ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดมีแนวโน้มสูงขึ้น ที่ระดับผงใบกัญชา ร้อยละ 0 และ 10 สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นลดลง เนื่องจากการลดความชื้นของส่วนผสมทำให้อุณหภูมิความดันภายในบาร์เรลสูงขึ้นจึงส่งผลให้ผนังเซลล์พืชถูกทำลาย ทำให้ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกถูกปลดปล่อย และถูกสกัดออกมาได้ง่ายขึ้น (Zhang et al., 2018) นอกจากนี้ยังมีบางกรณีที่พบว่า ในระหว่างกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันที่ระดับความชื้นสูงและอุณหภูมิสูง อาจเกิดกระบวนการดีคาร์บอกซิเลชันของสารประกอบฟีนอลิก ทำให้เกิดโพลีเมอไรเซชันเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ ความสามารถในการละลายในตัวทำละลายลดลง ส่งผลให้สารฟีนอลิกที่สกัดได้ลดลง (Brennan et al., 2011) และเมื่อพิจารณาค่าความสามารถในการต้านออกซิเดชัน ด้วยวิธี DPPH และ ABTS ซึ่งเป็นวิธีการวัดความสามารถในการดักจับอนุมูลอิสระของอนุมูลไนโตรเจนของ $DPPH^{\bullet}$ และอนุมูลของ $ABTS^{\bullet+}$ ตามลำดับ การเพิ่มปริมาณผงใบกัญชาส่งผลให้ความสามารถในการต้านออกซิเดชัน ด้วยวิธี DPPH, ABTS และ FRAP มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาการลดปริมาณความชื้นของส่วนผสมที่แต่ละระดับผงใบกัญชา พบว่า ส่งผลให้ค่าความสามารถในการ

ต้านออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH และ ABTS มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ขณะที่ไม่มีผลต่อความสามารถในการต้านออกซิเดชันด้วยวิธี FRAP อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

## สรุป

จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมี และสารประกอบฟีนอลิก พบว่า กัญชาพันธุ์หางกระรอก มีปริมาณโปรตีน ร้อยละ 22.64 ไขมัน ร้อยละ 3.87 และเส้นใยหยาบ ร้อยละ 12.39 โดยน้ำหนักแห้ง มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด 23.00 mg GAE/g db เมื่อนำผงใบกัญชามาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเอ็กซ์ทรูเดต พบว่าการเพิ่มปริมาณผงใบกัญชาทำให้เอ็กซ์ทรูเดตมีค่าความสว่างลดลง และเมื่อปริมาณผงใบกัญชา และความชื้นของส่วนผสมเพิ่มขึ้นส่งผลให้เอ็กซ์ทรูเดตหลังการคืนตัวในน้ำมีแนวโน้มของค่าเนื้อสัมผัสด้านความแข็ง และพลังงานการเคี้ยวสูงขึ้น การเพิ่มปริมาณผงใบกัญชาจากร้อยละ 0 เป็นร้อยละ 15 และลดปริมาณความชื้นของส่วนผสมจากร้อยละ 45 เป็น 25 มีผลทำให้เอ็กซ์ทรูเดตมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และความสามารถในการต้านออกซิเดชันเพิ่มขึ้น ดังนั้นใบกัญชาจึงเป็นทางเลือกของส่วนผสมที่สามารถเพิ่มลงในผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อเป็นทางเลือกของผู้บริโภคในอนาคต ทั้งนี้ต้องมีปริมาณสาร THC ไม่เกิน 1.6 มิลลิกรัมต่อหน่วยบรรจุ

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณคณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และทุนอุดหนุนวิจัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ประเภทงานวิจัยมูลฐาน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2566 ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยและการนำเสนอผลงานในครั้งนี้

## เอกสารอ้างอิง

ทิพยา จุลหวี ฟอร์จูน, ธนารักษ์ มั่งมีชัย, ลลิตา ชมเพ็ญ. 2563. มารู้จักกัญชง-กัญชากันเถอะ. https://www.tistr.or.th/tistrblog/wp-content/uploads/2021/03/Cannabis-sativa-L.pdf, 15 ธันวาคม 2565.

สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร. 2556. โปรตีนเกษตรหรือเนื้อเทียม. http://ifrpd.ku.ac.th/th/products/ifrpd-protein.php, 15 ธันวาคม 2565

Aazza, S. 2021. Application of multivariate optimization for phenolic compounds and antioxidants extraction from Moroccan *Cannabis sativa* waste. J. Chemistry. 2021: 9738656.

AOAC. 2006. Official Methods of Analysis. Association of Official Analytical Chemists, Gaithersburg, MD, USA.

Audu, B.S., Ofojekwu, P.C., Ujah, A., Ajima, M.N.O. 2014. Phytochemical, proximate composition, amino acid profile and characterization of Marijuana (*Cannabis sativa* L.). J. Phytopharmacol. 3: 35–43. doi.org/10.31254/phyto.2014.3106

Baird, D.G., Reed, C.M. 1989. Transport Properties of Food Doughs. Extrusion cooking. Woodhead Publishing Limited. USA.

Brennan, C., Brennan, M., Derbyshire, E., Tiwari, B.K. 2011. Effects of extrusion on the polyphenols, vitamins and antioxidant activity of foods. Trends Food Sci. Technol. 22: 570–575.

Cavalaro, R.I., Fabricio, L.F.F., Vieira, T.M.F.S. 2020. Ultrasound-assisted extraction of antioxidants from Baccharis dracunculifolia and green propolis. Processes 8: 1530.

Chalermchaiwat, P., Jangchud, K., Jangchud, A., Charunuch, C., Prinyawiwatkul, W. 2015. Antioxidant activity, free gamma-aminobutyric acid content, selected physical properties and consumer acceptance of germinated brown rice extrudates as affected by extrusion process. LWT. 64: 490–496.

Cotacallapa-Sucapuca, M., Vega, E.N., Maieves, H.A., Berrios, J.D.J., Morales, P., Fernández-Ruiz, V., Cámara, M. 2021. Extrusion process as an alternative to improve pulses products consumption. A review. Foods 10: 1096.

Feng, X., Sun, G., Fang, Z. 2022. Effect of hempseed cake (*Cannabis sativa* L.) incorporation on the physicochemical and antioxidant properties of reconstructed potato chips. Foods 11: 211.

Giles Jr, H.F., Mount III, E.M., Wagner Jr, J.R. 2004. Extrusion: The Definitive Processing Guide and Handbook. William Andrew. GA, USA.

Hong, S., Shen, Y., Li, Y. 2022. Physicochemical and functional properties of texturized vegetable proteins and cooked patty textures: Comprehensive characterization and correlation analysis. Foods 11: 2619.

Isahq, M.S., Afridi, M.S., Ali, J., Hussain, M.M., Ahmad, S., Kanwal, F. 2015. Proximate composition, phytochemical screening, GC-MS studies of biologically active cannabinoids and antimicrobial activities of Cannabis indica. Asian Pac J Trop Dis. 5: 897–902.

Lee, J.S., Oh, H., Choi, I., Yoon, C.S., Han, J. 2022. Physico-chemical characteristics of rice protein-based novel textured vegetable proteins as meat analogues produced by low-moisture extrusion cooking technology. LWT. 157: 113056.

Leonard, W., Zhang, P., Ying, D., Xiong, Y., Fang, Z. 2021. Extrusion improves the phenolic profile and biological activities of hempseed (*Cannabis sativa* L.) hull. J. Food Chem. 346: 128606.

Ma, X., Ryu, G. 2019. Effects of green tea contents on the quality and antioxidant properties of textured vegetable protein by extrusion-cooking. Food Sci. Biotechnol. 28: 67–74.

Oliveira, L.C., Schmiele, M., Steel, C.J. 2017. Development of whole grain wheat flour extruded cereal and process impact on color, expansion, and dry and bowl-life texture. LWT. 75: 261–270.

Seth, D., Rajamanickam, G. 2012. Development of extruded snacks using soy, sorghum, millet and rice blend–A response surface methodology approach. Int. J. Food Sci. Technol. 47: 1526–1531.

Suri, S., Dutta, A., Shahi, N.C., Raghuvanshi, R.S., Singh, A., Chopra, C.S. 2020. Numerical optimization of process parameters of ready-to-eat (RTE) iron rich extruded snacks for anemic population. LWT. 134: 110164.

Tepsongkroh, B., Jangchud, K., Jangchud, A., Charunuch, C., Prinyawiwatkul, W. 2019. Healthy brown rice-based extrudates containing straw mushrooms: Effect of feed moisture and mushroom powder contents. J. Food Process. Preserv. 43: e14089.

Zhang, R., Khan, S. A., Chi, J., Wei, Z., Zhang, Y., Deng, Y., Zhang, M. 2018. Different effects of extrusion on the phenolic profiles and antioxidant activity in milled fractions of brown rice. LWT. 88: 64–70.

# ผลของการดัดแปรด้วยอัลตราซาวน์ต่อสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนถั่วเขียวไอโซเลท

## Effect of ultrasound modification on functional properties of mung bean protein isolate

**วิภาวี จั่นเพชร, วรรธินี เกตุคง***

Wiphawee Junphet, Wattinee Katekhong*

ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพ 10900

Department of Food Science and Technology, Faculty of Argo-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: fagiwnk@ku.ac.th

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของการดัดแปรด้วยเทคนิคอัลตราซาวน์ที่ระยะเวลาต่าง ๆ ต่อสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนถั่วเขียวไอโซเลท โดยทำการดัดแปรโปรตีนถั่วเขียวไอโซเลทด้วยคลื่นอัลตราซาวน์ความถี่ 40 KHz กำลัง 500 W เป็นระยะเวลา 30 และ 60 นาที ผลการทดลองพบว่าตัวอย่างโปรตีนที่ผ่านการดัดแปรมีปริมาณซัลฟ์ไฮดริลอิสระ ความสามารถในการละลาย ความสามารถในการเกิดโฟม (FA) ความคงตัวของโฟม (FS) ความสามารถในการเป็นอิมัลซิไฟ-เออร์ (EAI) และความคงตัวของอิมัลชัน (ESI) เพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างโปรตีนที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปร อย่างไรก็ตามค่าความสามารถในการละลาย FA, FS และEAI ของตัวอย่างที่ผ่านการดัดแปรระยะเวลา 30 และ 60 นาที ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) นอกจากนี้ยังพบว่าตัวอย่างที่ผ่านการดัดแปรระยะเวลา 60 นาที มีค่า ESI ต่ำกว่าตัวอย่างที่ผ่านการดัดแปร 30 นาที

**คำสำคัญ**: การดัดแปรด้วยเทคนิคอัลตราซาวน์, โปรตีนถั่วเขียวไอโซเลท, สมบัติเชิงหน้าที่

**Abstract**

This study investigated the effect of ultrasound modification at varying time on the functional properties of mung bean protein isolate. The mung bean protein isolate was modified using ultrasound with a frequency of 40 kHz and a power of 500 W at 30 and 60 min. The results showed that the modified protein samples exhibited a significant increase ($p \leq 0.05$) in free sulfhydryl content, solubility, foaming ability (FA), foaming stability (FS), emulsifying activity index (EAI) and emulsion stability index (ESI) compared to the unmodified sample. However, there were no significant differences in solubility, FA, FS and EAI of 30 min and 60 min modified samples ($p > 0.05$). Moreover, ESI of 60 min modified sample was lower than that of 30 min modified sample.

**Keywords**: Functional properties, Mung bean protein isolate, Ultrasound modification

**คำนำ**

จากปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมของโลกและการพัฒนาด้านความมั่นคงและความยั่งยืนของอาหาร แหล่งโปรตีนจากพืชตระกูลถั่วจึงได้รับความสนใจอย่างมากในปัจจุบัน ถั่วเขียวเป็นพืชไร่ที่สำคัญชนิดหนึ่งของประเทศไทย มีปริมาณโปรตีนสูง (20–28 %) มีองค์ประกอบของกรดอะมิโนที่จำเป็นเทียบเคียงได้กับถั่วเหลือง (Thompson et al., 1977) และไม่ถูกจัดให้เป็นสารก่อภูมิแพ้ อย่างไรก็ตามโปรตีนจากถั่วยังมีข้อจำกัดในการนำมาประยุกต์ใช้เพื่อเป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์อาหาร เนื่องจากสมบัติเชิงหน้าที่ เช่น การละลาย สมบัติของโฟมและการเป็นอิมัลซิไฟเออร์ อาจไม่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับโปรตีนจากสัตว์ เช่น โปรตีนนม การดัดแปรโครงสร้างของโปรตีนพืชโดยใช้วิธีทางเคมี การใช้เอนไซม์ และทางกายภาพสามารถปรับเปลี่ยนโครงสร้างของโปรตีนที่จะนำไปสู่การมีสมบัติเชิงหน้าที่ที่ต้องการได้ (Zhao et al., 2015) งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาการใช้เทคนิคการดัดแปรด้วยอัลตราซาวน์ซึ่งเป็นวิธีการทางกายภาพ ปลอดสารเคมี ไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมและผู้บริโภค เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนถั่วเขียว

**อุปกรณ์และวิธีการ**

*วัตถุดิบ*

ถั่วเขียวกะเทาะเปลือก ตรา ไร่ทิพย์ (บริษัท ไทยซีเรียลเวิลส์ จำกัด)

*การสกัดโปรตีน*

การสกัดโปรตีนถั่วเขียวดัดแปลงจากวิธีการของ Thompson et al. (1977) โดยนำแป้งถั่วเขียวที่ผ่านการบดและร่อนผ่านตะแกรงความละเอียดขนาด 250 µm ผสมกับน้ำปราศจากไอออนในอัตราส่วน 1:10 w/v ปรับ pH ให้เท่ากับ 9.0 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 6 M กวนสารแขวนลอยเป็นเวลา 60 นาที ปั่นเหวี่ยงสารแขวนลอยตัวอย่างด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงตกตะกอน (centrifuge) ที่ความเร็วรอบ 7,470 rpm เป็นเวลา 20 นาที เก็บสารละลายเหนือตะกอน ตกตะกอนโปรตีนโดยการปรับ pH ให้เป็น 4.5 ด้วยสารละลายกรดซิตริกความเข้มข้น 2 M ตั้งทิ้งไว้ข้ามคืนที่อุณหภูมิ 4°C เก็บตะกอนโปรตีนโดยการปั่นเหวี่ยงสารละลายตัวอย่าง นำตะกอนโปรตีนที่ได้ผสมกับน้ำปราศจากไอออนในอัตราส่วน 1:5 ปรับค่า pH ให้เท่ากับ 7 ได้เป็นสารละลายโปรตีนถั่วเขียว จากนั้นนำสารละลายโปรตีนถั่วเขียวทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย (spray dryer) โดยใช้อุณหภูมิขาเข้า 170°C อุณหภูมิขาออก 80±5°C ได้ตัวอย่างโปรตีนถั่วเขียวไอโซเลท (Control) เก็บรักษาตัวอย่างในถุงพลาสติกซีลที่อุณหภูมิ 4°C

*การดัดแปรโปรตีนด้วยการใช้คลื่นอัลตราซาวน์ (Ultrasound modification)*

การดัดแปรโปรตีนถั่วเขียวดัดแปลงจากวิธีการของ Malik et al. (2017) โดยเตรียมสารละลายโปรตีนถั่วเขียวไอโซเลทกับน้ำปราศจากไอออนให้มีความเข้มข้น 10% w/w กวนผสมเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ดัดแปรสารละลายโปรตีน 100 mL ด้วยเครื่องอัลตราโซนิกแบบอ่าง ความถี่ 40 KHz กำลัง 500 W ระยะเวลา 30 และ 60 นาที โดยให้คลื่นอัลตราซาวน์และหยุดพักเป็นรอบ ๆ ละ 15 นาที สลับกันไปจนครบระยะเวลาการดัดแปร เพื่อควบคุมอุณหภูมิของสารละลายตัวอย่างไม่ให้เกิน 30°C นำสารละลายโปรตีนถั่วเขียวไอโซเลทที่ดัดแปรแล้วทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบเยือกแข็ง (freeze dryer) เก็บรักษาตัวอย่างที่ผ่านการดัดแปรในถุงพลาสติกซีลที่อุณหภูมิ 4°C

*การวิเคราะห์ปริมาณซัลฟ์ไฮดริลอิสระ (Free sulfhydryl; free SH) ของโปรตีน*

การวิเคราะห์ปริมาณ free SH ดัดแปลงจากวิธีการของ Xiong et al. (2018) โดยชั่งโปรตีน 0.03 กรัม ละลายในสารละลาย Tris-Glycine บัฟเฟอร์ pH 8.0 ปริมาตร 10 mL จากนั้นผสมกับ Ellman's reagent (DTNB 4 mg/ml Tris-Glycine buffer) 0.05 mL กวนผสมเป็นเวลา 30 นาที นำตัวอย่างไปปั่นเหวี่ยงโดยใช้เครื่องปั่นเหวี่ยงตกตะกอนที่ความเร็วรอบ 8,350 rpm อุณหภูมิ 25°C เป็นเวลา 10 นาที เก็บสารละลายเหนือตะกอน 4 mL ไว้ในที่มืดเป็นเวลา 15 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 412 nm คำนวณปริมาณ free SH ตาม Equation 1

$$\text{Free SH (}\mu\text{mol/g)} = 73.53 \times (A-A_0) \times C \quad (1)$$

Where; A = Absorbance of sample

$A_0$ = Absorbance of

C = Concentration of protein sample (mg/mL)

*การวิเคราะห์สมบัติการละลาย (Solubility)*

การวิเคราะห์สมบัติการละลายดัดแปลงจากวิธีการของ Brishti et al. (2020) ชั่งตัวอย่างโปรตีน 0.25 กรัม ละลายในน้ำปราศจากไอออน 25 mL จากนั้นกวนผสมนาน 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 25°C นำสารละลายไปปั่นเหวี่ยงที่ 6,980 rpm อุณหภูมิ 25°C เป็นเวลา 15 นาที ปิเปตสารละลายเหนือตะกอนที่ผ่านการเจือจางแล้ว 10 เท่ามา 0.1 mL ผสมกับ Bradford reagent 5 mL วิเคราะห์ปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ด้วยเทคนิค Bradford assay คำนวณค่าความสามารถในการละลายตาม Equation 2

$$\text{Solubility (\%)} = \frac{\text{protein supernatant content}}{\text{total protein content of sample}} \times 100 \quad (2)$$

*การวิเคราะห์สมบัติของโฟม (Foaming properties)*

การวิเคราะห์สมบัติของโฟมดัดแปลงจากวิธีการของ ฐิติพร (2549) โดยเตรียมสารละลายโปรตีนความเข้มข้น 1% w/v ปริมาตร 15 mL นำสารละลายเทใส่ในหลอด centrifuge ขนาด 50 mL ที่มีขีดระบุปริมาตรชัดเจน จากนั้นนำมาตีปั่นให้เกิดโฟมด้วยเครื่องโฮโมจิไนเซอร์ (homogenizer) ที่ความเร็วรอบ 13,000 rpm เป็นเวลา 1 นาที ที่อุณหภูมิห้อง วัดปริมาตรของโฟมหลังจากตีปั่นเป็นเวลา 1 นาที และหลังจากตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 30 นาที คำนวณค่าความสามารถในการเกิดโฟม (Foaming ability; FA) ตาม Equation 3 และค่าความคงตัวของโฟม (Foaming stability; FS) ตาม Equation 4

$$\text{FA (\%)} = \frac{\text{volume of foam after 1 min}}{\text{initial total volume of sample}} \times 100 \quad (3)$$

$$\text{FS (\%)} = \frac{\text{volume of foam after 30 min}}{\text{volume of foam after 1 min}} \times 100 \quad (4)$$

*การวิเคราะห์สมบัติการเป็นอิมัลซิไฟเออร์ (Emulsification properties)*

การวิเคราะห์สมบัติการเป็นอิมัลซิไฟเออร์ดัดแปลงจากวิธีของ Brishti et al. (2020) โดยนำสารละลายโปรตีนความเข้มข้น 1% w/v ปริมาตร 15 mL ผสมกับน้ำมันถั่วเหลือง 5 mL ตีปั่นด้วยเครื่องโฮโมจิไนเซอร์ที่ความเร็วรอบ 19,000 rpm เป็นเวลา 1 นาที ปิเปตอิมัลชันที่ได้ 50 µL จากก้นหลอดที่ 0 นาที และ 10 นาที เจือจางในสารละลายโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตความเข้มข้น 0.1% w/v ปริมาตร 4.95 mL นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 500 nm ด้วยเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ (spectrophotometer) คำนวณค่าความสามารถในการเป็นอิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifying activity index; EAI) ตาม Equation 5 และความคงตัวของอิมัลชัน (Emulsion stability index; ESI) ตาม Equation 6

$$EAI\ (m^2/g) = \frac{4.606 \times A_0 \times N}{\phi \times C \times 10000} \quad (5)$$

$$ESI\ (min) = \frac{A_0}{A_0 - A_{10}} \times t \quad (6)$$

Where; $A_0$ = Absorbance of diluted solutions at 0 min

$A_{10}$ = Absorbance of solutions after 10 min

N = Dilutions factor

Ø = Oil fraction

C = Concentration of protein sample (g/ml)

t = Time

*การวิเคราะห์ทางสถิติ*

วางแผนการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติแบบ Completely Randomized Design (CRD) ทำการทดลอง 3 ซ้ำและเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติโดยใช้วิธี Duncan's new multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ด้วยโปรแกรม IBM SPSS statistics version 22.0

**ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง**

*ปริมาณซัลฟ์ไฮดริลอิสระของโปรตีน*

การดัดแปรตัวอย่างโปรตีนถั่วเขียวไอโซเลทด้วยอัลตราซาวด์เป็นระยะเวลา 30 และ 60 นาที ทำให้ตัวอย่างมีปริมาณ free SH สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปร (Table 1) ทั้งนี้เนื่องจากในระหว่างการดัดแปรโปรตีนเกิดปรากฏการณ์คาวิเตชัน (cavitation) จากอัลตราซาวด์ ทำให้พันธะไดซัลไฟด์ภายในโครงสร้างของโปรตีนถูกทำลาย จึงส่งผลให้โปรตีนมีปริมาณ free SH สูงขึ้น และโครงสร้างของโปรตีนเกิดการคลี่ออกบางส่วน (partially unfold) (Xiong et al., 2018) ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Xiong et al. (2018) ที่พบว่าการดัดแปรโปรตีนถั่วลันเตาด้วยอัลตราซาวด์ทำให้โปรตีนมีปริมาณ SH สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปร อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลของระยะเวลาการดัดแปรที่ 30 และ 60 นาที พบว่า ปริมาณ free SH ของตัวอย่างไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) การเสียสภาพธรรมชาติของโมเลกุลโปรตีนโดย

โครงสร้างเกิดการคลี่ออกออกบางส่วนจากผลของการใช้อัลตราซาวด์มีความสัมพันธ์กับการปรับปรุงสมบัติเชิงหน้าที่ คือ สมบัติการละลาย การเกิดโฟม และการเป็นอิมัลซิไฟเออร์ของโปรตีนถั่วเขียวไอโซเลทซึ่งได้อธิบายไว้ในส่วนต่อไป

**Table 1** Free sulfhydryl content of mung bean protein isolate after ultrasound modification at 30 and 60 min

| Samples | Free sulfhydryl content (μmol/g) |
|---|---|
| Control | 6.40±0.75[a] |
| 30 min | 9.87±0.15[b] |
| 60 min | 10.47±0.21[b] |

*Means±SD followed by different superscripts are significantly different ($p \leq 0.05$)

*สมบัติการละลาย*

Fig. 1 แสดงให้เห็นว่าการดัดแปรโปรตีนด้วยอัลตราซาวน์ทำให้โปรตีนมีความสามารถในการละลายที่สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปร สอดคล้องกับงานวิจัยของ Jambrak et al. (2008) ที่พบว่าการใช้อัลตราซาวด์ความถี่ 20 และ 40 kHz ที่ระยะเวลา 15 และ 30 นาที ช่วยเพิ่มความสามารถในการละลายของโปรตีนเวย์ไอโซเลทให้สูงขึ้น การดัดแปรโปรตีนด้วยอัลตราซาวด์ทำให้โครงสร้างของโปรตีนเกิดการคลี่ออกบางส่วน ส่งผลให้ส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic part) ของกรดอะมิโนที่อยู่ด้านในโมเลกุลโปรตีนสามารถจับกับน้ำได้ นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโปรตีนที่เกิดขึ้นยังทำให้เกิดโมเลกุลที่มีประจุ ($NH_4^+$, $COO^-$) เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้การเกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างโปรตีนและน้ำสูงขึ้น (Jambark et al, 2008) อย่างไรก็ตามพบว่าการเพิ่มระยะเวลาการดัดแปรจาก 30 นาทีเป็น 60 นาที ไม่ได้ทำให้ค่าความสามารถในการละลายของโปรตีนเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

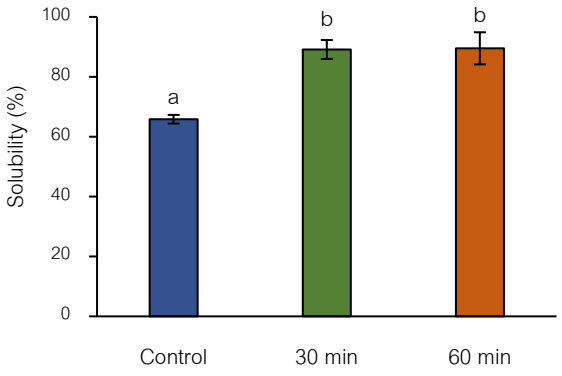



**Fig. 1** Solubility of mung bean protein isolate after ultrasound modification at 30 and 60 min. Different letters above bars indicate significant ($p \leq 0.05$) differences among treatments

*สมบัติสมบัติของโฟม*

การดัดแปรโปรตีนด้วยอัลตราซาวน์ที่ระยะเวลา 30 และ 60 นาที ทำให้ค่า FA ของโปรตีนถั่วเขียวไอโซเลทเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (Fig. 2A) เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปร เมื่อพิจารณาค่า FS พบว่า การดัดแปรทำให้โปรตีนถั่วเขียวมีค่า FS เพิ่มสูงขึ้น แต่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

(Fig. 2B) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การดัดแปรโปรตีนด้วยอัลตราซาวน์ที่ระยะเวลา 30 และ 60 นาที สามารถช่วยปรับปรุงสมบัติของโฟมโดยเฉพาะอย่างยิ่งค่า FA ของโปรตีนถั่วเขียวไอโซเลทได้ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโปรตีนจากผลของอัลตราซาวด์ ทำให้โปรตีนเสียสภาพธรรมชาติเกิดการคลายเกลียวบางส่วน ส่งผลให้โปรตีนสามารถถูกดูดซับที่พื้นผิวระหว่างอากาศและน้ำ (air-water interface) ได้ดีขึ้น (Zhang et al, 2011) นอกจากนี้ยังอาจเนื่องมาจากเมื่อโมเลกุลโปรตีนเกิดการคลายเกลียวบางส่วนทำให้หมู่ที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) มาอยู่ที่พื้นผิวของโมเลกุลโปรตีนเพิ่มมากขึ้น การเพิ่มขึ้นของหมู่ที่ไม่ชอบน้ำบนพื้นผิว (surface hydrophobicity) ของโมเลกุลโปรตีนจะช่วยลดแรงตึงผิว (interfacial tension) เพิ่มอัตราการดูดซับโปรตีนที่พื้นผิวระหว่างน้ำและอากาศ (Zhang et al., 2011; Xiong et al., 2018) อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองพบว่า การเพิ่มระยะเวลาการดัดแปรจาก 30 นาทีเป็น 60 นาที ไม่ได้ทำให้ค่า FA ของตัวอย่างเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

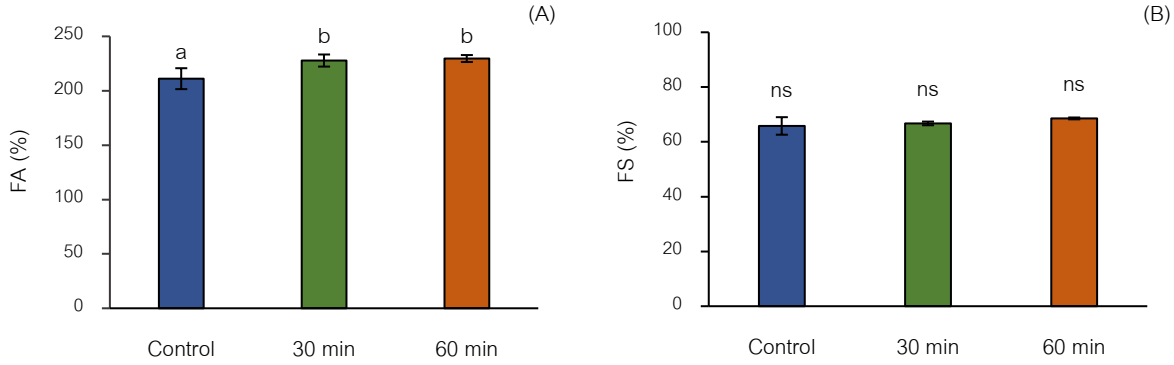



**Fig. 2** FA (A) and FS (B) of mung bean protein isolate after ultrasound modification at 30 and 60 min. Different letters above bars in each graph indicate significant ($p \leq 0.05$) differences among treatments. Ns means no significant difference ($p > 0.05$).

*สมบัติการเป็นอิมัลซิไฟเออร์*

ผลการทดลองพบว่า ตัวอย่างโปรตีนที่ผ่านการดัดแปรด้วยอัลตราซาวน์มีค่า EAI (Fig. 3A) และ ESI (Fig. 3B) สูงกว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านการดัดแปรอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) สอดคล้องกับจากงานวิจัยของ Jambark et al. (2009) ที่รายงานว่าการดัดแปรด้วยอัลตราซาวน์ทำให้ค่า EAI ของโปรตีนถั่วเหลืองไอโซเลทและโปรตีนถั่วเหลืองเข้มข้นสูงขึ้น การเพิ่มขึ้นของค่า EAI และ ESI เนื่องมาจากโมเลกุลโปรตีนที่เกิดการคลายเกลียวบางส่วนและส่วนที่ไม่ชอบน้ำถูกปลดปล่อยออกมาที่พื้นผิวโมเลกุลโปรตีนเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากกระบวนการดัดแปร ทำให้โมเลกุลโปรตีนนั้นถูกดูดซับที่พื้นผิวระหว่างน้ำและน้ำมัน (oil-water interface) ได้รวดเร็วขึ้นและเกิดอันตรกิริยาระหว่างโปรตีนกับโปรตีนที่เสถียร (Jambrak et al., 2009) จึงสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติการเป็นอิมัลซิไฟเออร์ของโปรตีนถั่วเขียวได้ เมื่อพิจารณาผลของระยะเวลาการดัดแปร พบว่า ค่า EAI ของตัวอย่างที่ผ่านการดัดแปรระยะเวลา 30 และ 60 นาที ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ในขณะที่ค่า ESI ของตัวอย่างที่ผ่านการดัดแปรระยะเวลา 60 นาทีต่ำกว่าตัวอย่างที่ผ่านการดัดแปร 30 นาที ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปริมาณหมู่ไฮโดรโฟบิกที่มากขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัสของโปรตีนเมื่อระยะเวลาการดัดแปรสูงขึ้น เหนี่ยวนำทำให้เพิ่มการจับกันเองนำไปสู่การรวมมวลของหยดไขมัน ทำให้ค่า ESI ของตัวอย่างที่ผ่านการดัดแปรที่ระยะเวลา 60 นาทีมีค่าต่ำลง (Hu et al., 2015)

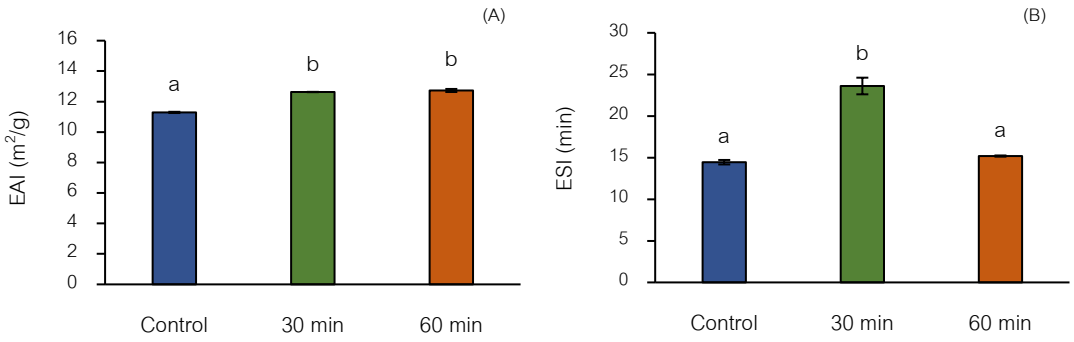



**Fig. 3** EAI (A) and ESI (B) of mung bean protein isolate after ultrasound modification at 30 and 60 min. Different letters above bars in each graph indicate significant ($p \leq 0.05$) differences among treatments

## สรุป

การดัดแปรโปรตีนถั่วเขียวไอโซเลทด้วยอัลตราซาวน์ที่ระยะเวลา 30 และ 60 นาที ทำให้โครงสร้างของโปรตีนเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพธรรมชาติและเกิดการคลายเกลียวบางส่วนจึงช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงหน้าที่ คือ ความสามารถในการละลาย สมบัติของโฟม และสมบัติการเป็นอิมัลซิไฟเออร์ของโปรตีนถั่วเขียวให้สูงขึ้นได้ การเพิ่มระยะเวลาการดัดแปรจาก 30 นาทีเป็น 60 นาที ไม่ได้ทำให้ค่าความสามารถในการละลาย สมบัติของโฟม และสมบัติการเป็นอิมัลซิไฟเออร์ของโปรตีนถั่วเขียวเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ อีกทั้งยังทำให้ค่า ESI ของตัวอย่างลดลง การดัดแปรโปรตีนถั่วเขียวไอโซเลทด้วยอัลตราซาวน์ที่ระยะเวลา 30 นาที จึงเป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนถั่วเขียวในงานวิจัยนี้ อย่างไรก็ตามเป็นไปได้ว่าการดัดแปรโปรตีนถั่วเขียวไอโซเลทด้วยอัลตราซาวน์สามารถใช้ระยะเวลาที่สั้นกว่า 30 นาทีเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนได้ ซึ่งผู้วิจัยจะดำเนินการศึกษาต่อไป

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่สนับสนุนเครื่องมือ อุปกรณ์วิทยาศาสตร์และห้องปฏิบัติการสำหรับการทำวิจัยนี้

## เอกสารอ้างอิง

ฐิติพร แก้วอัมพร. 2549. ผลของ pH และสารตกตะกอนต่อคุณสมบัติเชิงหน้าที่ของผลิตภัณฑ์โปรตีนจากถั่วเขียว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Brishti, F.H., Chay, S.Y., Muhammad, K., Ismail-Fitry, M.R., Zarei, M., Saari, N. 2020. Effects of drying techniques on the physicochemical, functional, thermal, structural and rheological properties of mung bean (*Vigna radiata*) protein isolate powder. Food Res. Int. 138: 109783.

Jambrak, A.R., Mason T.J., Lelas V., Herceg Z., Herceg I.L. 2008. Effect of ultrasound treatment on solubility and foaming properties of whey protein suspensions. J. Food Eng. 86:281–287. doi:10.1016/j.foodres.2020.109783

Jambrak, A.R., Lelas, V., Mason, T. J., Krešić, G., Badanjak, M. 2009. Physical properties of ultrasound treated soy proteins. J. Food Eng. 93: 386–393. doi:10.1016/j.jfoodeng.2009.02.001

Hu, H., Cheung, I.W.Y., Pan, S., Li-Chan, E.C.Y. 2015. Effect of high intensity ultrasound on physicochemical and functional properties of aggregated soybean β-conglycinin and glycinin. Food Hydrocolloids 45: 102–110. doi:10.1016/j.foodhyd.2014.11.004

Malik, M.A., Sharma, H.K., Saini, C.S. 2017. High intensity ultrasound treatment of protein isolate extracted from dephenolized sunflower meal: Effect on physicochemical and functional properties. Ultrason Sonochem. 39: 511–519. doi: 10.1016/j.ultsonch.2017.05.026

Thompson, L.U. 1977. Preparation and evaluation of mung bean protein isolates. J. Food Sci. 42 202–206. doi.org/10.1111/j.1365-2621.1977.tb01252.x

Xiong.T, Xiong, W., Ge, M., Xia, J., Li, B., Chen, Y. 2018. Effect of high intensity ultrasound on structure and foaming properties of pea protein isolate. Food Res. Int. 109: 260–267. doi: 10.1016/j.foodres.2018.04.044

Zhao, J., Dong, F., Li, Y., Kong, B., Liu, Q. 2015. Effect of freeze–thaw cycles on the emulsion activity and structural characteristics of soy protein isolate. Process Biochem. 50: 1607–1613. doi: 10.1016/j.procbio.2015.06.021

Zhang, H., Claver, I.P., Zhu, Ke-X, Zhou, H. 2011. The effect of ultrasound on the functional properties of wheat gluten. Molecules 16: 4231–4240. doi: 10.3390/molecules16054231

# Sleeping quality survey: A comprehensive market survey and consumer study on sleep quality and factors affecting sleep quality in Thai consumers

Konrawat Daengprapai*, Withida Chantrapornchai, Aussama Soontrunnarudrungsri
Department of Product Development, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand
*Corresponding author. E-mail address: Konrawat.d@ku.th

**Abstract**

This research aims to survey and assess sleep quality, factors affecting sleep quality, insomnia severity, consumer sleep behavior, and a comprehensive market related to sleeping. The survey was conducted in December 2023 with 100 consumers, aged 18 years old and over. The questionnaire consisted of 4 parts 1) personal data, 2) factors affecting sleep quality (physical factors, mental factors, environmental factors, and personal activity) 3) The Pittsburgh Sleep Quality Index (PSQI: Thai version), which is the scale to assess sleep quality, and 4) The Insomnia Severity Index (ISI: Thai version), which is the scale to assess the severity level of insomnia symptoms. Data was collected and analyzed using a statistics program. Results revealed that the majority of the consumers were female (60%), their age was in a range between 26-35 years (33%), 52% of consumers had poor sleep quality, and the severity level of insomnia of mild degree (26%), moderate level (14%), and severe level (5%). Factors affecting sleep quality were physical factors (52%), personal activity (56%), environmental factors (51%), and mental factors (47%). The information from this research can be used to study consumer sleep behavior, sleep quality, and sleep market trends.

**Keywords**: Factors affecting sleep quality, Insomnia, Market trends, Sleep behavior, Sleep quality

## Introduction

Sleep is a condition of the body and mind that typically recurs for several hours every night, in which the nervous system is relatively inactive, the eyes closed, and the postural muscles relaxed. Sleep is directly related to health and quality of life as a basic need for humans to balance, repair, and recharge the body and mind. The survey conducted by the Department of Mental Health in 2016 revealed a significant prevalence of insomnia problems among Thai people. The findings indicated that approximately 30–40% of the population, experienced insomnia during the night or had difficulty obtaining sufficient sleep. This translates to roughly 1 in 5 individuals being affected by insomnia. Sleep problems include difficulty falling asleep (difficulty sleeping), taking a long time to fall asleep, and waking up often sleeping in the middle of the night or waking up earlier than you should. There is less sleep duration each night than the body needs and often spend time sleeping during the day (Buysse et al., 1989; Christensen et al., 2016; Triruangwararat, 2017). Insomnia is a common sleep disorder characterized by persistent difficulty falling or staying asleep, resulting in impaired daytime functioning. It can have various causes, including stress, anxiety, depression, medical conditions, and certain medications. Insomnia can significantly impact an individual's overall health and well-being, leading to fatigue, irritability, difficulty concentrating, and impaired cognitive performance (Janthayanont et al., 2012). Lack of sleep also increases the risk of mental health and physical health problems, such as cardiovascular disease, immunocompromised, anxiety, and depression, including substance abuse (Taylor et al., 2003). Other factors interfere with and cause sleep problems, including physical factors such as health problems, discomfort, and congenital diseases, as well as emotional and mental factors such as stress, anxiety, and depression (Chinvararak et al., 2018). Environmental factors in the area of residence, such as light and noise, are factors that make it difficult to fall asleep and wake up earlier than desired (Pollak, 1993; Halperin, 2014). It can be seen that the quality of sleep is related to many factors, including the body, mind, environment, and sleeping habits. To break the cycle of stress and insomnia, it's important to address both problems. This may involve managing stress through relaxation techniques and improving sleep habits by establishing a regular sleep schedule and therapy. If you are experiencing signs of insomnia, consider using a sleep quality questionnaire like the PSQI or ISI to assess your sleep and discuss the results with your doctor or sleep specialist. These tools can provide valuable insights into your sleep patterns and help you receive appropriate treatment for your insomnia. Currently, the growing demand for products and services related to improved sleep quality and stress relief reflects a significant trend in the global market. Consumers are increasingly seeking solutions to address sleep-related issues. There is a growing awareness among consumers about the importance of sleep for physical and mental health and the willingness of consumers to invest in their sleep health.

### *Market survey*

The results from the Mintel GNPD database show that the world is currently facing a number of geopolitical events and economic challenges that are causing significant stress and anxiety among consumers. These include the ongoing COVID-19 pandemic and the rising cost of living. These stressors are having a

negative impact on mental health, with many people experiencing increased anxiety, depression, and insomnia. In Japan, a recent survey found that 39% of consumers reported difficulty sleeping as the main physical effect of stress in the last 12 months. This condition, sometimes referred to as “COVID-somnia” is a result of the ongoing uncertainty and disruption caused by the pandemic. In response to these mental health challenges, consumers are increasingly seeking out products and services that can help them improve their mood, sleep better, and reduce stress. This includes products such as supplements, sleep aids, and relaxation techniques (Dynata, 2020). Businesses that can offer products or services that address these consumer needs are likely to see increased demand. This could include companies that sell natural health products, sleep-related products, and stress relief products. The results show that The Asia-Pacific (APAC) region has a significant sleep deprivation problem, with many individuals not getting enough rest. This presents an opportunity for food and beverage manufacturers to develop more products that offer sleep benefits. Currently, less than 1% of sleep product launches in APAC focus on sleep benefits, with tea, vitamins, minerals, and supplements (VMS), and sleep aids dominating the market (Rakuten, 2020).

*Consumer behavior survey*

The Mintel study highlights the growing trend of consumers seeking to improve their sleep quality through various means, including supplements and food and beverage products. The results found that 42% of Chinese consumers have taken supplements to improve their sleep quality. This indicates a significant demand for sleep-enhancing supplements in the Chinese market. 37% of Thai consumers find the benefit of improving sleep quality appealing when choosing food and drink products (Michelle, 2021). This suggests that Thai consumers are receptive to food and beverage products that promote better sleep. Currently, consumers need alternative products that provide a safe and effective for those seeking a natural approach to improving their sleep quality. This has led to the rise in popularity of sleep-related self-care products and services highlights the growing awareness among consumers about the importance of sleep and the desire for personalized solutions to improve sleep quality. This trend is likely to continue as consumers seek ways to prioritize their well-being and achieve a better night’s sleep.

## Materials and Methods

*Market research*

This qualitative research data collection utilizes the Mintel database to gather qualitative data on sleep health, including consumer behaviors regarding sleep quality, stress relief products, and sleep market trends.

*Sleep quality survey*

The study designed an online self-report questionnaire was used to collect data from the consumers. The questionnaire was created using Google’s form platform. The target group for the study consisted of 100

Thai consumers, both males and females aged 18 years old and over. The Inclusion Criteria: Participants were required to read and complete the questionnaire by themselves, and be able to communicate and read in Thai. The Exclusion Criteria: Participants who are not Thai nationals and under 18 years of age. The questionnaire consisted of 4 parts:

1) The demographic questionnaire consists of gender, age, occupation, and average monthly income.

2) The questionnaire on factors disturbing sleep (Ramsiri, 2000), and factors influencing sleep by Miller (Miller, 1999), was divided into 4 components physical, mental, environmental, and personal activity.

3) The Pittsburgh Sleep Quality Index: PSQI, translated and adapted from Jirapramukpitak and Tanchaisawat (1997), comprises 7 components: subjective sleep quality, sleep latency, sleep duration, habitual sleep efficiency, sleep disturbances, use of sleeping medication, and effects on daytime activities. The score from each component contributes to the Global PSQI score, ranging from 0 to 21 points, a total score less than or equal to 5 points indicates good sleep quality, while a total score greater than 5 points means poor sleep quality (Buysse et al., 1989).

4) The Insomnia Severity Index (ISI) scale was created by Morin, ISI is an assessment scale to assess the severity level of insomnia symptoms, ranging from 0 to 28 points, the total score of 0 to 7 points indicates the patient has no symptoms of insomnia, 8 to 14 points indicates mild degree, 15 to 21 points indicates the moderate level and 22 to 28 points indicates severe level.

*Statistical analyses*

Data were analyzed using a statistics program by percentage, mean, and standard deviation, analyzing the correlation with Pearson product-moment correlation statistics coefficient tested at a significance level of 0.5

## Results and Discussion

*The demographic information*

The majority of the respondents were female 60%. A significant portion of the respondents 33% were between the ages of 26–35 years old. The most common occupation among the respondents was employees and self-employed 25%. A notable percentage of the respondents 26% had an average monthly income of more than 50,000 baht.

*Factors disturbing sleep*

The results showed that the personal activity factor is the factors accounts for 56% of sleep disturbances, with the majority 89% caused by using electronic devices before bedtime, 76% of respondents reported feeling uncomfortable as a disturbing factor, 76% of those who found environmental factors disturbing

cited noise as the main cause, and 80% of those who found mental factors disturbing cited feeling anxious as the main cause as shown in Table 1.

**Table 1** The factors disturbing sleep quality (*n* = 100)

| Factors disturbing sleep* | Percentage (%) | Score (Mean±SD) | Meaning |
|---|---|---|---|
| Physical | 52 | 19.8±7.52 | |
| Feeling uncomfortable | 76 | 2.37±1.01 | Moderately |
| Mental | 47 | 16.78±7.02 | |
| Anxiety | 80 | 2.55±1.05 | Very disturbing |
| Environmental | 51 | 19.95±9.95 | |
| Noise | 76 | 2.37±1.08 | Moderately |
| Personal activity | 56 | 18.49±5.39 | |
| Using electronic devices before bedtime | 89 | 2.49±0.82 | Very disturbing |

* Data are displayed as a percentage, mean, and standard deviation.

*Sleep quality*

The results of the sleep quality assessment within the past 1 month by The Pittsburgh Sleep Quality Index: PSQI indicate that a significant portion of the consumers 52% had poor sleep quality. Additionally, a substantial number of individuals 33% perceived their sleep quality as relatively poor, and a small percentage 4% perceived their sleep quality as very poor. The most common bedtime was 11:00 p.m., and the most common wake-up time was 7:00 a.m. Regarding the time taken to fall asleep, 36% of consumers took 16-30 minutes, and 29% took 31-60 minutes. The majority of consumers sleep 5-6 hours per night and have a sleep efficiency of more than 85%. Most consumers have never used sleeping pills or drugs to help them sleep, and their sleep does not affect their daytime activities. The data are displayed as shown in Table 2.

**Table 2** The sleep quality of 100 consumers, classification of 7 components of PSQI (*n* = 100)

| PSQI Components | Punctuation | Meaning | Percentage (%) | PSQI score (Mean±SD) |
|---|---|---|---|---|
| PSQI global score | 5 or more | Poor quality | 52 | 7.01±4.06 |
| PSQI sleep quality | 2 | Fairly bad | 33 | 1.22±0.81 |
| | 3 | Very bad | 4 | 1.23±0.82 |
| PSQI sleep latency | 2 | 31–60 minutes | 29 | 0.98±0.82 |
| | 3 | > 60 minutes | 1 | 0.99±0.84 |

**Table 2** (Continued) The sleep quality of 100 consumers, classification of 7 components of PSQI ($n$ = 100)

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| PSQI duration | 2 | 5–6 hours | 55 | 1.62±0.83 |
| | 3 | < 5 hours | 10 | 1.63±0.85 |
| PSQI efficiency | 2 | 65–74% | 19 | 0.96±1.13 |
| | 3 | < 65% | 14 | 0.97±1.14 |
| PSQI sleep disturbance | 1 | Slightly | 73 | 1.19±0.48 |
| | 2 | Moderately | 23 | 1.20±0.49 |
| PSQI hypnotic drugs | 2 | 1 or 2 times a week | 2 | 0.41±0.94 |
| | 3 | 3 or more times a week | 3 | 0.42±0.96 |
| PSQI daytime dysfunction | 2 | Slightly | 8 | 0.27±0.61 |
| | 3 | Moderately | 9 | 0.28±0.63 |

* Data are displayed as a percentage, mean, and standard deviation.

*Exploring gender differences in sleep quality*

Based on the results of the sleep quality study, females have better sleep efficiency than males ($p$ < .05*)*. This means that females are able to spend a higher percentage of their time in bed sleeping, compared to males. Females have a higher number of hours spent in bed than males, males spend between 5–10 hours in bed, while females spend between 6–11 hours in bed. Males have a shorter duration of sleep, with most spending between 3–8 hours asleep. Females have a longer duration of sleep, with most spending between 4–10 hours asleep. These findings suggest that females may have better sleep quality compared to males. However, it's important to note that this study only looked at two specific aspects of sleep: sleep efficiency and time spent in bed. Other factors, such as sleep disturbances, daytime sleepiness, and subjective sleep quality, were not examined. Therefore, more research is needed to fully understand the differences in sleep quality between males and females and the factors that contribute to these differences. The data are displayed as shown in Table 3.

**Table 3** The gender differences in sleep quality, classification of 7 components of PSQI ($n$ = 100)

| PSQI components | Male (Mean±SD) | Female (Mean±SD) | $p$-value* |
|---|---|---|---|
| PSQI global score$^{ns}$ | 7.65±4.69 | 6.58±3.55 | 0.19 |
| PSQI sleep quality$^{ns}$ | 1.20±0.97 | 1.22±0.69 | 0.92 |
| PSQI sleep latency$^{ns}$ | 2.33±2.04 | 2.18±1.79 | 0.71 |
| PSQI duration$^{ns}$ | 1.73±0.78 | 1.55±0.87 | 0.30 |
| PSQI efficiency$^{*}$ | 1.40±1.24 | 0.65±0.95 | 0.00 |
| PSQI sleep disturbance$^{ns}$ | 5.90±4.26 | 6.60±4.12 | 0.43 |
| PSQI hypnotic drugs$^{ns}$ | 0.40±1.01 | 0.38±0.01 | 0.93 |
| PSQI daytime dysfunction$^{ns}$ | 1.93±2.10 | 1.48±1.45 | 0.22 |

* Significant at the 0.05 level, $^{ns}$ Non-significant

*Correlation between sleep quality and factors affecting sleep quality*

The results of the correlation analysis indicate that sleep quality is significantly correlated with physically disturbing factors and mentally disturbing factors, but not with environmental and activity disturbing factors. This suggests that physical and mental disturbances are more likely to disrupt sleep quality than environmental and activity-related factors. The positive correlation between sleep quality and physically disturbing factors means that as physical disturbances increase, sleep quality tends to decrease. This is consistent with the finding that 76% of consumers felt uncomfortable, 68% had difficulty breathing, and 80% felt anxious. These physical disturbances can make it difficult to fall asleep, stay asleep, or get restful sleep. The positive correlation between sleep quality and mentally disturbing factors suggests that as mental disturbances increase, sleep quality tends to decrease. This is consistent with the finding that 79% of consumers had stress. Mental disturbances, such as stress, anxiety, and worry, can interfere with sleep by making it difficult to relax and quiet the mind. The lack of correlation between sleep quality and environmental disturbing factors and activity disturbing factors suggests that these factors are not significantly associated with sleep quality. This could be due to the fact that these factors are more likely to affect sleep quality in specific situations or for certain individuals. For example, noise may be more disruptive to sleep in a quiet environment than in a noisy environment. Overall, the results of the correlation analysis suggest that physical and mental disturbances are more likely to disrupt sleep quality than environmental and activity-related factors. This highlights the importance of addressing physical and mental health issues in order to improve sleep quality as shown in Table 4

**Table 4** The Correlation Coefficient and probability value of the correlation between sleep quality and factors disturbing sleep (*n* = 100)

| Factors disturbing sleep* | Sleep quality | |
|---|---|---|
| | r | *P*-value |
| Physical | 0.22* | .05 |
| Mental | 0.35** | .01 |
| Environmental | 0.19 | .05 |
| Personal activity | 0.19 | .05 |

* Significant at the 0.05 level, ** Significant at the 0.01 level.

*Severity level of insomnia*

The results can be concluded that insomnia is a prevalent issue among consumers, with 45% of them experiencing symptoms. The severity of insomnia symptoms varies, with the majority 55% having no clinically significant insomnia, followed by subthreshold insomnia 26%, clinical insomnia (moderate severity) 14%, and clinical insomnia (severe) 5%. Among the various insomnia symptoms, waking up early in the morning was found to be the most severe. This suggests that a significant proportion of consumers struggle with early

morning awakenings, which can disrupt their sleep patterns and lead to daytime fatigue and impaired functioning. The data are displayed as shown in Table 5.

**Table 5** The severity level of insomnia, classification of 7 components of ISI ($n$ = 100)

| ISI Components* | Percentage (%) | ISI score (Mean±SD) | Meaning |
|---|---|---|---|
| ISI overall score | 45 | 8.10±6.80 | A mild degree of insomnia |
| Difficulty falling asleep | 58 | 1.03±1.11 | Moderately |
| Waking up during the night | 58 | 1.05±1.14 | Moderately |
| Waking up early in the morning | 85 | 1.47±1.00 | Fully |
| Worried/distressed about sleep problem | 44 | 0.83±1.08 | Not much |
| Interfere daily functioning | 54 | 1.01±1.13 | Moderately |
| Noticeable sleeping problem | 43 | 0.83±1.09 | Not much |
| Satisfaction with sleep quality | 57 | 1.88±1.20 | Moderately |

*Data are displayed as a percentage, mean, and standard deviation.

**Conclusions**

Our findings show that Most of the 100 consumers revealed that a majority of them experienced poor sleep quality, with mild insomnia symptoms, and factors that disturbed sleep, both physical and mental, were found to be correlated with poor sleep quality as measured by The Pittsburgh Sleep Quality Index (PSQI). Specific factors identified as contributing to poor sleep quality included using electronic devices before bedtime and experiencing stress and anxiety. The study suggests that certain behaviors and psychological factors can negatively impact sleep quality. To improve sleep quality, it may be beneficial for individuals to reduce screen time before bed, manage stress, and address any underlying anxiety issues. However, further research is indeed necessary to gain a deeper understanding of the causes and risk factors for insomnia, as well as to develop an effective questionnaire for consumer information. By addressing these areas of research and developing an effective consumer information questionnaire. Key insights from the sleep-related market survey found that Stress is a major cause of consumer's sleep issues. This highlights the need for products that effectively address stress reduction to improve sleep quality, consumers are increasingly seeking natural and organic sleep products, indicating a growing preference for products perceived as safe and consumers prioritize products that demonstrate efficacy in improving sleep quality and emphasize the absence of side effects from long-term use. This suggests that manufacturers should focus on developing products with proven effectiveness and a strong safety profile. Overall, the trend toward natural and organic sleeping products presents significant opportunities for markets to explore the potential of sleep health products.

**Acknowledgments**

The authors gratefully thank The Department of Product Development, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University for the scholarship of the 62nd Kasetsart University Annual Conference and my advisor Asst. Prof. Aussama Soontrunnrudrungsri, Ph.D., and my co-advisor Asst. Prof. Withida Chantrapornchai, Ph.D. for assistance in this research and thank respondents for cooperation in this research.

**References**

Arizton. 2021. Sleep Market: Global outlook and forecast 2021-2026. Thailand. https://www.arizton.com/market-reports/sleep-market-size-analysis#:~:text=SLEEP%20MARKET%20TREND%20ANALYSIS%201%20Amazon%2C%20Xiaomi%2C%20and,gaining%20high%20traction%20in%20the%20industry.%20More%20items, 21 November 2023.

Bastien, C.H., Vallieres, A., Morin, C.M. 2001. Validation of the insomnia severity index as an outcome measure for insomnia research. Sleep Med. 2: 297–307.

Buysse, D.J., Reynolds, C.F., Monk, T.H., Berman, SR. Kupfer, D.J. 1989. The Pittsburgh sleep quality index: a new instrument for psychiatric practice and research. Psychiatry Res. 28: 193–213.

Grebow, J. 2022. Sleep support surges in 2022: 2022 Ingredient trends for food, drinks, dietary supplements, and natural products. Thailand. https://www.nutritionaloutlook.com/view/sleep-support-surges-in-2022-2022-ingredient-trends-for-food-drinks-dietary-supplements-and-natural-products, 21 November 2023.

Guan Yu, L. 2021. Sleep well: Interest in sleep support products gaining traction in APAC but firms cite marketing challenges. Thailand. https://www.foodnavigator-asia.com/Article/2021/09/06/Sleep-well-Interest-in-sleep-support-products-gaining-traction-in-APAC-but-firms-cite-marketing-challenges, 21 November 2023.

Laine Bergeson, B. 2019. Why Do I Always Wake Up at Night to Use the Bathroom. Thailand. https://experiencelife.lifetime.life/article/why-do-i-always-wake-up-at-night-to-use-the-bathroom/, 21 November 2023.

Michael, J. 2012. Men and Women: Different When It Comes to Sleep. Thailand. https://www.psychologytoday.com/us/blog/sleep-newzzz/201202/men-and-women-different-when-it-comes-sleep, 21 November 2023.

Michelle, T. 2021. Nutrition watch: sleep health in APAC. Thailand. https://clients.mintel.com/insight/nutrition-watch-sleep-health-in-apac?fromSearch=%3Ffreetext%3DSleep%26resultPosition%3D4, 14 November 2023.

Miller, C.A. 1999. Nursing care of elderly adult: theory and practices, 3rd ed. Lippincott. PA, USA.

Morin, C.M., Rodrigue, S, Ivers, H. 2002. Insomnia, stress, and coping skills. Sleep 25: A31–A32.

Pacheco, D., Rehman, A. 2023. Pain and Sleep. Thailand. https://www.sleepfoundation.org/physical-health/pain-and-sleep, 21 November 2023.

Peters, B. 2023. Why Do I Fall Asleep So Fast. Thailand. https://www.verywellhealth.com/could-falling-asleep-too-fast-be-a-sleep-problem-3015146#:~:text=In%20healthy%20people%2C%20sleep%20latency%20%28the%20time%20until,could%20signal%20an%20unhealthy%20level%20of%20sleepiness%2C%20too., 21 November 2023.

Summer, J., Singh, A. 2023. Anxiety and Insomnia. Thailand. https://www.sleepfoundation.org/mental-health/anxiety-vs-insomnia, 21 November 2023.

Suni, E., Debanto, J. 2022. Sleep and overeating. Thailand. https://www.sleepfoundation.org/physical-health/sleep-and-overeating, 21 November 2023.

Suni, E., Singh, A. 2023. How much sleep do you need.Thailand. https://www.sleepfoundation.org/how-sleep-works/how-much-sleep-do-we-really-need, 21 November 2023.

Vivienne, R. 2017. Calm Sleep Mist and Sleep Story. Thailand. https://clients.mintel.com/innovative-product/calm-sleep-mist-and-sleep-story?fromSearch=%3Ffreetext%3DSleep%26resultPosition%3D6, 9 January 2024.

Yunn, L. 2022. Nutrition watch: children's sleep health. Thailand. https://clients.mintel.com/insight/nutrition-watch-children-s-sleep-health?fromSearch=%3Ffreetext%3DSleep%26resultPosition%3D1, 19 January 2024.

# ผลของสารควบคุมความเป็นกรดต่อความคงตัวของครีมจากพืชเพื่อการใช้งานในกาแฟ

## Effect of acidity regulators on stability of plant-based cream for using in coffee

**นวพร มัคสมุทร์, นพรัตน์ ปราบสงบ*, เทพกัญญา หาญศีลวัต**

Navaporn Maksamut, Nopparat Prabsangob*, Thepkunya Harnsilawat

ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Product Development, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: faginrpr@ku.ac.th

**บทคัดย่อ**

ปัจจุบันการบริโภคอาหารจากพืชเป็นแนวโน้มที่ได้รับความนิยม ครีมเป็นผลิตภัณฑ์อิมัลชันที่ใช้ประกอบการชงกาแฟเพื่อปรับสีและรสชาติ ในสภาวะนี้ครีมต้องเผชิญกับความเป็นกรดและอุณหภูมิสูงของกาแฟที่มีผลอย่างมากต่อความคงตัวของครีม งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาครีมเทียมจากพืชเพื่อสุขภาพจากน้ำมันรำข้าวและโปรตีนจากถั่วลันเตาเป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ โดยศึกษาผลของสารควบคุมความเป็นกรด ได้แก่ โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ($NaHCO_3$), ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ($Na_2HPO_4$), และสารผสม $NaHCO_3$:$Na_2HPO_4$ ที่อัตราส่วน 1:1 ที่ปริมาณ 0.25 และ 0.50% พบว่าครีมเทียมที่ใช้ $NaHCO_3$ ปริมาณ 0.25% มีขนาดหยดน้ำมันเล็กที่สุด (3.65±0.61 µm) สัมพันธ์กับความคงตัวต่อการเกิดครีม (50.39±1.58%) ที่มีค่าต่ำกว่าครีมที่ใช้ $Na_2HPO_4$ และยังมีผลชะลอการลดลงของค่า pH และช่วยปรับเพิ่มระดับสีขาวของกาแฟได้ดีกว่าครีมเทียมที่ใช้ $Na_2HPO_4$ การใช้ $NaHCO_3$ ปริมาณ 0.25% ทำให้ได้ครีมเทียมจากพืชที่ดีต่อสุขภาพและสามารถใช้ประกอบการชงกาแฟได้อย่างมีประสิทธิภาพ

**คำสำคัญ**: ครีม, ครีมจากพืช, น้ำมันรำข้าว, โปรตีนจากถั่วลันเตา, สารควบคุมความเป็นกรด

**Abstract**

Presently, consumption of plant-based food is a popular trend. Cream is an emulsion-based product generally used for coffee preparation to adjust color and taste. In this application, cream is exposed to an acidic condition with high temperature of coffee, thereby greatly affecting its stability. This work aimed to develop healthy plant-based cream using rice bran oil and pea protein isolate as emulsifiers. Effect of acidity regulators including sodium hydrogen carbonate ($NaHCO_3$), disodium hydrogen phosphate ($Na_2HPO_4$), and the mixture of $NaHCO_3$:$Na_2HPO_4$ (1:1) at the concentrations of 0.25 and 0.50% was investigated. The cream added with 0.25% of $NaHCO_3$ possessed the smallest sized oil droplets (3.33±0.45 µm), corresponding with creaming stability (50.39±1.58%) which was lower than the cream used $Na_2HPO_4$. Moreover, the cream incorporated with $NaHCO_3$ could retard pH reduction and increase whiteness of coffee more effective than the ones added with $Na_2HPO_4$. The present results suggested that using 0.25% of $NaHCO_3$ provided the healthy plant-based cream which could be employed for coffee preparation effectively.

**Keywords**: Acidity regulator, Cream, Pea protein isolate, Plant-based cream, Rice bran oil

**คำนำ**

ในปัจจุบันร้านกาแฟเป็นธุรกิจที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก โดยในปี พ.ศ. 2566 นี้ มูลค่าตลาดกาแฟมีการเติบโตสูงถึง 60,000 ล้านบาท หรือคิดเป็นอัตราการขยายตัวจากปี พ.ศ. 2564 ถึงร้อยละ 9 โดยกลุ่มกาแฟชงสดหน้าร้านมีมูลค่าคิดเป็น 27,000 ล้านบาท หรือคิดเป็นร้อยละ 45 ของตลาดทั้งหมด (กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม, 2566) จากการสำรวจพฤติกรรมการบริโภคเครื่องดื่มชาและกาแฟในผู้บริโภคจำนวน 161 คน พบว่าผู้บริโภคจำนวน 86 คนหรือคิดเป็นร้อยละ 53 ชอบดื่มกาแฟแบบใส่นม และผู้บริโภคอีก 75 คนที่เหลือ ชอบดื่มกาแฟแบบไม่ใส่นม เนื่องจากต้องการหลีกเลี่ยงไขมันในครีม โดยลักษณะที่ทำให้กังวลในการบริโภคครีมมากที่สุด คือ ปริมาณคอเลสเตอรอล รองลงมาคือ การมีไขมันอิ่มตัว ครีมหรือนมเป็นวัตถุดิบที่จำเป็นต้องมีในการชงกาแฟนมทั้งแบบร้อนและเย็นที่ยังมีจุดที่สามารถพัฒนาให้สามารถตอบสนองความต้องการด้านสุขภาพให้แก่ผู้บริโภคได้ งานวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนาครีมจากพืช โดยเลือกใช้น้ำมันรำข้าวที่เป็นน้ำมันที่มีกรดไขมันอิ่มตัวต่ำ และไม่มีคอเลสเตอรอล ร่วมกับการใช้โปรตีนจากถั่วลันเตา (Pea protein isolate, PPI) ที่เป็นโปรตีนจากพืชใช้เป็นอิมัลซิไฟเออร์เพื่อเป็นทางเลือกให้แก่ผู้ที่แพ้โปรตีนนม อย่างไรก็ตามสภาวะความเป็นกรดและอุณหภูมิสูงของสารละลายกาแฟส่งผลต่อความคงตัวของครีมเนื่องจากการเสียสภาพของ PPI แนวทางที่ช่วยในการเพิ่มความคงตัวของครีมที่ใช้ประกอบการชงกาแฟได้คือ การใช้สารควบคุมความเป็นกรดเพื่อควบคุมการลดลงของ pH ของครีมเมื่อใช้ประกอบการชงกาแฟ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาชนิดและปริมาณของสารควบคุมความเป็นกรดต่อคุณภาพความคงตัวของครีมจากพืชเพื่อการใช้งานในกาแฟ

**อุปกรณ์และวิธีการ**

*วัตถุดิบ*

โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) (บริษัท เช้าท์ ซิตี้ กรุ๊ป จำกัด), ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ($Na_2HPO_4$) (บริษัท เบอร์ลี่ ยุคเกอร์ จำกัด), น้ำมันรำข้าว สูตร Oryzanol 8,000 ppm (ตรา คิง บริษัท น้ำมันบริโภคไทย จำกัด), โปรตีนจากถั่วลันเตา (Pisane C9 pea protein, COSUCRA Groupe Warcoing company), เลซิตินจากถั่วเหลือง (Solec SG-TN A, Solae company), กัวร์กัม (เคมีภัณฑ์)

*การศึกษาผลของสารควบคุมความเป็นกรดต่อลักษณะของครีม*

ศึกษาผลของสารควบคุมความเป็นกรด 3 ชนิด ได้แก่ $NaHCO_3$, $Na_2HPO_4$, และสารผสม $NaHCO_3$:$Na_2HPO_4$ ที่อัตราส่วน 1:1 ที่ปริมาณ 0.25 และ 0.50% ทำการเตรียมครีมจากพืชทั้งหมด 6 สูตร ดัง Table 1 ทำการเตรียมอิมัลชันของครีมจากพืช เริ่มจากเตรียมส่วนที่ละลายในน้ำมัน (น้ำมันรำข้าวและเลซิติน) นำน้ำมันรำข้าวมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60±2°C ก่อนนำเลซิตินลงไปละลาย จากนั้นเตรียมส่วนที่ละลายในน้ำ (PPI, กัวร์กัม, สารควบคุมความเป็นกรด, และน้ำ) โดยนำ PPI กับน้ำ กวนผสมเข้าด้วยกันที่ความเร็วรอบ 400 รอบต่อนาที นาน 1 นาที ก่อนเติมกัวร์กัมลงไปกวนผสมต่อ 5 นาที จากนั้นให้ความร้อนสารละลายจนถึงอุณหภูมิ 60°C เติมสารควบคุมความเป็นกรดลงไปแล้วกวนผสมต่ออีก 5 นาที จากนั้นปั่นผสมส่วนที่ละลายในน้ำและส่วนที่ละลายในน้ำมัน ที่ความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที (Fu et al., 2020) เป็นเวลา 15 นาที ที่อุณหภูมิ 60–65°C ได้เป็นอิมัลชันเบื้องต้นก่อนนำอิมัลชันนี้ไปผ่านเครื่องโฮโมจีไนเซอร์แรงดันสูง (APV-1000, APV Manufacturing, Poland) ที่ความดันรวม 100 บาร์ ทั้งหมด 2 รอบ ที่อุณหภูมิ 60–65°C

**Table 1** Composition of plant-based creams

| Ingredients | Composition (%) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Formula 1 | Formula 2 | Formula 3 | Formula 4 | Formula 5 | Formula 6 |
| Rice bran oil | 10.00 | 10.00 | 10.00 | 10.00 | 10.00 | 10.00 |
| PPI | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| Soy lecithin | 0.50 | 0.50 | 0.50 | 0.50 | 0.50 | 0.50 |
| Guar gum | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.10 |
| $NaHCO_3$ | 0.25 | 0.50 | - | - | 0.125 | 0.25 |
| $Na_2HPO_4$ | - | - | 0.25 | 0.50 | 0.125 | 0.25 |
| Water | 88.15 | 87.90 | 88.15 | 87.90 | 88.15 | 87.90 |

อิมัลชันที่ได้นำไปผ่านการพาสเจอไรส์ที่อุณหภูมิ 80°C นาน 20 วินาที ทำให้เย็นลงถึงอุณหภูมิ 10°C ก่อนเก็บที่อุณหภูมิ 5±2°C เป็นเวลา 18–24 ชั่วโมง แล้วนำไปตรวจสอบสมบัติทางกายภาพและเคมี ดังนี้

*การวัดขนาดอนุภาคหยดน้ำมัน*

วัดขนาดอนุภาคหยดน้ำมันด้วยเครื่อง Mastersizer 3000 (Malvern Panalytical, United Kingdom) ประเมินค่า $d_{4,3}$ ($d_{4,3}=\frac{\sum n_i d_i^4}{n_i d_i^3}$) เมื่อ n; คือ จำนวนอนุภาคหยดน้ำมันที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $d_i$ และวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวของหยดน้ำมันด้วยค่า Span ตาม Equation 1 (Vladisavljevic and Schubert, 2007)

$$\text{Span}=\frac{d_{90}-d_{10}}{d_{50}} \quad (1)$$

Where; $d_{x0}$ is the diameter corresponding to x0 vol.% on a relative cumulative particle size distribution curve. x is the number of vol.%

*การวัดค่าความหนืด*

วัดค่าความหนืดของครีมจากพืชด้วยเครื่อง Brookfield Viscometer (DV-II+ Pro EXTRA) ด้วย Probe S62 ความเร็วรอบ 60 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 15°C

*การวิเคราะห์ความคงตัวในสภาวะเร่ง*

ทดสอบความคงตัวของการเกิดครีมโดยดัดแปลงจากวิธีของ Saharudin et al. (2016) นำครีมใส่ลงในหลอดแก้วก่อนทำการปั่นเหวี่ยง (ยี่ห้อ Hettich รุ่น EBA 20, Germany) ด้วยแรงเหวี่ยง 1,538×g เป็นเวลา 15 นาที ที่อุณหภูมิ 25±2 °C หลังการปั่นเหวี่ยงทำการวัดความสูงของอิมัลชันและส่วนของเซรั่มเพื่อใช้คำนวณระดับการเกิดครีม ตาม Equation 2 (Fadzilah et al., 2020) ดังนี้

$$\%\text{Creaming Index} = \frac{HL}{HE} \times 100 \quad (2)$$

Where; HE is sum of height emulsion, HL is height of lower depleted. Both represent in centimeter (cm) unit.

