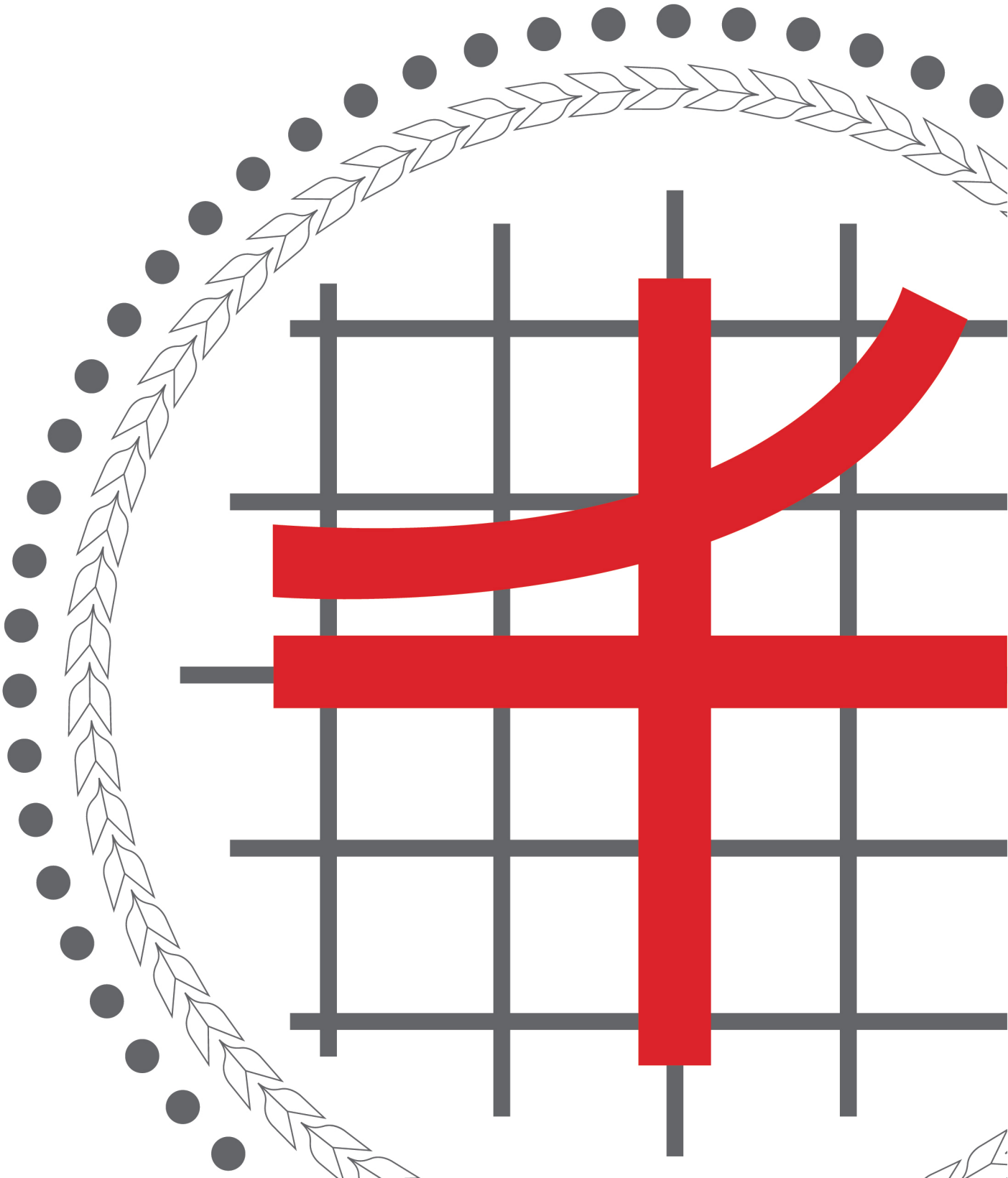
Srinakharinwirot University Engineering Journal
วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
Vol. 19 No.1 (October 2023 - March 2024)
ISSN : 2774 - 0269 (Online)



Srinakharinwirot University Engineering Journal Vol. 19 No.1 (October 2023 - March 2024)

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เป็นวารสารในศูนย์ข้อมูลดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (Thai – Journal Citation Index Centre: TCI) กลุ่มที่ 2 พ.ศ. 2563-2567 เลขมาตรฐานสากลประจำวารสาร 2774-0269 (Online) เพื่อเผยแพร่บทความวิจัยและบทความวิชาการ ด้านวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีวิศวกรรมเคมี วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมอุตสาหการ วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ วิศวกรรมชีวการแพทย์ และสาขาใกล้เคียงอื่นๆ ทั้งในเชิงทฤษฎีและเชิงปฏิบัติ เป็นภาษาอังกฤษหรือภาษาไทยที่มีบทคัดย่อภาษาอังกฤษ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ จึงกำหนดให้จัดทำโครงการจัดทำวารสารทางวิชาการขึ้น โดยจัดพิมพ์เป็นประจำทุกปี วารสารตีพิมพ์ 2 ครั้งต่อปี (ทุก 6 เดือน) ในเดือน ในเดือน มีนาคม และ กันยายน ฉบับที่ 1 ช่วงเดือนตุลาคม – มีนาคม ฉบับที่ 2 ช่วงเดือนเมษายน – กันยายน ซึ่งบทความที่ได้รับการตีพิมพ์ทุกบทความจะผ่านการทบทวนโดยผู้ทรงคุณวุฒิอย่างน้อย 2 คนต่อบทความ (Peer-review) และประเมินบทความในลักษณะเป็นผู้ทรงคุณวุฒิที่ประเมินบทความไม่ทราบชื่อผู้แต่งและผู้แต่งไม่ทราบชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ หรือ Double Blinded review และสงวนสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พุทธศักราช 2521 และเผยแพร่แบบออนไลน์ทั่วประเทศ

วัตถุประสงค์

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (วศม) มีวัตถุประสงค์เพื่อคัดสรรและเผยแพร่บทความวิจัยและบทความวิชาการทางด้านวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีในสาขาวิศวกรรมเคมี วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมอุตสาหการ วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ วิศวกรรมชีวการแพทย์ และสาขาใกล้เคียงอื่นๆ ทั้งในเชิงทฤษฎีและเชิงปฏิบัติ

เจ้าของ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

กองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
63 หมู่ 7 ตำบลองครักษ์ อำเภอองครักษ์
จังหวัดนครนายก 26120
โทร. 0 2649 5000 ต่อ 27560
http://eng.swu.ac.th และ https://www.tci-thaijo.org/index.php/sej
อีเมล journalengswu@gmail.com

ที่ปรึกษากองบรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมภพ รอดอัมพร	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตติ สถาพรประสาธน์	รองคณบดีฝ่ายแผนและพัฒนา

รายนามคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ

ศาสตราจารย์ ดร.ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ อัครเอกฒาลิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร. พานิช วุฒิพฤกษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร.เอเดรียน อีแวน ฟลัด	สถาบันสิริวิทยเมธี
ศาสตราจารย์ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ศาสตราจารย์ ดร.โกสินทร์ จำนงไทย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ยอดสุดใจ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ศาสตราจารย์ ดร.วรงค์ ปวราจารย์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร ศราวุธ ริมดุสิต	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย เปรมฤดีปรีชาชาญ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศาสตราจารย์ ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาต โสภาแดง	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.อธิคม ฤกษบุตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงพรรณ กริชชาญชัย ศฤงคารินทร์	มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต ชาลีรักษ์ตระกูล	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.เตือนใจ สมบูรณ์วิวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร. ธนิยา เกาศล	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รองศาสตราจารย์ ดร.ประจวบ กล่อมจิตร	มหาวิทยาลัยศิลปากร
รองศาสตราจารย์ ดร.รุ่งเรือง กาลศิริศิลป์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
พันเอกหญิง รองศาสตราจารย์ ดร.สุวิมล เสนีวงศ์ ณ อยุธยา	โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

บรรณาธิการอำนวยการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิลดา หวังพานิช

หัวหน้ากองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.ประชา บุณยวานิชกุล

กองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.สงกรานต์ วิริยะศาสตร์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ ดร.จันจิรา จับศิลป์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ ดร.นิลวรรณ ชุ่มฤทธิ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ ดร.สุนิติ สุภาพ	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ ดร.วุฒิพล ธาราธีรเศรษฐ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ธนยศ อริสริยวงศ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุชาดา ตันติสถิระพงษ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประมวล ชูรัตน์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงษ์ คงประเสริฐ	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
อาจารย์ ดร.สุธิดา ทีปรักษพันธุ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
อาจารย์นาวี รุจิดามพ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ศาสตราจารย์ ดร.ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ อัครเอกฒาลิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร. พานิช วุฒิพฤกษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร.เอเดรียน อีแวน ฟลัด	สถาบันสิริวิทยเมธี
ศาสตราจารย์ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ศาสตราจารย์ ดร.โกสินทร์ จำนงไทย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ยอดสุดใจ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ศาสตราจารย์ ดร.วรงค์ ปวราจารย์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร ศราวุธ ริมดุสิต	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย เปรมฤดีปรีชาชาญ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศาสตราจารย์ ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาต โสภาแดง	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.อธิคม ฤกษบุตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงพรรณ กริชชาญชัย ศฤงคารินทร์	มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต ชาลีรักษ์ตระกูล	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.เตือนใจ สมบูรณ์วิวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร. ธนิยา เกาศล	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รองศาสตราจารย์ ดร.ประจวบ กล่อมจิตร	มหาวิทยาลัยศิลปากร
รองศาสตราจารย์ ดร.รุ่งเรือง กาลศิริศิลป์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
พันเอกหญิง รองศาสตราจารย์ ดร.สุวิมล เสนีวงศ์ ณ อยุธยา	โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

ฝ่ายการเงิน

นางสาวลินดา นิลพัท

ฝ่ายประชาสัมพันธ์

นายณัฐกาญจน์ ไชยสมบูรณ์

นางธิดา ศรีกงพาน

ผู้ช่วยบรรณาธิการ

นางสาวยุพาพร ประไพย์

บทบรรณาธิการ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ได้จัดพิมพ์ขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่ผลงานวิชาการ ผลงานวิจัย และแลกเปลี่ยนแนวคิด ความรู้ ความก้าวหน้าใหม่ ด้านวิศวกรรมศาสตร์อย่างต่อเนื่องมาเป็นระยะเวลากว่า 15 ปี โดยบทความทุกเรื่องได้ผ่านการพิจารณากลั่นกรองและประเมินคุณภาพตามกระบวนการจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้องจากหลายสถาบันการศึกษา ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ฉบับนี้ ได้นำเสนอบทความจำนวนทั้งสิ้น 9 บทความ เป็นบทความวิจัยจำนวน 8 บทความ บทความวิชาการ 1 บทความ โดยบทความทั้งหมดเป็นผลงานวิจัยพื้นฐานและผลงานวิจัยประยุกต์ในสาขาต่างๆ ทางวิศวกรรมศาสตร์ ซึ่งผลงานที่เผยแพร่ในครั้งนี้เป็นผลงานวิจัยที่มุ่งเน้นไปที่การประยุกต์ใช้งานและการแก้ปัญหาเชิงปฏิบัติการที่เข้ากับสถานการณ์ปัจจุบัน

กองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ หวังเป็นอย่างยิ่งว่า วารสารฉบับนี้จะเป็นเวทีทางวิชาการ ที่จะกระตุ้นการผลิตผลงานและแลกเปลี่ยนเรียนรู้ของนักวิจัย นักวิชาการและผู้อ่านทุกท่าน ทั้งนี้ เพื่อการมีส่วนร่วมในการสร้างสรรค์งานวิจัยอันจะเป็นการส่งเสริมการพัฒนาประเทศ ตามแนวนโยบายประเทศไทย 4.0 ในโอกาสนี้กองบรรณาธิการขอขอบคุณกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ในการประเมินบทความ ให้ความเห็นที่เป็นประโยชน์และมีส่วนร่วมในการพัฒนาคุณภาพและมาตรฐานของวารสารฯ ฉบับนี้เสมอ สุดท้ายนี้หากมีข้อเสนอแนะประการใดทางกองบรรณาธิการฯ ยินดีรับฟังข้อเสนอแนะเพื่อการปรับปรุงและพัฒนาวารสารให้มีคุณภาพยิ่งขึ้น

รองศาสตราจารย์ ดร.ประชา บุณยวานิชกุล

บรรณาธิการวารสาร

สารบัญ

บทความวิจัย

การจัดตำแหน่งน้ำหนักนักพายเรือ เพื่อพัฒนาศักยภาพในการแข่งขันApplication of Design of Experiments to Reducing Defects in Tablet Packing Process 1
ทิวานันท์ มณีรัตน์ จิรพัฒน์ เงาประเสริฐวงศ์

การกำจัดสีย้อมแอซิดในสารละลายด้วยกระบวนการดูดซับร่วมกับโอโซนออกซิเดชัน Decolorization of Acid Dye in Aqueous Solution by a Combined Adsorption–Ozonation Process 16
พัชรี คำธิตา นัทธพงศ์ อติภาสวร

การศึกษาสถานีบริการอัดประจุไฟฟ้าเพื่อรองรับยานยนต์ไฟฟ้า A Study of the Electric Charging Stations to Support Electric Vehicles 29
ณัฐภาส จรัสรุ่งชวลิต ปนัดดา กสิกิจวิวัฒน์

การออกแบบและพัฒนาเครื่องสีข้าวกล้องพลังงานแสงอาทิตย์ Design and Development of Solar Powered Brown Rice Milling Machine 52
ปวริศร กล้วยอ่อน รุ่งเรือง กาลศิริศิลป์ จตุรงค์ ลังกาพินธุ์

การหาสภาวะที่เหมาะสมในการใช้อัลตราโซนิคช่วยสกัดโปรตีนจากผงแป้งเมล็ดขนุนด้วยวิธีพื้นที่ผิวตอบสนอง Optimization of Ultrasonic-Assisted Extraction of Protein from Jackfruit Seed Powder using Response Surface Methodology 66
วรทเอก ศรีสุวรรณ กิตติ ไชยวัณณ์ พชร แก้วรัตนขจร

Predictive Modeling of Non-Communicable Diseases Using Social Determinants of Health as Features: A Review of Existing Approaches 79
Peatiphat Bhoothookngoen Nattapong Sanchan

การศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตบราซเคลย์สำหรับการขึ้นรูปโดยการปั้น A Study of Factors Affecting on Brass Clay Forming Process by Sculping 89
อนุวัฒน์ จุติลาภถาวร ปาริฉัตร จำวงค์ กุลธิดา แซ่เจีย

แนวทางการวิเคราะห์กำลังแบกทานและระยะฝังของเสาเข็มเจาะฝังปลายในหินแกรนิตผุพังปานกลาง Guidelines for Analyzing Bearing Capacity and Embedded Length of Rock-Socketed Piles in Moderately Weathered Granite 102
อติเทพ ศรีคงศรี พงศ์ศักดิ์ แซ่หลี

สารบัญ (ต่อ)

บทความวิจัยต่อ

กระบวนการคัดเลือกผู้ประกอบการเพื่อป้องกันการทอดทิ้งงานก่อสร้าง ในหน่วยงานภาครัฐ 114
The Contractor Selection Process in Order to Prevent Abandonment of The Construction Work in The Public Sector
สุดนิรันดร์ เพชรัตน์, อิทธิพร ศิริสวัสดิ์ รุ่งอรุณ บุญถ่าน ศานติ จินตรัตน์

บทความวิชาการ

บทความวิชาการ: การศึกษาการอบแห้งแบบกระแสชน 41
A review: The study of Impinging Stream Drying
ปราชญา ตรีสุทธาชีพ กิตติ สถาพรประสาธน์

Srinakharinwirot University Engineering Journal (2023) 19(1), 1-15 วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีที่ 19 ฉบับที่ 1 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2566 – มีนาคม พ.ศ. 2567

การจัดตำแหน่งน้ำหนักนักพายเรือ เพื่อพัฒนาศักยภาพในการแข่งขัน

Optimum Rower Weight Position for Competition Development

จิราพร คุโนภาส[1] ประชา บุณยวานิชกุล[1] ถนอมศักดิ์ เสนาคำ[2]* สุรชัย เหมหิรัญ[3]
[1]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลองครักษ์ อำเภอองครักษ์ นครนายก 26120
[2]ภาควิชาวิทยาศาสตร์การกีฬา คณะพลศึกษาและ RCAT มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลองครักษ์ อำเภอองครักษ์ นครนายก 26120
[3]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพมหานคร 10120
Jiraporn Khunopast[1] Pracha Bunyawanichakul[1] Tanormsak Senakham[2]* Surachai Hemhirun[3]
[1]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University
Rangsit-Nakhon Nayok Road, Ongkharak, Nakhon Nayok, 26120
[2] Department of Sport Science, Faculty of Physical Education and RCAT, Srinakharinwirot
University Rangsit-Nakhon Nayok Road, Ongkharak, Nakhon Nayok, 26120
[3]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of
Technology Krungthep, Nang Linchi Road, Thung Maha Mek, Sathon, Bangkok, 10120
*Corresponding author Email: tanormsakse@gmail.com
(Received: June 13, 2023; Revised: July 2, 2023 ; Accepted: August 17, 2023)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหารูปแบบตำแหน่งน้ำหนักของนักพายเรือมังกร 10 ฝีพาย ในระยะทาง 200 เมตร โดยใช้โปรแกรม Ansys Workbench สร้างแบบจำลองการพายและคำนวณหาผลลัพธ์ ทำการกำหนดรูปแบบการวิเคราะห์ออกเป็น 3 รูปแบบ ได้แก่ 1) ให้นักพายเรือที่มีน้ำหนักมากไว้ด้านหน้าของเรือพาย 2) ให้นักพายเรือที่มีน้ำหนักมากไว้ตรงกลางของเรือพาย 3) ให้นักพายเรือที่มีน้ำหนักมากไว้ด้านท้ายของเรือพาย จากนั้นนำผลลัพธ์ที่ได้มาเปรียบเทียบเพื่อหารูปแบบตำแหน่งน้ำหนักของนักพายเรือที่ทำให้เรือพายมีประสิทธิภาพในการแข่งขันสูงสุด จากการศึกษาพบว่ารูปแบบตำแหน่งน้ำหนักของนักพายเรือที่ทำให้เรือพายมีประสิทธิภาพในการแข่งขันสูงสุด คือการจัดรูปแบบตำแหน่งน้ำหนักของนักพายเรือมีน้ำหนักมากไว้ตรงกลางของเรือพาย เนื่องจากมีการกระจายตัวของน้ำหนักที่เหมาะสม ทำให้มีค่าแรงต้านที่กระทำการเคลื่อนที่เรือพายน้อยที่สุดอยู่ที่ 339.156 นิวตัน และมีค่าแรงยกมากที่สุดอยู่ที่ 9,268.35 นิวตัน เป็นผลให้มีค่าความเร็วในการพายมากที่สุดอยู่ที่ 3.817 เมตรต่อวินาที ส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการพายน้อยที่สุดอยู่ที่ 53.00 วินาที เมื่อเทียบกับรูปแบบอื่นๆ ดังนั้นการจัดตำแหน่งน้ำหนักของนักพายเรือจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการแข่งขันกีฬาเรือพายมังกร และสามารถนำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ไปประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์อย่างสูงสุดแก่วงการกีฬาเรือพายต่อไป

คำสำคัญ: เรือมังกร การพาย เรือพาย

ABSTRACT

The purpose of this research was to optimize rower weight position for Competition Development using Ansys Workbench. A rowing model was made to calculate results. There were three types of analysis, as follows: 1) rowers with a heavy weight were seated at the front of the boat; 2) rowers with a heavy weight were seated in the middle of the boat; and 3) rowers with a heavy weight were seated at the rear of the boat. The results obtained were compared to identify the positions of the weights of the rowers to ensure the boat reached maximum efficiency in racing. According to the study, the positions of the weights of the rowers that enabled the boat to reach maximum efficiency in racing was assigning rowers with a heavy weight to sit in the middle of the boat since the weight was distributed appropriately, and the resistance affected dragon boat movement was at the lowest, 339.156 Newton and the lift was at the highest, 9,268.35 Newton, the highest speed in rowing was 3.817 meter per second, and the least time spent on rowing was 53.00 seconds, compared to other types. Therefore, the arrangement of the positions of rowers is essential for dragon boat racing. The information obtained from the analysis can be applied to achieve the maximum benefit for dragon boating accordingly.

Keyword: Dragon boat, Rowing, Rowing boat.

1. บทนำ

กีฬาเรือมังกรเป็นกีฬาเรือพายชนิดหนึ่งที่ได้รับการบรรจุไว้ในรายการแข่งขันทั้งในระดับชาติและนานาชาติ โดยประเภทของการแข่งขันกีฬาเรือพายชนิดนี้แบ่งออกเป็น 2 ประเภทได้แก่ 10 ฝีพาย และ 20 ฝีพาย โดยแต่ละประเภทจะมีระยะทางในการแข่งขันตั้งแต่ 200 เมตร 500 เมตร 1,000 เมตร และ 2,000 เมตร ระยะทางที่นิยมใช้ในการแข่งขันของประเทศไทยได้แก่ ระยะทางที่ 200 เมตร

ในการแข่งขันเรือพายมังกรนั้น รูปทรงและน้ำหนักของเรือ น้ำหนักและตำแหน่งของนักพายเรือ แรงต้านทาน การไหลของของไหล แรงยก ปัจจัยเหล่านี้ล้วนเป็นตัวแปรที่สำคัญต่อความเร็วในการเคลื่อนที่ของเรือทั้งสิ้น

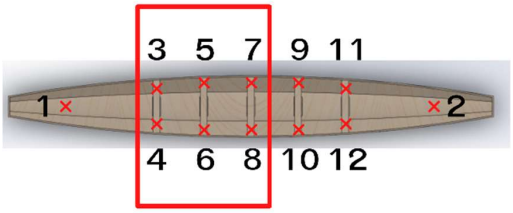
จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพายเรือที่มีทั้งการศึกษาเชิงทดลองและการศึกษาเชิงทฤษฎี ในการศึกษาเชิงทดลองเป็นการศึกษากลศาสตร์ทางด้านคิเนเมติกส์และทางด้านไดนามิคของการพายเรือ [1-3] โดยทำการวัดและบันทึกขบวนการที่เกี่ยวข้องกับการพายเรือ รวมถึงแรงที่มากระทำกับการพายเรือทั้งแรงที่มากระทำภายนอกและแรงที่มากระทำภายใน ส่วนการศึกษาเชิงทฤษฎีเป็นการศึกษาโดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายการเคลื่อนที่ของเรือ [4] จากนั้นได้มีการพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการคำนวณและหาผลลัพธ์ [5-9] โดยทั้งสองรูปแบบจะมีหลักการและแนวทางการวิจัยที่คล้ายกัน แต่จะแตกต่างในรูปแบบของวัตถุประสงค์ วิธีการ และขอบเขตของงานวิจัย จากงานวิจัยที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่าไม่มีการศึกษาวิจัยถึงน้ำหนักของนักพายเรือ ซึ่งเป็นมวลส่วนใหญ่ของการพายเรือ ประมาณร้อยละ 70-80 ของมวลทั้งหมด [10] ดังนั้นงานวิจัยนี้มุ่งศึกษาและจำลองการเคลื่อนที่ของเรือพายมังกร โดยใช้โปรแกรม Ansys Workbench ในการวิเคราะห์หาความเร็วและเวลาในการพาย ตลอดจนพฤติกรรมของของไหลที่กระทำกับการเคลื่อนที่ของเรือพาย เพื่อนำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์

มาเปรียบเทียบในการจัดหาตำแหน่งน้ำหนักของนักพายเรือที่ทำให้เรือมีประสิทธิภาพสูงสุด การศึกษาดังกล่าวนี้ทำให้ทราบถึงข้อมูลการคำนวณพื้นฐานของการเคลื่อนที่ของเรือพายจริง และสามารถนำมาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์อย่างสูงสุดแก่วงการกีฬาเรือพายต่อไป

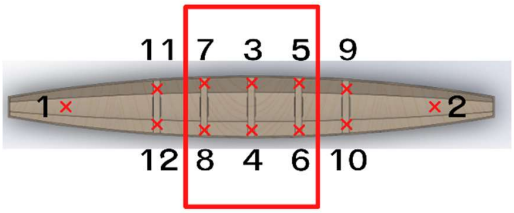
2. วิธีดำเนินงานวิจัย

2.1 อุปกรณ์และขั้นตอนการดำเนินงาน

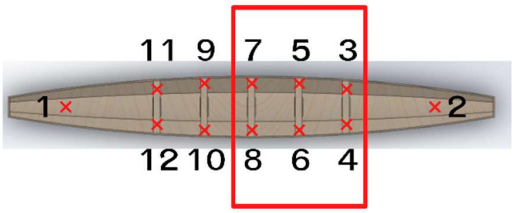
งานวิจัยนี้ใช้เครื่องพายเรือ (Ergometer) ในการเก็บข้อมูลการพาย เพื่อวัดกำลังของนักพายเรือ และใช้เครื่องชั่งน้ำหนักในการวัดน้ำหนักตัวของนักพายเรือ โดยกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยในครั้งนี้เป็นนักพายเรือมังกรชายทีมชาติไทยจำนวน 12 คน แบ่งออกเป็นคนตีกลอง 1 คน คนคัดท้าย 1 คน และนักพายเรือ 10 คน จากนั้นทำการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการพายเรือมังกรขึ้นมา เพื่อใช้ทำนายพฤติกรรมของของไหลที่มากระทำกับเรือพายมังกรในระยะทาง 200 เมตร และใช้โปรแกรม Ansys Workbench สร้างแบบจำลองการพายเรือและคำนวณหาผลลัพธ์ โดยกำหนดรูปแบบการวิเคราะห์ออกเป็น 3 รูปแบบ ได้แก่ 1) ให้นักพายเรือที่มีน้ำหนักมากไว้ด้านหน้าของเรือ 2) ให้นักพายเรือที่มีน้ำหนักมากไว้ตรงกลางของเรือ 3) ให้นักพายเรือที่มีน้ำหนักมากไว้ด้านท้ายของเรือ ดังแสดงในรูปที่ 1-3 และตารางที่ 1 จากนั้นนำผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมทั้ง 3 รูปแบบ มาเปรียบเทียบเพื่อหารูปแบบการพายเรือที่ทำให้เรือมีประสิทธิภาพในการแข่งขันสูงสุด



รูปที่ 1 นักพายเรือที่มีน้ำหนักมากไว้ด้านหน้าของเรือพาย (รูปแบบที่ 1)



รูปที่ 2 นักพายเรือที่มีน้ำหนักมากไว้ตรงกลางของเรือพาย (รูปแบบที่ 2)



รูปที่ 3 นักพายเรือที่มีน้ำหนักมากไว้ด้านท้ายของเรือพาย (รูปแบบที่ 3)

ตารางที่ 1 ตำแหน่งน้ำหนัก และแรงของนักพายเรือ

ตำแหน่ง	มวล (kg)	แรง (N)
1 (คนตีกลอง)	60.3	-
2 (คนคัดท้าย)	60.8	-
3	80.3	178
4	80.0	179
5	79.2	201
6	79.1	200
7	67.0	181
8	66.9	182
9	64.1	177
10	64.0	175
11	62.3	185
12	62.4	202

2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การศึกษาการเคลื่อนที่ของเรือพายมังกร เพื่อนำไปสู่การคำนวณหาความเร็วและเวลาในการพาย ตลอดจนแรงต้านทานและแรงยกที่มากระทำกับการเคลื่อนที่ของเรือพาย ในงานวิจัยนี้ใช้สมการการเคลื่อนที่ ด้วยวิธีการ

จำลองการไหลเชิงพลศาสตร์ (Computational Fluid Dynamics; CFD) ภายใต้สภาวะไม่คงตัว (Unsteady State) แบบ 2 มิติ สมการควบคุม (Governing equation) อยู่บนพื้นฐานการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence Model) แบบ $k-\omega$ SST ด้วยวิธีการ Couple ในการอธิบายบนระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุม (Finite Volume Method) ประกอบด้วยสมการความต่อเนื่อง (Continuity equation) และสมการโมเมนตัม (Momentum equation) ดังนี้

2.2.1 สมการการเคลื่อนที่

การเคลื่อนที่ของเรือพายมังกรเป็นไปตามกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน ซึ่งประกอบด้วย แรงขับเคลื่อน แรงต้านทานเรือ มวลและความเร่ง [11]

$$F_C + F_R = (m_B + m_C)a \tag{1}$$

เมื่อ F_C คือ แรงขับเคลื่อนเนื่องจากนักพายเรือ (N)
F_R คือ แรงต้านทานเรือ (N)
a คือ ความเร่งของจุดศูนย์กลางมวล (m/s^2)
m_B คือ มวลของเรือ (kg)
m_C คือ มวลของนักพายเรือ (kg)

2.2.2 สมการแรงต้านทานเรือ

การเคลื่อนที่ของเรือพายมังกรจะเคลื่อนที่ช้าลงเนื่องจากแรงต้านทานที่เรียกว่า แรงฉุด (Drag Force) ในการพายเรือแรงต้านทาน แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ แรงต้านทานอากาศ และแรงต้านทานน้ำ

$$F_D = F_{AD} + F_{HD} \tag{2}$$

เมื่อ F_D คือ แรงต้านทานรวม (N)
F_{AD} คือ แรงต้านทานอากาศ (N)
F_{HD} คือ แรงต้านทานน้ำ (N)

ในการเคลื่อนที่ของเรือพายแรงต้านทานของอากาศนั้นจะมีผลกระทบต่อพื้นที่หน้าตัดของเรือ ความเร็วและสัมประสิทธิ์ของแรงต้านทาน โดยอย่างไรก็ตามในระบบการเคลื่อนที่ของเรือแรงต้านทานของอากาศมีผลต่อการเคลื่อนที่เพียง 10% ของแรงต้านทานทั้งหมดของระบบ [12]

$$F_{AD} = \frac{\rho_A}{2} C_A A V_A^2 \tag{3}$$

เมื่อ ρ_A คือ ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)
C_A คือ สัมประสิทธิ์แรงต้านของอากาศ (N/m^2)
A คือ พื้นที่หน้าตัดวัตถุที่สัมผัสอากาศ (m^2)
V_A คือ ความเร็วเฉลี่ย (m/s)

แรงต้านทานน้ำประกอบไปด้วย แรงต้านทานตามพื้นผิวของวัตถุ (Skin Drag) แรงต้านทานเนื่องจากแรงดัน (Pressure Drag) และแรงต้านทานของคลื่น (Wave Drag)

$$F_{HD} = F_{HDs} + F_{HDp} + F_{HDw} \tag{4}$$

เมื่อ F_{HDs} คือ แรงต้านทานตามพื้นผิวของวัตถุ (N)
F_{HDf} คือ แรงต้านทานเนื่องจากแรงดัน (N)
F_{HDw} คือ แรงต้านทานของคลื่น (N)

ในกีฬาเรือพายนั้นแรงต้านทานในน้ำส่วนใหญ่จะเกิดจากแรงต้านทานตามพื้นผิวของวัตถุ (Skin Drag) เป็นแรงต้านทานที่ส่งผลกระทบมากที่สุดต่อการแข่งขันเรือพาย โดยมีค่าประมาณ 90% ของแรงต้านทานของน้ำทั้งหมด [13]

$$F_{HDs} = \frac{\rho_w}{2} C_s A V_w^2 \tag{5}$$

เมื่อ ρ_w คือ ความหนาแน่นของน้ำ (kg/m^3)
C_s คือ สัมประสิทธิ์แรงต้านของน้ำ (N/m^2)
A คือ พื้นที่หน้าตัดของวัตถุที่สัมผัสน้ำ (m^2)

V_w คือ ความเร็วเฉลี่ย (m/s)

2.2.3 สมการแรงยก

แรงแยก (Lift Force) เป็นแรงที่กระทำต่อวัตถุในแนวตั้งฉากกับแรงต้านและการเคลื่อนที่ของวัตถุ โดยสามารถหาได้จากสมการ

$$F_L = \frac{\rho}{2} C_L A V^2 \quad (6)$$

เมื่อ F_L คือ แรงยก (N)
ρ คือ ความหนาแน่นของน้ำ (kg/m^3)
C_L คือ สัมประสิทธิ์ของแรงยก (N/m^2)
A คือ พื้นที่ของวัตถุที่สัมผัสน้ำ (m^2)
V คือ ความเร็วเฉลี่ย (m/s)

2.2.4 ระบบสมการนาเวียร์-สโตกส์

การเคลื่อนที่ของของไหลทั้ง 2 ชนิดที่กระทำกับการพายเรือมังกรใช้ระบบสมการนาเวียร์-สโตกส์ เพื่ออธิบายปรากฏการณ์ทางกายภายของของไหล ประกอบไปด้วยสมการความสัมพันธ์ต่าง ๆ ดังนี้

1) สมการความต่อเนื่อง

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla\cdot\left(\rho\vec{u}\right) = 0 \quad (7)$$

2) สมการโมเมนตัม

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i^2)}{\partial x_i} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\lambda\vec{\nabla}\cdot\vec{V} + 2\mu\frac{\partial u_i}{\partial x_i}\right) + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right)\right] + F_D \quad (8)$$

$$\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_i} + \frac{\partial(\rho u_j^2)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i}\left[\mu\left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\lambda\vec{\nabla}\cdot\vec{V} + 2\mu\frac{\partial u_j}{\partial x_j}\right) + F_L \quad (9)$$

3) สมการแรงที่กระทำกับตัวเรือ

$$F_a = \vec{a}\cdot\vec{F}_p + \vec{a}\cdot\vec{F}_v \quad (10)$$

เมื่อ $\vec{a}$ คือ เวกเตอร์แรงที่ระบุ
$\vec{F}_p$ คือ เวกเตอร์แรงกด
$\vec{F}_v$ คือ เวกเตอร์แรงหนืด

4) สมการแรงต่อหนึ่งการพาย

$$F(t) = A\sin(\omega t + \varphi) + C \quad (11)$$

เมื่อ A คือ แอมพลิจูดแรงที่ใช้ในการพาย (N)
ω คือ รอบการพาย (s/stroke)
t คือ เวลา (s)
φ คือ ปรับกราฟ Sine ให้เริ่มต้นที่ 0 มีค่าเท่ากับ $\frac{\pi}{2}$ =1.571
C คือ ปรับกราฟ Sine ให้เป็นบวกโดยจะมีค่าเท่ากับแอมพลิจูดแรง (N)

2.2.5 แบบจำลองความปั่นป่วนชนิด $k-\omega$ SST

แบบจำลอง $k-\omega$ SST สมการพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (k) เขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j}\right) + \tilde{G}_k - Y_k \quad (12)$$

สมการอัตราลดลงของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนจำเพาะ ω เขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\omega)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\omega u_i)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_\omega\frac{\partial\omega}{\partial x_j}\right)+G_\omega-Y_\omega+D_\omega \quad (13)$$

โดยที่ค่า Effective Diffusivity แสดงดังนี้

$$\Gamma_k=\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k} \quad (14)$$

และ $$\Gamma_k=\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k} \quad (15)$$

โดยที่ μ_t หาได้จาก

$$\mu_t=\frac{\rho k}{\max\left[\frac{1}{\alpha^*},\frac{SF_2}{0.31\omega}\right]\omega} \quad (16)$$

เมื่อ S คือ Strain rate magnitude หาได้จาก

$$S=\frac{1}{2}\left[\frac{\partial u_j}{\partial x_i}+\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right] \quad (17)$$

และ $$F_2=\tanh(\Phi_2^2) \quad (18)$$

โดยที่ $$\Phi_2=\max\left[\frac{2\sqrt{k}}{0.09\omega y},\frac{500\mu}{\rho y^2\omega}\right] \quad (19)$$

$$\alpha^*=\left[\frac{0.33\beta_i+\rho k/6\mu\omega}{1+\rho k/6\mu\omega}\right] \quad (20)$$

$$\sigma_k=\frac{1.176}{F_1+1.176(1-F_1)} \quad (21)$$

$$\sigma_\omega=\frac{2.336}{1.168F_1+2(1-F_1)} \quad (22)$$

$$D_\omega=2(1-F_1)\rho\frac{1}{1.168\omega}\frac{\partial k}{\partial x_j}\frac{\partial\omega}{\partial x_j} \quad (23)$$

$$\beta_i=0.075F_1+0.0828(1-F_1) \quad (24)$$

สำหรับค่าคงที่และที่มาของตัวแปรต่างๆ ในสมการที่ 7-9 และ สมการที่ 12-24 อ้างอิงจาก [14-15]

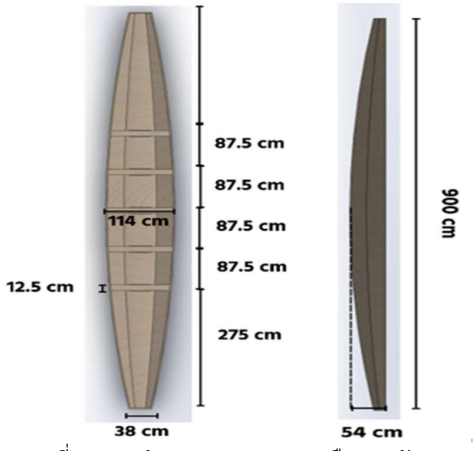
2.3 แบบจำลองและเงื่อนไขขอบเขต

2.3.1 แบบจำลองและคุณสมบัติของเรือพาย

งานวิจัยนี้ใช้เรือพายมังกร 10 ฝีพาย โดยเรือพายมังกรทำจากไม้ตะคียน มีขนาดความกว้าง 114 เซนติเมตร ความยาว 900 เซนติเมตร และความสูง 54 เซนติเมตร ตามมาตรฐานในการแข่งขัน [16] ดังแสดงในตารางที่ 2 และรูปที่ 4

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของเรือพายมังกร

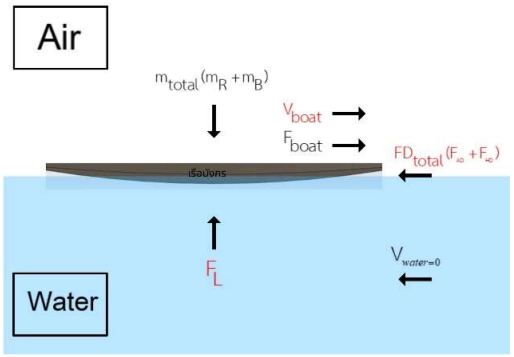
วัสดุ	ไม้ตะเคียน
ความหนาแน่น (kg/m^3)	800
มวล (kg)	180



รูปที่ 4 แบบจำลองและขนาดของเรือพายมังกร

2.3.2 เงื่อนไขขอบเขตของงานวิจัย

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้ได้กำหนดให้อยู่ภายใต้สมมติฐานที่ใช้ในการจำลองดังรูปที่ 5 และค่าคุณสมบัติของของไหลที่ใช้ในแบบจำลองแสดงดังตารางที่ 3 โดยมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ตัวแปรต้น

1. ตำแหน่งที่นั่งของนักพายเรือ

ตัวแปรตาม

1. เวลาที่ในการพาย
2. ความเร็วในการพาย
3. แรงต้านทานที่กระทำต่อการเคลื่อนที่ของเรือพาย
4. แรงยกที่กระทำต่อการเคลื่อนที่ของเรือพาย
5. ความจมของเรือพาย

ตัวแปรควบคุม

เรือพายที่ใช้เป็นเรือพายมังกร 10 ฝีพาย มีขนาดความกว้าง 114 เซนติเมตร ความยาว 900 เซนติเมตร ความสูง 54 เซนติเมตร น้ำหนัก 180 กิโลกรัม ใช้วัสดุเป็นไม้ตะเคียน

สมมติฐาน

1. กำหนดแรงและน้ำหนักของนักพายเรือเป็นจุดตามตำแหน่งของนักพายเรือ
2. กำหนดให้ค่าแรงของนักพายเรือมีค่าตั้งแต่ 175 - 202 N
3. กำหนดให้น้ำหนักของนักพายเรือมีค่าตั้งแต่ 60.3 – 80.3 kg
4. กำหนดให้รูปแบบการพายของนักพายเรือในหนึ่งรอบการพายเป็นรูปแบบกราฟ sine
5. กำหนดรูปแบบการจำลองเป็น Multiphase โดยแบ่งเป็นเฟสน้ำกับเฟสอากาศ
6. ไม่คิดข้อมูลของใบพาย

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของของไหล

คุณสมบัติ	อากาศ	น้ำ
ความหนาแน่น (kg/m^3)	1.225	998.2
ความหนืด $(kg/m\cdot s)$	1.7894e-05	0.001003

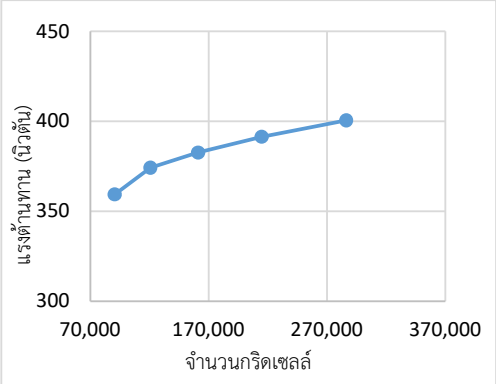
2.4 การวิเคราะห์แบบจำลองด้วยโปรแกรม Ansys Workbench

งานวิจัยนี้แบ่งการวิเคราะห์แบบจำลองออกเป็น 4 ขั้นตอน ได้แก่

2.4.1 การตรวจสอบความเป็นอิสระของกริด (Grid Independence Study)

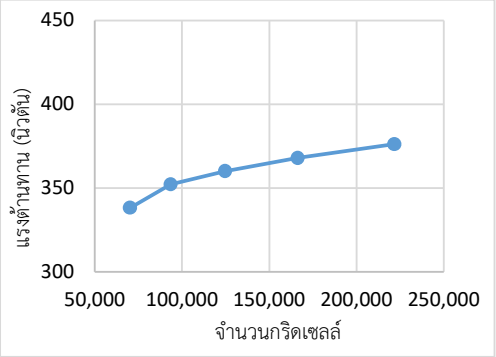
การตรวจสอบความเป็นอิสระของกริด คือการตรวจสอบจำนวนกริดเซลล์ เพื่อให้ผลลัพธ์ในการวิเคราะห์มีความแม่นยำมากขึ้น ในการตรวจสอบความเป็นอิสระของกริดสำหรับงานวิจัยนี้พิจารณาจากแรงต้านทานที่มากระทำกับการเคลื่อนที่ของเรือพายมังกรเทียบกับจำนวนกริดเซลล์ในทุกๆโดเมน โดยการตรวจสอบความเป็นอิสระของกริดทั้ง 3 รูปแบบ มีดังนี้

1) การตรวจสอบความเป็นอิสระของกริดรูปแบบที่ 1 จากการตรวจสอบพบว่าจำนวนกริดเซลล์ที่ 120,778 กริดเซลล์ และ 161,037 กริดเซลล์ มีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าแรงต้านทานน้อยกว่า 3% ดังนั้น กริดเซลล์ที่ 161,037 กริดเซลล์ จึงมีความละเอียดเพียงพอสำหรับการวิเคราะห์ในครั้งนี้ หากมีการเพิ่มจำนวนของกริดเซลล์นั้นพบว่ามีค่าแตกต่างของค่าแรงต้านทานเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 6



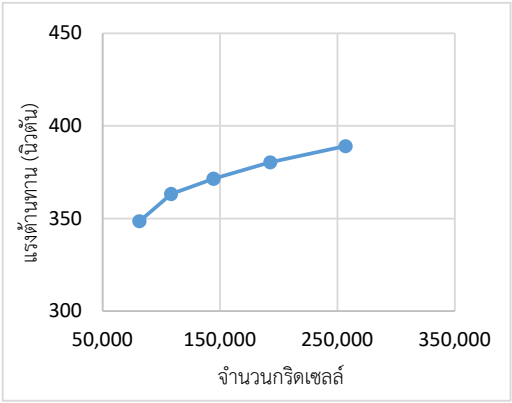
รูปที่ 6 การตรวจสอบความเป็นอิสระของกริดรูปแบบที่ 1

2) การตรวจสอบความเป็นอิสระของกริดรูปแบบที่ 2 จากการตรวจสอบพบว่าจำนวนกริดเซลล์ที่ 93,441 กริดเซลล์ และ 124,588 กริดเซลล์ มีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าแรงต้านทานน้อยกว่า 3% ดังนั้น กริดเซลล์ที่ 124,588 กริดเซลล์ จึงมีความละเอียดเพียงพอสำหรับการวิเคราะห์ในครั้งนี้ หากมีการเพิ่มจำนวนของกริดเซลล์นั้นพบว่ามีค่าแตกต่างของค่าแรงต้านทานเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 การตรวจสอบความเป็นอิสระของกริดรูปแบบที่ 2

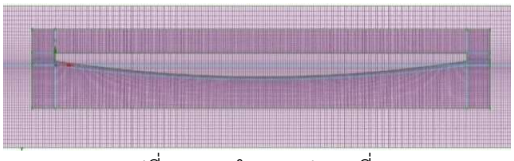
3) การตรวจสอบความเป็นอิสระของกริดรูปแบบที่ 3 จากการตรวจสอบพบว่าจำนวนกริดเซลล์ที่ 108,420 กริดเซลล์ และ 144,560 กริดเซลล์ มีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าแรงต้านทานน้อยกว่า 3% ดังนั้น กริดเซลล์ที่ 144,560 กริดเซลล์ จึงมีความละเอียดเพียงพอสำหรับการวิเคราะห์ในครั้งนี้ หากมีการเพิ่มจำนวนของกริดเซลล์นั้นพบว่ามีค่าแตกต่างของค่าแรงต้านทานเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 8



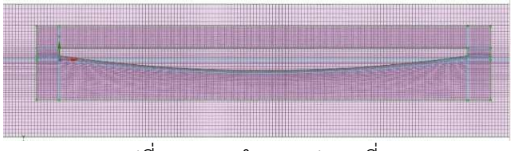
รูปที่ 8 การตรวจสอบความเป็นอิสระของกริดรูปแบบที่ 3

2.4.2 แบบจำลอง

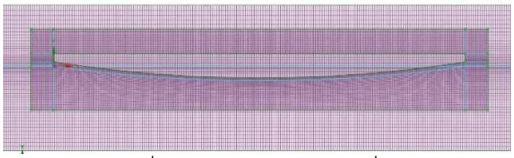
การสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของของไหลที่มากระทำกับกับการเคลื่อนที่ของเรือพายมังกรใช้เอลิเมนต์แบบ Hex Mesh โดยใช้วิธี Overset grid แบบ Blocking Mesh เนื่องจากแบบจำลองที่ใช้เป็น Multiphase ทำให้การใช้เอลิเมนต์ชนิดนี้แบ่งแยกเฟสอากาศกับเฟสน้ำได้ชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 9-11



รูปที่ 9 แบบจำลองรูปแบบที่ 1



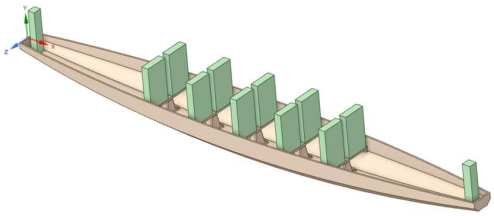
รูปที่ 10 แบบจำลองรูปแบบที่ 2



รูปที่ 11 แบบจำลองรูปแบบที่ 3

2.4.3 การวิเคราะห์การกระจายตัวของน้ำหนัก

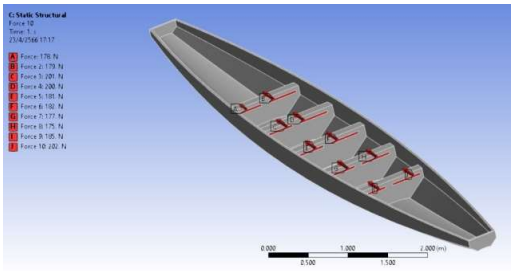
งานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์ความจมของท้องเรือใน 3 มิติ เป็นการวิเคราะห์การกระจายตัวของน้ำหนักนักพายเรือที่กระทำต่อเรือ และการกระจายตัวของน้ำหนักนักพายเรือและเรือที่กระทำกับน้ำ โดยใช้โปรแกรม Ansys Spaceclaim ในการสร้างแบบจำลอง เพื่อกำหนดเงื่อนไขให้เป็นไปตามการพายเรือจริง ดังแสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 12 การวิเคราะห์การกระจายตัวของน้ำหนัก

2.4.4 การวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของเรือพายมังกร

งานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของเรือใน 2 มิติ เป็นการการวิเคราะห์เวลา และความเร็วในการเคลื่อนที่ของเรือพาย ตลอดจนแรงต้านทานและแรงยกที่มากระทำต่อการเคลื่อนที่ของเรือ โดยทำการวิเคราะห์แรงของนักพายเรือใน 3 มิติ กำหนดให้แรงของนักพายเรือในแต่ละจุดตามรูปแบบตำแหน่งที่กำหนด ในโปรแกรม Static Structural ดังแสดงในรูปที่ 13 กำหนดค่าแรงเทียบกับเวลาให้อยู่ในรูปของกราฟ Sine ต่อ 1 การพาย จากนั้นนำค่า Force Reaction สูงสุดมาวิเคราะห์หาความเร็วและเวลาในการเคลื่อนที่ของเรือพายในโปรแกรม Ansys Fluent



รูปที่ 13 การวิเคราะห์แรงของนักพายเรือ

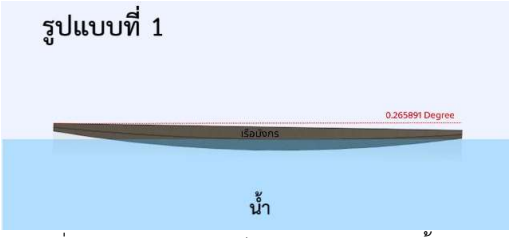
3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การศึกษาการเคลื่อนที่ของเรือพายมังกร และหารูปแบบตำแหน่งน้ำหนักของนักพายเรือที่ทำให้เรือพายมังกรมีประสิทธิภาพสูงสุดในการแข่งขันในระยะทาง 200 เมตร ตลอดจนศึกษาพฤติกรรมของของไหลที่มากระทำกับการเคลื่อนที่ของเรือพายมังกรที่ส่งผลต่อความเร็วภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดด้วยโปรแกรม Ansys Workbench มีผลการวิเคราะห์ดังนี้

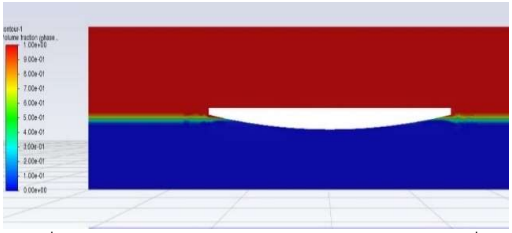
3.1 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของน้ำหนัก

จากการวิเคราะห์การกระจายตัวของน้ำหนักนักพายเรือและเรือที่กระทำกับน้ำโดยใช้ Ansys Spaceclaim ใน 3 รูปแบบ มีผลการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

1) ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของน้ำหนักรูปแบบที่ 1



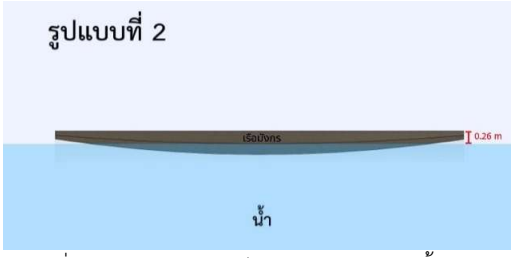
รูปที่ 14 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของน้ำหนักรูปแบบที่ 1



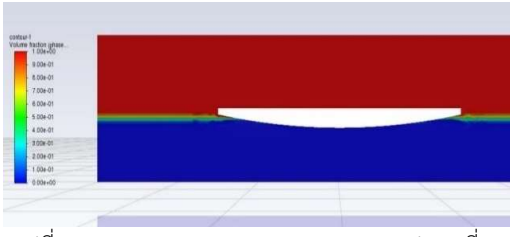
รูปที่ 15 Contour Phase ของ Air-Water รูปแบบที่ 1

จากรูปที่ 14 และ 15 เป็นการวิเคราะห์การกระจายตัวของน้ำหนักนักพายเรือ โดยกำหนดให้นักพายเรือที่มีน้ำหนักมากไว้ด้านหน้าของเรือพาย (รูปแบบที่ 1) มีค่าการจมของหน้าเรือทำมุม 0.266 องศา กับแนวระนาบของผิวน้ำ

2) ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของน้ำหนักรูปแบบที่ 2



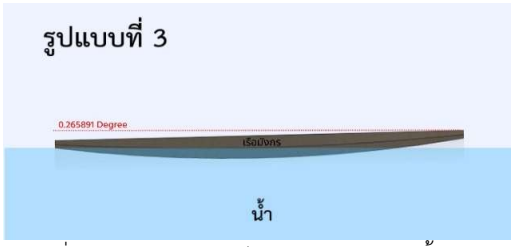
รูปที่ 16 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของน้ำหนักรูปแบบที่ 2



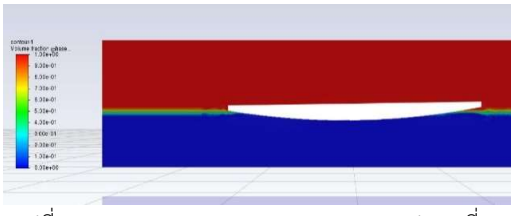
รูปที่ 17 Contour Phase ของ Air-Water รูปแบบที่ 2

จากรูปที่ 16 และ 17 เป็นการวิเคราะห์การกระจายตัวของน้ำหนักนักพายเรือ โดยกำหนดให้นักพายเรือที่มีน้ำหนักมากไว้ด้านกลางของเรือพาย (รูปแบบที่ 2) มีค่า 0.26 เมตร จากกราบเรือถึงผิวน้ำ

3) ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของน้ำหนักรูปแบบที่ 2



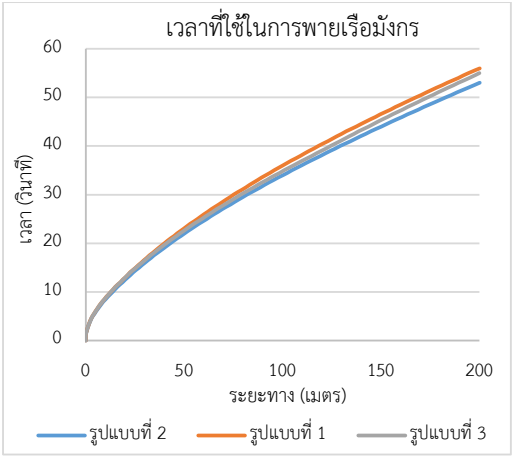
รูปที่ 18 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของน้ำหนักรูปแบบที่ 3



รูปที่ 19 Contour Phase ของ Air-Water รูปแบบที่ 3

จากรูปที่ 18 และ 19 เป็นการวิเคราะห์การกระจายตัวของน้ำหนักนักพายเรือ โดยกำหนดให้นักพายเรือที่มีน้ำหนักมากไว้ด้านท้ายของเรือพาย (รูปแบบที่ 3) มีค่าการจมของท้ายเรือทำมุม 0.266 องศา กับแนวระนาบของผิวน้ำ

3.2 เวลาที่ใช้ในการพายเรือมังกรในระยะทาง 200 เมตร



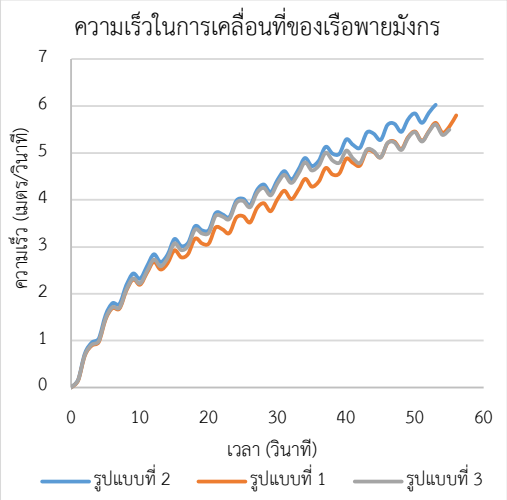
รูปที่ 20 เวลาที่ใช้ในการพายเรือมังกรในระยะทาง 200 เมตร

ตารางที่ 4 เวลาที่ใช้ในการพายเรือมังกรในระยะทาง 200 เมตร

รูปแบบที่	เวลาที่ใช้ในการพาย (s)
1	56.00
2	53.00
3	55.01

จากรูปที่ 20 และตารางที่ 4 เป็นการวิเคราะห์เวลาที่ใช้ในการเรือมังกรในระยะทาง 200 เมตร จากการวิเคราะห์ดังกล่าวนี้ทำให้ทราบว่า รูปแบบที่ 2 นักพายเรือที่มีน้ำหนักมากไว้ตรงกลางของเรือพาย ให้ค่าเวลาที่ใช้ในการพายที่ดีที่สุดในระยะทาง 200 เมตร เนื่องจากมีการกระจายตัวของน้ำหนักที่เหมาะสมทำให้เกิดการสมดุลของเรือในการเคลื่อนที่ที่กระทำกับของไหล [17]

3.3 ความเร็วในการเคลื่อนที่ของเรือพายมังกร



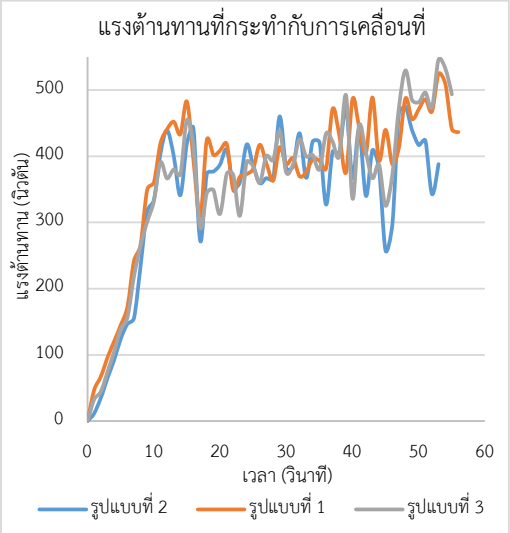
รูปที่ 21 ความเร็วในการเคลื่อนที่ของเรือพายมังกร

ตารางที่ 5 ความเร็วในการเคลื่อนที่ของเรือพายมังกร

รูปแบบที่	ความเร็วในการพาย (m/s)
1	3.628
2	3.817
3	3.727

จากรูปที่ 21 และตารางที่ 5 เป็นการวิเคราะห์ความเร็วในการเคลื่อนที่ของเรือพายมังกร จากการวิเคราะห์ดังกล่าวนี้ทำให้ทราบว่า รูปแบบที่ 2 คือการจัดตำแหน่งนักพายเรือที่มีน้ำหนักมากไว้ตรงกลางของเรือพาย ให้ผลลัพธ์ความเร็วเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ของเรือพายมังกรดีที่สุด เนื่องจากมีการกระจายตัวของน้ำหนักนักพายเรือที่เหมาะสมทำให้พื้นที่ผิวของเรือพายสัมพันธ์กับน้ำน้อยจึงทำให้มีความเร็วสูงสุด [18]

3.4 แรงต้านทานที่กระทำกับการเคลื่อนที่ของเรือพายมังกร



รูปที่ 22 แรงต้านทานที่กระทำกับการเคลื่อนที่ของเรือพายมังกร

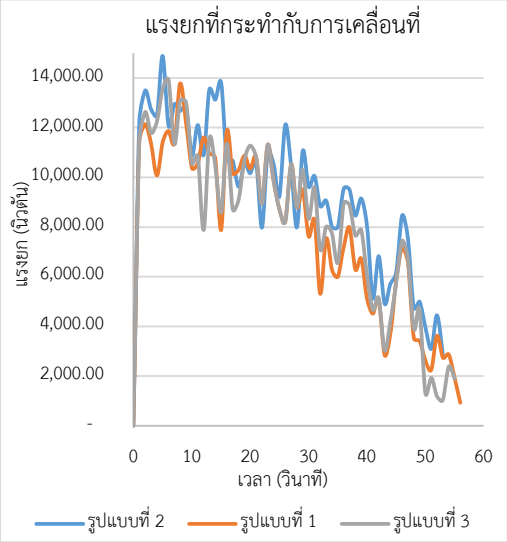
ตารางที่ 6 แรงต้านทานที่กระทำกับการเคลื่อนที่ของเรือพายมังกร

รูปแบบที่	แรงต้านทาน (N)
1	372.357
2	339.156
3	357.876

จากรูปที่ 22 และตารางที่ 6 เป็นการวิเคราะห์แรงต้านทานที่กระทำกับการเคลื่อนที่ของเรือพายมังกร จากการวิเคราะห์ดังกล่าวนี้ทำให้ทราบว่า รูปแบบที่ 2 นักพายเรือที่มีน้ำหนักมากไว้ตรงกลางของเรือพายให้ค่าแรงต้านทานที่กระทำกับการเคลื่อนที่ของเรือพายมังกรเฉลี่ยดีที่สุด เนื่องจากในรูปแบบนี้มีการกระจายตัวของน้ำหนักที่เหมาะสม ทำให้พื้นที่ผิวของเรือที่สัมผัสกับน้ำน้อย เป็นผลให้แรงต้านทานที่กระทำต่อการเคลื่อนที่ของเรือพายมังกร

มีค่าน้อยที่สุด ดังนั้นผลการวิเคราะห์ดังกล่าวนี้จะสอดคล้องกับงานวิจัย [13] ที่กล่าวว่าแรงต้านทานตามพื้นผิว (Skin Drag) คิดเป็น 90% ของแรงต้านทั้งหมดสำหรับเรือที่มีความเร็วต่ำ

3.5 แรงยกที่กระทำกับการเคลื่อนที่ของเรือพายมังกร



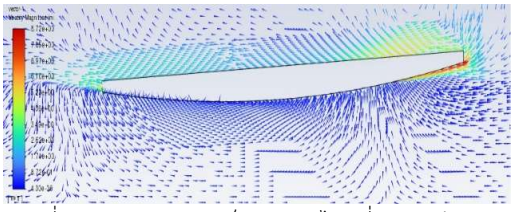
รูปที่ 23 แรงยกที่กระทำกับการเคลื่อนที่ของเรือพายมังกร

ตารางที่ 7 แรงยกที่กระทำกับการเคลื่อนที่ของเรือพายมังกร

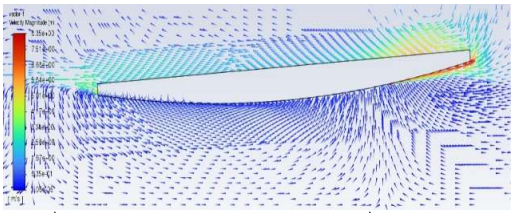
รูปแบบที่	แรงยก (N)
1	7,754.71
2	9,268.35
3	8.099.27

จากรูปที่ 23 และตารางที่ 7 เป็นการวิเคราะห์แรงยกที่กระทำกับการเคลื่อนที่ของเรือพายมังกร จากการวิเคราะห์ดังกล่าวนี้ทำให้ทราบว่ารูปแบบที่ 2 นักพายเรือที่มีน้ำหนักมากไว้ตรงกลางของเรือพายให้ค่าแรงยกที่กระทำการเคลื่อนที่ของเรือพายมังกรเฉลี่ยดีที่สุด เนื่องจากแรงยกคือแรงที่กระทำต่อพื้นที่ผิวและมุมปะทะของเรือพาย หากมีแรงยกที่มากระทำกับเรือพายมาก จะส่งผลให้พื้นที่ผิวของเรือพายที่สัมผัสกับน้ำน้อยลงเป็นผลให้แรงต้านทานที่กระทำกับการเคลื่อนที่ของเรือพายมังกรลดลง [19]

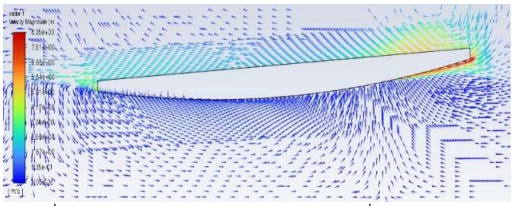
3.6 ความเร็วของของไหลที่กระทำต่อการเคลื่อนที่ของเรือพายมังกรในระยะทาง 200 เมตร



รูปที่ 24 Vector ความเร็วของของไหลที่กระทำต่อการเคลื่อนที่ของเรือพายมังกร รูปแบบที่ 1



รูปที่ 25 Vector ความเร็วของของไหลที่กระทำต่อการเคลื่อนที่ของเรือพายมังกร รูปแบบที่ 2

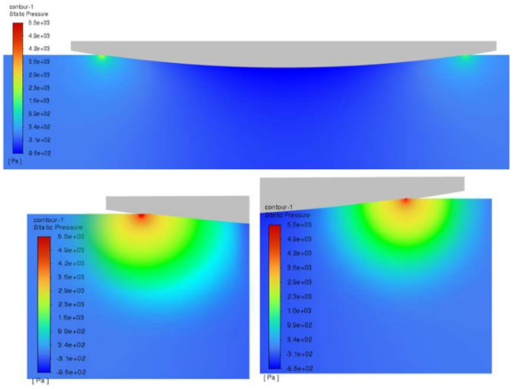


รูปที่ 26 Vector ความเร็วของของไหลที่กระทำต่อการเคลื่อนที่ของเรือพายมังกร รูปแบบที่ 3

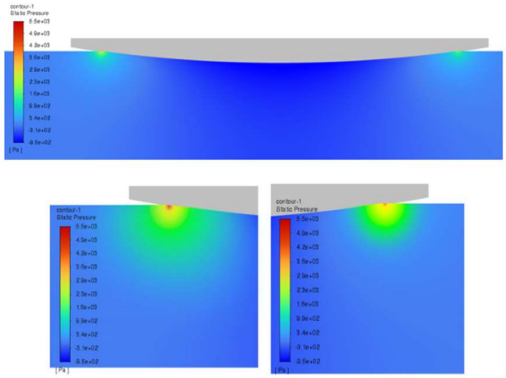
จากรูปที่ 24-26 แสดงเวคเตอร์ความเร็วของของไหลที่กระทำต่อการเคลื่อนที่ของเรือพายมังกรทั้ง 3 รูปแบบ จากการวิเคราะห์พบว่ารูปแบบที่ 2 นักพายเรือที่มีน้ำหนักมากไว้ตรงกลางของเรือพายแสดงเวคเตอร์ความเร็วของของไหลทั้งน้ำและอากาศที่กระทำกับการเคลื่อนที่ของเรือพายมังกรมากที่สุด เนื่องจากรูปแบบนี้มีค่าความเร็วใน

การเคลื่อนที่ของเรือพายมากที่สุด ซึ่งจะสอดคล้องกับทฤษฎีความเร็วของของไหล

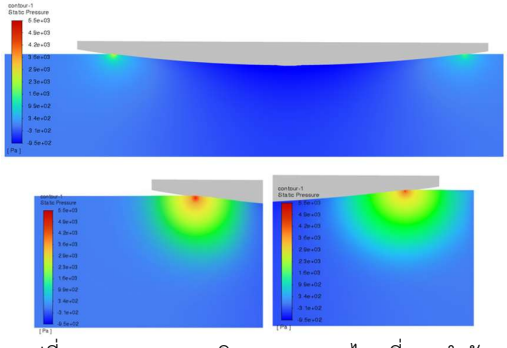
3.7 พฤติกรรมของของไหลที่กระทำต่อการเคลื่อนที่ของเรือพายมังกรในระยะทาง 200 เมตร



รูปที่ 27 Contour พฤติกรรมของของไหลที่กระทำกับการเคลื่อนที่ของเรือพายมังกร รูปแบบที่ 1



รูปที่ 28 Contour พฤติกรรมของของไหลที่กระทำกับการเคลื่อนที่ของเรือพายมังกร รูปแบบที่ 2



รูปที่ 29 Contour พฤติกรรมของของไหลที่กระทำกับการเคลื่อนที่ของเรือพายมังกร รูปแบบที่ 3

จากรูปที่ 27-29 แสดง Contour พฤติกรรมของของไหลที่กระทำกับการเคลื่อนที่ของเรือพายมังกรทั้ง 3 รูปแบบ จากการวิเคราะห์พบว่ารูปแบบที่ 2 นักพายเรือที่มีน้ำหนักมากไว้ตรงกลางของเรือพายแสดงแรงดันของของไหลที่มากระทำต่อการเคลื่อนที่ของเรือพายน้อยที่สุด เนื่องจากมีการกระจายตัวของน้ำหนักที่เหมาะสม ทำให้พื้นที่ผิวของเรือที่สัมผัสกับน้ำน้อย

4. สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของเรือพายมังกร 10 ฝีพาย ในระยะทาง 200 เมตร พบว่าการจัดรูปแบบตำแหน่งน้ำหนักนักพายเรือที่เหมาะสมที่สุดคือ รูปแบบที่ 2 นักพายเรือที่มีน้ำหนักมากไว้ตรงกลางของเรือพาย เนื่องจากให้ผลการวิเคราะห์ดีที่สุด จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าวนี้ทำให้ทราบว่าตำแหน่งน้ำหนักของนักพายเรือเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อการเคลื่อนที่ของเรือพายมังกร หากมีการจัดตำแหน่งน้ำหนักนักพายเรือให้มีความสมดุลจะทำให้มีแรงยกที่กระทำกับการเคลื่อนที่ของเรือพายมังกรมากที่สุด ส่งผลให้พื้นที่ผิวของเรือที่สัมผัสกับน้ำน้อย เป็นผลให้แรงต้านทานที่กระทำกับการเคลื่อนที่ของเรือมังกรลดลง และทำให้ความเร็วในรูปแบบนี้มีค่ามากกว่ารูปแบบอื่น ในขณะที่ใช้เวลาในการพายน้อยที่สุดในระยะทาง 200 เมตร

5. ข้อเสนอแนะ

1) ขยายขอบเขตการศึกษาการเคลื่อนที่ของเรือพายมังกรใน 3 มิติ เพื่อให้ได้พฤติกรรมการเคลื่อนที่ที่สมจริงยิ่งขึ้น

2) ควรพิจารณาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความเร็วในการเคลื่อนที่ของเรือพายมังกร เช่น อัตราการพายเรือ เพื่อให้ได้คำตอบที่ถูกต้องมากขึ้น

3) ควรคำนึงถึงหลักสรีรวิทยา เช่น พิจารณาความล้าของกล้ามเนื้อ เพราะการพายเรือนั้นมีช่วงที่นักพายเรือเกิดความล้าทำให้ค่าแรงที่นำมาพิจารณามีความคลาดเคลื่อน

4) ขยายขอบเขตการศึกษาระยะทางในการเคลื่อนที่ของเรือพายมังกร ตามกติกาการแข่งขัน เช่น 500 เมตร 1,000 เมตร และ 2,000 เมตร เพื่อดูพฤติกรรมของของไหลที่มากระทำต่อการเคลื่อนที่ของเรือพายมังกร

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ภาควิชาวิทยาศาสตร์การกีฬา คณะพลศึกษา มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ และสมาคมกีฬาเรือพายแห่งประเทศไทย ที่สนับสนุนงานวิจัยในครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

[1] TP. Martin and JS. Bernfield "Effect of stroke rate on velocity of a rowing," *Medicine and Science in Sports and Exercise*, vol. 12, no. 4, pp. 250-256, 1980.

[2] M. J. Hofmijster, E. H. Landman, R. M. Smith and A. J. Van Soest, "Effect of stroke rate on the distribution of net mechanical power in rowing," *J Sports Sci,* vol. 25, no. 4, pp. 403-411, 2007.

[3] J. Gomory, K. Ball and R. Stokes, "A system to measure the kinematics, kinetics and effort of dragon boat paddling," *Procedia Engineering,* vol. 13, pp. 457-463, 2011.

[4] S. Karmanov and F. L. Chernousko, "Simple Modelling of the Rowing Process," *IFAC-PapersOnLine,* vol. 48, no. 1, pp. 829-833, 2015.

[5] P. Rachnavy, "Rowing Parameters for Optimal Effectiveness in Sculling," Doctoral dissertation, Suranaree University, 2007.

[6] L. Formaggia, E. Miglio, A. Mola and A. Montano, "A model for the dynamics of rowing boats," *International Journal for Numerical Methods in Fluids,* vol. 61, no. 2, pp. 119-143, 2009.

[7] C. Sawade, S. Turnock, A. Forrester and M. Toward, "Improved rehabilitation and training techniques through the use of motion simulation – Core strength conditioning for elite rowers," *Procedia Engineering,* vol. 34, pp. 646-651, 2012.

[8] A. G. Elkafas, M. M. Elgohary and A. E. Zeid, "Numerical study on the hydrodynamic drag force of a container ship model," *Alexandria Engineering Journal,* vol. 58, no. 3, pp. 849-859, 2019.

[9] E. Giraldo-Pérez, E. Betancur and G. Osorio-Gómez, "Experimental and statistical analysis of the hydrodynamic performance of planing boats: A Comparative study," *Ocean Engineering,* vol. 262, 2022.

