

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

SRINAKHARINWIROT ENGINEERING JOURNAL

ปีที่ 15 ฉบับที่ 3 เดือนกันยายน - ธันวาคม พ.ศ. 2563



คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เป็นวารสารในศูนย์ข้อมูลดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (Thai – Journal Citation Index Centre: TCI) กลุ่มที่ 2 พ.ศ. 2558-2562 เลขที่ ISSN 1905-4548 เพื่อเผยแพร่บทความวิจัยและบทความวิชาการ ด้านวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีวิศวกรรมเคมี วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมอุตสาหการ วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ วิศวกรรมชีวการแพทย์ และสาขาใกล้เคียงอื่นๆ ทั้งในเชิงทฤษฎีและเชิงปฏิบัติ เป็นภาษาอังกฤษหรือภาษาไทยที่มีบทความภาษาอังกฤษ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ จึงกำหนดให้จัดทำโครงการจัดทำวารสารทางวิชาการขึ้น โดยจัดพิมพ์เป็นประจำทุกปี ปีละ 3 ฉบับ ฉบับที่ 1 ช่วงเดือนมกราคม – เมษายน ฉบับที่ 2 ช่วงเดือนพฤษภาคม – สิงหาคม และฉบับที่ 3 ช่วงเดือนกันยายน – ธันวาคม ซึ่งบทความที่ได้รับการตีพิมพ์ทุกบทความจะผ่านการทบทวนโดยผู้รู้เสมอกัน (peer review) โดยผู้ทรงคุณวุฒิสองคนในสาขาที่เกี่ยวข้องแบบอำพรางฝ่ายเดียว (single-blind) และสงวนสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พุทธศักราช 2521 และเผยแพร่แบบออนไลน์ทั่วประเทศ

วัตถุประสงค์

เพื่อเป็นแหล่งรวบรวม เผยแพร่บทความวิจัย และบทความวิชาการทางด้านวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี ในสาขาวิศวกรรมเคมี วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมอุตสาหการ วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ วิศวกรรมชีวการแพทย์ และสาขาใกล้เคียงอื่นๆ ทั้งในเชิงทฤษฎีและเชิงปฏิบัติ

เจ้าของ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

กองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

63 หมู่ 7 ตำบลอโศก อำเภอบางบาล

จังหวัดนนทบุรี 11000

โทร. 0 2649 5000 ต่อ 27560

<http://eng.swu.ac.th> และ <https://www.tci-thaijo.org/index.php/sej>

อีเมล journalengswu@gmail.com

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ที่ปรึกษากองบรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมภพ รอดอัมพร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตติ สถาพรประสาธน์

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
รองคณบดีฝ่ายแผนและพัฒนา

รายนามคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ

ศาสตราจารย์ ดร.ทงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ์ อัครเอกมณีน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร.เอเดรียน อีแวน ฟลัด	สถาบันสิรินธรวิทยเมธี
ศาสตราจารย์ ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต)
ศาสตราจารย์ ดร.โกสินทร์ จันทน์ไทย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.พานิช วุฒิพฤษ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ โสภางค์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.อริศม ฤกษ์บุตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
รองศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย เปรมฤดีปริชาชาญ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงพรรณ กริชชาญชัย ศฤงคารินทร์	มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต ชาลรักษ์ตระกูล	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.เตือนใจ สมบูรณ์วิวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.ธนิยา เกาศล	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รองศาสตราจารย์ ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
รองศาสตราจารย์ ดร.ประจวบ กล่อมจิตร	มหาวิทยาลัยศิลปากร
รองศาสตราจารย์ ดร.วรงค์ ปวรจารย์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ยอดสุดใจ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

บรรณาธิการอำนวยการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิไลดา หวังพานิช

หัวหน้ากองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.ประชา บุญยานิชกุล

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล นาผล	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ ดร.จันจิรา จัปศิลป์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ ดร.นิลวรรณ ชุ่มฤทธิ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ ดร.ทิฆัมภ์ เจริญพงษ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

รองศาสตราจารย์ ดร.สุนิติ สุภาพ	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ ดร.วุฒิพล ธาราธิ์เศรษฐ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประมวล ชูรัตน์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงษ์ คงประเสริฐ	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาคภูมิ ศรีर्मรีน	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
อาจารย์ ดร.สุธิดา ทีปรักษพันธ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
อาจารย์นาวิ รุจิตามพ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ศาสตราจารย์ ดร.ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ์ อัครเอกผาลิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร.เอเดรียน อีแวน ฟลัด	สถาบันสิริวิทยเมธี
ศาสตราจารย์ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต)
ศาสตราจารย์ ดร.โกสินทร์ จันทน์ไทย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร. พานิช วุฒิพฤษ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ โสภาแดง	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.อริคม ฤกษ์บุตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
รองศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย เปรมฤดีปรีชาชาญ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงพรรณ กริชชาญชัย ศฤงคารินทร์	มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต ชาลรักษ์ตระกูล	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.เตือนใจ สมบูรณ์วิวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร. ธนียา เกาศล	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รองศาสตราจารย์ ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
รองศาสตราจารย์ ดร.ประจวบ กล่อมจิตร	มหาวิทยาลัยศิลปากร
รองศาสตราจารย์ ดร.วรงค์ ปวรจารย์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ยอดสุดใจ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผู้ช่วยบรรณาธิการ

นางสาวยุพาพร ประไพย์

บทบรรณาธิการ

ปัจจุบันนี้เป็นที่พูดถึงกันมากว่า ประเทศไทยกำลังเข้าสู่สังคมที่มีจำนวนคนชราเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่คนในวัยทำงานจะมีจำนวนน้อยลงอย่างขาดสมดุล สาเหตุเนื่องมาจากการลดลงของอัตราการเกิด ซึ่งคาดการณ์ว่าจะส่งผลกระทบมากกว่าหนึ่งด้าน อันได้แก่ รัฐบาลเก็บภาษีได้ไม่เพียงพอกับภาระรายจ่ายที่เกิดขึ้นในการดูแลคนชรา และการลดลงของจำนวนผู้ต้องการศึกษาต่อในระดับอุดมศึกษาส่งผลทำให้หลักสูตรที่มีผู้สมัครเรียนน้อยอาจจะต้องปิดตัวลง แต่อย่างไรก็ตามกรอบมาตรฐานคุณวุฒิระดับอุดมศึกษาแห่งชาติและการประกันคุณภาพการศึกษาของประเทศไทย ได้มีการวางระบบและกลไกให้สถาบันอุดมศึกษามีแนวทางเปิดสอนหลักสูตรที่ตรงกับความต้องการของตลาดแรงงาน โดยจะต้องดำเนินการสำรวจความต้องการของทั้งนายจ้างและผู้เรียน เพื่อใช้ประกอบการทำหลักสูตร ซึ่งสอดคล้องกับรัฐบาลที่ได้มีการเน้นย้ำให้สถาบันอุดมศึกษาเปิดสอนหลักสูตรที่ตรงกับความต้องการของตลาดแรงงาน เพื่อให้บัณฑิตสามารถประกอบวิชาชีพได้

สำหรับการบริหารจัดการทรัพยากรคนอาจารย์ให้เปลี่ยนแปลงทันกับการเปลี่ยนแปลงของหลักสูตรและความต้องการของสังคมเป็นสิ่งที่ทำได้ยาก เพราะคนอาจารย์สำเร็จการศึกษามาด้วยการทำปริญญาโทในหัวข้อที่ต้องมีความลุ่มลึก ทำให้ขาดมิติความกว้างที่จะปรับเปลี่ยนหัวข้อการสอนตามการเปลี่ยนแปลงของหลักสูตรได้ ขณะเดียวกันก็ไม่สามารถแก้ไขปัญหานี้ด้วยการเปิดรับอาจารย์ใหม่ เพราะอายุการทำงานของคนอาจารย์แต่ละคนยาวนานเกินการเปลี่ยนแปลงของความต้องการของหลักสูตร การแก้ปัญหานี้แนวทางนี้ เมื่อเวลาผ่านไปไม่นาน ปัญหาความไม่สอดคล้องระหว่างคนอาจารย์ที่มีความต้องการของหลักสูตรก็จะวนกลับมาเกิดซ้ำอีก ไม่นับรวมภาระค่าใช้จ่ายที่ต้องแบกรับในการจ้างคนอาจารย์กลุ่มเดิมที่ไม่สามารถสอนในหลักสูตรที่เปลี่ยนแปลงไปได้ ซึ่งจะทำให้ต้นทุนค่าธรรมเนียมการศึกษาสูงโดยไม่จำเป็น เกิดความไม่มีประสิทธิภาพในการใช้งบประมาณที่ได้รับ

ดังนั้นหากคนอาจารย์มีความพยายามที่จะทำงานวิจัยในหัวข้อใหม่ ๆ ที่ไม่ถนัด และสามารถปรับเปลี่ยนหัวข้อการสอนให้ตรงตามการเปลี่ยนแปลงของหลักสูตรได้ ผู้กำกับดูแลงานวิจัยของหน่วยงานต่าง ๆ จึงควรทำงานบูรณาการกับหลักสูตรและการเรียนการสอน เพื่อกำหนดเป้าหมายและขอบเขตของการสนับสนุนโครงการวิจัยในหน่วยงาน ให้นำไปสู่ความสามารถในการสอนหัวข้อที่ตรงกับหลักสูตรที่เปลี่ยนแปลงไปได้ อีกทั้งผลลัพธ์ของโครงการวิจัยได้อีกทางคือ การตีพิมพ์บทความวิจัย วารสารคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒที่ท่านถืออยู่นี้ จึงเป็นกลไกสำคัญในการผลักดันให้คนอาจารย์ทำวิจัย ซึ่งกองบรรณาธิการดูแลเป็นอย่างดีเสมอมา

สุดท้ายนี้ ขอแจ้งว่ากองบรรณาธิการได้ปรับแก้รูปแบบการเขียนเอกสารอ้างอิง ให้เป็นรูปแบบ IEEE ร้อยละร้อย เพื่อให้ผู้เขียนเตรียมต้นฉบับได้สะดวกขึ้น พร้อมให้ตัวอย่างอย่างครอบคลุม ท่านผู้เขียนที่เคยส่งบทความมาก่อน โปรดใช้รูปแบบ IEEE ในการเขียนเอกสารอ้างอิง

สารบัญ

บทความวิจัย

เครื่องลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบที่ปฏิกิริยาโดยใช้คลื่นไมโครเวฟและท่อผสมแบบสถิต Acid Catalyzed Reactor in Mixed Crude Palm Oil Using Microwave Irradiation and Static Mixer สุหัตถ์ นิเซ็ง อาริษา โสภางกรย์ ภาณุมาศ สุธางคำ ธนะวิทย์ ทองวิเชียร กฤษณพงศ์ สังขวาสี	1
การควบคุมพัสดุคงคลังสารหล่อลื่นสำหรับงานบำรุงรักษาของท่าเรือ Lubricants Inventory Control for Marine Port Maintenance จารุวรรณ งามเลิศ สิริเดช ชาตินิยม	7
การลดของเสียในกระบวนการฉีดพลาสติกของชิ้นส่วนโทรศัพท์โดยการออกแบบการทดลอง Reducing Defectives in Plastic Injection Process of Telephone Part By Design of Experiment สุรศักดิ์ ขุบโธสง ระพี กาญจนะ	17
อิทธิพลของความเร็วเลื่อนไถลและความดันสัมผัสที่ส่งผลต่อพฤติกรรมทางไทรบอโลยีของผิวคู่สัมผัสเหล็กกล้า เครื่องมือ SKD11 และเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก The Influence of Sliding Velocity and Contact Pressure on Tribological Behavior of The Mating Surfaces of SKD11 Tool Steel and Ferritic Stainless Steel 430 HL เจษฎา จันทน์ผา ภาสพิรุฬห์ วัชรศรีสำเร็จ	32
การจัดเส้นทางขนส่งสินค้าด้วยวิธีการผสมผสาน สำหรับผู้ประกอบการขนาดเล็ก Vehicles Routing Using Composite Approach For Small Businesses ธนากร ชีวพิทักษ์ผล สิริเดช ชาตินิยม	44
การบริหารจัดการภาวะภัยแล้งในพื้นที่นอกเขตชลประทานของประเทศไทย: กรณีศึกษา ตุลาคม 2562 ถึง เมษายน 2563 Drought Management for the Rainfed Areas in Thailand: A Case Study of October 2019 to April 2020 Period สุประภาพร พัฒนสิงห์เสนีย์ จิรวัดน์ ประชีพนาย กัลยาณี สุวรรณประเสริฐ ธนัช สระประเทศ จิรพงษ์ เหล่าน้ำใส	54
การพัฒนาค่าปรับแก้ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความจุของทางหลวงชนบทสองช่องจราจรด้วยวิธีการแบบทางอ้อม Development of Adjustment Factors affecting The Capacity of DRR Two-Lane Highways with Indirect Empirical Method ปฐวิภาณ แก้ววิเชียร วุฒิไกร ไชยปัญญา	65

สารบัญ

บทความวิจัย (ต่อ)

Gross Domestic Product and Economic Value of Water Resources of River Basins in Thailand Pavisorn Chuenchum Pongsak Suttinon	75
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการศึกษาระดับความสูงในการสูบน้ำ ของระบบสูบน้ำความร้อนด้วยกำลังไอน้ำแบบต่อเนื่อง The Mathematical Modeling for a Study of Suction Heads of a Continuous Operation Thermal Water Pump with Steam System จิรวุฒน์ สิตรานนท์ กิตติวุฒิ ศุทธิวิโรจน์ ญัฐพล รุ่งประแสง	89

เครื่องลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบที่บรวมนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ และท่อผสมแบบสถิต

Acid Catalyzed Reactor in Mixed Crude Palm Oil Using Microwave Irradiation and Static Mixer

สุห์ดี นิเซ็ง^{1,2*} อาริสา โสภารจารย์¹ ภาณุมาศ สุยบังคำ¹ ธนะวิทย์ ทองวิเชียร¹ กฤษณพงศ์ สังขวาสิ¹

¹สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องจักรกลเกษตร วิทยาลัยรัตภูมิ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

²หน่วยวิจัยการเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์ชุมชนภาคใต้ตอนล่าง วิทยาลัยรัตภูมิ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

Suhdee Niseng^{1,2*} Arrisa Sopajarn¹ Panumas Suybangdum¹ Tanawit Thongwicchan¹

Krisanapong Sangkavasi¹

¹Agricultural Machinery Engineering, Department of Industrial, Rattaphum College,
Rajamangala University of Technology Srivijaya,

²Community Product Value Research Unit Lower Southern Region, Rattaphum College,
Rajamangala University of Technology Srivijaya,

*Corresponding author Email: zuhmech@gmail.com

(Received: April 9, 2020; Accepted: October 22, 2020)

บทคัดย่อ

การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบที่บรวมนที่มีกรดไขมันอิสระสูง จำเป็นต้องลดกรดไขมันอิสระเหลือไม่เกิน 2 mgKOH/g เพื่อไม่ให้เกิดปฏิกิริยาสะปอนิฟิเคชันจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความบริสุทธิ์ต่ำ งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้คลื่นไมโครเวฟและท่อผสมแบบสถิตเพื่อลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบด้วยกระบวนการเอสเทอร์ริฟิเคชัน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาและค่าความเป็นกรดไม่เกิน 2 mgKOH/g จากการทดลองโดยการป้อนวัตถุดิบให้ไหลผ่านท่อผสมแบบสถิตยาว 5 m และคลื่นไมโครเวฟขนาด 450 W ใช้กรดซัลฟูริก 4 %vol. และใช้เมทานอล 15, 20, 25, และ 30 %vol. ตามลำดับ พบว่าเงื่อนไขที่ดีที่สุดคือการใช้ปริมาณเมทานอล 30 %vol. ทำปฏิกิริยา 9 นาที ซึ่งสามารถลดกรดไขมันอิสระจาก 30.5 mgKOH/g ลงเหลือ 1.93 mgKOH/g (S.D.= 0.02) โดยมีองค์ประกอบของน้ำมันที่ผ่านการลดกรดไขมันอิสระเช่น ไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และโมโนกลีเซอไรด์ใกล้เคียงกับการลดกรดไขมันอิสระโดยใช้ท่อผสมแบบสถิต แต่ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาน้อยกว่า

คำสำคัญ: น้ำมันปาล์มดิบ คลื่นไมโครเวฟ ท่อผสมแบบสถิต

ABSTRACT

Biodiesel production from high free fatty acid mixed crude palm oil need to reduce for free fatty acid less than 2 mgKOH/g. It causes to appear saponification process to make low purity product. This research to apply a microwave irradiation and static mixer for reducing of free fatty acid in mixed crude palm oil by esterification process. The purpose was decrease the reaction time and free fatty acid less than 2 mgKOH/g. From the experiments fed raw materials for circulating into 5 m static mixer and 450 W microwave irradiation and used sulfuric acid 4 %vol., methanol 15, 20, 25, and 30 %vol., respectively. The result indicated that the optimal condition for this research was using methanol 30 %vol. which reacted for 9 min. It was able to decrease free fatty acid from 30.5 mgKOH/g to 1.93 mgKOH/g (S.D.= 0.02). The compositions of esterified oil such as mono-glyceride, di-glyceride, and tri-

glyceride was similar to reduce free fatty acid in mixed crude palm oil using static mixer, but the reaction time was short time.

Keyword: Mixed Crude Palm Oil, Microwave Irradiation, Static Mixer.

1. บทนำ

ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันที่ให้ผลผลิต 5,090,658 ไร่ เป็นประเทศที่ผลิตน้ำมันปาล์มเป็นอันดับที่ 3 ของโลก [1] จากข้อมูลอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มของ ศูนย์วิจัยกรุงศรี พบว่าในปี 2561 ความต้องการบริโภค น้ำมันปาล์มมีแนวโน้มเติบโตค่อยเป็นค่อยไป แต่อุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มของไทยในระยะ 3 ปีข้างหน้า อาจเผชิญแรงกดดันจากอุปทานที่เพิ่มขึ้นจากการขยาย พื้นที่ปลูกในช่วง 5-6 ปีก่อนหน้าตามการส่งเสริมของรัฐ ประกอบกับปริมาณสต็อกน้ำมันปาล์มที่อยู่ในระดับสูง ส่งผลให้ราคาน้ำมันปาล์มของไทยมีแนวโน้มลดลง [2] ดังนั้นการส่งเสริมให้เกิดการใช้น้ำมันปาล์มภายในประเทศ ให้มากขึ้นจึงเป็นวิธีการหนึ่งซึ่งช่วยพยุงราคาน้ำมันปาล์ม ให้สูงขึ้น การใช้ไขมันพืชเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลเป็นอีกแนวทางหนึ่งซึ่งช่วยให้ราคาน้ำมันปาล์มสูงขึ้น และเสริมความมั่นคงด้านพลังงาน โดยคาดว่าความต้องการใช้น้ำมันปาล์มดิบในการผลิตไบโอดีเซลในไทยจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความต้องการใช้น้ำมันในภาคขนส่ง และยังมีปัจจัยหนุนจากแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและ พลังงานทางเลือกของรัฐบาลที่ตั้งเป้าเพิ่มสัดส่วน B100 ในน้ำมันดีเซลเป็น 10% (หรือ B10) [2]

ปัญหาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบจะต้อง พิจารณาปริมาณกรดไขมันอิสระที่มีอยู่ เนื่องจากหากมี ปริมาณกรดไขมันอิสระมากกว่า 2 mgKOH/g (หรือ 1 %wt.) [3] จะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงใน กระบวนการผลิต ทำให้ไบโอดีเซลที่ได้มีความบริสุทธิ์ต่ำ และผลได้น้อย (yield) วิธีการแก้ปัญหาดังกล่าวสามารถ ทำได้โดยการผลิตไบโอดีเซลแบบ 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอน แรกใช้กระบวนการเอสเทอร์ริฟิเคชัน เพื่อลดกรดไขมัน อิสระในน้ำมันปาล์มดิบก่อน จากนั้นนำไปผลิตไบโอดีเซล ในขั้นตอนที่สอง คือ กระบวนการทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน จะทำให้ได้ไบโอดีเซลที่มีความบริสุทธิ์ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ที่กำหนดโดยกรมธุรกิจพลังงาน [4]

การผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธีการให้ความร้อนด้วยวิธี ทัวปจะต้องให้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยานาน แต่การ ให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟจะช่วยลดระยะเวลาใน การทำปฏิกิริยาให้สั้นลง [5] ดังเช่นงานวิจัยของ Daeho

Kim และคณะ ได้ศึกษากระบวนการลดกรดไขมันอิสระ จากกรดโอเลอิกแบบต่อเนื่องด้วยกระบวนการเอสเทอร์ ริฟิเคชันโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ พบว่าสามารถลดกรดไขมัน อิสระลงได้โดยใช้เวลาเพียง 15 นาที ภายใต้เงื่อนไข อัตราส่วนน้ำมันพืชต่อเมทานอล 1: 20 และทำปฏิกิริยาที่ 60 °C [6] Kamath และคณะ ทดลองผลิตไบโอดีเซล แบบสองขั้นตอนจาก crude karanja oil โดยสามารถลด กรดไขมันอิสระเหลือ 1.11%wt. ด้วยคลื่นไมโครเวฟ ขนาด 180 วัตต์ และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาเพียง 190 วินาที และในขั้นตอนที่สอง สามารถผลิตไบโอดีเซลที่มี ร้อยละผลได้ 91.4% ใช้เวลา 150 วินาที ใช้คลื่นไมโครเวฟ ขนาดเท่ากัน [7] อย่างไรก็ตามแม้ว่าการให้ความร้อนด้วย คลื่นไมโครเวฟจะช่วยให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว แต่หากขาดการกระตุ้นให้เกิดการผสมของวัตถุดิบตั้งต้น (น้ำมันพืช แอลกอฮอล์ และตัวเร่งปฏิกิริยา) การใช้คลื่น ไมโครเวฟก็จะไม่สามารถกระตุ้นปฏิกิริยาดังกล่าวให้ สมบูรณ์ขึ้นได้ นักวิจัยได้ประยุกต์ใช้ท่อผสมแบบสลิตซึ่งมี คุณสมบัติสามารถผสมของเหลวได้ดี เช่น K. Somnuk และคณะ ได้ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบ ที่บรวมน้ำมันสองขั้นตอนด้วยกระบวนการหมุนวนผ่านท่อ ผสมแบบสลิตยาว 5 m พบว่าในขั้นตอนแรก ใช้เมทานอล 19.8 %vol. กรดซัลฟูริก 2.0 %vol. ความเร็วในการป้อน สารเคมี 40 L/h ใช้เวลาทำปฏิกิริยานาน 50 นาที สามารถ ลดค่าความเป็นกรดในน้ำมันปาล์มดิบจาก 30 mgKOH/g เหลือเพียง 2 mgKOH/g และในขั้นตอนที่สอง สามารถ ผลิตไบโอดีเซลให้มีความบริสุทธิ์ 98.65 %wt. โดยใช้เม ทานอล 23.81 %vol. โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 11.8 %wt. ใช้เวลาทำปฏิกิริยานาน 60 นาที และความเร็วใน การป้อนสารเคมี 40 L/h [8]

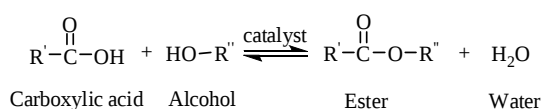
จากที่กล่าวมาข้างต้นจะสังเกตได้ว่าการนำคลื่น ไมโครเวฟมาใช้ในกระบวนการลดกรดไขมันอิสระหรือการ ผลิตไบโอดีเซลมีจุดเด่นในเรื่องของระยะเวลาในการทำ ปฏิกิริยาซึ่งเมื่อเทียบกับการใช้ท่อผสมแบบสลิตแล้วถือว่า ใช้เวลาน้อยมาก แต่การผลิตด้วยการกระตุ้นจากคลื่น ไมโครเวฟจะต้องทำให้วัตถุดิบผสมเป็นเนื้อเดียวกันก่อน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษากระบวนการลดกรดไขมันอิสระ ในน้ำมันปาล์มดิบด้วยกระบวนการหมุนวนผ่านท่อผสม

แบบสลิตเพื่อให้วัตถุดิบผสมเป็นเนื้อเดียวกัน ก่อนได้รับการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยคลื่นไมโครเวฟอีกครั้ง ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อลดระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาและค่าความเป็นไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบที่ได้มีค่าน้อยกว่า 2 mgKOH/g

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน

กระบวนการลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบใช้ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน โดยกรดไขมันอิสระทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ ได้ผลิตภัณฑ์คือ เอสเตอร์กับน้ำ โดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา [9] ดังแสดงในรูปที่ 1 สำหรับกระบวนการนี้ต้องการเปลี่ยนเฟส (phase) ของกรดไขมันอิสระให้เป็นไตรกลีเซอไรด์ให้ได้มากที่สุด ซึ่งจะส่งผลดีต่อการนำน้ำมันที่ผ่านการลดกรดไขมันอิสระไปผลิตไบโอดีเซลในขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 1 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน

2.2 ท่อผสมแบบสลิต

ท่อผสมแบบสลิตเป็นอุปกรณ์ช่วยผสมซึ่งสามารถผสมสารได้หลายสถานะ [10] ภายหลังมีการประยุกต์ใช้ในกระบวนการลดกรดไขมันอิสระและผลิตไบโอดีเซลพบว่าสามารถผสมวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิตสามารถเกิดปฏิกิริยาได้สมบูรณ์ [8], [11] ในงานวิจัยนี้ใช้ท่อผสมแบบสลิตชนิดเกลียวสามารถทำจากโลหะแผ่นบาง โดยตัดตามสัดส่วนที่ต้องการแล้วบิดทำมุม 180 องศา ไปตามเข็มนาฬิกา จากนั้นนำเกลียวแต่ละอันมาเชื่อมต่อกันทำมุม 90 องศา ให้ความยาวตามที่ต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ท่อผสมแบบสลิตชนิดเกลียว

2.3 คลื่นไมโครเวฟ

การประยุกต์ใช้คลื่นไมโครเวฟในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลได้รับความสนใจ เนื่องจากสามารถกระตุ้นปฏิกิริยาเคมีให้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ผลได้สูง และต้องการ

พลังงานน้อย [12] โดยคลื่นไมโครเวฟที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นช่วงความถี่คลื่นไมโครเวฟที่ใช้สำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้า และการส่งเคราะห์ปฏิกิริยาเคมี คือ 2.45 GHz และความยาวคลื่น 12.25 m

3. วัตถุดิบและอุปกรณ์การทดลอง

3.1 วัตถุดิบ

น้ำมันปาล์มดิบชนิดหีบรวมซึ่งมีกรดไขมันอิสระสูงใช้ผลิตภัณฑ์จากห้างหุ้นส่วนจำกัดรุ่งเรืองกิจน้ำมันปาล์ม ใช้แอลกอฮอล์ชนิดเมทานอล เกรดเชิงการค้าความบริสุทธิ์ 98% และใช้กรดซัลฟิวริกเกรดเชิงการค้าความเข้มข้น 95% เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

3.2 เครื่องลดกรดไขมันอิสระ

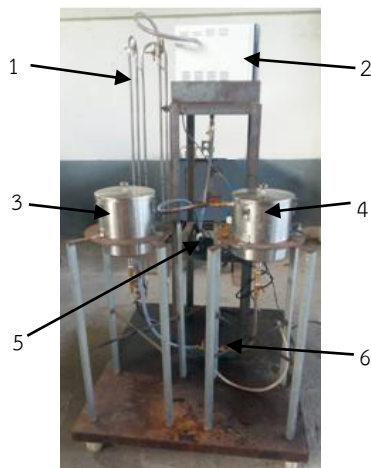
เครื่องลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมตามรูปที่ 3 แสดงอุปกรณ์ของระบบ ประกอบด้วย ถัง T1 ขนาด 5 ลิตร สำหรับใส่น้ำมันปาล์มดิบหีบรวม มีปั๊ม P1 (ยี่ห้อ SANSO, รุ่น PMD-221) ซึ่งมีอัตราการไหล 1.3 l/min เพื่อป้อนน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเข้าสู่ท่อผสมแบบสลิต (SM) มีความยาว 5 m และเตาไมโครเวฟ (M) ซึ่งมีปั๊ม P2 (ยี่ห้อ SANSO, รุ่น PMD-221) ซึ่งมีอัตราการไหล 1.3 l/min ทำหน้าที่ดูดวัตถุดิบจากไมโครเวฟหมุนเวียนเข้าสู่ถัง T1 มีถัง T2 ขนาด 5 ลิตร สำหรับใส่เมทานอลและกรดซัลฟิวริก ซึ่งมีปั๊ม P1 สำหรับป้อนสารเคมีเข้าสู่ระบบ เตาไมโครเวฟ (M) เป็นเตาไมโครเวฟแบบครัวเรือน (ยี่ห้อ SAMSUNG, รุ่น ME711K) ซึ่งมีท่อพลาสติกทนความร้อนขุดอยู่ภายในสำหรับให้น้ำมันที่ถูกป้อนเข้าสู่ไมโครเวฟได้รับการกระตุ้นปฏิกิริยาจากคลื่นไมโครเวฟอุณหภูมิระหว่างการทำปฏิกิริยาวัดด้วยเทอร์มิสเตอร์แบบดิจิตอล TM ยี่ห้อ UNION รุ่น UN-305A

3.3 ขั้นตอนการทำงาน

การทำงานของเครื่องตามรูปที่ 4 ขั้นตอนแรกใส่น้ำมันปาล์มดิบลงในถัง T1 เปิดปั๊ม P1 เพื่อให้น้ำมันในถัง T1 เข้าสู่ท่อผสมแบบสลิต จากนั้นไหลเข้าสู่เตาไมโครเวฟซึ่งน้ำมันจะถูกดูดออกจากเตาไมโครเวฟด้วยปั๊ม P2 ซึ่งจะไหลวนเข้าสู่ถัง T1 ใหม่ หมุนเวียนในระบบเพื่อเป็นการเตรียมน้ำมันให้มีอุณหภูมิ $60 \pm 5^\circ\text{C}$ เมทานอลที่ถูกเตรียมไว้ในถัง T2 จะถูกป้อนด้วยปั๊ม P1 ด้วยการเปิดวาล์ว V2 เมื่อเมทานอลเข้าสู่ระบบปล่อยให้เมทานอลกับน้ำมันดิบไหลวนผสมเป็นเนื้อเดียวประมาณ 3 นาที จึงป้อนกรดซัลฟิวริกที่เตรียมไว้ในถัง T2 เข้าสู่ระบบไหลวนในระบบตามระยะเวลาที่กำหนด เวลาในการทำปฏิกิริยาจะเริ่มจับทันทีที่เติมซัลฟิวริกเข้าสู่ระบบโดยทำปฏิกิริยา

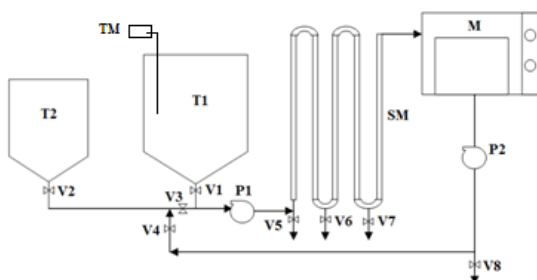
นาน 18 นาที และจะเก็บตัวอย่างไบโอดีเซลมาวิเคราะห์
ทุกๆ 3 นาที (ไหลวนในระบบครบ 2 รอบ) ซึ่งตัวอย่างที่
เก็บจะนำไปแช่ในน้ำแข็งทันทีเพื่อหยุดปฏิกิริยา

สำหรับเงื่อนไขในการทดลองแต่ละครั้งจะใช้น้ำมัน
ปาล์มดิบจำนวน 3 ลิตร ใช้กรดซัลฟูริก 4 %vol. ใช้คลื่น
ไมโครเวฟ 450 W ใช้เมทานอล 15, 20, 25 และ 30
%vol. ตามลำดับ ในทุกเงื่อนไขจะทำการทดลองซ้ำกัน 3
ครั้ง เพื่อยืนยันผลการทดลอง



หมายเลข	คำอธิบาย
1	ท่อผสมแบบสถิต
2	เตาไมโครเวฟ
3	ถังน้ำมันปาล์มดิบ
4	ถังเมทานอลและกรด
5	ปั๊ม SANSO 1
6	ปั๊ม SANSO 2

รูปที่ 3 อุปกรณ์ของเครื่องลดกรดไขมันอิสระในน้ำมัน
ปาล์มดิบหีบรวม



รูปที่ 4 ผังการทำงานของเครื่องลดกรดไขมันอิสระใน
น้ำมันปาล์มดิบหีบรวม

3.4 การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด

ตัวอย่างน้ำมันที่ผ่านการลดกรดไขมันอิสระหลังจาก
ล้างทำความสะอาดสิ่งปนเปื้อนด้วยน้ำแล้ว จะนำไป
วิเคราะห์หาค่าความเป็นกรดด้วยวิธีของ The American
Oil Chemists' Society Official Method Cd 3a-63 for
Acid Value [13] ดังสมการที่ (1)

$$AV = \frac{ml \times 0.1 \times 56.1}{g} \quad (1)$$

เมื่อ AV = ค่าความเป็นกรด (mgKOH/g)
 ml = ปริมาณสารละลายที่ใช้ (ml)
 g = น้ำหนักน้ำมันตัวอย่าง (g)

3.5 การวิเคราะห์องค์ประกอบในน้ำมันด้วยวิธี TLC-FID

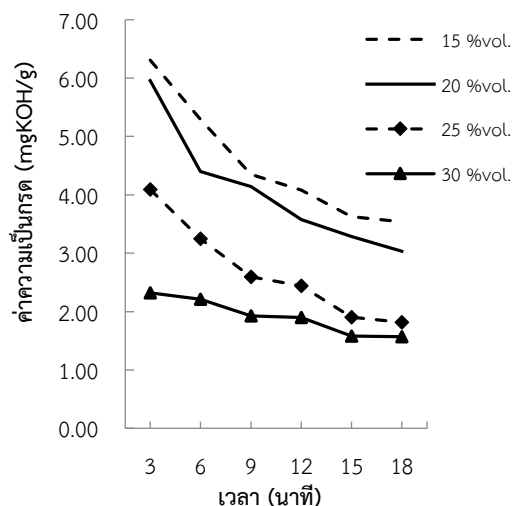
ตัวอย่างน้ำมันที่ต้องการนำไปวิเคราะห์หา
องค์ประกอบด้วยเทคนิค TLC/FID จะต้องล้างด้วยน้ำร้อน
เสียก่อน เพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนที่เหลือยู่ในน้ำมัน
เนื่องจากหากมีสิ่งปนเปื้อนจะส่งผลการแยกสาร ทำให้
ค่าที่อ่านได้คลาดเคลื่อนจากผลการทดลองจริง การ
วิเคราะห์องค์ประกอบในน้ำมันด้วยเทคนิค TLC/FID โดย
ใช้เครื่อง IATRON-CAN MK-65 และ Chromarod Type
S-II Quartz (Mishubishi Kagaku Iatron., Japan)

4. อภิปรายผลการทดลอง

4.1 ผลการลดกรดไขมันอิสระโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ และท่อผสมแบบสถิต

การทดลองลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบหีบ
รวมด้วยเงื่อนไขการทดลองที่แตกต่างกัน ปรากฏว่าการ
เพิ่มปริมาณเมทานอลที่สูงขึ้นจะช่วยให้ปฏิกิริยาเอสเทอร์
ริฟิเคชันเกิดขึ้นได้สมบูรณ์เร็วขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5 จะ
เห็นได้ว่า การทดลองโดยใช้เมทานอล 15 %vol. เมื่อทำ
ปฏิกิริยาผ่านไป 18 นาที สามารถลดกรดไขมันอิสระจาก
30.5 mgKOH/g เหลือ 3.54 mgKOH/g (S.D.= 0.03)
เมื่อเพิ่มปริมาณเมทานอลมากขึ้นพบว่า สามารถลดกรด
ไขมันอิสระได้ดียิ่งขึ้น โดยการใช้ปริมาณเมทานอล
30 %vol. สามารถลดกรดไขมันอิสระจาก 30.5
mgKOH/g เหลือ 1.57 mgKOH/g (S.D.= 0.02) ซึ่ง
เป็นไปตามทฤษฎีคือ การเพิ่มเมทานอลที่มากกว่าทาง
ทฤษฎี 100 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็ว
ขึ้นและผลได้ที่สูงขึ้น [14] อย่างไรก็ตามการลดกรดไขมัน

อิสระให้เหลือไม่เกิน 2 mgKOH/g ก็เพียงพอแล้วสำหรับนำไปผลิตไบโอดีเซลในขั้นตอนทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน ดังนั้นเพื่อลดระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเงื่อนไขที่แนะนำให้ใช้คือ การใช้ปริมาณเมทานอล 30 %vol. ทำปฏิกิริยา 9 นาที ซึ่งสามารถลดกรดไขมันอิสระลงเหลือ 1.93 mgKOH/g (S.D.= 0.02)



รูปที่ 5 ค่าความเป็นกรดของน้ำมันปาล์มดิบโดยใช้กลีเซอรีนและทอผสมแบบสถิติ

4.2 คุณสมบัติของน้ำมันที่ผ่านการลดกรดไขมันอิสระจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมเปรียบเทียบกับน้ำมันที่ผ่านการลดกรดไขมันอิสระดังตารางที่ 1 พบว่าสามารถลดกรดไขมันอิสระเหลือเพียง 0.818 %wt. เมื่อเทียบกับงานวิจัยของ K. Somnuk *et al.*, [8] ได้ทำการลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมโดยใช้ทอผสมแบบสถิติเพียงอย่างเดียว พบว่าองค์ประกอบของน้ำมันที่ผ่านการลดกรดไขมันอิสระไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ และเอสเตอร์ มีค่าใกล้เคียงกัน แต่มีระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาแตกต่างกันมาก โดยการลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบโดยใช้ทอผสมแบบสถิติอย่างเดียวใช้เวลาทำปฏิกิริยา 50 นาที ในขณะที่งานวิจัยนี้ ใช้ระยะเวลาเพียง 9 นาที จะเห็นได้ว่าการนำกลีเซอรีนมาใช้กระตุ้นปฏิกิริยาจะช่วยลดระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาอย่างเห็นได้ชัด

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมและน้ำมันที่ผ่านการลดกรดไขมันอิสระ

คุณสมบัติ	น้ำมันปาล์มดิบ	ทอผสมแบบสถิติ [8]	ทอผสมแบบสถิติร่วมกับโมโคเวฟ
Free fatty acid (%wt.)	7.272	0.868	0.818
Triglyceride (%wt.)	86.830	80.126	79.906
Diglyceride (%wt.)	4.315	8.459	8.601
Monoglyceride (%wt.)	1.582	1.439	5.286
Ester (%wt.)	0.000	9.877	8.201

5. สรุป

การประยุกต์ใช้อุปกรณ์กระตุ้นปฏิกิริยาร่วมกันระหว่างทอผสมแบบสถิติและคลื่นไมโครเวฟ ในกระบวนการลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมปรากฏว่าผลการทดลองเป็นไปตามวัตถุประสงค์สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ภายใต้เงื่อนไขใช้ปริมาณเมทานอล 30 %vol, กรดซัลฟูริก 4 %vol. ทำปฏิกิริยานาน 9 นาที สามารถลดค่ากรดไขมันอิสระให้เหลือต่ำกว่า 2 mgKOH/g โดยที่องค์ประกอบของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และโมโนกลีเซอไรด์ ใกล้เคียงกับการใช้ทอผสมแบบสถิติเพียงอย่างเดียว

2. การใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมกับทอผสมแบบสถิติในกระบวนการลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมสามารถลดระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเหลือเพียง 9 นาที ในขณะที่การลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบโดยใช้ทอผสมแบบสถิติอย่างเดียวใช้เวลาทำปฏิกิริยานาน 50 นาที [8]

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณ วิทยาลัยรัตภูมิ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่อุปกรณ์ และเครื่องมือต่างๆ สนับสนุนงานวิจัย และนักศึกษาสาขาวิชาเทคโนโลยีเครื่องจักรกลเกษตร ได้แก่ นายปฐมพร นวลแก้ว และนายจิระพงษ์ คงปาน ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำวิจัยในครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Office of Agricultural Economics. (2018, Nov 5). Oil Palm 2018 [Online]. Available: <http://www.oae.go.th>
- [2] C. Chusuwan. (2018, Nov 5). Palm Industrial [Online]. Available: <https://www.krungsri.com>
- [3] K. Somnuk, P. Smithmaitrie and G. Prateepchaikul, "Optimization of continuous acid- catalyzed esterification for free fatty acids reduction in mixed crude palm oil using static mixer coupled with high- intensity ultrasonic irradiation," *Energy Conversion and Management*, vol. 68, pp. 193–199, 2013.
- [4] J. Surachai and G. Prateepchaikul, "Enhancement of the Two-Stage Process for Producing Biodiesel from High Free Fatty Acid Mixed Crude Palm Oil," *Kasetsart J. (Nat. Sci.)*, vol. 45, pp. 1094-1104, 2011.
- [5] J. Milano, H.G. Ong, H.H. Masjuki, A.S. Silitonga, W.H. Chen, F. Kusumo, S. Dharma and A.H. Sebayang, "Optimization of biodiesel production by microwave irradiation-assisted transesterification for waste cooking oil- Galophyllum inophyllum oil via response surface methodology," *Energy Conversion and Management*, vol. 158, pp. 400–415, 2018.
- [6] D. Kim, J. Choi, G.J. Kim, S.K. Seol and S. Jung, "Accelerated esterification of free fatty acid using pulsed microwaves," *Bioresources Technology*, vol. 102, pp.7229-7231, 2011.
- [7] V. Kamath H, I. Regupathi and M.B. Saidutta, "Optimization of two step karanja biodiesel synthesis under microwave irradiation," *Fuel Processing Technology*, vol. 92, pp. 100-105, 2011.
- [8] K. Somnuk, S. Niseng and G. Prateepchaikul, "Optimization of high free fatty acid reduction in mixed crude palm oils using circulation process through static mixer reactor and pilot-scale of two-step process," *Energy Conversion and Management*, vol. 80, pp. 374-381, 2014.
- [9] D.Y.C Leung, X. Wu and M.K.H Leung, "A review on biodiesel production using catalyzed Transesterification," *Applied Energy*, vol. 87, pp. 1083-1095, 2010.
- [10] L.F. Albright, *Albright's Chemical Engineering Handbook*. New York: CRC Press, 2008.
- [11] S. Niseng, K. Somnuk and G. Prateepchaikul, "Optimization of base-catalyzed transesterification in biodiesel production from refined palm oil via circulation process through static mixer reactor," *Advanced Materials Research*, vol. 931-932, pp. 1038-1042, 2014.
- [12] H. Ding, W. Ye, Y. Wang, L. Li, D. Liu, J. Gui, C. Song and N. Ji, "Process intensification of transesterification for biodiesel production from palm oil: Microwave irradiation on transesterification reaction catalyzed by acidic imibazolium ionic liquids," *Energy*, vol. 144, pp. 957-967, 2018.
- [13] Cd 3a-63 Method for Acid Value Volume III, Official Method and Recommended Practices of American Oil Chemists Society, 1998.
- [14] S. Lestari, P. Maki-Arvela, J. Beltramini, G.Q. Max Lu and D.Y. Murzin, "Transforming Triglycerides and Fatty Acids into Biofuels," *ChemSusChem*, vol. 2, pp. 1109-1119, 2009.

การควบคุมพัสดุคงคลังสารหล่อลื่นสำหรับงานบำรุงรักษาของท่าเรือ Lubricants Inventory Control for Marine Port Maintenance

จารุวรรณ งามเลิศ สิริเดช ชาตินิยม*

สาขาวิชาวิศวกรรมโลจิสติกส์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ นครนายก 26120

Jaruwan Ngamlerd, Siradej Chartniyom*

Logistics Engineering, Department of Industrial Engineering

Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University, Nakhon Nayok 26120

*Corresponding author Email: siradej@g.swu.ac.th

(Received: August 17, 2020; Accepted: October 7, 2020)

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาระบบพัสดุคงคลังสำหรับงานบำรุงรักษาในการดำเนินงานของท่าเรือนานาชาติแห่งหนึ่ง โดยมุ่งเน้นที่การปรับปรุงวิธีการสั่งซื้อและวิธีการควบคุมปริมาณสำรองคลังประเภทสารหล่อลื่นให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ในขั้นต้นใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบเอบีซี เพื่อจัดลำดับความสำคัญของพัสดุคงคลังตามมูลค่าการใช้งาน และประมาณการปริมาณใช้งานที่จะไม่ทำให้เกิดการขาดแคลน จากนั้นจึงจัดตั้งวิธีการควบคุมพัสดุประเภทสารหล่อลื่นตามความเหมาะสมของแต่ละกลุ่มด้วยวิธี 1) ระบบรอบเวลาสั่งซื้อคงที่ 2) ระบบจุดสูงสุด – ต่ำสุด และ 3) ใช้แผนซ่อมบำรุงของทางแผนกในการพิจารณา จากนั้นจึงทำการสร้างแผนการสั่งซื้อสารหล่อลื่นตามหมวดหมู่ต่างๆ เพื่อใช้งานจริง การปรับปรุงสามารถลดปัญหาสารหล่อลื่นไม่เพียงพอได้ถึงร้อยละ 88.99 สามารถลดมูลค่าพัสดุดำรงคงคลังได้ 65,853 บาท คิดเป็นร้อยละ 11.19 ของมูลค่าการใช้งานสารหล่อลื่นรายปี

คำสำคัญ: สารหล่อลื่น การควบคุมพัสดุคงคลัง ท่าเรือและอุปกรณ์ขนถ่ายตู้สินค้า

ABSTRACT

This article presents the development of the maintenance, repair & operating supplies (MRO) inventory system for the operation of an international portyard. Steps in the improvements focused on setting up suitable ordering and controlling methods to work as an integrated inventory approach. Firstly, ABC classification technique was used to prioritize 3 groups of lubricants according to their annual-usage levels. Subsequently, three controlling methods as 1) periodic review system, 2) Min-Max system and 3) a maintenance plan were considered in setting a buying plan for the different groups. Finally, purchasing and controlling plans were released for the real operation of the sample port. The proposed approach results in the reduction of shortage in lubricants by 88.99%, and the reduction of the MRO inventory cost of 65,853 bahts, which implied 11.19% of annual usage value.

Keywords: Lubricant, Inventory Control, Port Facilities and Cargo Handling Equipment Maintenance

1. บทนำ

ในปัจจุบัน ธุรกิจท่าเทียบเรือขนถ่ายตู้สินค้ากำลังเติบโตอย่างมากเพื่อให้บริการขนถ่ายตู้สินค้าขึ้น-ลงเรือบรรทุกตู้สินค้าระหว่างประเทศ พร้อมทั้งบริการจัดเก็บและส่งมอบตู้สินค้าอย่างครบวงจรด้วยอุปกรณ์อำนวยความสะดวกที่หลากหลาย เช่น ปันจันยกตู้สินค้าหน้าท่า รถลาก และเครื่องมือขนย้ายต่างๆ ทั้งนี้ผู้ประกอบการจะต้องสามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าโดยทำการส่งมอบตู้สินค้าตรงตามเวลาที่กำหนด การซ่อมบำรุงอุปกรณ์และเครื่องจักรข้างต้นจึงมีความจำเป็น และต้องมีระบบการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance) อย่างถูกต้อง ไม่ว่าจะเป็นการดูแลเปลี่ยนถ่ายสารหล่อลื่น เช่น น้ำมันเครื่อง จาระบี และน้ำมันไฮดรอลิก หรือการเปลี่ยนชิ้นส่วนอะไหล่ที่เสื่อมสภาพตามเวลา

บทความนี้ทำการศึกษาปัญหาเกี่ยวกับระบบการควบคุมพัสดุคงคลังสำหรับงานบำรุงรักษาของท่าเทียบเรือขนถ่ายตู้สินค้านานาชาติ และได้เจาะจงที่การใช้งานสารหล่อลื่นซึ่งมีการใช้งานเป็นจำนวนมาก และใช้เป็นประจำทุกวัน จากข้อมูลเบื้องต้นพบว่ามีสารหล่อลื่นหลายชนิดที่ไม่เพียงพอต่อการใช้งาน และยังไม่มีการวิเคราะห์และวางแผนการใช้งานเพื่อร่วมพิจารณาในแผนการบำรุงรักษาด้วย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องประยุกต์หลักการของการบริหารพัสดุคงคลังหมวดซ่อมบำรุง (Maintenance Repair & Operating Supplies, MRO) โดยให้ความสำคัญกับการจัดหาพัสดุคงคลังประเภทสารหล่อลื่นนี้ให้อยู่ในระดับที่สามารถมีใช้งานเพียงพออย่างสม่ำเสมอ ในขณะที่ต้นทุนการจัดหาและจัดเก็บก็ไม่สูงมากเกินไป ซึ่งในบริบทนี้ เทคนิคการจัดแบ่งกลุ่มสินค้าคงคลัง (Inventory Classification) [1, 2] และเทคนิคการบริหารการสั่งซื้อแบบรอบเวลาสั่งซื้อคงที่ แบบจุดสูงสุดต่ำสุด แบบการสั่งซื้อแต่พอดี [2] สามารถนำมาใช้งานร่วมกันเป็นกระบวนการควบคุมสินค้าคงคลัง (Integrated Inventory Approach) สำหรับการบริหารคลังพัสดุของระบบซ่อมบำรุงนี้ได้

ในการดำเนินการได้พิจารณาพัสดุประเภทสารหล่อลื่นจำนวน 13 รายการ และนำมาวิเคราะห์แบ่งกลุ่มตามลำดับความสำคัญ และกำหนดวิธีการควบคุมปริมาณการจัดหาและจัดเก็บเพื่อสร้างแผนการสั่งซื้อที่เหมาะสม ที่สอดคล้องกับการใช้งานตามรอบเวลาของระบบการบำรุงรักษา ยังผลให้สามารถลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาและสามารถดำเนินการตามแผนบำรุงรักษา

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การวิเคราะห์แบบ ABC เป็นแนวคิดที่ให้ความสำคัญกับสินค้าตามกลุ่มสินค้าโดยการจัดลำดับสินค้าตามยอดขายหรือส่วนแบ่งกำไรของสินค้านั้นซึ่งสินค้าที่จัดอยู่ในกลุ่ม A จะประกอบด้วยสินค้าเพียงไม่กี่ประเภทหรือมีจำนวนรายการน้อยแต่เป็นสินค้าที่มียอดขายหรือส่วนแบ่งกำไรมากที่สุด ส่วนสินค้าที่มียอดขายหรือสัดส่วนผลกำไรรองลงไปจะได้รับความสำคัญน้อยลงเป็น B และ C ตามลำดับ

การสำรวจงานวิจัย [3, 4] แสดงให้เห็นประสิทธิภาพของการจัดการสินค้าคงคลังแบบกลุ่ม โดยการใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบ ABC เพื่อจัดกลุ่มพัสดุในคลังของโรงงานน้ำตาลและโรงงานทอเยา ซึ่งทำให้สามารถประยุกต์ใช้เทคนิคการควบคุมเข้ากับแต่ละกลุ่มได้เป็นลำดับต่อไป

2.2 การพยากรณ์ (Forecasting)

ในหัวข้อนี้นำเสนอเฉพาะการพยากรณ์แบบแยกส่วนประกอบ (Decomposition Method) ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์ที่เน้นการแยกแต่ละส่วนประกอบของอนุกรมเวลาออกจากกัน ซึ่งทำให้ทราบถึงลักษณะการเคลื่อนไหวของอนุกรมเวลา ในรูปแบบของแนวโน้ม ฤดูกาล หรือวัฏจักร ซึ่งสามารถนำไปสร้างตัวแบบพยากรณ์ต่อไปได้ [5, 6] ตัวอย่างเช่น ใน [7] ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ความต้องการใช้ปุ๋ยเคมีในงานเกษตรกรรมที่มีความผันแปรตามฤดูกาล นอกจากนั้น ยังพบว่าโปรแกรมเช่น Minitab ยังเอื้ออำนวยต่อการสร้างข้อมูลและการวิเคราะห์ด้วยวิธีการแยกส่วนประกอบด้วย [8]

การพยากรณ์โดยวิธีการแยกส่วนประกอบมีรูปแบบแต่
ที่นิยมใช้มี 2 รูปแบบคือ

รูปแบบเชิงบวก (Additive model)

$$Y = T + S + C + I \quad (1)$$

รูปแบบเชิงคูณ (Multiplicative model)

$$Y = T \times S \times C \times I \quad (2)$$

เมื่อ

Y = ค่าพยากรณ์ของเหตุการณ์

T = ค่าอิทธิพลของแนวโน้ม

S = ค่าอิทธิพลของฤดูกาล

C = ค่าอิทธิพลของวัฏจักร

I = ค่าอิทธิพลของเหตุการณ์ไม่ปกติ

2.3 วิธีควบคุมพัสดุคงคลัง

2.3.1 ระบบรอบเวลาสั่งซื้อคงที่ (Fixed-Time Period Systems: P-systems) ระบบนี้จะกำหนดระยะเวลา
สั่งซื้อที่แน่นอน และใช้ปริมาณการสั่งซื้อ (Q) แต่ครั้งไม่
เท่ากันโดยขึ้นอยู่กับปริมาณคงคลังที่เหลืออยู่ขณะนั้น
ระบบนี้มีพารามิเตอร์ควบคุมอยู่ 2 จุด คือ ระยะเวลา
สั่งซื้อ (T) และระดับคงคลังสูงสุด (Maximum level of
inventory : S) สามารถหาได้ดังสมการ (3)

$$S = D_{LT+T} + k\sigma_{LT+T} \quad (3)$$

โดยที่

D_{LT+T} = ปริมาณความต้องการพัสดุโดยเฉลี่ยใน
ช่วงเวลานำและระยะเวลาสั่งซื้อ

σ_{LT+T} = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความต้องการใน
ช่วงเวลานำและระยะเวลาสั่งซื้อ

k = safty factor เพื่อกำหนดระดับการให้บริการ
(service level) ของคลังสินค้า

2.3.2 ระบบจุดสูงสุด – ต่ำสุด (Min - Max) ระบบนี้
จะมีการสั่งซื้อต่อเมื่อพัสดุคงคลังมีปริมาณลดลงมาถึงจุด
ต่ำสุด (Min) และจะทำการสั่งซื้อเข้ามาจนถึงระดับ
ควบคุมสูงสุด (Max) โดยที่ระยะเวลาสั่งซื้อไม่ได้กำหนด
แต่จะกำหนดจุดมุ่งหมายในการเก็บพัสดุอะไหล่ยาวนานสุด
(Stockage Objective) ตามนโยบายของแต่ละบริษัท

เช่น 2 เดือน หรือ 3 เดือน สามารถคำนวณ Min – Max
ได้ดัง (4) และ (6)

$$Min = (D \times LT) + ss \quad (4)$$

$$ss = z\sigma_d\sqrt{LT} \quad (5)$$

$$Max = D \times Stockage objective \quad (6)$$

โดยที่

D = อัตราการใช้เฉลี่ยของพัสดุดต่อเดือน

LT = ช่วงเวลานำในการสั่งซื้อพัสดุดเข้ามา

ss = ระดับปริมาณพัสดุดคงคลังสำรอง

z = ค่าแจกแจงปกติมาตรฐาน

σ_d = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความต้องการ

$Stockage objective$ = ระยะเวลาที่ต้องการให้มี
พัสดุดอยู่ในคลัง (2 เดือน หรือ 3 เดือน ขึ้นอยู่กับความ
ต้องการของทางบริษัท) การใช้งานวิธีการควบคุมพัสดุดคง
คลังแบบรอบเวลาคงที่ สามารถศึกษารายละเอียดได้ใน
[2, 9] และสามารถศึกษาการใช้งานร่วมกันของการ
วิเคราะห์แบบ ABC กับวิธีการควบคุมพัสดุดคงคลังทั้งสอง
แบบข้างต้นใน [9, 10] และงานวิจัยตัวอย่างสำหรับระบบ
อะไหล่หรืองานบำรุงรักษาใน [11, 12]

3. เปรียบวิธีการวิจัย

เพื่อให้ระบบบำรุงรักษาของท่าเรือตัวอย่างสามารถ
กระทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงมีแนวความคิดที่ให้มีการ
ใช้งานเทคนิคต่างๆ ซึ่งนำเสนอในหัวข้อที่ 2 ร่วมกัน ใน
รูปแบบของ กระบวนการเชิงรวม (Integrated
Inventory Approach) ซึ่งจะสอดคล้องไปกับนโยบาย
และแผนงานของระบบบำรุงรักษาที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน
ดังนั้น งานวิจัยจึงกำหนดขั้นตอนและการประยุกต์ใช้
เทคนิคเป็น 3 ระยะ ดังนี้

3.1 ศึกษาภาพรวมของแผนกและขั้นตอนการทำงาน

ใช้การเก็บข้อมูลเชิงปริมาณ ทั้งในรูปแบบข้อมูลปฐม
ภูมิและข้อมูลทุติยภูมิ จากฐานข้อมูลคลังพัสดุดของแผนก
วิศวกรรม จากช่วงเวลา เดือนกรกฎาคม 2560 ถึงเดือน
สิงหาคม 2562 และเอกสารรายงานซึ่งเกี่ยวข้องกับ
จัดการคลังสารหล่อลื่น ประกอบด้วยข้อมูลชนิดของสาร
หล่อลื่นจำนวน 13 รายการ ข้อมูล ราคา ปริมาณความ

ต้องการของสารหล่อลื่นแต่ละชนิด รวมถึงขั้นตอนและระยะเวลานำในการจัดหา และกำหนดขอบเขตการใช้ข้อมูลไม่ต่ำกว่า 6 เดือนเพื่อให้ครอบคลุมรอบเวลาของงานบำรุงรักษา

3.2 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทางวิศวกรรม

3.2.1 จัดลำดับความสำคัญของพัสดุคงคลังด้วยเทคนิคการจัดแบ่งกลุ่ม (Inventory Classification) แบบการวิเคราะห์เอบีซี (ABC Analysis) โดยพิจารณามูลค่าการใช้สารหล่อลื่นทั้งหมด เพื่อระบุความสำคัญของสารหล่อลื่นแต่ละประเภท และกำหนดนโยบายการแบ่งกลุ่มเป็น กลุ่ม A – 80% สำคัญต่อระบบบำรุงรักษาอย่างมาก กลุ่ม B – 15% และกลุ่ม C มีการใช้งานเป็นครั้งคราว คิดที่ระดับ 5% ของมูลค่าการใช้งานสารหล่อลื่นทั้งหมด

3.2.2 พยากรณ์ความต้องการใช้งานสารหล่อลื่น ของกลุ่ม A ด้วยวิธีการพยากรณ์แบบแยกส่วน (Decomposition Method) โดยพิจารณาค่าแนวโน้มและฤดูกาลร่วมด้วย ทั้งนี้เพื่อกำหนดระดับการใช้งานและสร้างนโยบายการจัดหาที่จะให้ความสำคัญระดับสูงกับกลุ่ม A ในขั้นตอนต่อไป

การวิเคราะห์แบ่งกลุ่ม และการพยากรณ์ ดำเนินการในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Microsoft Excel และ Minitab เพื่อให้บริษัทตัวอย่างสามารถดำเนินการได้จริงและใช้งานได้อย่างต่อเนื่อง

3.3 การควบคุมพัสดุดำรงของกลุ่มสารหล่อลื่น

กำหนดนโยบายการจัดหาและควบคุมตามลำดับความสำคัญของกลุ่ม โดย สารหล่อลื่นกลุ่ม A ใช้นโยบายการควบคุมที่เข้มงวด แบบรอบเวลาสั่งซื้อคงที่ (Fixed-Time Period Systems, (T, S)) โดยทางแผนกซ่อมบำรุงกำหนดระดับการให้บริการ Service level 80% เป็นค่าเริ่มต้น สารหล่อลื่นกลุ่ม B ใช้นโยบายการควบคุมแบบปกติ โดยใช้ระบบจุดสูงสุด – ต่ำสุด (Min - Max) และสารหล่อลื่นกลุ่ม C ใช้นโยบายผ่อนคลายเป็น เพื่อความ

สะดวกในการปฏิบัติงานจริง โดยกำหนดให้เป็นการสั่งซื้อแต่พอดี (Lot for Lot) ตามรอบเวลาของแผนการซ่อมบำรุงที่ได้กำหนดไว้ การคำนวณพารามิเตอร์ต่างๆ ของนโยบายที่เลือกใช้จะแสดงในหัวข้อถัดไป

4. ผลการวิจัย

4.1 ข้อมูลของพัสดุนิตสารหล่อลื่น

ระบบซ่อมบำรุงของท่าเรือตัวอย่างใช้พัสดุประเภทสารหล่อลื่นจำนวน 13 รายการ โดยมีข้อมูลที่เกี่ยวข้องภายใต้ระยะเวลา 6 เดือนล่าสุด คือ เดือนมีนาคม 2562 ถึงเดือนสิงหาคม 2562 ดังตารางที่ 1

4.2 ผลการจัดกลุ่มพัสดุแบบ ABC

การวิเคราะห์ความสำคัญของพัสดุดำรงประเภทสารหล่อลื่นตามนโยบายที่กำหนดในหัวข้อ 3.2.1 ให้ผลดังต่อไปนี้ พัดในกลุ่ม A – 80% มีมูลค่าการใช้งานรวม 1,798,206 บาท หรือคิดเป็นร้อยละ 77 ของมูลค่าสารหล่อลื่นทั้งหมด และมีจำนวนสารหล่อลื่นทั้งหมด 4 รายการ พัดในกลุ่ม B มีมูลค่าการใช้งานรวม 396,526 บาท หรือคิดเป็นร้อยละ 17 ของมูลค่าสารหล่อลื่นทั้งหมด และมีจำนวนรายการสารหล่อลื่นทั้งหมด 3 รายการ พัดในกลุ่ม C มีมูลค่าการใช้งานรวม 139,828 บาท หรือคิดเป็นร้อยละ 6 ของมูลค่าสารหล่อลื่นทั้งหมดและมีจำนวนรายการสารหล่อลื่น 6 รายการ

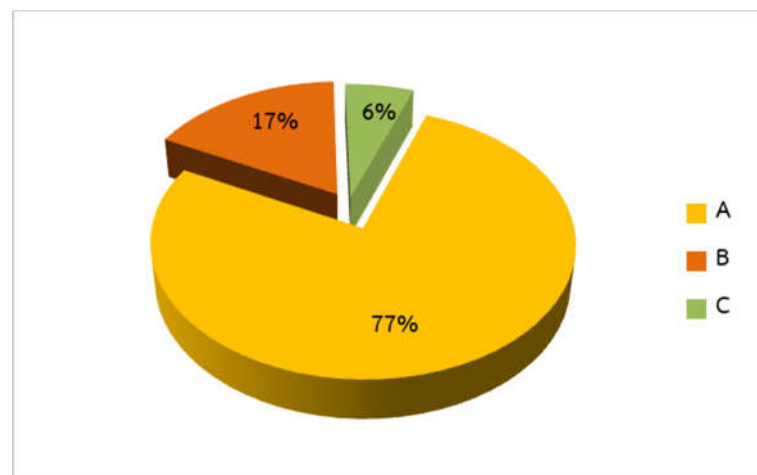
การใช้งานสารหล่อลื่นของท่าเรือ จำนวน 13 รายการ มีมูลค่าการใช้งานรวม 2,334,560 บาท โดยในปัจจุบันสำหรับทุกรายการสารหล่อลื่นจะมีระยะเวลานำในการสั่งซื้อ 30 วัน และสั่งซื้อในรอบเวลา 30 วัน ผลการจัดกลุ่มและสัดส่วนของสารหล่อลื่นทั้งหมดแสดงในตารางที่ 2 และรูปที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการเก็บรวบรวมข้อมูลของสารหล่อลื่น

รายการ	หน่วย	ราคา/ หน่วย (บาท)	พัสดุ คงเหลือ	ปริมาณ การใช้งาน
ENGINE OIL	Liter	70.0	1,641	12,831
HYDRAULIC OIL(Agri Trans Plus 80W)	Liter	78.0	750	5,350
SPHEEROL (EPL2)	Kilogram	105.5	233	2,327
TRANSMITION OIL & HYDRAULIC OIL (ATF Dex II)	Liter	82.0	906	2,893
HYDRAULIC OIL (Hyspin AWS 68)	Liter	56.0	760	3,750
TRANSMITION OIL (CRB 30CF)	Liter	70.0	357	1,545
DIFFERENTIAL OIL (Axle GL-5 140W)	Liter	76.0	668	1,031
TRANSMITION OIL (ATF Dex III)	Liter	82.6	297	680
HYDRAULIC OIL (ALPHA SP 320)	Liter	75.3	600	600
MOLY GREASE	Kilogram	205.3	0	87
GREASE BEARING	Kilogram	171.0	0	90
MANUAL 80W 90 (GL-4)	Liter	72.0	392	48
SPHEEROL (EPL3)	Kilogram	110.9	90	15

ตารางที่ 2 ผลการจัดลำดับพัสดุ

กลุ่ม	จำนวนรายการพัสดุ	ร้อยละของมูลค่าทั้งหมด	มูลค่า (บาท)
A	4 (รายการที่ 1-4)	77	1,798,206
B	3 (รายการที่ 5-7)	17	396,526
C	6 (รายการที่ 8-13)	6	139,828
รวม	13	100	2,334,560



รูปที่ 1 แผนภาพผลการจัดกลุ่มพัสดุแบบ ABC

4.3 การพยากรณ์ความต้องการใช้งาน

ใช้เทคนิคการพยากรณ์แบบแยกส่วนประกอบ (Decomposition Method) พร้อมทั้งพิจารณาแนวโน้มและค่าฤดูกาล เพื่อระบุความต้องการใช้สารหล่อลื่นกลุ่ม A จำนวน 4 รายการ เพื่อประโยชน์ในการนำค่าพยากรณ์มาวางแผนและกำหนดนโยบายในการควบคุมการพยากรณ์ทั้งหมดดำเนินการในโปรแกรมสำเร็จรูป Minitab เนื่องจากข้อมูลมีจำนวนมากและการคำนวณซับซ้อนมีหลายขั้นตอน และเพื่อให้บทความในส่วนสำคัญในการสร้างกระบวนการควบคุมพัสดุคงคลัง จึงขอละเว้นการแสดงรายละเอียดการพยากรณ์ในที่นี้

ข้อมูลที่นำมาพยากรณ์เป็นการใช้งานตั้งแต่ เดือน กรกฎาคม 2560 ถึงเดือนสิงหาคม 2562 และค่าพยากรณ์รวมที่จะนำมาใช้คำนวณตามนโยบายการควบคุมพัสดุคงคลัง แสดงในตารางที่ 3

4.4 การควบคุมพัสดุดำรงของกลุ่มสารหล่อลื่น

4.4.1 การจัดกลุ่มพัสดุ แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ดังแสดงในหัวข้อ 4.2 ตารางที่ 2 คือ กลุ่ม A กลุ่ม B และ กลุ่ม C และกำหนดวิธีการควบคุมตามนโยบายใน 3.3 จะได้วิธีการควบคุมพัสดุคงคลังชนิดสารหล่อลื่นแต่ละกลุ่ม ดังตารางที่ 4

ตัวอย่างการคำนวณระดับคงคลังสูงสุดของสารหล่อลื่น ENGINE OIL

คำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จากข้อมูลพัสดุคงคลังในหัวข้อ 4.1 ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel และได้ผลดังนี้ ข้อมูลนำเข้าในการคำนวณเป็นดังนี้

$$D = 1,992.2 \text{ ลิตร/เดือน}$$

$$\sigma = 306.7 \text{ ลิตร}$$

$$LT = 1 \text{ เดือน}$$

$$T = 0.67 \text{ เดือน (20 วัน)}$$

$k = 0.84$ จากตาราง unit normal distribution โดย $P[X \leq k] = 0.80$ ซึ่งแสดงแทนระดับการให้บริการ (Service level) ที่คาดหวังเป็น 80%

ตารางที่ 3 ค่าการพยากรณ์ของสารหล่อลื่นกลุ่ม A จำนวน 4 รายการ โดยวิธีแยกส่วนประกอบ จากโปรแกรม Minitab

เดือน	ค่าพยากรณ์ (ลิตร)			
	ENGINE OIL	HYDRAULIC		TRANSMIT
		OIL (Agri	SPHEEROL	ON OIL &
		Trans Plus 80W)	(EPL2)	HYDRAULIC OIL (ATF Dex II)
ก.ย. 62	2,023.7	415.5	444.5	369.2
ต.ค 62	2,071.5	819.6	437.9	297.7
พ.ย 62	2,292.1	1,523.0	518.2	420.7
ธ.ค 62	1,330.6	986.9	131.0	12.7
ม.ค 63	1,877.7	729.0	465.7	269.9
ก.พ. 63	1,742.9	326.3	354.7	115.5
มี.ค 63	2,293.8	1,866.0	484.3	80.0
เม.ย 63	1,749.2	234.2	202.2	542.6
พ.ค 63	2,090.2	684.8	497.7	146.7
มิ.ย 63	1,807.3	416.8	363.1	439.5
ก.ค.63	2,423.0	680.9	462.6	435.5
ส.ค 63	2,204.5	716.4	563.0	223.9
AVERAGE	1,992.2	783.3	410.4	279.5
STD.	306.7	483.3	128.8	166.8
TOTAL	23,906.3	9,399.4	4,924.9	3,353.9
MAPE	9.5	64.0	14.4	46.2
MAD	193.3	399.0	45.6	140.7
MSD	76,772.8	292,691.0	6,247.0	50,118.4

ตารางที่ 4 วิธีการควบคุมพัสดุ

กลุ่ม	วิธีการควบคุมพัสดุ
A	ระบบรอบเวลาสั่งซื้อคงที่ Fixed-Time Period Systems, (T, S) ที่ระดับ service level 80%
B	ระบบจุดสูงสุด – ต่ำสุด (Min - Max)
C	สั่งซื้อแต่พอดี (Lot for Lot) ตามรอบเวลาการบำรุงรักษา

นำค่าพยากรณ์ความต้องการ (D) มาคำนวณหาระดับคงคลังสูงสุด (Maximum inventory level, S) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (6) $S = D_{LT+T} + k\sigma_{LT+T}$ ได้เป็น

$$LT + T = 1 + 0.67 = 1.67 \text{ เดือน}$$

$$D_{LT+T} = 1,992.2 \text{ ลิตร/เดือน} \times 1.67 \text{ เดือน} \\ = 3,326.9 \text{ ลิตร}$$

$$\sigma_{LT+T} = 306.7 \text{ ลิตร/เดือน} \times 1.67 \text{ เดือน} \\ = 512.2 \text{ ลิตร}$$

$$k\sigma_{LT+T} = 0.84 \times 512.2 = 430.3 \text{ ลิตร}$$

ระดับคงคลังสูงสุด (Maximum level of inventory: S) ที่ระดับการให้บริการ 80% ได้เป็น

$$S = 3,326.9 + 430.3 = 3,758 \text{ ลิตร}$$

ด้วยการคำนวณในวิธีการเดียวกันกับตัวอย่าง จะทำให้ได้ระดับพัสดุคงคลังสูงสุด S ของสารหล่อลื่นในกลุ่ม A ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ระดับคงคลังสูงสุดของพัสดุก่อนกลุ่ม A