*การวัดค่า pH*

วัดค่า pH ของครีมด้วย pH meter (Mettler Toledo, Seven Compact) ที่อุณหภูมิ 20–25°C

*การวัดค่าสี*

วัดค่าสีของครีมด้วยเครื่อง HunterLab (UltraScan PRO) เพื่อประเมินค่า L*, a* และ b* โดยใช้แหล่งกำเนิดแสง Daylight (D65) โหมดการวัดแบบสะท้อนแสง และมุมสังเกต 10 ° นำตัวอย่างครีมใส่ลงในคิวเวทท์ควอตซ์ ขนาด 52.5×12.5×45 มิลลิเมตร จนถึงขีดบอกปริมาตร จากนั้นนำไปวางที่เครื่องและวัดค่าสีของตัวอย่าง

*การใช้ครีมประกอบการชงกาแฟ*

*การเตรียมสารละลายกาแฟ*

ทดสอบการใช้ครีมประกอบการชงกาแฟตามวิธีของ Chung et al. (2018) เตรียมสารละลายกาแฟความเข้มข้น 1% (w/v) ด้วยน้ำร้อน (อุณหภูมิประมาณ 90–95°C) จากนั้นนำสารละลายกาแฟที่ได้ผสมเข้ากับครีม อัตราส่วนสารละลายกาแฟ:ครีม เท่ากับ 6:1 โดยปริมาตรแล้วตรวจสอบลักษณะของกาแฟ ดังนี้

*การวัดค่า pH*

วัดค่า pH ของกาแฟด้วย pH meter (Mettler Toledo, Seven Compact) ที่อุณหภูมิ 20–25°C

*การวัดค่าสีและระดับความขาว*

วัดค่าสีของกาแฟด้วยเครื่อง HunterLab (UltraScan PRO) เพื่อประเมินค่า L*, a* และ b* โดยใช้แหล่งกำเนิดแสง Daylight (D65) โหมดการวัดแบบสะท้อนแสง และมุมสังเกต 10 ° นำตัวอย่างกาแฟใส่ลงในคิวเวทท์ควอตซ์ ขนาด 52.5×12.5×45 มิลลิเมตร จนถึงขีดบอกปริมาตร จากนั้นนำไปวางที่เครื่องและวัดค่าสีของตัวอย่าง คำนวณหาค่าระดับความขาว (Whiteness index, WI) ตามวิธีของ Lohman and Hartel (1994) ดัง Equation 3

$$WI=100-\sqrt{(100-L^{*})^{2}+a^{*2}+b^{*2}} \quad (3)$$

*การวัดความสามารถในการขึ้นโฟมและความคงตัวของโฟม*

ทดสอบความสามารถในการขึ้นโฟมและความคงตัวของโฟมโดยดัดแปลงจาก Wang et al. (2022) นำครีม (50 mL) ไปทำให้ร้อนด้วยไมโครเวฟ (กำลังไฟ 800 วัตต์, 35 วินาที) จนตัวอย่างมีอุณหภูมิ 68±2°C เพื่อจำลองการสร้างโฟมนมจากเครื่องชงกาแฟด้วยวิธีการใส่ไอน้ำร้อนลงในนม (Stream injection) จากนั้นใช้เครื่องตีโฟมนม (IKEA, Sweden) ปั่นผสมด้วยความเร็วคงที่ เป็นเวลา 30 วินาที ทำการอ่านปริมาตรโฟมนมที่ 0 ($V_0$) และ 30 ($V_{30}$) นาที คำนวณค่าความสามารถในการขึ้นโฟม (Foaming Capacity, FC) และค่าความคงตัวของโฟม (Foaming Stability, FS) ดัง Equation 4 และ 5 ดังนี้

$$\%FC = \frac{(V_0\text{-}50)}{V_0} \times 100 \quad (4)$$

$$\%FS = \frac{(V_{30}\text{-}50)}{V_0\text{-}50} \times 100 \quad (5)$$

*การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ*

วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลค่าทางกายภาพและเคมีด้วยวิธี Analysis of variance (ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่นทางสถิติร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$) โดยใช้โปรแกรม IBM SPSS Statistics Version 28

**ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง**

*ผลของสารควบคุมความเป็นกรดต่อลักษณะของครีม*

Fig. 1 แสดงผลของสารควบคุมความเป็นกรด 3 ชนิด ได้แก่ $NaHCO_3$, $Na_2HPO_4$, และสารผสมระหว่าง $NaHCO_3$:$Na_2HPO_4$ ที่อัตราส่วน 1:1 ที่ปริมาณ 0.25 และ 0.50% ต่อลักษณะของครีมด้านขนาดหยดน้ำมัน พบว่า ครีมที่ใช้ $NaHCO_3$ มีขนาดหยดน้ำมันเล็กกว่าครีมที่ใช้ $Na_2HPO_4$ ($p \leq 0.05$) โดยครีมที่ใช้ $NaHCO_3$ ปริมาณ 0.25% และใช้สารควบคุมความเป็นกรดผสมที่ปริมาณ 0.25% มีขนาดหยดน้ำมันเล็กที่สุด ($p \leq 0.05$) การเพิ่มปริมาณของสารควบคุมความเป็นกรดส่งผลให้ขนาดหยดน้ำมันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามค่า Span มีแนวโน้มลดลง บ่งชี้ให้เห็นถึงการกระจายตัวของหยดน้ำมันที่สม่ำเสมอของตัวอย่างครีม โดยอิมัลชันความคงตัวที่ดีมักประกอบด้วยหยดน้ำมันขนาดเล็กและมีค่า Span ต่ำ (McClements, 2015)

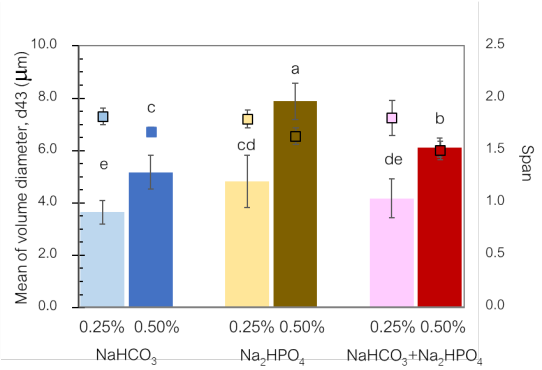



**Fig. 1** Effects of acidity regulators on mean volume oil droplet size (bar chart) and span (dot chart) of cream samples. Different letters indicate significant difference between mean droplet diameter ($p \leq 0.05$).

Fig. 2 แสดงผลของสารควบคุมความเป็นกรดต่อลักษณะต่าง ๆ ของครีม ได้แก่ ความหนืด ความคงตัวที่ระยะเวลาการเก็บรักษาต่าง ๆ ต่อการเกิดครีม และลักษณะปรากฏ การเพิ่มปริมาณสารควบคุมความเป็นกรดมีผลทำให้ความหนืดของครีมเพิ่มขึ้น ($p \leq 0.05$) โดยครีมที่ใช้ $NaHCO_3$ ร่วมกับ $Na_2HPO_4$ ปริมาณ 0.25% ให้ความหนืดต่ำที่สุด เท่ากับ 16.67±0.52 cPs ($p \leq 0.05$) และครีมที่ใช้ $Na_2HPO_4$ ปริมาณ 0.50% ให้ความหนืดสูงที่สุด เท่ากับ 20.92±0.36 cPs

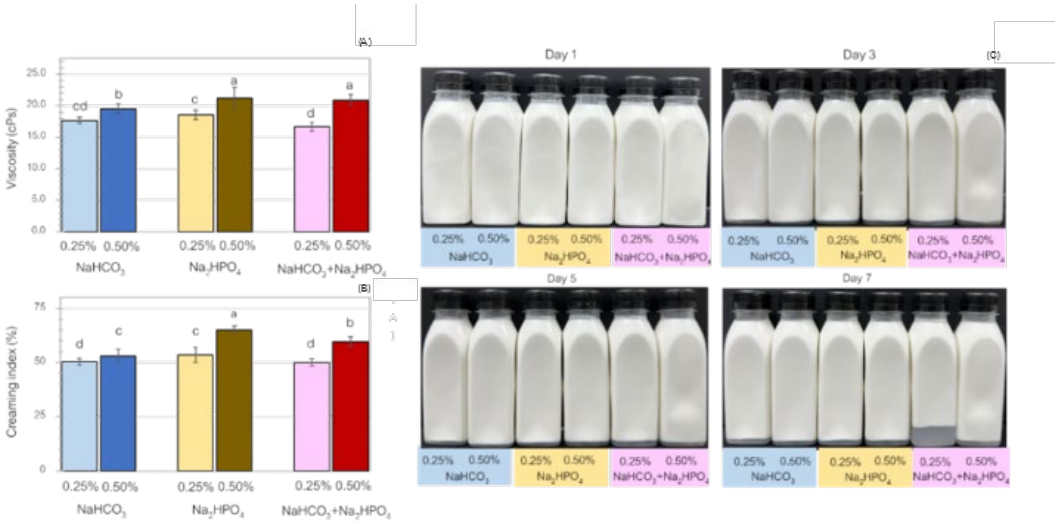



**Fig. 2** Effects of acidity regulators on (A) viscosity, (B) creaming index, and (C) appearance after 7 days of storage of cream samples. In subfigure (a) and (b) different letters indicate significant difference between mean values ($p \leq 0.05$).

สำหรับความคงตัวต่อการเกิดครีม พบว่า ตัวอย่างครีมทุกตัวอย่างเริ่มเกิดการแยกชั้นของครีมเมื่อเก็บรักษาไปแล้ว 3 วันที่อุณหภูมิ 5±2°C ตัวอย่างครีมที่ใช้สารควบคุมความเป็นกรดชนิดเดียวจะมีค่าการเกิดครีมสูงขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารควบคุมความเป็นกรดชนิดนั้น ๆ ($p \leq 0.05$) ซึ่งตัวอย่างครีมที่ใช้ $NaHCO_3$ และ $NaHCO_3$ ร่วมกับ $Na_2HPO_4$ ปริมาณ 0.25% มีแนวโน้มคงตัวดีพิจารณาจากค่าการเกิดครีมเท่ากับ 50.39±1.58 และ 49.98±1.54% ตามลำดับ ($p > 0.05$) มีค่าต่ำกว่าค่าการเกิดครีมของครีมที่ใช้ $Na_2HPO_4$ ปริมาณ 0.25% ที่มีค่าเท่ากับ 53.51±3.56% ($p \leq 0.05$) ที่ระยะเวลาการเก็บรักษา 4 วัน สอดคล้องกับลักษณะปรากฏของครีมภายหลังการเก็บรักษาในช่วง 5 วันแรกที่พบว่าครีมที่ใช้ $NaHCO_3$ มีการแยกชั้นน้อยมาก ให้ลักษณะความคงตัวที่ดี แต่อย่างไรก็ตามพบว่าครีมที่ใช้ $NaHCO_3$ ร่วมกับ $Na_2HPO_4$ ปริมาณ 0.25% เกิดการแยกชั้นของครีมมากกว่าตัวอย่างอื่นที่อายุการเก็บรักษา 7 วัน อาจเนื่องมาจากความหนืดที่มีค่าต่ำกว่าตัวอย่างที่เหลือโดยมีค่าเท่ากับ 16.67±0.68 cPs ($p \leq 0.05$) เนื่องจากการเกิดครีมเกิดจากการเคลื่อนที่ของขนาดอนุภาคหยดน้ำมันขึ้นไปสะสมบริเวณด้านบนของอิมัลชัน ซึ่งความเร็วในการเคลื่อนที่ของหยดน้ำมันจะขึ้นอยู่กับขนาดของหยดน้ำมันและความหนืดของวัฏภาคต่อเนื่องของระบบอิมัลชัน (Wilde, 2019) เมื่อครีมมีขนาดของหยดน้ำมันใหญ่จะทำให้แรงตึงผิวระหว่างหยดน้ำมันมีค่าสูงส่งผลให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างหยดน้ำมันให้เคลื่อนที่เข้าหากันจนเกิดการรวมตัวกันของหยดน้ำมันลอยตัวขึ้นสู่ผิวหน้าเกิดเป็นครีมนั่นเอง ซึ่งความเร็วในการเคลื่อนที่ของอนุภาคหยดน้ำมันขึ้นอยู่กับความหนืดของอิมัลชัน เมื่อความหนืดของอิมัลชันต่ำส่งผลให้อนุภาคของหยดน้ำมันเคลื่อนที่เข้าหากันได้เร็วขึ้นจนนำไปสู่การเกิดครีม หรือการแยกชั้นของครีมนั่นเอง

Fig. 3 แสดงค่า pH ของตัวอย่างครีมที่เตรียมขึ้น พบว่าครีมที่ใช้ $NaHCO_3$ มีแนวโน้มค่า pH สูงสุด Table 2 แสดงลักษณะสีของครีมพบว่าชนิดของสารควบคุมความเป็นกรดส่งผลต่อลักษณะสีของครีม โดยครีมที่ใช้ $NaHCO_3$ มีแนวโน้มสีคล้ำมากที่สุดบ่งบอกจากค่า L* ที่มีแนวโน้มต่ำสุด อาจเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) ระหว่างกลุ่มอะมิโนไลซีนที่เป็นกรดอะมิโนที่พบได้มากใน PPI และน้ำตาลรีดิวซ์ของคาร์โบไฮเดรต (Zhang et al., 2022) จนเกิดเป็นสารประกอบสีน้ำตาลที่เรียกว่า เมลานอยดิน (Melanoidin) โดยค่า pH อาจเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด จากการทดลองของ Karseno et al. (2018) ได้ศึกษาผลของ pH ของ Coconut neera

ที่ 3 ระดับ (pH 4, 6, และ 8) ต่อระดับการเกิดสีน้ำตาลในน้ำตาลมะพร้าว พบว่าระดับการเกิดสีน้ำตาลของน้ำตาลมะพร้าวเพิ่มขึ้นตามค่า pH ของ Coconut neera ที่ใช้ ($p \leq 0.05$) สอดคล้องกันกับครีมที่ใช้ $NaHCO_3$ ที่มีแนวโน้มค่า pH สูงกว่าตัวอย่างอื่น จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดระดับสูงกว่าครีมตัวอย่างอื่น ๆ ส่งผลให้ค่า L* ของครีมมีแนวโน้มต่ำ ในขณะที่ครีมที่ใช้ $Na_2HPO_4$ มีแนวโน้มของค่า L* สูงกว่า สอดคล้องกับค่า pH ของครีมที่ต่ำกว่า อย่างไรก็ตามค่า L* ของตัวอย่างครีมต่างกันเล็กน้อยในระดับที่ไม่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า

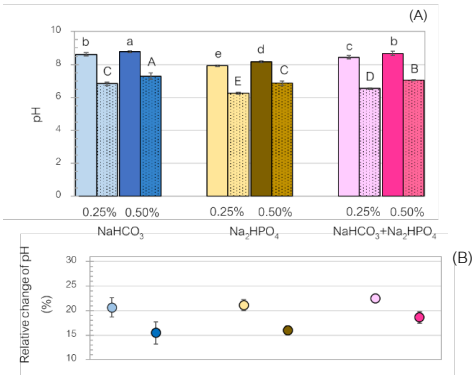



**Fig. 3** Effects of acidity regulators on pH of (A) cream (colored bar) and coffee added with cream (dotted bar) and (B) relative change of pH of the cream after mixing with coffee. In subfigure (a) different small (capital) letters indicate significant difference between pH of cream (coffee added with cream) ($p \leq 0.05$).

**Table 2** Effects of acidity regulators on color parameters of cream, white coffee, and white index (WI)

| Acidity regulator | | Cream | | | White coffee | | | WI |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Type | Concentration (%) | L* | a* | b* | L* | a* | b* | |
| $NaHCO_3$ | 0.25% | 87.35±0.86$^{d}$ | -0.41±0.04$^{d}$ | 7.00±0.31$^{e}$ | 53.93±0.72$^{c}$ | 7.36±0.18$^{a}$ | 22.71±0.65$^{a}$ | 48.11±0.94$^{c}$ |
| | 0.50% | 88.28±0.58$^{c}$ | -0.46±0.03$^{e}$ | 7.12±0.24$^{d}$ | 53.30±0.71$^{e}$ | 7.25±0.28$^{b}$ | 21.66±0.99$^{c}$ | 48.01±1.08$^{c}$ |
| $Na_2HPO_4$ | 0.25% | 89.32±0.25$^{a}$ | -0.15±0.02$^{a}$ | 7.41±0.26$^{b}$ | 54.22±0.22$^{b}$ | 7.22±0.12$^{b}$ | 22.24±0.69$^{b}$ | 48.59±0.44$^{b}$ |
| | 0.50% | 89.22±0.21$^{a}$ | -0.20±0.02$^{b}$ | 7.52±0.36$^{a}$ | 53.10±0.79$^{f}$ | 7.16±0.18$^{cd}$ | 21.17±0.42$^{d}$ | 48.05±0.90$^{c}$ |
| $NaHCO_3$ +$Na_2HPO_4$ | 0.25% | 89.09±0.21$^{ab}$ | -0.32±0.02$^{c}$ | 7.27±0.24$^{c}$ | 54.43±0.29$^{a}$ | 7.18±0.09$^{c}$ | 21.80±0.30$^{c}$ | 48.98±0.40$^{a}$ |
| | 0.50% | 88.91±0.12$^{b}$ | -0.41±0.02$^{d}$ | 7.32±0.24$^{c}$ | 53.52±0.16$^{d}$ | 7.12±0.10$^{d}$ | 21.19±0.37$^{d}$ | 48.43±0.28$^{b}$ |

*Means±SD in the same column followed by different superscripts are significantly different ($p \leq 0.05$)

*ผลของการใช้ครีมประกอบการชงกาแฟ*

จากการศึกษาผลของสารควบคุมความเป็นกรด 3 ชนิด ได้แก่ $NaHCO_3$, $Na_2HPO_4$, และสารผสมระหว่าง $NaHCO_3$:$Na_2HPO_4$ ที่อัตราส่วน 1:1 ที่ปริมาณ 0.25 และ 0.50% ต่อการใช้ประกอบการชงกาแฟ จากการวัดค่า pH ดังแสดงผลใน Fig. 3 เห็นได้ว่าครีมที่ใช้ $NaHCO_3$ ส่งผลชะลอการลดลงของค่า pH ของครีมเมื่อเติมผสมกับกาแฟได้ดีกว่าครีมอื่น ๆ โดยเฉพาะเมื่อใช้ $NaHCO_3$ ปริมาณ 0.50% จากการพิจารณาสมบัติด้านสีและระดับความขาวของกาแฟดังแสดงผลใน Table 2 พบว่า กาแฟที่เติมสารควบคุมความเป็นกรดผสม ให้ค่าความขาว (WI) ของกาแฟสูงที่สุด อย่างไร

ก็ตาม ครีมที่เตรียมขึ้นทุกตัวอย่างทำให้ได้กาแฟที่มีลักษณะที่ดี ไม่สังเกตพบลักษณะฝ้าขาว (Featuring effect) ซึ่งเป็นลักษณะที่ไม่พึงประสงค์เกิดขึ้นที่ผิวหน้าของกาแฟแสดงใน Fig. 4

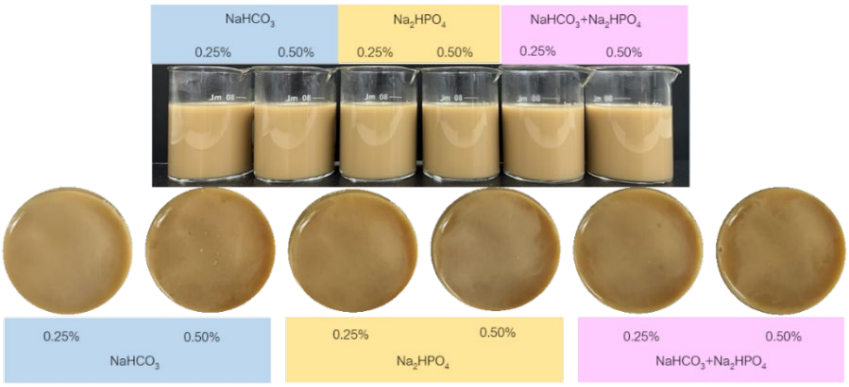



**Fig. 4** Appearance of white coffees added with different cream samples

การใช้ครีมเพื่อตีโฟมเป็นอีกลักษณะการใช้งานที่มีความสำคัญเมื่อใช้ครีมประกอบการชงกาแฟ Fig. 5 แสดงความสามารถในการเกิดโฟมของตัวอย่างครีม พบว่า ความสามารถในการขึ้นโฟม (Foaming capacity, FC) ของทุกตัวอย่างครีมไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) ในขณะที่การเพิ่มปริมาณสารควบคุมความเป็นกรดส่งผลให้ค่าความคงตัวของโฟม (Foaming stability, FS) สูงขึ้น ($p \leq 0.05$) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความหนืดของครีมที่ใช้สารควบคุมความเป็นกรดที่ปริมาณ 0.50% สูงกว่าความหนืดของครีมที่ใช้สารควบคุมความเป็นกรด 0.25% โดยเปรียบเทียบที่สารควบคุมความเป็นกรดชนิดเดียวกัน จึงทำให้มีความคงตัวของโฟมที่ดีกว่า เนื่องจากโฟมเป็นระบบที่ประกอบด้วยฟองอากาศกระจายในวัฏภาคตัวกลางที่เป็นของเหลว ความหนืดที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อความคงตัวของฟองอากาศ ทำให้ได้โฟมที่มีความคงตัวที่ดี สอดคล้องกับการทดลองของ Khezr et al. (2017) ที่ศึกษาความคงตัวของโฟมกาแฟนมที่ใช้แซนแทนกัมที่ปริมาณต่าง ๆ (0.05, 0.10, และ 0.20%) พบว่า การใช้แซนแทนกัมมีผลทำให้ความหนืดของกาแฟนมเพิ่มขึ้น และเมื่อศึกษาการสร้างโฟมนมก็พบว่าความคงตัวของโฟมเพิ่มขึ้นตามปริมาณแซนแทนกัมที่เพิ่มขึ้น ความหนืดส่งผลให้ความเร็วของการเกิดการรวมตัวกันของโฟมข้างเคียงลดลง จึงทำให้โฟมมีความคงตัวมากขึ้นนั่นเอง

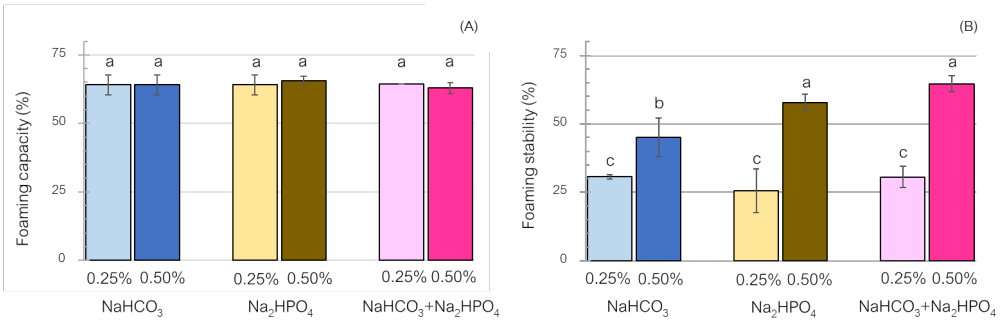



**Fig. 5** Effects of acidity regulators on foaming capacity (A) and foaming stability (B) of cream samples. In subfigure (B) different letters indicate significant difference between foaming stability of cream ($p \leq 0.05$).

## สรุป

จากการศึกษาผลของชนิดและความเข้มข้นของสารควบคุมความเป็นกรดต่อความคงตัวของครีมจากพืชเพื่อการใช้งานในกาแฟ พบว่า ชนิดและความเข้มข้นของสารควบคุมความเป็นกรดมีผลต่อความคงตัวของครีมจากพืช โดยตัวอย่างครีมจากพืชที่ใช้ $NaHCO_3$ ปริมาณ 0.25% มีขนาดอนุภาคหยดน้ำมันเล็กที่สุด และมีค่าความคงตัวต่อการเกิดครีมที่ดี และเมื่อนำไปใช้ชงกาแฟทำให้ได้กาแฟที่มีลักษณะที่ดี ปราศจากการเกิดลักษณะฝ้าขาว อย่างไรก็ตาม ครีมดังกล่าวยังมีจุดที่ควรพัฒนาต่อไปคือความคงตัวของโฟมที่ยังน้อยกว่าครีมที่ใช้ $Na_2HPO_4$ ซึ่งอาจปรับปรุงได้จากการเพิ่มความหนืด อย่างไรก็ตาม หากได้สูตรสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ครีมจากพืชแล้วควรดำเนินการทดสอบทางประสาทสัมผัสและทำการประเมินต้นทุนและความเป็นไปได้ในการผลิตเชิงพาณิชย์ต่อไป

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนการนำเสนอผลงานจากคณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

## เอกสารอ้างอิง

กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม. 2666. ตลาดกาแฟไทย. https://marketeeronline.co/archives/307648#jp-carousel-307677, 14 ธันวาคม 2566.

Chung, C., Sher, A., Rousset, P., McClements, D.J. 2018. Impact of oil droplet concentration on the optical, rheological, and stability characteristics of O/W emulsions stabilized with plant-based surfactant: Potential application as non-dairy creamers. Food Res. Int. 105: 913–919. doi.org/10.1016/j.foodres.2017.12.019

Fadzilah, M.F., Zubairi, S.I., Abidin, N.Z., Kasim, Z.M., Lazim, A. 2020. Physico-chemical and sensory acceptance of Carica papaya leaves extract edible O/W emulsion as prospective natural remedies. Arab. J. Chem. 13: 7829–7842. doi.org/10.1016/j.arabjc.2020.09.014

Fu, L.W., HE, Z., Qin, F., Chen, J. 2020. Effects of soy protein composition in recombined soy-based cream on the stability and physical properties of whipping cream. J. Sci. Food Agric. 100: 2732–2741. doi.org/10.1002/jsfa.10305

Karseno, K., Wuryatmo, Erminawati, Yanto, T., Setyawati, R., Haryanti, P. 2017. Effect of pH and temperature on browning intensity of coconut sugar and its antioxidant activity. Food Res. 2: 32–38.

Khezri, M., Shahriari, S., Shahsavani, L. 2017. The effect of xanthan gum and temperature on foam stability of milk-based espresso coffees. J. Food Biosci. Technol. 7: 15–22.

Lohman, M., Hartel, R. 1994. Effect of milk fat fractions on fat in dark chocolate. J. Am. Oil Chem. 71: 267–275.

McClements, D.J. 2015. Food Emulsions: Principles, Practices, and Techniques, 3rd ed. CRC Press. Boca Raton, FL, USA.

Saharudin, S., Ahmad, Z., Basri, M. 2016. Role of xanthan gum on physicochemical and rheological properties of rice bran oil emulsion. Int. Food Res. J. 23: 1361–1366.

Vladisavljevc, G., Schubert, H. 2007. Preparation of emulsions with a narrow particle size distribution using microporous α-alumina membranes. J. Dispers. Sci. Technol. 24: 811–819. doi.org/10.1081/DIS-120025549

Wang, Y., Wang, S., Li, R., Wang, Y., Xiang, Q., Li, K., Bai, Y. 2022. Effects of combined treatment with ultrasound and pH shifting on foaming properties of chickpea protein isolate. Food Hydrocolloids 124: 107351. doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107351

Wilde, P.J. 2019. Improving emulsion stability through selection of emulsifiers and stabilizers. Reference Module in Food Science. doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.22337-8

Zhang, Z., Wang, B., Adhikari, B. 2022. Maillard reaction between pea protein isolate and maltodextrin via wet-heating route for emulsion stabilization. Future Foods 6: 100193. doi.org/10.1016/j.fufo.2022.100193

# การศึกษากลุ่มผู้บริโภคเจเนอเรชั่นแซดในการตัดสินใจซื้อผลิตภัณฑ์แปรรูปจากวัสดุเหลือทิ้งจากเส้นใยธรรมชาติของกลุ่มวิสาหกิจชุมชน

# A study of Generation Z consumers' decision-making process of purchasing products made from waste materials processed from natural fibers by community enterprises

**นิชดา ตู้จินดา*, กรทิพย์ วัชรปัญญาวงศ์ เตชะเมธีกุล, ปวริน ตันตริยานนท์, พรรณภัทร พรหมเพ็ญ**
Nichada Tujinda*, Kornthip Watcharapanyawong Techametheekul, Pawarin Tuntariyanond, Phannaphat Phromphen
ภาควิชาวิทยาการสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900
Department of Textile Science, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand
*Corresponding author. E-mail address: nichada.tujin@ku.th

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิเคราะห์และหาความสัมพันธ์ข้อมูลความต้องการ ทัศนคติและพฤติกรรมการซื้อของผู้บริโภคเจเนอเรชั่นแซดที่มีต่อผลิตภัณฑ์แปรรูปจากวัสดุเหลือทิ้งจากเส้นใยธรรมชาติ และเป็นแนวทางการออกแบบผลิตภัณฑ์จากวัสดุเหลือทิ้งที่ได้จากเส้นใยกัญชง โดยเก็บข้อมูลแบบสอบถามกลุ่มผู้บริโภคเจเนอเรชั่นแซด (18–26 ปี) จำนวน 100 คน เมื่อวิเคราะห์ค่าทางสถิติพบว่าเป็นเพศหญิงมากที่สุด ร้อยละ 80 ส่วนใหญ่มีรูปแบบการดำเนินชีวิตแต่งกายแบบลำลอง ร้อยละ 33 มีความสัมพันธ์กับกลุ่มสีธรรมชาติและมีความชอบกลุ่มเส้นใยกัญชงมากที่สุดในระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.001 และ 0.05 ตามลำดับ และสนใจผลิตภัณฑ์ประเภทกระเป๋า รองเท้า และของตกแต่งโดยช่วงราคา 500–1,000 บาท นอกจากนี้พบว่าเพศมีความสัมพันธ์กับกลุ่มสีอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.001 และอายุมีความสัมพันธ์กับรูปแบบการดำเนินชีวิตที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 จากผลการวิเคราะห์ได้นำเสนอแนวคิดต้นแบบการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่ใช้เพื่อตอบสนองความต้องการกลุ่มผู้บริโภคเจเนอเรชั่นแซด เพิ่มมูลค่ากับผลิตภัณฑ์แปรรูปจากวัสดุเหลือทิ้งของกลุ่มวิสาหกิจผู้ผลิตเส้นใยกัญชง

**คำสำคัญ**: การเพิ่มมูลค่า, เจเนอเรชั่นแซด, วัสดุเหลือทิ้ง, เส้นใยธรรมชาติ

**Abstract**

This research aims to study and analyze relationships concerning the information needs of Generation Z consumers—specifically, their attitudes and purchasing behavior towards products made from natural fiber waste materials. Additionally, it serves as a guideline for designing products from waste materials obtained from hemp fibers. By collecting questionnaire data from a group of 100 Generation Z consumers (18–26 years old), the analysis of statistical values revealed that the majority were female (80%) with a casual lifestyle (33%). This group demonstrated a relationship with the natural color group and the greatest preference for the hemp fiber group at statistical significance levels of 0.001 and 0.05, respectively. They also expressed interest in products such as bags, shoes, and decorations, with a price range of 500–1,000 baht. Furthermore, it was found that gender was significantly related to the color group at the .001 level, and age was related to lifestyle at a statistical significance level of .05. From the results of the analysis, a prototype concept for product development is presented, intended to meet the needs of Generation Z consumers and add value to products processed from waste materials obtained from hemp fiber production enterprises.

**Keywords**: Generation Z, Natural fibers, Value addition, Waste materials

**คำนำ**

ปัจจุบันโลกกำลังเชิญปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมมากมาย ทำให้ส่งผลเกิดการเปลี่ยนแปลงของธรรมชาติ และส่งผลต่อด้านสุขภาพของมนุษย์และสิ่งมีชีวิต ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นที่ทำให้องค์กรไม่ว่าจะเป็นภาครัฐ เอกชน หน่วยงาน ประชาชนผู้บริโภคทั่วไป หันมาให้ความสนใจเกี่ยวกับด้านสิ่งแวดล้อมมากขึ้นจนทำให้เกิดกระแสอนุรักษ์นิยม และมีแนวโน้มที่มีผู้ให้ความสนใจเพิ่มมากขึ้นในทุก ๆ ปี ซึ่งสอดคล้องกับคำแถลงนโยบายด้านสิ่งแวดล้อม ประจำปี พ.ศ. 2562 อุตสาหกรรมสิ่งทอเป็นอุตสาหกรรมที่มีการใช้ทรัพยากรและพลังงานเป็นจำนวนมาก เพื่อทำการผลิตเป็นสินค้านำไปนำเสนอให้แก่ผู้บริโภค (กวินวัฒน์ และนันทพร, 2560) นอกจากนั้นยังมีของเสียที่เกิดจากแต่ละกระบวนการผลิตที่บางส่วนยังถูกจัดการอย่างไม่เหมาะสม โดยเฉพาะวัสดุเหลือทิ้งที่ได้จากกระบวนการปลายน้ำ (นภท์ชนก และนวัทตกร, 2563) ซึ่งต่อการย่อยสลายได้ด้วยตัวเอง จึงมีการนำแนวคิดการออกแบบเชิงนิเวศเศรษฐกิจ (Eco-design) ซึ่งเป็นแนวคิดที่การออกแบบผลิตภัณฑ์มีการพิจารณาถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตั้งแต่ขั้นตอนการออกแบบ, การใช้วัสดุ, กระบวนการผลิต จนไปถึงการบรรจุและการขนส่งผลิตภัณฑ์สู่ผู้บริโภค โดยมีพื้นฐานการทำงานจากการประยุกต์หลักการ 4R (Reduce, Reuse, Recycle, Recover) เป็นหลักการสำคัญในการจัดการกับวัสดุเหลือทิ้งโดยให้ความสำคัญกับการใช้ให้ได้มากที่สุดและลดปริมาณขยะที่สร้างขึ้น (KMUTT Library ,2021) และสำหรับกลุ่มวิสาหกิจชุมชนถือว่าเป็นอุตสาหกรรมขนาดเล็กที่กำลังเป็นที่ได้รับความสนใจและได้รับการสนับสนุนจากทางภาครัฐในฐานะของอำนาจแห่งความสร้างสรรค์ (Soft Power) หนึ่งในห้า F (Fashion) (สำนักงานส่งเสริมการจัดประชุมและนิทรรศการ (องค์การมหาชน), 2023) โดยกลุ่มวิสาหกิจชุมชนจะมีเริ่มมีกิจกรรมตั้งแต่กระบวนการต้นน้ำไปจนถึงกระบวนการปลายน้ำ มีการใช้วัตถุดิบจากธรรมชาติเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตผลิตภัณฑ์ แต่จากการศึกษาและลงพื้นที่พบว่ายังขาดวิธีการจัดการของเสียหรือวัตถุดิบที่เหลือจากกระบวนการผลิตอย่างเหมาะสมทำให้เกิดเป็นวัสดุเหลืองทิ้งจนไปถึงขยะเป็นจำนวนมาก ซึ่งหากสามารถบริหารจัดการวัสดุเหล่านี้ได้อย่างมีประสิทธิภาพก็จะเป็นการแก้ไขปัญหาลดปริมาณของเสีย ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในการแก้ปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมและเป็นทางเลือกในการเพิ่มรายได้กับชุมชนอีกด้วย และจากการวิจัยพบบว่ากลุ่มผู้บริโภคเจเนอเรชั่นแซดได้ให้ความสนใจเรื่องสิ่งแวด ล้อมมากที่สุดเมื่อเทียบกับเจเนอเรชั่นอื่นๆ มีการปรับเปลี่ยนความคิด ทัศนคติ และพฤติกรรมต่าง ๆ ในการดำเนินชีวิต ประจำวัน เช่น 36% ของกลุ่มคนเจเนอเรชั่นแซดเลือกซื้อผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและอีก 25% (ประชาชาติธุรกิจ, 2566) ยินยอมจ่ายเงินเพิ่มขึ้นให้กับผลิตภัณฑ์ที่มีความยั่งยืนและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยพวกเขามองว่าเป็นสิ่งที่คุ้มค่ากับเงินที่เสียไป ซึ่งในอนาคตพวกเขากำลังเป็นประชากรที่มีขนาดใหญ่และกำลังซื้อมากที่สุดในอาเซียนอีกด้วย และจากการวิจัยพบว่ากลุ่มคนเจเนอเรชั่นแซดในประเทศไทยสามารถแบ่งได้ 8 ลักษณะใหญ่ ๆ ตามรูปแบบการดำเนินชีวิตที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งจะประกอบไปด้วย รูปแบบการดำเนินชีวิตแบบละเอียดอ่อน (Style corporate), รูปแบบการดำเนินชีวิตแบบทางการ (Style academic), รูปแบบการดำเนินชีวิตแบบลำลอง (Style casual), รูปแบบการดำเนินชีวิตแบบกระตือรือร้น (Style active), รูปแบบการดำเนินชีวิตแบบการสร้างสรรค์ (Style creative), รูปแบบการดำเนินชีวิตแบบมีเสน่ห์ (Style glamorous), รูปแบบการดำเนินชีวิตแบบอ่อนหวาน (Style girlish) และรูปแบบการดำเนินชีวิตแบบละเอียดอ่อน (Style corporate) (จิรชญา, 2554)

ดังนั้นจากที่ได้กล่าวมาในข้างต้น จึงเป็นที่มาและความสำคัญในการศึกษาและการทำวิจัย เรื่อง การศึกษาวิเคราะห์กลุ่มผู้บริโภคเจเนอเรชั่นแซดในการตัดสินใจซื้อผลิตภัณฑ์ที่แปรรูปจากวัสดุเหลือทิ้งจากเส้นใยธรรมชาติของกลุ่มวิสาหกิจชุมชน โดยจะเป็นการศึกษาและวิเคราะห์ความต้องการ ทัศนคติและพฤติกรรมผู้บริโภค ที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์แปรรูปจากวัสดุเหลือทิ้งเส้นใยธรรมชาติ และการพัฒนาต่อยอดของธุรกิจสิ่งทอกลุ่มวิสาหกิจชุมชนผลิตเส้นใยธรรมชาติ

**อุปกรณ์และวิธีการ**

การวิจัยนี้เป็นแบบเชิงปริมาณ (Quantitative Research) และเชิงคุณภาพ (Quanlitative Research)

1. ศึกษาวิเคราะห์และหาความสัมพันธ์ข้อมูลทางประชากรศาสตร์ที่มีผลต่อความต้องการ ทัศนคติและพฤติกรรมการซื้อของผู้บริโภคเจเนอเรชั่นแซดที่มีต่อผลิตภัณฑ์แปรรูปจากวัสดุเหลือทิ้งจากเส้นใยธรรมชาติ

2. เพื่อนำเสนอตัวอย่างผลิตภัณฑ์จากวัสดุเหลือทิ้งที่ได้จากการผลิตเส้นใยกัญชงตามแต่ละรูปแบบการดำเนินชีวิตแต่ละประเภท โดยการวิเคราะห์ข้อมูลและหาความสัมพันธ์ของตัวแปรด้านต่าง ๆ เพื่อนำมาจัดทำเป็นตัวอย่างผลิตภัณฑ์จากวัสดุเหลือทิ้งจากเส้นใยกัญชง โดยได้นำข้อมูลมาจากการสัมภาษณ์วิสาหกิจชุมชนเส้นใยกัญชงด้านวัสดุเหลือทิ้ง 1 กลุ่ม คือ วิสาหกิจชุมชนผู้ผลิตเส้นใยกัญชง ดาวม่าง จังหวัดเชียงใหม่

กลุ่มประชากรเป็นกลุ่มผู้บริโภคเจเนอเรชั่นแซด คัดเลือกกลุ่มตัวอย่างด้วยเกณฑ์อยู่ในช่วงอายุ 18–26 ปี อาศัยในเขตกรุงเทพมหานคร ทั้งผู้ที่เคยซื้อและไม่เคยซื้อผลิตภัณฑ์สิ่งทอจากเส้นใยธรรมชาติ โดยอ้างอิงจากจำนวนผู้เข้าร่วมงาน (ช่วงอายุ 18–26 ปี) “OTOP ศิลปาชีพ ประทีปไทย” ระหว่างวันที่ 12–20 สิงหาคม 2566 ณ อาคารชาเลนเจอร์ 1–3 อิมแพคเมืองทองธานี อำเภอปากเกร็ด จังหวัดนนทบุรี เฉลี่ยทั้งสิ้นประมาณ 140,000 คน สุ่มโดยวิธีตามความสะดวก (Convenience Sampling) สูตรการคำนวณของ ทาโร่ ยามาเน่ (Taro Yamane) ทำให้ได้จำนวนกลุ่มตัวอย่าง 100 คน และเนื่องจากกลุ่มตัวอย่างที่เก็บมีลักษณะเป็นตัวแทนของกลุ่มประชากรและมีความหลากหลายน้อยซึ่งใช้ค่าความคาดเคลื่อนของกลุ่มตัวอย่าง ที่ 0.1 เหมาะสมต่อการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ตาม Equation 1

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

n = Sample Size

N = Population Size

e = Expected deviation of the sample group at 0.1

$$n = \frac{140{,}000}{1+(140{,}000\ x(0.1)^2)}$$

n = 99.9286 person

เครื่องมือที่ใช้ คือ แบบสอบถามรูปแบบออนไลน์จำนวน 100 ชุด โดยแบ่งออกเป็น 5 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 แบบสอบถามข้อมูลส่วนบุคคล ได้แก่ เพศ, ช่วงอายุ (เจเนอ เรชั่น), สถานภาพ, ระดับการศึกษา, รายได้เฉลี่ยต่อเดือน, อาชีพ และภูมิลำเนา เป็นต้น โดยลักษณะคำถามจะเป็นแบบปลายปิด (Close-ended questionnaire)

ส่วนที่ 2 แบบสอบถามข้อมูลรูปแบบการดำเนินชีวิต และพฤติกรรมการเปิดรับสื่อ โดยลักษณะคำถามจะเป็นแบบปลายปิด (Close-ended questionnaire)

ส่วนที่ 3 แบบสอบถามข้อมูลการรับรู้และทัศนคติของผู้ตอบแบบสอบถามเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อม

ส่วนที่ 4 แบบสอบถามข้อมูลการรับรู้เรื่องเส้นใยธรรมชาติ

ส่วนที่ 5 แบบสอบถามข้อมูลพฤติกรรมการซื้อผลิตภัณฑ์จากเส้นใยธรรมชาติและปัจจัยทางด้านการตลาดที่มีผลต่อการตัดสินใจซื้อของผู้บริโภค โดยลักษณะคำถามจะเป็นแบบปลายปิด (Close-ended questionnaire) ผสมผสานคำถามแบบปลายเปิด (Open-ended questionnaire)

การทดสอบคุณภาพของแบบสัมภาษณ์ 2 วิธี ได้แก่

1. การทดสอบความเที่ยงตรง (Validity) ของแบบสอบถามจากผู้เชี่ยวชาญและอาจารย์ที่ปรึกษา เพื่อทำการตรวจสอบข้อมูลความถูกต้อง และความชัดเจนของแบบสัมภาษณ์และแบบสอบถาม ซึ่งหากข้อคำถามมีค่า IOC ตั้งแต่ 0.50–1.00 จะถือว่าข้อคำถามนั้นมีความเที่ยงตรงและสามารถนำไปใช้งานได้ โดยได้ค่า 0.76

2. การทดสอบความน่าเชื่อถือ (Reliability) ของแบบสอบถาม โดยผู้วิจัยจะนำแบบสอบถามไปทำการทดสอบก่อน (Pre-Test) กับกลุ่มตัวอย่างจำนวน 30 คน โดยคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์แอลฟาครอนบัค (Cronbach) หากได้ค่าสัมประสิทธิ์ มากกว่า 0.70 (Cronbach, 1970) ซึ่งหมายถึงค่านั้นอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ สามารถนำแบบสอบถามนี้ไปใช้เก็บข้อมูกลุ่มตัวอย่างทั้งหมดได้ โดยได้ค่า 0.871

*การวิเคราะห์ข้อมูล และประเมินผล*

ใช้วิธีการการวิเคราะห์ข้อมูลสถิติเชิงพรรณนา (Descriptive statistics) โดยแจกแจงความถี่ (frequency) ร้อยละ (percentage) ค่าเฉลี่ย (mean) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) โดยนำเสนอข้อมูลในรูปแบบตารางเชิงสถิติเพื่ออธิบายข้อมูลเบื้องต้น และการใช้สถิติอนุมานประกอบ การวิเคราะห์ค่าสถิติความสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปร (Chi-square) และค่าสหสัมพันธ์ (Correlation) เพื่อเป็นการดูทิศทางความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ตัว ได้แก่ ข้อมูลด้านประชากรศาสตร์กับรูปแบบการดำเนินชีวิตและพฤติกรรมผู้บริโภค, ข้อมูลด้านประชากรศาสตร์กับกลุ่มสี (ทฤษฎีสีโคบายาชิ) และข้อมูลด้านรูปแบบการดำเนินชีวิตกับกลุ่มสี (ทฤษฎีสีโคบายาชิ)

**ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง**

จากกลุ่มตัวอย่างผู้บริโภคเจเนอเรชั่นแซดในเขตกรุงเทพมหานคร จำนวน 100 คน พบว่ากลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่เป็น เพศหญิง คิดเป็นร้อยละ 80 เป็นเพศชาย คิดเป็นร้อยละ 18 และเป็นเพศอื่น ๆ คิดเป็นร้อยละ 2 โดยส่วนใหญ่อยู่ในช่วงอายุ 24–26 ปี คิดเป็นร้อยละ 64 จบการศึกษาระดับปริญญาตรี คิดเป็นร้อยละ 77 ทำอาชีพพนักงานบริษัทเอกชน คิดเป็นร้อยละ 42 มีรายได้เฉลี่ยอยู่ในช่วง 20,000–30,001 บาท คิดเป็นร้อยละ 35 และมีสถานภาพโสด คิดเป็นร้อยละ 92

การหาความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบการดำเนินชีวิตและข้อมูลด้านประชากรศาสตร์ที่มีต่อรูปแบบและพฤติกรรมของผู้บริโภค ดังแสดงใน Table 1

**Table 1** The statistical significance level is used to demonstrate the relationship between demographic variables, lifestyle, and consumer behavior

| | Sex | Age | Status | Education level | Average income |
|---|---|---|---|---|---|
| Life Style | | .035* | | .010 | .011 |
| Color Group | <.001** | | .034 | <.001 | .002 |
| Types of products interested in Clothing. | | .015 | | | |
| Types of products interested in bags, shoes, and decorations. | | | | | .060* |
| Types of products interested in household items. | | | | .010 | .034 |
| Types of products interested in gifts and souvenirs. | | | .019 | .046 | <.001 |
| Amount of purchase. | <.001 | | | .007* | <.001 |

The significance levels in hypothesis testing are denoted as ** for a level of 0.01 and * for a level of 0.05.

จาก Table 1 เมื่อทดสอบความสัมพันธ์ด้วยการทดสอบระหว่างตัวแปรด้วยสถิติไคสแควร์ (Chi-square) พบว่า เพศมีความสัมพันธ์กับกลุ่มสีอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.001 อายุมีความสัมพันธ์กับรูปแบบการดำเนินชีวิตอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ระดับการศึกษามีความสัมพันธ์กับจำนวนเงินในการซื้อสินค้าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 และสุดท้ายข้อมูลด้านรายได้เฉลี่ยมีความสัมพันธ์กับจำนวนเงินในการซื้อสินค้าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 โดยมีรายละเอียดใน Table 2

**Table 2** Percentages and the relationships between demographic data and lifestyle patterns

| Demographic | | Life style | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Style academic | Style conservative | Style casual | Style active | Style creative | Style glamorous | Style corporate |
| Age | 18–20 years | 24% | 0% | 3% | 5.3% | 5% | 0% | 0% |
| | 21–23 years | 76% | 6.3% | 21.2% | 52.6% | 40% | 0% | 57.1% |
| | 24–26 years | 0% | 93.8% | 75.8% | 42.1% | 55.0% | 100% | 42.9% |
| | Total | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |
| Education level | Under bachelor's degree. | 0% | 0% | 12% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| | Bachelor's degree. | 33.3% | 68.8% | 75.8% | 89.5% | 80.% | 0% | 100% |
| | Master's degree. | 66.7% | 31.3% | 12.1% | 10.5% | 21.1% | 10.5% | 0.0% |
| | Total | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |
| Average income | ≥ 10,000 baht | 0% | 0% | 27.3% | 0% | 10% | 0% | 28.6% |
| | 10,001–20,000 B. | 0% | 0% | 33.3% | 36.8% | 15% | 0% | 42.9% |
| | 20,001–30,000 B. | 100% | 37.5% | 21.2% | 42.1% | 45% | 100% | 0% |
| | 30,001–40,000 B. | 0% | 31.1% | 12.1% | 10.5% | 20.0% | 0% | 28.6% |
| | 40,001–50,000 B. | 0% | 12.5% | 6.1% | 0% | 10% | 0% | 0% |
| | 50,001 B onwards. | 0% | 18.8% | 0% | 10.5% | 0% | 0% | 0% |
| | Total | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |

จาก Table 2 เมื่อทดสอบความสัมพันธ์ด้วยการทดสอบระหว่างตัวแปรด้วยสถิติไคสแควร์ (Chi-square) พบว่า ปัจจัยทางประชากรศาสตร์ด้านอายุมีความสัมพันธ์กับรูปแบบการดำเนินชีวิต โดยที่พบมากที่สุดคือ ช่วงอายุ 24–26 ปี มีความสัมพันธ์กับรูปแบบการดำเนินชีวิตแบบการดำเนินชีวิตแบบมีเสน่ห์ (Style glamorous) ข้อมูลด้านระดับการศึกษาโดยที่พบมากที่สุด ระดับปริญญาตรีสัมพันธ์กับรูปแบบการดำเนินชีวิตแบบละเอียดอ่อน (Style corporate) และข้อมูลด้านรายได้เฉลี่ยที่พบมากที่สุดอยู่ในช่วง 20,001–30,000 บาทสัมพันธ์กับรูปแบบการดำเนินชีวิตแบบทางการ (Style academic)และแบบการดำเนินชีวิตแบบมีเสน่ห์ (Style glamorous) โดยคิดเป็นร้อยละ 100

**Table 3** Relationship between demographics and Kobayashi's color image scale

| Demographic | | Color Group | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Elegant | Modern | Romantic | Chic | Natural | Casual | Dandy |
| Sex | Female | 100% | 56.3% | 82.1% | 100% | 100% | 83.3% | 0% |
| | Male | 0% | 43.8% | 17.9% | 0% | 0% | 100% | 57.1% |
| | Other gender | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 16.7% | 42.9% |
| Total | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |
| Education level | Under bachelor's degree | 8% | 0% | 0% | 0% | 0% | 16.7% | 0% |
| | Bachelor's degree. | 18.2% | 20.8% | 33.8% | 7.8% | 9.1% | 7.8% | 2.6% |
| | Master's degree. | 73.8% | 79.2% | 66.2% | 92.2% | 90.9% | 75.5% | 97.4% |
| Total | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |
| Average income | ≥ 10,000 baht. | 16% | 31.3% | 7.1% | 0% | 0% | 16.7% | 0% |
| | 10,001 – 20,000 B. | 32% | 0% | 21.4% | 50% | 71.4% | 16.7% | 0% |
| | 20,001 – 30,000 B. | 24% | 43.8% | 39.3% | 50% | 28.6% | 33.3% | 33.3% |
| | 30,001 – 40,000 B. | 16% | 0% | 17.9% | 0% | 0% | 33.3% | 66.7% |
| | 40,001 – 50,000 B. | 0% | 25% | 7.1% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| | 50,001 B onwards. | 12% | 0% | 7.1% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| Total | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |

จาก Table 3 เมื่อทดสอบความสัมพันธ์ด้วยการทดสอบระหว่างตัวแปรด้วยสถิติไคสแควร์ (Chi-square) พบว่าปัจจัยทางประชากรศาสตร์ด้านเพศมีความสัมพันธ์กับกลุ่มสี โดยที่พบมากที่สุดคือ เพศหญิง สัมพันธ์กับกลุ่มสีสง่างาม (Elegant), มีความสัมพันธ์กับกลุ่มสีเก๋ไก๋ (Chic) และกลุ่มสีธรรมชาติ (Natural) ในระดับที่เท่ากัน เพศชาย สัมพันธ์กับกลุ่มสีลำลอง (Casual) คิดเป็นร้อยละ 100 ปัจจัยทางประชากรศาสตร์ด้านสถานภาพ โดยสถานภาพโสดมีความสัมพันธ์กับกลุ่มสีสมัยใหม่ (Modern), กลุ่มสีเก๋ไก๋ (Chic), กลุ่มสีธรรมชาติ (Natural) และกลุ่มสีลำลอง (Casual) คิดเป็นร้อยละ 100 และสุดท้ายปัจจัยทางประชากรศาสตร์ด้านรายได้เฉลี่ยในช่วง 10,001–20,000 บาท มีความสัมพันธ์กับกลุ่มสีธรรมชาติ (Natural) มากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 71.4 และเมื่อใช้ข้อคำถามที่อธิบายถึงคำจำกัดความในรูปแบบการดำเนินชีวิตประเภทต่างๆ กับกลุ่มตัวอย่างเพื่อหาค่าทางสถิติได้ผลดังแสดงใน Table 4

**Table 4** Proportion of population in each lifestyle

| Lifestyle | Frequency | Percent | Lifestyle | Frequency | Percent |
|---|---|---|---|---|---|
| Style academic | 3 persons | 3% | Style creative | 20 persons | 20% |
| Style conservative | 16 persons | 16% | Style glamorous | 2 persons | 2% |
| Style casual | 33 persons | 33% | Style corporate | 7 persons | 7% |
| Style active | 19 persons | 19% | | | |

จาก Table 4 พบว่ารูปแบบการดำเนินชีวิตที่ตรงกลับกลุ่มตัวอย่างผู้บริโภคเจเนอเรชั่นแซดมากที่สุด คือ รูปแบบการดำเนินชีวิตแบบลำลอง (Style casual) คิดเป็นร้อยละ 33 เนื่องจากเป็นรูปแบบการดำเนินชีวิตมีความสอดคล้องกับลักษณะเด่นของกลุ่มคนเจเนอเรชั่นแซด คือ เป็นกลุ่มคนที่เกิดมาในช่วงของโลกสมัยใหม่ ยุคดิจิตอลที่ทุกสิ่งรอบตัวมี

ความก้าวหน้าทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สามารถเข้าถึงเครือข่ายข้อมูลออนไลน์ขนาดใหญ่ช่วยทำให้พวกเขาสามารถใช้ชีวิตประประจำวันได้อย่างสะดวกสบาย และสามารถทำกิจกรรมต่างๆ หลายสิ่งหลายอย่างได้ในเวลาเดียวกัน

เมื่อนำข้อมูลรูปแบบการดำเนินชีวิตมาหาความสัมพันธ์กับกลุ่มสีที่ชื่นชอบ โดยใช้การวิเคราะห์ข้อมูลสถิติวิเคราะห์เชิงอนุมาน ดังแสดงใน Table 5

**Table 5** Relationship between Life style of the sample group and Kobayashi's color image scale

| | Elegant | Modern | Romantic | Chic | Natural | Casual | Dandy |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Style academic | 0.534 | 0.681 | 0.006* | 0.275 | 0.235 | 0.109 | 0.237 |
| Style conservative | 0.032 | 0.411 | 0.277 | 0.661 | 0.634 | 0.521 | 0.661 |
| Style casual | 0.395 | 0.873 | 0.195 | 0.078 | 0.045** | 0.203 | 0.072 |
| Style active | 0.663 | 0.040* | 0.459 | 0.225 | 0.501 | 0.75 | 0.225 |
| Style creative | 0.085 | 0.418 | 0.002 | <.001* | 0.561 | 0.001 | 0.210 |
| Style glamorous | 0.013* | 0.538 | 0.378 | 0.721 | 0.699 | 0.602 | 0.721 |
| Style corporate | 0.823 | 0.235 | 0.039** | 0.493 | 0.457 | 0.165 | 0.493 |

The significance levels in hypothesis testing are denoted as ** for a level of 0.01 and * for a level of 0.05.

จาก Table 5 เมื่อทดสอบความสัมพันธ์ด้วยการทดสอบสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) พบว่า กลุ่มตัวอย่างผู้บริโภคเจเนอเรชั่นแซดที่รูปแบบการดำเนินชีวิตแบบทางการ (Style academic) มีความสัมพันธ์กับกลุ่มสีช่างฝัน (Style romantic), รูปแบบการดำเนินชีวิตแบบกระตือรือร้น (Style active) มีความสัมพันธ์กับกลุ่มสีสมัยใหม่ (Modern), รูปแบบการดำเนินชีวิตแบบการสร้างสรรค์ (Style creative) มีความสัมพันธ์กับกลุ่มสีเก๋ไก๋ (Chic) และรูปแบบการดำเนินชีวิตแบบมีเสน่ห์ (Style glamorous) มีความสัมพันธ์กับกลุ่มสีสง่างาม (Elegant) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 รูปแบบการดำเนินชีวิตแบบลำลอง (Style casual) มีความสัมพันธ์กับกลุ่มสีธรรมชาติ (Natural) และรูปแบบการดำเนินชีวิตแบบละเอียดอ่อน (Style corporate) มีความสัมพันธ์กับกลุ่มสีช่างฝัน (Romantic) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ระดับนัยสำคัญ 0.001

ข้อมูลด้านพฤติกรรมการซื้อของกลุ่มตัวอย่างผู้บริโภคเจเนอเรชั่นแซด วิเคราะห์ได้ผลการวิจัยดังแสดงใน Table 6

**Table 6** Information on purchasing behavior of the sample group

| | | | Frequency | Percent |
|---|---|---|---|---|
| Consumer purchasing behavior of products made from natural fibers. | What type of fiber waste material are you most interested in processing. | Cotton fiber | 1 persons | 1% |
| | | Water hyacinth fiber | 17 persons | 17 % |
| | | Hemp fiber | 47 persons | 47% |
| | | Pineapple leaf fiber | 21 persons | 21% |
| | | Eri silk fiber | 14 persons | 14% |
| | Are you interested in textile products made from waste materials from what types of natural fibers. | Clothing | 3 persons | 3% |
| | | Bags, Shoes and Accessories | 54 persons | 54% |
| | | Household items | 12 persons | 12% |
| | | Gifts and Souvenirs | 31 persons | 31% |
| | How much should textile products made from waste natural fibers cost. | Not more than 500 B. | 21 persons | 21% |
| | | 501–1,000 B. | 44 persons | 44% |
| | | 1,001–2,000 B. | 23 persons | 23% |
| | | 2,001–3,000 B. | 12 persons | 12% |

จาก Table 6 พบว่า กลุ่มตัวอย่างผู้บริโภคเจเนอเรชั่นแซดมีความสนใจวัสดุเหลือทิ้งจากเส้นใยกัญชงมากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 47 โดยเป็นผลิตภัณฑ์สิ่งทอจากวัสดุเหลือทิ้งจากเส้นใยธรรมชาติประเภทกระเป๋า รองเท้า และของตกแต่ง มากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 54 อยู่ในช่วงราคาระหว่าง 501–1,000 บาท คิดเป็นร้อยละ 44 และจากการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการสำรวจแบบสอบถามและการสัมภาษณ์กลุ่มวิสาหกิจชุมชนผู้ผลิตเส้นใยกัญชง ดาวม่าง จังหวัดเชียงใหม่ ด้านวัสดุเหลือทิ้งที่เป็นส่วนใหญ่เป็นเศษเส้นด้ายที่สามารถนำมาขึ้นรูปเป็นวัตถุดิบในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ จึงสามารถสรุปแนวคิดในการออกแบบผลิตภัณฑ์แปรรูปจากวัสดุเหลือทิ้งจากเส้นใยธรรมชาติสำ หรับกลุ่มผู้บริโภคเจเนอเรชั่นแซดในเขตกรุงเทพฯ โดยแบ่งตามข้อมูลด้านประชากรศาสตร์ รูปแบบการดำเนินชีวิต และกลุ่มสีที่ชื่นชอบ ดังแสดงใน Fig. 1

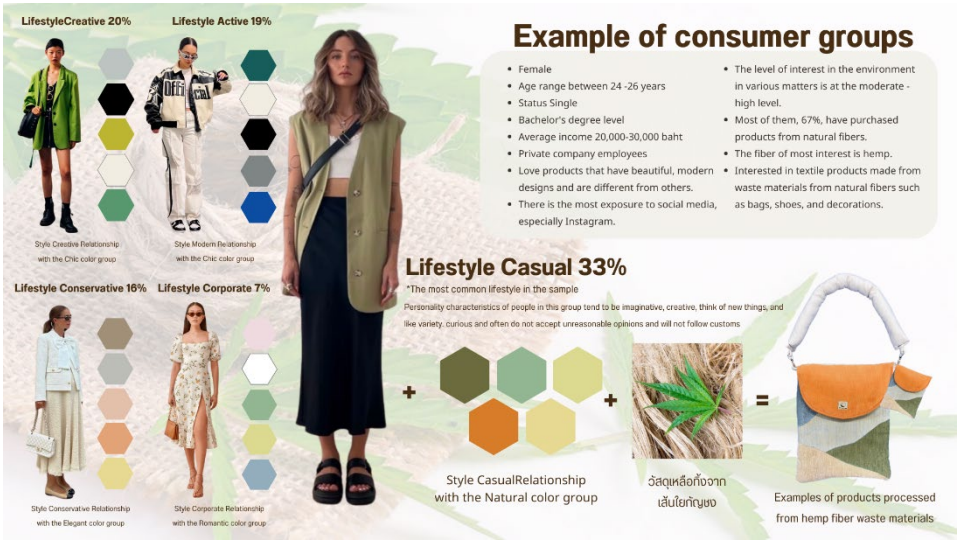



**Fig. 1** Information on product development guidelines

**สรุป**

จากการเก็บข้อมูลแบบสอบถามกลุ่มผู้บริโภคเจเนอเรชั่นแซดในเขตกรุงเทพมหานคร จำนวน 100 คน พบว่าส่วนใหญ่ที่พบมากที่สุด คือ เพศหญิง คิดเป็นร้อยละ 80 มีรูปแบบการดำเนินชีวิตแบบลำลอง (Style casual) คิดเป็นร้อยละ 33 ซึ่งมีความเชื่อมโยงกับสีกลุ่มธรรมชาติ (Natural) ในระดับความสัมพันธ์ที่ระดับนัยสำคัญที่ 0.001 และมีความสนใจผลิตภัณฑ์แปรรูปจากวัสดุเหลือทิ้งเส้นใยธรรมชาติประเภทกระเป๋า รองเท้า และของตกแต่ง จากวัสดุเหลือทิ้งเส้นใยธรรมชาติกัญชงที่โดยอยู่ในช่วงราคา 500–1,000 บาท และปัจจัยที่ส่งผลต่อทัศนคติด้านสิ่งแวดล้อมมากที่สุด คือ ด้านรายได้เฉลี่ย โดยมีความสัมพันธ์กับมีการติดตามและให้ความสนใจเกี่ยวข่าวปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมอยู่เสมอ, การศึกษาวิธีการที่จะมีส่วนช่วยลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม, เลือกซื้อสินค้าหรือบริการมักคำนึงถึงผลกระทบที่อาจจะเกิด, คิดว่าผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมสามารถช่วยปัญหาที่จะเกิดขึ้นได้, ให้ความสนใจสินค้าที่ได้รับฉลากสิ่งแวดล้อมมากกว่าสินค้าทั่วไป และรู้จักการประยุกต์ใช้หลักการ 4R โดยมีค่าระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 จากการศึกษาวิจัยดังกล่าวทำให้ได้ข้อมูลเบื้องต้นที่สามารถนำไปพัฒนาตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ใช้เพื่อตอบสนองความต้องการกลุ่มผู้บริโภคเจเนอเรชั่นแซดที่มีความสนใจในผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และเป็นแนวทางการเพิ่มมูลค่ากับผลิตภัณฑ์แปรรูปจากวัสดุเหลือทิ้งของกลุ่มวิสาหกิจผู้ผลิตเส้นใยธรรมชาติอีกด้วย

**กิตติกรรมประกาศ**

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณที่ได้รับทุนนำเสนอผลงานในการประชุมวิชาการ ครั้งที่ 62 ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สาขาอุตสาหกรรมเกษตร จากคณะอุตสาหกรรมเกษตร และขอขอบคุณกลุ่มตัวอย่างทุกท่านที่ให้ความร่วมมือในการตอบแบบสอบถามและการสัมภาษณ์เพื่อให้ผู้วิจัยได้นำข้อมูลไปใช้วิเคราะห์ทำให้การวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

**เอกสารอ้างอิง**

กัญญามน อินหว่าง และคณะ. 2554. การจัดการวิสาหกิจชุมชน. มหาวิทยาลัยพิษณุโลก. พิษณุโลก.

กวินวัฒน์ หิรัญบูรณะ, นันทพร บุญพรหม. 2560. ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่ออุตสาหกรรมเสื้อผ้าสำเร็จรูปช่วงทศวรรษที่ 2540. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, สำนักงานวิทยาเขตกำแพงแสน, กองบริหารวิชาการและนิสิต. 14: 1482–1489.

จิรัชญา วันจันทร์. 2011. การแต่งกายตามบุคลิกภาพ. ศิลปกรรมสาร 6: 55–70.

นภท์ชนก ขวัญสง่า, นวัทตกร อุมาศิลป์. 2563. ผลิตภัณฑ์แฟชั่นไลฟ์สไตล์จากการพัฒนาเส้นใยดาหลา (รายงานผลการวิจัย). คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย.

ประชาชาติธุรกิจ. 2566. Gen Z ในไทย 36% นิยมซื้อผลิตภัณฑ์รักษ์โลก ผลวิจัย มินเทลเผยเศรษฐกิจ. https://www.prachachat.net/d-life/news-1211909

พักตรา ยุทธภัณฑ์บริภาร. 2564. Eco-design การออกแบบเชิงนิเวศเศรษฐกิจ. https://shorturl.asia/1PpFt

สำนักงานส่งเสริมการจัดประชุมและนิทรรศการ (องค์การมหาชน). 2023. Soft Power อำนาจแห่งความสร้างสรรค์ เพื่อสรรค์สร้างเศรษฐกิจไทย. https://www.businesseventsthailand.com/th/press-media/news-press-release/detail /1461-soft-power-the-power-of-creativity-to-build-the-thai-economy, 1 ธันวาคม 2566.

Grail Research. 2011. Consumers of tomorrow: Insights and observations about Generation Z. Grail Research. https://docplayer.net/31078434-Consumers-of-tomorrow.html

KMUTT Library. 2021. Eco-Design การออกแบบเชิงนิเวศเศรษฐกิจ. https://shorturl.asia/1PpFt, 20 ตุลาคม 2566.

Kobayashi, S. 1990. Color image scale. Nippon Color & Design Research Institute, Inc. Japan.

Meg Ryan. 2022. Earth tone outfits. https://www.pinterest.com/pin/68745815723/, 12 ธันวาคม 2566.

# การตกแต่งไมโครแคปซูลวิตามินอีลงบนผ้าฝ้ายด้วยกระบวนการจุ่มอัด-อบแห้ง-อบผนึก

## Finishing of Vitamin E microcapsule on cotton fabrics with pad-dry-cure process

**เกวลิน ใหม่จันดี, พรสวรรค์ บุญน้อย, ผุสดี แซ่ลิ่ม***

Kawalin Maichandee, Pornsawan Boonnoi, Phussadee Sae-Lim*

ภาควิชาวิทยาการสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Textile Science, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: phussadee.l@ku.th

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของการตกแต่งไมโครแคปซูลวิตามินอีลงบนผ้าฝ้ายด้วยกระบวนการจุ่มอัด-อบแห้ง-อบผนึก โดยศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารช่วยติดชนิดอะคริลิคและไมโครแคปซูลวิตามินอี และผลของผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งต่อการรักษาความชุ่มชื้นบนผิวมะเขือเทศ ผลการศึกษาพบว่าสามารถตกแต่งไมโครแคปซูลวิตามินอีลงบนผ้าฝ้ายได้ด้วยกระบวนการจุ่มอัด-อบแห้ง-อบผนึก โดยสภาวะที่เหมาะสมคือ ความเข้มข้นไมโครแคปซูลวิตามินอี 30 กรัมต่อลิตร และสารช่วยติดชนิดอะคริลิค 20 กรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิการอบแห้ง 120°C เป็นเวลา 30 วินาที อบผนึกที่อุณหภูมิ 160°C เป็นเวลา 2 นาที ผลการเก็บข้อมูลคุณภาพผิวของมะเขือเทศที่ถูกห่อหุ้มเป็นระยะเวลา 7 วัน พบว่าผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งด้วยไมโครแคปซูลวิตามินอีที่ความเข้มข้น 30 กรัมต่อลิตร และสารช่วยติดชนิดอะคริลิคที่ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร สามารถรักษาความชุ่มชื้นให้กับผิวของมะเขือเทศได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับผ้าที่ไม่ผ่านการตกแต่งและตกแต่งที่ความเข้มข้นน้อยกว่า

**คำสำคัญ**: ผ้าฝ้าย, ไมโครเอนแคปซูเลชั่น, วิตามินอี

**Abstract**

This research aimed to study the effect of vitamin E microcapsule finishing on cotton fabric using pad-dry-cure process. The appropriate amount of acrylic binder, vitamin E microcapsules and the effect of treated cotton on maintaining moisture on tomato skin were investigated. The result showed that vitamin E microcapsules can be finished on cotton by the process of pad-dry-cure with the conditions of 30 g/L vitamin E microcapsules and 20 g/L acrylic binder. At a drying temperature of 120°C for 30 seconds and cured at 160°C for 2 minutes. The result of collected data on tomato skin quality enwrapped for 7 days showed that the treated cotton with 30 g/L vitamin E microcapsules and 20 g/L acrylic binder gave the best result for protecting moisture of the tomato skin compared with untreated and treated with lower concentration.