[10] A. Dudhia. Physics of Rowing [online]. Avaliable: http://eodg.atm.ox.ac.uk/user/dudhia/rowing/physics/index

[11] M. van Holst. (2004). Simulation of Rowing [Online]. Available: http://home.hccnet.nl/m.holst/report.html

[12] D.-l. S. F. HOERNER. FLUID-DYNAMIC DRAG [online]. Available: https://ia600707.us.archive.org/13/items/*FluidDynamicDragHoerner1965*/Fluid-dynamic_drag__Hoerner__1965_text.pdf

[13] A. G. Elkafas, M. M. Elgohary and A. E. Zeid, "Numerical study on the hydrodynamic drag force of a container ship model," *Alexandria Engineering Journal,* vol. 58, no. 3, pp. 849-859, 2019.

[14] M. Kaewbumrung, T. Sukchana, C. Jaiboonma, A. bumrungkit, S. Sirikasemsuk, C.

Khurukijwanich, R. Thipsena, W. Chayinthu, K. Nutasarin, K. C. Sitthiwang and C. Plengsa-ard. "Numerical study to predict airflow under the roof garret for Wat Chang Yai Phra Nakhon Si Ayutthaya Province," *Journal of Industrial Technology and Innovation,* vol.2, no,1, pp. 1-14, 2023.

[15] ANSYS. Ansys Fluent 12.0 Theory Guide [online]. Avaliable: https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node1.htm

[16] I. D. B. Federation. Manufacturers' Licencing Schemes for Racing Dragon Boats and Recing Paddles [online]: Avaliable: www.idbf.org

[17] M.-G. Seo, Y. Kim, and D.-M. Park, "Effect of internal sloshing on added resistance of ship," *Journal of Hydrodynamics,* vol. 29, no. 1, pp. 13-26, 2017.

[18] A. Dudhia. Effect of Weight in Rowing [online]. Avaliavle: http://eodg.atm.ox.ac.uk/user/dudhia/rowing/physics/weight.html

[19] B. Suwasono, H. M. A. Akbar, A. Sahir and A. Munazid, "Outrigger RC Boat Model Hull Development as A High Speed Craft Based on Resistance and Lift Force," *Procedia Engineering,* vol. 194, pp. 197-202, 2017.

Srinakharinwirot University Engineering Journal (2023) 19(1), 16-28 วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีที่ 19 ฉบับที่ 1 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2566 – มีนาคม พ.ศ. 2567

การกำจัดสีย้อมแอซิดในสารละลายด้วยกระบวนการดูดซับร่วมกับโอโซนออกซิเดชัน

Decolorization of Acid Dye in Aqueous Solution by a Combined Adsorption–Ozonation Process

พัชรี คำธิตา* นัทธพงศ์ อติภาสวร
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต ปทุมธานี 12000
Patcharee Kamthita* Natthapong Atipasaworn
Department of Chemical Engineering, College of Engineering,
Rangsit University, Patumthani, 12000
*Corresponding author E-mail: patcharee.k@rsu.ac.th
(Received: February 27, 2023; Revised: July 10, 2023 ; Accepted: August 17, 2023)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการลดความเข้มสีและย่อยสลายสีย้อมเหลืองแอซิด36 ในสารละลาย โดยเปรียบเทียบกระบวนการดูดซับด้วยอลูมินากัมมันต์ที่เตรียมจากเศษบรรจุภัณฑ์อลูมิเนียม กระบวนการโอโซนออกซิเดชัน และกระบวนการร่วมระหว่างการดูดซับกับโอโซนออกซิเดชัน ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการกำจัดสีย้อม เช่น ความเป็นกรด-ด่าง ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม เวลาในการดูดซับ และเวลาในการใช้โอโซน ผลการศึกษาพบว่าการดูดซับด้วยอลูมินากัมมันต์และโอโซนออกซิเดชันแบบกระบวนการเดี่ยวนั้นสามารถกำจัดสีย้อมได้ 98.2% และ 97.5% ลดค่าซีโอดีได้ 95% และ 65% ตามลำดับ ภายในเวลา 50 นาที ซึ่งกระบวนการโอโซนออกซิเดชันสามารถลดความเข้มข้นของสีย้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพแต่ลดค่าซีโอดีได้น้อยกว่าการดูดซับ เมื่อใช้กระบวนการผสมผสานระหว่างการดูดซับร่วมกับโอโซนออกซิเดชันในระบบ 3 วัฏภาคที่สภาวะความเป็นกรดภายในเวลา 20 นาที สามารถลดความเข้มข้นของสีย้อมในสารละลายได้ 98.7% และลดค่าซีโอดีได้ 60% จาก 160 mg/L เหลือ 64 mg/L จากการศึกษาจลนศาสตร์ของการกำจัดสีย้อมเหลืองแอซิด 36 พบว่าการดูดซับร่วมกับโอโซนออกซิเดชันสอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับสองเทียมที่มีค่าคงที่อัตรามากกว่าปฏิกิริยาอันดับสองเทียมของการดูดซับหรือโอโซนออกซิเดชันอย่างเดียว เห็นได้ว่ากระบวนการแบบผสมผสานนี้สามารถใช้เป็นทางเลือกหนึ่งในการลดเวลาการบำบัดน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: สีย้อมเหลืองแอซิด36 การดูดซับ อลูมินากัมมันต์ โอโซนออกซิเดชัน

ABSTRACT

This research aimed to study the decolorization and degradation of acid yellow 36 in an aqueous solution by comparing three different processes: adsorption on activated alumina prepared from aluminum packaging scrap, oxidation with ozone, and a combination of adsorption and ozone oxidation. The effects of pH, initial dye concentration, adsorption time, and ozonation time were investigated. The results showed that activated alumina adsorption and ozone oxidation with a single process could remove 98.2% and 97.5% of the dye concentration and reduce the COD by 95% and 65%, respectively,

in 50 minutes. The ozone oxidation process could effectively remove the dye concentration but reduce the COD less than adsorption. When using a combination process between adsorption and ozonation in a three-phase system at acidic conditions within 20 min, achieved 98.7% removal of acid dye and a 60% reduction of the COD from 160 mg/L to 64 mg/L. The kinetics of the acid yellow 36 removal were studied. It was found that the combined process corresponded to the pseudo-second-order reaction with a higher rate constant than the pseudo-second-order reaction of the single process. The combined process can be used as an alternative method to effectively reduce the wastewater treatment time.

Keyword: Acid yellow 36, adsorption, activated alumina, ozone oxidation (ozonation).

1. บทนำ

อุตสาหกรรมสิ่งทอเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่ส่งผลโดยตรงต่อมลพิษทางน้ำ เนื่องจากในระหว่างกระบวนการผลิตสิ่งทอมีการใช้น้ำเป็นส่วนสำคัญต่อกระบวนการฟอกย้อม สารเคมีหลักที่ใช้ในการย้อมเส้นใยคือสีย้อม เช่น สีย้อมแอซิด (acid dyes) เป็นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการย้อมสีสิ่งทอเหมาะสำหรับย้อมเส้นใยโปรตีน เช่น ขนสัตว์ ไหม และเส้นใยสังเคราะห์บางชนิด ได้แก่ ไนลอน เส้นใยพอลิเอไมด์ ตัวอย่างสีย้อมเช่น สีย้อมเหลืองแอซิด 36 (acid yellow 36) หรือมีชื่อเรียก metanil yellow acid, สีย้อม acid yellow G เป็นสีในเฉดเหลือง ส้ม แดง ขึ้นกับค่าความเป็นกรดด่างของสารละลาย

สีย้อมแอซิดเป็นสีย้อมที่มีโครงสร้างโครโมฟอร์ (chromophores) ประกอบด้วยพันธะคู่ของไนโตรเจน (–N=N–) เชื่อมต่อวงแอโรมาติกส์ 2 วง ทำให้เกิดสีสดใสและเข้ม เมื่อละลายน้ำแล้วโมเลกุลสีจะมีประจุเป็นลบจึงเรียกว่า สีย้อมแอนไอออน (anionic dyes) เนื่องจากสีชนิดนี้สามารถกระจายตัวในน้ำได้ดี โมเลกุลของสีย้อมไม่เกาะกันเป็นกลุ่มๆ จึงทำให้ได้ผลการย้อมสีที่สม่ำเสมอ โครงสร้างโมเลกุลของสีแอซิดส่วนใหญ่เป็นเกลือโซเดียมของกรดอินทรีย์สามารถย้อมและดูดติดเส้นใยได้ดีในสารละลายสีย้อมที่มีสภาพเป็นกรดช่วง pH 2-3 ซึ่งกลไกการดูดติดสีเกิดขึ้นระหว่างหมู่เอมีน (NH_2) ในเส้นใยกับหมู่ซัลเฟตของสีย้อม (NaO_3S) โดยอาศัยไฮโดรเจนไอออน (H^+) จากสภาวะความเป็นกรดของสารละลายสีย้อม สีย้อมชนิดนี้มีความคงทนต่อแสงแดด การขัดถูและทนต่อการซักล้างอยู่ในเกณฑ์ปานกลางถึงดีมาก ซึ่งในกระบวนการฟอกย้อมถ้ามีการปล่อยน้ำเสียที่มีสารเคมีเหล่านี้เจือปนอยู่ลงสู่แหล่งน้ำก่อนการบำบัดจะก่อให้เกิดมลพิษทางน้ำ ตลอดจนส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในแหล่งน้ำ เนื่องจากสีย้อมมีองค์ประกอบของสารอินทรีย์ที่เป็นสารก่อมะเร็ง เช่น สารประกอบจำพวกแอโรมาติกส์ ถ้ามีปริมาณสารเหล่านี้เจือปนในน้ำสูงจะทำให้มีปริมาณออกซิเจนในน้ำต่ำ และมีความเข้มสีสูงทำลายทัศนียภาพ จึงมีการควบคุมคุณภาพของน้ำทิ้งจากกระบวนการฟอกย้อม โดยใช้การบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคการบำบัดทางกายภาพ การบำบัดทางเคมีและการบำบัดทางชีวภาพ (physico-chemical and biological techniques) เช่น การตกตะกอนด้วยสารเคมีหรือกระบวนการโคแอกกูเลชัน การดูดซับด้วยสารดูดซับชนิดต่างๆ [1, 2, 3] การทำปฏิกิริยาโฟโตเคมีด้วย $UV/H_2O_2/O_3$ เพื่อเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสีย้อม และการใช้โอโซนออกซิเดชันในการย่อยสลายโมเลกุลของสีย้อม [4, 5, 6] ส่วนการบำบัดสีย้อมทางชีวภาพมีประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำเนื่องจากน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีความเป็นพิษ ทำให้จุลินทรีย์ไม่สามารถย่อยสลายได้อย่างมีประสิทธิภาพ

นอกจากนี้ได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีกระบวนการบำบัดน้ำทิ้งแบบผสมผสานด้วยวิธีการบำบัดทางกายภาพทางเคมีและกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (advanced

oxidation processes; AOPs) เช่น โคแอกกูเลชันร่วมกับโอโซนออกซิเดชัน (coagulation–ozonation) สามารถกำจัดสีย้อมในน้ำทิ้งและช่วยลดค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมีหรือซีโอดี (chemical oxygen demand; COD) โคแอกกูเลชันร่วมกับการดูดซับ (coagulation–adsorption) และการดูดซับร่วมกับการทำปฏิกิริยาโฟโตเคมี (adsorption–photochemistry) สามารถลดความเข้มข้นสีย้อมรีแอกทีฟหลายชนิด [1, 7] และการผสมผสานระหว่างโอโซนออกซิเดชันร่วมกับการดูดซับ (ozonation–adsorption) ซึ่งวิธีการผสมผสานนี้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย เช่นการกำจัดสีย้อมแอซิด สีย้อมเบสิก และสีย้อมรีแอกทีฟ [8, 9, 10] การกำจัดสารอินทรีย์จำพวกสารประกอบฟีนอล [11, 12, 13] และการกำจัดไอออนของโลหะ [14] เนื่องจากโอโซนเป็นสารออกซิไดซ์ที่มีความรุนแรงสามารถทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ที่เป็นอิเล็กโทรฟิลิก (electrophilic) และมีความหนาแน่นของประจุลบมาก จึงเกิดปฏิกิริยากับสารประกอบที่มีพันธะคู่ของคาร์บอน (–C=C–) หรือพันธะคู่ของไนโตรเจน (–N=N–) ที่เชื่อมต่อกับวงแอโรเมติกส์ โดยการให้อิเล็กตรอนที่ตำแหน่งออร์โธและตำแหน่งพารา เกิดการแทนที่ด้วยไฮดรอกซิล (–OH) หรือเอมีน ($–NH_2$) และมีการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยเปลี่ยนโครงสร้างของสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งกลายเป็นสารประกอบชนิดต่างๆ แต่กระบวนการโอโซนออกซิเดชันสามารถลดค่าซีโอดีได้น้อย [4, 5, 8] จึงมีการใช้กระบวนการดูดซับเข้ามาร่วมด้วย เนื่องจากสารดูดซับมีพื้นที่ผิวมากและมีความสามารถในการดูดซับสารประกอบที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่และขนาดเล็กได้ แต่มีข้อจำกัดในด้านการจัดการกากของแข็งที่เป็นสารดูดซับหรือการนำกลับมาใช้ใหม่ เช่น ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) เป็นสารดูดซับที่มีประสิทธิภาพและนิยมใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสีย แต่การผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพนั้นใช้ต้นทุนค่อนข้างสูง จึงได้มีการพัฒนาผลิตสารดูดซับที่มีประสิทธิภาพและใช้ต้นทุนต่ำ เช่นสารดูดซับอลูมินากัมมันต์ (activated alumina) ที่เตรียมได้จากวัสดุอลูมิเนียมเหลือทิ้ง นำมาสังเคราะห์เป็นอลูมิเนียมออกไซด์ชนิดแกมม่าอลูมินา (γ-Al_2O_3) ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่มีพื้นที่ผิวมากและมีความสามารถในการดูดซับสีย้อมแอซิดได้ดีภายใต้สภาวะความเป็นกรด โดยทำให้สภาพพื้นผิวของสารดูดซับอลูมินากัมมันต์มีประจุบวกและดึงดูดกับสีย้อมแอซิดที่ละลายในน้ำแล้วแตกตัวเป็นประจุลบได้ดี เช่นการดูดซับสีย้อม acid orange G และสีย้อม acid yellow36 [3, 15] นอกจากนี้แกมม่าอลูมินาได้ถูกนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของปฏิกิริยาโอโซนออกซิเดชัน (heterogeneous catalytic ozonation) สามารถลดสารอินทรีย์คาร์บอนรวม (total organic carbon) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และช่วยให้ปริมาณการใช้โอโซนลดลงเมื่อเทียบกับการทำโอโซนออกซิเดชันอย่างเดียว [8] จึงเห็นได้ว่าการผสมผสานเทคนิคทางกายภาพและทางเคมีในการบำบัดสารอินทรีย์ เช่น สีย้อมในน้ำเสียน่าจะเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่มีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาการบำบัดสีย้อมในสารละลายโดยใช้การผสมผสานระหว่างการดูดซับด้วยอลูมินากัมมันต์ร่วมกับโอโซนออกซิเดชันในการลดความเข้มข้นของสีย้อมและค่าซีโอดีในสารละลาย เพื่อเป็นแนวทางในการบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมให้มีประสิทธิภาพและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

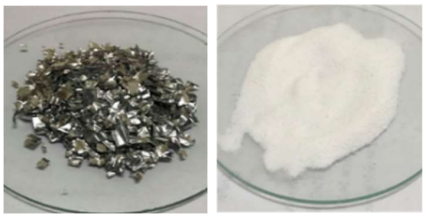
2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมเหลืองแอซิด 36 (acid yellow 36, AY36) โดยใช้วิธีผสมผสานของการดูดซับด้วยอลูมินากัมมันต์ที่ผลิตจากเศษบรรจุภัณฑ์อลูมิเนียมร่วมกับโอโซนออกซิเดชัน โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการลดความเข้มข้นของสีย้อมและค่าซีโอดีในสารละลาย เช่น ความเป็นกรด-ด่าง ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม เวลาในการดูดซับและเวลาที่ใช้โอโซน ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบจลนศาสตร์ของการดูดซับ โอโซนออกซิเดชัน และกระบวนการผสมผสานระหว่างการดูดซับด้วยอลูมินากัมมันต์ร่วมกับโอโซนออกซิเดชัน เพื่อประเมินประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมและลดค่าซีโอดีในสารละลาย

3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 สารเคมีและอุปกรณ์

สารดูดซับอลูมินากัมมันต์เตรียมจากเศษบรรจุภัณฑ์อลูมิเนียมด้วยวิธีการตกตะกอนในงานวิจัยที่ผ่านมา [15] แสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งวิเคราะห์เฟสของอลูมินากัมมันต์ด้วย Bruker D5005 X-ray diffractometer (XRD) มีลักษณะเป็นแกมม่าอลูมินา (γ-Al_2O_3) วิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุนด้วย Surface area and pore size analyzer มีพื้นที่ผิวจำเพาะ (BET surface area) 286 m^2/g ปริมาณรูพรุน (BJH pore volume) 0.36 cm^3/g และวิเคราะห์ด้วย Particle size analyzer มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 2.554 µm



รูปที่ 1 ลักษณะทางกายภาพของเศษบรรจุภัณฑ์อลูมิเนียมและสารดูดซับอลูมินากัมมันต์

สีย้อมเหลืองแอซิด 36 (acid yellow 36 หรือ AY36) เป็นสีย้อมชนิดแอนไอออนิก มีสูตรเคมี $C_{18}H_{14}N_3NaO_3S$ มวลโมลาร์ 375.38 g/mol มีค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุด (λ_{max}) 414 nm ลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างทางเคมีดังรูปที่ 2 ทำการเตรียมสารละลายสีย้อม AY36 ความเข้มข้น 1000 mg/L เป็นสารละลายตั้งต้นเก็บไว้ในขวดสีชา เพื่อใช้ในการเตรียมสารละลายสีย้อมที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 50, 100 และ 150 mg/L โดยปรับค่า pH 3, 7, และ 10 ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 M สารละลายทั้งหมดเตรียมด้วยน้ำกลั่น (สารเคมีที่ใช้เป็นเกรดวิเคราะห์ของ Ajax Finechem Pty Ltd.)

3.2 วิธีทดลอง

โดยออกแบบการทดลองเป็น 3 รูปแบบ ดังนี้

1) การกำจัดสีย้อมด้วยการดูดซับ

นำสารละลายสีย้อม AY36 ปริมาตร 150 mL ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 50, 100 และ 150 mg/L ปรับค่า pH 3, 7 และ 10 ตามลำดับ ใส่ในขวดปฏิกิริยาและเติมสารดูดซับอลูมินากัมมันต์ 0.3 g หรือ 2.0 g/L กวนผสมด้วยความเร็วรอบ 200 rpm เป็นเวลา 10, 20, 30, 40 และ 50 min ตามลำดับ แยกสารดูดซับออกจากสารละลายและนำไปวิเคราะห์ทางเคมี

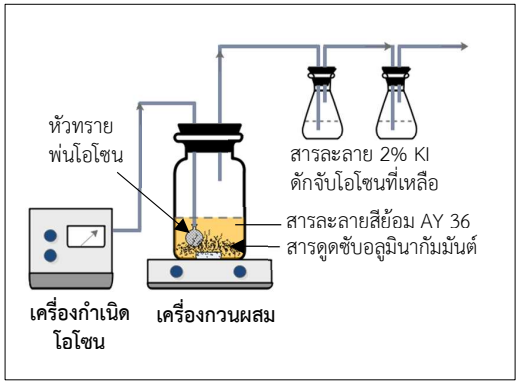
รูปที่ 2 ลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างทางเคมีของสีย้อมเหลืองแอซิด 36

2) การกำจัดสีย้อมด้วยโอโซนออกซิเดชัน

นำสารละลายสีย้อม AY36 ปริมาตร 150 mL ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นและค่า pH เช่นเดียวกับข้อ 1) ใส่ในขวดปฏิกิริยาและติดตั้งเครื่องกำเนิดโอโซนรุ่น N1668 ที่มีปริมาณการผลิตโอโซน 500 mg/h เป่าผ่านหัวทรายเพื่อช่วยเพิ่มการสัมผัสโอโซนกับสารละลายสีย้อม ใช้อัตราการไหล 1.5 L/min เวลาในการเป่าโอโซน 10, 20, 30, 40 และ 50 min ตามลำดับ (ปริมาณโอโซนที่เหลือถูกดักจับด้วยสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์, KI 2%) จากนั้นเก็บตัวอย่างสารละลายสีย้อมนำไปวิเคราะห์ทางเคมี

3) การกำจัดสีย้อมด้วยการดูดซับร่วมกับโอโซนออกซิเดชัน

นำสารละลายสีย้อม AY36 ปริมาตร 150 mL ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นและค่า pH เช่นเดียวกับข้อ 1) ใส่ในขวดปฏิกิริยา เติมสารดูดซับอลูมินากัมมันต์ 0.3 g หรือ 2.0 g/L และเป่าโอโซนด้วยอัตราการไหล 1.5 L/min พร้อมกับการดูดซับ ดังรูปที่ 3 โดยใช้เวลา 3, 6, 10, 20, 30, 40 และ 50 min ตามลำดับ จากนั้นเก็บตัวอย่างสารละลายสีย้อมนำไปวิเคราะห์ทางเคมี



รูปที่ 3 อุปกรณ์ทดลองใช้ระบบโอโซนพร้อมกับการดูดซับ

3.1 การวิเคราะห์ทางเคมี

1) วิเคราะห์ความเข้มข้นของสีย้อม AY36 ในสารละลาย โดยใช้เครื่อง UV-VIS spectrophotometer (HACH รุ่น DR 6000) วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุด λ_{max} 414 nm ใช้ quartz cell ขนาด 10 mm เปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของสีย้อมในสารละลายกับค่าการดูดกลืนแสง

2) วิเคราะห์ค่าซีโอดีของสารละลายสีย้อมด้วยวิธีรีฟลักซ์แบบปิดและการไทเทรต [16] โดยใช้สารละลายโพแทสเซียมไดโครเมตและกรดซัลฟิวริกเป็นตัวออกซิไดซ์ ไทเทรตโพแทสเซียมไดโครเมตที่เหลือยู่ด้วยเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต โดยใช้เฟอร์โรอีนเป็นอินดิเกเตอร์ แล้วคำนวณปริมาณของโพแทสเซียมไดโครเมตที่ใช้ในการย่อยสลายและเทียบเป็นค่าซีโอดี

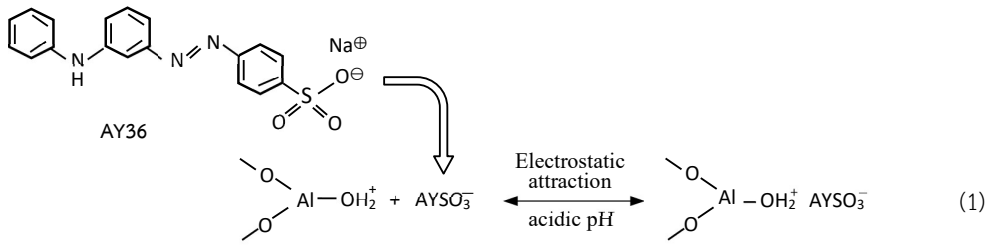
3) วิเคราะห์องค์ประกอบของสารในสารละลายที่เกิดขึ้นภายหลังการทำโอโซนออกซิเดชัน ด้วยเทคนิค GC/MS (gas chromatography/mass spectrometry) 7890A 5975C MSD วิธีทดสอบ FAME_SPLITLESS-1.M

4. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

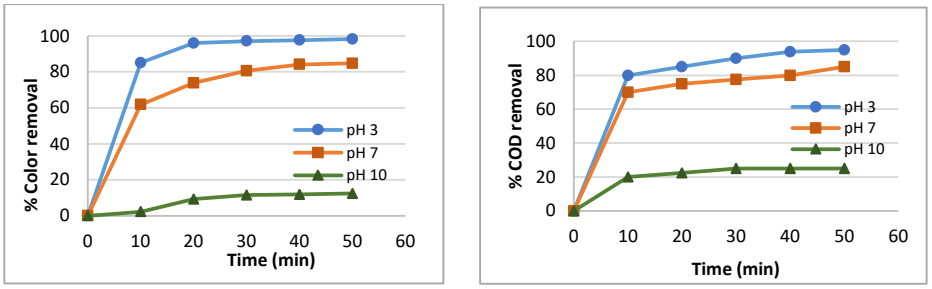
4.1 ผลการกำจัดสีย้อมเหลืองแอซิด 36 ในสารละลายด้วยการดูดซับ

การกำจัดสีย้อม AY36 ในสารละลายที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมในสารละลาย 100 mg/L และค่าซีโอดีเริ่มต้น 160 mg/L ปรับค่า pH 3, 7 และ 10 ตามลำดับ ด้วยกระบวนการดูดซับ (adsorption) โดยใช้ปริมาณสารดูดซับอลูมินากัมมันต์ 2.0 g/L มีเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อม AY36 และค่าซีโอดี แสดงดังรูปที่ 4 พบว่าการดูดซับสีย้อม AY36 ที่มีค่า pH ของสารละลายต่างกัน มีประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมและการลดค่าซีโอดีที่แตกต่างกันชัดเจน ซึ่งการดูดซับสารละลายสีย้อมภายใต้สภาวะที่เป็นกรดค่า pH 3 ภายในเวลา 30 นาที มีเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมสูงถึง 97.0% และสามารถลดค่าซีโอดีได้ 90.0% จาก 160 mg/L เหลือ 16 mg/L แสดงให้เห็นว่าการดูดซับสีย้อมด้วยอลูมินากัมมันต์ภายใต้สภาวะที่เป็นกรดสามารถกำจัดสีย้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีกลไกการดูดซับโมเลกุลของสีย้อม AY36 ที่แพร่กระจายบนพื้นผิวของอลูมินากัมมันต์ และเคลื่อนไปยังรูพรุนที่อยู่ภายในอนุภาคสารดูดซับที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะมาก และเกิดการยึดติดอยู่ที่ผิวภายในรูพรุน ทั้งนี้เนื่องจากสีย้อม AY36 เป็นสีย้อมชนิดแอนไอออนิก เมื่อละลายในน้ำสามารถเกิดการแตกตัวให้ไอออนลบที่เป็นหมู่ซัลเฟต (NaO_3S) และการปรับสภาพของสารละลายสีย้อมให้มีความเป็นกรดช่วยส่งผลให้พื้นผิวของสารดูดซับอลูมินากัมมันต์มีไฮโดรเจนไอออน (H^+) ล้อมรอบจึงสามารถดูดซับและเกิดแรงยึดเหนี่ยวกับสีย้อมที่แตกตัวเป็นไอออนลบได้ดี [15] ดังสมการ (1)

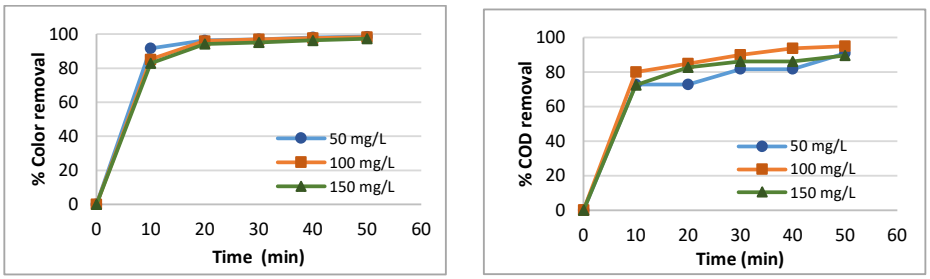
เมื่อพิจารณาการกำจัดสีย้อม AY36 ที่มีค่า pH 3 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมในสารละลาย 50, 100 และ 150 mg/L และค่าซีโอดีเริ่มต้น 88, 160 และ 232 mg/L ตามลำดับ ด้วยการดูดซับโดยใช้ปริมาณสารดูดซับอลูมินากัมมันต์ 2.0 g/L มีเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อม AY36 และค่าซีโอดี แสดงดังรูปที่ 5 เห็นได้ว่าเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมในสารละลายที่ต่างกัน มีการดูดซับสีย้อมด้วยอลูมินากัมมันต์สามารถลดความเข้มข้นของสีย้อมและค่าซีโอดีได้ดี และมีอัตราการดูดซับเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 50 นาที โดยมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อม AY36 โดยเฉลี่ย 98.0% และเปอร์เซ็นต์การลดค่าซีโอดีโดยเฉลี่ย 91.8%



(1)



รูปที่ 4 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม AY36 ด้วยการดูดซับเมื่อสารละลายสีย้อมมีความเข้มข้นเริ่มต้น 100 mg/L



รูปที่ 5 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม AY36 ด้วยการดูดซับเมื่อสารละลายสีย้อมมีค่า pH 3

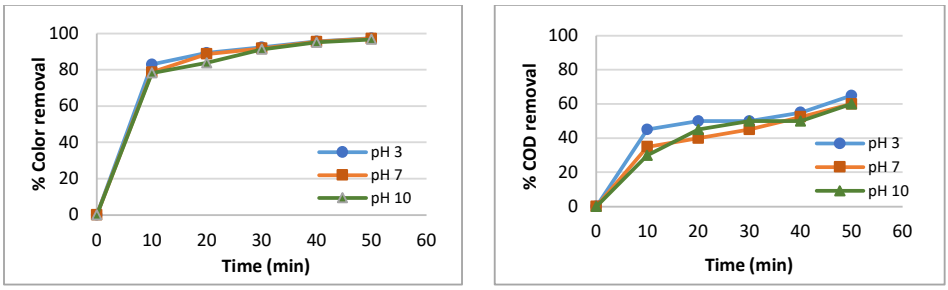
4.2 ผลการกำจัดสีย้อมเหลืองแอซิด 36 ในสารละลายด้วยโอโซนออกซิเดชัน

การกำจัดสีย้อม AY36 ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 100 mg/L ค่าซีโอดี160 mg/L ที่มีค่า pH 3, 7 และ 10 ตามลำดับ ด้วยโอโซนออกซิเดชัน (ozonation) เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อม AY36 และค่าซีโอดี แสดงดังรูปที่ 6 เห็นได้ว่ากระบวนการโอโซนออกซิเดชันกำจัดสีย้อม AY36 ในสารละลายที่มีค่า pH ต่างกันนั้น มีประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมได้ใกล้เคียงกัน โดยมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมได้มากถึง 97.5% ภายในเวลา 50 นาที แต่มีเปอร์เซ็นต์การลดค่าซีโอดีต่างกันเล็กน้อย ซึ่งการใช้โอโซนออกซิเดชันในสารละลายที่มีความเป็นกรด pH 3 สามารถลดค่าซีโอดีได้มากกว่าสารละลายที่มี pH 7 และ 10 โดยลดค่าซีโอดีจาก 160 mg/L เหลือ 56 mg/L หรือมีเปอร์เซ็นต์การลดค่าซีโอดี 65.0% ซึ่งค่าซีโอดีลดลงเนื่องจากโมเลกุลของสีย้อมถูกย่อยสลายเป็นสารประกอบต่างๆและบางส่วนยังคงอยู่ในสารละลายทำให้ค่าซีโอดีลดลงได้น้อยกว่ากระบวนการดูดซับ โดยที่โอโซนเป็นสารออกซิไดซ์ที่มีความรุนแรง ซึ่งมีศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน(oxidation potential) 2.07 V [8] สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับโมเลกุลของสีย้อม AY36 ซึ่งปฏิกิริยาโอโซนออกซิเดชันเกิดขึ้นผ่านกลไกแบบโดยตรงภายใต้สภาวะที่เป็นกรด โมเลกุลของโอโซนเข้าทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของสีย้อม AY36 ที่มีโครงสร้างพันธะ

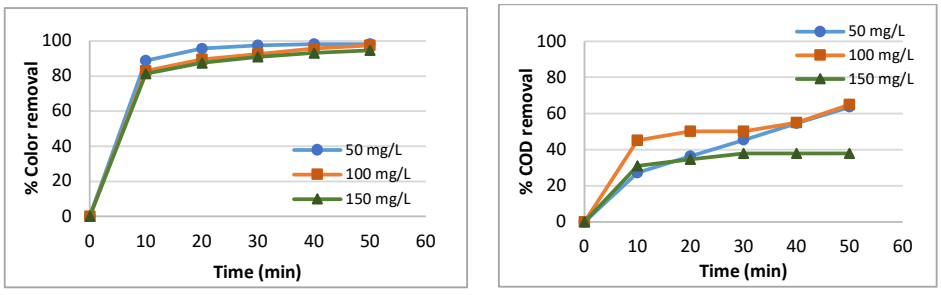
ชนิดไม่อิ่มตัวที่บริเวณพันธะคู่ของคาร์บอน (–C=C–) พันธะคู่ของไนโตรเจน (–N=N–) และเกิดการสลายโครงสร้างโครโมฟอร์ของโมเลกุลสีย้อมที่มีวงแอโรเมติกส์ ทำให้เกิดการเปลี่ยนโครงสร้างโมเลกุลกลายเป็นสารประกอบต่างๆ หลายชนิดที่ไม่มีสี ความเข้มข้นของสีย้อม AY36 ในสารละลายจึงลดลง ในขณะที่สารละลายสีย้อมที่มีสภาวะเป็นเบสสามารถเกิดปฏิกิริยาโอโซนออกซิเดชันแบบโดยอ้อม มีการสลายตัวของโอโซนในน้ำเกิดเป็นอนุมูลไฮดรอกซิล (hydroxyl radical, •OH) ที่มีศักยภาพการเกิดออกซิเดชันสูงถึง 2.80 V สามารถย่อยสลายโมเลกุลของสารอินทรีย์ได้ดี [8] ดังนั้นปฏิกิริยาโอโซนออกซิเดชันจึงลดความเข้มข้นของสีย้อมในสารละลายได้ทั้งในสภาวะที่เป็นกรดและเบส

จากการทดลองนำสารละลายที่ผ่านกระบวนการโอโซนออกซิเดชันไปวิเคราะห์องค์ประกอบของสารต่างๆ ด้วยเทคนิค GC/MS (gas chromatography/mass spectrometry) พบว่ามีสารประกอบที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายโมเลกุลสีย้อม AY36 เช่น bis(2-ethylhexyl) adipate 79.98%, palmitic acid 5.64%, stearic acid 2.03%, octadecane 1.39%, cyclododecane 0.58% และอื่นๆ10.38% ซึ่งเป็นสารประกอบที่ไม่มีสี เช่นเดียวกับผลการทดลองที่ใช้กระบวนการโอโซนออกซิเดชันในการกำจัดสีรีแอคทีฟ orange16 ทำให้เกิดสารประกอบที่ไม่มีสี [5]

เมื่อพิจารณาการกำจัดสีย้อม AY36 ที่มีค่า pH 3 ความเข้มข้นเริ่มต้น 50, 100 และ 150 mg/L ค่าซีโอดี 88, 160 และ 232 mg/L ตามลำดับ ด้วยกระบวนการโอโซนออกซิเดชัน เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อม AY36 และค่าซีโอดี แสดงดังรูปที่ 7 เห็นได้ว่าการใช้โอโซนกำจัดสีย้อม AY36 ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมต่างกัน มีประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมได้ใกล้เคียงกัน แต่มีเปอร์เซ็นต์การลดค่าซีโอดีต่างกัน ซึ่งการใช้โอโซนสามารถลดความเข้มข้นของสีย้อมและค่าซีโอดีได้รวดเร็วภายในเวลาประมาณ 10 นาที ซึ่งมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลงและเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 50 นาที โดยมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อม AY36 โดยเฉลี่ย 96.8% และเปอร์เซ็นต์การลดค่าซีโอดี 55.5%



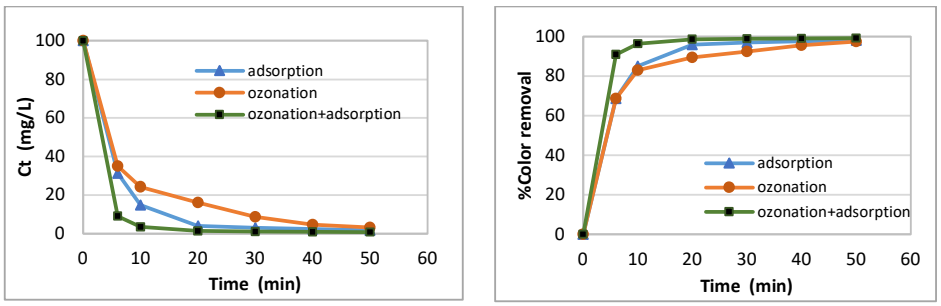
รูปที่ 6 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม AY36 ด้วยโอโซนออกซิเดชันเมื่อสารละลายสีย้อมมีความเข้มข้นเริ่มต้น 100 mg/L



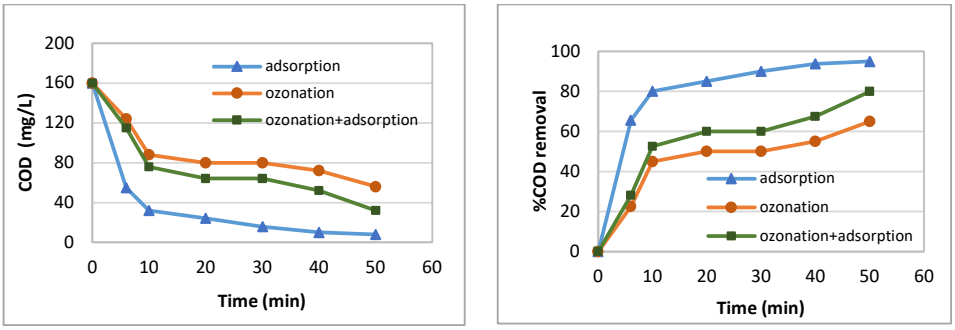
รูปที่ 7 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม AY36 ด้วยโอโซนออกซิเดชันเมื่อสารละลายสีย้อมมีค่า pH 3

4.3 ผลการกำจัดสีย้อมเหลืองแอซิด 36 ในสารละลายด้วยการดูดซับร่วมกับโอโซนออกซิเดชัน

การกำจัดสีย้อม AY36 ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 100 mg/L ค่าซีโอดี 160 mg/L โดยปรับสภาพของสารละลายสีย้อมให้มีความเป็นกรดค่า pH 3 เนื่องจากทั้งการดูดซับและโอโซนออกซิเดชันเกิดขึ้นได้ดี ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม AY36 ในสารละลายของทั้ง 3 วิธีคือการดูดซับ โอโซนออกซิเดชัน และโอโซนออกซิเดชันร่วมกับการดูดซับ พบว่าภายในเวลา 10 นาที มีเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อม 85.1% 83.0% และ 96.5% ตามลำดับ ดังรูปที่ 8 และมีค่าซีโอดีเริ่มต้นจาก 160 mg/L ลดลงเหลือ 32, 88 และ 76 mg/L คิดเป็น 80.0% 45.0% และ 52.5% ตามลำดับ ดังรูปที่ 9 เห็นได้ว่าการกำจัดสีย้อมในสารละลายด้วยวิธีผสมผสานระหว่างโอโซนออกซิเดชันร่วมกับการดูดซับในระบบ 3 วัฏภาค (three-phase) ภายใต้สภาวะที่เป็นกรด ทำให้สภาพพื้นผิวของอลูมินากัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับโมเลกุลของสีย้อมได้ดี สามารถลดความเข้มข้นของสีย้อมได้รวดเร็วขึ้น และอลูมินากัมมันต์ช่วยเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้โอโซนย่อยสลายโมเลกุลของสีย้อม ทำให้โครงสร้างของโมเลกุลสีย้อมเปลี่ยนแปลงไป ส่งผลให้ความเข้มข้นของสีย้อม AY36 ลดลง และในขณะเดียวกันเกิดการดูดซับโมเลกุลสีย้อมที่เหลืออยู่และสารประกอบอื่นๆที่เกิดจากปฏิกิริยาโอโซนออกซิเดชัน จึงช่วยทำให้เกิดการกำจัดสีย้อมในสารละลายอย่างมีประสิทธิภาพ สามารถกำจัดสีย้อมได้ 98.7% ภายในเวลา 20 นาที และมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมสูงถึง 99% ภายในเวลา 30 นาที เมื่อเปรียบเทียบการลดค่าซีโอดีในสารละลาย เห็นได้ว่าวิธีการดูดซับอย่างเดียวสามารถลดค่าซีโอดีของสารละลายสีย้อม AY36 ได้มากกว่าวิธีอื่น อย่างไรก็ตามการกำจัดสีย้อมในสารละลายทั้ง 3 วิธี สามารถลดค่าซีโอดีในสารละลายได้ต่ำกว่าค่ามาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงาน พ.ศ. 2560 ซึ่งต้องมีค่าซีโอดีไม่เกิน 120 mg/L



รูปที่ 8 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม AY36 ในสารละลายที่มีค่า pH 3 ด้วยกระบวนการบำบัดต่างๆ



รูปที่ 9 ประสิทธิภาพการลดค่าซีโอดีในสารละลายสีย้อม AY36 ที่มีค่า pH 3 ด้วยกระบวนการบำบัดต่างๆ

4.4 จลนศาสตร์ของการกำจัดสีย้อม

1) จลนศาสตร์การกำจัดสีย้อม AY36 ด้วยการดูดซับสีย้อมในสารละลาย มีอัตราปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (pseudo first order reaction rate) และอัตราปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (pseudo second order reaction rate) ที่มีความสัมพันธ์ขึ้นอยู่กับปริมาณของสีย้อมที่ถูกดูดซับอยู่ในสารดูดซับ [16] ดังสมการ (2) และ (3) ดังนี้

อัตราปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม

$$-\frac{dq_t}{dt} = k_{ad1}\,(q_e - q_t)$$

$$ln\,\frac{q_e}{(q_e - q_t)} = k_{ad1}\,t \qquad (2)$$

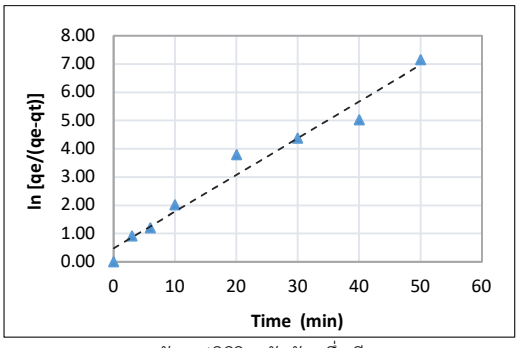
อัตราปฏิกิริยาอันดับสองเทียม

$$-\frac{dq_t}{dt} = k_{ad}\;(q_e - q_t)^2$$

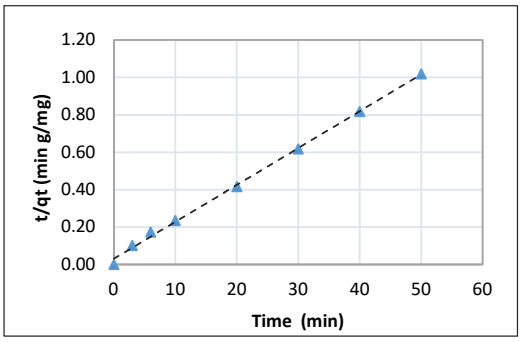
$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_{ad2}\,q_e^2} + \frac{t}{q_e} \qquad (3)$$

โดยที่ C_o, C_t และ C_e เป็นความเข้มข้นของสีย้อมในสารละลาย (mg/L) ที่เวลาเริ่มต้น เวลาใดๆ และที่สมดุล ตามลำดับ q_t และ q_e เป็นปริมาณของสีย้อมที่ถูกดูดซับ (mg/g) ที่เวลาใดๆ และที่ภาวะสมดุล ตามลำดับ $q = \frac{(C_o - C)\,V}{m}$ โดยที่ V เป็นปริมาตรของสารละลายสีย้อม และ m เป็นปริมาณของสารดูดซับอลูมินากัมมันต์ k_{ad1} เป็นค่าคงที่การดูดซับอันดับหนึ่ง (min^{-1}) และ k_{ad2} เป็นค่าคงที่การดูดซับอันดับสอง ($mg{\cdot}g^{-1}{\cdot}min^{-1}$)

จากความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสีย้อม AY36 ที่เหลืออยู่ในสารละลายกับเวลา เห็นได้ชัดว่าการดูดซับสีย้อมบนอนุภาคสารดูดซับอลูมินากัมมันต์เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเวลา 10 นาทีแรก และหลังจากนั้นการดูดซับเริ่มเข้าสู่สมดุลภายในเวลา 30 นาที เมื่อนำข้อมูลมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ของอัตราปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมระหว่าง $ln\,\frac{q_e}{(q_e - q_t)}$ กับเวลา t ดังรูปที่ 10 (ก) และพล็อตกราฟความสัมพันธ์ของอัตราปฏิกิริยาอันดับสองเทียมระหว่าง $\frac{t}{q_t}$ กับเวลา t ดังรูปที่ 10 (ข) พบว่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (R^2 = 0.9698) มีค่าน้อยกว่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (R^2 = 0.9980) จลนศาสตร์การดูดซับสีย้อม AY36 ในสารละลายจึงสอดคล้องกับอัตราปฏิกิริยาอันดับสองเทียม



(ก) อัตราปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม



(ข) อัตราปฏิกิริยาอันดับสองเทียม

รูปที่ 10 จลนศาสตร์การดูดซับสีย้อม AY36 ด้วยสารดูดซับอลูมินากัมมันต์ ในสารละลาย pH 3

2) จลนศาสตร์การกำจัดสีย้อม AY36 ในสารละลายด้วยโอโซนออกซิเดชันโดยไม่เติมสารดูดซับอลูมินากัมมันต์ และการกำจัดสีย้อม AY36 ในสารละลายด้วยโอโซนออกซิเดชันผสมผสานกับการเติมอลูมินากัมมันต์ ดังรูปที่ 11 และ 12 ตามลำดับ มีอัตราปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมและอัตราปฏิกิริยาอันดับสองเทียมที่มีความสัมพันธ์ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสีย้อมในสารละลายที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน [9] ดังสมการ (4) และ (5) ดังนี้

อัตราปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม

$$-\frac{dC_{dye}}{dt} = k_{oz1}C_{dye}$$

$$ln\ C_t = -k_{oz1}\,t + ln\ C_o \quad (4)$$

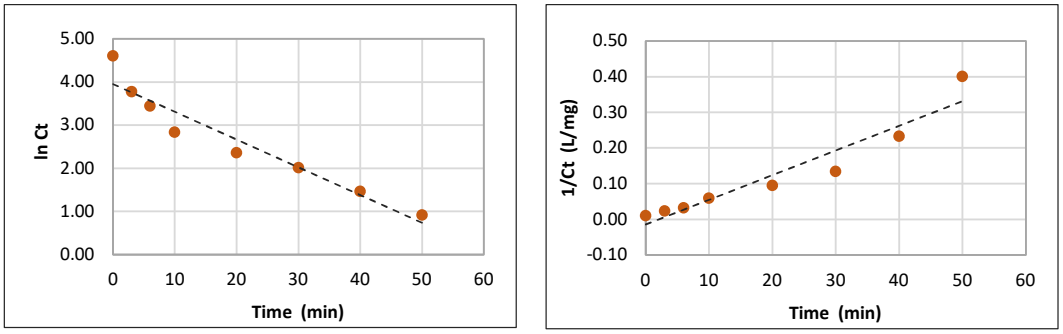
อัตราปฏิกิริยาอันดับสองเทียม

$$-\frac{dC_{dye}}{dt} = k_{oz2}\,C_{dye}^2$$

$$\frac{1}{C_t} = k_{oz2}\,t + \frac{1}{C_o} \quad (5)$$

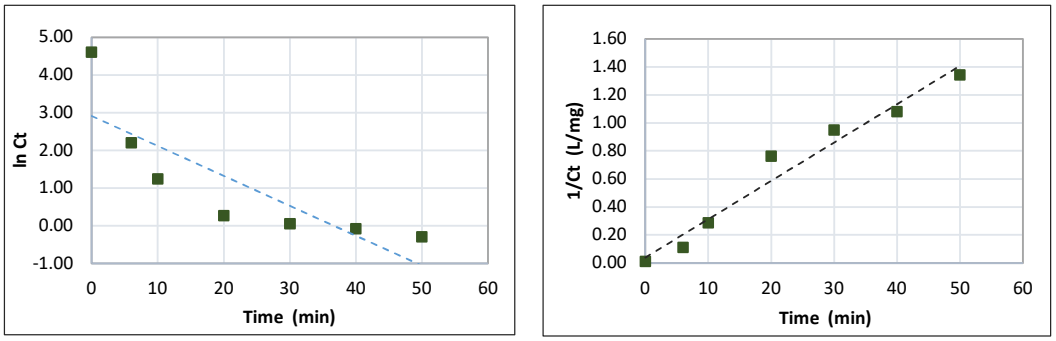
โดยที่ k_{oz1} เป็นค่าคงที่โอโซนออกซิเดชันอันดับหนึ่ง (min^{-1}) และ k_{oz2} เป็นค่าคงที่โอโซนออกซิเดชันอันดับสอง ($L \cdot mg^{-1} \cdot min^{-1}$)

จากการศึกษาอัตราปฏิกิริยาการลดลงของความเข้มข้นสีย้อม AY36 ในสารละลาย pH 3 ด้วยกระบวนการกำจัดสีย้อมทั้ง 3 วิธี ดังตารางที่ 1 โดยเปรียบเทียบค่าคงที่อัตราปฏิกิริยาและความสอดคล้องของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม พบว่าการดูดซับด้วยอลูมินากัมมันต์มีค่าคงที่อัตราปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมมากกว่าวิธีอื่น เมื่อเปรียบเทียบค่าคงที่อัตราปฏิกิริยาและความสอดคล้องของปฏิกิริยาอันดับสองเทียม พบว่าโอโซนออกซิเดชันร่วมกับการดูดซับมีค่าคงที่อัตราปฏิกิริยาอันดับสองเทียมมากกว่าวิธีอื่น แสดงให้เห็นว่าโอโซนออกซิเดชันร่วมกับการดูดซับด้วยอลูมินากัมมันต์เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม AY36 ในสารละลายได้อย่างรวดเร็ว



(ก) อัตราปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (ข) อัตราปฏิกิริยาอันดับสองเทียม

รูปที่ 11 จลนศาสตร์ของปฏิกิริยาโอโซนออกซิเดชันต่อสีย้อม AY36 ในสารละลาย pH 3



(ก) อัตราปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (ข) อัตราปฏิกิริยาอันดับสองเทียม

รูปที่ 12 จลนศาสตร์ของปฏิกิริยาโอโซนออกซิเดชันต่อสีย้อม AY36
ในสารละลาย pH 3 ที่เติมสารดูดซับอลูมินากัมมันต์

ตารางที่ 1 ค่าคงที่อัตราปฏิกิริยาของการดูดซับ โอโซนออกซิเดชัน และโอโซนออกซิเดชันร่วมกับการดูดซับ ในการกำจัดสีย้อม AY36

วิธีการกำจัดสีย้อม AY36	ค่าคงที่อัตราปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม		ค่าคงที่อัตราปฏิกิริยาอันดับสองเทียม	
	k_1	R^2	k_2	R^2
วิธีการดูดซับด้วยอลูมินากัมมันต์ (adsorption)	0.1298 min^{-1}	0.9698	0.0126 $g \cdot mg^{-1} \cdot min^{-1}$	0.9980
วิธีโอโซนออกซิเดชัน (ozonation)	0.0643 min^{-1}	0.9248	0.0069 $L \cdot mg^{-1} \cdot min^{-1}$	0.9121
วิธีโอโซนออกซิเดชันร่วมกับการดูดซับ (ozonation and adsorption)	0.0794 min^{-1}	0.6975	0.0274 $L \cdot mg^{-1} \cdot min^{-1}$	0.9651

5. สรุปผลการวิจัย

การกำจัดสีย้อมเหลืองแอซิด36 โดยใช้การดูดซับด้วยอลูมินากัมมันต์และการทำโอโซนออกซิเดชันแบบกระบวนการเดี่ยวนั้น มีเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมเท่ากับ 98.2% และ 97.5% และเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่าซีโอดี 95% และ 65% ตามลำดับ ภายในเวลา 50 นาที ที่สภาวะความเป็นกรด เห็นได้ว่าการดูดซับด้วยอลูมินากัมมันต์มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมและลดค่าซีโอดีในสารละลาย ในขณะที่โอโซนออกซิเดชันสามารถทำให้ความเข้มของสีย้อมลดลงได้ แต่ยังคงมีปริมาณของสารประกอบอื่นที่เกิดจากการย่อยสลายด้วยโอโซนอยู่ในสารละลาย จึงทำให้ค่าซีโอดีในสารละลายลดลงได้น้อยกว่าวิธีการดูดซับ เมื่อใช้วิธีผสมผสานระหว่างโอโซนออกซิเดชันร่วมกับการดูดซับด้วยอลูมินากัมมันต์ในรูปแบบของการสัมผัส 3 วัฏภาค (three-phase) พบว่าวิธีผสมผสานสามารถลดความเข้มข้นของสีย้อม AY36 ในสารละลายได้อย่างรวดเร็ว มีเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมสูงถึง 98.7% ภายในเวลา 20 นาที และลดค่าซีโอดีจาก 160 mg/L เหลือ 64 mg/L คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่าซีโอดี 60.0% ซึ่งวิธีผสมผสานนี้โอโซนมีส่วนช่วยในการย่อยสลายโมเลกุลของสีย้อมทำให้โครงสร้างของโมเลกุลสีย้อมเปลี่ยนแปลงไป และการดูดซับด้วยอลูมินากัมมันต์ทำให้ความเข้มข้นของสีย้อมและสารประกอบอื่นๆที่เกิดจากปฏิกิริยาโอโซนออกซิเดชันลดลงอย่างรวดเร็ว และจากการศึกษาจลนศาสตร์ของการกำจัดสีย้อม AY36 ในสารละลายของแต่ละวิธีได้แสดงให้เห็นว่าวิธีผสมผสานระหว่างโอโซนออกซิเดชันร่วมกับการดูดซับสอดคล้องกับอัตราปฏิกิริยาอันดับสองเทียมที่มีค่าคงที่อัตรา 0.0274 $L \cdot mg^{-1} \cdot min^{-1}$ มากกว่าค่าคงที่อัตราของการดูดซับหรือโอโซนออกซิเดชันแบบวิธีเดี่ยว ซึ่งวิธีผสมผสานสามารถใช้เวลาในการบำบัดสีย้อม AY36 ได้เร็วขึ้น 2.5 เท่า ดังนั้นการใช้วิธีผสมผสานโอโซนออกซิเดชันร่วมกับการดูดซับด้วยอลูมินากัมมันต์จึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการกำจัดสีย้อมกรด (acid dyes) ในสารละลายได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ

6. เอกสารอ้างอิง

[1] F. I. Hai, K. Yamamoto and K. Fukushi, “Hybrid treatment systems for dye wastewater,” *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, vol. 37, no. 4, pp. 315–377, May 2007. doi: 10.1080/10643380601174723.

[2] P. K. Malik, “Use of activated carbons prepared from sawdust and rice-husk for adsorption of acid dyes: a case study of Acid

Yellow 36," *Dyes and Pigments*, vol. 56, no. 3, pp. 239–249, Mar. 2003, doi: 10.1016/s0143-7208(02)00159-6.

[3] S. Banerjee, S. Dubey, R. K. Gautam, M. C. Chattopadhyaya and Y. C. Sharma, "Adsorption characteristics of alumina nanoparticles for the removal of hazardous dye, Orange G from aqueous solutions," *Arabian Journal of Chemistry*, vol. 12, no. 8, pp.5339–5354, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.arabjc.2016.12.016.

[4] J. Basiri Parsa and S. Hagh Negahdar, "Treatment of wastewater containing Acid Blue 92 dye by advanced ozone-based oxidation methods," *Separation and Purification Technology*, vol. 98, pp.315–320, Sep.2012, doi: 10.1016/j.seppur.2012.06.041.

[5] K. Turhan and S. A. Ozturkcan, "Decolorization and degradation of reactive dye in aqueous solution by ozonation in a semi-batch bubble column reactor," *Water, Air, & Soil Pollution*, vol. 224, no. 1, Nov. 2012, doi: 10.1007/s11270-012-1353-8.

[6] C. Zulzikrami Azner Abidin, M. Ridwan Fahmi, O. Soon-An, S. Nurfatin Nadhirah Mohd Makhtar and N. Rosmady Rahmat, "Decolourization of an azo dye in aqueous solution by ozonation in a semi-batch bubble column reactor," *ScienceAsia*, vol. 41, no. 1, p. 49, 2015, doi: 10.2306/scienceasia1513-1874.2015.41.049.

[7] B. Karwowska, E. Sperczyńska and L. Dąbrowska, "Water treatment in hybrid connection of coagulation, ozonation, UV Irradiation and adsorption processes," *Water*, vol. 13, no. 13, p. 1748, Jun. 2021, doi: 10.3390/w13131748.

[8] J. Wang and H. Chen, "Catalytic ozonation for water and wastewater treatment: Recent advances and perspective," *Science of The Total Environment*, vol. 704, p. 135249, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135249.

[9] A. Ikhlaq, M. Raashid, A. Akram, M. Kazmi and S. Farman, "Removal of methylene blue dye from aqueous solutions by adsorption in combination with ozonation on iron loaded sodium zeolite: role of adsorption," *Desalination and Water Treatment*, vol. 237, pp. 302–306, 2021, doi: 10.5004/dwt.2021.27744.

[10] P. C. C. Faria, J. J. M. Órfão and M. F. R. Pereira, "Mineralisation of coloured aqueous solutions by ozonation in the presence of activated carbon," *Water Research*, vol. 39, no. 8, pp. 1461–1470, Apr. 2005, doi: 10.1016/j.watres.2004.12.037.

[11] W. Pratarn, T. Pornsiri, S. Thanit, C. Tawatchai and T. Wiwut, "Adsorption and Ozonation Kinetic Model for Phenolic Wastewater Treatment," *Chinese Journal of Chemical Engineering*, vol. 19, no. 1, pp. 76–82, Feb. 2011, doi: 10.1016/s1004-9541(09)60180-4.

[12] J. I. Lombraña, A. Menéndez, N. Villato, A. De Luis, and C. Rodriguez, "Kinetic modeling of the operational variants in a batch Ozonation-adsorption process," in *15th International Conference on Environmental Science and Technology*, Rhodes, Greece, 2017, pp. 390-394.

[13] C. Ferreiro, A. de Luis, N. Villota, J. Lomas, J. Lombraña and L. Camarero, “Application of a combined adsorption–ozonation process for phenolic wastewater treatment in a continuous fixed-bed reactor,” *Catalysts*, vol. 11, no. 8, p. 1014, Aug. 2021, doi: 10.3390/catal11081014.

[14] A. Ikhlaq, T. Aslam, A. M. Zafar, F. Javed, and H. M. S. Munir, “Combined ozonation and adsorption system for the removal of heavy metals from municipal wastewater: effect of COD removal,” *Desalination and Water Treatment*, vol. 159, pp. 304–309, 2019, doi: 10.5004/dwt.2019.24164.

[15] P. Kamthita and S. Tiamsri, “Application of response surface methodology for optimization of γ-alumina nanoparticles synthesis and acid dye adsorption,” *Journal of Current Science and Technology*, vol. 9, no. 1, pp. 1-15, Jan. 2019.

[16] P. Maimansomsuk, “COD Analysis,” in *Introduction to Water and Wastewater Analysis*, Department of Industrial Works, 2010, pp. 1-19.

[17] H. Qiu, L. Lv, B. Pan, Q. Zhang, W. Zhang, and Q. Zhang, “Critical review in adsorption kinetic models,” *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, vol. 10, no. 5, pp. 716–724, May 2009, doi: 10.1631/jzus.a0820524.

Srinakharinwirot University Engineering Journal (2023) 19(1), 29-40 วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีที่ 19 ฉบับที่ 1 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2566 – มีนาคม พ.ศ. 2567

การศึกษาสถานีบริการอัดประจุไฟฟ้าเพื่อรองรับยานยนต์ไฟฟ้า

A Study of the Electric Charging Stations to Support Electric Vehicles

ณัฐภาส จรัสรุ่งชวลิต ปนัดดา กสิกิจวิวัฒน์*
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
นครปฐม 73140
Nattapas Jarasrungchawalit Panatda Kasikitwiwat*
Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering at KamphaengSaen, Kasetsart University,
KamphaengSaen Campus, Nakhon Pathom 73140, Thailand
*Corresponding author Email: nattapas.jar@ku.th
(Received: January 22, 2023; Revised: July 16, 2023 ; Accepted: August 28, 2023)

บทคัดย่อ

การศึกษาเรื่องสถานีอัดประจุไฟฟ้าสำหรับรองรับรถยนต์ไฟฟ้าโดยการจำลองสถานการณ์ มีจุดประสงค์วิเคราะห์และประเมินระดับการให้บริการโดยใช้ทฤษฎีแถวคอย เพื่อเป็นแนวทางในการดำเนินรูปแบบกิจการสถานีบริการอัดประจุไฟฟ้าเพื่อเพิ่มแรงจูงใจในการใช้รถยนต์ไฟฟ้าให้มากขึ้น โดยกลุ่มตัวอย่างในงานวิจัยนี้คือ รถยนต์ไฟฟ้าปลั๊กอินไฮบริด และรถยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี มีการใช้โปรแกรมอารีนาในการศึกษาแบบจำลอง โดยใช้ค่า จำนวนแถวคอย ระยะเวลาในการรอคอย เป็นตัวชี้วัดลักษณะของแบบจำลองเพื่อให้ได้รูปแบบทรัพยากรที่เหมาะสมต่ออัตราการเข้าใช้บริการ และนำมาวิเคราะห์วิเคราะห์ผลตอบแทนในการลงทุนกิจการสถานีบริการอัดประจุไฟฟ้า เมื่อทำการวิเคราะห์แล้วพบว่า มียานยนต์ไฟฟ้าประเภทรถยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี สามารถใช้เครื่องอัดประจุไฟฟ้าประเภทกระแสตรง 50 kW และกระแสสลับ 7.4 kW ได้ ในขณะที่รถยนต์ไฟฟ้าประเภทรถยนต์ไฟฟ้าปลั๊กอินไฮบริด สามารถใช้เครื่องอัดประจุไฟฟ้าประเภทกระแสสลับ 7.4 kW เพียงอย่างเดียว ซึ่งค่าเฉลี่ยสำหรับระยะเวลาการชาร์จแบบกระแสตรง 50 kW คือ 35.5 นาที ซึ่งเป็นการชาร์จจากแบตเตอรี่ 20% เพิ่มเป็น 100% ในขณะที่ระยะเวลาการชาร์จแบบกระแสสลับ 7.4 kW คือ 28.9 นาที ซึ่งเป็นการชาร์จจากแบตเตอรี่ 20% เพิ่มเป็น 25.7% เพื่อให้ผู้ขับสามารถขับกลับที่พักอาศัยและไปชาร์จ ณ ที่พักอาศัยต่อได้ เมื่อพิจารณาความเป็นไปได้จากการพยากรณ์รูปแบบ และปริมาณความต้องการ การใช้งานในอนาคต ผู้วิจัยได้จำลองรูปแบบการจัดการการให้บริการของสถานี 6 แบบจำลอง และพบว่า แบบจำลองที่ 3 ที่มีเครื่องอัดประจุไฟฟ้าแบบกระแสตรง 50 kW 2 เครื่อง และแบบกระแสสลับ 7.4 kW 4 เครื่อง มีความเหมาะสมที่สุด เนื่องจาก ให้ผลด้านระยะเวลารอคอย และจำนวนแถวคอย ที่น้อยกว่าแบบอื่นรูปแบบอื่น สามารถรองรับปริมาณยานยนต์ไฟฟ้าสำหรับการชาร์จกระแสตรง 50 kW ได้ 63 คัน/วัน และสำหรับการชาร์จกระแสสลับได้ 98 คัน/วัน โดยปริมาณการเข้าใช้บริการนี้จะทำให้กิจการสถานีอัดประจุไฟฟ้า มีอัตราผลตอบแทนภายใน 14.23% โดยใช้ระยะเวลาคืนทุน 6.1 ปี หากอัตราการเข้าใช้บริการมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น ร้อยละ 20 จะได้อัตราผลตอบแทนภายใน 20.90% โดยใช้ระยะเวลาคืนทุน 5.0 ปี และถ้าอัตราการเข้าใช้บริการมีการเปลี่ยนแปลงลดลง ร้อยละ 20 จะได้อัตราผลตอบแทนภายใน 7.08% โดยใช้ระยะเวลาคืนทุน 7.6 ปี ซึ่งแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดนี้และการวิเคราะห์ทางด้านการลงทุนนี้จะเป็นประโยชน์และแนวทางสำหรับทำกิจการสถานีอัดประจุไฟฟ้าขนาดเล็กในอนาคต

คำสำคัญ: การจำลองสถานการณ์ สถานีบริการอัดประจุไฟฟ้า ยานยนต์ไฟฟ้า

ABSTRACT

The study of electric vehicle charging stations by simulation aims to analyze and assess the service level by using the queuing theory. To be a guideline for implementing the business model of electric charging stations to increase the incentives for using more electric cars. The sample group in this research is plug-in hybrid electric vehicle and battery electric vehicles The Arena program was used to study the simulation by using the number of queuing, waiting time. It is a measure of the characteristics of the model in order to optimize the resource model for service traffic. And analyzed to analyze the return on investment in the electric charging service station business. After analyzing, it was found that There are electric vehicles, battery electric vehicles. 50 kW direct current and 7.4 kW alternating current chargers can be used, while plug-in hybrid electric vehicles can be used. A single 7.4 kW AC type charger can be used. The average charging time for 50 kW DC is 35.5 minutes, charging from 20% battery to 100%, while charging time for 7.4 kW AC is 28.9 minutes, charging from 20% battery to 25.7. % so that the driver can drive back to the residence and continue charging at the residence. To account for the future demand for stations with the small size, the researcher simulated the service management model of 6- charger station and found that the 3rd model with 2 fast chargers and 4 slow chargers is the most suitable because the results of waiting time and the number of queues are significantly less than other types. It can accommodate 63 cars per day for fast chargers and 98 cars per day for slow chargers. The internal rate of return is 14.23% and the payback period is 6.1 years. If the utilization rate increases by 20 percent, there will be an internal rate of return of 20.90% with the payback period of 5.0 years. If the use of service has decreased by 20%, yielding an internal rate of return of 7.08% with the payback period of 7.6 years.

Keywords: Simulation, electric charging station, electric vehicles.