รายการพัสดุ	ระดับคงคลังสูงสุด (S)
ENGINE OIL	3,758 ลิตร
HYDRAULIC OIL (Agri Trans Plus 80W)	1,763 ลิตร
SPHEEROL (EPL2)	865 กิโลกรัม
TRANSMITION OIL & HYDRAULIC OIL (ATF Dex II)	701 ลิตร

4.4.2 วิธีการควบคุมและแผนสั่งซื้อของพัสดุดำเนินการประเภทสารหล่อลื่นกลุ่ม B

ตัวอย่างการคำนวณระดับ Min – Max ของสารหล่อลื่น HYDRAULIC OIL (Hyspin AWS 68)

คำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จากข้อมูลพัสดุดังกล่าวด้วยโปรแกรม Microsoft Excel โดยใช้ข้อมูลนำเข้า คือ

$$D = 625 \text{ ลิตร/เดือน}$$

$$LT = 1 \text{ เดือน}$$

$z = 0.84$ จากตาราง unit normal distribution โดย $P[x \leq z] = 0.80$ ซึ่งแสดงแทนระดับการให้บริการ (Service level) ที่คาดหวังเป็น 80%

$$\sigma_d = 327 \text{ ลิตร/เดือน}$$

คำนวณค่าสินค้าเพื่อความปลอดภัย (SS) โดยสมการที่ (7) ได้

$$SS = (0.84) \times (327) \times \sqrt{1} = 274.7 \text{ ลิตร}$$

พารามิเตอร์ Min-Max ของระบบสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (7) และ (9) โดยทางแผนกซ่อมบำรุงกำหนด stockage objective เป็นเวลา 3 เดือน

$$Min = (625 \times 1) + 274.7 = 900 \text{ ลิตร}$$

$$Max = (625 \times 3) = 1,875 \text{ ลิตร}$$

ด้วยการคำนวณในวิธีการเดียวกันกับตัวอย่าง จะทำให้ได้ระดับ Min และ Max ของสารหล่อลื่นในกลุ่ม B ดังแสดงในตารางที่ 6

4.4.3 วิธีการควบคุมและแผนสั่งซื้อของพัสดุดำเนินการประเภทสารหล่อลื่นกลุ่ม C

สารหล่อลื่นกลุ่ม C มีจำนวน 6 รายการซึ่งมีการใช้งานปริมาณน้อย จึงใช้นโยบายผ่อนคลายเป็นเกณฑ์ในการสั่งซื้อแต่พอดี (Lot for Lot) ตามรอบเวลาของแผนการซ่อมบำรุงที่ได้กำหนดไว้ แผนกซ่อมบำรุงบันทึกและกำหนดปริมาณสารหล่อลื่นที่ต้องใช้เพิ่มเติมในการบำรุงรักษาต่อครั้งสำหรับแต่ละอุปกรณ์ขนถ่าย (ระบุเป็นชื่อยี่ห้ออุปกรณ์) และกำหนดให้มีการเผื่อเพื่อสำรองอีก 10% ของปริมาณสั่งซื้อ และทำแบบบันทึกปริมาณการใช้ต่อครั้งของแต่ละเครื่องจักรเพื่อความสะดวกในการคำนวณและสรุปการสั่งซื้อ ผลการกำหนดปริมาณตามแผนการซ่อมบำรุงแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 6 พารามิเตอร์ของระบบควบคุมแบบต่ำสุด - สูงสุด (Min - Max) สำหรับสินค้าคงคลังกลุ่ม B

รายการพัสดุ	ระดับ บริการ	SS	Min	Max	หน่วย
HYDRAULIC OIL (Hyspin AWS 68)	80%	275.4	900.4	1,875	ลิตร
TRANSMISSION OIL (CRB 30CF)	80%	141.9	399.5	772.5	ลิตร
DIFFERENTIAL OIL (Axle GL-5 140W)	80%	113.7	285.5	515.5	ลิตร

ตารางที่ 7 สรุปการสั่งซื้อของพัสดุสารหล่อลื่นในกลุ่ม C ซึ่งสัมพันธ์กับแผนการบำรุงรักษาที่ใช้งานอยู่

Lubricant	ปริมาณการใช้งานต่อครั้ง (ลิตร)			
	สำหรับอุปกรณ์			
	QC	RTG	ITV	ISUZU
TRANSMISSION OIL (ATF Dex III)			20	
MANUAL 80W 90 (GL-4)				8
HYDRAULIC OIL (ALPHA 320)	870	200		
SPHEEROL (ep13)		5		
MOLY GREASE	5	5		
GREASE BEARING	15	15		

4.5 ผลการพัฒนาระบบสั่งซื้อและการควบคุมพัสดุสารหล่อลื่น

ระบบสั่งซื้อและควบคุมพัสดุสารหล่อลื่นสำหรับงานบำรุงรักษาที่พัฒนาขึ้น อยู่บนพื้นฐานของแนวคิดกระบวนการเชิงรวมเพื่อบริหารสินค้าคงคลัง (Integrated Inventory Approach) ซึ่งใช้วิธีการจัดแบ่งกลุ่มร่วมกับนโยบายการควบคุมสินค้าคงคลัง และทำเรื่องตัวอย่างสามารถดำเนินการได้อย่างสะดวกรวดเร็วในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Microsoft Excel ซึ่งกระบวนการทั้งหมดในการควบคุมพัสดุดังกล่าวสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 8

ระบบการควบคุมพัสดุดังกล่าวสามารถสรุปได้สำหรับงานบำรุงรักษาที่ได้พัฒนาขึ้น ได้แสดงให้เห็นนโยบายการควบคุมพัสดุที่ชัดเจนและมีรูปแบบที่แน่นอน และสามารถกำหนดระดับการให้บริการ (service level) ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนในภายหลังเพื่อกำหนด

ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบการบำรุงรักษา รวมถึงแสดงให้เห็นการลดลงของปริมาณการขาดพัสดุสารหล่อลื่นได้ดังตารางที่ 9 ทั้งนี้ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบใช้งานระบบเป็นระยะเวลา 2 เดือนในสถานประกอบการท่าเรือตัวอย่าง ซึ่งถึงแม้จะมีข้อจำกัดอยู่บ้างในด้านเวลาที่ทดสอบระบบ ก็พบว่าสามารถลดจำนวนการขาดพัสดุสารหล่อลื่นได้เกือบทั้งหมด

จากตารางที่ 9 ร้อยละผลต่างของปริมาณพัสดุที่ไม่เพียงพอ เปรียบเทียบก่อนและหลังการปรับปรุง สามารถคำนวณได้เป็น 88.99% และการเก็บข้อมูลค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบระบบ ได้ค่าใช้จ่ายประเมินที่ 522,525 บาท ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าใช้จ่ายที่ได้บันทึกไว้ก่อนการพัฒนาระบบ 588,378 บาท จะให้ค่าผลต่างเป็นการลดค่าใช้จ่ายลง 11.19%

ตารางที่ 8 ภาพรวมนโยบายการสั่งซื้อและวิธีควบคุมคลังพัสดุซ่อมบำรุงที่พัฒนาขึ้น

รายการ	กลุ่ม ABC	นโยบายการสั่งซื้อ	ระดับ บริการ	ระดับคงคลัง สูงสุด (S), Max	ระดับคง คลังต่ำสุด (Min)	รอบเวลา สั่งซื้อ(วัน)
ENGINE OIL	A	Fixed-Time Period Systems, (T, S)	80%	3,758	-	20
HYDRAULIC OIL (Agri Trans Plus)				1,763		
SPHEEROL (EPL2)				865		
TRANSMISSION OIL & HYDRAULIC OIL (ATF Dex II)				701		
HYDRAULIC OIL (Hyspin AWS 68)	B	Min - Max	80%	1,875	900	on Min level
TRANSMISTION OIL (CRB 30CF)				772	399	
DIFFERENTIAL OIL (Axle GL-5 140W)				515	285	
TRANSMITION OIL (ATF Dex III)	C	Lot for Lot	-	สั่งซื้อตามรอบเวลาของแผนการซ่อมบำรุงที่ได้ กำหนดไว้ และ เพิ่มปริมาณสำรอง 10% ของปริมาณสั่งซื้อ		
HYDRAULIC OIL (ALPHA SP 320)						
MOLY GREASE						
GREASE BEARING						
MANUAL 80W 90 (GL-4)						
SPHEEROL (EPL3)						

ตารางที่ 9 ตารางเปรียบเทียบปริมาณพัสดุก่อนและหลังปรับปรุง จากการทดลองใช้ระบบควบคุมที่พัฒนาขึ้นใหม่เป็นเวลา 2 เดือน (แสดงข้อมูลเพียงบางส่วนที่สามารถบันทึกได้ในช่วงทดลอง)

รายการพัสดุ	ปริมาณพัสดุที่ไม่เพียงพอ (ก่อนปรับปรุง) (ลิตร)	ปริมาณพัสดุที่ไม่เพียงพอ (หลังปรับปรุง) (ลิตร)	ผลต่าง (ลิตร)
HYDRAULIC OIL (Agri Trans Plus)	158	40	118
TRANSMISSION OIL & HYDRAULIC OIL (ATF Dex II)	120	-	120
HYDRAULIC OIL (Hyspin AWS 68)	160	30	130
TRANSMISSION OIL (CRB 30CF)	96	-	96
DIFFERENTIAL OIL (Axle GL-5 140W)	102	-	102

5. อภิปรายผล

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาระบบการควบคุมพัสดुकงคลังสำหรับงานบำรุงรักษา ซึ่งออกแบบให้อยู่ในรูปของลำดับกระบวนการเชิงรวม (Integrated Inventory Control Approach) ซึ่งเป็นการประยุกต์ใช้เทคนิคการบริหารสินค้าคงคลังแบบดั้งเดิม เข้าด้วยกันอย่างมีลำดับขั้นตอน ซึ่งประกอบด้วยเทคนิคการจัดแบ่งกลุ่มแบบเอบีซี ด้วยการใช้นโยบายการควบคุมพัสดुकงคลังแบบดั้ง คือ

ระบบรอบเวลาสั่งซื้อคงที่ ระบบจุดต่ำสุด – สูงสุดและระบบสั่งซื้อแต่พอดี

ผลการจากทดสอบกระบวนการที่ได้ออกแบบพบว่คลังพัสดุของงานบำรุงรักษาของบริษัทตัวอย่างมีแนวทางในการควบคุมที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพงานบำรุงรักษาได้ชัดเจน ลดปัญหาการขาดพัสดุได้ 88.99% และในด้านของค่าใช้จ่ายสามารถประเมินเป็นอัตราการลดต้นทุนของพัสดुकงคลังลง 11.19%

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้เป็นผลงานวิจัยจากโครงการฝึกงานแบบสหกิจศึกษา สาขาวิศวกรรมโลจิสติกส์ ซึ่งได้รับการสนับสนุนด้านการฝึกงาน สถานที่ ข้อมูล และคำแนะนำต่างๆ จากผู้บริหารและบุคลากรทุกท่านของท่าเรือแหลมฉบัง คณะผู้วิจัย และ สาขาวิศวกรรมโลจิสติกส์จึงขอแสดงความขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Apiprachayakul, *Inventroy Management*. Bangkok: Focus Media and publishing, 2003.
- [2] R. H. Ballou, *Business Logistics & Supply Chain Management – Planning ,Organizing, and Controlling the Supply Chain*. 5th edition, Pearson Prentice-Hall, Pearson International, 2004.
- [3] K. Suwantararungsri, *Improvement of Inventory Control in Sugar Cane Factory*. Master Degree of Engineering, Chulalongkorn University, 2003.
- [4] N. Puttipong and T. Wasusri, “Inventory Control in Woven Rubber Factory”, *KMUTT Research and Development Journal*. pp. 91-107, 2006.
- [5] R. S. Russell, B. W. Taylor, *Operations Management: Creating Value along the Supply Chain*. 7th Edition, Virginia Tech, Wiley, 2010.
- [6] S. Chartniyom, “ Demand Process and Forecasting,” in *INE 4 6 7 Logistics and Supply Chain Management*. Department of Industrial Engineering, Srinakharinwirot University, 2016.
- [7] P. Kittitulakanon, “Forecasting Method for The Requirement of Chemical fertilizer: Case study of Tabong Agricultural Cooperatives, Nakornsawan Province”, *J. Itech.*, Lampang Rajabhat University, Vol. 10(1), 2017.
- [8] Minitab 18 Support. (2019). Example of Decomposition. [Online] Available: <https://support.minitab.com>.
- [9] S. Chartniyom, “Inventory Management,” in *INE 467 Logistics and Supply Chain Management*. Department of Industrial Engineering, Srinakharinwirot University, 2016.
- [10] P. Lumnoi, *Development of Inventory Management: Case Study of Pharmacy Department, Nawamintharajini Hospitol*. Department of Logistics and Supply Chain Management, Burapa University, 2015.
- [11] M. Chumsungneun, *Improvement of Inventory Management for Spare Parts in Hard drive Industry*. Department of Industrial Engineering, Chulalongkorn University, 2008.
- [12] S. Zhu, W. V. Jaarsveld, and R. Dekker, “Spare parts inventory control based On maintenance planning”, *Ind. Eng. Inno. Sci.* Technische Universiteit Eindhoven, 2019.

การลดของเสียในกระบวนการฉีดพลาสติกของชิ้นส่วนโทรศัพท์

โดยการออกแบบการทดลอง

Reducing Defectives in Plastic Injection Process of Telephone Part

By Design of Experiment

สุรศักดิ์ ชูบโธสง* ระพี กาญจนะ

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

39 หมู่ 1 ถนนรังสิต-นครนายก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

Surasak Choobthaisong* Rapee Kanchana

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology

Thanyaburi 39 Moo1, Klong 6, Klong Luang Pathum Thani 12110

*Corresponding author Email: surasak_c@mail.rmutt.ac.th

(Received: February 21, 2020; Accepted: December 30, 2020)

บทคัดย่อ

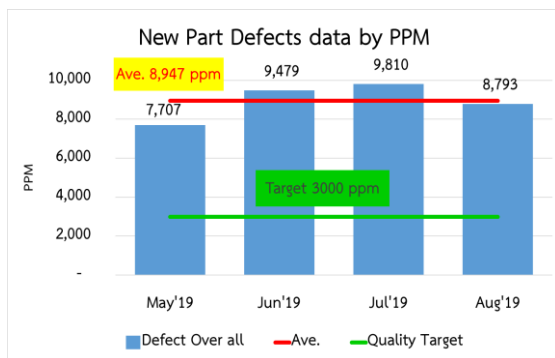
งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดสัดส่วนของเสียจากกระบวนการฉีดพลาสติก สำหรับกรณีการผลิตชิ้นงานใหม่ โดยการออกแบบการทดลอง และการประยุกต์ใช้เครื่องมือคุณภาพ จากข้อมูลในอดีตพบว่า มีสัดส่วนของเสียเฉลี่ยโดยรวมอยู่ที่ 8947 ppm เกินเป้าหมายที่บริษัทกรณีศึกษากำหนดไว้ที่ 3000 ppm งานวิจัยเริ่มจากการนำเครื่องมือคุณภาพมาใช้ในการค้นหาปัญหาในกระบวนการผลิต พบว่าปัญหาประกายเงิน เป็นปัญหาที่พบสูงสุดคิดเป็นร้อยละ 95.70 ของปัญหาทั้งหมด และจากการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาพบว่าสาเหตุหลักเกิดจากการตั้งค่าพารามิเตอร์จากกระบวนการฉีดพลาสติกไม่เหมาะสมอยู่ 8 ปัจจัย จากแผนการทดลองเบื้องต้น (Screening experiment) โดยการทดลองแบบ 2^{8-3} Fractional Factorial เพื่อคัดกรองปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อปัญหาประกายเงิน พบว่ามี 4 ปัจจัย ที่มีอิทธิพลหลักต่อปัญหาประกายเงินคือ Injection Pressure, Clamping force, Nozzle Temperature และ Injection Speed จากนั้นได้นำเทคนิคพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology) โดยใช้แผนการทดลองแบบส่วนผสมกลาง (Central Composite Design) มาวิเคราะห์ผลตัวแปรตอบสนอง เพื่อให้ได้ระดับค่าของปัจจัยที่เหมาะสม Response Optimization พบว่าระดับค่าของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อปัญหาประกายเงินที่เหมาะสมคือ Injection Pressure 97 Mpa, Clamping force เท่ากับ 240 Ton, Nozzle Temperature เท่ากับ 237 °C, และ Injection Speed 30 mm/sec ผลที่ได้จากการวิจัยการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ที่ระดับค่าของปัจจัยที่เหมาะสม พบว่าสัดส่วนของเสียสำหรับปัญหาประกายเงินของชิ้นงาน 1220402 ลดลงจากเดิม 33748 ppm มาอยู่ที่ 6778 ppm และหากพิจารณาจากสัดส่วนของเสียเฉลี่ยโดยรวมของชิ้นงานใหม่ทั้งหมด ลดลงจากเดิม 8947 ppm มาอยู่ที่ 2320 ppm เป็นไปตามเป้าหมายของบริษัทกรณีศึกษาที่กำหนดไว้คือสัดส่วนของเสียเฉลี่ยโดยรวมในการผลิตชิ้นงานใหม่ทั้งหมดต้องน้อยกว่า 3000 ppm

คำสำคัญ: การลดของเสีย การออกแบบการทดลอง กระบวนการฉีดพลาสติก

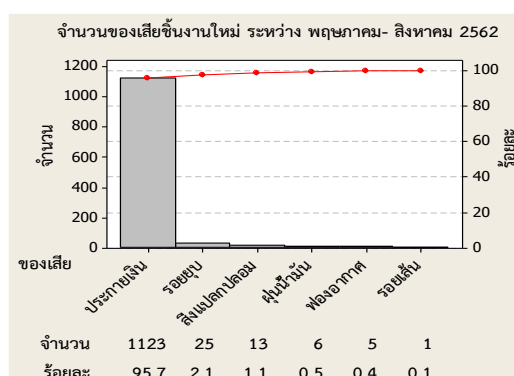
This research aimed to reduce the proportion of defect from plastic injection molding process for new part production by using Design of Experimental and applying Quality Control Tools. According to historical data, the proportion of defect was 8,947 ppm, exceeding the company target of 3,000 ppm. The research started with finding problems in the production process using QC Tools. It was found that the silver streak was the highest number of defects, 95.70 % of all defects. And the problem analysis, it was found that the main cause of the problem was the inappropriate parameter settings consisting of 8 factors in the plastic injection molding process. The design of experimental technique by 2^{8-3} Fractional Factorial was then applied in screening experiment to find out the main factors affecting the silver streaks. It was found that there were 4 factors including injection pressure, clamping force, nozzle temperature, and injection speed. The Response Surface Methodology technique by Central Composite Design was then applied for analyzing the response optimization. It was found that suitable parameters included the injection pressure of 97 Mpa, the clamping force of 240 tons, the nozzle temperature of 237 °C, and the injection speed at 30 mm/sec. The research result showed that the applied optimal parameters could reduce the silver streak defects of the part number 1220402 from 33,748 ppm to 6,778 ppm. Moreover, the overall average defect proportions of new part production decreased from 8,947 ppm to 2,320 ppm that were 74.06% of all defects. This achieved the company target which aimed to have less than 3,000 ppm defects.

1. บทนำ

พลาสติก ตั้งแต่ เดือนพฤษภาคม-เดือนสิงหาคม 2562 พบว่ามีสัดส่วนของเสียโดยรวมเฉลี่ยอยู่ที่ 8947 ppm และจากรูปที่ 2 พบว่าเป็นปัญหาประกายเงิน มากถึง 95.70% ของปัญหาทั้งหมด ซึ่งส่งผลกระทบต่อสัดส่วนของเสีย โดยรวมของการผลิตชิ้นงานใหม่ที่เกินเป้าหมาย และจาก ข้อมูลของการผลิตชิ้นงานใหม่ทั้งหมด จากตารางที่ 1 พบว่าชิ้นงานหมายเลข 1220402 พบปัญหาประกายเงิน มากถึง 33748 PPM ซึ่งเป็นปัญหาเกี่ยวกับคุณลักษณะ ภายนอก Appearance ของชิ้นงาน จากรูปที่ 3 แสดง ลักษณะของปัญหาประกายเงิน ซึ่งในบริเวณผิวด้านนอก ของชิ้นงาน ตามมาตรฐานการตรวจสอบแล้วจะต้องไม่พบ ปัญหาดังกล่าว



รูปที่ 1 สัดส่วนของเสียโดยรวมของชิ้นงานผลิตใหม่
ข้อมูล ในช่วงเดือนพฤษภาคม-สิงหาคม 2562



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างปัญหาที่เกิดขึ้นและจำนวน
ของเสีย ในช่วงเดือนพฤษภาคม-สิงหาคม 2562

ตารางที่ 1 ชิ้นงานที่พบปัญหาประกายเงิน ในระหว่าง
เดือนพฤษภาคม-เดือนสิงหาคม 2562

หมายเลข ชิ้นงาน	จำนวนการผลิตชิ้นงานใหม่ เดือนพฤษภาคม-สิงหาคม 2562	พบปัญหาประกายเงิน		
		จำนวน(ชิ้น)	PPM	%
1220368	8,666	5	577	0.06
1220370	10,433	12	1,150	0.12
1220374	15,684	4	255	0.26
1220377	802	2	2,494	0.25
1220378	9,202	1	109	0.01
1220384	15,049	7	465	0.05
1220402	32,357	1,092	33,748	3.37



รูปที่ 3 ลักษณะปัญหาประกายเงินบนผิวของชิ้นงาน

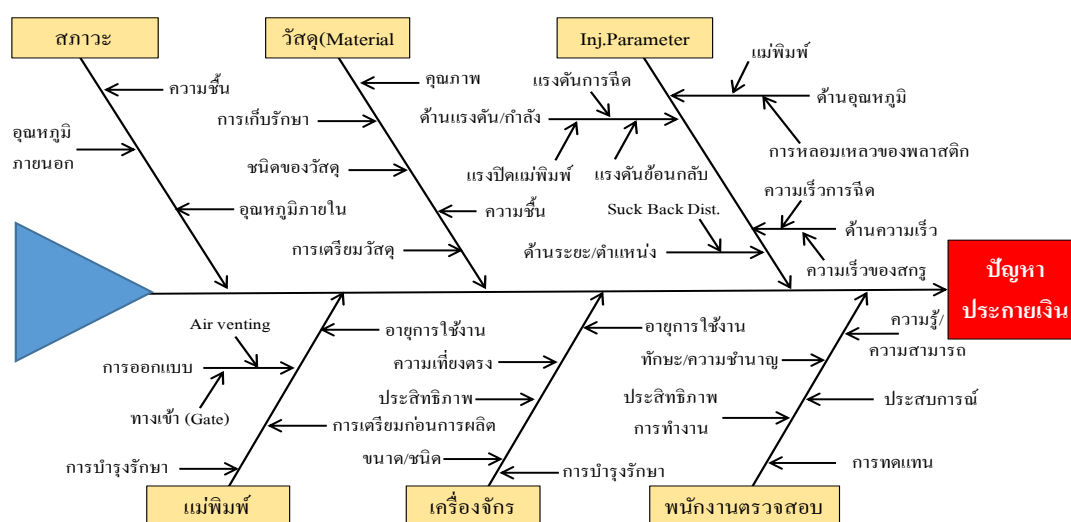
ด้วยเหตุนี้จึงเลือกชิ้นงานหมายเลข 1220402 มา
ทำการการศึกษาเพื่อแก้ปัญหาประกายเงิน โดยมีเป้าหมาย
เพื่อที่จะลดสัดส่วนของเสียเฉลี่ยโดยรวมลง ให้เป็นไปตาม
เป้าหมายคุณภาพของบริษัทกรณีศึกษา โดยเริ่มจากการ
จัดตั้งทีมงานเพื่อระดมความคิด (Brainstorming) จาก
หน่วยงานที่เกี่ยวข้องทั้งหมด โดยนำเครื่องมือคุณภาพมา
ประยุกต์ใช้ เพื่อต้องการคัดเลือกปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง
เบื้องต้น โดยผลที่ได้จากระดมความคิด ทำให้สามารถ
กำหนดความสำคัญของปัญหาที่จะต้องทำการแก้ไข
ก่อนหลังได้ และสามารถวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา
ประกายเงินโดยใช้แผนภูมิแก๊งปลา ดังรูปที่ 4 ทำให้ทราบ
ถึงสาเหตุทั้งหมดที่อาจส่งผลต่อปัญหาประกายเงิน.

จากปัจจัยที่ได้จากแผนผังแก๊งปลาหลายปัจจัย จึง
ได้นำหลักการของตารางความสัมพันธ์ของเหตุและผล
(Cause & Effect Matrix) มาวิเคราะห์ถึงระดับ
ความสำคัญของแต่ละปัจจัย ทำให้ทราบถึงปัจจัยที่มี
ความสำคัญต่อปัญหาประกายเงิน จากตารางที่ 2 พบว่า
ปัจจัยหลักที่มีผลต่อปัญหาประกายเงิน คือการปรับตั้ง
ค่าพารามิเตอร์ คิดเป็น 93.33% และได้้นำปัจจัยดังกล่าว
มาทำการวิเคราะห์เพื่อคัดเลือกปัจจัยนำเข้าที่จะใช้ในการ
ทดลองเบื้องต้น โดยใช้ข้อมูล 2 ส่วนในการพิจารณา คือ
ข้อมูลการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาจากเทคนิคการระดม
ความคิด และข้อมูลที่สำคัญในการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์
จากการศึกษาทฤษฎี โดยคัดเลือกเฉพาะปัจจัยที่สามารถ
ควบคุมได้ พบว่ามี 8 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อปัญหาประกาย
เงิน ดังนี้ อุณหภูมิแม่พิมพ์ อุณหภูมิหัวฉีด ระยะชักสกรู
ความเร็วรอบสกรู ความดันด้านการถอยสกรู ความเร็วฉีด
ความดันฉีด และแรงปิดแม่พิมพ์ สามารถแสดงได้ดัง
ตารางที่ 3 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ อุดลย์ และคณะ
[1] เนื่องจากปัจจัยที่ได้จากการระดมความคิดมีจำนวน
มาก จึงพิจารณาใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง
(DOE) เพื่อหาปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อปัญหาประกายเงิน
โดยเลือกใช้ 2^{8-3}_{IV} Fractional Factorial design เพื่อการ
คัดกรองปัจจัย เนื่องจากผลที่ได้จากการทดลองดังกล่าวมี
ข้อมูลเพียงพอที่จะสามารถวิเคราะห์ถึงผลกระทบหลัก
(Main Effect) และ ผลกระทบของปัจจัยร่วม

(Interaction Effect) ได้ ซึ่งหากผลการวิเคราะห์พบว่า ข้อมูลในการทดลองไม่เพียงพอก็สามารถทำการทดลองเพิ่มเติมต่อจากการทดลองเดิมได้ ซึ่งข้อดีของการทดลองแบบ Fractional Factorial design สามารถช่วยลดเวลา ค่าใช้จ่าย และจำนวนในการทดลองได้ [2]

หลังจากได้ปัจจัยที่มีนัยสำคัญจากการทดลองเบื้องต้นแล้ว นำปัจจัยดังกล่าวมาทำการทดลองเพื่อยืนยันผลการทดลองเพื่อความละเอียดของผลที่ได้ และเพื่อตรวจสอบลักษณะของส่วนโค้ง (Curvature) ซึ่งเป็นลักษณะ โพลีโนเมียลดีกรี 2 (2^{nd} Order model) โดยการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k ร่วมกับการทดลองจุดศูนย์กลาง (2^k Factorial design with Center point) พบว่าผลที่ได้เป็นแบบ 2^{nd} Order model ในการหาระดับ

ค่าของปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดจึงพิจารณาใช้เทคนิคพื้นผิวผลตอบ (RSM) โดยใช้แผนการทดลองแบบส่วนผสมกลาง (CCD) เพื่อวิเคราะห์ผลตัวแปรตอบสนอง เพื่อให้ได้ระดับค่าของปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด (Response Optimization) ในการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ ของกระบวนการฉีดพลาสติก ในการแก้ไขปัญหาประกายเงิน โดยใช้โปรแกรม Minitab ช่วยในการวิเคราะห์และประมวลผลทางสถิติ จากวิธีการทั้งหมดที่กล่าวมานั้น ประโยชน์คาดว่าจะได้รับการวิจัย คือทำให้ทราบถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อปัญหาประกายเงิน ระดับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม และสามารถลดสัดส่วนของเสียให้เป็นไปตามเป้าหมายคุณภาพของบริษัทกรณีศึกษา และสามารถใช้เป็นแนวทางในการแก้ไขปัญหาอื่นๆ ต่อไป



รูปที่ 4 วิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาประกายเงิน

ตารางที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเหตุและผล

ลำดับ	กลุ่มของปัจจัย	ทีมงาน วิศวกร ผู้เชี่ยวชาญ โดยเทคนิคการระดมสมอง (Brainstorming)										รวม 90 คะแนน	%
		EN_MO	EN_PD	EN_QC	DS	SV_PD	MAT	MOL	INJ	MG_EN	MG_PD		
1	การปรับตั้งค่าพารามิเตอร์	7	9	9	9	9	7	7	9	9	9	84	93.33
2	พนักงานตรวจสอบ	7	8	9	7	7	7	7	9	9	7	77	85.56
3	แม่พิมพ์ฉีดพลาสติก	7	7	7	7	5	5	7	5	5	5	60	66.67
4	วัตถุดิบ (พลาสติก)	5	7	5	5	7	5	5	5	5	5	54	60.00
5	เครื่องจักร												
	-เครื่องอบเม็ดพลาสติก	3	5	5	5	5	7	3	5	5	5	48	53.33
	-เครื่องฉีดพลาสติก	3	5	5	3	3	3	3	3	3	5	36	40.00
6	สภาวะแวดล้อม	1	3	3	1	3	3	1	3	1	3	22	24.44

หลักเกณฑ์การให้คะแนน: 9 คะแนนส่งผลโดยตรงต่อปัญหา 100% 7คะแนนส่งผลโดยตรงต่อปัญหา 80% 5คะแนนส่งผลโดยตรงต่อปัญหา 60% 3 คะแนนส่งผลโดยตรงต่อปัญหา 40% และ 1 คะแนนส่งผลโดยตรงต่อปัญหา <20%

ตารางที่ 3 การคัดเลือกปัจจัยนำเข้าสำหรับการออกแบบแผนการทดลองเบื้องต้น

ลำดับ	ปัจจัย / ค่าพารามิเตอร์	แหล่งที่มาของปัจจัย		
		ศึกษาจากทฤษฎี	จากการระดมความคิด	การนำไปวิเคราะห์การทดลองเบื้องต้น
1	อุณหภูมิกระบอกฉีด (Barrel Temp)	มี	ไม่มี	ไม่เลือก
2	อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold Temp)	มี	มี	เลือก
3	อุณหภูมิหัวฉีด (Nozzle Temperature)	มี	มี	เลือก
4	ระยะชักสกรู (Metering Stroke)	มี	มี	เลือก
5	เวลาที่พลาสติกเหลวแช่ในกระบอกฉีด (Resident Time)	มี	ไม่มี	ไม่เลือก
6	ระยะสำรอง (Cushion)	มี	ไม่มี	ไม่เลือก
7	ความเร็วรอบสกรู (rpm.)	มี	มี	เลือก
8	ความดันต้านการถอยสกรู (Back Pressure)	มี	มี	เลือก
9	ระยะเปลี่ยนจังหวะฉีดเป็นฉีดย้ำ (Switching Over)	มี	ไม่มี	ไม่เลือก
10	ความเร็วฉีด (Injection Speed)	มี	มี	เลือก
11	ความดันฉีด (Injection Pressure)	มี	มี	เลือก
12	ความดันฉีดย้ำ (Packing Pressure)	มี	ไม่มี	ไม่เลือก
13	เวลาในการฉีดย้ำ (Packing Time)	มี	ไม่มี	ไม่เลือก
14	แรงปิดแม่พิมพ์ (Clamping Force)	มี	มี	เลือก
15	เวลาในการหล่อเย็น (cooling Time)	มี	ไม่มี	ไม่เลือก

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลาสติก (Plastic) พลาสติกที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้ คือพลาสติกเอบีเอส (ABS) เป็นเทอร์โมพลาสติกซึ่งมีคุณสมบัติเหนียว ทนการกระแทก มีความแข็งแรงสูง ทนทานต่อสารเคมี มีอุณหภูมิการใช้งานอยู่ที่ 60-80°C นิยมใช้เป็นส่วนประกอบของใช้หลากหลายชนิดเช่น ชิ้นส่วนของเครื่องใช้ไฟฟ้า ชิ้นส่วนรถยนต์ เครื่องใช้สำนักงาน เป็นต้น [3] นอกจากคุณสมบัติของพลาสติก ABS ที่กล่าวมาแล้ว กระบวนการเตรียมเม็ดพลาสติก ABS ก่อนนำไปใช้ในกระบวนการฉีดพลาสติก ก็มีความสำคัญ ดังนั้นทางบริษัทเม็ดพลาสติกมีข้อเสนอแนะดังนี้ ควรทำการอบ (Drying) เม็ดพลาสติกก่อนนำไปใช้งานเพื่อไล่ความชื้นออกจากเม็ดพลาสติก เพื่อป้องกันปัญหาคุณภาพที่จะเกิดขึ้นกับชิ้นงานเช่น ปัญหารั่วรอยประกายเงิน ทางบริษัทเม็ดพลาสติก จึงแนะนำการอบพลาสติก ABS ที่

อุณหภูมิ 80 ~ 90 °C /3-5 ชั่วโมงก่อนนำไปใช้งาน และคำแนะนำสำหรับการตั้งค่าพารามิเตอร์สำหรับงานฉีดพลาสติก เช่น อุณหภูมิกระบอกฉีด (Barrel Temperature) ตามตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การตั้งค่าอุณหภูมิที่กระบอกฉีดสำหรับพลาสติก ABSเกรด GP [4]

N	Zone4	Zone3	Zone2	Zone1	H
230-240 °C	230-240 °C	230-240 °C	220-230 °C	220-230 °C	210-220 °C

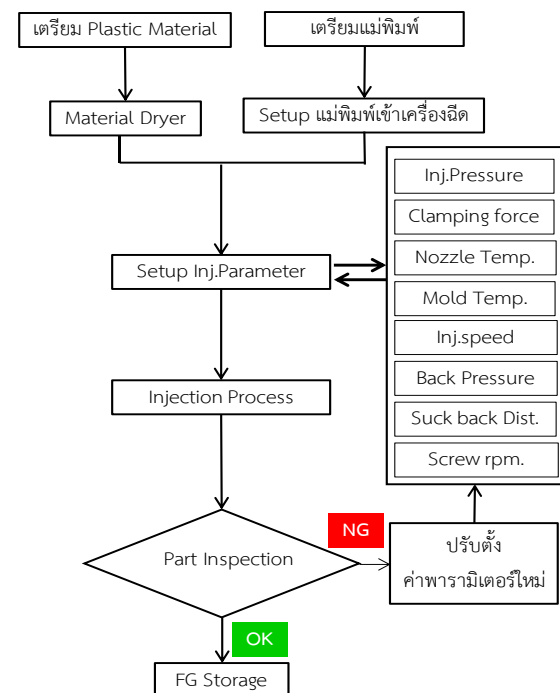
ความเร็วในการฉีดและแรงดันในการฉีด ความเร็วในการฉีดจะขึ้นอยู่กับรูปร่างของผลิตภัณฑ์ อุณหภูมิแม่พิมพ์ ช่วงแรงดันการฉีดทั่วไปคือ 70 ~ 140MPa [4] อุณหภูมิของแม่พิมพ์มีผลต่อคุณภาพพื้นผิวและระดับของความเค้นตกค้างในผลิตภัณฑ์ขึ้นรูป เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ที่มีสภาพ