**Keywords:** Cotton fabric, Microencapsulation, Vitamin E

**คำนำ**

ในปัจจุบันความต้องการของผู้บริโภคในการดูแลเรื่องผิวมีเพิ่มมากขึ้น จากผลสำรวจแนวโน้มการเติบโตและการขยายตัวของส่วนแบ่งการตลาดเครื่องสำอางและความงามในประเทศไทยปี 2559 พบว่ามีมูลค่าสูงถึง 81,000 ล้านบาท ซึ่งผลิตภัณฑ์บำรุงผิวมีส่วนแบ่งทางการตลาดมากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 46 มีอัตราเติบโตเฉลี่ยต่อปีร้อยละ 5 และจากข้อมูลของศูนย์พยากรณ์เศรษฐกิจและธุรกิจ มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย ครีมบำรุงผิวเป็นสาขาธุรกิจที่ถูกจัดอันดับให้เป็น 1 ใน 10 ของธุรกิจที่น่าสนใจในการลงทุน แสดงให้เห็นถึงความต้องการของผู้บริโภคเกี่ยวกับสินค้าเครื่องสำอางและครีมบำรุงผิวที่เติบโตอย่างต่อเนื่องเพิ่มขึ้นในทุกปี (สุภัสตรา และวัชระ, 2565) โดยวิตามินอีเป็นหนึ่งในส่วนประกอบสำคัญของผลิตภัณฑ์ด้านความงามและเป็นหนึ่งในองค์ประกอบที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ทางการแพทย์ เนื่องจากวิตามินอีมีส่วนช่วยในการควบคุมฮอร์โมน ลดคอเลสเตอรอล เสริมภูมิคุ้มกัน ป้องกันการเกิดมะเร็ง นอกจากนี้วิตามินอี ยังเป็นสารอาหารที่ละลายในไขมัน สามารถซึมเข้าสู่ผิวหนัง ช่วยคืนความชุ่มชื้นให้กับผิว รักษาความเสียหายของผิว เสริมสร้างการทำงานของเกราะป้องกันผิว และเป็นสารอาหารรองหรือวิตามินที่จำเป็นต่อร่างกายช่วยให้ระบบต่าง ๆ ภายในร่างกายทำงานเป็นปกติ (Rizvi et al., 2014; Prakash and Parida, 2023)

ในอุตสาหกรรมสิ่งทอมีการนำเทคนิคไมโครเอนแคปซูเลชั่นมาใช้เพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์สิ่งทอ ซึ่งเทคนิคไมโครเอนแคปซูเลชั่นเป็นกระบวนการที่สารสำคัญที่เป็นของเหลว ของแข็ง หรือแก๊สถูกห่อหุ้มด้วยพอลิเมอร์เป็นชั้นบาง ๆ ให้อยู่ในรูปของแคปซูลขนาดเล็กระดับไมโคร ช่วยในการควบคุมการปล่อยสารสำคัญในปริมาณที่เหมาะสม ลดความสิ้นเปลืองในการใช้ ยับยั้งผลกระทบของปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม เช่น แสงแดด ออกซิเจน น้ำ เป็นต้น ซึ่งเป็นสภาวะแวดล้อมภายนอกที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของสารสำคัญ มีการนำวิตามินอีซึ่งมีสรรพคุณช่วยปกป้องและเพิ่มความชุ่มชื้นให้กับผิว มาทำให้อยู่ในรูปไมโครแคปซูลด้วยเทคนิคไมโครเอนแคปซูเลชั่นใส่ลงบนผ้าฝ้าย เพื่อเพิ่มคุณสมบัติให้กับผ้าฝ้าย เมื่อเราใช้ผลิตภัณฑ์สิ่งทอที่ผ่านการตกแต่งด้วยไมโครแคปซูลวิตามินอี ช่วยทำให้ผิวของผู้ใช้มีความชุ่มชื้นและลดรอยเหี่ยวย่น เนื่องจากผิวหนังมีความสามารถในการดูดซึมวิตามินอี (Basyigit et al., 2018; Singh and Sheikh, 2020; Oloko, 2022; Sousa et al., 2022) และช่วยยืดเวลาการปล่อยวิตามินอีให้นานขึ้น

โดยมีการทำการทดสอบการตรึงไมโครแคปซูลวิตามินอีด้วยวิธีการ จุ่มอัด-อบแห้ง-อบผนึก (pad-dry-cure) บนผ้าฝ้ายถัก พบว่ามีวิตามินอีติดอยู่บนพื้นผิวของผ้าฝ้ายถัก จากภาพถ่ายสามมิติโดยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) และมีการทดสอบการซัก การขัดถู และการรีด พบว่า วิตามินอีมีความคงตัวในระหว่างกระบวนการทดสอบ และลดลงทีละน้อยเมื่อเวลาผ่านไป จากผลการทดลองสรุปได้ว่าการตรึงไมโครแคปซูลวิตามินอีบนผ้าฝ้ายแบบถักโดยวิธีจุ่มอัด-อบแห้ง-อบผนึก มีความน่าเชื่อถืออย่างมากในด้านของความคงทนของไมโครแคปซูล (Son et al., 2014)

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาการตกแต่งผ้าฝ้ายด้วยไมโครแคปซูลวิตามินอี ซึ่งมีคุณสมบัติในการเพิ่มความชุ่มชื้นและลดรอยเหี่ยวย่นให้กับผิวโดยกระบวนการจุ่มอัด-อบแห้ง-อบผนึก ในการตรึงไมโครแคปซูลวิตามินอีบนผ้าฝ้าย โดยทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการตกแต่ง และทดสอบผลของผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่งด้วยวิธีการรักษาความชุ่มชื้นให้กับผิวของมะเขือเทศ (Tomato Experiment) (ณัฐพงศ์, 2559) ซึ่งผลการทดสอบและข้อมูลที่ได้สามารถนำไปเป็นแนวทางประยุกต์ใช้ในการผลิตหรือพัฒนาผลิตภัณฑ์สิ่งทอให้กับผู้ประกอบการหรือผู้ที่สนใจทั่วไปเพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์สิ่งทอต่อไปในอนาคต

**อุปกรณ์และวิธีการ**

ผ้าฝ้าย (ตลาดพาหุรัด, ประเทศไทย), ไมโครแคปซูลวิตามินอีและสารช่วยติดชนิดอะคริลิค (บริษัท รัชดาเคมีคอลส์ จำกัด, ประเทศไทย), เครื่องบีบอัด (ภาควิทยาการสิ่งทอ, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, ประเทศไทย),

กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) (คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, ประเทศไทย)

*วิธีดำเนินการวิจัย*

*ศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมในการตกแต่งผ้าฝ้ายด้วยไมโครแคปซูลวิตามินอี*

*1. ศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารช่วยติดชนิดอะคริลิค*

นำผ้าฝ้ายที่ผ่านการทำความสะอาด มาตกแต่งด้วยกระบวนการจุ่มอัด-อบแห้ง-อบผนึก โดยแช่ผ้าในสารละลายไมโครแคปซูลวิตามินอีที่ความเข้มข้น 30 กรัมต่อลิตร และสารช่วยติดชนิดอะคริลิคที่ความเข้มข้น 0, 10, 20 และ 30 กรัมต่อลิตร เป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นนำผ้าเข้าเครื่องบีบอัดที่ความเร็ว 4 รอบต่อนาที และแรงดัน 0.2 บาร์ อบแห้งด้วยเครื่องอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 30 วินาที และอบผนึกด้วยเครื่องอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 160°C เป็นเวลา 2 นาที นำผ้าที่ผ่านการตกแต่งมาวิเคราะห์ดูลักษณะการติดของไมโครแคปซูลวิตามินอีบนพื้นผิวของผ้าฝ้ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด โดยเคลือบทองลงบนผิวผ้าก่อนส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด

*2. ศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของไมโครแคปซูลวิตามินอี*

นำผ้าฝ้ายที่ผ่านการทำความสะอาด มาตกแต่งด้วยกระบวนการจุ่มอัด-อบแห้ง-อบผนึก โดยแช่ผ้าในสารละลายไมโครแคปซูลวิตามินอีที่ความเข้มข้น 10, 20 และ 30 กรัมต่อลิตร และสารช่วยติดชนิดอะคริลิคที่ความเข้มข้นที่เหมาะสมจากข้อที่ 1 เป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นนำผ้าเข้าเครื่องบีบอัดที่ความเร็ว 4 รอบต่อนาที และแรงดัน 0.2 บาร์ อบแห้งด้วยเครื่องอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 30 วินาที และอบผนึกด้วยเครื่องอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 160°C เป็นเวลา 2 นาที นำผ้าที่ผ่านการตกแต่งมาวิเคราะห์ดูลักษณะการติดของไมโครแคปซูลวิตามินอีบนพื้นผิวของผ้าฝ้ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด โดยเคลือบทองลงบนผิวผ้าก่อนส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด

*ศึกษาผลของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยไมโครแคปซูลวิตามินอีต่อการรักษาความชุ่มชื้นของผิวมะเขือเทศ*

นำผ้าฝ้ายมาทำการทดสอบการรักษาความชุ่มชื้นให้กับผิวของมะเขือเทศ (Tomato Experiment) โดยศึกษาผลของผ้าฝ้ายที่ไม่ผ่านการตกแต่งและผ่านการตกแต่งด้วยไมโครแคปซูลวิตามินอีทั้ง 3 สภาวะ ที่มีระดับความเข้มข้นของไมโครแคปซูลวิตามินอี 10, 20 และ 30 กรัมต่อลิตร และสารช่วยติดชนิดอะคริลิคที่ได้จากการทดลองข้อที่ 1 ทำการทดสอบด้วยการห่อหุ้มผลของมะเขือเทศด้วยผ้าฝ้ายที่ไม่ผ่านการตกแต่งและผ่านการตกแต่งทั้งหมด ก่อนเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C โดยมีการทำให้ไมโครแคปซูลวิตามินอีปล่อยวิตามินอีออกมาบนผ้าด้วยการขัดถูโดยการขยำผ้าทีละผืนทุกผืน โดยในแต่ละผืนทำการขยำจำนวน 50 ครั้งเท่า ๆ กัน นาน 1 นาที ทุกวันเป็นเวลา 7 วัน และสังเกตการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผิวมะเขือเทศ เก็บผลการทดลองด้วยภาพถ่ายทุกวัน รายงานผลด้วยภาพถ่ายมะเขือเทศก่อนการทดลองภาพวันที่ 3 และ 7

**ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง**

*ผลการศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมในการตกแต่งผ้าฝ้ายด้วยไมโครแคปซูลวิตามินอี*

*1. ผลการศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารช่วยติดชนิดอะคริลิค*

ผลการวิเคราะห์พื้นผิวของผ้าที่ตกแต่งด้วยสารช่วยติดชนิดอะคริลิคที่ความเข้มข้น 0, 10, 20 และ 30 กรัมต่อลิตร โดยใช้ไมโครแคปซูลวิตามินอีที่ความเข้มข้น 30 กรัมต่อลิตร ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด จาก Fig. 1 พบว่ามีเม็ดไมโครแคปซูลวิตามินอีติดอยู่บนผ้าที่ผ่านการตกแต่งทั้งที่ไม่ใช้สารช่วยติดชนิดอะคริลิค และใช้สารช่วยติดชนิดอะคริลิคที่ความเข้มข้นต่างกัน โดยผ้าที่ผ่านการตกแต่งด้วยสารช่วยติดชนิดอะคริลิคที่ความเข้มข้นต่างกัน ปริมาณการติดของไมโครแคปซูลวิตามินอีมีปริมาณมากกว่า เมื่อเทียบกับผ้าที่ไม่ใช้สารช่วยติด ซึ่งหากดูจากลักษณะการติดของเม็ดไมโครแคปซูลวิตามินอี พบว่าที่ความเข้มข้นของสารช่วยติดชนิดอะคริลิค 20 กรัมต่อลิตร ลักษณะการติดของไมโครแคปซูลวิตามินอีที่ติดอยู่บนผ้ามีปริมาณมากและลักษณะการติดของเม็ดไมโครแคปซูลวิตามินอีมีการกระจายตัวได้ดี เมื่อเทียบกับการใช้สารช่วยติดชนิดอะคริลิคที่ความเข้มข้น 10 และ 30 กรัมต่อลิตร ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกความเข้มข้นของสารช่วยติดชนิดอะคริลิคที่ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร เป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมในการตกแต่งผ้าฝ้าย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Phussadee and Jantip (2019) ที่ได้มีการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการตกแต่งผ้าไหมด้วยไมโครแคปซูลของน้ำมันหอมระเหย พบว่าที่ความเข้นข้นของสารช่วยติดชนิดอะคริลิคที่เหมาะสมคือ 20 กรัมต่อลิตร ทำให้ไมโครแคปซูลน้ำมันหอมระเหยติดอยู่บนผ้าได้ในปริมาณที่เหมาะสมและลักษณะการติดของเม็ดไมโครแคปซูลน้ำมันหอมระเหยมีการกระจายตัวได้ดี

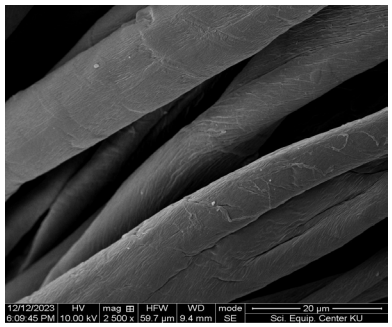
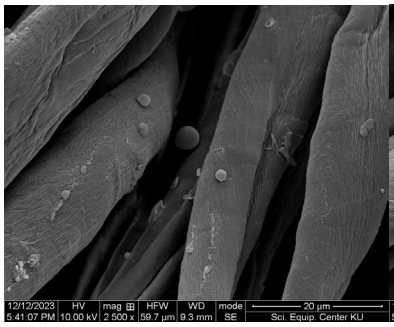
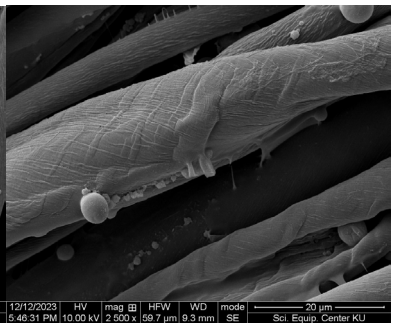
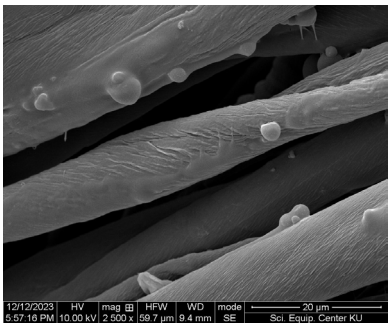
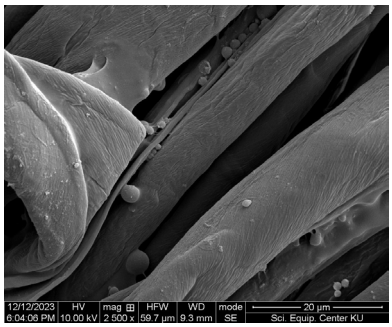
| Untreated fabric | 0 g/L Acrylic binder | 10 g/L Acrylic binder |
|---|---|---|
|  |  |  |
| **20 g/L Acrylic binder** | **30 g/L Acrylic binder** | |
|  |  | |

**Fig. 1** SEM images of treated fabric with acrylic binder at concentrations of 0 , 10, 20, 30 g/L and fix Vitamin E Microcapsule concentrations of 30 g/L

*2. ผลการศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของไมโครแคปซูลวิตามินอี*

ผลการวิเคราะห์พื้นผิวผ้าที่ตกแต่งด้วยไมโครแคปซูลวิตามินอีที่ความเข้มข้น 0, 10, 20 และ 30 กรัมต่อลิตร โดยใช้สารช่วยติดชนิดอะคริลิคที่ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด จาก Fig. 2 พบว่า ปริมาณการติดของไมโครแคปซูลวิตามินอีบนผ้าฝ้าย มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณความเข้มข้นของไมโครแคปซูลวิตามินอี ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงเลือกใช้ไมโครแคปซูลวิตามินอีที่ความเข้มข้น 30 กรัมต่อลิตร สำหรับการทำวิจัยในขั้นตอนต่อไป เนื่องจากเป็นปริมาณซึ่งน่าจะส่งผลในการรักษาความชุ่มชื้นให้กับผิวของมะเขือเทศได้มากที่สุด

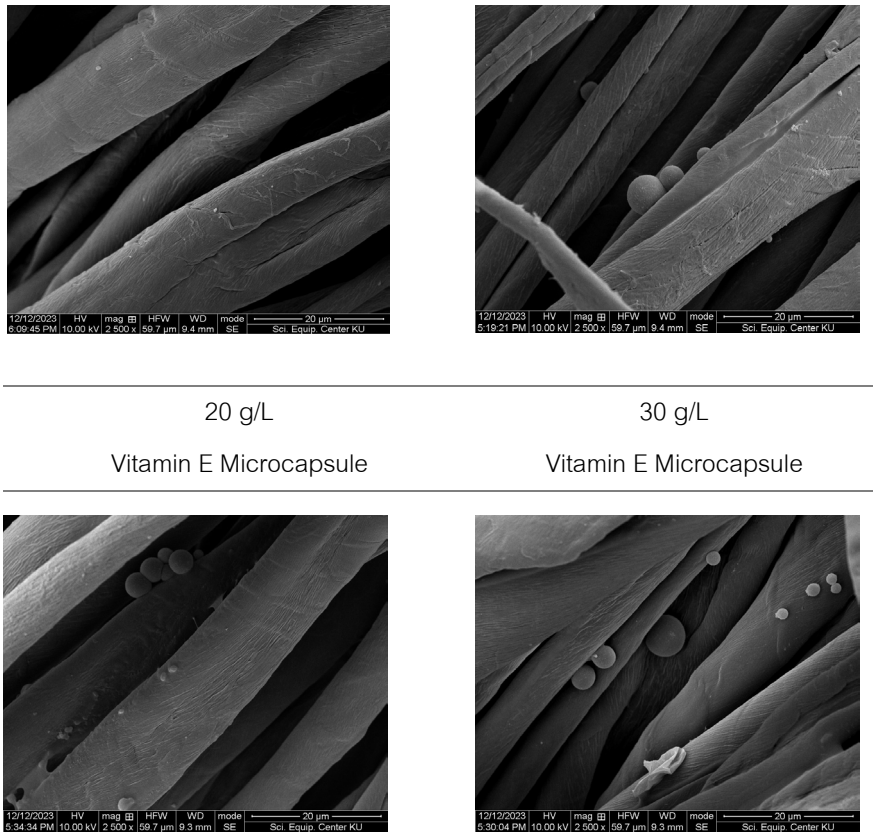



**Fig. 2** SEM images of treated fabric with Vitamin E Microcapsules at Concentrations of 10, 20 and 30 g/L and fix acrylic binder concentration of 20 g/L

*ผลการศึกษาผลของผ้าที่ตกแต่งด้วยไมโครแคปซูลวิตามินอีต่อการรักษาความชุ่มชื้นของผิวมะเขือเทศ*

เนื่องจากดีเอ็นเอของมนุษย์และดีเอ็นเอของมะเขือเทศมีความคล้ายคลึงกัน ทั้งสองประกอบด้วยหน่วยการสร้างนิวคลีโอไทด์ ได้แก่ อะดีนีน กัวนีน ไซโตซีน และไทมีน (Rathod, 2023) ซึ่งจัดเป็นโครโมโซมเช่นกัน วิจัยนี้จึงเลือกใช้มะเขือเทศมาใช้ในการทดสอบ จากผลการทดสอบประสิทธิภาพการรักษาความชุ่มชื้นของไมโครแคปซูลวิตามินอีที่ตกแต่งลงบนผ้าฝ้าย ในการรักษาความชุ่มชื้นให้กับผิวของมะเขือเทศของผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยไมโครแคปซูลวิตามิอีที่ความเข้มข้น 0, 10, 20 และ 30 กรัมต่อลิตร และสารช่วยติดชนิดอะคริลิค 20 กรัมต่อลิตร โดยนำผ้ามาห่อหุ้มผลของมะเขือเทศ เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงของผิวมะเขือเทศ

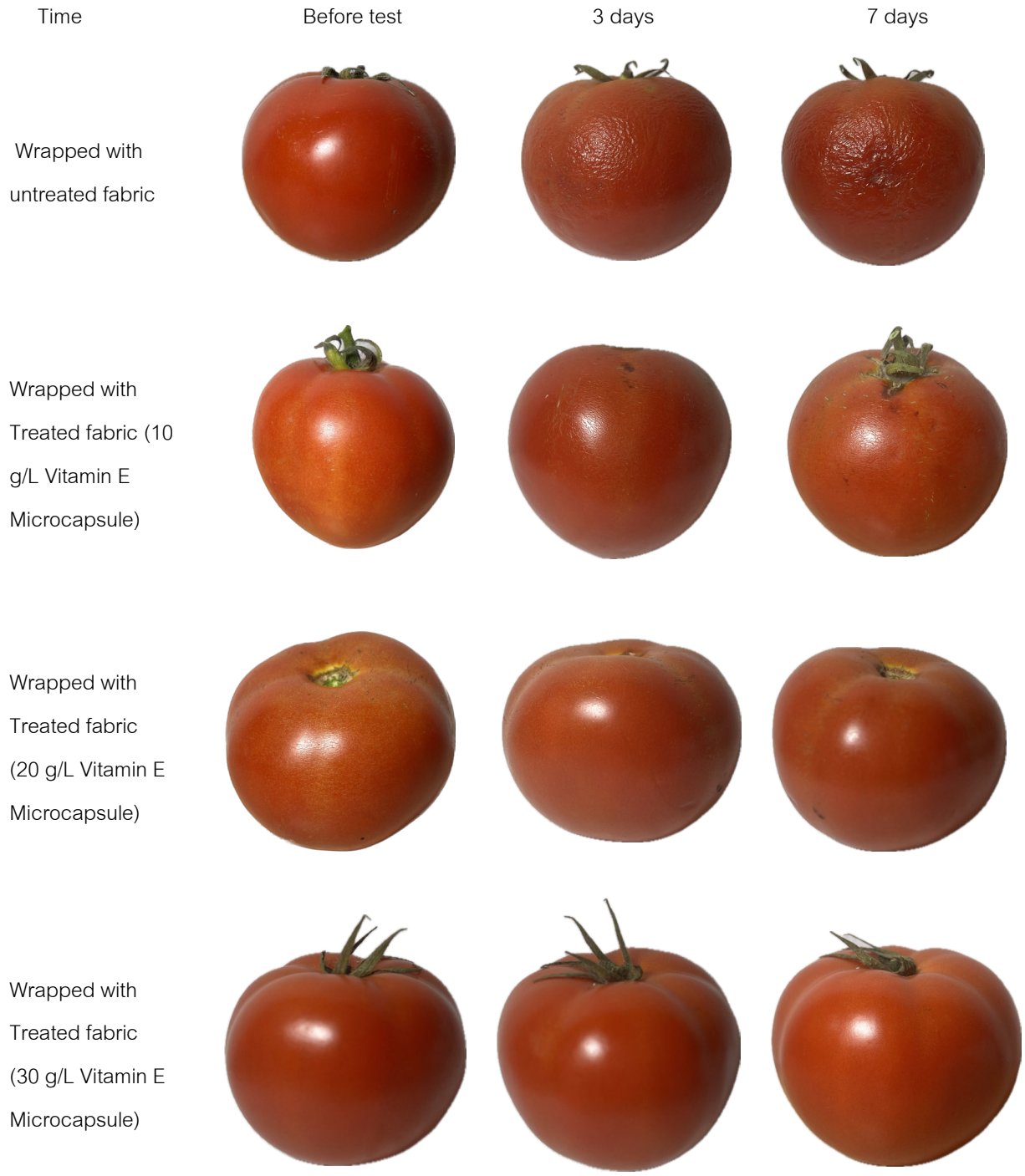



**Fig. 3** The comparison of tomato skin before and after wrapped with fabric treated with Vitamin E Microcapsule at 10, 20 and 30 g/L and fix acrylic binder at 20 g/L within 7 days investigated

จาก Fig. 3 ผลการเปรียบเทียบผิวของมะเขือเทศที่ถูกห่อหุ้มด้วยผ้าที่ไม่ผ่านการตกแต่งและผ้าที่ผ่านการตกแต่งด้วยไมโครแคปซูลวิตามินอี ที่ความเข้มข้น 10, 20 และ 30 กรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 25°C สังเกตการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผิวมะเขือเทศ เก็บผลการทดลองทุกวัน พบว่าผิวของมะเขือเทศที่ห่อหุ้มด้วยผ้าฝ้ายที่ไม่ผ่านการตกแต่งด้วยไมโครแคปซูลวิตามินอี เมื่อระยะเวลาผ่านไป 3 วัน ผิวของมะเขือเทศเกิดการเหี่ยวย่น ขาดความชุ่มชื้น เกิดรอยช้ำบนผิว

ของมะเขือเทศ และเมื่อเวลาผ่านไป 7 วัน ผิวเกิดการเหี่ยวย่น เกิดรอยช้ำมากขึ้น ในขณะที่ผิวของมะเขือเทศที่ห่อหุ้มด้วยผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยไมโครแคปซูลวิตามินอีที่ความเข้มข้นที่ 10 กรัมต่อลิตร เมื่อระยะเวลาผ่านไป 7 วัน ผิวของมะเขือเทศเริ่มพบรอยช้ำ และเริ่มมีผิวที่เหี่ยวย่นเล็กน้อย ผิวของมะเขือเทศที่ห่อหุ้มด้วยผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยไมโครแคปซูลวิตามินอีที่ความเข้มข้นที่ 20 กรัมต่อลิตร ผิวของมะเขือเทศเกิดรอยเหี่ยวย่นสีขาวเล็กน้อย แต่ยังสามารถรักษาความชุ่มชื้นไว้ได้ดี ในขณะที่ผิวของมะเขือเทศที่ห่อหุ้มด้วยผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยไมโครแคปซูลวิตามินอีที่ความเข้มข้นที่ 30 กรัมต่อลิตร สามารถรักษาความชุ่มชื้นให้กับผิวของมะเขือเทศได้ดีที่สุด เมื่อระยะเวลาผ่านไป 7 วัน ผิวของมะเขือเทศไม่มีรอยช้ำและไม่เกิดรอยเหี่ยวย่น เนื่องจากวิตามินอีมีสรรพคุณช่วยปกป้องและให้ความชุ่มชื้นกับผิว ส่งผลให้ผิวของมะเขือเทศที่ถูกห่อหุ้มด้วยผ้าที่ตกแต่งด้วยไมโครแคปซูลวิตามินอีในปริมาณที่มากขึ้นสามารถรักษาความชุ่มชื้นได้ดีมากยิ่งขึ้น

ผลการศึกษาจากการพิจารณาคุณภาพผิวของมะเขือเทศที่ผ่านไปเป็นเวลา 7 วัน สรุปได้ว่า มะเขือเทศที่ห่อหุ้มด้วยผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยไมโครแคปซูลวิตามินอีที่ความเข้มข้นที่ 30 กรัมต่อลิตร และความเข้มข้นที่ 20 กรัมต่อลิตรของสารช่วยติดชนิดอะคริลิคสามารถรักษาความชุ่มชื้นให้กับผิวของมะเขือเทศได้ดีที่สุด

## สรุป

จากผลการศึกษาพบว่าสามารถตกแต่งไมโครแคปซูลวิตามินอีลงบนผ้าฝ้ายได้โดยกระบวนการจุ่มอัด-อบแห้ง-อบผนึก โดยสภาวะที่เหมาะสมวิเคราะห์จากปริมาณการติดและกระจายตัวของไมโครแคปซูลวิตามินอีบนผ้าฝ้ายด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด พบว่าความเข้มข้นของไมโครแคปซูลวิตามินอี และสารช่วยติดชนิดอะคริลิคที่เหมาะสมคือที่ความเข้มข้น 30 กรัมต่อลิตร และ 20 กรัมต่อลิตรตามลำดับ และผลการทดสอบการรักษาความชุ่มชื้นของผิวมะเขือเทศ พบว่ามะเขือเทศที่ห่อหุ้มด้วยผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยไมโครแคปซูลวิตามินอีที่ความเข้มข้นที่ 30 กรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของสารช่วยติดชนิดอะคริลิค 20 กรัมต่อลิตร สามารถรักษาความชุ่มชื้นให้กับผิวของมะเขือเทศได้ดีที่สุด จากผลการศึกษานี้สามารถนำข้อมูลมาใช้ประโยชน์เป็นแนวทางให้กับผู้ประกอบการ และผู้ที่สนใจทั่วไปในการผลิตหรือพัฒนาผลิตภัณฑ์เพื่อเพิ่มมูลค่าในอุตสาหกรรมสิ่งทอต่อไป

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณทุนนำเสนอผลงานในการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 62 ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สาขาอุตสาหกรรมเกษตร ที่สนับสนุนการนำเสนอผลงานในครั้งนี้ ขอขอบพระคุณภาควิชาวิทยาการสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ห้องปฏิบัติการ เครื่องมือ อุปกรณ์เพื่อใช้ในการทำวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ผุสดี แซ่ลิ่ม อาจารย์ที่ปรึกษาวิชาโครงงานวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งทอที่ได้กรุณาสละเวลาให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษาและตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆที่เป็นประโยชน์จนกระทั่งงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

## เอกสารอ้างอิง

ณัฐพงษ์ ปัญญาธิคุณ. 2559. การพัฒนาชุดชั้นในสตรีโดยการตกแต่งสำเร็จด้วยคอลลาเจน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

สุภัสตรา สุขทองสาม, วัชระ ยี่สุ่นเทศ. 2565. ปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมการซื้อครีมบำรุงผิวหน้าของผู้บริโภคในเขตกรุงเทพมหานคร. วารสารมหาจุฬานาครทรรศน์ 9: 264–278.

Basyigit, Z.O., Kut, D., Yenilmez, E., Eyüpoglu, S., Hocaoglu, E., Yazan, Y. 2018. Vitamin E loaded fabrics as cosmetotextile products: Formulation and characterization. Tekstil ve Konfeksiyon 28: 162–169.

Lim, P., Setthayanond, J. 2019. Factors affecting release of microencapsulated essential oils from finished silk fabric for automotive and home textile products. Int. J. Eng. Adv. Technol. 8: 501–504.

Oloko, O.T. 2022. Microencapsulation of Vitamin E and application to textile. M.Sc. thesis, Department of Chemistry, Morgan State University. Baltimore, MD, USA.

Prakash, V., Parida, L. 2023. Characterization and rheological behavior of vitamin E nanoemulsions prepared by phase inversion composition technique. Results in Engineering 18: 101175. doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101175

Rathod, N. 2023. How does human DNA compared to tomato. How does human DNA compared to tomato? – Brainly.com, 25 January 2023.

Rizvi, S., Raza, S.T., Ahmed, F., Ahmad, A., Abbas, S., Mahdi, F. 2014. The role of vitamin e in human health and some diseases. Sultan Qaboos Univ. Med. J. 14: 157–165.

Singh, N., Sheikha, J. 2020. Microencapsulation and its application in production of functional textiles. Indian J. Fibre Text. Res. 45: 495–509.

Son, K., Yoo, D.I. Shin, Y. 2014. Fixation of vitamin E microcapsules on dyed cotton fabrics. Chem. Eng. J. 239: 284–289. doi.org/10.1016/j.cej.2013.11.03

Sousa, V.I., Parente, J.F., Marques, J.F., Forte, M.A., Tavares, C.J. 2022. Microencapsulation of essential oils: A Review. Polymers 14: 1730. doi: 10.3390/polym14091730

# การศึกษาวิธีการสกัดและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดหยาบจากใบหม่อน

## A study of the extraction methods and antioxidant activity of crude extracts from mulberry leaves

**สิวินีย์ ยงค์ไพบูลย์*, หทัยรัตน์ ริมคีรี, วิษฐิดา จันทราพรชัย**

Siwinee Yongpaiboon*, Hathairat Rimkeeree, Withida Chantrapornchai

ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Product Development, Faculty of Agro Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: siwinee.y@ku.th

**บทคัดย่อ**

ใบหม่อนเป็นพืชสมุนไพรที่อุดมไปด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพหลายชนิด จึงได้รับความนิยมในการนำมาเป็นส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์อย่างแพร่หลาย งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากรรมวิธีการสกัดสารสกัดหยาบใบหม่อนและศึกษาค่าการต้านอนุมูลอิสระโดยรวมของสารสกัดหยาบใบหม่อนด้วยวิธี ABTS assay และ FRAP assay เมื่อนำผงใบหม่อนแห้งมาสกัดด้วยตัวทำละลายเอทานอลที่อัตราส่วน 1:2, 1:3 และ 1:4 (w/v) พบว่าผลผลิตร้อยละของสารสกัดหยาบเท่ากับ 4.16±0.06, 4.57±0.06 และ 5.19±0.05 ตามลำดับ จากการศึกษาฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี ABTS และ FRAP ของสารสกัดหยาบทั้งสามอัตราส่วนพบว่า สารสกัดใบหม่อนหยาบที่อัตราส่วน 1:4 มีค่าการต้านอนุมูลอิสระและปริมาณเทียบเท่าสารมาตรฐานเฟอร์รัสซัลเฟตมากที่สุด และจากการศึกษาครั้งนี้พบว่าสารสกัดหยาบที่ผ่านการสกัดโดยเพิ่มความมีขั้วของตัวทำละลาย ชั้นไดคลอโรมีเทนให้สารสกัดที่มีค่าการต้านอนุมูลอิสระมากที่สุด และสารสกัดที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์อาหารและเครื่องสำอางต่อไป

**คำสำคัญ**: ใบหม่อน, สารต้านอนุมูลอิสระ, สารสกัดหยาบ

**Abstract**

Mulberry leaves are a herbal plant that is rich in bioactive compounds. They are widely used as a component in various products. This study aimed to investigate the extraction methods of crude mulberry leaf extract and to study the overall antioxidant capacity of crude mulberry leaf extract using ABTS assay and FRAP assay. When dried mulberry leaf powder was extracted with ethanol at the ratios of 1:2, 1:3, and 1:4 (w/v), the yield of crude extract was found to be 4.16±0.06, 4.57±0.06, and 5.19±0.05, respectively. The antioxidant activities of crude extracts at the three ratios were evaluated by ABTS and FRAP assays. The crude mulberry leaf extract at the ratio of 1:4 had the highest antioxidant activity and equivalent to the ferrous sulfate standard. The study also found that crude extract with increased polarity of the solvent layer dichloromethane gave the extract with the highest antioxidant activity. The extract obtained can be used as an ingredient in food and cosmetic products.

**Keywords**: Antioxidants, Crude extracts, Mulberry leaves

**คำนำ**

หม่อนมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Morus alba* Linn จำแนกอยู่ในวงศ์ Moraceae เป็นไม้พุ่มขนาดกลางหรือไม้ยืนต้นขนาดเล็ก พบปลูกทั่วไปในเอเชียตะวันออกตอนเหนือ ทวีปแอฟริกาตอนใต้ ทวีปยุโรป และทวีปอเมริกา รวมถึงประเทศไทย ใบหม่อนเป็นใบเดี่ยว ตำแหน่งของใบออกเรียงสลับกัน ใบเป็นรูปไข่ ปลายใบแหลมยาว โคนใบเว้าเป็นรูปหัวใจหรือค่อนข้างตัด ขอบใบเรียบหรือหยักเว้า แผ่นใบเป็นสีเขียวเข้มผิวเรียบเงา ท้องใบเป็นสีเขียวอ่อน ใบค่อนข้างหนา หลังใบสากระคาย เส้นใบมี 3 เส้น ออกจากโคนทอดยาวไปถึงกลางใบ และเส้นใบออกจากเส้นกลางใบอีก 4 คู่ เส้นร่างแหปรากฏชัดเจนจากด้านล่าง ก้านใบเรียวเล็ก ความยาวประมาณ 1–1.5 เซนติเมตร (ศุภสิทธิ์, 2562)

สารสำคัญในใบหม่อนประกอบด้วยสารฟลาโวนอยด์ที่มีฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ ฤทธิ์ต้านการอักเสบ ได้แก่ เควอซิติน แอสทากาลิน ไอโซเคสอซิตริน และรูทิน โพลิฟีนอลิก คือ แอลกอฮอล์ที่ประกอบด้วยวงแหวนเบนซีนมากกว่าหรือเท่ากับ 2 วงต่อเข้าด้วยกัน โดยแต่ละวงจะมีหมู่ไฮดรอกซี (-OH) เกาะอยู่อย่างน้อย 1 หมู่ สารกลุ่มนี้มีความหลากหลายอย่างมากทางโครงสร้าง โดยมีโครงสร้างตั้งแต่โมเลกุลง่าย ๆ เช่น กรดฟีนอลิก ฟีนอลิกโพรพานอยด์ และฟลาโวนอยด์ ไปจนถึงโครงสร้างโมเลกุลที่ซับซ้อน และขนาดใหญ่ เช่น ลิกนิน เมลานิน และแทนนิน เป็นต้น จากสารประกอบเหล่านี้กลุ่มฟลาโวนอยด์เป็นกลุ่มที่พบได้บ่อย และมีกลุ่มย่อยมากที่สุดในกลุ่มสารประกอบฟีนอลิก มีรายงานว่าสารฟลาโวนอยด์เป็นสารในกลุ่มนี้ที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพที่หลากหลายมากกว่าฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ ได้แก่ ฤทธิ์ต้านแบคทีเรีย ฤทธิ์ต้านไวรัส ฤทธิ์ต้านการอักเสบ ฤทธิ์ต้านการเกิดภูมิแพ้ ฤทธิ์ต้านภาวะเส้นเลือดอุดตัน ฤทธิ์ต้านสารก่อมะเร็ง ฤทธิ์ต้านสารพิษในตับ และฤทธิ์ช่วยขยายหลอดเลือด (ศุภสิทธิ์, 2019) มีการศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดหยาบจากใบหม่อน โดยใช้วิธีการสกัดที่แตกต่างกัน สารสกัดที่ได้ประกอบไปด้วยสารต่าง ๆ เช่น กรดฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ กรดอินทรีย์ และอนุพันธ์ของกรดไขมัน (Guo et al., 2023) ในประเมินฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดใบหม่อนโดยใช้วิธี DPPH ผลลัพธ์แสดงว่าฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับวิธีการสกัดและปริมาณฟีนอลของสารสกัด (Chen, et al., 2022; Verma et al., 2022) การศึกษาครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากรรมวิธีการสกัดสารสกัดหยาบจากใบหม่อน และประเมินฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดหยาบที่ได้ เพื่อแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของสารสกัดใบหม่อนในการเป็นแหล่งของสารต้านอนุมูลอิสระจากธรรมชาติ

**อุปกรณ์และวิธีการ**

ใบหม่อนแห้งสายพันธุ์สกลนคร (มุกดาหาร ประเทศไทย) เอทานอล (กรมสรรพสามิต ประเทศไทย) ไดคลอโรมีเทน (บริษัท อาร์ซีไอ แล็บสแกน ประเทศไทย) เฮกเซน (บริษัท อาร์ซีไอ แล็บสแกน ประเทศไทย) เอทิลอะซิเตท (บริษัท อาร์ซีไอ แล็บสแกน ประเทศไทย) น้ำบริสุทธิ์ (สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ประเทศไทย)

*กรรมวิธีการสกัดสารสกัดหยาบ (crude extract) จากใบหม่อน*

*การเตรียมวัตถุดิบ*

นำใบหม่อนแห้งพันธุ์สกลนคร จากพื้นที่เพาะปลูกจังหวัด มุกดาหารจำนวน 20 กิโลกรัม ชั่งน้ำหนักเริ่มต้นปั่นละเอียดโดยเครื่องปั่นความเร็วสูง วัดค่าความชื้นด้วยเครื่องวัดความชื้น (Moisture Analyzer PCE-MA 200 บริษัท อินสทรูเมนท์ ประเทศไทย) ชั่งน้ำหนักตัวอย่างผงใบหม่อนแห้งที่ได้ บรรจุลงถุงอลูมิเนียมที่ปิดสนิท เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 20–25 องศาเซลเซียส

*การสกัดสารสกัดหยาบจากใบหม่อน*

ชั่งน้ำหนักผงใบหม่อนแห้ง 500 กรัม แช่ในเอทานอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 95 โดยใช้ ผงใบหม่อนแห้ง:เอทานอล (w/v) ที่ 1:2, 1:3 และ 1:4 ที่อุณหภูมิ 25–30 องศาเซลเซียส เวลา 10 นาที กรองแยกสารละลายส่วนใส และแช่ซ้ำ 3 ครั้ง ระเหยแห้งสารละลายส่วนใสด้วยเครื่องกลั่นระเหยสุญญากาศแบบหมุน (รุ่น อาร์-200 บริษัท บูชิ ประเทศสวิตเซอร์แลนด์) ที่อุณหภูมิ 30–40 องศาเซลเซียสจนตัวทำละลายระเหยออกจนหมด ชั่งน้ำหนักสารสกัดใบหม่อนที่ได้ บรรจุลงขวดแก้วสีชาที่ปิดมิดชิด เก็บที่อุณหภูมิ 3–4 องศาเซลเซียส

*การสกัดโดยเพิ่มความมีขั้วของตัวทำละลาย (liquid-liquid partitioning extraction)*

หลังจากวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี radical scavenging activity, 2,2'-azino-bis (3ethylbenzothiazoline-6-sulphonic acid) (ABTS) radical cation decolorization assay ด้วยชุดทดสอบ Antioxidant Assay Kit (บริษัท ซิกมา-อัลดริช ประเทศไทย) และ Ferric Ion Reducing Antioxidant Power assay (FRAP) ด้วยชุดทดสอบ Ferric Ion Reducing Antioxidant Power (FRAP) Assay (บริษัท ซิกมา-อัลดริช ประเทศไทย) และวิเคราะห์ผลทางสถิติ คัดเลือกสารสกัดหยาบใบหม่อนที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระมากที่สุด นำมาสกัดในกรวยแยกสาร (Separatory funnel) (บริษัทไพเร็กซ์ ประเทศเยอรมนี) ด้วยตัวทำละลายต่าง ๆ โดยอาศัยคุณสมบัติความมีขั้ว (Polarity) ของทั้งตัวทำละลายและสารสำคัญในสารสกัดใบหม่อนหยาบ ดังแสดงใน Fig 1.

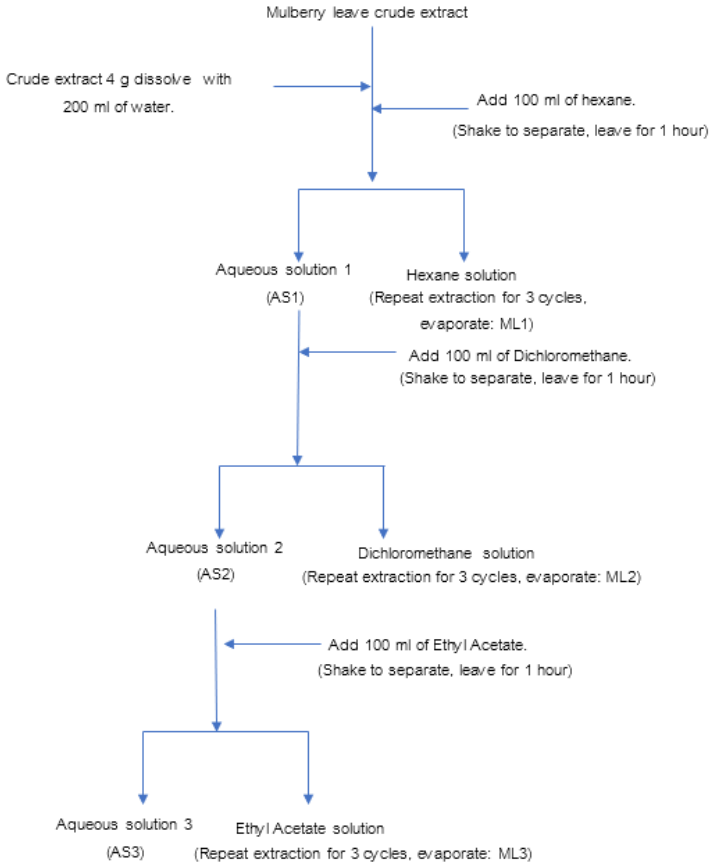



**Fig. 1** Solvent extraction of crude extracts according to their polarity properties

ขั้นที่ 1 โดยชั่งน้ำหนักสารสกัดหยาบใบหม่อน 4 กรัม ละลายด้วยน้ำ 200 มิลลิลิตร เติมลงในกรวยแยกสาร เติมเฮกเซน 100 มิลลิลิตรเขย่าเพื่อแยกส่วนทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมงไขสารละลายส่วนตัวทำละลายเฮกเซนออก เก็บไว้ในภาชนะปิดเติมเฮกเซนอีกครั้งในกรวยแยกสาร และ สกัดซ้ำจนครบ 3 รอบนำสารละลายส่วนตัวทำละลายเฮกเซนที่ผ่านการแยกทั้ง 3 รอบระเหยแห้งด้วยเครื่องกลั่นระเหยสุญญากาศแบบหมุน ที่อุณหภูมิ 30–40 องศาเซลเซียสจนตัวทำละลายระเหยออกจนหมด ชั่งน้ำหนักสารสกัดที่ได้ (ML1) เก็บที่อุณหภูมิ 3–4 องศาเซลเซียส สารละลายส่วนน้ำ (AS1) ถูกแยกออกและนำไปใช้ในขั้นที่ 2

ขั้นที่ 2 นำสารละลายส่วนน้ำที่ถูกแยกออกในขั้นที่ 1 (AS1) เติมลงในกรวยแยกสาร เติมไดคลอโรมีเทน 100 มิลลิลิตร เขย่าเพื่อแยกส่วน ทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ไขสารละลายส่วนไดคลอโรมีเทนออกเก็บไว้ในภาชนะปิด เติมไดคลอโรมีเทน และ สกัดซ้ำจนครบ 3 รอบ นำสารละลายส่วนไดคลอโรมีเทนที่ผ่านการแยกระเหยแห้งด้วยเครื่องกลั่นระเหยสุญญากาศแบบหมุน ที่อุณหภูมิ 30–40 องศาเซลเซียสจนตัวทำละลายระเหยออกจนหมด ชั่งน้ำหนักสารสกัดที่ได้ (ML2) เก็บที่อุณหภูมิ 3–4 องศาเซลเซียสสารละลายส่วนน้ำ (AS2) ถูกแยกออกและนำไปใช้ในขั้นที่ 3

ขั้นที่ 3 นำสารละลายส่วนน้ำที่ถูกแยกออกในขั้นที่ 2 เติมลงในกรวยแยกสารเติมเอทิลอะซิเตท 100 มิลลิลิตร เขย่าเพื่อแยกส่วน ทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ไขสารละลายส่วนเอทิลอะซิเตทออกเก็บไว้ในภาชนะปิด เติมเอทิลอะซิเตท และ สกัดซ้ำจนครบ 3 รอบ แยกสารละลายส่วนน้ำ (AS3) และ สารละลายส่วนเอทิลอะซิเตทออกจากกัน และระเหยแห้งสารละลายที่ผ่านการแยกส่วน ชั่งน้ำหนักสารสกัดที่ได้ (ML3) เก็บที่อุณหภูมิ 3–4 องศาเซลเซียส

*การวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดใบหม่อน*

วิเคราะห์ทดสอบด้วยชุดทดสอบ Antioxidant Assay Kit เตรียมความเข้มข้นของสารมาตรฐานโทรลอกซ์ ที่ความเข้มข้น 0.015, 0.045, 0.105, 0.21 และ 0.42 มิลลิโมลาร์ และสารตัวอย่าง ที่ 1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตรในตัวทำละลายเมทานอล เติมลงใน 96-เวลเพลท 10 ไมโครลิตร เติม Myoglobin Working Solution 20 ไมโครลิตร และ ABTS Substrate Working Solution 150 ไมโครลิตร บ่มที่ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที หยุดปฏิกิริยาด้วยการเติม Stop Solution 100 ไมโครลิตร นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องอ่านปฏิกิริยาไมโครเพลท (บริษัท ทีแคน รุ่น อินฟิ นิต เอ็ม 200 โปร ประเทศสหรัฐอเมริกา) ที่ความยาวคลื่น 504 นาโนเมตร นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย เปอร์เซ็นต์การต้านอนุมูลอิสระ โดยคำนวณตาม Equation 1

$$\text{Antioxidant activity (\%)} = ((Abs_{Blank} - Abs_{Sample}) / Abs_{Blank}) \times 100 \quad (1)$$

Antioxidant activity = Antioxidant activity of Sample (%)

$Abs_{Sample}$ = The absorbance value of the test substance and sample.

$Abs_{Blank}$ = The absorbance value of the test substance and solvent.

*วิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี* Ferric Ion Reducing Antioxidant Power (FRAP) Assay *ด้วยชุดทดสอบ*

เตรียมความเข้มข้นของสารมาตรฐานเฟอร์รัสความเข้มข้นที่ 2 มิลลิโมลาร์ เจือจางด้วย FRAP Assay Buffer ให้ได้ 0, 4, 8, 12, 16 และ 20 นาโนโมล และเตรียมสารตัวอย่าง ที่ความเข้มข้น 1 กรัมต่อมิลลิลิตรในเมทานอล เตรียมตัวอย่างทดสอบ (Reaction Mix) ลงใน 96-เวลเพลทโดยเติมสารตัวอย่าง 10 ไมโครลิตร FRAP Assay Buffer

152 ไมโครลิตร $FeCl^3$ Solution 19 ไมโครลิตร และเติม FRAP Probe 19 ไมโครลิตร เตรียม Background Control Mix ลงใน 96-เวลเพลทโดย FRAP Assay Buffer 171 ไมโครลิตร และเติม $FeCl^3$ Solution 19 ไมโครลิตร บ่มที่ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 594 นาโนเมตร นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยปริมาณสารทดสอบเทียบเท่าสารมาตรฐานเฟอร์รัสซัลเฟต โดยคำนวนจากค่า ความชัน (Slope) และจุดตัดของกราฟบนแกน Y (Intercept) สมการเส้นตรงของกราฟสารมาตรฐาน ตาม Equation 2

$$\text{Antioxidant activity (mM Ferrous equivalents)} = (Abs_{Sample} - \text{Intercept})/\text{Slope} \quad (2)$$

Antioxidant activity = Antioxidant activity of Sample (mM Ferrous equivalents)

$Abs_{Sample}$ = The absorbance value of the test substance and sample.

Intercept = Interception value of Calibration curve

Slope = Interception value of Calibration curve

*การวิเคราะห์ผลทางสถิติ*

ออกแบบการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) วิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS (Statistical Package for Social Sciences Version 27) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

**ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง**

*ผลการสกัดสารสกัดหยาบจากใบหม่อน*

ผงใบหม่อนแห้งมีค่าความชื้น (Moisture Content) เท่ากับ 8.26±0.31 % จากการนำผงใบหม่อนแห้งที่ได้มาสกัดสารสกัดหยาบด้วยตัวทำละลายเอทานอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 95 ที่อัตราส่วน ผงใบหม่อนแห้ง:เอทานอล (w/v) ที่ 1:2, 1:3 และ 1:4 ระเหยแห้งด้วยเครื่องกลั่นระเหยสุญญากาศพบว่ามีค่าร้อยละผลผลิต (percent yield) เท่ากับ 4.16±0.06 4.57±0.06 และ 5.19±0.05 ตามลำดับ และผลการสกัดแยกสารสีเขียวออกจากสารสกัดหยาบใบหม่อนที่อัตราส่วน1:4ด้วยตัวทำละลายเฮกเซน ไดคลอโรมีเทน เอทิลอะซิเตท และน้ำ พบว่ามีค่าผลผลิตร้อยละ เท่ากับ 60.58±0.51 62.48±0.2 และ 11.22±0.33 ตามลำดับ (Table 1)

**Table 1** Appearance and % yield crude mulberry leaf extract

| Sample | Appearance of crude extract | Weight of crude extract (mg) | % yield |
|---|---|---|---|
| Mulberry leave to ethanol ratio 1:2 | Dark green | 21.1 | 4.16±0.06 |
| Mulberry leave to ethanol ratio 1:3 | Dark green | 22.9 | 4.57±0.06 |
| Mulberry leave to ethanol ratio 1:4 | Dark green | 25.65 | 5.19±0.05 |
| ML1 (Hexane) | Dark green | 2.41 | 60.58±0.51 |
| ML2 (Dichloromethane) | Dark yellow | 2.49 | 62.48±0.2 |
| ML3 (Ethyl acetate) | Dark yellow | 0.45 | 11.22±0.33 |

*ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดหยาบใบหม่อน*

ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดหยาบใบหม่อน ทดสอบด้วยวิธี ABTS โดยแสดงเป็นร้อยละ (%) ที่อัตราส่วนผงใบหม่อนแห้ง:เอทานอล (w/v) (Table 2) จะเห็นได้ว่า ค่าฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดหยาบใบหม่อนที่ละลายด้วยเอทานอล ที่ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตรทุกรูปแบบสารสกัดมีค่าฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงเกิน 60% พบว่าสารสกัดหยาบใบหม่อนที่สกัดด้วยเอทานอลในอัตราส่วน 1:4 มีค่าฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงที่สุด โดยมีค่าสูงถึง 78.71% ซึ่งมากกว่าสารสกัดหยาบใบหม่อนที่สกัดด้วยเอทานอลในอัตราส่วน 1:2 และ 1:3 อย่างชัดเจน แสดงให้เห็นว่า อัตราส่วนของเอทานอลต่อใบหม่อนที่ใช้ในการสกัดมีผลต่อฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ โดยอัตราส่วน 1:4 ให้ผลผลิตสารสกัดที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงที่สุด คาดว่าเนื่องจากอัตราส่วนที่ใช้มีปริมาณของตัวทำละลายมากกว่า จึงทำให้มีประสิทธิภาพในการสกัดสารสำคัญออกจากใบหม่อนได้ดีกว่า (Giorgis et al., 2027)

การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดหยาบใบหม่อน โดยใช้วิธี FRAP ซึ่งวัดความสามารถในการรีดิวซ์เฟอริสซัลเฟต (Fe3+) ให้กลายเป็นเฟอรัสไอออน (Fe2+) ยิ่งค่าปริมาณเทียบเท่าเฟอรัสซัลเฟตมาตรฐานสูง แสดงว่าฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระยิ่งมาก ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสารสกัดที่ได้จากการสกัดด้วยเอทานอล 1:4 มีค่าปริมาณเทียบเท่าเฟอรัส ซัลเฟตมาตรฐานสูงกว่า 1:2 และ 1:3 สารสกัดที่ได้จากการสกัดด้วยเอทานอล 1:4 มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงสุด (Table 2)

*ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดหยาบใบหม่อนที่ผ่านการสกัดโดยเพิ่มความมีขั้วของตัวทำละลาย*

ค่าฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดหยาบใบหม่อนที่ผ่านการสกัดโดยเพิ่มความมีขั้วของตัวทำละลาย ได้แก่ น้ำ เอทิลอะซิเตท เฮกเซน และไดคลอโรมีเทน โดยวิธี ABTS (Table 3) ค่าที่แสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ของการต้านอนุมูลอิสระยิ่งค่าเปอร์เซ็นต์สูง แสดงว่าฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระยิ่งมาก ไดคลอโรมีเทนเป็นตัวทำละลายที่มีประสิทธิภาพในการสกัดสารต้านอนุมูลอิสระมากที่สุด สารสกัดที่ได้มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงสุด

ผลการวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดหยาบใบหม่อนที่ผ่านการสกัดโดยเพิ่มความมีขั้วของตัวทำละลาย ได้แก่ เอทิลอะซิเตท เฮกเซน ไดคลอโรมีเทน โดยใช้วิธี FRAP (Table 3) โดยแสดงเป็นปริมาณเทียบเท่าเฟอรัสซัลเฟตมาตรฐานของสารสกัดหยาบใบหม่อน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าไดคลอโรมีเทนเป็นตัวทำละลายที่มีประสิทธิภาพในการสกัดสารต้านอนุมูลอิสระมากที่สุด โดยสารสกัดที่ได้จากไดคลอโรมีเทนมีค่าปริมาณเทียบเท่าเฟอรัสซัลเฟตมาตรฐานสูงสุด และมีค่าปริมาณเทียบเท่าเฟอรัสซัลเฟตมาตรฐานสูงกว่าสารสกัดเริ่มต้น

ผลการวิจัยเบื้องต้น (Table 3) ชี้ให้เห็นว่า สารประกอบออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในใบหม่อนส่วนใหญ่เป็นสารประกอบที่มีขั้วสูง เช่น แอนโธไซยานิน ฟลาโวนอยด์ และโพลีฟีนอล สารประกอบเหล่านี้สามารถละลายได้ดีในตัวทำละลายที่มีขั้วสูง เช่น ไดคลอโรมีเทน เมื่อสารสกัดหยาบใบหม่อนผ่านการสกัดโดยเพิ่มความมีขั้วของตัวทำละลาย ชั้นไดคลอโรมีเทนจะดูดซับสารประกอบออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีขั้วสูงเหล่านี้ไว้ ทำให้สารสกัดหยาบในชั้นไดคลอโรมีเทนมีค่าการต้านอนุมูลอิสระมากที่สุด นอกจากนี้ การสกัดด้วยตัวทำละลายที่มีขั้วสูงยังช่วยเพิ่มอัตราการสกัดสารประกอบออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีขั้วสูงอีกด้วย ส่งผลให้สารสกัดหยาบในชั้นไดคลอโรมีเทนมีปริมาณสารประกอบออกฤทธิ์ทางชีวภาพสูง จึงทำให้มีค่าการต้านอนุมูลอิสระสูงตามไปด้วย ดังนั้น สารสกัดหยาบจากใบหม่อนที่ผ่านการสกัดโดยเพิ่มความมีขั้วของตัวทำละลาย ชั้นไดคลอโรมีเทนมีค่าการต้านอนุมูลอิสระมากที่สุด เนื่องจากชั้นไดคลอโรมีเทนสามารถดูดซับสารประกอบออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีขั้วสูงไว้ได้ และช่วยเพิ่มอัตราการสกัดสารประกอบออกฤทธิ์ทางชีวภาพเหล่านี้อีกด้วย

**Table 2** Antioxidant activity of crude mulberry leaf extract

| Mulberry leave to ethanol ratio (w/v) | Antioxidant activity | |
|---|---|---|
| | ABTS assay (%) | FRAP assay (mM Ferrous equivalents) |
| 1:2 | 67.66±0.07$^{c}$ | 95.0±0.00$^{c}$ |
| 1:3 | 70.56±0.40$^{b}$ | 104.7±0.00$^{b}$ |
| 1:4 | 78.71±0.06$^{a}$ | 106.8±0.00$^{a}$ |

* Means in the same column followed by different superscripts are significantly different ($p < 0.05$)

**Table 3** Antioxidant activity of the crude mulberry leaf extract that has been extracted and separated by color separation

| Extraction step | Antioxidant activity | |
|---|---|---|
| | ABTS assay (%) | FRAP assay (mM Ferrous equivalents) |
| ML1 (Hexane) | 56.49±0.14$^{b}$ | 321.0±0.00$^{b}$ |
| ML2 (Dichloromethane) | 91.65±0.17$^{a}$ | 805.0±0.01$^{a}$ |
| ML3 (Ethyl acetate) | 46.86±0.45$^{c}$ | 258.4±0.00$^{c}$ |

* Means in the same column followed by different superscripts are significantly different ($p < 0.05$)

## สรุป

การศึกษาวิธีการสกัดสารสกัดหยาบใบหม่อนด้วยตัวทำละลายเอทานอลร้อยละ 95 โดยใช้อัตราส่วนตัวทำละลายต่อผงใบหม่อนแตกต่างกัน พบว่าอัตราส่วน 1:4 ให้ผลผลิตร้อยละสูงสุด รองลงมาคืออัตราส่วน 1:3 และ 1:2 ตามลำดับ จากการศึกษาครั้งนี้ พบว่าสารสกัดหยาบใบหม่อนที่อัตราส่วน 1:4 มีค่าการต้านอนุมูลอิสระสูงสุด เมื่อผ่านการสกัดด้วยตัวทำละลายเอทานอลร้อยละ 95 และแยกชั้นด้วยตัวทำละลายไดคลอโรมีเทน เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการเป็นส่วนประกอบของการพัฒนาผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ

**กิตติกรรมประกาศ**

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และศูนย์เชี่ยวชาญนวัตกรรมผลิตภัณฑ์สมุนไพร สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ที่มีส่วนช่วยเหลือให้งานวิจัยนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และขอขอบคุณคณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่มอบทุนสนับสนุนการนำเสนอผลงานในการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 62 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สาขาอุตสาหกรรมเกษตร

**เอกสารอ้างอิง**

ศุภสิทธิ์ อินทร์แสง. 2562. การผลิตไมโครแคปซูลสกัดใบหม่อนวิทยานิพนธ์ปริญญาโท, คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

Medthai. 2563. ใบหม่อน สรรพคุณและประโยชน์ของต้นหม่อน 50 ข้อ. https://medthai.com/%e0%b8%ab%e0%b8%a1%e0%b9%88%e0%b8%ad%e0%b8%99/, 1 ตุลาคม 2566.

Chen, C, Mokhtar, R.A.M., Sani, M.S.A., Noor, N.Q.I.M. 2022. The effect of maturity and extraction solvents on bioactive compounds and antioxidant activity of Mulberry (*Morus alba*) fruits and leaves. Molecules 27: 2406–2406. doi: 10.3390/molecules27082406

Giorgis, S., Lorenza, T., Dante, F. 2007. Effects of extraction time, temperature and solvent on concentration and antioxidant activity of grape marc phenolics. 81: 200–208. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2006.10.021

Guo, Z., Lai, Z., Wu, Y., Wang, S., Liang, X. 2023. Investigation on antioxidant activity and different metabolites of Mulberry (*Morus* spp.) leaves depending on the harvest months by UPLC–Q-TOF-MS with Multivariate tools. Molecules 28: 1947–1947. doi: 10.3390/molecules28041947

Verma, S., Usenov, A.K., Shakhnoza, S., Safarov, J. 2022. Determination of antioxidant activity of dried Mulberry leaves. 2022 2nd International Conference on Technological Advancements in Computational Sciences. Tashkent, Uzbekistan, pp. 273–276. doi: 10.1109/ICTACS56270.2022.9988364

# สาขาทรัพยากรธรรมชาติ และสิ่งแวดล้อม

(Subject: Natural Resources And Environment)

---

# ภาคโปสเตอร์

(Poster Presentation)

# ผลของการเติมเปลือกสับปะรดต่อการผลิตปุ๋ยหมักจากผักตบชวาและฟางข้าว

## Effect of adding pineapple peel on compost production from water hyacinth and rice straw

**กานต์สินี วิรุณกาญจน์***, **ปิยาภรณ์ สมสมัคร**, **อาทิตยา ช่างด้วง**, **ประไพพิศ ชัยรัตนมโนกร**

Kansinee Wirunkan*, Piyapawn Somsamak, Athitaya Changduang, Prapaipid Chairattanamanokorn

ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Environmental Technology and Management, Faculty of Environment, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: kansinee.wi@ku.th

**บทคัดย่อ**

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนของเปลือกสับปะรดในการผลิตปุ๋ยหมักจากผักตบชวาและฟางข้าวที่มีต่อคุณสมบัติของปุ๋ยหมัก หมักถังขนาด 20 L ที่อัตราส่วนของผักตบชวา (W) เปลือกสับปะรด (P) และฟางข้าว (S) ดังนี้ P0 (W1:P0:S1), P1 (W1:P1:S1), P2 (W1:P2:S1), P3 (W1:P3:S1) และ P4 (W1:P4:S1) และเติมพด. 1 ทำการผสมสัปดาห์ละ 1 ครั้ง ระยะเวลาในการหมัก 49 วัน จากผลทดลองพบว่าปุ๋ยหมักจากอัตราส่วนการผสมที่ P3 (W1:P3:S1) และ P4 (W1:P4:S1) มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน 13.37 กับ 16.01 และมีดัชนีการงอกของเมล็ด 51.36% กับ 61.10% ตามลำดับ หลังจากนั้นศึกษาผลของการเติมอากาศ 3 แบบ ได้แก่ การผสม 1 ครั้ง/สัปดาห์โดยไม่เติมอากาศ การเติมอากาศทุก 6 ชม. และการเติมอากาศ 24 ชม. จากการหมักที่อัตราส่วนผสมสูตร P4 รูปแบบการเติมอากาศไม่ได้ส่งผลต่อการความแตกต่างจำนวนโคโลนีของกลุ่มจุลินทรีย์ประเภทแบคทีเรีย เชื้อรา แอคติโนมัยซีท และจุลินทรีย์ที่ผลิตเอนไซม์เซลลูเลส ทุกกลุ่มเพิ่มขึ้นสูงหลัง 7 วัน 3–5 เท่า โดยอุณหภูมิในถังสูงถึง 40–43°C

**คำสำคัญ**: การงอก, การเติมอากาศ, การทำปุ๋ยหมัก, การนับจำนวนจุลินทรีย์, เปลือกสับปะรด

**Abstract**

This research aims to study the effect of the ratio of pineapple peel in the compost production from water hyacinth and rice straw on characteristics of the compost. The composting in 20-liter tanks at the ratio of water hyacinth (W), pineapple peel (P) and rice straw (S) as: P0 (W1:P0: S1), P1 (W1:P1: S1), P2 (W1:P2: S1), P3 (W1:P3: S1) and P4 (W1:P4: S1) as well as adding microbial activator super LDD1. Mixing is done once a week in the tank for 49 days. The results showed that the composts from the mixing ratios of P3 and P4 had the ratio of carbon to nitrogen were 13.37 and 16.01 and the seed germination index were 51.36 and 61.10%. Aftermore, the effect of aeration methods was studied in the composting at the ratio P4 with 3 aeration patterns: mixing once a week without aeration, aeration with switch on-off every 6 hr. and aeration 24 hr. The pattern of aeration did not affect the difference of colony forming units (CFU) of microorganism: bacteria, fungi, antinomycetes and cellulase producing microorganism. The CFU of microorganisms was increased by 3–5 times after 7 days with temperatures in the tanks as high as 40–43°C.

**Keywords**: Aeration, Composting, Germination, Microbial population count, Pineapple peel

**คำนำ**

ปัจจุบันการทำปุ๋ยหมักเป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรหรือวัชพืช เช่น ฟางข้าว ซังข้าวโพด พืชตระกูลถั่ว หญ้าแห้ง ผักตบชวา หรือมูลสัตว์ ของเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ตลอดจนขยะมูลฝอยตามบ้านเรือนมาทำการหมัก โดยผ่านกระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์ ซึ่งจะย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีองค์ประกอบซับซ้อนให้มีขนาดเล็กลง จนถึงจุดที่จุลินทรีย์ย่อยสลายได้ช้าหรือย่อยสลายไม่ได้ และมีความเสถียร การทำปุ๋ยหมักแต่ละครั้งมักใช้ระยะเวลานานกว่าจะได้ผลิตภัณฑ์ ส่งผลให้เกิดการสูญเสียไนโตรเจนจำนวนมากในรูปของแอมโมเนีย เนื่องจากการเปลี่ยนรูปแอมโมเนียเกิดได้จากปัจจัยด้านปริมาณและระยะเวลาในการเติมอากาศที่ไปเร่งการเปลี่ยนรูปของแอมโมเนีย ทำให้คุณภาพของปุ๋ยหมักที่ได้ต่ำ (Rich et al., 2018) ในปัจจุบันมีการศึกษามากมายเพื่อให้กระบวนการหมักเร็วขึ้น จากการศึกษาของ Zhang and Sun (2018) ทำการหาอัตราส่วนของกากหัวบีทและเศษกระดาษในกระบวนการหมักแบบ 2 ขั้นตอน พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สามารถช่วยเร่งกระบวนการหมักให้เร็วขึ้น คือกากหัวบีท 25% และเศษกระดาษ 10% โดยจะไปเพิ่มความพรุน ทำให้ออกซิเจนและการกักเก็บน้ำในปุ๋ยหมักเพิ่มมากขึ้น หรือจากการศึกษาของ Omorotionmwan et al. (2018) ที่เลือกใช้เปลือกสับปะรดมาหมัก เพื่อดูการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ เนื่องจากผิวของเปลือกสับปะรดสามารถเป็นที่อยู่อาศัยของจุลินทรีย์ และมีน้ำตาลที่จะไปช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ให้เพิ่มมากขึ้น รวมทั้งเปลือกสับปะรดสามารถช่วยยับยั้งจุลินทรีย์ที่ก่อโรค

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาปุ๋ยหมักจากผักตบชวา เปลือกสับปะรด และฟางข้าว มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของเปลือกสับปะรด ศึกษาผลของปุ๋ยหมักต่อการงอกของเมล็ดผักกวางตุ้ง และศึกษาระยะเวลาการเติมอากาศ ต่อการเปลี่ยนของจำนวนจุลินทรีย์ เปลือกสับปะรดมีน้ำตาลเป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่ส่งเสริมการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ซึ่งส่งผลต่อกระบวนการผลิตปุ๋ยหมักให้เร็วขึ้น และสามารถนำไปใช้ร่วมในการกำจัดวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรชนิดอื่น ๆ ได้

**อุปกรณ์และวิธีการ**

*ศึกษาคุณสมบัติของผักตบชวา เปลือกสับปะรด และฟางข้าว*

นำผักตบชวา เปลือกสับปะรด และฟางข้าว ตัดให้มีขนาดไม่เกิน 3 inch (UF/IFAS, 2023) นำไปอบที่อุณหภูมิ 105°C จนน้ำหนักคงที่ จากนั้นทำการปั่นตัวอย่างให้มีขนาดเล็ก เพื่อที่นำไปใช้ในการวิเคราะห์หาค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงดัง Table 1

**Table 1** Chemical composition of materials used in the fermentation process

| Fermented materials | Chemical composition | | |
|---|---|---|---|
| | Carbon | Nitrogen | C/N |
| Water hyacinth | 39.82 | 2.99 | 13.33 |
| Pineapple peel | 52.53 | 2.07 | 25.34 |
| Straw | 45.56 | 3.55 | 12.85 |

*การหมัก*

*ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของเปลือกสับปะรด*

นำผักตบชวา เปลือกสับปะรด และฟางข้าว มาตัดให้มีขนาดไม่เกิน 3 inch เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวให้จุลินทรีย์เข้ามาย่อยสลายได้ง่าย (UF/IFAS, 2023) ใส่ลงในถังหมักขนาด 20 L (ถังหมักมีการเจาะรูด้านล่างทั้ง 2 ฝั่งในแนวนอน เพื่อให้ใส่ท่อพีวีซีที่มีการเจาะรูเข้าไปในตัวถังหมัก) โดยมีความหนาแน่นของวัสดุเฉลี่ยอยู่ที่ 25–266 g/cm$^3$ และเติมเชื้อจุลินทรีย์ที่ได้จากพด.1 ในอัตราส่วน 1:100 นอกจากนี้ทุกสัปดาห์จะทำการกวนผสมวัตถุดิบภายในถังหมัก เพื่อเป็นการเติมอากาศเข้ามาในถังหมัก ทำให้วัตถุดิบให้ถังหมักเกิดการผสมและระบายอากาศ โดยมีแผนการศึกษาแสดงดังนี้ Table 2 (ส่วน1)

**Table 2** Experimental plan

| Recipes | | Mixing ratio | | | Aerobic | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Water hyacinth | Pineapple peel | Straw | Stir | Aerator |
| 1 | P0 | 1 | 0 | 1 | ✓ | |
| | P1 | 1 | 1 | 1 | ✓ | |
| | P2 | 1 | 2 | 1 | ✓ | |
| | P3 | 1 | 3 | 1 | ✓ | |
| | P4 | 1 | 4 | 1 | ✓ | |
| 2 | Air0 (P4) | 1 | 4 | 1 | ✓ | |
| | Air6 (P4) | 1 | 4 | 1 | | Switch on-off for 6 hours |
| | Air24 (P4) | 1 | 4 | 1 | | 24 hours |

*การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์สมบัติของปุ๋ยหมัก*

ทำการสุ่มตัวอย่างปุ๋ยหมัก 50 g แบ่งเป็น 3 ซ้ำ มาทำการวิเคราะห์หาอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนสัปดาห์ละ 1 ครั้ง และเมื่อสิ้นสุดกระบวนการหมัก นำตัวอย่างปุ๋ยหมักมาทดสอบการงอกของเมล็ดพันธุ์พืช

*วิเคราะห์ปริมาณอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน*

ปริมาณคาร์บอน นำตัวอย่างที่ผ่านการอบแห้งและปั่นให้มีขนาดเล็ก ไปเผาที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 2 ชม. จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนักและคำนวณตาม Equation 1

$$\text{Carbon (\%)} = [(\text{Weight before burning} - \text{Weight after burning})/ \text{Weight before burning})] \times 1.8 \quad (1)$$

ปริมาณไนโตรเจน ด้วยวิธี Kjeldhal (กรมพัฒนาที่ดิน, 2547) นำตัวอย่างไปย่อยด้วยกรดซัลฟิวริก ที่มีการเติมโพแทสเซียม และคอปเปอร์ซัลเฟต เป็นเวลา 2–4 ชม. จนกลายเป็นสารละลายฟ้าอมเขียว นำเข้าเครื่องกลั่น ใช้กรดบอริกมารองรับไอแอมโมเนีย เปลี่ยนจากสีม่วงแดงเป็นสีเขียว จากนั้นนำไปไทเทรตด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกจนเปลี่ยนเป็นสีชมพูและคำนวณตาม Equation 2 เมื่อได้ค่าทั้งหมดนำไปคำนวณปริมาณอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนตาม Equation 3

$$\text{Total Keldahl Nitrogen (\%)} = [(\text{Normality of HCl}) \times (V_s - V_b) \times (0.014) \times (100)]/W_s \quad (2)$$

$$\text{C/N ratio} = \text{Carbon (\%)} / \text{TKN (\%)} \quad (3)$$

*ศึกษาการงอกของเมล็ดผักกวางตุ้ง*

นำปุ๋ยหมักผสมน้ำกลั่นในอัตราส่วน 1:10 ทำการวางเมล็ดผักกวางตุ้งทั้งหมด 10 เมล็ด ลงในกระดาษกรอง ทำทั้งหมด 3 ซ้ำ ใส่น้ำสกัดปุ๋ยหมัก และน้ำกลั่นสำหรับกลุ่มควบคุม จานละ 5 mL นำไปบ่มไว้ในที่มืดอุณหภูมิระหว่าง 28–30°C นาน 48 hr. (กรมพัฒนาที่ดิน, 2547) คำนวณตาม Equation 4

$$GI(\%) = \frac{[\text{Seed germination of treatment}][\text{Root length of treatment}]}{[\text{Seed germination of control}][\text{Root length of control}]} \quad (4)$$

*ศึกษารูปแบบการเติมอากาศ ต่อการเปลี่ยนของจำนวณจุลินทรีย์*

นำผักตบชวา เปลือกสับปะรด และฟางข้าว มาตัดให้มีขนาดไม่เกิน 3 inch (UF/IFAS, 2023) ผสมลงในถังหมักขนาด 20 L (ถังหมักมีการเจาะรูด้านล่างทั้ง 2 ฝั่งในแนวนอน เพื่อใส่ท่อพีวีซีที่มีการเจาะรูเข้าไปในตัวถังหมัก แต่ทำการปิดปลายท่อพีวีซี โดยทำการใส่ท่อลมของเครื่องเติมอากาศ) ตามสูตรผสม P4 ลงไป ซึ่งมีความหนาแน่นของวัสดุเฉลี่ยอยู่ที่ 350 g/cm$^3$ และเติมเชื้อจุลินทรีย์ที่ได้จากพด.1 ในอัตราส่วน 1:100 โดยจะทำการเติมอากาศ 3 แบบ คือการเติมอากาศด้วยการกวนผสมสัปดาห์ละ 1 ครั้ง, เติมโดยเครื่องปั๊มอากาศแบบสลับเปิด-ปิดทุก 6 ชม. และเปิดตลอด 24 ชม. มีอัตราการเติมอากาศ 0.2 L/min (Xiong et al., 2017) ตาม Table 2 (ส่วน2)

*วิเคราะห์ปริมาณจุลินทรีย์ในปุ๋ยหมัก*

สุ่มเก็บตัวอย่างปุ๋ยหมัก 30 g. เพื่อมานับจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นในปุ๋ยหมัก ด้วยวิธี Standard plate counts โดยนำปุ๋ยหมักผสมกับน้ำอัตราส่วน 1:10 จากนั้นนำไปเจือจางแบบอนุกรม จนได้ระดับความเจือจางที่ต้องการ นำแต่ละระดับความเจือจาง หยดลงบนผิวหน้าอาหารเลี้ยงเชื้อ 0.1 mL ในอาหารเลี้ยงเชื้อ ได้แก่ แบคทีเรียใช้ Trypticase soy agar (TSA), เชื้อราใช้ Potato dextrose agar (PDA), แอคติโนมัยซีทใช้ Starch Casein Agar (SCA) และดูกิจกรรมการย่อยสลายเซลลูโลสของจุลินทรีย์ด้วย Carboxymethylcellulose agar (CMCA) แล้วเกลี่ยให้กระจายสม่ำเสมอทั่วผิวหน้าอาหารในจานเพาะเชื้อ โดยทำระดับความเจือจางละ 3 จาน จากนั้นนำไปบ่มเชื้อที่อุณหภูมิ 45°C เป็นเวลา 48 ชม. และทำการนับโคโลนีที่เกิดขึ้น นำไปคำนวณตาม Equation 5

$$\text{CFU/g} = \text{Total colony counts range from 25-250 colonies} / [(v1n1+0.1n2) \times d] \quad (5)$$

**ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง**

*ปริมาณคาร์บอนของปุ๋ยหมัก*

ตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์มีปริมาณของคาร์บอนลดลงจากวันที่เริ่มการหมัก เนื่องจากจุลินทรีย์ทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ เพื่อนำคาร์บอนไปใช้ในกระบวนการสร้างองค์ประกอบของเซลล์สำหรับการเจริญเติบโต จะเห็นได้ว่าในช่วงเริ่มต้นมีปริมาณคาร์บอนแต่ละสูตรประมาณร้อยละ 40–50 มีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาการหมัก เนื่องจาก

กระบวนการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่จะทำการเปลี่ยนคาร์บอนให้เป็นแหล่งพลังงาน และปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่ภายนอก ส่งผลให้ปริมาณคาร์บอนในปุ๋ยหมักลดลง (Lu et al., 2018) ดังแสดงใน Fig. 1A ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อทำการหมักผ่านไป 28 วัน ปริมาณคาร์บอนมีแนวโน้มคงที่ โดยมีอัตราการย่อยสลายลดลง พิจารณาได้ว่าวัสดุที่นำมาหมักเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงเป็นปุ๋ย ทำให้เหลือแต่อินทรีย์สารที่มีโครงสร้างที่แข็งแรง ซึ่งยากต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ (Manga et al., 2022) นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณอัตราส่วนเปลือกสับปะรดที่ผสมแต่ละสูตร มีผลต่อปริมาณคาร์บอนในปุ๋ยหมัก เห็นได้ว่าในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการหมักสูตรผสม P4 (W1:P4:S1) เป็นสูตรที่มีการผสมเปลือกสับปะรดมากที่สุด มีปริมาณคาร์บอนสูงถึง 47.41% เมื่อเทียบกับสูตรผสม P0 (W1:P0:S1) ที่ไม่มีการผสมเปลือกสับปะรด มีปริมาณคาร์บอน 42.18% เมื่อสิ้นสุดกระบวนการหมัก สูตรผสม P4 มีปริมาณคาร์บอน 35.51% ลดลงมา 11.90% ในขณะที่สูตรผสมที่ 1 มีปริมาณคาร์บอน 37.68% ลดลงเพียง 4.5% เนื่องจากเปลือกสับปะรดมีน้ำตาลเป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งเป็นอินทรีย์คาร์บอนที่จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายง่าย เพื่อนำไปเป็นแหล่งพลังงานช่วยในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ (Omorotionmwan et al., 2018)