1. บทนำ

ปัจจุบันโลกเกิดสภาวะโลกร้อนซึ่งส่วนหนึ่งเกิดจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยหนึ่งในกิจกรรมที่ก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นั้นคือการขับขี่ยานพาหนะที่ใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิง ดังนั้นเราจึงควรใช้รถยนต์ไฟฟ้าให้มากขึ้น ซึ่งจะสามารถช่วยลดการเกิดมลพิษแต่ด้วยเทคโนโลยีที่ใหม่ ยังมีข้อจำกัดในด้านต่างๆ เช่น ระยะทางที่สามารถที่วิ่งได้ยังน้อยซึ่งเป็นผลมาจากขนาดของแบตเตอรี่ที่มีขนาดเล็กทำให้รถยนต์ไฟฟ้าจำเป็นจะต้องได้รับการชาร์จไฟฟ้าค่อนข้างถี่กว่ารถยนต์สันดาปทั่วไป ประกอบกับความครอบคลุมของจุดชาร์จไฟฟ้าที่ยังมีจำนวนน้อย และระยะเวลาในการชาร์จไฟฟ้าค่อนข้างนาน ทำให้ผู้คนยังไม่กล้าที่จะใช้รถยนต์ไฟฟ้า ดังนั้นจึงควรเพิ่มสถานีอัดประจุไฟฟ้าเพื่อเพิ่มแรงจูงใจในการใช้รถยนต์ไฟฟ้าให้มากขึ้น โดยอาจศึกษาเป็นสถานีอัดประจุไฟฟ้า/จุดให้บริการอัดประจุไฟฟ้าขนาดเล็กที่เหมาะสมแต่ลงทุนไม่มาก

สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร [สนข.] และ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ [สวทช.] คาดการณ์ว่า ในปี 2579 การขยายตัวของยานยนต์ไฟฟ้าสามารถลดความต้องการเชื้อเพลิงฟอสซิลลงได้ 2.19–5.54 ล้านตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ (25.75–53.23 พันล้านหน่วย, thousand GW-hr) คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ

5.45–11.26 ของความต้องการพลังงานในภาคการขนส่งทางถนน ขณะที่ความต้องการพลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเพียง 0.21–2.41 ล้านตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ (2.41–7.78 พันล้านหน่วย, thousand GW-hr) และสามารถลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกตลอดวัฏจักรพลังงาน 6.9–13.5 ล้านตันเทียบเท่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 4.74–9.31 ของการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกในภาคการขนส่งทางถนนหรือคิดเป็นส่วนหนึ่งของเป้าหมายการลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการประชุม COP21 ที่ต้องการลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากทุกภาคส่วนลงร้อยละ 25 ในปี 2573 (ประมาณ 111 ล้านตันเทียบเท่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์) ทั้งนี้ ความแตกต่างของผลกระทบดังกล่าวขึ้นอยู่กับระดับการขยายตัวของจำนวนรถยนต์ไฟฟ้า [1]

สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน ได้ระบุถึงข้อดี-ข้อเสียของรถยนต์ไฟฟ้า ซึ่งข้อดีของรถยนต์ไฟฟ้าคือ รถยนต์ไฟฟ้านั้นสามารถทำงานด้วยการใช้พลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ ทำให้ไม่มีการปล่อยไอเสียหรือก๊าซเรือนกระจกออกมาและไม่สร้างมลพิษซึ่งเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมโดย ลดมลพิษทางเสียง เนื่องจากกลไกในการขับเคลื่อนไม่ต้องใช้การจุดระเบิดเพื่อเผาไหม้ จึงทำให้ไม่มีเสียงเวลาขับ และการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้านั้น มีเสียงที่เงียบกว่าเครื่องยนต์มาก รถยนต์ไฟฟ้าใช้มอเตอร์ไฟฟ้าซึ่งมีแรงบิดมากกว่าโดยเริ่มตั้งแต่ออกตัว ทำให้อัตราเร่งดีกว่ารถยนต์ที่ใช้น้ำมัน เนื่องจากรถยนต์ไฟฟ้านั้นไม่มีเครื่องยนต์ จึงไม่ต้องใช้น้ำมันเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ อีกทั้งพลังงานไฟฟ้ายังมีราคาถูกกว่า และผันผวนน้อยกว่าราคาน้ำมันส่วนในเรื่องของการบำรุงรักษานั้น ในรถยนต์ไฟฟ้ามีเพียงมอเตอร์ไฟฟ้าเท่านั้นที่เป็นส่วนกำลังทำให้รถเคลื่อนที่ไปได้ ไม่มีของเหลวหรือกรองของเหลวที่ต้องบำรุงรักษาตามวาระ สามารถชาร์จแบตเตอรี่ได้จากที่บ้านซึ่งสามารถชาร์จได้ระหว่างที่นอนหลับ เมื่อถึงยามเช้ารถยนต์ไฟฟ้าก็จะอยู่ในสภาพพร้อมใช้งาน จึงทำให้ไม่ต้องกังวลในเรื่องการเสียเวลาที่สถานีบริการน้ำมันอีกต่อไป แต่รถยนต์ไฟฟ้าก็มีข้อเสียคือ ปัจจุบันรถยนต์ไฟฟ้ายังมีราคาที่ค่อนข้างแพง เนื่องจากกระบวนการผลิตจนถึงการวางจำหน่ายจำเป็นต้องใช้เทคโนโลยีที่มีราคาสูง ทำให้ตัวรถมีราคาสูงตามไปด้วย เนื่องจากระยะทางในการขับขี่จะขึ้นอยู่กับขนาดความจุของแบตเตอรี่ ซึ่งอาจจะต้องมีการวางแผนการชาร์จระหว่างทาง สำหรับการขับขี่ในระยะไกล หากมีการเดินทางระยะยาวหรือข้ามจังหวัดนั้นควรจะต้องมีการวางแผนหาตำแหน่งที่ตั้งของสถานีอัดประจุ เนื่องจากปัจจุบันสถานีอัดประจุในประเทศยังไม่ครอบคลุมทุกพื้นที่ รถยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทยยังถือว่าเป็นเทคโนโลยีที่ใหม่มาก อาจจะต้องใช้เวลาเพื่อให้บุคลากรทางสายยานยนต์เรียนรู้เรื่องการบำรุงรักษาระบบต่าง ๆ เนื่องจากแบตเตอรี่ที่ติดตั้งอยู่ในรถยนต์ไฟฟ้าปัจจุบันมีอายุการใช้งานที่จำกัด การเปลี่ยนแบตเตอรี่ใหม่เป็นเรื่องที่ทำได้ง่าย แต่การกำจัดแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพไปแล้วนั้น ในปัจจุบันยังไม่มีมาตรการที่ชัดเจนในการกำจัดแบตเตอรี่ที่เป็นขยะเหล่านี้ [2]

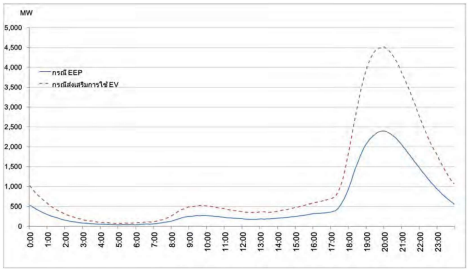
รถยนต์ไฟฟ้าเริ่มเข้ามามีบทบาทมากขึ้นในประเทศไทย โดยเริ่มจากรถยนต์ไฟฟ้าประเภทไฮบริด(Hybrid Electric Vehicle; HEV) ที่สามารถใช้พลังงานได้จากทั้งน้ำมันและไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ จากนั้นเริ่มมีการพัฒนาขึ้นเป็นรถยนต์ไฟฟ้าประเภทปลั๊กอินไฮบริด (Plug-in Hybrid Electric Vehicle; PHEV) ที่สามารถใช้พลังงานได้จากทั้งน้ำมันและไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ซึ่งสามารถชาร์จไฟฟ้าเพิ่มได้จากหัวชาร์จ และรถยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี (Battery Electric Vehicle; BEV) [3] โดยรถยนต์ไฟฟ้าประเภท PHEV สามารถชาร์จได้เฉพาะหัวชาร์จแบบกระแสสลับ (Alternating current electricity; AC) 7.4 kW ส่วนรถยนต์ไฟฟ้าประเภท BEV สามารถชาร์จได้ทั้งหัวชาร์จแบบกระแสสลับ (AC) 7.4 kW และกระแสตรง (Direct Current ; DC) 50 kW โดยหัวชาร์จแบบกระแสตรงจะให้กำลังไฟฟ้าที่มากกว่าทำให้ใช้เวลาชาร์จสั้นกว่าหัวชาร์จแบบกระแสสลับ ในปัจจุบันประเทศไทยมีรถยนต์สันดาปภายใน 98% รถยนต์ไฟฟ้าประเภท HEV 1.66% รถยนต์ไฟฟ้าประเภท PHEV 0.275% และรถยนต์ไฟฟ้าประเภท BEV 0.035% จากสัดส่วนระหว่างรถยนต์ประเภทสันดาปทั่วไปกับรถยนต์ไฟฟ้าประเภทต่างๆ แสดงให้เห็นว่าประเทศไทยยังมีการใช้รถยนต์ไฟฟ้าอยู่เป็นจำนวนน้อย

อย่างมีนัยสำคัญ จึงจำเป็นที่จะต้องมีการกระตุ้นให้เกิดการใช้รถยนต์ไฟฟ้ามากขึ้น [4]

การที่จะทำให้ผู้บริโภคหันมาใช้รถยนต์ไฟฟ้ามากขึ้น จำเป็นที่จะต้องมีการกระตุ้นจากภาครัฐซึ่งอาจจะเป็นนโยบายต่างๆ และการพัฒนาด้านการบริการการอัดประจุไฟฟ้า ซึ่งนโยบายของภาครัฐได้แก่ การลดภาษีจดทะเบียน การลดภาษีนำเข้า การทำที่จอดรถพิเศษหรือทางพิเศษสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า การให้ส่วนลดสำหรับการซื้อรถยนต์ไฟฟ้า การให้หน่วยงานภาครัฐมีการใช้รถยนต์ไฟฟ้าเพื่อเป็นตัวอย่างและการให้ข้อมูลความรู้เกี่ยวกับรถยนต์ไฟฟ้าให้กับประชาชน ในส่วนของการพัฒนาด้านการบริการการอัดประจุไฟฟ้า ได้แก่ การเพิ่มสถานี/แท่นอัดประจุไฟฟ้าให้กระจายและครอบคลุมมากที่สุด โดยเฉพาะการเดินทางที่มีระยะทางไกลซึ่งจำเป็นจะต้องได้รับการอัดประจุไฟฟ้าจำนวนถี่มากขึ้น การสร้างระบบนิเวศรอบสถานีอัดประจุไฟฟ้าเพื่อให้ลูกค้าสามารถใช้ระหว่างการรอกระบวนการอัดประจุไฟฟ้า ซึ่งจะช่วยให้เกิดความสะดวกสบายในการใช้รถยนต์ไฟฟ้า อีกทั้งการพัฒนาสิ่งต่างๆดังกล่าว จะทำให้ผู้บริโภคไม่ต้องเปลี่ยนพฤติกรรมหรือเปลี่ยนพฤติกรรมให้น้อยที่สุดในด้านการเติมเชื้อเพลิง

จากรูปที่ 1 รายงานแผนพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านไฟฟ้าเพื่อรองรับยานยนต์ไฟฟ้าของประเทศไทย ของการไฟฟ้าทั้ง 3 ส่วน ได้ทำให้เราทราบว่าช่วงเวลาที่มีการอัดประจุไฟฟ้ามากที่สุดคือช่วงเวลาค่ำ และน้อยที่สุดคือช่วงเช้ามืด เนื่องจากพฤติกรรมของคนไทยช่วงที่มีเวลาอิสระมากที่สุดคือช่วงค่ำหลังเลิกงาน จุดที่ให้บริการไม่ได้อยู่ใกล้สถานที่ที่ทำกิจกรรมหรือที่ทำงานในชีวิตประจำวัน ทำให้การเข้ามาใช้บริการในช่วงกลางวันมีน้อยอย่างนัยสำคัญ สำหรับคนที่มีเครื่องอัดประจุไฟฟ้าในที่พักอาศัยก็จะใช้ช่วงเวลานี้ในการอัดประจุไฟฟ้าเช่นกันอย่างมีนัยสำคัญ [5]

จากรายงานแผนพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านไฟฟ้าเพื่อรองรับยานยนต์ไฟฟ้าของประเทศไทย ของการไฟฟ้าทั้ง 3 ส่วน พบว่าผู้ใช้งานประมาณ 84-87% ส่วนใหญ่อัดประจุไฟฟ้าของยานยนต์ไฟฟ้าที่บ้าน ในลักษณะการอัดประจุไฟฟ้าข้ามคืน ในขณะที่ผู้ใช้งานประมาณ 13-16% อัดประจุไฟฟ้านอกบ้าน ดังแสดงในตารางที่ 1 [5]



รูปที่ 1 ความต้องการใช้ไฟฟ้ารายชั่วโมงของการอัดประจุไฟฟ้าในปี 2579

ตารางที่ 1 สมมติฐานสัดส่วนของการอัดประจุไฟฟ้า

สถานที่	ประเภทการชาร์จ	ร้อยละ
บ้าน	AC	85
อาคารสำนักงาน	AC	5
ศูนย์การค้า	AC/DC	5
สถานีบริการอัดประจุไฟฟ้า	DC	5

จากข้อมูลข้างต้นทั้งหมดทำให้เกิดประเด็นที่ต้องพิจารณาถึงความสามารถในการรองรับกระบวนการอัดประจุไฟฟ้าของรถยนต์ไฟฟ้าในอนาคตที่จะต้องมีการพัฒนาเพื่อรองรับปริมาณความต้องการใช้รถยนต์ไฟฟ้าที่มากขึ้น การรองรับปริมาณการเดินทางไม่ว่าจะเป็นการเดินทางภายในเมืองหรือการเดินทางระยะไกลที่ต้องผ่านหลายๆเมืองและใช้ระยะเวลานาน เพื่อให้การใช้รถยนต์ไฟฟ้าเกิดความสะดวกสบายมากที่สุดเหมือนกับการใช้รถยนต์สันดาปภายในในปัจจุบัน โดยศึกษารูปแบบสถานีอัดประจุไฟฟ้า/จุดให้บริการขนาดเล็กที่เหมาะสมและลงทุนไม่มากเพื่อให้สามารถรองรับปริมาณความต้องการได้กระจายทั่วทุกพื้นที่ โดยใช้โปรแกรม Arena ศึกษาวิธีการใช้โปรแกรมจากคู่มือ [6] และศึกษาวิจัยการดำเนินงาน [7]

มีการศึกษาการแก้ไขปัญหาระบบแถวคอยจาก สายสุรางค์ โชติพานิช (2547) ซึ่งได้ศึกษาระบบแถวคอยของการเข้ารับบริการเจาะเลือดโรงพยาบาลภูมิพลอดุลยเดชมี

การสร้างแบบจำลองในรูปแบบต่างๆ เพื่อนำมาเปรียบเทียบและหารูปแบบที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด [8] และรัตนา กูดทา (2549) ได้ศึกษาปัญหาระบบแถวคอยของผู้ใช้บริการธนาคารไทยพาณิชย์ สาขามหาวิทยาลัยขอนแก่น เพื่อหาแนวทางในการปรับปรุงการให้บริการ เพื่อให้ลูกค้าเกิดความพึงพอใจสูงสุด โดยใช้โปรแกรม Arena ในการสร้างรูปแบบการจำลอง [9]

2. ระเบียบและวิธีการวิจัย

2.1 ศึกษาความสามารถของยานยนต์ไฟฟ้าที่เข้ามาบริการ

ปัจจุบันมียานยนต์ไฟฟ้าหลายรุ่นหลายแบรนด์ ซึ่งมีความสามารถในการขับขี่และฟังก์ชันแตกต่างกัน เพื่อให้ข้อมูลนำเข้าสำหรับแบบจำลองในส่วนของความสามารถของยานยนต์ไฟฟ้าเป็นค่าเฉลี่ยส่วนใหญ่ โดยทำการเก็บรวบรวมข้อมูลสถิติของยานยนต์ไฟฟ้าประเภทรถยนต์ส่วนบุคคลไม่เกิน 7 ที่นั่ง ตั้งแต่ปี 2562-2564 ซึ่งมีค่าระยะทางโดยเฉลี่ยที่วิ่งได้ ขนาดความจุของแบตเตอรี อัตราความเร็วในการอัดประจุไฟฟ้า ระยะเวลาในการอัดประจุไฟฟ้า

2.2 ศึกษาพฤติกรรมของลูกค้าในการเข้ามาใช้บริการ

พฤติกรรมของลูกค้าในการเข้าใช้บริการสถานีบริการอัดประจุไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วย ช่วงเวลาการเข้ามาใช้บริการซึ่งมีการแบ่งเป็น 4 ช่วงเวลาในวันธรรมดาและ 2 ช่วงเวลาสำหรับวันหยุด อัตราการเข้ามาใช้บริการซึ่งมีการแจกแจงแบบปัวซอง เพื่อนำมาใช้เป็นข้อมูลนำเข้าของแบบจำลองสถานการณ์ โดยศึกษาจากข้อมูลสถิติพฤติกรรมของต่างประเทศเนื่องจากในประเทศไทยยังมีการใช้งานยานยนต์ไฟฟ้าจำนวนน้อย

2.3 ศึกษากระบวนการให้บริการของสถานีอัดประจุไฟฟ้าและสัดส่วนประเภทแท่นชาร์จ

โดยกระบวนการให้บริการของสถานีอัดประจุไฟฟ้าคือลูกค้าสามารถเลือกเข้ามาใช้บริการแบบไม่ได้จองล่วงหน้า หรือแบบทำการจองล่วงหน้า ซึ่งการจองล่วงหน้าลูกค้าจะต้องอยู่ใกล้กับสถานีบริการอัดประจุไฟฟ้าในระยะที่กำหนด เมื่อลูกค้าเข้ามาใช้บริการแล้วสามารถเข้ามาใช้บริการได้ทันทีโดยไม่ต้องรอแถวคอย ส่วนลูกค้าที่เข้ามาใช้บริการแบบไม่ได้จองล่วงหน้า จะต้องเข้าแถวคอยเพื่อรับบริการ โดยปกติแล้วสถานีบริการอัดประจุไฟฟ้าจะไม่มีพนักงานเข้ามาให้บริการ โดยลูกค้าจะต้องทำการอัดประจุไฟฟ้าและชำระเงินด้วยตัวเอง ทั้งนี้ต้องมีการศึกษาสัดส่วนสำหรับแท่นชาร์จแบบ AC และแบบ DC ในการรองรับปริมาณการใช้งานในอนาคต เนื่องจากยานยนต์ไฟฟ้าประเภท (BEV) สามารถอัดประจุไฟฟ้าในแท่นชาร์จแบบกระแสสลับ (AC) และแท่นชาร์จแบบกระแสตรง (DC) เป็นการอัดประจุไฟฟ้าแบบกระแสตรง ในขณะที่ยานยนต์ไฟฟ้าประเภท (PHEV) สามารถใช้เครื่องอัดประจุไฟฟ้าแบบช้า (AC) ได้เพียงอย่างเดียว โดยมีสัดส่วนปริมาณในการเข้า-ออกใช้บริการ และระยะเวลาในการรอคอยเป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพรูปแบบที่ให้บริการ

2.4 ศึกษาทางด้านการลงทุนเพื่อวิเคราะห์ความคุ้มค่าในการลงทุน

โดยเมื่อศึกษาและได้ผลลัพธ์ของสัดส่วนแท่นชาร์จระหว่าง AC และ DC แล้ว และหารูปแบบของแบบจำลองที่เหมาะสมได้แล้ว ผู้วิจัยจะนำแบบจำลองที่เหมาะสมนั้นมาทำการวิเคราะห์ทางด้านการลงทุนเพื่อหา อัตราผลตอบแทนภายใน และระยะเวลาคืนทุน ซึ่งจะทำให้ผู้วิจัยทราบได้ว่ารูปแบบที่ผ่านการคัดเลือกนั้น นอกจากมีความเหมาะสมทางด้านวิศวกรรมแล้ว รูปแบบนั้นมีความเหมาะสมทางด้านการลงทุนหรือไม่

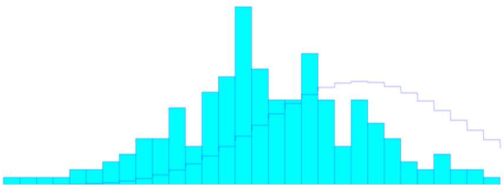
3. ผลการวิจัย

3.1 ลักษณะการให้บริการและเข้าใช้บริการ

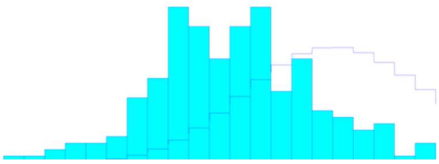
โดยการเข้าใช้บริการแบบ Walk-In หมายถึงการที่ลูกค้าสามารถเข้าไปใช้บริการได้ในทันทีเมื่อมาถึงโดยไม่ได้ทำการจองคิวล่วงหน้า และการเข้าใช้บริการแบบ Booking หมายถึงลูกค้าทำการจองคิวล่วงหน้าก่อนเข้าใช้บริการ โดยตารางที่ 2 แสดงถึงจำนวนเครื่องอัดประจุไฟฟ้าแต่ละประเภทในแต่ละรูปแบบการให้บริการ ตารางที่ 3 เป็นการแสดงข้อมูลนำเข้าในส่วนของอัตราการเข้ามาใช้บริการของลูกค้าในแต่ละช่วงเวลาโดยแสดงตัวอย่างข้อมูลการแจกแจงจากโปรแกรม Input Analyzer ในรูปที่ 2 และ 3

ตารางที่ 2 จำนวนเครื่องอัดประจุไฟฟ้าแต่ละประเภทการให้บริการ

รูปแบบ	เครื่องอัดประจุไฟฟ้าแบบชาร์จเร็ว (50 kW)		เครื่องอัดประจุไฟฟ้าแบบชาร์จช้า (7.4 kW)	
	Walk-In	Booking	Walk-In	Booking
1	1	1	1	1
2	1	1	2	1
3	1	1	3	1
4	1	-	2	1
5	1	-	3	1
6	1	1	2	2



รูปที่ 2 การแจกแจงการเข้าใช้บริการของลูกค้าที่มีรถยนต์ประเภท BEV ในช่วง 8.00-17.00 น.



รูปที่ 3 การแจกแจงการเข้าใช้บริการของลูกค้าที่มีรถยนต์ประเภท PHEV ในช่วง 8.00-17.00 น.

จากรูปที่ 2 เป็นการแจกแจงแบบปัวซอง ของข้อมูลอัตราการเข้ามาใช้บริการของลูกค้าที่มีรถยนต์ประเภท BEV ในช่วง 8.00-17.00 น. โดยมีค่าน้อยที่สุดคือ 20 นาที/คัน ค่าเฉลี่ยคือ 35.6 นาที/คัน และค่าสูงสุดคือ 57 นาที/คัน

จากรูปที่ 3 เป็นการแจกแจงแบบปัวซอง ของข้อมูลอัตราการเข้ามาใช้บริการของลูกค้าที่มีรถยนต์ประเภท PHEV ในช่วง 8.00-17.00 น. โดยมีค่าน้อยที่ที่สุดคือ 10 นาที/คัน ค่าเฉลี่ยคือ 20.1 นาที/คัน และค่าสูงสุดคือ 33 นาที/คัน

ในส่วนของข้อมูลนำเข้าของระยะเวลาในการอัดประจุไฟฟ้าของแต่ละประเภทเครื่องอัดประจุไฟฟ้าที่ให้บริการดังแสดงในตารางที่ 4 ซึ่งเป็นการแจกแจงแบบสามเหลี่ยม

ตารางที่ 3 อัตราการเข้ามาใช้บริการของลูกค้า

ช่วงเวลา	ระยะห่างของเวลาโดยเฉลี่ยที่ลูกค้าเข้ามาใช้บริการโดยเฉลี่ย (นาที/คัน)			
	เครื่องอัดประจุไฟฟ้าแบบเร็ว (50 kW)		เครื่องอัดประจุไฟฟ้าแบบช้า (7.4 kW)	
	Walk-In	Booking	Walk-In	Booking
วันธรรมดา				
0.00-3.00 น.	35.4	-	20.3	-
3.00-8.00 น.	38.1	-	30.4	-
8.00-17.00 น.	35.6	37.5	20.1	35.0
17.00-24.00 น.	29.4	37.5	14.6	35.0
วันหยุด				
0.00-6.00 น.	35.6	-	29.4	-
6.00-24.00 น.	35.6	37.5	25.1	35.0

3.2 ผลลัพธ์ความสามารถในการให้บริการของแต่ละแบบจำลอง

ตารางที่ 5 เป็นการกำหนดคำย่อและความหมายเพื่อใช้ในการอธิบายผลลัพธ์การวิเคราะห์ของแบบจำลองในตารางที่ 6-14 เมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณรถยนต์ไฟฟ้าเข้า-ออกระบบ ช่วงระยะเวลา 0.00-3.00 น. และ 3.00-8.00 น. ในแต่ละรูปแบบมีปริมาณรถยนต์ไฟฟ้าเข้า-ออกระบบใกล้เคียงกัน ซึ่งมีผลลัพธ์ดังนี้

ตารางที่ 4 ระยะเวลาที่ใช้ในการอัดประจุไฟฟ้า

ระยะเวลาการอัดประจุไฟฟ้า	เครื่องอัดประจุไฟฟ้าแบบ DC (50 kW) (นาที)	เครื่องอัดประจุไฟฟ้าแบบ AC (7.4 kW) (นาที)
ค่าสูงสุด	40	35
ค่าต่ำสุด	24	20
ค่าเฉลี่ยส่วนใหญ่	35.5	28.9

ตารางที่ 5 คำอธิบายความหมายตัวชี้วัด

คำย่อ	ความหมาย
Wlkn In	จำนวนลูกค้าที่ไม่ได้จองคิวล่วงหน้าเข้าใช้บริการ
Wlkn Out	จำนวนลูกค้าที่ไม่ได้จองคิวล่วงหน้าออกจากการใช้บริการ
Bk In	จำนวนลูกค้าที่จองคิวล่วงหน้าเข้าใช้บริการ
Bk Out	จำนวนลูกค้าที่จองคิวล่วงหน้าออกจากการใช้บริการ
WT 50 kW (W)	ระยะเวลารอคอยในการเข้าใช้บริการแท่นชาร์จ 50 kW แบบไม่ได้จองคิวล่วงหน้า
WT 50 kW (B)	ระยะเวลารอคอยในการเข้าใช้บริการแท่นชาร์จ 50 kW แบบมีการจองคิวล่วงหน้า
WT 7.4 kW (W)	ระยะเวลารอคอยในการเข้าใช้บริการแท่นชาร์จ 7.4 kW แบบไม่ได้จองคิวล่วงหน้า
WT 7.4 kW (B)	ระยะเวลารอคอยในการเข้าใช้บริการแท่นชาร์จ 7.4 kW แบบมีการจองคิวล่วงหน้า

จากตารางที่ 6 แสดงปริมาณรถยนต์ไฟฟ้าเข้า-ออกระบบ ช่วงเวลา 0.00-3.00 น. และ 3.00-8.00 น. ทุกรูปแบบมีปริมาณรถยนต์ไฟฟ้าเข้ามาใช้บริการใกล้เคียงกัน เนื่องจากเป็นช่วงเวลาที่มีความต้องการใช้บริการน้อย สามารถรองรับได้ 83% ในช่วงเวลา 0.00-3.00 น. และ 90% ในช่วงเวลา 3.00 – 8.00 น.

ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบปริมาณรถยนต์ไฟฟ้าเข้า-ออกระบบ ช่วงเวลา 0.00-3.00 น. และ 3.00-8.00 น.

ลักษณะการใช้บริการ	ปริมาณรถยนต์ไฟฟ้าเข้า-ออกระบบ (คัน)	
	0.00 – 3.00 น.	3.00 – 8.00 น.
Wlkn In	15.03	18.86
Wlkn Out	12.57	16.99

จากตารางที่ 7 และ 8 แสดงปริมาณรถยนต์ไฟฟ้าเข้า-ออกระบบ ช่วง 8.00 – 17.00 น. พบว่า รูปแบบที่ 1 สามารถรองรับปริมาณยานยนต์ไฟฟ้าได้น้อยที่สุด คือ 62 คัน คิดเป็น 83% จากจำนวนรถยนต์ที่เข้ามาใช้บริการ และรูปแบบที่ 6 สามารถรองรับปริมาณยานยนต์ไฟฟ้าได้มากที่สุด คือ 80 คัน คิดเป็น 93% จากจำนวนรถยนต์ที่เข้ามาใช้บริการ ในส่วนของรูปแบบที่ 2 และรูปแบบที่ 3 สามารถรองรับปริมาณรถยนต์ได้ใกล้เคียงกัน ซึ่งจะมีความแตกต่างกันในส่วนของระยะเวลาในการรอคิว เช่นเดียวกับรูปแบบที่ 4 และรูปแบบที่ 5 ที่สามารถรองรับปริมาณรถยนต์ได้ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 7 การเปรียบเทียบปริมาณรถยนต์ไฟฟ้าเข้า-ออกระบบ ช่วงเวลา 8.00-17.00 น. (รูปแบบที่ 1-3)

ลักษณะการใช้บริการ	ปริมาณรถยนต์ไฟฟ้าเข้า-ออกระบบ (คัน)		
	รูปแบบที่ 1	รูปแบบที่ 2	รูปแบบที่ 3
Wlkn In	43.20	43.10	43.1
Wlkn Out	33.51	40.59	40.6
Bk In	30.96	30.95	30.95
Bk Out	29.10	29.09	29.08

ตารางที่ 8 การเปรียบเทียบปริมาณรถยนต์ไฟฟ้าเข้า-ออกระบบ ช่วงเวลา 8.00-17.00 น. (รูปแบบที่ 4-6)

ลักษณะการใช้บริการ	ปริมาณรถยนต์ไฟฟ้าเข้า-ออกระบบ (คัน)		
	รูปแบบที่ 4	รูปแบบที่ 5	รูปแบบที่ 6
Wlkn In	43.13	43.13	43.18
Wlkn Out	40.65	40.67	40.7
Bk In	15.95	15.93	42.48
Bk Out	15.1	15.1	40.09

ตารางที่ 9 การเปรียบเทียบปริมาณรถยนต์ไฟฟ้าเข้า-ออกระบบ ช่วงเวลา 17.00-24.00 น. (รูปแบบที่ 1-3)

ลักษณะการใช้บริการ	ปริมาณรถยนต์ไฟฟ้าเข้า-ออกระบบ (คัน)		
	รูปแบบที่ 1	รูปแบบที่ 2	รูปแบบที่ 3
Wlkn In	44.19	44.23	44.19
Wlkn Out	26.58	39.35	40.61
Bk In	24.44	24.45	24.43
Bk Out	22.75	22.73	22.73

จากตารางที่ 9 และ 10 แสดงปริมาณรถยนต์ไฟฟ้าเข้า-ออกระบบ ช่วง 17.00 – 24.00 น. พบว่า รูปแบบที่ 1 สามารถรองรับปริมาณยานยนต์ไฟฟ้าได้น้อยที่สุด คือ 49 คัน คิดเป็น 71% จากจำนวนรถยนต์ที่เข้ามาใช้บริการ และรูปแบบที่ 6 สามารถรองรับปริมาณยานยนต์ไฟฟ้าได้มากที่สุด คือ 70.4 คัน คิดเป็น 91% จากจำนวนรถยนต์ที่เข้ามาใช้บริการ ในส่วนของรูปแบบที่ 2 และรูปแบบที่ 3 สามารถรองรับปริมาณรถยนต์ได้ใกล้เคียงกัน ซึ่งจะมีความแตกต่างกันในส่วนของระยะเวลาในการรอคิว เช่นเดียวกับรูปแบบที่ 4 และรูปแบบที่ 5 ที่สามารถรองรับปริมาณรถยนต์ได้ใกล้เคียงกัน

เมื่อนำระยะเวลารอคิวของแต่ละรูปแบบมาเปรียบเทียบในแต่ละช่วงเวลา ดังแสดงในตารางที่ 11 และ 12 พบว่า ในวันธรรมดา ช่วงเวลา 8.00-17.00 น. การรอคิวอัดประจุไฟฟ้าแบบเร็วที่เป็นการ Walk-In มีแบบจำลองที่ 2,3 และ 6 ที่มีระยะเวลารอแถวคอยน้อยอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับแบบจำลองที่มีการใช้ระยะเวลารอแถวคอยนานอย่างมีนัยสำคัญคือ แบบจำลองที่ 1 และ 4 ตามลำดับ โดยรูปแบบที่ 1 ในส่วนของการรอคิวอัดประจุไฟฟ้าแบบเร็ว มีการต่อคิวอยู่ที่ 0.13 คัน โดยจะต้องใช้ระยะเวลารอแถวคอย 24 นาที ในขณะที่การรอคิวอัดประจุไฟฟ้าแบบช้า มีการรอแถวคอย 3.78 คันโดยจะต้องใช้ระยะเวลารอคิว 73 นาที สำหรับรูปแบบที่ 4 ในส่วนของการรอคิวอัดประจุไฟฟ้าแบบเร็ว มีการรอแถวคอยเฉลี่ย 0.12 คัน

ตารางที่ 10 การเปรียบเทียบปริมาณรถยนต์ไฟฟ้าเข้า-ออกระบบ ช่วงเวลา 17.00-24.00 น. (รูปแบบที่ 4-6)

ลักษณะการใช้บริการ	ปริมาณรถยนต์ไฟฟ้าเข้า-ออกระบบ (คัน)		
	รูปแบบที่ 4	รูปแบบที่ 5	รูปแบบที่ 6
Wlkn In	44.17	44.17	44.13
Wlkn Out	39.32	39.32	39.38
Bk In	12.51	12.51	33.46
Bk Out	11.75	11.75	31.1

ตารางที่ 11 ระยะเวลาการรอคอย ช่วงเวลา 8.00-17.00 น. (วันธรรมดา รูปแบบที่ 1-3)

ลักษณะการรอคอย	ระยะเวลาการรอคอย (นาที)		
	รูปแบบที่ 1	รูปแบบที่ 2	รูปแบบที่ 3
WT 50 kW (W)	24.24	3.83	3.87
WT 50 kW (B)	0.17	0.17	0.17
WT 7.4 kW (W)	73.64	0.12	0
WT 7.4 kW (B)	0.06	0.05	0.05

จากตารางที่ 13 และ 14 พบว่า ในวันธรรมดา ช่วงเวลา 17.00-24.00 น. การรอคิวอัดประจุไฟฟ้าแบบกระแสตรง 50 kW ที่เป็นการ Walk-In มีรูปแบบที่ 3 ที่มีระยะเวลารอ

คิวน้อย สำหรับแบบจำลองที่มีการใช้ระยะเวลารอคิวนานอย่างมีนัยสำคัญคือ รูปแบบที่ 1 และ 4 ตามลำดับ โดยรูปแบบที่ 1 ในส่วนของการรอคิวอัดประจุไฟฟ้ากระแสตรง 50 kW มีการรอแถวคอยเฉลี่ย 0.89 คัน โดยจะต้องใช้ระยะเวลารอคิว 24 นาที ในขณะที่การรอคิวอัดประจุไฟฟ้าแบบกระแสสลับ 7.4 kW มีการรอแถวคอยเฉลี่ย 6.9 คัน โดยจะต้องใช้ระยะเวลารอแถวคอย 96 นาที สำหรับรูปแบบที่ 4 ในส่วนของการรอคิวอัดประจุไฟฟ้าแบบกระแสตรง 50 kW มีการรอแถวคอยเฉลี่ย 0.53 คัน โดยจะต้องใช้ระยะเวลารอแถวคอย 16 นาที

ตารางที่ 12 ระยะเวลาการรอคอย ช่วงเวลา 8.00-17.00 น. (วันธรรมดา รูปแบบที่ 4-6)

ลักษณะการรอคอย	ระยะเวลาการรอคอย (นาที)		
	รูปแบบที่ 4	รูปแบบที่ 5	รูปแบบที่ 6
WT 50 kW (W)	4	4.02	3.68
WT 50 kW (B)	-	-	0.17
WT 7.4 kW (W)	0.14	0	0.13
WT 7.4 kW (B)	0.06	0.05	0.01

ตารางที่ 13 ระยะเวลาการรอคอย ช่วงเวลา 17.00-24.00 น. (วันธรรมดา รูปแบบที่ 1-3)

ลักษณะการรอคอย	ระยะเวลาการรอคอย (นาที)		
	รูปแบบที่ 1	รูปแบบที่ 2	รูปแบบที่ 3
WT 50 kW (W)	24.66	16.30	13.33
WT 50 kW (B)	0.17	0.17	0.17
WT 7.4 kW (W)	96.88	8.21	0.19
WT 7.4 kW (B)	0.05	0.05	0.05

ในวันหยุด ช่วงเวลา 6.00-24.00 น. การรอคิวอัดประจุไฟฟ้าแบบกระแสตรง 50 kW ที่เป็นการ Walk-In มีรูปแบบที่ 2,3 และ 6 ที่มีระยะเวลารอแถวคอยน้อยอย่างมีนัยสำคัญสำหรับแบบจำลองที่มีการใช้ระยะเวลารอคิวนานอย่างมีนัยสำคัญคือ รูปแบบที่ 1 โดย ในส่วนของการรอคิวอัดประจุไฟฟ้าแบบกระแสสลับ 7.4 kW มีการรอแถวคอยเฉลี่ยอยู่ที่ 2.3 คัน โดยจะต้องใช้ระยะเวลารอคิวนานถึง 55 นาที

ตารางที่ 14 ระยะเวลาการรอคอย ช่วงเวลา 17.00-24.00 น. (วันธรรมดา รูปแบบที่ 4-6)

ลักษณะการรอคอย	ระยะเวลาการรอคอย (นาที)		
	รูปแบบที่ 4	รูปแบบที่ 5	รูปแบบที่ 6
WT 50 kW (W)	16.04	13.62	15.98
WT 50 kW (B)	-	-	0.17
WT 7.4 kW (W)	8.01	0.15	7.84
WT 7.4 kW (B)	0.05	0.05	0

จากการศึกษาในแต่ละแบบจำลองแต่ละช่วงเวลาและได้เปรียบเทียบผลลัพธ์แล้ว ทำให้ผู้วิจัยสามารถหาแบบจำลองในแต่ละช่วงเวลาที่เหมาะสมที่สุดได้ดังนี้

1) วันธรรมดา (จันทร์-ศุกร์) ช่วงเวลา 0.00 – 3.00 น., 3.00 – 8.00 น., 8.00 - 17.00 น. และ 17.00 - 24.00 น. เลือกใช้แบบจำลองที่ 3 ถึงแม้ว่าแบบจำลองที่ 6 สามารถรองรับปริมาณรถยนต์ไฟฟ้าได้มากกว่ารูปแบบที่ 3 แต่ระยะเวลารอคิวโดยเฉลี่ยใช้เวลารอคอยนานมากกว่า โดยที่จำนวนแท่นชาร์จเท่ากัน แต่มีแท่นชาร์จที่สามารถจองได้มากกว่าทำให้ เครื่องที่ต้อง Walk-In มีจำนวนน้อยกว่ารูปแบบที่ 3 ซึ่งเป็นเหตุให้ค่าเฉลี่ยระยะเวลารอคอยโดยรวมทั้งระบบมากกว่ารูปแบบที่ 3

2) วันหยุด (เสาร์-อาทิตย์ และวันหยุดนักขัตฤกษ์) ช่วงเวลา 0.00 – 6.00 น. เลือกใช้รูปแบบที่ 3 และวันหยุด (เสาร์-อาทิตย์ และวันหยุดนักขัตฤกษ์) ช่วงเวลา 6.00 – 24.00 น. เลือกใช้รูปแบบที่ 6

เนื่องจากยานยนต์ไฟฟ้าประเภทรถยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี สามารถใช้เครื่องอัดประจุไฟฟ้าประเภทกระแสตรง 50 kW และกระแสสลับ 7.4 kW ได้ ในขณะที่รถยนต์ไฟฟ้าประเภทรถยนต์ไฟฟ้าปลั๊กอินไฮบริด สามารถใช้เครื่องอัดประจุไฟฟ้าประเภทกระแสสลับ 7.4 kW เพียง

อย่างเดียว ซึ่งค่าเฉลี่ยสำหรับระยะเวลาการชาร์จแบบกระแสตรง 50 kW คือ 35.5 นาที ซึ่งเป็นการชาร์จจากแบตเตอรี่ 20% เพิ่มเป็น 100% ในขณะที่ระยะเวลาการชาร์จแบบกระแสสลับ 7.4 kW คือ 28.9 นาที ซึ่งเป็นการชาร์จจากแบตเตอรี่ 20% เพิ่มเป็น 25.7% หรือวิ่งเป็นระยะทาง 17 กิโลเมตร ให้ผู้ขับสามารถขับกลับที่พักอาศัยและไปชาร์จ ณ ที่พักอาศัยต่อได้

3.2 ผลลัพธ์การศึกษาทางด้านการลงทุน

เนื่องจากต้นทุนในการก่อสร้างอาจมีการเปลี่ยนแปลงตามมูลค่าวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้าง ซึ่งค่าใช้จ่ายและรายได้มีข้อมูลดังตารางที่ 15 - 16

ตารางที่ 15 ตารางแสดงต้นทุนคงที่

รายละเอียด	หน่วย	อายุใช้งาน (ปี)	เงินลงทุนต่อสถานี (ล้านบาท)
DC Charger	1.00	10	1.5
AC Charger	1.00	10	0.1
งานก่อสร้าง	1.00	20	0.9
ซอฟต์แวร์สำหรับบริหารจัดการ	1.00	10	0.5

ตารางที่ 16 ตารางแสดงต้นทุนพลังงาน

	ค่าความต้องการพลังไฟฟ้า (บาท/กิโลวัตต์)		ค่าพลังงานไฟฟ้า (บาท/หน่วย)		ค่าบริการ (บาท/เดือน)
	On Peak	Off Peak	On Peak	Off Peak	
>69 kW	74.14	0	4.13	2.61	312.24
12-24 kW	132.93	0	4.21	2.63	312.24
<12 kW	210.00	0	4.36	2.66	312.24

จากตารางที่ 15 เป็นการแสดงต้นทุนคงที่ในการทำกิจการการให้บริการสถานีบริการอัดประจุไฟฟ้า ซึ่งให้บริการในสถานีบริการน้ำมัน นอกจากนี้ยังมีค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผู้ให้บริการอัดประจุไฟฟ้าจะต้องซื้อจากการไฟฟ้า โดยจะแสดงต้นทุนพลังงานในตารางที่ 16

โดยรายรับจากการให้บริการอัดประจุไฟฟ้ามาจากอัตราค่าบริการ ซึ่งราคาในตลาดปัจจุบัน อัตราค่าบริการของแต่ละผู้ให้บริการแสดงดังตารางที่ 17

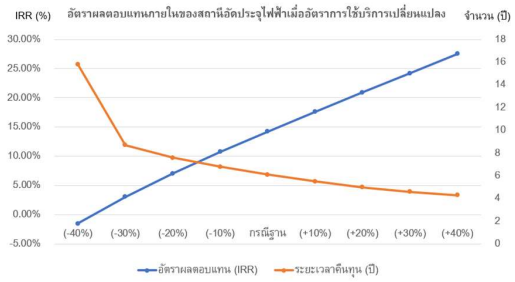
ตารางที่ 17 ตารางแสดงอัตราค่าบริการ

ผู้ให้บริการ	ประเภทหัวชาร์จ	อัตราค่าบริการ (บาท/หน่วย)	
		Peak	Off Peak
PEA	DC	7.98	4.60
	AC	7.98	4.60
PTT	DC	7.50	4.50
	AC	7.50	4.50
EA	DC	6.50	6.50
	AC	6.50	6.50
MG	DC	7.50	6.50
	AC	7.50	6.50
ELEXA	DC	7.50	7.50
	AC	7.50	7.50

ทางผู้วิจัยจึงได้ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบกรณีฐาน และ กรณีที่ต้นทุนในการก่อสร้างมีการปรับเพิ่ม/ลด ร้อยละ 10, ร้อยละ 20 และร้อยละ 30 โดยอัตราค่าบริการทางผู้วิจัยเลือกใช้ของ PTT ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ปรากฏว่า ในระยะเวลา 15 ปี (2565-2579) กรณีฐาน จะได้อัตราผลตอบแทนภายใน 14.23% โดยใช้ระยะเวลาคืนทุน 6.1 ปี หากราคาค่าก่อสร้างมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น ร้อยละ 30 จะได้อัตราผลตอบแทนภายใน 10.72% โดยใช้ระยะเวลาคืนทุน 6.9 ปี หากราคาค่าก่อสร้างมีการเปลี่ยนแปลงลดลง ร้อยละ 30 จะได้อัตราผลตอบแทนภายใน 18.94% โดยใช้ระยะเวลาคืนทุน 5.2 ปี

หากทำการวิเคราะห์ในด้านที่อัตราการเข้าใช้บริการอาจมีการเปลี่ยนแปลง ทางผู้วิจัยจึงได้ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบกรณีฐาน และ กรณีที่อัตราการเข้าใช้บริการมีการปรับเพิ่ม/ลด ร้อยละ 10, ร้อยละ 20 ร้อยละ 30

และร้อยละ 40 ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ปรากฏว่า ในระยะเวลา 15 ปี (2565-2579) ซึ่งกำหนดตามการศึกษาการคาดการณ์ปริมาณความต้องการใช้รถยนต์ไฟฟ้าในของ สนข. โดยกรณีฐาน จะได้อัตราผลตอบแทนภายใน 14.23% โดยใช้ระยะเวลาคืนทุน 6.1 ปี หากอัตราการเข้าใช้บริการมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น ร้อยละ 20 จะได้อัตราผลตอบแทนภายใน 20.90% โดยใช้ระยะเวลาคืนทุน 5.0 ปี หากอัตราการเข้าใช้บริการมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น ร้อยละ 40 จะได้อัตราผลตอบแทนภายใน 27.50% โดยใช้ระยะเวลาคืนทุน 4.3 ปี หากอัตราการเข้าใช้บริการมีการเปลี่ยนแปลงลดลง ร้อยละ 20 จะได้อัตราผลตอบแทนภายใน 7.08% โดยใช้ระยะเวลาคืนทุน 7.6 ปี และหากอัตราการเข้าใช้บริการมีการเปลี่ยนแปลงลดลง ร้อยละ 40 จะได้อัตราผลตอบแทนภายใน -1.49% โดยใช้ระยะเวลาคืนทุน 15.8 ปี ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 แผนภูมิแสดงอัตราส่วนผลตอบแทนภายในของสถานีอัดประจุไฟฟ้าเมื่ออัตราการใช้บริการเปลี่ยนแปลง

4. สรุป

ผลการวิจัยนี้ นำเสนอรูปแบบการให้บริการสถานีบริการอัดประจุไฟฟ้าขนาดเล็กที่มีการลงทุนไม่มาก ซึ่งทราบว่าความต้องการใช้รถยนต์ไฟฟ้าประเภท PHEV มากกว่า BEV ซึ่งช่วงเวลาที่มีอัตราการเข้ามาใช้บริการมากที่สุดคือ ช่วง 17.00น. – 24.00น. โดยรูปแบบที่เหมาะสมวันธรรมดาสำหรับสถานีบริการอัดประจุไฟฟ้า 1 สถานี คือรูปแบบที่ 3 ซึ่งมีแท่นอัดประจุไฟฟ้าแบบเร็ว (DC) 2 เครื่อง และแบบช้า (AC) 4 เครื่อง และรูปแบบที่ 6 สำหรับวันหยุด โดยค่าเฉลี่ยสำหรับระยะเวลาการชาร์จแบบกระแสตรง 50 kW คือ 35.5 นาที ซึ่งค่าเฉลี่ยสำหรับระยะเวลาการชาร์จแบบกระแสตรง 50 kW คือ 35.5 นาที ซึ่งเป็นการชาร์จจากแบตเตอรี่ 20% เพิ่มเป็น 100% ในขณะที่ระยะเวลาการชาร์จแบบกระแสสลับ 7.4 kW คือ 28.9 นาที ซึ่งเป็นการชาร์จจากแบตเตอรี่ 20% เพิ่มเป็น 25.7% โดยรูปแบบการให้บริการนี้ ให้อัตราผลตอบแทนภายใน 14.23% โดยใช้ระยะเวลาคืนทุน 6.1 ปี หากอัตราการเข้าใช้บริการมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น ร้อยละ 20 จะได้อัตราผลตอบแทนภายใน 20.90% โดยใช้ระยะเวลาคืนทุน 5.0 ปี และถ้าอัตราการเข้าใช้บริการมีการเปลี่ยนแปลงลดลง ร้อยละ 20 จะได้อัตราผลตอบแทนภายใน 7.08% โดยใช้ระยะเวลาคืนทุน 7.6 ปี ซึ่งแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดนี้และการวิเคราะห์ทางด้านการลงทุนนี้จะเป็นประโยชน์และแนวทางสำหรับทำกิจการสถานีอัดประจุไฟฟ้าขนาดเล็กในอนาคต

งานวิจัยในขั้นต่อไปจะทำการวิเคราะห์การคาดการณ์ปริมาณสถานีบริการอัดประจุไฟฟ้าที่ควรจะมีในอนาคตเพื่อรองรับปริมาณยานยนต์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

5. เอกสารอ้างอิง

[1] Planning for the development of the transport sector to be ready to support expansion of electric vehicle technology (Electric Vehicles) in the group of passenger cars. rep. Bangkok: Transport and Traffic Technology Group, Transport and Traffic System Development Division, Office of Transport and Traffic Policy and Planning, 2017, pp. 1–3.

[2] Energy Policy and Planning Office (March 5, 2022), Ministry of energy Pros and cons of

electric cars [online]. Available: https://www.eppo.go.th/index.php/th/petroleum/price/price-lpg-internal/item/17404-ev-charging-201064.

[3] EV Technology (2021). Thai Electric Vehicle Association [online]. Available: http://www.evat.or.th

[4] Thai Electric Vehicle Association (March 5, 2022). Summary of electric vehicle situation in Thailand January-October 2021 [online]. Available: http://www.evat.or.th

[5] Electricity Generating Authority of Thailand, Metropolitan Electricity Authority and the Provincial Electricity Authority, “Report on electric infrastructure development plan to support electric vehicles in Thailand”, Nov. 2016. pp. 24–121.

[6] R. Phisachpen, *Arena modeling manual*. Bangkok: V. Print Co., Ltd., 2008.

[7] R. Pisachpen and Pornthipha Ongkunarak, *Operation research* Bangkok: V. Print Co., Ltd., 2013.

[8] R. Goodtha. “The simulation of the queuing system of Siam Commercial Bank users”. Master dissertation, Khon Kaen University, 2006.

[9] S. Chotpanich. “An Analysis of the Queuing System of Visiting Bhumibol Adulyadej Hospital for Blood Collection Services”. Master dissertation, Kasetsart University, 2004.

Srinakharinwirot University Engineering Journal (2023) 19(1), 41-51 วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีที่ 19 ฉบับที่ 1 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2566 – มีนาคม พ.ศ. 2567

บทความวิชาการ: การศึกษาการอบแห้งแบบกระแสชน

A review: The study of Impinging Stream Drying

ปราชญา ตรีสุทธาชีพ* กิตติ สถาพรประสาธน์
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์
ถ.รังสิต-นครนายก อ.องครักษ์ จ.นครนายก 26120
Prachaya Treesutthacheep* Kitti Sathapornprasath
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University,
Rangsit-Nakhonnayok Rd., Khong 16, Ongkharak, Nakhonnayok 26120
*Corresponding author Email: prachaya_me@hotmail.com
(Received: December 31, 2022; Revised: August 3, 2023 ; Accepted: September 8, 2023)

บทคัดย่อ

การอบแห้งแบบกระแสชนเป็นเทคโนโลยีที่มีการศึกษาอย่างแพร่หลายทั่วโลก ในบทความนี้ได้รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับหลักการพื้นฐานของกระแสชน งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบเครื่องอบแห้งแบบกระแสชนที่ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการอบแห้ง วัสดุอบแห้งสามารถใช้วัสดุที่หลากหลายในการอบแห้งได้ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นวัสดุทางการเกษตร ได้แก่ กากถั่วเหลือง ข้าวเปลือก และข้าวนึ่ง (parboiled rice) ค่าตัวแปรที่ใช้วัดประสิทธิภาพของการอบแห้งในงานวิจัยส่วนใหญ่ ได้แก่ ค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร ค่าพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง และการศึกษาที่ใช้แบบจำลองเพื่อศึกษาเกี่ยวกับตัวแปรต่างๆในการอบแห้งแบบกระแสชน

คำสำคัญ: การอบแห้งแบบกระแสชน วัสดุทางการเกษตร สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร กากถั่วเหลือง อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร

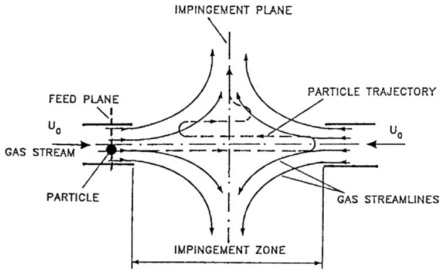
ABSTRACT

Impinging stream drying (ISD) is technology that has been studied worldwide. This article reviewed the principle of impinging stream, and research of ISD. Most research were focused on designing and verifying factors affected the efficiency of ISD. Drying materials a variety of materials can be used for drying. Drying materials are mostly agricultural products, including okara, rice paddy and parboiled rice. To assess the efficacy of ISD, volumetric water evaporation rate, volumetric heat transfer coefficient and energy consumption were determined in most research and a study by using a simulation for study the variables in an impinging stream dryer

Keyword: Impinging steam drying, Agricultural products, Volumetric heat transfer coefficient, Okara, Volumetric water evaporation rate.

1. หลักการของการอบแห้งแบบกระแสชน

การอบแห้งแบบกระแสชน ซึ่งมีลักษณะเด่นคือใช้เวลาในการอบสั้นมากเมื่อเทียบกับการอบแห้งแบบอื่นๆ โดยการอบแบบกระแสชนเหมาะสำหรับการอบแห้งวัสดุที่มีความชื้นที่ผิวสูง แนวคิดพื้นฐานของกระแสชน คือ เมื่อกระแสของไหลความเร็วสูง 2 กระแสซึ่งไหลเข้าสู่ระบบในทิศทางตรงกันข้ามเกิดการชนกันจะเกิดเป็นระนาบการชน ส่งผลให้บริเวณดังกล่าวเกิดการถ่ายเทความร้อน มวลสาร และโมเมนตัมขึ้น เป็นผลเนื่องมาจากแรงเฉือน (Shear force) ที่เกิดขึ้นจากการชนกันของกระแสของไหล 2 กระแส หลังจากกระแสของไหลชนกันแล้วก็จะไหลออกจากระบบ โดยวัสดุที่เป็นของแข็งหรือของเหลวเริ่มไหลไปกับกระแสใดกระแสหนึ่ง ความเร็วของวัสดุจะถูกเร่งจากความเร็วเท่ากับศูนย์ (zero velocity; U_0) จนถึงความเร็วระดับหนึ่งอันเป็นผลมาจากไฮโดรไดนามิกของการไหลของของแข็งและแก๊สเมื่อผ่านระนาบการชน (impingement plane) วัสดุจะแทรกตัวเข้าสู่กระแสตรงกันข้ามในระนาบเดิม และเมื่อผ่านบริเวณนี้ ความเร็วของวัสดุจะลดลง และหยุดที่ระยะทางหนึ่งในบริเวณกระแสตรงกันข้าม จากนั้นวัสดุจะมีความเร็วเพิ่มขึ้นอีกครั้ง และเคลื่อนที่ย้อนกลับเนื่องจากแรงของกระแสที่เป่าจากทิศตรงกันข้าม และเคลื่อนตัวกลับไปกลับมาเนื่องจากการเพิ่มและลดความเร็วซ้ำไปมาเนื่องจากการชนกันของกระแสตรงกันข้าม การเคลื่อนที่ในทิศทางตรงกันข้ามกันไปมาและเกิดขึ้นซ้ำ ๆ จนกระทั่งวัสดุในบริเวณที่เกิดการชน (impingement zone) มีความเร็วเท่ากับความเร็วสุดท้าย (terminal velocity) และหลุดออกจากระบบการอบแห้งแบบกระแสชน [1] ด้วยกลไกการอบแห้งเช่นนี้ทำให้ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นมาก สามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับระบบการอบแห้งวัสดุ (เฟสกระจายตัว) ที่เป็นของเหลวหรือของแข็งขนาดเล็ก โดยมีแก๊สหรือของเหลวเป็นกระแส (เฟสต่อเนื่อง) แต่ทั้งนี้เนื่องจากการอบแห้งแบบกระแสชนมีระยะเวลาของวัสดุที่อยู่ในระบบสั้นมาก โดยมีหน่วยของระยะเวลาเป็นวินาที ความชื้นที่ออกจากวัสดุส่วนใหญ่นั้นเป็นความชื้นที่อยู่บริเวณพื้นผิววัสดุ



รูปที่ 1 หลักการของ impinging stream drying [1]

2. งานวิจัยที่ทำการศึกษา

ในการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ได้รวบรวมมา เช่น การสร้างแบบจำลอง และการใช้วัสดุต่างๆมาอบแห้งโดยเครื่องอบแห้งแบบกระแสชน ได้แก่ เรซิ่น กากถั่วเหลือง ข้าวเปลือก ข้าวเปลือกนึ่ง และข้าวกล้องนึ่ง รวมไปถึงการนำไปใช้ในวัสดุอื่นที่ไม่ใช่วัสดุทางการเกษตรเช่น ถ่านหิน เป็นต้น

2.1 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การวิเคราะห์ผ่านโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ หรือที่เรียกว่า การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (mathematical model) โดยการจำลอง (simulation) ผลการวิจัยที่เป็นไปได้โดยการใช้สมการทางคณิตศาสตร์ทำนายผลการทดลอง และเครื่องมือที่นิยมใช้จำลองและวิเคราะห์ผลการทดลองได้ด้วยระบบคอมพิวเตอร์ คือ โปรแกรม computational fluid dynamics (CFD) ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์สำหรับการวิเคราะห์ด้านพลศาสตร์ของไหลด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ ใช้อธิบายพฤติกรรมการไหลของของไหล โดยการจำลองปรากฏการณ์จะคำนวณด้วยชุดของสมการอนุรักษ์ (Conservation Equations) ได้แก่ สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equations) สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum Equations) สมการอนุรักษ์พลังงาน (Energy Equations)

ในงานวิจัยของ Khomwachirakul et al. [2] ได้ใช้โปรแกรม computational fluid dynamics (CFD) และ

โปรแกรม computational fluid dynamics and discrete element method (CFD-DEM) ในการจำลองการไหลและลักษณะการอบแห้งของอนุภาคความชื้นสูงในการอบแห้งแบบกระแสชน จากงานวิจัยได้กำหนดตัวแปรต้นซึ่งเป็นสภาวะในการทดลอง ได้แก่ ขนาดของอนุภาค ความหนาแน่นของอนุภาค ค่าความจุความร้อนของอนุภาค ค่าการนำความร้อนของอนุภาค ความชื้นเริ่มต้นของอนุภาค อุณหภูมิอากาศขาเข้า ความเร็วอากาศขาเข้า อัตราการป้อนวัสดุ และระยะการชน และในการใช้โปรแกรม CFD เพื่อจำลองการไหลและลักษณะการอบแห้งนั้น มีการกำหนดค่าตัวแปรเพิ่มเติมคือ ค่า restitution coefficient of particle-wall ค่า gas time step และค่า particle time step ในขณะที่การจำลองโดยใช้โปรแกรม CFD-DEM ได้ใช้ค่า spring constant ค่า friction coefficient และค่า restitution coefficient of particle-particle เพิ่มเติม โดยหลักการที่เกี่ยวข้องกับการจำลองดังกล่าว ได้แก่ พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของแก๊ส (gas motion behavior) พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของอนุภาค (particle motion behavior) และจลนศาสตร์ของการอบแห้งของอนุภาคความชื้นสูง (kinetic drying of high moisture particle) และมีสมการที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ สมการ continuity equation (สมการที่ (1)) [2]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha\rho) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\alpha\rho u_i) = M_m \qquad (1)$$

เมื่อ t คือ เวลา (วินาที)
α คือ สัดส่วนของช่องว่าง
ρ คือ ความหนาแน่นของแก๊ส (kg/m^3)
x_i คือ พิกัดตามแนวแกน x (m)
u_i คือ ความเร็วแก๊สในแนวแกน x (m/s)
M_m คือ เทอมของสมการความต่อเนื่อง (kg/m^{3}s)

สมการโมเมนตัม (Momentum equation) (สมการที่ (2)) [2]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha\rho u_j) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\alpha\rho u_i u_j) = -\alpha\frac{\partial P}{\partial x_i} + \left[\alpha(\mu+\mu_t)\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\right] + \alpha\rho g + M_F \qquad (2)$$

เมื่อ u_i คือ ความเร็วแก๊สในแนวแกน y (m/s)
P คือ ความดัน (N/m^2)
x_j คือ พิกัดตามแนวแกน y (m)
μ คือ ความหนืดพลวัตของแก๊ส (kg/m.s)
μ_t คือ ความหนืดเนื่องจากการไหลปั่นป่วน (kg/m.s)
g คือ อัตราเร่งจากแรงโน้มถ่วง (m/s^2)
M_F คือ เทอมของสมการโมเมนตัม (N/m^3)

สมการ Particle motion equations (สมการที่ (3)) [2]

$$m_p\frac{du_p}{dt} = F_g + F_D + F_C \qquad (3)$$

เมื่อ m_p คือ มวลของวัสดุ (kg)
u_p คือ ความเร็วของวัสดุ (m/s)
F_g คือ แรงเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (N)
F_D คือ แรงฉุดลาก (N)
F_C คือ ผลรวมของแรงปฏิสัมพันธ์กันระหว่างอนุภาคกับอนุภาค (N)

สมการพลังงาน (energy equation for the gas phase) (สมการที่ (4)) [2]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha\rho c_p T) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\alpha\rho c_p u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_i} + \left(\alpha k\frac{\partial T}{\partial x_i}\right) + M_h \qquad (4)$$

เมื่อ c_p คือ ความจุความร้อนจำเพาะของอนุภาค (J/kg.K)

T คือ อุณหภูมิ (K)

k คือ พลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (m^2/s^2)

M_h คือ เทอมของสมการพลังงาน (W/m^3)

และสมการ species (water) balance equation (สมการที่ (5)) [2]

$$\frac{\partial(\alpha\rho C)}{\partial t}+\frac{\partial(\alpha\rho u_i C)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\alpha\left(\rho D+\frac{\mu_t}{Sc_t}\right)\frac{\partial C}{\partial x_i}\right)+M_m \quad (5)$$

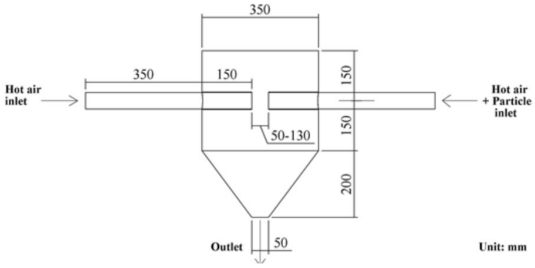
เมื่อ C คือ ความเข้มข้นของอนุภาค (kg/m^3)

D คือ ค่าสัมประสิทธิ์ในการแพร่ของแก๊ส (m^2/s)

Sc_t คือ ชมิดท์นัมเบอร์ของความปั่นป่วน

จากงานวิจัยดังกล่าวได้นำสมการคณิตศาสตร์มาใช้จำลองการไหลและลักษณะการอบแห้งอนุภาคที่มีความชื้นสูง โดยเปรียบเทียบความแม่นยำระหว่างการคำนวณผ่านโปรแกรม CFD และโปรแกรม CFD-DEM เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองจริง ได้แก่ค่าเฉลี่ยของระยะเวลาที่วัสดุอยู่ในระบบ (mean residence time) และค่าความชื้นของวัสดุ (moisture content of particle) พบว่าการใช้โปรแกรม CFD-DEM ให้ผลการทดลองที่แม่นยำกว่าการใช้โปรแกรม CFD นอกเหนือไปจากการสร้างภาพจำลองของอนุภาคในระหว่างการอบแห้งแบบกระแสชนด้วยโปรแกรมดังกล่าวแล้ว Khomwachirakul et al. [2] ได้รายงานผลค่าเฉลี่ยของระยะเวลาที่วัสดุอยู่ในระบบ (mean residence time) และค่าความชื้นของวัสดุ (moisture content of particle) โปรแกรม CFD-DEM แสดงผลค่าเฉลี่ยของระยะเวลาที่วัสดุอยู่ในระบบที่มีความคลาดเคลื่อนจากค่าจริงเพียง ±4% เท่านั้น แต่โปรแกรม CFD แสดงผลค่าเฉลี่ยของระยะเวลาที่วัสดุอยู่ในระบบที่มีความคลาดเคลื่อนจากค่าจริง ±8% สำหรับค่าความชื้นของวัสดุนั้น โปรแกรม CFD-DEM และโปรแกรม CFD แสดงค่าความชื้นของวัสดุคลาดเคลื่อน ± 3% และ ± 7% ตามลำดับ

ต่อมา Khomwachirakul et al. [3] ใช้แบบจำลอง CFD-DEM ทำการศึกษาการอบแห้งในเครื่องอบแห้งแบบกระแสชนแบบหลายขั้นตอนซึ่งมุ่งเน้นศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ อุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้าและจำนวนรอบการอบแห้ง ที่มีผลต่อค่าความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกนึ่งที่ทางออกของห้องอบแห้ง และอุณหภูมิของข้าวเปลือกนึ่ง ในการจำ ลองข้าวเปลือกนึ่งถูกอบแห้งทั้งหมด 7 รอบการอบแห้ง ซึ่งในแต่ละรอบการอบแห้ง จะถูกพักในที่อับอากาศเป็นเวลา 4 นาที หลังจากนั้นข้าวเปลือกนึ่งจะถูกนำกลับเข้าสู่เครื่องอบแห้งอีกครั้ง

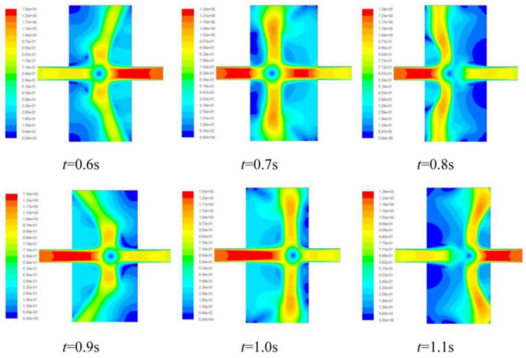


รูปที่ 2 แผนผังห้องอบแห้งที่ใช้ในการจำลอง [3]

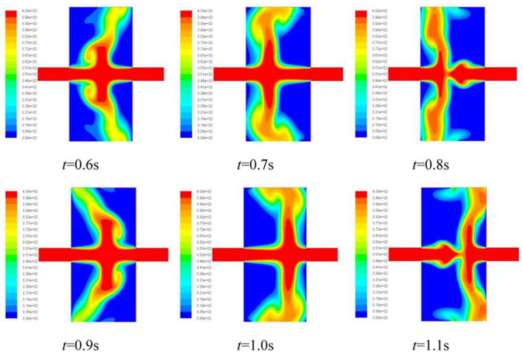
การจำลองแบบพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณร่วมกับวิธีเอลิเมนต์ไม่ต่อเนื่องได้ถูกนำมาใช้ในการจำลองการอบแห้งข้าวเปลือกนึ่งแบบหลายขั้นตอน สำหรับทำนายผลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีต่อค่าความชื้นสุดท้ายและอุณหภูมิของข้าวเปลือกนึ่งในระบบอบแห้งแบบกระแสชน ซึ่งพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้ผลการจำลองสอดคล้องกับผลการทดลอง และมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน ± 5% โดยผลอัตราการลดลงของความชื้นข้าวเปลือกนึ่งขึ้นอยู่กับทั้งอุณหภูมิอากาศร้อน และจำนวนรอบการอบแห้ง

ต่อมา Li et al. [4] ได้สร้างแบบจำลองเพื่อการศึกษาเกี่ยวกับอุณหภูมิของแก๊สในแต่ละตำแหน่งภายในห้องอบแห้งดังรูปที่ 3 ความเร็วของแก๊สเมื่อมีการ

ชนของกระแสทั้ง 2 ด้านในตำแหน่งต่างๆภายในห้องอบแห้งดังรูปที่ 4

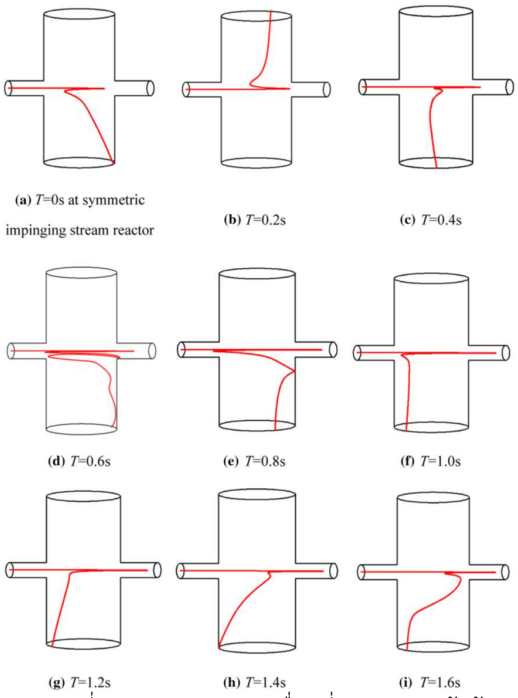


รูปที่ 3 ความเร็วของอากาศในแต่ละช่วงเวลาที่ได้จากการจำลองปฏิกิริยาการอบแห้งแบบกระแสชน [4]

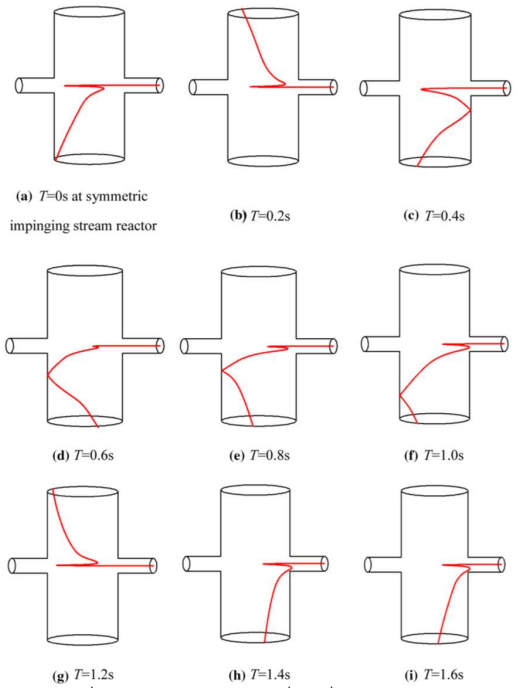


รูปที่ 4 อุณหภูมิของอากาศในแต่ละช่วงเวลาที่ได้จากการจำลองปฏิกิริยาการอบแห้งแบบกระแสชน [4]

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาถึงลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาค ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมการเคลื่อนที่ และรูปแบบของการเคลื่อนที่ในลักษณะที่สามารถพบเจอได้ในห้องอบแห้งของแต่ละช่วงเวลาดังรูปที่ 5 และรูปที่ 6 ทำให้ทราบถึงโอกาสในการเคลื่อนที่ไปกลับของวัสดุผ่านระนาบการชน โดยการเคลื่อนที่ดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในการออกแบบห้องอบแห้ง

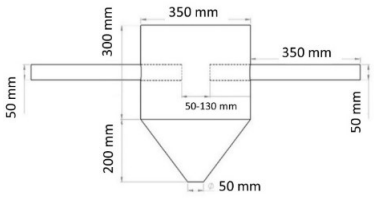


รูปที่ 5 แบบจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคเข้าห้องอบแห้งจากทางด้านซ้ายในแต่ละช่วงเวลา [4]

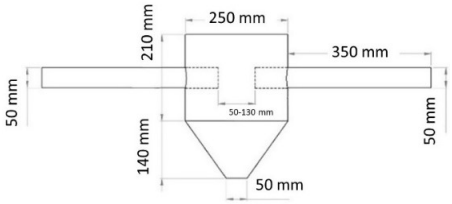


รูปที่ 6 แบบจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคเข้าห้องอบแห้งจากทางด้านขวาในแต่ละช่วงเวลา [4]

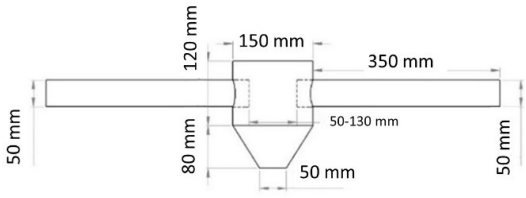
จากการศึกษาลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาค lamyaem and Kundkun [5] ทำการศึกษาถึงรูปทรงต่าง ๆ ของห้องอบแห้ง ได้แก่ ห้องอบแห้งรูปทรงกระบอก-กรวย รูปทรงกลม และรูปทรงสามทาง และความชันที่บริเวณปลายท่อส่งวัสดุเดียวกัน พบว่ารูปทรงห้องอบแห้งส่งผลต่อระยะเวลาเฉลี่ยที่วัสดุอยู่ในห้องอบแห้งเป็นอย่างมาก หากรูปทรงห้องอบแห้งไม่เอื้ออำนวยต่อการเคลื่อนที่ออกจากห้องอบแห้งอาจทำให้เกิดการตกค้างของวัสดุภายในห้องอบแห้ง และพบว่าการลดปริมาตรห้องอบแห้ง (ภาพที่ 7, 8 และ 9) ซึ่งขนาดห้องอบแห้ง L, M และ S มีปริมาตรห้องอบแห้งเท่ากับ 0.035, 0.013 และ 0.0028 m^3 ตามลำดับ ทำให้ประสิทธิภาพการลดความชื้นของวัสดุลดลง เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนและความชื้นของวัสดุส่วนใหญ่เกิดที่บริเวณการชน



รูปที่ 7 แบบของห้องอบแห้ง size L [5]

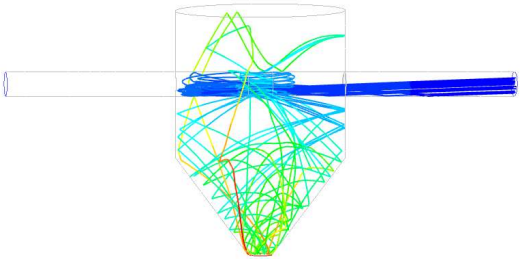


รูปที่ 8 แบบของห้องอบแห้ง size M [5]



รูปที่ 9 แบบห้องอบแห้ง size S [5]

และนอกจากนี้ยังพบว่าการปรับเพิ่มความชันที่บริเวณปลายท่อส่งวัสดุเพื่อลดปัญหาการตกของวัสดุก่อนถึงบริเวณการชน สามารถทำได้โดยการเพิ่มความชันที่บริเวณปลายท่อส่งวัสดุ เนื่องจากการเพิ่มความชันทำให้วัสดุสามารถเคลื่อนที่เข้าสู่ระนาบการชนได้ในปริมาณที่มากขึ้น อย่างน้อย 1 รอบการเคลื่อนที่



รูปที่ 10 การเคลื่อนที่ของวัสดุภายในห้องอบแห้งที่ความชัน 1° ภายใต้เงื่อนไขระยะห่างในการชน 50 mm ความเร็วอากาศขาเข้า 20 m/s อัตราการป้อนวัสดุ 10 $kg_{dry\ solid}$/h และอุณหภูมิอากาศขาเข้า 170 °C [5]

2.2 การอบแห้งจากเครื่องอบแห้ง

งานวิจัยที่ใช้วัสดุเป็นเรซิ่นเป็นวัสดุสำหรับอบแห้ง ได้แก่ Sathapornprasath et al. [6] ได้ทำการศึกษาโดยเรซิ่นมีความชื้นเริ่มต้น 81-85 % (d.b.) อุณหภูมิการอบแห้ง 70-110 °C มีเวลาเฉลี่ยที่อนุภาคอยู่ในระบบ 2 วินาที พบว่าได้อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุด 110 kg_{water}/m^3h และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรสูงสุด 880 W/m^3K

ในการศึกษากับวัสดุที่เป็นกากถั่วเหลืองได้มีผู้วิจัยทำการศึกษากับกากถั่วเหลืองโดยพัฒนาจากเครื่องต้นแบบของ Sathapornprasath et al. [6] และได้ทำการศึกษากับกากถั่วเหลืองโดย Jantaka et al. [7] ได้ขยายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อส่งวัสดุเข้าเครื่องอบแห้งให้ใหญ่ขึ้นจาก 0.025 เป็น 0.038 เมตร และเปลี่ยนอุปกรณ์ป้อนวัสดุแบบสกรู (Screw conveyor) เป็นแบบสายพานลำเลียง (Belt conveyor) อุณหภูมิการอบแห้ง

130 และ 150 ºC มีระยะการชน 5 และ 13 cm อัตราการป้อนกากถั่วเหลือง 10 และ 20 $kg_{dry\ solid}$/h พบว่าได้อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุด 300 kg_{water}/m^3h และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรสูงสุด 5750 W/m^3K ที่ความเร็วลม 25 m/s อุณหภูมิ 150 ºC

ต่อมา Choicharoen et al. [8] ได้ทำการทดลองกับกากถั่วเหลือง โดยมีปัจจัยที่ทำการศึกษา คือ อากาศร้อนที่อุณหภูมิ 130, 150 และ 170 ºC ตามลำดับ ใช้ไอน้ำยิ่งยวดที่อุณหภูมิ 130, 150, 170 และ 190 ºC ตามลำดับ และระยะการชน 5, 9 และ 13 cm ตามลำดับ อัตราการป้อนกากถั่วเหลือง 10 และ 20 $kg_{dry\ solid}$/h พบว่าสำหรับอากาศร้อนอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุด 549 kg_{water}/m^3h และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรสูงสุด 4805 W/m^3K สำหรับไอน้ำอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุด 807 kg_{water}/m^3h และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรสูงสุด 7983 W/m^3K ซึ่งอุณหภูมิ ความเร็ว และอัตราการป้อนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้น และมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะรวมของเครื่องอบแห้งต่ำสุดเท่ากับ 3.1 MJ/kg_{water} ที่ไอน้ำยิ่งยวดอุณหภูมิ 190 ºC อัตราการป้อนกากถั่วเหลือง 20 $kg_{dry\ solid}$/h และระยะการชน 5 cm

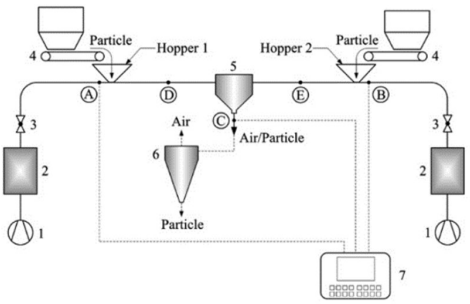
ต่อมาในปี 2017 Nimmol et al. [9] ได้ใช้กากถั่วเหลืองซึ่งมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 288 ถึง 342% (d.b.) เป็นวัสดุทดสอบการทดลองอบแห้งแบ่งออกเป็นสองส่วน กล่าวคือ การอบแห้ง 1 รอบและการอบแห้ง 2 รอบ อุณหภูมิอบแห้ง 100, 130 และ 150 ºC ตามลำดับ และอัตราการป้อนกากถั่วเหลือง 15, 30 และ 45 $kg_{dry\ solid}$/h ตามลำดับ พบว่าได้อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุด 1784.2 kg_{water}/m^3h และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรสูงสุด 3385.3 W/m^3K ซึ่งเกิดขึ้นในการอบแห้งรอบที่ 1 ที่อุณหภูมิอบแห้ง 150 ºC และอัตราการป้อนกากถั่วเหลือง 45 $kg_{drysolid}$/h มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะรวมของเครื่องอบแห้งต่ำสุดเท่ากับ 2.07 MJ/kg_{water} ที่อุณหภูมิ 150 ºC อัตราการป้อนกากถั่วเหลือง 45 $kg_{dry\ solid}$/h

สำหรับการอบแห้งที่ใช้ถั่วเหลืองเป็นวัสดุอบแห้งนั้น ได้มีการศึกษาโดย Choicharoen et al. [10] ปัจจัยที่ทำการศึกษาคือ อากาศร้อนที่อุณหภูมิ 130, 150 และ 170 ºC ตามลำดับ ระยะการชน 5, 9 และ 13 cm ตามลำดับ อัตราการป้อนกากถั่วเหลือง 10 และ 20 $kg_{dry\ solid}$/h ความเร็วลม 20 และ 27 m/s พบว่าได้อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุด 524 kg_{water}/m^3h และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรสูงสุด 4593 W/m^3K โดยที่อุณหภูมิ ความเร็ว และอัตราการป้อนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้น ในขณะที่ ความเร็ว อัตราการป้อน และระยะห่างการชนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรมีค่าเพิ่มขึ้น และค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะรวมของเครื่องอบแห้งต่ำสุดเท่ากับ 5.6 MJ/kg_{water} ที่อุณหภูมิ 170 ºC อัตราการป้อนกากถั่วเหลือง 20 $kg_{dry\ solid}$/h และระยะการชน 13 cm

สำหรับการอบแห้งที่ใช้ข้าวเปลือกเป็นวัสดุอบแห้งได้มีการศึกษาโดย Pattachari and Sathapornprasath [11] ได้ทำการศึกษากับข้าวเปลือกที่มีความชื้น 22 % (d.b.) อุณหภูมิ 70-110 ºC พบว่าได้อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุด 44.7 kg_{water}/m^3h และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรสูงสุด 602.83 W/m^3K

ต่อมา Nimmol et al. [12] ได้ทำการปรับปรุงระบบให้มีการป้อนวัสดุ 2 จุดดังแสดงในรูปที่ 11 โดยมีปัจจัยที่ทำการศึกษา คือ อากาศร้อนที่อุณหภูมิ 110, 130 และ 150 ºC ตามลำดับ ระยะการชน 5, 10 และ 15 cm ตามลำดับ และ อัตราการป้อนข้าวเปลือก 130 และ 150 $kg_{dry\ solid}$/h พบว่าได้อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุด 198 kg_{water}/m^3h ที่การป้อนจุดเดียว พบว่าอุณหภูมิ และอัตราการป้อนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้น และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรสูงสุด 7013 W/m^3K ที่การป้อน 2 จุด ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะรวมของเครื่องอบแห้ง

ต่ำสุดเท่ากับ 5.1 MJ/kg_{water} ที่อุณหภูมิ 110 ºC อัตราการป้อน 150 $kg_{dry\ solid}$/h และระยะการชน 5 cm ที่การป้อน 2 จุด ในการศึกษานี้ไม่ได้คำนึงถึงการแตกหัก และคุณภาพของข้าวเปลือก



1) พัดลมความดันสูง 2) เครื่องกำเนิดความร้อน
3) โกลบวาล์ว 4) สายพานลำเลียง
5) ห้องอบแห้ง 6) ไซโคลน
7) เครื่องเก็บข้อมูลอุณหภูมิ และความชื้น

รูปที่ 11 แผนผังของเครื่องอบแห้งกระแสชน และอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง

ต่อมา Nimmol et al. [13] ได้ทำการทดลองการอบแห้งข้าวเปลือก โดยมีการปรับปรุงระบบใช้ร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลม มีปัจจัยที่ทำการศึกษา คือ อากาศร้อนที่อุณหภูมิ 70, 90 และ 110 ºC ตามลำดับ ความเร็วลม 16 และ 25 m/s อัตราการป้อนข้าวเปลือก 22, 47 และ 62 $kg_{dry\ solid}$/h ตามลำดับ พบว่าการอบแบบพาหะลมมีอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุด 150 kg_{water}/m^3h และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรสูงสุด 2325 W/m^3K สำหรับการอบแบบกระแสชนร่วมกับแบบพาหะลมมีอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุด 329 kg_{water}/m^3h และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรสูงสุด 3310 W/m^3K ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะรวมของเครื่องอบแห้งต่ำสุดเท่ากับ 2.6 MJ/kg_{water} ที่อุณหภูมิ 70 ºC อัตราการป้อน 62 $kg_{dry\ solid}$/h ที่การอบแห้งแบบกระแสชนร่วมกับแบบพาหะลม โดยที่อุณหภูมิการอบแห้งมีผลกับความขาวของเมล็ดข้าวเล็กน้อยเนื่องจากเวลาในการอบแห้งสั้นมากมีค่า 36–38 และ 35–38 ค่าร้อยละต้นข้าวจากการอบแบบพาหะลม และการอบแห้งแบบกระแสชนร่วมกับแบบพาหะลมอยู่ในช่วง 36–45% และ 28–43% ตามลำดับ

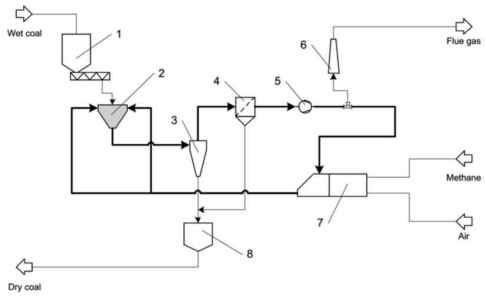
ต่อมา Thanasookprasert et al. [14] ได้ทำการอบแห้งข้าวเปลือกจำนวน 2 รอบโดยใช้อุณหภูมิในการอบแห้ง 130, 150 และ 170ºC ความเร็วของอากาศเข้าห้องอบแห้ง 20 m/s ระยะห่างกระแสชนเท่ากับ 5 cm และอัตราการป้อนวัสดุ 90 kg/h และการทดลองนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับร้อยละต้นข้าว การเปลี่ยนแปลงสีของข้าว ซึ่งผลจากการทดลองพบว่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุด 377.2 kg_{water}/m^3h ในการอบรอบที่ 1 และการเปลี่ยนแปลงสีค่อนข้างน้อย ความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกและร้อยละต้นข้าวลดลงเมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น ในขณะที่อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น ทำให้ความชื้นของข้าวเปลือกนั้นลดลง แต่จะส่งผลทำให้ปริมาณร้อยละต้นข้าวลดลงไปด้วย ในส่วนการเปลี่ยนแปลงสีของข้าวหลังจากผ่านกระบวนการอบแห้งนั้นพบว่ามีค่าน้อยเนื่องจากการใช้เวลาในการอบแห้งสั้นเมื่อเทียบกับการอบแห้งแบบอื่น

ต่อมา Swasdisevi et al. [15] ได้ทำการทดลองกับข้าวเปลือกเช่นเดียวกัน โดยมีปัจจัยที่ทำการศึกษา คือ อากาศร้อนที่อุณหภูมิ (130, 150, 170, 190 ºC) และการใช้ไอน้ำยิ่งยวดที่อุณหภูมิ (130, 150, 170, 190 ºC) ทดสอบที่ 1 และ 2 รอบ อัตราการป้อนข้าวเปลือก 90 $kg_{dry\ solid}$/h พบว่าสำหรับอากาศร้อนอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุด 377.2 kg_{water}/m^3h และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรสูงสุด 8634.8 W/m^3K สำหรับไอน้ำอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุด 351.6 kg_{water}/m^3h และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรสูงสุด 10120 W/m^3K ที่การทดลอง 1 รอบ และสรุปได้ว่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ การใช้ไอน้ำยิ่งยวดค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำกว่าการใช้อากาศร้อน ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะรวมของเครื่องอบแห้งต่ำสุดเท่ากับ 3.7 MJ/kg_{water} จากการใช้ไอน้ำยิ่งยวดอุณหภูมิ 190 ºC

สำหรับการอบแห้งที่ใช้ข้าวนึ่งเป็นวัสดุอบแห้งนั้นได้มีการศึกษาโดย Kumklam et al. [16] มีปัจจัยที่ทำการศึกษาคือ อากาศร้อนที่อุณหภูมิ 80, 150, 170 และ 190 ºC ตามลำดับ ระยะการชน 5 และ 13 cm ทำการอบแห้ง 17 รอบ ความเร็วลม 10, 15, 20 และ 25 m/s ตามลำดับ อัตราการป้อนข้าวเปลือก 80, 110 และ 160 $kg_{dry\ solid}$/h ตามลำดับ จากผลการทดลองแนะนำให้ใช้ความเร็วลม 15 เมตร/วินาที และอุณหภูมิ 190 ºC สำหรับการอบแห้งข้าวเปลือกนึ่ง ด้วยเงื่อนไขดังกล่าวการใช้พลังงานทั้งหมดประมาณ 8.5 MJ/kg สำหรับอัตราป้อนข้าวเปลือก 160 $kg_{dry\ solid}$/h

นอกจากนี้การอบแห้งแบบกระแสชนได้นำไปลดความชื้นของถ่านหินโดย Słowik, and Stec [17] โดยมีอัตราป้อนถ่านหิน 50–120 kg/h ถ่านหินมีความชื้น 4–18% (w.b.) ที่อุณหภูมิ 500 ºC พบว่าสามารถลดความชื้นสูงสุดได้ 32.4 % อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุด 230.5 kg_{water}/m^3h และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรสูงสุด 2420 W/m^3K



1) ถ่านหินเปียกป้อนแบบสกรู 2) อบแห้งถ่านหินแบบกระแสชน
3) ไซโคลน 4) กรองอนุภาคถ่านหิน
5) พัดลมแก๊สเผาไหม้ 6) ปล่องแก๊ส
7) ห้องเผาไหม้ 8) ถ่านหินแห้ง

รูปที่ 12 แผนผังการทำงานของโรงอบแห้งนำร่อง

3. สรุปผลการศึกษา

จากการที่ได้ทำการศึกษางานวิจัยของแต่ละท่านพบว่าได้มีการใช้แบบจำลองในการศึกษาถึงตัวแปรต่าง ๆ ในการอบแห้ง รวมถึงพฤติกรรมของวัสดุในช่วงเวลาต่าง ๆ และการอบแห้งจากเครื่องอบแห้งแบบกระแสชนนี้ทำให้พบว่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของอากาศ และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอัตราการป้อนวัสดุ [18] โดยที่ 2 ตัวแปรนี้เป็นตัวแปรสำคัญในการอบแห้ง และการศึกษางานวิจัยมาในข้างต้นควรจะคำนึงถึงคุณภาพของวัสดุที่ได้จากการอบแห้งด้วย เนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะส่งผลให้เกิดความเค้นขึ้นภายในเมล็ด ความเค้นที่สูงนี้จะส่งผลให้เกิดการแตกร้าวเมื่อนำไปขัดสีเมล็ดข้าวจึงเกิดการแตกหัก ส่งผลให้ปริมาณต้นข้าวเต็มเมล็ดมีค่าลดลง [14]

4. เอกสารอ้างอิง

[1] T. Kudra, and A. S. Mujumdar, *Advanced Drying Technologies.* New York: Marcel Dekker, Inc., 2002.