ผิวมีผิวงานที่ดีเยี่ยมและมีความเค้นตึงค้ำน้อยลงควรควบคุมอุณหภูมิของแม่พิมพ์ให้สูงที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ตั้งแต่ $40^{\circ}\text{C} \sim 80^{\circ}\text{C}$ อย่างไรก็ตามอุณหภูมิของแม่พิมพ์ที่สูงขึ้นอาจทำให้รอบการทำงานนานขึ้นและเกิดปัญหาการบดงอ [4] การออกแบบแม่พิมพ์เช่น ทางเข้าน้ำพลาสติก (Gate) และขนาดของทางวิ่งของน้ำพลาสติก (Runner) จะต้องทำการทดลองในแต่ละรูปร่างของชิ้นงาน ก่อนการผลิตจริงเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสม สำหรับแรงดันในการฉีด ควรควบคุมความดันในการฉีดให้เต็มแม่พิมพ์อย่างสม่ำเสมอและมีลักษณะที่ยอมรับได้สำหรับคุณลักษณะของชิ้นงาน (Appearance) ตัวแปรหลายตัวมีผลต่อแรงดันการฉีดเช่นอุณหภูมิการฉีด รูปร่างของผลิตภัณฑ์หัวฉีด และขนาดเกท (Gate) ขนาดทางวิ่งของน้ำพลาสติก (Runner) เป็นต้น

2.2 การฉีดขึ้นรูป (Injection Molding) เป็นกรรมวิธีการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน เพราะสามารถผลิตชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ดี ซึ่งมีองค์ประกอบที่สำคัญอยู่ 6 ส่วน (6M) คือ Material (วัตถุดิบเม็ดพลาสติก) Mold (แม่พิมพ์) Machine (เครื่องฉีด) Method (พารามิเตอร์) Man (ช่างฉีด) Management (การจัดการ) [5] จากรูปที่ 5 แสดงถึงแผนภูมิการไหลของกระบวนการฉีดพลาสติก เริ่มจากการเตรียมเม็ดพลาสติก โดยทำการอบเม็ดพลาสติกก่อนป้อนเข้าที่เครื่องฉีด เตรียมแม่พิมพ์สำหรับฉีด เตรียมค่าพารามิเตอร์สำหรับเครื่องฉีด หลังจากเตรียมส่วนต่างๆ แล้ว กระบวนการฉีดโดยเครื่องฉีดพลาสติกจะทำหน้าที่หลอมละลายเม็ดพลาสติกและฉีดพลาสติกเหลวเข้าสู่แม่พิมพ์ คงความดันและอัดพลาสติกเหลวเข้าเต็มแม่พิมพ์ และชิ้นงานจะถูกหล่อเย็นด้วยขณะฉีด เพื่อให้ได้ชิ้นงานรูปร่างตามแม่พิมพ์แล้วจึงเปิดแม่พิมพ์เพื่อทำการปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ ทำการตรวจสอบชิ้นงาน แยกของดี ของเสียและลงบันทึก เก็บงานดีเข้าที่จัดเก็บ เพื่อเตรียมส่งในกระบวนการถัดไป

2.3 การระดมความคิด (Brainstorming) เป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในระดมความคิดเพื่อแก้ไขปัญหา จากหลาย ๆ มุมมอง หลากหลายความคิดของสมาชิกที่มาร่วมกิจกรรม

ระดมสมอง ดังนั้นการระดมความคิด (Brainstorm) โดยสรุปจึงหมายถึง การระดมความคิดจากทุก ๆ มุมมอง โดยไม่มีการตัดสินถูกผิด ของสมาชิกในกลุ่ม เพื่อหาทางเลือกในการตัดสินใจ ความคิดใหม่ๆ และใช้ในการการวางแผนในการแก้ไขปัญหาอื่นๆ [6]



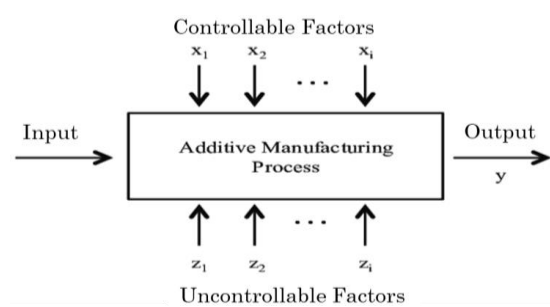
รูปที่ 5 แผนภูมิการไหลของกระบวนการฉีดพลาสติก

2.4 เครื่องมือคุณภาพ (7QC Tools) ในงานวิจัยนี้ได้ นำเครื่องมือคุณภาพมาใช้นี้ ใบบันทึก (Check sheet) ใช้สำหรับการลงบันทึกผลการตรวจสอบ แผนภูมิพาเรโต (Pareto diagram) แสดงตามรูปที่ 2 ใช้ในการจัดลำดับความสำคัญของปัญหาและวิเคราะห์ข้อมูลสะสม แผนภูมิแกงปลาหรือแผนผังสาเหตุและผลเป็นแผนผังที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปัญหา (Problem) กับสาเหตุทั้งหมดที่เป็นไปได้ที่อาจก่อให้เกิดปัญหานั้น (Possible Cause) แสดงตามรูปที่ 4 กราฟ (Graph) ใช้แสดงการเปรียบเทียบกันของข้อมูลก่อนและหลังการปรับปรุง [6]

2.5 ตารางความสัมพันธ์ระหว่างเหตุและผล (Cause and Effect Matrix) เป็นตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตอบสนองที่ทำการศึกษา กับปัจจัยที่นำเข้าที่สำคัญ ที่ได้จากการระดมความคิด โดยใช้แผนภูมิแกงปลา วิเคราะห์ถึงระดับความสำคัญของปัจจัยที่มี

ผลกระทบต่อดัชนีแปรตอบสนองพิจารณาโดยใช้ความรู้ความชำนาญและประสบการณ์ ในการปฏิบัติงานของทีมงานในการแก้ปัญหาจากการระดมความคิด [6]

2.6 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) หมายถึง การทดลองเพียงครั้งเดียวหรือทำการทดลองอย่างต่อเนื่อง สามารถทำได้โดยการเปลี่ยนค่าตัวแปรนำเข้า (Input Variable) ในกระบวนการที่สนใจศึกษา ซึ่งทำให้สามารถสังเกตและชี้ถึงสาเหตุต่าง ๆ ที่อาจก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์ที่ได้ (Outputs or Response) จากกระบวนการนั้น ๆ ตัวแปรนำเข้าจะถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่ควบคุมได้ เรียกว่าตัวแปรหรือปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Variables or Factors) หรือตัวแปรหรือปัจจัยที่สามารถออกแบบได้ (Design Variables or Factors) และกลุ่มที่ไม่สามารถควบคุมได้ ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ

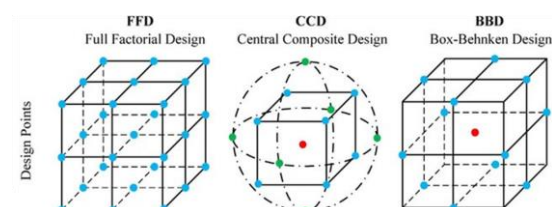
การออกแบบ Fraction Factorial Experiment คือ การทดลองเพื่อทำการลดจำนวนการทดลองลงจากการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full Factorial Design) แต่เป็นการทดลองซึ่งใช้ในการพิจารณาปัจจัยต่างที่มีอยู่ในระบบทั้งหมดว่าปัจจัยใดให้ผลกระทบต่อผลตอบสนองที่มากที่สุด กล่าวคือเป็นการทดลองในขั้นตอนแรกของการพัฒนา ซึ่งการใช้งานโดยส่วนใหญ่ของการออกแบบการทดลองชนิดพิเศษส่วนนี้เรียกว่า การทดลองเพื่อวิเคราะห์เบื้องต้น (Screening Experiment) เพื่อใช้ในการคัดเลือกปัจจัยออกบางส่วน ให้เหลือเฉพาะปัจจัยที่มีนัยสำคัญที่มีผลต่อดัชนีแปรตอบสนอง [7]

Response Surface Methodology (RSM) เป็นเทคนิคการรวบรวมเอาทั้งทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหาซึ่งแสดงผลตอบสนองต่อผลจากตัวแปรต่าง ๆ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบ Responds Optimization [8]

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \varepsilon \quad (1)$$

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (2)$$

การออกแบบการทดลองแบบ Central Composite Design (CCD) เป็นการทดลองที่มีความเหมาะสมสำหรับใช้ในการศึกษา หรือสร้างตัวแบบในลักษณะของ โพลีโนเมียลดีกรี 2 (Second-order or Quadratic Model) การทดลองลักษณะนี้พบว่ามีความยืดหยุ่นในการใช้งานและมีประสิทธิภาพมากที่สุด แสดงจุดทำการทดลองตามรูปที่ 7 เมื่อเปรียบเทียบกับแผนการทดลองอื่นที่ใช้ในการศึกษาตัวแบบโพลีโนเมียลดีกรี 2 [8]



รูปที่ 7 ตัวอย่างการออกแบบจุดการทดลอง CCD

2.7 ทบทวนวรรณกรรม

จากการศึกษาและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องพบว่า มีการนำเทคนิคการออกแบบการทดลอง และเทคนิคของพื้นที่ผิวผลตอบโดยวิธีการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง มาใช้ในการแก้ไขปัญหาในกระบวนการฉีดพลาสติกและเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดตามลำดับ ดังนี้ อุดุลย์ [9] ทำการศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเสียรูปในการจำลองกระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติก เอบีเอส โดยการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง แบบ 2^{k-p} Fractional Factorial

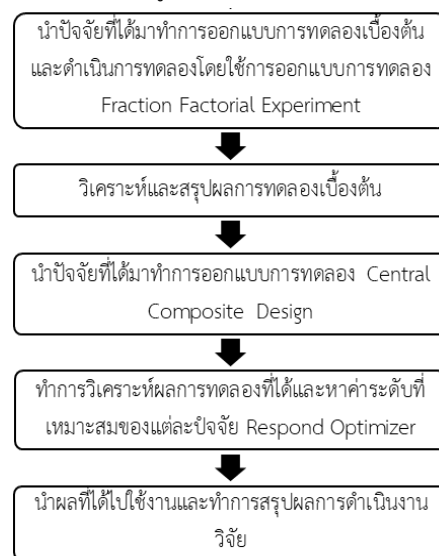
Design สำหรับการออกแบบการทดลองเบื้องต้น พบว่าสามารถลดปัจจัยทั้งหมดจาก 8 ปัจจัย เหลือ 4 ปัจจัยที่มีอิทธิพลคือ อัตราการฉีด เวลาการฉีดช้า อุณหภูมิหลอมเหลวพลาสติก และเวลาหล่อเย็น จากนั้นนำทั้ง 4 ปัจจัยมาวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบ (RSM) เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม โดยการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง (CCD) โดยได้ค่าอัตราการฉีดร้อยละ 58 เวลาการฉีดช้า 6 วินาที อุณหภูมิหลอมเหลวพลาสติก 221 องศาเซลเซียส และเวลาหล่อเย็น 55 วินาที โดยได้ค่าการเสียรูปต่ำที่สุดเท่ากับ 3.97 มิลลิเมตร นำค่าที่ได้ไปทำการผลิตจริงพบว่าสัดส่วนของเสียจากการเสียรูปเท่ากับร้อยละ 3.30 ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานของบริษัท กรณีศึกษาที่ยอมรับสัดส่วนของเสียที่ร้อยละ 5 ซึ่งแสดงว่าจากผลที่ได้สามารถนำไปเป็นแนวทางแก้ปัญหา ลดสัดส่วนของเสียในกระบวนการฉีดพลาสติกได้จริง พระพงษ์ และวิภู [10] ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการหดตัวและหาจุดเหมาะสมของสภาวะปัจจัยที่ทำให้ชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D955 เกิดการหดตัวน้อยที่สุดของชิ้นงานฉีดขึ้นรูปพลาสติก ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบสองระดับ (2^k Factorial Design) ซึ่งปัจจัยที่ใช้ศึกษามีทั้งหมด 6 ปัจจัย คือ อุณหภูมิพลาสติก, ความเร็วฉีด, ความดันฉีด, ความดันฉีดช้า, เวลาในการฉีดช้า และเวลาในการเย็นตัว พบว่าปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าการหดตัวของชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญ 5 ปัจจัย คือ อุณหภูมิพลาสติก, ความเร็วฉีด, ความดันฉีด, ความดันฉีดช้า, และเวลาในการฉีดช้า จากนั้นนำทั้ง 5 ปัจจัยมาวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบ (RSM) เพื่อหาค่าการหดตัวที่เหมาะสม โดยการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง (CCD) และผลการวิจัยพบว่าที่สภาวะปัจจัยที่เหมาะสมทำให้ได้ค่าการหดตัวของชิ้นงาน เท่ากับ 1.95 มิลลิเมตร (1.54 เปอร์เซ็นต์ของความยาวชิ้นงาน) กระบวนการผลิตและต้องกำจัดรอยเชื่อมบนชิ้นส่วนพื้นผิวให้หมด

Krit, Wiroj and Thiradet [11] ได้ทำการศึกษาค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการฉีดพลาสติกที่มีผลต่อความมั่นคงของชิ้นส่วนพลาสติก ABS โดยวิธีการ

ออกแบบการทดลองโดยใช้เทคนิคของทากูชิ เป็นการทดลองเบื้องต้นเพื่อค้นหาปัจจัยที่มีผลต่อความมั่นคงของชิ้นงาน จาก 8 ปัจจัย เหลือ 3 ปัจจัยที่มีนัยสำคัญ และใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบ (RSM) โดยเทคนิคการออกแบบการทดลองส่วนผสมกลาง (CCD) เพื่อหาระดับค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย พบว่าอุณหภูมิของแม่พิมพ์ Cavity ที่ 70 °C อุณหภูมิการฉีดที่ 240 °C และความเร็วในการฉีด 120 มม. / วินาที ในระดับความเชื่อมั่นที่ 95% เป็นระดับของปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อการเพิ่มประสิทธิภาพ ความเงาบนชิ้นส่วนพลาสติกที่เหมาะสมที่สุด

3.วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะลดสัดส่วนของเสียจากกระบวนการฉีดพลาสติก โดยการหาค่าระดับของปัจจัยงานฉีดพลาสติกที่เหมาะสมในการผลิต โดยใช้การออกแบบการทดลอง ซึ่งสามารถแสดงลำดับขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยได้ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 แผนผังลำดับขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

จากบทนำ เราทราบถึงปัญหาและชิ้นงานที่จะต้องทำการปรับปรุงเพื่อลดสัดส่วนของเสียเฉลี่ยโดยรวม ตามรูปที่ 1 รูปที่2 รูปที่3 และตารางที่ 1 ตามลำดับ คือปัญหาประกายเงิน ชิ้นงานหมายเลข 1220402 และผลที่ได้จากการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาประกายเงินโดยแผนผังก้างปลา ตามรูปที่ 4 และทราบถึงระดับความสำคัญของ

แต่ละปัจจัยตามตารางที่ 2 ซึ่งพบว่าเปอร์เซ็นต์ของปัจจัยที่อาจมีผลต่อปัญหาประกายเงินสูงที่สุดคือปัจจัยการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ และจากการคัดเลือกปัจจัยของค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง จากตารางที่ 3 พบว่ามีทั้งหมด 8 ปัจจัยที่เกี่ยวข้อง สำหรับการกำหนดค่าของระดับของปัจจัย ที่ใช้สำหรับการทดลองเบื้องต้น จากตารางที่ 5 พิจารณาจาก ความสอดคล้องกับคุณสมบัติต่างของวัตถุดิบ เครื่องจักร รวมไปถึงลักษณะของชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง โดยอาศัยเทคนิคการระดมความคิดจากทีมงาน โดยนำปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ได้ไปทำการทดลองแบบ 2^{8-3} Fractional Factorial design โดยกำหนดค่าผลตอบสนองในการทดลอง (Y) คือ จำนวนของเสียจากปัญหาประกายเงินของชิ้นงาน หมายเลข 1220402 ทำการทดลองฉีดยิงตามค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดตามแผนการทดลอง

ตารางที่ 5 ปัจจัยและระดับของปัจจัย นำเข้าสำหรับการทดลองแบบ 2^{8-3} Fraction Factorial Experiment

Factors (Symbol)	ระดับของปัจจัย		หน่วย
	Low	High	
Screw rpm. (A)	25	35	rpm
Inj. Pressure (B)	90	110	Mpa
Clamping force (C)	230	280	Ton
Nozzle Temp. (D)	230	270	°C
Mold Temp. (E)	50	70	°C
Inj. Speed (F)	30	50	mm/Sec
Back Pressure (G)	6	10	Mpa
Suck back Dist. (H)	2	3	mm.

4. ผลการทดลอง

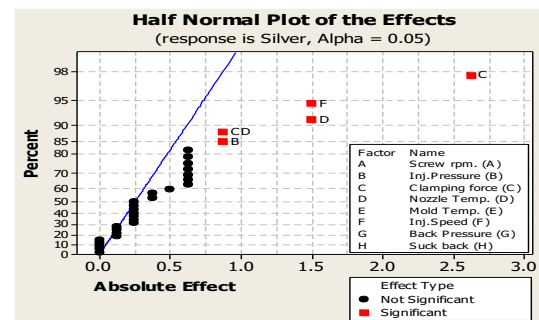
4.1 การทดลองเบื้องต้น (Screening Experiment)

จากข้อมูลตารางที่ 5 ได้ทำการทดลองแบบ 2^{8-3}_{IV} Fractional Factorial design 1 Replicate 32 Run ใช้ตัวอย่างในการทดลองจำนวน 500 ชิ้น ในแต่ละการทดลอง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ($\alpha=0.05$) ทำการประมวลผล โดยโปรแกรม Minitab ได้ผลตามรูปที่ 9 และทำการวิเคราะห์ผลจากตาราง ANOVA พบว่าไม่สามารถสรุปผลได้เนื่องจากผลที่ได้ไม่แสดงค่า P-value

จึงพิจารณาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อปัญหาประกายเงิน จาก Half Normal Plot ตามรูปที่ 10 พบว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่า Y (ปัญหาประกายเงิน) มีทั้งหมด 5 ปัจจัย ดังนี้ Inj. Pressure (B) Clamping force (C) Nozzle Temp. (D) Inj. Speed (F) และ Clamping force * Nozzle Temp. (C*D)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	8	104.625	104.625	13.0781	*	*
2-Way Interactions	20	25.750	25.750	1.2875	*	*
3-Way Interactions	3	3.125	3.125	1.0417	*	*
Residual Error	0	*	*	*		
Total	31	133.500				

รูปที่ 9 ผลการวิเคราะห์ ANOVA



รูปที่ 10 Half Normal plot of the Effect

Factors: 8	Base Design: 8, 32	Resolution: IV
Runs: 32	Replicates: 1	Fraction: 1/8
Blocks: 1	Center pts (total): 0	
Design Generators: F = ABC, G = ABD, H = BCDE		
Alias Structure (up to order 4)		
I + ABCF + ABDG + CDFG		
A + BCF + BDG + CEGH + DEFH		
B + ACF + ADG + CDEH + EFGH		
C + ABF + DFG + AEGH + BDEH		
D + ABG + CFG + AEFH + BCEH		
E + ACGH + ADFH + BCDH + BFGH		
F + ABC + CDG + ADEH + BEGH		
BH + CDE + EFG + ACFH + ADGH		
CD + FG + BEH + ABCG + ABDF		

รูปที่ 11 ผลการวิเคราะห์ ที่ได้จากการทดลอง 2^{8-3}_{IV}

Fraction Factorial

จากผลการทดลอง ได้ทำการวิเคราะห์ จากเงื่อนไขของการทดลองแบบ 2^{8-3}_{IV} Fraction Factorial เมื่อพิจารณาจากอิทธิพลของปัจจัยร่วม (Interaction effect) พบว่าจากแผนการทดลองนี้เป็นรูปแบบ Resolution 4

ซึ่งหมายความว่า จะมีอิทธิพลของปัจจัยร่วมน้อยมาก โดยอิทธิพลของปัจจัยร่วมที่สามารถตรวจพบได้ จะเป็นผลของอิทธิพลร่วมที่มีโครงสร้างซ้ำซ้อน (Alias Structure) แบบ 2 ปัจจัยร่วมกับอีกสองปัจจัย โดยผลที่ได้จากการทดลองประมวลผลโดยโปรแกรม Minitab ตามรูปที่ 11

หลังจากพิจารณา Aliases แล้วสรุปได้ว่าปัจจัยที่มีผลต่อ Y (ปัญหาประกายเงิน) อย่างมีนัยสำคัญคือ ปัจจัย B C D F ที่ระดับนัยสำคัญ 95 เปอร์เซนต์ ($\alpha=0.05$) จึงนำปัจจัย ดังกล่าว ไปทำการทดลองซ้ำอีกครั้งโดยการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^4 รวมกับการทดลองที่จุด Center point เพื่อเป็นการยืนยันผลการทดลอง และเพื่อตรวจสอบ และยืนยันว่ากระบวนการมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นตรง (Linear) หรือเชิงเส้นโค้ง (Curvature) โดยเพิ่มจุดกึ่งกลาง (Center point) อีก 1 ระดับ (Level) เพื่อใช้พิจารณาในการทดลองที่จะแยกต่อไป ปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองตามตารางที่ 6 ทำการทดลองจำนวน 3 Replicate ในแต่ละการทดลองใช้ตัวอย่างในการทดลองจำนวน 500 ชิ้น ในแต่ละการทดลอง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ($\alpha=0.05$) ผลที่ได้ตามรูปที่ 12 ประมวลผลโดย โปรแกรม Minitab

ตารางที่ 6 ปัจจัยและระดับของปัจจัย นำเข้าสำหรับการทดลองแบบ 2^4 Factorial design with Center point

ปัจจัยนำเข้า/Factor	สัญลักษณ์	ระดับของปัจจัย		หน่วย
		ต่ำ	สูง	
แรงดันฉีด (Inj.Pressure)	B	90	110	Mpa.
ความเร็วฉีด (Inj.Speed)	F	30	50	mm/Sec.
แรงปิดแม่พิมพ์ (Clamping force)	C	230	280	Ton
อุณหภูมิหัวฉีด (Nozzle tep.)	D	230	270	°C

ผลการวิเคราะห์การทดลอง จากรูปที่ 12 วิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R^2 (adj) ของการทดลองพบว่าค่า (Y) ปัญหาประกายเงินมีการเปลี่ยนแปลงอันมีผลมาจากปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่า Y ข้างต้น เท่ากับ ร้อยละ 86.52 แสดงว่าข้อมูลที่เก็บมาจากการทดลองใน 100 หน่วย จะมีความผันแปรที่เกิดจากปัจจัยที่ทำการทดลองถึง 86.52 หน่วย ในขณะที่หน่วยที่เหลือไม่สามารถอธิบาย

ได้ว่ามีความผันแปรเกิดขึ้นเนื่องจากปัจจัยที่ใช้ในการทดลองหรือไม่ ซึ่งก็หมายถึงเกิดจากความคลาดเคลื่อนนั่นเอง และพิจารณาจาก ค่าของ Ct Pt (Center point) ค่า P Value ที่ได้น้อยกว่า 0.05 และจากตาราง ANOVA ค่าของ Curvature ค่า P Value ที่ได้น้อยกว่า 0.05 เช่นเดียวกัน สรุปได้ว่าความสัมพันธ์เป็นลักษณะของโพลีโนเมียลดีกรี 2 (Second-order Model) สำหรับการทดลองเพื่อวิเคราะห์ระดับของอิทธิพลอย่างละเอียด ซึ่งในการวิจัยนี้ได้นำการทดลองแบบส่วนผสมกลาง (CCD) มาวิเคราะห์ ระดับของอิทธิพลอย่างละเอียดเนื่องจากมีความยืดหยุ่นในการทดลองสูง ในหัวข้อถัดไป

Factorial Fit: Y versus Inj. Pressure(B), Inj. Speed(F), Clamping force(C), Nozzle Temp. (D)						
Estimated Effects and Coefficients for Y (coded units)						
Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P	
Constant		10.104	0.1581	63.90	0.000	
B	-1.042	-0.521	0.1581	-3.29	0.002	
F	3.958	1.979	0.1581	12.52	0.000	
C	2.792	1.396	0.1581	8.83	0.000	
D	0.625	0.312	0.1581	1.98	0.056	
B*F	-0.292	-0.146	0.1581	-0.92	0.362	
B*C	0.208	0.104	0.1581	0.66	0.514	
B*D	-0.625	-0.312	0.1581	-1.98	0.056	
F*C	0.375	0.188	0.1581	1.19	0.243	
F*D	-0.625	-0.312	0.1581	-1.98	0.056	
C*D	-0.125	-0.063	0.1581	-0.40	0.695	
B*F*C	2.125	1.062	0.1581	6.72	0.000	
B*F*D	0.458	0.229	0.1581	1.45	0.156	
B*C*D	-0.042	-0.021	0.1581	-0.13	0.896	
F*C*D	1.125	0.563	0.1581	3.56	0.001	
B*F*C*D	-0.458	-0.229	0.1581	-1.45	0.156	
Ct Pt		-2.704	0.5148	-5.25	0.000	
S = 1.09545 PRESS = 96.375						
R-Sq = 90.67% R-Sq(pred) = 79.18% R-Sq(adj) = 86.52%						
Analysis of Variance for Y (coded units)						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	4	299.250	299.250	74.812	62.34	0.000
2-Way Interac	6	12.792	12.792	2.132	1.78	0.132
3-Way Interac	4	71.917	71.917	17.979	14.98	0.000
4-Way Interac	1	2.521	2.521	2.521	2.10	0.156
Curvature	1	33.113	33.113	33.113	27.59	0.000
Residual Error	36	43.200	43.200	1.200		
Pure Error	36	43.200	43.200	1.200		
Total	52	462.792				

รูปที่ 12 ผลการวิเคราะห์ ที่ได้จากการทดลอง 2^4

Factorial design

4.2 การวิเคราะห์ผลตอบ Response Surface Methodology (RSM) และ Response Optimization เพื่อที่จะหาระดับค่าของปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด ในการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ ในการแก้ไขปัญหาประกายเงินของชิ้นงานหมายเลข 1220402 ได้นำปัจจัยที่มีอิทธิพลที่ได้จากการทดลองในเบื้องต้นทั้ง 4 ปัจจัยมาทำการวิเคราะห์

โดยใช้ การออกแบบการทดลองแบบ Central Composite ซึ่งจะทำให้การทดลองจำนวน 1 Replicate 31 Run ใช้ตัวอย่างในการทดลองจำนวน 500 ชิ้น ในแต่ละการทดลอง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ($\alpha=0.05$) โดยกำหนดค่าในการทดลองตามตารางที่ 7 โดยที่จะทำการควบคุมปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญต่อปัญหาประกายเงิน ตารางที่ 7 ค่าระดับของปัจจัยที่ใช้ทดลองแบบ CCD

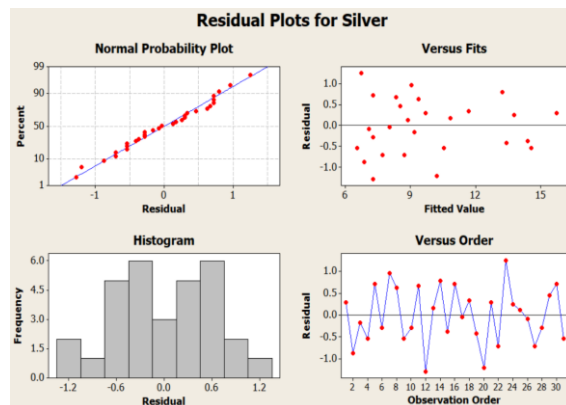
ปัจจัยนำเข้า	สัญลักษณ์	ระดับของปัจจัย					หน่วย
		$-\alpha$	-1	0	1	α	
แรงดันฉีด (Inj.Pressure)	B	80	90	100	110	120	Mpa.
ความเร็วฉีด (Inj.Speed)	F	20	30	40	50	60	mm/Sec.
แรงบีบแม่พิมพ์ (Clamping force)	C	205	230	255	280	305	Ton
อุณหภูมิหัวฉีด (Nozzle temp.)	D	210	230	250	270	290	°C

Response Surface Regression: Y versus Inj. Pressur(B), Inj. Speed(F), Clamping force(C), Nozzle Temp. (D)						
The analysis was done using coded units.						
Estimated Regression Coefficients for Y						
Term	Coef	SE Coef	T	P		
Constant	7.2857	0.2980	24.453	0.000		
B	0.5417	0.1609	3.366	0.003		
F	1.8750	0.1609	11.652	0.000		
C	1.4583	0.1609	9.063	0.000		
D	0.7083	0.1609	4.402	0.000		
B*B	0.4598	0.1474	3.119	0.005		
F*F	0.8348	0.1474	5.663	0.000		
C*C	1.0848	0.1474	7.359	0.000		
D*D	0.4598	0.1474	3.119	0.005		
B*D	0.4375	0.1971	2.220	0.038		
F*C	0.5625	0.1971	2.854	0.010		
S = 0.788307	PRESS = 38.8104					
R-Sq = 94.54% R-Sq(pred) = 82.96% R-Sq(adj) = 91.81%						
Analysis of Variance for Y						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	10	215.313	215.313	21.5313	34.65	0.000
Linear	4	154.500	154.500	38.6250	62.16	0.000
B	1	7.042	7.042	7.0417	11.33	0.003
F	1	84.375	84.375	84.3750	135.78	0.000
C	1	51.042	51.042	51.0417	82.14	0.000
D	1	12.042	12.042	12.0417	19.38	0.000
Square	4	52.688	52.688	13.1721	21.20	0.000
B*B	1	1.855	6.046	6.0462	9.73	0.005
F*F	1	13.750	19.929	19.9291	32.07	0.000
C*C	1	31.037	33.653	33.6525	54.15	0.000
D*D	1	6.046	6.046	6.0462	9.73	0.005
Interaction	2	8.125	8.125	4.0625	6.54	0.007
B*D	1	3.062	3.062	3.0625	4.93	0.038
F*C	1	5.062	5.062	5.0625	8.15	0.01
Residual Error	20	12.429	12.429	0.6214		
Lack-of-Fit	14	9.000	9.000	0.6429	1.13	0.471
Pure Error	6	3.429	3.429	0.5714		
Total	30	227.742				
Estimated Regression Coefficients for Y using data in uncoded units						
Term	Coef					
Constant	292.329					
Inj. Pressure	-1.41235					
Inj. Speed	-1.05411					
Clamping force	-0.916881					
Nozzle Temp.	-0.758110					
Inj. Pressure*Inj. Pressure	0.00459821					
Inj. Speed*Inj. Speed	0.00834821					
Clamping force*Clamping force	0.00173571					
Nozzle Temp.*Nozzle Temp.	0.00114955					
Inj. Pressure*Nozzle Temp.	0.00218750					
Inj. Speed*Clamping force	0.00225000					

รูปที่ 13 ผลการวิเคราะห์ ที่ได้จากการทดลองแบบ ส่วนผสมกลาง (CCD) โดยโปรแกรม Minitab

ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการทดลองตามรูปที่ 13 พบว่าปัจจัย Injection pressure มีค่า P-Value เท่ากับ 0.003 ปัจจัย Clamping force มีค่า P-Value เท่ากับ 0.000 ปัจจัย Nozzle Temperature มีค่า P-Value เท่ากับ 0.000 และปัจจัย Injection speed มีค่า P-Value เท่ากับ 0.000 ซึ่งทั้งหมดมีค่าน้อยกว่าค่าระดับนัยสำคัญ 0.05 รวมถึงปัจจัยกำลังสองซึ่งมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 แสดงว่าปัจจัยทั้งหมดที่กล่าวมามีอิทธิพลต่อการปัญหาประกายเงิน และพิจารณาจากการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R^2 (adj) ของการทดลองหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อปัญหาประกายเงินเท่ากับ 91.81% แสดงว่าข้อมูลที่เก็บมาจากการทดลองใน 100 หน่วย จะมีความผันแปรที่เกิดจากปัจจัยที่ทำการทดลอง 91.81 หน่วย ส่วนหน่วยที่เหลือเราไม่สามารถอธิบายได้ว่ามีความผันแปรเกิดขึ้นเนื่องจากปัจจัยที่ใช้ในการทดลองหรือกล่าวได้ว่าหน่วยที่เหลือเกิดจากความคลาดเคลื่อนจากการทดลองนั่นเอง ผลที่ได้จากการทดลอง แสดงรูปที่ 13 ประมวลผลโดยโปรแกรม Minitab และจาก Residuals plot รูปที่ 14 จากกราฟด้านบนซ้ายเป็นการตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) ของค่าส่วนตกค้าง (Residual) จากการพิจารณาของค่าส่วนตกค้าง (Residual) ซึ่งใช้ในการทดสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability Plot) เห็นว่าค่าส่วนตกค้าง (Residual) มีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง ทำให้ประมาณได้ว่า ค่าส่วนตกค้าง (Residual) มีการแจกแจงแบบปกติ จากกราฟบนขวา เป็นการตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) ของค่าส่วนตกค้าง (Residual) เมื่อพิจารณาการกระจายของข้อมูลบนแผนภูมิพบว่า การกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residual) มีรูปแบบที่เป็นอิสระ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน หรือไม่สามารถประมาณรูปแบบที่แน่นอนได้ แสดงให้เห็นว่าค่าส่วนตกค้าง (Residual) มีความเป็นอิสระต่อกัน (Independent) จากกราฟล่างขวา เป็นการตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Variance stability) โดยใช้แผนภูมิการกระจายของค่าความคลาดเคลื่อน (Residuals) ในแต่ละระดับของปัจจัยที่ทำการทดลอง

พบว่าส่วนตกค้ำงั้นมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั้งทางบวกและทางลบ แสดงว่าข้อมูลที่ได้นั้น มีความเสถียรของความแปรปรวน สรุปได้ว่าข้อมูลที่ทำมาทำการทดลองและผลที่ได้นั้นมีความเหมาะสม และผลการวิเคราะห์ที่ได้ตามรูปที่ 13 จึงสรุปได้ว่าผลการทดลองมีความเชื่อถือได้ โดยพิจารณาจากค่า Lack-of-Fit ที่ได้ค่า P Value เท่ากับ 0.417 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ($\alpha = 0.05$) แสดงได้ว่าข้อมูลมีความน่าเชื่อถือได้

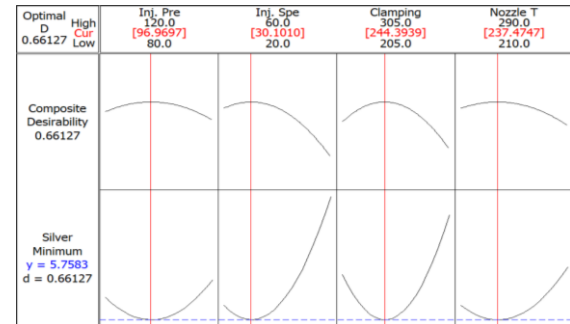


รูปที่ 14 Residuals plot

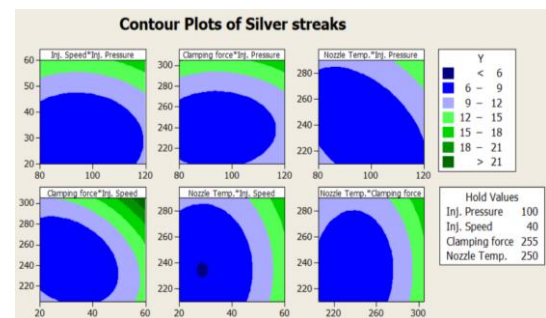
จึงได้นำข้อมูลดังกล่าวไปวิเคราะห์หาค่า *Response Optimization* เพื่อที่จะได้ทราบระดับค่าของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อปัญหาประกายเงินที่เหมาะสมที่สุด ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ความเชื่อมั่น 95เปอร์เซ็นต์ ($\alpha = 0.05$) ผลการวิเคราะห์ จากโปรแกรม Minitab ที่ได้แสดงตาม รูปที่ 15 และรูปที่ 16 , 17 ตามลำดับ

Response Optimization						
Parameters						
	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Import
Y	Minimum	0	0	17	1	1
Global Solution						
Inj. Pressur	=	96.9697				
Inj. Speed	=	30.1010				
Clamping force	=	244.394				
Nozzle Temp.	=	237.475				
Predicted Responses						
Y	=	5.75833				
Composite Desirability	=	0.661274				

รูปที่ 15 ผลการวิเคราะห์ระดับค่าของปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด



รูปที่16 ผลตอบป้จจ้ยที่เ้เหมาะสมที่ท่ให้เกิดปัญหาประกายเงิน น้อยที่สุด ที่ระดับความเชื่อมั่น 95เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 17 Contour Plot แสดงปัจจัยที่มีผลต่อสัดส่วนของเสียจากปัญหาประกายเงิน (B C D และ F)

จากการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Minitab เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด Response Optimization ของทั้ง 4 ปัจจัยพบว่าค่าที่เหมาะสมสำหรับปัจจัย Inj. Pressure เท่ากับ 96.96 Mpa. ปัจจัย Inj. Speed เท่ากับ 30.10 mm./Sec ปัจจัย Clamping force เท่ากับ 244.39Ton และ ปัจจัย Nozzle Temp. เท่ากับ 237.47 °C ที่ระดับความเชื่อมั่น 95เปอร์เซ็นต์ ($\alpha = 0.05$) และได้สมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$Y = 292.329 - 1.412 (B) - 1.054 (F) - 0.916 (C) - 0.758 (D) + 0.0045 (B)^2 + 0.0083 (F)^2 + 0.0017 (C)^2 + 0.0011 (D)^2 + 0.0021 (B*D) + 0.0022 (F*C)$$

5. ทดลองเพื่อยืนยันผลและเปรียบเทียบผลการทดลอง

5.1 การทดลองเพื่อยืนยันผล ทำการทดลองเพื่อยืนยันผลการทดลองที่ได้ โดยกำหนดค่าของระดับปัจจัยที่ได้ตามตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ระดับของปัจจัยที่นำไปทดลองเพื่อยืนยันผล

ปัจจัย (Symbol)	สัญลักษณ์	ระดับของปัจจัย		Unit
		ก่อน	หลัง	
Screw rpm.**	A	30	25	rpm
Inj. Pressure *	B	110	97	Mpa
Clamp. force *	C	260	240	Ton
Nozzle Temp. *	D	260	237	°C
Mold Temp. **	E	60	70	°C
Inj. Speed *	F	40	30	mm./Sec
Back Pressure **	G	8	6	Mpa
Suck back Dist **	H	3	3	mm.