*ปริมาณไนโตรเจนของปุ๋ยหมัก*

ไนโตรเจนมีการเพิ่มสูงขึ้นจากวันที่เริ่มกระบวนการหมัก จากผลการทดลอง Fig. 1B พบว่าปริมาณไนโตรเจนในช่วงเริ่มต้นกระบวนการหมักอยู่ที่ 1.25–1.45% และเมื่อสิ้นสุดกระบวนการหมักมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณไนโตรเจนในแต่ละสูตรผสมประมาณร้อยละ 1.95–2.40% ซึ่งการที่ไนโตรเจนเพิ่มขึ้นเกิดจากการที่จุลินทรีย์มีการตรึงไนโตรเจนไว้ในเซลล์ เนื่องจากไนโตรเจนเป็นธาตุอาหารสำหรับต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ซึ่งจุลินทรีย์ส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วยโปรตีนและกรดนิวคลีอิก (Fang et al., 2023) เกิดจากการที่เปลือกสับปะรดมีปริมาณธาตุอาหารที่เหมาะสมต่อจุลินทรีย์และมีเอนไซม์โบมิเลนที่ช่วยทำให้วัตถุดิบมีขนาดเล็กลง (Omorotionmwan et al., 2018) ซึ่งจุลินทรีย์สามารถเข้าไปย่อยสลายได้ง่าย และตรึงไนโตรเจนเอาไว้กับตัว เพื่อใช้ในการเจริญเติบโต หรืออาจจะเกิดจากกระบวนการหมักแบบใช้อากาศที่มาจากการกวนผสม จึงส่งผลให้ไนโตรเจนไม่เกิดการเปลี่ยนรูปและอยู่ภายในปุ๋ยหมัก (Wang et al., 2021)

*อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของปุ๋ยหมัก*

C/N ratio มีผลต่อการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุ เนื่องจากคาร์บอนและไนโตรเจนมีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตและการทำงานของจุลินทรีย์ โดยไนโตรเจนช่วยในการสังเคราะห์กรดอะมิโน โปรตีน และกรดนิวคลีอิก ส่วนคาร์บอนช่วยสร้างโครงสร้างและเป็นแหล่งพลังงานของจุลินทรีย์ ดังนั้น C/N ratio ที่เหมาะสมต่อกระบวนการหมักควรอยู่ระหว่าง 25–30:1 แต่ในทางปฏิบัติสามารถมีค่าสูงได้ถึง 35–45:1 (Rangseesuriyachai and Saricheewin, 2018) เมื่อปุ๋ยหมักเสร็จสมบูรณ์ ควรมีค่า C/N ratio ไม่เกิน 20:1 ซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ของไทยที่ถือว่าสามารถนำไปใช้ในการปลูกพืชได้ (กรมวิชาการเกษตร, 2557) จากผลการทดลอง Fig. 1C มี C/N ratio เริ่มต้นของแต่ละสูตรผสม P0, P1, P2, P3 และ P4 เท่ากับ 29.00, 33.31, 35.52, 37.36, และ 37.97 ตามลำดับ เมื่อสิ้นสุดกระบวนการหมัก มี C/N ratio เท่ากับ 19.08, 16.45, 13.79, 13.77 และ 16.01 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าทุกสูตรการผสมมีแนวโน้มการลดลงของ C/N ratio มากในช่วงสัปดาห์ที่ 1 ของการหมัก เนื่องจากจุลินทรีย์ได้ทำการย่อยสลายสารอาหารที่ย่อยง่ายในถังหมัก และทุกสูตรการผสมมี C/N ratio เมื่อสิ้นสุดกระบวนการเป็นไปตามที่มาตรฐานกรมวิชาการเกษตรกำหนด

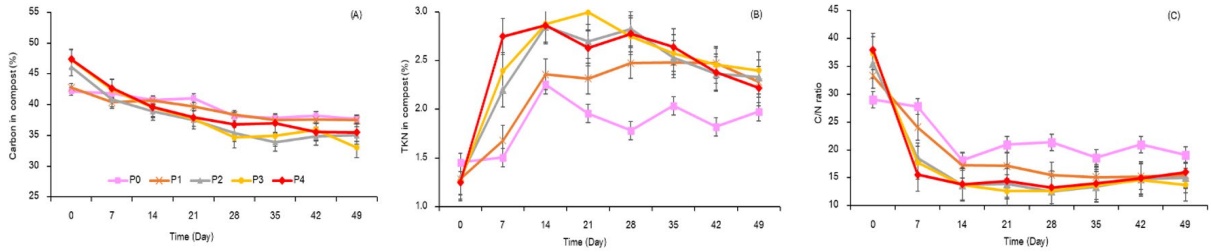



**Fig. 1** Chemical composition of each compost formula: Carbon (A); TKN (B); C/N ratio (C) in compost

*การทดสอบการงอกของเมล็ดผักกวางตุ้ง*

ดัชนีการงอกของเมล็ดเป็นปัจจัยหนึ่งที่ช่วยพิจารณาถึงการหมักเสร็จสมบูรณ์ของปุ๋ยหมัก โดยการสกัดปุ๋ยหมักด้วยน้ำ เพื่อละลายสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายไม่สมบูรณ์ออกมา ซึ่งสารเหล่านี้มีความเป็นพิษที่จะไปส่งผลต่อการงอกและความยาวรากของพืช (กรมพัฒนาที่ดิน, 2547) โดยดัชนีการงอกที่เหมาะสมควรมากกว่า 50% ซึ่งแสดงว่าปุ๋ยหมักนี้เสร็จสมบูรณ์และไม่เป็นอันตรายต่อพืช (Xiong et al., 2017) ได้เลือกเอาปุ๋ยหมักที่ 49 วันมาทดสอบ โดยพิจารณาจากคุณสมบัติทางกายภาพที่ปุ๋ยหมักเสร็จสมบูรณ์จะมีสีดำ และไม่มีกลิ่นเหม็น พร้อมพิจารณาด้วยคุณสมบัติทางเคมีที่ควรมี C/N ratio ไม่เกิน 20:1 (กรมวิชาการเกษตร, 2557) จาก Fig. 2 พบว่าสูตรการผสม P4 (W1:P4:S1) มีดัชนีการงอกที่สูงกว่าสูตรอื่น 61.10% ส่วนสูตรการผสมที่มีดัชนีการงอกที่น้อยสุด คือ สูตรการผสม P0 (W1:P0:S1) เท่ากับ 33.44% แต่จากการพิจารณาสูตรปุ๋ยหมักทั้ง 5 สูตร พบว่าสูตรผสมที่สามารถนำไปใช้ในการปลูกได้โดยที่ไม่เป็นอันตรายต่อพืช คือ สูตรผสมที่ P3 มีดัชนีการงอก 51.36% และ C/N ratio 13.77 พร้อมกับสูตรผสมที่ P4 มีดัชนีการงอก 61.10% และ C/N ratio 16.01 โดยทั้งสองสูตรมีค่าดัชนีการงอกสูงกว่า 50% จะเห็นได้ว่าดัชนีการงอกมีการเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของเปลือกสับปะรด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเปลือกสับปะรดสามารถเข้าไปช่วยในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์ เพื่อให้ได้ปุ๋ยหมักเสร็จสมบูรณ์และไม่เป็นอันตรายต่อพืช

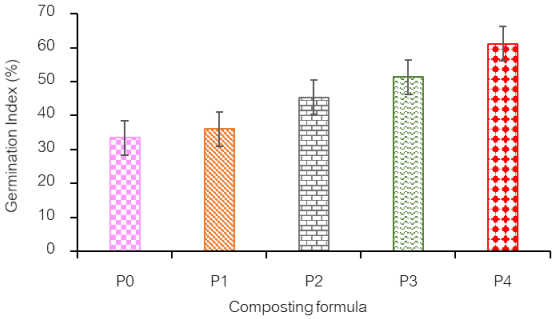



**Fig. 2** Germination Index of Bok choy in compost

*อุณหภูมิภายในปุ๋ยหมักต่อการเปลี่ยนแปลงของจุลินทรีย์*

อุณหภูมิเป็นปัจจัยทางกายภาพที่เป็นตัวบ่งชี้ถึงกิจกรรมการย่อยสลายวัตถุดิบหมักปุ๋ยของจุลินทรีย์ โดยอุณหภูมิ 25–45°C เป็นช่วงอุณหภูมิที่มีความเหมาะสมต่อกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ เนื่องจากเป็นระยะที่จุลินทรีย์เพิ่มขึ้น มีการย่อยสลายสารอินทรีย์ทำให้เกิดความร้อน และเมื่อทำการหมักไปสักพักอุณหภูมิจะค่อยลดลง เนื่องจากปริมาณสารอินทรีย์ภายในปุ๋ยหมักลดลง จุลินทรีย์ย่อยสลายได้น้อยลง ทำให้พลังงานความร้อนได้ลดลงจนอุณหภูมิภายในปุ๋ยหมักใกล้เคียงกับอุณหภูมิภายนอก (โสพัส, 2559) ในช่วงเริ่มต้นกระบวนการหมักทุกกลุ่มมีอุณหภูมิอยู่

ที่ 28.2°C อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 1–2 วันแรกของการหมัก โดยในแต่ละกลุ่มมีอุณหภูมิ คือ Air0 42.2°C และ Air6 กับ Air24 43.6°C ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิภายนอก คือ 34°C ซึ่งแสดงให้เห็นถึงกิจกรรมการย่อยสลายของจุลินทรีย์ที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อทำการหมักผ่านไป 49 วัน อุณหภูมิในแต่ละกลุ่มลดเหลือ 30.5°C ซึ่งใกล้เคียงกับอุณหภูมิภายนอก 30°C ดังแสดงใน Fig. 3

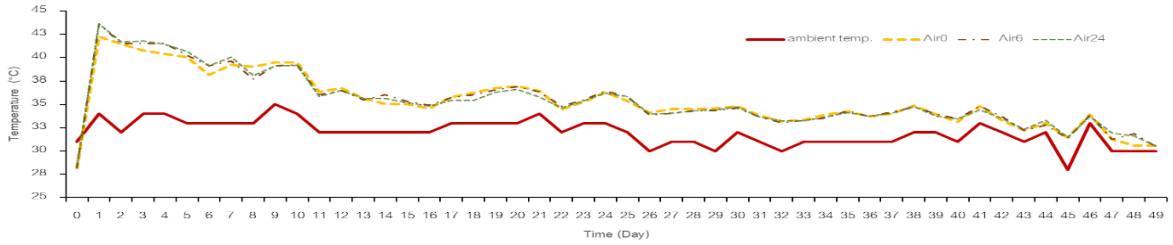



**Fig. 3** Temperature on microbial changes

*จำนวนจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นภายในปุ๋ยหมัก*

การผลิตปุ๋ยหมัก เกิดจากกระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์หลายชนิด โดยในการศึกษารูปแบบการเติมอากาศต่อการเปลี่ยนของจำนวนจุลินทรีย์ ได้เลือกเอาสูตรผสม P4 (W1:P4:S1) มาใช้ เนื่องจากเป็นสูตรที่เป็นไปตามมาตรฐานกำหนด คือมีค่า C/N ratio 16.01 ซึ่งมีค่าไม่เกิน 0 และมีดัชนีการงอกของเมล็ด 61.10% มาทำการเติมอากาศ 3 แบบ คือ กวนผสม, เติมอากาศแบบสลับเปิด-ปิดทุก 6 ชม. และเติมอากาศตลอด 24 ชม. พบว่าการเติมอากาศไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของจุลินทรีย์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ อาจเนื่องจากถังที่นำมาใช้ในการหมักมีขนาดเล็ก การเติมอากาศแบบกวนผสมให้ปริมาณออกซิเจนที่เพียงพอต่อความต้องการของจุลินทรีย์ที่ใช้ในการเจริญเติบโตและเพิ่มจำนวน ทำให้การเติมอากาศโดยใช้เครื่องจึงส่งผลต่อการเพิ่มจำนวนของจุลินทรีย์ไม่แตกต่างจากการกวนผสม (Munna et al., 2014) จาก Fig. 4 จะเห็นได้ว่าทุกสูตรอาหารในวันที่ 0 จะมีการพบจุลินทรีย์อยู่ในช่วง 1.7–2.4×$10^5$ CFU/g เมื่อทำการหมักผ่านไป 7 วัน จะเห็นได้ว่าจุลินทรีย์ในกองปุ๋ยหมักมีการเพิ่มขึ้น 3–5 เท่าจากวันที่ 0 จากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ 4 ชนิด แบคทีเรียเพิ่มขึ้น 7.02×$10^5$ CFU/g แบคทีเรีย มีบทบาทสำคัญช่วยย่อยสลายโปรตีนและคาร์โบไฮเดรต (Omorotionmwan et al., 2018) เชื้อราเพิ่มขึ้น 9.46×$10^5$ CFU/g เชื้อรา ช่วยย่อยสลายวัสดุอินทรีย์ที่มีโมเลกุลใหญ่และย่อยสลายยาก ได้แก่ ลิกนิน และเซลลูโลส (Verma et al., 2023 )แอคติโนมัยซีสเพิ่มขึ้น 1.07×$10^6$ CFU/g แอคติโนมัยซีสจะช่วยย่อยสลายเซลลูโลส ลิกนิน ไคติน และโปรตีน โดยจะโตได้ดีในสภาวะที่อากาศถ่ายเท (Javed et al., 2021) และอาหาร CMCA เป็นอาหารสำหรับทดสอบว่ามีจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายเซลลูโลส โดยเพิ่มขึ้น 9.54×$10^5$ CFU/g แสดงว่าภายในปุ๋ยหมักมีจุลินทรีย์สามารถเข้าไปย่อยสลายเซลลูโลสได้ และเมื่อทำการหมักครบ 49 วัน จะเห็นได้ว่ามีจำนวนจุลินทรีย์มีการลดลงจากการที่ภายในปุ๋ยหมักเหลือเพียงธาตุอาหารที่จุลินทรีย์ย่อยสลายได้ยาก ทำให้จุลินทรีย์ไม่สามารถนำธาตุอาหารไปใช้ในการเพิ่มจำนวนได้จึงทำให้ปริมาณจุลินทรีย์เมื่อปุ๋ยหมักที่เสร็จสมบูรณ์มีจำนวนลดลงจากช่วงแรก (Lu et al., 2018) โดยเหลือจุลินทรีย์อยู่ในช่วง 3.5–4.5 CFU/g

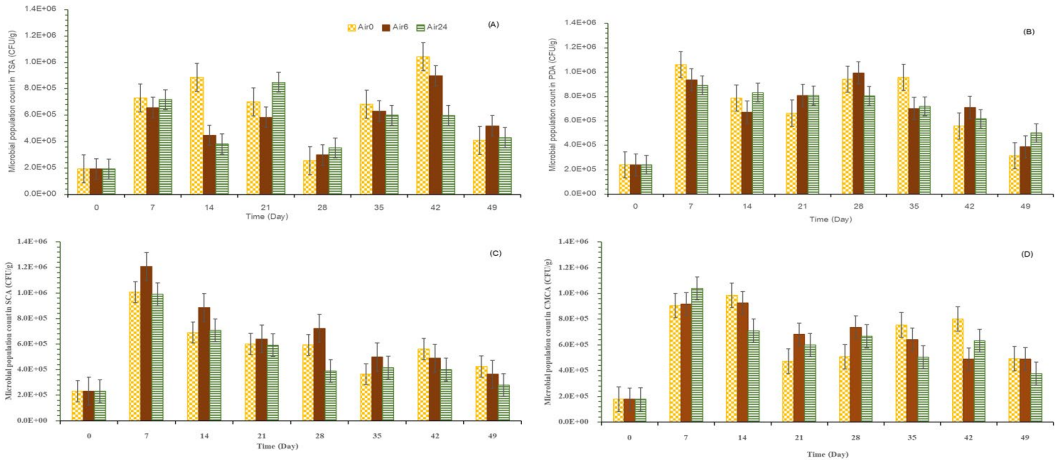



**Fig. 4** Microbial population count in each sample group: bacteria (A); fungi (B); actinomycetes (C); cellulolytic activity (D) in compost

## สรุป

การศึกษาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของปุ๋ยหมักที่ผสมระหว่างผักตบชวากับเปลือกสับปะรด ใช้ระยะเวลาในการหมัก 49 วัน เพื่อหาปุ๋ยหมักที่เสร็จสมบูรณ์ตามมาตรฐานกำหนด โดยพิจารณาจากอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่มีค่าไม่เกิน 20 และดัชนีการงอกของเมล็ดที่จะต้องมีค่ามากกว่า 50% พบว่าสูตรการผสมที่ P3 (ผักตบชวา 1: เปลือกสับปะรด 3 : ฟางข้าว 1) และสูตรการผสมที่ P4 (ผักตบชวา 1: เปลือกสับปะรด 4 : ฟางข้าว 1) หมักในถังขนาด 20 L เป็นสูตรการผสมที่เหมาะสมตามที่มาตรฐานกำหนด คือ มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน เท่ากับ 13.77 กับ 16.01 ซึ่งมีค่าไม่เกิน 20 และมีดัชนีการงอกของเมล็ด 51.36% กับ 61.10% แสดงให้เห็นว่าปุ๋ยหมักสูตรที่ P3 และ P4 สามารถนำไปผลิตเป็นปุ๋ยหมักได้ จากนั้นนำปุ๋ยหมักสูตร P4 ไปทำการหมักแบบเติมอากาศ 3 แบบ (กวนผสม, สลับเปิดปิดทุก 6 ชม. และเปิดตลอด 24 ชม.) เพื่อนำมาพิจารณาจำนวนของจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นในปุ๋ยหมัก พบว่าการเติมอากาศทั้ง 3 แบบไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของจำนวนจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นภายในปุ๋ยหมักอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาเทคโนโลยีการจัดการสิ่งแวดล้อม และกองทุนคณะสิ่งแวดล้อม ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัยในครั้งนี้

## เอกสารอ้างอิง

กรมพัฒนาที่ดิน. 2547. คู่มือการวิเคราะห์ตัวอย่างดิน น้ำ ปุ๋ย พืช วัสดุปรับปรุงดิน และการวิเคราะห์เพื่อตรวจรับรองมาตรฐานสินค้า. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. กรุงเทพฯ.

กรมวิชาการเกษตร. 2557. กำหนดเกณฑ์ปุ๋ยอินทรีย์. กรมพัฒนาที่ดิน, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. กรุงเทพฯ.

โสฬส แซ่ลิ้ม. 2559. ปุ๋ยอินทรีย์และการใช้ประโยชน์ในประเทศไทย. กรมพัฒนาที่ดิน, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. กรุงเทพมหานคร.

Fang, T., Wang, T., Zhao, M., Bai, L., Deng, Y., Ruan, W. 2023. Food waste digestate composting enhancement by sodium polyacrylate addition: Effects on nitrogen transformation processes and

bacterial community dynamics. J. Environ. Manag. 325: 116531. doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116531

Javed, Z., Tripathi, G.D., Mishra, M., Dashora, K. 2021. Actinomycetes – The microbial machinery for the organic-cycling, plant growth, and sustainable soil health. Biocatal. Agric. Biotechnol. 31: 101893. doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101893

Lu, Q., Zhao, Y., Gao, X., Wu, J., Zhou, H., Tang, P., Wei, Q., Wei, Z. 2018. Effect of tricarboxylic acid cycle regulator on carbon retention and organic component transformation during food waste composting. Bioresour. Technol. 256: 128–136. doi.org/10.1016/j.biortech.2018.01.142

Manga, M., Evans, B.E., Ngasala, T.M., Camargo-Valero, M.A. 2022. Recycling of faecal sludge: Nitrogen, carbon and organic matter transformation during co-composting of faecal sludge with different bulking agents. Int. J. Environ. Res. Public Health. 19: 10592. doi.org/10.3390/ijerph191710592

Munna, M.S., Tamanna, S., Afrin, M., Sharif, G., Mazumder, C., Kana, K., Urmi, N., Uddin, M., Rahman, T., Noor, R. 2014. Influence of aeration speed on bacterial colony forming unit (CFU) formation capacity. Am. J. Microbiol. Res. 2: 47–51. doi.org/10.12691/ajmr-2-1-7

Omorotionmwan, F., Ogwu, H., Ogwu, M. 2018. Antibacterial characteristics and bacteria composition of pineapple (*Ananas comosus* [Linn.] Merr.) peel and pulp. Food Health. 5: 1–11. doi.org/10.3153/FH19001

Rangseesuriyachai, T., Saricheewin, K. 2018. Study of organic waste composting with aeration and use of crude Enzyme. Journal of Engineering 16: 1–12.

Rich, N., Bharti, A., Kumar, S. 2018. Effect of bulking agents and cow dung as inoculant on vegetable waste compost quality. Bioresour. Technol. 252: 83–90. doi.org/10.1016/ j.biortech.2017.12.080

UF/IFAS. 2023. Elements of composting. https://sfyl.ifas.ufl.edu/sarasota/natural-resources/waste-reduction/composting/what-is-composting/elements-of-composting/, 21 January 2024.

Verma, S., Awasthi, M.K., Liu, T., Awasthi, S.K., Syed, A., Bahkali, A.H., Verma, M., Zhang, Z. 2023. Influence of biochar on succession of fungal communities during food waste composting. Bioresour. Technol. 385: 129437. doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129437

Wang, Y., Tang, Y., Li, M., Yuan, Z. 2021. Aeration rate improves the compost quality of food waste and promotes the decomposition of toxic materials in leachate by changing the bacterial community. Bioresour. Technol. 340: 125716. doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125716

Xiong, Z.-Q., Wang, G.-X., Huo, Z.-C., Yan, L., Gao, Y.-M., Wang, Y.-J., Gu, J.-D., Wang, W.-D. 2017. Effect of aeration rates on the composting processes and Nitrogen loss during composting. Appl. Environ. Biotechnol. 2: 20–27. doi.org/10.26789/aeb.2017.01.003

Zhang, L., Sun, X. 2018. Influence of sugar beet pulp and paper waste as bulking agents on physical, chemical, and microbial properties during green waste composting. Bioresour. Technol. 267: 182–191. doi.org/10.1016/j.biortech.2018.07.040

# การสำรวจสารกำจัดศัตรูพืชตกค้างในพืชและสิ่งแวดล้อมจากแหล่งปลูกอ้อยในจังหวัดสุพรรณบุรี

# Survey of pesticide in vegetation and the environment from sugar cane crops at Suphan Buri province

**ปภัสรา คุณเลิศ*, ประกิจ จันทร์ติ๊บ,กาญจนาภา ด้วงนคร**

Paphatsara Khunlert*, Prakit Chuntib, Kanjanapa Duangnakorn

กลุ่มงานวิจัยผลกระทบจากการใช้วัตถุมีพิษการเกษตร กลุ่มวิจัยวัตถุมีพิษการเกษตร กองวิจัยพัฒนาปัจจัยการผลิตทางการเกษตร กรมวิชาการเกษตร 50 ถนนพหลโยธิน เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

Impact of Pesticide Used Subgroup, Pesticide Research Group, Agricultural Production Science Research and Development Division, Department of Agricultural, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: daeng_Khu29@hotmail.co.th

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสำรวจการใช้สารกำจัดศัตรูพืชที่ตกค้างในแหล่งปลูกอ้อยต่อความเสี่ยงที่มีต่อสุขภาพเกษตรกร และประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ในพื้นที่อำเภออู่ทอง จังหวัดสุพรรณบุรี โดยสุ่มเก็บตัวอย่างดิน น้ำ ตะกอนดิน ในฤดูแล้งและฤดูฝน และอ้อยที่ระยะเก็บเกี่ยว รวมทั้งหมด 87 ตัวอย่าง ตรวจวิเคราะห์สารกำจัดศัตรูพืช จำนวน 65 ชนิด ด้วยเทคนิค Chromatography ผลการตรวจวิเคราะห์พบสารกำจัดศัตรูพืชตกค้าง 45 ตัวอย่าง (52%) ในดินพบสารกำจัดศัตรูพืช 4 ชนิด ได้แก่ atrazine, ametryn, acetochlor และ pendimethalin ปริมาณ 0.02–0.09 mg/kg ในน้ำพบสาร 4 ชนิด ได้แก่ atrazine, ametryn, acetochlor และ pendimethalin ปริมาณ 0.04-9.65 µg/L ในตะกอนดินพบสาร 1 ชนิด คือ ametryn ปริมาณ 0.02–0.27 mg/kg ไม่พบสารตกค้างในอ้อยทุกตัวอย่าง เมื่อประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพด้วยค่า Hazard quotient (HQ) ในดิน น้ำ และตะกอนดิน มีค่าน้อยกว่า1 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้ (HQ < 1.0) และประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้วยค่า Risk quotient (RQ) ในดิน และตะกอนดิน มีค่าน้อยกว่า 0.1 ไม่มีความเสี่ยง (RQ ≤ 0.1) ส่วนในน้ำมีค่ามากกว่า 0.1 มีความเสี่ยงต่ำ (RQ > 0.1) อย่างไรก็ตามเกษตรกรควรคำนึงถึงการตกค้างของสารกำจัดศัตรูพืชที่ใช้ในการเพาะปลูกอ้อย ลดความเสี่ยงอันตรายจากการใช้สารกำจัดศัตรูพืช

**คำสำคัญ**: จังหวัดสุพรรณบุรี, ค่าดัชนีบ่งชี้ความเสี่ยงต่อสิ่งแวดล้อม, ค่าดัชนีบ่งชี้อันตราย, สารกำจัดศัตรูพืชตกค้าง

**Abstract**

The objective of this study were to survey residues of pesticide in sugar cane crops and to evaluate the risk of those residues for humans and environment in Amphor U Thong Suphan Buri Province. The soil, water, sediment and sugar cane were collected (n = 87) in dry and wet seasons and analyzed using chromatography. The results showed that the pesticides were found in 45 samples (52%). In soil, the total levels of four 4 pesticides, including atrazine, ametryn, acetochlor and pendimethalin, were 0.02–0.09 mg/kg. The total levels of those four 4 pesticides in water were 0.04–9.65 µg/L. Whereas, only one type of pesticide, ametryn, were found in sediment (0.02-0.27mg/kg). However, pesticide residues in the sugar cane were not found in all samples. The health risk assessment using Hazard quotient (HQ) were less than 1 in soil, water and sediment. It is in acceptable level (HQ < 1.0). Environmental risk assessment using Risk quotient (RQ) were less than 0.1 in soil and sediment which was no risk (RQ ≤ 0.1). In water more than 0.1 hazard is low (RQ > 0.1). However, farmer should consider the residues of these insecticides used in cultivation. Therefore, the results of this research should be distributed to farmers to reduce the risk form pesticide uses.

**Keywords**: Hazard quotient (HQ), Pesticide residues, Suphan Buri Province, Risk Quotient (RQ)

**คำนำ**

อ้อยเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย เป็นวัตถุดิบในการผลิตน้ำตาลเพื่อบริโภคภายในประเทศและส่งออกสถานการณ์พื้นที่ปลูกอ้อยปีการผลิตปี 2564/65 มีพื้นที่เพาะปลูกรวมทั้งสิ้นจำนวน 11,022,348 ไร่ เพิ่มขึ้นจำนวน 159,738 ไร่ (สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาล, 2565) ปัจจุบันสารกำจัดศัตรูพืชมีบทบาทสำคัญในภาคเกษตรกรรม เนื่องจากเกษตรกรต้องการผลผลิตที่มีคุณภาพ และปริมาณสูง จึงเป็นสาเหตุทำให้เกษตรกรจำเป็นต้องใช้สารกำจัดศัตรูพืชเพิ่มมากขึ้น เพื่อควบคุมโรคและศัตรูพืชในผลผลิต (ปัทมา และคณะ, 2563) จังหวัดสุพรรณบุรีมีพื้นที่ปลูกอ้อย 605,896 ไร่ พื้นทีเก็บเกี่ยวอ้อยส่งโรงงาน 497,138 ไร่ ให้ผลผลิต 8.89 ตัน/ไร่ (คณะกรรมการอ้อยและน้ำตาล, 2565) อำเภออู่ทอง มีพื้นที่ 630.29 ตารางกิโลเมตร 15 ตำบล 151 หมู่บ้าน เกษตรกรส่วนใหญ่มีอาชีพปลูกอ้อย ซึ่งปัญหาสำคัญคือ ปัญหาวัชพืชที่เกิดขึ้นจากการปลูกอ้อยในพื้นที่ที่มีการเตรียมดินก่อนปลูก อย่างไรก็ตามหากขาดการจัดการวัชพืชที่เหมาะสม และมีการแข่งขันของวัชพืชมาก อาจทำให้ผลผลิตอ้อยลดลงได้มากกว่า 60 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นตั้งแต่เริ่มปลูกจนถึงอ้อยมีอายุประมาณ 3–4 เดือน จึงจะทำให้อ้อยมีการเจริญเติบโต แตกกอและข้อปล้องได้ดี (กลุ่มวิจัยวัชพืช, 2554) ในปี 2565 มีปริมาณการนำเข้าวัตถุอันตรายทางการเกษตร ปริมาณ 113,640,459.70 กิโลกรัม มูลค่า 24,010,434,152.44 ล้านบาท (สำนักควบคุมพืชและวัสดุการเกษตร, 2566) ปัจจุบันผู้บริโภคมีความตระหนักในการรักษาสุขภาพมากขึ้น การตกค้างของสารกำจัดศัตรูพืชในผลผลิตทางการเกษตร ได้กลายเป็นปัญหาที่สำคัญของประเทศ ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของผู้ใช้ ผู้บริโภค (กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2565; ภานุพันธ์ และสยาม, 2558) นอกจากสารกำจัดศัตรูพืชตกค้างในผลผลิตแล้ว ยังสามารถตกค้างในดิน น้ำ ตะกอนดิน ในพื้นที่บริเวณใกล้เคียงที่เกษตรกรพ่นสารกำจัดศัตรูพืช จากรายงานวิจัยของ รัศมี และคณะ (2558) ตรวจพบสารกำจัดศัตรูพืชภายในวิทยาลัยชัยบาดาลพิพัฒน์ จังหวัดลพบุรี พบสารกำจัดวัชพืชในตัวอย่างน้ำ 2 ชนิด คือ ametryn ตรวจพบในฤดูฝน จำนวน 3 ตัวอย่าง ปริมาณ 0.01–0.03 µg/L และ atrazine ตรวจพบทั้งสามฤดูในตัวอย่างน้ำ 10 ตัวอย่าง ปริมาณ 0.14–0.82 µg/L

อย่างไรก็ตามการใช้สารกำจัดศัตรูพืชอย่างต่อเนื่อง ทำให้เกิดความเสี่ยงต่อสุขภาพของเกษตรกร และสิ่งแวดล้อมบริเวณโดยรอบแหล่งเพาะปลูก เนื่องจากขณะพ่นสารกำจัดศัตรูพืช ละอองสารเกิดการฟุ้งกระจายไปในอากาศ ตกค้างในผลผลิต สะสมในดิน ชะละลายลงสู่แหล่งน้ำบริเวณใกล้เคียง เกิดการเคลื่อนย้ายในสิ่งแวดล้อม สะสมในสิ่งมีชีวิต และปนเปื้อนในห่วงโซ่อาหาร ส่งผลกระทบต่อสุขภาพผู้บริโภค เพื่อให้สอดรับกับนโยบาย Thailand 4.0 ยุทธศาสตร์ชาติ 20 ปี แผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 12 และก้าวเข้าสู่เป้าหมายการพัฒนาอย่างยั่งยืนขององค์การสหประชาชาติ (sustainable development Goals) เพื่อยกระดับมาตรฐานสินค้าเกษตร ให้สามารถตรวจสอบข้อมูลได้ตลอดกระบวนการผลิต เป็นการสร้างความเชื่อมั่นด้านความปลอดภัยให้แก่ผู้บริโภค (กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2565) งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสำรวจการใช้สารกำจัดศัตรูพืชที่ตกค้างในแหล่งปลูกอ้อย ในดิน น้ำ ตะกอนดิน และผลผลิต เพื่อประเมินความเสี่ยงที่มีผลต่อสุขภาพเกษตรกร ผู้บริโภค และประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ในพื้นที่อำเภออู่ทอง จังหวัดสุพรรณบุรี

**อุปกรณ์และวิธีการ**

*วิธีการ*

1. การสำรวจและกำหนดจุดเก็บตัวอย่าง เลือกตัวอย่างแบบเฉพาะเจาะจงในหมู่บ้านที่มีอาชีพปลูกอ้อยเชิงพาณิชย์ คือ อ.อู่ทอง จ.สุพรรณบุรี เป็นหมู่บ้านที่ปลูกอ้อยเป็นอาชีพมากกว่า 30 ปี เกษตรกรมีการใช้สารกำจัดศัตรูพืชอย่างต่อเนื่อง ทำการสำรวจแปลงปลูกอ้อย และสัมภาษณ์เกษตรกร ได้ข้อมูลเกษตรกรที่มีการใช้สารกำจัดศัตรูพืช จำนวน

16 ราย ทำการเก็บตัวอย่าง 2 ครั้ง ในช่วงฤดูแล้ง (ธันวาคม 2565) และฤดูฝน (มิถุนายน 2566) สุ่มเก็บตัวอย่างดิน น้ำ ตะกอนดิน และอ้อย เพื่อนำไปวิเคราะห์สารกำจัดศัตรูพืชตกค้าง และวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของดิน และน้ำ แสดงดัง Table 1

2. การจัดการศัตรูพืชในแปลงอ้อยของเกษตรกร จากการสัมภาษณ์เกษตรกรจำนวน 16 ราย พบวัชพืชสำคัญที่ขึ้นในแปลงอ้อยมีทั้งวัชพืชประเภทใบแคบ และใบกว้าง ซึ่งหลังปลูกอ้อย เกษตรกรจะใช้สารกำจัดวัชพืช 4 ชนิด ได้แก่ atrazine, acetochlor, diuron และ pendimethalin พ่นคลุมดินก่อนวัชพืชงอกหลังปลูกอ้อยหรือหลังการแต่งตอ เพื่อกำจัดหญ้าตีนติด หญ้าดอกขาว หญ้ารังนก หญ้าปากควาย หญ้านกสีชมพู หญ้าขจรจบ หญ้าตีนนก และหญ้าตีนกา หลังวัชพืชงอกมีจำนวนใบ 4–5 ใบ เกษตรกรจะพ่นสารกำจัดวัชพืช 2 ชนิดคือ ametryn และ 2,4-D หลังจากปลูกอ้อย ได้ 2 เดือน เกษตรกรทำการพรวนดิน ใส่ปุ๋ย และพ่นสารกำจัดวัชพืช diuron เพื่อกำจัดหญ้าตีนกา หญ้าตีนนก หญ้าข้อ หญ้าหวาย แมงลักป่า และผักปลาบ พ่นภายในแปลง อัตราการพ่น เกษตรกรจะพ่นตามคำแนะนำในฉลาก ซึ่งความถี่ในการพ่นแต่ละรอบฤดูการปลูก ขึ้นอยู่กับการระบาดของศัตรูพืช อย่างไรก็ตามชนิดสารกำจัดศัตรูพืชที่เกษตรกรใช้ในแปลงปลูกอ้อย เป็นข้อมูลการสัมภาษณ์ และสังเกตภายในแปลง ซึ่งอาจมีบางส่วนที่เกษตรกรไม่ได้ให้ข้อมูล แต่ตรวจพบเมื่อนำไปวิเคราะห์หาสารพิษตกค้างในห้องปฏิบัติการ

3. วิธีการเก็บตัวอย่าง

3.1 ตัวอย่างดิน เก็บจากแปลงตามคำแนะนำของกรมวิชาการเกษตร (กลุ่มวิจัยวัตถุมีพิษการเกษตร, 2548) ทำการสุ่มเก็บให้ทั่วแปลง (random sampling) แปลงละ 10 จุด ใช้ช้อนตักดินลงไปเป็นหลุมรูปตัววี (V) ลึกประมาณ 6–7 นิ้วจากผิวดิน ทิ้งดินส่วนแรกแล้วใช้เสียมขุดดินข้างหลุม ข้างใดข้างหนึ่งหนาประมาณ 1–2 นิ้ว รวมดินทั้งหมดจากทุกจุดเข้าเป็นตัวอย่างเดียวกัน แล้วเก็บในถุงพลาสติกบรรจุให้ได้น้ำหนัก 1 kg. ขณะนำส่งห้องปฏิบัติการให้แช่ตัวอย่างไว้ในถังน้ำแข็ง หากยังไม่สกัดตัวอย่างให้นำแช่ไว้ในตู้เย็นหรือตู้แช่แข็ง

3.2 ตัวอย่างน้ำ ใช้แครงสุ่มตักตัวอย่างน้ำบริเวณบ่อหรือจุดรวบรวมน้ำสำหรับใช้ในแปลงผัก ให้เต็มขวดพลาสติก ขนาด 1 L. จำนวน 3 ขวด ขณะนำส่งห้องปฏิบัติการให้แช่ตัวอย่างไว้ในถังน้ำแข็ง หากยังไม่สกัดตัวอย่างให้นำแช่ไว้ในตู้เย็น ถ้าน้ำมีลักษณะใสสะอาด สามารถนำไปสกัดได้ทันที รวมทั้งตรวจวิเคราะห์ดัชนีคุณภาพน้ำจากค่าพารามิเตอร์ในน้ำ ได้แก่ อุณหภูมิของน้ำ ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำ (pH) การนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity; EC, µs/cm) และค่าของแข็งทั้งหมด (Total Dissolve Solid: TDS, mg/L)

3.3 ตัวอย่างตะกอนดิน ใช้แครงสุ่มตักตัวอย่างตะกอนจากท้องน้ำบริเวณเดียวกับจุดเก็บน้ำให้ได้ประมาณ 0.5–1 kg. นำใส่ในขวดแก้วที่มีฝาปิดสนิท หุ้มด้วยกระดาษหรือวัสดุกันกระแทกใส่ลงถุงพลาสติกขณะนำส่งห้องปฏิบัติการให้แช่ตัวอย่างไว้ในถังน้ำแข็ง หากยังไม่สกัดตัวอย่างให้นำแช่ไว้ในตู้เย็น

3.4 ตัวอย่างอ้อย สุ่มเก็บตัวอย่างอ้อยระยะเก็บเกี่ยวจำนวน 4 ลำ/แปลงอ้อย หั่นเป็นท่อนขนาดเล็ก ปริมาณไม่น้อยกว่า 2 kg. นำใส่ในถุงพลาสติก ขณะนำส่งห้องปฏิบัติการให้แช่ตัวอย่างไว้ในถังน้ำแข็ง หากยังไม่สกัดตัวอย่างให้นำแช่ไว้ในตู้เย็นหรือตู้แช่แข็ง เมื่อจะทำการเตรียมตัวอย่างให้นำออกจากตู้เย็นหรือตู้แช่แข็ง ตั้งไว้ให้ได้อุณหภูมิห้อง จากนั้นเตรียมตัวอย่างโดยหั่นตัวอย่างอ้อยเป็นชิ้นเล็ก ๆ นำไปปั่นละเอียดด้วยเครื่องปั่นย่อย (Food Processer) ก่อนนำไปทดสอบ

**Table 1** Locations of the samples collected in the sugar cane crops at Suphan Buri Province during dry season and wet season

| Location | Location by GPS | | Samples collected in dry season | | | | Samples collected in wet season | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | UTM X | UTM Y | Soil | Water | Sediment | Sugar cane | Soil | water | sediment | Sugar cane |
| P 1 | 14.33285 | 99.85781 | S 1 | W 1 | Sd 1 | Sc 1 | S 1 | W 1 | - | - |
| P 2 | 14.31983 | 99.85121 | S 2 | W 2 | Sd 2 | Sc 2 | S 2 | W 2 | Sd 2 | - |
| P 3 | 14.31463 | 99.84932 | S 3 | W 3 | - | Sc 3 | S 3 | W 3 | - | - |
| P 4 | 14.30862 | 99.87198 | S 4 | W 4 | Sd 4 | Sc 4 | S 4 | W 4 | Sd 4 | - |
| P 5 | 14.330396 | 99.87086 | S 5 | - | - | Sc 5 | S 5 | - | - | - |
| P 6 | 14.30995 | 99.87525 | S 6 | - | - | Sc 6 | S 6 | - | - | - |
| P 7 | 14.30396 | 99.88270 | S 7 | - | - | Sc 7 | S 7 | W 7 | - | - |
| P 8 | 14.30396 | 99.87429 | S 8 | - | - | Sc 8 | S 8 | - | - | - |
| P 9 | 14.30396 | 99.87150 | S 9 | W 9 | - | Sc 9 | S 9 | W 9 | - | - |
| P 10 | 14.30130 | 99.87646 | S 10 | W 10 | Sd 10 | Sc 10 | S 10 | W 10 | Sd 10 | - |
| P 11 | 14.30729 | 99.87585 | S 11 | W 11 | Sd 11 | Sc 11 | S 11 | W 11 | Sd 11 | - |
| P 12 | 14.30729 | 99.87585 | S 12 | W 12 | Sd 12 | Sc 12 | S 12 | W 12 | Sd 12 | - |
| P 13 | 14.29577 | 99.85660 | S 13 | W 13 | Sd 13 | Sc 13 | S 13 | W 13 | Sd 13 | - |
| P 14 | 14.29634 | 99.86824 | S 14 | W 14 | Sd 14 | Sc 14 | S 14 | W 14 | - | - |
| P 15 | 14.29825 | 99.86824 | S 15 | - | - | Sc 15 | S 15 | - | - | - |
| P 16 | 14.29825 | 99.86740 | S 16 | W 16 | Sd 16 | Sc 16 | S 16 | W 16 | Sd 16 | - |

4. วิธีการตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ

ทดสอบหาวิธีการตรวจวิเคราะห์ปริมาณสารกำจัดศัตรูพืชในตัวอย่างดิน น้ำ ตะกอนดิน และอ้อย จำนวน 65 ชนิด แสดงใน Table 2

**Table 2** Types of pesticides analyzed

| Pesticides | Type of pesticide | Instrument |
|---|---|---|
| 16 Organochlorine (OCs) * | aldrin, alpha-BHC, alpha-endosulfan, beta-endosulfan, dieldrin, endosulfan sulfate, endrin, gamma-BHC, heptachlor, heptachlor epoxide, *o,p'*-DDE, *o,p'*-DDT, *o,p'*-TDE, *p,p'*-DDE, *p,p'*-DDT, *p,p'*-TDE | Gas Chromatograph (Agilent Technology HP6890) with Electron Capture Detector (ECD) |
| 7 Pyrethroid (PYs) * | bifenthrin, cyfluthrin, cypermethrin, lambda-cyhalothrin, deltamethrin, fenvalerate, permethrin | |
| 4 Triazole * | difenoconazole, tetraconazole, hexaconazole, propiconazole | |
| 3 Chloroacetamide * | alachlor, acetochlor, s-metolachlor | |

**Table 2** (Continued) Types of pesticides analyzed

| Pesticides | Type of pesticide | Instrument |
|---|---|---|
| 5 Herbicides * | oxyfluorfen, oxadiazon, pendimethalin, diuron | |
| | 2,4-D | Ultra-High Performance Liquid Chromatography with Diode Array (UHPLC-DAD) |
| 21 Organophosphorus* (OPs) | azinphos ethyl, chlorpyrifos, chlorpyrifos ethyl, diazinon, dicrotophos, dimethoate, EPN, ethion, ethoprophos, fenthion, fenitrothion, malathion, methidathion, monocrotophos, parathion methyl, pirimiphos methyl, profenophos, triazophos, methamidophos, omethoate, phosalone | Gas Chromatograph (Agilent Technology HP6890) with Flame Photometric Detector (FPD) |
| 6 Carbamate * | carbaryl, carbofuran, isoprocarb, promecarb, metocarb, methomy | Gas Chromatograph (Agilent Technology 7890) with Nitrogen Phosphorus Detector (NPD) |
| 3 Triazine * | ametryn, metribuzine, atrazine | |

*****Confirm the results of the analyzed with Gas Chromatograph-Mass Spectrometry (Agilent Technology 5973)

4.1 การตรวจวิเคราะห์สารพิษตกค้างในตัวอย่างน้ำ

(1) กลุ่ม Organochlorine กลุ่ม Pyrethroid กลุ่ม Triazole กลุ่ม Chloroacetamide, pendimethalin oxyfluorfen และ oxadiazon (In house method TM-T04-I01 (2560) based on AOAC 990.06 (2016)

(2) กลุ่ม Organophophorus กลุ่ม Carbamate กลุ่ม Triazine และกลุ่ม Phenylamide akylalanine (In house method TM-T04-I03 based on EPA method 8141 A, Revision 1 (1994)

(3) 2,4-D (Hammani, et al., 2017; Thorstensen et al., 2000)

4.2 การตรวจวิเคราะห์สารพิษตกค้างในตัวอย่างดินและตะกอนดิน กลุ่ม Organophophorus กลุ่ม Carbamate กลุ่ม Triazine กลุ่ม Phenylamide akylalanine กลุ่ม Organochlorine กลุ่ม Pyrethroid กลุ่ม Triazole กลุ่ม Chloroacetamide pendimethalin oxyfluorfen oxadiazon และ diuron (In house method TM-T04-I02 based on AOAC Official method 970.52 (2016) และสารกำจัดศัตรูพืช 2-4-D (Sutherland et al., 2003)

4.3 การตรวจวิเคราะห์สารพิษตกค้างในตัวอย่างอ้อย ประยุกต์ใช้วิธี QuEChERS (EN 15622, 2008)

5. การประเมินความเสี่ยง

5.1 การประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพ (Exposure and Risk Assessment) โดยใช้ดัชนีบ่งชี้ความอันตราย (HQ) ซึ่งค่า HQ คำนวณจากค่า ADI (ปริมาณค่าเฉลี่ยที่เกษตรกรได้รับสารกำจัดศัตรูพืชต่อวัน) เทียบกับค่า RfD (ค่าอ้างอิง คือ ปริมาณสารพิษที่น้อยสุดที่ร่างกายรับได้โดยไม่ทำให้เกิดอันตรายหรือเป็นพิษต่อร่างกาย) มีสมการคำนวณ (Equation 1) ดังนี้

$$ADI = (C*CF*IR*EF*ED)/(BW*AT) \quad (1)$$

การคำนวณค่าความเสี่ยงจากสารพิษตกค้างได้จากค่า hazard quotient (HQ) ซึ่งคำนวณจาก ค่า ADI และค่า RfD ดังสมการต่อไปนี้ (Equation 2)

$$HQ = ADI/RfD \quad (2)$$

5.2 การประเมินความเสี่ยงที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Environmental Effects; Ecological risk assessment) โดยใช้ค่าความเสี่ยง (Risk quotient; RQ) เมื่อ MEC (measured environment concentration) คือ ความเข้มข้นของสารที่วัดได้ในสิ่งแวดล้อม และ PNEC (predicted no effect concentration) คือ ความเข้มข้นสูงสุดของสารที่ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิต (Equation 3) (U.S. EPA., 2014)

$$RQ = MEC/PNEC \quad (3)$$

**ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง**

*ปริมาณสารกำจัดศัตรูพืชตกค้างที่ตรวจพบในตัวอย่างดิน*

ได้สุ่มเก็บตัวอย่างดินครั้งที่ 1 ช่วงเดือนธันวาคม (ฤดูแล้ง) จำนวน 16 ตัวอย่าง และครั้งที่ 2 ช่วงเดือนมิถุนายน (ฤดูฝน) จำนวน 16 ตัวอย่าง รวมทั้งหมด 32 ตัวอย่าง ผลการตรวจวิเคราะห์ในฤดูแล้ง พบสารพิษตกค้างจำนวน 7 ตัวอย่าง (44%) คือ สาร ametryn จำนวน 7 ตัวอย่าง ปริมาณ 0.02–0.06 mg/kg ในฤดูฝน ตรวจพบปริมาณสารพิษตกค้างจำนวน 15 ตัวอย่าง (94%) ได้แก่ ametryn จำนวน 7 ตัวอย่าง ปริมาณ 0.02-0.06 mg/kg atrazine จำนวน 4 ตัวอย่าง ปริมาณ 0.02–0.04 mg/kg acetochlor จำนวน 13 ตัวอย่าง ปริมาณ 0.02–0.09 mg/kg และ pendimethalin จำนวน 13 ตัวอย่าง ปริมาณ 0.04 mg/kg สรุปผลการตรวจวิเคราะห์ในตัวอย่างดินทั้งหมด 32 ตัวอย่าง พบปริมาณสารพิษตกค้าง 22 ตัวอย่าง (69%) ในฤดูฝนมากกว่าฤดูแล้ง (Table 3 และ 4) ลักษณะของดินในแปลงส่วนใหญ่เป็นดินร่วนเหนียว สามารถดูดซับสารพิษได้ดีกว่าดินร่วนทราย ซึ่งชนิดสารที่ตรวจพบปริมาณสูงที่สุดคือ acetochlor ปริมาณ 0.09 mg/kg รองลงมาคือ ametryn 0.06 mg/kg และปริมาณ atrazine ที่ตรวจพบต่ำกว่าเกณฑ์ค่าสูงสุดที่ยอมให้มีการปนเปื้อนของ atrazine ในดินเพื่อเกษตรกรรมของกรมควบคุมมลพิษ (2547) (ไม่เกิน 22 mg/kg) สอดคล้องกับปริมาณดินที่ตรวจพบในแปลงอ้อย ซึ่งสารกำจัดวัชพืชที่ตรวจพบเป็นสารที่กรมวิชาการเกษตรแนะนำให้ใช้ในแปลงปลูกอ้อย (กลุ่มวิจัยวัชพืช, 2554) ametryn และ atrazine ที่ตรวจพบ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Oliveia et al. (2001) พบว่าสาร atrazine จะถูกดูดซับในดินเหนียวมากกว่าดินร่วนเหนียวปนทรายและดินร่วนปนทราย และสามารถเคลื่อนย้ายได้ดีในดินร่วนปนทราย เช่นเดียวกับรายงานการตรวจพบ atrazine ในตัวอย่างดินปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ในช่วงฤดูน้ำหลากพบ atrazine ตกค้างในดิน เฉลี่ย 133.59–183.23 µg/kg (อรอนงค์ และคณะ, 2554) นอกจากนี้ยังตรวจพบสาร acetochlor ปริมาณ 0.02–0.09 mg/kg ในแปลงปลูกอ้อย ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลการสัมภาษณ์เกษตรกร เช่นเดียวกับรายงานการตรวจพบสาร acetochlor ปริมาณ 0.01 , cypermethrin ปริมาณ 0.03–0.12 และ profenofos ปริมาณ 0.01–0.04 mg/kg ในแปลงปลูกคะน้าในจังหวัดขอนแก่น (จารุพงศ์ และคณะ, 2562) นอกจากนี้ปัจจัยที่มีผลต่อการตกค้างของสารกำจัดศัตรูพืชในดินประกอบด้วยความถี่ในการพ่น ทำให้เกิดการสะสมของสารพิษ ลักษณะของเนื้อดินในแปลงส่วนใหญ่เป็นดินร่วนเหนียว มีปริมาณอินทรียวัตถุ (1.08-4.57%) ปานกลางถึงสูง ค่า pH ของดินอยู่ในช่วง 6.2–8.4 เมื่อพิจารณาค่าอัตราการสลายตัวครึ่งหนึ่งในดิน ($DT_{50}$) พบว่ามีค่า $DT_{50}$ ค่อนข้างสั้นกว่าอายุการเก็บเกี่ยวผลผลิต โดย acetochlor มีค่า $DT_{50}$ 12.1 วัน, pendimethalin $DT_{50}$ 100.6 วัน, atrazine $DT_{50}$ 75 วัน และ ametryn $DT_{50}$ 37 วัน

*ปริมาณสารกำจัดศัตรูพืชตกค้างที่ตรวจพบในตัวอย่างน้ำและตะกอนดิน*

ได้สุ่มเก็บตัวอย่างน้ำครั้งที่ 1 ช่วงเดือนธันวาคม (ฤดูแล้ง) จำนวน 11 ตัวอย่าง และครั้งที่ 2 ช่วงเดือนมิถุนายน (ฤดูฝน) จำนวน 12 ตัวอย่าง รวมทั้งหมด 23 ตัวอย่าง ผลการตรวจวิเคราะห์ในฤดูแล้ง พบสารพิษตกค้าง จำนวน 4 ตัวอย่าง (37%) คือสาร atrazine จำนวน 3 ตัวอย่าง ปริมาณ 0.08–0.16 µg/L และสาร ametryn จำนวน 3 ตัวอย่าง 0.19–2.25 µg/L ในฤดูฝน ตรวจพบสารพิษตกค้างจำนวน 12 ตัวอย่าง (100%) ได้แก่สาร atrazine จำนวน 1 ตัวอย่าง ปริมาณ 0.20, ametryn จำนวน 6 ตัวอย่าง ปริมาณ 0.15–9.65, acetochlor จำนวน 3 ตัวอย่าง ปริมาณ 0.06-0.71 µg/L และ pendimethalin จำนวน 12 ตัวอย่าง ปริมาณ 0.04–0.90 µg/L สรุปผลการตรวจวิเคราะห์ในตัวอย่างน้ำทั้งหมด 22 ตัวอย่าง พบปริมาณสารพิษตกค้างจำนวน 16 ตัวอย่าง (72%) ในฤดูฝนมากกว่าฤดูแล้ง (Table 3 และ 4) ซึ่งเป็นตัวอย่างน้ำจากแหล่งน้ำธรรมชาติที่เกษตรกรใช้ในแปลงปลูกอ้อย เมื่อเปรียบเทียบปริมาณสารที่ตรวจพบในตัวอย่างน้ำ พบสารกำจัดวัชพืช ametryn ตกค้างในปริมาณสูง เนื่องจากสาร ametryn สามารถละลายน้ำได้ดี ที่อุณหภูมิ 25°C ปริมาณ 185 mg/L (Sabir et al., 2018) สอดคล้องกับข้อมูลการสัมภาษณ์เกษตรกร รองลงมาคือสาร pendimethalin, acetochlor และ atrazine ซึ่งปริมาณสาร atrazine ที่ตรวจพบมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ค่าสูงสุดที่ยอมให้มีการปนเปื้อนของ atrazine ในน้ำดื่มตามค่า maximum contamination level (MCL) ของ U.S.EPA (2018) (ไม่เกิน 3 µg/L) ซึ่งสอดคล้องกับรายงานการตรวจพบ atrazine ในตัวอย่างน้ำ จากวิทยาลัยชัยบาดาลพิพัฒน์ จ. ลพบุรี ปริมาณ 0.14–0.82 µg/L (รัศมี และคณะ, 2558) เช่นเดียวกับ อรอนงค์ และคณะ (2554) ตรวจพบ atrazine ในตัวอย่างน้ำท่า 38 ตัวอย่าง (63%) มีค่าเฉลี่ย 4.70 µg/L บริเวณพื้นที่ปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ในช่วงฤดูน้ำหลาก

ได้สุ่มเก็บตัวอย่างตะกอนดินครั้งที่ 1 ช่วงเดือนธันวาคม (ฤดูแล้ง) จำนวน 9 ตัวอย่าง และครั้งที่ 2 ช่วงเดือนมิถุนายน (ฤดูฝน) จำนวน 7 ตัวอย่าง รวมทั้งหมด 16 ตัวอย่าง จากการสุ่มเก็บตัวอย่างในฤดูฝน พบว่าคลองหรือบ่อที่ใช้ในแปลงอ้อย มีบางจุดที่มีความลึกจนอุปกรณ์ที่ใช้เก็บตัวอย่างไม่สามารถเก็บได้ จึงทำให้ได้ปริมาณตัวอย่างน้อยกว่าฤดูแล้ง ผลการตรวจวิเคราะห์ในฤดูแล้ง พบสารพิษตกค้าง จำนวน 6 ตัวอย่าง (67%) คือสาร ametryn ปริมาณ 0.02–0.27 mg/kg ในฤดูฝน ตรวจพบสารพิษตกค้างจำนวน 1 ตัวอย่าง (14%) คือสาร ametryn ปริมาณ 0.02 mg/kg (Table 3 และ 4) ปริมาณสารที่ตรวจพบน่าจะเกิดจากการเคลื่อนย้ายของสาร ametryn ในแปลงปลูกอ้อย เนื่องจาก ametryn มีความสามารถเคลื่อนย้ายได้ปานกลางถึงสูงในดินเหนียวหรือดินที่มีอินทรียวัตถุต่ำ ๆ เกิดการเคลื่อนย้ายได้สูงด้วยกระบวนการชะล้าง (run-off) จากฝนสู่น้ำผิวดินและน้ำใต้ดิน มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับ ($K_{oc}$) เท่ากับ 3.45 (Sabir et al., 2018; Rafal et al., 2018) ทำให้เกิดการสะสมในตะกอนดิน ลักษณะเนื้อดิน (soil texture) เป็นดินร่วนเหนียว มีอินทรียวัตถุต่ำ ในสิ่งแวดล้อม ametryn เกิดการสลายตัวอยู่ในรูปของสารอนุพันธ์ 2-amino-4-12 isopropylamino-6-methylthio-s-triaizine (GS-11354) และ 2-ethylamino-4-amino-6-methylthio-s-triazine (GS-11355) โดยจุลินทรีย์หรือแบคทีเรียมีค่าครึ่งชีวิต (half-life) 9.6-38 วัน นอกจากนี้ ametryn มีความคงทนต่อกระบวนการ hydrolysis มีค่าครึ่งชีวิต (half-life) 368 วัน (U.S. EPA., 2005)

*ปริมาณสารกำจัดศัตรูพืชตกค้างที่ตรวจพบในตัวอย่างอ้อย*

ได้สุ่มเก็บตัวอย่างอ้อยที่ระยะเก็บเกี่ยว 240 วัน ช่วงเดือนธันวาคม จำนวน 16 ตัวอย่าง (Table 3) ผลการตรวจวิเคราะห์ไม่พบสารพิษตกค้างในอ้อยทุกตัวอย่าง ค่าปริมาณสารพิษตกค้างสูงสุด (MRL) ของ atrazine และ ametryn ในอ้อย เท่ากับ 0.1 และ 0.05 mg/kg (สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ, 2559) สอดคล้องกับงานวิจัยของ วิภา และคณะ (2555) ตรวจไม่พบสาร atrazine ในอ้อยทุกตัวอย่าง

**Table 3** Concentration levels of pesticides in the soil, water, sediment and sugar cane sample from sugar cane crops at Suphan Buri Province during dry season

| Types of samples | Number of samples | | | | Mean concentration levels | Standard quality |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Sample analyzed | Positive sample, (%) | Groups of pesticides | Types of pesticides | | |
| Soil | 16 | 7 (44%) | Triazines (7) | ametryn (7) | 0.02–0.06 mg/kg | |
| Water | 11 | 4 (37%) | Triazines (4) | atrazine (3) | 0.08–0.16 µg/L | 3 µg/L[1)] |
| | | | | ametryn (3) | 0.19–2.25 µg/L | |
| Sediment | 9 | 6 (67%) | Triazines (6) | ametryn (6) | 0.02–0.27 mg/kg | |
| Sugar cane | 16 | 0 (0%) | ND | ND | ND | |
| Total | 52 | 17 (33%) | samples | | | |

Water samples; (µg/L), soil, sediment and sugar cane samples; (mg/kg), ND: not detected

1) Standard quality of drinking water (Environmental Protection Agency; maximum contamination level (MCL) atrazine 3 µg/L) (U.S. EPA., 2018)

**Table 4** Concentration levels of pesticides in the soil, water and sediment sample from sugar cane crops at Suphan Buri Province during wet season

| Types of samples | Number of samples | | | | Mean concentration levels | Standard quality |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Sample analyzed | Positive sample, (%) | Groups of pesticides | Types of pesticides | | |
| Soil | 16 | 15 (94%) | Triazines (7) | atrazine (4) | 0.02–0.04 mg/kg | 22 mg/kg[1)] |
| | | | | ametryn (7) | 0.02–0.06 mg/kg | |
| | | | Chloroacetamide (13) | acetochlor | 0.02–0.09 mg/kg | |
| | | | Herbicide (13) | pendimethalin | 0.04 mg/kg | |
| Water | 12 | 12(100%) | Triazines (6) | atrazine (1) | 0.20 µg/L | 3 µg/L[2)] |
| | | | | ametryn (6) | 0.15–9.65 µg/L | |
| | | | Chloroacetamide (3) | acetochlor | 0.06–0.71 µg/L | |
| | | | Herbicide (12) | pendimethalin | 0.04–0.09 µg/L | |
| Sediment | 7 | 1 (14%) | Triazines (1) | ametryn | 0.02 mg/kg | |
| Total | 35 | 28 (80%) | samples | | | |

Water samples; (µg/L), soil, sediment and vegetable samples; (mg/kg), ND: not detected

1) Standard quality of soil in agricultural soils (atrazine 22 mg/kg) (กรมควบคุมมลพิษ, 2547)

2) Standard quality of drinking water (Environmental Protection Agency, EPA; maximum contamination level (MCL) atrazine 3 µg/L) (U.S. EPA., 2018)

*การประเมินความเสี่ยงของสารกำจัดศัตรูพืชในดิน น้ำ และตะกอนดิน ที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม*

เมื่อนำผลการตรวจวิเคราะห์สารกำจัดศัตรูพืชตกค้างในดิน น้ำ และตะกอนดิน มาประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการรับสัมผัส (Exposure and risk assessment) สารกำจัดศัตรูพืชตกค้างที่ไม่ใช่สารก่อมะเร็ง โดยคำนวณจากค่า HQ

เพื่อประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพของเกษตรกร ในดิน น้ำ และตะกอนดิน ในเด็กช่วงอายุ 6–12 ปี และผู้ใหญ่อายุ 70 ปี ได้ค่าเฉลี่ยน้อยกว่า 1 เมื่อคำนวณการบริโภคและปริมาณการตกค้างของสารกำจัดศัตรูพืชในร่างกาย พบว่าไม่เกินค่ามาตรฐานที่ยอมรับให้เข้าสู่ร่างกายได้ในแต่ละวัน (Acceptable Daily Intake; ADI) ซึ่งค่า HQ จากการคำนวณใน Table 5 พบว่าในดิน น้ำ และตะกอนดิน มีความเสี่ยงอยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้ (HQ < 1) และเมื่อนำไปประเมินความเสี่ยงที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Environmental Effects; Ecological risk assessment) ด้วยค่าความเสี่ยง (Risk quotient; RQ) ในดิน และตะกอนดิน มีค่าเฉลี่ย $4.00\times10^{-3}$–$2.70\times10^{-2}$ ถือว่าไม่มีความเสี่ยง (RQ ≤ 0.1) ส่วนในตัวอย่างน้ำ มีค่าเฉลี่ย $2.0\times10^{-2}$–$9.60\times10^{-1}$ ถือว่ามีความเสี่ยงต่ำ (RQ ≤ 0.1) เนื่องจากสาร ametryn ละลายได้ดีในน้ำที่อุณหภูมิ 25°C ปริมาณ 185 mg/100 mL (Sabir et al., 2018) ทำให้เกิดการสะสมในตะกอนดิน ส่งผลกระทบต่อปลาน้ำจืดทำให้การเจริญเติบโตลดลง สำหรับเกษตรกร จะมีผลกระทบต่อสุขภาพในระยะสั้น จะเกิดการระคายเคืองต่อผิวหนังและดวงตา สำหรับในระยะยาวจะส่งผลกระทบต่อเนื้อเยื่อทำให้เกิดการอักเสบ (U.S. EPA., 2005)

**Table 5** The health risk assessment using Hazard quotient (HQ) and environmental risk assessment using Risk quotient (RQ)

| Types of samples | Pesticides | Concentration | | Hazard quotient (HQ) | | Risk quotient (RQ) | Risk Levels |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Min | Max | Child | Adult | | |
| Soil * | ametryn | 0.02 | 0.06 | $3.59\times10^{-5}$ | $8.82\times10^{-6}$ | $6.00\times10^{-3}$ | [1,2] acceptable |
| | atrazine | 0.02 | 0.04 | $6.84\times10^{-6}$ | $1.68\times10^{-6}$ | $4.00\times10^{-3}$ | [1,2] acceptable |
| | acetochlor | 0.02 | 0.09 | $5.39\times10^{-5}$ | $1.32\times10^{-5}$ | $9.00\times10^{-3}$ | [1,2] acceptable |
| | pendimethalin | - | 0.04 | $7.99\times10^{-7}$ | $1.96\times10^{-7}$ | $4.00\times10^{-3}$ | [1,2] acceptable |
| Water * | atrazine | 0.08 | 0.20 | $1.30\times10^{-4}$ | $8.00\times10^{-5}$ | $2.00\times10^{-2}$ | [1,2] acceptable |
| | ametryn | 0.15 | 9.65 | $2.00\times10^{-2}$ | $1.00\times10^{-2}$ | $9.60\times10^{-1}$ | [1] acceptable<br>[2] hazard is low |
| | acetochlor | 0.06 | 0.71 | $1.10\times10^{-2}$ | $5.00\times10^{-3}$ | $7.10\times10^{-2}$ | [1,2] acceptable |
| | pendimethalin | 0.04 | 0.90 | $1.00\times10^{-3}$ | $4.00\times10^{-4}$ | $9.00\times10^{-2}$ | [1,2] acceptable |
| Sediment* | ametryn | 0.02 | 0.27 | $1.62\times10^{-4}$ | $3.97\times10^{-5}$ | $2.70\times10^{-2}$ | [1,2] acceptable |

Water* samples; (µg/L), soil* and sediment*samples; (mg/kg)

1. HQ <1 (acceptable risk) and HQ ≥1 (Risk)
2. RQ ≤ 0.1 (acceptable risk, no hazard exists), RQ >0.1-1.0 (hazard is low), RQ >1.1-10 (hazard is moderate) and RQ >10 (hazard is high) (U.S. EPA., 2014)

## สรุป

การสำรวจสารพิษตกค้างในพืชและสิ่งแวดล้อมจากแหล่งปลูกอ้อยในจังหวัดสุพรรณบุรี ผลการตรวจวิเคราะห์ดิน น้ำ ตะกอนดิน และอ้อยระยะเก็บเกี่ยว ในฤดูแล้งและฤดูฝน รวมทั้งหมด 87 ตัวอย่าง พบการตกค้างของดินและน้ำในฤดูฝนมากกว่าฤดูแล้ง และในตะกอนดินพบการตกค้างในฤดูแล้งมากกว่าฤดูฝน เมื่อนำมาประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพในดิน น้ำ ตะกอนดินและอ้อย พบว่าอยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้ จากการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ในน้ำ พบว่ามีความเสี่ยงต่ำ ในดินและตะกอนดิน พบว่าไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในแหล่งปลูกอ้อยในจังหวัดสุพรรณบุรี

จากข้อมูลทำให้ทราบว่าเกษตรกรยังมีการใช้สารกำจัดวัชพืชอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นหน่วยงานที่เกี่ยวข้องจึงควรมีแนวทางในการแก้ไขปัญหาในการลดการใช้สารกำจัดศัตรูพืช รวมถึงมีการให้ความรู้แก่เกษตรกรให้เข้าใจถึงผลกระทบจากสารกำจัดศัตรูพืชที่มีต่อสุขภาพ และสิ่งแวดล้อม และเศรษฐกิจ ส่งเสริมการปลูกพืชอินทรีย์ ตลอดจนการให้ความรู้ในเรื่องการเก็บเกี่ยวผลผลิต และในส่วนของผู้บริโภคนั้น ควรตระหนักถึงอันตรายจากสารกำจัดศัตรูพืชที่ปนเปื้อน จึงควรล้างให้สะอาดก่อนการบริโภค เพื่อเป็นการเฝ้าระวัง ควรมีการเก็บข้อมูลการใช้สารของเกษตรกร รวมถึงสำรวจเก็บตัวอย่างที่ต่อเนื่อง เพื่อลดความเสี่ยงต่อการได้รับสัมผัสสารกำจัดศัตรูพืช

**กิตติกรรมประกาศ**

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณด้านวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) ตามกรอบการสนับสนุนงานวิจัยมูลฐาน (Fundamental Fund) จากสำนักงานคณะกรรมการการส่งเสริมวิทยาศาสตร์วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ผ่านกรมวิชาการเกษตร ตามรหัสการทดลอง FF65-58-04-65-01-06-66

**เอกสารอ้างอิง**

กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2565. แผนปฏิบัติการด้านการเกษตรและสหกรณ์ พ.ศ. 2566–2570. สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. กรุงเทพฯ.

กรมควบคุมมลพิษ. 2547. ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 25 (พ.ศ. 2547) ออกตามความในพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพดิน. ราชกิจจานุเบกษา เล่ม 121 ตอนพิเศษ 119 ง, ลงวันที่ 20 ตุลาคม 2547.

กลุ่มวิจัยวัตถุมีพิษการเกษตร. 2548. คู่มือการใช้บริการตรวจวิเคราะห์สารพิษตกค้าง คุณภาพวัตถุมีพิษการเกษตรและสารธรรมชาติ. สำนักวิจัยพัฒนาปัจจัยการผลิตทางการเกษตร, กรมวิชาการเกษตร, กรุงเทพฯ.

กลุ่มวิจัยวัชพืช. 2554. คำแนะนำการป้องกันกำจัดวัชพืชและการใช้สารกำจัดวัชพืชปี 2554. สำนักวิจัยการพัฒนาการอารักขาพืช, กรมวิชาการเกษตร, กรุงเทพฯ.

จารุพงศ์ ประสพสุข, สุวิทย์ เลาหศิริวงศ์, อรุณี พรมคำบุตร, ชุลีมาศ บุญไทย อิวาย. 2562. การประเมินความเสี่ยงสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างในดินต่อสุขภาพของเกษตรกร ผู้ปลูกคะน้าในจังหวัดขอนแก่น. วารสารวิชาการเกษตร 37: 278–285.

ปัทมา เสนทอง, กชพรรณ หนูชนะ, จันทิมา เอกรัชฤทธิ์, ธนวัฒน์ สายเมธา, จิรกิตติ์ ดวงมุสิก, ภคินี ปิยะพันธ์, กฤตภพ ไทรทองคำ. 2563. การตกค้างของสารกำจัดศัตรูพืชในดิน น้ำที่ใช้ในการบริโภค และผักสวนครัวในครัวเรือนที่อยู่ในสวนเงาะและสวนทุเรียน. วารสารวิจัย มข. 20: 86–94.

รัศมี แสงศิริมงคลยิ่ง, มลิสา เวชยานนท์, ปภัสรา คุณเลิศ, พรชนก ชโลปกรณ์. 2558. การศึกษาการปนเปื้อนของสารกำจัดศัตรูพืชสู่สิ่งแวดล้อมในวิทยาลัยชัยบาดาลพิพัฒน์. วารสารวิจัยราชภัฏพระนคร 10: 22–37.

สำนักควบคุมพืชและวัสดุการเกษตร. 2566. รายงานสรุปการนำเข้าวัตถุอันตรายทางการเกษตรปี พ.ศ. 2565. https://www.doa.go.th/ard/wp-content/uploads/2023/03/รายงานสรุปการนำเข้าวัตถุอันตรายทางการเกษตร ปี พ.ศ.2564_ประเภทการใช้.pdf, 22 มกราคม 2566.

สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ. 2559. ปริมาณสารพิษตกค้างสูงสุด https://www.acfs.go.th/standard/download/MAXIMUM-RESIDUE-LIMITS.pdf, 11 กุมภาพันธ์ 2565.

สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาล. 2565. รายงานสถานการณ์การปลูกอ้อยปีการผลิต 2564/65. https://www.ocsb.go.th/wp-content/uploads/2023/03/13813-1585.pdf., 11 ธันวาคม 2566.

อรอนงค์ ผิวนิล, ศุภมาศ พนิชศักดิ์ พัฒนา, นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์, บงกชรัตน์ ปิติยนต์, น้ำเย็น ศิริพัฒน์. 2554. การศึกษาการตกค้างและเคลื่อนย้ายสารกำจัดวัชพืชอะทราซีนในดินพื้นที่ปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ตะกอนดิน และน้ำท่าบริเวณลุ่มน้ำห้วยกะโปะ อำเภอน้ำหนาว จังหวัดเพชรบูรณ์. ใน รายงานการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 49. กรุงเทพฯ, หน้า 1–11.

AOAC. 2016. Organophosphorus pesticide. General Multiresidue Method. Association of Official Analytical Chemists Method 970.52. In house method TM-T04-I02

AOAC. 2016. Organochlorine pesticides in water gas chromatographic method. 2005. General Multiresidue Method. Association of Official Analytical Chemists Method 990.06. In house method TM-T04-I01.

Chaikasem, S., Na Roi-et, V. 2020. Health risk assessment of pesticide residues in vegetables from river basin area applied. Environ. Res. App. Envi. Res. 42: 46–61.

De Amarante, O.P., Brito, Jr.N.M., dos Santos, T.C.R., Nunes, G.S., Ribeiro, M.L. 2003. Determination of 2,4-Dichlorophenoxyacetic acid and its major transformation product in soil samples by liquid chromatographic analysis. Talanta 60:115–121.

EN 15662. 2008. Foods of plant origin - Determination of pesticide residues using GC-MS and/or LCMS/MS following acetonitrile extraction/partitioning and clean-up by dispersive SPE – QuEChERS method.

Hammani, B., Bahri, M., Hassine, S.B., Driss, M.R. 2017. Development of liquid chromatography separation and a solid-phase extraction method for phenoxy alkanoic acid herbicides in water. Mod. Chem. Appl. 5: 1–8.

Jitpaka, S., Wischada, J., Thongsuk, P., Rattiyakorn, S., Weerawut, W. 2015. Monitoring of pesticide residues in domestic vegetables in Thailand during 2015. Asia Pac. J. Sci. Technol. 23: APST-23-04-03.

Oliveira, R.S., Koskinen, W.C., Fereira, F.A. 2001. Sorption and leaching potential of herbicides on Brazillian soils. Weed Res. 41: 97–100.

Rafal, S., Ksmierska, A., Bernat, P. 2018. Ametryn removal by *Metarhizium brunneum*: Biodegradation pathway proposal and metabolic background revealed. Chemosphere 190: 174–183.

Sabir, K., Hussainc, S., Wonga, A., Foguel, M.V., Gonçalvesd, L.M., Gurgoe, M.I.P., Sotomayor, M.P. 2018. Synthesis and characterization of magnetic-molecularly imprinted polymers for the HPLC-UV analysis of ametryn. Reactive and Functional Polymers 122: 175–182.

Thorstensen, C.W., Lode, O., Christiansen, A.L. 2000. Development of a solid-phase extraction method for phenoxy acids and bentazone in water and comparison to a liquid-liquid extraction method. J. Agric. Food Chem. 48: 5829–5833.

U.S. EPA. 1994. Organophosphorus compound by Gas Chromatography capillary column technique. In-house method. 2005. EPA method 8141A, Revision 1.

U.S.EPA. 2005. Reregistration Eligibility Decision (RED) for Ametryn. https://archive.epa.gov/pesticides/reregistration/web/pdf/ametryn_red.pdf, 22 January 2024.

U.S. EPA. 2014. Technical Overview of Ecological Risk Assessment Risk Characterization. Washington DC, USA.