[2] P. Khomwachirakul, S. Devahastin, T. Swasdisevi and S. Soponronnarit. “Simulation of flow and drying characteristics of high-moisture particles in an impinging stream dryer via CFD-DEM,” *Drying Technol.*, vol. 34, pp. 403-419, 2016.

[3] P. Khomwachirakul, S. Devahastin, T. Swasdisevi and S. Soponronnarit, “CFD-DEM simulation of parboiled paddy drying in an impinging stream dryer” in *The 18th TSAE National Conference and the 10th TSAE International Conference*., 2017

[4] C. Li, S. Yue and M. Li, “Numerical simulation of the drying characteristics of a high-moisture particle in a dynamic

asymmetric impinging stream reactor," *Chemical Papers.*, vol. 76, pp. 41-56, 2021.

[5] K. Iamyaem and A. Kundkun, "The study of variables that affect the movement of particle in impinging stream dryer," Senior project Dept. Mech. Eng., Srinakharinwirot Univ., Thailand, 2019.

[6] K. Sathapornprasath, S. Devahastin and S. Soponronnarit, "Performance evaluation of an impinging stream dryer for particulate materials," *Drying Technology,* vol. 25, pp. 1121-1128, 2007.

[7] P. Jantaka, C. Nimmol and S. Devahastin, "Use of an impinging stream dryer for agricultural waste: A case study with soy residue," in *The 22nd Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand,* 2008.

[8] K. Choicharoen, S. Devahastin, and S. Soponronnarit, "Comparative evaluation of performance and energy consumption of hot air and superheated steam impinging stream dryers for high-moisture particulate materials," *Applied Thermal Engineering*, vol. 31, pp. 3444-3452, 2011.

[9] C. Nimmol, A. Hirunwat and K. Sathapornprasath, "Performance and energy efficiency of an impinging stream Dryer for Okara" *Engineering Journal Chiang Mai University*, vol. 24, pp.45-59, 2017.

[10] K. Choicharoen, S. Devahastin, and S. Soponronnarit, "Performance and Energy Consumption of an Impinging Stream Dryer for High-Moisture Particulate Materials," *Drying Technology*, vol. 28, pp. 20-29, 2009.

[11] T. Pattachari and K. Sathapornprasath, "Performance study of an impinging stream dryer for agricultural product," in *The 23rd Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand,* 2009.

[12] C. Nimmol and S. Devahastin, "Evaluation of performance and energy consumption of an impinging stream dryer for paddy," *Applied Thermal Engineering*, vol. 30, pp. 2204-2212, 2010.

[13] C. Nimmol, K. Sathapornprasath and S. Devahastin, "Drying of High-Moisture Paddy Using a Combined Impinging Stream and Pneumatic Drying System," *Drying Technology*, vol. 30, pp. 1854-1862, 2012.

[14] S. Thanasookprasert, T. Swasdisevi, S. Devahastin and S. Soponronnarit, " Dehydration of Unhusked Rice by using Impinging Stream Dryer" *Journal of Science and Technology,* vol. 1, no. 2, pp. 1-10, 2012

[15] T. Swasdisevi, S. Devahastin, S. Thanasookprasert and S. Soponronnarit, "Comparative Evaluation of Hot-Air and Superheated-Steam Impinging Stream Drying as Novel Alternatives for Paddy Drying," *Drying Technology*, vol. 31, pp. 717-725, 2013.

[16] P. Kumklam, S.Prachayawarakorn, S. Devahastin and S. Soponronnarit, "Effects of operating parameters of impinging stream dryer on parboiled rice quality and energy consumption" *Drying Technology,* vol. 38, pp. 634-645, 2019.

[17] A. C. K. Słowik and M. Stec, "Experimental Investigations of a pilot scale coal impinging

stream dryer," *International Journal of Coal Preparation and Utilization.*, vol. 40, no. 9, pp. 604-617, 2017.

[18] Y. Kitron and A. Tamir, "Characteristics and scale-up of coaxial impinging streams gas-solid contractors," *Drying Technology*, vol. 8, pp. 781-810, 1990.

Srinakharinwirot University Engineering Journal (2023) 19(1), 52-65 วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีที่ 19 ฉบับที่ 1 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2566 – มีนาคม พ.ศ. 2567

การออกแบบและพัฒนาเครื่องสีข้าวกล้องพลังงานแสงอาทิตย์

Design and Development of Solar Powered Brown Rice Milling Machine

ปวริศร กล้วยอ่อน* รุ่งเรือง กาลศิริศิลป์ จตุรงค์ ลังกาพินธุ์
ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110
Pawarit Kluay-on* Roongruang Kalsirisilp Jaturong Langapin
Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi (RMUTT), Pathumthani, 12110
*Corresponding author Email: pawarit_k@mail.rmutt.ac.th
(Received: May 29, 2023; Revised: August 29, 2023 ; Accepted: September 28, 2023)

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้มีวัตุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาเครื่องสีข้าวกล้องพลังงานแสงอาทิตย์ เครื่องสีข้าวกล้องพลังงานแสงอาทิตย์ประกอบด้วยโครสร้างหลัก 5 ส่วน 1.แผงโซล่าเซลล์ 2.แบตเตอรี่ 3.ชุดอินเวอร์เตอร์ 4.ชาร์จเจอร์ 5. เครื่องสีข้าวกล้องแบบ 5 ลูกยาง ศึกษาความเร็วรอบมอเตอร์ที่ 1,300, 1,400 และ 1,500 รอบต่อนาที ระยะห่างระหว่างลูกยางที่ใช้ในการทดสอบ 0.8, 0.9 และ 1.0 มิลลิเมตร พันธ์ข้าวเปลือกที่ใช้ในการทดสอบจำนวน 3 สายพันธุ์ ได้แก่ หอมมะลิ ข้าวหอมปทุม และข้าวหอมพวง การทดสอบจะควบคุมความชื้นของข้าวเปลือกอยู่ในช่วงระหว่าง 13-15 เปอร์เซ็นต์ (ความชื้นฐานเปียก) โดยมีค่าชี้ผลในการศึกษา ได้แก่ ความสามารถในการกะเทาะข้าวเปลือก เปอร์เซ็นต์ข้าวหัก และดัชนีการกะเทาะ โดยทดสอบตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 888 -2532 ผลการทดสอบเครื่องสีข้าวสายพันธุ์หอมมะลิ พบว่า ความเร็วรอบมอเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการสีข้าวกล้องเท่ากับ 1,400 รอบต่อนาที ระยะห่างระหว่างลูกยางที่เหมาะสม 0.9 มิลลิเมตร ความสามารถในการกะเทาะข้าวเปลือก 17.25 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เปอร์เซ็นต์ข้าวแตกหัก 0.46 เปอร์เซ็นต์ และดัชนีการกะเทาะ 96.85 เปอร์เซ็นต์ สำหรับข้าวเปลือกสายพันธุ์หอมพวง และ หอมปทุม พบว่าความเร็วรอบมอเตอร์ที่เหมาะสมในการกะเทาะเท่ากับ 1,500 รอบต่อนาทีและระยะห่างระหว่างลูกยางที่เหมาะสม 0.9 มิลลิเมตร มีค่าความสามารถในการกะเทาะข้าวเปลือกเท่ากับ 21.51 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และ 19.18 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ตามลำดับ มีค่าดัชนีการกะเทาะเท่ากับ 96.87 และ 96.87 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายทางเศรษฐศาสตร์ พบว่าเมื่อใช้เครื่องสีข้าวกล้อง 2,400 ชั่วโมงต่อปี มีค่าใช้จ่ายในการทำงาน 1.68 บาทต่อกิโลกรัม จุดคุ้มทุนในการทำงาน 337 ชั่วโมงต่อปี มีระยะเวลาในการคืนทุน 0.62 ปี

คำสำคัญ: เครื่องสีข้าวกล้องแบบ 5 ลูกยาง พลังงานแสงอาทิตย์ ดัชนีการกะเทาะ

ABSTRACT

This research project aims to design and develop a solar powered brown rice milling machine. Solar powered brown rice milling machine consists of five main structures: 1. solar panel 2. battery 3. inverter set 4. charger 5. brown rice milling machine with five rubber rolls. The motor speeds were set

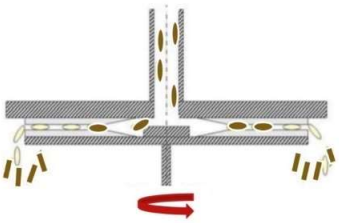
to 1,300, 1,400, and 1,500 rpm. The clearance between the cylinders was set at 0.8, 0.9, and 1.0 mm. Three varieties of paddy namely Thai jasmine rice, Pathum Thani rice and jasmine 85 rice. The moisture content of paddy in the range between 13-15 percent (wet basis) was used in this study. The performance parameters investigated were machine capacity, percentage of broken rice and husking index. The research study was conducted based on Thai Industrial Standards 888-2532. The machine performance test for Thai jasmine rice revealed that the optimum speed and clearance between cylinders were 1,400 rpm and 0.9 mm, respectively. The machine capacity was 17.25 kg of rice per hour. The broken rice was 0.46%, respectively. The machine husking index was determined to be 96.85%. For Pathum Thani and jasmine 85 rice, the optimum revolution speed of motor and clearance between cylinders were 1,500 rpm and 0.9 mm, respectively. The machine capacity was 25.01 and 21.51 kg of rice per hour for Pathum Thani and jasmine 85 rice, respectively. The machine husking index was determined to be 96.87 and 96.87%, respectively. Based on the analysis of engineering economics, it was found that the rice milling machine worked 2,400 hours per year, with an average cost of 1.68 baht per kilogram. The break-even point of the machine was 337 hours per year with a payback period of 0.62 years.

Keyword: Brown rice milling machine with 5 rubber rolls, solar powered, husking index.

1. บทนำ

เครื่องจักรในการสีข้าว ได้รับการออกแบบให้สามารถกะเทาะข้าวเปลือก คัดแยกแกลบ ตลอดจนขบวนการขัดสีข้าวเปลือก ทำให้ได้ข้าวกล้องหรือข้าวสารที่สะอาด เหมาะสำหรับการบริโภค ปัจจุบันเกษตรกรรายย่อยในประเทศไทยนิยมใช้เครื่องสีข้าวขนาดเล็ก ในการสีข้าวเปลือกเพื่อการบริโภคในครัวเรือนหรือทำธุรกิจในครัวเรือน ซึ่งก่อให้เกิดรายได้และเกษตรกรมีความเป็นอยู่ที่ดีขึ้น ขั้นตอนการกะเทาะนับเป็นหัวใจหลักของเครื่องสีข้าวกล้อง สามารถจำแนกได้ดังนี้ 1. การกะเทาะด้วยเพลาเหล็ก ใช้งานง่ายแต่เปอร์เซ็นต์การแตกหักสูง (รูปที่ 1) 2. การกะเทาะด้วยหินขัด ใช้หลักการเสียดสีของหินขัดทำให้เปลือกหลุดออก (รูปที่ 2) และ 3. การกะเทาะด้วยลูกยาง วิธีการกะเทาะแบบนี้จะมีประสิทธิภาพในการกะเทาะดีที่สุด เปอร์เซ็นต์ข้าวแตกหักต่ำ [1] (รูปที่3) เครื่องสีข้าวขนาดเล็กที่นิยมใช้ในประเทศไทย ได้แก่เครื่องสีข้าวแบบลูกยางกะเทาะ ประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 5 ส่วน ได้แก่ 1) โครงเครื่อง 2) ชุดป้อนข้าวเปลือก 3) ชุดลูกยางกะเทาะข้าวเปลือก 4) ชุดแยกแกลบ และ 5) ชุดมอเตอร์ต้นกำลัง ลูกยางกะเทาะจะมีขนาดความโตของเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน ความเร็วรอบของลูกยางกะเทาะจะต่างกันประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ หมุนในทิศทางตรงข้ามกัน ซึ่งจะดึงเมล็ดข้าวเปลือกลงมาด้านล่างตามการหมุนของลูกยางกะเทาะ และเกิดแรงเฉือนที่เมล็ดข้าวเปลือกทำให้เปลือกหลุดออกจากเมล็ดข้าว [1]

รูปที่ 1 เครื่องกะเทาะข้าวเปลือกแบบเพลาเหล็ก



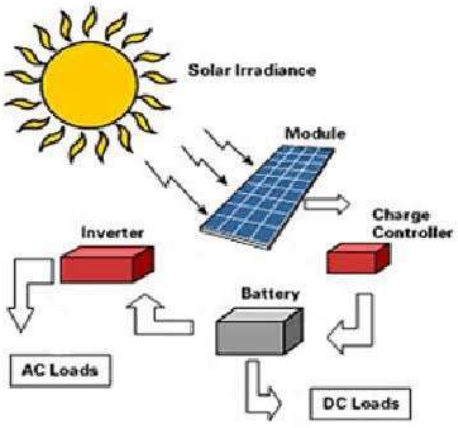
รูปที่ 2 การกะเทาะข้าวเปลือกแบบหินขัด

รูปที่ 3 การกะเทาะข้าวเปลือกแบบลูกยาง

สำหรับขั้นตอนการกะเทาะข้าวเปลือก เป็นขั้นตอนที่สำคัญมาก เนื่องจากเป็นขั้นตอนแรกของกระบวนการสีข้าว ซึ่งจะส่งผลถึงเปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดที่ได้รับ ในการกะเทาะข้าวเปลือกเป็นเวลานานจะทำให้อุณหภูมิของลูกยางกะเทาะสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลให้ข้าวเปลือกที่อยู่ระหว่างลูกยางทั้งสองมีอุณหภูมิสูงขึ้น เกิดการแตกหักได้ง่าย และสภาพของลูกยางกะเทาะ เมื่อใช้งานเป็นเวลานาน จะทำให้ขนาดของลูกยางกะเทาะเล็กลง และขาดการปรับตั้งที่เหมาะสมทำให้ประสิทธิภาพการสีข้าวลดลงได้ ความเร็วรอบของลูกยางกะเทาะมีผลต่อการทำงานของ เครื่องสีข้าว เมื่อลดความเร็วรอบของลูกยางกะเทาะจะทำ ให้อัตราการกะเทาะและปริมาณแกลบที่ได้ลดลง แต่จะได้ปริมาณต้นข้าวเพิ่มมากขึ้น ความชื้นของข้าวเปลือกก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อคุณภาพของข้าวกล้องหรือข้าวขาวที่ได้จากการสี ซึ่งโดยทั่วไปควรทำการสีเมื่อข้าวเปลือก มีค่าความชื้นอยู่ระหว่าง 13-15 เปอร์เซ็นต์ [2] ทักษะของผู้ควบคุมเครื่องสีข้าวก็เป็นปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการสีข้าวเปลือก [3] [4] ลักษณะรูปร่างของข้าวเปลือก หรืออัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้างของข้าวเปลือกมีผลต่อคุณภาพของข้าวกล้องหรือข้าวขาวที่ได้จากการสี โดยข้าวเปลือกที่มีลักษณะเรียวยาว (Long slender) จะมีเปอร์เซ็นต์การแตกหักสูงกว่าข้าวเปลือกที่มีลักษณะสั้น ซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพและประสิทธิผลการสีข้าว ระยะห่างระหว่างลูกยางกะเทาะเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อสมรรถนะการสีข้าว ระยะห่างระหว่างลูกยางที่มากขึ้น ทำให้เปอร์เซ็นต์การแตกหักของข้าวลดลงและมีเปอร์เซ็นต์ของต้นข้าว (Percent Brown Rice) และดัชนีการกะเทาะ (Husking Index) สูงขึ้น กล่าวโดยสรุปได้ว่า คุณภาพการสีข้าวขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 ด้านได้แก่ ปัจจัยด้านวิศวกรรม (Engineering Factor) และ ปัจจัยด้านพันธุ์ข้าว (Variety Factor) โดยปัจจัยด้านวิศวกรรมได้แก่ กระบวนการเก็บเกี่ยว การลดความชื้นข้าวเปลือก การเก็บรักษา และขั้นตอนการสีข้าวเปลือก ส่วนปัจจัยด้านพันธุ์ข้าว ได้แก่ ลักษณะทางกายภาพ และสมบัติเชิงกลของข้าวเปลือก การทดสอบเครื่องสีข้าวขนาดเล็ก สำหรับพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ และพันธุ์ข้าวสันป่าตอง1 ได้เปอร์เซ็นต์ ข้าวดีร้อยละ 80, 85% อัตราการสีข้าว 32, 35 กิโลกรัม/วัน ตามลำดับ ที่ความเร็วรอบ 1,440 รอบต่อนาที [5] ประสิทธิภาพของการสีข้าวอยู่ระหว่าง 65 ถึง 93 เปอร์เซ็นต์ ประสิทธิผลของการสีข้าวอยู่ระหว่าง 50 ถึง 71 เปอร์เซ็นต์ ร้อยละข้าวเต็มเมล็ดอยู่ระหว่าง 54 ถึง 81 เปอร์เซ็นต์ [6]

ประเทศไทยใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นทุกปี ตามการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคม แต่แหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้าภายในประเทศลดน้อยลงและกำลังจะหมดไป การใช้โซล่าเซลล์ผลิตพลังงานไฟฟ้าเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง ที่มีความเหมาะกับตำแหน่งพื้นที่ของประเทศ ประกอบกับคุณสมบัติของโซล่าเซลล์ การใช้และบำรุงรักษาง่ายอายุการใช้งานยาวนาน ขนาดเล็ก ปัจจุบันราคาถูกลงที่สำคัญ เป็นพลังงานสะอาดช่วยลดโลกร้อน ดังนั้นหากเกษตรกรมีเครื่องสีข้าวที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นของตัวเองจะทำให้ เกษตรกรลดต้นทุนและประหยัดพลังงานไฟฟ้า ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อประเมิน

สมรรถนะของเครื่องสีข้าวพลังงานแสงอาทิตย์นี้โดยใช้พลังงานจากโซล่าเซลล์ ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แผนภาพระบบโซล่าเซลล์ [7]

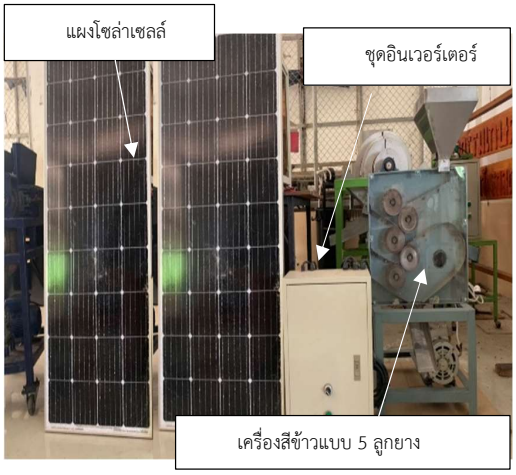
2. วิธีการดำเนินงาน

2.1 การออกแบบและพัฒนาเครื่องต้นแบบ

จากการศึกษาข้อมูลที่สำคัญและเกี่ยวข้องกับการออกแบบเครื่องแล้วจึงได้ดำเนินการ ออกแบบเครื่องสีข้าวพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งเกณฑ์และรายละเอียดในการออกแบบเครื่อง มีข้อกำหนดที่สำคัญ ดังต่อไปนี้ ใช้ระบบกะเทาะแบบ 5 ลูกยาง กลไกการทำงานของเครื่อง ทำงานง่าย ไม่ซับซ้อนมากเกินไป ใช้โซล่าเซลล์เป็นต้นกำลัง บำรุงรักษาง่าย สามารถปฏิบัติงานได้สะดวกและปลอดภัย ใช้ผู้ปฏิบัติงาน 1 คน สร้างจากวัสดุที่มีจำหน่ายในประเทศ อุปกรณ์ชิ้นส่วนมาตรฐานต่างๆ หากเกิดการชำรุดสามารถถอดเปลี่ยนได้ง่าย และมีจำหน่ายทั่วไปตามท้องตลาด

2.1.1 โครงสร้างเครื่อง

เครื่องสีข้าวกล้องพลังงานแสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นจะทำงานอาศัยพลังงานจากแสงอาทิตย์โดยรับแสงเข้าแผงโซล่าเซลล์จากแผงโซล่าเซลล์เข้ามาเก็บในแบตเตอรี่ จากแบตเตอรี่จะส่งไปยังอินเวอร์เตอร์จากนั้นอินเวอร์เตอร์จะส่งพลังงานไฟฟ้าไปยังมอเตอร์ ทำการใส่เมล็ดข้าวเปลือกลงไปในช่องป้อน และกลไกชุดลูกยางกะเทาะจะทำการสีข้าว ดังรูปที่ 5

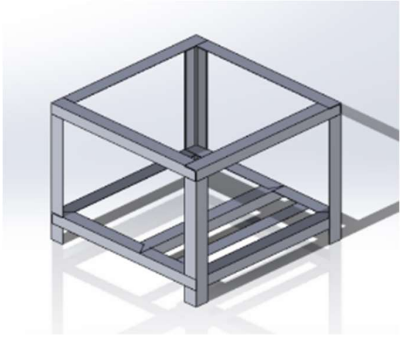


รูปที่ 5 เครื่องสีข้าวพลังงานแสงอาทิตย์

เครื่องสีข้าวพลังงานแสงอาทิตย์ ที่ได้ออกแบบให้มีเครื่องสีข้าวพลังงานแสงอาทิตย์ ประกอบด้วยโครงสร้างหลักได้แก่ 1.โครงเครื่อง 2.ชุดป้อนข้าวเปลือก 3.ชุดลูกยางกะเทาะข้าวเปลือก 4.ชุดส่งกำลัง 5.ชุดโซล่าเซลล์ มีรายละเอียดในการออกแบบดังนี้

2.1.2 โครงเครื่อง

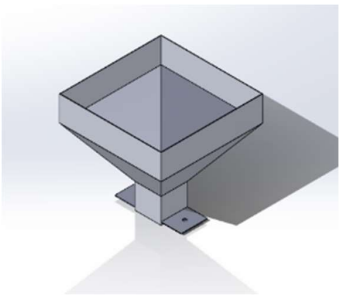
โครงเครื่องทำจากเหล็กฉากหน้าตัด 4 เซนติเมตร x 4 เซนติเมตร นำมาตัดประกอบเชื่อม ให้มีขนาดความกว้าง x ความยาว x ความสูง เท่ากับ 40 เซนติเมตร 40 เซนติเมตร 50 เซนติเมตร มีหน้าที่เป็นโครงตัวยึดให้กับชุดต้นกำลัง ชุดลูกยางกะเทาะ และชุดป้อนเมล็ดข้าวเปลือก มีลักษณะดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 โครงเครื่อง

2.1.3 ชุดป้อนเมล็ดข้าวเปลือก

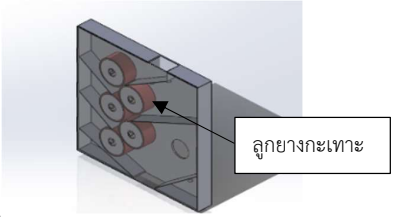
ชุดป้อนเมล็ดข้าวเปลือกทำจากเหล็กแผ่นหนา 1.5 มิลลิเมตร กว้าง 30 เซนติเมตร ยาว 30 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร โดยถังป้อนเมล็ดข้าวเปลือกจะมีหน้าที่ในการป้อนเมล็ดข้าวไม่ให้ไหลลงมากจนเกินไป ซึ่งออกแบบให้มีมุมลาดเอียงของชุดป้อนข้าวเปลือกมีมุม 65 องศา และมีความจุในการเทเมล็ดข้าวแต่ละครั้งได้ 5 กิโลกรัม ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 ชุดป้อนเมล็ดข้าวเปลือก

2.1.4 ชุดลูกยางกะเทาะข้าวเปลือก

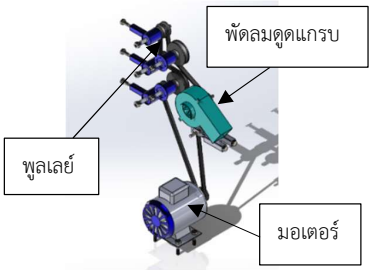
ชุดลูกยางกะเทาะข้าวเปลือกมีหน้าที่สำหรับกะเทาะข้าวเปลือก ส่วนมากทำจากยางพารา โดยใช้ลักษณะการเสียดสี กะเทาะให้แกลบหลุดจากตัวเมล็ดข้าว โดยมี ลูกยาง 2 ลูกหมุนด้วยความเร็วไม่เท่ากัน ทำหน้าที่ฉีกเปลือกของเมล็ดข้าวแยกออกจากแกลบ ลูกยางกะเทาะจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4x6 นิ้ว ระยะห่างระหว่างลูกยางกะเทาะสามารถปรับได้ในช่วง 0.8 ถึง 1.0 มิลลิเมตร จำนวนลูกยางกะเทาะออกแบบให้มีจำนวนลูกกะเทาะ 5 ลูก ดังรูปที่ 8 ซึ่งเครื่องสีข้าวเปลือกโดยทั่วไปที่มีขายตามท้องตลาดจะมีจำนวนลูกยางกะเทาะ 2 ถึง 3 ลูก ข้อดีคือสามารถสีข้าวเปลือกเพียงครั้งเดียวจะได้ข้าวกล้องเกือบทั้งหมด มีข้าวเปลือกที่ไม่ผ่านการกะเทาะน้อยมาก ขณะที่เครื่องสีข้าวกล้องแบบ 2 หรือ 3 ลูกยางจะต้องสีข้าวอย่างน้อย 2 ถึง 3 ครั้ง จึงจะสามารถกะเทาะเปลือกได้หมด ดังนั้นจึงทำให้เกษตรกรมีเวลาสำหรับการทำกิจกรรมอื่นๆ เพื่อเสริมรายได้ของครอบครัว



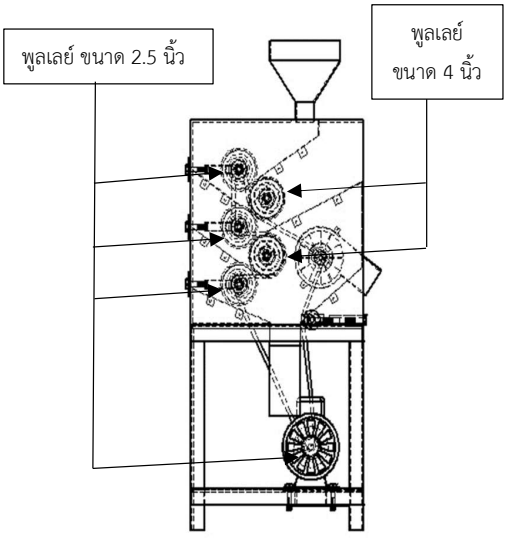
รูปที่ 8 ชุดลูกยางกะเทาะข้าวเปลือก

2.1.5 ชุดส่งกำลัง

ชุดระบบส่งและถ่ายทอดกำลังใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 1 HP เป็นต้นกำลังเพื่อถ่ายทอดกำลังไปยังพูลเลย์ และลูกยางกะเทาะ เพื่อขับให้ลูกยางกะเทาะหมุนฉีกเปลือกของเมล็ดออก ชุดส่งกำลัง มีลักษณะตามรูปที่ 9-10



รูปที่ 10 ชุดส่งกำลัง



รูปที่ 9 ภาพด้านหน้าของระบบการส่งถ่ายกำลังของชุดลูกยางกะเทาะ

2.1.6 ชุดโซลล่าเซลล์

ชุดโซลล่าเซลล์ประกอบด้วยแผงโซลล่าเซลล์ขนาด 450 วัตต์ จำนวน 2 แผง แปลงพลังงานแสงอาทิตย์จ่ายให้กับชาจเจอร์ เพื่อชาร์จแบตเตอร์รี่ ขนาด 100 แอมป์แปร์ 12 โวลต์ แบตเตอรี่ทำหน้าที่จ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับอินเวอร์เตอร์ขนาด 3,500 วัตต์ 12 โวลต์ เพื่อแปลงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ ดังรูปที่ 10-12

รูปที่ 11 ชุดอินเวอร์เตอร์

รูปที่ 12 แผงโซล่าเซลล์ขนาด 450 วัตต์ 12โวลต์

รูปที่ 13 แบตเตอร์รี่ขนาด 12 โวลต์
100 แอมป์แปร์

หลักการทำงานของเครื่องสีข้าวกล้องแบบ 5 ลูกยาง ที่สร้างขึ้นจะทำงานโดยอาศัยพลังงานไฟฟ้าจากโซล่าเซลล์ เมื่อมอเตอร์เริ่มทำงานจะทำให้ชุดส่งกำลังทำงานตามไปด้วย หลังจากนั้นชุดส่งกำลังจะทำการส่งกำลังให้กับชุดลูกยางเพื่อให้ชุดลูกยางนั้นทำงาน เมื่อชุดลูกยางกะเทาะเริ่มทำงานก็ทำการใส่เมล็ดข้าวเปลือกลงไปในช่องป้อน และกลไกชุดลูกยางกะเทาะจะเริ่มทำการสีข้าว ในขณะเดียวกันชุดพัดลมทำความสะอาด จะทำหน้าที่ดูดแกลบที่ได้จากการสีข้าวเปลือกไปยังชุดรวบรวมแกลบ

2.2 วิธีการทดสอบ

มีขั้นตอนและรายละเอียดการทดสอบดังนี้ พันธุ์ข้าวเปลือกที่ใช้ในการทดสอบได้แก่ พันธุ์หอมมะลิ พันธุ์ข้าวหอมพวง และพันธุ์ข้าวหอมปทุม ตรวจสอบเครื่องสีข้าวเปลือกให้อยู่ในสภาพพร้อมใช้งาน สุ่มวัดความชื้นข้าวเปลือก นำข้าวเปลือกจำนวน 1 กิโลกรัม ใส่ไปยังชุดป้อนข้าวเปลือก ความเร็วรอบของมอเตอร์ ที่ศึกษาได้แก่ 1,300, 1,400 และ 1,500 รอบต่อนาที ซึ่งที่ความเร็วรอบดังกล่าวจะมีความเร็วเชิงเส้นของลูกยางกะเทาะที่ 8.64, 9.31 และ 9.97 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ ระยะห่างระหว่างลูกยางที่ใช้ในการทดสอบ 0.8, 0.9 และ 1.0 มิลลิเมตร ในแต่ละการทดสอบทำซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อวิเคราะห์ผลทางสถิติ ตามแผนการทดลองแบบ 3x3x3 factorial experiments in CRD มีค่าชี้ผลในการศึกษาได้แก่ อัตราการกะเทาะ เปอร์เซ็นต์ข้าวหัก ดัชนีการกะเทาะ ประสิทธิภาพและประสิทธิผลการสีข้าว โดยทดสอบตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมตาม มอก.888-2532 [8]

2.2.1 อัตราการกะเทาะ

หาได้จากน้ำหนักข้าวกล้องที่ผ่านการกะเทาะหารด้วยเวลาที่ใช้ในการกะเทาะด้วยสมการที่ (1)

$$TR = \frac{W_{BR}}{T \times 1000} \quad (1)$$

เมื่อ

TR = อัตราการกะเทาะ (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)

W_{BR} = น้ำหนักข้าวกล้อง (กรัม)

T = เวลาที่ใช้ในการกะเทาะ (ชั่วโมง)

2.2.2 ประสิทธิภาพการสีข้าว

หาได้จากน้ำหนักของข้าวกล้องที่กะเทาะได้หารด้วยน้ำหนักของข้าวเปลือกที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังสมการที่ (2)

$$PTR = \frac{W_{BR}}{W_1} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ

PTR = ประสิทธิภาพการสีข้าว (เปอร์เซ็นต์)

W_{BR} = น้ำหนักข้าวกล้อง (กรัม)

W_1 = น้ำหนักข้าวเปลือกที่ทดสอบ (กรัม)

2.2.3 ประสิทธิผลการสีข้าว

หาได้จากน้ำหนักของข้าวกล้องเต็มเมล็ดหารด้วยน้ำหนักของข้าวกล้องที่ได้จากการกะเทาะที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังสมการที่ (3)

$$PTE = \frac{W_{HBR}}{W_{BR}} \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ

PTE = ประสิทธิผลการสีข้าว (เปอร์เซ็นต์)

W_{BR} = น้ำหนักข้าวกล้อง (กรัม)

W_{HBR} = น้ำหนักข้าวกล้องเต็มเมล็ด (กรัม)

2.2.4 ดัชนีการกะเทาะ เป็นค่าที่สำคัญในการประเมินสมรรถนะของเครื่องสีข้าว คำนวณได้จากสมการ (4)

$$HI = 100 \times (1 - \frac{W_{US}}{W_1}) \times \frac{W_{HBR}}{(W_1 - W_{US} - W_H)} \quad (4)$$

เมื่อ

HI = ดัชนีการกะเทาะ (เปอร์เซ็นต์)

W_1 = น้ำหนักข้าวเปลือกที่ทดสอบ (กรัม)

W_{US} = น้ำหนักข้าวเปลือกที่ไม่ผ่านการสี (กรัม)

W_{HBR} = น้ำหนักข้าวกล้องเต็มเมล็ด (กรัม)

W_H = น้ำหนักของแกลบ (กรัม)

2.2.5 เปอร์เซ็นต์ข้าวหัก [9]

คำนวณได้จากสมการที่ 5

$$Br = 100 \times \frac{W_{BE}}{(W_{HBR} + W_{BE})} \quad (5)$$

เมื่อ

Br = เปอร์เซ็นต์ข้าวหัก (เปอร์เซ็นต์)

W_{HBR} = น้ำหนักข้าวกล้องเต็มเมล็ด (กรัม)

W_{BE} = น้ำหนักข้าวกล้องที่แตกหัก (กรัม)

2.2.7 วิเคราะห์ค่าใช้จ่ายทางเศรษฐศาสตร์

วัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการทำงาน จุดคุ้มทุน และวิเคราะห์หาระยะเวลาในการคืนทุนของเครื่อง วิธีการประเมินค่าใช้จ่ายโดยรวม ในการใช้งานเครื่องโดยพิจารณาจาก เกษตรกรซื้อเครื่องแทนวิธีการใช้แรงงานคน ซึ่งค่าใช้จ่ายโดยรวมจะประกอบด้วยต้นทุนคงที่และต้นทุนผันแปร โดยต้นทุนคงที่ได้แก่ ค่าเสื่อมราคาของเครื่อง (คิดค่าเสื่อมราคาโดยวิธีเส้นตรงเมื่อประมาณอายุการใช้งานของเครื่องสีข้าวพลังงานแสงอาทิตย์เท่ากับ 5 ปี) และค่าเสียโอกาสของเงินทุน (คิดอัตราดอกเบี้ย 10 เปอร์เซ็นต์) ซึ่งค่าใช้จ่ายที่เป็นต้นทุนคงที่จะไม่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณของการใช้งานของเครื่องสีข้าวพลังงานแสงอาทิตย์ อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์จะไม่คิดต้นทุนคงที่เกี่ยวกับค่าประกันภัย ค่าภาษี ค่าโรงเรือน และค่าจ้างขนย้ายเครื่องสีข้าวพลังงานแสงอาทิตย์ ไปทำงานตามสถานที่ ต่าง ๆ เป็นต้น สำหรับต้นทุนผันแปรซึ่งเป็นต้นทุนที่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณของการทำงาน ได้แก่ ค่าจ้างแรงงานคนเพื่อทำงานร่วมกับเครื่อง ค่าบำรุงรักษาและค่าซ่อมแซม เป็นต้น

1. ค่าเสื่อมราคา คำนวณได้จากสมการที่ 6 [10]

$$D = (\frac{P-S}{L}) \quad (7)$$

เมื่อ

D = ค่าเสื่อมราคา (บาทต่อปี)

P = ราคาเครื่องจักร (บาท)
S = มูลค่าซาก (บาท)
L = อายุการใช้งาน (ปี)

2. ค่าดอกเบี้ย หรือค่าเสียโอกาสในการลงทุน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 7 [10]

$$I = \frac{(P+S)}{2} \times i \quad (8)$$

เมื่อ
I = ค่าดอกเบี้ย (บาทต่อปี)
i = อัตราดอกเบี้ยทศนิยม

3. ระยะเวลาในการคืนทุน

เป็นการคำนวณหาระยะเวลาคืนทุนของเครื่องจักรว่ามีระยะเวลานานเท่าไรเมื่อลงทุนในเครื่องจักรไปแล้ว จะได้รับผลตอบแทนกลับคืนมาในจำนวนเงินเท่ากับที่ลงทุนไปแล้วภายในระยะเวลากี่ปี คำนวณได้จากสมการที่ 8 [11]

$$PBP = \frac{P}{R} \quad (9)$$

เมื่อ
PBP = ระยะเวลาในการคืนทุน (ปี)
p = ราคาเครื่องจักร (ปี)
R = กำไรสุทธิต่อปี (บาทต่อปี)

4. จุดคุ้มทุน

จุดคุ้มทุนในการทำงานของเครื่องคือจุดที่รายได้และรายจ่ายจากการใช้เครื่องมีค่าเท่ากัน หรือจุดที่ไม่ก่อให้เกิดผลกำไร คำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่างผลรวมของค่าใช้จ่ายคงที่กับผลต่างระหว่างอัตราการรับจ้างและค่าใช้จ่ายผันแปร ดังสมการที่ 9 [10]

$$PBP = \frac{F_C}{B-VC} \quad (10)$$

เมื่อ
BEP = จุดคุ้มทุน (ชั่วโมงต่อปี)
F_C = ค่าใช้จ่ายคงที่ (บาทต่อปี)
B = อัตราการรับจ้าง (บาทต่อปี)
VC = ค่าใช้จ่ายผันแปร (บาทต่อชั่วโมง)

5. ค่าใช้จ่ายรวมของเครื่อง

ค่าใช้จ่ายรวมของเครื่องสีข้าวพลังงานแสงอาทิตย์ ได้แก่ผลรวมของค่าใช้จ่ายคงที่และค่าใช้จ่ายผันแปร คำนวณได้จากสมการที่ 10 [10]

$$TC = \frac{F_C}{X} + VC \quad (11)$$

เมื่อ
TC = ค่าใช้จ่ายรวมของเครื่อง (บาทต่อชั่วโมง)
F_C = ค่าใช้จ่ายคงที่ (บาทต่อปี)
X = ชั่วโมงการทำงานต่อปี (ชั่วโมง)
VC = ค่าใช้จ่ายผันแปร (บาทต่อชั่วโมง)

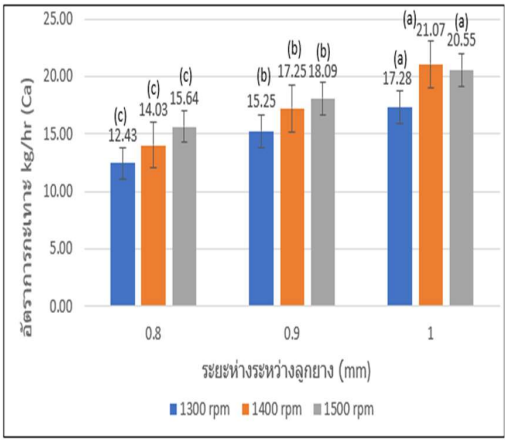
3. ผลการศึกษา

3.1 ความสามารถในการสีข้าว

สมรรถนะและประสิทธิภาพการสีข้าวกล้องหอมมะลิ ที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 1,300 1,400 และ 1,500 รอบต่อนาที และระยะห่างระหว่างลูกยางกะเทาะเท่ากับ 0.8 0.9 และ 1.0 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 14-18 ที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 1,300 รอบต่อนาที ความเร็วรอบของลูกยางกะเทาะรอบเร็วเท่ากับ 1,300 รอบต่อนาที ขณะที่ความเร็วรอบของลูกยางกะเทาะรอบช้าเท่ากับ 780 รอบต่อนาที จากรูปที่ 14-18 สรุปได้ว่าที่ความเร็วรอบลูกยางกะเทาะรอบเร็ว 1,400 รอบต่อนาที และความเร็วรอบลูกยางกะเทาะรอบช้าที่ 885 รอบต่อนาที ระยะห่างระหว่างลูกยางที่ 0.9 มิลลิเมตร จะให้อัตราการกะเทาะข้าวกล้องสูงสุดเท่ากับ 17.25 กิโลกรัมข้าวกล้องต่อชั่วโมง เปอร์เซ็นต์ข้าวแตกหัก 0.46 เปอร์เซ็นต์ ประสิทธิผลการกะเทาะ 86.69 เปอร์เซ็นต์ ประสิทธิภาพการกะเทาะ 87.09 เปอร์เซ็นต์ และดัชนีการกะเทาะ 96.85 เปอร์เซ็นต์ ประสิทธิภาพและดัชนีการกะเทาะข้าวกล้องที่ความเร็ว

รอบของลูกยางกะเทาะรอบเร็วเท่ากับ 1,300 รอบต่อนาที ความเร็วรอบของลูกยางกะเทาะรอบช้าเท่ากับ 780 รอบต่อนาที ระยะห่างระเหว่างลูกยางกะเทาะ 0.9 มิลลิเมตร มีค่าเท่ากับ 81.76 และ 97.02 เปอร์เซ็นต์ และมีเปอร์เซ็นต์ข้าวแตกหัก 0.49 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อเพิ่มความเร็วรอบลูกยางกะเทาะรอบเร็วเป็น 1,400 รอบต่อนาที ระยะห่างระเหว่างลูกยางกะเทาะ 0.8 มิลลิเมตร ความเร็วรอบของลูกยางกะเทาะรอบช้าเท่ากับ 840 รอบต่อนาที ประสิทธิภาพและดัชนีการกะเทาะข้าวกล้องมีค่าเท่ากับ 84.91 และ 97.72 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเพิ่มความเร็วรอบลูกยางกะเทาะรอบเร็วเป็น 1,500 รอบต่อนาที ระยะห่างระหว่างลูกยางกะเทาะ 0.8 มิลลิเมตร ความเร็วรอบของลูกยางกะเทาะรอบช้าเท่ากับ 885 รอบต่อนาที ประสิทธิภาพและดัชนีการกะเทาะข้าวกล้องมีค่าเท่ากับ 74.61 และ 97.74 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

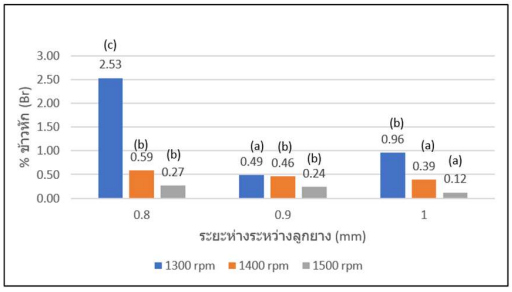
รูปที่ 14 อัตราการกะเทาะข้าวกล้องที่ความเร็วรอบ



และระยะห่างระหว่างลูกยางต่างกัน (ข้าวหอมมะลิ)

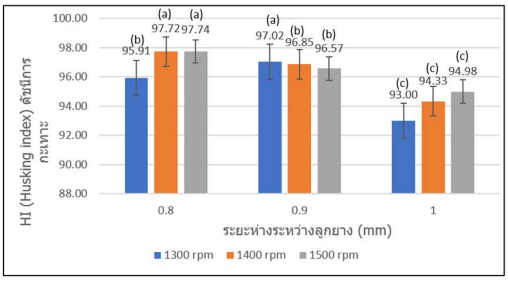
[abc]อักษรที่แตกต่างกันในแต่ละสภาวะทดสอบแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

จากข้อมูลการทดสอบ พบว่า ระยะห่างระหว่างลูกยางกะเทาะมีผลต่อเปอร์เซ็นต์การแตกหักของข้าวกล้อง ถ้าระยะห่างระหว่างลูกยางน้อยเกินไป (0.8 มิลลิเมตร) จะทำให้มีเปอร์เซ็นต์การแตกหักของข้าวสูงขึ้น ประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ ในขณะเดียวกันถ้าระยะห่างระหว่างลูกยางมากเกินไป (1.0 มิลลิเมตร) ค่าดัชนีการกะเทาะจะจะมีค่าลดลงตามไปด้วย ขณะที่ผลของความเร็วรอบของมอเตอร์ต่อ เปอร์เซ็นต์การแตกหักของข้าว พบว่า ความเร็วรอบของมอเตอร์ที่สูงมากเกินไป (มากกว่า 1,300 รอบต่อนาที) ทำให้เปอร์เซ็นต์การแตกหักของข้าวเพิ่มขึ้นถึง 100 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้น ความเร็วรอบและระยะห่างระหว่างลูกยางที่เหมาะสมสำหรับการสีข้าวกล้องหอมมะลิ 1,400 รอบต่อนาที และ 0.9 มิลลิเมตร ตามลำดับ



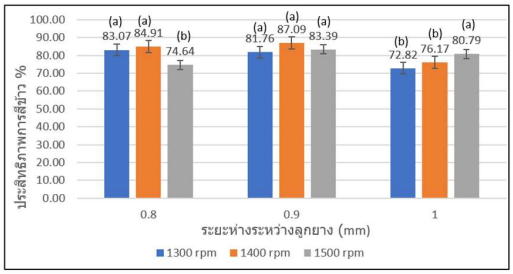
รูปที่ 15 เปอร์เซ็นต์ข้าวหักของข้าวกล้องที่ความเร็วรอบและระยะห่างระหว่างลูกยางต่างกัน (ข้าวหอมมะลิ)

[abc]อักษรที่แตกต่างกันในแต่ละสภาวะทดสอบแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)



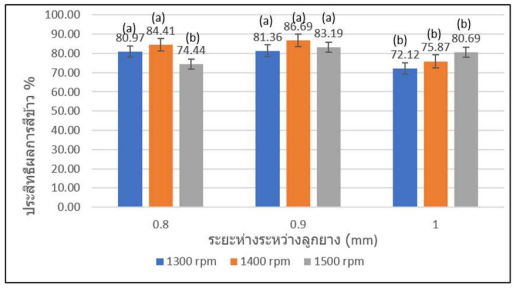
รูปที่ 16 ดัชนีการกะเทาะที่ความเร็วรอบและระยะห่า' ระหว่างลูกยางต่างกัน (ข้าวหอมมะลิ)

[abc]อักษรที่แตกต่างกันในแต่ละสภาวะทดสอบแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)



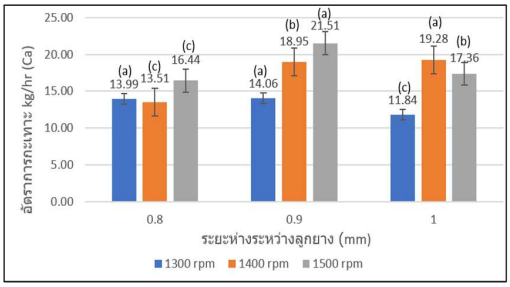
รูปที่ 17 ประสิทธิภาพการกะเทาะที่ความเร็วรอบและระยะห่างระหว่างลูกยางต่างกัน (ข้าวหอมมะลิ)

[abc]อักษรที่แตกต่างกันในแต่ละสภาวะทดสอบแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)



รูปที่ 18 ประสิทธิผลการกะเทาะที่ความเร็วรอบและระยะห่างระหว่างลูกยางต่างกัน (ข้าวหอมมะลิ)

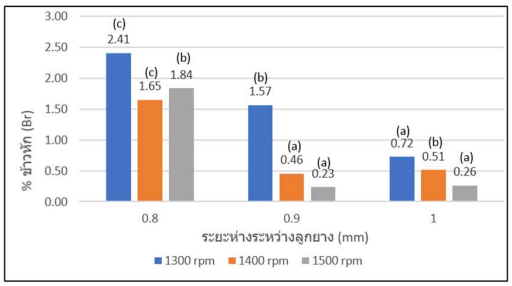
[abc]อักษรที่แตกต่างกันในแต่ละสภาวะทดสอบแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)



รูปที่ 19 อัตราการกะเทาะข้าวกล้องที่ความเร็วรอบและระยะห่างระหว่างลูกยางต่างกัน (ข้าวหอมพวง)

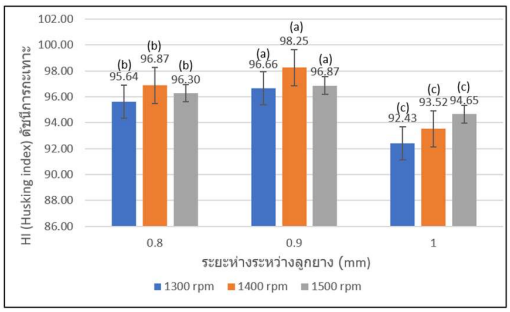
[abc]อักษรที่แตกต่างกันในแต่ละสภาวะทดสอบแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

สมรรถนะและประสิทธิภาพการสีข้าวหอมพวง ที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 1,300 1,400 และ 1,500 รอบต่อนาที และระยะห่างระหว่างลูกยางกะเทาะเท่ากับ 0.8 0.9 และ 1.0 มิลลิเมตร แสดง ดังรูปที่ 19-23 สรุปได้ว่าที่ความเร็วรอบลูกยางกะเทาะรอบเร็ว 1,500 รอบต่อนาที และความเร็วรอบลูกยางกะเทาะรอบช้าที่ 885 รอบต่อนาที ระยะห่างระหว่างลูกยางที่ 0.9 มิลลิเมตร จะให้อัตราการกะเทาะข้าวกล้องสูงสุดเท่ากับ 21.51 กิโลกรัมข้าวกล้องต่อชั่วโมง เปอร์เซ็นต์ข้าวแตกหัก 0.23 เปอร์เซ็นต์ และดัชนีการกะเทาะ 96.87 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งให้ผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์การแตกหักน้อยที่สุด จากข้อมูลการทดสอบ พบว่า ระยะห่างระหว่างลูกยางกะเทาะมีผลต่อเปอร์เซ็นต์การแตกหักของข้าวกล้อง ถ้าระยะห่างระหว่างลูกยางน้อยเกินไป (น้อยกว่า 0.9 มิลลิเมตร) จะทำให้มีเปอร์เซ็นต์การแตกหักของข้าวมีแนวโน้มสูงขึ้น ขณะที่ผลของความเร็วเชิงเส้นของลูกยางกะเทาะต่อเปอร์เซ็นต์การแตกหักของข้าว พบว่า ความเร็วเชิงเส้นของลูกยางกะเทาะที่น้อยเกินไป (น้อยกว่า 1,500 รอบต่อนาที) ทำให้เปอร์เซ็นต์การแตกหักของข้าวเพิ่มขึ้นถึง 3 เปอร์เซ็นต์ และค่าดัชนีการกะเทาะมีแนวโน้มลดลงด้วย ดังนั้น ความเร็วเชิงเส้นและระยะห่างระหว่างลูกยางที่เหมาะสมสำหรับการสีข้าวหอมพวง อยู่ที่ 1,500 รอบต่อนาที และ 0.9 มิลลิเมตร ตามลำดับ



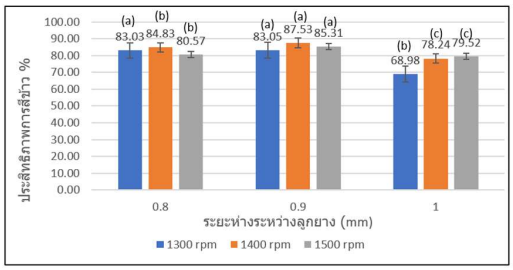
รูปที่ 20 เปอร์เซ็นต์ข้าวหักที่ความเร็วรอบและระยะห่างระหว่างลูกยางต่างกัน (ข้าวหอมพวง)

[abc]อักษรที่แตกต่างกันในแต่ละสภาวะทดสอบแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)



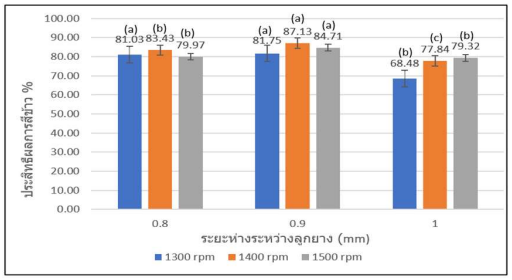
รูปที่ 21 ดัชนีการกะเทาะที่ความเร็วรอบและระยะห่างระหว่างลูกยางต่างกัน (ข้าวหอมพวง)

abcอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละสภาวะทดสอบแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)



รูปที่ 22 ประสิทธิภาพการกะเทาะที่ความเร็วรอบและระยะห่างระหว่างลูกยางต่างกัน (ข้าวหอมพวง)

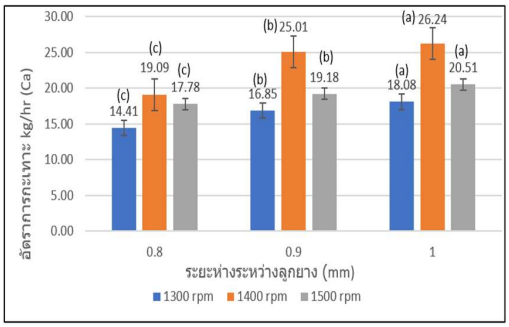
abcอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละสภาวะทดสอบแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)



รูปที่ 23 ประสิทธิผลการกะเทาะที่ความเร็วรอบและระยะห่างระหว่างลูกยางต่างกัน (ข้าวหอมพวง)

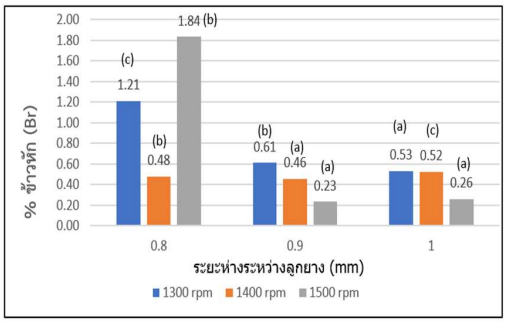
abcอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละสภาวะทดสอบแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

สมรรถนะและประสิทธิภาพการสีข้าวหอมปทุม ที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 1,300 1,400 และ 1,500 รอบต่อนาที และระยะห่างระหว่างลูกยางกะเทาะเท่ากับ 0.8 0.9 และ 1.0 มิลลิเมตร แสดง ดังรูป 23-27 สรุปได้ว่าที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 1,500 รอบต่อนาที และความเร็วรอบลูกยางกะเทาะรอบช้าที่ 885 รอบต่อนาที ระยะห่างระหว่างลูกยางที่ 0.9 มิลลิเมตร จะให้อัตราการกะทาะข้าวกล้องเท่ากับ 19.18 กิโลกรัมข้าวกล้องต่อชั่วโมง เปอร์เซ็นต์ข้าวแตกหัก 0.23 เปอร์เซ็นต์ และดัชนีการกะเทาะ 96.87 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งให้ผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์การแตกหักน้อยที่สุด จากข้อมูลการทดสอบ พบว่าระยะห่างระหว่างลูกยางกะเทาะมีผลต่อเปอร์เซ็นต์การแตกหักของข้าวกล้อง ถ้าระยะห่างระหว่างลูกยางน้อยเกินไป (น้อยกว่า 0.9 มิลลิเมตร) จะทำให้มีเปอร์เซ็นต์การแตกหักของข้าวสูงขึ้น ขณะที่ผลของความเร็วรอบของมอเตอร์ต่อ เปอร์เซ็นต์การแตกหักของข้าว พบว่าความเร็วรอบของมอเตอร์ที่น้อยเกินไป (น้อยกว่า 1,500 รอบต่อนาที) ทำให้เปอร์เซ็นต์การแตกหักของข้าวเพิ่มขึ้นถึง 4 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้น ความเร็วรอบและระยะห่างระหว่างลูกยางที่เหมาะสมสำหรับการสีข้าวหอมปทุมอยู่ที่ 1,500 รอบต่อนาที และ 0.9 มิลลิเมตร ตามลำดับ



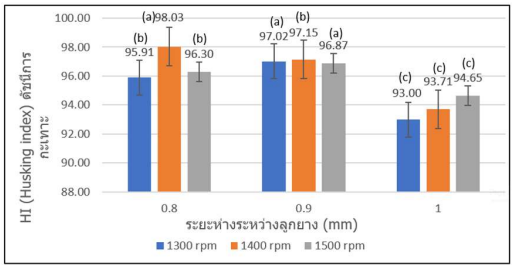
รูปที่ 24 อัตราการกะเทาะข้าวกล้องที่ความเร็วรอบและระยะห่างระหว่างลูกยางต่างกัน (ข้าวหอมปทุม)

abcอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละสภาวะทดสอบแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)



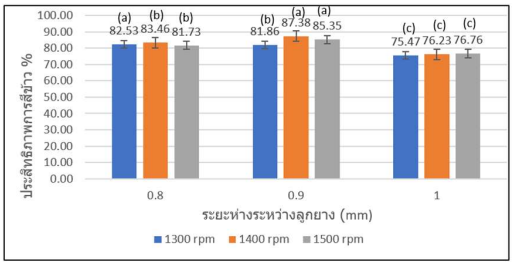
รูปที่ 25 เปอร์เซ็นต์ข้าวหักที่ความเร็วรอบและระยะห่างระหว่างลูกยางต่างกัน (ข้าวหอมปทุม)

[abc]อักษรที่แตกต่างกันในแต่ละสภาวะทดสอบแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)



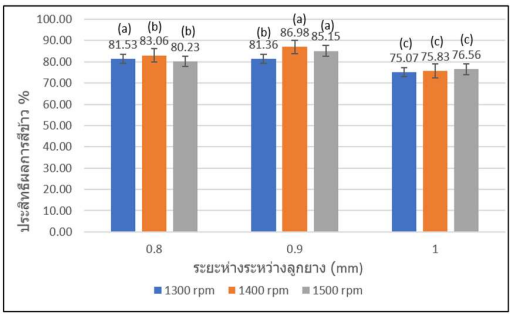
รูปที่ 26 ดัชนีการกะเทาะที่ความเร็วรอบและระยะห่างระหว่างลูกยางต่างกัน (ข้าวหอมปทุม)

[abc]อักษรที่แตกต่างกันในแต่ละสภาวะทดสอบแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)



รูปที่ 27 ประสิทธิภาพการกะเทาะที่ความเร็วรอบและระยะห่างระหว่างลูกยางต่างกัน (ข้าวหอมปทุม)

[abc]อักษรที่แตกต่างกันในแต่ละสภาวะทดสอบแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)



รูปที่ 28 ประสิทธิผลการกะเทาะที่ความเร็วรอบและระยะห่างระหว่างลูกยางต่างกัน (ข้าวหอมปทุม)

[abc]อักษรที่แตกต่างกันในแต่ละสภาวะทดสอบแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

จากการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของดัชนีการกะเทาะ พบว่าชนิดของพันธุ์ข้าว (RV) ที่ใช้ในการทดสอบไม่มีนัยสำคัญ ทางสถิติต่อค่าดัชนีการกะเทาะ ที่ระดับ 0.05 ส่วนค่าความเร็วรอบ (LV) และ ระยะห่างระหว่างลูกยาง (RC) มีผลต่อค่าดัชนีการกะเทาะอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับ 0.05 (ตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 การวิเคราะห์ ANOVA สำหรับดัชนีการกะเทาะ

Source	SS	df	F	Sig.
A-RV	.064	2	.032	.968
B–LV	18.37	2	1.785	.000
C-RC	205.059	2	1.085	.000
Error	54.000	54		
Total	746478.542	81		

3.2 วิเคราะห์ค่าใช้จ่ายทางเศรษฐศาสตร์ของเครื่อง

จากผลการทดสอบเครื่องสีข้าวพลังงานแสงอาทิตย์ได้ออกแบบและพัฒนาขึ้นโดยใช้แรงงานคนปฏิบัติงาน 1 คน ค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่อง 43,000 บาท เมื่อกำหนดให้เครื่องทำงาน 8 ชั่วโมง/วัน ทำงานปีละ 300 วัน ค่าแรงงานในการควบคุมเครื่อง 300 บาทต่อวัน หรือประมาณ 37.5 บาทต่อชั่วโมง ค่าบำรุงรักษา 20 บาทต่อ

ชั่วโมง อัตรารับจ้างสีข้าวเปลือก 70 บาทต่อชั่วโมง ผลประโยชน์สุทธิ 69,635 บาทต่อปี ผลการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายทางเศรษฐศาสตร์ พบว่าเมื่อใช้เครื่องสีข้าวกล้อง 2,400 ชั่วโมงต่อปี มีค่าใช้จ่ายในการทำงาน 1.68 บาทต่อกิโลกรัม จุดคุ้มทุนในการทำงาน 337 ชั่วโมงต่อปี และมีระยะเวลาในการคืนทุน 0.62 ปี

4. สรุป

เครื่องสีข้าวพลังงานแสงอาทิตย์ที่ออกแบบ เป็นเครื่องสีข้าวกล้องขนาดเล็กที่ ประกอบด้วยโครงสร้างหลักหลัก 5 ส่วน 1.แผงโซล่าเซลล์ 2.แบตเตอรี่ 3.ชุดอินเวอร์เตอร์ 4.ชาร์จเจอร์ 5. เครื่องสีข้าวแบบ 5 ลูกยาง ผลการทดสอบเครื่องสีข้าวกล้องพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะและประสิทธิภาพการสีข้าวกล้อง ได้แก่ สายพันธุ์ข้าวเปลือก ระยะห่างระหว่างลูกยางกะเทาะ และความเร็วรอบของมอเตอร์ ความเร็วเชิงเส้นของลูกยางกะเทาะที่เหมาะสมสำหรับการสีข้าวกล้องสายพันธ์หอมมะลิ เท่ากับ 1,400 รอบต่อนาที ระยะห่างระหว่างลูกยางที่เหมาะสม 0.9 มิลลิเมตร ความสามารถในการกะเทาะข้าวเปลือก 17.25 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เปอร์เซ็นต์ข้าวแตกหัก 0.46 เปอร์เซ็นต์ และดัชนีการกะเทาะ 96.85 เปอร์เซ็นต์ ความเร็วรอบของมอเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการสีข้าวหอมปทุม เท่ากับ 1,500 รอบต่อนาที ระยะห่างระหว่างลูกยางที่เหมาะสม 0.9 มิลลิเมตร อัตราการกะเทาะข้าวเปลือก 21.51 กิโลกรัมต่อ เปอร์เซ็นต์ข้าวแตกหัก 0.23 เปอร์เซ็นต์ และดัชนีการกะเทาะ 96.87 เปอร์เซ็นต์ ความเร็วรอบของมอเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการสีข้าวกล้องสายพันธ์หอมพวง เท่ากับ 1,500 รอบต่อนาที ระยะห่างระหว่างลูกยางที่เหมาะสม 0.9 มิลลิเมตร อัตราการกะเทาะข้าวเปลือก 19.18 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เปอร์เซ็นต์ข้าวแตกหัก 0.24 เปอร์เซ็นต์ และดัชนีการกะเทาะ 96.87 เปอร์เซ็นต์

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่สนับสนุนงบประมาณในการจัดสร้างสถานที่และอุปกรณ์ในการทดสอบ คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

6. เอกสารอ้างอิง

[1] A. Baker, R.S. D. Joyce, C. Briggs and M. Brockf, “Effect of different rubber materials on husking dynamics of paddy rice,” [Online]. Available: www.eprints.whiterose.ac.uk

[2] T. Nonthaputha, K. Chalermwong, S. Tantiviwat and N. Rattanaporn, “Mini brown rice mill for house hold,” *RMUTP Research Journal (Special Issue)*, pp. 489-498, 2015.