(ปัจจัยที่มีนัยสำคัญ*, ปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญ**)

โดยทำการทดลองอย่างต่อเนื่อง ได้ผลการทดลองเพื่อยืนยันผลตามตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ผลการทดลองเพื่อยืนยันผล

ชิ้นงาน	จำนวนการทดลอง	ปัญหา ประกายเงิน	ปัญหาอื่นๆ	รวม	PPM
1220402	1000	7	2	9	9000

ผลการทดลองเพื่อยืนยันผลจากตารางที่ 9 พบว่า ปัจจัยที่กำหนดในการทดลองส่งผลให้ ปัญหาประกายเงินลดลง ซึ่งมีสัดส่วนของเสียอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ดังนั้นจึงพิจารณานำระดับค่าปัจจัยของพารามิเตอร์มาเพิ่มจำนวนการตัวอย่างในการทดลอง ตามตารางการผลิตจริงของบริษัทการศึกษา ในช่วงระหว่างการผลิตของเดือนกันยายน ถึงเดือนตุลาคม 2562 และติดตามผลการผลิตชิ้นงานหมายเลข 1220402 เพื่อตรวจสอบสัดส่วนปัญหาประกายเงินที่เกิดขึ้นได้ผลตามตารางที่ 10

ตารางที่ 10 แสดงผลการติดตามการผลิตเพื่อยืนยันผลและการเปรียบเทียบ ปัญหาประกายเงินจากการผลิตชิ้นงานหมายเลข 1220402

แผนการผลิต 2562	จำนวนการผลิต ชิ้นงาน 1220402	พบปัญหาประกายเงิน	
		จำนวน(ชิ้น)	PPM
พฤษภาคม-สิงหาคม(ก่อนการปรับปรุง)	32,357	1,092	33,748
กันยายน-ตุลาคม (หลังการปรับปรุง)	42,878	663	15,462
ผลการเปรียบเทียบ		ลดลง	18,286

จากตารางที่ 10 ผลจากการผลิตจริงเพื่อเป็นการยืนยันผลการวิจัย ของการผลิตชิ้นงานหมายเลข 1220402 พบว่าสามารถลดสัดส่วนของเสียจากปัญหาประกายเงินได้จริง กล่าวคือสัดส่วนของเสียลดลงจากเดิม 18,286 PPM หรือคิดเป็น ลดลง 54.18% ดังนั้นจึงกำหนดเป็นค่ามาตรฐาน (Tolerances for Setup $\pm 5\%$) เพื่อใช้ทำการผลิต Mass Production ต่อไป

5.2 การติดตามผลการดำเนินงานวิจัย และการเปรียบเทียบผลที่ได้ การผลิตภายใต้ค่าพารามิเตอร์ใหม่ที่ได้จากการทดลองสำหรับผลิตชิ้นงานหมายเลข 1220402 ทำการตรวจสอบปัญหาประกายเงินที่เกิดขึ้นได้ผลสัดส่วนของเสีย ตามตารางที่ 11

ตารางที่ 11 ผลการติดตามการผลิต จากการปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ ของชิ้นงาน 1220402 ในช่วงเดือนพฤศจิกายน2562 - เดือนมีนาคม 2563

สภาวะ	จำนวนการผลิต ชิ้นงาน 1220402	พบปัญหาประกายเงิน	
		จำนวน	PPM
ก่อนการปรับปรุง	32,357	1,092	33,748
การทดลองยืนยันผล (ระหว่างการปรับปรุง)	42,878	663	15,462
MP (หลังการปรับปรุง)	106,665	723	6,778
ผลการเปรียบเทียบ		ลดลง	2670

จากตารางที่ 11 พบว่าสามารถลดสัดส่วนของเสียจากปัญหาประกายเงิน ของชิ้นงานหมายเลข 1220402 ลดลงจาก 33748 PPM มาอยู่ที่ 6778 PPM หรือคิดเป็นลดลง 79.92 % จากสัดส่วนของเสียที่ลดลงของชิ้นงาน 1220402 ดังกล่าว

ตารางที่ 12 การเปรียบเทียบสัดส่วนของเสียโดยรวม ก่อนและหลังการปรับปรุง สำหรับชิ้นส่วนใหม่

การเปรียบเทียบสัดส่วนของเสียทั้งหมดสำหรับการผลิตชิ้นงานใหม่			
สภาวะการปรับปรุง/ช่วงเวลา	จำนวนการผลิตเฉลี่ยต่อ เดือน(ชิ้น)	พบของเสียเฉลี่ยทั้งหมด	
		จำนวน(ชิ้น)	PPM
ก่อนการปรับปรุง/พฤษภาคม-สิงหาคม62	31930	286	8947
หลังการปรับปรุง/กันยายน-ตุลาคม62	81121	358	4550
หลังการปรับปรุง/พฤศจิกายน62-มีนาคม63	66086	164	2320

จากตารางที่ 12 พบว่าสามารถลดสัดส่วนของเสียเฉลี่ยโดยรวมของปัญหาทั้งหมดของการผลิตชิ้นงานใหม่ลงได้จาก 8947 PPM ลดลงมาอยู่ที่ 2320 PPM หรือคิดเป็นลดลง 74.06% ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานของบริษัทฯ วิศวกรรมศึกษากำหนด

6. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

6.1 *สรุปผลการทดลอง* จากการประยุกต์ใช้เครื่องมือคุณภาพ เพื่อทราบถึงปัญหา และที่มาของปัจจัยที่ทำให้เกิดปัญหาทั้งหมด จากนั้นได้นำเทคนิคการออกแบบการทดลอง มาประยุกต์ใช้เพื่อค้นหาปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อปัญหา ประกายเงิน และวิเคราะห์ผลเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Response Optimization) เพื่อใช้ในการปรับตั้งค่า พารามิเตอร์ของเครื่องฉีดพลาสติก พบว่ามี 4 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อปัญหาประกายเงินอย่างมีนัยสำคัญ และพบว่าค่าที่เหมาะสมที่สุดในแต่ละปัจจัยเป็นดังนี้ แรงดันในการฉีด (Injection Pressure) 97 Mpa. แรงบิดแม่พิมพ์ (Clamping force) 240 Ton อุณหภูมิหัวฉีด (Nozzle Temperature 237 °C และ ความเร็วในการฉีด (Injection Speed) 30 mm/Sec. จากการนำระดับค่าพารามิเตอร์ของปัจจัยดังกล่าวไปปรับใช้ ในกระบวนการฉีดพลาสติก พบว่าสัดส่วนของเสียในการผลิตชิ้นงานหมายเลข 1220402 จากปัญหาประกายเงิน ลดลงจาก 33748 PPM เหลือ 6778 PPM และทำให้ส่งผลต่อสัดส่วนของเสียโดยรวมจากการผลิตชิ้นงานใหม่จาก 8947 PPM ลดลงเหลือ 2320 PPM ซึ่งเป็นไปตามที่บริษัทฯ วิศวกรรมศึกษากำหนด

6.2 *ข้อเสนอแนะ* จากการนำค่าพารามิเตอร์ไปผลิตอย่างต่อเนื่อง จะต้องทำการตรวจสอบและติดตามสัดส่วนของเสียในปัญหาอื่นๆ ด้วย เช่น ฉีดไม่เต็ม ชิ้นงานเป็นครีบก เป็นต้น หากมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ อาจต้องทำการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์เพื่อแก้ปัญหาอื่นๆ ที่เกิดขึ้น ซึ่งอาจส่งผลต่อสัดส่วนของเสียจากปัญหาประกายเงิน และค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลอง

จากการวิจัยนี้พบว่ามีความทิศทางการหาระดับของปัจจัยที่มีอิทธิพลได้อย่างเหมาะสม เพื่อใช้ในการปรับตั้ง

ค่า พารามิเตอร์ของเครื่องฉีดพลาสติก ซึ่งผลที่ได้สามารถลดสัดส่วนของเสียได้จริง บริษัทฯ วิศวกรรมศึกษานำการประยุกต์ใช้เครื่องมือคุณภาพ และเทคนิคการออกแบบการทดลอง ไปที่ใช้ในการปรับปรุงแก้ไขปัญหาอื่นๆ ได้

7. กิตติกรรมประกาศ

บทความฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีต้องขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ จากภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรญาณบุรี คุณภานุวัฒน์ นาคสมบัติ ผู้จัดการอาวุโสและทีมงานวิศวกร บริษัทฯ วิศวกรรมศึกษา ที่ให้ข้อมูลด้านเทคนิคในกระบวนการฉีดพลาสติก และขอขอบพระคุณกำลังใจ จากบิดา มารดา และสุดท้ายขอขอบคุณผู้ที่เกี่ยวข้องในการให้ข้อมูลต่างๆ ที่ไม่ได้กล่าวถึง

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Jit-aree, S. Jarupinyo and R. Kanchana, "Design of Experiments for Analyzing Factors Affecting to Varied Deformation in the Simulation of ABS Plastic Injection Molding Process", in *The 2nd TNIAAC: Thai-Nichi Institute of Technology Academic Conference*, Bangkok, 2013, pp. 68-73.
- [2] P. Chutima, *Design of an Engineering Experiment*. Bangkok: The Publisher of Chulalongkorn University, 2002, pp. 449-495.
- [3] B. Sorannil, *Plastic Technology*. Bangkok: Technology promotion (Thai-Japanese), Association, 2010, pp. 14-24.
- [4] ABS Resin. TOYOLAC Technical Guide Toray Plastics (Malaysia) Sdn. Bnd [Online]. Available: https://www.torayplastics.com.my/pdf/toyolac/Technical_guide/GP_Technical_Guide.pdf

- [5] W. Techawinyuatham, Plastic injection *Engineering*. 1st edition, Bangkok: Technology promotion (Thai-Japanese), Association, 2010.
- [6] K. Ployphanichcharoan, *Quality Control System (QC CIRCLE)*. Bangkok: The Publisher of S. Asia press co ., ltd. , 2000, pp. 209-312.
- [7] P. Suthat Na Ayudhya and P. Luengphaibun, *Design and analysis of Experiments*. Bangkok: Top, 2008, pp. 281-282.
- [8] Douglas C. Montgomery. *Design and Analysis of Experiments*. The United States of America : John Wiley & Sons, INC., 2005, pp. 478-540.
- [9] A. Jit-aree “Experimental design for the analysis of factors influencing deformation in the simulation of ABS plastic injection molding process,” M.S.Thesis, Dept. Industrial Eng., Rajamangala Univ. of Technology Thanyaburi, 2012.
- [10] P. Bourtone and W. Sriseubsai,“ Applications of Design of Experiment and Computer-Aided Engineering to Minimize Shrinkage of a Plastic Injection-molded Part” in *IE Network conference*, Phetchaburi, 2012, pp. 829-834.
- [11] K. Chasuriyakul, W. Thasana and T. Khajifa, “Study of heating and cooling temperature of injection molding to effect on gloss of plastic injection parts,” in *The 8th TSME International Conference on Mechanical Engineering*, Bangkok, 2017, pp. 1238-1246.

อิทธิพลของความเร็วเลื่อนไถลและความดันสัมผัสที่ส่งผลต่อพฤติกรรมทางไทรบอโลยีของผิวคู่สัมผัสเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 และเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก 430 HL

The Influence of Sliding Velocity and Contact Pressure on Tribological Behavior of The Mating Surfaces of SKD11 Tool Steel and Ferritic Stainless Steel 430 HL

เจษฎา จันทร์ผา¹ ภาสพิรุฬห์ วัชรศรีสำเร็จ^{2*}

¹สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

²ศูนย์เทคโนโลยีแม่พิมพ์ (TDTC) คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

217 ถนนนทบุรี 1 ตำบลสวนใหญ่ อำเภอเมือง จังหวัดนนทบุรี 11000

Jedsada Junpha¹ Bhadpiroon Watcharasresomroeng^{2*}

¹Department of Science, Faculty of Science and Technology

²Tool and Die Technology Center (TDTC), Faculty of Engineering and Architecture

Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi

217 Nonthaburi 1 Road, Suanyai, Muang, Nonthaburi, 11000

*Corresponding author Email: bhadpiroon.s@rmutsb.ac.th

(Received: September 16, 2020; Accepted: December 15, 2020)

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของความเร็วเลื่อนไถลและความดันสัมผัสที่ส่งผลต่อพฤติกรรมทางไทรบอโลยีของผิวสัมผัสวัสดุเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 ขูดขัดกับวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก 430 HL ภายใต้สภาวะไม่ใช้สารหล่อลื่น การศึกษาใช้การจำลองการทดสอบ Pin-on-Disk ตามมาตรฐาน ASTM G99-95a ความเร็วในการเลื่อนไถลของวัสดุคู่สัมผัสมี 3 ระดับ คือ 50 100 และ 150 mm/s ภายใต้แรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 2 5 และ 8 N ผลการศึกษาพบว่าลักษณะความเสียหายของผิวเหล็กกล้าเครื่องมือที่เคลื่อนสัมผัสบนวัสดุชิ้นงานมี 2 รูปแบบ คือ การสึกหรอแบบขูดถูและการยึดติดของวัสดุชิ้นงาน ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวคู่สัมผัสมีค่าอยู่ในช่วง 0.707 ถึง 0.904 ความเร็วในการเลื่อนไถลและความดันสัมผัสไม่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวคู่สัมผัสของวัสดุเครื่องมือกับวัสดุชิ้นงาน การยึดติดของวัสดุชิ้นงานบนผิววัสดุเครื่องมือไม่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่สูงขึ้น ปริมาณการสึกหรอของวัสดุเครื่องมือกับระยะทางการเคลื่อนที่มีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันและแปรผันตามความดันที่เกิดขึ้นระหว่างผิวคู่สัมผัส ในขณะที่จะแปรผกผันกับความเร็วในการเลื่อนไถลบนวัสดุชิ้นงาน

คำสำคัญ: ความเร็วเลื่อนไถล ความดันสัมผัส ไทรบอโลยี เหล็กกล้าเครื่องมือ เหล็กกล้าไร้สนิม

ABSTRACT

The objective of this article is to study the influence of sliding velocity and contact pressure on the tribological behavior of the mating surfaces of hardened SKD11 tool steel against ferritic stainless steel 430 HL workpiece material under dry conditions. The study was conducted by simulation testing with Pin-on-Disk according to ASTM G99-95a. There are three levels of sliding velocity of the contact surface material: 50 100 and 150 mm/s under normal loads of 2 5 and 8 N. The study found that relative damage of tool steel surface on the workpiece material comes in two forms: abrasive wear and adhesion of workpiece material. The coefficient of friction between the contact surfaces ranged from 0.707 to 0.904. Sliding velocity and contact pressure do not linearly correlate with the coefficient of friction between the contact surfaces of the tool material and the workpiece material. The adhesion of the workpiece material to the tool surface does not affect to increase the coefficient of friction. The quantitative of tool material wear and the sliding distance correlated in the same direction, also wear is proportional to the pressure generated between the contact surfaces, which is inversely proportional to the sliding velocity on the workpiece material.

Keyword: Sliding Velocity, contact pressure, tribology, tool steel, stainless steel.

1. บทนำ

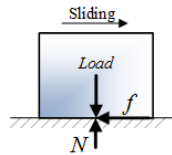
การขึ้นรูปโลหะแผ่นที่ต้องการปริมาณการผลิตสูง โดยทั่วไปใช้ชุดแม่พิมพ์ (Die Set) เป็นเครื่องมือในการขึ้นรูปโลหะแผ่นให้เกิดการเปลี่ยนรูปถาวร (Plastic Deformation) เป็นรูปทรงตามที่ต้องการ ชิ้นส่วนหลักของชุดแม่พิมพ์ที่สำคัญได้แก่ พันช์ (Punch) ดาย (Die) และแผ่นจับยึดชิ้นงาน (Blank Holder) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของกระบวนการที่ใช้ในการขึ้นรูปโลหะแผ่น โดยระหว่างกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น ชิ้นส่วนหลักจะสัมผัสกับวัสดุชิ้นงานและเคลื่อนที่สัมพัทธ์กัน (Relative Movement) เกิดความดันระหว่างผิวคู่สัมผัสเนื่องจากแรงที่ให้กับวัสดุชิ้นงานเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนรูปถาวร [1]

จากการสัมผัสกันระหว่างวัสดุเครื่องมือกับวัสดุชิ้นงานในลักษณะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ส่งผลให้เกิดความเสียดทาน (Friction) ระหว่างผิวคู่สัมผัส และเมื่อใช้งานเครื่องมือดังกล่าวไปช่วงระยะเวลาหนึ่งก็จะเกิดการสึกหรอ (Wear) กับวัสดุเครื่องมือดังกล่าวรวมถึงวัสดุชิ้นงาน ก็จะได้รับเสียหายจากการสึกหรอของเครื่องมือ

ดังนั้นในการขึ้นรูปโลหะแผ่นจึงมีการปรับปรุงสมบัติระหว่างผิวคู่สัมผัสของวัสดุเครื่องมือกับวัสดุชิ้นงานด้วยการหล่อลื่น (Lubrication) เช่น การใช้สารหล่อลื่นจำพวกน้ำมันทาบนวัสดุชิ้นงานที่ต้องการขึ้นรูป เป็นต้น ทำให้มีการศึกษาในศาสตร์ไทรบอโลยี (Tribology) ซึ่งเกี่ยวข้องกับเรื่องของความเสียดทาน การสึกหรอ และการหล่อลื่นในงานขึ้นรูปโลหะเพื่อให้ทราบถึงความสัมพันธ์หรือพฤติกรรมทางไทรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสวัสดุเครื่องมือกับวัสดุชิ้นงาน เพื่อความต้องการในการออกแบบและควบคุมกระบวนการขึ้นรูปโลหะให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

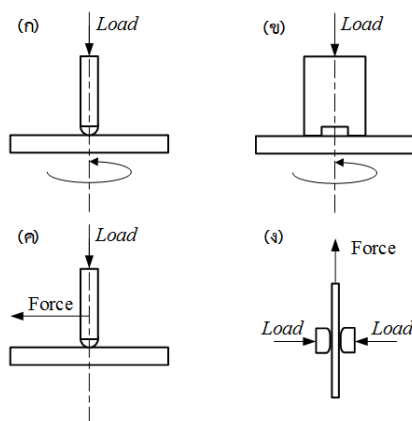
เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาเรื่องความเสียดทานที่เกิดระหว่างผิวคู่สัมผัสที่เคลื่อนที่สัมพัทธ์กันดังรูปที่ 1 จะสามารถอธิบายด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงเสียดทาน (Friction Force; f) กับความดันกระทำตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ (Normal Pressure; N) ที่รู้จักกันในชื่อ Coulomb Friction ดังสมการ (1) โดยที่ μ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Coefficient of Friction) [1]

$$\mu = \frac{f}{N} \quad (1)$$



รูปที่ 1 กลไกการเกิดความเสียหายระหว่างผิวคู่สัมผัสที่เคลื่อนที่สัมผัสกัน

จากรูปที่ 1 สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายระหว่างผิวคู่สัมผัสของวัสดุเครื่องมือกับวัสดุชิ้นงานได้เมื่อทราบค่าความดันที่เกิดระหว่างผิวคู่สัมผัสและแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างผิวคู่สัมผัสหรือค่าแรงเสียดทาน ซึ่งในกระบวนการขึ้นรูปโลหะเพื่อผลิตชิ้นส่วนหรือผลิตภัณฑ์ในภาคอุตสาหกรรมอาจทำการหาค่าแรงเสียดทานหรือศึกษาพฤติกรรมทางไทรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสของวัสดุเครื่องมือกับวัสดุชิ้นงานได้ยาก ดังนั้นจึงมีการใช้การจำลองการทดสอบ (Simulation Testing) เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางไทรบอโลยีของวัสดุคู่ผิวสัมผัสดังกล่าว



รูปที่ 2 การจำลองการทดสอบทางไทรบอโลยี

(ก) Pin-on-Disk (ข) Twist Compression Test (ค) Slider-on-flat Surface Test และ (ง) Strip Drawing Test [1]

ตัวอย่างการจำลองการทดสอบทางไทรบอโลยีแสดงดังรูปที่ 2 โดยที่ผ่านมามีงานวิจัยใช้การจำลองการทดสอบดังกล่าวศึกษาพฤติกรรมทางไทรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัส เช่น Pin-on-Disk Test [2-13] Twist Compression Test [14] Slider-on-Flat Surface Test [15,16] และ Strip Drawing Test [14] เป็นต้น แต่ด้วยการทดสอบแบบ Pin-on-Disk เป็นวิธีการทดสอบการสึกหรอของวัสดุผิวคู่สัมผัสที่เคลื่อนที่สัมผัสกันภายใต้มาตรฐาน ASTM G99-95a [17] ที่มีความสะดวกในการทดสอบ เนื่องจากปัจจุบันมีผู้ผลิตไทรบอมิเตอร์ (Tribometer) ที่มีหลักการทำงานเป็นไปตามมาตรฐานดังกล่าวออกมาจำหน่าย และสามารถรายงานผลค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายระหว่างผิวคู่สัมผัสได้ ในขณะที่วิธีการทดสอบแบบอื่นผู้ทดสอบต้องสร้างเครื่องมือขึ้นใช้ทดสอบและศึกษาพฤติกรรมทางไทรบอโลยีเอง ทำให้การจำลองการทดสอบด้วยวิธี Pin-on-Disk Test นิยมใช้เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางไทรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสโดยเฉพาะในชิ้นรูปโลหะ เช่น Premanond [2] ได้ใช้การจำลองการทดสอบดังกล่าวด้วยไทรบอมิเตอร์ศึกษาพฤติกรรมด้านไทรบอโลยีของผิวคู่สัมผัสวัสดุเครื่องมือเกรดต่าง ๆ กับวัสดุชิ้นงานหลักกล้ากล้าไร้สนิมออสเทนนิติก (Austenitic Stainless Steel) เพื่อศึกษาอิทธิพลของชนิดวัสดุและสารหล่อลื่นที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหาย การสึกหรอของวัสดุทำแม่พิมพ์แต่ละชนิดในกรณีที่ไมใช้สารหล่อลื่น อิทธิพลของการหล่อลื่นและค่าความแข็งของวัสดุทำแม่พิมพ์ที่มีต่อการสึกหรอของวัสดุแม่พิมพ์ โดยการทดสอบได้ใช้ลูกบอลจับยึดด้วยตัวจับยึด (Holder) แทนการใช้หมุดหรือพิน (Pin) ซึ่งอาจเรียกวิธีการนี้ว่า “Ball-on-Disk” ในขณะที่ Sriprasird et al. [3] ใช้ Pin-on-Disk ไทรบอมิเตอร์ศึกษาการสึกหรอของผิวคู่สัมผัสระหว่างเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น (Cold Work Tool Steel) เกรด SKD11 (JIS) ที่เคลือบผิวด้วยฟิล์มแข็งบาง (Hard Thin Film) ชนิดต่าง ๆ กับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก Lawanwong et al. [4] ใช้ Pin-on-Disk ไทรบอมิเตอร์ประเมินชนิดของฟิล์มแข็งบางที่เลื่อนไถล (Sliding) บน

วัสดุชิ้นงานโลหะแผ่นกลุ่มเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง (High Strength Steel) เกรด 440 590 และ 780 ขณะที่ Sresomroeng et al. [5] ใช้การจำลองการทดสอบดังกล่าวศึกษาพฤติกรรมทางไทรบอโลยีของวัสดุเหล็กกล้าเครื่องมือกับโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษ (Advanced High Strength Steel) เกรด 980 โดยเปรียบเทียบกรณีการทำงานที่ใช้และไม่ใช้สารหล่อลื่น

จากงานวิจัยที่ผ่านมา [2-5] การใช้ไทรบอมิเตอร์จำลองการทดสอบทางไทรบอโลยีระหว่างวัสดุเครื่องมือกับวัสดุชิ้นงานที่เคลื่อนที่สัมผัสกัน สามารถทำให้ทราบค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวคู่สัมผัสและทำนายการสึกหรอของวัสดุเครื่องมือภายใต้สภาวะทางไทรบอโลยีที่แตกต่างกันได้ นอกจากนี้ยังมีการศึกษาพฤติกรรมทางไทรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสที่แตกต่างกันภายใต้สภาวะต่าง ๆ ด้วยการจำลองการทดสอบ Pin-on-Disk เช่น ที่สภาวะอุณหภูมิการทำงานต่าง ๆ [6-8] พฤติกรรมทางไทรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสของวัสดุต่างชนิดกัน [9-12] รวมถึงใช้การจำลองการทดสอบดังกล่าวประเมินประสิทธิภาพทางไทรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสที่มีการปรับสภาพผิวด้วยวิธีการต่าง ๆ เพื่อนำผลการจำลองการทดสอบที่ได้ไปประยุกต์ใช้กับการทำงานจริง เช่น งานด้านระบบราง (Railway Systems) [13] แต่งานศึกษาที่ผ่านมา [2-13] กำหนดค่าความดันสัมผัสระหว่างผิววัสดุทำแม่พิมพ์และวัสดุชิ้นงานรวมถึงความเร็วที่ใช้ในการทดสอบคงที่ ซึ่งตัวแปรทั้งสองเป็นตัวแปรที่สำคัญในกระบวนการขึ้นรูปโลหะ [1] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีความต้องการใช้การจำลองการทดสอบแบบ Pin-on-Disk ศึกษาตัวแปรทั้งสองที่ส่งผลต่อพฤติกรรมทางไทรบอโลยีของวัสดุทำแม่พิมพ์ที่เคลื่อนที่สัมผัสกับวัสดุชิ้นงาน เพื่อเป็นข้อมูลในการออกแบบแม่พิมพ์ให้แก่ภาคอุตสาหกรรมและเป็นแนวทางให้ผู้สนใจใช้วิธีการ Pin-on-Disk ในการศึกษาพฤติกรรมทางไทรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสของวัสดุเครื่องมือกับวัสดุชิ้นงานหรือประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมอื่นที่เกี่ยวข้อง

2. วัสดุ เครื่องมือและวิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 วัสดุผิวคู่สัมผัส

เหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น (Cold Work Tool Steel) เกรด SKD11 ตามมาตรฐาน JIS หรือเทียบเท่าเกรด D2 ตามมาตรฐาน AISI ถูกเลือกใช้ในการศึกษาครั้งนี้ เนื่องจากการขึ้นรูปโลหะแผ่นโดยทั่วไปใช้กระบวนการขึ้นรูปเย็น (Cold Forming Process) วัสดุดังกล่าวจึงนิยมนำมาใช้ทำชิ้นส่วนแม่พิมพ์ที่ต้องสัมผัสกับวัสดุชิ้นงานขณะทำการขึ้นรูปเพราะมีสมบัติทนการสึกหรอได้ดี [18,19] ดังนั้นผู้ศึกษาจึงเลือกวัสดุดังกล่าวเป็นวัสดุผิวคู่สัมผัสกับวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก (Ferritic Stainless Steel) เกรด 430 HL (Hair Line: การขัดผิวเชิงเส้น) หรือ SUS430 HL ตามมาตรฐาน JIS ซึ่งเป็นเหล็กกล้ารีดเย็น (Cold Rolled) ผสมธาตุโครเมียม (Chromium; Cr) ในปริมาณสูง (16.0-19.0 % โดยน้ำหนัก) ทำให้มีสมบัติทนการกัดกร่อนที่ดี โดยทั่วไปเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกจะไม่มีส่วนผสมของนิกเกิล (Nickel; Ni) หรือผสมในปริมาณที่น้อยมากทำให้มีราคาต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก มีค่าการขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Thermal Expansion) ต่ำและนำความร้อนได้ดีกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก จึงทำให้วัสดุดังกล่าวนิยมใช้ในสภาวะแวดล้อมที่ต้องทนต่อการกัดกร่อนสูงและมีความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้อง เช่น ชิ้นส่วนในงานสถาปัตยกรรม และชิ้นส่วนยานยนต์ เป็นต้น ทั้งนี้เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกยังคงมีสมบัติความเป็นแม่เหล็กเนื่องจากโครงสร้างของวัสดุเป็นเฟอร์ไรต์ (Ferrite) [20-22]

สมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 430 HL ได้จากการทดสอบด้วยแรงดึง (Tensile Testing) ตามมาตรฐาน ASTM E8 [23] องค์ประกอบทางเคมี (Chemical Compositions) ของวัสดุเครื่องมือและวัสดุชิ้นงานใช้เทคนิควิธี Optical Emission Spectrometry (OES) ในการระบุธาตุประกอบที่มีอยู่ ผลการทดสอบสมบัติทางกลและตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่ศึกษาแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมบัติทางกลและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่ศึกษา

Symbol	$\sigma_{0.2\%}$	σ_U	Elongation		
[JIS]	[MPa]	[MPa]	[%]		
SUS430 HL	382	513	27.7		
	Chemical Compositions [wt%]				
	C	Si	Mn	P	S
	0.0116	0.4913	0.3380	0.0317	0.0064
	Cr	Mo	Ni	Al	Cu
	18.5576	0.3235	0.1771	0.0028	0.5149
	Nb	Ti	V	B	
	0.4138	0.0028	0.0998	<0.0001	
SKD11	C	Si	Mn	P	S
	1.4346	0.2285	0.2869	0.0337	0.0028
	Cr	Mo	Ni	Al	Cu
	11.6004	0.8489	0.4832	0.0067	0.1656
	Nb	Ti	V	B	Fe
	-	-	0.2421	-	Bal.

จากการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุชิ้นงานพบว่าปริมาณธาตุโครเมียมในช่วงค่ามาตรฐาน (16.0-19.0%) มีค่าความเค้นพิสูจน์ (Proof Stress; $\sigma_{0.2\%}$) ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด (Ultimate Stress; σ_U) หรือค่าความแข็งแรงดึงของวัสดุ (Tensile Strength) และร้อยละการยืดตัว (%Elongation) เท่ากับ 382 MPa 513 MPa และ 27.7 ตามลำดับ ซึ่งสมบัติทางกลของวัสดุชิ้นงานที่ใช้ศึกษา มีค่าไม่น้อยกว่าค่ามาตรฐานที่ระบุไว้ และจากผู้ผลิต [22] จึงยืนยันได้ว่าวัสดุชิ้นงานที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก เกรด 430 HL โดยมีค่าความแข็งที่ได้จากการทดสอบความแข็ง (Hardness Testing) เท่ากับ 85 HRB

เนื่องจากวัสดุชิ้นงานที่ศึกษามีการปรับปรุงสภาพผิวด้วยการขัดเจิงเส้นแบบต่อเนื่องทั่วทั้งแผ่นชิ้นงานตามทิศทางการรีด (Rolled Direction) ของวัสดุ และเพื่อให้ทราบค่าความหยาบผิวของวัสดุชิ้นงานที่ศึกษาซึ่งถือเป็นตัวแปรที่สำคัญตัวหนึ่งที่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน [1] ผู้ศึกษาจึงตรวจสอบค่าความหยาบผิว

(Surface Roughness) R_a ของวัสดุชิ้นงานด้วยเครื่องวัดความหยาบผิวแบบเข็มลาก (Stylus) ของ Marsurf รุ่น PS1 ด้วยระยะความยาวเข็มลากเคลื่อนที่เท่ากับ 8.6 mm และมีระยะทางในการกรองความถี่ของความยาวที่วัด (Cut-off Length) เท่ากับ 0.8 mm ค่าความหยาบผิวของวัสดุชิ้นงานที่วัดได้มีค่าเฉลี่ย R_a เท่ากับ 0.0938 μm ตามทิศทางแนวรีด และมีค่าความหยาบผิวเฉลี่ย R_a เท่ากับ 0.2342 μm ตั้งฉากกับทิศทางแนวรีด ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความหยาบผิวของวัสดุชิ้นงานในแต่ละทิศทางของแนวรีดมีค่าแตกต่างกัน

2.2 เครื่องมือและวิธีการดำเนินงานวิจัย

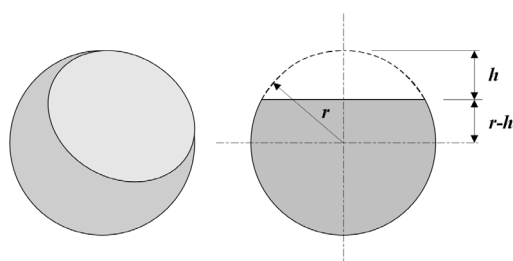
เครื่องไทรบอมิเตอร์แบบ Pin-on-Disk ยี่ห้อ Anton Paar ถูกใช้เพื่อศึกษาอิทธิพลของความเร็วในการเลื่อนไถลและความดันสัมผัสที่ส่งผลต่อพฤติกรรมทางไทรบोलยีของผิวคู่สัมผัสเครื่องมือกับวัสดุชิ้นงาน การทดสอบใช้ลูกบอลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm จับยึดด้วยด้ามจับ (Ball Holder) แทนการใช้หมุด (Pin) เพื่อให้สามารถหมุนเปลี่ยนตำแหน่งการทดสอบได้รอบลูกบอล และเพื่อให้สอดคล้องกับกระบวนการขึ้นรูปเย็น ลูกบอลถูกเตรียมจากวัสดุ SKD11 ชุบแข็งเพื่อให้ได้ค่าความแข็ง 60 ± 2 HRC ปรับแต่งผิวให้มีค่าความหยาบผิว R_a ในช่วง $0.1 \pm 0.05 \mu\text{m}$ ซึ่งค่าความแข็งและค่าความหยาบผิวที่เลือกใช้เป็นค่าที่ใช้ในงานขึ้นรูปโลหะทั่วไป [14,20,19,24] วัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 430 HL ความหนา 1.5 mm ถูกเตรียมเป็นแผ่นดิสก์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 mm ด้วยเครื่องไวร์ อีดีเอ็ม (Wire EDM) เพื่อป้องกันการเสียรูปและอิทธิพลจากการเปลี่ยนรูปพลาสติก (Plastic Deformation)

ความเร็วเลื่อนไถล (Sliding Velocity) ที่ศึกษามี 3 ระดับ คือ 50 100 และ 150 mm/s ซึ่งเป็นช่วงความเร็วที่ใช้ในงานขึ้นรูปโลหะ [15,25,26] ความดันสัมผัสที่เกิดระหว่างผิวคู่สัมผัสให้โดยตุ้มน้ำหนักขนาด 2 5 และ 8 N ซึ่งเท่ากับค่าความดันสัมผัส 807 1095 และ 1280 MPa ตามสมการของ Hertzian [27] การทดสอบทำใน

ห้องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่ $23 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$
และ $50 \pm 3 \%$ ตามลำดับ

การทดสอบทำในสภาวะไม่ใช้สารหล่อลื่นเนื่องจาก
ปัจจุบันการขึ้นรูปโลหะมีความพยายามลดการใช้สารหล่อ
ลื่นจำพวกน้ำมันเนื่องจากเป็นอันตรายต่อผู้ใช้งานและ
สภาพแวดล้อม [28] อีกทั้งยังต้องกำจัดสารหล่อลื่น
ดังกล่าวหลังจากการขึ้นรูปเสร็จก่อนนำไปใช้งานซึ่งถือเป็น
ต้นทุนการผลิตอย่างหนึ่ง ดังนั้นเพื่อให้แน่ใจว่าเป็นการ
ทดสอบในสภาวะปราศจากสารหล่อลื่น (Dry Condition)
ลูกบอลและแผ่นดิสก์ถูกล้างด้วยอะซิโตน (Acetone) โดย
เทคนิคอัลตราโซนิค (Ultrasonic) เป็นเวลา 2 นาที

ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายระหว่างผิวคู่สัมผัส
ของวัสดุเครื่องมือกับวัสดุชิ้นงานได้จากซอฟต์แวร์
InstrumX เวอร์ชัน 7.0.10 ซึ่งต่อพ่วงกับชุดไดรบบิเตอร์
โดยค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายที่นำมารายงานผลเป็น
ค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบในช่วงระยะทางการทดสอบ
100 m ที่ทุก ๆ ระยะทางการทดสอบ 100 m ลูกบอล
SKD11 ชุบแข็ง จะถูกนำมาตรวจสอบลักษณะความ
เสียหายและวัดความกว้างของรอยสึกหรอที่เกิดขึ้นบนผิว
ลูกบอลทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ Mitutoyo MF-
B1010D ที่ต่อพ่วงกับชุดประมวลผลภาพ Mitutoyo
Vision Unit โดยการทดสอบจะทำจนถึงระยะทางการ
เคลื่อนที่ 1200 m ลักษณะรอยสึกหรอของบอลแสดงดัง
รูปที่ 3 โดยสามารถหาปริมาณการสึกหรอของลูกบอล
SKD11 ชุบแข็ง ได้จากสมการ (2)



รูปที่ 3 ลักษณะและตัวแปรในการวัดรอยสึกหรอของ
ลูกบอล

$$V = \pi h^2 \left(r - \frac{h}{3} \right) \quad (2)$$

เมื่อ V คือ ปริมาณการสึกหรอ, mm^3

r คือ รัศมีของลูกบอลทดสอบ, mm

h คือ ความสูงจากส่วนโค้งของผิวลูกบอลจนถึง
รอยสึกหรอ, mm

โดยค่าความสูงจากส่วนโค้งของผิวลูกบอลจนถึงรอย
สึกหรอสามารถหาได้จากสมการ (3) เมื่อ s คือ เส้นผ่าน
ศูนย์กลางของรอยสึกหรอที่เกิดขึ้น มีหน่วยเป็น mm

$$h = \frac{8r - \sqrt{64r^2 - 16s^2}}{8} \quad (3)$$

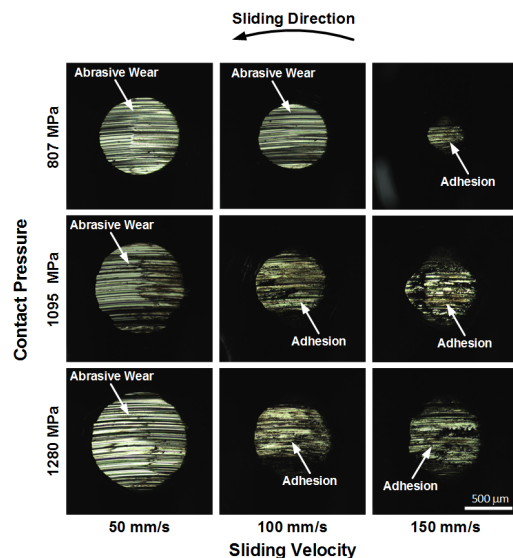
3. ผลและการวิเคราะห์

3.1 ลักษณะความเสียหายของผิวบอล

จากการทดสอบ Pin-on-Disk ที่ระยะทางการทดสอบ
100 m เมื่อนำลูกบอลมาตรวจสอบลักษณะความเสียหายที่
เกิดกับผิวสัมผัสดังรูปที่ 4 พบว่ามีรูปแบบความเสียหายที่
แตกต่างกันตามค่าความเร็วในการเลื่อนไถลและค่าความดัน
สัมผัสที่ให้แก่ผิวคู่สัมผัส คือ มีการสึกหรอแบบขัดถู
(Abrasive Wear) กับเกิดการยึดติด (Adhesion) ของวัสดุ
ชิ้นงานบนผิวของลูกบอล ซึ่งโดยทั่วไปวัสดุที่เคลื่อนที่
สัมผัสกันจะเกิดการสึกหรอในลักษณะขัดถูและเกิดการยึด
ติดของวัสดุชิ้นงาน [1,27,29] แต่ปัญหาการขึ้นรูปเหล็กกล้า
ไร้สนิมหรือวัสดุที่มีค่าความแข็งแรงสูงมักพบปัญหาวัสดุ
ชิ้นงานเกาะและยึดติดกับผิวของวัสดุเครื่องมือดังรายงานใน
งานวิจัยที่ผ่านมา [30-32]

จากผลการทดสอบพบว่าปัญหาวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้า
ไร้สนิมเกรด 430 HL เกาะและยึดติดกับผิวของวัสดุ
เครื่องมือเกรด SKD11 ชุบแข็ง จะรุนแรงเมื่อผิวคู่สัมผัส
เคลื่อนที่สัมผัสกันด้วยความเร็วสูงและมีค่าความดันผิวคู่
สัมผัสสูงดังพิจารณาได้จากลักษณะความเสียหายของ
ผิวสัมผัสลูกบอลในรูปที่ 4 นอกจากลักษณะความเสียหายที่
เกิดกับผิวสัมผัสของลูกบอลวัสดุเครื่องมือชุบแข็งแล้ว เมื่อ
พิจารณาความกว้างของรอยสึกหรอของลูกบอลที่สภาวะ
เงื่อนไขการทดลองที่ต่างกันพบว่าเมื่อความเร็วในการ

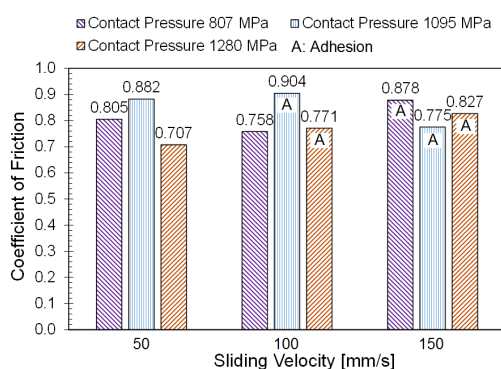
เลือนไกลเพิ่มขึ้นรอยสึกหรอของลูกบอลจะมีขนาดเล็กลง ในขณะที่เมื่อเกิดความดันที่ผิวคู่สัมผัสสูง รอยสึกหรอที่เกิดขึ้นบริเวณผิวสัมผัสของลูกบอลจะมีขนาดใหญ่ขึ้น



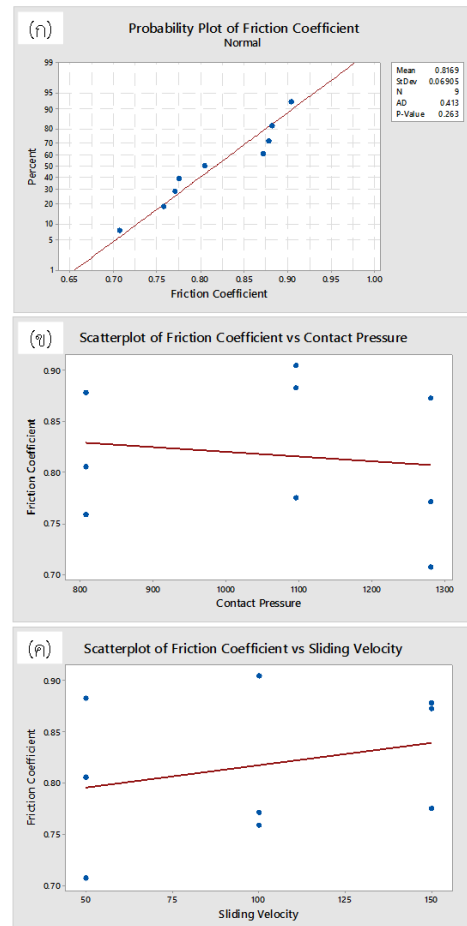
รูปที่ 4 ลักษณะความเสียหายที่เกิดกับผิวลูกบอลที่ระยะทางการทดสอบ 100 m

3.2 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวคู่สัมผัส

ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวคู่สัมผัสวัสดุเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 ชุบแข็ง ที่เคลื่อนที่สัมผัสกับวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก 430 HL ภายใต้สภาวะความดันสัมผัสและความเร็วในการเลื่อนไกลต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวคู่สัมผัส



(ง) Correlation: Friction Coefficient, Contact Pressure, Sliding Velocity

Friction Coefficient	
Contact Pressure	-0.139
Sliding Velocity	0.722
Cell Contents	
Pearson correlation	0.274
P-Value	0.476

รูปที่ 6 ผลการทดสอบทางสถิติ (ก) การทดสอบการแจกแจงปกติของข้อมูล (ข) และ (ค) การวิเคราะห์ด้วยแผนภาพการกระจายตัวของข้อมูล (ง) ผลการวิเคราะห์สหสัมพันธ์

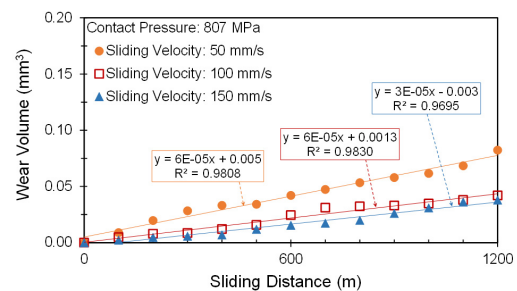
จากรูปที่ 5 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ได้ภายใต้สภาวะที่ศึกษามีค่าแตกต่างกันอยู่ในช่วง 0.707 ถึง 0.904 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกราฟพบว่าความดันสัมผัสและความเร็วเลื่อนไกลไม่มีแนวโน้มความสัมพันธ์ต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานในลักษณะความสัมพันธ์เชิง

เส้น เมื่อนำค่าที่ได้ไปทดสอบทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ดังผลการทดสอบในรูปที่ 6 พบว่า (ก) ชุดข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ (ข) ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายมีแนวโน้มที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นทางลบกับความดันสัมผัส (ค) ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายมีแนวโน้มที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นทางบวกกับความเร็วเลื่อนไถล แต่เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ดังรูปที่ 6 (ง) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ได้อยู่ในระดับต่ำมาก คือ 0.139 และ 0.274 ในกรณีวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายกับความดันสัมผัส และกรณีวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายกับความเร็วเลื่อนไถลตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่า P-Value ของทั้งสองกรณีพบว่ามีความมากกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนด (0.05) ซึ่งแปลความหมายได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายไม่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับความดันสัมผัสและความเร็วในการเลื่อนไถลของวัสดุคู่สัมผัสเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นเกรด SKD11 ชุบแข็งกับเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก 430 HL ซึ่งสอดคล้องกับเอกสารอ้างอิง [3] ที่รายงานว่าความดันสัมผัสไม่มีอิทธิพลที่ชัดเจนต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายแต่ไม่ได้อธิบายเหตุผลประกอบ ซึ่งจากผลการทดลองในงานวิจัยนี้และรายงานในเอกสารอ้างอิง [3] ไม่สอดคล้องกับสมการ (1) ทั้งนี้เอกสารอ้างอิง [34] ได้อธิบายว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายเป็นสมบัติของวัสดุที่ขึ้นกับตัวแปรหลายตัว นอกเหนือจากค่าความดันสัมผัสที่เกิดระหว่างผิวคู่สัมผัส เช่น อุณหภูมิที่เกิด ณ จุดสัมผัสขณะผิววัสดุคู่สัมผัสเคลื่อนที่สัมผัสกัน รวมถึงสภาพผิวของวัสดุผิวคู่สัมผัส เป็นต้น จากรูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่าสภาพผิวของวัสดุผิวคู่สัมผัสมีความแตกต่างกันเนื่องจากเกิดการยึดติดของวัสดุชิ้นงานบนผิวของวัสดุแม่พิมพ์ในแต่ละเงื่อนไขการทดลองที่แตกต่างกัน และการเกิดการยึดติดเป็นรูปแบบที่ไม่ตายตัว [35] ดังนั้นจึงเป็นเหตุผลที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายไม่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับความดันสัมผัสและความเร็วในการเลื่อนไถลของวัสดุคู่สัมผัสที่ศึกษาในงานวิจัยนี้

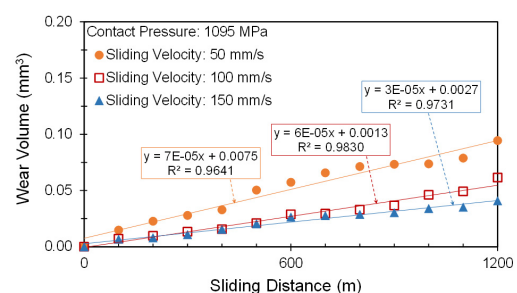
ในกรณีที่ผิวของวัสดุเครื่องมือเกิดการยึดติดของวัสดุชิ้นงานจะเกิดความเสียหายระหว่างผิวคู่สัมผัสสูง ทำให้ต้องใช้แรงในการเอาชนะแรงยึดติดระหว่างผิวคู่สัมผัสของวัสดุเครื่องมือกับวัสดุชิ้นงานสูงจึงส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายระหว่างผิวคู่สัมผัสสูงด้วยซึ่งได้อธิบายไว้ในเอกสารอ้างอิง [2] นั้น เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายของวัสดุผิวคู่สัมผัสที่สภาวะเงื่อนไขที่เกิดการยึดติดของวัสดุชิ้นงาน (A) บนผิววัสดุเครื่องมือพบว่าผลการศึกษามีความแตกต่างกับงานวิจัยดังกล่าว คือ การยึดติดของวัสดุชิ้นงานบนผิววัสดุเครื่องมือไม่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายที่สูงขึ้น

3.3 พฤติกรรมการสึกหรอของวัสดุเครื่องมือ

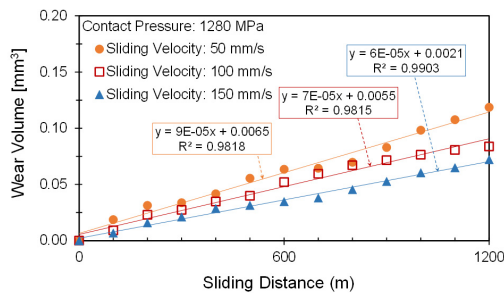
พฤติกรรมการสึกหรอของวัสดุเครื่องมือแสดงด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการสึกหรอกับระยะทางการเคลื่อนที่ดังแสดงในรูปที่ 7-9



รูปที่ 7 ปริมาณการสึกหรอของวัสดุเครื่องมือที่ความดันสัมผัส 807 MPa



รูปที่ 8 ปริมาณการสึกหรอของวัสดุเครื่องมือที่ความดันสัมผัส 1095 MPa



รูปที่ 9 ปริมาณการสึกหรอของวัสดุเครื่องมือที่ความดันสัมผัส 1280 MPa

ปริมาณการสึกหรอของวัสดุเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 ชูบแข็งกับระยะทางการเคลื่อนมีความสัมพันธ์เชิงเส้นทางบวกในทุกสภาวะเงื่อนไขการทดลอง โดยสามารถพิจารณาได้จากค่าสถิติ R^2 ที่มีค่ามากกว่า 0.95 ดังนั้นเมื่อวัสดุเหล็กกล้าเครื่องมือชูบแข็งเคลื่อนที่ไปบนวัสดุชิ้นงาน ด้วยระยะทางการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น วัสดุเหล็กกล้าเครื่องมือ จะเกิดการสึกหรอในปริมาณเพิ่มขึ้นด้วยซึ่งสอดคล้องกับเอกสารอ้างอิง [1,2,3,5,29]

จากสมการเส้นตรงของเส้นกราฟความสัมพันธ์ของแต่ละสภาวะเงื่อนไขการทดลอง เมื่อพิจารณาปริมาณการสึกหรอของวัสดุเครื่องมือเทียบกับระยะทางการเคลื่อนที่พบว่า ปริมาณการสึกหรอจะแปรผันตามค่าความดันสัมผัสซึ่งสอดคล้องกับเอกสารอ้างอิง [1,3] คือ ในสภาวะที่เกิดความดันระหว่างผิวคู่สัมผัสสูงจะส่งผลให้ปริมาณการสึกหรอของวัสดุเครื่องมือสูง ในขณะที่ปริมาณการสึกหรอจะแปรผกผันกับความเร็วในการเคลื่อนไถของวัสดุคู่สัมผัส

จากผลการศึกษาพฤติกรรมทางไตรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสวัสดุเครื่องมือกับวัสดุชิ้นงาน ปัญหาสำคัญในการทำงานกับวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก 430 HL พบว่ามีปัญหาการยึดติดของวัสดุชิ้นงานบนผิววัสดุทำแม่พิมพ์ โดยเฉพาะในสภาวะที่เกิดความดันระหว่างผิวคู่สัมผัสสูงที่ส่งผลให้วัสดุชิ้นงานที่มีค่าความแข็งน้อยกว่าวัสดุทำแม่พิมพ์เกิดการเปลี่ยนรูปถาวรแล้วหลุดไปเกาะและยึดติดกับวัสดุแม่พิมพ์ซึ่งมีค่าความแข็งที่สูงกว่า แต่ยัง

ไม่เป็นที่แน่ชัดว่าความเร็วในการเคลื่อนไถของวัสดุเครื่องมือบนผิววัสดุชิ้นงานส่งผลต่อการเกิดการยึดติดดังกล่าวหรือไม่ จากงานวิจัยที่ผ่านมา [14-16,25,33] ได้รายงานว่าตัวแปรที่ส่งผลต่อการเกิดการยึดติดของวัสดุชิ้นงานบนผิวของวัสดุเครื่องมือได้แก่ ความดันสัมผัสที่เกิดระหว่างผิวของวัสดุเครื่องมือกับวัสดุชิ้นงาน ระยะทางการเคลื่อนที่ของวัสดุเครื่องมือบนวัสดุชิ้นงาน ค่าความหยาบผิว และโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเครื่องมือ แต่ยังไม่มีการกล่าวถึงความเร็วเคลื่อนไถ ดังนั้นเพื่อให้เข้าใจถึงอิทธิพลของตัวแปรดังกล่าวหรือความเร็วที่ใช้ในการขึ้นรูปโลหะต่อการเกิดการยึดติดของวัสดุชิ้นงาน ผู้ศึกษาจะได้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรดังกล่าวในกระบวนการขึ้นรูปโลหะด้วยการทดสอบขึ้นรูปจริงต่อไป

4. สรุป

จากการศึกษาอิทธิพลของความเร็วในการเคลื่อนไถและความดันสัมผัสที่ส่งผลต่อพฤติกรรมทางไตรบอโลยีของผิวสัมผัสวัสดุเครื่องมือเหล็กกล้า SKD11 ชูบแข็งและวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก 430 HL ด้วยวิธีการทดสอบ Pin-on-Disk สามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) ความเสียหายของผิววัสดุเครื่องมือที่เคลื่อนที่สัมผัสบนวัสดุชิ้นงานมี 2 รูปแบบ คือ การสึกหรอแบบขีดถูและการยึดติดของวัสดุชิ้นงาน
- 2) ความเร็วในการเคลื่อนไถและความดันสัมผัสไม่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวคู่สัมผัสของวัสดุเครื่องมือกับวัสดุชิ้นงาน
- 3) การยึดติดของวัสดุชิ้นงานบนผิววัสดุเครื่องมือไม่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่สูงขึ้น
- 4) ปริมาณการสึกหรอของวัสดุเครื่องมือกับระยะทางการเคลื่อนที่ที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นทางบวก
- 5) ในสภาวะที่เกิดความดันระหว่างผิวคู่สัมผัสสูงจะส่งผลให้ปริมาณการสึกหรอของวัสดุเครื่องมือสูง ในขณะที่ปริมาณการสึกหรอจะแปรผกผันกับความเร็วในการเคลื่อนไถของวัสดุคู่สัมผัส

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Lange, *Handbook of Metal Forming*. New York, McGraw-Hill, 1985.
- [2] V. Premanond, "Tribological Behavior of tool materials against stainless steel workpiece material in a ball-on-disk model wear device," in *the 18th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand*, Khon Kaen, 2004, p. 5.
- [3] J. Sriprasird, A. Khantachawana, V. Premanond and P. Kaewtatip, "Wear behavior of contacting between thin film coating on SKD11 ball and 304 stainless steel disk," (in Thai), *Songklanakarin J. Sci. Technol.*, vol. 29, no. 6, pp. 1591-1598, 2007.
- [4] K. Lawanwong, B. Sresomroeng and V. Premanond, "The study type of hard film coating and strength of materials to wear volume by ball-on-disk technique," (in Thai), *Engineering Journal of Research and Development*, vol. 20, no. 4, pp. 85-91, 2009.
- [5] B. Sresomroeng and N. Angsuseranee, "Ball-on-Disk simulation to study tribological behavior in sheet metal forming," in *the 1st Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi National Conference*, Phranakhon Si Ayutthaya, 2016, pp. 96-103.
- [6] L. Wang, J. Cai, J. Zhou and J. Duszczek, "Characteristics of the friction between aluminium and steel at elevated temperatures during ball-on-disc tests," *Tribol Lett.*, Vol. 36, pp. 183-190, 2009.
- [7] L. Wang, Y. He, J. Zhou and J. Duszczek, "Effect of temperature on the frictional behavior of an aluminium alloy sliding against steel during ball-on-disc tests," *Tribology International*, vol. 43, pp. 299-306, 2010.
- [8] R. Wang, H. J. Mei, R. S. Li, Q. Zhang, T. F. Zhang and Q. M. Wang, "Friction and wear behavior of AlTiN-coated carbide balls against SKD11 hardened steel at elevated temperatures," *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, vol. 31, pp. 1073-1083, 2018.
- [9] L. Yan, Y. Liu and E. Liu, "Wear behavior of martensitic NiTi shape memory alloy under ball-on-disk sliding tests," *Tribology International*, vol. 66, pp. 219-224, 2013.
- [10] D. Toboła, W. Brostow, K. Czechowski and P. Rusek, "Improvement of wear resistance of some cold working tool steels," *Wear*, vol. 382-383, pp. 29-39, 2017.
- [11] J. Moravčíková, R. Moravčík, M. Kusý and M. Necpal, "Influence of laser surface texturing on tribological performance of tool steels," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 27, pp. 5417-5426, 2018.
- [12] M. Alvarez-Vera, J. C. Torres-Méndez, H. M. Hdz-García, R. Muñoz-Arroyo, A. I. Mtz-Enriquez, J. L. Acevedo-Dávila, M. A. L. Hernandez-Rodriguez, "Wear resistance of TiN or AlTiN nanostructured Ni-based hardfacing by PTA under pin on disc test," *Wear*, vol. 426-427, pp. 1584-1593, 2019.
- [13] F. Hernández, N. Demas, K. Gonzales and A. Polycarpou, "Correlation between laboratory ball-on-disk and full-scale rail performance tests," *Wear*, vol. 270, pp. 479-491, 2011.

- [14] H. Kim, S. Han, Q. Yan and T. Altan, "Evaluation of tool materials, coatings and lubricants in forming galvanized advanced high strength steels (AHSS)," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 57, pp. 299–304, 2008.
- [15] A. Gåård, P. V. Krakhmalev, J. Bergström and N. Hallbäck, "Galling resistance and wear mechanisms – cold work tool materials sliding against carbon steel sheets," *Tribol Lett.*, Vol. 26 no. 1, pp. 67–72, 2007.
- [16] P. Karlsson, A. Gåård and P. Krakhmalev, "Influence of tool steel micro structure on friction and initial material transfer," *Wear*, vol. 319, pp. 12–18, 2014.
- [17] Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus, ASTM G 99 – 95a, 2000.
- [18] T. Altan, S. Oh and H. Gegel, *Metal Forming: Fundamentals and Applications*, Ohio, ASM International, 1995.
- [19] V. Boljanovic, *Sheet Metal Stamping Sies: Die Design and Die-Making Practice*. New York, Industrial Press Inc., 2013.
- [20] Outokumpu, *Handbook of Stainless Steel*, Espoo, Outokumpu Oyj, 2013.
- [21] JFE Steel Corporation. (2020, September 9). Stainless Steels [Online]. Available: <https://www.jfe-steel.co.jp/en/products/stainless/catalog/g1e-001.pdf>
- [22] Juthawan. (2020, September 9). Stainless Steel [Online]. Available: <https://www.juthawan.co.th/product-group/stainless-steel/>
- [23] Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM E8/E8M – 13a, 2013.
- [24] Standard components for press dies 2007.9 – 2008.8 catalog, Misumi Corporation, 2008.
- [25] Y. Abe, W. Daodon, N. Takahashi and K. Mori, "Improvement of seizure resistance by roughening surface of stainless steel drawn cup in ironing using die having lubricant pockets," *Production Engineering Research and Development*, vol. 10, pp.551–562, 2016.
- [26] T. Altan and A.E. Tekkaya, *Sheet Metal Forming Processes and Applications*, Ohio, ASM International, 2012.
- [27] B. Bhushan, *Modern tribology handbook*, Florida, CRC Press LLC, 2001.
- [28] F. Vollertsen and F. Schmidt, "Dry metal forming: definition, chances and challenges," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, vol. 1 no. 1, pp. 59–62, 2014.
- [29] G. W. Stachowiak, *Wear – Materials, Mechanisms and Practice*, Hoboken, John Wiley & Sons Ltd., 2005.
- [30] S. Kataoka, M. Murakawa, T. Aizawa and H. Ike, "Tribology of dry deep-drawing of various metal sheets with use of ceramics tools," *Surface and Coatings Technology*, vol. 177-178, pp. 582–590, 2004.
- [31] B. Podgornik, S. Hogmark and O. Sandberg, "Influence of surface roughness and coating type on the galling properties of coated forming tool steel," *Surface and Coatings*

Technology, vol. 184, no. 2-3, pp. 338–348, 2004.

- [32] B. Podgornik, S. Hogmark and O. Sandberg, “Proper coating selection for improved galling performance of forming tool steel,” *Wear*, vol. 261, no. 1, pp. 5–21, 2006.
- [33] W. Dong, L. Xu, Q. Lin and Z. Wang, “Experimental and numerical investigation on galling behavior in sheet metal forming process,” *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 88, pp. 1101–1109, 2017.
- [34] G. W. Stachowiak and A. W. Batchelor, *Engineering Tribology*, 3rd ed., Massachusetts, Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005.
- [35] N. Angsuseranee, B. Watcharasresomroeng, P. Bunyawanichkul and S. Chartniyom, “Tribological behavior of tool steel substrate and solid films against 304 BA austenitic stainless steel under dry sliding,” *Advances in Tribology*, vol. 2020, pp. 1–11, 2020.

การจัดเส้นทางขนส่งสินค้าด้วยวิธีการผสมผสาน สำหรับผู้ประกอบการขนาดเล็ก Vehicles Routing Using Composite Approach For Small Businesses

ธนากร ชีวพิทักษ์ผล สิริเดช ชาตินิยม*

สาขาวิชาวิศวกรรมโลจิสติกส์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ นครนายก 26120

Thanakorn Cheewapitakphol Siradej Chartniyom*

Logistics Engineering, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering

Srinakharinwirot University, Nakhon Nayok 26120

*Corresponding author Email: siradej@swu.ac.th

(Received: August 14, 2020; Accepted: December 15, 2020)

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางรถเพื่อขนส่งสินค้าแบบมีข้อจำกัดด้านขนาดความจุของยานพาหนะ ภายใต้เงื่อนไขที่จำนวนลูกค้าผู้รับสินค้ามีจำนวนทั้งหมด 30 ราย แต่ความต้องการสินค้ารายวันของลูกค้าแต่ละรายเกิดขึ้นแบบสุ่ม แบบจำลองที่สร้างขึ้นมีเป้าหมายเพื่อสร้างเส้นทางขนส่งที่สั้นที่สุด การหาผลลัพธ์กระทำโดยการออกแบบกระบวนการหาผลลัพธ์ตามแนวความคิดผสมผสาน สร้างความสัมพันธ์เชื่อมโยงระหว่างระบบจัดการขนส่งและแก้ปัญหาการจัดเส้นทางด้วยตัวประมวลผลในโปรแกรมสเปรดชีต ซึ่งจะช่วยให้บริษัทตัวอย่างสามารถเข้าใจวิธีการได้ง่ายและใช้งานได้จริง ผลการศึกษาพบว่า การวิเคราะห์ด้วยวิธีเมตาฮีริสติกของตัวประมวลผลสเปรดชีตสามารถจัดเส้นทางจริงในการขนส่งได้สั้นที่สุด การวิเคราะห์ปัญหาตัวอย่างพบว่าสามารถช่วยประหยัดต้นทุนการขนส่งลงจากเดิม 2,253 บาทต่อวัน ซึ่งคิดเป็นอัตราส่วน 8% ของค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นเดิม

คำสำคัญ: ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่ง วิธีผสมผสาน ตัวประมวลผลเอ็กเซล

ABSTRACT

This article presents the capacitated vehicle routing problem that associated with the limit of vehicle capacity. The problem represents a type of actual daily delivery under constraints of maximum of 30 locations and the demand over the locations occurs randomly. The model aims to solve for minimum routing target using the designed solution procedure based on the composite approach, and applies the current transportation management system along with spreadsheet solvers. The proposed solution procedure allows the company to deal easily with actual transportation routes and distances in their daily scheduling tasks. The result of the study shows that a metaheuristic method, within the spreadsheet solver, gives the best performance. The set of sample schedules returns the reduction of 8% in the total transportation cost.

Keywords: Vehicle Routing Problem, Composite Approach, Excel Solver.