U.S. EPA. 2018. National primary drinking water regulations. United States Environmental Protection Agency. http://www.epa.gov/ground-water-and-drinking-water/national-primary-drinking-water-regulations, 10 February 2022.

# การประยุกต์เอนไซม์แลคเคสตรึงเพื่อกำจัดสารปฏิชีวนะออกซีเตตราไซคลินในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

## Application of immobilized laccase for oxytetracycline removal in aquaculture pond

**ปิยาภรณ์ สมสมัคร*, กัณฑิกา นนทามิตร, ชนกนันท์ ก้องสมุทร, อาทิตยา ช่างด้วง, ประไพพิศ ชัยรัตนมโนกร**

Piyapawn Somsamak*, Kanthika Nonthamit, Chanoknan Kongsamoot, Athitaya Changduang, Prapaipid Chairattanamanokorn

ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Environmental Management and Technology, Faculty of Environment, Kasetsart University, 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: piyapawn.s@ku.th

**บทคัดย่อ**

เอนไซม์แลคเคสตรึงถูกนำมาศึกษาเพื่อประยุกต์ในการกำจัดสารปฏิชีวนะในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ เมื่อทดสอบปัจจัยที่สัมพันธ์กับสภาวะในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำพบว่าเอนไซม์แลคเคสตรึงสามารถกำจัดสารปฏิชีวนะออกซีเตตราไซคลิน (oxytetracycline, OTC) ได้ แต่ปฏิกิริยามีความไวต่อสารอินทรีย์ในน้ำ การดูดซับจึงเป็นกลไกหลักในการบำบัดที่ระดับความเข้มข้นสารอินทรีย์สูง ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดโดยรวมลดลงกว่าร้อยละ 80 เมื่อบรรจุเม็ดแคปซูลตรึงเอนไซม์ในโครงสร้างที่มีรูปพรุนและทดสอบในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจำลอง พบว่ารูปทรงของโครงสร้างรวมทั้งลักษณะการกระจายตัวในบ่อจำลองให้ผลการศึกษาที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เม็ดแคปซูลตรึงเอนไซม์สามารถบำบัดน้ำในบ่อจำลองต่อเนื่องได้อย่างน้อย 40 วัน โดยบำบัด OTC 3 รอบ และสามารถเก็บกลับคืนเมื่อเลิกใช้โดยไม่ตกค้างในบ่อเพาะเลี้ยงซึ่งเป็นเป้าหมายสำคัญของการศึกษานี้ ผลลัพธ์นี้เป็นแนวทางพัฒนาเทคโนโลยีสีเขียวเพื่อกำจัดสารปฏิชีวนะตกค้างในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

**คำสำคัญ**: เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ, แลคเคส, สารปฏิชีวนะ, ออกซีเตตราไซคลิน, เอนไซม์ตรึง

**Abstract**

Immobilized laccase was studied for applying in antibiotic removal from aquaculture ponds. Upon testing under aquaculture pond conditions, Immobilized laccase exhibited oxytetracycline (OTC) removal capacity. However, the reactions were very sensitive to organic materials presenting in water. At high organic concentrations, adsorption was a major removal mechanism resulting in decreasing of overall OTC removal efficiency by approximately 80%. Immobilized laccase capsules were packed in porous structures and tested in aquaculture pond mesocosms. Shapes and distribution patterns of supporting structures showed no statistically significant difference. Immobilized laccase capsules demonstrated removing capacity for 40 consecutive days with 3 cycles of OTC additions. The capsules were successfully recovered at the end of the test. The results leads to the development of green remediation technology for removing antibiotic residues in aquaculture ponds.

**Keywords**: Antibiotics, Aquaculture, Immobilized enzyme, Laccase, Oxytetracycline

**คำนำ**

สารปฏิชีวนะมักถูกตรวจพบจะเป็นพื้นที่ที่มีกิจกรรมของมนุษย์ที่สัมพันธ์กับการใช้ เช่น โรงพยาบาล การบำบัดน้ำเสีย การเลี้ยงสัตว์ หรือการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ (Kay et al., 2004; Patrolecco et al., 2015; Orya et al. 2016) สารปฏิชีวนะที่ปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมทำให้เกิดผลระยะสั้นจะทำให้จุลินทรีย์บางกลุ่มที่ตอบสนองต่อยาตายลง ส่งผลต่อจำนวนและความสัมพันธ์ของกลุ่มจุลินทรีย์ต่าง ๆ (Laveman et al., 2015; Roose-Amsaleg and Laveman, 2016) นอกจากนี้ยังจะทำให้เกิดการคัดเลือกสิ่งมีชีวิตที่ดื้อยาในสิ่งแวดล้อมในระยะยาว (Jutkina et al., 2016) Grenni et al. (2018) ได้ถือว่ายีนดื้อยาเป็นมลสารสิ่งแวดล้อมประเภทหนึ่ง ทั้งนี้สารปฏิชีวนะในน้ำอาจถูกย่อยสลาย หรือถูกดูดซับไว้ในส่วนตะกอนได้ (Harrabi et al., 2019) อุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืดเพื่อการบริโภคมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การใช้ยาปฏิชีวนะและฮอร์โมนในระหว่างการเพาะเลี้ยงเพิ่มมากขึ้นด้วยเพื่อให้เร่งการเจริญและลดการเกิดโรคในการเลี้ยงแบบหนาแน่น ทำให้อาจเกิดการสะสมของยาปฏิชีวนะและฮอร์โมนในน้ำและตะกอน หากระบายออกสู่สิ่งแวดล้อมจะส่งผลต่อคุณภาพน้ำและระบบนิเวศ การห้ามใช้สารปฏิชีวนะหรือจำกัดการใช้สารปฏิชีวนะร่วมกับการฟื้นฟูคุณภาพน้ำเป็นแนวทางลดปัญหาการปนเปื้อนสารปฏิชีวนะจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำสู่แหล่งน้ำได้

การใช้เอนไซม์แลคเคส (E.C. 1.10.3.2, *p*-benzenedial: oxygen oxidoreductase)ในกำจัดสารปฏิชีวนะนับว่าเป็นกระบวนการฟื้นฟูที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เอนไซม์แลคเคสออกซิไดซ์สารอินทรีย์โดยใช้ออกซิเจนเป็นสับสเตรทร่วม ทั้งนี้เอนไซม์แลคเคสสามารถเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชั่นของสารประกอบทั้งกลุ่มฟีนอลลิกและไม่ใช่ฟีนอลลิกที่หลากหลายและใช้ในการกำจัดมลพิษสิ่งแวดล้อมอย่างกว้างขวาง (Jeong and Choi, 2020) การตรึงเอนไซม์จะเร่งอัตราการสลายได้ดีกว่าในรูปสารละลายเนื่องจากยังคงรักษาระดับกิจกรรมของเอนไซม์แลคเคสในระดับสูง (Chang and Ren, 2015) ปิยาภรณ์ และคณะ (2565) ได้ศึกษาเอนไซม์แลคเคสในการกำจัด OTC เพื่อประยุกต์ในการฟื้นฟูบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ พบว่าการทำงานของเอนไซม์แลคเคสทางการค้าและสารสกัดหยาบจากเชื้อ *Xylaria sp.* มีประสิทธิภาพสูงสุดในช่วง pH 5–6.5 และความเค็ม 0.0–0.4 กรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นสภาวะไม่สอดคล้องกับสภาวะในบ่อเพาะเลี้ยง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัด OTC ที่ทดสอบในสภาวะบ่อเพาะเลี้ยงมีค่าต่ำ แต่การตรึงสารสกัดหยาบและเอนไซม์แลคเคสทางการค้าในเม็ดแอลจิเนตสามารถลดการยับยั้งในสภาวะแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมกับการทำงานของเอนไซม์ได้ ทำให้เม็ดแคปซูลที่ตรึงเอนไซม์มีประสิทธิภาพการกำจัด OTC สูงกว่าเอนไซม์อิสระในรูปสารละลาย นอกจากนี้เม็ดแคปซูลตรึงเอนไซม์ยังมีกลไกการดูดซับ ส่งผลดีต่อการกำจัดสารปฏิชีวนะโดยรวม ทั้งนี้ในสภาวะที่ไม่เหมาะสมกับการทำงานของเอนไซม์แลคเคส เม็ดแคปซูลตรึงเอนไซม์ใหญ่กว่า 2 มิลลิเมตรจะมีประสิทธิภาพการกำจัด OTC สูงกว่าเม็ดแคปซูลตรึงเอนไซม์ขนาดเล็ก

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการใช้งานเอนไซม์แลคเคสตรึงเพื่อบำบัดน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจึงศึกษาปัจจัยที่สอดคล้องกับคุณภาพน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงได้แก่ ความกระด้างและสารอินทรีย์ที่ละลายในน้ำ รวมทั้งทดลองใช้งานโครงสร้างพยุงแบบทรงกลมเปรียบเทียบกับโครงสร้างทรงกระบอกในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจำลอง โครงสร้างสำหรับพยุงเม็ดแคปซูลตรึงเอนไซม์นี้ยึดติดที่และมีรูพรุนโดยรอบบรรจุเม็ดแคปซูลตรึงเอนไซม์ไว้ภายใน ทำให้เม็ดแคปซูลตรึงเอนไซม์ไม่หลุดลอยออกไปทั่วบ่อ ทำให้สามารถเก็บกลับคืนได้เมื่อให้งานเสร็จหรือเมื่อเม็ดแคปซูลหมดประสิทธิภาพแล้วโดยไม่เหลือเป็นสิ่งตกค้างในบ่อ โดยโครงสร้างทรงกลมเป็นการกระจายเอนไซม์ทุกทิศทาง ส่วนโครงสร้างทรงกระบอกเน้นการกระจายตามแนวลึกของบ่อ ผลการศึกษานี้จะเป็นข้อมูลพื้นฐานเพื่อปรับปรุงโครงสร้างต้นแบบเพื่อการใช้งานในบ่อเพาะเลี้ยงจริงต่อไป

**อุปกรณ์และวิธีการ**

*การผลิตเม็ดแคปซูลตรึงเอนไซม์และศึกษาผลของความกระด้างและสารอินทรีย์*

ละลายเอนไซม์แลคเคสทางการค้า (EC 1.10.3.2) ผลิตจากเชื้อ *Aspergillus oryzae* (Sunson Industry group, ประเทศจีน) ในน้ำกลั่นให้มีกิจกรรมเอนไซม์ 5 หน่วยต่อมิลลิลิตร ละลายโซเดียมแอลจิเนต 5 กรัม ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลายเอนไซม์ลงไป ร้อยละ 10 ของปริมาตรสารละลายโซเดียมแอลจิเนต หลังจากผสมกันดีแล้วดูดส่วนผสมใส่หลอดแล้วบีบปล่อยลงไปในสารละลาย แคลเซียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 1.5 คนตลอดเวลา บีบผ่านปลายเข็มให้ได้เม็ดแคปซูลขนาด 2–5 มิลลิเมตร ศึกษาผลของความกระด้างโดยการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) 400, 800 และ 1200 มิลลิกรัมต่อลิตร และได้เลือกกรดฮิวมิกเป็นตัวแทนสารอินทรีย์ในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยเติมกรดฮิวมิก 10, 25, 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ความเข้มข้น OTC เริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยละลาย OTC ในน้ำปราศจากไอออน (DI water) ปริมาตร 800 มิลลิลิตร ทดสอบชุดการทดลองแคปซูลตรึงเอนไซม์ 40 เม็ดต่อน้ำ 1 ลิตร (40Cap+E) และ แคปซูลตรึงเอนไซม์ 80 เม็ดต่อน้ำ 1 ลิตร (80Cap+E) โดยมีชุดควบคุมคือ ชุดแคปซูลที่ไม่ตรึงเอนไซม์ 40 เม็ดต่อน้ำ 1 ลิตร ชุดเอนไซม์แลคเคสอิสระในรูปสารละลาย และชุดสารละลาย OTC ที่ไม่เติมเอนไซม์หรือแคปซูลทำการศึกษา 15 วัน ทำการทดลอง 3 ซ้ำ

*โครงสร้างพยุงเม็ดแคปซูลเมื่ออยู่ในน้ำและการสลายสารปฏิชีวนะในน้ำเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำสังเคราะห์ในบ่อจำลอง*

โครงสร้างพยุงมีลักษณะเป็นเสาติดกับโครงสร้างที่เป็นรูพรุนขนาดเล็กกว่าเม็ดแคปซูลเพื่อสามารถกักเก็บเม็ดแคปซูลไว้ภายในได้ ได้แก่ โครงสร้างทรงกระบอก (Perforated column, PC) และ โครงสร้างทรงกลม (Perforated ball-on-stick, PBS) (Fig. 1) PC เป็นทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.4 เซนติเมตร ยาว 8 เซนติเมตร ปริมาตร 12.31 ลูกบาศก์เซนติเมตร ผิวเป็นโครงร่างตาข่ายขนาดช่องว่าง 1 มิลลิเมตร สัดส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตร 3.36:1 ส่วน PBS เป็นพลาสติกครึ่งทรงกลม 2 ชิ้นที่นำมาประกอบเป็นรูปทรงกลม เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.90 เซนติเมตร ปริมาตร 12.76 ลูกบาศก์เซนติเมตร สัดส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตร 1.93:1 เจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร จำนวน 40 รู กระจายทั่วพื้นผิว คิดเป็นสัดส่วน 45% ของพื้นที่ผิวติดตั้งโครงสร้างพยุงแคปซูลทั้ง 2 แบบได้แก่ โครงสร้างพยุงแบบทรงกลม PBS และทรงกระบอก PC ในตู้เลี้ยงปลาขนาด 45×21×26 เซนติเมตรโดยศึกษาการกระจายเม็ดแคปซูลในบ่อจำลอง 3 รูปแบบ คือ แบบศูนย์กลาง แบบกระจาย 4 จุด และแบบกระจาย 8 จุด แต่ละบ่อบรรจุแคปซูลตรึงเอนไซม์แลคเคสขนาด 2–5 มิลลิเมตร จำนวน 1600 เม็ด ดังแสดงใน Fig. 2 เติมสารละลาย OTC เข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร pH 7.5 กรดฮิวมิก 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตรน้ำสังเคราะห์ 20 ลิตร ให้อากาศกลางบ่อ 1 จุด เก็บตัวอย่างน้ำถังละ 2 จุด ณ จุดกึ่งกลางความลึก เพื่อวัดความเข้มข้นสารปฏิชีวนะ OTC ทำการทดลองเป็นเวลา 40 วัน ระหว่างนี้เมื่อตรวจพบการลดลง OTC จึงการทำการถ่ายน้ำและเติม OTC เพิ่มอีกทั้งหมด 2 ครั้ง

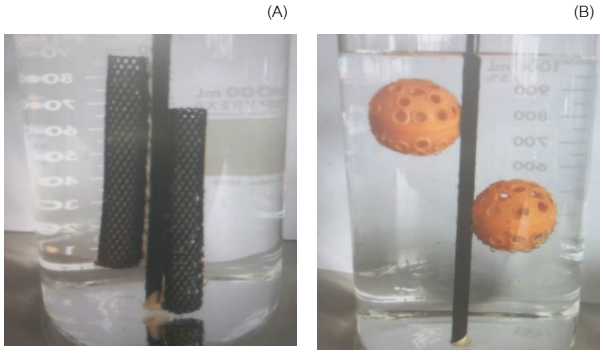



**Fig. 1** Models of porous supporting structure Perforated column, PC (A); and Perforated ball-on-stick, PBS (B)

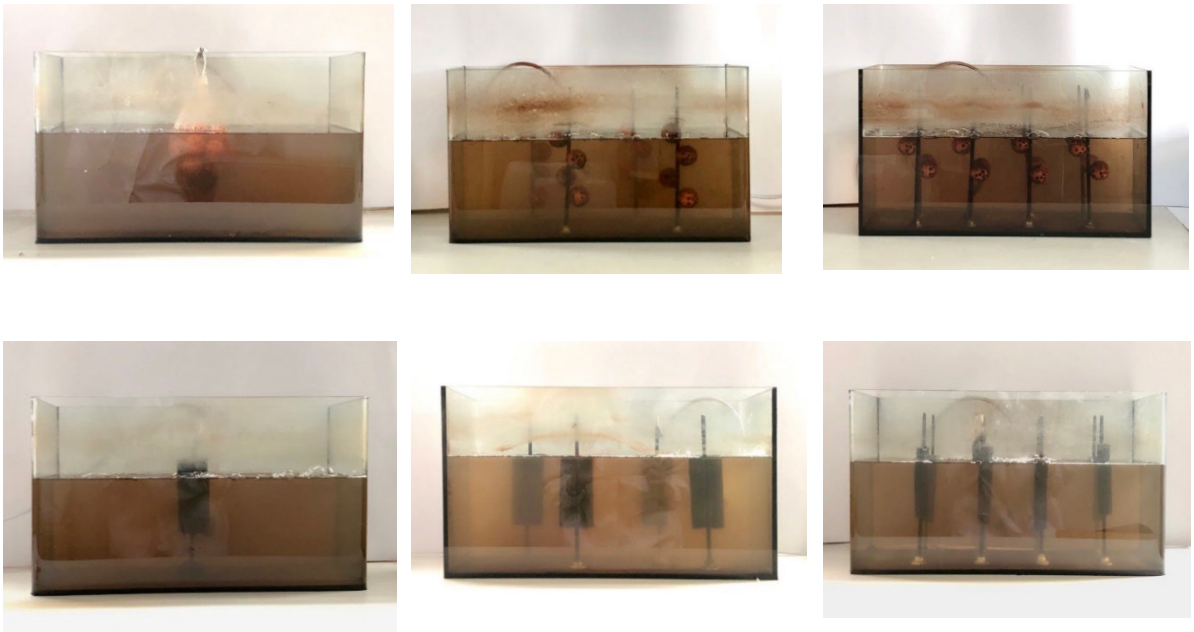


**Fig. 2** Photos of aquaculture pond mesocosms

*การวิเคราะห์ OTC*

วิเคราะห์ OTC ด้วยเทคนิคโครมาโตรกราฟฟีด้วยเครื่องวิเคราะห์ของเหลวสมรรถนะสูง (Agilent HPLC) โดยใช้คอลัมน์ชนิด C18 ( Cosmosil 5C18-MS-II, 5 ไมโครเมตร, 150×4.6 มิลลิเมตร) สภาวะสำหรับการวิเคราะห์ใช้สารชะ Phosphate buffer (0.02 M) pH 2.5: Methanol (75:25) อัตราการไหล 1.0 มิลลิลิตรต่อนาที ระยะเวลาที่ใช้วิเคราะห์ 10 นาที ตรวจวัดค่าการดูดกลืนรังสีอัตราไวโอเลตของสารที่แยกได้จากตัวอย่างที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร (Vijuksungsith et al., 2021)

**ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง**

จากการเก็บตัวอย่างน้ำจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมีความกระด้าง 770 มิลลิกรัมต่อลิตร และมักจะมีสารอินทรีย์จากของเสียและอาหารตกค้างอยู่ (Vijuksungsith et.al, 2021) จึงทำการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัด OTC ที่ระดับความกระด้าง 0–1200 มิลลิกรัมต่อลิตร (Fig. 3A) จากผลการทดลองพบว่าเอนไซม์แลคเคสจะทำงานได้ดีในสภาวะที่ไม่มีความกระด้าง โดยชุดการการทดลองเอนไซม์แลคเคสอิสระที่ไม่ถูกตรึงและชุดการทดลองแคปซูลตรึงเอนไซม์

80Cap+E สามารถกำจัด OTC ได้อย่างสมบูรณ์ภายในเวลา 15 วัน ส่วนชุดการทดลอง 40Cap+E ที่ยังคงตรวจพบ OTC เหลืออยู่ซึ่งเป็นผลมาจากการมีเม็ดแคปซูลตรึงเอนไซม์ในจำนวนน้อยกว่าส่งผลให้เอนไซม์มีปริมาณน้อยกว่าความกระด้าง 400 มิลลิกรัมต่อลิตรเริ่มส่งผลกระทบทางลบต่อการทำงานของชุดการทดลองเอนไซม์แลคเคสอิสระ แต่ที่ความกระด้าง 800 และ 1200 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการกำจัด OTC ของเอนไซม์อิสระน้อยกว่าชุดควบคุมที่ไม่มีความกระด้างร้อยละ 42 และร้อยละ 77 ตามลำดับ การตรึงเอนไซม์บนแอลจีเนตสามารถลดผลกระทบของความกระด้างที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัด OTC ได้โดยประสิทธิภาพของแคปซูลตรึงเอนไซม์ 80Cap+E ลดลงร้อยละ 5 และ ร้อยละ 33 ที่ความกระด้าง 800 และ 1200 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการตรึงเอนไซม์ทำให้เอนไซม์เลคเคสสามารถทำงานได้ดีว่าเอนไซม์อิสระในสภาวะที่ความกระด้างมีค่าใกล้เคียงกับค่าความกระด้างในน้ำเสียจริงจากบ่อเพาะเลี้ยง แม้ว่ายังไม่มีการสรุปผลของความกระด้างต่อกลไกการทำงานของเอนไซม์แลคเคสอย่างชัดเจน แต่กลไกการตรึงในเม็ดแอลจีเนตคือการกักเก็บ (entrapment) จึงเป็นการห่อหุ้มเอนไซม์ไว้ภายใน เป็นการป้องสารและไอออนต่าง ๆ ให้สัมผัสกับเอนไซม์ได้น้อยลง เพิ่มเสถียรภาพให้กับเอนไซม์โดยรวม (ปราณี, 2556) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาผลความเป็นกรดด่างและผลของความเค็มก่อนหน้านี้ (ปิยาภรณ์ และคณะ, 2565)

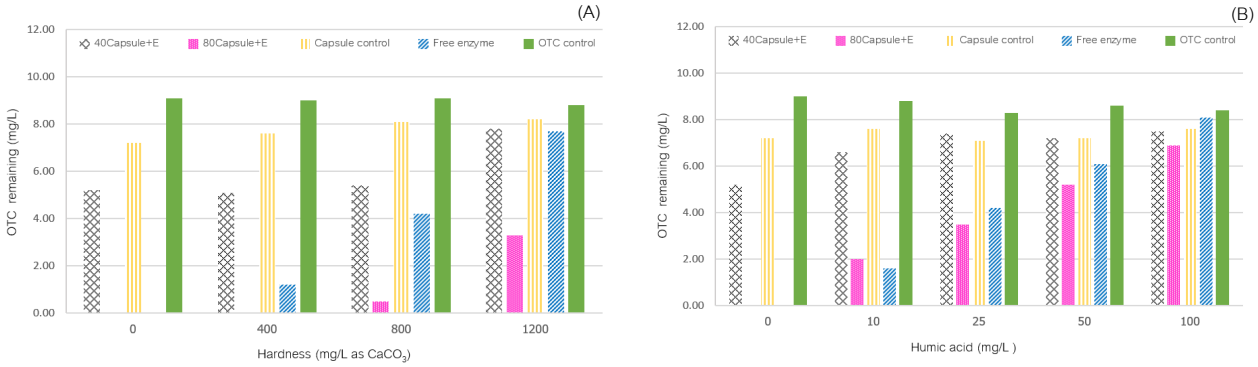



**Fig. 3** Effects of hardness (A); and organic matter as humic acid (B) on OTC removal by immobilized laccase, initial OTC concentration 10 mg/L

บ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมักมีของเสียของสัตว์น้ำและอาหารที่กินไม่หมดซึ่งอาจส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด OTC เพื่อศึกษาผลของปัจจัยดังกล่าวจึงได้ทดสอบการกำจัด OTC ในน้ำที่มีความเข้มข้นสารอินทรีย์ในรูปกรดฮิวมิก 0–100 มิลลิกรัมต่อลิตร (Fig. 3B) ผลการทดลองแสดงถึงการยับยั้งปฏิกิริยาของเอนไซม์อย่างชัดเจน ซึ่งอาจเป็นเพราะสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำแข่งขันกับ OTC ในการทำปฏิกิริยากับเอนไซม์แลคเคส เมื่อสารอินทรีย์มีความเข้มข้นต่ำการยับยั้งแบบแข่งขันดังกล่าวอาจไม่ชัดเจน และแลคเคสยังอาจช่วยสลายสารอินทรีย์ในน้ำ เป็นการปรับปรุงคุณภาพน้ำระหว่างการเพาะเลี้ยงด้วย แต่เมื่อสารอินทรีย์มีความเข้มข้นมากขึ้นก็ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด OTC มากขึ้นด้วย ที่ความเข้มข้นกรดฮิวมิกตั้งแต่ 25 มิลลิกรัมต่อลิตรขึ้นไป ชุดแคปซูลตรึงเอนไซม์ 40Cap+E จะมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับชุดควบคุมที่มีเฉพาะเม็ดแคปซูลแต่ไม่มีเอนไซม์ ชี้ว่าในสภาวะนี้ การดูดซับโดยเม็ดแคปซูลเป็นกลไกหลักในการกำจัด OTC ส่วนการทำงานของเอนไซม์มีผลต่อน้อยมาก กิจกรรมของเอนไซม์ยังคงมีความสำคัญในชุดแคปซูลตรึงเอนไซม์ 80Cap+E แต่จะค่อย ๆ ลดลงเมื่อความเข้มข้นของกรดฮิวมิกสูงขึ้น ดังนั้นหากต้องบำบัดในสภาวะที่มีสารอินทรีย์สูงจำเป็นต้องใช้เอนไซม์ที่ความเข้มข้นสูงมาก ในทางปฏิบัติจึงควรหลีกเลี่ยงการใช้เอนไซม์บำบัดในสภาวะนี้และพิจารณาการบำบัดวิธีอื่นแทน จะเห็นได้ว่าสารอินทรีย์ที่ไม่มีมากเกินไปและปริมาณเอนไซม์ที่เพียงพอเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่ออัตราการสลาย OTC

โดยเอนไซม์แลคเคส เกษตรกรผู้เลี้ยงสัตว์น้ำจึงควรบำบัดตะกอนในช่วงเตรียมบ่อก่อนการเพาะเลี้ยงและการควบคุมปริมาณอาหารสัตว์น้ำระหว่างการเพาะเลี้ยงควบคู่กันไปด้วย

เพื่อศึกษาข้อมูลพื้นฐานเพื่อเป็นต้นแบบการใช้งานจริง จึงทำการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัด OTC ในบ่อเพาะเลี้ยงจำลองโดยใช้น้ำสังเคราะห์ที่มีสมบัติใกล้เคียงกับน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงจริง และได้บรรจุเม็ดแคปซูลตรึงเอนไซม์ไว้ในโครงสร้างพยุงเม็ดแคปซูลรวมทั้งศึกษาการกระจายตัวของเม็ดแคปซูลตรึงเอนไซม์ในรูปแบบต่าง ๆ ภายใต้สภาวะที่ทำการศึกษา (Fig. 2) รูปแบบของโครงสร้างพยุงและรูปแบบการกระจายตัวของโครงสร้างพยุงในบ่อจำลองไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด OTC ทั้งนี้ในการทดสอบรอบที่ 1 ทุกชุดการทดลองมี OTC คงเหลือร้อยละ 10–13 ในวันที่ 6 ของการทดลอง (Fig. 4) จากนั้นในวันที่ 11 ของการทดลองได้ระบายน้ำบ่อเพาะเลี้ยงสังเคราะห์ออกทั้งหมดแล้วเติมน้ำใหม่ลงไป จะเห็นได้ว่าแคปซูลที่ตรึงเอนไซม์ในโครงสร้างพยุงสามารถบำบัดน้ำบ่อเพาะเลี้ยงสังเคราะห์ที่ปนเปื้อน OTC อย่างต่อเนื่อง โดยในรอบที่ 2 นี้ ทุกชุดการทดลองมี OTC คงเหลือร้อยละ 8–10 ในวันที่ 26 ของการทดลอง รวมระยะเวลาบำบัดในรอบนี้ 16 วัน ในวันที่ 33 ของการทดลอง ได้ระบายน้ำบ่อเพาะเลี้ยงสังเคราะห์ออกทั้งหมดแล้วเติมน้ำใหม่ลงไปอีกครั้งหนึ่ง ในครั้งนี้การบำบัดน้ำบ่อเพาะเลี้ยงสังเคราะห์ที่ปนเปื้อน OTC อย่างต่อเนื่อง โดยในรอบนี้ ทุกชุดการทดลองมี OTC คงเหลือร้อยละ 59–60 ในวันที่ 40 ของการทดลอง รวมระยะเวลาบำบัดในรอบนี้ 8 วัน

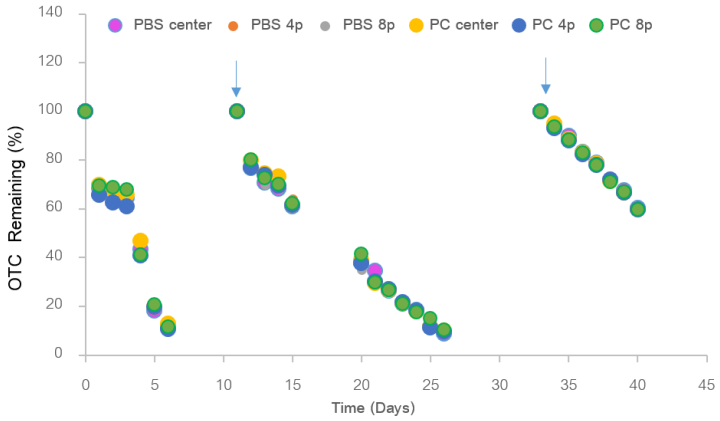



**Fig. 4** Efficiencies of OTC removal by two types of porous supporting structures with three different distribution patterns. Arrows indicates OTC respiking.

การประยุกต์เอนไซม์ตรึงในการกำจัด OTC ในบ่อเพาะเลี้ยงต้องพิจารณาใน 2 ประเด็นคือ ประสิทธิภาพของเอนไซม์ภายใต้สภาวะในบ่อเพาะเลี้ยงและวิธีการนำเอนไซม์ตรึงไปใช้ในบ่อเพาะเลี้ยง ซึ่งการศึกษานี้จะเน้นแนวทางที่เกษตรสามารถนำไปใช้ได้ การผลการศึกษาในครั้งนี้แสดงให้เห็นว่า โครงสร้างพยุงต้นแบบทั้งแบบทรงกระบอกและทรงกลม สามารถบรรลุเป้าประสงค์ของการวิจัยได้เป็นอย่างดี เม็ดแคปซูลตรึงเอนไซม์สามารถทำงานต่อเนื่องได้อย่างน้อย 40 วัน โดยบำบัด OTC 3 รอบ และสามารถเก็บเม็ดแคปซูลกลับคืนเมื่อเลิกใช้งานโดยไม่ตกค้างในบ่อเพาะเลี้ยง การหมุนวนของน้ำภายในบ่อจำลองเป็นผลจากการให้อากาศซึ่งเป็นสภาวะที่สอดคล้องกับสภาวะจริงในบ่อเพาะเลี้ยงทำให้รูปทรงและรูปแบบการกระจายตัวของโครงสร้างพยุงที่ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด แม้ว่าอัตราการกำจัด OTC ในบ่อจำลองลดลงตามเวลาที่ผ่านไป แต่ระยะเวลากักเก็บน้ำที่ยาวนานในบ่อเพาะเลี้ยงจะชดเชยข้อจำกัดส่วนนี้ อย่างไรก็ตามหากต้องการใช้เทคนิคทางชีวภาพนี้ในการบำบัดน้ำในบ่อพักน้ำที่มีระยะเวลากักเก็บน้ำน้อยกว่าบ่อเพาะเลี้ยงจำเป็นต้องปรับปรุงประสิทธิภาพให้สูงขึ้นเพื่อสามารถบำบัดได้ในระยะเวลากักเก็บน้ำที่สั้นลง

การเพิ่มความเข้มข้นของเอนไซม์เป็นอีกแนวทางหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพภายใต้สภาวะที่ไม่เหมาะสม เช่น pH เป็นกลางถึงด่าง มีสารอินทรีย์ในน้ำหรือระยะเวลากักเก็บน้ำสั้นเกินไป ปิยาภรณ์ และคณะ (2565) ชี้ว่าจุดนี้เป็นข้อจำกัดของการใช้สารสกัดหยาบจาก *Xylaria* sp. เนื่องจากการทำให้เอนไซม์จากสารสกัดหยาบเข้มข้นมากขึ้นเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายในการเตรียมเอนไซม์นอกเหนือจากส่วนเพาะเลี้ยงและสกัดเอนไซม์ ส่วนแนวทางการเพิ่มจำนวนแคปซูลที่ตรึงสารสกัดหยาบนั้นนอกจากจะเพิ่มค่าใช้จ่ายแล้วยังมีความเป็นไปได้น้อยมากในทางปฏิบัติเนื่องจากต้องพิจารณาสัดส่วนของแคปซูลต่อปริมาตรน้ำให้น้อยที่สุด เพื่อไม่กระทบต่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ดังนั้นการใช้เอนไซม์ทางการค้าเพื่อผลิตเป็นแคปซูลเอนไซม์จะลดขั้นตอนการเลี้ยงเชื้อและการสกัดเอนไซม์ทำให้เอื้อต่อการใช้งานจริงและสามารถควบคุมคุณภาพได้ นอกจากนี้การใช้เอนไซม์ทางการค้ายังสามารถเพิ่มความเข้มข้นเอนไซม์ตรึงในแคปซูลให้สูงขึ้น ส่งผลให้การประยุกต์ในบ่อเพาะเลี้ยงมีประสิทธิภาพสูงขึ้นและสามารถลดสัดส่วนเม็ดแคปซูลต่อปริมาตรน้ำลงได้ อย่างไรก็ตามแม้ว่าการใช้เอนไซม์ตรึงจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าเอนไซม์อิสระ แต่เอนไซม์แลคเคสทางการค้าที่นำมาศึกษานี้มีกิจกรรมเอนไซม์ที่ลดลงภายให้สภาวะที่ใกล้เคียงกับคุณภาพน้ำในบ่อเพาะเลี้ยง นับว่าเป็นข้อจำกัดในการใช้งานโดยเฉพาะในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำกร่อยหรือน้ำเค็ม ดังนั้นการพัฒนาเม็ดแคปซูลตรึงเอนไซม์แลคเคสที่มีกิจกรรมของเอนไซม์ที่สภาะความเค็มสูง ความกระด้างสูงและ pH เป็นกลาง จึงเป็นแนวทางการพัฒนาแนวคิดนี้ให้สามารถประยุกต์ได้อย่างกว้างขวางอย่างแท้จริง

## สรุป

การตรึงเอนไซม์ทำให้เอนไซม์แลคเคสสามารถทำงานได้ดีกว่าเอนไซม์อิสระในสภาวะที่มีค่าใกล้เคียงกับในน้ำเสียจริงจากบ่อเพาะเลี้ยง ส่วนสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำแข่งขันกับ OTC ในการทำปฏิกิริยากับเอนไซม์แลคเคส เมื่อสารอินทรีย์มีความเข้มข้นมากขึ้นก็ส่งผลทางลบต่อประสิทธิภาพการกำจัด OTC มากขึ้นด้วย โครงสร้างพยุงต้นแบบทั้งแบบทรงกระบอกและทรงกลม สามารถบรรลุเป้าประสงค์ของการวิจัยได้เป็นอย่างดี โดยยึดเม็ดแคปซูลตรึงเอนไซม์ให้คงอยู่ในจุดที่กำหนดและไม่หลุดลอยเป็นอิสระออกไปทั่วบ่อ เม็ดเอนไซม์ตรึงนี้สามารถทำงานต่อเนื่องได้อย่างน้อย 40 วัน และสามารถนำกลับคืนเมื่อเลิกใช้งานโดยไม่ตกค้างในบ่อเพาะเลี้ยง

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ 2563 และคณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

## เอกสารอ้างอิง

ปราณี พัฒนพิพิธไพศาล. 2556. เอนไซม์เทคโนโลยี. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.

ปิยาภรณ์ สมสมัคร, ชาญวิช อมาตยกุล, เกศรัตน์ คำเสนาะ, กัณฑิกา นนทามิตร, ชนกนันท์ ก้องสมุทร, ประไพพิศ ชัยรัตนมโนกร. 2565. การกำจัดสารปฏิชีวนะออกซีเตตราไซคลินโดยสารสกัดหยาบจากเชื้อ *Xylaria sp.* ที่ตรึงในแคลเซียมแอลจีเนต. ใน: รายงานการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 60. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ, หน้า 627–634.

Chang, B., Ren, Y. 2015. Biodegradation of three tetracyclines in river sediment. Ecol. Eng. 75: 272–277.

Grenni, P., Ancona, V., Caracciolo, B. 2018. Ecological effects of antibiotics on natural ecosystems: A review. Microchem. J. 136: 25–39.

Harrabi M., Alexandrino, D.A.M., Aloulou, F., Elleuch. B., Jia, Z., Almeida, C.M.R., Mucha, A.P., Carvalho, M.F. 2019. Biodegradation of oxytetracycline and enrofloxacin by autochthonous microbial communities from estuarine sediments. Sci. Total Environ. 648: 962.

Jeong, D., Choi, K.Y. 2020 Biodegradation of tetracycline antibiotic by laccase biocatalyst immobilized on chotisan-tripolyphosphate beads. Appl. Biochem. Microbiol. 56: 306–312.

Jutkina, J., Rutgersson, C., Flash, C.F., Larsoon, D.G.J. 2016. An assay for determining minimal concentrations of antibiotics that drive horizontal transfer of resistence. Sci. Total Environ. 1: 131–138.

Kay, P., Blackwell, P.A., Boxall, A.B. 2004 Fate of veterinary antibiotics in a macroporous tile drained clay soil. Environ. Toxicol. Chem. 23: 1136–1144.

Kummerer, K. 2009. Antibiotics in the aquatic environment- A review-part I. Chemosphere 75: 417–434.

Laveman, A.M., Cazier, T., Yan, C., Roose-Amsaleg, C., Petit, F. Ganier, J., Berthe.T. 2015. Exposure to vancomycin causes a shift in the microbial community structure without affecting nitrate reduction rates in river sediment. Environ. Sci. Pollut. Res. Int. 22: 13702–13709.

Orya, J., Bricheux, G., Togola, A., Bonnet, J.L., Donnadiuu-Bernard, F., Forester, C., Traore, O. 2016. Ciprofloxacin residue and antibiotic-resistant biofilm bacteria in hospital effluent. Environ. Pollut. 214: 635–645.

Patrolecco, L., Capri, S., Ademollo, N. 2015. Occurrence of selected pharmaceuticals in the principal sewage treatment plants in Rome (Italy) and in the receiving waters. Environ. Sci. Pollut. Res 22: 5864–5875.

Roose-Amsaleg, C., Laveman, A.M. 2016. Do antibiotics have environmental side-effect? Impact of synthetic antibiotics on biogeochemical processes. Environ. Sci. Pollut. Res. 23: 4000–4012.

Vijuksungsith, P., Satapanajaru, T., Chokejaroenrat, C., Jarusutthirak, C., Sakulthaew, C., Kambhu, A., Boonprasert, R. 2021. Remediating oxytetracycline-contaminated aquaculture water using nano calcium peroxide (nCaO2) produced from flue gas desulfurization (FGD) gypsum. Environ. Technol. Innov. 24: 101861.

# Effects of meteorological factors and air pollutants on $PM_{2.5}$ concentrations during winter season in Bangkok

Torfun Tawpang[a], Pawee Klongvessa[a,*], Parkpoom Choomanee[b]

[a]Department of Environmental Technology and Management, Faculty of Environment, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

[b]Department of Environmental Science, Faculty of Environment, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author: E-mail address: ecpwk@ku.ac.th

**Abstract**

This study investigated and compared effects of meteorological factors and air pollutants on $PM_{2.5}$ concentration and determined the specific factors associated with $PM_{2.5}$ in urban areas of Bangkok, Thailand during winter in 2016–2020. The data were obtained from the Microclimate and Air Pollutants Monitoring Tower at Kasetsart University, Bangkok. Multiple linear regression (MLR) and the t-test were used to examine the important factors in the calculation of the $PM_{2.5}$ concentration based on three sets of independent variables: 1) meteorological factors, 2) air pollutants, and 3) both meteorological factors and air pollutants. Based on the Pearson correlation coefficients, $PM_{2.5}$ was negatively correlated with wind speed and positively correlated with $NO_x$, $SO_2$, and CO. Using only meteorological factors in the MLR, the important factor was wind speed; however, the accuracy of the calculated $PM_{2.5}$ concentration was not high. Using only air pollutants and both meteorological factors and air pollutants in the MLR, the important factors were $SO_2$ and CO for both cases, and the accuracies were notably better. These results suggested that air pollutants were key factors for calculating the $PM_{2.5}$ concentration.

**Keywords**: Air pollutants, Meteorological factors, Multiple linear regression, $PM_{2.5}$

## Introduction

Bangkok is facing air pollution challenges, especially during the winter, when high-pressure systems originating from China lead to an accumulation of pollutants. One of the significant air pollutants is $PM_{2.5}$. According to the $PM_{2.5}$ measurements conducted by the Microclimate and Air Pollutants Monitoring Tower at Kasetsart University (KU Tower) during the winter seasons of 2016 - 2020, there were several days that the $PM_{2.5}$ concentration exceeded the standard of the National Ambient Air Quality Standards (NAAQS) Thailand (37.5 μg/m$^3$). For example, on February 10, 2016, the average $PM_{2.5}$ concentration was 74.5 μg/m$^3$.

Several studies have investigated the relationship between $PM_{2.5}$ concentrations and various meteorological and geographic factors, as well as other pollutants in many regions (Nazif et al., 2018; Thongthammachart and Jinsart, 2020; Lesar and Filipčić, 2021). These studies have found that the meteorological factors and other pollutants contribute to temporal variations of $PM_{2.5}$ concentrations. The factors which have been commonly found to be related to the $PM_{2.5}$ concentration include temperature, air pressure, wind, and precipitation (Li et al., 2015; Chen et al., 2020; Xu et al., 2021). In addition, pollutants, such as $SO_2$ and $NO_2$, influence fluctuations in the $PM_{2.5}$ intensity (Wang and Ogawa, 2015).

Nevertheless, much of the published research focused on investigating the association between $PM_{2.5}$ and meteorological factors without including the effects of pollutants (Nazif et al., 2018), even though some studies have reported an association between $PM_{2.5}$ and other pollutants (Xie et al., 2015). Therefore, the current study aimed to investigate and compare the effects of meteorological factors and air pollutants on the $PM_{2.5}$ concentration, as well as to determine the specific factors associated with $PM_{2.5}$ in Bangkok urban areas during winter (November–February), as the season with high $PM_{2.5}$ concentration. The multiple linear regression (MLR) was applied to determine the relationship of $PM_{2.5}$ concentration to meteorological factors and air pollutants, and a t-test was done to determine the significant factors. With the MLR, the $PM_{2.5}$ concentration could be calculated from multiple variables; and therefore, the variables with high direct effects on the $PM_{2.5}$ concentrations could be determined.

## Materials and Methods

### *Study area*

Bangkok has many air quality monitoring stations, including KU Tower, where meteorological parameters and pollutants are measured at multiple heights (10 m, 30 m, 50 m, 75 m, and 110 m). This monitoring station is in the Faculty of Environment, Kasetsart University, Bang Khen, Bangkok (13.8540°N, 100.5699°E) in Fig. 1. The area surrounding the station is mostly urban, including commercial areas and transportation routes. The data measured at a height of 30 m from the KU Tower was used in this study to represent ambient air quality data in Bangkok (Sharma et al., 2017). However, for some parameters which were not available at that height, the data at a height of 10 m were used instead.

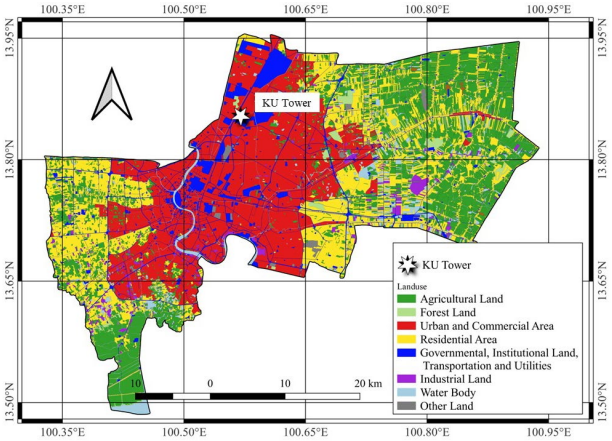



**Fig. 1** Location of KU Tower and land use in Bangkok

*Monitoring records and preprocessing*

The data collected consisted of the concentrations of $PM_{2.5}$ and of other air pollutants: nitrogen oxides ($NO_x$), sulfur dioxide ($SO_2$), carbon monoxide (CO), and ozone ($O_3$), as well as meteorological factors: wind speed (WS), temperature (T), relative humidity (RH), air pressure (BP) and rainfall (Rain). Data were collected on an hourly basis from 2016 to 2020 during the winter season.

A thorough screening of the data series was performed to identify and remove outliers that may have arisen due to measurement problems. The data as well as the heights of data measuring points and percentage of data availability (after removal of outliers) are summarized (Table 1).

**Table 1** Data used in this study

| Data (unit) | Height above ground level (m) | Availability (%) |
|---|---|---|
| Wind speed (m/s) | 30 | 93.17% |
| Temperature ($^{o}$C) | 30 | 98.59% |
| Relative humidity (%) | 30 | 99.27% |
| Air pressure (hPa) | 10 | 93.72% |
| Rainfall (mm) | 10 | 88.09% |
| $PM_{2.5}$ (μg/m$^3$) | 30 | 88.27% |
| Nitrogen oxides (ppb) | 30 | 94.03% |
| Sulfur dioxide (ppb) | 30 | 94.89% |
| Carbon monoxide (ppb) | 30 | 92.73% |
| Ozone (ppb) | 30 | 94.50% |

*Analysis*

MLR is a statistical method used to determine the relationship between one dependent variable and 2 or more independent variables. Many studies have used this method to investigate the relationship between $PM_{2.5}$ and related factors, such as meteorological factors and other pollutants (Nazif et al., 2018; Lesar and Filipčić, 2021; Saiohai et al., 2023). The current study used MLR to determine the relationships between: 1) $PM_{2.5}$ and meteorological factors (WS, T, RH, BP, and Rain); 2) $PM_{2.5}$ and other pollutants ($NO_x$, $SO_2$, CO, and $O_3$); and 3) $PM_{2.5}$ and both meteorological factors and other pollutants. The general form of the MLR equation is shown in Equation 1:

$$y=a+\sum_{i=1}^{p} b_i x_i+\varepsilon \quad (1)$$

where, $y$ is the $PM_{2.5}$ concentration, $x_i$ is the value of the $i^{th}$ independent variable (meteorological factor or other air pollutant), $p$ is the total number of meteorological factors and other air pollutants, $a$ and $b_i$ are constants, and $\varepsilon$ is the error. The values of $a$ and $b_i$ used in the regression were those that had the lowest sum of $\varepsilon^2$.

After the relationship was derived, the coefficient of determination ($R^2$) and the root mean square error (RMSE) were calculated to evaluate the accuracy, and the factors related to $PM_{2.5}$ were evaluated for statistical significance investigated based on a t-test against the null hypothesis that the value of each regression coefficient, $b_i$ in Equation 1, was 0 (that is, each factor did not relate to $PM_{2.5}$).

## Results and Discussion

*Characteristics of meteorological factors and pollutants*

During the study period, winter season from 2016 to 2020, $PM_{2.5}$ exhibited varying levels of concentrations with an average ± standard deviation of 34.29±18.48 μg/m$^3$. Notably, 35% these values exceeded the standard of the NAAQS Thailand (37.5 μg/m$^3$). There were also variations in the wind speed, temperature, relative humidity, air pressure, rainfall, and other air pollutants ($NO_x$, $SO_2$, CO, and $O_3$). Averages and standard deviations of these data are shown in Table 2.

**Table 2** Averages and standard deviations of meteorological factors and pollutants during the study period

| Data | Average | Standard Deviation |
|---|---|---|
| WS(m/s) | 1.84 | 1.00 |
| T ($^{o}$C) | 27.97 | 2.76 |
| RH (%) | 61.79 | 15.50 |
| Rain on Rainy day (mm)* | 3.6 | 8.0 |
| BP (hPa) | 1009.10 | 2.69 |
| $NO_x$ (ppb) | 25.41 | 22.02 |
| $SO_2$ (ppb) | 2.39 | 1.36 |
| CO (ppb) | 0.96 | 0.33 |
| $O_3$ (ppb) | 25.88 | 17.93 |
| $PM_{2.5}$ (ppb) | 34.29 | 18.48 |

* There were 124 rainy days during the study period

*Relationship between $PM_{2.5}$ concentration and independent variables (meteorological factors and other pollutants*

The relationship between $PM_{2.5}$ concentration and independent variables (meteorological factors and other pollutants) based on the MLR analysis can be seen in Table 3. CO and $SO_2$ were more important than the other variables when both meteorological factors and air pollutants were considered, based on the test-value. Since CO emission is usually caused by incomplete combustion (Bonfanti et al., 1994) and CO is not very reactive, the strong relationship between $PM_{2.5}$ and CO indicated that $PM_{2.5}$ was manily generated from combustion, which emits both $PM_{2.5}$ and CO. In addition to CO, $NO_x$ and $SO_2$ are also produced by combustions (Inerb et al., 2021). These 2 pollutants can be precursors for the formation of secondary $PM_{2.5}$ (Fang et al., 2017). In fact, $PM_{2.5}$ had positive relationships with all of CO, $NO_x$, and $SO_2$ (Table 4); however, $NO_x$ in the MLR was not as important as CO and $SO_2$ because the effect of CO could be used as a substitute for the effect of $NO_x$. It could be seen in Table 4 that the $NO_x$ was strongly correlated with CO. This strong correlation was because $NO_x$ was released along with CO.

Based only on the meteorological factors, WS was more important than the other variables in the MLR, with a high WS resulting in a low level of $PM_{2.5}$ because wind could disperse the pollutants. Since some pollutants are precursors for the formation of secondary $PM_{2.5}$, dispersion of these pollutants reduced the formation of secondary $PM_{2.5}$, as can be seen in Table 4 where WS is negatively correlated with $PM_{2.5}$ and with $NO_x$, one of precursors for the formation of secondary $PM_{2.5}$ (Guerra et al., 2014), while $NO_x$ is positively correlated with $PM_{2.5}$. However, when both meteorological factors and pollutants were used in the MLR, the WS were less important (see Table 3) because its effect was partially represented by the variation in $NO_x$. These findings indicated that WS indirectly affected the $PM_{2.5}$ by dispersing $NO_x$ rather than by directly dispersing $PM_{2.5}$.

**Table 3** Regression coefficients from MLR between $PM_{2.5}$ and independent variables (meteorological factors and pollutants), and MLR performance

| Parameter | Independent Variable: Meteorogical factors and pollutants | | | Independent Variable: Meteorogical factors | | | Independent Variable: Pollutants | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Coefficient | Test-value | P-value | Coefficient | Test-value | P-value | Coefficient | Test-value | *p*-value |
| Intercept ($\mu g/m^3$) | -202.063 | -3.283 | 0.001 | -302.964 | -3.936 | < 0.0001 | -3.8259 | -7.287 | < 0.0001 |
| WS (m/s) | -1.8039 | -12.333 | < 0.0001 | -5.7402 | -33.636 | < 0.0001 | - | - | - |
| T (°C) | -0.1866 | -2.936 | 0.0033 | -1.1712 | -14.975 | < 0.0001 | - | - | - |
| RH (%) | 0.0967 | 7.864 | < 0.0001 | -0.1704 | -13.182 | < 0.0001 | - | - | - |
| Rain (mm) | -0.3472 | -2.049 | 0.0405 | -0.489 | -2.205 | 0.0274 | - | - | - |
| BP (hPa) | 0.195 | 3.252 | 0.0011 | 0.388 | 5.176 | < 0.0001 | - | - | - |
| $NO_x$ (ppb) | 0.1316 | 12.031 | < 0.0001 | - | - | - | 0.1594 | 16.522 | < 0.0001 |
| $SO_2$ (ppb) | 3.8365 | 34.122 | < 0.0001 | - | - | - | 3.5678 | 33.625 | < 0.0001 |
| CO (ppb) | 28.251 | 41.831 | < 0.0001 | - | - | - | 25.5029 | 42.241 | < 0.0001 |
| $O_3$ (ppb) | 0.1932 | 16.733 | < 0.0001 | - | - | - | 0.0986 | 11.998 | < 0.0001 |
| $R^2$ | | 0.5044 | | | 0.1105 | | | 0.4578 | |
| RMSE ($\mu g/m^3$) | | 13.19 | | | 17.56 | | | 13.70 | |

**Table 4** Pearson correlation coefficients between factors used in this study

| | $PM_{2.5}$ | WS | T | RH | BP | Rain | $NO_x$ | $SO_2$ | CO | $O_3$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $PM_{2.5}$ | 1.0000 | -0.2579 | -0.1326 | 0.0150 | 0.1040 | -0.0168 | 0.5406 | 0.4311 | 0.6111 | -0.1210 |
| WS | -0.2579 | 1.0000 | -0.0001 | -0.3103 | 0.1042 | -0.0002 | -0.3973 | -0.1493 | -0.2813 | 0.3073 |
| T | -0.1326 | -0.0001 | 1.0000 | -0.4437 | -0.4713 | -0.0390 | -0.2071 | -0.0846 | -0.2027 | 0.4881 |
| RH | 0.0150 | -0.3103 | -0.4437 | 1.0000 | -0.0168 | 0.0721 | 0.1431 | -0.1253 | 0.1217 | -0.6207 |
| BP | 0.1040 | 0.1042 | -0.4713 | -0.0168 | 1.0000 | -0.0014 | 0.0648 | 0.1324 | 0.1540 | -0.1895 |
| Rain | -0.0168 | -0.0002 | -0.0390 | 0.0721 | -0.0014 | 1.0000 | -0.0199 | -0.0368 | 0.0017 | -0.0269 |
| $NO_x$ | 0.5406 | -0.3973 | -0.2071 | 0.1431 | 0.0648 | -0.0199 | 1.0000 | 0.3661 | 0.7155 | -0.4736 |
| $SO_2$ | 0.4311 | -0.1493 | -0.0846 | -0.1253 | 0.1324 | -0.0368 | 0.3661 | 1.0000 | 0.3588 | -0.0791 |
| CO | 0.6111 | -0.2813 | -0.2027 | 0.1217 | 0.1540 | 0.0017 | 0.7155 | 0.3588 | 1.0000 | -0.2711 |
| $O_3$ | -0.1210 | 0.3073 | 0.4881 | -0.6207 | -0.1895 | -0.0269 | -0.4736 | -0.0791 | -0.2711 | 1.0000 |

*MLR performance*

The performance of the various MLRs are shown in Table 3 and the comparison between the measured and calculated $PM_{2.5}$ concentrations are shown in Fig. 2. Using only meteorological factors in the MLR yielded a less accurate result ($R^2$ = 0.1105, RMSE = 17.56 $\mu g/m^3$, with the variability of the calculated $PM_{2.5}$ concentration being notably lower than for the measured $PM_{2.5}$ concentration), while using only pollutants in the MLR produced a notably more accurate result ($R^2$ = 0.4578, RMSE = 13.70 $\mu g/m^3$, with the variability of the

calculated $PM_{2.5}$ concentration being greatly improved). However using both meteorological factors and pollutants in the MLR produced a slightly more accurate result than when only the pollutants were used ($R^2$ = 0.5044 and RMSE = 13.19 µg/$m^3$). These results indicated that the $PM_{2.5}$ concentration in Bangkok during winter was correlated with both meteorological factors and air pollutants, but its correlation with air pollutant was stronger than its correlation with meteorological factors. Therefore, the air pollutant data were key factors in the calculation of $PM_{2.5}$ concentration.

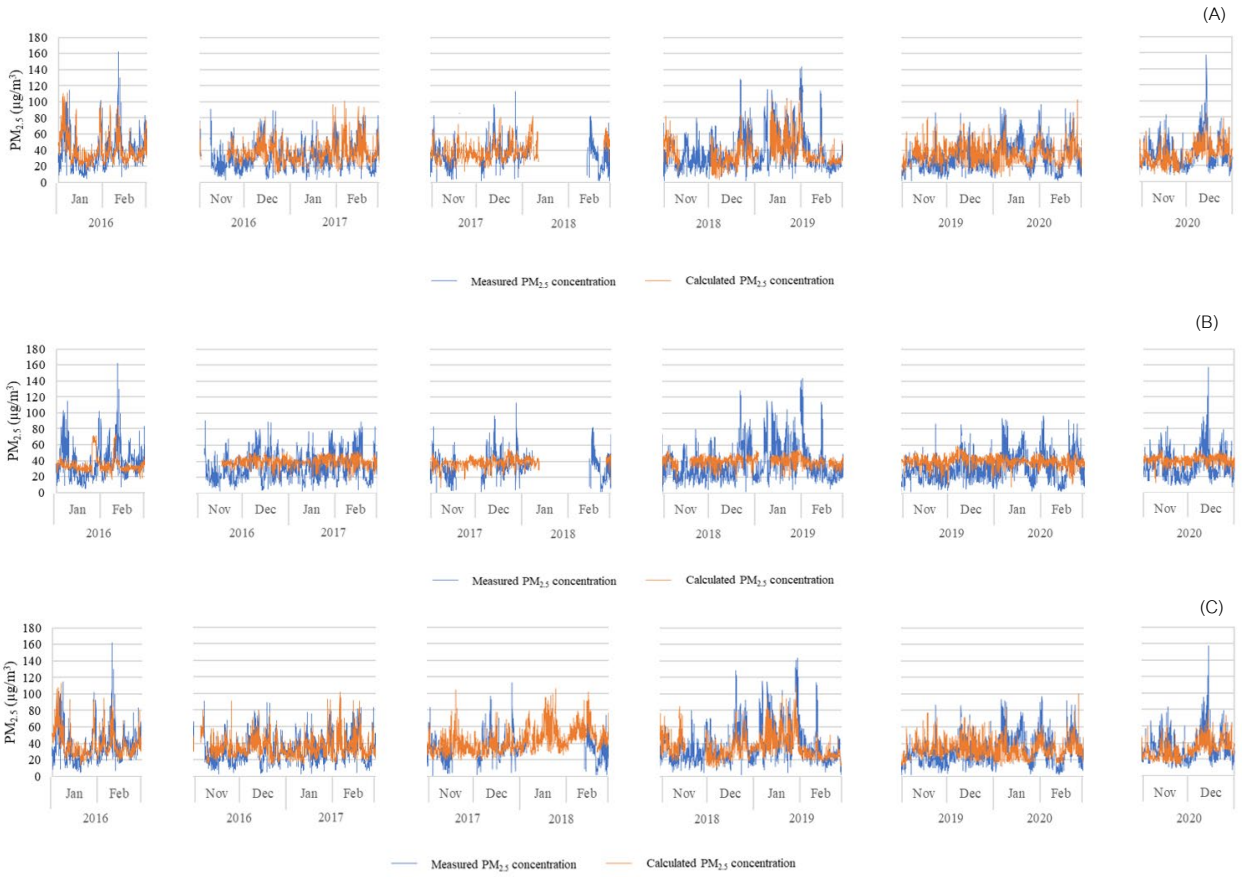



**Fig. 2** Measured and calculated $PM_{2.5}$ concentrations with independent variables: (A) both meteorological factors and air pollutants; (B) only meteorological factors; and (C) only air pollutants

## Conclusions

This study investigated the relationship between $PM_{2.5}$ and meteorological factors (WS, T, RH, BP and Rain) and air pollutants ($NO_x$, $SO_2$, CO and $O_3$) in Bangkok during the winter season and determined the important data for calculation of the $PM_{2.5}$ concentration. The Pearson correlation coefficients revealed that WS, $NO_x$, $SO_2$, and CO were clearly related to the $PM_{2.5}$ concentration. However, MLR analysis revealed that only $SO_2$ and CO were most important for this, because WS indirectly affected $PM_{2.5}$ through $NO_x$, which was correlated with CO. The correlation between $PM_{2.5}$ and CO indicated that $PM_{2.5}$ originated from combustion, while the correlation between $PM_{2.5}$ and precursors of secondary $PM_{2.5}$ ($NO_x$ and $SO_2$) indicated that $PM_{2.5}$ also originated from the reactions of air pollutants ($NO_x$ and $SO_2$). Furthermore, the indirect effect of wind speed

indicated that the wind reduced $PM_{2.5}$ by dispersing $NO_x$ rather than by directly dispersing $PM_{2.5}$. The predicted values for $PM_{2.5}$ concentrations were calculated based on MLR when the independent variables were: 1) both meteorological factors and air pollutants, 2) only meteorological factors, and 3) only air pollutants. The results indicated that the $PM_{2.5}$ concentration was correlated with air pollutants more strongly than with the meteorological factors. Therefore, the air pollutant data were key factors in the calculation of $PM_{2.5}$ concentration.

**Acknowledgements**

Financial support was provided by the Faculty of Environment, Kasetsart University, Bangkok, Thailand.

**References**

Bonfanti, L., Michele, G.D., Riccardi, J., Lopez-Doriga, E. 1994. Influence of coal type and operating conditions on the formation of incomplete combustion products. Pilot plant experiments. Combust. Sci. Technol. 101: 505–525.

Chen, Z., Chen, D., Zhao, C., et al. 2020. Influence of meteorological conditions on $PM2_{2.5}$ concentrations across China: A review of methodology and mechanism. Environ. Int. 139: 105558.

Fang, C., Zhang, Z., Jin, M., Zou, P., Wang, J. 2017. Pollution characteristics of PM2.5 aerosol during haze periods in Changchun, China. Aerosol Air Qual. Res. 17: 888–895.

Guerra, S.A., Olsen, S.R., Anderson, J.J. 2014. Evaluation of the SO2 and NOx offset ratio method to account for secondary PM2.5 formation. J. Air Waste Manag. 64: 265–271.

Inerb, M., Manomaiphiboon, K., Kokkaew, E., et al. 2021. Comparison of anthropogenic local and global emission inventories for Greater Bangkok. In: Proceedings of the 6th EnvironmentAsia International Conference. Bangkok, Thailand, pp. 305–317.

Lesar, T. T., Filipčić, A. 2021. The hourly simulation of PM2.5 particle concentrations using the Multiple Linear Regression (MLR) model for sea breeze in Split, Croatia. Water Air Soil Pollut. 232: 261.

Li, Y., Chen, Q., Zhao, H., Wang, L., Tao, R. 2015. Variations in $PM_{10}$, $PM_{2.5}$ and $PM_{1.0}$ in an urban area of the Sichuan Basin and their relation to meteorological factors. Atmosphere 6: 150–163.

Nazif, A., Mohammed, N.I., Malakahmad, A., Abualqumboz, M.S. 2018. Regression and multivariate models for predicting particulate matter concentration level. Environ. Sci. Pollut. Res. 25: 283–289.

Saiohai, J., Bualert, S., Thongyen, T., Duangmal, K., Choomanee, P., Szymanski, W.W. 2023. Statistical $PM_{2.5}$ prediction in an urban area using vertical meteorological factors. Atmosphere 14: 589.

Sharma, S., Agarwal, P., Mandal, T., et al. 2017. Study on ambient air quality of megacity Delhi, India during odd–even strategy. MAPAN. 32: 155–165.

Thongthammachart, T., Jinsart, W. 2020. Estimating $PM_{2.5}$ concentrations with statistical distribution techniques for health risk assessment in Bangkok. Hum. Ecol. Risk Assess. 26: 1848–1863.

Wang, J., Ogawa, S. 2015. Effects of meteorological conditions on $PM_{2.5}$ concentrations in Nagasaki, Japan. Int. J. Environ. Res. Public Health 12: 9089–9101.

Xie, Y., Zhao, B., Zhang, L., Luo, R. 2015. Spatiotemporal variations of $PM_{2.5}$ and $PM_{10}$ concentrations between 31 Chinese cities and their relationships with $SO_2$, $NO_2$, CO and $O_3$. Particuology 20: 141–149.

Xu, J., Liu, Z., Yin, L., et al. 2021. Grey correlation analysis of haze impact factor PM2.5. Atmosphere 12: 1513.

# การบำบัดไซโปรฟลอกซาซินในน้ำเสียด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกโอโซเนชัน

## Treatment of ciprofloxacin in wastewater by photocatalytic ozonation

**ศรายุทธ สุขสมแดน, อาภาพร กิจเจริญ, ชลอ จารุสุทธิรักษ์***

Sarayut Suksomdan, Arpaporn Kitjaroen, Chalor Jarusutthirak*

ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Environmental Technology and Management, Faculty of Environment, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: ecclj@ku.ac.th

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดไซโปรฟลอกซาซิน (CIP) ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลติกโอโซเนชัน (PCO) โดยศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ความเข้มข้น CIP (10, 20 และ 30 มก/ล.) พีเอช (3, 7 และ 9) และปริมาณโอโซน (44, 95 และ 132 มก/ชม.) ที่ระยะเวลา 0–60 นาที และความเข้มแสงยูวี 9 วัตต์ ผลการศึกษาพบว่า ที่ความเข้มข้น CIP 10 มก/ล.พีเอช 9 ปริมาณโอโซน 95 มก/ชม. และระยะเวลา 60 นาที ประสิทธิภาพการบำบัด CIP ด้วยกระบวนการ PCO และกระบวนการโอโซเนชันเพียงอย่างเดียว (OZ) ไม่ต่างกัน โดยมีค่า 79.90% และ 82.77% ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม กระบวนการ PCO สามารถบำบัดสารอินทรีย์ทั้งหมด (TOC) ได้มากกว่ากระบวนการ OZ (26.69% และ 19.62% ตามลำดับ) การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยา พบว่า เป็นการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม โดยที่ความเข้มข้น CIP 10 มก/ล. ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (k) มีค่าไม่แตกต่างกัน แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้น CIP เป็น 20 และ 30 มก/ล. พบว่ากระบวนการ PCO มี k สูงกว่ากระบวนการ OZ

**คำสำคัญ**: ไซโปรฟลอกซาซิน, โฟโตแคตะไลติกโอโซเนชัน, โอโซเนชัน

**Abstract**

This research studied treatment efficiency of photocatalytic ozonation (PCO) in removal of ciprofloxacin (CIP) in synthetic wastewater. Relevant factors including CIP concentration (10, 20 and 30 mg/L), pH value (3, 7 and 9), and ozone dosage (44, 95 and 132 mg/hr.) were investigated at contact time of 0-60 min. and UV intensity of 9 watts. The results showed at CIP concentration of 10 mg/L, pH of 9, ozone dosage of 95 mg/hr, and contact time of 60 min, the removal efficiency of PCO was similar to that of ozonation alone (OZ), i.e. 79.90% and 82.77%, respectively. However, the PCO exhibited higher removal efficiency for total organic compounds (TOC) than the OZ (26.69% and 19.62%, respectively). The study of reaction kinetics of CIP treatment by PCO and OZ revealed that the reactions followed pseudo-first order kinetics. At the CIP concentration of 10 mg/L, the reaction rate constant (k) of PCO and OZ were not significant different. As the CIP concentration increased to 20 and 30 mg/L, the reaction rate constant (k) of PCO became higher than those of OZ.