[3] S.M. Dauda, “Performance evaluation of a locally developed rice dehulling machine,” *IJAAR*, vol. 2, no. 1, pp. 15-21, 2012.

[4] P. Boonprakong, K. Patommakesorn and A. Thianboocha, “The effectiveness of small rice mill machine for rice mill of rice varieties trading in chai-nat province,” VRU Research and Development Journal Science and Technology, pp.105-117, 2020.

[5] S. Bangpan and P. Bangpan, “Small rice milling machine open type,” in *13th TSAE National Conference*, Chiang Mai, 2012.

[6] R. Kalsirisilp, S. Aliusman and J. Langkapin, “Testing and evaluation of rice milling machine based on Thai industrial standard” *Research Journal Rajamangala University of Technology Thanyaburi*, vol 18, pp. 1-16, 2019.

[7] Block Diagram of the Developed Solar System [Online]. Available: www.researchgate.net/figure/Block-diagram-of-the-developed-solar-system

[8] Thai Industrial Standards Institute (TISI) no. 8 8 8 - 1989, Ministry of industry [Online]. Available: https://service.tisi.go.th/standard

[9] Rice Quality, Japan International Cooperation Agency (JICA) [Online]. Available: www.jica.go.jp/project/english/sudan

[10] A. W. Stonier, *A Text Book of Economic Theory*. New York: Longman, 1980.

[11] D. Humt, *Farm Power and Machinery Management*. Waveland Press, 2016.

Srinakharinwirot University Engineering Journal (2023) 19(1), 66-78 วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีที่ 19 ฉบับที่ 1 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2566 – มีนาคม พ.ศ. 2567

การหาสภาวะที่เหมาะสมในการใช้อัลตราโซนิคช่วยสกัดโปรตีนจากผงแป้งเมล็ดขนุนด้วยวิธีพื้นที่ผิวตอบสนอง

Optimization of Ultrasonic-Assisted Extraction of Protein from Jackfruit Seed Powder using Response Surface Methodology

วรทเอก ศรีสุวรรณ* กิตติ ไชยวัณณ์ พชร แก้วรัตนขจร
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
63 หมู่ 7 ถนน รังสิต-นครนายก อ.องครักษ์, จ.นครนายก 26120
Warathaek Srisuwan* Kitti Chaiyawan Pathchara Keawrattanakajorn
Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University,
63 Moo 7 Rangsit-Nakhonnayok Road, Ongkharak , Nakhonnayok 26120, Thailand
*Corresponding author Email: warathaek@gmail.com
(Received: May 15, 2023; Revised: November 6, 2023 ; Accepted: December 7, 2023)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการใช้อัลตราโซนิคช่วยสกัดโปรตีนจากแป้งเมล็ดขนุนด้วยวิธีพื้นที่ผิวตอบสนอง โดยศึกษาถึงผลกระทบจากปัจจัยของอัตราส่วนปริมาณเอนไซน์โปรติเอสที่ใช้ อุณหภูมิ และระยะเวลาในการสกัด โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken Designs ที่ 3 ปัจจัย 3 ระดับ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม จากการทดลองพบว่า สภาวะที่เหมาะสมคือ อัตราส่วนของเอนไซม์โปรติเอสต่อแป้งเมล็ดขนุนเป็น 3.50 มิลลิลิตรต่อแป้ง 10 กรัม อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการสกัด 15 นาที และ ได้ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีนร้อยละ 64.42 แป้งที่ผ่านกระบวนการกำจัดโปรตีนแล้วจะเหลือปริมาณโปรตีนเท่ากับร้อยละ 3.15

คำสำคัญ: อัลตราโซนิคช่วยสกัด การกำจัดโปรตีน ผงแป้งเมล็ดขนุน วิธีพื้นที่ผิวตอบสนอง

ABSTRACT

This research aims to study the optimization of ultrasonic-assisted extraction of protein from jackfruit seed powder by response surface methodology (RSM). The effect of the ratio of enzyme to jackfruit seed powder, temperature and extraction time was investigated on protein removal. Box-Behnken Designs was used to determine the optimum extraction parameters. The result showed the optimum conditions were the ratio of enzyme to jackfruit seed powder 3.5 ml/10 g, temperature of 50 °C and extraction time about 15 minutes. The protein removal percentage was 64.42% at the optimum conditions. While, the jackfruit seed powder remained protein was 3.15%.

Keyword: Ultrasonic-assisted extraction, protein removal, jackfruit seed powder, response surface methodology.

1. บทนำ

ขนุนมีชื่อสามัญว่า jackfruit เป็นพืชในวงศ์ Moraceae มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Artocarpus Heterophyllus Lam.* เป็นไม้ผลเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย นิยมปลูกกันมากในกลุ่มประเทศเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ สามารถนำผลมาใช้ประกอบอาหารรับประทานแทนผัก ส่วนเนื้อขนุนนำมาบริโภคเป็นขนุนสดหรือนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ในอุตสาหกรรม เช่น ขนุนอบแห้ง ขนุนในน้ำเชื่อมบรรจุกระป๋อง ขนุนแช่แข็ง ขนุนแช่อิ่ม และขนุนแผ่นทอด พบว่าผลผลิตขนุนรวมทั้งประเทศในปี พ.ศ. 2549 ถึง พ.ศ. 2550 สูงประมาณ 130,668 ถึง 132,874 ตันต่อปี โดยพบว่าเมล็ดขนุนซึ่งเป็นของเหลือทิ้งจากการแปรรูป และบริโภคมีปริมาณร้อยละ 10 ถึง 15 ของน้ำหนักผลขนุน ซึ่งเมื่อคิดจากผลผลิตทั้งประเทศอาจมีปริมาณเมล็ดขนุนสูงถึงประมาณ 19,600 ถึง 19,931 ตันต่อปี [1] แต่การใช้ประโยชน์จากเมล็ดขนุนมีน้อย ส่วนใหญ่นิยมนำมาต้มเพื่อรับประทานเป็นอาหารว่างในครัวเรือนเท่านั้น ดังนั้นควรมีการนำเมล็ดขนุนมาผลิตเป็นแป้งบริสุทธิ์สตาร์ชเมล็ดขนุนเพื่อเพิ่มมูลค่าและยังลดปัญหาการกำจัดของเสียอีกทางหนึ่งด้วยด้วย แป้งบริสุทธิ์สตาร์ชเมล็ดขนุนจะมีปริมาณ Resistance starch สูงถึงร้อยละ 50 สามารถประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพได้ เช่น ผลิตภัณฑ์วุ้นเส้นเพื่อสุขภาพ ร่วมถึงการใช้เป็นสารให้ความหนืดในซอสพริกเนื่องมีค่าความหนืดสูงสุด 2100 RVU และมีอุณหภูมิเจลาติไนซ์ที่ 85-90°C [2] เนื่องจากเมล็ดขนุนจะมีโปรตีนอยู่ประมาณร้อยละ 10 ถึง 12 โปรตีนในแป้งส่งผลต่อคุณภาพของแป้ง 2 ด้าน คือ ด้านคุณค่าทางโภชนาการและด้านคุณภาพ พบว่าแป้งที่มีโปรตีนต่ำจะให้รสชาติความเหนียวนุ่มและการจับตัวมากกว่าแป้งที่มีโปรตีนสูง นอกจากนี้เมื่อการมีโปรตีนในแป้งจะเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด ส่งผลให้สีและกลิ่นของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลง [3] ดังนั้นจึงต้องนำเมล็ดขนุนมาผ่านกระบวนการกำจัดโปรตีนเสียก่อนเพื่อให้ได้แป้งสตาร์ชเมล็ดขนุนที่บริสุทธิ์ ในกระบวนการกำจัดโปรตีนในแป้งโดยทั่วไปทำได้โดยการใช้ตัวทำละลาย แต่ก็พบปัญหาของการตกค้างของสารเคมี การใช้เอนไซม์ในการย่อยโปรตีนเป็นทางเลือกหนึ่งที่เป็นยอมรับเพราะไม่ต้องกังวลต่อการตกค้างของสารเคมีแต่ประสิทธิในการกำจัดโปรตีนไม่ดีนักและใช้เวลาในการสกัดนาน [4] การใช้คลื่นอัลตราโซนิคช่วยสกัด จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและลดระยะเวลาในการสกัด อีกทั้งช่วยลดการใช้สารละลายอีกด้วย โดยคลื่นอัลตราโซนิคจะทำให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็กจำนวนมากและปรากฏการณ์คาวิเทชั่น ส่งผลให้โครงสร้างของโปรตีนเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยทำลายพันธะโควาเลนท์ทำให้ละลายได้มากขึ้น เอนไซม์จึงสามารถเข้าได้ย่อยสลายได้ดีขึ้น ดังนั้นคลื่นอัลตราโซนิคและการย่อยด้วยเอนไซม์จึงเสริมฤทธิ์กันในการย่อยสลายโปรตีน ส่วนปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดโปรตีนได้แก่ กำลังของคลื่น อัตราส่วนของสารละลายกับสารตัวอย่าง อัตราส่วนของเอมไซม์ที่ใช้ ความเป็นกรดด่าง อุณหภูมิ ระยะเวลาในการสกัด [2] [5] [6]

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นในการศึกษาการกำจัดโปรตีนจากแป้งเมล็ดขนุนโดยใช้เอนไซม์โปรตีเอสในการย่อยโปรตีนร่วมกับการใช้คลื่นอัลตราโซนิคช่วยสกัด โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดโปรตีน ได้แก่ อัตราส่วนเอนไซม์โปรตีเอสต่อผงแป้งขนุน อุณหภูมิ และเวลาในการสกัด เพื่อให้ทราบถึงสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโปรตีนในการผลิตแป้งบริสุทธิ์สตาร์ชเมล็ดขนุน นอกจากนี้ยังศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ของแป้งบริสุทธิ์สตาร์ชเมล็ดขนุน ได้แก่ ความหนืด และการเกิดเจลาติไนเซชัน เพื่อใช้เป็นสารให้ความหนืดในซอสพริกหรือซอสมะเขือเทศ

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

การวิเคราะห์ปริมาณไขมันด้วยวิธี Soxhlet extraction (AOAC, 2000) [7] ด้วยเฮกเซน

การวิเคราะห์ปริมาณเส้นใย (AOAC, 2000) [7] สารละลายกรดซัลฟูริก เข้มข้นร้อยละ 1.25 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้นร้อยละ 5 สารละลายกรดไฮโดรครอริกเข้มข้นร้อยละ 1 เอทานอลเข้มข้นร้อยละ 95

การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนด้วยวิธี Kjeldahl (AOAC 2000) [7] ด้วย โพแทสเซียมซัลเฟต คอปเปอร์ซัลเฟต กรดซัลฟูริก สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 32 สารละลายกรดบอริกเข้มข้นร้อยละ 4 สารละลายไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร เอนไซม์โพตีเอส และน้ำจากการผลิตด้วยวิธี Reverse Osmosis

การวิเคราะห์ปริมาณแป้งทั้งหมด (Total starch content) ด้วย เอทานอล ความเข้มข้นร้อยละ 80 Dimethyl sulphoxide เอนไซม์ Thermostable α-amylase เอนไซม์ Amyloglucosidase สารละลาย Glucose determination reagent

เอนไซม์โปรตีเอสจาก บริษัท รีช ไบโอเทคโนโลยี จำกัด เป็นเอนไซม์อัลคาไลน์โปรตีเอส มีสภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่ pH 9.5-10.5 อุณหภูมิที่ 30-50 องศาเซลเซียส ปริมาณการใช้และระยะเวลาเหมาะสมตามการใช้งาน

เครื่องอัลตราโซนิค ของบริษัท Elmasonic S (Elma) ประเทศเยอรมัน รุ่น S 70 H กำลังไฟ 750 วัตต์ ความถี่ 37 กิโลเฮริตซ์

2.2 การเตรียมสารตัวอย่าง

นำเมล็ดขนุนพันธุ์ทองประเสริฐ มาล้างทำความสะอาด ปลอกเปลือกหุ้มเมล็ดออก ตัดเป็นชิ้นบางๆ ความหนาประมาณ 2 มิลลิเมตร นำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส นาน 8 ชั่วโมง จากนั้นนำไปบด แล้วคัดแยกขนาดให้ได้ขนาดเล็กกว่า 90 ไมโครเมตร ด้วยตะแกรงเบอร์ 100 เก็บรักษาในโถดูดความชื้นเพื่อรอนำไปใช้ในการทดลอง

2.3 วิธีการวิเคราะห์ (AOAC 2000) [7]

2.3.1 การวิเคราะห์ปริมาณไขมันด้วยวิธี Soxhlet extraction

อบ Boiling flask ขนาด 1000 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้นแล้วชั่งน้ำหนัก ชั่งสารตัวอย่าง 20 กรัม ใส่ใน Thimble นำ Thimble มาใส่ใน Soxhlet extraction เติม Hexane 350 มิลลิลิตร ลงใน Boiling flask แล้วทำการสกัดเป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำ Boiling flask ที่ได้ไประเหย Hexane ออกโดยใช้ Rotary evaporator จะเหลือน้ำมันอยู่ที่ Boiling flask นำ Boiling flask ไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้นประมาณ 15 นาที แล้วนำไปชั่งน้ำหนักและคำนวณหาปริมาณไขมันดังสมการที่ 1

$$\text{ไขมัน}(\text{ร้อยละ}) = \frac{W_2 - W_1}{S} \times 100 \qquad (1)$$

เมื่อ

W_1 = น้ำหนักขวดก่อนอบ หน่วยเป็น กรัม

W_2 = น้ำหนักขวดหลังอบ หน่วยเป็น กรัม

S = น้ำหนักสารตัวอย่าง หน่วยเป็น กรัม

2.3.2 การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า

เผาถ้วยกระเบื้องเคลือบในเตาเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง นำออกจากเตาเผาเก็บไว้ในโถดูดความชื้น ปล่อยให้เย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้อง ชั่งน้ำหนัก บันทึกผล ทำซ้ำจนกระทั่งได้น้ำหนักที่คงที่ (ในแต่ละซ้ำต่างกันไม่เกิน 3 มิลลิกรัม) หาค่าเฉลี่ย บันทึกผล (W_1) ชั่งตัวอย่างอย่างละเอียดประมาณ 5 กรัม (S) ลงในถ้วยกระเบื้องเคลือบ เผาบนเตาไฟฟ้า จนหมดควัน นำไปเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส จนกระทั่งได้เถ้าสีเทาอ่อน หรือสีขาวสม่ำเสมอ นำออกจากเตาเผา เก็บในโถดูดความชื้น ปล่อยให้เย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้อง ชั่งน้ำหนัก บันทึกผล ทำซ้ำ (ในแต่ละซ้ำต่างกันไม่เกิน 3 มิลลิกรัม) หาค่าเฉลี่ย บันทึกผล (W_2) และคำนวณหาปริมาณเถ้าดังสมการที่ 2

$$\text{เถ้า}(\text{ร้อยละ}) = \frac{W_2 - W_1}{S} \times 100 \qquad (2)$$

เมื่อ

W_1 = น้ำหนักถ้วยเปล่าหลังเผา หน่วยเป็น กรัม

W_2 = น้ำหนักถ้วยและตัวอย่างหลังเผา หน่วยเป็น กรัม
S = น้ำหนักสารตัวอย่าง หน่วยเป็น กรัม

2.3.3 การวิเคราะห์ปริมาณเส้นใย

นำตัวอย่างแป้งที่ผ่านการสกัดไขมันออกแล้วไปบดลดขนาดด้วย Blender ชั่งน้ำหนักที่แน่นอนของตัวอย่างแป้งประมาณ 5 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 500 มิลลิลิตร เติมสารละลายกรดซัลฟูริก เข้มข้น 1.25 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 200 มิลลิตร นำไปต้มให้เดือดเบาๆ นาน 30 นาที โดยพยายามรักษาระดับของเหลวในบีกเกอร์ให้คงที่โดยการเติมน้ำกลั่นที่ร้อน และคนเป็นระยะๆ เพื่อป้องกันตัวอย่างเกาะติดกับผนังบีกเกอร์ กรองอย่างรวดเร็วผ่านกระดาษกรองบน Buchner ล้างบีกเกอร์ และกากบนกระดาษกรองหลายๆรอบด้วยน้ำกลั่นที่ร้อน จนกระทั่งน้ำที่ผ่านกระดาษกรองลงมาเป็นกลาง เติมสารละลาย NaOH เข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ที่มีกากจากข้อ 5 ปรับปริมาตรของเหลวในบีกเกอร์เป็น 200 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น (จะได้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 1.25 เปอร์เซ็นต์) นำไปต้มให้เดือดเบาๆ นาน 30 นาที โดยพยายามรักษาระดับของเหลวในบีกเกอร์ให้คงที่โดยการเติมน้ำกลั่นที่ร้อน และคนเป็นระยะๆ เพื่อป้องกันตัวอย่างเกาะติดกับผนังบีกเกอร์ กรองอย่างรวดเร็วผ่านกระดาษกรองชนิดปราศจากเถ้า ที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอนบน Buchner ล้างบีกเกอร์และกากบนกระดาษกรองหลายๆรอบด้วยน้ำกลั่นที่ร้อนหลายๆรอบ และล้างตะกอนด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นล้างตะกอนด้วยด้วยน้ำกลั่นที่ร้อนหลายๆรอบจนกระทั่งน้ำที่ผ่านกระดาษกรองลงมาเป็นกลาง ล้างตะกอนด้วยเอทานอล 95 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณเล็กน้อย 2 รอบ นำตะกอนมาระเหยเอาเอทานอลออก และนำไปอบให้แห้งด้วยตู้อบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ นำออกจากตู้อบแล้วทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น (Desiccator) ชั่งน้ำหนักกากที่ได้ นำกากที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณเถ้า (ash) บันทึกผล และคำนวณหาปริมาณเส้นใยในอาหารดังสมการที่ 3

$$\text{เส้นใย(ร้อยละ)} = \frac{W_2 - W_1}{S} \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ
W_1 = น้ำหนักแห้งของกาก หน่วยเป็น กรัม
W_2 = น้ำหนักเถ้า หน่วยเป็น กรัม
S = น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น ปราศจากน้ำ หน่วยเป็น กรัม

2.3.4 การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนตามวิธี Kjeldahl

ชั่งน้ำหนักสารตัวอย่างที่แน่นอนใช้ทศนิยม 3 ตำแหน่ง ประมาณ 1.00 กรัม แล้วนำสารตัวอย่างที่ชั่งใส่ลงในขวด Kjeldahl เติมโพแทสเซียมซัลเฟต 5 กรัม คอปเปอร์ซัลเฟต 0.50 กรัม และ เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้นจำนวน 20 มิลลิลิตร อย่างช้าๆ ตั้งขวด Kjeldahl บนเตาซึ่งอยู่ในตู้ควัน จากกนั้นย่อยสารละลายตัวอย่างโดยใช้เครื่องย่อย (Digestion Unit) จนกระทั่งใส ซึ่งใช้เวลาประมาณ 2 ชั่วโมง แล้วตั้งทิ้งไว้จนสารละลายใสเย็นลง

การกลั่น และหาปริมาณแอมโมเนีย นำขวด Kjeldahl ที่ได้เข้าเครื่องกลั่น โดยตั้งค่าปริมาตรน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 75 มิลลิลิตร หยด Mixed Indicator 2 ถึง 3 หยด ลงไปใส่ขวดชมพู่ซึ่งมีสารละลายกรดบอริกจำนวน 50 มิลลิลิตร แล้วนำไปวางที่ปลายทางออกของคอนเดนเซอร์โดยที่ให้ปลายของคอนเดนเซอร์จุ่มอยู่ใต้ผิวของสารละลายกรดบอริกตลอดเวลา ทำการกลั่นแอมโมเนียโดยใช้เครื่อง Distillation Unit 3.30 นาที จะสังเกตเห็นสีของอินดิเคเตอร์ เปลี่ยนจากสีม่วงไปเป็นสีเขียว และปริมาตรสารละลายที่ได้ประมาณ 150 มิลลิลิตร จากนั้นนำสารละลายกรดบอริกที่จับแอมโมเนียไว้มาไตเตรทกับสารละลายมาตรฐานกรดไฮโดรคลอริก 0.10 โมลาร์ จนกระทั่งอินดิเคเตอร์เปลี่ยนสีจากเขียวเป็นสีม่วง คำนวณหาปริมาณของไนโตรเจนดังสมการที่ 4

$$\text{ไนโตรเจน(ร้อยละ)} = \frac{(V_2 - V_1) \times N \times 14}{W} \times 100 \quad (4)$$

เมื่อ

W = น้ำหนักของสารตัวอย่าง หน่วยเป็น มิลลิกรัม

V_2 = ปริมาตรของสารละลายกรดเกลือมาตรฐานที่ใช้ไตเตรตกับสารละลายสารตัวอย่าง หน่วยเป็น มิลลิลิตร

V_1 = ปริมาตรของสารละลายกรดเกลือมาตรฐานที่ใช้ไตเตรตกับ blank หน่วยเป็น มิลลิลิตร

N = ความเข้มข้นกรดเกลือมาตรฐาน (N)

เปอร์เซ็นต์ของโปรตีนสามารถคำนวณได้โดยคูณเปอร์เซ็นต์ของไนโตรเจนด้วย 6.25 สำหรับธัญพืช ดังสมการที่ 5

$$\text{โปรตีน(ร้อยละ)} = \text{ไนโตรเจน(ร้อยละ)} \times 6.25 \quad (5)$$

2.3.5 การวิเคราะห์ปริมาณแป้งทั้งหมด (Total starch content)

ชั่งตัวอย่างประมาณ 100±5 มิลลิกรัม (น้ำหนักแน่นอน) ใส่ลงในหลอดทดลอง เติมเอทานอล ความเข้มข้นร้อยละ 80 ปริมาตร 0.2 มิลลิลิตร และเติม Dimethyl sulphoxide ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ทันที เขย่าให้เข้ากัน และนำไปไว้ในน้ำเดือดเป็นเวลา 5 นาทีหลังจากนั้นเติม สารละลายเอนไซม์ Thermostable α-amylase ปริมาตร 4 มิลลิลิตร ทันทีและนำไปไว้ในน้ำเดือดเป็นเวลา 6 นาที ทำการเขย่าทุกๆ 2 นาทีและนำสารละลายตัวอย่างมาพักไว้ในอ่างน้ำควบคุมที่ 50 องศาเซลเซียสเพื่อให้ตัวอย่างสารละลายมีอุณหภูมิลดลงเป็น 50 องศาเซลเซียส จากนั้นเติมสารละลายเอนไซม์ Amyloglucosidase ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันและนำไปบ่มในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที โดยทำการเขย่าทุกๆ 5 นาที

ถ่ายสารละลายในหลอดทดลองลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นจนมีปริมาตร 100 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน นำไปหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 1500 g เป็นเวลา 10 นาทีดูดสารละลายในส่วนใส ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ลงหลอดทดลองและเติมสารละลาย Glucose determination reagent (GOPOD reagent) ปริมาตร 3 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน และนำไปบ่มในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร และคำนวณหาแป้งทั้งหมดดังสมการที่ 6

$$\text{ปริมาตรแป้งทั้งหมด (ร้อยละ)} = \Delta E \times (F/W) \times 90 \quad (6)$$

เมื่อ

ΔE = ค่าการดูดกลืนแสงที่อ่านได้ที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร

F = ค่า Factor ของการเปลี่ยนแปลงหน่วยเป็นไมโครกรัมของกลูโคสในสารละลาย GOPOD reagent

W = น้ำหนักแห้งของตัวอย่าง (มิลลิกรัม) ซึ่งคำนวณได้ดังสมการที่ 7

$$W = \text{น้ำหนักตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์} \times [(100 - \text{ปริมาณความชื้น})/100] \quad (7)$$

2.4 การออกแบบทดลองโดยใช้วิธี Box-Behnken

การศึกษาเพื่อกำจัดโปรตีนในผงแป้งเมล็ดขนุน ทำการออกแบบทดลองโดยใช้วิธี Box-Behnken Designs [8] ที่ 3 ปัจจัย 3 ระดับ ทำการทดลองทั้งหมด 15 การทดลอง การทดลองละ 3 ซ้ำ โดยใช้อัตราส่วนระหว่างเอนไซม์โปรตีเอสต่อผงแป้งเมล็ดขนุน 1.00 3.00 และ 5.00 มิลลิลิตรเอนไซม์โปรตีเอสต่อ 10 กรัมแป้ง ที่อุณหภูมิ 30 40 และ 50 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการสกัด 10 20 และ 30 นาที โดยเติมน้ำ RO 200 มิลลิลิตร ต่อแป้งเมล็ดขนุน 10 กรัม แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ระดับปัจจัยต่างๆ ในการออกแบบการทดลอง ที่ 3 ปัจจัย 3 ระดับ และร้อยละการกำจัดโปรตีน

ลำดับ	ปริมาณเอนไซม์		อุณหภูมิ		เวลา		ร้อยละการกำจัดโปรตีน		ความคลาดเคลื่อน (ร้อยละ)
	X_1	mL/10g	X_2	°C	X_3	นาที	จากการทดลอง	จากการทำนาย	
1	-1	1	-1	30	0	20	47.99±2.40	43.59	10.10
2	1	5	-1	30	0	20	38.85±1..34	37.03	4.93
3	-1	1	1	50	0	20	52.80±1.82	54.87	3.78
4	1	5	1	50	0	20	58.38±2.88	63.03	7.38
5	-1	1	0	40	-1	10	52.42±0.88	51.73	1.35
6	1	5	0	40	-1	10	46.62±2.63	43.33	7.61
7	-1	1	0	40	1	30	35.45±2.91	39.01	9.11
8	1	5	0	40	1	30	48.08±1.07	49.01	1.89
9	0	3	-1	30	-1	10	30.31±5.42	35.73	15.16
10	0	3	1	50	-1	10	66.59±3.35	63.75	4.46
11	0	3	-1	30	1	30	40.50±1.09	41.59	2.61
12	0	3	1	50	1	30	56.01±5.65	50.85	10.15
13	0	3	0	40	0	20	52.34±1.89	54.42	3.83
14	0	3	0	40	0	20	55.67±1.27	54.42	2.30
15	0	3	0	40	0	20	54.88±0.87	54.42	0.85

2.5 การศึกษาการกำจัดโปรตีนด้วยเอมไซม์โปรติเอสร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิคช่วยสกัด

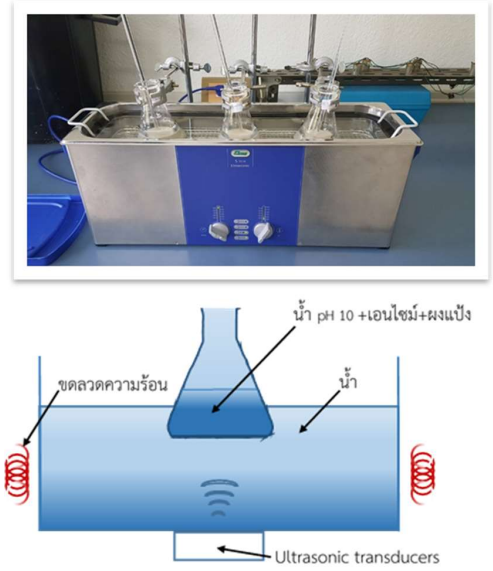
เติมน้ำ pH 10 ที่ปรับค่า pH ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 โมลต่อลิตร 200 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร นำขวดรูปชมพู่แช่ในอ่างอัลตราโซนิค เปิดสวิทช์ ปรับอุณหภูมิ (อุณหภูมิในการทดลอง 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียส) รอจนกระทั้งอุณหภูมิของน้ำในอ่างคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 1 จากนั้นเติมผงแป้งเมล็ดขนุน 20 กรัม และเอนไซน์โปรตีเอส (อัตราส่วนเอนไซม์ต่อผงแป้ง 1.00 3.00 และ 5.00 มิลลิลิตร เอนไซม์ ต่อ 10 กรัมแป้ง) พร้อมกับจับเวลา (ระยะเวลาในการสกัด 10, 20 และ 30 นาที) เมื่อครบเวลาตามกำหนด นำน้ำแป้งมากรองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ ฉีดน้ำกลั่นเพื่อล้างเอนไซม์ออกหลายๆ ครั้ง นำแป้งที่ผ่านการกรองไปอบที่ 55 องศาเซลเซียส นาน 8 ชั่วโมง จากนั้นนำไปบด แล้วคัดแยกขนาดให้ได้ขนาดเล็กกว่า 90 ไมโครเมตร ด้วยตะแกรงเบอร์ 100 เก็บรักษาในโถดูดความชื้นเพื่อรอนำไปวิเคราะห์

3. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

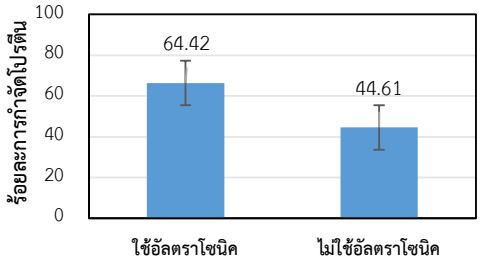
3.1 ผลของการใช้คลื่นอัลตราโซนิคช่วยสกัดโปรตีน

จากการศึกษาเปรียบเทียบผลของการใช้คลื่นอัลตราโซนิคช่วยสกัด ที่สภาวะอัตราส่วนของเอนไซม์โปรติเอสต่อแป้งเมล็ดขนุนเป็น 3.50 มิลลิลิตรต่อแป้ง 10 กรัม อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการสกัด 15 นาที (รูปที่ 2) พบว่าการกำจัดโปรตีนในผงแป้งเมล็ดขนุนด้วยเอนไซน์โปรติเอสเพียงอย่างเดียว สามารถกำจัดโปรตีนได้ร้อยละ 44.61 ส่วนการกำจัดโปรตีนในผงแป้ง

เมล็ดขนุนด้วยเอนไซน์โปรติเอสในการย่อยโปรตีนร่วมกับการใช้คลื่นอัลตราโซนิคช่วยสกัดสามารถกำจัดโปรตีนออกจากแป้งเมล็ดขนุนได้สูงร้อยละ 64.42 แสดงให้เห็นถึงการเสริมฤทธิ์กันของคลื่นอัลตราโซนิคที่ช่วยให้เอนไซน์โปรติเอสทำงานได้ดียิ่งขึ้นในการสกัดโปรตีนออกจากแป้งเมล็ดขนุน [5]



รูปที่ 1 การส่งผ่านคลื่นอัลตราโซนิคทางอ้อม โดยอาศัยน้ำเป็นตัวกลาง



รูปที่ 2 การกำจัดโปรตีนในผงแป้งเมล็ดขนุนด้วยเอนไซน์โปรติเอสในการย่อยโปรตีนร่วมกับการใช้คลื่นอัลตรา-โซนิคช่วยสกัด และไม่ใช้เครื่องอัลตราโซนิค

3.2 ร้อยละการกำจัดโปรตีน

จากการศึกษากำจัดโปรตีนในผงแป้งเมล็ดขนุนจะอาศัยเอนไซน์โปรติเอสร่วมกับการใช้คลื่นอัลตราโซนิคช่วยสกัดโปรตีนออกจากแป้งเมล็ดขนุน โดยปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ อัตราส่วนระหว่างเอนไซม์โปรตีเอสต่อผงแป้งเมล็ดขนุน 1.00, 3.00 และ 5.00 มิลลิลิตรเอนไซม์โปรตีเอสต่อ 10 กรัมแป้ง ที่อุณหภูมิ 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการสกัด 10, 20 และ 30 นาที ร้อยละการกำจัดโปรตีนที่ได้จาการทดลองและการทำนายอยู่ในช่วงระหว่าง 30 ถึง 67 แสดงดังตารางที่ 1

3.3 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวตอบสนอง

จากตารางที่ 2 แสดงข้อมูลทางสถิติที่ได้จากการออกแบบการทดลอง ของค่า Coefficient (α) กับค่า P-Vaule ซึ่งค่า P-Value จะแสดงถึงความมีนัยสำคัญของแต่ละตัวแปรที่ศึกษาว่ามีผลอย่างไรต่อการสกัดโปรตีนจากแป้งเมล็ดขนุนโดยใช้อัลตราโซนิคช่วยสกัด โดยที่หากค่า P-Value มากกว่าค่า α แสดงให้เห็นว่าตัวแปรนั้นไม่มีนัยสำคัญ แต่ถ้าค่า P-Value น้อยกว่า α แสดงให้เห็นว่าตัวแปรนั้นมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ซึ่งค่า α จะมีค่าเท่ากับ 0.05 จากตาราง จะเห็นได้ว่าค่า P-Value ของอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัดมีค่าเท่ากับ 0.004 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 จึงสามารถสรุปได้ว่าตัวแปรที่มีผลต่อการสกัดมากที่สุดคืออุณหภูมิที่ใช้ในการสกัดโปรตีนจากแป้งเมล็ดขนุนโดยใช้อัลตราโซนิคช่วยสกัด [9]

ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการแบบจำลองกำลังสองสามารถเขียนสมการแบบจำลองกำลังสองเพื่อใช้ในการทำนายผลการทดลองดังแสดงในสมการที่ 8

$$Y=-30.7-6.51X_1+2.35X_2+3.07X_3-0.875X_1^2-0.0129X_2^2 -0.0515X_3^2+0.184X_1X_2+0.230X_1X_3-0.0469X_2X_3 \quad (8)$$

เมื่อ

Y คือ ร้อยละในการกำจัดโปรตีน

X_1 คือ อัตราส่วนเอนไซม์โปรตีเอส

X_2 คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการสกัดโปรตีน

X_3 คือ เวลาที่ใช้ในการสกัดสกัดโปรตีน

ตารางที่ 2 ข้อมูลทางสถิติจากการออกแบบการทดลอง

Regression Term	Extracted Protein (%)	
	Coefficient	Probability (p-value)[a]
Constant (b_0)	-30.7	0.000
Enzyme ratio (b_1)	-6.51	0.834
Temperature (b_2)	2.35	0.004
Time (b_3)	3.07	0.391
Enzyme ratio^2 (b_{11})	-0.875	0.255
Temperature^2 (b_{22})	-0.0129	0.655
Time^2 (b_{33})	-0.0515	0.117
Enzyme ratio/ Temperature (b_{12})	0.184	0.291
Enzyme ratio/Time (b_{13})	0.230	0.139
Temperature/Time (b_{23})	-0.0469	0.133
R^2	0.8872	-

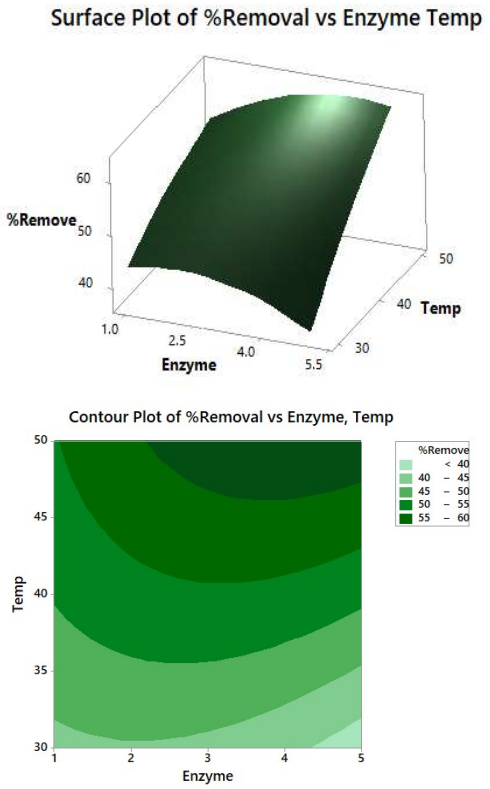
[a]The p-value more than 0.05 is not significantly different at the 5% level.

ผลที่ได้จากการทำนายร้อยละการกำจัดโปรตีนจากสมการ (8) และผลการทดลองการกำจัดโปรตีนจากแป้งเมล็ดขนุนโดยใช้อัลตราโซนิคช่วยสกัดแสดงในตารางที่ 1 พบว่ามีค่าความคาดเคลื่อนร้อยละ 1 ถึง 15

ส่วนค่า R^2 มีค่าเท่ากับ 0.8872 ดังแสดงในตารางที่ 2 ถือว่าสมการกำลังสองที่คำนวณได้นั้นเป็นสมการที่สามารถนำมาทำนายผลการทดลองได้หรือมีความน่าเชื่อถือในการใช้ทำนายผลการทดลอง

3.4 ผลของปัจจัยต่างๆ ต่อร้อยละการกำจัดโปรตีน [10] [11] [12]

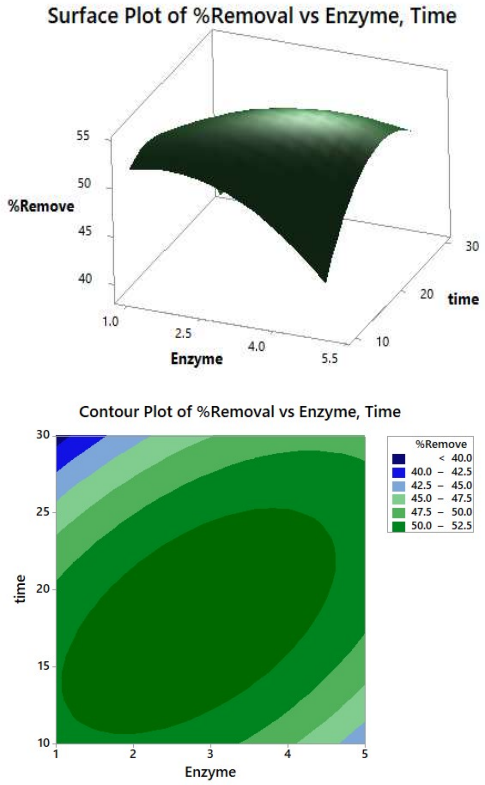
กราฟพื้นที่ผิวตอบสนองของปัจจัยต่างๆ ต่อร้อยละการกำจัดโปรตีน แสดงดังรูปที่ 3, 4 และ 5 พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการสกัดเพิ่มขึ้นมีผลให้ร้อยละการกำจัดโปรตีนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ จากตารางที่ 2 ($p<0.05$)



รูปที่ 3 พื้นผิวตอบสนอง ระหว่างร้อยละการกำจัดโปรตีน อัตราส่วนเอนไซม์ และอุณหภูมิ

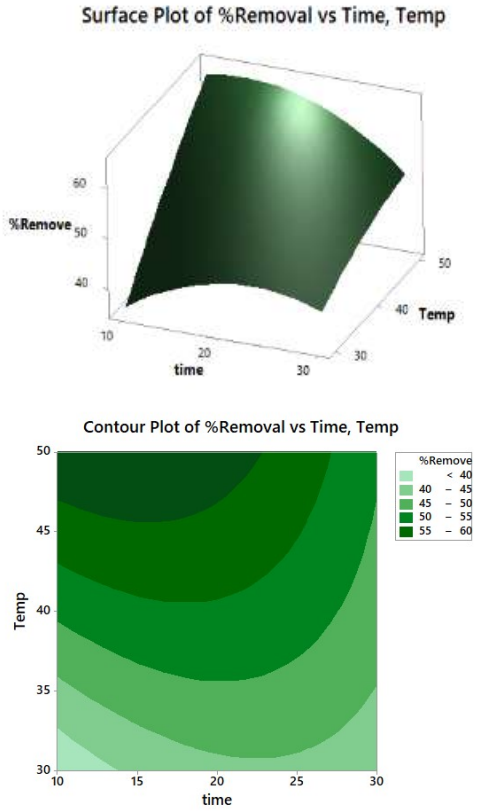
รูปที่ 3 แสดงพื้นที่ผิวตอบสนอง ระหว่างร้อยละการกำจัดโปรตีน อัตราส่วนเอนไซม์ และอุณหภูมิในการสกัด พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการสกัดและอัตราส่วนเอนไซน์เพิ่มขึ้นมีผลให้ร้อยละการกำจัดโปรตีน จุดสูงสุดของกราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงค่าร้อยละการกำจัดที่มากที่สุด อยู่ที่อัตราส่วนเอนไซม์เท่ากับ 3.5 มิลลิลิตรต่อ 10 กรัมแป้ง และที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จากกราฟการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่สูงกว่า 50 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มที่จะทำให้ร้อยละการกำจัดโปรตีนเพิ่มขึ้น แต่การทดลองจำกัดอุณหภูมิสูงสุดที่ 50 องศาเซลเซียส เนื่องจากสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทำงานของเอนไซม์อยู่ระหว่าง 40-

50 องศาเซลเซียส หากอุณหภูมิในการทดลองสูงกว่านี้จะทำให้เอนไซม์เสียสภาพการทำงาน



รูปที่ 4 พื้นผิวตอบสนอง ระหว่างร้อยละการกำจัดโปรตีน อัตราส่วนเอนไซม์ และเวลา

รูปที่ 4 แสดงพื้นที่ผิวตอบสนอง ระหว่างร้อยละการกำจัดโปรตีน อัตราส่วนเอนไซม์ และระยะเวลาในการสกัด พบว่าที่อัตราส่วนการใช้เอนไซม์ต่ำที่ 1 มิลลิลิตรต่อ 10 กรัมแป้ง ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีนลดลงเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการสกัด ต่างจากที่อัตราส่วนการใช้เอนไซม์สูงที่ 5 มิลลิลิตรต่อ 10 กรัมแป้ง ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีนเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการสกัด โดยค่าร้อยละการกำจัดโปรตีนมากที่สุด จากกราฟพื้นผิวตอบสนองอยู่ที่อัตราส่วนเอนไซม์ 3.5 มิลลิลิตรต่อ 10 กรัมแป้ง และเวลาในการสกัด 15 นาที



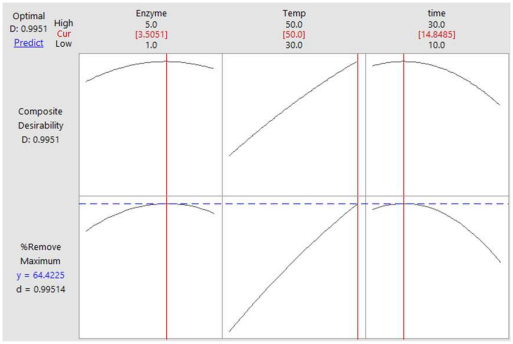
รูปที่ 5 พื้นผิวตอบสนอง ระหว่างร้อยละการกำจัดโปรตีน เวลา และอุณหภูมิ

รูปที่ 5 แสดงกราฟพื้นผิวตอบสนอง ระหว่างร้อยละการกำจัดโปรตีน เวลา และอุณหภูมิ พบว่าที่เวลาในการสกัด 10 นาที เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้ร้อยละการกำจัดโปรตีนเพิ่มขึ้นอย่างมาก ส่วนที่เวลาในการสกัด 30 นาที เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้ร้อยละการกำจัดโปรตีนค่อยๆเพิ่มขึ้น โดยค่าร้อยละการกำจัดโปรตีนมากที่สุดจากกราฟพื้นผิวตอบสนองอยู่ที่ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และเวลาในการสกัด 15 นาที

3.5 สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโปรตีน

จากรูปที่ 6 แสดงการทำนายสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโปรตีนจากแป้งเมล็ดขนุนโดยใช้อัลตราโซนิคช่วยสกัด พบว่าที่อัตราส่วนเอนไซม์ที่ 3.50 มิลลิลิตรต่อ 10 กรัมแป้ง อุณหภูมิที่ใช้ในการสกัดเท่ากับ 50.0 องศา

เซลเซียส และเวลาที่ใช้ในการสกัดเท่ากับ 14.85 นาที ภายใต้สภาวะนี้จากการทำนายผลจะให้ค่าร้อยละกำจัดโปรตีนสูงสุด 64.42 และเมื่อทำการทดลองซ้ำที่สภาวะที่ดังกล่าวเพื่อยืนยันผลการทดลอง พบว่าได้ค่าร้อยละการกำจัดโปรตีนใกล้เคียงกันที่ 66.40 ซึ่งสามารถคิดร้อยละความคลาดเคลื่อน 3.08



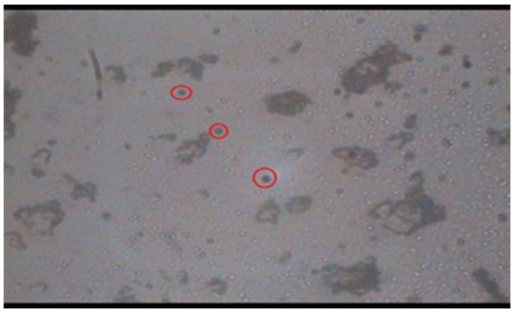
รูปที่ 6 แสดงค่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการกำจัดโปรตีนจากแป้งเมล็ดขนุน

3.6 ลักษณะทางกายภาพของเม็ดแป้งขนุนเมล็ด

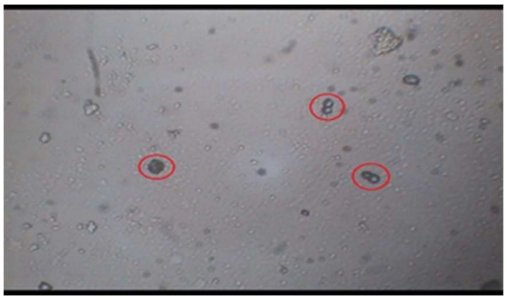
จากการนำแป้งเมล็ดขนุนทั้งก่อนการกำจัดโปรตีนและหลังการกำจัดโปรตีนไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 40 เท่า พบว่าทั้งแป้งก่อนการกำจัดโปรตีนและแป้งที่ผ่านการกำจัดโปรตีนแล้ว มีลักษณะคล้ายกันโดยมีลักษณะเป็นทรงกลม แต่เม็ดแป้งที่ผ่านการกำจัดโปรตีนแล้ว จะมีขนาดใหญ่กว่าเนื่องจากสามารถดูดซับน้ำได้ดีกว่าจึงมีการพองตัวมากกว่า แสดงดังรูปที่ 7

3.7 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเมล็ดขนุน

จากการทดลองวัดความหนืดของแป้งบริสุทธิ์สตาร์ชเมล็ดขนุน โดยชั่งแป้งเมล็ดขนุน 1 กรัม น้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร จากนั้นนำมาวิเคราะห์ความหนืดด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA) โดยเริ่มวิเคราะห์จากอุณหภูมิ 25-100 องศาเซลเซียส พบว่ามีอุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความหนืดที่ 80.80 องศาเซลเซียส มีค่าความหนืดต่ำสุด 91.67 RVU อุณหภูมิที่เกิดความหนืดสูงสุดคือ 91.95 องศาเซลเซียส มีค่าความหนืดสูงสุด 98.58 RVU ค่าความหนืดสุดท้าย 133.67 RVU ผลต่างระหว่างค่าความหนืดสุดท้ายกับความหนืดสูงสุด 35.09 RVU และผลต่างระหว่างค่าความหนืดสุดท้ายกับความหนืดต่ำสุด 42 RVU สอดคล้องกับงานวิจัยของ Rengsutthi และคณะ (2011) ที่พบว่าแป้งบริสุทธิ์สตาร์ชเมล็ดขนุน มีอุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความหนืดที่ 81.58 องศาเซลเซียส มีค่าความหนืดต่ำสุด 215.92 RVU มีค่าความหนืดสูงสุด 255.58 RVU ค่าความหนืดสุดท้ายของการทดลอง 364.13 RVU ผลต่างระหว่างค่าความหนืดสุดท้ายกับความหนืดสูงสุด 148.21 RVU และผลต่างระหว่างค่าความหนืดสูงสุดกับความหนืดต่ำสุด 39.67 RVU [13]



(ก)



(ข)

รูปที่ 7 ลักษณะของเม็ดแป้งที่กำลังขยาย 40 เท่า
(ก) แป้งเมล็ดขนุนก่อนการกำจัดโปรตีน
(ข) แป้งเมล็ดขนุนหลังการกำจัดโปรตีน

การเปลี่ยนแปลงความหนืดเกิดขึ้นเมื่อแป้งได้รับความร้อนจนเกิดเจลาติไนเซชัน เม็ดแป้งสามารถดูดซับน้ำ

และเกิดการพองตัว ซึ่งการพองตัวของเม็ดแป้งมีผลให้ความหนืดเพิ่มมากขึ้น ความหนืดสูงสุดเกิดขึ้นเมื่อให้ความร้อนจนเกิดเจลาทิไนเซชันสมบูรณ์ แป้งจะสุกทั้งหมด ค่าความหนืดสุดท้ายใช้บ่งชี้ลักษณะของผลิตภัณฑ์สุดท้ายหรือเจลที่เกิดขึ้น ซึ่งค่าความหนืดสุดท้ายมาก แสดงว่าเป็นแป้งมีปริมาณอะไมโลสสูง ส่วนผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดต่ำสุด แสดงถึง ความสามารถในการจัดเรียงตัวใหม่ของอะไมโลสและอะไมโลเพกทิน หรือการคืนตัวของแป้งสุก (Retrogradation) ถ้ามีค่ามาก แสดงว่าแป้งมีความสามารถในการจัดเรียงตัวได้ดี และผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดสูงสุดแสดงถึงความแข็งของเจลผลิตภัณฑ์ ซึ่งมีค่าบวก หมายความว่าเจลที่มีความแข็ง [14] จากการทดลองพบว่าแป้งสตาร์ชเมล็ดขนุนสามารถให้ความข้นหนืดสูง เนื่องจากประกอบด้วยอะไมโลสสูง จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าองค์ประกอบของอะไมโลสในเมล็ดขนุนมีปริมาณสูงถึงร้อยละ 26.4 [15] [16]

3.8 การเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งเมล็ดขนุน

การเกิดเจลาติไนเซชัน โดยชั่งตัวอย่าง 10 มิลลิกรัม ลงใน ถ้วยสแตนเลส (stainless steel pan) และเติมน้ำกลั่นลงไปในสัดส่วนน้ำหนักแป้ง 30% จากนั้นนำมาวิเคราะห์คุณสมบัติการเกิดเจลาติไนเซชันด้วย Differential Scanning Calorimetry (DSC) โดยใช้อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิด้วยอัตรา 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จากอุณหภูมิ 25 ถึง 150 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นลดอุณหภูมิด้วยอัตราการลดลง 60 องศาเซลเซียสต่อนาที และให้คงที่ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 3 พบว่าค่าอุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิดเจลาทิไนเซชัน (T_o) อุณหภูมิสูงสุดในการเกิดเจลาทิไนเซชัน (T_p) และอุณหภูมิที่จุดสิ้นสุดในการเกิดเจลาทิไนเซชัน (T_c) ของแป้งทั้งสองชนิดมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) โดยแป้งเมล็ดขนุนก่อนการกำจัดโปรตีนมีค่า T_o T_p และ T_c เท่ากับ 81.34 84.24 และ 90.35 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ส่วนแป้งเมล็ดขนุนหลังการกำจัดโปรตีนมีค่า T_o T_p และ T_c เท่ากับ 82.17 85.95 และ 91.70 องศาเซลเซียส ตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kittipongpatana และคณะ (2011) พบว่าแป้งบริสุทธิ์สตาร์ชเมล็ดขนุน มีค่า T_o T_p และ T_c เท่ากับ 82.92 86.01 และ 91.23 องศาเซลเซียส ตามลำดับ [16]

ตารางที่ 3 อุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งเมล็ดขนุนทั้งก่อนและหลังการกำจัดโปรตีน

สารตัวอย่าง	อุณหภูมิ			
	T_o (°C)	T_p (°C)	T_c (°C)	ΔT (°C)
แป้งเมล็ดขนุนก่อนการกำจัดโปรตีน	81.34 ±1.66	84.24 ±1.46	90.35 ±1.62	9.01
แป้งเมล็ดขนุนหลังการกำจัดโปรตีน	82.17 ±1.64	85.95 ±1.71	91.70 ±1.74	9.53

เมื่อ T_o คือ อุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิดเจลาทิไนเซชัน

T_p คือ อุณหภูมิสูงสุดในการเกิดเจลาทิไนเซชัน

T_c คือ อุณหภูมิที่จุดสิ้นสุดในการเกิดเจลาทิไนเซชัน

ΔT (T_c-T_o) คือ ช่วงอุณหภูมิที่เกิดเจลาทิไนเซชัน

3.5 องค์ประกอบของแป้งเมล็ดขนุน

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของแป้งเมล็ดขนุนที่จะนำมาใช้ในการทดลอง พบว่ามีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นคาร์โบไฮเดรตร้อยละ 79.12 ที่เหลือมีโปรตีนร้อยละ 9.42 ไขมันร้อยละ 1.01 เถ้าร้อยละ 7.18 และเยื่อใยร้อยละ 3.27 โดยน้ำหนักแห้ง ส่วนองค์ประกอบของแป้งสตาร์ชเมล็ดขนุนหลังผ่านการกำจัดโปรตีน พบว่ามีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นคาร์โบไฮเดรตร้อยละ 86.92 โดยน้ำหนัก และส่วนที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต ซึ่งส่วนใหญ่เป็นโปรตีนร้อยละ 3.15 โดยน้ำหนัก ที่เหลือเป็นไขมันร้อยละ 0.98 โดยน้ำหนัก เถ้าร้อยละ 6.98 โดยน้ำหนัก และเยื่อใยร้อยละ 1.97 โดยน้ำหนัก ดังตารางที่ 4 สอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhang และคณะ (2016) ที่พบว่าเมล็ดขนุนดิบมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นคาร์โบไฮเดรตร้อยละ 60-80 โปรตีนร้อยละ 8 ไขมันร้อยละ 1.5 และเถ้าร้อยละ 2.2 โดยน้ำหนัก [15]

ตารางที่ 4 องค์ประกอบของแป้งเมล็ดขนุน

องค์ประกอบ (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)	แป้งก่อนการกำจัดโปรตีน	แป้งหลังกำจัดโปรตีน
คาร์โบไฮเดรต	79.12±3.92	86.92±4.15
โปรตีน	9.42±0.46	3.15±0.15
ไขมัน	1.01±0.05	0.98±0.04
เถ้า	7.18±0.35	6.98±0.32
เยื่อใย	3.27±0.16	1.97±0.09

4. สรุปผล

เมล็ดขนุนเป็นส่วนที่เหลือทิ้งจากการบริโภค สามารถนำมาผลิตเป็นแป้งบริสุทธิ์สตาร์ชเมล็ดขนุนโดยการกำจัดโปรตีนจากผงแป้งเมล็ดขนุนโดยใช้เอนไซม์โปรตีเอสในการย่อยโปรตีนร่วมกับการใช้คลื่นอัลตราโซนิค ทำให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดโปรตีนเพิ่มมากขึ้น แป้งสตาร์ชเมล็ดขนุนที่ได้จะมีความบริสุทธิ์ของโพลิแซคคาไรด์สูงขึ้น จากงานวิจัยพบว่าสภาวะเหมาะสมในการกำจัดโปรตีน ที่อัตราส่วนเอมไซน์ 3.5 มิลลิลิตรต่อ 10 กรัมแป้ง อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการสกัด 15 นาที สามารถการกำจัดโปรตีนจากแป้งเมล็ดขนุน ได้ร้อยละ 64.42

องค์ประกอบทางเคมีของแป้งสตาร์ชเมล็ดขนุนที่ผ่านการกำจัดโปรตีน มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นคาร์โบไฮเดรตร้อยละ 86.92 โดยน้ำหนัก โปรตีนร้อยละ 3.15 โดยน้ำหนัก ไขมันร้อยละ 0.98 โดยน้ำหนัก เถ้าร้อยละ 6.98 โดยน้ำหนัก และเยื่อใยร้อยละ 1.97 โดยน้ำหนัก สามารถดูดซับน้ำได้ดี และให้ความข้นหนืดสูง 133.67 RVU อุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชันอยู่ในช่วง 81-92 องศาเซลเซียส

จากคุณสมบัติของแป้งสตาร์ชเมล็ดขนุนหลังผ่านการกำจัดโปรตีนดังกล่าวสามารถนำไปใช้เป็นสารให้ความข้นหนืดได้ดี จากการศึกษาของ Rengsutthi และคณะ (2011) ได้นำแป้งสตาร์ชเมล็ดขนุนเป็นสารให้ความข้นหนืดในซอสพริก พบว่าแป้งสตาร์ชเมล็ดขนุนสามารถให้ความข้นหนืดสูง เนื่องจากเม็ดแป้งมีขนาดเล็ก และประกอบด้วยอะไมโลสสูง นอกจากนั้นยังต้านทานการเปลี่ยนแปลงทางด้านความร้อนและทางกลระหว่างการปรุงอาหารได้ดี มีการแยกชั้นของของเหลวต่ำระหว่างการเก็บรักษา และเป็นที่ยอมรับทางด้านการประเมินประสาทสัมผัส [13]

5. เอกสารอ้างอิง

[1] Department of Agriculture, *Report on agricultural production statistics by planting area (All) Jackfruit crops, calendar year 2006-2007 the entire country,* Ministry of Agriculture and Cooperatives, 2008.

[2] A. Mukprasert, “Factors affecting the extraction of starch from jackfruit seeds,” *King Mongkut’s Agricultural Journal*, vol.20, no.2, pp. 1-8, May 2003.

[3] K. Srirot and K. Piyajomkwan, *Technology of Starch*, 4th ed., Bangkok : Kasetsart University, 2007.

[4] W. Qu, H. Ma, J. Jia, R. He, L. Luo and Z. Pan, “Enzymolysis kinetics and activities of ACE inhibitory peptides from wheat germ protein prepared with SFP ultrasound-assisted processing,” *Ultrasonics Sonochemistry,* vol.19, May 2012.

[5] S. Jain and A. K. Anal, “Optimization of extraction of functional protein hydrolysates from chicken egg shell membrane (ESM) by ultrasonic assisted extraction (UAE) and enzymatic hydrolysis,” *LWT - Food Science and Technology,* vol. 69, pp. 295-302, Jan 2016.

[6] K. Kumar, S. Srivastav and V.S. Sharanagat, “Ultrasound assisted extraction (UAE) of bioactive compounds from fruit and

vegetable processing by-products: A review," *Ultrasonics - Sonochemistry,* vol. 70, pp. 1-11, Sep 2021.

[7] AOAC. Official Methods of Analysis, 16th ed., Washington DC: The Association of Official Analytical Chemistry, 2000.

[8] D. C., Montgomery, *Design and Analysis of Experiment,* 5th ed., USA : John Wiley & Sons, 2001.

[9] N. Choomrit, *Engineering Statistics*, Bangkok : SE-EDUCATION Public Company Limited, 2011.

[10] M. Vergara-Barberán, M.J. Lerma-García, J.M. Herrero-Martínez and E.F. Simó-Alfonso, "Use of an Enzyme-Assisted Method to Improve Protein Extraction from Olive Leaves," *Food Chemistry.* Vol.169, pp. 28-33, 2015.

[11] J. Singh, S. Karmakar and R. Banerjee, "An integrated study using ultrasonic-assisted enzymatic extraction of hydrolysates from rice based distillery byproduct and its characterization" *Process Biochemistry*, vol. 119, pp. 128-139, May 2022.

[12] H. Xintian and W. XuLifeng, "Ultrasonic-assisted extraction of polysaccharides from coix seeds: Optimization, purification, and in vitro digestibility," *Food Chemistry*, vol. 374, pp. 1-10, April 2022.

[13] K. Rengsutthi and S. Charoenrein, "Physico-chemical properties of jackfruit seed starch (*Artocarpus heterophyllus*) and its application as a thickener and stabilizer in chilli sauce," *LWT - Food Science and Technology,* vol. 44, pp. 1309-1313, Jan 2011.

[14] L.S. Santos, R.C.F. Bonomo, R.C.I. Fontan, W.O. Santos and A.A.L. Silva, "Gelatinization temperature and acid resistance of jackfruit seed starch," *Journal of Food,* vol. 7, no.1, pp. 1-5, 2009.

[15] Y. Zhang, K. Zhu, S. He, L. Tan and X. Kong "Characterization of high purity starches isolated from five different jackfruit cultivars," *Food Hydrocolloids,* vol. 52, pp. 785–795, Jan 2016.

[16] O. S. Kittipongpatana and N. Kittipongpatana, "Preparation and physicochemical properties of modified jackfruit starches," *LWT - Food Science and Technology,* vol. 44, pp. 1766-1773, March 2011.

Srinakharinwirot University Engineering Journal (2023) 19(1), 79-88 วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีที่ 19 ฉบับที่ 1 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2566 – มีนาคม พ.ศ. 2567

Predictive Modeling of Non-Communicable Diseases Using Social Determinants of Health as Features: A Review of Existing Approaches

Peatiphat Bhoothookngoen Nattapong Sanchan
[1]School of Information Technology and Innovation, Bangkok University, Main Campus 9/1 Village No.5, Phaholyothin Road, Klong Nueng Sub-district, Klong Luang District, Pathumthani Province 12120, Thailand
*Corresponding author Email: peatiphat.bhoo@bumail.net
(Received: June 12, 2023; Revised: August 5, 2023 ; Accepted: December 18, 2023)

ABSTRACT

The paper presents a comprehensive review of the current state of predictive models for non-communicable diseases (NCDs) prevalence, specifically focusing on utilising social determinants of health (SDHs) as features for model training. The review's search strategy employed a thorough screening process to select sixteen studies for inclusion. These studies used supervised, unsupervised, and other algorithms to forecast NCDs' burden; the most frequently applied attributes were age, gender, Fasting Blood Sugar (FBS), physical inactivity, obesity, and smoking. The evaluation methods for the models included a range of metrics, such as Percent Accuracy, Receiver Operating Characteristic (ROC), and Hamming loss. The review concludes that predictive models have the potential to forecast NCD prevalence accurately and highlights the need for further research that focuses on incorporating SDH-related factors as features for model training.

Keyword: Non-communicable diseases, social determinants of health, prediction, machine learning.

1. Introduction

Non-communicable diseases (NCDs) are a significant public health issue that accounts for approximately 71% of global deaths, with low- and middle-income countries being disproportionately affected [1]. The burden of NCDs is increasing, primarily due to ageing populations, changes in lifestyle, and environmental factors such as air pollution and unhealthy diets. The prevention and management of NCDs require a comprehensive approach addressing the complex interplay of factors contributing to their development.

The social determinants of health (SDHs) are crucial in developing and managing NCDs. These determinants encompass a wide range of non-medical factors influencing health outcomes, including income, education, employment, food security, housing, and access to healthcare. Individuals with lower socioeconomic positions have a higher risk of developing NCDs and experiencing worse health outcomes. For

example, low-income individuals may face barriers to accessing healthy foods and adequate medical care, increasing the risk of developing chronic conditions such as diabetes or heart disease [2]. Research suggests that addressing SDHs is crucial for reducing the burden of NCDs and improving health equity. SDHs can impact health outcomes more significantly than lifestyle choices or healthcare, accounting for up to 55% of health outcomes [1]. Thus, a comprehensive approach to managing NCDs must address the underlying social determinants of health to reduce health disparities.

Forecasting models can be valuable in predicting NCDs prevalence and mortality rates, as they can consider the complex interplay of various factors, including SDHs. Such models can help policymakers and healthcare providers allocate resources and develop targeted interventions to manage NCDs effectively. Accurate forecasting models incorporating SDHs can help identify populations at higher risk of developing NCDs, allowing for the implementation of timely interventions and preventive measures. Managing NCDs requires a comprehensive approach that considers the complex interplay of factors contributing to their development, including social determinants of health. Forecasting models can be useful in predicting NCDs prevalence and mortality rates, especially when incorporating SDHs as an essential feature. Addressing the social determinants of health and developing accurate predictive models should help reduce health disparities and effectively manage NCDs.

This review aims to investigate the current state of predictive models in NCDs prevalence, specifically focusing on using SDHs as features for training.

2. Related Works

There is considerable evidence linking SDHs and NCDs, as demonstrated by several studies. Braveman [3] found that individuals residing in neighbourhoods with poor socio-economic conditions had higher rates of NCDs than those in more affluent neighbourhoods. Similarly, Vallejo-Torres and Morris [4] used the corrected concentration index to measure inequality across time and areas of England and found that smoking and obesity contribute to income-related inequality in health. In another study, Stringhini [5] observed that low socioeconomic status was associated with greater mortality, with smoking having the highest population-attributable fraction, followed by physical inactivity and socioeconomic status. Moreover, Hosseinpoor [6] found that wealth and education were inversely associated with the prevalence of certain NCDs, such as angina, arthritis, asthma, depression, and comorbidity, with the strongest inequalities reported for angina, asthma, and comorbidity.

Despite the evidence linking SDHs and NCDs, it remains to be seen whether predictive models have incorporated SDHs as features in their training. This is a gap in the literature, as SDHs could be essential in understanding and predicting the risk of NCDs. Furthermore, by ignoring SDHs, predictive models may only notice

critical features that could significantly impact the development of NCDs, resulting in less effective interventions and policies. Therefore, it is essential to investigate and incorporate SDHs in predictive models to enhance our understanding of NCDs.

3. Methodology

A systematic search strategy identified relevant literature from several databases, including PubMed, Scopus, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), and Random Search. Appropriate keywords and Medical Subject Headings (MeSH) terms related to NCDs, SDHs, predictive modelling, and review articles will be used. The search strategy will be refined using Boolean operators (AND, OR, NOT) to filter the results. Additionally, the reference lists of relevant articles will be examined to identify additional sources.

A screening process was employed to select articles for inclusion in this review. The first stage will involve screening the titles and abstracts of the articles, followed by a full-text review of the selected articles in the second stage. This review's inclusion criteria include peer-reviewed articles written in English and addressed the research question. The exclusion criteria include articles irrelevant to the topic, not primary research articles or limited scope.

A structured data extraction form was developed to extract relevant data from the selected articles. The extracted data included the author, year, study objectives, SDHs used, modelling approach, model evaluation, and outcome measures. The extracted data were synthesised according to themes such as the features used, the modelling techniques employed and the limitations and challenges of the models. The review's findings were summarised, and conclusions were drawn based on the evidence.

4. Results

The escalating incidence of NCDs has led to an increased focus on developing predictive models that accurately forecast their occurrence. This review presents a literature review to consolidate criteria-met predictive model studies for forecasting NCDs prevalence. The systematic search yielded thirty-two studies, of which fourteen were excluded for not meeting the model criteria or not being applied in NCDs studies. Two were excluded for not being machine learning modelling studies.

The remaining sixteen literature sources encompass various algorithms, encompassing supervised, unsupervised, and other methodologies (Table I). Each of these sources specifically examines the prediction of NCDs, either from a diagnostic or an epidemiologic standpoint. In these studies, the algorithms and attributes employed for developing NCDs prediction were thoroughly reviewed and extracted.

TABLE I

Algorithms Used by Category

Category	Algorithms
Supervised: Labeled training data to make predictions	ANN, SVM, LSTM, Logistic Regression, Decision Tree, Naive Bayes, Random Forest, KNN, AdaBoost
Unsupervised: Exploring unlabeled data to uncover patterns	K-means clustering, MAFIA Binary Relevance (BR), Classifier Chains (CC), RAkEL, ML-KNN
Other: Algorithms that might not fall into supervised or unsupervised	DeepSHAP, GBDT, GAMM, Fuzzy Logic IF-THEN rules, Dynamic population model, Combination of evolution tree model and Multilevel Modelling
Evaluation Method	% Accuracy, Algorithms comparison, 95% CI, Kappa statistics, RMSE, Precision, Recall, F-measure, ROC, and Hamming loss

These sixteen studies highlight the effectiveness of supervised learning techniques in predicting NCDs, emphasising the importance of algorithm selection and the potential for tailored interventions based on these predictions. Several studies have utilised supervised learning techniques to predict and model NCDs. For example, Ngom [7] employed artificial neural networks (ANN), support vector machines (SVM), decision trees, naive Bayes, logistic regression, and random forest. Equivalently, Keerthi Samhitha [8] and Mohan [9] used decision trees, K-nearest neighbour (KNN), K-means clustering, AdaBoost, and logistic regression in their supervised learning models. Hu [10] utilised gradient-boosting decision trees to predict non-communicable diseases and improve intervention programs in Bangladesh. Hu [11] employed a stacking ensemble model that combined linear regression, support vector regression, extreme gradient boosting, random forest, and gradient-boosting decision trees to predict daily hospital admissions for cardiovascular diseases. These studies demonstrate the effectiveness of supervised learning techniques in predicting and modelling NCDs.

Banu and Gomathy [12] utilised various unsupervised learning techniques, including K-means clustering, Maximal Frequent Itemset Algorithm (MAFIA), and C4.5 algorithm (supervised), to develop a disease forecasting system. Equivalently, Sangkatip and Phuboon-ob [13] employed multiple techniques, such as binary relevance (BR), classifier chains (CC), random k-labelsets (RAkEL), and multi-label k-nearest neighbour (ML-KNN), to classify non-communicable diseases. In contrast, Davagdorj [14] utilised a combination of both supervised and unsupervised learning techniques, including hybrid feature selection, eXtreme Gradient Boosting (XGBoost), logistic regression (supervised), random forest (supervised), KNN (supervised), Support Vector Machine - Recursive Feature Elimination (SVM-RFE) (supervised), Multi-

Layer Perceptron (MLP) (supervised), Neural Network (NN) (supervised), and random forest-based feature selection, in their learning models to predict smoking-induced NCDs.

And other various machine-learning techniques have been used to investigate NCDs. For example, George and Thomas [15] developed fuzzy logic-based IF-THEN rules to forecast peak demand days of chronic respiratory diseases. Hu [10] and Hu [11] employed machine learning techniques to examine NCDs. Hastings [16] utilised a dynamic population model with regression to project new-onset cardiovascular disease by socioeconomic group in Australia. Davagdorj [14] used an Explainable Artificial Intelligence Based Framework for NCDs Prediction, incorporating Deep Shapley Additive Explanations (DeepSHAP) to enhance interpretability. Wang and Wang [17] combined the evolution tree model and Multilevel Modelling (MLM) to model and predict global NCDs. Lastly, Stringhini [5] applied a generalised additive mixed model (GMM) to study NCDs risk factors in older adults. These studies collectively demonstrate the diverse machine-learning techniques employed in investigating NCDs.

Based on the reviewed literatures, the evaluation methods for the models included Percent Accuracy, Algorithms comparison, 95% Confident Interval (CI), Kappa statistics, Root Mean Square Error (RMSE), Precision, Recall, F-measure, Receiver Operating Characteristic (ROC), and Hamming loss. Five studies (table II) used non-individual factors as attributes, eleven used individual factors (Non-SDHs) [18][19][20][21], and the rest were excluded due to unidentified attributes [22]. The studies that used individual factors proposed the outcome as an individual diagnostic result based on individual input factors rather than SDHs-related factors. Examples of studies that used predictive models for forecasting NCDs include those by Wang and Wang [20], Stringhini [18], George and Thomas [4], Hastings [9], and Hu [12]. These studies employed different algorithms, attributes, and evaluation methods to obtain the desired outcomes.

Numerous recent studies have been conducted to develop predictive models for NCDs using a variety of attributes. Eleven of the nineteen studies reviewed selected individual factors as the primary training attribute, while five opted for non-individual factors (SDHs). The attributes used in the remaining two studies were not explicitly specified. Among the five studies that explored non-individual factors, Wang and Wang [20] investigated a predictive model for global NCDs deaths, incorporating socioeconomic factors, country development level, income at the country level, and the number of NCDs deaths. Their study proposed a novel algorithm that combined the evolution tree model and the Multilevel model (MLM) and evaluated its accuracy in fitting the data. Comparing it to linear regression (LR), the proposed algorithm achieved an R-squared value of 0.7932, while LR yielded 0.7005. These findings underscore the notable association between socioeconomic factors and NCD-related mortality.

In another study, Stringhini [18] examined the relationship between low socioeconomic status

and NCDs risk factors, such as diabetes, high alcohol intake, high blood pressure, obesity, physical inactivity, and smoking among older individuals in multi-cohort populations from 24 countries. The study used generalised additive mixed models (GAMM) for analysis and found an association between socioeconomic status and physical functioning. George and Thomas [4] developed a model for forecasting the peak demand days of chronic respiratory diseases using Fuzzy logic and applied environmental factors to predict the peak demand day. Hastings [9] deployed a dynamic population model to determine the new-onset cardiovascular disease (CVD) by socioeconomic group in Australia, which included parameters such as population, risk of new-onset CVD by socioeconomic quintile, and utility and found that 8.4% of people in the most disadvantaged quintile were at high risk of CVD. Finally, Hu [12] developed a predictive model for the number of CVD admissions using air quality, hospital admission, and meteorological data. The authors used the stacking model and Sequential Forward Floating Selection (SFFS) for feature selection in training the model. Their study found that the stacking model outperformed RF regarding MAE, RMSE, MAPE, and R square.