1. บทนำ

ในปัจจุบันนี้ อัตราการแข่งขันในด้านสินค้าและบริการเพิ่มมากขึ้นในระบบเศรษฐกิจของแต่ละประเทศ ทำให้ในหลายบริษัทนำเอาการบริหารจัดการห่วงโซ่อุปทานและโลจิสติกส์ (Supply Chain and Logistics) เข้ามาปรับใช้ภายในองค์กรมากยิ่งขึ้น เพื่อใช้ในการพัฒนาและเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันของบริษัท

ปัญหาในการขนส่งสินค้าให้ทันตามเวลาที่กำหนดหรือปัญหาการจัดการเส้นทางการขนส่ง (Vehicle Routing Problem, VRP) [1], [2] นับว่าเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีบทบาทที่สำคัญต่อระบบโลจิสติกส์ของทุกองค์กร ซึ่งโดยทั่วไปจะมุ่งเน้นในส่วนของการจัดการให้ส่งสินค้าถึงลูกค้าให้ได้เร็วที่สุดตามตารางเวลาที่ได้วางแผนไว้ ระบบปัญหานี้ได้รับการศึกษาค้นคว้ามายาวนานกว่า 40 ปี โดยตลอดเวลาได้มีการเพิ่มเงื่อนไขและข้อจำกัดต่างๆ ทำให้แบบจำลองปัญหา VRP ได้รับความนิยมและมีการพัฒนามีความหลากหลายมากขึ้นตามไปด้วย

ผู้วิจัยได้เล็งเห็นถึงความสำคัญของปัญหาการจัดการเส้นทางการเดินรถขนส่งของบริษัทตัวอย่างขนาดเล็ก ที่เป็นผู้นำเข้าและกระจายสินค้าเครื่องดนตรีและกีฬา จากต้นทางหนึ่งตำแหน่งไปยังร้านค้าที่สั่งซื้อในหลายปลายทาง ซึ่งโดยเป้าหมายของการจัดการขนส่งรายวันในธุรกิจนี้ บริษัทควรขนส่งเพื่อกระจายสินค้าไปยังหน้าร้านต่างๆ ให้เสร็จสิ้นภายในวันเดียวภายใต้ต้นทุนที่ต่ำที่สุด ในสภาวะการทำงานปัจจุบัน บริษัทไม่มีการจัดการเส้นทาง คงใช้เพียงประสบการณ์ในการเลือกกลุ่มปลายทางที่คิดว่าขนส่งไปด้วยกันได้

บริษัทใช้โปรแกรมจัดการขนส่ง (TMS) เพียงเพื่อเลือกบันทึก และพิมพ์รายการขนส่งโดยไม่มีการคิดคำนวณเส้นทางที่ดีหรือประเมินต้นทุน จึงทำให้เกิดปัญหาหลายด้านเช่น การบรรจุสินค้าไม่เต็มคันรถ การเดินทางซ้ำซ้อน การเดินทางระยะไกลข้ามเขต นอกจากนี้ บริษัทยังไม่มี

องค์ความรู้ในการใช้เทคนิคใดๆ เพื่อให้จัดเส้นทางได้ดีที่สุดเลย

ลักษณะการเกิดการสั่งซื้อสินค้าจากลูกค้าที่ปลายทางเหล่านั้น และเงื่อนไขต่างๆ ข้างต้นทำให้ปัญหาของบริษัทตัวอย่างสอดคล้องกับระบบปัญหาการจัดการเส้นทางแบบมีเงื่อนไขความจุยานพาหนะ (Capacitated Vehicle Routing Problem, CVRP) และได้ทำการพัฒนาแนวคิดในการเชื่อมโยงข้อมูลการขนส่งที่มีอยู่จากระบบการจัดการขนส่งของบริษัทเพื่อแก้ปัญหาในโปรแกรมคอมพิวเตอร์แบบสเปรดชีต ซึ่งทำให้บริษัทตัวอย่างมีระบบการจัดการเส้นทางขนส่งที่ทำงานได้สมบูรณ์ภายใต้เงื่อนไขตามที่จำเป็น สามารถลดต้นทุนในการกระจายสินค้าและมีความสะดวกรวดเร็วในการ จัดการขนส่งได้

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แบบจำลองของปัญหาการจัดการเส้นทางการขนส่ง

ปัญหาการจัดการเส้นทางขนส่งในรูปแบบดั้งเดิม หรือเรียกกันว่า Classical VRP เป็นการหาจำนวนเส้นทางและลำดับในการส่งสินค้าให้กับลูกค้าต่างๆ ในระบบกระจายสินค้าโดยเริ่มต้นส่งออกจากศูนย์กระจายสินค้าเดียว (Single-depot) และเดินทางไปยังลูกค้าปลายทางหลายจุด (Multiple-location) [3] รถทุกคันจะเริ่มต้นและสิ้นสุดที่จุดเดียวกันคือคลังสินค้ากลาง โดยทราบปริมาณความต้องการสินค้าที่แตกต่างกันของลูกค้าแต่ละราย ภายใต้ข้อจำกัดที่ยานพาหนะมีรูปแบบเดียวกันและบรรทุกสินค้าได้ไม่เกินความจุที่กำหนดไว้ ทั้งนี้การจัดการเส้นทางจะต้องจัดให้ครอบคลุมลูกค้าทุกจุดในเส้นทางที่เลือกออกมาในรอบเดียวโดยให้มีระยะทางต่ำที่สุด

แบบจำลองของ CVRP ที่สอดคล้องกับระบบปัญหาในบทความนี้ [3] สามารถแสดงเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ดังนี้

Minimize (1)

Subject to $\sum_{j=1}^n x_{0j}^k = 1 \quad k = 1, \dots, m$ (2)

$\sum_{i=0}^n x_{ip}^k - \sum_{j=0}^n x_{pj}^k = 0 \quad p = 0, \dots, n; \quad k = 1, \dots, m$ (3)

$\sum_{k=1}^m y_i^k = 1, \quad i = 1, \dots, n$ (4)

$\sum_{i=1}^n q_i y_i^k \leq a_k \quad k = 1, \dots, m$ (5)

$y_i^k \leq \sum_{j=0}^n x_{ji}^k \quad i = 1, \dots, n; \quad k = 1, \dots, m$ (6)

$\sum_{k=1}^m \sum_{i=0}^n x_{ij}^k \geq 1 \quad j = 0, \dots, n$ (7)

$y_i^k \geq 0 \quad i = 1, \dots, n; \quad k = 1, \dots, m$ (8)

$x_{ij}^k \in \{0, 1\} \quad i = 0, \dots, n; \quad j = 0, \dots, n; \quad k = 1, \dots, m$ (9)

โดยที่

n = เซตของจุดส่งสินค้า (Node) ทั้งหมด

i และ j = ดัชนีของจุดส่งสินค้า $i = 1, 2, 3, \dots, n$ และ $j = 1, 2, 3, \dots, n$ โดยที่ $i \neq j$ และ $i = 0$ คือ คลังสินค้ากลาง

d_{ij} = ระยะทางระหว่างจุดขนส่ง i และ j

k = ดัชนีของรถส่งสินค้าจากจำนวนรถทั้งหมด m คัน

a_k = ความจุของรถสินค้าคันที่ k

y_i^k = สัดส่วนของความต้องการสินค้าของลูกค้า i ซึ่งขนส่งด้วยรถขนส่ง k

x_{ij}^k ตัวแปรไบนารี เพื่อตัดสินใจเลือกรถ k โดย $x_{ij}^k = 1$ ถ้าเส้นทาง $i-j$ ถูกจับคู่ขนส่งโดยรถ k เดินทางจากจุดส่งสินค้า i ไปยังจุดส่งสินค้า j ถ้าไม่เช่นนั้น $x_{ij}^k = 0$

K = เมตริกซ์ของ $x_{ij}^k = \sum x_{ij}^k$ ซึ่งจะเทียบเท่ากับคู่เส้นทางที่เชื่อมโยงกันของจุดส่งสินค้า

ฟังก์ชัน (1) เป็นสมการวัตถุประสงค์ที่แสดงแทนผลรวมของระยะทางที่รถแต่ละคันเดินทางระหว่างจุดส่งสินค้า i และ j และกำหนดให้เป็นการหาคำตอบที่ทำให้ระยะทางรวมที่เดินทางสั้นที่สุด (Minimize)

ระบบสมการจะถูกกำหนดขอบเขตโดยสมการขอบข่ายหลายแบบ คือ สมการขอบข่าย (2) กำหนดให้รถขนส่งทุกคันเดินทางออกจากศูนย์กระจายสินค้า ($i = 0$)

และเดินทางไปยังจุดส่งสินค้า j สมการ (3) ควบคุมสมดุลของการใช้งานรถขนส่ง โดยกำหนดให้รถออกและกลับเข้ามาที่ศูนย์กระจายสินค้าเสมอ (ผลต่างรถออกและเข้า = 0) สมการ (4) ควบคุมให้เกิดการขนส่งตามความต้องการสินค้าของลูกค้าครบทั้งหมด

สมการ (5) ควบคุมไม่ให้เกิดการบรรทุกสินค้ารวม (q_i) เกินความจุ (a_k) ของรถคันใด ๆ สมการ (6) ควบคุมให้เกิดการขนส่งตามความต้องการสินค้าไปยังทุกจุดส่งสินค้า สมการ (7) ควบคุมให้เกิดการเดินทางจนครบทุกจุดส่งสินค้าที่เลือกในเส้นทางใด ๆ สมการ (8) กำหนดให้สัดส่วนสินค้าของจุดส่งสินค้าใดๆ ไม่เป็นค่าลบ และเกิดการขนส่งสินค้าไปให้ลูกค้า และสมการ (9) กำหนดให้ตัวแปรตัดสินใจ x_{ij}^k ทุกตัวเป็นตัวแปรแบบไบนารี

2.2 กระบวนการหาผลลัพธ์ของแบบจำลองการจัดเส้นทางรถขนส่ง

2.2.1 กระบวนการหาคำตอบที่ดีที่สุด ได้ถูกคิดค้นไว้ใน [3] และ [4] ซึ่งได้พัฒนาขั้นตอนให้สามารถเลือกเส้นทางรถที่เหมาะสมที่สุด ผลที่ได้จากการแก้ปัญหาขึ้นคือ ทำให้ทราบจำนวนรถที่จะใช้ขนส่ง และปริมาณสินค้าที่ขนส่งของรถแต่ละคัน โดยมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

1) เลือกจุดเริ่มต้นจากคลังสินค้าขึ้นมาหนึ่งจุดให้เป็นจุดลำดับที่หนึ่ง

2) คำนวณค่าของระยะเวลา ระยะทาง หรือค่าใช้จ่ายในการขนส่ง (C_{ij}) โดยที่ค่าใช้จ่ายรวมในการเดินทางระหว่างสองจุด (S_{ij}) จะเป็นไปตามเงื่อนไข $S_{ij} = C_{i0} + C_{0j} + C_{ij}$ สำหรับ $i, j = 2, 3, \dots, n$

3) เรียงลำดับค่า S_{ij} , จากมากไปหาน้อย

4) สร้างเส้นทางโดยเพิ่มจุดขนส่งลงในเส้นทาง โดยไล่ลำดับเชื่อมจุดขนส่ง i และ j ที่มีค่า S_{ij} มากที่สุดก่อน จนกว่าจะถึงข้อจำกัดจำนวนจุดขนส่งหรือบรรทุกเต็มความจุรถขนส่ง แล้วจึงเริ่มเส้นทางใหม่

5) ทำซ้ำจนกว่าจะจัดเส้นทางได้ครบ

อย่างไรก็ตาม การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะขึ้นกับข้อจำกัดและเงื่อนไขต่างๆ ของธุรกิจที่มีความแตกต่างกันไป และจะมองเห็นได้ว่าการดำเนินงานด้านคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนและผลลัพธ์ที่ดีที่สุดนั้น ไม่น่าจะเหมาะสมกับการดำเนินการจริงของธุรกิจ ทางเลือกอื่นที่เป็นไปได้ จึงเป็นการใช้วิธีการฮิวริสติกส์ (Heuristics) หรือเมตาฮิวริสติกส์ (Meta-Heuristics) พร้อมทั้งจัดหาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สามารถช่วยการประมวลผลได้สะดวกรวดเร็ว

2.2.2 การหาผลลัพธ์ด้วยวิธีการแบบฮิวริสติกส์หรือเมตาฮิวริสติกส์

เป็นวิธีการที่อาศัยการกำหนดกฎเกณฑ์บางประการขึ้นมาเพื่อใช้ในการแก้ปัญหา สามารถแก้ปัญหาได้รวดเร็ว และสามารถใช้กับปัญหาที่มีขนาดใหญ่ คำตอบที่ได้จะไม่ใช่ว่าคำตอบที่ดีที่สุดแต่ก็อยู่ในระดับที่ยอมรับได้และเหมาะสมกับการดำเนินธุรกิจ การแก้ปัญหาด้วยวิธีการฮิวริสติกส์หรือเมตาฮิวริสติกส์ [1], [5-7] สามารถพบได้ในรูปแบบดังต่อไปนี้

1) การสร้างทัวร์ (Tour Construction Procedure) เป็นเทคนิคในการค้นหาเส้นทางที่เป็นไปได้ เช่น Saving Method, Nearest Neighborhood Procedure, Nearest Insertion Procedure, และ วิธีการ Two-Phase algorithm ซึ่งแบ่งการหาคำตอบเป็นสองระดับที่

ต่อเนื่องกัน คือ การจัดกลุ่ม (Clustering) และการกำหนดเส้นทาง (Routing)

2) การปรับปรุงเส้นทาง (Tour Improvement Procedure) เป็นการนำเส้นทางเดินรถที่มีอยู่แล้วซึ่งอาจไม่ใช่คำตอบที่ดีที่สุดมาปรับปรุงเส้นทาง โดยการสลับหรือแลกเปลี่ยน node เพื่อให้ได้เส้นทางใหม่ที่เป็นคำตอบที่ดีกว่าเดิม วิธีการนี้นิยมใช้เพื่อลดระยะเวลาการวิเคราะห์ปัญหา

3) วิธีผสมผสาน (Composite Procedure) เป็นวิธีการจัดเส้นทางที่นำเทคนิคในการวิเคราะห์ปัญหาของทั้งการสร้างเส้นทางและปรับปรุงเส้นทางมาผสมผสานกันเพื่อลดระยะเวลาในการแก้ปัญหา โดยเริ่มต้นกำหนดเส้นทางเดินรถด้วยวิธีการสร้างเส้นทางและปรับปรุงเส้นทางที่ได้จากขั้นตอนด้วยวิธีการปรับปรุงเส้นทาง

4) วิธีเมตาฮิวริสติกส์ซึ่งพัฒนามาจากการเลียนแบบกระบวนการในธรรมชาติ [8] เช่น Ant Algorithm, Genetic Algorithms, หรือ Simulated Annealing ซึ่งหลายวิธีการในกลุ่มนี้สามารถทดแทนวิธีการดั้งเดิมใน 1) และ 2) ได้ดีมาก และในปัจจุบัน เมตาฮิวริสติกส์ได้ถูกพัฒนาให้ใช้งานง่ายและสอดคล้องไว้ในโปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับการคำนวณ เช่น Microsoft Excel (Solver)

3 การดำเนินงานวิจัย

3.1 การกำหนดเงื่อนไขของระบบปัญหาการจัดเส้นทางของบริษัทตัวอย่าง

จากการพิจารณากระบวนการและขั้นตอนการจัดส่งสินค้าของบริษัทตัวอย่าง สามารถกำหนดขอบเขตและเงื่อนไขของระบบปัญหาได้ดังนี้

1) เป็นปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งรูปแบบมาตรฐาน ซึ่งมีเงื่อนไขด้านขนาดการบรรจุของยานพาหนะ ต้องการหาจำนวนเส้นทางและลำดับในการส่งสินค้าให้กับลูกค้าต่างๆ ในระบบกระจายสินค้าโดยเริ่มต้นส่งออกจากศูนย์กระจายสินค้าของบริษัท และเดินรถไปยังลูกค้าซึ่งเป็นร้านค้าปลีกทางหลายจุด (Single DC – Multiple Retailers) โดยใช้รถขนส่งขนาดหลักเล็กทุกคัน และมีรถขนส่งเพียงพอยู่เสมอ

2) เป็นการวางแผนการขนส่งรายวัน ที่มีจำนวนร้านค้าปลายทางในระบบสูงสุดคือ 30 ร้านค้า ทำการสั่งสินค้าจากศูนย์กระจายสินค้าตามความต้องการที่เกิดขึ้นอย่างอิสระ ปัญหาที่จะนำมาทดสอบในบทความนี้เป็นการสุ่มคำสั่งซื้อ 10 ครั้งจากวันที่แตกต่างกัน

3) บริษัทมีการแบ่งเขตการส่งสินค้าออกเป็นเขตพื้นที่ส่งสินค้าโดยใช้ประสิทธิภาพของพนักงานในการเลือกจัดเรียงสินค้าในแต่ละเส้นทางด้วยโปรแกรม TMS ซึ่งทำให้เกิดค่าใช้จ่ายสูงในการขนส่งสินค้าไปยังเขตพื้นที่นั้นๆ แต่ในงานวิจัยนี้สามารถใช้การแบ่งเขตแบบ Clustering ช่วยได้เพื่อรวมกลุ่มปริมาณสินค้าที่เกิดขึ้นในแต่ละวันให้ใกล้เคียงกับขนาดความจุของรถขนส่งได้

4) มีรถขนส่งหลายคันซึ่งเพียงพอต่อการขนส่งสินค้าทั้งหมด แต่เนื่องจากการทำตามวิธีการดั้งเดิมในข้อ 3 จึงไม่สามารถดำเนินการที่คุ้มค่าต้นทุนที่เหมาะสมได้

5) บริษัทมีการใช้งานระบบจัดการขนส่ง (Transportation Management System), [9] อยู่แล้วเพื่อการจัดเรียงคำสั่งซื้อ คำสั่งส่งงาน บันทึกการขนส่งพิมพ์รายการจัดส่งในเส้นทาง และโปรแกรมจะมีฟังก์ชันจัดลำดับหรือเลือกกลุ่มปลายทางแบบง่ายๆ (Sequencing or Clustering) จนกระทั่งจำนวนสินค้าเต็มความจุของรถขนส่งได้ โปรแกรมจัดการขนส่งนี้จะมีข้อมูลการสั่งซื้อ ร้านค้าปลายทาง ตำแหน่งของร้านค้า ซึ่งสามารถนำออกมาใช้เพื่อเป็นข้อมูลนำเข้าในการหาเส้นทางและระยะทางได้

6) ผลลัพธ์ที่มีรูปแบบและลักษณะการบรรจุหีบห่อเป็นมาตรฐาน บริษัทตัวอย่างจึงสามารถสร้างวิธีการคำนวณปริมาตรของหีบห่อสินค้า ไว้เป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับการคำนวณ แสดงตัวอย่างในรูปที่ 1

3.2 การพัฒนากระบวนการหาผลลัพธ์ของแบบจำลองการจัดเส้นทางรถขนส่ง

ผู้วิจัยได้ออกแบบกระบวนการหาผลลัพธ์ภายใต้แนวความคิดของวิธีการผสมผสาน (Composite

Procedure) โดยอิงจากเทคนิคหลายแบบที่มีใช้งานอยู่จริงในปัจจุบัน โดยทำการผสมผสานการใช้ระบบสารสนเทศระหว่างระบบ TMS, Excel Solver และ Google Map ให้เป็นกระบวนการหาคำตอบที่มีลำดับขั้นตอนที่เหมาะสม (Procedure) ที่ใช้งานได้จริงกับลักษณะการประกอบธุรกิจขนาดเล็กที่มีการกระจายสินค้ารายวันตามคำสั่งซื้อที่เกิดขึ้น และใช้จำนวนจุดขนส่งทดสอบ 30 จุด ซึ่งจัดเป็นปัญหาขนาดเล็กแต่เพียงพอกับลักษณะธุรกิจกระจายสินค้าที่มีขนาดเล็กโดยที่ธุรกิจไม่จำเป็นต้องลงทุนเพื่อซื้อโปรแกรมเฉพาะสำหรับการจัดการขนส่ง ทั้งนี้หากเป็นระบบกระจายสินค้าในธุรกิจขนาดกลางหรือขนาดใหญ่ จะมีจุดขนส่งจำนวนมาก หรือมีลักษณะการกระจายสินค้าที่ซับซ้อนกว่า ผู้ประกอบการจะมีทางเลือกในการลงทุนเพื่อซื้อโปรแกรมจัดการขนส่งที่มีราคาสูงและประสิทธิภาพสูงกว่าได้

กระบวนการหาผลลัพธ์ทำการแยกส่วนการคำนวณเพื่อสร้างเส้นทาง และการปรับปรุงเส้นทางออกจากกัน และใช้การส่งถ่ายข้อมูลระหว่างระบบจัดการขนส่งที่ใช้งานอยู่จริงกับแบบจำลองปัญหาการจัดการเส้นทางในโปรแกรมสำเร็จรูป Microsoft Excel ทั้งนี้เพื่อลดความซับซ้อนของระบบสมการทางคณิตศาสตร์ และความยุ่งยากในการหาผลลัพธ์ที่ดีที่สุดจากระบบสมการ ซึ่งทำให้บุคลากรที่เกี่ยวข้องสามารถสร้างแผนการขนส่งรายวันได้โดยใช้เพียงความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับระบบการขนส่งของบริษัทตัวอย่างเท่านั้น

กระบวนการหาผลลัพธ์ที่ได้ออกแบบ จะประกอบด้วย 5 ขั้นตอน ดังนี้

1) กำหนดตำแหน่ง node ในระบบ Google Map [10], [11] เพื่อสร้างเมตริกซ์ระยะทางจากคลังสินค้า (node 1) และระยะทางระหว่างที่ตั้งร้านค้าแต่ละราย (node i) ตัวอย่างเมตริกซ์ระยะทางระหว่างจุดขนส่งต่างๆ แสดงในรูปที่ 2

Image	Type	WxLxH (cm.)	Volume(cm ³)
	A	41x34x22	30,668
	B	44x63x42	116,424

รูปที่ 1 การกำหนดรูปแบบหีบห่อมาตรฐานและการคำนวณปริมาตรในการขนส่ง

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Location	1	2	3	4	5	6	7
2	1	0	34	36	37	31	33	36
3	2	34	0	29	23	22	25	24
4	3	36	29	0	17	12	18	17
5	4	37	23	17	0	32	30	29
6	5	31	22	12	32	0	26	24
7	6	33	25	18	30	26	0	19
8	7	36	24	17	29	24	19	0

รูปที่ 2 เมตริกซ์ระยะทางวัดจาก Google Map และสร้างตารางใน Microsoft Excel

2) ใช้ฟังก์ชันของระบบ TMS ทำการเลือกพื้นที่แบบ Clustering โดยแบ่งพื้นที่ของกลุ่มร้านค้าและเรียงลำดับที่เป็นไปได้ในเส้นทางเดียวกัน โดยที่ไม่ขัดแย้งกับเงื่อนไขของระบบปัญหาและการทำงานจริง สร้างเป็นเซตของคำตอบเบื้องต้น (Initial Solution) และส่งข้อมูลออก (export) ในรูปของไฟล์ข้อมูล Microsoft Excel

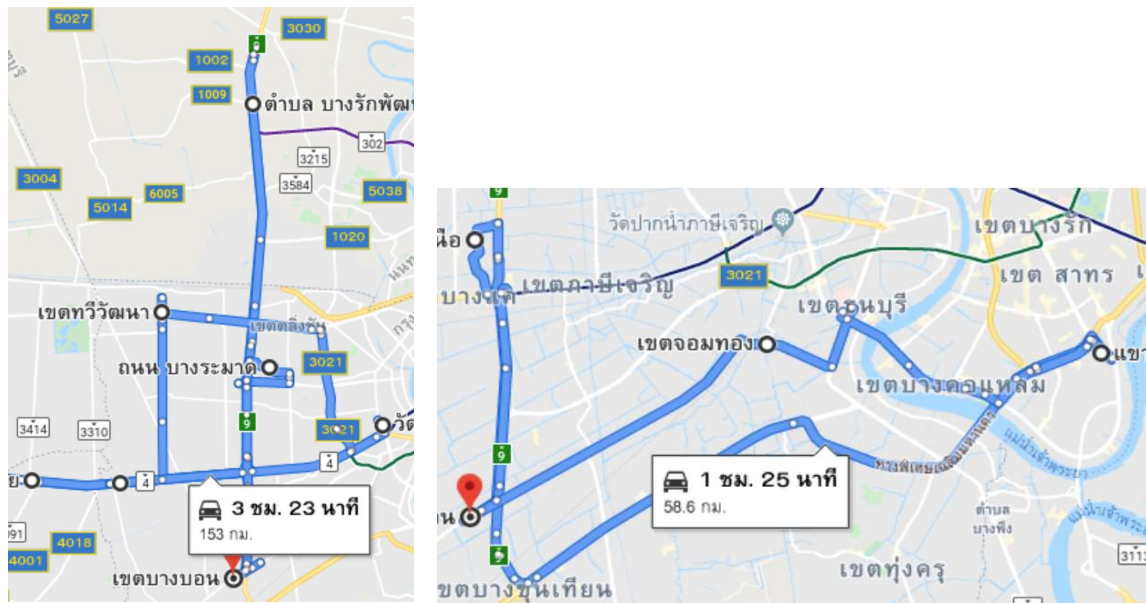
ทั้งนี้ จากการเลือกพื้นที่และสร้างคำตอบเบื้องต้นจากระบบ TMS จะทำให้สมการข้อช่วย (5) ด้านความจุของรถ และสมการ (6) และ (7) ที่เกี่ยวกับจำนวนรถขนส่งทั้งหมด ถูกลดรูปลง และปัญหา VRP จะลดรูปเป็นปัญหา Travelling Saleman (TSP) ซึ่งสามารถใช้ตัว

ประมวลผลสำเร็จรูปในโปรแกรม Microsoft Excel หาคำตอบได้อย่างรวดเร็ว

ตัวอย่างของเซตคำตอบเบื้องต้นแสดงในรูปที่ 3 โดยตัวอย่างรูปทางด้านซ้าย มีคำตอบเบื้องต้นด้วยเส้นทางคลังสินค้า-บางรักพัฒนา-อ้อมน้อย-วัดท่าพระ-ทวีวัฒนา-หนองแขม-บางระมาด-คลังสินค้า ใช้ระยะทาง 153 กิโลเมตร (แสดงในรูปแบบของ Google Map เพื่อให้เห็นกลุ่มและเส้นทางชัดเจน)

3) สร้างแบบจำลองของระบบปัญหา CVRP ในรูปแบบของสมการ (1) - (9) เพื่อเป็นโครงสร้างการคำนวณทางคณิตศาสตร์ในโปรแกรม Microsoft Excel

4) เรียกใช้ Solver ของโปรแกรม Microsoft Excel เพื่อสร้างเส้นทางที่สั้นที่สุด โดยตั้งค่าวัตถุประสงค์ตามสมการที่ (1) เพิ่มสมการข้อช่วย (add constraints) ตามสมการที่ (2) - (4) และเลือกวิธีประมวลผลเป็นเมตาฮิวริสติกส์ (ในโปรแกรม Microsoft Excel Solver เรียกว่า Evolutionary) เพื่อประมวลผลหาผลลัพธ์ที่สามารถปรับปรุงจากเซตคำตอบเบื้องต้น แบบจำลองระบบปัญหาและการเรียกใช้งาน Solver แสดงดังรูปที่ 4



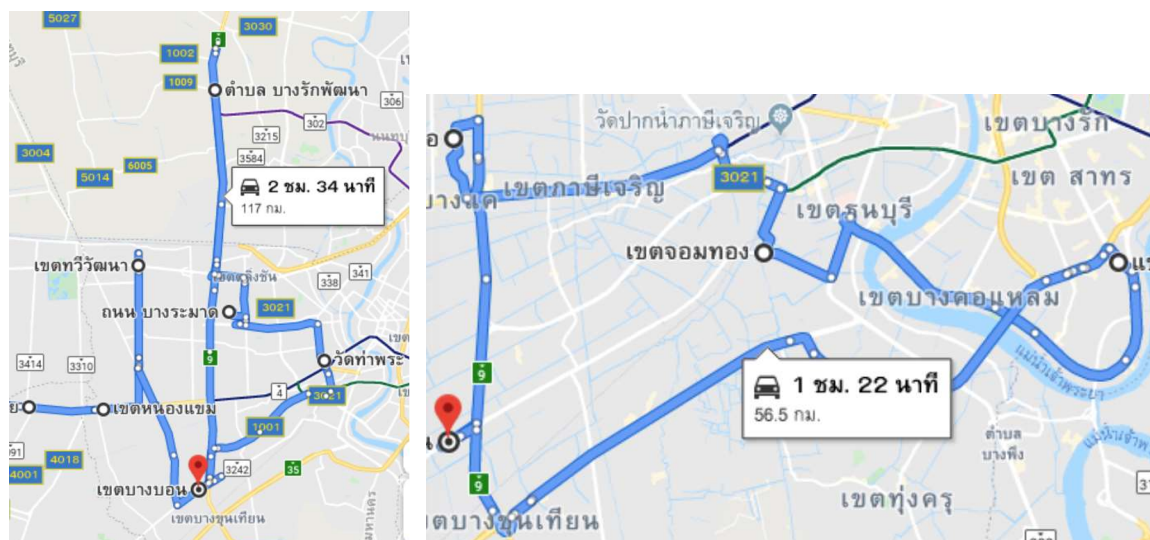
รูปที่ 3 เขตคำตอบเบื้องต้นที่ได้จากการจัดกลุ่มในระบบ TMS

ตัวอย่างของเส้นทางจากการใช้ Solver ด้วยวิธีการ
เมตาดิวริสติกส์แสดงในรูปที่ 5 โดยตัวอย่างรูปทางด้าน
ซ้าย มีคำตอบที่ปรับปรุงให้ดีกว่าด้วยเส้นทาง คลังสินค้า-
อ้อมน้อย-หนองแขม-ทวีวัฒนา-วัดท่าพระ-บางระมาด-

บางรักพัฒนา-คลังสินค้า ใช้ระยะทาง 117 กิโลเมตร
(แสดงในรูปแบบของ Google Map เพื่อให้เห็นกลุ่มและ
เส้นทางชัดเจน)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Location	1	2	3	4	5	6	7		Target			
2	1	0	34	36	37	31	33	36		Min	162		
3	2	34	0	29	23	22	25	24					
4	3	36	29	0	17	12	18	17					
5	4	37	23	17	0	32	30	29					
6	5	31	22	12	32	0	26	24					
7	6	33	25	18	30	26	0	19					
8	7	36	24	17	29	24	19	0					
9													
10	Solution	1	2	3	4	5	6	7		Subje			
11	1	0	0	0	0	0	0	1					
12	2	0	0	0	0	1	0	0					
13	3	0	0	0	1	0	0	0					
14	4	0	1	0	0	0	0	0					
15	5	0	0	1	0	0	0	0					
16	6	1	0	0	0	0	0	0					
17	7	0	0	0	0	0	1	0					
18													

รูปที่ 4 แบบจำลองระบบปัญหาการจัดเส้นทางและการเรียกใช้ Solver เพื่อปรับปรุงเส้นทาง



รูปที่ 5 คำตอบเส้นทางโดยการใช้ Solver ด้วยวิธีการเมตาฮิวริสติกส์

5) นำคำตอบที่ได้จาก Solver เส้นทางและลำดับการขนส่งที่ร้านค้าเป้าหมาย บ่อนกลับเข้าสู่ระบบจัดการขนส่ง TMS เพื่อให้เห็นกลุ่มของสินค้าที่เดินทางด้วยรถคันเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 6 และให้ระบบ TMS สร้างเป็น

แผนงานการขนส่งสำหรับวันนั้นๆ และสามารถสร้างกราฟฟิคใน Google Map เพื่อแสดงเส้นทางและตำแหน่งร้านค้าเป้าหมาย ประกอบกับแผนการขนส่งรายวันได้

...	ลบ	ฉนวน	ชื่อลูกค้า	จังหวัด	เลขที่ Invoice	จำนวน	ปริมาตร	ขนส่ง	คืน	ชำระบัญชี	จำนวนเงิน
☒	☐	วันนี้	AAAAA	กรุงเทพมหานคร	IN262080380	B-1ก	116424		☐		5,280.00
☒	☐		BBBBB		2SL201908002			Logis1	☐		0.00
☒	☐		CCCCC	กรุงเทพมหานคร				Logis1	☐		0.00
☒	☐		DDDDD			D-6ฟอ	2472192		☐		0.00

รูปที่ 6 ตัวอย่างการกำหนดลำดับในระบบ TMS ด้วยคำตอบเส้นทางขนส่งจาก Solver

4 ผลการวิจัย

กระบวนการหาผลลัพธ์ที่ได้ออกแบบในหัวข้อ 3.2 ประกอบด้วย 1) ส่วนของการสร้างเซตคำตอบเส้นทางเบื้องต้น ซึ่งดำเนินการโดยระบบ TMS ซึ่งเซตคำตอบนี้มีความใกล้เคียงกับการเลือกเส้นทางโดยประสิทธิภาพของผู้วางแผนการขนส่ง ซึ่งให้ค่าใช้จ่ายการขนส่งที่สูง แต่ทำให้ผู้วางแผนสามารถลดรูปของระบบปัญหาให้ง่ายขึ้นได้ และ 2) ส่วนของการปรับปรุงเส้นทางด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป ผลลัพธ์ที่ดีและเป็นไปได้มากที่สุดจะเป็นไปตามขีดความสามารถของวิธีการหาคำตอบที่เลือกใช้ Solver ซึ่งในงานวิจัยนี้พบว่า การเลือกใช้วิธีแบบเมตาฮิวริสติกส์จะให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าการเลือกใช้วิธี Simplex LP หรือ GRG NonLinear อย่างสม่ำเสมอ

จากการทดสอบกระบวนการหาผลลัพธ์ที่ได้ออกแบบด้วยปัญหาตัวอย่าง (A) – (J) จำนวน 10 เส้นทางแบบสุ่ม ซึ่งขนาดของปัญหาแสดงด้วยจำนวนจุดขนส่งในแต่ละเส้นทาง ผลลัพธ์แสดงให้เห็นค่าผลรวมระยะทางที่สั้นลงไม่ต่ำกว่า 8% ซึ่งหากประเมินเป็นค่าใช้จ่ายโดยคิดราคาน้ำมันขณะเวลาที่ทำการวิจัย จะได้ค่าใช้จ่ายในการขนส่งของเซตคำตอบเบื้องต้นเป็น 28,144 บาท และเซตของเส้นทางที่ปรับปรุงด้วยวิธีเมตาฮิวริสติกส์ ให้ค่าใช้จ่ายเป็น 25,891 บาท ซึ่งสามารถลดต้นทุนด้านการขนส่งได้ในช่วง 8 - 10% เช่นเดียวกัน ทั้งนี้ยังไม่รวมถึงต้นทุนเวลาที่อาจประหยัดได้ในการเดินทางด้วยระยะทางที่สั้นกว่า ผลการเปรียบเทียบคำตอบจากกระบวนการหาผลลัพธ์ที่ได้ออกแบบ แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบระยะทางการขนส่งโดยวิธีปัจจุบัน และการจัดเส้นทางโดยใช้ Excel Solver

เซตคำตอบเส้นทางเบื้องต้น			คำตอบเส้นทางจาก Solver ด้วยวิธีเมตาฮีริสติกส์	
เส้นทาง	Set of Node	ระยะทาง	Set of Node	ระยะทาง
(A)	1-4-2-8-13-7-19-1	153.0	1-2-7-13-8-19-4-1	117.0
(B)	1-3-9-17-1	58.6	1-3-17-9-1	56.5
(C)	1-4-9-20-1	105.0	1-9-20-4-1	96.8
(D)	1-12-19-4-1	72.2	1-12-19-4-1	72.2
(E)	1-8-20-17-1	41.7	1-20-8-17-1	35.5
(F)	1-9-3-6-1	97.6	1-3-6-9-1	95.9
(G)	1-5-14-20-1	94.5	1-20-14-5-1	90.3
(H)	1-12-15-1	16.7	1-12-15-1	16.7
(I)	1-2-6-21-1	131.0	1-6-2-21-1	124.0
(J)	1-16-7-10-12-1	41.7	1-16-7-10-12-1	41.7
ระยะทาง		812.0		746.9

5. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้เทคนิคการวิจัยดำเนินงานในภาคอุตสาหกรรม โดยได้ศึกษาปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งแบบ Capacitated Vehicle Routing ในธุรกิจขนาดเล็กซึ่งเป็นผู้กระจายสินค้าหีบห่อขนาดใหญ่ ไปยังลูกค้าประจำซึ่งเป็นร้านค้าปลีกทาง ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งในรูปแบบเดียวกันนี้เป็นปัญหาที่ซับซ้อนสำหรับผู้ประกอบการเกินกว่าที่จะลงทุนด้านทรัพยากรและเวลาที่จะหาคำตอบที่ดีที่สุด การวิจัยแสดงให้เห็นว่ากระบวนการแบบ Composite Method ที่ออกแบบโดยผสมผสานการใช้งานโปรแกรมจัดการขนส่ง TMS โปรแกรม Google Map โปรแกรม Microsoft Excel และวิธีการหาคำตอบด้วย Metaheuristic Excel Solver ซึ่งมีใช้งานเป็นปกติในกลุ่มผู้ประกอบการขนาดเล็ก ช่วยทำให้การแก้ปัญหาการจัดการขนส่งง่ายขึ้นมาก สามารถใช้งานได้โปรแกรมสเปรดชีตทั่วไป ผลจากการทดสอบด้วยโจทย์จากการขนส่งจริงพบว่าได้ประสิทธิภาพด้านระยะทางที่สั้นลงไม่ต่ำกว่า 8% และเมื่อประเมินค่าใช้จ่ายก็สามารถลดค่าใช้จ่ายลงได้ในระดับที่เทียบเคียงกัน

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้เป็นผลงานวิจัยจากโครงการฝึกงานแบบสหกิจศึกษา สาขาวิศวกรรมโลจิสติกส์ ซึ่งได้รับการสนับสนุนด้านการฝึกงาน สถานที่ ข้อมูล และคำแนะนำต่างๆ จากผู้บริหารและบุคลากรทุกท่านของ บริษัท แลนด์ไคส์ปอร์ต แอนด์ มิวสิคเคิล จำกัด คณะผู้วิจัยและสาขาวิศวกรรมโลจิสติกส์จึงขอแสดงความขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] G. D. Taylor, “Transportation System Overview,” in *Introduction To Logistics Engineering*, Taylor & Francis Group, LLC, 2009.
- [2] C-S. Liu and M. Y. Lai, *The Future Of The Logistics Industry*. Pricewaterhouse Coopers, Germany, 2009.
- [3] G. Clarke and J. W. Wright, “Scheduling Of Vehicle Routing Problem From A Central Depot To A Number Of Delivery Points,”

Operations Research, Vol. 12(4), pp. 568-581, 1964.