**Keywords**: Ciprofloxacin, Ozonation, Photocatalytic ozonation

**คำนำ**

ไซโปรฟลอกซาซิน (Ciprofloxacin) เป็นยาปฏิชีวนะกลุ่มฟลูโอโรควิโนโลน (Fluoroquinolone) ที่ช่วยรักษาหรือป้องกันการติดเชื้อแบคทีเรียบางชนิด เช่น การติดเชื้อทางเดินหายใจ ทางเดินปัสสาวะอักเสบ ต่อมลูกหมากติดเชื้อ การติดเชื้อที่ผิวหนัง เป็นต้น เมื่อบริโภคยาเข้าสู่ร่างกาย ยาจะถูกดูดซึมไปใช้แค่บางส่วนและบางส่วนจะถูกกำจัดออกจากร่างกายทางปัสสาวะเป็นหลัก ในประเทศไทยมีการศึกษาการปนเปื้อนของยาปฏิชีวนะในแม่น้ำบางปะกง ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงพยาบาลขนาดใหญ่เป็นระบบบำบัดแบบตะกอนเร่ง น้ำเสียจากฟาร์มสุกร พบว่ามีไซโปรฟลอกซาซินปนเปื้อนความเข้มข้น 0.32–12.44, 1.56 และ 34.3 ไมโครกรัมต่อลิตรตามลำดับ (กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม, 2559) นอกจากนี้ยังพบการปนเปื้อนของยาปฏิชีวนะไซโปรฟลอกซาซินใน 20 ประเทศกลุ่มสหประชาชาติในระบบนิเวศ มีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 0.1–10 ไมโครกรัมต่อลิตร การปนเปื้อนยาปฏิชีวนะในสิ่งแวดล้อมส่งผลให้เกิดการดื้อยาของเชื้อจุลินทรีย์ (Kim et al., 2020) ยาปฏิชีวนะมากกว่าร้อยละ 90 สามารถปนเปื้อนอยู่ในน้ำทิ้งที่ระบายจากระบบบำบัดน้ำเสียได้ พบการดื้อยาปฏิชีวนะของเชื้อ *Escherichia coli* (*E. coli*) ในน้ำเสียโรงพยาบาลสามารถดื้อยาปฏิชีวนะหลายชนิด เช่น แอมพิซิลลิน (Ampicillin) ไซโปรฟลอกซาซิน (Ciprofloxacin) เป็นต้น (ฐาปกรณ์, 2563) ถ้าได้รับเชื้อแบคทีเรียที่เกิดการดื้อยาจะทำให้การรักษาด้วยวิธีมาตรฐานไม่ได้ผลและอาการป่วยหายยากขึ้น อาจถึงขั้นทำให้เสียชีวิตได้ วิธีบำบัดน้ำเสียในปัจจุบันนิยมใช้ระบบตะกอนเร่งซึ่งมีประสิทธิภาพไม่เพียงพอในการบำบัดยาที่ปนเปื้อนได้ ทำให้มีการปล่อยยาที่ปนเปื้อนออกสู่สิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ยังพบยาตกค้างอยู่ในกากตะกอน (Sludge) อีกด้วย วิธีบำบัดด้วยกระบวนการโอโซเนชัน (Ozonation) เป็นกระบวนการทางเคมีที่มีประสิทธิภาพ โดยโอโซนสามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำและลดความเป็นพิษของสารลงได้ นอกจากนี้โอโซนสามารถเปลี่ยนรูปไปเป็นออกซิเจนได้ง่ายจึงไม่ตกค้างอยู่ในน้ำ (Dewitte et al., 2008) ข้อจำกัดของการใช้โอโซนคือเป็นสารไม่เสถียร และมีความจำเพาะต่อสารในการเกิดปฏิกิริยา (Asgari et al., 2021) จึงมีการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของโอโซนด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) ชนิด UV-C ทำให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิล (OH•) ที่มีศักยภาพการออกซิเดชันและประสิทธิภาพในการออกซิไดซ์ที่มากกว่าโอโซนเพียงอย่างเดียว (Krakko et al., 2021)

งานวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนไซโปรฟลอกซาซิน ด้วยกระบวนการโฟโต-แคตะไลติกโอโซชันเปรียบเทียบกับโอโซเนชันเพียงอย่างเดียว โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด ได้แก่ ความเข้มข้นของไซโปรฟลอกซาซิน ค่าพีเอช ปริมาณโอโซน และระยะเวลาสัมผัส ผลงานวิจัยสามารถประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนยาปฏิชีวนะ เช่น น้ำเสียจากฟาร์มสุกร โรงพยาบาล หรือ น้ำเสียจากอุตสาหกรรมยาให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

**อุปกรณ์และวิธีการ**

*การติดตั้งและเดินระบบโฟโตแคตะไลติกโอโซเนชัน*

ระบบโฟโตแคตะไลติกโอโซเนชันประกอบด้วยเครื่องกำเนิดโอโซนซึ่งสามารถปรับค่าอัตราการผลิตก๊าซโอโซนได้ที่ 44, 95 และ 132 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง ถังปฏิกิริยาทำจากวัสดุอะคริลิคขนาดความจุ 2 ลิตร ปั๊มน้ำชนิดจุ่ม อุปกรณ์เวนจูรี (Venturi ejector) และหลอดกำเนิดแสงยูวีชนิดหลอดตะเกียบ ขนาด 9 วัตต์ ในการเดินระบบ ปั๊มหมุนเวียนน้ำจากถังปฏิกิริยาผ่าน venturi ejector ซึ่งจะเกิดสุญญากาศ ทำให้ก๊าซโอโซนจากเครื่องกำเนิดโอโซนไหลผ่านท่อละลายผสมกับน้ำตัวอย่าง จากนั้นน้ำตัวอย่างไหลผ่านกระบอกหลอดยูวี ทำให้น้ำตัวอย่างที่ผสมก๊าซโอโซนเกิดปฏิกิริยากับแสงยูวี หลังจากนั้นน้ำตัวอย่างก็ไหลกลับเข้าสู่ถังปฏิกิริยาดัง Fig.1 ก๊าซโอโซนที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาถูกดักจับด้วยโซเดียม

ไธโอซัลเฟต ($Na_2S_2O_3$) ในการทดลองการบำบัดด้วยระบบโอโซเนชันทำโดยการไม่เปิดแสงยูวี และทำการทดลองชุดควบคุมโดยการเปิดเฉพาะแสงยูวีแต่ไม่เปิดเครื่องกำเนิดก๊าซโอโซน

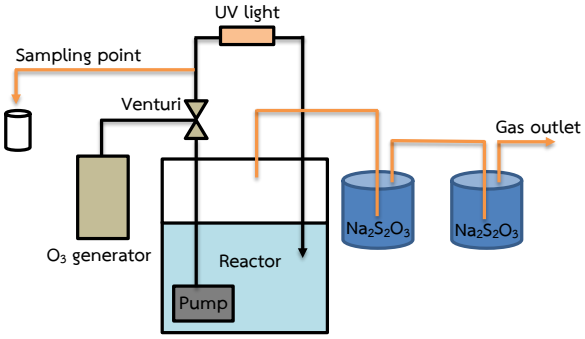



Fig. 1 Experimental setup for photocatalytic ozonation

*ตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์*

เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์โดยการบดยาไซโปรฟลอกซาซินชนิดเม็ด 500 มิลลิกรัม ละลายในน้ำ RO กวนสารตัวอย่างเวลา 3 ชั่วโมง นำไปกรองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ ปรับปริมาตรในขวด 1 ลิตร จะได้สารละลายสต็อคความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นด้วยเครื่อง UV-spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 275 นาโนเมตร เทียบกับกราฟมาตรฐาน (Sanjay et al., 2020)

*การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดไซโปรฟลอกซาซินด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลติกโอโซเนชัน*

*1) ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น*

เติมน้ำสังเคราะห์ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 1 ลิตร ลงในถังปฏิกิริยา ปรับพีเอชเป็น 9 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เดินระบบโฟโตแคตะไลติกโอโซเนชันเปรียบเทียบกับโอโซเนชันเพียงอย่างเดียว โดยปริมาณการผลิตก๊าซโอโซน 95 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง เก็บตัวอย่างที่เวลา 0, 5, 10, 15, 25, 35, 45, 60 นาที วิเคราะห์ความเข้มข้นของ CIP โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 275 นาโนเมตร และคำนวณหาค่าประสิทธิภาพการบำบัด ทำการทดลองชุดละ 3 ซ้ำ และรายงานผลประสิทธิภาพการบำบัด CIP ด้วยค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ทำการทดลองซ้ำโดยแปรค่าความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น 20 และ 30 มิลลิกรัม/ลิตร

*2) ผลของพีเอช*

เติมน้ำสังเคราะห์ความเข้มข้นที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้างต้น ปริมาตร 1 ลิตร ลงในถังปฏิกิริยา ปรับพีเอชเป็น 3 ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก เดินระบบโฟโตแคตะไลติกโอโซเนชันเปรียบเทียบกับโอโซเนชันเพียงอย่างเดียว โดยปริมาณการผลิตก๊าซโอโซน 95 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง เก็บตัวอย่างที่เวลา 0, 5, 10, 15, 25, 35, 45, 60 นาที วิเคราะห์ความเข้มข้นของ CIP โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 275 นาโนเมตร และคำนวณหาค่าประสิทธิภาพการบำบัด ทำการทดลองชุดละ 3 ซ้ำ และรายงานผลประสิทธิภาพการบำบัด CIP ด้วยค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ทำการทดลองซ้ำโดยแปรค่าพีเอชเป็น 7 และ 9

*3) ผลของปริมาณโอโซน*

เติมน้ำสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นและค่าพีเอชที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้างต้น ปริมาตร 1 ลิตร ลงในถังปฏิกิริยา เดินระบบโฟโตแคตะไลติกโอโซเนชันเปรียบเทียบกับโอโซเนชันเพียงอย่างเดียว โดยปริมาณการผลิตก๊าซโอโซน 44 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง เก็บตัวอย่างที่เวลา 0, 5, 10, 15, 25, 35, 45, 60 นาที วิเคราะห์ความเข้มข้นของ CIP โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 275 นาโนเมตร และคำนวณหาค่าประสิทธิภาพการบำบัด ทำการทดลองชุดละ 3 ซ้ำ และรายงานผลประสิทธิภาพการบำบัด CIP ด้วยค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ทำการทดลองซ้ำโดยแปรค่าปริมาณก๊าซโอโซนเป็น 95 และ 132 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง

*การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการบำบัดไซโปรฟลอกซาซิน*

ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาการบำบัด CIP เปรียบเทียบระหว่างกระบวนการโฟโตแคตะไลติกโอโซเนชัน โอโซเนชันเพียงอย่างเดียวและแสงยูวี โดยใช้สภาวะการทดลองที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้างต้น นำค่าที่ได้จากการทดลองมาเขียนกราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่าง ความเข้มข้นของ CIP กับเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา เพื่ออธิบายรูปแบบการเกิดปฏิกิริยาเปรียบเทียบกับแบบจำลองการเกิดปฏิกิริยาอันดับต่าง ๆ ดัง Equations 1, 2 และ 3 โดยพิจารณาจากค่า $R^2$ ที่เข้าใกล้ 1 มากที่สุด จากนั้นทำการหาค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (k) จากค่าความชันของสมการเส้นตรง

ปฏิกิริยาอันดับศูนย์ $$[\mathrm{CIP}]_t = [\mathrm{CIP}]_0 - \mathrm{kt} \quad (1)$$

ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง $$[\mathrm{CIP}]_t = [\mathrm{CIP}]_0 \mathrm{e}^{-\mathrm{kt}} \text{ หรือ } \ln[\mathrm{CIP}]_t = \ln[\mathrm{CIP}]_0 - \mathrm{kt} \quad (2)$$

ปฏิกิริยาอันดับสอง $$\frac{1}{[\mathrm{CIP}]_t} = \frac{1}{[\mathrm{CIP}]_0} + \mathrm{kt} \quad (3)$$

โดยที่ $[CIP]_0$ และ $[CIP]_t$ เท่ากับความเข้มข้นของไซโปรฟลอกซาซินที่เวลาเริ่มต้นและเวลาใดๆ ตามลำดับ ส่วน k เท่ากับค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาการบำบัดไซโปรฟลอกซาซิน และ t เท่ากับระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา

**ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง**

*การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดไซโปรฟลอกซาซิน*

*1) ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น*

การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลติกโอโซเนชัน โดยใช้แสงยูวีขนาด 9 วัตต์ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของ CIP 10, 20 และ 30 มิลลิกรัม/ลิตร พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 9 กำลังการผลิตก๊าซโอโซน 95 มิลลิกรัม/ชั่วโมง แสดงใน Fig. 2A ตามลำดับ พบว่า การเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้น CIP จาก 10 มก./ล เป็น 20 และ 30 มก./ล ส่งผลให้ประสิทธิภาพลดลงจาก 79.90% เป็น 78.90% และ 72.48% ตามลำดับ ที่ระยะเวลา 60 นาที เนื่องจากปริมาณโอโซนที่ให้แก่ระบบมีค่าคงที่ ในขณะที่ CIP มีปริมาณมากขึ้น ทำให้เกิดข้อจำกัดในการเกิดปฏิกิริยา รวมทั้งการสร้างอนุมูลไฮดรอกซิลจากการกระตุ้นด้วยแสงยูวี ผลการทดลองดังกล่าวมีแนวโน้มเดียวกับการใช้กระบวนการโอโซเนชันเพียงอย่างเดียว ดังแสดงใน Fig. 2B ซึ่งให้ประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 82.06% 79.53% และ 73.33% ตามลำดับ โดยผลการวิจัยสอดคล้องกับงานวิจัยของ Asgari et al. (2021) และ Javid et al. (2019)

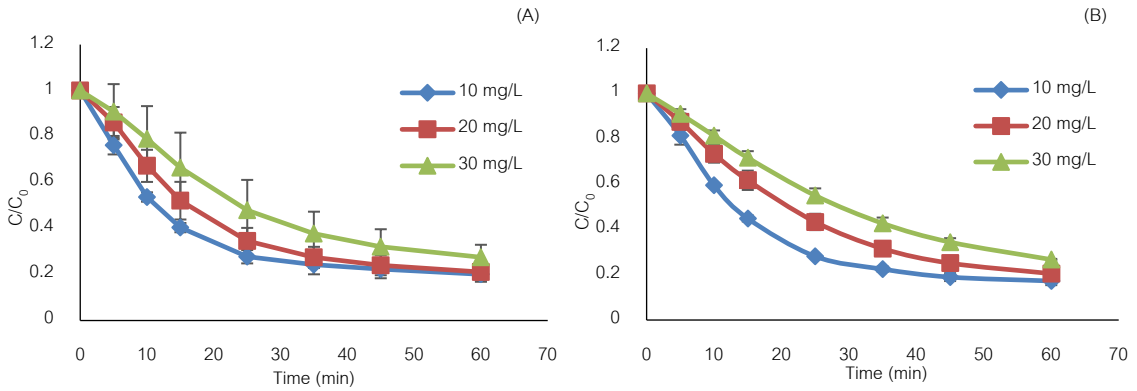



**Fig. 2** Effect of initial concentration on CIP removal by photocatalytic ozonation (A); and ozonation alone (B) (UV 9 w, $O_3$ = 95 mg/h, pH = 9)

*2) ผลของพีเอช*

การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลติกโอโซเนชันใช้แสงยูวีขนาด 9 วัตต์ ปริมาณก๊าซโอโซน 95 มิลลิกรัม/ชั่วโมง ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของ CIP 30 มิลลิกรัม/ลิตร แปรค่าพีเอชที่ 3, 7 และ 9 พบว่าการเพิ่มพีเอชจาก 3 เป็น 7 และ 9 ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัด CIP สูงขึ้นดังแสดงใน Fig. 3A โดยที่พีเอช 7 และ 9 ให้ประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 70.87% และ 72.48% ตามลำดับ ในขณะที่พีเอช 3 ให้ประสิทธิภาพการบำบัด 59.66% ซึ่งมีค่าแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% กับประสิทธิภาพการบำบัดที่พีเอช 7 และ 9 ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มพีเอชของสารละลายทำให้เกิดการสลายตัวของโอโซนไปเป็นอนุมูลไฮดรอกซิล (OH•) อย่างรวดเร็ว ซึ่ง OH• สามารถย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ได้เร็วและมีประสิทธิภาพมากกว่าโอโซน (Asgari et al. 2021) นอกจากนี้แสงยูวีมีส่วนช่วยกระตุ้นปฏิกิริยาต่อเนื่องเกิดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ($H_2O_2$) และออกซิเจน ($O_2$) เป็นผลิตภัณฑ์ จากนั้นจะเกิดเป็นปฏิกิริยาต่อเนื่องเกิดอนุมูลไฮดรอกซิลเรดิเคิล (OH•) (Krakko et al., 2021) ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Asgari et al. (2021) ส่วนการบำบัด CIP ด้วยกระบวนการโอโซเนชันเพียงอย่างเดียว ดังแสดงใน Fig. 3B มีแนวโน้มเดียวกับกระบวนการโฟโตแคตะไลติกโอโซเนชัน และพบว่าค่าประสิทธิภาพการบำบัดที่พีเอช 3, 7 และ 9 ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

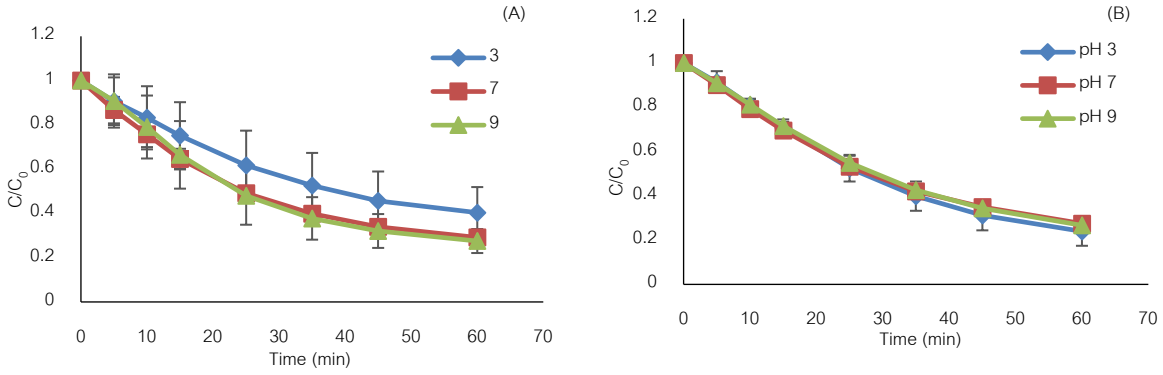



**Fig. 3** Effect of pH on CIP removal by photocatalytic ozonation (A) and ozonation alone (B) (UV 9 w, $O_3$ = 95 mg/h, [CIP] = 30 mg/L)

*3) ผลของปริมาณก๊าซโอโซน*

การศึกษาผลของปริมาณก๊าซโอโซนต่อประสิทธิภาพการบำบัด CIP ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลติกโอโซเนชันที่ใช้แสงยูวีขนาด 9 วัตต์ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร พีเอช 9 โดยแปรค่าอัตราการผลิตโอโซนที่ 44 95 และ 132 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง ผลการทดลองแสดงใน Fig. 4A พบว่าการเพิ่มอัตราการผลิตโอโซน จาก 44 เป็น 95 ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัด CIP เพิ่มขึ้น โดยที่ปริมาณการผลิตก๊าซโอโซน 44 มิลลิกรัม/ชั่วโมง ให้ประสิทธิภาพการบำบัด CIP 71.01% ที่ระยะเวลา 60 นาที เมื่อเพิ่มอัตราการผลิตโอโซนเป็น 95 มิลลิกรัม/ชั่วโมง ประสิทธิภาพการบำบัด CIP เพิ่มขึ้นเป็น 79.90% เนื่องจากการเพิ่มอัตราการผลิตก๊าซโอโซนทำให้ก๊าซโอโซนละลายในน้ำมากขึ้น เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงยูวี จะเกิดเป็นปฏิกิริยาต่อเนื่องเกิดเป็น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ($H_2O_2$) และ OH• ได้มากขึ้นทำให้มีประสิทธิภาพการบำบัดสูงขึ้น (Krakko et al., 2021) อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณก๊าซโอโซนจาก 95 เป็น 132 มิลลิกรัม/ชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพการบำบัด CIP ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p$ = 0.05) เนื่องจาก ปริมาณโอโซนละลายในน้ำมากขึ้นจะเกิดการสร้างอนุมูลไฮดรอกซิลมากเกิน ทำให้เกิดการกำจัดอนุมูลไฮดรอกซิลกันเอง (Self - scavenging) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Asgari et al. (2021) ส่วนการบำบัดด้วยโอโซเนชันเพียงอย่างเดียวให้ผลที่สอดคล้องกับกระบวนการโฟโตแคตะไลติกโอโซเนชัน ดังแสดงใน Fig. 4B

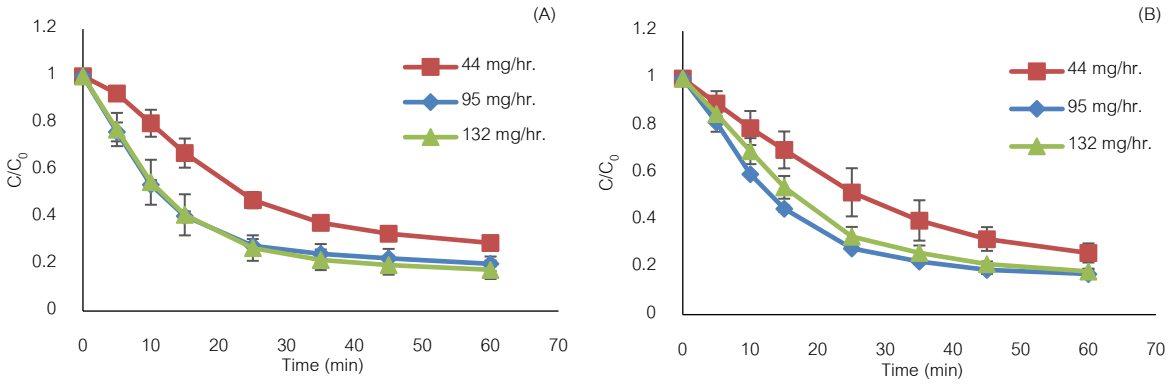



**Fig. 4** Effect of ozone dosage on CIP removal by photocatalytic ozonation (A); and ozonation alone (B) (UV 9 w, [CIP] = 10 mg/L, pH = 9)

*การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดไซโปรฟลอกซาซินระหว่างกระบวนการโฟโตแคตะไลติกโอโซเนชันและกระบวนการโอโซเนชันเพียงอย่างเดียว*

ผลการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัด CIP ความเข้มข้น 10 มก./ล ที่พีเอช 9 ด้วยกระบวนการโฟโต-แคตะไลติกโอโซเนชัน และโอโซเนชันเพียงอย่างเดียว ดังแสดงใน Fig. 5A พบว่ากระบวนการโฟโตแคตะไลติกโอโซเนชันและโอโซเนชันเพียงอย่างเดียวให้ประสิทธิภาพในการบำบัด CIP เท่ากับ 82.33% และ 79.90% ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้งนี้เนื่องมาจากน้ำเสียสังเคราะห์มีความเป็นด่างสูง (ค่าพีเอช 9) ทำให้ก๊าซโอโซนเกิดการสลายตัวและผลิตอนุมูลไฮดรอกซิล (OH•) ได้เช่นเดียวกับการกระตุ้นด้วยแสงยูวี ประสิทธิภาพการบำบัด CIP ในน้ำเสียสังเคราะห์ของทั้งสองระบบจึงไม่มีความแตกต่างกัน ซึ่งสอดคล้องกับ Paucar et al. (2019) อย่างไรก็ตาม จากผลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ทั้งหมด (TOC) พบว่ากระบวนการโฟโตแคตะไลติกโอโซเนชันสามารถกำจัด TOC ได้มากกว่ากระบวนการโอโซเนชันเพียงอย่างเดียว ดังแสดงใน Fig. 5B เนื่องจากไฮดรอกซิลเรดิคอล (OH•) ที่เกิด

จากกระบวนการโฟโตแคตะไลติกโอโซเนชันสามารถบำบัดค่า TOC ได้มากกว่าโอโซนเพียงอย่างเดียว สอดคล้องกับงานวิจัยของ Labrada et al. (2020)

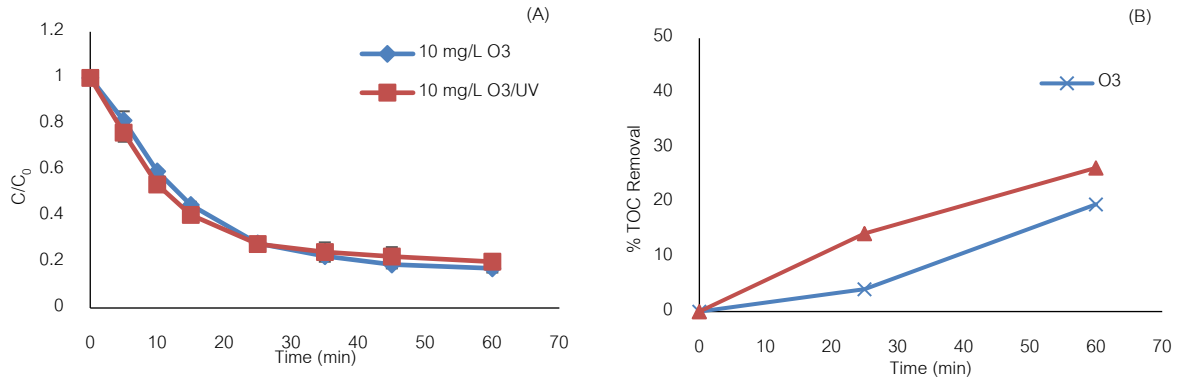



**Fig. 5** Removal efficiencies by photocatalytic ozonation compared with ozonation and UV alone: CIP removal (A); TOC removal (B)

*การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยา*

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาที่ใช้ในการบำบัดไซโปรฟลอกซาซิน ด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลติกโอโซเนชันและโอโซเนชันเพียงอย่างเดียว ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 10, 20 และ 30 มก./ล ค่าพีเอช 9 อัตราการผลิตก๊าซโอโซน 95 มก./ชม. ในช่วงเวลา 25 นาทีแรก พบว่าการเกิดปฏิกิริยาสอดคล้องกับแบบจำลองอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order kinetic) โดยมีค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (k) ดังแสดงใน Fig. 6 โดยที่ CIP ความเข้มข้น 10 มก./ล ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการโอโซเนชันและโฟโตแคตะไลติกโอโซเนชันไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แต่เมื่อความเข้มข้นของ CIP เพิ่มขึ้นเป็น 20 และ 30 มก./ล พบว่ากระบวนการโฟโต-แคตะไลติกโอโซเนชันมีค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (k) ที่มากกว่า เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นทำให้มีสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยามากขึ้น และกระบวนการโฟโตแคตะไลติกโอโซเนชันที่ใช้แสงยูวีกระตุ้นทำให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิลที่ส่งเสริมให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาในช่วงแรกเกิดได้เร็วกว่ากระบวนการโอโซเนชันเพียงอย่างเดียว ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Asgari et al. (2021) และ Verinda et al. (2022)

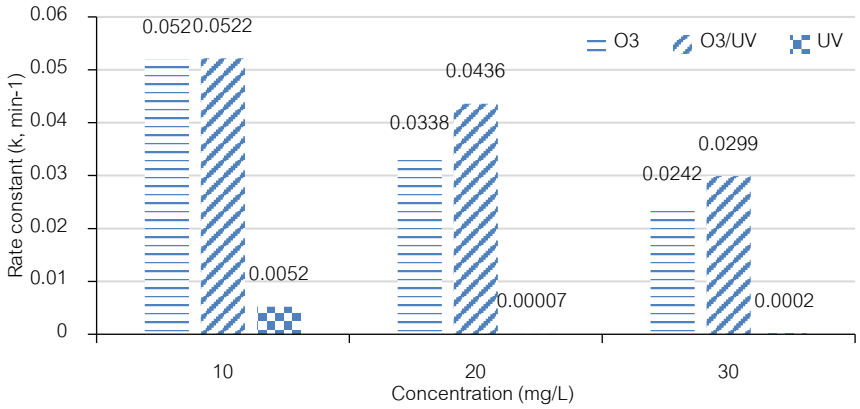



**Fig. 6** Kinetic study of CIP removal by photocatalytic ozonation compared with ozonation and UV alone ($O_3$ = 95 mg/h, pH = 9, and reaction time = 25 min)

## สรุป

การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดไซโปรฟลอกซาซินด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลติกโอโซเนชัน โดยทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด ได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของ CIP ค่าพีเอช และปริมาณโอโซน พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นจาก 10 เป็น 20 และ 30 มิลลิกรัม/ลิตร ประสิทธิภาพการบำบัด CIP มีค่าลดลง จาก 79.90% เป็น 78.90% และ 72.48% ตามลำดับ ที่ระยะเวลา 60 นาที การเพิ่มพีเอชจาก 3 เป็น 7 และ 9 ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัด CIP สูงขึ้น โดยที่พีเอช 7 และ 9 ให้ประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 70.87% และ 72.48% ตามลำดับ ในขณะที่พีเอช 3 ให้ประสิทธิภาพการบำบัดเพียง 59.66% การเพิ่มปริมาณโอโซน จาก 44 เป็น 95 มิลลิกรัม/ชั่วโมง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัด CIP เพิ่มขึ้น จาก 71.01% เป็น 79.90% ที่ระยะเวลา 60 นาที อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณก๊าซโอโซนจาก 95 เป็น 132 มิลลิกรัม/ชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพการบำบัด CIP ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% การศึกษาเปรียบเทียบกับกระบวนการโอโซเนชันเพียงอย่างเดียว พบว่าประสิทธิภาพการบำบัด CIP ของทั้งสองกระบวนการมีค่าใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตาม กระบวนการโฟโตแคตะไลติกโอโซเนชันสามารถกำจัด TOC ได้มากกว่ากระบวนการโอโซเนชันเพียงอย่างเดียว การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการบำบัด CIP ในช่วงเวลา 25 นาทีแรกพบว่าเป็นไปตามรูปแบบของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order kinetic) โดยที่ความเข้มข้น CIP 10 มิลลิกรัมต่อลิตร กระบวนการโฟโตแคตะไลติกโอโซเนชันและโอโซเนชันมีค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (k) ใกล้เคียงกัน เท่ากับ 0.0522 และ 0.0520 นาที$^{-1}$ ตามลำดับ เมื่อเพิ่มความเข้มข้น CIP พบว่าค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการโฟโตแคตะไลติกโอโซเนชันมีค่าสูงกว่ากระบวนการโอโซเนชัน เท่ากับ 0.0436 และ 0.0338 นาที$^{-1}$ ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการใช้แสงยูวีร่วมกับโอโซนในกระบวนการโฟโตแคตะไลติกโอโซเนชันสามารถเพิ่มอัตราเร็วของปฏิกิริยาได้

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาเทคโนโลยีการจัดการสิ่งแวดล้อม และกองทุนคณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการทำโครงงานวิทยาศาสตร์ในครั้งนี้

**เอกสารอ้างอิง**

กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม. 2559. การปนเปื้อนของสารกลุ่มผลิตภัณฑ์ยาและผลิตภัณฑ์ดูแลสุขภาพในแม่น้ำบางปะกง. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพฯ.

ฐาปกรณ์ คำหอมกุล. 2563. การปนเปื้อนและผลกระทบของผลิตภัณฑ์ยาในสิ่งแวดล้อม. วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย. 14: 40–50.

Asgari, E., Sheikhmohammadi, A., Nourmorad, H., Nazari, S., Aghanaghad, M. 2021. Degradation of ciprofloxacin by photocatalytic ozonation process under irradiation with UVA: Comparative study, performance and mechanism. Proc. Safe. Environ. Prot. 147: 356–366.

Dewitte, B., Dewulf, J., Demeestere, K., Vyvere, V.V.D., Wispelaere, P.D., Langenhove, H.V. 2008. Ozonation of ciprofloxacin in water: HRMS Identification of reaction products and pathways. Environ. Sci. Technol. 42: 4889–4895.

Javid, N., Honarmandrad, Z., Malakootian, M. 2019. Ciprofloxacin removal from aqueous solutions ozonation with calcium peroxide. Desal. Wat. Treat. 174: 178–185.

Kim, T.K., Kim, T., Park, H., Lee, I., Jo, A., Choi, K., Zoh, K.D. 2020. Degradation of ciprofloxacin and inactivation of ciprofloxacin resistant *E.faecium* during UV-LED (275 nm)/chlorine process. Chem. Eng. J. 394: 124803.

Krakko, D., Illes, A., Licul-Kucera, V., et al. 2021. Application of (V)UV/$O_3$ technology for post-treatment of biologically treated wastewater: A pilot-scale study. Chemosphere 275: 130080.

Labrada, K.G., Richard, R., Adriantsiferana, C., Valdes, H., Haza, U.J., Manero, M.H. 2020. Enhancement of ciprofloxacin degradation in aqueous system by heterogeneous catalytic ozonation. Environ. Sustain. Chem. Eng. 27: 1246–1255.

Paucar, E.N., Kim, I., Tanaka, H., Sato, C. 2019. Effect of $O_3$ dose on the $O_3$/UV treatment process for the removal of pharmaceuticals and personal care products in secondary effluent. Chem Eng. 3: 53.

Sanjay, S.S., Kavalapure, R., Palled, M.S., Alegaon, S.G. 2020. Development and validation of UV-spectrophotometric method for determination of ciprofloxacin and curcumin in bulk powder. Inter. J. Pharm. Sci. Res. 11: 1161–1166.

Verinda, S.B., Muflihatul, M., Yulianto, E., et al. 2022. Degradation of ciprofloxacin in aqueous solution using ozone microbubbles: Spectroscopic, kinetics, and antibacterial analysis. Heliyon 8: e10137.

# ปัจจัยของไนโตรเจนเสมือนของผลไม้ในประเทศไทย: กรณีศึกษามังคุด

## Virtual nitrogen factor of fruit in Thailand: A case study of mangosteen

**สุจิตรา พุฒชา, ณหทัย ศรีเชียงสา, ณัฐนรี แจ่มนภา, สิทธินันท์ ท่อแก้ว, สินศุภา จุ้ยจุลเจิม, อัญชลี สุวรรณมณี***

Sujittra Phutcha, Nahathai Srichiengsa, Natnaree Jamnapa, Sittinun Tawkaew, Sinsupha Chuichulcherm, Unchalee Suwanmanee*

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ นครนายก 26120

Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University, Nakhon Nayok 26120, Thailand

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

**บทคัดย่อ**

การศึกษาไนโตรเจนสูญเสีย (Nitrogen Loss) เป็นดัชนีที่วัดปริมาณการปล่อยไนโตรเจน (ทุกรูปแบบของไนโตรเจน ยกเว้น $N_2$) หรือไนโตรเจนปฏิกิริยาที่ก่อให้เกิดผลกระทบสิ่งแวดล้อม (Reactive Nitrogen, Nr) มีขอบเขตการศึกษาตั้งแต่การเพาะปลูก ตั้งแต่ขั้นตอนการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนในพืชและสิ้นสุดที่การบำบัดน้ำเสียจากการขับถ่ายในครัวเรือน ร่วมกับการวิเคราะห์ปัจจัยไนโตรเจนเสมือน (Virtual Nitrogen Factor, VNF) ที่พิจารณาการค้าระหว่างประเทศในปี พ.ศ. 2564 ผลการศึกษาพบว่า ค่า VNF มังคุดของประเทศไทย 8,998.49 ตัน N loss/ตัน N consumed และมีค่าสูงเมื่อเทียบกับประเทศจีน ญี่ปุ่น อินโดนิเซีย และอินเดีย (2.89–15.76 ตัน N loss/ตัน N consumed) และมีปริมาณไนโตรเจนสูญเสียต่อประชากรของมังคุด 1.274 kg N capita$^{-1}$ yr$^{-1}$ มีสาเหตุจากการสูญเสียสู่ดินเนื่องจากใส่ปุ๋ยเกินความต้องการของพืช (ร้อยละ 99.986) รองลงมาจากเปลือกที่บริโภคไม่ได้และนำไปกำจัดโดยการฝังกลบ (ร้อยละ 0.009) และการเก็บเกี่ยว (ร้อยละ 0.003) ตามลำดับ

**คำสำคัญ**: ไนโตรเจนเสมือน, ไนโตรเจนสูญเสีย, มังคุด, ประเทศไทย

**Abstract**

Nitrogen loss is an index of quantitative determination of nitrogen emissions (all species of N except $N_2$) or the anthropogenic release of reactive nitrogen (Nr). The system boundary along the food production and consumption chains starts from N fertilizer applied to crops and ends with sewage treatment. This study calculated specific virtual nitrogen factor (VNF) of fruit (mangosteen) diets, including the international trade in year 2021. The result shows that the VNF of mangosteen in Thailand is 8,998.49 ton N loss/ton N consumed, which is highest that of the average values (2.89–15.76 ton N loss/ ton N consumed) for other countries (China, Japan Indonesia, and India). Thailand has a high N loss per capita for mangosteen (1.274 kg N capita$^{-1}$ yr$^{-1}$). These are primarily due to N leaching to soil (99.986% of the total N loss), followed by inedible crop and disposal in landfill (0.009% of the total N loss), and harvesting (0.003% of the total N loss), respectively.

**Keywords**: Mangosteen, Nitrogen loss, Thailand, Virtual nitrogen factor (VNF)

**คำนำ**

องค์การสหประชาชาติได้กำหนดเป้าหมายการพัฒนาขึ้นใหม่โดยอาศัยกรอบความคิดที่มองการพัฒนาเป็นมิติของเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อม ให้มีความเชื่อมโยงกัน เรียกว่า “เป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน หรือ Sustainable Development Goals (SDGs)” ประกอบด้วย 17 เป้าหมาย การพัฒนาที่ยั่งยืนมีส่วนสำคัญในการกำหนดทิศทางเพื่อรักษาฐานทรัพยากรธรรมชาติควบคู่กับเศรษฐกิจสำหรับประเทศไทย โดยเฉพาะการมีรูปแบบการผลิตและบริโภคที่ยั่งยืน (โครงการพัฒนาแห่งสหประชาชาติแห่งประเทศไทย, 2565) งานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมโดยวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนฟุตพริ้นท์และไนโตรเจนเสมือนจากรูปแบบการบริโภคอาหาร เพื่อนำเสนอข้อมูลในมุมมองต่อสิ่งแวดล้อมและโภชนาการของการบริโภค โดยไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบในหมู่อะมิโนที่เป็นองค์ประกอบของโปรตีนซึ่งส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืชและสัตว์ และมีความสำคัญต่อการดำรงชีวิต โดยธรรมชาติไนโตรเจนมีในสถานะเป็นก๊าซเฉื่อยหรือ $N_2$ มีความเสถียร อยู่ในชั้นบรรยากาศโลกร้อยละ 78 แต่สำหรับไนโตรเจนปฏิกิริยา (Reactive Nitrogen, Nr) เกิดจากการที่ไนโตรเจนไม่เสถียรและถูกทำปฏิกิริยากับธาตุอื่นที่อยู่ในสิ่งแวดล้อม และอยู่ในองค์ประกอบต่างๆ เช่น แอมโมเนีย ($NH_3$), แอมโมเนียม ($NH_4^+$), ไนไตรท์ ($NO_2^-$), ไนเตรต ($NO_3^-$), และไนตรัสออกไซด์ ($N_2O$) เป็นต้น (UNEP, 2023) โดยไนโตรเจนเหล่านี้เมื่ออยู่ในสิ่งแวดล้อม ก่อให้เกิดผลกระทบสิ่งแวดล้อมด้านต่าง ๆ ได้ เช่น ไนตรัสออกไซด์ ทำให้เกิดการกักขังรังสีความร้อนในชั้นบรรยากาศของโลกก่อให้เกิดผลกระทบด้านภาวะโลกร้อน (Global warming impact) (IPCC, 2014) สำหรับแอมโมเนียและแอมโมเนียมก่อให้เกิดผลกระทบด้านภาวะพืชน้ำเจริญเติบโตผิดปกติ (Eutrophication impact) เป็นต้น

งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดต่อยอดการพัฒนาที่ยั่งยืน เป้าหมายที่ 12 สร้างหลักประกันให้มีรูปแบบการผลิตและการบริโภคที่ยั่งยืน (Ensure sustainable consumption and production patterns) มีเป้าประสงค์ที่ครอบคลุมประเด็นการจัดการและการใช้ทรัพยากรธรรมธรรมชาติอย่างมีประสิทธิภาพและยั่งยืน การลดของเสียที่เป็นอาหาร (Food waste) ลดการปล่อยสารเคมีและของเสียเป็นพิษออกสู่ธรรมชาติและจัดการอย่างถูกต้อง ลดของเสียโดยกระบวนการ reuse และ recycling การสร้างความตระหนักถึงการพัฒนาที่ยั่งยืนในสังคม (สำนักงานผู้ประสานงานสหประชาชาติประจำประเทศไทย, 2564) โดยคัดเลือกจากผลไม้ส่งออกที่สำคัญของประเทศไทย ได้แก่ ทุเรียน มังคุด และลำไย (ฝ่ายเศรษฐกิจมหภาค ธนาคารแห่งประเทศไทย, 2565) จึงดำเนินการวิเคราะห์ผลกระทบสิ่งแวดล้อมไนโตรเจนฟุตพริ้นท์และโภชนาการจากห่วงโซ่อาหารประเภทมังคุด ซึ่งเป็นผลไม้เมืองร้อน เริ่มให้ผลผลิตตอนอายุ 7–8 ปี และเก็บเกี่ยวผลผลิต 2 ช่วง คือ เดือนมกราคม ถึง มีนาคม และเดือนมิถุนายน ถึง ธันวาคม ผลผลิตรวมทั้งประเทศไทยในปี พ.ศ. 2564 คือ 270,773 ตัน แหล่งผลิตที่สำคัญส่วนใหญ่อยู่ที่ภาคตะวันออก (ร้อยละ 52) (กรมการค้าภายในกระทรวงพาณิชย์, 2565; สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2566) จึงดำเนินการวิเคราะห์ผลกระทบสิ่งแวดล้อมไนโตรเจนฟุตพริ้นท์โดยใช้เทคนิคการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life cycle assessment, LCA) และ N-calculator (Zhang et al., 2018) เพื่อนำเสนอข้อมูลผลการศึกษาด้านสิ่งแวดล้อมและโภชนาการ จากอาหารกลุ่มผลไม้ในประเทศไทย และเป็นข้อมูลเชิงนโยบายด้านสุขภาพของประชาชนต่อไป

**วิธีการ**

การประเมินวัฏจักรชีวิต (LCA) เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์และการประเมินค่าผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้น ภายใต้นิยามตามอนุกรมมาตรฐาน ISO 14040/ISO 14044 (2020) ซึ่งครอบคลุมตั้งแต่การ ได้มาซึ่งวัตถุดิบจนถึงการจัดการหลังการใช้งาน โดยมีขั้นตอนในการประเมิน 4 ขั้นตอน

1. การกำหนดเป้าหมายและขอบเขตของการวิจัย (Goal and scope definition)

*1.1 กำหนดเป้าหมายและหน่วยหน้าที่ (Goal and Function Unit)*

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากไนโตรเจนสูญเสีย และปัจจัยไนโตรเจนเสมือน และไนโตรเจนฟุตพริ้นท์ของผลไม้ประเภทมังคุด ตลอดห่วงโซ่การผลิตและการบริโภค ในปี พ.ศ. 2564

*1.2 กำหนดขอบเขตการศึกษา (Scope and System Boundary)*

1) ขอบเขตของงานวิจัยนี้ประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมปัจจัยที่มาจากการผลิตและการบริโภคของมังคุด โดยพิจารณาคลอบคลุม 6 ขั้นตอน ตั้งแต่การเพาะปลูก (การเตรียมพื้นที่เพาะปลูก การใส่ปุ๋ย และการดูแลรักษา) การเก็บเกี่ยว การขนส่ง การกระจายสินค้า การบริโภค และการบำบัดของเสียจากการขับถ่าย แสดงดัง Fig. 1

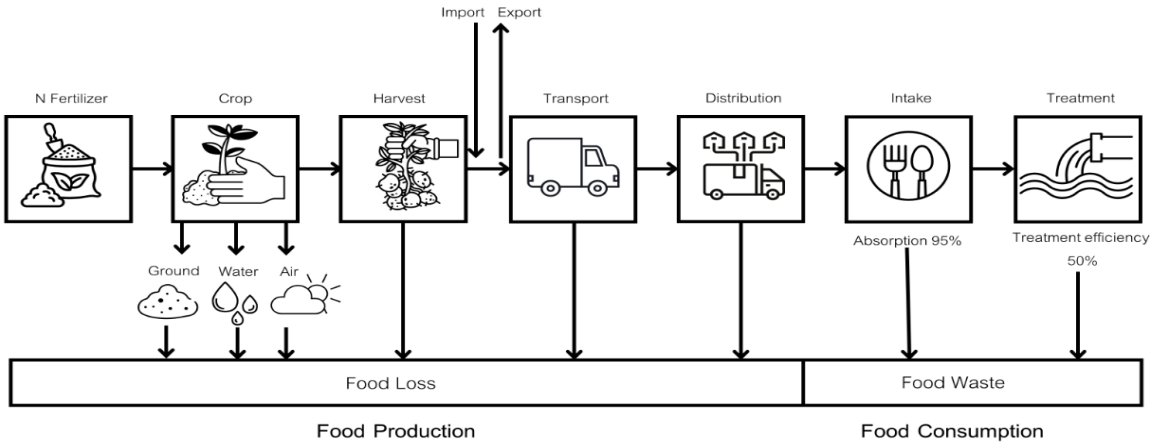



**Fig. 1** Schematic of nitrogen from crops and production throughout human waste: A case study of mangosteen

*1.3 การวิเคราะห์การไหลของสารและไนโตรเจนฟุตพริ้นท์ (Materials flow and N footprint analysis)*

1) การวิเคราะห์การไหลของสาร แบ่งเป็น 2 ขอบเขต ได้แก่

ขอบเขตที่ 1 การผลิตอาหาร (N Production) พิจารณา 4 ขั้นตอน (จาก Fig. 1) ตั้งแต่การเพาะปลูกจนถึงการกระจายสินค้า และขอบเขตที่ 2 การบริโภคอาหาร (N Consumption) พิจารณา 2 ขั้นตอน (จาก Fig. 1) ตั้งแต่การบริโภคและการบำบัดของเสีย และประยุกต์ใช้หลักการ Food Balance Sheets (FBS) จาก Food and Agricultural Organizatiion (FAO) (2001) ทำการวิเคราะห์ปริมาณมังคุดที่มีบริโภคในประเทศหรือ (Supply) ตาม Equation 1 และปริมาณมังคุดที่มีบริโภคโดยหักออกจากการนำไปใช้ประโยชน์ (Utilization) อื่น ๆ ตาม Equation 2 ได้แก่ เป็นเมล็ดพันธุ์ อาหารสัตว์ การแปรรูปผลิตภัณฑ์ ของเสีย และอื่น ๆ

$$\text{Supply} = \text{Production} + \text{Import} + \text{Change in Stocks} - \text{Exports} \quad (1)$$

$$\text{Food Consumption} = \text{Utilization} - (\text{Feed} + \text{Seed} + \text{Food/Nonfood Processing} + \text{Waste} + \text{Other Uses}) \quad (2)$$

2) การวิเคราะห์ไนโตรเจนสูญเสีย ไนโตรเจนฟุตพริ้นท์ และไนโตรเจนเสมือน

การวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนสูญเสียตลอดห่วงโซ่การผลิตและบริโภคมังคุดในปี 2564 ตาม Equation 3 พิจารณาปริมาณอาหารที่สูญเสีย กับ ร้อยละไนโตรเจนในมังคุด และการวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนในมังคุด (จาก Equation 3) จากรายงานคุณค่าทางโภชนาการของผลผลิตอาหาร โดยกรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข โดยการใช้

ตารางแสดงคุณค่าสารอาหารไทย (Thailand Food Composition Table) สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนในมังคุด (ตาม Equation 4) และการวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนฟุตพริ้นท์ (ตาม Equation 5) จากข้อมูลการสูญเสียตลอดห่วงโซ่การผลิตและบริโภคมังคุดในปี 2564 ต่อจำนวนประชากรไทย (66,171,439 คน) (สำนักงานสถิติแห่งชาติ, 2566) และไนโตรเจนเสมือน (VNF) ตาม Equation 6 คือ สัดส่วนการสูญเสียไนโตรเจนทั้งหมดต่อปริมาณไนโตรเจนบริโภค

$$\text{Total N loss} = \Sigma\ (\%\ \text{Nitrogen}_{\text{Mangosteen}} \times \text{Weight loss}_{\text{stage i}}) \quad (3)$$

$$\%\ \text{Protein} = \%\ \text{Nitrogen x factor for Mangosteen (6.25)} \quad (4)$$

$$\text{N footprint} = \text{Total N loss/Capita-year} \quad (5)$$

$$\text{VNF}_{\text{Mangosteen}} = \text{Total N loss/N consumption}_{\text{Mangosteen}} \quad (6)$$

Where; Total N loss is the total nitrogen loss to the environment of all process steps of the mangosteen (ton) production/consumption chain,

$\%\ \text{Nitrogen}_{\text{Mangosteen}}$ is the percent of nitrogen content in the mangosteen,

$\%\ \text{Protein}_{\text{Mangosteen}}$ is the percent of protein content in the mangosteen,

N footprint is the total nitrogen loss to the environment of all process steps in the mangosteen (ton) per capita-year (2021),

$\text{VNF}_{\text{Mangosteen}}$ is virtual nitrogen factor or the total nitrogen loss to the environment of all process steps in mangosteen product (ton loss) per the summation of consumed N in mangosteen product (ton consumed),

$\text{N consumption}_{\text{Mangosteen}}$ is the nitrogen content of consumed mangosteen product (ton consumed).

**ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง**

*1. การวิเคราะห์ Supply และ Utilization และการสูญเสีย: ห่วงโซ่ผลิตและบริโภคมังคุด (2564)*

การวิเคราะห์ Supply และ Utilization (ตาม Equation 1 และ 2) และการสูญเสียตลอดห่วงโซ่ผลิตและบริโภคมังคุด ในปี พ.ศ. 2564 ผลการศึกษาแสดงดัง Fig. 2 พบว่า จากสมดุลมวลในขั้นตอนการบริโภคมังคุดมีปริมาณการสูญเสียมวลมากที่สุด 9,872.49 ตัน (ร้อยละ 74.23) แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ การสูญเสียจากการบริโภคมี 139.54 ตัน และการจัดการของเสีย (เปลือก) โดยการฝังกลบ 9,732.94 ตัน รองลงมาการสูญเสียจากการเก็บเกี่ยว 2,707.73 ตัน (ร้อยละ 20.36) และผลการวิเคราะห์การสูญเสียตลอดห่วงโซ่มังคุด มีรายละเอียดดังนี้

*1.1 ขั้นตอนที่ 1 การใช้ปุ๋ยไนโตรเจนในการผลิตมังคุด*

ขั้นตอนการใช้ปุ๋ยเคมีและอินทรีย์ ใช้ข้อมูลจากสถานีพัฒนาที่ดินจันทบุรี ในปี 2560 การเพาะปลูกที่เหมาะสมเป็นดินเหนียวปนดินทราย (แต่ดินที่จันทบุรีเป็นดินเหนียว) สำหรับช่วงยังไม่ให้ผลผลิต อายุ 1 ปี ใส่ปุ๋ยสูตร 20-10-10 อัตรา 150–200 กรัมต่อต้น ร่วมกับปุ๋ยหมักหรือปุ๋ยคอกอัตรา 15–20 กิโลกรัมต่อต้น แบ่งใส่ 2 ครั้ง ในช่วงต้นและปลายฤดูฝน และช่วงยังไม่ให้ผลผลิตหลังปลูก 2 ปี ก่อนให้ผลผลิต ใส่ปุ๋ยสูตร 15-15-15 ในอัตราครึ่งหนึ่งของอายุ (กิโลกรัมต่อต้น) ร่วมกับปุ๋ยหมักหรือปุ๋ยคอกอัตรา 15–25 กิโลกรัมต่อต้น โดยแบ่งใส่ 3 ครั้ง ในช่วงต้น กลางและปลายฤดู

ฝน เช่น ต้นที่มีอายุ 2 ปี ใส่ปุ๋ย 1 กิโลกรัมต่อต้น และใส่ปุ๋ย (84,521.78 ตัน N) จนเก็บเกี่ยวได้ เป็นเวลา 12 ปี (0.199 ตัน N/ไร่ และ 1 ไร่ 20 ต้น) พบว่ามีการปล่อย $N_2O$ จากกลุ่มดินที่ใช้ในการเกษตร โดยคำนวณวิธีตาม SNC ซึ่งมีค่า Emission Factor ในส่วน Indirect Emission (สำหรับ Ground water, River และ Marine Areas) 0.0075 kg $N_2O$/kg N และในส่วน Direct Emission (สำหรับ Nitrification และ Denitrification) 0.01 kg $N_2O$/kg N (สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2560) เมื่อวิเคราะห์ค่าการสูญเสียไนโตรเจนจนกระทั่งเก็บเกี่ยวได้ในปีที่ 12 พบว่าสูญเสียสู่ดิน 84,303.82 ตัน N, สู่น้ำ 0.81 ตัน N, และอากาศ 0.54 ตัน N ในขั้นตอนนี้ได้ข้อมูลผลผลิตมังคุด (270,773 ตัน) และการสูญเสียในช่วงการเพาะปลูก (ดัง Fig. 2)

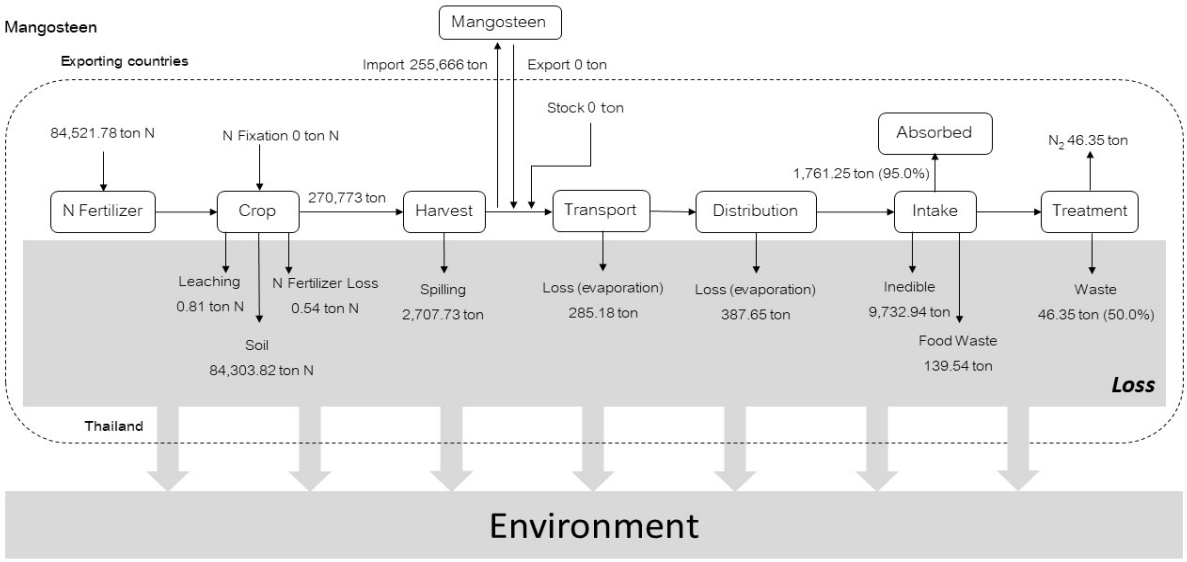



**Fig. 2** Mass balance and N flow the entire production and consumption chain of mangosteen in Thailand, including international trade

*1.2 ขั้นตอนที่ 2 การเก็บเกี่ยวมังคุด*

เป็นขั้นตอนที่เกิดการสูญเสียของมังคุดขณะเก็บเกี่ยว จากการสัมภาษณ์เกษตรกรจังหวัดจันทบุรี คือ สวนเคพี การ์เด้น สวนผลไม้จากจังหวัดจันทบุรี มีพื้นที่มากกว่า 50 ไร่ ได้ให้ข้อมูลการสูญเสียมังคุดขณะการเก็บเกี่ยวมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 1 ที่ไม่สามารถนำไปขายได้เนื่องจากผลยังอ่อนเกินไป หรือโดนหนอนเจาะ และหลังการเก็บเกี่ยวมีส่วนที่นำไปส่งออก 255,666 ตัน (ดัง Fig. 2)

*1.3 ขั้นตอนที่ 3 การขนส่งมังคุด*

เป็นขั้นตอนการขนส่งมังคุดจากสวนไปตลาดค้าส่ง จากการสัมภาษณ์จากร้าน ผู้ประกอบการผู้นำเข้าและส่งออกมังคุดที่ตลาดไท (ตลาดผลไม้ตามฤดูกาล) จังหวัดปทุมธานี จำนวน 2 ราย ทำการขนส่งมังคุดภายในเวลา 48 ชั่วโมง โดยขนส่งผ่านรถบรรทุก 4 ล้อ และใช้ผ้าคลุมขณะขนส่ง จากระยะทางเฉลี่ยประมาณ 280 กิโลเมตร ใช้ระยะเวลาในการขนส่งประมาณ 4 ชั่วโมง พบว่ามีการสูญเสียมังคุดจากการขนส่งมังคุดจากสวนไปผู้ค้าส่งเฉลี่ยร้อยละ 2.3 จากความชื้นที่สูญเสีย

*1.4 ขั้นตอนที่ 4 การกระจายสินค้า*

เป็นการสูญเสียมังคุดจากการขนส่งจากตผู้ค้าส่งไปผู้ค้าปลีกและการสูญเสียมังคุดขณะรอกระจายสินค้าสู่ผู้บริโภค จากการสัมภาษณ์ร้านผลไม้ผู้ประกอบการขายมังคุด (ขายปลีก) 2 ราย โดยขนส่งผ่านรถบรรทุก 4 ล้อ และใช้ผ้าคลุมขณะขนส่ง ระยะทางเฉลี่ยประมาณ 2 กิโลเมตร ใช้ระยะเวลาในการขนส่งประมาณ 10 นาที พบว่ามีปริมาณการสูญเสียมังคุดจากการขนส่งจากผู้ค้าส่งไปไปผู้ค้าปลีกและการสูญเสียมังคุดขณะรอกระจายสินค้าสู่ผู้บริโภค เฉลี่ยร้อยละ 3.2 จากความชื้นที่สูญเสีย ถ้ามังคุดเริ่มซ้ำผู้ค้าปลีกจะขายลดราคาไม่มีเหลือทิ้งและขายหมดภายใน 2 วัน

*1.5 ขั้นตอนที่ 5 การบริโภค*

ขั้นตอนการบริโภค เป็นการสูญเสียมังคุดจากการบริโภคของผู้บริโภค โดยทั่วไปในมังคุด 1 ผล ประกอบด้วยส่วนเปลือกร้อยละ 83 ส่วนเนื้อร้อยละ 15 และส่วนเมล็ดร้อยละ 2 (นรินทร์ และคณะ, 2561) ดังนั้นมังคุด 1 ผล บริโภคได้ร้อยละ 17 และส่วนที่บริโภคไม่ได้และเหลือทิ้ง ร้อยละ 83 และพบว่าการสูญเสียระหว่างการบริโภคของผักและผลไม้มีการสูญเสียร้อยละ 7 (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2566) และ พบว่าร่างกายของมนุษย์สามารถดูดซึมสารอาหารและนำไปใช้ได้ร้อยละ 95 (บทความการดูแลสุขภาพ และเคล็ดลับเพื่อสุขภาพดี, 2563) ดังนั้นปริมาณส่วนที่ร่างกายดูดซึมไม่ได้และปล่อยทิ้งเข้าบ่อเกรอะ คือ 7.79 ตัน N/ปี

*1.6 ขั้นตอนที่ 6 การบำบัด*

เป็นขั้นตอนการบำบัดของเสียที่ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 50 (จากข้อมูลของกรมควบคุมมลพิษ ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของบ่อเกรอะประมาณร้อยละ 40-60 ดังนั้น พบว่า ส่วนที่บ่อเกรอะไม่สามารถบำบัดได้คิดเป็นไนโตรเจนสูญเสียเท่ากับ 0.04 ตัน N/ปี (กรมควบคุมมลพิษ, 2560)

*2. การวิเคราะห์ N loss, N footprint และ VNF: ห่วงโซ่ผลิตและบริโภคมังคุด (2564)*

ผลการวิเคราะห์ไนโตรเจนสูญเสียทั้งหมด 84,315.81 ตัน N (แสดงดัง Fig. 3) แบ่งเป็น 2 ช่วง คือ Food production 84,307.87 ตัน N (ร้อยละ 99.99 ของการสูญเสียไนโตรเจนทั้งหมด) และ Food consumption 7.94 ตัน N (ร้อยละ 0.01 ของการสูญเสียไนโตรเจนทั้งหมด) เมื่อพิจารณาแต่ละกระบวนการ พบว่า การสูญเสียจากการสูญเสียจากการใส่ปุ๋ยเกินความต้องการที่พืชจะดูดซึมได้ 84,303.82 ตัน N (ร้อยละ 99.986 ของการสูญเสียไนโตรเจนทั้งหมด) รองลงมาการบริโภค (เปลือกที่บริโภคไม่ได้และบริโภคเหลือ) 7.90 ตัน N (ร้อยละ 0.009 ของการสูญเสียไนโตรเจนทั้งหมด) และการสูญเสียจากการเก็บเกี่ยว 2.17 ตัน N (ร้อยละ 0.003 ของการสูญเสียไนโตรเจนทั้งหมด) และผลการวิเคราะห์ VNF มังคุด (8,998.49 ตัน N loss/ตัน N consumed) ตาม Equation 6 แสดงสัดส่วนการสูญเสียไนโตรเจนสู่สิ่งแวดล้อมตลอดห่วงโซ่ (84,315.81 ตัน N) ต่อปริมาณไนโตรเจนบริโภค (9.37 ตัน N) และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการศึกษาอื่นๆ ค่า VNF มังคุด ประเทศไทยมีค่าสูงที่สุดเนื่องจากการใส่ปุ๋ยเกินความต้องการที่พืชจะดูดซึมเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ได้ เมื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ผลไม้ของประเทศจีน (15.76) ญี่ปุ่น (12.81) อินโดนิเซีย (3.90) และอินเดีย (2.89) ตามลำดับ (Oita et al., 2020; Wirasenjaya et al., 2023) สำหรับปริมาณไนโตรเจนสูญเสียต่อประชากรในปี 2564 ของมังคุดมีค่าเท่ากับ 1.274 kg N capita$^{-1}$ yr$^{-1}$ โดยเกิดจากการสูญเสียสู่ดินเนื่องจากใส่ปุ๋ยเกินความต้องการของพืช (ร้อยละ 99.986), รองลงมาจากเปลือกที่บริโภคไม่ได้และกำจัดโดยการฝังกลบ (ร้อยละ 0.009), การเก็บเกี่ยว (ร้อยละ 0.003), การขนส่งและการกระจายสินค้า (ร้อยละ 0.001), และการสูญเสียจากการบริโภค (ร้อยละ 0.0001), ตามลำดับ

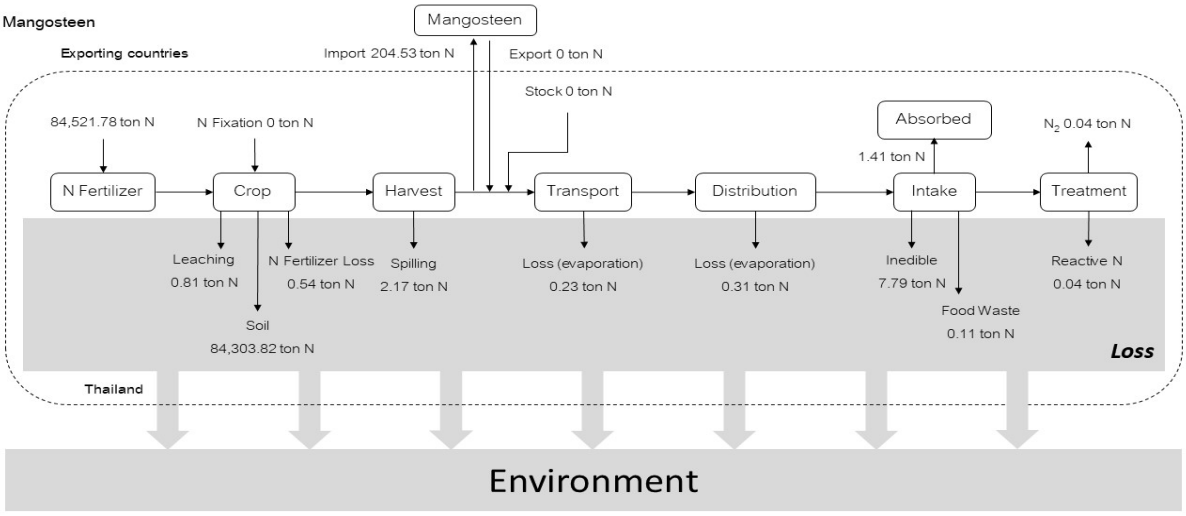



Fig. 3 N balance and flow the entire production and consumption chain of mangosteen in Thailand, including international trade

## สรุป

การประเมินไนโตรเจนสูญเสียตลอดห่วงโซ่การผลิตและการบริโภคมังคุดในปี 2564 ตั้งแต่ การเพาะปลูกถึงการบำบัดของเสียในครัวเรือน ผลการศึกษาสมดุลมวลห่วงโซ่การผลิตและการบริโภคมังคุด พบว่าขั้นตอนการบริโภคมังคุดมีปริมาณการสูญเสียมากที่สุดร้อยละ 74 (มี 2 ส่วน คือ การสูญเสียจากการจัดการเปลือก 9,732.94 ตัน และการบริโภคเหลือ 139.54 ตัน ) รองลงมาคือการสูญเสียจากการเก็บเกี่ยวร้อยละ 20.4 (2,707.73 ตัน) และผลการวิเคราะห์ไนโตรเจนสูญเสีย พบว่าการสูญเสียจากการใส่ปุ๋ยเกินความต้องการที่พืชจะดูดซึมได้มีค่ามากที่สุด 84,521.78 ตัน N (ร้อยละ 99.986 ของการสูญเสียไนโตรเจนทั้งหมด) รองลงมาการบริโภค (เปลือกที่บริโภคไม่ได้และบริโภคเหลือ) 7.90 ตัน N (ร้อยละ 0.009 ของการสูญเสียไนโตรเจนทั้งหมด) และการสูญเสียจากการเก็บเกี่ยว 2.17 ตัน N (ร้อยละ 0.003 ของการสูญเสียไนโตรเจนทั้งหมด) จึงทำให้ผลการวิเคราะห์ค่า VNF มังคุดมีค่าสูง 8,998.49 ตัน N loss/ตัน N consumed (VNF ผลไม้ 2.89–15.76) สาเหตุหลักจากการใช้ปุ๋ยในปริมาณที่เกินความต้องการที่พืชจะดูดซึมได้ และปริมาณไนโตรเจนสูญเสียต่อประชากรในปี 2564 ของมังคุดมีค่า 1.274 kg N capita$^{-1}$ yr$^{-1}$ ผลการวิจัยแสดงให้เห็นถึงโอกาสการลดผลกระทบสิ่งแวดล้อม โดยการปรับปรุงการใส่ปุ๋ยให้คุ้มค่า และการกำจัดของเสียที่เหมาะสม เพื่อใช้เป็นเชิงนโยบายภาคการเกษตรและอาหารต่อไป

## เอกสารอ้างอิง

กรมการค้าภายในกระทรวงพาณิชย์. 2565. ปฏิทินฤดูกาลสินค้าเกษตร 2565. https://www.dit.go.th/PR_Publication Viewer.aspx?id=5254#p=25\, 14 ตุลาคม 2566.

กรมควบคุมมลพิษ. 2560. ระบบบ่อเกรอะ (Septic Tank). http://cac.pcd.go.th/index.php/ourservices/2017-02-05-14-04-09/2017-06-30-02-49-14/271-septic-tank-2, 14 ตุลาคม 2566.

โครงการพัฒนาแห่งสหประชาชาติแห่งประเทศไทย. 2565. แผนที่การลงทุนสู่เป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืนของประเทศไทย ปี 2565. https://www.undp.org, 22 มกราคม 2567.

นรินทร์ เจริญพันธ์, ศักดิ์ชัย เศรษฐ์อนวัช, สามารถ สายอุต. 2561. องค์ประกอบทางเคมีและแนวโน้มการใช้ประโยชน์จากผลพลอยได้ และเศษเหลือทิ้งจากการแปรรูปผลไม้เขตร้อน 4 ชนิด. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 28: 114–128.

บทความการดูแลสุขภาพ และเคล็ดลับเพื่อสุขภาพดี. ม.ป.ป. การดูดซึมสารอาหาร (adsorbtion). 2563. https://www.healthcarethai.com/การดูดซึมสารอาหาร-absorption, 15 พฤษภาคม 2563.

ฝ่ายเศรษฐกิจมหภาค ธนาคารแห่งประเทศไทย. 2565. ผลไม้ไทยสุดฮอตรุกตลาดโลกฝ่าโควิด-19. หนังสือพิมพ์กรุงเทพธุรกิจ. 11/256: 1.

สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2560. คู่มือการตรวจวัด รายงาน และทวนสอบ (MRV) การจัดทำบัญชีก๊าซเรือนกระจก. สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพฯ.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2565. ไม้ผลตะวันออก 4 ชนิด ปีนี้ ผลผลิตรวม 1.19 ล้านตัน เพิ่มขึ้น 32% ออกตลาดชุกพฤษภาคมนี้. https://www.oae.go.th/view/1/รายละเอียดภาวะเศรษฐกิจการเกษตร/38728/TH-TH, 22 พฤศจิกายน 2566.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2566. การดำเนินงานด้าน Food Loss ของไทย. https://tast.or.th/wp-content/uploads/2017/07/คุณหิรัญญา-สระสม-–-“การดำเนินงานด้าน-Food-Loss-ของไทย”.pdf, 22 พฤศจิกายน 2566.

สำนักงานสถิติแห่งชาติ. 2566. http://statbbi.nso.go.th/staticreport/Page/sector/TH/report/sector_01_11102_TH_.xlsx, 20 พฤษภาคม 2563.

สำนักงานผู้ประสานงานสหประชาชาติประจำประเทศไทย. 2564. เป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน. https://www.sdgport-th.org/2021/06/sustainable-development-goal-sdg-booklet/, 22 มกราคม 2567.

สถานีพัฒนาที่ดินจันทบุรี. 2560. การปลูกและการดูแลรักษามังคุด. http://r02.ldd.go.th/cti/Mangosteen.html, 12 พฤศจิกายน 2566.

Food and Agricultural Organizatiion (FAO). 2001. Food balance sheet methodology. http://www.fao.org/3/X9892E/X9892E00.htm, 10 May 2023.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2014. AR5 Climate Change 2014: Mitigation of climate change. https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/, 10 May 2023.

ISO 14040/14044. 2020. Environmental Management—Life Cycle Assessment—Requirements and Guide-Lines—Amendment 2. International Organization for Standardization. Geneva, Switzerland.

Oita, A., Wirasenjaya, F., Liu, J., Webeck, E., Matsubae. K. 2020. Trends in the food nitrogen and phosphorus footprints for Asia's giants: China, India, and Japan. Resour. Conserv. Recycl. 157: 104752. doi.org/10.1016/j.res conrec.2020.104752.

UNEP. 2023. What is nitrogen pollution?. https://www.unep.org/interactives/beat-nitrogen-pollution/, 22 January 2024.

Wirasenjaya, F., Dhar, A.R., Oita, A., Matsubae. K. 2023. Assessment of food-related nitrogen and phosphorus footprints in Indonesia. Sustain. Prod. Consum. 30: 30–41. doi.org/10.1016/j.spc.2023.04.011.

Zhang, Y., Liu, Y., Shibata, H., Gu, B., Wan, Y. 2018. Virtual nitrogen factors and nitrogen footprints associated with nitrogen loss and food wastage of China's main food crops. Environ. Res. Lett. 13: 014017. doi: 10.1088/1748-9326/aa98a6

# การศึกษาลักษณะทางกายวิภาคของไม้วงศ์ยาง

## Study on wood anatomy of Dipterocarpaceae

**มารศรี แก้วปราณี**

Marasree Kaewpranee

สำนักวิจัยและพัฒนาการป่าไม้ กรมป่าไม้ กรุงเทพฯ 10900

Forest Research and Development Office, Royal Forestry Department, Bangkok 10900, Thailand

Corresponding author. E-mail address: marasreeau@gmail.com

**บทคัดย่อ**

การศึกษากายวิภาคของไม้ในวงศ์ยาง สกุล Shorea Hopea และ Dipterocarpus เก็บตัวอย่างเนื้อไม้จากศูนย์วิจัยและพัฒนาผลิตผลป่าไม้ สำนักวิจัยและพัฒนาการป่าไม้ กรมป่าไม้ ตัวอย่างชิ้นไม้ ขนาด 1.5×1.5×1.5 เซนติเมตร ใช้แฮนด์เลนส์ศึกษาลักษณะโครงสร้างไม้อย่างหยาบด้านหน้าตัดของไม้ ได้แก่ พอร์ เรย์ พาเรงคิมา และตัวอย่างสไลด์ใช้กล้องจุลทรรศน์ศึกษาลักษณะโครงสร้างไม้อย่างละเอียด ได้แก่ เซลล์เวสเซล พาเรงคิมา เรย์ ไฟเบอร์ และสารแทรกในเซลล์เนื้อไม้ ผลการศึกษาพบว่า ลักษณะโครงสร้างของไม้วงศ์ยาง ทั้ง 3 สกุล พบ พอร์เป็นแบบพอร์เดี่ยว ภายในพอร์มีไทโลส พาเรงคิมาพบแบบพาเรงคิมาแบบปีกต่อ เส้นเรย์เห็นชัด ไม้สกุล Shorea และ Hopea มีท่อยางเรียงต่อกันเป็นแนวยาวตัดกับเส้นเรย์ เรียกว่า gum vein และ ไม้สกุล Dipterocarpus มีท่อยางเรียงต่อกันเป็นแนวสั้น ๆ เรียกว่า gum duct

**คำสำคัญ**: การตรวจพิสูจน์ชนิดไม้, กายวิภาคของไม้, ไม้วงศ์ยาง

**Abstract**

Study of the anatomy of Dipterocarpaceae 3 genus is Shorea Hopea and Dipterocarpus were collected wood samples from the Forest Products Research and Development Center, Forest Research and Development Office, Royal Forest Department. A sample piece of wood, size 1.5×1.5×1.5 centimeters, was used with a hand lens to study the rough structure of the wood on the cross-section, including pores, rays, parenchyma. The sample slides were used by a microscope to study the wood structure in detail, including vessels, parenchyma, rays, fibers, and substances inserted into wood cells. The results of the study showed the structural characteristics of wood all 3 genera of Dipterocarpaceae. The pores were found to be solitary pores. It is diffuse porous within the tylose pores. Parenchyma found confluent parenchyma. The ray lines are clearly visible. The Shorea and Hopea genus have rubber tubes arranged in a long line intersecting with the rays, called gum veins. And Dipterocarpus genus have rubber pipes arranged in a short line called gum duct.