Among the various attributes, certain factors were frequently considered in the analysis. Age emerged as the most applied attribute, appearing seven times. Fasting Blood Sugar (FBS) and gender followed closely behind, each being utilised six times. Other attributes that garnered significant attention included Alcoholic habits, Blood pressure, Exercise-induced angina, Family history, Maximum heart rate achieved, Obesity, Physical inactivity, the slope of peak exercise ST segment, Smoking, and Thalassemia, all being taken into account four times. Several attributes were also considered moderate, appearing three times in the analysis. These included Serum Cholesterol, resting blood pressure, psychological stress, and Diabetes Mellitus (DM). Additionally, a few attributes were considered two times. All of these attributes were considered individual factors, risk factors for NCDs but not SDHs. While individual factors were the most commonly used attributes in the reviewed studies, insights from the five studies (Table II) using non-individual factors highlight the association between socioeconomic and environmental factors and NCDs. Therefore, crucial to consider various attributes when developing NCD predictive models. Hu's [12] study is particularly relevant to SDHs, and its model development method will be modified to be used in this experiment due to the similarity in study design and selected attributes.

5. Conclusion and Discussion

The objective of this review is to synthesise studies focusing on predictive models that forecast the prevalence of NCDs by utilising SDHs (non-individual factors) as features. A systematic search strategy was employed to identify relevant studies, resulting in a total of thirty-two studies. After applying inclusion and exclusion criteria, sixteen studies were considered eligible for inclusion in this review. Out of these, only five studies incorporated relevant SDHs as features in their models.

TABLE II
Summary of Forecast Model Literature Review for Studies Deploying Non-Individual Factors as Features

Authors	Features
Wang, Y., & Wang, J. (2020) [20]	Country type [income] and Country development stage, NCD death, Socio-economic status
Stringhini, S., et al. (2018) [18]	High alcohol intake, Low socioeconomic status, Current smoking, Hypertension, Diabetes Mellitus, Obesity, Physical inactivity
George, N., & Thomas, J. (2018) [4]	Nitrogen Dioxide, Outdoor temp, Particle matter, Relative humidity, Sulphur Dioxide, Wind speed
Hu, Z., et al. (2020) [12]	Air quality, Hospital admission, Meteorological
Hastings, K., et al. (2022) [9]	Population, Risk of new-onset CVS by socioeconomic quintile, Utility

The identified studies employed a variety of supervised, unsupervised, and other algorithms, with individual factors (Non-SDHs) being the most frequently used attributes. The studies also utilised various evaluation methods, including Percent Accuracy, Algorithms comparison, 95% CI, Kappa stat, RMSE, Precision, Recall, F measure, ROC, and Hamming loss. The review demonstrates the growing interest in utilising machine learning algorithms for predicting and diagnosing NCDs. Examples of studies that employed predictive models for forecasting NCDs include those by Wang and Wang [20], Stringhini [18], George and Thomas [4], Hastings [9], and Hu [12]. These studies employed various algorithms, attributes, and evaluation methods to obtain the desired outcomes. The review also reveals the effectiveness of supervised learning techniques, such as ANN, SVM, decision trees, naive Bayes, logistic regression, and random forest, in predicting and modelling NCDs. Moreover, unsupervised learning techniques, including K-means clustering, MAFIA, and the C4.5 algorithm, were employed in some studies to develop disease forecasting systems. From the results of this review, it is evident that the features considered SDHs have rarely been used. A few studies integrated SDHs (Table II) into their models in conjunction with non-SDH factors. However, no study exclusively employed SDHs to predict NCDs' prevalence directly. This perspective could be attributed to the prevailing focus of model developers on training models to predict NCDs diagnoses primarily based on individual factors, such as laboratory testing or other disease risk factors, rather than considering the broader epidemiological context.

The results of the study showed that the SDHs categorisation identifies some categories deployed as features in NCDs prediction (see Table II). However, several categories [21] still have not yet been deployed, especially for NCDs prevalence prediction. These categories include education, social protection, unemployment and job insecurity, working life conditions, food

insecurity, social inclusion, and non-discrimination.

Determining the accuracy and effectiveness of either comparing SDHs as features amongst themselves or pitting SDHs as features against others is a premature endeavour, supported by the following reasons. Firstly, several categories of SDHs have yet to be utilised as features. Secondly, the variations among studies encompass diverse deployed algorithms and selected features. Thirdly, the outcomes of this review indicate a scarcity of studies that have tested the approach of employing SDHs as features for predicting NCDs prevalence.

This study provided insights into the methods employed and outcomes achieved in recent studies focused on developing predictive models for NCDs. The findings of this review can inform future studies aimed at developing more accurate and effective predictive models for NCDs prevalence.

6. References

[1] World Health Organization (2022). Non communicable diseases, World Health Organization [online]. Available: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/noncommunicable-diseases

[2] World Health Organization (2019). Social Determinants of Health, World Health Organization. Available: https://www.who.int/health-topics/social-determinants-of-health

[3] P. Braveman, S. Egerter and D.R. Williams, “The Social Determinants of Health: Coming of age”, *Annual Review of Public Health*, vol. 32, no. 1, pp. 381–398, 2011.

[4] L. Vallejo-Torres and S. Morris, “The contribution of smoking and obesity to income-related inequalities in health in England”, Social Science & Medicine, vol. 71, no. 6, pp. 1189–1198, 2010.

[5] S. Stringhini, C. Carmeli, M. Jokela, M, Avendaño, P. Muennig, F. Guida et al., “Socioeconomic status and the 25 × 25 risk factors as determinants of premature mortality: A multicohort study and meta-analysis of 1·7 million men and women”, *The Lancet*, vol. 389, no. 10075, pp. 1229–1237, 2017.

[6] A.R. Hosseinpoor, N. Bergen, S. Mendis, S. Harper, E. Verdes, A. Kunst and S. Chatterji, “Socioeconomic inequality in the prevalence of noncommunicable diseases in low- and middle-income countries: Results from the World Health Survey”, *BMC Public Health*, vol.12, article number 474, 2012.

[7] F. Ngom, I. Fall, M. S. Camara and A. Bah, "A study on predicting and diagnosing non-communicable diseases: case of cardiovascular diseases," in *International Conference on Intelligent Systems and Computer Vision (ISCV)*, Fez, Morocco, 2020, pp. 1-8.

[8] B. Keerthi Samhitha, M.R. Sarika Priya, C. Sanjana, S.C. Mana and J. Jose, "Improving the Accuracy in Prediction of Heart Disease using Machine Learning Algorithms," in *International Conference on*

Communication and Signal Processing (ICCSP), Chennai, India, 2020, pp. 1326-1330.

[9] N. Mohan, V. Jain and G. Agrawal, "Heart Disease Prediction Using Supervised Machine Learning Algorithms," in *5th International Conference on Information Systems and Computer Networks (ISCON)*, Mathura, India, 2021, pp. 1-3.

[10] M. Hu, Y. Nohara, Y. Wakata, A. Ahmed, N. Nakashima and M. Nakamura, "Machine learning based prediction of non-communicable diseases to improving intervention program in Bangladesh", *European Journal for Biomedical Informatics*, vol.14, no.4, 2018.

[11] Z. Hu, H. Qiu, Z. Su, M. Shen and Z. Chen, "A Stacking Ensemble Model to Predict Daily Number of Hospital Admissions for Cardiovascular Diseases," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 138719-138729, 2020.

[12] M. A. N. Banu and B. Gomathy, "Disease Forecasting System Using Data Mining Methods," in *International Conference on Intelligent Computing Applications*, Coimbatore, India, 2014, pp. 130-133.

[13] W. Sangkatip and J. Phuboon-Ob, "Non-Communicable Diseases Classification using Multi-Label Learning Techniques," in *5th International Conference on Information Technology (InCIT)*, Chonburi, Thailand, 2020, pp. 17-21.

[14] K. Davagdorj, J. -W. Bae, V. -H. Pham, N. Theera-Umpon and K. H. Ryu, "Explainable Artificial Intelligence Based Framework for Non-Communicable Diseases Prediction," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 123672-123688, 2021.

[15] N. George and J. Thomas, "Forecasting the Peak Demand Days of Chronic Respiratory Diseases with Fuzzy Logic," in *International Conference on Circuits and Systems in Digital Enterprise Technology (ICCSDET)*, Kottayam, India, 2018, pp. 1-5.

[16] K. Hastings, C. Marquina, J. Morton, D. Abushanab, D. Berkovic, S. Talic, E. Zomer , D. Liew, Z. Ademi, "Projected new-onset cardiovascular disease by Socioeconomic Group in Australia", *Pharmacoeconomics*, vol.40, no.4, pp. 449–460, 2022.

[17] Y. Wang and J. Wang, "Modelling and prediction of Global Non-communicable diseases", *BMC Public Health*, vol.20, no.1, 2020.

[18] M. A. Alim, S. Habib, Y. Farooq and A. Rafay, "Robust Heart Disease Prediction: A Novel Approach based on Significant Feature and Ensemble learning Model," in *3rd International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET)*, Sukkur, Pakistan, 2020, pp. 1-5.

[19] K. Davagdorj, J. -W. Bae, V. -H. Pham, N. Theera-Umpon and K. H. Ryu, "Explainable Artificial Intelligence Based Framework for Non-Communicable Diseases Prediction," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 123672-123688, 2021.

[20] R. Ferdousi, M. A. Hossain and A. E. Saddik, "Early-Stage Risk Prediction of Non-Communicable Disease Using Machine Learning in Health CPS," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 96823-96837, 2021.

[21] S. Islam, N. Jahan and M. E. Khatun, "Cardiovascular Disease Forecast using Machine Learning Paradigms," in *Fourth International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC)*, Erode, India, 2020, pp. 487-490.

[22] M. Marmot and R. Bell, "Social Determinants and non-communicable diseases: Time for Integrated Action", *thebmj*, BMJ 2019; 364:l251.

Srinakharinwirot University Engineering Journal (2023) 19(1), 89-101 วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีที่ 19 ฉบับที่ 1 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2566 – มีนาคม พ.ศ. 2567

การศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตบราซเคลย์สำหรับการขึ้นรูปโดยการปั้น

A Study of Factors Affecting on Brass Clay Forming Process by Sculping

อนุวัฒน์ จุติลาภถาวร* ปาริฉัตร จำวงค์ กุลธิดา แซ่เจีย
ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
63 หมู่ 7 ถนน รังสิต-นครนายก อ.องครักษ์ จ.นครนายก 26120
Anuwat Jutilarptavorn* Parichat Jamwong Kultida Saejear
Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University
63 Moo 7 Rangsit-Nakhonnayok Road, Ongkharak , Nakhonnayok 26120, Thailand
*Corresponding author Email: anuwatju@g.swu.ac.th
(Received: September 15, 2023; Revised: December 22, 2023 ; Accepted: December 25, 2023)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกระบวนการขึ้นรูปบราซเคลย์โดยการปั้นได้ประยุกต์ใช้หลักการออกแบบการทดลองแบบเชิงแฟกทอเรียลและใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติในการวิเคราะห์และแปรผลเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการขึ้นรูปบราซเคลย์ ขั้นตอนในการศึกษาเริ่มจากการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องและควบคุมได้ มีอยู่ 4 ปัจจัย ได้แก่ ชนิดตัวประสาน เปอร์เซ็นต์ตัวประสานที่ใช้ในการผสม อุณหภูมิและระยะเวลาในการเผาซินเตอร์ จากนั้นนำผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกลที่ได้มาวิเคราะห์และทำการจัดลำดับเงื่อนไขที่มีความเหมาะสมเพื่อเลือกเงื่อนไขในการขึ้นรูปบราซเคลย์โดยการปั้น จากผลการวิเคราะห์และจัดลำดับเงื่อนไขที่เหมาะสมในการขึ้นรูปบราซเคลย์ พบว่าเงื่อนไขที่มีความเหมาะสมในการขึ้นรูปบราซเคลย์โดยการปั้นคือชนิดตัวประสานคาร์บอกซิลเมทิลเซลลูโลส เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน 1% เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งเงื่อนไขดังกล่าวมีค่าการหดตัวเชิงปริมาตรหลังการขึ้นรูปร้อยละ 0.7 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปและหลังการอบกำจัดตัวประสานมีความคงรูปของชิ้นงานดี ไม่เกิดการแยกชั้นหรือรอยแตก หลังการเผาซินเตอร์ชิ้นงานมีการผสานตัวสมบูรณ์ทั่วทั้งชิ้นงาน ค่าการหดตัวเชิงปริมาตรหลังการเผาซินเตอร์ร้อยละ 17.4 ค่าความหนาแน่นเท่ากับ 5.31 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และมีค่าความแข็งวิกเกอร์ 37.73 HV โดยผลจากการทดลองนำเงื่อนไขดังกล่าวไปทำการขึ้นรูปโดยการปั้น พบว่าเนื้อเคลย์มีความยืดหยุ่น สามารถปั้นขึ้นรูปได้ดีและยังสามารถปั้นรูปทรงลักษณะต่างๆ อีกทั้งสามารถใช้เทคนิคการปั้ม การตัด การรีดและการปะติดในการขึ้นรูปได้

คำสำคัญ: การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล การขึ้นรูปผงโลหะ เมทัลเคลย์

ABSTRACT

This research aimed to study the factor affecting the brass clay forming process by sculpting and applies with the method of factorial design of experiment and using the statistical program to analyze and transform the result to find the optimal conditions for forming brass clay. The study starts

with learning about controllable factors. The four independent variables were the type of binders, percentage of binders used in mixing, temperature and duration of sintering. The results of physical and mechanical properties obtained were analyzed and sorted the optimal condition to select the most optimal condition for forming the brass clay. It was found that the most optimal condition for forming by sculpting is carboxymethylcellulose 1% sintered at 900 Celsius for 1 hour. This condition has volume shrinkage after forming about 0.76%. The physical characteristics of workpieces after forming and removing the binder have good stability, no separation of layers or cracks. After sintering, the workpiece has completely combined and the volume shrinkage was 17.4%. The density was 5.31 g/cm^3 and the surface hardness was 37.73 HV. The result of applying the aforementioned conditions by sculpting shows that the clay has the flexibility and be able to sculpt to any shape easily. Besides, it can be applied together with stamping, cutting, rolling, patching and forming.

Keyword: Factorial design, powder metallurgy, metal clay.

1. บทนำ

กระบวนการโลหะผง (Powder Metallurgy Process) [1] คือขั้นตอนการนำผงโลหะมาทำให้เกิดประโยชน์ด้วยวิธีทางกลและความร้อน ขั้นตอนหลักของกระบวนการโลหะผงประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ได้แก่ การผสมผงโลหะ การอัดขึ้นรูปผงโลหะและการเผาซินเตอร์ ปัจจุบันอุตสาหกรรมการขึ้นรูปโลหะผงถูกนำมาใช้ประโยชน์ในแวดวงอุตสาหกรรมมากมายโดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมไฟฟ้าลิเล็กทอนิกส์ และเป็นหนึ่งในกระบวนการขึ้นรูปโลหะที่ได้รับความสนใจและกำลังเติบโตอย่างต่อเนื่องในประเทศไทย เนื่องด้วยเป็นเทคโนโลยีขึ้นรูปโลหะที่ประหยัดเวลาและวัตถุดิบแบบใกล้รูปร่างสุดท้าย (Near Net Shape) สามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีความซับซ้อนได้อย่างมีความเที่ยงตรงสูง ช่วยลดต้นทุนการผลิตและราคาต่อชิ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการขึ้นรูปโลหะแบบอื่นๆ อีกทั้งยังเป็นกระบวนการที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งวัสดุที่ได้รับความนิยมในการขึ้นรูปโลหะผงได้แก่ เหล็ก ทองแดง อะลูมินัม ดีบุก นิกเกิล ไทเทเนียมและโลหะทนความร้อน เช่น ไนโอเบียม ทังสเตน แทนทาลัม เป็นต้น

เมทัลเคลย์ [2-5] คือ วัสดุที่เกิดจากการผสมผงโลหะที่มีอนุภาคขนาดเล็ก ตัวประสานอินทรีย์ (Organic Binder) และน้ำ ทำให้มีลักษณะคล้ายดินเหนียว สามารถปั้นขึ้นรูปได้ด้วยมือและอุปกรณ์ปั้นอย่างง่าย โดยไม่ต้องใช้เครื่องจักรหรือเครื่องหล่อโลหะ หลังจากได้รูปทรงที่ต้องการแล้วจึงปล่อยทิ้งไว้ให้แห้ง จากนั้นนำไปให้ความร้อนในเตาอบเพื่อให้น้ำและตัวประสานระเหยออกจากชิ้นงาน อนุภาคขนาดเล็กของโลหะจะเชื่อมติดกันกลายเป็นโลหะ (Bulk Metal) โดยสมบูรณ์ ทำให้ได้ชิ้นงานโลหะตามที่ขึ้นรูป เมทัลเคลย์จึงเป็นวิธีการขึ้นรูปโลหะประเภทหนึ่งที่เหมาะสมกับชิ้นงานที่มีรูปแบบหลากหลาย เช่น เครื่องประดับ เครื่องเรือน อาวุธ พระพุทธรูป เป็นต้น ซิลเวอร์เคลย์ (Silver Clay) ก็เป็นอีกวัสดุชนิดหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องประดับเพื่อลดปัญหาและข้อจำกัดที่เกิดจากการขึ้นรูปโดยวิธีการอื่นๆ เช่น การหล่อ ด้วยสมบัติของวัสดุของการขึ้นรูปเครื่องประดับได้ง่าย และสามารถปรับเปลี่ยนแก้ไขรูปทรงได้โดยไม่จำเป็นต้องผ่านกระบวนการขึ้นรูปหลายขั้นตอน จึงทำให้สามารถสร้างสรรค์ผลงานที่มีความซับซ้อนได้หลากหลายในเวลาที่ลดลง การศึกษาและวิเคราะห์ถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตซิล

เวอร์เคลย์ที่ใช้ในงานผลิตเครื่องประดับมีหลากหลายงานวิจัย [7-10]

แต่ข้อจำกัดของซิลเวอร์เคลย์ด้านราคาต้นทุนที่แพง ทำให้ไม่มีการใช้อย่างแพร่หลายและไม่เหมาะกับงานเครื่องประดับราคาถูก งานวิจัยนี้มีแนวคิดที่จะใช้ผงโลหะทองเหลือง มาแทนผงโลหะเงิน ซึ่งเรียกว่า บราซเคลย์ (Brass Clay) วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกระบวนการผลิต บราซเคลย์ และเงื่อนไขที่เหมาะสมในการผลิตบราซเคลย์สำหรับการขึ้นรูปโดยการปั้น

2. วิธีการดำเนินการทดลอง

2.1 การออกแบบการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาหาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตบราซเคลย์และเงื่อนไขที่เหมาะสมในการผลิตบราซเคลย์สำหรับการขึ้นรูปโดยการปั้น วัสดุที่ใช้คือผงทองเหลืองที่มีส่วนผสมทองแดง 80 เปอร์เซ็นต์และสังกะสี 20 เปอร์เซ็นต์ เกรด FBro 62 ที่มีขนาดน้อยกว่า 53 ไมครอนและตัวประสานคาร์บอกซิลเมทิลเซลลูโลส (Carboxyl Methyl Cellulose) และพอลิเอทธีลีนไกลคอล (Polyethylene Glycol) 30 เปอร์เซ็นต์ ผสมกับแป้ง (Flour) 70 เปอร์เซ็นต์ ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะเป็นทรงกระบอก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร ความหนา 10 มิลลิเมตร

สำหรับงานวิจัยนี้ใช้วิธีการออกแบบการทดลองเป็นแบบแฟกทอเรียล [6] ซึ่งเป็นการทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับ (Level) ของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้น โดยงานวิจัยนี้มีตัวแปรการทดสอบ 2 ประเภท ได้แก่ ตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม ตัวแปรอิสระประกอบด้วย 4 ปัจจัยหลัก ได้แก่ ชนิดตัวประสาน มี 2 ชนิด เปอร์เซ็นต์ตัวประสานมี 3 ระดับ อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาซินเตอร์มี 2 ระดับ ระยะเวลาในการเผาซินเตอร์มี 3 ระดับ รายละเอียดดังตารางที่ 1 ใช้วิธีวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ตัวแปรตามในโครงงานนี้คือ เปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรหลังการขึ้นรูป เปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรหลังการเผาซินเตอร์ ค่าความหนาแน่น ค่าปริมาตรรูพรุนเปิด และค่าความแข็งวิกเกอร์ของชิ้นงานบราซเคลย์ โดยทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับโครงงาน คณะผู้วิจัยได้ทำการทดลองทั้งสิ้น 72 การทดลอง

ตารางที่ 1 ปัจจัยและระดับที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย (Factors)	ระดับ (Level)
ชนิดตัวประสาน	CMC
	PEG + Flour
เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน	1%
	2%
	3%
อุณหภูมิในการเผาซินเตอร์ (องศาเซลเซียส)	800
	900
ระยะเวลาในการเผาซินเตอร์ (ชั่วโมง)	1
	2
	3

2.2 ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ

คณะผู้วิจัยได้ทำการออกแบบชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองโดยการเลือกชิ้นงานลักษณะรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร ความหนา 10 มิลลิเมตร โดยควบคุมขนาดของชิ้นงานด้วยการอัดลงแบบได้ชิ้นงานดังรูปที่ 1

รูปที่ 1 ตัวอย่างชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ

2.3 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

1. ทดลองผสมบราซเคย์ตามอัตราส่วนที่กำหนด โดยกำหนดให้ใช้ผงทองเหลืองเงื่อนไขละ 10 กรัมอย่างละ 2 ชิ้นงาน (ดังตารางที่ 2)

ตารางที่ 2 อัตราส่วนที่ใช้ในการผสมบราซเคลย์

เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน	ตัวประสาน	น้ำหนักตัวประสาน (g)
1%	CMC	0.10
	PEG + Flour	0.10
2%	CMC	0.20
	PEG + Flour	0.20
3%	CMC	0.31
	PEG + Flour	0.31

2. หลังปล่อยชิ้นงานให้แห้ง ทำการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป

3. ทดสอบการหดตัวเชิงปริมาตรหลังการขึ้นรูปโดยคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์การหดตัวได้จากสมการ (1)

$$\text{Volume of Shrinkage} = \left(\frac{V_1 - V_2}{V_1}\right) \times 100 \quad (1)$$

โดยที่

V_1 = ปริมาตรของแม่พิมพ์ที่ใช้ในการขึ้นรูป (cm^3)

V_2 = ปริมาตรของชิ้นงานบราซเคลย์ (cm^3)

4. อบกำจัดตัวประสานที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที

5. ตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลังอบกำจัดตัวประสาน

6. เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสและ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง 2 ชั่วโมงและ 3 ชั่วโมง

7. ทดสอบการหดตัวเชิงปริมาตรหลังการเผาซินเตอร์

8. ทดสอบความหนาแน่นแบบมวลรวม อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C373 โดยการนำชิ้นงานไปแช่ในน้ำ 24 ชั่วโมง นำชิ้นงานอิ่มน้ำไปชั่งน้ำหนักในอากาศและในน้ำ จากนั้นนำชิ้นงานอิ่มน้ำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมงและทำการชั่งน้ำหนักชิ้นงานอบแห้ง คำนวณจากสมการ (2)

$$\text{Density} = \frac{W_3}{W_2 - W_1} \times \rho_{water} \quad (g/cm^3) \quad (2)$$

โดยที่

W_1 = น้ำหนักของชิ้นงานอิ่มน้ำ ชั่งในน้ำ (g)

W_2 = น้ำหนักของชิ้นงานอิ่มน้ำชั่งในอากาศ (g)

W_3 = น้ำหนักของชิ้นงานหลังอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (g)

ρ_{water} = ความหนาแน่นของน้ำมีค่าเท่ากับ 1 g/cm^3

9. ทดสอบปริมาตรรูพรุนเปิด คำนวณได้จากสมการ (3)

$$\text{Volume open pores} = \frac{W_1 - W_2}{\rho_{water}} \quad (cm^3) \quad (3)$$

โดยที่

W_1 = น้ำหนักของชิ้นงานอิ่มน้ำ ชั่งในอากาศ (g)

W_2 = น้ำหนักของชิ้นงานหลังอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (g)

ρ_{water} = ความหนาแน่นของน้ำมีค่าเท่ากับ 1 g/cm^3

10. ทดสอบการผสานตัวสมบูรณ์โดยใช้เทคนิคการเลื่อยชิ้นงานตามแนวยาว

11. ทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ คำนวณได้จากสมการ (4)

$$HV = \frac{1.854P}{d^2} \quad (kgf/mm^2) \quad (4)$$

โดยที่

HV = ค่าความแข็งแบบ Vickers (kgf/mm^2)

P = แรงกด (kgf)

d = เส้นทแยงมุมของ d_1 และ d_2 เฉลี่ย (mm.)

12. ตรวจสอบรูพรุนโดยใช้กล้องจุลทรรศน์

3. ผลการดำเนินการทดลอง

3.1 ผลการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป

จากการสังเกตลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป พบว่า CMC ทุกเปอร์เซ็นต์ตัวประสาน มีความคงตัวของชิ้นงาน ความเป็นเนื้อเดียวกันและมีความสามารถในการขึ้นรูป และพบว่า PEG + Flour ทุกเปอร์เซ็นต์ตัวประสาน มีความคงตัวของชิ้นงาน ความเป็นเนื้อเดียวกัน แต่ไม่มีความสามารถในการขึ้นรูป เนื่องจากมีความร่วนเกินไปที่จะนำไปขึ้นรูป

3.2 ผลการทดสอบการหดตัวเชิงปริมาตรหลังการขึ้นรูป

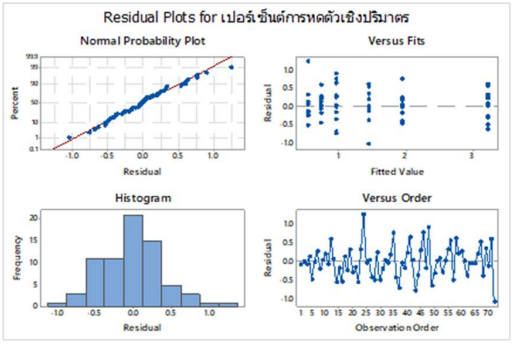
หลังจากชิ้นงานแห้งแล้ว นำชิ้นงานมาวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงโดยใช้เวอร์เนียร์คาลิเปอร์เพื่อคำนวณปริมาตรของชิ้นงานและนำมาคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรหลังการขึ้นรูป (ดังตารางที่ 3)

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรหลังการขึ้นรูปชิ้นงาน

ชนิดตัวประสาน	ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรหลังการขึ้นรูป (%)		
	1%	2%	3%
CMC	0.76	1.88	3.25
PEG+Flour	0.51	1.02	1.42

3.2.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยใช้ Residual Plots สำหรับค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรหลังการขึ้นรูป (ดังรูปที่ 2) สรุปได้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงปกติ มีการกระจายอย่างสม่ำเสมอแสดงว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระ และข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน



รูปที่ 2 ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

3.2.2 การวิเคราะห์ความสามารถในการอธิบายความเหมาะสมของแบบจำลอง

พิจารณาจากค่า Adjust R Square มีค่าเท่ากับ 0.81 หมายความว่าตัวแปรอิสระ (ชนิดตัวประสานและเปอร์เซ็นต์ของตัวประสาน) สามารถอธิบายความผันแปรหรือการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตาม (เปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรหลังการขึ้นรูป) ได้ร้อยละ 81.85 แสดงว่าแบบจำลองมีความเหมาะสมในการอธิบายข้อมูล (ดังรูปที่ 3)

3.2.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรหลังการขึ้นรูปที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 พบว่าค่า P-Value ของเทอมกำลังสองมีค่า เท่ากับ 0.75 และเทอมอันตรกิริยามีค่าเท่ากับ 0.00 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่านัยสำคัญทางสถิติที่กำหนด ดังนั้นจึงสามารถใช้แบบจำลองอันตรกิริยาในการทำนายเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรหลังการขึ้นรูป (ดังรูปที่ 3) ซึ่งจากค่า P-Value ของปัจจัยชนิดตัวประสาน และเปอร์เซ็นต์ตัวประสาน มีค่าเท่ากับ 0.00 น้อยกว่าค่านัยสำคัญทางสถิติที่กำหนด แสดงให้เห็นว่าปัจจัยทั้งสองต่างส่งผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรหลังการขึ้นรูป (ดังรูปที่ 4)

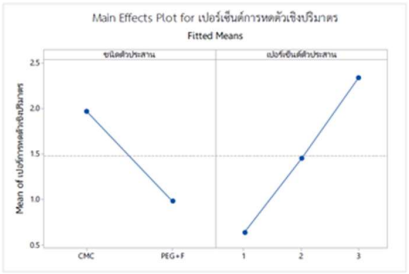
Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	4	59.5088	14.8772	81.06	0.000
Linear	2	51.9794	25.9897	141.61	0.000
ชนิดตัวประสาน	1	17.3792	17.3792	94.70	0.000
เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน	1	34.6002	34.6002	188.53	0.000
Square	1	0.0188	0.0188	0.10	0.750
เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน*เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน	1	0.0188	0.0188	0.10	0.750
2-Way Interaction	1	7.5106	7.5106	40.92	0.000
ชนิดตัวประสาน*เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน	1	7.5106	7.5106	40.92	0.000
Error	67	12.2963	0.1835		
Lack-of-Fit	1	0.1333	0.1333	0.72	0.398
Pure Error	66	12.1630	0.1843		
Total	71	71.8051			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.428401	82.88%	81.85%	80.26%

รูปที่ 3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรหลังการขึ้นรูป



รูปที่ 4 กราฟแสดงผลกระทบหลักที่มีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรหลังการขึ้นรูปในแต่ละปัจจัย

4.2.4 การหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด

จากการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมโดยใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer พบว่าค่าปัจจัยที่เหมาะสมมี 5 อันดับเรียงจากค่าเปอร์เซ็นต์หดตัวเชิงปริมาตรน้อยไปมาก โดยปัจจัยที่มีความเหมาะสมมากที่สุดในการขึ้นรูป คือ ชนิดตัวประสาน PEG + Flour เปอร์เซ็นต์ตัวประสานที่ใช้ในการผสม 1% ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรหลังการขึ้นรูปเท่ากับ 0.509 โดยมีค่าความพึงพอใจรวมเท่ากับ 0.867 (ดังรูปที่ 5)

4.3 ผลการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลังอบกำจัดน้ำและตัวประสาน

จากการสังเกตลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลังการอบไล่น้ำและกำจัดตัวประสารพบว่า CMC ทุกเปอร์เซ็นต์ตัวประสาน มีความคงตัวของชิ้นงาน และมีความเป็นเนื้อเดียวกัน แต่ PEG + Flour ทุกเปอร์เซ็นต์ตัวประสาน มีความเป็นเนื้อเดียวกัน แต่ไม่มีความคงตัวของชิ้นงาน เนื่องจากชิ้นงานหลังการอบไล่น้ำและกำจัดตัวประสาน มีความเปราะสูง จึงแตกได้ง่าย และชิ้นงานยังมีความร่วนซุย จึงต้องใช้ความระมัดระวังในสัมผัสชิ้นงานเป็นอย่างมาก

Response Optimization: เปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตร

Parameters

Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
เปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตร	Minimum		0	3.83404	1	1

Solutions

Solution	ชนิดตัวประสาน	เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน	เปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตร Fit	Composite Desirability
1	2	1	0.50971	0.867058
2	1	1	0.76203	0.801247
3	2	2	1.02020	0.733911
4	2	3	1.41662	0.630515
5	1	2	1.88111	0.509366

รูปที่ 5 ลำดับค่าปัจจัยที่เหมาะสมพิจารณาจากค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรหลังการขึ้นรูป

4.4 ผลการคำนวณเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรหลังการเผาซินเตอร์

หลังจากเผาซินเตอร์ตามอุณหภูมิและระยะเวลาที่กำหนด นำชิ้นงานมาวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงโดยใช้เวอร์เนียร์คาลิเปอร์ในการวัดเพื่อคำนวณปริมาตรของชิ้นงานและนำมาคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรหลังการเผาซินเตอร์ (ดังรูปที่ 6)

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรหลังการเผาซินเตอร์ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 พบว่าค่า P-Value ของเทอมกำลังสองมีค่าเท่ากับ 0.107 และเทอมอันตรกิริยามีค่าเท่ากับ 0.00 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่านัยสำคัญทางสถิติที่กำหนด ดังนั้นจึงสามารถใช้แบบจำลองอันตรกิริยาในการทำนายเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรหลังการเผาซินเตอร์ (ดังรูปที่ 7) ซึ่งจากค่า P-Value พบว่าปัจจัยระหว่างชนิดตัวประสานและเปอร์เซ็นต์ตัวประสาน ปัจจัยระหว่างชนิดตัวประสานและอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาซินเตอร์ ปัจจัยระหว่างชนิดตัวประสานและระยะเวลาที่ใช้ในการเผาซิน

เตอร์ ปัจจัยระหว่างอุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในการเผาซินเตอร์ มีค่าเท่ากับ 0.00 น้อยกว่าค่านัยสำคัญทางสถิติที่กำหนด แสดงให้เห็นว่าปัจจัยร่วมทั้งสี่ความสัมพันธ์นี้ต่างส่งผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรหลังการเผาซินเตอร์

4.3 ผลการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลังอบกำจัดน้ำและตัวประสาน

จากการสังเกตลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลังการอบไล่น้ำและกำจัดตัวประสารพบว่า CMC ทุกเปอร์เซ็นต์ตัวประสาน มีความคงตัวของชิ้นงาน และมีความเป็นเนื้อเดียวกัน แต่ PEG + Flour ทุกเปอร์เซ็นต์ตัวประสาน มีความเป็นเนื้อเดียวกัน แต่ไม่มีความคงตัวของชิ้นงาน เนื่องจากชิ้นงานหลังการอบไล่น้ำและกำจัดตัวประสาน มีความเปราะสูง จึงแตกได้ง่าย และชิ้นงานยังมีความร่วนซุย จึงต้องใช้ความระมัดระวังในสัมผัสชิ้นงานเป็นอย่างมาก

4.4 ผลการคำนวณเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรหลังการเผาซินเตอร์

หลังจากเผาซินเตอร์ตามอุณหภูมิและระยะเวลาที่กำหนด นำชิ้นงานมาวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงโดยใช้เวอร์เนียร์คาลิเปอร์ในการวัดเพื่อคำนวณปริมาตรของชิ้นงานและนำมาคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรหลังการเผาซินเตอร์ (ดังรูปที่ 6)

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรหลังการเผาซินเตอร์ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 พบว่าค่า P-Value ของเทอมกำลังสองมีค่าเท่ากับ 0.107 และเทอมอันตรกิริยามีค่าเท่ากับ 0.00 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่านัยสำคัญทางสถิติที่กำหนด ดังนั้นจึงสามารถใช้แบบจำลองอันตรกิริยาในการทำนายเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรหลังการเผาซินเตอร์ (ดังรูปที่ 7) ซึ่งจากค่า P-Value พบว่าปัจจัยระหว่างชนิดตัวประสานและเปอร์เซ็นต์ตัวประสาน ปัจจัยระหว่างชนิดตัวประสานและอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาซินเตอร์ ปัจจัยระหว่างชนิดตัวประสานและระยะเวลาที่ใช้ในการเผาซินเตอร์ ปัจจัยระหว่างอุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในการเผาซินเตอร์ มีค่าเท่ากับ 0.00 น้อยกว่าค่านัยสำคัญทางสถิติที่กำหนด แสดงให้เห็นว่าปัจจัยร่วมทั้งสี่ความสัมพันธ์นี้ต่างส่งผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรหลังการเผาซินเตอร์

อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาซินเตอร์ (องศาเซลเซียส)	ชนิดตัวประสาน	เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน	ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรหลังการเผาซินเตอร์ (%)		
			ระยะเวลา 1 ชั่วโมง	ระยะเวลา 2 ชั่วโมง	ระยะเวลา 3 ชั่วโมง
800 องศาเซลเซียส	CMC	1%	1.69	2.93	3.67
		2%	3.55	4.30	5.53
		3%	4.73	5.51	6.96
	PEG + Flour	1%	1.69	2.33	3.03
		2%	2.07	2.84	3.81
		3%	2.86	3.39	4.00
900 องศาเซลเซียส	CMC	1%	17.40	23.24	24.85
		2%	18.42	24.35	27.73
		3%	20.08	25.96	28.72
	PEG + Flour	1%	4.69	15.85	23.24
		2%	4.03	13.54	19.35
		3%	3.33	10.66	17.55

รูปที่ 6 ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรหลังการเผาซินเตอร์

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	12	5847.90	487.33	287.31	0.000
Linear	4	4983.30	1245.83	734.51	0.000
ชนิดตัวประสาน	1	688.89	688.89	406.15	0.000
เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน	1	6.95	6.95	4.10	0.047
อุณหภูมิ	1	3701.02	3701.02	2182.02	0.000
ระยะเวลา	1	586.44	586.44	345.75	0.000
Square	2	7.88	3.94	2.32	0.107
เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน*เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน	1	0.01	0.01	0.01	0.932
ระยะเวลา*ระยะเวลา	1	7.87	7.87	4.64	0.035
2-Way Interaction	6	856.72	142.79	84.18	0.000
ชนิดตัวประสาน*เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน	1	61.75	61.75	36.40	0.000
ชนิดตัวประสาน*อุณหภูมิ	1	407.60	407.60	240.31	0.000
ชนิดตัวประสาน*ระยะเวลา	1	35.84	35.84	21.13	0.000
เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน*อุณหภูมิ	1	19.00	19.00	11.20	0.001
เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน*ระยะเวลา	1	1.19	1.19	0.70	0.406
อุณหภูมิ*ระยะเวลา	1	331.35	331.35	195.35	0.000
Error	59	100.07	1.70		
Lack-of-Fit	23	96.04	4.18	37.30	0.000
Pure Error	36	4.03	0.11		
Total	71	5947.98			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1.30236	98.32%	97.98%	97.35%

รูปที่ 7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรหลังการเผาซินเตอร์

จากการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมโดยใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer พบว่าค่าปัจจัยที่เหมาะสมมี 5 อันดับเรียงจากค่าเปอร์เซ็นต์หดตัวเชิงปริมาตรน้อยไปมาก โดยค่าที่มีความเหมาะสมมากที่สุดในการขึ้นรูป คือ ชนิดตัวประสานที่ 2 หรือ PEG + Flour เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน 1% เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรหลังการเผาซินเตอร์เท่ากับ 1.68 โดยมีค่าความพึงพอใจรวมเท่ากับ 0.993 (ดังรูปที่ 8)

Response Optimization: เปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตร

Parameters

Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
เปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตร	Minimum		1.50443	29.0867	1	1

Solutions

Solution	ชนิดตัวประสาน	เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน	อุณหภูมิ	ระยะเวลา	เปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตร Fit	Composite Desirability
1	2	1	800	1	1.68912	0.993304
2	1	1	800	1	1.69498	0.993091
3	2	2	800	1	2.06721	0.979596
4	2	1	800	2	2.33048	0.970051
5	2	2	800	2	2.84230	0.951495

รูปที่ 8 ลำดับค่าปัจจัยที่เหมาะสมพิจารณาจากค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรหลังการเผาซินเตอร์

4.5 ผลการทดสอบความหนาแน่น

หลังจากทำการทดสอบการหดตัวหลังการเผาซินเตอร์แล้ว นำชิ้นงานไปแช่น้ำ เป็นเวลา 24 ชั่วโมงจากนั้นนำชิ้นงานที่อิ่มน้ำไปชั่งน้ำหนักในอากาศและชั่งในน้ำ นำชิ้นงานไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงนำชิ้นงานมาชั่งน้ำหนักในอากาศ นำค่าที่ได้มาคำนวณค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน (ดังรูปที่ 9)

อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาซินเตอร์ (องศาเซลเซียส)	ชนิดตัวประสาน	เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน	ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นของชิ้นงาน (g/cm^3)		
			ระยะเวลา 1 ชั่วโมง	ระยะเวลา 2 ชั่วโมง	ระยะเวลา 3 ชั่วโมง
800 องศาเซลเซียส	CMC	1%	4.40	4.24	4.36
		2%	4.32	4.29	4.72
		3%	4.11	4.26	4.15
	PEG + Flour	1%	4.44	4.53	4.71
		2%	4.28	4.36	4.58
		3%	4.14	4.38	4.45
900 องศาเซลเซียส	CMC	1%	5.31	5.92	6.10
		2%	5.39	5.82	5.89
		3%	5.18	5.37	5.78
	PEG + Flour	1%	4.75	5.37	5.82
		2%	4.55	5.22	5.57
		3%	4.37	4.56	4.72

รูปที่ 9 ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นของชิ้นงาน

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความหนาแน่นที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 พบว่าค่า P-Value ของเทอมกำลังสองมีค่า เท่ากับ 0.132 และเทอมอันตรกิริยามีค่าเท่ากับ 0.00 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่านัยสำคัญทางสถิติที่กำหนด ดังนั้นจึงสามารถใช้แบบจำลองอันตรกิริยาในการทำนายค่าความหนาแน่นได้ (ดังรูปที่ 10) เมื่อพิจารณาปัจจัยระหว่างชนิดตัวประสานและอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาซินเตอร์ที่มีค่า P-Value เท่ากับ 0.00 ปัจจัยระหว่างเปอร์เซ็นต์ตัวประสานและอุณหภูมิใช้ในการเผาซินเตอร์ที่มีค่า P-Value เท่ากับ 0.007 และปัจจัยระหว่างอุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในการเผาซินเตอร์ที่มีค่า P-Value เท่ากับ 0.00 ซึ่งน้อยกว่าค่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงให้เห็นว่าปัจจัยร่วมทั้งสามความสัมพันธ์นี้มีผลต่อค่าความหนาแน่น

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	12	25.8120	2.1510	45.93	0.000
Linear	4	21.5307	5.3827	114.95	0.000
ชนิดตัวประสาน	1	1.2813	1.2813	27.36	0.000
เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน	1	1.6834	1.6834	35.95	0.000
อุณหภูมิ	1	15.9255	15.9255	340.09	0.000
ระยะเวลา	1	2.6406	2.6406	56.39	0.000
Square	2	0.1967	0.0983	2.10	0.132
เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน*เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน	1	0.1885	0.1885	4.03	0.049
ระยะเวลา*ระยะเวลา	1	0.0082	0.0082	0.17	0.678
2-Way Interaction	6	4.0846	0.6808	14.54	0.000
ชนิดตัวประสาน*เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน	1	0.1921	0.1921	4.10	0.047
ชนิดตัวประสาน*อุณหภูมิ	1	2.5925	2.5925	55.36	0.000
ชนิดตัวประสาน*ระยะเวลา	1	0.0837	0.0837	1.79	0.186
เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน*อุณหภูมิ	1	0.3695	0.3695	7.89	0.007
เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน*ระยะเวลา	1	0.0798	0.0798	1.70	0.197
อุณหภูมิ*ระยะเวลา	1	0.7671	0.7671	16.38	0.000
Error	59	2.7628	0.0468		
Lack-of-Fit	23	0.9098	0.0396	0.77	0.744
Pure Error	36	1.8530	0.0515		
Total	71	28.5748			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.216396	90.33%	88.36%	85.39%

รูปที่ 10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความหนาแน่น

จากการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมโดยใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer พบว่าค่าปัจจัยที่เหมาะสมมี 5 อันดับเรียงจากค่าความหนาแน่นมากไปน้อย โดยค่าที่มีความเหมาะสมมากที่สุด คือ ชนิดตัวประสานที่ 1 หรือ CMC เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน 1% เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ค่าความหนาแน่นเท่ากับ 6.10 g/cm^3 โดยมีค่าความพึงพอใจรวมเท่ากับ 0.873 (ดังรูปที่ 11)

Response Optimization: ความหนาแน่น

Parameters

Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
ความหนาแน่น	Maximum	3.88375	6.42		1	1

Solutions

Solution	ชนิดตัวประสาน	เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน	อุณหภูมิ	ระยะเวลา	ความหนาแน่น Fit	Composite Desirability
1	1	1	900	3	6.10000	0.873829
2	1	1	900	2	5.91500	0.800887
3	1	2	900	3	5.89000	0.791030
4	2	1	900	3	5.81826	0.762745
5	1	2	900	2	5.81500	0.761459

รูปที่ 11 ลำดับค่าปัจจัยที่เหมาะสมพิจารณาจากค่าความหนาแน่น

4.6 ผลการทดสอบปริมาตรรูพรุนเปิด

หลังจากการเผาซินเตอร์ นำค่าน้ำหนักชิ้นงานอิ่มน้ำที่ชั่งในอากาศและค่าน้ำหนักชิ้นงานหลังการอบแห้งนำค่าที่ได้มาคำนวณค่าปริมาตรรูพรุนเปิด (ดังรูปที่ 12)

อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาซินเตอร์ (องศาเซลเซียส)	ชนิดตัวประสาน	เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน	ค่าเฉลี่ยปริมาตรรูพรุนเปิด (cm^3)		
			ระยะเวลา 1 ชั่วโมง	ระยะเวลา 2 ชั่วโมง	ระยะเวลา 3 ชั่วโมง
800 องศาเซลเซียส	CMC	1%	0.73	0.68	0.70
		2%	0.71	0.70	0.60
		3%	0.64	0.68	0.65
	PEG + Flour	1%	9.37	8.64	7.86
		2%	10.17	9.61	8.43
		3%	11.19	9.54	8.91
900 องศาเซลเซียส	CMC	1%	0.50	0.33	0.30
		2%	0.44	0.26	0.30
		3%	0.41	0.32	0.29
	PEG + Flour	1%	8.67	6.50	5.05
		2%	9.86	6.92	5.82
		3%	10.28	9.32	8.55

รูปที่ 12 ค่าเฉลี่ยปริมาตรรูพรุนเปิดของชิ้นงาน

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าปริมาตรรูพรุนเปิดที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 พบว่าค่า P-Value ของเทอมกำลังสองมีค่าเท่ากับ 0.492 เทอมอันตรกิริยามีค่าเท่ากับ 0.00 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่านัยสำคัญทางสถิติที่กำหนด ดังนั้นจึงสามารถใช้แบบจำลองอันตรกิริยาในการทำนายค่าปริมาตรรูพรุนเปิดได้ (ดังรูปที่ 13) เมื่อพิจารณาปัจจัยระหว่างชนิดตัวประสานและเปอร์เซ็นต์ตัวประสาน ปัจจัยระหว่างชนิดตัวประสานและอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาซินเตอร์ ปัจจัยระหว่างชนิดตัวประสานและระยะเวลาที่ใช้ในการเผาซินเตอร์ที่มีค่า P-Value เท่ากับ 0.00 ซึ่งน้อยกว่าค่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงให้เห็นว่าปัจจัยร่วมทั้งสามความสัมพันธ์นี้มีผลต่อค่าปริมาตรรูพรุนเปิด

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	12	1258.46	104.87	303.47	0.000
Linear	4	1220.59	305.15	883.02	0.000
ชนิดตัวประสาน	1	1175.91	1175.91	3402.80	0.000
เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน	1	10.93	10.93	31.64	0.000
อุณหภูมิ	1	13.72	13.72	39.71	0.000
ระยะเวลา	1	20.02	20.02	57.94	0.000
Square	2	0.50	0.25	0.72	0.492
เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน*เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน	1	0.18	0.18	0.51	0.476
ระยะเวลา*ระยะเวลา	1	0.32	0.32	0.92	0.341
2-Way Interaction	6	37.38	6.23	18.03	0.000
ชนิดตัวประสาน*เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน	1	11.86	11.86	34.31	0.000
ชนิดตัวประสาน*อุณหภูมิ	1	5.33	5.33	15.43	0.000
ชนิดตัวประสาน*ระยะเวลา	1	17.09	17.09	49.45	0.000
เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน*อุณหภูมิ	1	1.45	1.45	4.20	0.045
เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน*ระยะเวลา	1	0.19	0.19	0.54	0.464
อุณหภูมิ*ระยะเวลา	1	1.46	1.46	4.23	0.044
Error	59	20.39	0.35		
Lack-of-Fit	23	8.18	0.36	1.05	0.440
Pure Error	36	12.21	0.34		
Total	71	1278.85			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.587853	98.41%	98.08%	97.60%

รูปที่ 13 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าปริมาตรรูพรุนเปิด

จากการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมโดยใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer พบว่าค่าปัจจัยที่เหมาะสมมี 5 อันดับเรียงจากค่าปริมาตรรูพรุนน้อยไปมาก โดยค่าที่มีความเหมาะสมมากที่สุด คือ ชนิดตัวประสานที่ 1 หรือ CMC เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน 2% เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ค่าปริมาตรรูพรุนเปิดเท่ากับ 0.255 โดยมีค่าความพึงพอใจรวมเท่ากับ 0.993 (ดังรูปที่ 14)

Response Optimization: ปริมาตรรูพรุนเปิด

Parameters

Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
ปริมาตรรูพรุนเปิด	Minimum		0.18	12.4156	1	1

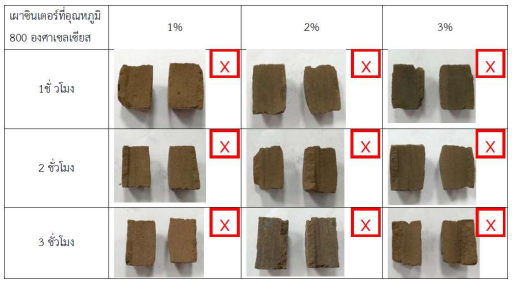
Solutions

Solution	ชนิดตัวประสาน	เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน	อุณหภูมิ	ระยะเวลา	ปริมาตรรูพรุนเปิด Fit	Composite Desirability
1	1	2	900	2	0.255	0.993870
2	1	3	900	3	0.290	0.991010
3	1	2	900	3	0.295	0.990601
4	1	1	900	3	0.300	0.990193
5	1	3	900	2	0.320	0.988558

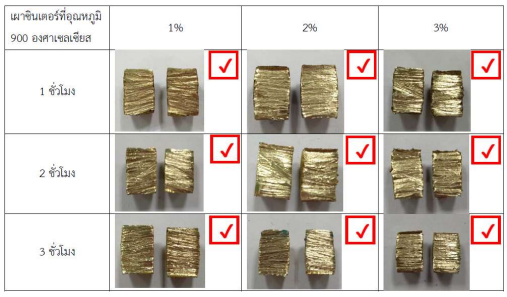
รูปที่ 14 ลำดับค่าปัจจัยที่เหมาะสมพิจารณาจากค่าปริมาตรรูพรุนเปิด

4.7 ผลการทดสอบการผสานตัวสมบูรณ์

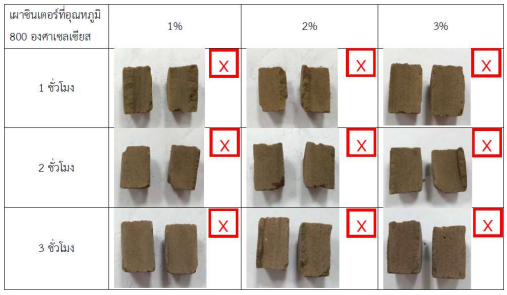
ในการทดสอบส่วนนี้จะเป็นการทดสอบความเป็นเนื้อโลหะของชิ้นงาน โดยการตัดตามยาวชิ้นงานหลังการเผาซินเตอร์ในแต่ละเงื่อนไข พบว่าที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสไม่เหมาะสมในการเผาซินเตอร์เพราะไม่มีเงื่อนไขใดผสานตัวกันสมบูรณ์ (ดังรูปที่ 15 และรูปที่ 17) ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ตัวประสาน CMC ทุกเงื่อนไขมีการผสานตัวกันสมบูรณ์เป็นโลหะทองเหลืองทั้งชิ้นงาน (ดังรูปที่ 16) แต่ตัวประสาน PEG + Flour มีเพียง 2 เงื่อนไขที่เป็นผสานตัวกันสมบูรณ์ คือ PEG + Flour 1% เผาซินเตอร์ 3 ชั่วโมง และ PEG + Flour 2% เผาซินเตอร์ 3 ชั่วโมง ในเงื่อนไขอื่นนั้น พบว่า ผสานตัวกันไม่สมบูรณ์เป็นโลหะทองเหลืองไม่ทั่วชิ้นงาน (ดังรูปที่ 18)



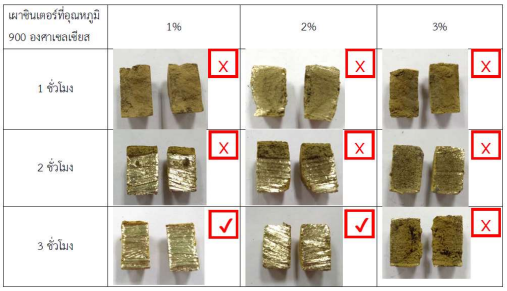
รูปที่ 15 ภาพตัดชิ้นงานตัวประสาน CMC หลังการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส



รูปที่ 16 ภาพตัดชิ้นงานตัวประสาน CMC หลังการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส



รูปที่ 17 ภาพตัดชิ้นงานตัวประสาน PEG + Flour หลังการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส



รูปที่ 18 ภาพตัดชิ้นงานตัวประสาน PEG + Flour หลังการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

4.8 ผลการทดสอบความแข็งวิกเกอร์

นำชิ้นงานที่ผ่านการตรวจสอบการผสานตัวสมบูรณ์และมีคุณสมบัติความเป็นโลหะเท่านั้น มาทำการทดสอบค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ ซึ่งพบว่ามีเพียงชิ้นงานบราซเคลย์ที่ผสมกับตัวประสาน CMC เท่านั้นที่มีการผสานตัวสมบูรณ์และมีเนื้อชิ้นงานเป็นโลหะทองเหลือง จึงทำการหาค่าความแข็งบริเวณผิวของชิ้นงานและได้ค่าความแข็งวิกเกอร์ (ดังรูปที่ 19)

ค่าเฉลี่ยความแข็งที่อุณหภูมิการเผา 900 องศาเซลเซียส (HV)				
ชนิดตัวประสาน	ระยะเวลาในการเผาซินเตอร์ (ชั่วโมง)	เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน (%)		
		1%	2%	3%
CMC	1	37.73	36.92	38.99
	2	38.51	38.09	39.65
	3	39.69	39.12	40.86

รูปที่ 19 ค่าเฉลี่ยความแข็งวิกเกอร์ของชิ้นงาน

เนื่องจากชิ้นงานบราซเคลย์ที่ผสมกับตัวประสาน PEG + Flour มีการผสานตัวสมบูรณ์และมีเนื้อชิ้นงานเป็นโลหะทองเหลือง เพียงแค่ 4 ชิ้นงานจากทั้งหมด 36 ชิ้น จึงไม่ได้ทำการวัดค่าความแข็งจากชิ้นงานบราซเคลย์ที่ผสมกับตัวประสาน PEG + Flour

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็งที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 พบว่าค่า P-Value ของเทอมแบบเชิงเส้น มีค่าเท่ากับ 0.00 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่านัยสำคัญทางสถิติที่กำหนด ดังนั้นจึงสามารถใช้แบบจำลองเชิงเส้นในการทำนายค่าความแข็งได้ (ดังรูปที่ 20) ซึ่งจากค่า P-Value ของปัจจัยของเปอร์เซ็นต์ตัวประสานมีค่าเท่ากับ 0.008 และปัจจัยของระยะเวลาที่ใช้ในการเผาซินเตอร์ มีค่าเท่ากับ 0.00 น้อยกว่าค่านัยสำคัญทางสถิติที่กำหนด แสดงให้เห็นว่าปัจจัยทั้งสองส่งผลต่อค่าความแข็งของชิ้นงาน

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	5	22.1873	4.4375	10.44	0.000
Linear	2	16.4044	8.2022	19.30	0.000
เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน	1	4.2841	4.2841	10.08	0.008
ระยะเวลา	1	12.1203	12.1203	28.51	0.000
Square	2	5.7788	2.8894	6.80	0.011
เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน*เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน	1	5.7041	5.7041	13.42	0.003
ระยะเวลา*ระยะเวลา	1	0.0747	0.0747	0.18	0.682
2-Way Interaction	1	0.0041	0.0041	0.01	0.924
เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน*ระยะเวลา	1	0.0041	0.0041	0.01	0.924
Error	12	5.1010	0.4251		
Lack-of-Fit	3	0.1392	0.0464	0.08	0.967
Pure Error	9	4.9618	0.5513		
Total	17	27.2883			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.651987	81.31%	73.52%	58.89%

รูปที่ 20 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็ง

จากการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมโดยใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer พบว่าค่าปัจจัยที่เหมาะสมมี 5 อันดับเรียงจากค่าความแข็งมากไปน้อย โดยค่าที่มีความเหมาะสมมากที่สุด คือ ชนิดตัวประสานที่ 1 หรือ CMC เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน 3% เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ค่าความแข็งเท่ากับ 40.88 โดยมีค่าความพึงพอใจรวมเท่ากับ 0.951 (ดังรูปที่ 21)

Response Optimization: ค่าความแข็ง

Parameters

Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
ค่าความแข็ง	Maximum	36.46	41.11		1	1

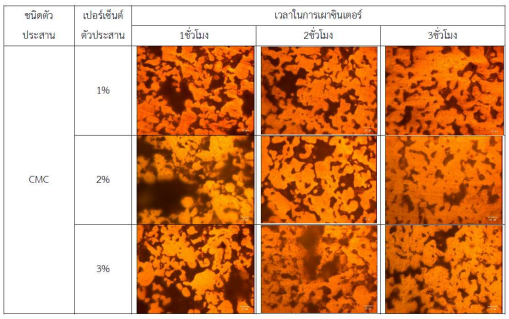
Solutions

Solution	เปอร์เซ็นต์ตัวประสาน	ระยะเวลา	ค่าความแข็ง Fit	Composite Desirability
1	3	3	40.8839	0.951374
2	3	2	39.7422	0.705854
3	1	3	39.6889	0.694385
4	2	3	39.0922	0.566069
5	3	1	38.8739	0.519116

รูปที่ 21 ลำดับค่าปัจจัยที่เหมาะสมพิจารณาจากค่าความแข็ง

4.9 ผลการตรวจสอบรูพรุนโดยใช้กล้องจุลทรรศน์

การตรวจสอบรูพรุน ได้ทำการตรวจสอบจากชิ้นงานบราซเคลย์ที่ผ่านการวัดความแข็งมาแล้ว มาทำการขัดกระดาษทรายและผ้าสักหลาด แล้วนำไปส่องกล้องจุลทรรศน์ ภาพโครงสร้างแสดงรูพรุนจากกล้องจุลทรรศน์มีความสอดคล้องกับค่าปริมาตรรูพรุน และค่าความหนาแน่น พบว่าเมื่อระยะเวลาในการเผาซินเตอร์มากขึ้นปริมาณรูพรุนเปิดมีจำนวนน้อยลงทุกเปอร์เซ็นต์ตัวประสาน



รูปที่ 22 ภาพโครงสร้างแสดงรูพรุนที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์

4.11 การเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสมในการขึ้นรูป

จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติและผลการทดลองการขึ้นรูป โดยใช้ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกล ได้เงื่อนไขที่เหมาะสมในการขึ้นรูปในแต่ละเกณฑ์การพิจารณา (ดังรูปที่ 23)

เกณฑ์การพิจารณา	เงื่อนไขที่เหมาะสม
การผสานตัวสมบูรณ์	CMC 1% เผาซินเตอร์ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 2 ชั่วโมงและ 3 ชั่วโมง
เปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรหลังการขึ้นรูป	PEG + Flour 1%
ลักษณะทางกายภาพหลังการขึ้นรูป และหลังการอบกำจัดตัวประสาน	CMC 1%
เปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรหลังการเผาซินเตอร์	CMC 1% เผาซินเตอร์ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
ความหนาแน่น	CMC 1% เผาซินเตอร์ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
ความแข็ง	CMC 3% เผาซินเตอร์ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

รูปที่ 23 เงื่อนไขที่เหมาะสมในการขึ้นรูปในแต่ละเกณฑ์การพิจารณา

จากเงื่อนไขที่เหมาะสมในการขึ้นรูปในแต่ละเกณฑ์การพิจารณา สามารถสรุปได้ว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้ในการขึ้นรูปโดยการปั้น คือ ชนิดตัวประสาน CMC 1% เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง มีคุณสมบัติที่เหมาะสมที่จะนำเงื่อนไขนี้มาทำการทดลองขึ้นรูปโดยการปั้นเป็นชิ้นงานตัวอย่าง ตัวอย่างชิ้นงานบราซเคลย์ (ดังรูปที่ 24)

รูปที่ 24 ตัวอย่างชิ้นงานบราซเคลย์ที่ขึ้นรูปโดยการปั้น

4. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

การศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตบราซเคลย์สำหรับการขึ้นรูปโดยการปั้นเป็นการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของบราซเคลย์

ได้แก่ เปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรหลังการขึ้นรูป ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปและหลังการอบกำจัดตัวประสาน เปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงปริมาตรหลังการเผาซินเตอร์ ค่าความหนาแน่น ค่าปริมาตรรูพรุนเปิด การผสานตัวสมบูรณ์ ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์และการตรวจสอบรูพรุนของชิ้นงาน ได้เงื่อนไขที่มีความเหมาะสมในการขึ้นรูปบราซเคลย์โดยการปั้น คือ ชนิดตัวประสาน CMC 1% เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง มีค่าการหดตัวเชิงปริมาตรหลังการขึ้นรูปร้อยละ 0.76 ลักษณะทางกายภาพหลังการขึ้นรูปและหลังอบกำจัดตัวประสานมีความคงรูปของชิ้นงานดี หลังการเผาซินเตอร์มีการผสานตัวสมบูรณ์ทั่วทั้งชิ้นงาน มีค่าการหดตัวเชิงปริมาตรหลังการเผาซินเตอร์ร้อยละ 17.4 ค่าความหนาแน่นน้อยที่สุดคือ 5.31 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ค่าความแข็งวิกเกอร์ 37.73 สามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีเอกลักษณ์เฉพาะตัวได้โดยสามารถใช้เทคนิคการปั้ม การตัด การรีดและการปะติดได้

ข้อเสนอแนะงานวิจัยที่ดำเนินการต่อไปคือการเพิ่มขนาดของผงโลหะทองเหลืองมากกว่า 1 ขนาดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการประสานตัวของการเผาซินเตอร์ และเลือกใช้ตัวประสานอินทรีย์อื่นๆที่เพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปโดยการปั้น

5. เอกสารอ้างอิง

[1] S. Boonmee, *Powder Metallurgy Handbook*. Pathum Thani: Thailand Powder Metallurgy Association, 2020.

[2] M. Nelson. (2022). How to add silver accents to bronze and copper metal clay [Online]. Available: https://www.riogrande.com/knowledge-hub/videos/silver-accents-vid/

[3] P. Thongnopkun. (2012). Silver jewelry forming from nano-silver clay [Online]. Available: https://www.chanthaburi.buu.ac.th/~gjr/File_InformationCenter/90.pdf

[4] Metal Adventures. (2006). Your guide to fastfire bronzclay [Online]. Available: https://www.seattlefindings.com/assets/images/Product Instructions PDF/Fastfire-BronzClayGuide.pdf

[5] R. Medal. (2011). Clearing the air on carbon firing [Online]. Available:

http://www.tgmetalarts.com

[6] P. Chutima, *Engineering Design of Experiment*. Bangkok: Chulalongkorn University Press, 2002.

[7] P. Thongnopkun, S. Tanyapirom and T. Chanduang. (2012). Innovation for fabrication of complex shape silver jewelry from nano-silver clay [Online]. Available: http://dspace.lib.buu.ac.th/xmlui/handle/1234567890/384

[8] S. Supansomboon, C. Tangmansugarit, N. Khaocharee and A. Munpakdee, "Effect of binder on the physical properties of silver clay for jewelry", *SWU Sci. J.*, vol.26, no.1, pp. 131-147, 2010.

[9] T. On-in, S. Janjirawittaya and A. Munpakdee. (2015). The influence of solder joins on the physical and mechanical properties of copper clay [Online]. Available: http://science.swu.ac.th/Portals/22/SciEvent/Students/2_3_Jun_58_Present/posters/9_jew/9_jew_20.jpg

[10] A. Bunchavimonchet, "Effects of binder composition on metal injection molding," M.S. thesis, Dept. Metallurgical. Eng., Chulalongkorn Univ., Bangkok, Thailand, 2001.

Srinakharinwirot University Engineering Journal (2023) 19(1), 102-113 วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีที่ 19 ฉบับที่ 1 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2566 – มีนาคม พ.ศ. 2567

แนวทางการวิเคราะห์กำลังแบกทานและระยะฝังของเสาเข็มเจาะฝังปลายในหินแกรนิตผุพังปานกลาง

Guidelines for Analyzing Bearing Capacity and Embedded Length of Rock-Socketed Piles in Moderately Weathered Granite

อติเทพ ศรีคงศรี[1]* พงศ์ศักดิ์ แซ่หลี[2]
[1]คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต 60 ถนนร่มเกล้า แขวงมีนบุรี เขตมีนบุรี กรุงเทพ 10510
[2] บริษัท แคสแลบ (ประเทศไทย) จากัด 168/6 หมู่ที่ 2 ตำบลบ้านคลองสวน อำเภอพระสมุทรเจดีย์ จังหวัดสมุทรปราการ 10290
Atitep Srikongsri[1]* Pongsak Saelee[2]
[1]Faculty of Engineering, Kasem Bundit University Romklao Campus, 60 Romklao Road, Minburi, Bangkok 10510
[2]Castlab (Thailand) Co., Ltd., 168/6 Moo 2 Ban Khlong Suan Subdistrict Phra Samut Chedi District Samut Prakan Province, 10290
*Corresponding author Email: atitep.sri@kbu.ac.th
(Received: April 3, 2023; Revised: December 7, 2023 ; Accepted: January 25, 2024)

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์กำลังแบกทานของเสาเข็มชนิดปลายฝังในหินด้วยวิธี FHWA และ Tomlinson โดยใช้ข้อมูลจากการเจาะสำรวจทางปฐพีวิศวกรรม สมการแรงเสียดทานและแรงแบกทานปลายเสาเข็มที่ฝังในหินคำนวณจากตัวแปรประกอบด้วย ชนิดหิน คุณภาพมวลหิน (ค่า RQD) ระดับความผุพัง กำลังรับแรงอัดแกนเดียวของหินและกำลังอัดประลัยของคอนกรีต เสาเข็มเจาะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.80 และ 1.00 เมตรฝังปลายในหินแกรนิตผุพังปานกลางถูกนำมาวิเคราะห์กำลังแบกทาน จากการเปรียบเทียบผลการคำนวณพบว่าทั้งสองวิธีให้ค่าแรงเสียดทานใกล้เคียงกันแต่วิธีของ Tomlinson ให้ค่าแรงแบกทานที่ปลายเสาเข็มสูงกว่าวิธีแรกมาก เมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณกับน้ำหนักทดสอบสูงสุดจากการทดสอบเสาเข็มด้วยวิธีสถิตศาสตร์ในสนาม พบว่าการกำหนดระยะฝังในหิน 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางทำให้ได้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยค่อนข้างสูงเกินความจำเป็น จึงมีการเสนอแนวทางวิเคราะห์ระยะฝังประสิทธิผลเพื่อลดระยะฝังในหินให้สอดคล้องกับค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่เหมาะสม

คำสำคัญ: เสาเข็มปลายฝังในหิน กำลังแบกทานของหิน เสาเข็มเจาะ ทดสอบเสาเข็ม

ABSTRACT

Bearing capacity of pile socketed in moderately weathered granite was statically analyzed using FHWA and Tomlinson methods. The capacity equations for the pile socket including friction and tip resistance were based on several geotechnical parameters such as type of rock, rock quality designation

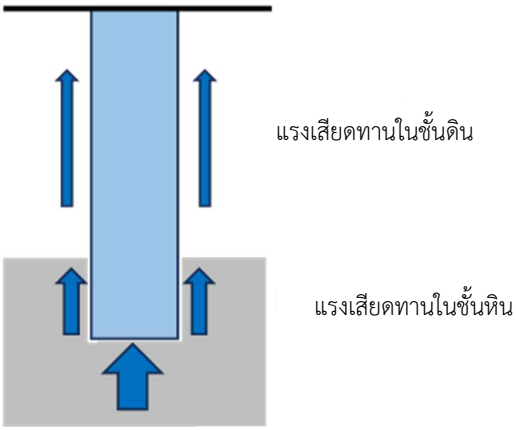
(RQD), degree of weathering, and compressive strengths of rock and concrete. Two bored piles with a diameter of 0.80 m and 1.00 m were selected for analysis. Calculated results of the methods are then compared. The results show that the friction resistances yielded from both methods are comparable, however, the tip resistance of Tomlinson method exhibits much higher the magnitude than FHWA. The results were also validated by static pile load test results. Comparison between the calculated results and the maximum tested loads implies an ample factor of safety. Therefore, an analytical approach for effective socket depth is proposed herein to reduce the embedded length in rock for yielding appropriate values of factor of safety.

Keyword: Rock socketed pile, Rock bearing capacity, Bored pile, Pile load test.