**Keywords**: Wood anatomy, Wood idenrification, Dipterocarpaceae

**คำนำ**

ไม้วงศ์ยางพบได้ทั่วไปในป่าดงดิบหรือป่าไม่ผลัดใบ (Evergreen forest) และป่าผลัดใบ (Deciduous forest) ขึ้นตามป่าดิบแล้งและป่าดิบชื้น ไม้วงศ์ยางมีอยู่ด้วยกัน 8 สกุล ได้แก่ สกุลไม้ยางนา (Dipterocarpus) สกุลไม้กระบาก (Anisoptera) สกุลไม้เคี่ยม (Cotylelobium) สกุลไม้พันจา (Vatica) สกุลไม้ตะเคียน (Hopea) สกุลไม้ เต็ง รัง และสยา (Shorea) สกุลไม้ไข่เขียว (Parashorea) และสกุลไม้ตะเคียนชันตาแมว (Balanocarpus) ไม้วงศ์ยางมีความสำคัญทางเศรษฐกิจเป็นอันมาก เนื่องจากเนื้อไม้สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการก่อสร้างอาคารบ้านเรือนได้ดี เมื่อนำมาอาบน้ำยาให้ถูกต้องก็จะช่วยทำให้มีความทนทานมากขึ้นสามารถนำไปใช้กับงานภายนอกได้ทนทานนับ 10 ปี ไม้ยางนาเป็นไม้ขนาดใหญ่ เปลาตรง สูง และไม่ค่อยมีกิ่งก้าน การตัดไม้ยางนามาใช้ประโยชน์จึงได้เนื้อไม้มาก โดยเนื้อไม้ที่ได้จะมีความแข็งปานกลาง สามารถนำมาเลื่อยไสกบตกแต่งให้เรียบได้ง่าย (สำนักวิจัยและพัฒนาการป่าไม้, 2563) มีการใช้ประโยชน์จากไม้ยางนาในอดีตนิยมนำมาเลื่อยทำเสาบ้าน รอด ตง ไม้พื้นไม้ระแนง ไม้คร่าว โครงหลังคา ฝ้าเพดาน เครื่องเรือนต่าง ๆ ทำรั้วบ้าน ทำเรือขุด เรือขนาดย่อม แจว พายกรรเชียง รวมไปถึงตัวถังเกวียน ถังไม้ หมอนรองรางรถไฟ ฯลฯ แต่ในปัจจุบันการใช้ประโยชน์จากเนื้อไม้ยางนาที่สำคัญคือ การนำไปทำเป็นไม้อัดและแผ่นใยไม้อัด นำเนื้อไม้มาใช้ในการก่อสร้างอาคารบ้านเรือน และเครื่องใช้ต่าง ๆ ที่มากขึ้น ประกอบกับคุณภาพที่ใช้ทดแทนไม้ที่มีราคาแพงหลายชนิดทำให้ต้นทุนในการผลิตลดลงทำให้มีความต้องการใช้ไม้สกุลนี้มากขึ้น ถึงแม้จะมีการส่งเสริมการปลูกมากขึ้นในพื้นที่ต่าง ๆ แต่ก็ยังไม่เพียงพอต่อความต้องการและต้องนำไม้เข้ามาจากต่างประเทศ

การศึกษาลักษณะโครงสร้างไม้ (wood anatomy) เป็นวิชาที่ว่าด้วยรูปร่างลักษณะ ขนาด และการเรียงตัวของเซลล์ในเนื้อไม้ ซึ่งลักษณะ โครงสร้างไม้ต่างชนิดกันจะมีความแตกต่างกัน สามารถนำมาใช้ในการจำแนกชนิดไม้ได้ เกรียงศักดิ์ (2544) ได้ให้ความหมาย การตรวจพิสูจน์ชนิดไม้ (wood identification) คือ การนำเอาลักษณะโครงสร้างไม้ที่เห็นได้ โดยการใช้แว่นขยายส่องดูเนื้อไม้ด้านหน้าตัดที่ได้ใช้มีดตัดไว้ การตรวจพิสูจน์ไม้เพื่อจะบอกว่าเป็นไม้ชนิดใดจึงจำเป็นต้องมีข้อมูลและความรู้เกี่ยวกับไม้ชนิดต่าง ๆ ให้มากที่สุด เพื่อความแน่นอนในการตัดสินใจ ไม่ว่าจะเป็นข้อมูลเกี่ยวกับ ลักษณะทั่ว ๆ ไปของต้นไม้ ลักษณะเนื้อไม้ คุณสมบัติของไม้แต่ละชนิด และความรู้เกี่ยวกับไม้ ลักษณะภายในของไม้หรือลักษณะโครงสร้างไม้ โดยเฉพาะการตรวจพิสูจน์ชนิดไม้โดยใช้แว่นขยายจะต้องรู้ลักษณะต่าง ๆ ภายในเนื้อไม้ที่มองเห็นด้านหน้าตัด เพื่อสามารถตรวจพิสูจน์ไม้ได้อย่างแม่นยำ

กรมป่าไม้โดยสำนักวิจัยและพัฒนาการป่าไม้ มีงานบริการทางวิชาการด้านป่าไม้ที่สำคัญ ได้แก่ งานตรวจชนิดและคุณภาพไม้ พร้อมทั้งออกหนังสือรับรองทางวิชาการให้ผู้ยื่นความประสงค์ ซึ่งมีผู้เข้ามารับบริการตรวจพิสูจน์ไม้และขอคำปรึกษาเป็นจำนวนมากในแต่ละปี ไม้ที่นำมาตรวจส่วนใหญ่เป็นไม้สกุลยางมีทั้งในรูปแบบไม้ท่อน ไม้แปรรูปและผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ประกอบกับข้อมูลทางกายวิภาคของไม้วงศ์ยางที่ทำการศึกษาไว้ยังมีข้อมูลน้อยมาก และตัวอย่างที่ทำการศึกษาไว้บางส่วนชำรุดเสียหาย จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องการศึกษาลักษณะทางกายวิภาคของไม้วงศ์ยางเพื่อใช้ในการปฏิบัติงานดังกล่าว

**อุปกรณ์และวิธีการ**

*การเก็บตัวอย่าง*

1. เลื่อยชิ้นไม้ตัวอย่างไม้ ให้ได้ขนาด 1.5×1.5×1.5 เซนติเมตร ให้ได้ตาม ลักษณะด้านหน้าตัด (Cross section) ด้านสัมผัส (Tangential section) และด้านรัศมี (Radial section) จำนวน 5 ชิ้นต่อ 1ชนิดไม้

2. ต้มชิ้นไม้ตัวอย่างจนอ่อนตัว แล้วไปทำการเฉือนด้านหน้าตัด (Cross section) ด้วยเครื่องตัดสไลด์ (Slide microtome) พื้นที่หน้าตัดเรียบเสมอกัน แล้วนำชิ้นไม้ตัวอย่างผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้องจนแห้ง

3. นำชิ้นไม้ตัวอย่างศึกษาลักษณะโครงสร้างด้านหน้าตัดด้วย กล้องสเตอร์โอไมโครสโคป (Stereo microscope) ที่กำลังขยาย 6.7 เท่า 15 เท่า และ 40 เท่า โดยศึกษาลักษณะของพอร์ (Pores) เรย์ (Rays) พาเรงคิมา (Parenchyma) พร้อมทั้งบันทึกภาพหน้าตัดไม้

4. บันทึกภาพสไลด์ไมโครมิเตอรสไลด์ ขนาด 2 มิลลิเมตร (Micrometer slides 2 mm.) ที่กำลังขยาย 15 เท่า และ 40 เท่า โดยนำภาพที่บันทึกได้ไปวัดขนาดในโปรแกรมวัดขนาดเซลล์ไม้และบันทึก เป็นขนาดอ้างอิง

5. นำภาพด้านหน้าตัดไม้ตัวอย่าง ที่กำลังขยาย 15 เท่า และ 40 เท่า เข้าโปรแกรมวัดขนาดเซลล์ไม้ เพื่อบันทึกภาพไว้เป็นภาพตัวอย่างไม้เพื่อใช้เปรียบเทียบต่อไป

*การศึกษาลักษณะโครงสร้างไม้อย่างละเอียด* ทำการตัดตัวอย่างไม้ ขนาด 2×2×2 เซนติเมตร จำนวน 10 ตัวอย่าง โดยตัดตัวอย่างให้ตรงตามด้านหน้าตัด ด้านรัศมี และด้านสัมผัส จากนั้นนำไปต้มน้ำ จนชิ้นไม้อ่อนตัว นำชิ้นไม้ไปตัดเป็นแผ่นไม้บาง ขนาด 15 ไมครอนทั้งสามด้าน จากนั้นนำแผ่นไม้บางที่ได้ย้อมด้วยสีแดง safanin-O นำไปทำสไลด์ไม้ เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างของเซลล์เวสเซล (vessels) พาเรงคิมา (parenchyma) เรย์ (rays) ไฟเบอร์ (fibers) และสารแทรกในเซลล์เนื้อไม้

*การศึกษาโครงสร้างไม้ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ (microscope)* พร้อมทั้งบันทึกภาพ ที่กำลังขยาย 40 เท่า และ 100 เท่า

**ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง**

กายวิภาคของไม้วงศ์ยาง สกุล Shorea สกุล Hopea และสกุล Dipterocarpus ทำการศึกษาลักษณะโครงสร้างไม้อย่างหยาบด้านหน้าตัดของไม้ ตัวอย่างชิ้นไม้ ขนาด 1.5×1.5×1.5 เซนติเมตร โดยใช้แฮนด์เลนส์ ศึกษาลักษณะของพอร์ (Pores) เรย์ (Rays) พาเรงคิมา (Parenchyma) และสารแทรกในเนื้อไม้ และทำการศึกษาโครงสร้างไม้อย่างละเอียดโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ตัวอย่างถูกเตรียมเป็นสไลด์ โดยดูลักษณะของเซลล์เวสเซล (vessels) พาเรงคิมา (parenchyma) เรย์ (rays) ไฟเบอร์ (fibers) และสารแทรกในเซลล์เนื้อไม้ เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างของไม้ ได้แก่ รูปร่าง ลักษณะขนาดการเรียงตัวของเซลล์ต่าง ๆ ในเนื้อไม้ และสามารถแยกความเหมือนหรือแตกต่างของชนิดไม้ที่เป็นลักษณะเฉพาะของไม้นั้น ๆ ดังนี้

*สกุล Shorea*

1. เต็ง (*Shorea obtusa*) วงศ์ Dipterocarpaceae ลักษณะโครงสร้างไม้ พอร์เป็นแบบ พอร์เดี่ยว (solitary pore) และ พอร์แฝด (multiple pore) แบบของการเรียงตัวไม่เด่นชัด การกระจายเป็นแบบ กระจัดกระจาย (diffuse porous) พอร์ใหญ่ ทางภายในพอร์มีไทโลส (tylose) เกือบทุกพอร์มีท่อยางเรียงต่อกันยาวตัดกับเส้นเรย์ เส้นเรย์เห็นชัด ลักษณะความแตกต่างของขนาดเส้นเรย์ สามารถนำมาใช้จำแนกชนิดไม้ที่มีความใกล้เคียงกันได้ เช่น ในกรณีของไม้เต็ง (*S. obtusa*) และไม้รัง (*Pentacme siamensis*) ซึ่งไม้ทั้งสองชนิดนี้มีลักษณะโครงสร้างไม้ที่ใกล้เคียงกันมาก แต่ลักษณะของเส้นเรย์ไม้เต็งจะมีขนาดที่ใกล้เคียงกันมองเห็นเป็นขนาดเดียว ส่วนของไม้รังจะมีสองขนาดคือ มีขนาดเล็กเป็นเส้นบาง ๆ และขนาดที่หนากว่ามองเห็นเป็นใหญ่กว่าชัดเจน (งานคุณสมบัติและวิศวกรรมโครงสร้างไม้, 2554) พาเรงคิมาเป็นแบบ พาเรงคิมาแบบปีก (aliform parenchyma) และ พาเรงคิมาแบบปีกต่อ (confluent parenchyma) (Figs. 1–2)

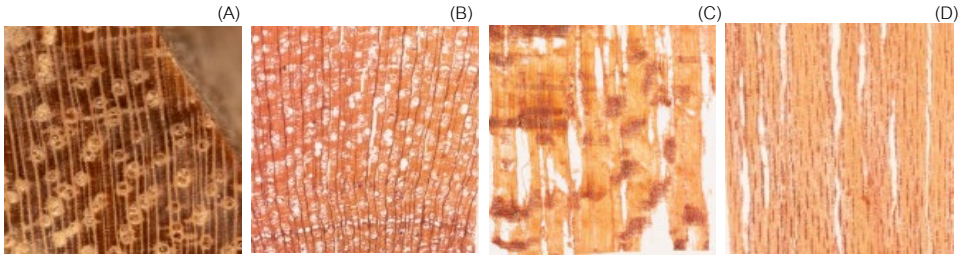



**Fig. 1** Structure characteristics of *S. obtuse*: (A) cross section 10x; (B) cross section 15x; (C) radial section; (D) tangential section

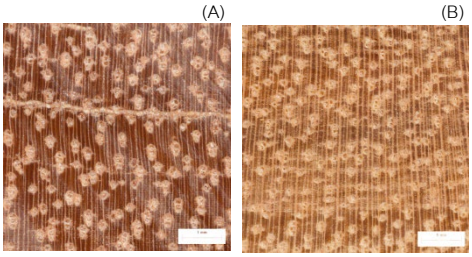



**Fig. 2** Rays of two distinct sizes: (A) *S. obtuse*; (B) *P. siamensis*

2. พะยอม (*Shorea roxburghii*) วงศ์ Dipterocarpaceae ลักษณะโครงสร้างไม้ พอร์ เป็นแบบ พอร์เดี่ยว (solitary pore) และ พอร์แฝด (multiple pore) แบบของการเรียงตัวไม่เด่นชัด การกระจายเป็นแบบ กระจัดกระจาย (diffuse porous) พอร์ใหญ่ ทางภายในพอร์มีไทโลส (tylose) เป็นบางพอร์ พาเรงคิมาเป็นแบบ พาเรงคิมาแบบปีก (aliform parenchyma) พาเรงคิมาแบบปีกต่อ (confluent parenchyma) มีท่อยางที่ยังไม่แข็งตัวต่อเรียงยาวตัดกับเส้นเรย์ (Fig. 2)

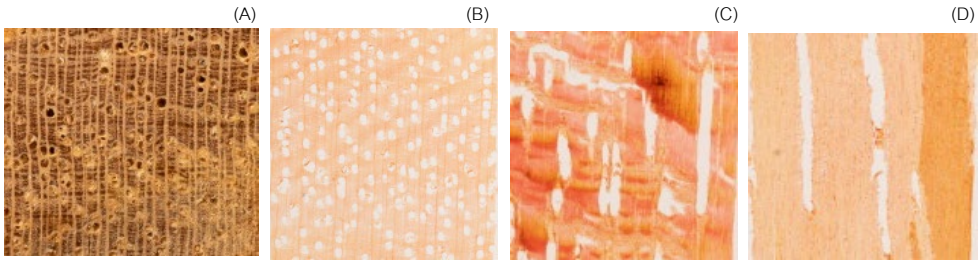



**Fig. 3** Structure characteristics of *S. roxburghii*: (A) cross section 10x; (B) cross section 15x; (C) radial section; (D) tangential section

3. เคี่ยมคะนอง (*Shorea henryana*) วงศ์ Dipterocarpaceae ลักษณะโครงสร้างไม้พอร์ ส่วนมากจะเป็นพอร์เดี่ยว (solitary pore) พอร์แฝด (multiple pore) น้อยมาก แบบของการเรียงตัวไม่เด่นชัด การกระจายเป็นแบบกระจัดกระจาย (diffuse porous) พอร์ใหญ่ มีท่อยางเรียงต่อกันตัดกับเส้นเรย์ เส้นเรย์เห็นชัด มีพาเรงคิมาเป็บแบบ พาเรงคิมาแบบปีก (aliform parenchyma) และ พาเรงคิมาแบบปีกต่อ (confluent parenchyma) (Figs. 3–4)

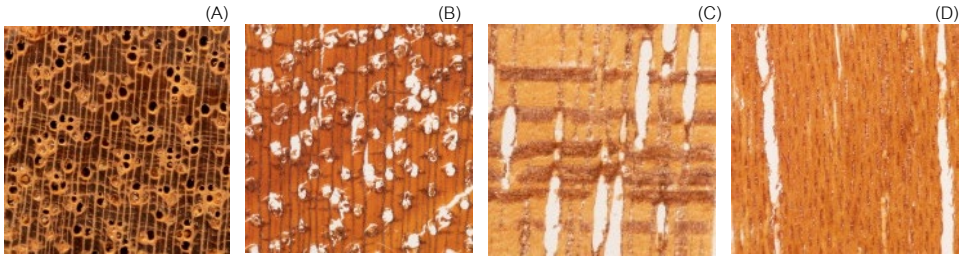



**Fig. 4** Structure characteristics of *S. henryana* (A) cross section 10x; (B) cross section 15x; (C) radial section; (D) tangential section

ท่อเรียงต่อกันเป็นเส้นยาว (Axial canals in long tangential lines) หมายถึง ลักษณะที่มองเห็นด้านหน้าตัดไม้เห็นท่อยางไม้ (gum duct) ท่อยางน้ำมันไม้ (resin duct) ที่เรียงต่อกันเป็นเส้นยาว ๆ ไม้สกุล Shorea เช่น เต็ง พะยอม และเคี่ยม ถือเป็นลักษณะเด่นของไม้ในวงศ์นี้ ซึ่งลักษณะที่พบนี้จะเรียกว่า แถบท่อยางไม้ (gum vein) (งานคุณสมบัติและวิศวกรรมโครงสร้างไม้, 2554) (Fig. 5)

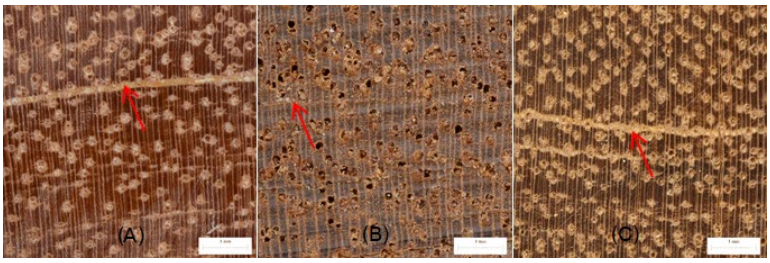



**Fig. 5** Axial canals in long tangential lines (A) *S. obtuse*; (B) *S. roxburghii*; (C) *S. henryana*

*สกุล Hopea*

1. ตะเคียนทอง (*Hopea odorata*) วงศ์ Dipterocarpaceae ลักษณะโครงสร้างไม้ พอร์มีทั้งแบบ พอร์เดี่ยว (solitary pore) และ พอร์แฝด (multiple pore) แบบของการเรียงตัวไม่เด่นชัด การกระจายเป็นแบบ กระจัดกระจาย (diffuse porous) ทางภายในพอร์มีไทโลส (tylose) บ้างเป็นบางพอร์ พอร์ใหญ่มีท่อยางต่อเป็นแนวยาวเรียงตัดกันเป็นเส้นเรย์ เส้นเรย์เห็นชัด พาเรงคิมา เป็นแบบพาเรงคิมาแบบกระจาย (diffuse parenchyma) ซึ่งสอดคล้องกับงานคุณสมบัติและวิศวกรรมโครงสร้างไม้ (2554) พบพาเรงคิมาแบบกระจายของไม้ตะเคียนทอง และพาเรงคิมาแบบปีก (aliform parenchyma) (Fig. 6)

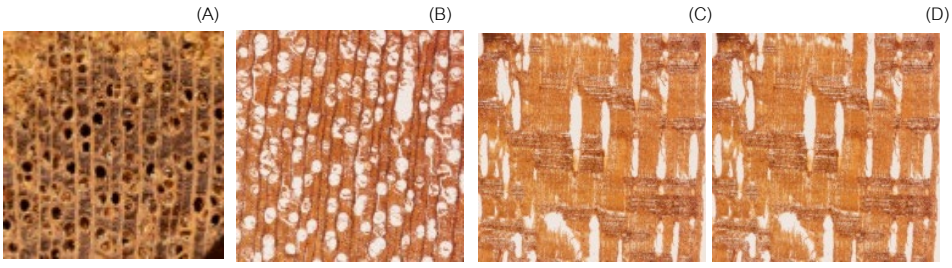



**Fig. 6** Structure characteristics of *H. odorata*: (A) cross section 10x; (B) cross section 15x; (C) radial section; (D) tangential section

2. ตะเคียนราก (*Hopea pierrei*) วงศ์ Dipterocarpaceae ลักษณะโครงสร้างไม้ พอร์เป็นแบบ พอร์เดี่ยว (solitary pore) พอร์แฝดมีน้อย แบบของการเรียงตัวไม่เด่นชัดการกระจายเป็นแบบ กระจัดกระจาย (diffuse porous) พอร์ขนาดปานกลาง ทางภายใน พอร์มีไทโลส (tylose) บ้างเป็นบางพอร์ มีท่อยางต่อเรียงเป็นแนวยาวตัดกับเป็นเส้นเรย์ เส้นเรย์เห็นชัดพาเรงคิมาเป็นแบบ พาเรงคิมาแบบปีก (aliform parenchyma) (Fig. 7)

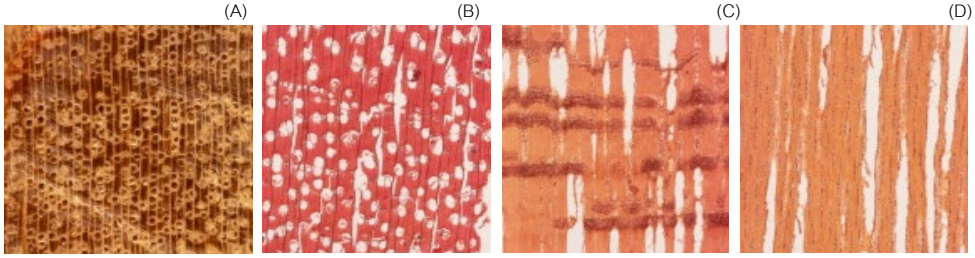



**Fig. 7** Structure characteristics of *H. pierrei*: (A) cross section 10x; (B) cross section 15x; (C) radial section; (D) tangential section

3. ตะเคียนหิน (*Hopea ferrea*) วงศ์ Dipterocarpaceae ลักษณะโครงสร้างไม้ พอร์เป็นแบบ พอร์เดี่ยว (solitary pore) และ พอร์แฝดอยู่รวมกันเป็นกลุ่ม แบบของการเรียงตัวไม่เด่นชัด การกระจายเป็นแบบ กระจัดกระจาย (diffuse porous) พอร์เล็กมาก มีท่อยางต่อเรียงเป็นแนวยาวตัดกับเส้นเรย์ เส้นเรย์เห็นชัดมีลายริ้ว (ripple mark) (Fig. 8)

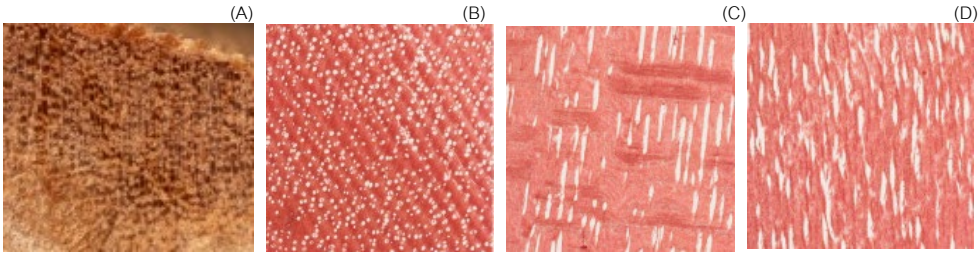



**Fig. 8** Structure characteristics of *H. ferrea*: (A) cross section 10x; (B) cross section 15x; (C) radial section; (D) tangential section

*สกุล Dipterocarpus*

1. ยางนา (*Dipterocarpus alatus*) วงศ์ Dipterocarpaceae ลักษณะทางกายวิภาค พอร์ เป็นแบบ พอร์เดี่ยว (solitary pore) เกือบทั้งหมด แบบของการเรียงตัวไม่เด่นชัด การกระจายเป็นแบบ กระจัดกระจาย (diffuse porous) พอร์ใหญ่มาก เส้นเรย์เห็นชัด มีท่อยางเรียงต่อกัน 3–4 ท่อ อยู่ใกล้ ๆ พอร์ (Fig. 9)

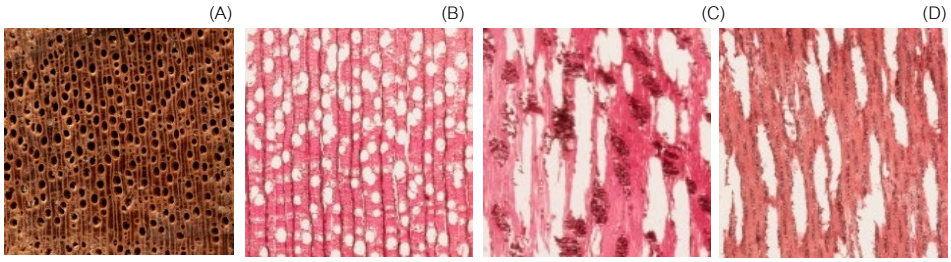



**Fig. 9** Structure characteristics of *D. alatus*: (A) cross section 10x; (B) cross section 15x; (C) radial section; (D) tangential section

2. ยางเหียง (*Dipterocarpus obtusifolius*) วงศ์ Dipterocarpaceae ลักษณะทางกายวิภาค พอร์ เป็นแบบ พอร์เดี่ยว (solitary pore) แบบของการเรียงตัวไม่เด่นชัด การกระจายเป็นแบบ diffuse พอร์ใหญ่ มีสารแทรก (deposit) สีขาวอุด เป็นบางพอร์ เส้นเรย์เห็นชัด พาเรงคิมาเป็นแบบกระจัดกระจาย (diffuse parenchyma) มีท่อยางต่อเรียงกันสั้น ๆ ใกล้ ๆ พอร์ (Fig. 10)

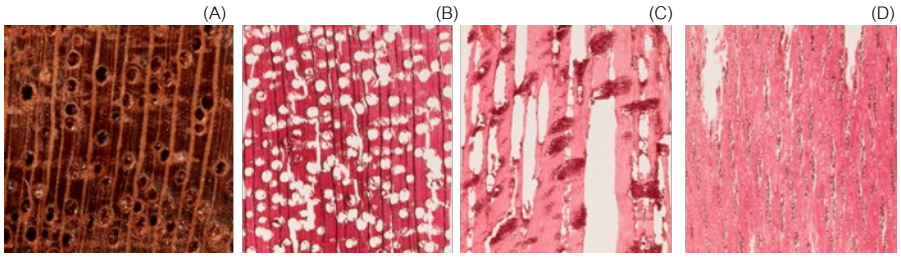



**Fig. 10** Structure characteristics of *D. obtusifolius*: (A) cross section 10x; (B) cross section 15x; (C) radial section; (D) tangential section

3. ยางพลวง (*Dipterocarpus tubercutalus*) วงศ์ Dipterocarpaceae ลักษณะทางกายวิภาค พอร์ เป็นแบบพอร์เดี่ยว (solitary pore) เกือบทั้งหมด พอร์แฝด (multiple pore) แทบไม่มี แบบของการเรียงตัวไม่เด่นชัด การกระจายเป็นแบบ กระจัดกระจาย (diffuse porous) พอร์ใหญ่ มีท่อยางเรียงสั้น ๆ อยู่ใกล้พอร์ เส้นเรย์เห็นชัด (Fig. 11)

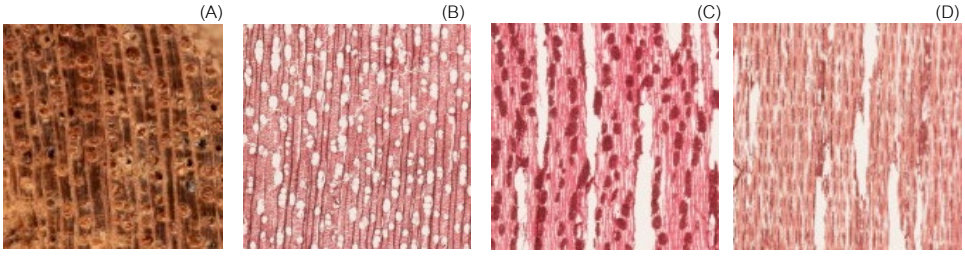



**Fig. 11** Structure characteristics of *D. tubercutalus*: (A) cross section 10x; (B) cross section 15x; (C) radial section; (D) tangential section

ท่อเรียงต่อกันเป็นเส้นสั้น ๆ (Axial canals in short tangential lines) หมายถึง ลักษณะที่มองเห็นด้านหน้าตัดไม้ เห็นท่อยางไม้ (Gum duct) ท่อยางน้ำมันไม้ (Resin duct) ที่เรียงต่อกันเป็นเส้นสั้น ๆ เป็นลักษณะเด่นของไม้สกุล Dipterocarpus เช่น ยางนา เหียง และพลวง (งานคุณสมบัติและวิศวกรรมโครงสร้างไม้, 2554)

**สรุป**

สรุปผลโครงการวิจัยการศึกษาลักษณะทางกายวิภาคของไม้วงศ์ยาง ลักษณะทางกายภาพของไม้วงศ์ยาง Dipterocarpaceae จำนวน 3 สกุล ได้แก่

*สกุล Shorea* จำนวน 3 ชนิด ได้แก่ เต็ง (*S. obtusa*) พะยอม (*S. roxburghii*) และเคี่ยมคะนอง (*S. henryana*) ลักษณะโครงสร้างที่พบ เวสเซลหรือพอร์ (vessel or pores) เป็นแบบพอร์เดี่ยว (solitary pore) มากกว่าพอร์แฝด (multiple pore) แบบของการเรียงตัวไม่เด่นชัดเป็นแบบกระจัดกระจาย (diffuse porous) ภายในพอร์มีไทโลส (tylose) พาเรงคิมา (parenchyma) พบแบบไม่ติดพอร์ (apotracheal) เรียงตัวเป็นกลุ่มกระจาย (diffuse in aggregate) แบบติดพอร์ (paratracheal) เรียงตัวเป็นหย่อม (scanty) เรียงตัวรอบพอร์ (vasicentric) ปีก (aliform) ปีกต่อ (confluent) ติดพอร์ด้านเดียว (unilateral) และแบบแถบ (baned) เส้นเรย์ (ray) เป็นแบบหลายแถวเห็นชัด มีท่อระหว่างเซลล์ (interceiiular canals) ท่อยางไม้ต่อเรียงกันเป็นแถบยาวตัดกับเส้นเรย์ เรียกว่า gum vein

*สกุล Hopea* จำนวน 3 ชนิด ได้แก่ ตะเคียนทอง (*H. odorata*) ตะเคียนราก (*H. pierrei*) และตะเคียนหิน (*H. ferrea*) ลักษณะโครงสร้างที่พบ เวสเซลหรือพอร์ (vessel or pores) พอร์มีทั้งแบบพอร์เดี่ยว (solitary pore) และพอร์แฝด (multiple pore) แบบของการเรียงตัวไม่เด่นชัด การกระจายเป็นแบบกระจัดกระจาย (diffuse porous) ภายในพอร์มีไทโลส (tylose) และมีสารตกค้าง (deposit) บ้างเป็นบางพอร์ พาเรงคิมา (parenchyma) พบแบบไม่ติดพอร์ (apotracheal) เรียงตัวเป็นกลุ่มกระจาย (diffuse in aggregate) และแบบติดพอร์ (paratracheal) เรียงตัวเป็นหย่อม (scanty) เรียงตัวรอบพอร์ (vasicentric) ปีก (aliform) ปีกต่อ (confluent) เส้นเรย์ (ray) เป็นแบบหลายแถวเห็นชัด มีท่อระหว่างเซลล์ (interceiiular canals) ท่อยางไม้ต่อเรียงกันเป็นแถบยาวตัดกับเส้นเรย์ เรียกว่า gum vein และท่อยางน้ำมันไม้ (resin duct)

*สกุล Dipterocarpus* จำนวน 3 ชนิด ได้แก่ ยางนา (*D. alatus*) ยางเหียง (*D. obtusifolius*) และยางพลวง (*D. tubercutalus*) ลักษณะโครงสร้างที่พบเวสเซลหรือพอร์ (vessel or pores) เป็นแบบพอร์เดี่ยว (solitary pore) เกือบทั้งหมด พอร์แฝด (multiple pore) แทบไม่มี แบบของการเรียงตัวไม่เด่นชัด การกระจายเป็นแบบกระจัดกระจาย (diffuse porous) พอร์ใหญ่ มีสารแทรก (deposit) สีขาวอุดเป็นบางพอร์ พาเรงคิมา (parenchyma) พบแบบไม่ติดพอร์ (apotracheal) การเรียงตัวเป็นแบบกระจัดกระจาย (diffuse parenchyma) และแบบติดพอร์ (paratracheal) เรียงตัวเป็นหย่อม (scanty) และติดพอร์ด้านเดียว (unilateral) เส้นเรย์ (ray) เป็นแบบหลายแถวเห็นชัด มีท่อยางเรียงสั้น ๆ อยู่ใกล้พอร์ เรียกว่า gum duct และท่อยางน้ำมันไม้ (resin duct) เรียงตัวตั้งฉากกับเรย์

**กิตติกรรมประกาศ**

ขอขอบคุณผู้อำนวยการสำนักวิจัยและพัฒนาการป่าไม้ กรมป่าไม้ ข้าราชการ และพนักงานราชการ ที่เกี่ยวข้องในการเก็บรวบรวมข้อมูล

**เอกสารอ้างอิง**

เกรียงศักดิ์ เสพย์ธรรม. 2544. ไม้ปละการตรวจพิสูจน์. เลขที่ ร.575. ส่วนวิจัยและพัฒนาผลิตผลป่าไม้ สำนักวิชาการป่าไม้ กรมป่าไม้. กรุงเทพฯ.

งานคุณสมบัติและวิศวกรรมโครงสร้างไม้. 2554. คู่มือการตรวจพิสูจน์ชนิดไม้. กลุ่มงานพัฒนาผลิตผลป่าไม้ สำนักวิจัยและพัฒนาการป่าไม้ กรมป่าไม้. กรุงเทพฯ.

สำนักวิจัยและพัฒนาการป่าไม้. 2563. คุณลักษณะของไม้ไทย. ส.มงคลการพิมพ์. กรุงเทพฯ.

# กายวิภาคและการตรวจพิสูจน์ของไม้ จำนวน 100 ชนิด

## Anatomy and identification of 100 wood species

**บางรักษ์ เชษฐสิงห์**

Bangrak Chadthasing

สำนักวิจัยและพัฒนาการป่าไม้ กรมป่าไม้ กรุงเทพฯ 10900

Forest Research and Development Office, Royal Forestry Department, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding author. E-mail address: chadthasing@gmail.com

**บทคัดย่อ**

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างของชนิดไม้ที่ปลูกในประเทศไทย จำนวน 100 ชนิด โดยดำเนินการศึกษาบันทึกลักษณะโครงสร้างตามคีย์ของ IAWA Hardwood List (IAWA Committee, 1989) ผลการวิจัยครั้งนี้พบว่าลักษณะโครงสร้างของไม้จำนวน 100 ชนิด แบ่งออกเป็น 71 สกุล (genus) 22 วงศ์ (family) มีลักษณะโครงสร้างเซลล์เนื้อไม้แตกต่างกันในแต่ละชนิดไม้ ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการตรวจจำแนกชนิดไม้จากเนื้อไม้อย่างละเอียด และใช้เป็นข้อมูลฐานความรู้สำหรับการศึกษาด้านคุณสมบัติไม้

**คำสำคัญ**: กายวิภาคไม้, การตรวจพิสูจน์ชนิดไม้

**Abstract**

The purpose of this research was to study the structural characteristics of 100 species of wood planted in Thailand by studying the key structural characteristics of the IAWA Hardwood List (IAWA Committee, 1989). A total of 100 species, divided into 71 genera and 22 families, have different cell structure characteristics in each wood species which can be used to identify wood species in detail and serve as a knowledge base for studying wood properties.

**Keywords**: Wood anatomy, Wood species identification

**คำนำ**

กองวิจัยผลิตผลป่าไม้ ได้จัดโครงการฝึกอบรมวิชาการตรวจพิสูจน์ไม้ การฝึกอบรมวิชาการตรวจพิสูจน์ไม้นี้จัดขึ้นครั้งแรกในปี พ.ศ. 2505 ก่อนหน้านั้น ในราวปี 2496–2497 ก็เคยมีการอบรมในลักษณะเดียวกันนี้มาครั้งหนึ่ง แต่ก็หยุดดำเนินการไปเสียนาน การรื้อฟื้นการอบรมขึ้นใหม่ ก็เพื่อสนองความต้องการของกรมป่าไม้ ซึ่งมีความจำเป็นที่ต้องได้เจ้าหน้าที่ผู้มีความรู้ความสามารถในการตรวจพิสูจน์ชนิดไม้เพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก เนื่องจากมีการนำชนิดไม้ใหม่ ๆ ออกมาใช้กันมากขึ้น มีปัญหาในการตรวจตราควบคุมตรวจตราเพื่อให้เป็นไปตามข้อกำหนดกฎหมาย วัตถุประสงค์ของโครงการเพื่อให้ผู้รับการอบรมมีพื้นฐานความรู้ในวิชาพฤกษศาสตร์ และการจัดหมวดหมู่ในทางวิชาการพอสมควร เพื่อให้ผู้รับการอบรมมีพื้นความรู้ในวิชาลักษณะโครงสร้างของไม้ เพื่อให้ผู้เข้ารับการอบรม ได้รู้จักไม้ และสามารถพิสูจน์ชนิดได้ประมาณ 50–60 ชนิด ซึ่งนอกจากจะนำไปใช้จำแนกได้โดยตรงแล้ว ก็ยังจำเป็นความรู้ขั้นพื้นฐานที่แน่นหนาสำหรับเรียนรู้ด้วยตนเองเกี่ยวกับชนิดไม้อื่น

การดำเนินการศึกษาลักษณะทางกายวิภาคที่ใช้พิสูจน์เนื้อไม้ สามารถเป็นแนวทางในการใช้ประโยชน์ไม้และตอบข้อปัญหาการใช้ประโยชน์ไม้ของงานบริการวิชาการของสำนักวิจัยและพัฒนาการป่าไม้ กรมป่าไม้ โดยลักษณะทางกายวิภาคอย่างละเอียดเป็นประโยชน์สำหรับการศึกษาอนุกรมวิธานและนิเวศวิทยาของสปีชีส์ (species) สกุล (genus) และวงศ์ (family) ของไม้แต่ละชนิดได้อีกด้วย

**อุปกรณ์และวิธีการ**

*อุปกรณ์*

1. เนื้อไม้ จำนวน 100 ชนิด จากพื้นที่ต่าง ๆ ในประเทศไทย
2. แผ่นสไลด์กระจกสำหรับกล้องจุลทรรศน์
3. สีย้อม safranin-o
4. กล้องจุลทรรศน์
5. เลื่อยวงเดือน
6. เครื่องตัดสไลด์ไม้ microtome
7. กล้องสเตอริโอ
8. คีย์ของ IAWA Hardwood List (IAWA Committee, 1989)

*วิธีการ*

*การเก็บตัวอย่างไม้*

1. เก็บตัวอย่างจากต้นไม้ที่ปลูกขึ้น โดยเก็บตัวอย่างส่วนลำต้น ตัดขนาดเป็นแว่นไม้หรือเขียงไม้ ขนาดความหนา 10 เซนติเมตรหรือ 4 นิ้ว จำนวน 2 แว่น

2. นำมาขัดด้านหน้าตัดไม้ให้เรียบ โดยแว่นไม้ชิ้นที่ 1 นำไปศึกษาลักษณะวงเจริญเติบโต (growth rings)

*การเตรียมสไลด์ไม้*

1. นำแว่นไม้ชิ้นที่ 2 นำไปตัดแบ่ง 4 ส่วน ได้แก่ ตัดผ่านกลางไจไม้ เพื่อแบ่งไม้ 2 ส่วน หลังจากนั้น ในไม้ที่แบ่งครึ่งแล้ว 1 ส่วน ตัดขนาดความหนา 2×2×2 เซนติเมตร โดยตัดไม้ให้ตรงด้านหน้าตัด ด้านสัมผัส และด้านรัศมี จำนวน 2 ชิ้น

2. นำไปต้มในน้ำให้ชิ้นไม้อ่อนตัว

3. นำไปตัดด้วยเครื่องตัดสไลด์ไม้ microtome โดยตัดแผ่นไม้ให้ได้ความบาง 10 ไมครอน ทางด้านหน้าตัด (cross section) ด้านสัมผัส (tangential section) และด้านรัศมี (radial section)

4. นำไปย้อมสีแดง safranin-o ทำสไลด์ไม้

*การบันทึกข้อมูล* ดำเนินการบันทึกข้อมูลลักษณะที่พบจากตัวอย่างชิ้นไม้และจากศึกษาจากสไลด์ไม้ ตามคีย์ของ IAWA Hardwood List (IAWA Committee, 1989) จำนวน 214 ลักษณะ คีย์ลำดับที่ 1-214 และบันทึกภาพลักษณะเด่นของไม้แต่ละชนิด เพื่อใช้อ้างอิงในการตรวจจำแนกชนิดไม้

*สรุปและวิจารณ์ผลการศึกษา* ลักษณะโครงสร้างของชนิดไม้ที่ปลูกในประเทศไทย จำนวน 100 ชนิด ตามคีย์ของ IAWA Hardwood List (IAWA Committee, 1989) โดยดำเนินการศึกษาลักษณะทั่วไปและลักษณะโครงสร้างเซลล์ไม้ด้วยวิธีการย้อมสีแบบ (simple staining) ใช้ safranin-o พร้อมทั้งถ่ายภาพเซลล์เนื้อไม้ไว้เป็นฐานข้อมูลของกรมป่าไม้

**ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง**

ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างไม้ จำนวน 100 ชนิด จำนวน 22 วงศ์ (families) 71 สกุล (genus) เก็บตัวอย่างไม้ที่ปลูกจากพื้นที่ในประเทศไทย บันทึกลักษณะตามหลักวิธีการของ IAWA Hardwood List (IAWA Committee, 1989) ลักษณะโครงสร้างของไม้ (anatomical features) จำนวน 163 ลักษณะ (ลักษณะลำดับที่ 1-163) และลักษณะที่ไม่ใช่โครงสร้างของไม้ (non-anatomical information) จำนวน 51 ลักษณะ (ลักษณะที่ 164-214) (Table 1)

**Table 1** Structural characteristics of the IAWA Hardwood List

| No. | Scientific name | Family | Anatomical features | Non-anatomical information |
|---|---|---|---|---|
| 1 | *Aquilaria malaccensis* | Thymelaeaceae | 2 5 10 13 22 23 25 26 29 30 42 47 52 58 62 66 68 69 71 75 78 91 92 96 97 105 106 107 108 109 115 133 134 | 168 169 170 189 192 193 197 199 200 203 |
| 2 | *Acacia crassicarpa* | Fabaceae | 1 2 5 13 22 23 25 26 29 30 42 46 47 52 53 54 58 61 66 69 72 79 80 81 83 91 92 97 104 115 136 142 168 169 | 170 171 173 175 176 189 192 194 196 197 217 |
| 3 | *Acacia auriculiformis* | Fabaceae | 2 5 13 22 23 25 26 29 30 42 45 47 52? 53? 61 66 69 71 72 73 79 83 90 91 97 104 115 136 142 143 | 171 173 175 176 189 192 204 |
| 4 | *Acacia mangium* | Fabaceae | 1 2 5 13 22 23 25 26 29 30 42 46 47 52 53 54 58 61 66 69 72 79 80 81 83 91 92 97 104 115 136 142 | 168 169 170 171 173 175 176 189 192 194 196 197 217 |
| 5 | *Leucaena leucocephala* | Fabaceae | 1 2 5 10 13 22 23 25 26 29 30 41 42 47 48 52 53 58 61 65 66 69 71 72 79 80 81 83 91 92 93 97 104 115 136 142 | 183 184 189 |
| 6 | *Acacia aulacocarpa* | Fabaceae | 1 2 5 13 22 23 25 26 29 30 42 46 47 52 53 54 58 61 66 69 72 79 80 81 83 91 92 97 104 115 136 142 | 168 169 170 171 173 175 176 189 192 194 196 197 217 |

**Table 1** (Continued) Structural characteristics of the IAWA Hardwood List

| No. | Scientific name | Family | Anatomical features | Non-anatomical information |
|---|---|---|---|---|
| 7 | *Sandoricum koetjape* | Meliaceae | 1 2 5 12 13 22 23 24 30 41 42 46 47 53 58 61 66 68 69 72 79 80 83 92 93 97 106 107 108 115 | 171 172 173 175 176 178 179 189 198 200 |
| 8 | *Aquilaria crassna* | Thymelaeaceae | 2 5 10 13 22 23 25 26 29 30 42 47 52 58 62 66 68 69 71 75 78 91 92 96 97 105 106 107 108 109 115 133 134 | 168 169 170 189 192 193 197 199 200 203 |
| 9 | *Anisoptera costata* | Dipterocarpaceae | 2 5 9 13 22 23 25 26 27 29 31 35 42 43 47 48 52 53 54 60 62 63 66 70 71 72 73 76 77 78 79 92 93 98 102 106 107 110 115 129 136 141 142 159 160 | 168 170 171 172 173 189 192 194 196 197 199 |
| 10 | *Fagraea fragrans* | Gentianaceae | 1 2 5 10 13 22 23 26 27 29 32 35 42 43 46 47 53 56 61 66 69 70 72 76 79 85 86 91 92 96 102 106 107 108 109 116 | 168 169 170 171 172 173 189 192 194 195 196 197 199 |
| 11 | *Artocarpus heterophyllus* | Moraceae | 2 5 13 22 23 26 27 31 32 35 42 43 46 47 52 53 56 58 61 66 69 72 80 81 83 91 92 98 106 107 110 114 115 132 | 168 170 171 172 173 174 189 192 193 194 196 199 202 |
| 12 | *Palaquium obovatum* | Sapotaceae | 2 5 7 13 22 23 26 30 31 32 42 43 46 47 52 53 54 61 66 69 71 72 73 76 77 86 93 94 97 106 107 115 136 142 159 160 | 171 172 189 194 197 19 |
| 13 | *Streblus asper* | Moraceae | 2 5 13 22 23 25 26 31 32 35 41 42 47 53 61 66 69 72 78 85 88 92 93 97 98 102 106 107 108 110 115 136 137 | 183 184 186 189 195 197 |
| 14 | *Senna siamea* | Fabaceae | 2 5 13 22 23 26 27 29 30 43 46 47 52 53 54 58 61 66 70 72 83 85 91 92 97 104 115 136 142 | 171 172 189 192v 194v 195 196 197 |
| 14 | *Parashorea stellate* | Dipterocarpaceae | 2 5 13 22 26 27 29 31 32 35 43 46 47 53 56 60 61 66 70 72 76 77 79 80 81 82 83 92 93 98 106 107 115 122 127 128 136 142 | 168 170 171 172 189 192? 194 196 197 |
| 16 | *Cotylelobium lanceolatum* | Dipterocarpaceae | 2 5 9 13 22 24 25 29 31 35 42 47 52 53 54 56 62 63 66 70 72 76 77 79 80 81 92 93 98 102 106 107 110 115 129 130 136 137 159 160 | 171 172 173 189 192 195 196 197 203 |
| 17 | *Nephelium lappaceum* | Sapindaceae | 2 5 13 22 23? 25 30 42 47 52? 53? 61 65 66 69 70 71? 72? 73? 76 79 80 81 82 83 85v 92 93 96 104 115 116 136 142 | 171 172 189 194 197 |
| 18 | *Anisoptera curtisii* | Dipterocarpaceae | 2 5 9 13 22 23 25 29 31 32 35 42 47 52 53 54 56 60 62 63 66 69 70 72 76 77 79 80 92 93 98 102 106 107 110 115 120 159 160 | 171 172 173 174 189 192 194 199 |

**Table 1** (Continued) Structural characteristics of the IAWA Hardwood List

| No. | Scientific name | Family | Anatomical features | Non-anatomical information |
|---|---|---|---|---|
| 19 | *Mansonia gagei* | Malvaceae | 1 2 5 10 13 22 23 24 30 40 41 49 52 53 54 58 61 66 70 71 72 73 76 77 92 97 106 107 115 118 120 121 136 137 138 140 141 | 168 169 170 171 172 189 190 195 196 197 |
| 20 | *Samanea saman* | Fabaceae | 2 5 13 22 23 26 29 30 42 43 46 47 52 53v 61 66 69 71 72 76 79 80 81 83 91 92 97 104 115 136 138 142 | 183 184 186 189 192 194 196 197 201 204 |
| 21 | *Artocarpus integer* | Moraceae | 2 5 13 22 23 26 27 31 32 42 46 52 53 61 66 69 71 72 73 80 81 82 83 91 92 98 106 107 110 115 132 | 171 173 189 194 |
| 22 | *Syzygium jambos* | Myrtaceae | 2 5 12 13 22 23 26 31 32 35 41 47 48 53 54 61 63 66 70 72 73 76 80 83 85 86 93 97 102 107 108 116 159 160 | 171 173 189 |
| 23 | *Anisoptera scaphula* | Dipterocarpaceae | 2 5 9 13 22 23 25 26 29 31 35 42 43 47 48 52 53 54 56 60 62 63 66 69 70 72 76 77 79 92 93 98 102 106 107 110 115 127 128 159 160 | 168 170 171 172 173 189 192 194 196v 197 199 |
| 24 | *Mesua ferrea* | Calophyllaceae | 2 5 7 9 13 22 24 25 31 32 35 42 43 46 47 53 54 56 58 60 61 66 70 71 72 85 86 93 94 96 106 107 115 116 136 142 | 168 169 170 171 172 173 189 192 195 196 197 198 |
| 25 | *Shorea siamensis* | Dipterocarpaceae | 2 5 13 22 23? 25 26 29 31 32 42 47 52? 53? 54? 60 61 66 70 71? 72? 73? 76 77 79 80 81v 82v 89v 92 98 106 107 110v 115 120v 127 136 137 138 142 156 | 171 172 189 194 196v 197 |
| 26 | *Dalbergia oliveri* | Fabaceae | 2 5 13 22 26 27 29 30 43 46 47 52 61 66 69 70 72 79 80 82 83 85 86 87 91 92 93 96 97 104 115 116 118 136 142 | 168 169 170 171 172 189 192 194 195 196 197 198 201 |
| 27 | *Cinnamomum iners* | Lauraceae | 1 2 5 7 12 13 14 15 22 23 26 27 32 35 42 47 48 53 56 61 66 69 72 79 83 84 92 93 97 98 106 107 115 124 125 | 168 169 170 171 172 173 189 192 194 195 197 198 199 203 |
| 28 | *Callerya atropurpurea* | Fabaceae | 2 5 10 13 22 23 26 27 29 30 42 43 47 52 53 61 66 70 71 72 73 80 82 83 85 91 92 93 97 98 104 115 118 120 136 142 | 168 170 171 172 173 189 |
| 29 | *Xylia xylocarpa* | Fabaceae | 2 5 13 22 23 25 26 29 30 42 43 47 53 58 61 65 66 69 70 72 76 79 80 81 89 92 97 104 115 116 136 142 | 168 169 170 171 172 173 189 192 195 196 197 201 |
| 30 | *Neobalanocarpus heimii* | Dipterocarpaceae | 2 5 13 22 25 26 29 31 32 35 42 47 53 56 60 61 66 69 70 72 73 76 77 78 79 86 92 93 98 106 107 109 110 115 118 120 127 136 137 156 | 171 172 173 189 192 195 196 197 203 |

**Table 1** (Continued) Structural characteristics of the IAWA Hardwood List

| No. | Scientific name | Family | Anatomical features | Non-anatomical information |
|---|---|---|---|---|
| 31 | *Hopea siamensis* | Dipterocarpaceae | 2 5 13 22 25 26 29 31 35 42 43 47 52 53 54 56 61 66 69 70 72 73 76 77 79 80 81 82 83 89 92 98 102 107 110 115 127 136 137 138 139 142 | 168 169 171 172 173 189 192 194 195 196 197 199 203 |
| 32 | *Hopea odorata* | Dipterocarpaceae | 2 5 7 13 22 25 26 29 31 32 42 43 47 52 53 56 60 61 66 69 70 72 73 76 77 78 79 80 81 92 98 106 107 109 110 114 115 120 127 128 136 137 157 | 168 169 170 171 172 189 192 194 197 199 200 201 203 204 |
| 33 | *Lagerstroemia floribunda* | Lythraceae | 1 5 13 22 23 25 26 29 30 41 47 48 53 61 65 67 68 69 71 78 91 92 96 104 116 | 168 170 171 172 173 189 194 196 197 200 |
| 34 | *Vitex pinnata* | Lamiaceae | 1 2 5 13 14 16 22 26 30 31 41 42 47 48 52 56 61 65 66 69 72 75 78 89 92 93 97 104 106 107 115 136 137 138 152 154 | 171 172 173 189 190 194 195 197 199 202 |
| 35 | *Shorea obtuse* | Dipterocarpaceae | 2 5 13 22 25 26 29 31 32 35 43 46 47 52 53 56 61 66 70 72 79 80 81 82 83 92 93 98 106 115 127 136 142 156 | 168 170 171 172 189 192 195 196 197 198 |
| 36 | *Albizia procera* | Fabaceae | 1 2 5 13 22 23 26 27 29 30 43 46 47 52 53 61 65 66 69 72 76 80 81 83 89 91 92 97 98 104 115 136 142 | 168 169 170 171 172 173 189 192 194 196 197 201 204 |
| 37 | *Schima wallichii* | Theaceae | 1 2 5 9 12 14 20 21 26 27 32 34 36 38 41 42 48 49 56 62 63 66 69 70 76 78 92 93 97 107 108 115 116 136 142 156 | 171 172 173 189 192 194 195 196 197 198 |
| 38 | *Litsea elliptica* | Lauraceae | 2 5 13 22 23 26 27 31 32 43 46 47 53 61 66 68 69 72 79 91 92 93 94 97 106 107 115 124 125 136 137 139 150 159 160 161 | 171 173 189 199 |
| 39 | *Alstonia macrophylla* | Apocynaceae | 2 5 7 10 13 22 23 25 29 30 41 42 48 49 54 61 66 69 72 75 76 92 93 97 106 115 132 136 142 | 171 173 189 199 200 204 |
| 40 | *Cinnamomum parthenoxylon* | Lauraceae | 2 5 7 12 13 22 23 26 27 31 42 46 47 52 53 54 56 61 65 66 69 70 72 79 92 93 97 106 107 115 124 125 126 | 171 172 189 192 194 196 197 201 203 |
| 41 | *Dalbergia cultrate* | Fabaceae | 2 5 13 21 23 26 29 30 42 46 52 53 58 61 66 69 70 71 72 73 85 86 87 91 92 97 104 106 115 118 120 122 136 142 | 168 169 170 171 172 189 192 195 196 197 202 203 205 |
| 42 | *Pterocarpus macrocarpus* | Fabaceae | 1 2 3 4 13 22 23 26 27 29 30 43 46 47 52 58 61 66 69 72 80 82 83 85 86 91 96 104 115 116 118 136 142 | 168 169 170 171 172 189 192 194 195 196 197 198 201 204 |

**Table 1** (Continued) Structural characteristics of the IAWA Hardwood List

| No. | Scientific name | Family | Anatomical features | Non-anatomical information |
|---|---|---|---|---|
| 43 | *Dialium cochinchinense* | Fabaceae | 1 2 5 13 22 23 26 29 30 42 47 52 53 61 66 70 71 72 73 79 86 89 92 97 104 115 118 120 136 142 | 168 170 171 172 189 195 196 197 |
| 44 | *Caesalpinia sappan* | Fabaceae | 1 5 13 22 23 25 26 29 30 41 42 47 52 58 61 66 69 70 71 79 80 81 83 89 90 91 92 97 104 115 120 136 142 | 168 169 189 192 194 195 196 198 |
| 45 | *Shorea roxburghii* | Dipterocarpaceae | 2 5 13 22 23 26 29 31 32 42 47 52 53 54 60 61 66 69 71 72 73 76 77 79 80 81 82 89 92 98 107 108 110 115 120 127 159 160 | 171 172 189 194 196 197 |
| 46 | *Dalbergia cochinchinensis* | Fabaceae | 2 5 13 22 23 26 27 29 30 43 46 47 52 61 66 69 70 72 80 82 86 87 91 96 104 115 116 118 136 142 | 171 172 189 192 194 195 196 197 198 201 |
| 47 | *Garcinia speciosa* | Clusiaceae | 2 5 10 13 22 23 24 25 30 42 46 47 53 54 61 66 69 70 72 73 80 83 86 92 93 98 102 106 107 115 130 136 137 138 141 142 | 168 169 170 171 172 173 189 192 194 195 196 198 199 |
| 48 | *Mimusops elengi* | Sapotaceae | 2 5 10 13 22 23 26 27 31 32 33 42 47 48 53 56 60 61 66 69 70 72 76 77 86 87 92 93 97 100 107 108 109 115 116 136 141 159 160 161 201 | 168 169 170 171 172 173 189 192 195 196 197 198 |
| 49 | *Shorea thorelii* | Dipterocarpaceae | 2 5 7 13 22 23 26 29 31 32 35 42 43 47 52 53 54 56 60 61 66 70 71 72 73 76 77 79 80 81 82 83 89 92 93 98 102 106 107 110 115 120 122 127 128 136 141 142 156 | 171 172 173 189 192 194 196 197 198 |
| 50 | *Adenanthera pavonina* | Fabaceae | 1 2 5 13 22 25 29 30 42 43 46 58 61 66 69 70 76 80 81 83 89 91 92 97 104 115 136 142 143 | 171 172 173 189 192 194 195 196 197 198 202 204 206 212 215 217 |
| 51 | *Diospyros mollis* | Ebenaceae | 2 5 13 22 23 24 25 30 41 47 52 53 61 66 70 71 72 73 77 93 96 97 107 108 109 116 136 137 138 141 | 172 173 189 195 196 202 |
| 52 | *Tamarindus indica* | Fabaceae | 1 2 5 13 22 23 25 26 27 29 30 41 42 47 52 53 58 61 66 69 72 76 79 80 81 83 89 91 92 96 97 104 115 116 136 142 143 | 178 179 189 192 195 196 197 198 202 |
| 53 | *Erythophleum succirubrum* | Fabaceae | 2 5 13 22 23 26 29 30 42 47 52 53 61 66 69 70 71 72 73 79 80 81 93 97 104 115 136 142 | 171 172 189 194 195 196 197 198 |
| 54 | *Sindora siamensis* | Fabaceae | 2 5 13 22 23 26 27 29 30 42 43 46 47 53 58 61 66 69 70 72 79 89 92 93 97 106 115 127 136 142 | 171 173 189 192 194 196 197 198 201 203 |
| 55 | *Afzelia xylocarpa* | Fabaceae | 2 5 13 22 23 24 29 30 42 45 46 47 52 53 58 61 66 70 71 72 73 80 81 82 83 89 91 92 93 97 104 115 136 142 | 171 172 173 189 192 194 196 203 |

**Table 1** (Continued) Structural characteristics of the IAWA Hardwood List

| No. | Scientific name | Family | Anatomical features | Non-anatomical information |
|---|---|---|---|---|
| 56 | *Bouea oppositifolia* | Anacardiaceae | 1 2 5 22 25 26 31 32 42 46 47 52 53 56 61 66 69 71 72 78 79 89 91 92 93 97 106 107 115 136 137 | 168 169 170 171 172 173 189 204 |
| 57 | *Mangifera indica* | Anacardiaceae | 1 2 5 13 22 23 26 27 31 32 42 46 47 53 56 58 61 66 69 71 79 80 81 82 83 89 92 97 104 106 115 136 137 138 141 | 168 169 170 171 172 173 189 192 194 196 197 198 199 204 |
| 58 | *Buchanania cochinchinensis* | Anacardiaceae | 2 5 13 22 23 27 31 32 42 46 47 53 61 66 68 69 71 72 78 79 80 81 92 93 97 98 106 107 115 130 159 | 168 169 170 171 172 189 193 194 197 |
| 59 | *Hopea pierrei* | Dipterocarpaceae | 2 5 13 22 23 25 26 31 32 42 47 52 53 54 60 61 66 70 71 72 73 76 77 79 80 81 82 92 97 98 107 108 115 120 127 141 142 | 171 172 189 194 196 197 |
| 60 | *Hopea ferrea* | Dipterocarpaceae | 2 5 13 22 23 25 29 31 32 35 40 41 42 47 48 49 52 53 54 56 61 62 66 70 72 76 77 78 79 80 82 83 84 89 91 92 93 97 98 102 107 109 110 115 118 120 122 127 128 136 137 | 168 170 171 172 173 189 192 194 195 196 197 199 |
| 61 | *Swietenia macrophylla* | Meliaceae | 1 2 5 13 22 23 24 30 42 46 47 53 58 61 65 66 69 72 76 78 79 85 89 93 97 98 106 107 115 118 122 131 136 137 138 141 142 | 183 184 189 192 194 196 197 198 |
| 62 | *Garcinia mangostana* | Clusiaceae | 2 5 10 13 22 23 24 25 30 42 46 47 53 54 61 66 69 70 72 73 80 83 86 92 93 98 102 106 107 115 130 136 137 138 141 142 | 168 169 170 171 172 173 189 192 194 195 196 198 199 |
| 63 | *Terminalia mucronata* | Combretaceae | 1 2 4 5 13 22 23 27 29 30 42 43 46 52 53 61 66 69 70 71 72 73 79 80 81 82 83 89 93 96 104 115 116 136 141 142 151 | 171 172 189 194 195 196 197 201 |
| 64 | *Wrightia arborea* | Apocynaceae | 1 5 10 12 13 22 23 24 25 29 30 40 41 48 49 52 53 62 66 69 71 72 77 78 91 92 97 100 103 108 116 | 168 169 170 171 172 189 192 194 199 200 |
| 65 | *Madhuca pierrei* | Sapotaceae | 2 5 7 10 13 22 25 26 31 32 35 42 46 47 52? 53 54 60 61 66 70 72 73 76 77 86 87 93 96 107 108 115 116 | 171 172 173 189 192 194 195 196 197 198 |
| 66 | *Morinda coreia* | Rubiaceae | 2 5 10 13 22 23 25 26 29 30 42 47 52 53 61 62 63 66 69 71 72 76 77 78 86 87 91 92 93 98 99 102 103 107 108 116 149 | 168 169 170 171 172 189 192 194 198 201 |
| 67 | *Dipterocarpus turbinatus* | Dipterocarpaceae | 2 5 9 13 22 26 29 31 32 35 42 43 46 47 53 56 60 62 63 66 69 70 72 73 76 77 78 79 80 81 92 93 98 102 107 108 110 115 127 128 129 159 160 161 | 168 169 170 171 172 189 192 194 196 197 198 |

**Table 1** (Continued) Structural characteristics of the IAWA Hardwood List

| No. | Scientific name | Family | Anatomical features | Non-anatomical information |
|---|---|---|---|---|
| 68 | *Dipterocarpus alatus* | Dipterocarpaceae | 2 5 9 13 22 25 26 27 29 31 32 42 43 46 47 52 53 54 60 62 63 66 69 70 71 72 73 76 77 78 80 81 93 98 102 107 108 110 115 128 129 159 160 | 171 172 189 194 196 197 198 |
| 69 | *Persea kurzii* | Lauraceae | 1 5 13 14 15 22 23 27 31 32 42 47 52 53 54 56 61 66 68 69 71 72 73 79 92 93 97 106 107 115 124 125 | 164 167 189 |
| 70 | *Dipterocarpus tuberculatus* | Dipterocarpaceae | 2 5 9 13 22 26 29 31 32 43 46 47 53 56 60 62 63 66 70 72 73 76 77 78 79 92 98 102 106 107 110 115 128 129 | 168 170 171 172 189 192 194 195 196 197 198 |
| 71 | *Hevea brasiliensis* | Euphorbiaceae | 2 5 13 22 23 27 30 31 42 43 46 47 52 53 54 56 61 66 68 69 71 72 73 86 87 89 93 94 97 98 100 107 108 115 136 137 140 142 | 183 186 189 192 194 197 |
| 72 | *Dipterocarpus obtusifolius* | Dipterocarpaceae | 2 5 9 13 22 23 26 29 31 32 35 43 46 47 53 56 60 62 63 66 70 72 73 76 77 78 79 92 98 102 106 107 110 115 128 129 159 160 | 168 170 171 172 189 192 194 195 196 197 198 203 |
| 73 | *Eucalyptus camaldulensis* | Myrtaceae | 1 2 5 7 9 13 22 26 27 29 31 32 42 45 47 52 53 56 60 62 63 66 69 70 72 76 77 78 79 84 92 93 97 104 106 116 | 175 176 189 192 195 196 197 198 |
| 74 | *Terminalia alata* | Combretaceae | 1 2 4 5 13 22 23 27 29 30 42 43 46 52 53 61 66 69 70 71 72 73 79 80 81 82 83 89 93 96 104 115 116 136 141 142 151 | 171 172 189 194 195 196 197 201 |
| 75 | *Gluta usitata* | Anacardiaceae | 2 5 13 22 23 27 31 35 42 43 46 47 53 56 61 66 69 71 72 76 79 85 92 93 96 106 107 115 130 159 160 161 | 168 169 170 189 192 194 196 198 201 204 |
| 76 | *Cassia fistula* | Fabaceae | 1 5 13 22 26 29 30 42 46 47 52 58 61 65 66 70 71 72 79 80 81 82 83 89 91 92 97 104 115 136 142 | 168 169 189 192 195 196 198 202 |
| 77 | *Manilkara zapota* | Sapotaceae | 2 5 13 22 23 25 26 32 41 42 47 48 53 56 58 60 61 66 70 72 76 77 86 87 88 93 94 97 100 108 109 113 116 136 137141 142 154 | 182 183 184 185 189 192 195 196 197 202 |
| 78 | *Lansium domesticum* | Meliaceae | 2 5 12 13 22 23 24 30 41 45 47 52 53 61 65 70 71 72 73 80 81 82 83 85 87 88 92 93 94 96 97 106 116 136 137 141 142 143 | 171 173 189 203 |
| 79 | *Dimocarpus longan* | Sapindaceae | 1 5 13 22 24 30 34 36 37 38 41 42 47 53 58 61 65 66 69 71 72 78 79 92 93 96 104 106 115 116 136 138 139 143 | 168 169 170 171 172 173 175 176 189 195 196 197 198 |

**Table 1** (Continued) Structural characteristics of the IAWA Hardwood List

| No. | Scientific name | Family | Anatomical features | Non-anatomical information |
|---|---|---|---|---|
| 80 | *Melia azedarach* | Meliaceae | 1 4 5 13 22 23 25 26 30 36 37 42 43 46 52 53 61 66 68 71 72 73 79 89 92 93 97 98 106 114 115 | 178 179 189 193 196 197 198 203 |
| 81 | *Hymenodictyon orixense* | Rubiaceae | 2 5 13 22 23 25 29 30 34 42 46 47 53 54 62 63 66 68 69 72 73 76 77 78 79 86 92 93 97 100 102 107 108 115 | 171 173 189 192 193 194 199 200 |
| 82 | *Terminalia bellirica* | Combretaceae | 1 2 5 13 22 23 27 29 30 43 46 47 53 58 61 66 69 70 72 80 82 83 85 89 91 92 93 96 104 116 136 142 156 | 168 169 170 189 192 194 199 200 |
| 83 | *Azadirachta indica* | Meliaceae | 1 2 5 6 11 13 22 24 25 30 36 37 42 45 46 47 52 53 58 61 66 69 71 72 79 85 89 92 93 94 97 98 104 106 115 131 136 141 142 | 168 169 171 172 173 178 179 189 192 194 196 197 198 |
| 84 | *Azadirachta excels* | Meliaceae | 1 2 5 11 13 22 23 24 25 30 36 37 42 45 46 47 52 53 58 61 66 69 72 78 79 85 89 92 93 94 97 98 106 115 131 136 142 | 171 172 173 189 192 194 196 197 198 |
| 85 | *Parkia speciosa* | Fabaceae | 1 2 5 13 22 23 25 29 30 42 46 58 61 66 68 69 70 80 81 82 83 91 92 97 98 104 115 136 142 143 | 171 172 173 189 193 194 199 200 201 |
| 86 | *Tectona grandis* | Lamiaceae | 1 3 4 5 13 22 23 25 26 30 42 43 47 52 53 56 58 61 65 66 69 71 72 78 79 89 92 93 97 98 104 106 115 163 | 168 169 170 171 172 189 192 194 196 197 201 203 |
| 87 | *Alstonia scholaris* | Apocynaceae | 2 5 10 12 13 22 23 25 26 29 30 42 46 47 53 54 62 66 68 72 73 77 78 86 87 89 92 93 94 97 100 106 107 115 132 | 171 173 175 176 178 179 189 192 193 200 203 |
| 88 | *Millettia leucantha* | Fabaceae | 1 5 13 22 26 27 29 30 43 46 47 52 58 61 66 70 72 78 85 89 92 97 98 106 115 118 120 136 142 | 168 170 189 192 195 196 198 201 203 |
| 89 | *Intsia bijuga* | Fabaceae | 1 2 5 13 22 23 25 29 30 42 43 46 53 58 61 66 69 72 80 81 82 83 89 91 92 97 104 115 136 142 | 171 172 173 189 192 194 195 196 197 198 201 203 204 |
| 90 | *Berrya cordifolia* | Malvaceae | 1 4 13 22 23 25 26 30 43 46 47 52 53 61 66 68 71 72 73 78 79 89 93 97 98 104 106 115 136 137 138 144 145 146 148 | 168 169 170 171 172 173 189 192 193 196 197 198 |
| 91 | *Melaleuca leucadendra* | Myrtaceae | 2 5 7 9 13 22 23 24 29 31 32 42 47 52 53 54 60 61 62 63 66 69 72 76 77 79 83 86 92 93 97 106 107 116 159 160 | 171 173 174 175 176 189 194 197 198 |
| 92 | *Intsia palembanica* | Fabaceae | 1 2 5 13 22 23 24 25 29 30 42 43 46 53 58 61 66 69 72 80 81 82 83 89 91 92 97 104 115 136 142 | 171 172 173 189 192 194 195 196 197 198 201 203 204 |

**Table 1** (Continued) Structural characteristics of the IAWA Hardwood List

| No. | Scientific name | Family | Anatomical features | Non-anatomical information |
|---|---|---|---|---|
| 93 | *Syzygium cumini* | Myrtaceae | 2 5 13 22 23 26 31 32 35 42 47 54 62 63 66 69 73 77 80 83 92 93 97 107 108 115 116 130 136 141 | 171 174 183 186 189 192 194 196 197 200 |
| 94 | *Syzygium claviflorum* | Myrtaceae | 2 5 13 22 23 26 29 31 32 42 47 52 53 54 61 66 69 71 72 73 83 86 93 97 107 108 115 116 136 142 | 171 172 189 194 197 198 |
| 95 | *Artocarpus lacucha* | Moraceae | 2 5 13 22 23 26 27 31 42 43 46 47 52 53 56 58 61 65 66 69 71 72 79 80 81 82 83 91 92 98 103 106 107 114 115 | 168 169 170 171 172 189 192 194 196 197 199 |
| 96 | *Cinnamomum verum* | Lauraceae | 2 5 13 14 15 22 23 27 31 32 42 47 48 53 54 61 66 69 72 78 79 83 91 92 93 97 98 106 107 115 124 125 | 168 169 189 194 196 197 200 203 |
| 97 | *Peltophorum dasyrhachis* | Fabaceae | 2 5 13 22 23 24 25 26 29 30 42 46 47 52 53 58 61 65 66 68 69 71 72 73 79 80 81 89 91 92 97 104 115 136 142 | 171 172 173 189 192 193 194 197 198 203 |
| 98 | *Lagerstroemia speciosa* | Lythraceae | 1 4 5 13 22 23 26 29 31 32 42 47 52 53 56 61 65 69 72 80 81 82 83 85 86 89 92 93 97 104 116 136 142 143 168 169 | 170 171 172 173 189 |
| 99 | *Shorea glauca* | Dipterocarpaceae | 2 5 13 22 23 25 26 31 32 42 47 52 53 60 61 62 66 70 71 72 73 76 79 80 82 83 84 92 93 98 102 106 107 114 127 136 141 142 | 171 172 173 189 192 196 197 199 |
| 100 | *Khaya senegalensis* | Meliaceae | 1 2 5 13 22 23 24 30 42 47 52 53 58 61 65 66 69 71 72 73 76 78 79 89 92 93 98 106 107 115 131 136 137 | 178 179 189 192 194 196 197 |

*ตัวอย่างผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างไม้สัก (Tectona grandis) วงศ์ LAMIACEAE (Fig. 1)*

Anatomical Features : 1 3 4 5 13 22 23 25 26 30 42 43 47 52 53 56 58 61 65 66 69 71 72 78 79 89 92 93 97 98 104 106 115 163

Non-anatomical information : 168 169 170 171 172 189 192 194 196 197 201 203

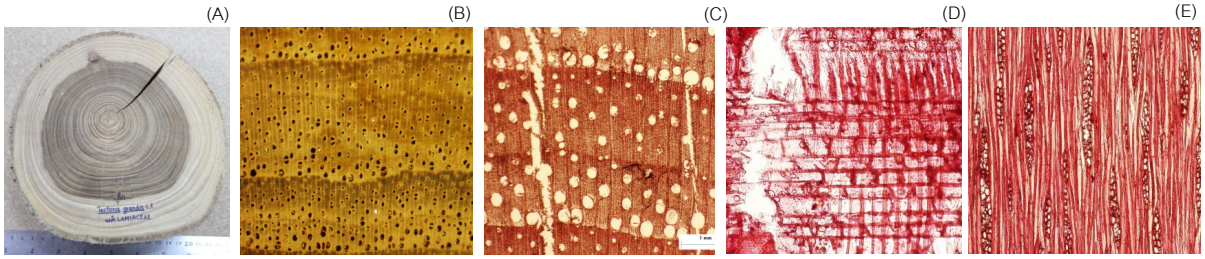



**Fig. 1** Anatomical features of *T. grandis*: (A) growth ring; (B) cross section 10x; (C) cross section 15x; (B) radial section; (E) tangential section

*ตัวอย่างผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างไม้มะค่าโมง (Afzelia xylocarpa) วงศ์ FABACEAE (Fig. 2)*

Anatomical Features : 2 5 13 22 23 24 29 30 42 45 46 47 52 53 58 61 66 70 71 72 73 80 81 82 83 89 91 92 93 97 104 115 136 142

Non-anatomical information : 171 172 173 189 192 194 196 203

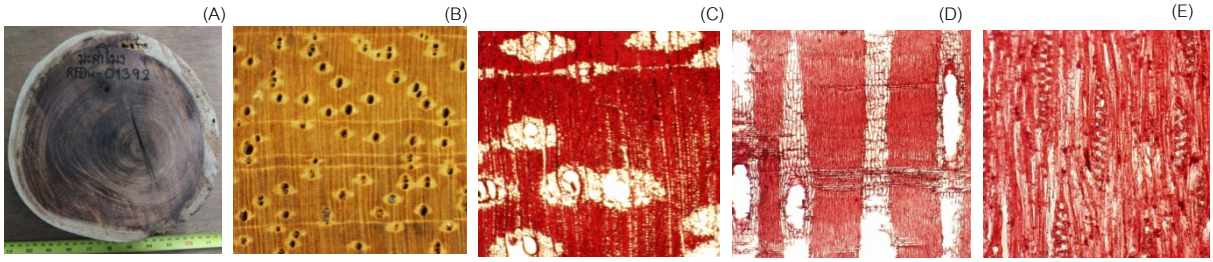



**Fig. 2** Anatomical features of *A. xylocarpa*: (A) cross section 1x; (B) cross section 10x; (C) cross section 15x; (D) radial section; (E) tangential section

*ตัวอย่างผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างไม้กันเกรา (Fagraea fragrans) วงศ์ GENTIANACEAE (Fig. 3)*

Anatomical Features : 1 2 5 10 13 22 23 26 27 29 32 35 42 43 46 47 53 56 61 66 69 70 72 76 79 85 86 91 92 96 102 106 107 108 109 116

Non-anatomical information : 168 169 170 171 172 173 189 192 194 195 196v 197 199

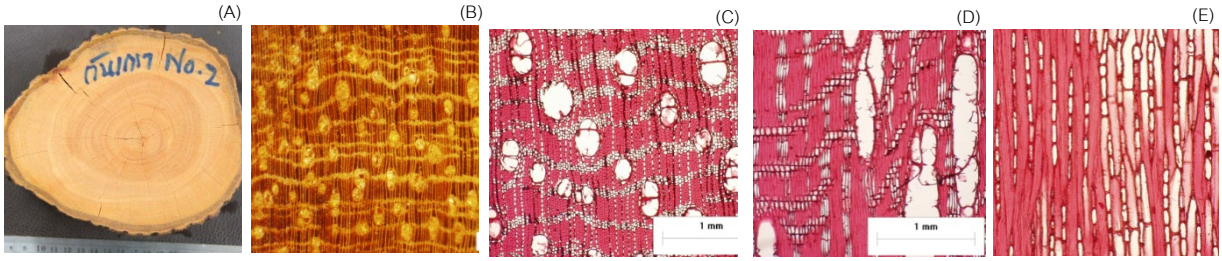



**Fig. 3** Anatomical features of *F. fragrans*: (A) cross section 1x; (B) cross section 10x; (C) cross section 15x; (D) radial section; (E) tangential section

## สรุป

การศึกษากายวิภาคและการตรวจพิสูจน์ของไม้ จำนวน 100 ชนิด จากผลการศึกษา สรุปว่าลักษณะโครงสร้างของไม้จำนวน 100 ชนิด แบ่งออกเป็น 71 สกุล (genus) 22 วงศ์ (families) มีลักษณะโครงสร้างเซลล์เนื้อไม้แตกต่างกันในแต่ละชนิดไม้ ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการตรวจจำแนกชนิดไม้จากเนื้อไม้อย่างละเอียดและใช้เป็นข้อมูลฐานความรู้สำหรับการศึกษาด้านคุณสมบัติไม้

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณผู้อำนวยการสำนักวิจัยและพัฒนาการป่าไม้ กรมป่าไม้ ข้าราชการ และพนักงานราชการ ที่เกี่ยวข้องในการเก็บรวบรวมข้อมูล

**เอกสารอ้างอิง**

ณรงค์ โทณานนท์. 2527. ไม้ต่างประเทศบางชนิดที่ใช้ก่อสร้างในประเทศไทย. กองวิจัยผลิตผลป่าไม้, กรมป่าไม้. กรุงเทพฯ.

พงศ์ โสโน. 2513. ชนิดไม้ที่เหมาะสมสำหรับงานก่อสร้าง, กองวิจัยผลิตผลป่าไม้ กรมป่าไม้ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ กรุงเทพฯ.

IAWA Committee. 1989. IAWA List of Microscopic Features for Hardwood Identification. International Association of Wood Anatomists at the National Herbarium. the Netherlands.

## รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ

**สาขาวิทยาศาสตร์: ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน**

1. รศ.ดร.ปกรณ์ วรรธณอมร ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
2. รศ.ดร.วันชัย ปลื้มภาณุภัทร ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
3. ผศ.ดร.วิชชา อิ่มอร่าม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
4. รศ.ดร.กรรณิการ์ ดวงมาลย์ ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์
5. รศ.ดร.นันทนา สีสุข ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์
6. ผศ.ดร.ชนิตา บุญมาก ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์
7. ผศ.ดร.พิชามญชุ์ เกียรติวุฒินนท์ ภาควิชาชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์
8. ศ.ดร.อรินทิพย์ ธรรมชัยพิเนต ภาควิชาพันธุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
9. รศ.ดร.วรรณรดา สุราช ภาควิชาพันธุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
10. รศ.ดร.อัญชณี คูเบอร่า ภาควิชาพันธุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
11. รศ.ดร.อัญชลี ศิริขจรกิจ ภาควิชาพันธุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
12. รศ.ดร.อุไรวรรณ อรัญวาสน์ ภาควิชาพันธุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
13. ผศ.ดร.ธีรศักดิ์ เอโกบล ภาควิชาพันธุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
14. ผศ.ดร.มิ่งขวัญ นิพิฐวัธนะผล ภาควิชาพันธุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
15. รศ.ดร.ชัยยะ เหลืองวิริยะ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
16. รศ.ดร.พงศกร จันทรัตน์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
17. รศ.ดร.ภาสกร ปนานนท์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์พื้นพิภพ คณะวิทยาศาสตร์
18. ดร.กัญจน์นรี ช่วงฉ่ำ ภาควิชาวิทยาศาสตร์พื้นพิภพ คณะวิทยาศาสตร์
19. ศ.ดร.วสกร บัลลังก์โพธิ์ ภาควิชาสัตววิทยา คณะวิทยาศาสตร์

## Editorial Board

**Subject: Science (Internal)**

1. Assoc.Prof.Dr.Pakorn Wattana-Amorn
2. Assoc.Prof.Dr.Wanchai Pluempanupat
3. Asst.Prof.Dr.Witcha Imaram
4. Assoc.Prof.Dr.Kannika Duangmal
5. Assoc.Prof.Dr.Nantana Srisuk
6. Asst.Prof.Dr.Chanita Boonmak
7. Asst.Prof.Dr.Pichamon Kiatwuthinon
8. Prof.Dr.Arinthip Thamchaipenet
9. Assoc.Prof.Dr.Wunrada Surat
10. Assoc.Prof.Dr.Anchanee Cubera
11. Assoc.Prof.Dr.Anchalee Sirikhachornkit
12. Assoc.Prof.Dr.Uraiwan Arunyawat
13. Asst.Prof.Dr.Teerasak E-kobon
14. Asst.Prof.Dr.Mingkwan Nipitwattanaphon
15. Assoc.Prof.Dr.Chaiya Luengviriya
16. Assoc.Prof.Dr.Pongsakorn Jantaratana
17. Assoc.Prof.Dr.Passakorn Pananont
18. Dr.Kannaree Chuangcham
19. Prof.Dr.Vasakorn Bullangpoti

**สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์: ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน**

| | |
|---|---|
| 1. รศ.ดร.นวลวรรณ ทวยเจริญ | ภาควิชานวัตกรรมอาคาร คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ |
| 2. ศ.ดร.สุวัฒนา จิตตลดากร | ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ |
| 3. รศ.สุรชัย ลิปิวัฒนาการ | ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ |
| 4. รศ.ดร.กฤษณะ ไวยมัย | ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ |
| 5. ผศ.ดร.ธนาวินท์ รักธรรมานนท์ | ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ |
| 6. ศ.ดร.วุฒิพงศ์ อารีกุล | ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ |
| 7. รศ.ดร.เอกชัย ไพศาลกิตติสกุล | ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ |
| 8. รศ.ดร.มิติ รุจานุรักษ์ | ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ |
| 9. รศ.ดร.เชาวลิต มิตรสันติสุข | ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ |
| 10. รศ.ดร.ดุลย์พิเชษฐ์ ฤกษ์ปรีดาพงศ์ | ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ |
| 11. รศ.ดร.อภิชาติ โรจนโรวรรณ | ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ |
| 12. ผศ.ดร.อมรรัตน์ เลิศวรสิริกุล | ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ |
| 13. ผศ.ดร.นเร ผิวนิ่ม | ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ |
| 14. รศ.ดร.วีรชัย ชัยวรพฤกษ์ | ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ |
| 15. ผศ.ดร.เฉลิมพล เปล่งสะอาด | ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ |
| 16. ศ.ดร.พงศ์ศักดิ์ หนูพันธ์ | ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ |
| 17. รศ.ดร.เฉลิมราช วันทวิน | ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ |
| 18. รศ.ดร.รัฐชา ชัยชนะ | ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม |
| 19. รศ.ดร.อภินิติ โชติสังกาศ | ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ |
| 20. รศ.รอ.พิพัฒน์ สอนวงษ์ | ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ |
| 21. รศ.ดร.สันติ ชินานุวัติวงศ์ | ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ |
| 22. รศ.ดร.สุธาริน สถาปิตานนท์ | ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ |
| 23. รศ.ดร.ปิยนุช เวทย์วิวรณ์ | ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ |
| 24. ผศ.ดร.จักรพันธ์ เทือกต๊ะ | ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ |
| 25. ผศ.พท.ดร.สรวิศ สุภเวชย์ | ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ |

**สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์: ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก**

| | |
|---|---|
| 1. รศ.ดร.ศศิมา เจริญกิจ | ภาควิชาสถาปัตยกรรม คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการออกแบบ<br>มหาวิทยาลัยนเรศวร |
| 2. รศ.ดร.วนารัตน์ กรอสิรานุกูล | สาขาวิชาเทคโนโลยีเพื่อการพัฒนาอย่างยั่งยืน<br>คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| 3. ผศ.เชาวนันต์ จำเริญ | สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมการวัดคุมและอัตโนมัติ<br>คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |

| | |
|---|---|
| 4. ผศ.ดร.อัญรัตน์ วัฒนพานิช | ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล |
| 5. ผศ.ดร.ชัยพร ศิลาวัชนาไนย | ภาควิชาครุศาสตร์เครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 6. ผศ.ดร.กรีฑา สมเกียรติกุล | สาขาวิศวกรรมการผลิตยานยนต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์ |
| 7. ดร.ชูตระกูล ศิริไพบูลย์ | สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยมหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช |
| 8. รศ.ดร.ศุวศา กานตวนิชกูร | ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ |
| 9. รศ.ดร.ภารดี ช่วยบำรุง | ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| 10. ดร.สุเมธ วงศ์เขียว | ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 11. ดร.อภิวรรธน์ โชติสังกาศ | กลุ่มสำรวจข้อมูลการจราจรและขนส่ง สำนักอำนวยความปลอดภัย กรมทางหลวง |

## Editorial Board

**Subject: Engineering and Architecture (Internal)**

1. Assoc.Prof.Dr.Nuanwan Tuaycharoen
2. Prof.Dr.Suwatana Chittaladakorn
3. Assoc.Prof.Surachai Lipiwattanakarn
4. Assoc.Prof.Dr.Kitsana Waiyamai
5. Asst.Prof.Dr.Thanawin Rakthanmanon
6. Prof.Dr.Vutipong Areekul
7. Assoc.Prof.Dr.Ekachai Phaisangittisagul
8. Assoc.Prof.Dr.Miti Ruchanurucks
9. Assoc.Prof.Dr.Chowarit Mitsantisuk
10. Assoc.Prof.Dr.Dulpichet Rerkpreedapong
11. Assoc.Prof.Dr.Aphichart Rodchanarowan
12. Asst.Prof.Dr.Amornrat Lertworasirikul
13. Asst.Prof.Dr.Naray Pewnim
14. Assoc.Prof.Dr.Weerachai Chaiworapuek
15. Asst.Prof.Dr.Chalermpon Plengsa-Ard
16. Prof.Dr.Pongsak Noophan
17. Assoc.Prof.Dr.Chalermraj Wantawin
18. Assoc.Prof.Dr.Ratcha Chaichana
19. Assoc.Prof.Dr.Apiniti Jotisankasa
20. Assoc.Prof.Flight Lieutenant Piphat Sornwong
21. Assoc.Prof.Dr.Santi Chinanuwatwong
22. Assoc.Prof.Dr.Sutharin Sthapitanonda
23. Assoc.Prof.Dr.Piyanut Wethyavivorn
24. Asst.Prof.Dr.Chakrapan Tuakta
25. Asst.Prof. Lieutenant Colonel Dr.Soravis Supavetch

**Subject: Engineering and Architecture (External)**

1. Assoc.Prof.Dr.Sasima Charoenkit
2. Assoc.Prof.Dr.Wanarat Konisranukul
3. Asst.Prof.Chaowanan Jamroen
4. Asst.Prof.Dr.Anyarat Watthanaphanit
5. Asst.Prof.Dr.Chaiyaporn Silawatchananai
6. Asst.Prof.Dr.Kreetha Somkeattikul

7. Dr.Chootrakul Siripaiboon
8. Prof.Dr.Suwasa Kantawanichkul
9. Prof.Dr.Paradee Chauybamroong
10. Dr.Sumeth Wongkiew
11. Dr.Apivat Jotisankasa

## รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ

**สาขาอุตสาหกรรมเกษตร: ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน**

| | |
|---|---|
| 1. รศ.ดร.กมลวรรณ แจ้งชัด | ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร |
| 2. ผศ.ดร.เทพกัญญา หาญศีลวัต | ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร |
| 3. รศ.ดร.นพรัตน์ ปราบสงบ | ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร |
| 4. รศ.ดร.วรรณสวัสดิ์ รัฐพิทักษ์สันติ | ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร |
| 5. ผศ.ดร.วิษฐิดา จันทราพรชัย | ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร |
| 6. รศ.ดร.หทัยรัตน์ ริมคีรี | ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร |
| 7. ผศ.ดร.อุศมา สุนทรนฤรังษี | ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร |
| 8. ผศ.ดร.กฤษกมล ณ จอม | ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร |
| 9. รศ.ดร.น้ำฝน ลำดับวงศ์ | ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร |
| 10. ผศ.ดร.มาศอุบล ทองงาม | ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร |
| 11. ดร.วรรธินี เกตุคง | ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร |
| 12. ผศ.ดร.วศะพร เพรททิเซย์ จันทร์พุฒ | ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร |
| 13. รศ.ดร.วีรเชษฐ์ จิตตาณิชย์ | ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร |
| 14. รศ.ดร.สิริชัย ส่งเสริมพงษ์ | ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร |
| 15. ผศ.ดร.สุดาทิพย์ แซ่ตั้น | ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร |
| 16. รศ.ดร.อุทัย กลิ่นเกษร | ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร |
| 17. รศ.ดร.มัสลิน นาคไพจิตร | ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร |
| 18. รศ.ดร.สุทธิพันธุ์ แก้วสมพงษ์ | ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร |
| 19. ดร.คุณาลัย พลอยดนัย | ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร |
| 20. ผศ.ดร.จุมพล วรสายัณห์ | ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร |
| 21. รศ.ดร.ธนโชติ บุญวรโชติ | ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร |
| 22. ดร.นันธวุฒิ ลือมรสิริ | ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร |
| 23. ผศ.วัชรพงศ์ เลิศสุรวัฒน์ | ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร |
| 24. ผศ.ดร.อภิชญา ลีลาวณิชกุล | ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร |
| 25. รศ.ดร.ธัญญารัตน์ จิญกาญจน์ | ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ คณะอุตสาหกรรมเกษตร |
| 26. ดร.อุรุชยา สนแจ้ง | ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ คณะอุตสาหกรรมเกษตร |
| 27. รศ.ดร.จันทร์ทิพย์ เศรษฐยานนท์ | ภาควิชาวิทยาการสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมเกษตร |
| 28. ผศ.ดร.พรรณภัทร พรหมเพ็ญ | ภาควิชาวิทยาการสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมเกษตร |
| 29. ดร.ธิดารัตน์ พันโท | ฝ่ายเคมีและกายภาพอาหาร สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร |

30. น.ส.ประจงเวท สาตมาลี — ฝ่ายเคมีและกายภาพอาหาร สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร

31. นายพิสุทธิ์ บุตรสุวรรณ — ฝ่ายกระบวนการผลิตและแปรรูป
สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร

32. ดร.วิชชา ตรีสุวรรณ — ฝ่ายโภชนาการและสุขภาพ
สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร

**สาขาอุตสาหกรรมเกษตร: ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก**

1. ผศ.ดร.เกียรติศักดิ์ ดวงมาลย์ — ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2. รศ.ดร.ขนิษฐา ธนานุวงศ์ — ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3. ผศ.ดร.พนิตา งามเชื้อชิต — ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4. รศ.ดร.จิรวรรณ อภิรักษากร — สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น

5. ผศ.ดร.ปริตา ธนสุกาญจน์ — ภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร
คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยนเรศวร

6. รศ.ดร.ปริศนา สุวรรณาภรณ์ — ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร
คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
(อาจารย์เกษียณ)

7. ดร.ปาริฉัตร หงสประภาส — ฟู้ดอินโนเวท

8. รศ.ดร.วลัยลักษณ์ อัตธีรวงศ์ — ภาควิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

9. ดร.ศรภัทร นิยมสินธุ์ — วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

10. ผศ.ดร.ศิรินันท์ แก่นทอง — ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร

11. ผศ.ดร.สุธีรา วัฒนกุล — สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

## Editorial Board

**Subject: Agro-Industry (Internal)**

1. Assoc.Prof.Dr.Kamolwan Jangchud
2. Asst.Prof.Dr.Thepkunya Harnsilawat
3. Assoc.Prof.Dr.Nopparat Prabsangob
4. Assoc.Prof.Dr.Wannasawat Ratphitagsanti
5. Asst.Prof.Dr.Withida Chantrapornchai
6. Assoc.Prof.Dr.Hathairat Rimkeeree

7. Asst.Prof.Dr.Aussama Soontrunnarudrungsri
8. Asst.Prof.Dr.Kriskamol Na Jom
9. Assoc.Prof.Dr.Namfone Lumdubwong
10. Asst.Prof.Dr.Masubon Thongngam
11. Dr.Wattinee Katekhong
12. Asst.Prof.Dr.Wasaporn Preteseille Chanput
13. Assoc.Prof.Dr.Weerachet Jittanit
14. Assoc.Prof.Dr.Sirichai Songsermpong
15. Asst.Prof.Dr.Sudathip Sae-Tan
16. Assoc.Prof.Dr.Utai Klinkesorn
17. Assoc.Prof.Dr.Massalin Nakphaichit
18. Assoc.Prof.Dr.Suttipun Keawsompong
19. Dr.Kunalai Ploydanai
20. Asst.Prof.Dr.Jumpol Vorasayan
21. Assoc.Prof.Dr.Tanachote Boonvorachote
22. Dr.Nantawut Leeamornsiri
23. Asst.Prof.Watcharaphong Leartsurawat
24. Asst.Prof.Dr.Apichaya Lilavanichakul
25. Assoc.Prof.Dr.Tunyarut Jinkarn
26. Dr.Uruchaya Sonchaeng
27. Assoc.Prof.Dr.Jantip Setthayanond
28. Asst.Prof.Dr.Phannaphat Phromphen
29. Dr.Thidarat Pantoa
30. Miss Prajongwate Satmalee
31. Mr.Pisut Butsuwan
32. Dr.Witcha Treesuwan

Subject: Agro-Industry (External)

1. Asst.Prof.Dr.Kiattisak Duangmal
2. Assoc.Prof.Dr.Kanitha Tananuwong
3. Asst.Prof.Dr.Panita Ngamchuachit
4. Assoc.Prof.Dr.Jirawan Apiraksakorn
5. Asst.Prof.Dr.Parita Thanasukarn
6. Assoc.Prof.Dr.Prisana Suwannaporn
7. Dr.Parichat Hongsprabhas
8. Assoc.Prof.Dr.Walailak Atthirawong
9. Dr.Sorapat Niyomsin
10. Asst.Prof.Dr.Sirinun Keanthong
11. Asst.Prof.Dr.Suteera Vatthanakul

## รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ

**สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม: ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน**

| | |
|---|---|
| 1. รศ.ดร.ชลอ จารุสุทธิรักษ์ | ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม |
| 2. รศ.ดร.รัฐชา ชัยชนะ | ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม |
| 3. ผศ.ดร.ธัญภัสสร์ ทองเย็น | ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม |
| 4. ผศ.ดร.ประไพพิศ ชัยรัตนมโนกร | ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม |
| 5. ผศ.ดร.ปวีร์ คล่องเวสสะ | ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม |
| 6. ดร.ปิยาภรณ์ สมสมัคร | ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม |
| 7. ดร.มณีกาญจน์ อยู่เอี่ยม | ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม |
| 8. ดร.แอน กำภู ณ อยุธยา | ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม |
| 9. รศ.ดร.สุรัตน์ บัวเลิศ | ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม |
| 10. ผศ.ดร.ธนิศร์ ปัทมพิฑูร | ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม |
| 11. ผศ.ดร.นพวรรณ เสมวิมล | ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม |

12. ผศ.ดร.ภาคภูมิ ชูมณี ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
13. ผศ.ดร.วัชรพงษ์ วาระรัมย์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
14. ผศ.ดร.สุธี จรรยาสุทธิวงศ์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
15. ผศ.ดร.อรอนงค์ ผิวนิล ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
16. ดร.กิตติชัย ดวงมาลย์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
17. ดร.ภาคิน มาสกุลรัตน์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
18. รศ.ดร.สุชาติ เหลืองประเสริฐ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
19. รศ.ดร.นิสา เหล็กสูงเนิน ภาควิชาชีววิทยาป่าไม้ คณะวนศาสตร์
20. ดร.ฉัตรพรรษ พงษ์เจริญ ภาควิชาชีววิทยาป่าไม้ คณะวนศาสตร์
21. รศ.ดร.สาพิศ ดิลกสัมพันธ์ ภาควิชาวนวัฒนวิทยา คณะวนศาสตร์
22. ผศ.ดร.กฤษฎาพันธุ์ ผลากิจ ภาควิชาการจัดการป่าไม้ คณะวนศาสตร์
23. ผศ.ดร.ไตรรัตน์ เนียมสุวรรณ ภาควิชาวนผลิตภัณฑ์ คณะวนศาสตร์
24. ดร.นรินธร จำวงษ์ ศูนย์วิจัยป่าไม้ คณะวนศาสตร์

**สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม: ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก**

1. รศ.ดร.ต่อลาภ คำโย สาขาวิชาเกษตรป่าไม้ มหาวิทยาลัยแม่โจ้-แพร่ เฉลิมพระเกียรติ
2. รศ.ดร.รัตนวัฒน์ ไชยรัตน์ คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
3. ผศ.ดร.สุธีระ เหิมฮึก คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้
4. ดร.โดม ประทุมทอง สำนักวิชาการพิพิธภัณฑ์ธรรมชาติวิทยา องค์การพิพิธภัณฑ์วิทยาศาสตร์แห่งชาติ
5. ดร.วรพรรณ หิมพานต์ สำนักวิจัยการจัดการป่าไม้และผลิตผลป่าไม้ กรมป่าไม้

Editorial Board

Subject: Natural Resources and Environment (Internal)

1. Assoc.Prof.Dr.Chalor Jarusutthirak
2. Assoc.Prof.Dr.Ratcha Chaichana
3. Asst.Prof.Dr.Thunyapat Thongyen
4. Asst.Prof.Dr.Prapaipid Chairattanamanokorn
5. Asst.Prof.Dr.Pawee Klongvessa
6. Dr.Piyapawn Somamak
7. Dr.Maneekarn Yoo-iam
8. Dr.Ann Kambhu Na Ayudhya
9. Assoc.Prof.Dr.Surat Bualert
10. Asst.Prof.Dr.Thanit Pattamaptoon
11. Asst.Prof.Dr.Noppawan Semvimol
12. Asst.Prof.Parkpoom Choomanee
13. Asst.Prof.Dr.Watcharapong Wararam
14. Asst.Prof.Dr.Suthee Janyasuthiwong
15. Asst.Prof.Dr.Onanong Phewnil
16. Dr.Kittichai Duangmal
17. Dr.Parkin Maskulrath
18. Assoc.Prof.Dr.Suchat Leungprasert
19. Assoc.Prof.Dr.Nisa Leksungnoen
20. Dr.Chattraphas Pongcharoen
21. Assoc.Prof.Dr.Sapit Diloksumpun
22. Asst.Prof.Dr.Kritsadapan Palakit
23. Asst.Prof.Dr.Trairat Neimsuwan
24. Dr.Narinthorn Jumwong

Subject: Natural Resources and Environment (External)

1. Assoc.Prof.Dr.Torlarp Kamyo
2. Assoc.Prof.Dr.Rattanawat Chaiyarat
3. Asst.Prof.Dr.Sutheera Hermhuk
4. Dr.Dome Pratumtong
5. Dr.Woraphun Himmapan

ประกาศมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เรื่อง แต่งตั้งคณะกรรมการจัดการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ ๖๒ ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

---

ด้วยมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ร่วมกับกระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม กระทรวงดิจิทัล เพื่อเศรษฐกิจและสังคม กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม กระทรวงศึกษาธิการ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ มหาวิทยาลัยกลุ่มเครือข่ายวิจัยประชาชื่น สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ และสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม จัดให้มีการประชุมทางวิชาการครั้งที่ ๖๒ ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปีพุทธศักราช ๒๕๖๗ มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอผลงานวิจัย แลกเปลี่ยนความรู้ความคิดเห็น ประสบการณ์ และเพื่อเผยแพร่ผลงานวิจัยสาขาต่างๆ สู่สาธารณชน

เพื่อให้การประชุมทางวิชาการครั้งที่ ๖๒ ดำเนินไปด้วยความเรียบร้อยและบรรลุผลสำเร็จตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์จึงแต่งตั้งคณะกรรมการจัดการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ ๖๒ ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ดังต่อไปนี้

**คณะกรรมการอำนวยการจัดการประชุมทางวิชาการ**

| | | |
|---|---|---|
| ๑. | นายกสภามหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ | ที่ปรึกษา |
| ๒. | ปลัดกระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม | ที่ปรึกษา |
| ๓. | ปลัดกระทรวงดิจิทัลเพื่อเศรษฐกิจและสังคม | ที่ปรึกษา |
| ๔. | ปลัดกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม | ที่ปรึกษา |
| ๕. | ปลัดกระทรวงศึกษาธิการ | ที่ปรึกษา |
| ๖. | ปลัดกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ | ที่ปรึกษา |
| ๗. | ผู้อำนวยการสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์วิจัยและนวัตกรรม | ที่ปรึกษา |
| ๘. | ผู้อำนวยการสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ | ที่ปรึกษา |
| ๙. | ประธานกลุ่มมหาวิทยาลัยเครือข่ายวิจัยประชาชื่น | ที่ปรึกษา |
| ๑๐. | อธิบดีกรมการข้าว | ที่ปรึกษา |
| ๑๑. | อธิบดีกรมชลประทาน | ที่ปรึกษา |
| ๑๒. | อธิบดีกรมประมง | ที่ปรึกษา |
| ๑๓. | อธิบดีกรมพัฒนาที่ดิน | ที่ปรึกษา |
| ๑๔. | อธิบดีกรมส่งเสริมการเกษตร | ที่ปรึกษา |

| | | |
|---|---|---|
| ๑๕. | อธิบดีกรมวิชาการเกษตร | ที่ปรึกษา |
| ๑๖. | อธิบดีกรมป่าไม้ | ที่ปรึกษา |
| ๑๗. | อธิบดีกรมควบคุมมลพิษ | ที่ปรึกษา |
| ๑๘. | อธิบดีกรมทรัพยากรธรณี | ที่ปรึกษา |
| ๑๙. | อธิบดีกรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง | ที่ปรึกษา |
| ๒๐. | อธิบดีกรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม | ที่ปรึกษา |
| ๒๑. | ผู้อำนวยการสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ | ที่ปรึกษา |
| ๒๒. | นายกสมาคมนิสิตเก่ามหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ | ที่ปรึกษา |
| ๒๓. | ผู้อำนวยการสถาบันสุขภาพสัตว์แห่งชาติ กรมปศุสัตว์ | ที่ปรึกษา |
| ๒๔. | ผู้เชี่ยวชาญด้านการพัฒนาธุรกิจสหกรณ์ กรมส่งเสริมสหกรณ์ | ที่ปรึกษา |
| ๒๕. | รักษาการในตำแหน่งผู้เชี่ยวชาญเฉพาะด้านวิจัยการอนุรักษ์ป่าไม้ กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช | ที่ปรึกษา |
| ๒๖. | อธิการบดีมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ | ประธานกรรมการ |
| ๒๗. | รองอธิการบดีฝ่ายวิจัยและสร้างสรรค์ | รองประธานกรรมการ |
| ๒๘. | รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ | รองประธานกรรมการ |
| ๒๙. | รองอธิการบดีฝ่ายบริหาร | กรรมการ |
| ๓๐. | รองอธิการบดีฝ่ายเทคโนโลยีดิจิทัล | กรรมการ |
| ๓๑. | รองอธิการบดีฝ่ายนวัตกรรมและกิจการเพื่อสังคม | กรรมการ |
| ๓๒. | รองอธิการบดีฝ่ายกิจการนิสิตและพัฒนาอย่างยั่งยืน | กรรมการ |
| ๓๓. | รองอธิการบดีฝ่ายพัฒนาคุณภาพ | กรรมการ |
| ๓๔. | รองอธิการบดีฝ่ายการเงินและทรัพย์สิน | กรรมการ |
| ๓๕. | รองอธิการบดีฝ่ายวิเทศสัมพันธ์ | กรรมการ |
| ๓๖. | รองอธิการบดีฝ่ายกิจการสภามหาวิทยาลัยและพัฒนาทรัพยากรมนุษย์ | กรรมการ |
| ๓๗. | รองอธิการบดีฝ่ายพัฒนาบัณฑิตขั้นสูงและโครงการจัดตั้งวิทยาเขตสุพรรณบุรี | กรรมการ |
| ๓๘. | รองอธิการบดีวิทยาเขตกำแพงแสน | กรรมการ |
| ๓๙. | รองอธิการบดีวิทยาเขตศรีราชา | กรรมการ |
| ๔๐. | รองอธิการบดีวิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร | กรรมการ |
| ๔๑. | คณบดีคณะเกษตร | กรรมการ |
| ๔๒. | คณบดีคณะประมง | กรรมการ |
| ๔๓. | คณบดีคณะสัตวแพทยศาสตร์ | กรรมการ |

| | | |
|---|---|---|
| ๔๔. | คณบดีคณะเทคนิคการสัตวแพทย์ | กรรมการ |
| ๔๕. | คณบดีคณะวิทยาศาสตร์ | กรรมการ |
| ๔๖. | คณบดีคณะสิ่งแวดล้อม | กรรมการ |
| ๔๗. | คณบดีคณะวนศาสตร์ | กรรมการ |
| ๔๘. | คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ | กรรมการ |
| ๔๙. | คณบดีคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ | กรรมการ |
| ๕๐. | คณบดีคณะอุตสาหกรรมเกษตร | กรรมการ |
| ๕๑. | คณบดีคณะเศรษฐศาสตร์ | กรรมการ |
| ๕๒. | คณบดีคณะบริหารธุรกิจ | กรรมการ |
| ๕๓. | คณบดีคณะศึกษาศาสตร์ | กรรมการ |
| ๕๔. | คณบดีคณะสังคมศาสตร์ | กรรมการ |
| ๕๕. | คณบดีคณะมนุษยศาสตร์ | กรรมการ |
| ๕๖. | คณบดีคณะแพทยศาสตร์ | กรรมการ |
| ๕๗. | คณบดีคณะพยาบาลศาสตร์ | กรรมการ |
| ๕๘. | คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย | กรรมการ |
| ๕๙. | ผู้อำนวยการสำนักหอสมุด | กรรมการ |
| ๖๐. | ผู้อำนวยการสำนักพัฒนาการเรียนรู้ตลอดชีวิต | กรรมการ |
| ๖๑. | ผู้อำนวยการสำนักบริการคอมพิวเตอร์ | กรรมการ |
| ๖๒. | นายกสมาคมเมล็ดพันธุ์แห่งประเทศไทย | กรรมการ |
| ๖๓. | นายกสมาคมนักวิชาการอ้อยและน้ำตาลแห่งประเทศไทย | กรรมการ |
| ๖๔. | นายกสมาคมวิทยาศาสตร์เกษตรในพระบรมราชูปถัมภ์ | กรรมการ |
| ๖๕. | นายกสมาคมดินและปุ๋ยแห่งประเทศไทย | กรรมการ |
| ๖๖. | นายกสมาคมนักโรคพืชแห่งประเทศไทย | กรรมการ |
| ๖๗. | นายกสมาคมสภาวิชาการอุตสาหกรรมเกษตร | กรรมการ |
| ๖๘. | นายกสมาคมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีทางอาหารแห่งประเทศไทย | กรรมการ |
| ๖๙. | นายกสัตวแพทยสภา | กรรมการ |
| ๗๐. | นายกสัตวแพทยสมาคมแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ | กรรมการ |
| ๗๑. | ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ | กรรมการและเลขานุการ |
| ๗๒. | รองผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ฝ่ายบริหาร | กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |
| ๗๓. | หัวหน้าสำนักงานเลขานุการ สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ | กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |
| ๗๔. | นางสาวพิชชาอรฐ์ สิริชีวเกษร | กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |

โดยให้คณะกรรมการชุดนี้มีหน้าที่ ให้ข้อคิดเห็นและอำนวยการให้การจัดการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ ๖๒ ดำเนินไปด้วยความเรียบร้อย

**คณะกรรมการฝ่ายวิชาการ**

| | |
|---|---|
| ๑. รองอธิการบดีฝ่ายวิจัยและสร้างสรรค์ | ที่ปรึกษา |
| ๒. รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ | ที่ปรึกษา |
| ๓. ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ | ที่ปรึกษา |
| ๔. รองผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ฝ่ายบริหาร | ประธานกรรมการ |
| ๕. นายปิยวัตน์ ดิลกสัมพันธ์ | รองประธานกรรมการ |
| ๖. นางสาวพิชชาอรฐ์ สิริชีวเกษร | กรรมการและเลขานุการ |
| ๗. นางสาวกัญญารัตน์ สุวรรณทีป | ผู้ช่วยเลขานุการ |
| ๘. นางสาวพัชราภา รัตนวิญญูภิรมย์ | ผู้ช่วยเลขานุการ |

**๙. กรรมการหมวดวิชาการเกษตรศาสตร์**

**๙.๑ สาขาพืช**

| | |
|---|---|
| ๑. คณบดีคณะเกษตร | ที่ปรึกษา |
| ๒. รองศาสตราจารย์พัชรียา บุญกอแก้ว | ประธานกรรมการ |
| ๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิจิตรา แก้วสอน | รองประธานกรรมการ |
| ๔. รองศาสตราจารย์เฉลิมพล ภูมิไชย์ | กรรมการ |
| ๕. รองศาสตราจารย์ชูศักดิ์ จอมพุก | กรรมการ |
| ๖. รองศาสตราจารย์ธิดา เดชฮวบ | กรรมการ |
| ๗. รองศาสตราจารย์เนตรนภิส เขียวขำ | กรรมการ |
| ๘. รองศาสตราจารย์ปิติพงษ์ โตบันลือภพ | กรรมการ |
| ๙. รองศาสตราจารย์วรชาติ วิศวพิพัฒน์ | กรรมการ |
| ๑๐. รองศาสตราจารย์ศุภธิดา อับดุลลากาซิม | กรรมการ |
| ๑๑. รองศาสตราจารย์สุตเขตต์ นาคะเสถียร | กรรมการ |
| ๑๒. รองศาสตราจารย์อรอุมา เพียซ้าย | กรรมการ |
| ๑๓. รองศาสตราจารย์เสาวนุช ถาวรพฤกษ์ | กรรมการ |
| ๑๔. รองศาสตราจารย์อัศเลข รัตนวรรณี | กรรมการ |
| ๑๕. รองศาสตราจารย์เอกพันธ์ ไกรจักร์ | กรรมการ |
| ๑๖. ผู้ช่วยศาสตราจารย์กาญจนา บุญเรือง | กรรมการ |
| ๑๗. ผู้ช่วยศาสตราจารย์จรีรัตน์ ฉันทวุฒิพร | กรรมการ |
| ๑๘. ผู้ช่วยศาสตราจารย์จุฑามาศ ร่มแก้ว | กรรมการ |

๑๙. ผู้ช่วยศาสตราจารย์จุติภรณ์ ทัสสกุลพนิช กรรมการ
๒๐. ผู้ช่วยศาสตราจารย์เจนจิรา ชุมภูคำ กรรมการ
๒๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์เฉลิมชาติ วงศ์ลี้เจริญ กรรมการ
๒๒. ผู้ช่วยศาสตราจารย์เฌอมาลย์ วงศ์ชาวจันท์ กรรมการ
๒๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ดำรงวุฒิ อ่อนวิมล กรรมการ
๒๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ทรงยศ โชติชุติมา กรรมการ
๒๕. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ทัศไนย จารุวัฒนพันธ์ กรรมการ
๒๖. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธนพล ไชยแสน กรรมการ
๒๗. ผู้ช่วยศาสตราจารย์นพ ตัณมุขยกุล กรรมการ
๒๘. ผู้ช่วยศาสตราจารย์เบญญา มะโนชัย กรรมการ
๒๙. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปริยานุช จุลกะ กรรมการ
๓๐. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปาริชาติ พรมโชติ กรรมการ
๓๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปวีณา ชื่นวาริน กรรมการ
๓๒. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปิยะ กิตติภาดากุล กรรมการ
๓๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปิยะณัฏฐ์ ผกามาศ กรรมการ
๓๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์เพชรดา ปินใจ กรรมการ
๓๕. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ภัศจี คงศีล กรรมการ
๓๖. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ภัสสร วรรณพินิจ กรรมการ
๓๗. ผู้ช่วยศาสตราจารย์รักศักดิ์ เสริมศักดิ์ กรรมการ
๓๘. ผู้ช่วยศาสตราจารย์รัชฎาวรรณ เงินกลั่น กรรมการ
๓๙. ผู้ช่วยศาสตราจารย์วีรชัย มัธยัสถ์ถาวร กรรมการ
๔๐. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมชัย อนุสนธิ์พรเพิ่ม กรรมการ
๔๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สราวุธ รุ่งเมฆารัตน์ กรรมการ
๔๒. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุจินต์ เจนวีรววัฒน์ กรรมการ
๔๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุพจน์ กาเซ็ม กรรมการ
๔๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรพงษ์ ดำรงกิตติกุล กรรมการ
๔๕. ผู้ช่วยศาสตราจารย์อนงค์นุช สาสนรักกิจ กรรมการ
๔๖. ผู้ช่วยศาสตราจารย์อัญมณี อาวุชานนท์ กรรมการ
๔๗. ผู้ช่วยศาสตราจารย์อัณณ์ชญาน์ มงคลชัยพฤกษ์ กรรมการ
๔๘. ผู้ช่วยศาสตราจารย์อารยา อาจเจริญ เทียนหอม กรรมการ
๔๙. ผู้ช่วยศาสตราจารย์อุดมศักดิ์ เลิศสุชาตวนิช กรรมการ
๕๐. ผู้ช่วยศาสตราจารย์วรรณสิริ วรรณรัตน์ กรรมการ
๕๑. นายเจตษฎา อุตรพันธ์ กรรมการ

๕๒. นางสาวนิตยา ชูเกาะ กรรมการ
๕๓. นางสาวอรุณี วงษ์แก้ว กรรมการ
๕๔. นางสาวภารดี ธรรมาภิชัย กรรมการ
๕๕. นายอภิเดช รักษ์เป็นไทย กรรมการ
๕๖. นางสาวสรัญญา จันทรวิวัฒน์ กรรมการและเลขานุการ
๕๗. นางสมจิตต์ สองบาง กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

**๙.๒ สาขาสัตว์**

๑. คณบดีคณะเกษตร ที่ปรึกษา
๒. นายกสมาคมสัตวบาลแห่งประเทศไทย ในพระราชูปถัมภ์ สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี ที่ปรึกษา
๓. รองศาสตราจารย์พรรณวดี โสพรรณรัตน์ ประธานกรรมการ
๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธนาทิพย์ สุวรรณโสภี รองประธานกรรมการ
๕. ศาสตราจารย์ชัยภูมิ บัญชาศักดิ์ กรรมการ
๖. รองศาสตราจารย์ศกร คุณวุฒิฤทธิรณ กรรมการ
๗. รองศาสตราจารย์วิริยา ลุ้งใหญ่ กรรมการ
๘. รองศาสตราจารย์ธีรวิทย์ เป่ยคำภา กรรมการ
๙. รองศาสตราจารย์ชาญวิทย์ แก้วตาปี กรรมการ
๑๐. ผู้ช่วยศาสตราจารย์อัจฉรา ขยัน กรรมการ
๑๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์กนกพร พ่วงพงษ์ กรรมการ
๑๒. ผู้ช่วยศาสตราจารย์เชาว์วิทย์ ระฆังทอง กรรมการ
๑๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์พงศ์ธร คงมั่น กรรมการ
๑๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นายสัตวแพทย์ สโรช แก้วมณี กรรมการ
๑๕. สัตวแพทย์หญิง มัธย์ฤน โล่ทอง กรรมการ
๑๖. นายสัตวแพทย์ เสวก เกียรติสมภพ กรรมการ
๑๗. นายดนัย จัตวา กรรมการ
๑๘. นายสมบัติ ประสงค์สุข กรรมการ
๑๙. นางสาวอัญชลี บวดขุนทด กรรมการ
๒๐. นางสาวนิภารัตน์ โคตะนนท์ กรรมการ
๒๑. นางสาวทิพย์มนต์ ใยเกษ กรรมการ
๒๒. นายพัลลภ ตั้งตระกูลทรัพย์ กรรมการ
๒๓. นางสาวพนัดดา บึงศรีสวัสดิ์ กรรมการและเลขานุการ
๒๔. นางสาว ก. ทีปลักษณ์ ระงับเหตุ กรรมการและเลขานุการ

| | |
|---|---|
| ๒๕. นางสาววัชราภรณ์ ศรีพลน้อย | กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |
| ๒๖. นางสาวสุภาพร ย้อนโคกสูง | กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |
| ๒๗. นางสาวพิจิตรา เปียธัญญา | กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |

**๙.๓ สาขาประมง**

| | |
|---|---|
| ๑. คณบดีคณะประมง | ที่ปรึกษา |
| ๒. ศาสตราจารย์อุทัยรัตน์ ณ นคร | ที่ปรึกษา |
| ๓. ศาสตราจารย์สุภาวดี พุ่มพวง | ที่ปรึกษา |
| ๔. ศาสตราจารย์เชษฐพงษ์ เมฆสัมพันธ์ | ที่ปรึกษา |
| ๕. รองศาสตราจารย์วันชัย วรวัฒนเมธีกุล | ประธานกรรมการ |
| ๖. หัวหน้าศูนย์บริหารงานวิจัยและสนับสนุนวิชาการ | กรรมการ |
| ๗. รองศาสตราจารย์อรพินท์ จินตสถาพร | กรรมการ |
| ๘. รองศาสตราจารย์วราห์ เทพาหุดี | กรรมการ |
| ๙. รองศาสตราจารย์ประพันธ์ศักดิ์ ศิรษะภูมิ | กรรมการ |
| ๑๐. รองศาสตราจารย์กังสดาลย์ บุญปราบ | กรรมการ |
| ๑๑. รองศาสตราจารย์จินตนา สและน้อย | กรรมการ |
| ๑๒. ผู้ช่วยศาสตราจารย์เมธี แก้วเนิน | กรรมการ |
| ๑๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์พัชรี ครูขยัน | กรรมการ |
| ๑๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สันติ พ่วงเจริญ | กรรมการ |
| ๑๕. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สาทิต ฉัตรชัยพันธ์ | กรรมการ |
| ๑๖. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุชาย วรชนะนันท์ | กรรมการ |
| ๑๗. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ถิรวัฒน์ รายรัตน์ | กรรมการ |
| ๑๘. นางสาวณัฏฐิกาฑ์ เหมภัทรสุวรรณ | กรรมการ |
| ๑๙. นายวชิระ ใจงาม | กรรมการ |
| ๒๐. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธนัสพงษ์ โภควนิช | กรรมการและเลขานุการ |
| ๒๑. นางสาวกาญจนา ทองเครือ | ผู้ช่วยเลขานุการ |
| ๒๒. นางสาวสุมิตตรา สุพรรณ์นอก | ผู้ช่วยเลขานุการ |

**๙.๔ สาขาสัตวแพทยศาสตร์**

| | |
|---|---|
| ๑. คณบดีคณะสัตวแพทยศาสตร์ | ที่ปรึกษา |
| ๒. รองคณบดีฝ่ายวิจัย คณะสัตวแพทยศาสตร์ | ที่ปรึกษา |
| ๓. รองศาสตราจารย์ นายสัตวแพทย์ อรรถวิทย์ โกวิทวที | ประธานกรรมการ |
| ๔. สัตวแพทย์หญิงพรสุชา พละเสวีนันท์ | กรรมการ |

| | | |
|---|---|---|
| ๕. | นายสัตวแพทย์ณัฐพงศ์ อัครินาจิรโชติ | กรรมการ |
| ๖. | นายวงศ์วิศว์ เจริญผล | กรรมการและเลขานุการ |
| ๗. | นางสาวญาดา หาญปัญญาพิชิต | กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |
| ๘. | นางสาววริศรา มารยาท | กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |

**๙.๕ สาขาส่งเสริมการเกษตรและคหกรรมศาสตร์**

| | | |
|---|---|---|
| ๑. | คณบดีคณะเกษตร | ที่ปรึกษา |
| ๒. | รองศาสตราจารย์สาวิตรี รังสิภัทร์ | ที่ปรึกษา |
| ๓. | รองศาสตราจารย์จำนงรักษ์ อุดมเศรษฐ์ | ที่ปรึกษา |
| ๔. | รองศาสตราจารย์พัฒนา สุขประเสริฐ | ที่ปรึกษา |
| ๕. | รองศาสตราจารย์ทัศนีย์ ลิ้มสุวรรณ | ที่ปรึกษา |
| ๖. | รองศาสตราจารย์สิริพันธุ์ จุลกรังคะ | ที่ปรึกษา |
| ๗. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุภาภรณ์ เลิศศิริ | ที่ปรึกษา |
| ๘. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์อัญชนีย์ อุทัยพัฒนาชีพ | ที่ปรึกษา |
| ๙. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ขจีจรัส ภิรมย์ธรรมศิริ | ที่ปรึกษา |
| ๑๐. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ทวีศักดิ์ เตชะเกรียงไกร | ที่ปรึกษา |
| ๑๑. | นางสาวศรันยา เผือกผ่อง | ที่ปรึกษา |
| ๑๒. | นางสาวนริศรา อินทะสิริ | ประธานกรรมการ |
| ๑๓. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์กานต์สุดา วันจันทึก | รองประธานกรรมการ |
| ๑๔. | รองศาสตราจารย์พิชัย ทองดีเลิศ | กรรมการ |
| ๑๕. | รองศาสตราจารย์พัชราวดี ศรีบุญเรือง | กรรมการ |
| ๑๖. | รองศาสตราจารย์สุธีลักษณ์ ไกรสุวรรณ | กรรมการ |
| ๑๗. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์พนามาศ ตรีวรรณกุล | กรรมการ |
| ๑๘. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุพัตรา ศรีสุวรรณ | กรรมการ |
| ๑๙. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธานินทร์ คงศิลา | กรรมการ |
| ๒๐. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชลาธร จูเจริญ | กรรมการ |
| ๒๑. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์เมตตา เร่งขวนขวาย | กรรมการ |
| ๒๒. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปพิชญา จินตพิทักษ์สกุล | กรรมการ |
| ๒๓. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปรีดา สามงามยา | กรรมการ |
| ๒๔. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์น้องนุช ศิริวงศ์ | กรรมการ |
| ๒๕. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริพร เรียบร้อย คิม | กรรมการ |
| ๒๖. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปาริสุทธิ์ เฉลิมชัยวัฒน์ | กรรมการ |
| ๒๗. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุจิตตา เรืองรัศมี | กรรมการ |

๒๘. ผู้ช่วยศาสตราจารย์อำพร แจ่มผล กรรมการ
๒๙. ผู้ช่วยศาสตราจารย์รุ่งทิพย์ ลุยเลา กรรมการ
๓๐. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชุติมา ชวลิตมณเฑียร กรรมการ
๓๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์วัลภา แต้มทอง กรรมการ
๓๒. ผู้ช่วยศาสตราจารย์พีรานุช เลิศวัฒนารักษ์ กรรมการ
๓๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศศิประภา รัตนดิลก ณ ภูเก็ต กรรมการ
๓๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ทิพวรรณ ดวงปัญญา กรรมการ
๓๕. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ฤทัย เรืองธรรมสิงห์ กรรมการ
๓๖. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สาวิตรี พังงา กรรมการ
๓๗. นางสาวนิโลบล วงศ์ภัทรนันท์ กรรมการ
๓๘. นางทิพากร ม่วงถึก กรรมการ
๓๙. นางกรกฎ แพทย์หลักฟ้า กรรมการ
๔๐. นายวิภูษณะ ศุภนคร กรรมการ
๔๑. นางสาววสพร นิชรัตน์ กรรมการ
๔๒. นางสุขกมล ปัญญาจันทร์ กรรมการ
๔๓. นางศรัญญา ศรีโยธิน กรรมการ
๔๔. นางสาวพิมพ์อร สุขแล้ว กรรมการ
๔๕. นางสาวทิวาพร มณีรัตนศุภร กรรมการ
๔๖. รองศาสตราจารย์พัชราวดี ศรีบุญเรือง กรรมการและเลขานุการ
๔๗. นายเสถียร แสงแถวทิม กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๔๘. นางภิญญาพัชญ์ โทนหงส์ษา กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๔๙. นางสาวปัณฑารีย์ ศิริชัย กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๕๐. นางสาวสุภิญญา ขาวผ่อง กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๕๑. นางสาวมณินทร เดชแห้ว กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๕๒. นางสาวกรรณิกา พุ่มสาหร่าย กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๕๓. นายภูคิษฐ์คมณ์ แสงตรีเพชรกล้า กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๕๔. นางสาวสวรรญา แย้มวันเพ็ง กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๕๕. นายสหภาพ ศรีโท กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

**๑๐.กรรมการหมวดวิชาการวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม**

**๑๐.๑ สาขาวิทยาศาสตร์**

๑. คณบดีคณะวิทยาศาสตร์ ที่ปรึกษา
๒. ศาสตราจารย์อรินทิพย์ ธรรมชัยพิเนต ประธานกรรมการ

| | | |
|---|---|---|
| ๓. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณัฐสมน เพชรแสง | รองประธานกรรมการ |
| ๔. | รองศาสตราจารย์ปกรณ์ วรรธนะอมร | กรรมการ |
| ๕. | รองศาสตราจารย์โชติกา หยกทองวัฒนา | กรรมการ |
| ๖. | รองศาสตราจารย์ฉัตรชัย เงินแสงสรวย | กรรมการ |
| ๗. | รองศาสตราจารย์อัญชณี คูเบอร่า | กรรมการ |
| ๘. | รองศาสตราจารย์ศิริกาญจนา ทองมี | กรรมการ |
| ๙. | รองศาสตราจารย์มีนา เลา | กรรมการ |
| ๑๐. | รองศาสตราจารย์วชิรญาณ์ ธงอาสา | กรรมการ |
| ๑๑. | รองศาสตราจารย์พงศ์เทพ ประจงทัศน์ | กรรมการ |
| ๑๒. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์แคทลียา ดาวสุด | กรรมการ |
| ๑๓. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์จุรีภรณ์ เชื้อดวงผุย | กรรมการ |
| ๑๔. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์มานิตย์ จิตรภักดี | กรรมการ |
| ๑๕. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ลัดดา แต่งวัฒนานุกูล | กรรมการ |
| ๑๖. | นางสาวสุนทรี คุ้มไพโรจน์ | กรรมการ |
| ๑๗. | นายรัฐพันธ์ ตรงวิวัฒน์ | กรรมการ |
| ๑๘. | นางสาวพรทิพย์ บุญมหามงคล | กรรมการและเลขานุการ |
| ๑๙. | นายสาธิต ประเสริฐมานะกิจ | กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |
| ๒๐. | นายวรพงศ์ สิงห์ชาติ | กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |
| ๒๑. | นางสาวแพรวไพลิน กังวานสุระ | กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |
| ๒๒. | นางสาวภัสรา นวะบุศย์ | กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |
| ๒๓. | นางสาวจิระประภา ขันสุข | กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |
| ๒๔. | นางสาววริศษา นรินทร | กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |
| ๒๕. | นางสาวรอยพิมพ์ ธนานุศักดิ์ | กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |

**๑๐.๒ สาขาวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์**

| | | |
|---|---|---|
| ๑. | คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ | ที่ปรึกษา |
| ๒. | คณบดีคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ | ที่ปรึกษา |
| ๓. | รองศาสตราจารย์สิริพล อนันตวรสกุล | ประธานกรรมการ |
| ๔. | รองศาสตราจารย์นวลวรรณ ทวยเจริญ | รองประธานกรรมการ |
| ๕. | ศาสตราจารย์ธงไทย วิฑูรย์ | กรรมการ |
| ๖. | รองศาสตราจารย์พงศ์ศักดิ์ หนูพันธ์ | กรรมการ |
| ๗. | รองศาสตราจารย์วรดร วัฒนพานิช | กรรมการ |
| ๘. | รองศาสตราจารย์อภินิติ โชติสังกาศ | กรรมการ |

| | |
|---|---|
| ๙. รองศาสตราจารย์จักรพันธ์ อร่ามพงษ์พันธ์ | กรรมการ |
| ๑๐. รองศาสตราจารย์อรทัย จงประทีป | กรรมการ |
| ๑๑. รองศาสตราจารย์จันทร์ศิริ สิงห์เถื่อน | กรรมการ |
| ๑๒. รองศาสตราจารย์กฤษณะ ไวยมัย | กรรมการ |
| ๑๓. รองศาสตราจารย์ชินธันย์ อารีประเสริฐ | กรรมการ |
| ๑๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์กษิดิศ พนมสุวรรณ | กรรมการ |
| ๑๕. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สิตางศุ์ พิลัยหล้า | กรรมการ |
| ๑๖. นางสาวศุภัชชา ชัยเมธานันท์ | กรรมการ |
| ๑๗. นางสาวสุทัตตา พาหุมันโต | กรรมการและเลขานุการ |
| ๑๘. นางสาวสหพร แบบประดับ | กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |
| ๑๙. นางสาวพัชรียา บุบผาชาติ | กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |
| ๒๐. นางสาวขวัญกมล บุญโปร่ง | กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |

**๑๐.๓ สาขาอุตสาหกรรมเกษตร**

| | |
|---|---|
| ๑. รองศาสตราจารย์อุลัยวรรณ์ วิทยเกียรติ | ประธานกรรมการ |
| ๒. รองศาสตราจารย์สุดสาย ตรีวานิช | รองประธานกรรมการ |
| ๓. รองศาสตราจารย์วราภรณ์ บุญทรัพย์ทิพย์ | กรรมการ |
| ๔. รองศาสตราจารย์นันทวัน เทอดไทย | กรรมการ |
| ๕. รองศาสตราจารย์วรรณสวัสดิ์ รัฐพิทักษ์สันติ | กรรมการ |
| ๖. รองศาสตราจารย์ประกิต สุขใย | กรรมการ |
| ๗. รองศาสตราจารย์กิติญา วงษ์คำจันทร์ โอราน | กรรมการ |
| ๘. ผู้ช่วยศาสตราจารย์อภิชญา ลีลาวณิชกุล | กรรมการ |
| ๙. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปิยะวณี จริยะสกุลโรจน์ | กรรมการ |
| ๑๐. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณัฐทินี บำบัดสรรพโรค | กรรมการ |
| ๑๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ขนิษฐา วัชราภรณ์ | กรรมการ |
| ๑๒. นางสาวพรรณภัทร พรหมเพ็ญ | กรรมการ |
| ๑๓. นางสาวฐิตาภรณ์ ตัมพานุวัตร | กรรมการ |
| ๑๔. นายธีระ ธุระกิจ | กรรมการ |
| ๑๕. นางสาวสุพนิดา วินิจฉัย | กรรมการ |
| ๑๖. นางสาวจารุพร รักใหม่ | กรรมการ |
| ๑๗. ผู้ช่วยศาสตราจารย์จุมพล วรสายัณห์ | กรรมการและเลขานุการ |
| ๑๘. นางดวงสมร นามกระโทก | กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |
| ๑๙. นางสาวอัญชนา ชมภูแก้ว | กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |

**๑๐.๔ สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม**

| | |
|---|---|
| ๑. คณบดีคณะวนศาสตร์ | ที่ปรึกษา |
| ๒. คณบดีคณะสิ่งแวดล้อม | ที่ปรึกษา |
| ๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สาพิศ ดิลกสัมพันธ์ | ประธานกรรมการ |
| ๔. นายณัฐวัฒน์ คลังทรัพย์ | รองประธานกรรมการ |
| ๕. รองศาสตราจารย์นพรัตน์ คัคคุริวาระ | กรรมการ |
| ๖. รองศาสตราจารย์พรเทพ เหมือนพงษ์ | กรรมการ |
| ๗. รองศาสตราจารย์แสงสรรค์ ภูมิสถาน | กรรมการ |
| ๘. รองศาสตราจารย์สุรัตน์ บัวเลิศ | กรรมการ |
| ๙. ผู้ช่วยศาสตราจารย์นิตยา เมี้ยนมิตร | กรรมการ |
| ๑๐. ผู้ช่วยศาสตราจารย์กฤษฎาพันธุ์ ผลากิจ | กรรมการ |
| ๑๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์พฤทธิ์ ราชรักษ์ | กรรมการ |
| ๑๒. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สาวิตรี พิสุทธิ์พิเชฎฐ์ | กรรมการ |
| ๑๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิวัฒน์ หาญวงศ์จิรวัฒน์ | กรรมการ |
| ๑๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์วาทินี สวนผกา | กรรมการ |
| ๑๕. ผู้ช่วยศาสตราจารย์จิราภรณ์ เทียมพันธ์พงศ์ | กรรมการ |
| ๑๖. ผู้ช่วยศาสตราจารย์อรอนงค์ ผิวนิล | กรรมการ |
| ๑๗. ผู้ช่วยศาสตราจารย์นพวรรณ เสมวิมล | กรรมการ |
| ๑๘. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธนิศร์ ปัทมพิฑูร | กรรมการ |
| ๑๙. ผู้ช่วยศาสตราจารย์วัชรพงษ์ วาระรัมย์ | กรรมการ |
| ๒๐. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ภาคภูมิ ชูมณี | กรรมการ |
| ๒๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปวีร์ คล่องเวสสะ | กรรมการ |
| ๒๒. นายยุทธพงษ์ คีรีมังคละ | กรรมการ |
| ๒๓. นายฉัตรพรรษ พงษ์เจริญ | กรรมการ |
| ๒๔. นายสุธี จรรยาสุทธิวงศ์ | กรรมการ |
| ๒๕. นางปิยาภรณ์ สมสมัคร | กรรมการ |
| ๒๖. นางสาวแอน กำภู ณ อยุธยา | กรรมการ |
| ๒๗. นางสาวมณีกาญจน์ อยู่เอี่ยม | กรรมการ |
| ๒๘. นางวราภรณ์ ลำใย | กรรมการและเลขานุการ |
| ๒๙. นางสาวละอองดาว เถาว์พิมาย | กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |
| ๓๐. นางสาวจินตลา กลิ่นหวล | กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |
| ๓๑. นางสาวศิรภัสสร ชมเชย | กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |

๓๒. นางณิชชา ประจันตะเสน กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

๓๓. นางสาวเสาวลักษณ์ บัวจันทร์ กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

**๑๑.กรรมการหมวดวิชาการมนุษยศาสตร์ สังคมศาสตร์และศึกษาศาสตร์**

**๑๑.๑ สาขาเศรษฐศาสตร์และบริหารธุรกิจ**

๑. คณบดีคณะเศรษฐศาสตร์ ที่ปรึกษา

๒. คณบดีคณะบริหารธุรกิจ ที่ปรึกษา

๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธนาภรณ์ อธิปัญญากุล ประธานกรรมการ

๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์พลวัฒน์ เลิศกุลวัฒน์ รองประธานกรรมการ

๕. รองศาสตราจารย์ดุษณี เกศวยุธ กรรมการ

๖. รองศาสตราจารย์กัมปนาท วิจิตรศรีกมล กรรมการ

๗. รองศาสตราจารย์วรัญพงศ์ บุญศิริธรรมชัย กรรมการ

๘. รองศาสตราจารย์วุฒิไกร งามศิริจิตต์ กรรมการ

๙. ผู้ช่วยศาสตราจารย์อุชุก ด้วงบุตรศรี กรรมการ

๑๐. ผู้ช่วยศาสตราจารย์พัฒน์ พิสิษฐเกษม กรรมการ

๑๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณัฐวุฒิ คูวัฒนเธียรชัย กรรมการ

๑๒. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธงชัย ศรีวรรธนะ กรรมการ

๑๓. หม่อมหลวงกุณฑลรัตน์ ทวีวงศ์ กรรมการ

๑๔. นางสาวณิธิชา ธรรมธนากูล กรรมการ

๑๕. นายห้องศิลป์ ศรีเกตุ กรรมการ

๑๖. นางสาวณัฏฐณิชา ฉายรัศมี กรรมการ

๑๗. นางสาวธิดารัตน์ คุ้มกิจ กรรมการ

๑๘. นางลลิตา จันทรวงศ์ไพศาล หงุ่ยตระกูล กรรมการ

๑๙. นางสาวกรรณิกา มิตรปล้อง กรรมการ

๒๐. นางเบญจมาศ แย้มพลอย กรรมการและเลขานุการ

๒๑. นางสาวปรารถนา ประสงค์สิน กรรมการและเลขานุการ

๒๒. นายภคพงศ์ พวงศรี กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

๒๓. นางสาวภีรตา รัตนสิงหกุล กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

๒๔. นางขวัญเมือง สุจริต กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

๒๕. นางสาวรัตติยา สาระโท กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

๒๖. นางสาวรุจาภา แว่นแก้ว กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

๒๗. นางสาวสมพิศ ทิมเทศ กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

๒๘. นางสาวจินตนา บุญสุวรรณ กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

| | |
|---|---|
| ๒๙. นางสาววรรณนิภา ชาวนา | กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |
| ๓๐. นายสมชาย ตามบุญ | กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |
| ๓๑. นายสัญชัย ทองขาว | กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |
| ๓๒. นางสาวเพชรรัตน์ พิลาชัย | กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |
| ๓๓. นางสาวธัญลักษณ์ เกษแก้ว | กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |
| ๓๔. นางสาวพวงผกา โชคชัยสมบัติ | กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |
| ๓๕. นางสาวธิติพันธ์ ละอองเทพ | กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |
| ๓๖. นางสุวรรณี ศิริวัฒนสาธร | กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |
| ๓๗. นายปิติศักดิ์ อุปสุข | กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |
| ๓๘. นางสาวชุดติมา อุบลบาน | กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |
| ๓๙. นางสาวเพ็ญเพชร สนั่นเมือง | กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |
| ๔๐. นางสาวธัญลักษณ์ เพ็งพินิจ | กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |
| ๔๑. นางสาวอรการณ์ วีระชยาภรณ์ | กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |
| ๔๒. นายทองปาน ขันตีกรม | กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |
| ๔๓. นายฉัตรชัย พ่วงพลับ | กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |
| ๔๔. นางสาวอารีย์ สี่แสงมุข | กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |
| ๔๕. นางสาวพรสุดา แตงจาด | กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ |

**๑๑.๒ สาขาศึกษาศาสตร์**

| | |
|---|---|
| ๑. คณบดีคณะศึกษาศาสตร์ | ที่ปรึกษา |
| ๒. ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิกุล เอกวรางกูร | ประธานกรรมการ |
| ๓. รองศาสตราจารย์วรรณดี สุทธินรากร | รองประธานกรรมการ |
| ๔. รองศาสตราจารย์ชาตรี ฝ่ายคำตา | รองประธานกรรมการ |
| ๕. รองศาสตราจารย์ชานนท์ จันทรา | กรรมการ |
| ๖. รองศาสตราจารย์ภัทรวรรธน์ จีรพัฒน์ธนธร | กรรมการ |
| ๗. รองศาสตราจารย์กรกฎา นักคิ้ม | กรรมการ |
| ๘. รองศาสตราจารย์ชลาธิป สมาหิโต | กรรมการ |
| ๙. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ทรงชัย อักษรคิด | กรรมการ |
| ๑๐. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชูศักดิ์ เอื้องโชคชัย | กรรมการ |
| ๑๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์วัตสาตรี ดิถียนต์ | กรรมการ |
| ๑๒. ผู้ช่วยศาสตราจารย์บุญเลิศ อุทยานิก | กรรมการ |
| ๑๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์วารุณี ลัภนโชคดี | กรรมการ |
| ๑๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ฉัตรศิริ ปิยะพิมลสิทธิ์ | กรรมการ |

๑๕. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธนนันท์ ธนารัชตะภูมิ กรรมการ
๑๖. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สรียา โชติธรรม กรรมการ
๑๗. นางสาวเขมวดี พงศานนท์ กรรมการ
๑๘. นายวรัญญู ฉายาบรรณ์ กรรมการ
๑๙. นางสาวฐาปณีย์ แสงสว่าง กรรมการ
๒๐. นางสาวสุวรรณ ปรมาพจน์ กรรมการและเลขานุการ
๒๑. นายณรงค์ศักดิ์ หวังรัตนปราณี กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๒๒. นายธีระภัณฑ์ ศิริสุวรรณ กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

**๑๑.๓ สาขามนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์**

๑. คณบดีคณะมนุษยศาสตร์ ที่ปรึกษา
๒. คณบดีคณะสังคมศาสตร์ ที่ปรึกษา
๓. รองศาสตราจารย์นัทธนัย ประสานนาม ประธานกรรมการ
๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์เฉลิมขวัญ สิงห์วี รองประธานกรรมการ
๕. ผู้ช่วยศาสตราจารย์อภิชา ชุติพงศ์พิสิฏฐ์ รองประธานกรรมการ
๖. รองศาสตราจารย์กังสดาล เชาว์วัฒนกุล กรรมการ
๗. ผู้ช่วยศาสตราจารย์พณิตา กุลสิริสวัสดิ์ กรรมการ
๘. นางสาวจริยา สุพรรณ กรรมการ
๙. นางสาวดารารัตน์ ซิ้มพัฒนวงษ์ กรรมการ
๑๐. นางสาวนันทนุช อุดมละมุล กรรมการ
๑๑. นางสาวผาณิตา ชัยดิเรก กรรมการ
๑๒. นางสาวสายทิพย์ เหล่าทองมีสกุล กรรมการ
๑๓. นางสาวศรีวรรณ บุญประเสริฐ กรรมการและเลขานุการ
๑๔. นางสาวพิทชญา สารภิรมย์ กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
๑๕. นางสาวรสิตา กลางประพันธ์ กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

**๒๑. คณะกรรมการโดยสมาคมวิชาการ วิชาชีพ**

๑. รองศาสตราจารย์ศกร คุณวุฒิฤทธิรณ กรรมการ
๒. รองศาสตราจารย์มนตรี แย้มกสิกร กรรมการ
๓. รองศาสตราจารย์สายวรุฬ ชัยวานิชศิริ กรรมการ
๔. รองศาสตราจารย์ นายสัตวแพทย์ จิตรกมล ธนศักดิ์ กรรมการ
๕. รองศาสตราจารย์ นายสัตวแพทย์ กัมพล แก้วเกษ กรรมการ
๖. รองศาสตราจารย์เสาวนุช ถาวรพฤกษ์ กรรมการ

| | | |
|---|---|---|
| ๗. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นายสัตวแพทย์ ปริวรรต พูลเพิ่ม | กรรมการ |
| ๘. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์สราวุธ รุ่งเมฆารัตน์ | กรรมการ |
| ๙. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์โสภณ อุไรชื่น | กรรมการ |
| ๑๐. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์พลรพี ทุมมาพันธ์ | กรรมการ |
| ๑๑. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุเชษฐ์ สมุหเสนีโต | กรรมการ |
| ๑๒. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์สิติมา จิตตินันท์ | กรรมการ |
| ๑๓. | สัตวแพทย์หญิง คชาภรณ์ เต็มยอด | กรรมการ |
| ๑๔. | นางสาวศุภกาญจน์ ล้วนมณี | กรรมการ |
| ๑๕. | นางสาวชวนพิศ อรุณรังสิกุล | กรรมการ |
| ๑๖. | นายนิพนธ์ เอี่ยมสุภาษิต | กรรมการ |
| ๑๗. | นางสาวพยัตติกา พลสระคู | กรรมการ |
| ๑๘. | นางอมรา ชินภูติ | กรรมการ |
| ๑๙. | นางพรพิมล อธิปัญญาคม | กรรมการ |

โดยให้คณะกรรมการชุดนี้มีหน้าที่ จัดการเสนอผลงานในการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ ๖๒ ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำหนดหน้าที่รับผิดชอบ กำหนดแนวทางการคัดเลือกผลงานที่นำมาเสนอ และรับนโยบายจากคณะกรรมการอำนวยการ มาปฏิบัติให้บรรลุตามวัตถุประสงค์

**คณะกรรมการฝ่ายบริหารจัดการประชุมทางวิชาการ**

| | | |
|---|---|---|
| ๑. | รองอธิการบดีฝ่ายวิจัยและสร้างสรรค์ | ที่ปรึกษา |
| ๒. | ผู้อำนวยการสำนักบริหารการศึกษา | ที่ปรึกษา |
| ๓. | ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ | ประธานกรรมการ |
| ๔. | ผู้อำนวยการสำนักบริการคอมพิวเตอร์ | ประธานกรรมการร่วม |
| ๕. | ผู้อำนวยการสำนักพัฒนาการเรียนรู้ตลอดชีวิต | ประธานกรรมการร่วม |
| ๖. | รองผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ฝ่ายบริหาร | รองประธานกรรมการ |
| ๗. | ประธานฝ่ายเลขานุการ (นางอัจฉราวรรณ คล้องช้าง) | กรรมการ |
| ๘. | ประธานฝ่ายสารสนเทศ (ผู้อำนวยการสำนักบริการคอมพิวเตอร์) | กรรมการ |
| ๙. | ประธานฝ่ายสถานที่ (ผู้อำนวยการสำนักบริการคอมพิวเตอร์) | กรรมการ |

๑๐. ประธานฝ่ายประชาสัมพันธ์ กรรมการ
(นางผกามาศ ธนพัฒนพงศ์)
๑๑. ประธานฝ่ายโสตทัศนูปกรณ์ กรรมการ
(นายวิเชียร คดพิมพ์)
๑๒. ประธานฝ่ายจัดการจราจรและรักษาความปลอดภัย กรรมการ
(นายตั๋น นิลมาติ)
๑๓. ประธานฝ่ายผลิตสื่อวิชาการ กรรมการ
(รักษาการแทนรองผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัย
เกษตรศาสตร์ ฝ่ายเผยแพร่งานวิจัย)
๑๔. ประธานฝ่ายการเงิน กรรมการ
(ผู้อำนวยการกองคลัง)
๑๕. ประธานร่วมฝ่ายการเงิน กรรมการ
(นางสาววรรณวิมล ราชอุปนันท์)
๑๖. ประธานฝ่ายประเมินผล กรรมการ
(นายปฏิภักดิ์ ปัญญาพูนตระกูล)
๑๗. ประธานฝ่ายพิธีการ กรรมการ
(นางสาวพิชชาอรฐ์ สิริชีวเกษร)
๑๘. ประธานฝ่ายจัดการฐานข้อมูล กรรมการ
(ผู้อำนวยการสำนักหอสมุด)
๑๙. นายปฏิภักดิ์ ปัญญาพูนตระกูล กรรมการและเลขานุการ
๒๐. นายพลากร คำแก้ว กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

โดยให้คณะกรรมการชุดนี้มีหน้าที่ ประสานงาน ดำเนินการ และอำนวยความสะดวกการจัดประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ ๖๒ โดยประสานงานกับคณะกรรมการอำนวยการ และคณะกรรมการฝ่ายวิชาการเพื่อให้การดำเนินงานสำเร็จลุล่วงและเป็นไปด้วยความเรียบร้อย ซึ่งประธานแต่ละฝ่ายสามารถพิจารณาคัดเลือก และแต่งตั้งกรรมการภายในฝ่ายได้เอง หากต้องการจัดทำเป็นคำสั่งเพิ่มเติม ให้แต่งตั้งเป็นคำสั่งของส่วนงานในสังกัด

ทั้งนี้ ตั้งแต่บัดนี้เป็นต้นไปโดยมีวาระ ๑ ปี

ประกาศ ณ วันที่ ๒๔ พฤศจิกายน พ.ศ. ๒๕๖๖

(นายดำรงค์ ศรีพระราม)
รองอธิการบดีฝ่ายบริหาร
รักษาการแทนอธิการบดีมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ประกาศมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เรื่อง แต่งตั้งคณะกรรมการจัดการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ ๖๒ ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (เพิ่มเติม)

---

อนุสนธิประกาศมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เรื่อง แต่งตั้งคณะกรรมการจัดการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ ๖๒ ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ลงวันที่ ๒๔ พฤศจิกายน พ.ศ. ๒๕๖๖ นั้น

เพื่อให้การจัดการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ ๖๒ ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ดำเนินไปด้วยความเรียบร้อย และบรรลุตามวัตถุประสงค์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์จึงขอแต่งตั้งคณะกรรมการจัดการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ ๖๒ ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (เพิ่มเติม) ดังนี้

**คณะกรรมการอำนวยการจัดการประชุมทางวิชาการ**

๑. นายกสมาคมจิตวิทยาแห่งประเทศไทย กรรมการ

**คณะกรรมการฝ่ายวิชาการ**

**๑๒. คณะกรรมการโดยสมาคมวิชาการ วิชาชีพ**

๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์นันท์ชัตสัณห์ สกุลพงศ์ กรรมการ

๒. นางลินดา สุวรรณดี กรรมการ

โดยให้คณะกรรมการมีหน้าที่ ตามประกาศมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เรื่อง แต่งตั้งคณะกรรมการจัดการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ ๖๒ ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ลงวันที่ ๒๔ พฤศจิกายน พ.ศ. ๒๕๖๖

ทั้งนี้ ตั้งแต่บัดนี้เป็นต้นไป

ประกาศ ณ วันที่ ๑๙ ธันวาคม พ.ศ. ๒๕๖๖

(นายดำรงค์ ศรีพระราม)

รองอธิการบดีฝ่ายบริหาร

**รักษาการแทนอธิการบดีมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์**

ประกาศสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เรื่อง แต่งตั้งคณะทำงานฝ่ายผลิตสื่อวิชาการ การจัดการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ ๖๒
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

---

เพื่อให้การจัดการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ ๖๒ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ดำเนินไปด้วยความเรียบร้อยและบรรลุตามวัตถุประสงค์ สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จึงให้แต่งตั้งคณะทำงานฝ่ายผลิตสื่อวิชาการ ดังรายนามต่อไปนี้

| | |
|---|---|
| ๑. ผู้รักษาการแทนรองผู้อำนวยการฝ่ายเผยแพร่งานวิจัย สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ | ประธานคณะทำงาน |
| ๒. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศรัณย์ธร ศศิธนากรแก้ว | คณะทำงาน |
| ๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตตินาถ เรขาลิลิต | คณะทำงาน |
| ๔. นางสาวทักษยา วัชรสารทรัพย์ | คณะทำงาน |
| ๕. นางสาวดลฤทัย เจียรกุล | คณะทำงาน |
| ๖. นายภานนท์ คุ้มสุภา | คณะทำงาน |
| ๗. นางสาวทิสยา ทิศเสถียร | คณะทำงาน |
| ๘. นางสาวรติกร สมิตไมตรี | คณะทำงาน |
| ๙. นางสาววนิดา รัตตมณี | คณะทำงาน |
| ๑๐. นายวิทวัส ยุทธโกศา | คณะทำงาน |
| ๑๑. นายวิโรตม์ เอี๊ยะตะกูล | คณะทำงาน |
| ๑๒. นายสิงห์อำพล จันทร์วิเศษ | คณะทำงาน |
| ๑๓. นางสาวมณฑา ปานทิม | คณะทำงาน |
| ๑๔. นางสาวพิชชาอรฐ์ สิริชีวเกษร | คณะทำงานและเลขานุการ |
| ๑๕. นางสาวกัญญารัตน์ สุวรรณทีป | คณะทำงานและผู้ช่วยเลขานุการ |
| ๑๖. นางสาวพัชราภา รัตนวิญญูภิรมย์ | คณะทำงานและผู้ช่วยเลขานุการ |

โดยให้คณะทำงานชุดนี้ มีหน้าที่ ดำเนินการผลิตสื่อวิชาการ อาทิ สื่อประชาสัมพันธ์งานประชุมวิชาการ สื่อข้อกำหนดต่างๆ จัดทำกำหนดการ หนังสือสูจิบัตร หนังสือรวบรวมบทคัดย่อ (Book of Abstracts) หนังสือตีพิมพ์ผลงานวิจัยเรื่องเต็ม (E-Proceedings) การประสานงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ รวมไปถึงการผลิตสื่อมัลติมีเดียและการถ่ายทอดสดงานประชุม โดยประสานงานกับฝ่ายวิชาการและฝ่ายต่างๆ ให้ดำเนินงานไปด้วยความเรียบร้อยและมีประสิทธิภาพ

ทั้งนี้ ตั้งแต่บัดนี้เป็นต้นไป

ประกาศ ณ วันที่ ๒๙ กันยายน พ.ศ. ๒๕๖๖

(รองศาสตราจารย์วราภา มหากาญจนกุล)
ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

# ปรัชญา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เป็นสถาบันที่มีปณิธานมุ่งมั่นในการสั่งสมเสาะแสวงหา และพัฒนาความรู้
ให้เกิดความเจริญงอกงามทางภูมิปัญญาที่เพียบพร้อมด้วย
วิชาการ จริยธรรม และคุณธรรม ตลอดจนเป็นผู้ชี้นำทิศทางสืบทอด
เจตนารมณ์ที่ดีของสังคมเพื่อความคงอยู่ ความเจริญ
และความเป็นอารยะของชาติ




kuannualconf@gmail.com
http://annualconference.ku.ac.th
http://www.rdi.ku.ac.th