1. บทนำ

เสาเข็มชนิดปลายฝังในหิน (Rock-Socketed Pile) เป็นทางเลือกหนึ่งที่ประยุกต์ใช้ได้กับสภาพทางธรณีวิทยาที่พบชั้นหินในระดับตื้นและสามารถก่อสร้างเสาเข็มได้ แม้ว่าเสาเข็มชนิดนี้จะมีค่าก่อสร้างค่อนข้างสูงเนื่องจากการเจาะหลุมในหินส่วนปลายเสาเข็ม แต่ก็เป็นเสาเข็มที่รับน้ำหนักได้มากซึ่งโดยส่วนใหญ่จะมากจนถึงหรือมากกว่าขีดจำกัดของกำลังอัดคอนกรีตที่ยอมให้ ถือว่าเป็นเสาเข็มที่ใช้กำลังได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ การใช้เสาเข็มชนิดนี้ในประเทศไทยพบได้ตามพื้นที่ภูมิภาคต่างๆ ที่ไม่ใช่พื้นที่ลุ่มที่มีชั้นดินหนา ถูกใช้ในงานฐานรากสะพานขนาดใหญ่และโครงสร้างอื่นที่มีน้ำหนักมากเกินกว่าการใช้เสาเข็มปกติในจำนวนที่เหมาะสมต่อฐานรากหนึ่งฐาน

กลไกแรงต้านรอบเสาเข็มเหมือนกับเสาเข็มทั่วไปคือประกอบด้วยแรงเสียดทานและแรงต้านที่ปลายเสาเข็ม รูปที่ 1 แสดงกลไกการสร้างแรงต้านของเสาเข็มมาจากแรงเสียดทานในชั้นดิน แรงเสียดทานในชั้นหิน และแรงต้านที่ปลายเสาเข็มในชั้นหิน โดยทั่วไปแรงต้านจากส่วนที่ฝังในชั้นหินจะมีค่าสูงกว่าแรงเสียดทานในชั้นดิน สมการออกแบบที่ใช้โดยทั่วเป็นสมการเชิงประสบการณ์ [1],[2] ซึ่งค่าพารามิเตอร์บางตัวมีช่วงค่อนข้างกว้างทำให้ต้องใช้ดุลพินิจของผู้ออกแบบ ส่งผลให้กำลังแบกทานที่คำนวณได้มีความแตกต่างกันได้มากเมื่อใช้วิธีที่แตกต่างกัน แม้กระทั่งวิธีเดียวกันก็ตาม



รูปที่ 1 กลไกแรงต้านรอบเสาเข็มชนิดปลายฝังในหิน

ตัวแปรที่สำคัญมากอีกตัวหนึ่งคือระยะฝังในหิน ระยะฝังมักจะถูกกำหนดในรูปแบบที่เป็นสัดส่วนกับขนาดเส้นผ่านศูนย์ของเสาเข็ม สำหรับแนวปฏิบัติที่ผ่านมาในประเทศไทยนิยมใช้วิธีกำหนดระยะฝังเท่ากับหรือไม่น้อยกว่า 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม ซึ่งอยู่บนแนวคิดแบบเดียวกันกับเสาเข็มในดินโดยไม่ได้อยู่บนพื้นฐานของคุณสมบัติของหิน แล้วจึงคำนวณกำลังแบกทานของเสาเข็มจากความยาวเสาที่กำหนด อย่างไรก็ตาม คู่มือของ FHWA แนะนำให้กำหนดระยะฝังได้ตั้งแต่ 1.5 เท่าของ

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็มขึ้นไป หากกำลังแบกทานของเสาเข็มมีเพียงพอก็ไม่จำเป็นต้องกำหนดระยะฝังลึกเกินไป [3] เสาเข็มเมื่อฝังในหินค่อนข้างลึก มักจะมีพฤติกรรมเป็นเสาเข็มเสียดทาน [4] สำหรับกรณีหินที่ฝังปลายเสาเข็มมีความแข็งมาก แรงเสียดทานจะพัฒนาไปก่อนแรงต้านที่ปลายอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อระยะฝังมากกว่า 2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม [5] สอดคล้องกับการศึกษาอิทธิของโมดูลัสยืดหยุ่นระหว่างหินและคอนกรีตเสาเข็มพบว่าถ้าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของหินสูงกว่าคอนกรีต ระยะฝังควรน้อยกว่า 4 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็มเพื่อให้แรงในเสาเข็มบางส่วนสามารถถ่ายลงไปที่ปลายด้านล่างได้ มิเช่นนั้นแรงต้านจะเกิดจากแรงเสียดทานเพียงอย่างเดียว [6] ดังนั้นการใช้เกณฑ์ระยะฝังในหินไม่น้อยกว่า 3 เท่าของขนาดหน้าตัดเสาเข็มโดยไม่คำนึงถึงกำลังต้านทานที่ได้จากชั้นหินอาจเป็นการออกแบบที่อนุรักษ์นิยมมากเกินไปเนื่องจากการเจาะหลุมขนาดใหญ่ในหินมีค่าดำเนินการสูงมาก [7]

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะแสดงแนวทางการเลือกค่าตัวแปรที่เหมาะสมเพื่อคำนวณกำลังรับแรงแบกทานของเสาเข็มชนิดปลายฝังในหินด้วยวิธีของ FHWA และ Tomlinson เลือกใช้เสาเข็มเจาะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 และ 1.0 เมตร จากโครงการแห่งหนึ่งในจังหวัดชลบุรี ทำการเปรียบเทียบค่าจากการคำนวณกับผลทดสอบเสาเข็มในสนามด้วยวิธีสถิติศาสตร์ทั้ง 2 ต้น เพื่อตรวจสอบความสอดคล้องระหว่างกัน และท้ายที่สุดเพื่อเสนอแนวทางการวิเคราะห์ระยะฝังปลายเสาเข็มในหินที่มีความสอดคล้องกับแรงต้านจากชั้นหินและกำลังอัดคอนกรีตที่ยอมให้ของเสาเข็ม

2. กำลังแบกทานของเสาเข็มฝังปลายในหิน

2.1 ภูมิหลังของวิทยาการ

ช่วงก่อนปี ค.ศ.1976 มีรายงานทางวิชาการเกี่ยวกับเสาเข็มปลายฝังในหินจำนวนน้อยมากจนกระทั่งช่วงระหว่างปี ค.ศ.1976 ถึงปี ค.ศ.1988 เป็นช่วงที่มีความก้าวหน้ามากช่วงหนึ่งในการพัฒนาองค์ความรู้เกี่ยวกับเสาเข็มปลายฝังในหินอย่างเป็นระบบ [8] มีรายงานวิจัยและเอกสารทางวิชาการเผยแพร่ที่เสนอแนวทางการออกแบบ สูตรการคำนวณ และหลักเกณฑ์ ต่างๆ อันเป็นรากฐานที่ใช้มาถึงปัจจุบัน

งานวิจัยที่สำคัญประกอบด้วยผลการศึกษาของ Horvath & Kenny ในปี ค.ศ.1979 อ้างอิงใน [6] และ Rowe & Armitage [9] ที่เสนอสมการคำนวณหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสหินในรูปแบบความสัมพันธ์กับค่ารากที่สองของกำลังอัดแกนเดียวของหินคูณด้วยค่าคงที่ สมการที่เสนอมีการตรวจสอบความเที่ยงตรงของสมการกับข้อมูลผลการทดสอบเสาเข็มในสนาม จึงนับว่าเป็นวิธีแรกๆที่ถูกอ้างอิงจำนวนมากและได้รับการยอมรับว่าเป็นวิธีที่ใช้งานได้ดี [10] หน่วยแรงเสียดทานจากผลการศึกษาดังกล่าวถูกนำมาศึกษาเพิ่มเติมในงานของ Carter & Kulhawy [11] เพื่อพัฒนาต่อยอดวิธีการออกแบบเสาเข็มปลายฝังในหินโดยทำการวิเคราะห์เพิ่มเติมจากฐานข้อมูลผลทดสอบเสาเข็มในจำนวนที่มากขึ้น ผลการศึกษายืนยันได้ว่าหน่วยแรงเสียดทานมีความสัมพันธ์กับค่ารากที่สองของกำลังอัดแกนเดียวของหิน และเสนอสมการหาค่าหน่วยแรงเสียดทานสูงสุด ($f_{\max}$) ไว้ในรูปแบบดังสมการที่ 1

$$f_{\max} = AP_a[q_u/P_a]^{0.5} \qquad (1)$$

เมื่อ $\boldsymbol{A}$ คือค่าคงที่มีค่า 0.63 ถึง 0.95

$\boldsymbol{P_a}$ คือความดันบรรยากาศ (101 kPa)

$\boldsymbol{q_u}$ คือค่ากำลังอัดแกนเดียวของหิน (Uniaxial Compressive Strength) มีหน่วยเป็น kPa

นอกจากนี้ยังมีงานศึกษาของ William & Pells [12] ที่ศึกษาความสัมพันธ์ของหน่วยแรงเสียดทานกับกำลังอัดแกนเดียวของหินซึ่งพบว่าหน่วยแรงเสียดทานลดลงเมื่อกำลังอัดแกนเดียวของหินเพิ่มขึ้นและได้เสนอสมการไว้ดังสมการที่ 2

$$f_{\max} = Bq_u \qquad (2)$$

เมื่อ $\boldsymbol{B}$ คือค่าสัมประสิทธิ์คำนวณจากค่าปรับแก้และปัจจัยลดทอน

สมการสำหรับหน่วยแรงแบกทานสูงสุดที่ปลายเสาเข็มในหิน (Maximum End Bearing in Rock) หรือ $q_{\max}$ มีแนวคิดหลักอยู่ 3 แนวทาง คือ สูตรอย่างง่ายโดยใช้ค่าคงที่คูณด้วยค่ากำลังอัดแกนเดียว [9],[12] ดังแสดงในสมการที่ 3 แนวทางที่ 2 เสนอโดย Zang & Einstein [13] เป็นสูตรคล้ายกับแนวทางแรก เพียงแต่มีที่มาจากการวิเคราะห์สมการเส้นแนวโน้มที่ดีที่สุด (Best Fit Curve) บนชุดข้อมูลผลทดสอบเสาเข็มในสนาม ทำให้ได้ความสัมพันธ์กับกำลังอัดแกนเดียวในรูปแบบยกกำลัง $\boldsymbol{n}$ ดังแสดงในสมการที่ 4

$$q_{\max} = Cq_u \quad (3)$$

$$q_{\max} = Cq_u{}^n \quad (4)$$

เมื่อ $\boldsymbol{C}$ คือค่าคงเชิงประสบการณ์ (Empirical Constant) ซึ่งมีความแตกต่างกันในแต่ละงานวิจัย

แนวทางที่ 3 เป็นแนวคิดบนพื้นฐานจากงานศึกษาของ Hoek & Brown อ้างอิงใน [11] โดยค่าหน่วยแรงแบกทานสูงสุดที่ปลายเสาเข็มแสดงในสมการที่ 5

$$q_{max} = (m + s^{0.5})q_u \quad (5)$$

เมื่อ $\boldsymbol{m}$ และ $\boldsymbol{s}$ คือค่าพารามิเตอร์เชิงประสบการณ์จำแนกตามชนิดและคุณสมบัติเชิงคุณภาพของมวลหิน

2.2 วิธีของ FHWA

ในปี ค.ศ. 1999 O'Neil & Reese ได้จัดทำคู่มือการออกแบบและก่อสร้างเสาเข็มปลายฝังในหินให้กับ Federal Highway Administration หรือ FHWA [3] ในส่วนของการออกแบบได้รวบรวมสูตรและหลักเกณฑ์ต่างๆ จากงานวิจัยในอดีตที่ได้กล่าวไป รวมถึงประสบการณ์จากการทดสอบและการใช้งานจริงมาปรับแต่งให้เหมาสมกับการนำไปใช้ออกแบบได้จริงในทางปฏิบัติ วิธีนี้เป็นวิธีที่สามารถคำนวณและตรวจสอบรายการคำนวณได้ง่ายและถูกแนะนำในคู่มือของ TRB [14] และคู่มือของ AASHTO [15]

หน่วยแรงเสียดทานสูงสุดในชั้นหินหรือ $\boldsymbol{f_{\max}}$ คำนวณจากสมการที่ 6

$$f_{\max} = 0.65P_a[q_u/P_a]^{0.5} \quad (6)$$

ทั้งนี้ต้องมีค่าไม่เกิน $0.65P_a[f_c'/P_a]^{0.5}$

เมื่อ $\boldsymbol{P_a}$ คือความดันบรรยากาศ (101 kPa)

$\boldsymbol{q_u}$ คือค่ากำลังอัดแกนเดียวของหิน (Uniaxial Compressive Strength) มีหน่วยเป็น kPa

$\boldsymbol{f_c'}$ คือค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่อายุ 28 วัน มีหน่วยเป็น kPa

สมการหน่วยแรงแบกทานสูงสุดของหินที่ปลายเสาเข็มหรือ $\boldsymbol{q_{max}}$ (หน่วยเป็น kPa) พิจารณาจากค่ากำลังอัดแกนเดียวของหินหรือ $\boldsymbol{q_u}$ และเปอร์เซ็นต์ความต่อเนื่องของตัวอย่างหินในรูปแบบของค่า RQD (Rock Quality Designation) สูตรแบ่งเป็น 3 กรณี

กรณีที่ 1 หินมีค่า RQD เท่ากับ 100 และระยะฝังไม่น้อยกว่า 1.5 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม ให้ใช้สมการที่ 7

$$q_{max} = 2.5q_u \quad (7)$$

กรณีที่ 2 หินมีค่า RQD ระหว่าง 70 ถึง 100 มีรอยไม่ต่อเนื่องปิดสนิทวางตัวค่อนข้างอยู่ในแนวราบและค่า $\boldsymbol{q_u}$ ไม่น้อยกว่า 0.5 MPa (สูตรนี้ใช้หน่วย MPa) ให้ใช้สมการที่ 8

$$q_{max} = 4.83q_u^{0.51} \quad (8)$$

กรณีที่ 3 หินมีรอยไม่ต่อเนื่องจำนวนมาก แต่ละแนวทำมุมแตกต่างกัน การประเมินสภาพรอยดังกล่าวสามารถ

ทำได้ด้วยการขุดทดสอบ ต้องพิจารณาร่วมกับ ชนิดหิน ความผุพัง และความไม่ต่อเนื่อง ให้ใช้สมการที่ 9

$$q_{max} = [s^{0.5} + (ms^{0.5} + s)^{0.5}]q_u \quad (9)$$

โดยค่า $\boldsymbol{s}$ และ $\boldsymbol{m}$ หาได้จากตารางที่ 1 และตารางที่ 2

ตารางที่ 1 สัญลักษณ์ชนิดหินสำหรับใช้ในตารางที่ 2 [3]

Rock Type	Description
A	carbonate rock with well-developed crystal cleavage (e.g., dolomite, limestone, marble)
B	mudstone, siltstone, shale, slate
C	sandstone, quartzite
D	fine-grained igneous rocks (andesite, dolerite, diabase, rhyolite)
E	coarse-grained igneous rocks and metamorphic rocks (amphibole, gabbro, gneiss, granite, quartz-diorite)

ตารางที่ 2 ค่า s และ m จำแนกตามคุณภาพและชนิดของหิน [3]

Rock Quality*	s	m based on rock type				
		A	B	C	D	E
(1)	1	7	10	15	17	25
(2)	0.1	3.5	5	7.5	8.5	12.5
(3)	0.04	0.7	1	1.5	1.7	2.5
(4)	10^{-4}	0.14	0.2	0.3	0.34	0.5

*Quality of Rock Mass by Joint Description and Spacing

(1) Excellent: Intact (closed); spacing > 3 m

(2) Very Good: Interlocking; spacing of 1 to 3 m

(3) Good: Slightly weathered; spacing of 1 to 3

(4) Fair: Moderately weathered; spacing of 0.3 to 1

2.3 วิธีของ Tomlinson

เป็นวิธีในหนังสือ Pile Design and Construction Practice ประพันธ์โดย M. J. Tomlinson [6] ซึ่งนำสมการจากงานวิจัยสำคัญในอดีตที่กล่าวถึงก่อนหน้านี้ มาเรียบเรียงผนวกกับข้อแนะนำจากผู้แต่งซึ่งเป็นบุคคลที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางโดยเฉพาะอย่างยิ่งในเรื่ององค์ความรู้และประสบการณ์เกี่ยวกับฐานรากเสาเข็ม วิธีนี้จึงเป็นอีกวิธีหนึ่งที่เชื่อถือได้ หนังสือ Pile Design and Construction Practice ที่พิมพ์หลังจากฉบับที่ 4 (4th Edition) เป็นการประพันธ์ร่วมกับ J. Woodward [16], [17] ซึ่งมีการปรับปรุงเพิ่มเติมเล็กน้อยและมีการกล่าวถึง Euro Code อยู่บ้าง แต่โดยรวมยังคงสาระหลักในฉบับก่อนหน้าเอาไว้ อย่างไรก็ตาม สมการที่นำมาใช้ในการศึกษานี้เป็นชุดสมการที่มีตั้งแต่ Tomlinson เป็นผู้ประพันธ์เดี่ยวจึงขอเรียกว่าวิธีของ Tomlinson

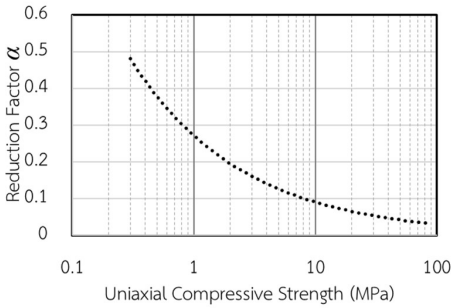
สมการที่ใช้ออกแบบประกอบด้วย หน่วยแรงเสียดทานสูงสุดรอบเสาเข็มในชั้นหิน คำนวณดังสมการที่ 10

$$f_{max} = \alpha\beta q_u \quad (10)$$

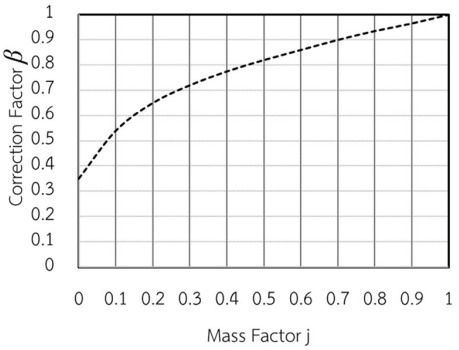
เมื่อ $\boldsymbol{\alpha}$ คือ ปัจจัยลดทอนกำลัง (Strength Reduction Factor)

β คือค่าปรับแก้ความไม่ต่อเนื่องของมวลหิน (Mass Correction Factor)

ค่า α นั้นแปรผันตามค่ากำลังอัดแกนเดียวซึ่งหาได้จากรูปที่ 2 ค่า β แปรผันตามค่า mass factor j ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยค่า mass factor j พิจารณาจากค่า RQD ในตารางที่ 3 สำหรับหินที่มีค่า q_u สูงกว่า f_c' ค่ากำลังเสียดทานประลัยคำนวณจาก f_{max} คูณด้วยพื้นที่ผิวสัมผัสและหารด้วยอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) เท่ากับ 2 และต้องมีค่าไม่เกินกำลังอัดของคอนกรีตที่ยอมให้ f_c ที่ 6 MPa คูณด้วยพื้นที่หน้าตัดเสาเข็ม



รูปที่ 2 ปัจจัยลดทอนกำลัง (สร้างใหม่จากข้อมูลใน [6])



รูปที่ 3 ค่าปรับแก้ความไม่ต่อเนื่องของมวลหิน (สร้างใหม่จากข้อมูลใน [6])

ตารางที่ 3 Mass factor j จำแนกตามคุณภาพของหิน [6]

RQD (%)	ความถี่รอยแตกของหินช่วง 1 ม.	Mass factor j
0 - 25	15	0.2
25 - 50	15 - 8	0.2
50 - 75	8 - 5	0.2 – 0.5
75 - 90	5 - 1	0.5 – 0.8
90 - 100	1	0.8 - 1

สมการหน่วยแรงแบกทานสูงสุดของหินที่ปลายเสาเข็มหรือ q_{max} (หน่วยเป็น kPa) พิจารณาจากค่ากำลังอัดแกนเดียว q_u และค่ามุมเสียดทานภายในของหิน $\emptyset$ ดังแสดงในสมการที่ 11

$$q_{max} = 2N_{\emptyset}q_u \quad (11)$$

เมื่อ $N_{\emptyset} = tan^2(45 + \frac{\emptyset}{2})$ โดยสามารถใช้ค่า $\emptyset$ ที่แนะนำในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่ามุม $\emptyset$ แนะนำ [6]

ระดับความเสียดทาน	ชนิดหิน	$\emptyset$
Low friction	Schists, Shale, Marl	20 - 27
Medium friction	Sandstone, Siltstone, Chalk, Gneiss, Slate	27 - 34
High friction	Basalt, Granite	34 - 40

เนื่องจากค่า RQD มีผลต่อค่าหน่วยแรงแบกทานสูงสุดของหินอย่างมีนัยสำคัญ กรณี RQD น้อยกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ ค่า q_{max} หาได้จากสมการที่ 12

$$q_{max} = 0.33q_u \quad (12)$$

ถ้า RQD มากกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไปให้ใช้ค่าตั้งแต่ $0.33q_u$ ถึง $0.8q_u$

นอกจากนี้ หากคำนวณค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) เฉพาะส่วนของแรงเสียดทานแล้วมีค่ามากกว่า 2 เท่าของน้ำหนักบรรทุกใช้งาน ลักษณะนี้สามารถอนุมานได้ว่าแรงจะถ่ายลงไปถึงปลายเสาเข็มน้อยมากภายใต้น้ำหนักบรรทุกนี้ กรณีนี้ให้ใช้ค่า FS ไม่น้อยกว่า 3 เท่า ทั้งนี้ต้องตรวจสอบหน่วยแรงอัดในคอนกรีตเสาเข็มด้วยว่าต้องไม่เกิน 6 MPa

3. การคำนวณกำลังแบกทานเสาเข็ม

เสาเข็มที่ศึกษาเลือกจากโครงการแห่งหนึ่งในจังหวัดชลบุรีจำนวน 2 ต้น ประกอบด้วยเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.80 และ 1.00 เมตร ยาว 18.9 และ 19.5 เมตร และมีระยะฝังในหิน 2.4 และ 3 เมตร ตามลำดับ ผลเจาะสำรวจทางปฐพีพบชั้นหินแกรนิตผุพังปานกลางที่ความลึกประมาณ

16.50 เมตร ดังแสดงในตารางที่ 5 หินนี้มีค่าเฉลี่ยของกำลังอัดแกนเดียว 44 MPa การวิเคราะห์เริ่มจากการคำนวณแรงเสียดทานในชั้นดินส่วนบนแล้วจึงนำไปรวมกับกำลังต้านทานในชั้นหินที่คำนวณจากวิธีในหัวข้อที่ 2.2 และ 2.3

ตารางที่ 5 ผลเจาะสำรวจทางปฐพี

ความลึก (เมตร)	ชนิดของดิน/หิน		SPT N	γ (kN/m^3)
0 ถึง 9	ทรายปนทรายแป้งแน่นปานกลางถึงแน่น (SM)		24	21
9 ถึง 16.5	ทรายปนทรายแป้งแน่นมาก (SM)		50	21
ชั้นหิน	RQD	หินแกรนิตสีเทาผุพังปานกลาง q_u = 44 MPa		22
16.5 ถึง 17.5	48			
17.5 ถึง 18.5	35			
18.5 ถึง 19.5	40			

3.1 กำลังเสียดทานในชั้นดินส่วนบน

สมการทั่วไปสำหรับหน่วยแรงเสียดทานสูงสุดรอบเสาเข็มในชั้นทราย หรือ f_s คำนวณจากสมการที่ 13

$$f_S = K_s tan\delta P_{avg} \quad (13)$$

เมื่อ K_s คือสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้าง

δ คือมุมเสียดทานระหว่างคอนกรีตกับดินรอบเสาเข็ม (0.75 เท่าของค่า ϕ มุมเสียดทานของดิน)

P_{avg} คือหน่วยแรงกดทับประสิทธิผลเฉลี่ยที่กึ่งกลางช่วงความยาวเสาเข็มในชั้นทราย

ผลการคำนวณในตารางที่ 6 ใช้ค่าหน่วยน้ำหนักจมน้ำ 11 kN/m^3 จากนั้นใช้สมการที่ 13 คำนวณหน่วยแรงเสียดทานสูงสุดในชั้นทรายช่วงความลึก 0 ถึง 9 เมตร ได้ 16.5 kPa และหน่วยแรงเสียดทานสูงสุดในชั้นทรายช่วงความลึก 9 ถึง 16.5 เมตร ได้ 58.4 kPa

ตารางที่ 6 พารามิเตอร์ของชั้นดินทราย

ความลึก (เมตร)	ϕ	δ	K_s	P_{avg} (kPa)
0 ถึง 9	34	26	0.7	49.5 คำนวณจาก (11x9/2)
9 ถึง 16.5	41	31	0.7	140.3 คำนวณจาก (11x9)+11x(16.5-9)/2

3.2 การคำนวณกำลังต้านทานในหินด้วยวิธี FHWA

การคำนวณหน่วยแรงเสียดทานสูงสุดในหินด้วยวิธี FHWA กรณีนี้ ค่า q_u ของหินมีค่าสูงกว่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตรูปทรงกระบอก (f'_c เท่ากับ 24 MPa) ดังนั้นใช้สมการที่ 6 คำนวณค่า f_{max} ได้เท่ากับ 1,012 kPa การคำนวณหน่วยแรงแบกทานสูงสุดที่ปลายเสาเข็มในหินเลือกใช้สมการที่ 9 เนื่องจากค่า RQD ของตัวอย่างหินที่เก็บจากหลุมเจาะในโครงการ (ค่าเฉลี่ย RQD ประมาณ 41%) มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ของสมการที่ 7 และสมการที่ 8 เมื่อพิจารณาระดับการผุพัง จัดว่าอยู่ในคุณภาพระดับ “Fair” ตามตารางที่ 1 และหินแกรนิตจัดอยู่ในกลุ่ม “E” ตามตารางที่ 2 ทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ s และ m เท่ากับ 0.0001 และ 0.5 ตามลำดับ แทนค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดในสมการที่ 9 จะได้ q_{max} เท่ากับ 4,170 kPa

3.3 การคำนวณกำลังต้านทานในหินด้วยวิธี Tomlinson

การคำนวณหน่วยแรงเสียดทานสูงสุดใช้ค่าปัจจัยลดทอนกำลัง α ประมาณ 0.04 (รูปที่ 2) ค่า J เท่ากับ 0.2 (ตารางที่ 3) และค่า β เท่ากับ 0.65 (รูปที่ 3) จากสมการที่ 10 จะได้ค่า f_{max} เท่ากับ 1,144 kPa

การคำนวณหน่วยแรงแบกทานสูงสุดที่ปลายเสาเข็มในที่นี้เลือกใช้สมการที่ 12 เนื่องจากตัวอย่างหินพบรอยแตกมากพอสมควร (RQD < 70%) ค่า q_{max} คำนวณ

จากค่า 0.33q_u ได้เท่ากับ 14.5 MPa ตรวจสอบแล้วน้อยกว่า f_c' (24 MPa) เลือกใช้ 14.5 MPa

กำลังเสียดทานสูงสุด (Q_f) ของแต่ละช่วงความลึก (L) คำนวณได้จาก f_s หรือ f_{max} คูณด้วยพื้นที่ผิวสัมผัส (A_s)

ตารางที่ 7 แสดงผลการคำนวณกำลังเสียดทานสูงสุดของแต่ละช่วงความลึก ในกรณีวิธี Tomlinson ตรวจสอบค่า Q_f/2 ได้เท่ากับ 4,187 kN ขณะที่กำลังรับน้ำหนักปลอดภัยของเสาเข็มคำนวณจากกำลังอัดของคอนกรีตอัดที่ยอมให้ 6 MPa มีค่าเท่ากับ 3,000 kN ถือว่าใช้ได้

ตารางที่ 7 ผลการคำนวณกำลังเสียดทานสูงสุดของเสาเข็มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.80 เมตร

L (m)	A_S (m^2)	FHWA		Tomlinson	
		f_s and f_{max} (kPa)	Q_f (kN)	f_s and f_{max} (kPa)	Q_f (kN)
9	22.62	16.5	374	16.5	374
7.5	18.85	58.4	1,101	58.4	1,101
2.4	6.03	1,012	6,104	1,144	6,898
		รวม	7,579		8,373

กำลังแบกทานสูงสุดที่ปลายเสาเข็ม (Q_b) คำนวณจาก q_{max} คูณด้วยพื้นที่หน้าตัด 0.50 ตารางเมตร ตามวิธี FHWA มีค่าเท่ากับ 2,097 kN และวิธี Tomlinson มีค่าเท่ากับ 7,294 kN

ตารางที่ 8 แสดงผลการคำนวณกำลังเสียดทานสูงสุดของแต่ละช่วงความลึกสำหรับเสาเข็มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 เมตร (ระยะฝังในหิน 3 เมตร) ใช้หลักการคำนวณตามตารางที่ 7 จะได้ค่า Q_f ตามวิธี FHWA เท่ากับ 9,543 kN และวิธี Tomlinson เท่ากับ 10,788 kN ตามลำดับ

กำลังแบกทานสูงสุดที่ปลายเสาเข็ม (Q_b) คำนวณจาก q_{max} คูณด้วยพื้นที่หน้าตัด 0.786 ตารางเมตร ตามวิธี FHWA มีค่าเท่ากับ 3,276 kN และวิธี Tomlinson มีค่าเท่ากับ 11,397 kN

ตารางที่ 9 แสดงค่ากำลังแบกทานประลัย (Q_u) ซึ่งได้จากผลรวมของ Q_f และ Q_b กำลังแบกทานที่ยอมให้ (Q_a) ได้จาก Q_u หารด้วย FS ที่ใช้เท่ากับ 2.5 สำหรับวิธี FHWA และ 3 สำหรับ Tomlinson

ตารางที่ 8 ผลการคำนวณกำลังเสียดทานเสาเข็มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 เมตร

L (m)	A_S (m^2)	FHWA		Tomlinson	
		f_s and f_{max} (kPa)	Q_f (kN)	f_s and f_{max} (kPa)	Q_f (kN)
9	28.64	16.5	473	16.5	473
7.5	23.56	58.4	1,376	58.4	1,376
3	9.43	1,012	9,543	1,144	10,788
		รวม	11,392		12,637

ตารางที่ 9 ผลการคำนวณกำลังแบกทานทั้งหมด

ค่า	ขนาด 0.80		ขนาด 1.00	
kN	FHWA	Tomlinson	FHWA	Tomlinson
Q_f	7,579	8,373	11,392	12,637
Q_b	2,097	7,294	3,276	11,397
Q_u	9,676	15,667	14,668	24,034
Q_a	3,870	5,222	5,867	8,011

4. การเปรียบเทียบและอภิปลายผล

4.1 เปรียบเทียบผลการคำนวณระหว่าง FHWA และ Tomlinson

ผลการคำนวณด้วยวิธี FHWA แสดงให้เห็นว่าเสาเข็มอาศัยแรงต้านจากกำลังเสียดทานเป็นหลักหรือเป็นเสาเข็มเสียดทาน (Friction Pile) คิดเป็นร้อยละ 78 ของกำลังแบกทานทั้งหมดซึ่งต่างจากวิธี Tomlinson ที่ค่ากำลังเสียดทานมากกว่ากำลังต้านทานที่ปลายเสาเข็มเล็กน้อย เนื่องจากค่าหน่วยแรงแบกทานที่ปลายเสาเข็มมีค่าค่อนข้างสูง หากพิจารณาเฉพาะส่วนของกำลังเสียดทาน

ในชั้นหิน วิธี FHWA และ Tomlinson ไม่แตกต่างกันมากนัก โดยที่วิธีหลังให้ค่าสูงกว่าเล็กน้อย ที่ไม่ต่างกันมากเนื่องจาก FHWA จะใช้กำลังต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีตแทนเมื่อหินมีกำลังสูงกว่าคอนกรีต (สมการที่ 6) ส่วนวิธีของ Tomlinson เมื่อพิจารณาค่า α ตามเส้นกราฟ ในรูปที่ 2 พบว่าค่ากำลังอัดของหินที่สูงกว่า 20 MPa ค่า α เกือบคงที่อยู่ในระดับต่ำสุดที่ประมาณ 0.04 ซึ่งเป็นค่าที่นำมาคำนวณแล้วจะให้ผลลัพธ์อยู่ในช่วงที่เทียบเคียงกันได้กับค่าทั่วไปของกำลังต้านแรงเฉือนของคอนกรีต ที่แตกต่างกันมากคือกำลังต้านทานที่ปลายเสาเข็ม พบว่าวิธี Tomlinson มีค่าสูงกว่าประมาณ 3 เท่า อันเป็นผลจากทั้งสองวิธีใช้สูตรและค่าพารามิเตอร์เชิงประสบการณ์บนพื้นฐานที่แตกต่างกัน ทำให้กำลังแบกทานที่ยอมให้สูงกว่าประมาณร้อยละ 30 แม้ว่าวิธี Tomlinson ใช้อัตราส่วนความปลอดภัย 3 เท่าซึ่งสูงกว่าวิธี FHWA ที่ใช้ 2.5 เท่า แต่วิธี FHWA ยังให้ผลการคำนวณในเชิงอนุรักษ์นิยมกว่า

อย่างไรก็ตาม ค่าน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยของเสาเข็ม (Q_{safe}) นั้นจะต้องตรวจสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มที่ควบคุมโดยขีดจำกัดกำลังอัดของคอนกรีตด้วย กฎกระทรวงมหาดไทยฉบับที่ 6 พศ.2527 [18] กำหนดให้หน่วยแรงอัดคอนกรีตที่ยอมให้ (f_c) สำหรับหน้าตัดคอนกรีตล้วนคือ 6 MPa ใน (ค่าเหมือนกันกับที่แนะนำโดย Tomlinson) เมื่อคูณด้วยพื้นที่หน้าตัดจะได้กำลังแบกทานของเสาเข็มที่ยอมให้โดยคอนกรีต (Q_{ac}) กำลังรับน้ำหนักบรรทุกปลอดภัย (Q_{safe}) ให้เลือกค่าน้อยกว่าระหว่างค่า Q_a กับ Q_{ac} ดังนั้นค่า Q_{safe} ของเสาเข็มขนาด 0.80 และ 1.00 เมตรจึงมีค่าเท่ากับ 3,000 kN และ 4,716 kN (ใช้จริงกำหนดไว้ 4,500 kN) ตามลำดับ

4.2 เปรียบเทียบระหว่างผลการคำนวณกับผลการทดสอบเสาเข็ม

การทดสอบเสาเข็มขนาด 0.80 และ 1.00 เมตร (รูปที่ 4 และ 5) ในสนามทำด้วยวิธีสถิตศาสตร์ (Static Load Test) กำหนดน้ำหนักทดสอบเสาเข็มขนาด 0.80 เมตรสูงสุดไว้ที่ 7,500 kN คิดเป็น 2.5 เท่าของน้ำหนักบรรทุกใช้งานที่กำหนดไว้ที่ 3,000 kN สำหรับเสาเข็มขนาด 1.00 เมตร กำหนดน้ำหนักทดสอบสูงสุดไว้ที่ 11,250 kN คิดเป็น 2.5 เท่าของน้ำหนักบรรทุกใช้งานที่กำหนดไว้ 4,500 kN ตารางที่ 10 แสดงข้อมูลสำคัญจากผลการทดสอบเสาเข็ม

รูปที่ 4 การทดสอบน้ำหนักบรรทุกเสาเข็มขนาด 0.80 (ภาพถ่ายเมื่อวันที่ 18 ม.ค. 2564)

รูปที่ 5 การทดสอบน้ำหนักบรรทุกเสาเข็มขนาด 1.00 (ภาพถ่ายเมื่อวันที่ 2 ก.พ. 2564)

ตารางที่ 10 ผลการทดสอบเสาเข็ม

ขนาด	น้ำหนักทดสอบสูงสุด (kN)	ค่าทรุดตัวสูงสุด (มม.)	ค่าทรุดตัวถาวร (มม.)
0.80	7,500	10.59	5.43
1.00	11,250	8.35	4.95

จากผลการทดสอบเสาเข็มทั้ง 2 ขนาด เมื่อพิจารณาจากค่าการทรุดตัวสูงสุดพบว่าค่าน้ำหนักทดสอบสูงสุดที่ใช้ยังไม่ใช่ค่าที่ทำให้เกิดการวิบัติซึ่งสอดคล้องกับค่าจากการคำนวณทั้งสองวิธี แต่ด้วยข้อจำกัดบางประการจึงไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์พิเศษใดๆเพิ่มเติมในเสาเข็ม ทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์แรงเสียดทานและแรงต้านที่ปลายเสาเข็มจากการทดสอบเสาเข็มได้ เป็นผลให้ไม่สามารถระบุได้ว่าระหว่างวิธี FHWA และ Tomlinson วิธีใดมีความแม่นยำกว่ากัน

อย่างไรก็ตาม ประเด็นสำคัญอยู่ตรงที่หินซึ่งมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตจึงสร้างแรงต้านได้สูงมาก โดยปกติเสาเข็มอาศัยแรงเสียดทาน กำลังเสียดทานจะพัฒนาก่อนกำลังต้านทานที่ปลายเสาเข็ม กับกรณีนี้ เช่น เสาเข็มขนาด 0.80 เมตร Q_f เท่ากับ 7,579 kN (FHWA) และ 8,373 kN (Tomlinson) ก็มีค่ามากกว่า Q_{safe} ที่ 3,000 kN อยู่มาก แม้ใช้อัตราส่วนความปลอดภัย 2 เท่า (ตามแนวทาง Tomlinson) ก็ยังมากกว่าอยู่ดี เสาเข็มขนาด 1.00 เมตรก็มีผลไปในทิศทางเดียวกัน ผลตรงนี้มีนัยสำคัญว่าหากเสาเข็มฝังในหินที่มีกำลังสูงกว่าคอนกรีต การจะลดระยะฝังในหินก็สามารถคำนวณใหม่ได้

4.3 แนวทางวิเคราะห์ระยะฝังประสิทธิผล

แนวทางการวิเคราะห์อาจเริ่มจากกำหนดระยะฝัง ($\boldsymbol{L_s}$) ในหิน 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม (D) ไว้ก่อน จากนั้นคำนวณ Q_f และ Q_b แล้วตรวจสอบว่า $Q_a > Q_{ac}$ และ $Q_f/2 > Q_{ac}$ หรือไม่ (Q_{ac} คือกำลังแบกทานคำนวณจากหน่วยแรงอัดคอนกรีตที่ยอมให้ 6 MPa) หากมีค่ามากกว่า Q_{ac} อย่างมีนัยสำคัญ สามารถพิจารณาลดระยะฝังโดยกำหนดให้ระยะฝังประสิทธิผล ($\boldsymbol{L_e}$) คำนวณบนสมมติฐานว่าถ้า $Q_f/2$ มากกว่า Q_{ac} ให้คำนวณใหม่โดยกำหนดค่า Q_f ที่ต้องการให้มีค่าเป็น 2 เท่าของ Q_{ac} (ใช้ FS เท่ากับ 2 สำหรับกำลังเสียดทานนั่นเอง) ทำให้เขียนสมการได้ดังสมการที่ 14

$$L_e = L_s - [(Q_f - 2Q_{ac})/(\pi D f_{max})] \quad (14)$$

ตัวอย่างการคำนวณค่า $\boldsymbol{L_e}$ เสาเข็มขนาด 0.80 จากวิธี FHWA ($\boldsymbol{L_s}$ = 2.4 ม.) จะได้

$\boldsymbol{L_e}$= 2.4 – [(7,579 – 2*6,000)/$\boldsymbol{\pi}$0.8*1,012)] = 1.8 ม.

และจากวิธี Tomlinson จะได้

$\boldsymbol{L_e}$= 2.4 – [(8,373 – 2*6,000)/$\boldsymbol{\pi}$0.8*1,012)] = 1.5 ม.

จากตัวอย่างการคำนวณ เห็นได้ว่าถ้าหินมีกำลังอัดแกนเดียวสูงกว่า 44 MPa ที่ใช้ในการศึกษานี้ ระยะฝังประสิทธิผลจะตื้นได้กว่านี้อีก ทั้งนี้ ค่า Q_f ค่าใหม่ (หรือ $2Q_{ac}$ นั่นเอง) เมื่อรวมกับ Q_b และหารด้วยอัตราส่วนความปลอดภัยเป็นค่า Q_a แล้วจะต้องไม่น้อยกว่า Q_{ac}

5. สรุปผลการศึกษา

การวิเคราะห์กำลังแบกทานเสาเข็มปลายฝังในหินด้วยวิธี FHWA และ Tomlinson เป็นวิธีที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน เพียงแต่การกำหนดค่าตัวแปรในการคำนวณเป็นหัวใจสำคัญเนื่องจากเป็นสูตรเชิงประสบการณ์ การศึกษาเสาเข็มเจาะจำนวน 2 ต้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.80 และ 1.00 เมตร ปลายฝังในหินแกรนิตผุพังปานกลางลึก 2.4 เมตรและ 3.0 เมตร ตามลำดับ โดยมีชั้นทรายหนาประมาณ 16.5 เมตรอยู่เหนือชั้นหิน สรุปได้ว่าการคำนวณทั้งสองวิธีแสดงผลลัพธ์กำลังเสียดทานที่ใกล้เคียงกันแต่วิธีของ Tomlinson ให้ผลลัพธ์ค่ากำลังต้านทานที่ปลายเสาเข็มสูงกว่าอีกวิธีค่อนข้างมากเนื่องจากสูตรที่ใช้ไม่ได้คำนึงถึงระดับความผุพังของหิน ผลการคำนวณกำลังแบกทานที่ยอมให้แสดงให้เห็นอีกว่ามีค่าสูงกว่ากำลังแบกทานจากหน่วยแรงอัดที่ยอมให้ของคอนกรีต อันเป็นผลมาจากกำลังอัดแกนเดียวของหินมีค่าสูงกว่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีต

ผลจากการเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการทดสอบเสาเข็มบอกเป็นนัยว่ากำลังแบกทานที่คำนวนจากทั้งสองวิธีมีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยค่อนข้างสูงเกินความจำเป็นเนื่องจากระยะฝังที่กำหนดไว้ 3 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม แนวคิดในการคำนวณระยะฝังประสิทธิผลจากกำลังเสียดทานสูงสุดที่กำหนดให้มีค่าเป็น

2 เท่าของกำลังแบกทานที่ได้จากหน่วยแรงอัดที่ยอมให้ของคอนกรีตเป็นอีกทางเลือกที่นำมาประยุกต์ใช้ได้

ตัวอย่างการคำนวณ (D = 0.80 m)

จากค่าพารามิเตอร์ในตารางที่ 6

กำลังเสียดทานสูงสุดในชั้นดินถึงความลึก 9 เมตร

f_S = 0.7*tan26*49.5 = 16.5 kPa

A_S = π0.8*9 = 22.62 m^2

กำลังเสียดทานสูงสุดในชั้นดินความลึก 9 ถึง 16.5 เมตร

f_S = 0.7*tan31*140.3 = 58.4 kPa

A_S = π0.8*7.5 = 18.85 m^2

วิธี FHWA

กำลังเสียดทานสูงสุดในชั้นหิน

f_{max} = 0.65*101(24,000/101)$^{0.5}$ = 1,012 kPa

A_S = π0.8*2.4 = 6.03 m^2

กำลังเสียดทานสูงสุดทั้งหมด

Q_f = (16.5*22.62) + (58.4*18.85) + (1,012*6.03) = 7,579 kN

กำลังแบกทานสูงสุดในชั้นหิน

q_{max} = [0.0001$^{0.5}$ + (0.5*0.0001$^{0.5}$ + 0.0001)$^{0.5}$] *44,000 = 4,170 kPa

Q_b = 4,170* π0.8^2/4 = 2,097 kN

Q_u = 7,579 + 2,097 = 9,676 kN

Q_a = 9,676/2.5 = 3,870 kN

วิธี Tomlinson

กำลังเสียดทานสูงสุดในชั้นหิน

α = 0.04 (รูปที่ 2) J = 0.2 (ตารางที่ 3) และ β = 0.65 (รูปที่ 3)

f_{max} = 0.2*0.65*44,000 = 1,144 kPa

กำลังเสียดทานสูงสุดทั้งหมด

Q_f = (16.5*22.91) + (58.4*18.85) + (1,144*6.03) = 8,373 kN

กำลังแบกทานสูงสุดในชั้นหิน

q_{max} = 0.33*44,000 = 14,500 kPa

Q_b = 14,500* π0.8^2/4 = 7,294 kN

Q_u = 8,373 + 7,294 = 15,667 kN

Q_a = 15,667/3 = 5,222 kN

กำลังแบกทานของเสาเข็มจากหน่วยแรงอัดที่ยอมให้ของคอนกรีต (6,000 kPa)

Q_{ac} = 6,000* π0.8^2/4 = 3,000 kN

Q_{ac} < Q_a ดังนั้น

Q_{ac} = Q_{safe} = 3,000 kN

6. เอกสารอ้างอิง

[1] J. Xu, G. Dai, W. Gong, Q. Zhang, A. Haque and R. P. Gamage, “A review of research on the shaft resistance of rock-socketed piles,” *Acta Geotechnica*, vol.16, no.3, pp. 653-677, 2020.

[2] S. J. Kim, S. Y. Kwon, J. T. Han and M. YOO, “Development of rock embedded drilled shaft resistance factors in Korea based on field tests,” *Applied Sciences*, vol. 9, no.11, pp. 1-17, 2019.

[3] M. W. O’Niel and L. C. Reese, “Drill Shafts: Construction Procedure and Design Method”, Federal Highway Administration, USA, Publication No. FHWA-IF-99-025, 1999.

[4] K. Terzaghi, R.B. Peck and G. Mesri, *Soil Mechanics in Engineering Practice*. 3rd Ed. Cambridge, John Wiley & Sons, 1995.

[5] M. Sagong, K. Paik and D. Kim, “A new approach to estimate side resistance of rock socketed drilled shafts,” *Soils and Foundations*, vol.47, no.2, pp. 415–421, 2007.

[6] M. J. Tomlinson, *Pile Design and Construction Practice*. 4th Ed. Chapman & Hall, 1994.

[7] A. Srikongsri, D. Rangsan, C. Chaivijarn, V. Panichacarn and N. Eursiriwan, “Bearing capacity analysis of rock-socketed pile using FHWA (1999) method,” *Journal of Science and Technology Sukhothai Thammathirat Open University*, vol.2, no.2 (July - December), pp. 23-31, 2022.

[8] F. H. Kulhawy, W. A. Prakoso and S. O. Akbas, “Evaluation of capacity of rock foundation sockets,” in *40th U.S. Symposium on Rock Mechanics*, *Alaska Rocks 2005*, *Rock Mechanics for Energy, Mineral and Infrastructure Development in the Northern Regions*, Anchorage, Alaska, 2005, pp. 635-642.

[9] R. K. Rowe and H. H. Armitage, “A design method for drilled piers in soft rock,” *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 24, pp. 126–142, 1987.

[10] P. J. N. Pells, “State practice for design of socketed piles in rock,” in *8th Australia New Zealand Conference on Geomechanics*, Nihal Vitharana and Randal Colman Eds., Hobart, 1999, pp. 307-327.

[11] J. P. Carter and F. H. Kulhawy, “Analysis and design of drilled shaft foundations socketed into rock,” Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, Report EL-5918, 1988.

[12] A. F. Williams and P. J. N. Pells, “Side resistance rock sockets in sandstone, mudstone, and shale,” *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 18, pp. 502–513, 1981.

[13] L. Zhang and H. H. Einstein, “End bearing capacity of drilled shafts in sock*,” Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 124, no. 7, pp. 574–584, 1998.

[14] Transportation Research Board of the National Academies, “Rock-Socketed Shafts for Highway Structure Foundations: A Synthesis of Highway Practice”, National Cooperative Highway Research Program, Washington, DC, Transportation Research Board, 2006.

[15] AASHTO, “Section10: estimation of drilled shaft resistance in rock” in *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*, 4th Ed., American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 2007, pp. 137-142.

[16] M. J. Tomlinson and J. Woodward, *Pile Design and Construction Practice*. 5th Ed. Taylor & Francis, 2008.

[17] M. J. Tomlinson and J. Woodward*, Pile Design and Construction Practice*. 6th Ed. CRC Press, 2015.

[18] Ministerial regulation no. 6 (B.E. 2527) issued under the building control act, B.E. 2522, 1979.

Srinakharinwirot University Engineering Journal (2024) 19(1), 114-131 วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีที่ 19 ฉบับที่ 1 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2566 – มีนาคม พ.ศ. 2567

กระบวนการคัดเลือกผู้ประกอบการเพื่อป้องกันการทอดทิ้งงานก่อสร้าง ในหน่วยงานภาครัฐ

The Contractor Selection Process in Order to Prevent Abandonment of The Construction Work in The Public Sector

สุดนิรันดร์ เพชรัตน์* อิทธิพร ศิริสวัสดิ์ รุ่งอรุณ บุญถ่าน ศานติ จินตรัตน์
ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
อ.องครักษ์ จ.นครนายก 26120
Sudniran Phetcharat* Ittiporn Sirisawat Roongarun Buntan Santi Chintarat
Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering,
Srinakharinwirot University, Ongkharak, Nakhonnayok 26120
*Corresponding author Email: sudniran@g.swu.ac.th
(Received: December 26, 2023; Revised: January 21, 2024 ; Accepted: January 31, 2024)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ลักษณะโครงการก่อสร้างในหน่วยงานของรัฐที่ถูกทิ้งงาน วิเคราะห์ปัจจัยที่เป็นสาเหตุของการทิ้งงานและแนวทางการคัดเลือกผู้ประกอบการเพื่อป้องกันการทิ้งงานโครงการก่อสร้างในหน่วยงานของรัฐ ขั้นตอนการวิจัยแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ การวิเคราะห์ข้อมูลจากหนังสือแจ้งรายชื่อผู้ทิ้งงานของกรมบัญชีกลาง ปีงบประมาณ พ.ศ.2555-2559 และการวิเคราะห์ข้อมูลจากการสำรวจด้วยแบบสอบถาม ด้วยสถิติการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงสำรวจ จากผลการวิจัยพบว่า ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากหนังสือแจ้งรายชื่อผู้ทิ้งงาน พบว่า ลักษณะโครงการก่อสร้างที่ถูกทิ้งงานจำนวนมากที่สุด คือ 1) งานก่อสร้างประเภทงานทาง สะพาน และท่อเหลี่ยม 2) โครงการที่จัดจ้างตามระเบียบกระทรวงมหาดไทยว่าด้วยการพัสดุของหน่วยการบริหารราชการส่วนท้องถิ่น พ.ศ. 2535 3) ผู้ทิ้งงานเป็นห้างหุ้นส่วนจำกัด 4) ผู้ทิ้งงานเป็นกิจการที่มีทุนจดทะเบียนไม่เกิน 1,000,000 บาท และ 5) โครงการมีมูลค่า ระหว่าง 100,001 -500,000 บาท ส่วนลักษณะโครงการก่อสร้างที่ถูกทิ้งงานที่มีมูลค่าโดยรวมสูงที่สุด คือ 1) งานก่อสร้างประเภทงานอาคาร 2) การจัดจ้างตามระเบียบสำนักนายกรัฐมนตรีว่าด้วยการพัสดุ พ.ศ. 2535 3) ผู้ทิ้งงานเป็นห้างหุ้นส่วนจำกัด 4) ผู้ทิ้งงานเป็นกิจการที่มีทุนจดทะเบียนมากกว่า 10,000,000 บาท และ 5) โครงการที่มีมูลค่ามากกว่า 10 ล้านบาท ส่วนผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของปัจจัยที่เป็นสาเหตุของการทิ้งงาน 20 ตัวแปร พบว่า สามารถจัดกลุ่มตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันได้ 4 องค์ประกอบ คือ 1) แผนการเงินและการบริหารงานไม่มีประสิทธิภาพ 2) ความไม่พร้อมของปัจจัยหลัก 3) ความไม่เข้าใจเนื้องานและขั้นตอนการดำเนินงาน และ 4) การประสานงานไม่มีประสิทธิภาพ ส่วนผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของแนวทางการคัดเลือกผู้ประกอบการเพื่อป้องกันการทิ้งงานก่อสร้างในหน่วยงานภาครัฐ ทั้งหมด 11 ตัวแปร สามารถจัดกลุ่มตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันได้ 2 องค์ประกอบ คือ 1) การประเมินศักยภาพในการดำเนินงาน ซึ่งมีความสำคัญเป็นลำดับที่ 1 และ 2) ความผิดพลาดของผลงานที่ผ่านมา มีความสำคัญเป็นอันดับ 2 ดังนั้นจากผลการวิจัยนี้ สามารถเป็นข้อพิจารณาแนวทางการคัดเลือกผู้ประกอบการเพื่อป้องกันการทิ้งงานโครงการก่อสร้างในหน่วยงานของรัฐ ที่ควรสร้างเกณฑ์ในการคัดเลือกผู้ประกอบการด้วยการประเมินศักยภาพในการดำเนินงานของผู้ประกอบการ โดย 5 ตัวแปรแรก ที่ควรพิจารณา เรียงลำดับตามความสำคัญ มีดังนี้ 1) เกณฑ์ที่พิจารณาความพร้อมของบุคลากร และแผนบริหารบุคลากร 2)

เกณฑ์ที่พิจารณาฐานะทางการเงิน หรือเงินทุนหมุนเวียน 3) การประเมินผลการปฏิบัติงานของผู้ประกอบการ 4) การขึ้นทะเบียนผู้รับเหมา และ 5) เกณฑ์ที่พิจารณาความพร้อมของเครื่องจักร และผังการบริหารเครื่องจักร

คำสำคัญ: คัดเลือกผู้ประกอบการ การทิ้งงานก่อสร้าง หน่วยงานภาครัฐ

ABSTRACT

This research aims to analyze the characteristics of construction projects under the supervision of governmental organizations whose contractors abandon the work before the end of the contract. The factors to be analyzed are those that cause the projects to be abandoned and the protocol and methodology for selecting the construction contractors to ensure they will not abandon government-led projects. The research was divided into two parts, including analyzing the companies who abandoned work from the blacklist reported of The Comptroller General's Department for the fiscal years of B.E. 2555-2559 (2013–2016) and analysis of data obtained through surveys using statistical analysis of the surveyed component using exploratory factor analysis. The research results found that the type of construction projects that are abandoned most are 1) roads, bridges, and square tunnels construction, 2) projects procured under The Regulations of the Ministry of Interior on Procurement of Local Administration Agency, B.E. 2535 (1992), 3) the companies who are registered as Limited Partnership, 4) the company registration funds are less than 1,000,000 THB and 5) the values of the project are between 100,001–500,000 THB. Whereas the types of construction project that has a high overall value were found to be 1) building construction projects, 2) projects procured under The Regulations of the Office of the Prime Minister on Procurement, B.E. 2535 (1992), 3) the companies that are registered as Limited Partnerships, 4) the company registration funds are more than 10,000,000 THB and 5) the project's values are more than 10,000,000 THB. Analysis of the components of the factors contributing to the abandonment of governmental construction projects from 20 variables resulted in 4 categories of elements. These four components include 1) an inefficient financial and work management plan, 2) a lack of readiness of the main factor, 3) a lack of understanding of the required work and its working process, and 4) an inefficiency in the coordination of the project. Meanwhile, the analysis result of the components for the selection of contractors to prevent abandoning of construction projects under the government-led projects has 11 variables which can be categorized into two categories of elements: 1) work potential analysis is number 1 on the priority list, and 2) the failures in the past projects is ranked 2nd on the priority list. The results of this research should be used in considering the selection process of contractors for government-led construction projects to prevent abandoning the project at any point. Standardized criteria for selecting contractors should be set based on the company's potential to carry out the project. The first five variables that should be considered based on its priorities are 1) criteria for the appropriateness of personnel and personnel management plan, 2) financial status or cash-flow criteria, 3) criteria for assessing past projects or work

portfolio, 4) criteria for checking the contractor's registration or license and 5) criteria for assessing the availability of machinery and machinery management plan.

Keyword: Selection process of the contractor, abandon work in construction, governmental organization.

1. บทนำ

ปัญหาการทิ้งงานโครงการก่อสร้างของหน่วยงานภาครัฐ ก่อให้เกิดความเสียหายเป็นอย่างมาก เนื่องจากทำให้เกิดความสูญเปล่าของงบประมาณที่ได้รับอนุมัติให้ดำเนินโครงการก่อสร้าง และมีผลต่อการพิจารณาสนับสนุนงบประมาณในปีถัดไปของหน่วยงาน ถึงแม้ในระเบียบได้กำหนดการลงโทษผู้ทิ้งงานไม่ให้ก่อนิติสัมพันธ์กับหน่วยงานราชการถ้าผู้ประกอบการมีรายชื่อในบัญชีรายชื่อผู้ทิ้งงานที่ได้แจ้งเวียนชื่อแล้ว แต่ปัญหาผู้ทิ้งงานโครงการก่อสร้างในหน่วยงานภาครัฐยังคงเกิดขึ้นในหลาย ๆ หน่วยงาน ทั้งในกรณีที่ผู้ที่ได้รับการคัดเลือกแล้วไม่ยินยอมทำสัญญาจ้าง ไม่ปฏิบัติตามสัญญาจ้าง ไม่แก้ไขข้อบกพร่อง ผลงานมีข้อบกพร่องภายหลังจากที่ใช้งานแล้ว เกิดข้อบกพร่องขึ้นภายในระยะเวลาที่กำหนด หรืองานไม่ได้มาตรฐานไม่ถูกต้องครบถ้วนตามข้อกำหนด ถึงแม้แต่ละหน่วยงานจะพยายามป้องกันและหาแนวทางแก้ไขปัญหาดังกล่าว แต่ปัญหาการทิ้งงานก่อสร้างในหน่วยงานภาครัฐยังเกิดขึ้นอยู่

ที่ผ่านมางานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการทิ้งงานในหน่วยงานภาครัฐ [1]-[3] ส่วนใหญ่มุ่งเน้นศึกษาปัจจัยที่มีผลให้เกิดความล่าช้าในโครงการก่อสร้าง การช่วยเหลือผู้ประกอบการไม่ให้ทิ้งงาน หรือลักษณะปัญหาการทิ้งงานในภาครัฐ ซึ่งการวิจัยมีขอบเขตจำกัดเฉพาะกรณีศึกษานั้น ๆ ผลวิจัยจึงไม่ได้เสนอแนวทางการลดปัญหาผู้ทิ้งงานอย่างเป็นรูปธรรม ดังนั้น จึงควรมีการวิจัยเพื่อวิเคราะห์ลักษณะโครงการก่อสร้างในหน่วยงานงานภาครัฐที่ถูกทิ้งงาน วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่เป็นสาเหตุของการทิ้งงานก่อสร้างในหน่วยงานภาครัฐ และวิเคราะห์แนวทางการคัดเลือกผู้ประกอบการเพื่อป้องกันการทิ้งงานก่อสร้างในหน่วยงานภาครัฐ ซึ่งเป็นแนวทางสำคัญในการปรับปรุงกระบวนการคัดเลือกผู้ประกอบการรับเหมาก่อสร้าง [4], [5] ที่มีปัจจัยเสี่ยงที่จะทิ้งงานงานน้อยที่สุดมาเป็นผู้ดำเนินโครงการก่อสร้าง ซึ่งต้องทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับปัญหาที่เกิดขึ้นในการดำเนินงานก่อสร้างจนเป็นสาเหตุให้ผู้ประกอบการทิ้งงาน และรวบรวมข้อมูลมาวิเคราะห์เพื่อเสนอแนวทางการกำหนดคุณสมบัติเบื้องต้นของผู้ประกอบการ เพื่อปรับปรุงแนวทางการคัดเลือกผู้ประกอบการรับเหมาก่อสร้างให้เป็นผู้ที่มีโอกาสทิ้งงานน้อยที่สุด ภายใต้รูปแบบการจัดซื้อจัดจ้างที่โปร่งใส ประหยัด มีประสิทธิภาพและยุติธรรมตามหลักธรรมาภิบาล ซึ่งจะทำให้การใช้เงินภาษีของประชาชนเกิดความคุ้มค่ามากที่สุดขนาดและการตั้งค่ากระดาษ

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. วิเคราะห์ลักษณะโครงการก่อสร้างในหน่วยงานงานภาครัฐที่ถูกทิ้งงาน

2. วิเคราะห์องค์ประกอบของปัจจัยที่เป็นสาเหตุของการทิ้งงานก่อสร้างในหน่วยงานภาครัฐ

3. วิเคราะห์องค์ประกอบของแนวทางการคัดเลือกผู้ประกอบการเพื่อป้องกันการทิ้งงานก่อสร้างในหน่วยงานภาครัฐ

3. ขั้นตอนการวิจัย

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ลักษณะโครงการก่อสร้างในหน่วยงานของรัฐที่ถูกทิ้งงาน วิเคราะห์ปัจจัยที่เป็นสาเหตุของการทิ้งงานและแนวทางการคัดเลือกผู้ประกอบการเพื่อป้องกันการทิ้งงาน

โครงการก่อสร้างในหน่วยงานของรัฐ โดยพื้นที่ศึกษา คือ จังหวัดนครนายก ทั้งนี้ เพื่อให้การดำเนินงานบรรลุวัตถุประสงค์การวิจัยดังกล่าว ผู้วิจัยได้กำหนดขั้นตอนการวิจัยเป็นสองส่วนหลัก คือ การสำรวจข้อมูลสถิติผู้ทิ้งงานตามหนังสือแจ้งเวียนรายชื่อผู้ทิ้งงานของคณะกรรมการว่าด้วยการพัสดุ กรมบัญชีกลาง และวิเคราะห์ข้อมูลจากการสำรวจด้วยแบบสอบถาม โดยแผนภาพแสดงขั้นตอนการวิจัย ดังรูปที่ 1 และแสดงรายละเอียดในข้อที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ

รูปที่ 1 แผนการดำเนินโครงการกระบวนการคัดเลือกผู้ประกอบการเพื่อป้องกันการทอดทิ้งงานก่อสร้างในหน่วยงานภาครัฐ

3.1 การสำรวจข้อมูลจากสถิติผู้ทิ้งงาน

การสำรวจสถิติข้อมูลผู้ทิ้งงานตามหนังสือแจ้งเวียนรายชื่อผู้ทิ้งงาน ของคณะกรรมการว่าด้วยการพัสดุ กรมบัญชีกลาง กระทรวงการคลัง ในปีงบประมาณ พ.ศ. 2555-2559 (ตุลาคม 2554-กันยายน 2559) [6] โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. การวิเคราะห์ข้อมูลการทิ้งงานโครงการจัดซื้อจัดจ้างในหน่วยงานของรัฐทั้งหมดในแต่ละปีงบประมาณ โดยจำแนกเป็นจำนวนหนังสือแจ้งรายชื่อผู้ทิ้งงาน จำนวนผู้ทิ้งงาน จำนวนโครงการที่ถูกทิ้งงาน และจำแนกตามประเภทงาน

2. วิเคราะห์ข้อมูลโครงการจัดซื้อจัดจ้างในหน่วยงานของรัฐที่ถูกทิ้งงาน จำแนกตามประเภทของโครงการที่ถูกทิ้งงาน ซึ่งจำแนกเป็น 3 ประเภท ดังนี้ 1) โครงการก่อสร้าง 2) โครงการจัดซื้อ และ 3) โครงการจ้างที่ปรึกษา

จ้างบริการ และจ้างอื่น ๆ โดยวิเคราะห์จำนวนโครงการและมูลค่าของโครงการ

3. วิเคราะห์ข้อมูลโครงการก่อสร้างในหน่วยงานของรัฐที่ถูกทิ้งงาน จำแนกตามลักษณะของงานก่อสร้าง ซึ่งจำแนกเป็น 4 ประเภท คือ 1) งานอาคาร 2) งานทางสะพาน และท่อเหลี่ยม 3) งานชลประทาน และ 4) งานสาธารณูปโภคอื่น ๆ โดยวิเคราะห์จำนวนโครงการ และมูลค่าของโครงการ

4. วิเคราะห์ข้อมูลโครงการก่อสร้างในหน่วยงานภาครัฐที่ถูกทิ้งงานตามระเบียบการทิ้งงาน [7]-[9] ซึ่งจำแนกเป็น 4 ประเภท คือ 1) ระเบียบสำนักนายกรัฐมนตรีว่าด้วยการพัสดุ พ.ศ.2535 2) ระเบียบกระทรวงมหาดไทยว่าด้วยการพัสดุของหน่วยการบริหารราชการส่วนท้องถิ่น พ.ศ. 2535 3) ระเบียบกระทรวงมหาดไทยว่าด้วยการพัสดุขององค์การบริหารส่วนตำบล พ.ศ.2538 และ 4) ระเบียบอื่น ๆ โดยวิเคราะห์จำนวนโครงการ และมูลค่าของโครงการ

5. วิเคราะห์ข้อมูลโครงการก่อสร้างในหน่วยงานภาครัฐที่ถูกทิ้งงานตามประเภทกิจการ ซึ่งแบ่งเป็น 4 ประเภท คือ บริษัทจำกัด ห้างหุ้นส่วนจำกัด การประกอบพาณิชยกิจ และบุคคลธรรมดา โดยวิเคราะห์จำนวนโครงการ และมูลค่าของโครงการหัวข้อย่อยและหัวข้อย่อยรองลงมา

ทั้งนี้ งานวิจัยนี้ไม่ครอบคลุมไปถึงข้อมูลภายหลังพระราชบัญญัติการจัดซื้อจัดจ้างและการบริหารพัสดุภาครัฐ พ.ศ.2560 [10] ประกาศและมีผลบังบังคับใช้กับหน่วยงานของรัฐ ตั้งแต่วันที่ 23 สิงหาคม 2560 ที่ผ่านมา ซึ่งมีผลให้ยกเลิกบัญญัติเกี่ยวกับพัสดุ การจัดซื้อจัดจ้างหรือการบริหารพัสดุในกฎหมาย ระเบียบ ข้อบังคับ ประกาศ ข้อบัญญัติ และข้อกำหนดใด ๆ ของหน่วยงานของรัฐที่อยู่ภายใต้บังคับแห่งพระราชบัญญัตินี้ ดังนั้นจึงหมายความว่าในวันที่ 23 สิงหาคม 2560 เป็นต้นไป ระเบียบกระทรวงมหาดไทยว่าด้วยการพัสดุของหน่วยการบริหารราชการส่วนท้องถิ่น พ.ศ.2535 และระเบียบสำนักนายกรัฐมนตรีว่าด้วยการพัสดุ พ.ศ.2535 จะไม่มีผลบังคับใช้แก่หน่วยการบริหารราชการส่วนท้องถิ่นและส่วนราชการ

3.2 การสำรวจข้อมูลด้วยแบบสอบถาม

การสำรวจข้อมูลด้วยแบบสอบถาม เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่เป็นสาเหตุให้เกิดการทิ้งงาน และแนวทางการคัดเลือกผู้ประกอบการเพื่อป้องกันการทิ้งงานก่อสร้างในหน่วยงานภาครัฐ โดยใช้วิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบ (Factor Analysis) ซึ่งเป็นเทคนิคทางสถิติ สำหรับการวิเคราะห์หลายตัวแปร เพื่อลดจำนวนตัวแปรที่มีอยู่จำนวนมาก โดยตัวแปรภายในองค์ประกอบเดียวกัน จะมีความสัมพันธ์กันสูง ส่วนตัวแปรที่ต่างองค์ประกอบจะสัมพันธ์กันน้อยหรือไม่มี ซึ่งแสดงรายละเอียดของการกำหนดประชากรและจำนวนตัวอย่างในการสำรวจ เครื่องมือสำรวจ การเก็บรวบรวมข้อมูล การตรวจสอบคุณภาพของเครื่องมือการสำรวจ การวิเคราะห์ข้อมูลและสถิติในการวิเคราะห์ข้อมูล และการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงสำรวจ ข้อที่ 3.2.1-3.2.6 ตามลำดับ

3.2.1 การกำหนดประชากร จำนวนตัวอย่างในการสำรวจ

กลุ่มตัวอย่าง คือ ผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการจัดซื้อจัดจ้างในหน่วยงานภาครัฐ ทั้งในกรณีที่เป็นเจ้าหน้าที่ของรัฐหรือบุคลากรในหน่วยงานเอกชน สถานประกอบการ หรือผู้รับเหมา ที่อยู่ในเขตจังหวัดนครนายก

จำนวนตัวอย่างในการสำรวจ ได้กำหนดจำนวนตัวอย่างที่ต้องการสุ่ม ภายใต้เงื่อนไขการวิเคราะห์องค์ประกอบ คือ จำนวนข้อมูล (Case) ควรมากกว่าจำนวนตัวแปรอย่างน้อย 10 เท่า [11]

ทั้งนี้ ในแบบสอบถามส่วนที่ 2 มีจำนวนตัวแปรตัวแปรมากที่สุด คือ 20 ตัวแปร ดังนั้น จำนวนตัวอย่างต้องไม่น้อยกว่า 200 ตัวอย่าง ซึ่งการสำรวจในครั้งนี้มีตัวอย่างจำนวน 224 ตัวอย่าง เป็นไปตามเงื่อนไขการวิเคราะห์องค์ประกอบ

3.2.2 เครื่องมือการสำรวจ

เครื่องมือการสำรวจ คือ แบบสอบถาม ประกอบด้วย 2 ส่วน ดังนี้

แบบสอบถามส่วนที่ 1 ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม จะเป็นคำถามปลายปิดเลือกได้ 1 คำตอบ เพื่อสำรวจปัจจัยส่วนบุคคลของผู้ตอบแบบสอบถามจำนวน 8 ข้อ ประกอบด้วย ประเภทหน่วยงานที่ผู้ตอบแบบสอบถามสังกัดในปัจจุบัน ผู้ตอบแบบสอบถามเคยอยู่ในหน่วยงานภาครัฐที่มีโครงการก่อสร้างถูกทิ้งงานในช่วงปีงบประมาณ 2555-ปัจจุบันหรือไม่ ผู้ตอบแบบสอบถามเคยอยู่ในหน่วยงานเอกชนที่มีรายชื่อเป็นผู้ทิ้งงาน ในช่วงปีงบประมาณ 2555-ปัจจุบันหรือไม่ เพศ อายุ ระดับการศึกษา ประสบการณ์ทำงาน และการปฏิบัติหน้าที่ในองค์กร

แบบสอบถามส่วนที่ 2 ปัจจัยที่เป็นสาเหตุให้เกิดการทิ้งงานเป็นคำถามปลายปิดจำนวน 20 ข้อ ที่ให้ผู้ตอบแบบสอบถามให้คะแนน จาก 1-5 ตามลำดับความสำคัญของแต่ละตัวแปร ซึ่งความหมายของระดับคะแนน มีดังนี้

คะแนนระดับ 5หมายถึง มากที่สุด
คะแนนระดับ 4 หมายถึง ค่อนข้างน้อย
คะแนนระดับ 3 หมายถึง ปานกลาง
คะแนนระดับ 2 หมายถึง ค่อนข้างน้อย
คะแนนระดับ 1 หมายถึง น้อย

แบบสอบถามส่วนที่ 3 แนวทางการคัดเลือกผู้ประกอบการเพื่อป้องกันการทิ้งงานก่อสร้างในหน่วยงานภาครัฐ เป็นคำถามปลายปิดจำนวน 11 ข้อ ที่ให้ผู้ตอบแบบสอบถามให้คะแนน จาก 1-5 ตามลำดับความสำคัญของแต่ละตัวแปร ซึ่งความหมายของระดับคะแนน มีดังนี้

คะแนนระดับ 5 หมายถึง มากที่สุด
คะแนนระดับ 4 หมายถึง ค่อนข้างน้อย
คะแนนระดับ 3 หมายถึง ปานกลาง
คะแนนระดับ 2 หมายถึง ค่อนข้างน้อย
คะแนนระดับ 1 หมายถึง น้อย

3.2.3 การเก็บรวบรวมข้อมูล

การสำรวจข้อมูลด้วยแบบสอบถามกับผู้ตอบแบบสอบถามโดยตรง และเพื่อให้ลักษณะของกลุ่มที่เลือกเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการวิจัยที่ได้กำหนดไว้ จึงใช้วิธีการสุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง (Purposive Sampling) โดยมุ่งเน้นตัวอย่างที่เป็นเจ้าหน้าที่ของรัฐหรือบุคลากรในหน่วยงานเอกชนที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการจัดซื้อจัดจ้างโครงการก่อสร้างในหน่วยงานภาครัฐ

3.2.4 การตรวจสอบคุณภาพของเครื่องมือการสำรวจ

การประเมินคุณภาพเครื่องมือที่ใช้ในการสำรวจข้อมูลในครั้งนี้ประกอบด้วย คือ การทดสอบความเที่ยงตรง (Validity) ซึ่งเป็นลักษณะที่บ่งชี้ว่าเครื่องมือนี้สามารถวัดในสิ่งที่ประสงค์จะวัดคือ สามารถเก็บรวบรวมข้อมูลหรือวัดค่าตัวแปรได้ตรงตามวัตถุประสงค์ของการวิจัย และทดสอบความเชื่อถือได้ (Reliability) ซึ่งเป็นการแสดงถึงความคงที่แน่นอนในการวัด ดังรายละเอียดในข้อที่ 3.2.4.1 และ 3.2.4.2 ตามลำดับ

3.2.4.1 การทดสอบความเที่ยงตรง (Validity)

ในการทดสอบความเที่ยงตรงตามเนื้อหาด้วยการหาค่าสัมประสิทธิ์ความสอดคล้อง (Index of Item – Objective Congruence; IOC) ดังสมการที่ (1) โดยเชิญผู้ทรงคุณวุฒิ จำนวน 5 ท่าน เป็นผู้พิจารณาแบบทดสอบถามเป็นรายข้อ

$$IOC = (\sum R)/N \qquad (1)$$

เมื่อ IOC คือ ความสอดคล้องระหว่างวัตถุประสงค์กับแบบทดสอบ

$\sum R$ คือ ผลรวมของคะแนนจากผู้ทรงคุณวุฒิทั้งหมด

N คือ จำนวนผู้ทรงคุณวุฒิ

โดยการแปลความ เมื่อค่า IOC มากกว่า 0.50 แสดงว่าแบบสอบถามมีความสอดคล้องตามวัตถุประสงค์

3.2.4.2 การทดสอบความเชื่อถือได้ (Reliability)

การทดสอบความเชื่อถือของแบบสอบถามด้วยสัมประสิทธิ์ Cronbach's Alpha ที่ใช้วัดความ

สอดคล้องภายในของคำตอบหลาย ๆ ข้อในแบบสอบถามชุดเดียวกัน โดย ค่า Cronbach's Alpha เป็นค่าที่เกิดจากค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของคำถามทุกคำถาม [11] ดังสมการที่ (2)

$$= \frac{k\,\overline{covariance}/\overline{variance}}{1+(k-1)\overline{covariance}/\overline{variance}} \qquad (2)$$

เมื่อ k คือ จำนวนคำถาม

$\overline{covariance}$ คือ ค่าเฉลี่ยของค่าแปรปรวนร่วมระหว่างคำถามต่าง ๆ

$\overline{variance}$ คือ ค่าเฉลี่ยของค่าแปรปรวนของคำถามต่าง ๆ

ในกรณีที่มีการ Standized แต่ละคำถาม ค่า Cronbach's Alpha สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3

$$= \frac{k\bar{r}}{1+(k-1)\bar{r}} \qquad (3)$$

เมื่อ $\bar{r}$ คือ ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างคำถามต่าง ๆ

โดยการแปลความหมายจากค่า สัมประสิทธิ์ Cronbach's Alpha หากพบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 0.50-0.65 แสดงว่า มีความเชื่อถือได้ปานกลาง หากมีค่าตั้งแต่ 0.70 ขึ้นไป แสดงว่ามีความเชื่อถือได้ค่อนข้างสูง แต่ถ้าหากมีค่าน้อยกว่า 0.50 แสดงว่ามีความเชื่อถือได้น้อย

3.2.5 การวิเคราะห์ข้อมูลและสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลจากการสำรวจด้วยแบบสอบถาม ใช้สถิติในการวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้น ดังนี้

1. ส่วนที่ 1 ข้อมูลเบื้องต้น ด้านปัจจัยส่วนบุคคลของผู้แบบตอบสอบถาม วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้ความถี่และร้อยละ

2. ส่วนที่ 2 ปัจจัยที่เป็นสาเหตุให้เกิดการทิ้งงานโครงการก่อสร้างในหน่วยงานของรัฐ วิเคราะห์โดยใช้ความถี่ ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงสำรวจ

3. ส่วนที่ 3 แนวทางการคัดเลือกผู้ประกอบการเพื่อป้องกันการทิ้งงานก่อสร้างในหน่วยงานภาครัฐ วิเคราะห์โดยใช้ความถี่ ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงสำรวจ

3.2.6 การวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงสำรวจ (Exploratory Factor Analysis) [12], [13]

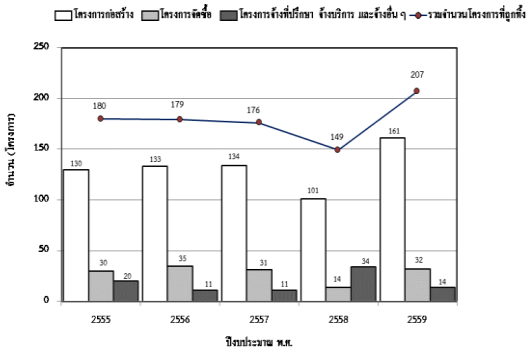
การวิเคราะห์ข้อมูลการสำรวจด้วยแบบสอบถามส่วนที่ 2 ปัจจัยที่เป็นสาเหตุให้เกิดการทิ้งงาน และส่วนที่ 3 แนวทางการคัดเลือกผู้ประกอบการเพื่อป้องกันการทิ้งงานก่อสร้างในหน่วยงานภาครัฐ โดยใช้การวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงสำรวจ (Exploratory Factor Analysis) โดยใช้โปรแกรม SPSS 22 (Trial Version) เพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ใช้การสกัดปัจจัยด้วยวิธีตัวประกอบหลักปัจจัย (Principal Components Factoring) ด้วยการหมุนแกนปัจจัย (Factor Rotation) แบบฉาก (Orthogonal Rotation) ซึ่งเป็นวิธีการหมุนแกนปัจจัยที่ยังคงทำให้ปัจจัยยังคงตั้งฉากกัน โดยเปรียบเทียบจากการหมุนด้วยวิธี วาริแมกซ์ (Verimax) ควาติแมกซ์ (Quautimax) และอีควอแมกซ์ (Equamax) ที่สามารถจัดกลุ่มตัวแปรและอธิบายความหมายของแต่ละองค์ประกอบได้ชัดเจนที่สุด

4. ผลการวิจัย

4.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการทิ้งงานในหน่วยงานรัฐจากหนังสือแจ้งรายชื่อผู้ทิ้งงาน

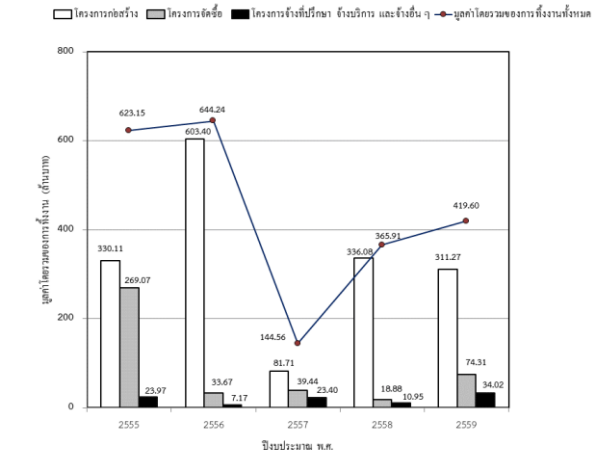
จากการวิเคราะห์ข้อมูลการทิ้งงานโครงการก่อสร้างในหน่วยงานของรัฐ จากหนังสือแจ้งรายชื่อผู้ทิ้งงานของกรมบัญชีกลาง กระทรวงการคลัง ในปีงบประมาณ พ.ศ.2555-2559 [6] เพื่อนำเสนอภาพรวมของการทิ้งงานโครงการก่อสร้างในหน่วยงานภาครัฐ ด้วยการวิเคราะห์จำนวนโครงการที่ถูกทิ้งงานและวิเคราะห์มูลค่าโดยรวม

จากการวิเคราะห์ข้อมูลจากสถิติการทิ้งงานในหน่วยงานของรัฐ จำแนกตามประเภทงานที่จำแนกเป็น 3 ประเภท คือ 1) โครงการก่อสร้าง 2) โครงการจัดซื้อ และ 3) โครงการจ้างที่ปรึกษา จ้างบริการ และจ้างอื่น ๆ โดยแสดงจำนวนโครงการที่ถูกทิ้งงาน และสัดส่วนของการทิ้งงานจำแนกประเภทงาน ปีงบประมาณ 2555-2559 ดังรูป 2 และ 3 ตามลำดับ พบว่าในแต่ละปีงบประมาณ โครงการที่ถูกทิ้งงานมากที่สุด ได้แก่ โครงการประเภทงานก่อสร้าง และงานประเภท



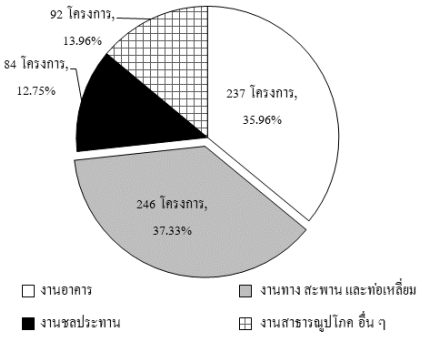
โครงการก่อสร้างมีมูลค่าถูกทิ้งงานโดยรวมมากที่สุดด้วยเช่นกันในทุกปีงบประมาณ

รูปที่ 2 จำนวนการทิ้งงานในหน่วยงานของรัฐจำแนกตามประเภทงาน ปีงบประมาณ 2555-2559

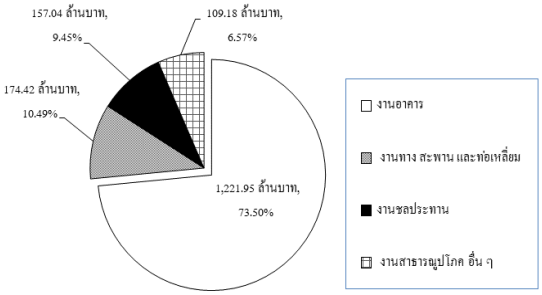


รูปที่ 3 มูลค่าโดยรวมของการทิ้งงานในหน่วยงานของรัฐจำแนกตามประเภทงาน ปีงบประมาณ 2555-2559

เมื่อทำการวิเคราะข้อมูลการทิ้งงานโครงการก่อสร้างในหน่วยงานของรัฐ จำแนกตามประเภทงานก่อสร้าง ซึ่งแบ่งเป็น 4 ประเภท คือ 1) งานอาคาร 2) งานทาง สะพาน และท่อเหลี่ยม 3) งานชลประทาน และ 4) งานสาธารณูปโภคอื่น ๆ ในปีงบประมาณ 2555-2559 ดังรูปที่ 4 และ 5 พบว่า โครงการที่ถูกทิ้งงานจำนวนมากที่สุด คือ งานทาง สะพานและท่อเหลี่ยม และงานอาคาร ตามลำดับ ส่วนงานประเภทงานอาคาร มีมูลค่าถูกทิ้งงานโดยรวมสูงที่สุดในทุกปีงบประมาน



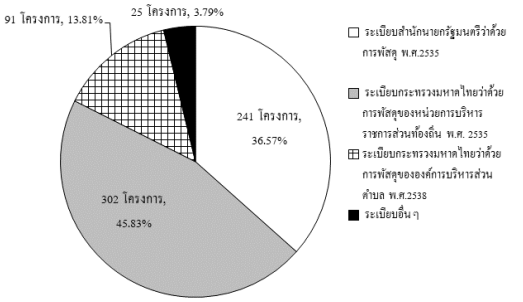
รูปที่ 4 สัดส่วนของการทิ้งงานโครงการก่อสร้างในหน่วยงานของรัฐ จำแนกตามประเภทงานก่อสร้างในช่วงปีงบประมาณ 2555-2559



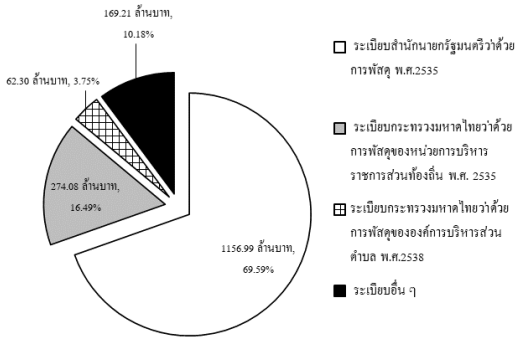
รูปที่ 5 สัดส่วนของมูลค่าโดยรวมการทิ้งงานโครงการก่อสร้างในหน่วยงานของรัฐ จำแนกตามประเภทงานก่อสร้าง ในช่วงปีงบประมาณ 2555-2559

ในการวิเคราะห์ค่าสถิติของการทิ้งงานโครงการก่อสร้างในหน่วยงานของรัฐ ปีงบประมาณ 2555-2559 โดยจำแนกตามระเบียบการจัดซื้อจัดจ้าง ซึ่งแบ่งเป็น 4 ประเภท คือ ระเบียบสำนักนายกรัฐมนตรีว่าด้วยการพัสดุ พ.ศ.2535 ระเบียบกระทรวงมหาดไทยว่าด้วยการพัสดุของหน่วยการบริหารราชการส่วนท้องถิ่น พ.ศ. 2535 ระเบียบกระทรวงมหาดไทยว่าด้วยการพัสดุขององค์การบริหารส่วนตำบล พ.ศ.2538 และ ระเบียบอื่น ๆ เช่น ระเบียบการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ฉบับที่ 26 ว่าด้วยการพัสดุ พ.ศ.2546 ระเบียบคณะกรรมการบริหารศาลยุติธรรมว่าด้วยการพัสดุ พ.ศ. 2545 ระเบียบโรงงานยาสูบ กระทรวงการคลัง ว่าด้วยการพัสดุ พ.ศ.2535 ดังรูปที่ 6 และ 7 พบว่า โครงการก่อสร้างที่จัดซื้อจัดจ้างตามระเบียบกระทรวงมหาดไทยว่าด้วยการพัสดุของหน่วยการบริหารราชการส่วนท้องถิ่น พ.ศ.2535 มีจำนวนถูกทิ้งงานมากที่สุด แต่โครงการก่อสร้างที่จัดซื้อจัดจ้างตามระเบียบสำนักนายกรัฐมนตรีว่าด้วยการพัสดุ พ.ศ.2535 มีมูลค่าถูกทิ้งงานโดยรวมสูงที่สุด เนื่องจากมูลค่าต่อโครงการมีปริมาณมาก

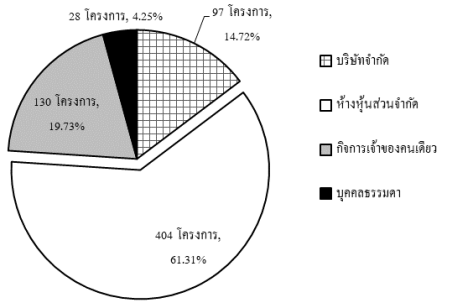
โดยการวิเคราะห์ข้อมูลการทิ้งงานโครงการก่อสร้างในหน่วยงานของรัฐ ในปีงบประมาณ 2555-2559 โดยจำแนกตามประเภทกิจการของผู้ทิ้งงาน ซึ่งแบ่งเป็น 4 ประเภท คือ 1) บริษัทจำกัด 2) ห้างหุ้นส่วนจำกัด 3) กิจการเจ้าของคนเดียว และ 4) บุคคลธรรมดา ดังรูปที่ 8 และ 9 พบว่า ในช่วงปีงบประมาณ 2555-2559 ผู้ที่ประกอบกิจการประเภทห้างหุ้นส่วนจำกัด ทิ้งงานโครงการก่อสร้างในหน่วยงานของรัฐจำนวนมากที่สุดในทุกปีงบประมาณ และยังมีมูลค่าโดยรวมที่ถูกทิ้งงานของโครงการสูงสุด รองลงมาเป็นเป็นผู้ประกอบกิจการประเภทบริษัทจำกัด กิจการเจ้าของคนเดียว และ บุคคลธรรมดา ตามลำดับ



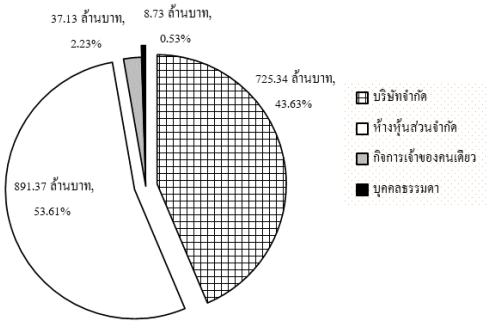
รูปที่ 6 สัดส่วนการทิ้งงานโครงการก่อสร้างในหน่วยงานของรัฐ จำแนกตามระเบียบการทิ้งงานในช่วงปีงบประมาณ 2555-2559



รูปที่ 7 สัดส่วนของมูลค่าโดยรวมของการทิ้งงานโครงการก่อสร้าง จำแนกตามระเบียบการจัดซื้อจัดจ้างในปีงบประมาณ 2555-2559



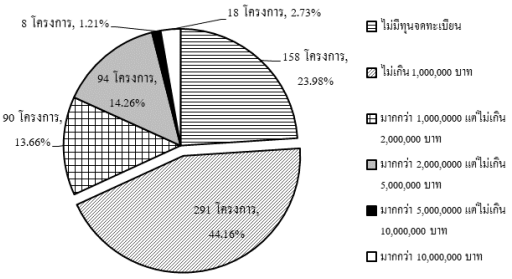
รูปที่ 8 สัดส่วนของการทิ้งงานโครงการก่อสร้างในหน่วยงานของรัฐ จำแนกตามประเภทกิจการของผู้ทิ้งงาน ในปีงบประมาณ 2555-2559



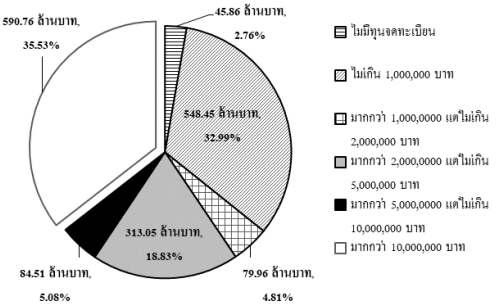
รูปที่ 9 สัดส่วนของมูลค่าการทิ้งงานโครงการก่อสร้างในหน่วยงานของรัฐ จำแนกตามประเภทกิจการของผู้ทิ้งงาน ในช่วงปีงบประมาณ 2555-2559

จากการวิเคราะห์สถิติการทิ้งงานโครงการก่อสร้างในหน่วยงานของรัฐ จำแนกตามทุนจดทะเบียนของผู้ทิ้งงาน ซึ่งแบ่งเป็น 6 ประเภท คือ 1) บุคคลธรรมดา และกิจการคนเดียว (ไม่มีทุนจดทะเบียน) 2) ทุนจดทะเบียนไม่เกิน 1,000,000 บาท 3) ทุนจดทะเบียนมากกว่า 1,000,000 บาท แต่ไม่เกิน 2,000,000 บาท 4) ทุนจดทะเบียนมากกว่า 2,000,000 บาท แต่ไม่เกิน 5,000,000 บาท 5) ทุนจดทะเบียนมากกว่า 5,000,000 บาท แต่ไม่เกิน 10,000,000 บาท และ กลุ่มที่ 6) ทุนจดทะเบียนมากกว่า 10,000,000 บาท ดังรูปที่ 10 และ 11 พบว่า กิจการที่มีทุนจดทะเบียนไม่เกิน 1,000,000 บาท เป็นผู้ทิ้งงานโครงการก่อสร้างในหน่วยงานของรัฐที่มีจำนวนสูงที่สุดในทุกปีงบประมาณ

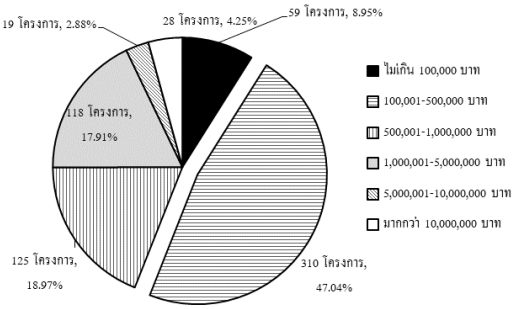
ทั้งนี้ ในการวิเคราะห์สถิติการทิ้งงานโครงการก่อสร้างในหน่วยงานของรัฐ จำแนกตามมูลค่าโครงการ ซึ่งแบ่งเป็น 6 กลุ่ม คือ 1) โครงการที่มูลค่าไม่เกิน 100,000 บาท 2) โครงการที่มีมูลค่าระหว่าง 100,001-500,000 บาท 3) โครงการที่มีมูลค่าระหว่าง 500,001-1,000,000 บาท 4) โครงการที่มีมูลค่าระหว่าง 1,000,001-5,000,000 บาท 5) โครงการที่มีมูลค่าระหว่าง 5,000,001-10,00,000 บาท และ 5) โครงการที่มีมูลค่ามากกว่า 10,000,000 บาท ตามลำดับ ดังรูปที่ 12 และ 13 พบว่า การทิ้งงานโครงการก่อสร้างที่มีมูลค่าระหว่าง 100,001-500,000 บาท มีจำนวนสูงที่สุดในทุกปีงบประมาณ อย่างไรก็ตาม งานโครงการก่อสร้างในหน่วยงานของรัฐมีมูลค่ารายโครงการมากกว่า 10 ล้านบาท เป็นโครงการที่ถูกทิ้งงานที่มูลค่าโดยรวมสูงสุด



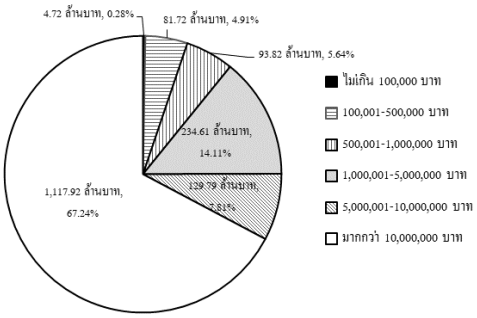
รูปที่ 10 สัดส่วนของการทิ้งงานโครงการก่อสร้างในหน่วยงานของรัฐ จำแนกตามทุนจดทะเบียนของผู้ทิ้งงาน ปีงบประมาณ 2555-2559



รูปที่ 11 สัดส่วนของมูลค่าโดยรวมของการทิ้งงานโครงการก่อสร้างในหน่วยงานของรัฐ จำแนกตามทุนจดทะเบียนของผู้ทิ้งงาน ในช่วงปีงบประมาณ 2555-2559



รูปที่ 12 สัดส่วนของการทิ้งงานโครงการก่อสร้างในหน่วยงานของรัฐ จำแนกตามมูลค่าโครงการ ในช่วงปีงบประมาณ 2555-2559



รูปที่ 13 สัดส่วนของมูลค่าโดยรวมของโครงการก่อสร้างที่ถูกทิ้งงานจำแนกตามมูลค่าของโครงการในช่วงปีงบประมาณ 2555-2559

ซึ่งจากการวิเคราะห์สถิติการทิ้งงานโครงการก่อสร้างในหน่วยงานของรัฐ จำแนกตามปัจจัยต่าง ๆ ที่กล่าวมาข้างต้น สามารถสรุปได้ตามตารางที่ 1 ถึง 3 โดยตารางที่ 1 แสดงสรุปสถิติการทิ้งงานโครงการก่อสร้างในหน่วยงานของรัฐ มีสัดส่วนการทิ้งงานสูงที่สุดในทุกปีงบประมาณ โดยมีสัดส่วน ร้อยละ 67.79-77.79 ของจำนวนโครงการที่ถูกทิ้งงานในแต่ละปีงบประมาณ ในส่วนของการวิเคราะห์มูลค่าโดยรวม พบว่า ในปีงบประมาณ 2555-2559 การทิ้งงานโครงการก่อสร้างมีมูลค่าโดยรวมสูงที่สุดในทุกปีงบประมาณ โดยมีสัดส่วนของมูลค่าโดยรวม ร้อยละ 52.97-91.85 ของมูลการทิ้งงานทั้งหมดในแต่ละปีงบประมาณ จากข้อมูลดังกล่าวแสดงถึงความสำคัญของปัญหาการทิ้งงานของโครงการก่อสร้าง ซึ่งเป็นโครงการส่วนใหญ่ที่ถูกทิ้งงาน และมีสัดส่วนของมูลค่าโดยรวมสูงที่สุดเมื่อเทียบกับโครงการจัดซื้อจัดจ้างงานประเภทอื่นในหน่วยงานของรัฐในแต่ละปีงบประมาณ เป็นผลเสียต่อการพัฒนาประเทศ ทำให้การเบิกจ่ายงบประมาณไม่เป็นไปตามแผนรายจ่ายงบประมาณประจำปี อีกทั้งยังก่อให้เกิดความเสียหายแก่หน่วยงานของรัฐที่ไม่สามารถใช้ประโยชน์จากพัสดุที่จัดซื้อจัดจ้างดังกล่าวตามกำหนดเวลา

ตารางที่ 1 สถิติการทิ้งงานโครงการก่อสร้างในหน่วยงานของรัฐ ปีงบประมาณ 2555-2559 [6]

ปีงบประมาณ พ.ศ.	จำนวนโครงการก่อสร้างที่ถูกทิ้งงาน		มูลค่าโดยรวมของโครงการก่อสร้างที่ถูกทิ้งงาน	
	จำนวนโครงการ	สัดส่วน (ร้อยละ)	มูลค่าโดยรวม (ล้านบาท)	สัดส่วนของมูลค่าโดยรวม (ล้านบาท)
2555	130	72.22	330.11	52.97
2556	133	74.30	603.40	93.66
2557	134	76.14	81.71	56.52
2558	101	67.79	336.08	91.85
2559	161	77.78	311.27	74.18

ทั้งนี้ในส่วนของการวิเคราะห์ข้อมูลการทิ้งงานโครงการก่อสร้างในหน่วยภาครัฐ จำแนกตามลักษณะโครงการก่อสร้าง 5 ตัวแปร คือ ประเภทงานก่อสร้าง ระเบียบการจัดซื้อจัดจ้าง ประเภทกิจการของผู้ทิ้งงาน ทุนจดทะเบียน และมูลค่ารายโครงการ โดยพิจารณาลักษณะโครงการที่มีสัดส่วนการทิ้งงานสูงที่สุด และมีสัดส่วนของมูลค่าโดยรวมสูงสุด ดังตารางที่ 2 และ 3 ตามลำดับ

จากตารางที่ 2 สรุปตัวแปรด้านลักษณะของการทิ้งงานก่อสร้างที่มีสัดส่วนการทิ้งงานสูงที่สุด ในช่วงปีงบประมาณ 2555-2559 คือ 1) งานทาง สะพาน และท่อเหลี่ยม 2) โครงการก่อสร้างที่จัดจ้างตามระเบียบกระทรวงมหาดไทยว่าด้วยการพัสดุของหน่วยการบริหารราชการส่วนท้องถิ่น พ.ศ. 2535 3) ผู้ทิ้งงานประกอบกิจการประเภทห้างหุ้นส่วนจำกัด 5) กิจการที่มีทุนจดทะเบียน ไม่เกิน 1,000,000 บาท และ 6) มีมูลค่ารายโครงการมากกว่า 100,000 บาท แต่ไม่เกิน 500,000 บาท

ส่วนตารางที่ 3 แสดงการสรุปตัวแปรด้านลักษณะของการทิ้งงานโครงการก่อสร้าง ที่มีสัดส่วนของมูลค่าโดยรวมสูงที่สุด ในช่วงปีงบประมาณ 2555-2559 คือ 1) โครงการก่อสร้างประเภทงานอาคาร 2) โครงการ

ก่อสร้างที่จัดจ้างตามระเบียบสำนักนายกรัฐมนตรีว่าด้วยการพัสดุ พ.ศ. 2535 3) ผู้ทิ้งงานประกอบกิจการประเภทห้างหุ้นส่วนจำกัด 4) กิจการที่มีทุนจดทะเบียนมากกว่า 10,000,000 บาท และ 5) โครงการที่มีมูลค่ามากกว่า 10 ล้านบาท

ตารางที่ 2 ตัวแปรด้านลักษณะการทิ้งงานโครงการก่อสร้างที่มีสัดส่วนการทิ้งงานสูงที่สุด ปีงบประมาณ 2555-2559

ตัวแปร	ลักษณะการทิ้งงานก่อสร้างที่มีจำนวนสูงที่สุด	จำนวนโครงการ	ร้อยละ
1.ประเภทของงานก่อสร้าง	งานทาง สะพาน และท่อเหลี่ยม	246	37.33
2.ระเบียบการจัดซื้อจัดจ้าง	ระเบียบกระทรวงมหาดไทยว่าด้วยการพัสดุของหน่วยการบริหารราชการส่วนท้องถิ่น พ.ศ. 2535	302	45.83
3.ประเภทกิจการของผู้ทิ้งงาน	ห้างหุ้นส่วนจำกัด	404	61.31
4.ทุนจดทะเบียน	องค์กรธุรกิจที่มีทุนจดทะเบียนไม่เกิน 1,000,000 บาท	291	44.16
5.มูลค่าโครงการ	โครงการที่มีมูลค่าระหว่าง 100,001-500,000 บาท	310	47.04

4.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของปัจจัยที่เป็นสาเหตุของการทิ้งงานโครงการก่อสร้างในหน่วยงานของรัฐ

การวิเคราะห์องค์ประกอบของปัจจัยที่เป็นสาเหตุของการทิ้งงานโครงการก่อสร้างในหน่วยงานของรัฐ จาก 20 ตัวแปร ดังตารางที่ 4 มีค่าสถิติสถิติของไคเซอร์-ไมเยอร์-โอลคิน (KMO) เท่ากับ 0.881 ซึ่งเป็นค่าที่มากกว่า 0.800 แสดงว่า ข้อมูลทั้งหมดและตัวแปรต่าง ๆ นั้น มีความสัมพันธ์กันดีมาก สามารถนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบตามจุดหมายของการวิจัยได้ ส่วนค่าสถิติของบาร์ทเลทท์ (Bartlett's Test of Sphericity) พบว่า ค่าสถิติ Chi-Square (χ^2) มีค่าเท่ากับ 1884.833 มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 แสดงว่า เมตริกซ์สหสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ มีความสัมพันธ์กัน ดังนั้น เมทริกซ์สหสัมพันธ์ จึงเหมาะสมที่จะใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบ

ตารางที่ 3 ตัวแปรด้านลักษณะการทิ้งงานโครงการก่อสร้าง ที่มีสัดส่วนของมูลค่าโดยรวมสูงที่สุด ปีงบประมาณ 2555-2559

ตัวแปร	ลักษณะการทิ้งงานก่อสร้างที่มีจำนวนสูงที่สุด	มูลค่าโดยรวม (ล้านบาท)	ร้อยละ
1.ประเภทของงานก่อสร้าง	งานอาคาร	1,221.95	73.50
2.ระเบียบการจัดซื้อจัดจ้าง	การพิจารณาให้เป็นผู้ทิ้งงานตามระเบียบสำนักนายกรัฐมนตรีว่าด้วยการพัสดุ พ.ศ. 2535	1,156.99	69.59
3.ประเภทกิจการของผู้ทิ้งงาน	ห้างหุ้นส่วนจำกัด	891.37	53.61
4.ทุนจดทะเบียน	องค์กรธุรกิจที่มีทุนจดทะเบียนมากกว่า 10,000,000 บาท	548.45	32.99
5.มูลค่าโครงการ	โครงการที่มีมูลค่ามากกว่า 10 ล้าน	1,117.92	67.24

ผลของการสกัดองค์ประกอบ พบว่า มีองค์ประกอบที่มีค่าไอเกนมากกว่า 1 จำนวน 4 องค์ประกอบ สามารถอธิบายความแปรปรวนได้ 58.083 พิจารณาผลการหมุนแกนองค์ประกอบด้วย วิธี

วารีแมกซ์ วิธีควาคิแมกซ์ และอีควอแมกซ์ พบว่า การหมุนแบบอีควอแมกซ์ ทำให้ค่าน้ำหนักองค์ประกอบมีความชัดเจนสามารถอธิบายองค์ประกอบได้ชัดเจนกว่าวิธีอื่น จึงเลือกผลการหมุนแกนองค์ประกอบแบบอีควอแมกซ์มาใช้ และตั้งชื่อองค์ประกอบใหม่ ดังนี้ องค์ประกอบที่ 1 แผนการเงินและการบริหารงานไม่ประสิทธิภาพ สามารถอธิบายความแปรปรวนปัจจัยที่เป็นสาเหตุให้เกิดการทิ้งงานก่อสร้างในหน่วยงานของรัฐ ได้ร้อยละ 15.155 และมีความสำคัญเป็นอันดับ 1 องค์ประกอบที่ 2 ความไม่พร้อมของปัจจัยหลักในการดำเนินงาน สามารถอธิบายความแปรปรวนปัจจัยที่เป็นสาเหตุให้เกิดการทิ้งงานก่อสร้างในหน่วยงานของรัฐ ได้ร้อยละ 15.078 องค์ประกอบที่ 3 ความไม่เข้าใจเนื้องานและขั้นตอนการดำเนินงาน สามารถอธิบายความแปรปรวนของปัจจัยที่เป็นสาเหตุให้เกิดการทิ้งงานก่อสร้างในหน่วยงานของรัฐ ได้ร้อยละ 14.730 และองค์ประกอบที่ 4 การประสานงานระหว่างผู้ประกอบการและหน่วยงานของรัฐสามารถอธิบายความแปรปรวนปัจจัยที่เป็นสาเหตุให้เกิดการทิ้งงานก่อสร้างในหน่วยงานของรัฐ ได้ร้อยละ 13.161

การวิเคราะห์องค์ประกอบของปัจจัยที่เป็นสาเหตุของการทิ้งงานโครงการก่อสร้างในหน่วยงานของรัฐ สามารถอธิบายความหมายของแต่ละองค์ประกอบได้ดังนี้

องค์ประกอบที่ 1 แผนการเงินและการบริหารงานไม่ประสิทธิภาพ สามารถอธิบายด้วยตัวแปร 6 ตัวแปร คือ ผู้ประกอบการขาดสภาพคล่องทางการเงิน ผู้ประกอบการจัดหาวัสดุก่อสร้างไม่ตรงตามแผน ผู้ประกอบการบริหารงวดงานไม่ได้ ผู้ประกอบการการบริหารบุคลากรไม่มีประสิทธิภาพ ผู้ประกอบการบริหารเครื่องจักรไม่มีประสิทธิภาพ และประเมินสถานที่ก่อสร้างผิดพลาด มีพิสัยของค่าน้ำหนักองค์ประกอบอยู่ระหว่าง 0.425-0.740 มีค่าไอเกน 3.023 และค่าความแปรปรวนร้อยละ 15.115 โดยตัวแปรที่ 16 ผู้ประกอบการขาดสภาพคล่องทางการเงิน มีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบนี้สูงสุด ส่วนตัวแปรที่ 12 ประเมินสถานที่ก่อสร้างผิดพลาด มีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบนี้ต่ำสุด องค์ประกอบนี้สามารถอธิบายความแปรปรวนปัจจัยที่เป็นสาเหตุให้เกิดการทิ้งงานก่อสร้างในหน่วยงานของรัฐ ได้ร้อยละ 15.155 เมื่อเปรียบเทียบค่าไอเกนกับองค์ประกอบอื่นทั้ง 4 องค์ประกอบแล้ว องค์ประกอบนี้มีความสำคัญเป็นอันดับ 1

องค์ประกอบที่ 2 ความไม่พร้อมของปัจจัยหลักในการดำเนินงาน สามารถอธิบายด้วยตัวแปร 5 ตัวแปร คือ ผู้ประกอบการมีเครื่องจักร เครื่องมือ ไม่เพียงพอ ผู้ประกอบมีบุคลากรงานก่อสร้างไม่เพียงพอ ผู้ประกอบการมีจำนวนบุคลากรที่มีทักษะ ฝีมือ หรือความชำนาญไม่เพียงพอ วัสดุก่อสร้างขาดแคลน และการเกิดอุบัติเหตุจากการปฏิบัติงานในโครงการก่อสร้าง มีพิสัยของค่าน้ำหนักองค์ประกอบอยู่ระหว่าง 0.449-0.804 มีค่าไอเกน 3.016 และค่าความแปรปรวนร้อยละ 15.078 โดยตัวแปรที่ 3 ผู้ประกอบการมีเครื่องจักร เครื่องมือไม่เพียงพอมีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบนี้สูงสุด ส่วนตัวแปรที่ 10 การเกิดอุบัติเหตุจากการปฏิบัติงานในโครงการก่อสร้าง มีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบนี้ต่ำสุด องค์ประกอบนี้สามารถอธิบายความแปรปรวนปัจจัยที่เป็นสาเหตุให้เกิดการทิ้งงานก่อสร้างในหน่วยงานของรัฐได้ร้อยละ 15.078 เมื่อเปรียบเทียบค่าไอเกนกับองค์ประกอบอื่นทั้ง 4 องค์ประกอบแล้ว องค์ประกอบนี้มีความสำคัญเป็นอันดับ 2

องค์ประกอบที่ 3 ความไม่เข้าใจเนื้องานและขั้นตอนการดำเนินงาน สามารถอธิบายด้วยตัวแปร 5 ตัวแปร คือ แบบก่อสร้างและรายการประกอบแบบไม่ชัดเจน งบประมาณของโครงการ สภาพอากาศเป็นอุปสรรคต่อการก่อสร้าง โครงการมีมูลค่าต่ำกว่าราคากลางมากกว่าร้อยละ 15 กฎ ระเบียบ และข้อกฎหมายยากต่อการปฏิบัติ และคุณภาพของงานก่อสร้างไม่เป็นไปตามมาตรฐาน หรือไม่ถูกต้อง มีพิสัยของค่า

น้ำหนักองค์ประกอบอยู่ระหว่าง 0.555-0.689 มีค่าไอเกน 2.94 และค่าความแปรปรวนร้อยละ 14.730 โดยตัวแปรที่ 17 แบบก่อสร้างและรายการประกอบแบบไม่ชัดเจน มีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบนี้สูงสุด ส่วนตัวแปรที่ 18 คุณภาพของงานก่อสร้างไม่เป็นไปตามมาตรฐาน หรือไม่ถูกต้อง มีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบนี้ต่ำสุด องค์ประกอบนี้สามารถอธิบายความแปรปรวนของปัจจัยที่เป็นสาเหตุให้เกิดการทิ้งงานก่อสร้างในหน่วยงานของรัฐ ได้ร้อยละ 14.730 เมื่อเปรียบเทียบค่าไอเกนกับองค์ประกอบอื่นทั้ง 4 องค์ประกอบแล้ว องค์ประกอบนี้มีความสำคัญเป็นอันดับ 3

ส่วนองค์ประกอบที่ 4 การประสานงานระหว่างผู้ประกอบการและหน่วยงานของรัฐ สามารถอธิบายด้วยตัวแปร 4 ตัวแปร คือ กระบวนการเบิกจ่ายล่าช้า กระบวนการตรวจรับล่าช้า การสื่อสารระหว่างผู้ประกอบการและหน่วยงานของรัฐมีความคลาดเคลื่อน และการปรับราคาเพิ่มขึ้นของวัสดุก่อสร้าง น้ำมันเชื้อเพลิง หรือค่าแรง มีพิสัยของค่าน้ำหนักองค์ประกอบอยู่ระหว่าง 0.322-0.866 มีค่าไอเกน 2.632 และค่าความแปรปรวนร้อยละ 13.161 โดยตัวแปรกระบวนการเบิกจ่ายเงินล่าช้า มีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบนี้สูงสุด ส่วนตัวแปรการปรับราคาเพิ่มขึ้นของวัสดุก่อสร้าง น้ำมันเชื้อเพลิง หรือค่าแรง มีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบนี้ต่ำสุด องค์ประกอบนี้สามารถอธิบายความแปรปรวนปัจจัยที่เป็นสาเหตุให้เกิดการทิ้งงานก่อสร้างในหน่วยงานของรัฐได้ร้อยละ 13.161 เมื่อเปรียบเทียบค่าไอเกนกับองค์ประกอบอื่นทั้ง 4 องค์ประกอบแล้ว องค์ประกอบนี้มีความสำคัญเป็นอันดับ 4

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของปัจจัยที่เป็นสาเหตุของการทิ้งงานโครงการก่อสร้างในหน่วยงานของรัฐ

ตัวแปรขององค์ประกอบของปัจจัยที่เป็นสาเหตุของการทิ้งงานโครงการก่อสร้างในหน่วยงานของรัฐ	องค์ประกอบที่			
	1	2	3	4
	ลำดับความสำคัญ			
1.ผู้ประกอบการมีบุคลากรงานก่อสร้างไม่เพียงพอ		2		
2.วัสดุก่อสร้างขาดแคลน		4		
3.ผู้ประกอบการมีเครื่องจักร เครื่องมือ ไม่เพียงพอ		1		
4. ผู้ประกอบการมีจำนวนบุคลากรที่มีทักษะฝีมือ หรือความชำนาญไม่เพียงพอ		3		
5. ผู้ประกอบการบริหารบุคลากรไม่มีประสิทธิภาพ	4			
6. ผู้ประกอบการบริหารเครื่องจักรไม่มีประสิทธิภาพ	5			
7. ผู้ประกอบการจัดหาวัสดุก่อสร้างไม่ตรงตามแผนงาน	2			
8. ผู้ประกอบการบริหารงานตามงวดงานไม่ได้	3			
9. การปรับราคาเพิ่มขึ้นของวัสดุก่อสร้าง น้ำมันเชื้อเพลิง หรือค่าแรง				4
10. การเกิดอุบัติเหตุจากการปฏิบัติงาน ในโครงการก่อสร้าง		5		
11. สภาพอากาศเป็นอุปสรรคต่อการก่อสร้าง			3	
12. ประเมินสภาพสถานที่ก่อสร้างผิดพลาด	6			
13. กระบวนการตรวจรับงานล่าช้า				2
14. กระบวนการเบิกจ่ายเงินล่าช้า				1
15. การสื่อสารระหว่างผู้ประกอบการ และหน่วยงานของรัฐมีความคลาดเคลื่อน				3
16. ผู้ประกอบการขาดสภาพคล่องทางการเงิน	1			
17. แบบก่อสร้างและรายการประกอบแบบไม่ชัดเจน			1	
18. คุณภาพงานก่อสร้างไม่เป็นไปตามมาตรฐาน หรือไม่ถูกต้อง			5	
19. กฎ ระเบียบ และข้อกฎหมาย ยากต่อการปฏิบัติ			4	
20. งบประมาณของโครงการมีมูลค่าต่ำกว่าราคากลางมากกว่าร้อยละ 15			2	

หมายเหตุ องค์ประกอบที่ 1 คือแผนการเงินและการบริหารงานไม่มีประสิทธิภาพ, องค์ประกอบที่ 2 คือ ความไม่พร้อมของปัจจัยหลัก, องค์ประกอบที่ 3 คือ ความไม่เข้าใจเนื้องานและขั้นตอนการดำเนินงานและองค์ประกอบที่ 4 คือการประสานงานไม่มีประสิทธิภาพ

4.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบของแนวทางการคัดเลือกผู้ประกอบการเพื่อป้องกันการทิ้งงานโครงการก่อสร้างในหน่วยงานของรัฐ

การวิเคราะห์องค์ประกอบเพื่อหาแนวทางการคัดเลือกผู้ประกอบการเพื่อป้องกันการทิ้งงานโครงการก่อสร้างในหน่วยงานของรัฐ ทั้งหมด 11 ตัวแปร ดังตารางที่ 5 มีค่าสถิติของไคเซอร์-ไมเยอร์-โอลคิน (KMO) เท่ากับ 0.870 ซึ่งเป็นค่าที่มากกว่า 0.800 แสดงว่า ข้อมูลทั้งหมดและตัวแปรต่าง ๆ นั้น มีความสัมพันธ์กันดีมาก ส่วนค่าสถิติของบาร์ทเลทท์ (Bartlett's Test of Sphericity) พบว่า ค่าสถิติ Chi-Square (χ^2) มีค่าเท่ากับ 1036.003 มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 แสดงว่าเมตริกซ์สหสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ มีความสัมพันธ์กัน ดังนั้น เมทริกซ์สหสัมพันธ์ จึงเหมาะสมที่จะใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบ ผลของการสกัดองค์ประกอบพบว่ามีองค์ประกอบที่มีค่าไอเกนมากกว่า 1 จำนวน 2 องค์ประกอบ สามารถอธิบายความแปรปรวนได้ร้อยละ 57.389 พิจารณาผลการหมุนแกนองค์ประกอบด้วยวิธีวารีแมกซ์ วิธีควาคิแมกซ์ และอีควอแมกซ์ พบว่าการหมุนแบบวารีแมกซ์ ทำให้ค่าน้ำหนักองค์ประกอบของมีความชัดเจนสามารถอธิบายองค์ประกอบได้ชัดเจนกว่าวิธีอื่น จึงเลือกผลการหมุนแกนองค์ประกอบแบบวารีแมกซ์มาใช้ จากนั้นตั้งชื่อองค์ประกอบใหม่ คือ องค์ประกอบที่ 1 การประเมินความพร้อมและศักยภาพในการดำเนินงาน สามารถอธิบายความแปรปรวนร้อยละ 34.00 ซึ่งมีความสำคัญเป็นลำดับที่ 1 และองค์ประกอบที่ 2 ความผิดพลาดของผลงานที่ผ่านมา ซึ่งสามารถอธิบายความแปรปรวนปัจจัยได้ร้อยละ 23.338

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของแนวทางในการคัดเลือกผู้ประกอบการเพื่อป้องกันการทิ้งงานก่อสร้างในหน่วยงานของรัฐ

ตัวแปรขององค์ประกอบของแนวทางในการคัดเลือกผู้ประกอบการเพื่อป้องกันการทิ้งงานก่อสร้างในหน่วยงานของรัฐ	องค์ประกอบที่	
	1	2
	ลำดับความสำคัญ	
1.ผู้ประกอบการไม่เคยถูกปรับเนื่องจากดำเนินงานล่าช้าตั้งแต่ร้อยละ 10 ของมูลค่างาน		2
2.ผู้ประกอบการไม่มีงานซ้ำซ้อนในหน่วยงานเดียวมากกว่า 3 งาน		1
3.กำหนดเกณฑ์ที่พิจารณาคัดเลือกผู้ประกอบการจากประสบการณ์	6	
4.กำหนดเกณฑ์ที่พิจารณาคัดเลือกผู้ประกอบการ จากพร้อมของเครื่องจักรและผังการบริหารเครื่องจักร	5	
5.กำหนดเกณฑ์ที่พิจารณาคัดเลือกผู้ประกอบการจากฐานะทางการเงินหรือเงินทุนหมุนเวียนของผู้ประกอบการ	2	
6.กำหนดเกณฑ์ที่พิจารณาคัดเลือกผู้ประกอบการจากความพร้อมของบุคลากรและแผนบริหารบุคลากร	1	
7.การขึ้นทะเบียนผู้รับเหมาที่แสดงผลงาน ประวัติการทำงาน ประวัติการถูกปรับเนื่องจากงานล่าช้า และอื่น ๆ ซึ่งใช้เป็นข้อมูลในการพิจารณาคัดเลือกผู้ประกอบการ	4	
8.การประเมินผลการปฏิบัติงานของผู้ประกอบการที่ต้องพิจารณาถึงความสามารถในการปฏิบัติงานให้แล้วเสร็จตามสัญญา ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญในการคัดเลือกผู้ประกอบการ	3	
9.ผู้ประกอบการที่ได้รับคัดเลือก เสนอราคาไม่ต่ำกว่าราคากลาง มากกว่าร้อยละ 15		3
10.ผู้ประกอบการต้องดูสถานที่ก่อสร้างโครงการล่วงหน้า และตรวจสอบความถูกต้องของสถานที่ก่อสร้าง	7	
11.ผู้ประกอบการไม่อยู่ในระหว่างการพิจารณาให้เป็นผู้ทิ้งงาน		4

หมายเหตุ องค์ประกอบที่ 1 คือการประเมินศักยภาพในการดำเนินงาน และองค์ประกอบที่ 2 คือความผิดพลาดของผลงานที่ผ่านมา

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเพื่อหาแนวทางการคัดเลือกผู้ประกอบการเพื่อป้องกันการทิ้งงานโครงการก่อสร้างในหน่วยงานของรัฐโดยสามารถอธิบายความความหมายของแต่ละองค์ประกอบดังนี้

องค์ประกอบที่ 1 การประเมินความพร้อมและศักยภาพในการดำเนินงาน สามารถอธิบายด้วยตัวแปร 7 ตัวแปรตามลำดับความสำคัญ คือ ตัวแปรที่ 6 กำหนดเกณฑ์ที่พิจารณาคัดเลือกผู้ประกอบการ จากความพร้อมของบุคลากรและแผนบริหารบุคลากร ตัวแปรที่ 5 กำหนดเกณฑ์ที่พิจารณาคัดเลือกผู้ประกอบการ จากฐานะทางการเงินหรือเงินทุนหมุนเวียนของสถานประกอบการ ตัวแปรที่ 8 การประเมินผลการปฏิบัติงานของผู้ประกอบการ ที่ต้องพิจารณาถึงความสามารถในการปฏิบัติงานให้แล้วเสร็จตามสัญญา ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญในการคัดเลือกผู้ประกอบการ ตัวแปรที่ 7 การขึ้นทะเบียนผู้รับเหมา ที่แสดงผลงาน ประวัติการทำงาน ประวัติการถูกปรับเนื่องจากงานล่าช้า และอื่น ๆ ซึ่งใช้เป็นข้อมูลในการพิจารณาคัดเลือกผู้ประกอบการ ตัวแปรที่ 4 กำหนดเกณฑ์ที่พิจารณาคัดเลือกผู้ประกอบการ จากความพร้อมของเครื่องจักร และผังการบริหารเครื่องจักร ตัวแปรที่ 3 กำหนดเกณฑ์ที่พิจารณาคัดเลือกผู้ประกอบการจากประสบการณ์ และตัวแปรที่ 10 ผู้ประกอบการต้องดูสถานที่ก่อสร้างโครงการล่วงหน้าและตรวจสอบความถูกต้องของสถานที่ก่อสร้าง มีพิสัยของค่าน้ำหนักองค์ประกอบอยู่ระหว่าง 0.419-0.817 มีค่าไอเกิน 3.740 และค่าความแปรปรวนร้อยละ 34.000 โดยตัวแปรที่ 6 กำหนดเกณฑ์ที่พิจารณาคัดเลือกผู้ประกอบการ จากความพร้อมของบุคลากรและแผนบริหารบุคลากร มีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบนี้สูงสุด ส่วนตัวแปรที่ 10 ผู้ประกอบการต้องดูสถานที่ก่อสร้างโครงการล่วงหน้าและตรวจสอบความถูกต้องของสถานที่ก่อสร้างมีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบนี้ต่ำสุด องค์ประกอบนี้สามารถอธิบายความแปรปรวนของแนวทางในการคัดเลือกผู้ประกอบการเพื่อป้องกันการทิ้งงานก่อสร้างในหน่วยงานของรัฐ ได้ร้อยละ 34.000

ผลวิจัยในส่วนนี้ แสดงถึงแนวทางการคัดเลือกผู้ประกอบการเพื่อป้องกันการทิ้งงานโครงการก่อสร้างในหน่วยงานของรัฐที่ควรมีเกณฑ์ในการคัดเลือกจากการประเมินศักยภาพในการดำเนินงานของผู้ประกอบการเป็นสำคัญ เมื่อพิจารณาความสำคัญของแต่ละตัวแปรในองค์ประกอบนี้ จากค่าน้ำหนักองค์ประกอบที่มีค่าเข้าใกล้ 1 ซึ่งแสดงว่าตัวแปรมีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบนี้สูง พบว่า มี 5 ตัวแปรที่มีค่าน้ำหนักองค์ประกอบมากกว่า 0.700 จึงควรพิจารณาใช้เป็นแนวทางในการคัดเลือกผู้ประกอบการเพื่อป้องกันการทิ้งงานโครงการก่อสร้างในหน่วยงานของรัฐ เรียงตามลำดับความสำคัญดังนี้ 1) กำหนดเกณฑ์ที่พิจารณาคัดเลือกผู้ประกอบการ จากความพร้อมของบุคลากร และแผนบริหารบุคลากร 2) กำหนดเกณฑ์ที่พิจารณาคัดเลือกผู้ประกอบการ จากฐานะทางการเงิน หรือเงินทุนหมุนเวียนของผู้ประกอบการ 3) การประเมินผลการปฏิบัติงานของผู้ประกอบการ ที่ต้องพิจารณาถึงความสามารถในการปฏิบัติงานให้แล้วเสร็จตามสัญญา ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญในการคัดเลือกผู้ประกอบการ 4) การขึ้นทะเบียนผู้รับเหมา ที่แสดงผลงาน ประวัติการทำงาน ประวัติการถูกปรับเนื่องจากงานล่าช้า และอื่น ๆ ซึ่งใช้เป็นข้อมูลในการพิจารณาคัดเลือกผู้ประกอบการ และ 5) กำหนดเกณฑ์ที่พิจารณาคัดเลือกผู้ประกอบการ จากความพร้อมของเครื่องจักร และผังการบริหารเครื่องจักร

ส่วนองค์ประกอบที่ 2 ความผิดพลาดของผลงานที่ผ่านมา สามารถอธิบายด้วย 4 ตัวแปร คือ ผู้ประกอบการไม่มีงานซ้ำซ้อนในหน่วยงานเดียวกันมากกว่า 3 งาน ผู้ประกอบการไม่เคยถูกปรับเนื่องจาก

การดำเนินงานล่าช้า ตั้งแต่ร้อยละ 10 ของมูลค่างาน ผู้ประกอบที่ได้รับคัดเลือก เสนอราคาไม่ต่ำกว่าราคากลาง มากกว่าร้อยละ 15 และผู้ประกอบการไม่อยู่ในระหว่างการพิจารณาให้เป็นผู้ทิ้งงาน มีพิสัยของค่าน้ำหนักองค์ประกอบอยู่ระหว่าง 0.478-0.807 มีค่าไอเกน 2.537 และค่าความแปรปรวนร้อยละ 23.338 โดยตัวแปรที่ 2 ผู้ประกอบการไม่มีงานซ้ำซ้อนในหน่วยงานเดียวกัน มากกว่า 3 งาน มีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบนี้สูงที่สุด ส่วนตัวแปรที่ 11 ผู้ประกอบการไม่อยู่ในระหว่างการพิจารณาให้เป็นผู้ทิ้งงานมีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบนี้ต่ำสุด องค์ประกอบนี้สามารถอธิบายความแปรปรวนปัจจัยได้ร้อยละ 23.338

5. สรุปผล

5.1 ผลจากการวิเคราะห์ลักษณะโครงการก่อสร้างในหน่วยงานงานภาครัฐที่ถูกทิ้งงาน พบว่า งานทางสะพานและท่อเหลี่ยมมีสัดส่วนการทิ้งงานสูงสุด ส่วนงานอาคารมีสัดส่วนของมูลค่างานที่ถูกทิ้งงานสูงสุด

5.2 ผลจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของปัจจัยที่เป็นสาเหตุของการทิ้งงานก่อสร้างในหน่วยงานภาครัฐ พบว่า แผนการเงินและการบริหารงานไม่มีประสิทธิภาพ มีความสำคัญอันดับแรก รองลงมาเป็นความไม่พร้อมของปัจจัยหลักในการดำเนินงาน

5.3 ผลจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของแนวทางการคัดเลือกผู้ประกอบการเพื่อป้องกันการทิ้งงานโครงการก่อสร้างในหน่วยงานของรัฐ พบว่า การประเมินศักยภาพในการดำเนินโครงการของผู้ประกอบการมีความสำคัญ อันดับ 1 ดังนั้น จึงเป็นข้อพิจารณาถึงแนวทางการคัดเลือกผู้ประกอบการเพื่อป้องกันการทิ้งงานโครงการก่อสร้างในหน่วยงานของรัฐที่ควรใช้เกณฑ์อื่นในการพิจารณาคัดเลือกผู้ประกอบการ ร่วมกับเกณฑ์ด้านการเงิน โดยตัวแปรที่ควรพิจารณา มีดังนี้ 1) กำหนดเกณฑ์ที่พิจารณาคัดเลือกผู้ประกอบการ จากความพร้อมของบุคลากรและแผนบริหารบุคลากร 2) กำหนดเกณฑ์ที่พิจารณาคัดเลือกผู้ประกอบการ จากฐานะทางการเงิน หรือเงินทุนหมุนเวียนของผู้ประกอบการ 3) การประเมินผลการปฏิบัติงานของผู้ประกอบการ ที่ต้องพิจารณาถึงความสามารถในการปฏิบัติงานให้แล้วเสร็จตามสัญญา ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญในการคัดเลือกผู้ประกอบการ 4) การขึ้นทะเบียนผู้รับเหมา ที่แสดงผลงาน ประวัติการทำงาน ประวัติการถูกปรับเนื่องจากงานล่าช้า และอื่น ๆ ซึ่งใช้เป็นข้อมูลในการพิจารณาคัดเลือกผู้ประกอบการ และ 5) กำหนดเกณฑ์ที่พิจารณาคัดเลือกผู้ประกอบการ จากความพร้อมของเครื่องจักรและผังการบริหารเครื่องจักร

ทั้งนี้ งานวิจัยนี้ได้เสนอผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรที่เป็นสาเหตุของการทิ้งงานโครงการก่อสร้างในหน่วยงานของรัฐ และตัวแปรที่สำคัญสำหรับเป็นแนวทางในการคัดเลือกผู้ประกอบการที่ลดปัจจัยเสี่ยงของเกิดการปัญหาการทิ้งงานโครงการก่อสร้างในหน่วยงานภาครัฐในอนาคต สามารถใช้เป็นข้อพิจารณาสร้างเกณฑ์ในการประเมินศักยภาพของผู้ประกอบการ มาเป็นผู้ดำเนินโครงการก่อสร้างในหน่วยงานของรัฐ ที่ลดปัจจัยเสี่ยงที่ผู้ประกอบการจะเป็นทิ้งงาน

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ไม่ครอบคลุมไปถึงระเบียบ พระราชบัญญัติการจัดซื้อจัดจ้างและการบริหารพัสดุภาครัฐ พ.ศ.2560 ที่มีการประกาศและมีผลบังคับใช้กับหน่วยงานของรัฐ ตั้งแต่วันที่ 23 สิงหาคม 2560 ที่ผ่านมา ซึ่งควรมีการเก็บรวมรวบข้อมูลตั้งแต่ปี 2560 มาถึงปัจจุบันเพื่อให้มีจำนวนฐานข้อมูลเพียงพอต่อการศึกษาวิจัยเพิ่มเติม โดยอาจรวมไปถึงการพิจารณาปัจจัยการเกิดโรคระบาดโควิด 19 ในช่วงปี 2562-2565 ที่ผ่านมา ที่อาจมีผลกระทบต่อการคัดเลือกผู้ประกอบการ

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัย เรื่อง กระบวนการคัดเลือกผู้ประกอบการเพื่อป้องกันการทอดทิ้งงานก่อสร้างในหน่วยงานภาครัฐ ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2559 มหาวิทยาลัยศรีนครินทร-วิโรฒ

7. เอกสารอ้างอิง

[1] N. Wilaihong “Works abandonment by contractors leading to contract termination for government construction projects,” M.Eng. thesis, Program in Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut’s University of Technology North Bangkok, 2014.

[2] P. Kaewta, P. Tongindum and K. Tochaiwat, “Work abandonment problems in public construction projects by price search method before and after the support: a case study of the cabinet resolution passed on 17 June 2008,” *Journal of Engineering, RMUTT*, vol.7, no. 1-2, pp.78-87, 2010.

[3] S. Wongsiwamongkol “A study of factors causing subcontractors to leave the job unfinished,” M.Eng. thesis, Program in Engineering and Construction Management, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Thonburi, 2014.

[4] S. Aumnioysombat, “Decision factors for building contractor prequalification,” M.Eng. thesis, Chulalongkorn University, 1997.

[5] S. Chunlapan and I. Sirisawat, “Factor affecting procurement in construction by government agencies using electronic bidding (e - bidding) case study: Srinakharinwirot University,” *Srinakharinwirot University Engineering Journal*, vol.11, no. 2, 2016.

[6] The Comptroller General’s Department, Ministry of Finance, Letter to inform the blacklist company for the fiscal years of B.E. 2013–2016.

[7] The Regulations of the Office of the Prime Minister on Procurement, B.E.1992.

[8] The Regulations of the Ministry of Interior on Procurement of Local Administration Agency, B.E. 1992.

[9] The Regulations of the Ministry of Interior on Procurement of Subdistrict Administrative Organization, B.E. 1995.

[10] The Government Procurement and Supplies Management Act, B.E. 2017.

[11] K. Vanichbuncha, *Principles of Statistics*, Bangkok: The CU Book Center, 2016.

[12] Y. Kaiyawan, *Multivariate Statistical Analysis for Research*, 2nd ed., Bangkok : Chulalongkorn University Press, 2014.

[13] S. Mejang, *Advance Statistics for Research: Theory and Practice*, Bangkok: Chulalongkorn University Press, 2014.

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิ (Reader)

ต้นฉบับบทความวิจัยที่ตีพิมพ์วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีที่ 19 ฉบับที่ 1 (เดือนปีที่ 19 ฉบับที่ 1 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2566 – มีนาคม พ.ศ. 2567) ได้รับการตรวจสอบแก้ไขจากผู้ทรงคุณวุฒิดังรายนามต่อไปนี้

1.	รองศาสตราจารย์ ดร.สุดนิรันดร์ เพชรัตน์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
2.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิสุทธิ หนักแน่น	สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การอาหารและโภชนาการ คณะเทคโนโลยีและนวัตกรรมผลิตภัณฑ์การเกษตร มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
3.	อาจารย์ ดร.กิตติศักดิ์ วิธินันทกิตต์	สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตบางพระ
4.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิรดล ศิริธร	สาขาวิชาโลจิสติกส์และระบบขนส่งทางราง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
5.	รองศาสตราจารย์ รุ่งเรือง กาลศิริศิลป์	ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
6.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กระวี ตรีอำนรรค	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
7.	อาจารย์ ดร.วุฒินันท์ นุ่นแก้ว	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
8.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชลัท ทิพากรเกียรติ	สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
9.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พลเทพ เวงสูงเนิน	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องจักรกลเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
10.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศุภกิตต์ สายสุนทร	ภาควิชาเกษตรกลวิธาน คณะเกษตรวิทยาเขตบางเขน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
11.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐวุฒิ เนียมสอน	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
12.	อาจารย์ปรัชญา บำรุงกุล	สาขาเทคโนโลยีไฟฟ้า คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์
13.	อาจารย์ ดร.คริษฐา แจ้งสามสี	ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
14.	อาจารย์ ดร.นราศักดิ์ บุญเทพ	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร มหาวิทยาลัยพะเยา

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิ (Reader)

ต้นฉบับบทความวิจัยที่ตีพิมพ์วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีที่ 19 ฉบับที่ 1 (เดือนปีที่ 19 ฉบับที่ 1 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2566 – มีนาคม พ.ศ. 2567) ได้รับการตรวจสอบแก้ไขจากผู้ทรงคุณวุฒิดังรายนามต่อไปนี้

15.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรเทพ ราชนาวี	สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การกีฬา สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
16.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ มงคล แก้วบำรุง	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
17.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชลอ จารุสุทธิรักษ์	ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
18.	รองศาสตราจารย์ ดร.สุธาสินี เนรมิตตกพงศ์	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
19.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรียา ยิ้มรัตนบวร	สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
20.	นายอนุชิต ฉ่ำสิงห์	สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตร
21.	ดร.มนัญญา โอฆวิไล	สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
22.	รองศาสตราจารย์ ดร.พรนภา เกษมศิริ	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
23.	อาจารย์ธงชัย เพ็งจันทร์ดี	สาขาวิชาการจัดการวิศวกรรมการผลิตและโลจิสติกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา
24.	อาจารย์ ดร.สิทธิพงค์ มหาธนบดี	ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
25.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภสิทธิ พงศ์ศิวะสถิตย์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
26.	รองศาสตราจารย์ ดร.พานิช วุฒปริยัติ	คณะเทคนิคศึกษาศาสตร์ ภาควิชาฝึกหัดครูสาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
27.	รองศาสตราจารย์ ดร.สันชัย อินทพิชัย	บจก.เจริญโภคภัณฑ์วิศวกรรม เลขที่ 97 ถนนเย็นจิต แขวงทุ่งวัดดอน เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120
28.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นิรชร นกแก้ว	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
29.	อาจารย์ ดร. สุรเชษฐ์ วรรณา	สาขาวิชาเทคโนโลยีก่อสร้าง คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม
30.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ กำแหงฤทธิรงค์	สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาคาร คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คำแนะนำสำหรับผู้เขียนบทความลงตีพิมพ์
วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (วมศ) เป็นวารสารที่ตีพิมพ์บทความวิจัยและบทความวิชาการ เพื่อเผยแพร่ความก้าวหน้าทางทฤษฎีและทางการทดลองในทุกสาขาวิศวกรรม ต้นฉบับทุกบทความที่ส่งมายังกองบรรณาธิการ จะได้รับการประเมินโดยมีผู้ทรงคุณวุฒิ 2 คนต่อบทความ (Peer-review) และประเมินบทความในลักษณะเป็นผู้ทรงคุณวุฒิที่ประเมินบทความไม่ทราบชื่อผู้แต่งและผู้แต่งไม่ทราบชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ หรือ Double Blinded review วารสารตีพิมพ์ 3 ฉบับต่อปี ในเดือน เมษายน สิงหาคม และ ธันวาคม เลขมาตรฐานสากลประจำวารสาร 2774-0269 (Online)

1. การเตรียมต้นฉบับ

1) เป็นบทความวิจัย หรือบทความวิชาการ ที่มีความยาวไม่ควรน้อยกว่า 7 หน้า และไม่ควรเกิน 10 หน้า กระดาษ A4 พิมพ์ห่างจากขอบกระดาษด้านซ้าย 1.25 นิ้ว ด้านอื่น ๆ 1 นิ้ว
2) เป็นบทความที่ไม่ได้อยู่ระหว่างการพิจารณาตีพิมพ์ของสื่อสิ่งพิมพ์อื่น ๆ และไม่เคยได้รับการตีพิมพ์ในวารสารใด ๆ มาก่อน
3) ต้องไม่มีการละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่น ไม่มีการลอกเลียน หรือตัดทอนผลงานวิจัยของผู้อื่นโดยที่ไม่ได้รับอนุญาตและมีการอ้างอิงที่เหมาะสม
4) ชนิดและขนาดตัวอักษร ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษให้ใช้ตัวอักษร TH Sarabun New ซึ่งขนาดตัวอักษร มีรายละเอียดดังนี้
    6.1) ชื่อบทความ ใช้ตัวอักษรขนาด 18 pt. ตัวหนา
    6.2) ชื่อ-สกุลผู้เขียนบทความ ใช้ตัวอักษรขนาด 14 pt. ตัวปกติ
    6.3) หัวข้อหลัก ใช้ตัวอักษรขนาด 14 pt. ตัวหนา
    6.4) หัวข้อรอง ใช้ตัวอักษรขนาด 14 pt. ตัวเอียง
    6.5) เนื้อเรื่องในหัวข้อหลักและหัวข้อรอง ใช้ตัวอักษรขนาด 14 pt. ตัวปกติ
    6.6) เนื้อเรื่องในตาราง ใช้ตัวอักษรขนาด 14 pt. ตัวปกติ

รูปแบบการเขียนบทความ ควรมีหัวข้อเรื่องเรียงตามลำดับดังต่อไปนี้

ชื่อเรื่อง ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ โดยมีข้อความที่กระชับ ได้ใจความ และบ่งบอกบทความได้อย่างชัดเจน

ชื่อผู้เขียน ให้ระบุชื่อ นามสกุล ตำแหน่ง หน่วยงานและที่อยู่ของผู้เขียนทุกคน โดยหากบทความเป็นภาษาไทยให้ระบุชื่อผู้เขียนเฉพาะภาษาไทยเท่านั้น

บทคัดย่อ บทคัดย่อต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ

คำสำคัญ (Keyword) คำสืบค้นที่เกี่ยวข้องกับบทความ ต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ

บทนำ กล่าวถึงความสำคัญของปัญหาและภูมิหลังของการวิจัย รวมไปถึงวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ตัวเนื้อหา อธิบายถึงอุปกรณ์ หรือวิธีการที่ใช้ในการวิจัย บรรยายผล และวิจารณ์ผล สามารถแตกออกเป็นหลายหัวข้อได้

สรุป บรรยายถึงบทสรุปของงานวิจัย

กิตติกรรมประกาศ ขอบคุณทุนสนับสนุน หรือบุคคล (ถ้ามี)

เอกสารอ้างอิง ให้เขียนเอกสารอ้างอิงโดยใช้วิธีเรียงตามลำดับก่อนหลังที่พบในบทความ ในรูปแบบตัวเลขในวงเล็บเหลี่ยม สำหรับรูปแบบการพิมพ์รายการเอกสารอ้างอิง ใช้รูปแบบ IEEE ดังรายละเอียดและตัวอย่างในไฟล์แม่แบบ (template) ซึ่งดาวน์โหลดได้ที่ http://eng.swu.ac.th/re.html

2. วิธีการส่งบทความ

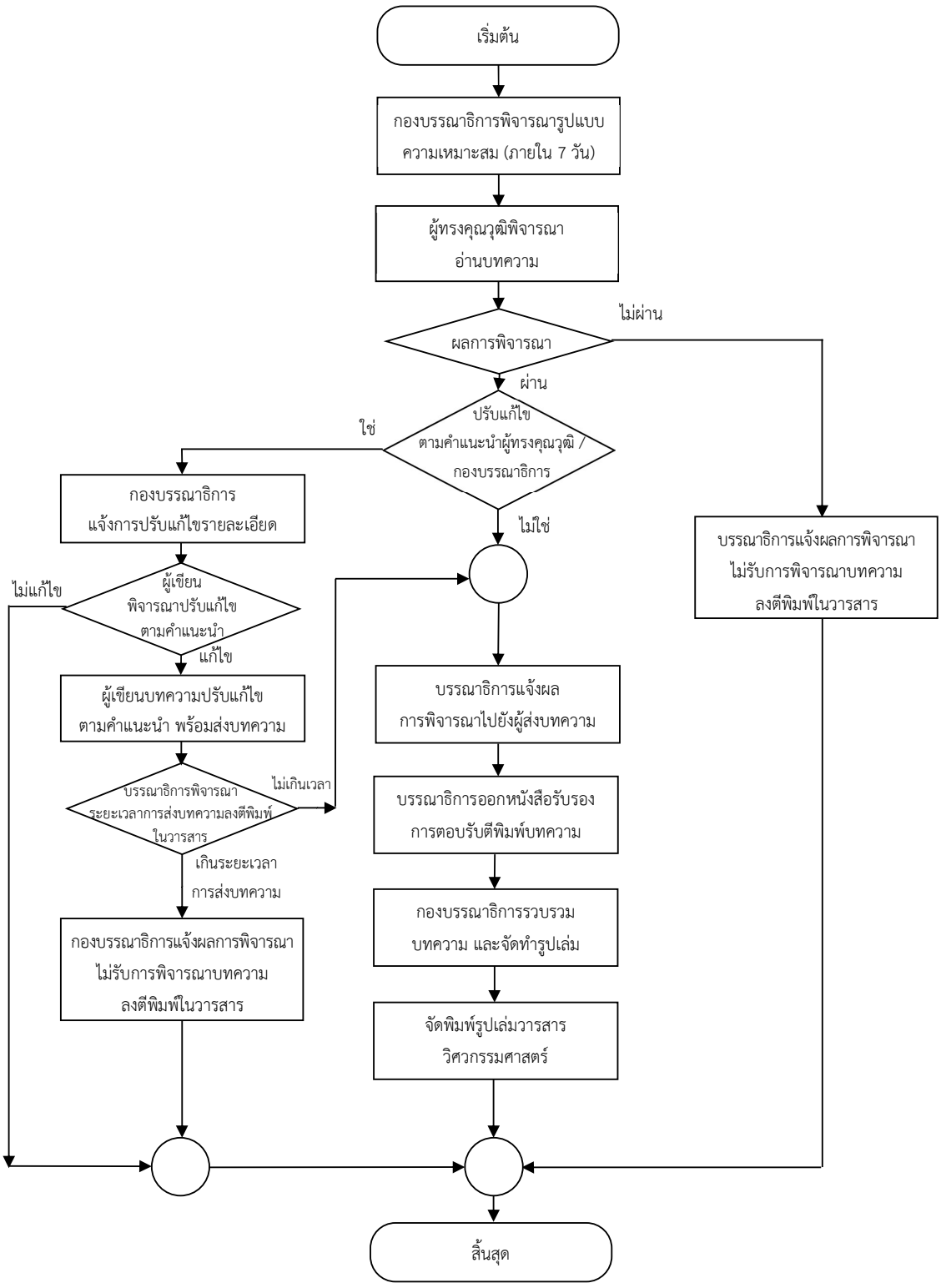
1) ส่งต้นฉบับบทความ ไฟล์ Microsoft Word และ pdf พร้อมแนบไฟล์สแกนแบบเสนอผลงานวิชาการเพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
2) ส่งไฟล์ต้นฉบับทางออนไลน์ที่ https://www.tci-thaijo.org/index.php/sej/login
3) ดูข้อมูลวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒเพิ่มเติม และดาวน์โหลดแบบฟอร์มประกอบการส่งบทความ ได้ที่ http://eng.swu.ac.th/re.html

3. ขั้นตอนการประเมินบทความ

การประเมินบทความวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ มีขั้นตอนดังนี้

1) การทบทวนโดยผู้รู้เสมอกัน (peer review) โดยผู้ทรงคุณวุฒิอย่างน้อยสองคนในสาขาที่เกี่ยวข้องแบบอำพรางฝ่ายเดียว (double-blind)
2) การเขียนตอบข้อซักถามและการแก้ไขปรับปรุงต้นฉบับตามข้อคิดเห็น (comments) ของผู้ทรงคุณวุฒิโดยผู้เขียน และการพิจารณาอีกครั้งโดยผู้ทรงคุณวุฒิคนเดิม หากผู้ทรงคุณวุฒิได้แจ้งความประสงค์ขอพิจารณาอีกครั้งไว้
3) การประชุมกองบรรณาธิการเพื่อพิจารณาผลการทบทวนโดยผู้รู้เสมอกันจากผู้ทรงคุณวุฒิ และการแก้ไขปรับปรุงต้นฉบับ เพื่อตัดสินใจว่าจะตอบรับหรือไม่ในขั้นสุดท้าย
4) สำหรับบทความที่ได้รับการตอบรับ กองบรรณาธิการจะพิจารณาความถูกต้องของรูปแบบเพื่อแจ้งผู้เขียนแก้ไข
5) บรรณาธิการออกหนังสือรับรองการเผยแพร่ให้ผู้เขียน โดยมอบไว้กับผู้เขียนหลัก

ขั้นตอนการพิจารณาผลงานเพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ



คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

Srinakharinwirot University Engineering Journal

Vol. 19 No.1 (October 2023 - March 2024)

ISSN : 2774 - 0269 (Online)

บทความวิจัย

- การจัดตำแหน่งน้ำหนักนักพายเรือ เพื่อพัฒนาศักยภาพในการแข่งขัน
  Application of Design of Experiments to Reducing Defects in Tablet Packing Process
  ทิวานันท์ มณีรัตน์ จิรพัฒน์ เงาประเสริฐวงศ์
- การกำจัดสีย้อมแอซิดในสารละลายด้วยกระบวนการดูดซับร่วมกับโอโซนออกซิเดชัน
  Decolorization of Acid Dye in Aqueous Solution by a Combined Adsorption–Ozonation Process
  พัชรี คำธิตา นัทธพงศ์ อติภาสวร
- การศึกษาสถานีบริการอัดประจุไฟฟ้าเพื่อรองรับยานยนต์ไฟฟ้า
  A Study of the Electric Charging Stations to Support Electric Vehicles
  ณัฐภาส จรัสรุ่งชวลิต ปนัดดา กสิกิจวิวัฒน์
- การออกแบบและพัฒนาเครื่องสีข้าวกล้องพลังงานแสงอาทิตย์
  Design and Development of Solar Powered Brown Rice Milling Machine
  ปวริศร กล้วยอ่อน รุ่งเรือง กาลศิริศิลป์ จตุรงค์ ลังกาพินธุ์
- การหาสภาวะที่เหมาะสมในการใช้อัลตราโซนิคช่วยสกัดโปรตีนจากผงแป้งเมล็ดขนุนด้วยวิธีพื้นที่ผิวตอบสนอง
  Optimization of Ultrasonic-Assisted Extraction of Protein from Jackfruit Seed Powder using Response Surface Methodology
  วรทเอก ศรีสุวรรณ กิตติ ไชยวัณณ์ พชร แก้วรัตนขจร
- Predictive Modeling of Non-Communicable Diseases Using Social Determinants of Health as Features: A Review of Existing Approaches
  Peatiphat Bhoothookngoen Nattapong Sanchan
- การศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตบราซเคลย์สำหรับการขึ้นรูปโดยการปั้น
  A Study of Factors Affecting on Brass Clay Forming Process by Sculping
  อนุวัฒน์ จุติลาภถาวร ปาริฉัตร จำวงค์ กุลธิดา แซ่เจีย
- แนวทางการวิเคราะห์กำลังแบกทานและระยะฝังของเสาเข็มเจาะฝังปลายในหินแกรนิตผุพังปานกลาง
  Guidelines for Analyzing Bearing Capacity and Embedded Length of Rock-Socketed Piles in Moderately Weathered Granite
  อติเทพ ศรีคงศรี พงศ์ศักดิ์ แซ่หลี
- กระบวนการคัดเลือกผู้ประกอบการเพื่อป้องกันการทอดทิ้งงานก่อสร้าง ในหน่วยงานภาครัฐ
  The Contractor Selection Process in Order to Prevent Abandonment of The Construction Work in The Public Sector
  สุดนิรันดร์ เพชรัตน์, อิทธิพร ศิริสวัสดิ์ รุ่งอรุณ บุญถ่าน ศานติ จินตรัตน์

บทความวิชาการ

- การศึกษาการอบแห้งแบบกระแสชน
  The study of Impinging Stream Drying
  ปราชญา ตรีสุทธาชีพ กิตติ สถาพรประสาธน์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
เลขที่ 63 หมู่ 7 ถนนรังสิต - นครนายก อำเภอองครักษ์ จังหวัดนครนายก 26120
โทร 0 2649 5000 ต่อ 27560
http://eng.swu.ac.th