- [4] G. K. Rand, “ The Life And Times Of The Savings Method For Vehicle Routing Problems,” *Orion*, Vol 25(2), pp. 125–145, 2009.
- [5] R. H. Ballou, *Business Logistics: Supply Chain Management*. ed., 5th, Pearson Education Inc., 2004.
- [6] C. Caplice, “*Introduction to Supply Chain*,” in *Supply Chain and Logistics Fundamentals*. MIT Center for Transportation & Logistics, 2010.
- [7] G. Dantzig, R. Fulkerson and S. Johnson, “ Solution of a large-scale travelling-salesman problem,” *Operational Research*, Vol 2, pp.393-410, 1954.
- [8] R. Pitakaso, *Meta-Heuristic Methods For Solving Production Planning and Logistics Problems*. TPA Publishing, Thailand, 2011.
- [9] Oracle Online Source (2019, August). What Is a Transportation Management System. [Online]. Available: <https://www.oracle.com>
- [10] Google Map. (2019). [Online]. Available: <https://www.google.com/maps>
- [11] Google Map. (2019). Searching for direction. [Online]. Available: <https://support.google.com>

การบริหารจัดการภาวะภัยแล้งในพื้นที่นอกเขตชลประทานของประเทศไทย:

กรณีศึกษา ตุลาคม 2562 ถึง เมษายน 2563

Drought Management for the Rainfed Areas in Thailand: A Case Study of October 2019 to April 2020 Period

สุประภาพร พัฒนสังหเสนีย์* จิรวัดน์ ประชีพฉาย กัลยาณี สุวรรณประเสริฐ ธนัช สระประเทศ

จิรพงษ์ เหล่าน้ำใส

ศูนย์ป้องกันวิกฤติน้ำ กรมทรัพยากรน้ำ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

180/3 ถนนพระรามที่ 6 แขวงพญาไท เขตพญาไท กรุงเทพมหานคร 10400

Supapap Patsinghasanee* Jirawat Pracheepchai Kalayanee Suwanaprasert Thanat Sapateth

Jeerapong Laonamsai

Water Crisis Prevention Center, Department of Water Resources, Ministry of Natural Resources and
Environment

180/3, Rama6 Road, Pharya Thai, Pharya Thai, Bangkok, 10400

*Corresponding author Email: supapap.p@mail.dwr.go.th

(Received: May 16, 2020; Accepted: December 25, 2020)

บทคัดย่อ

ความแปรปรวนของปริมาณฝนเป็นสาเหตุหลักที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณน้ำในแหล่งน้ำ ซึ่งปริมาณน้ำที่กักเก็บนั้นเป็นปัจจัยสำคัญต่อการกำหนดแผนการบริหารจัดการน้ำในช่วงฤดูแล้งโดยเฉพาะในพื้นที่นอกเขตชลประทาน เนื่องจากพื้นที่ดังกล่าวไม่มีระบบชลประทานและแผนการบริหารจัดการ ดังนั้นการวิเคราะห์สมมูลน้ำจึงมีความจำเป็นสำหรับคาดการณ์พื้นที่เสี่ยงภัยแล้งและการเตรียมแผนบรรเทาภัยแล้ง จากเหตุผลดังกล่าวการวิเคราะห์สมมูลน้ำจึงถูกประยุกต์ใช้งานเพื่อคาดการณ์พื้นที่เสี่ยงภัยแล้งระดับตำบลในพื้นที่นอกเขตชลประทาน พ.ศ. 2562/2563 สำหรับการศึกษาครั้งนี้ได้ดำเนินการประเมินปริมาณน้ำใช้การได้จากปริมาณฝนคาดการณ์ ปริมาณน้ำในแหล่งน้ำ และปริมาณน้ำในแม่น้ำ และการประเมินปริมาณความต้องการใช้น้ำด้านการอุปโภคบริโภค ด้านการเกษตร ด้านรักษาระบบนิเวศ และด้านอุตสาหกรรม จากผลการศึกษาพบว่าพื้นที่เสี่ยงภัยแล้งที่ได้จากการวิเคราะห์สมมูลน้ำมีความสอดคล้องกับพื้นที่ที่เกิดภัยแล้งตามที่กรมป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยได้ประกาศเขตให้ความช่วยเหลือด้านภัยแล้ง จึงสามารถสรุปได้ว่าการวิเคราะห์สมมูลน้ำเป็นวิธีการที่เป็นประโยชน์ต่อการคาดการณ์พื้นที่เสี่ยงภัยแล้งในพื้นที่นอกเขตชลประทานของประเทศไทย

คำสำคัญ: สมมูลน้ำ พื้นที่นอกเขตชลประทาน การบริหารจัดการภัยแล้ง

ABSTRACT

The annual rainfall uncertainty affects the available water. Therefore, in Thailand the available water during the dry season is the most important resources in rainfed areas for implementing the water management plan. Additionally, the most affected areas are in the rainfed areas since there is a

deficiency of irrigation projects and water management plans. Consequently, the water balance process is necessary to predict the drought areas and prepare a mitigation plan. For this reason, the water balance process was applied to determine the water deficit areas at sub-district level in Thailand from 2019 to 2020. The water supplies were evaluated by measuring all the existing available water in rainfall-runoff, waterbodies, and watercourses. Furthermore, the water demands were calculated for domestic, agriculture, ecology, and industry sectors. The study results on water balance were in good agreement with drought areas as identified by the disaster management agency. Finally, we can conclude that the methodology used for this study is an efficient tool for the drought prediction at a sub-district level in the rainfed areas.

Keyword: Water Balance, Rainfed Area, Drought Management.

1. บทนำ

รอบ 40 ปี ที่ผ่านมา ประเทศไทยประสบภาวะภัยแล้งหลายครั้ง ซึ่งส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจทั้งด้านเกษตรกรรม ด้านอุปโภคบริโภค และด้านอุตสาหกรรม โดยในช่วงตลอดระยะเวลา 10 ปี ที่ผ่านมา ประเทศไทยมีพื้นที่ประสบภัยแล้งเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากปริมาณฝนสะสมมีค่าน้อยกว่าปกติหรือฝนไม่ตกตามฤดูกาล [1] โดยประเทศไทยมีพื้นที่เสี่ยงภัยแล้งระดับรุนแรงและระดับปานกลาง 26.8 ล้านไร่ หรือมีหมู่บ้านที่ขาดแคลนน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภค จำนวน 7,490 หมู่บ้าน [2]

คำจำกัดความภาวะภัยแล้ง ตามพระราชบัญญัติทรัพยากรน้ำ พ.ศ.2561 ให้คำจำกัดความว่าเป็นสภาวะที่ปริมาณน้ำ ปริมาณการไหลของน้ำ หรือระดับน้ำลดลงอย่างต่อเนื่องจนอาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อการดำรงชีวิตของคน สัตว์ และพืชที่อยู่ในพื้นที่ใดพื้นที่หนึ่ง [3] นอกจากนั้นแล้วคำจำกัดความของภาวะภัยแล้ง ตามแผนการป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยแห่งชาติ พ.ศ. 2553-2557 หมายถึง ความแห้งแล้งของลมฟ้าอากาศ อันเกิดจากการที่มีปริมาณฝนตกน้อยหรือฝนไม่ตกเป็นระยะเวลานานและครอบคลุมพื้นที่เป็นบริเวณกว้าง ทำให้เกิดภาวะขาดแคลนน้ำดื่ม น้ำใช้ และพืชขาดน้ำไม่สามารถเจริญเติบโตได้ตามปกติ ส่งผลให้เกิดความเสียหายและส่งผลกระทบอย่างกว้างขวางรุนแรงต่อประชาชน [4] โดย

ภาวะภัยแล้งสามารถเกิดขึ้นต่อเนื่องและติดต่อกันในระยะเวลาหลายเดือนหรือหลายปี ทำให้เกิดผลกระทบต่อประชาชนในพื้นที่ประสบภัยแล้งเพิ่มขึ้น ซึ่งภาวะภัยแล้งที่เกิดขึ้นจะดำเนินต่อเนื่อง 3 ขั้นตอน (Stage of Drought) โดยมีรายละเอียดดังนี้ [5]

1. ภาวะแห้งแล้งที่เกี่ยวข้องกับลักษณะทางอุตุนิยมวิทยา โดยเกิดขึ้นเมื่อช่วงเวลาที่ปริมาณน้ำฟ้ามีปริมาณน้อยกว่าเกณฑ์เฉลี่ยอย่างต่อเนื่อง ซึ่งภาวะภัยแล้งที่เกิดขึ้นจะส่งผลให้เกิดภาวะภัยแล้งประเภทอื่น ๆ ด้วย
2. ภาวะแห้งแล้งที่ส่งผลกระทบต่อการเกษตร เป็นภาวะภัยแล้งที่ส่งผลกระทบต่อผลผลิตด้านการเกษตรหรือระบบนิเวศในพื้นที่
3. ภาวะแห้งแล้งด้านอุทกศาสตร์ เกิดขึ้นเมื่อปริมาณน้ำที่เก็บกักไว้ในแหล่งต่าง ๆ เช่น ชั้นหินอุ้มน้ำใต้ดิน (Aquifer) ทะเลสาบ อ่างเก็บน้ำ และแหล่งน้ำ ลดระดับลงต่ำกว่าเกณฑ์เฉลี่ย

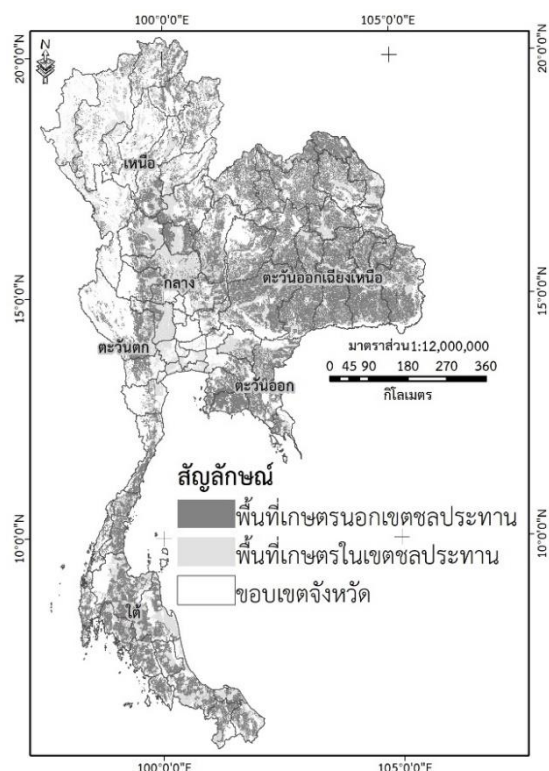
สำหรับระบบวิเคราะห์และคาดการณ์พื้นที่เสี่ยงภัยแล้งที่ดำเนินการในอดีต มีการประยุกต์ใช้งานข้อมูลด้านอุตุนิยมวิทยา อุทกวิทยา ระบบกระจายน้ำ และระบบประปาหมู่บ้าน เพื่อคาดการณ์พื้นที่เสี่ยงภัยแล้งในระดับจังหวัด [6] การประยุกต์ใช้งานแนวคิดสมมูลน้ำ โดยการพิจารณาปริมาณน้ำต้นทุน ซึ่งประกอบด้วยปริมาณฝนคาดการณ์ ปริมาณน้ำในลำน้ำ ปริมาณน้ำในแหล่งน้ำนอก

เขตชลประทาน และปริมาณความต้องการน้ำ (ด้านอุปโภคบริโภค ด้านเกษตร ด้านรักษาระบบนิเวศ และด้านอุตสาหกรรม) ในระดับอำเภอ [7] สำนักงานทรัพยากรน้ำแห่งชาติดำเนินการคาดการณ์พื้นที่เสี่ยงภัยแล้งโดยอาศัยข้อมูลปริมาณฝนสะสมระหว่างวันที่ 1 พฤษภาคม ถึง 31 ตุลาคม 2562 ที่มีค่าน้อยกว่า 800 มิลลิเมตร และอ่างเก็บน้ำขนาดใหญ่ที่มีปริมาณน้ำเก็บกักน้อยกว่าร้อยละ 30 ของความจุเก็บกัก ซึ่งผลการวิเคราะห์ได้มีการกำหนดพื้นที่เฝ้าระวังด้านน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภค และพื้นที่เฝ้าระวังขาดแคลนน้ำด้านการเกษตร [2] นอกจากนั้นแล้วผลการศึกษาเพื่อคาดการณ์ภาวะน้ำแล้งด้านอุทกนิยมนิเวศวิทยาในระดับภูมิภาคลุ่มแม่น้ำโขงตอนล่าง มีการประยุกต์ใช้ข้อมูลปริมาณฝน ระหว่างปี พ.ศ.2528 ถึง พ.ศ. 2559 โดยดำเนินการวิเคราะห์ค่า Standardize Precipitation Index ของปริมาณฝน 1, 3, 6 และ 12 เดือน ตามลำดับ [8] แต่อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ดังกล่าวส่วนใหญ่เป็นการพิจารณาเพียงปริมาณน้ำต้นทุน และข้อมูลด้านอุทกวิทยา ซึ่งยังไม่ได้มีการพิจารณาด้านความต้องการใช้น้ำในพื้นที่มาเป็นปัจจัยในการคาดการณ์พื้นที่เสี่ยงภาวะน้ำแล้ง

ดังนั้นเพื่อการบริหารจัดการบริหารจัดการภาวะภัยแล้งในพื้นที่นอกเขตชลประทานของประเทศไทย ประจำปี 2562/2563 การศึกษาครั้งนี้ได้ดำเนินการคาดการณ์พื้นที่เสี่ยงภัยแล้งในพื้นที่นอกเขตชลประทานระดับตำบล โดยการวิเคราะห์และประเมินปริมาณน้ำต้นทุน (ปริมาณฝนคาดการณ์ ปริมาณน้ำในลำน้ำ และปริมาณน้ำในแหล่งน้ำ) การวิเคราะห์และประเมินปริมาณความต้องการใช้น้ำ (ด้านอุปโภคบริโภค ด้านเกษตรกรรม ด้านรักษาระบบนิเวศ และด้านอุตสาหกรรม) และการวิเคราะห์สมดุลน้ำเชิงพื้นที่ในช่วงฤดูแล้ง ประจำปี 2562/2563 รวมถึงการเสนอแนะมาตรการที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการวางแผนป้องกันและบรรเทาภาวะน้ำแล้งที่จะเกิดขึ้นในพื้นที่นอกเขตชลประทานของประเทศไทย

2. พื้นที่ศึกษา

พื้นที่การเกษตรของประเทศไทยมีประมาณ 149.2 ล้านไร่ [1] โดยพื้นที่การเกษตรร้อยละ 43 อยู่ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (63.6 ล้านไร่) ซึ่งผลการสำรวจพบว่าประเทศไทยมีพื้นที่ชลประทานรวม 32.75 ล้านไร่ (ร้อยละ 22 ของพื้นที่การเกษตรทั้งประเทศ) และพื้นที่นอกเขตชลประทานรวม 116.45 ล้านไร่ (ร้อยละ 78 ของพื้นที่การเกษตรทั้งประเทศ) ครอบคลุมพื้นที่ 7,425 ตำบล โดยพื้นที่ดังกล่าวเป็นพื้นที่ปลูกพืชที่ใช้น้ำฝนเป็นหลัก ดังนั้นพื้นที่นอกเขตชลประทานจึงเสี่ยงต่อการขาดแคลนน้ำจากการผันแปรของสภาพทางอุตุนิยมวิทยาและอุทกวิทยา [9] โดยพื้นที่การเกษตรนอกเขตชลประทานของประเทศไทยสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 พื้นที่การเกษตรนอกเขตชลประทาน

3. วิธีการดำเนินงาน

วิธีการวิเคราะห์คาดการณ์พื้นที่เสี่ยงภัยแล้งในพื้นที่นอกเขตชลประทานระดับตำบล ช่วงฤดูแล้ง ประจำปี 2562/2563 (ตุลาคม 2562 ถึง เมษายน 2563)

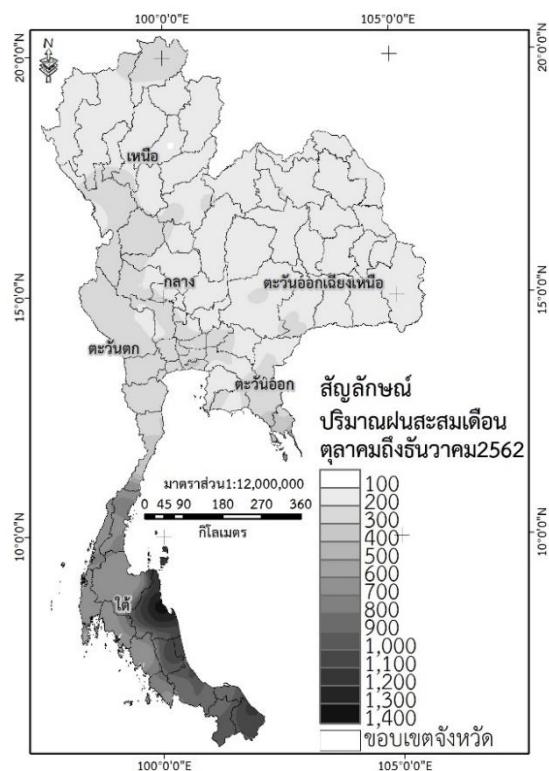
ประกอบด้วย ขั้นตอนการวิเคราะห์และประเมินปริมาณน้ำต้นทุน การวิเคราะห์และประเมินปริมาณความต้องการใช้น้ำ และการวิเคราะห์และประเมินสมดุลน้ำ โดยแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังนี้

3.1 การวิเคราะห์และประเมินปริมาณน้ำต้นทุน

การวิเคราะห์และประเมินปริมาณน้ำต้นทุนในพื้นที่นอกเขตชลประทาน ดำเนินการประเมินปริมาณน้ำใช้การได้จากปริมาณฝนคาดการณ์ล่วงหน้า 6 เดือน การประเมินปริมาณน้ำใช้การได้ในแหล่งน้ำนอกเขตชลประทาน และการประเมินปริมาณน้ำใช้การได้ของลำน้ำที่ไหลผ่านพื้นที่นอกเขตชลประทาน โดยรายละเอียดการวิเคราะห์และประเมินปริมาณน้ำต้นทุน ประกอบด้วย

การประเมินปริมาณน้ำใช้การได้จากปริมาณฝนคาดการณ์ล่วงหน้า ระหว่าง ตุลาคม 2562 ถึง มีนาคม 2563 โดยการศึกษาครั้งนี้อาศัยปริมาณฝนคาดการณ์ล่วงหน้า จากสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน) [10] ซึ่งดำเนินการวิเคราะห์ข้อมูลปริมาณฝนคาดการณ์รายเดือนระดับอำเภอ ครอบคลุมพื้นที่ 878 อำเภอ โดยตัวอย่างผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลปริมาณฝนคาดการณ์ล่วงหน้า ระหว่างเดือนตุลาคม ถึง ธันวาคม 2562 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2

การประเมินปริมาณน้ำท่าล่วงหน้าด้วยปริมาณฝนคาดการณ์ระดับอำเภอ (S_{RR}) โดยอาศัยแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า (Rainfall-Runoff Model) ซึ่งการศึกษานี้ได้ประยุกต์ใช้งาน NAM Model ซึ่งเป็นโมเดลหนึ่งใน MIKE 11 Package โดย NAM Model เป็นแบบจำลองลักษณะ Lumped Model หมายถึง พื้นที่ลุ่มน้ำย่อยแต่ละพื้นที่จะถือเป็นหนึ่งหน่วยอุทกวิทยา โดยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จะเป็นตัวแทนของพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยนั้น ๆ [11] ซึ่งค่าพารามิเตอร์หลักของ NAM Model ที่ประยุกต์ใช้งานในการศึกษานี้แสดงดังตารางที่ 1



รูปที่ 2 ปริมาณฝนคาดการณ์สะสม
(ตุลาคม ถึง ธันวาคม 2562)

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์หลักของ NAM Model

ตัวแปร	หน่วย	ช่วงค่าตัวแปร
Surface-root Zone		
Umax	มม.	5.00-32.90
Lmax	มม.	80.00-380.00
CQOF	-	0.12-1.00
CKIF	ชม.	68.46-2,383.00
CK1,2	ชม.	5.50-64.00
TOF	-	0.00-0.99
TIF	-	0.00-0.99
Ground Water		
TG	-	0.00-0.99
CKBF	ชม.	471.00-5,500.00

หมายเหตุ:

Umax คือ Maximum water content in surface storage

L_{max} คือ Maximum water content in lower zone/root storage

CQOF คือ Overland flow coefficient

CKIF คือ Groundwater recharge threshold

CK1,2 คือ Time constant for overland flow and interflow routing

TOF คือ Interflow drainage constant

TIF คือ Overland flow threshold

TG คือ Interflow threshold

CKBF คือ Time constant for baseflow

การประเมินปริมาณน้ำใช้การได้ในแหล่งน้ำขนาดกลางและขนาดเล็กในพื้นที่นอกเขตชลประทาน จำนวน 102,112 แห่ง โดยกรมทรัพยากรน้ำดำเนินการสำรวจแหล่งน้ำในพื้นที่ภาคสนามที่เป็นตัวแทน จำนวน 1 แหล่งน้ำต่ออำเภอ (878 แหล่งน้ำ) เพื่อการประเมินปริมาณน้ำใช้การได้ระดับตำบล ซึ่งการวิเคราะห์ปริมาณน้ำใช้การได้ในแหล่งน้ำนอกเขตชลประทาน สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (1)

$$S_{st} = \sum_{n=1}^{n=7,425} \left(\frac{S_t}{S_{max}} \times S_n \right) \quad (1)$$

โดย S_{st} คือ ปริมาณน้ำใช้การได้ในแหล่งน้ำนอกเขตชลประทานช่วงฤดูแล้งปี 2562/2563 (ล้าน ม.³) S_t คือ ปริมาณน้ำใช้การได้ในแหล่งน้ำตัวแทน ณ เวลา t (ล้าน ม.³) S_{max} คือ ปริมาณน้ำเก็บกักสูงสุดของแหล่งน้ำตัวแทน (ล้าน ม.³) และ S_n คือ ปริมาณน้ำเก็บกักสูงสุดของแต่ละตำบล (ล้าน ม.³)

การประเมินปริมาณน้ำใช้การได้จากลำน้ำที่ไหลผ่านพื้นที่นอกเขตชลประทาน ซึ่งการศึกษาครั้งนี้ดำเนินการประยุกต์ใช้งานข้อมูลตรวจวัดสถานีวัดน้ำท่าของกรมชลประทาน และกรมทรัพยากรน้ำ จำนวน 137 สถานีเป็นสถานีดัชนีในการประเมินปริมาณน้ำใช้การได้ในลำน้ำที่ไหลผ่านพื้นที่นอกเขตชลประทาน สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2)

$$S_{riv} = \sum_{n=1}^{n=137} (0.0036 \times c_{riv} \times Q_n) \quad (2)$$

โดย S_{riv} คือ ปริมาณน้ำใช้การได้ในลำน้ำที่ไหลผ่านพื้นที่นอกเขตชลประทาน (ล้าน ม.³) c_{riv} คือ ค่าสัมประสิทธิ์ปริมาณน้ำใช้การได้ในลำน้ำที่ไหลผ่านพื้นที่นอกเขตชลประทาน (0.8) และ Q_n คือ อัตราการไหลของสถานีตรวจวัดปริมาณน้ำท่า (ม.³/วินาที)

3.2 การวิเคราะห์และประเมินปริมาณความต้องการใช้น้ำ

การวิเคราะห์และประเมินปริมาณความต้องการใช้น้ำในพื้นที่นอกเขตชลประทาน ประกอบด้วย ปริมาณความต้องการใช้น้ำเพื่อการอุปโภคบริโภค การใช้น้ำเพื่อรักษาระบบนิเวศ การใช้น้ำเพื่อการเกษตร และการใช้น้ำเพื่อการอุตสาหกรรม โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

การใช้น้ำเพื่อการอุปโภคบริโภคในพื้นที่นอกเขตชลประทานซึ่งส่วนใหญ่เป็นพื้นที่นอกเขตตัวเมือง [9] ส่งผลให้ความต้องการน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภคน้อยกว่าความต้องการใช้น้ำของประชาชนในพื้นที่ชลประทาน โดยค่าเฉลี่ยการใช้น้ำสำหรับกิจกรรมเพื่อการอุปโภคบริโภคในพื้นที่นอกเขตชลประทานมีค่าประมาณ 120 ลิตร/คน/วัน [12] และจำนวนประชากรระดับตำบล อาศัยข้อมูลจากโปรแกรมรายงานหมู่บ้านชนบทไทย (กชช. 2ค) โดยกรมการพัฒนาชุมชน [13] ดังนั้นการประเมินการใช้น้ำเพื่อการอุปโภคบริโภคสามารถประเมินได้ดังสมการที่ (3)

$$D_{dom} = \sum_{n=1}^{n=7,425} \left(\frac{120 \times N_n}{10^9} \right) \quad (3)$$

โดย D_{dom} คือ ความต้องการใช้น้ำเพื่อการอุปโภคบริโภค (ล้าน ม.³) และ N_n คือ จำนวนประชากรแต่ละตำบล (คน)

การประเมินความต้องการใช้น้ำเพื่อรักษาระบบนิเวศ (D_{eco}) ซึ่งวิเคราะห์เฉพาะความต้องการปริมาณน้ำต่ำสุดเพื่อรักษานิเวศท้ายน้ำ โดยไม่พิจารณาความต้องการใช้น้ำจากกิจกรรมอื่น ๆ บริเวณพื้นที่ท้ายน้ำของลุ่มน้ำนั้น ๆ

ดังนั้นการศึกษาค้นคว้านี้ดำเนินการประเมินจากปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยรายเดือนที่มีค่าต่ำที่สุดของแต่ละพื้นที่ โดยมีค่าประมาณร้อยละ 57 ของปริมาณน้ำท่าในฤดูแล้ง [12]

การประเมินความต้องการใช้น้ำเพื่อการเกษตรในพื้นที่นอกเขตชลประทาน (D_{agr}) ซึ่งพืชเศรษฐกิจที่ปลูกส่วนใหญ่ในพื้นที่นอกเขตชลประทาน ได้แก่ ข้าว ข้าวโพด อ้อย และมันสำปะหลัง โดยอัตราการใช้น้ำของพืชเศรษฐกิจแต่ละชนิด [14] แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การใช้น้ำของพืชเศรษฐกิจในแต่ละพื้นที่ของประเทศไทย

พืช	อายุพืช (วัน)	การใช้น้ำของพืช ตลอดอายุ (ม ³ /ไร่)
ข้าว กข.	100	1,101-1,172
ข้าวโพด (ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ข้าวโพดฝักอ่อน ข้าวโพดฝักสด)	100	550-594
อ้อย	300	1,503-1,656
มันสำปะหลัง	125	715-773

การประเมินความต้องการใช้น้ำของโรงงานอุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ (D_{ind}) อาศัยข้อมูลทะเบียนโรงงานจากโปรแกรมรายงานหมู่บ้านชนบทไทย (กชช. 2 ค) [13] และอัตราการใช้น้ำของโรงงานอุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ โดยประเมินจำนวนวันทำงานของโรงงานอุตสาหกรรม 300 วัน/ปี [15] ซึ่งรายละเอียดอัตราการใช้น้ำของโรงงานอุตสาหกรรมแต่ละประเภทแสดงดังตารางที่ 3

3.3 การวิเคราะห์และประเมินสมมูลน้ำระดับตำบลในพื้นที่นอกเขตชลประทาน

การวิเคราะห์และประเมินสมมูลน้ำระดับตำบลในพื้นที่นอกเขตชลประทาน อาศัยผลต่างระหว่างปริมาณน้ำต้นทุนกับความต้องการใช้น้ำ ดังแสดงรายละเอียดของการวิเคราะห์สมมูลน้ำได้ดังสมการที่ (4)

ตารางที่ 3 อัตราการใช้น้ำของโรงงานอุตสาหกรรมแต่ละประเภท

ประเภท	รายละเอียดประเภทอุตสาหกรรม	อัตราการใช้น้ำ (ม ³ /ไร่/วัน)
Accessory	ผลิตชิ้นส่วน อุปกรณ์	6
Chemical	เคมีภัณฑ์	8
Food	อาหาร เครื่องดื่ม	12
Metal	ถลุง หล่อ โลหะ	5
Other	ทั่วไป	7
Outside	กลางแจ้ง	4
Paper	กระดาษ	4
Textile	สิ่งทอ พอกหนัง	5
Unmetal	อโลหะ	8
Wood	ไม้แปรรูปไม้	3

$$WB_{sub} = \sum_{n=1}^{n=7,425} ((S_{RR} + S_{st} + S_{riv}) - (D_{dom} + D_{eco} + D_{agr} + D_{ind})) \quad (4)$$

โดย WB_{sub} คือ สมมูลน้ำระดับตำบลในพื้นที่นอกเขตชลประทาน (ล้าน ม.³) ซึ่งเกณฑ์การพิจารณาระดับความรุนแรงของภาวะภัยแล้ง แบ่งออกเป็น 3 ระดับ ประกอบด้วย เสี่ยงภัยแล้งรุนแรง (ขาดแคลนนํ้ามากกว่า 5 ล้าน ม.³ ต่อ ตำบล) เสี่ยงภัยแล้งปานกลาง (ขาดแคลนนํ้าระหว่าง 1 ถึง 5 ล้าน ม.³ ต่อ ตำบล) และปกติ (ขาดแคลนนํ้าน้อยกว่า 1 ล้าน ม.³ ต่อ ตำบล) ตามลำดับ

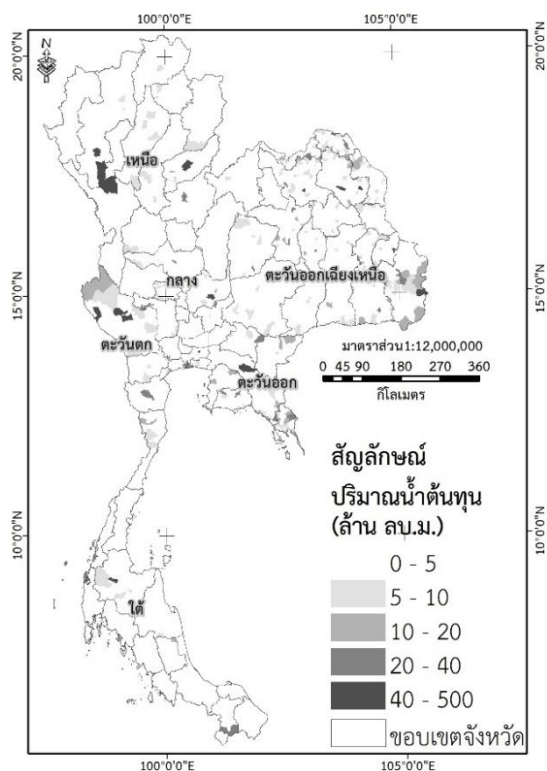
4. ผลการศึกษา

ผลการวิเคราะห์สมมูลน้ำระดับตำบลในพื้นที่นอกเขตชลประทานโดยการประเมินปริมาณน้ำต้นทุน และปริมาณความต้องการใช้น้ำในกิจกรรมต่าง ๆ มีรายละเอียดดังนี้

4.1 ผลการวิเคราะห์และประเมินน้ำต้นทุนในพื้นที่นอกเขตชลประทาน

ผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำต้นทุนจากปริมาณฝนคาดการณ์ ระหว่างเดือนตุลาคม 2562 ถึง มีนาคม 2563

โดยอาศัยปริมาณฝนคาดการณ์ระดับอำเภอ เป็นข้อมูลนำเข้าแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า (NAM Model) พบว่าปริมาณฝนคาดการณ์สามารถเปลี่ยนเป็นปริมาณน้ำผิวดินได้ประมาณ 652 ล้าน ม.³ สำหรับการประเมินปริมาณน้ำต้นทุนจากแหล่งน้ำขนาดกลางและขนาดเล็กในพื้นที่นอกเขตชลประทาน พบว่ามีปริมาณน้ำใช้การได้ในแหล่งน้ำขนาดกลาง 5,030 ล้าน ม.³ และแหล่งน้ำขนาดเล็ก 3,718 ล้าน ม.³ รวมปริมาณน้ำใช้การได้ของแหล่งน้ำในพื้นที่นอกเขตชลประทาน 8,748 ล้าน ม.³ และปริมาณน้ำใช้การได้จากลำน้ำที่ไหลผ่านพื้นที่นอกเขตชลประทาน โดยการวิเคราะห์ข้อมูลอัตราการไหลของน้ำท่าจากสถานีตรวจวัดน้ำของกรมชลประทานและกรมทรัพยากรน้ำ พบว่าพื้นที่นอกเขตชลประทานจะได้รับปริมาณน้ำต้นทุนจากลำน้ำที่ไหลผ่านพื้นที่ ประมาณ 2,366 ล้าน ม.³ ดังนั้นปริมาณน้ำต้นทุนในช่วงฤดูแล้ง ประจำปี 2562/2563 ในพื้นที่นอกเขตชลประทาน จะมีปริมาณใช้การได้ ประมาณ 11,766 ล้าน ม.³ โดยรายละเอียดของปริมาณน้ำต้นทุนในพื้นที่นอกเขตชลประทาน แสดงดังรูปที่ 3 และตารางที่ 4



ตารางที่ 4 ปริมาณน้ำต้นทุนในพื้นที่นอกเขตชลประทานของแต่ละภูมิภาค (หน่วย: ล้าน ม.³)

ภาค	ปริมาณน้ำต้นทุน			
	น้ำฝน	แหล่งน้ำ	ลำน้ำ	รวม
เหนือ	143	935	512	1,590
ตะวันออก	183	4,421	806	5,410
กลาง	65	1,002	441	1,508
ตะวันตก	41	730	117	888
ใต้	42	588	260	890
รวม	178	1,072	230	1,480
รวม	652	8,748	2,366	11,766

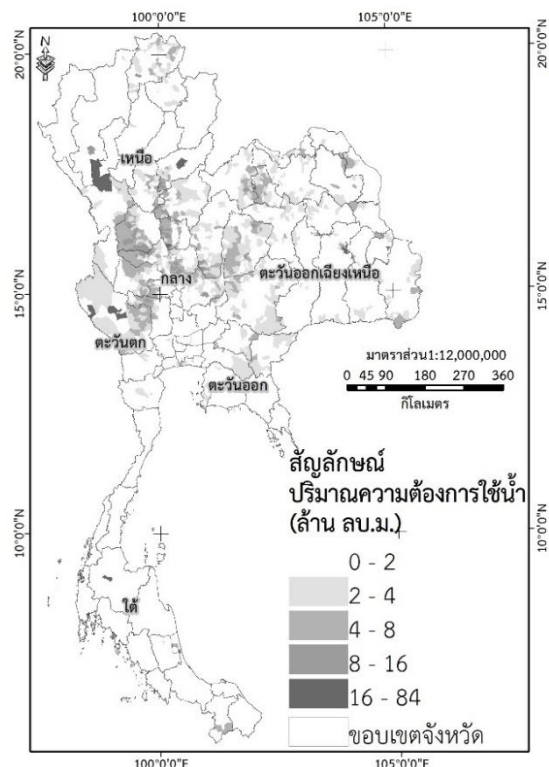
4.2 ผลการวิเคราะห์และประเมินความต้องการใช้น้ำในพื้นที่นอกเขตชลประทาน

ปริมาณความต้องการใช้น้ำในพื้นที่นอกเขตชลประทานระดับตำบลในช่วงฤดูแล้ง ประจำปี 2562/2563 ประกอบด้วย ความต้องการใช้น้ำด้านอุปโภคบริโภค ด้านการเกษตร ด้านรักษาระบบนิเวศ และด้านอุตสาหกรรม โดยสามารถสรุปรายละเอียดได้ดังนี้

ความต้องการใช้น้ำด้านอุปโภคบริโภคในพื้นที่นอกเขตชลประทาน มีความต้องการประมาณ 927 ล้าน ม.³ ความต้องการน้ำด้านการเกษตร โดยการวิเคราะห์ข้อมูลแผนการเพาะปลูกในฤดูแล้งปี 2562/2563 พบว่ามีแผนการเพาะปลูกข้าวนาปรัง 22.22 ล้านไร่ ข้าวโพด 0.85 ล้านไร่ อ้อย 2.86 ล้านไร่ และมันสำปะหลัง 1.59 ล้านไร่ [16]-[17] ซึ่งความต้องการใช้น้ำด้านการเกษตรในฤดูแล้ง ประจำปี 2562/2563 มีค่าประมาณ 5,692 ล้าน ม.³ นอกจากนั้นแล้วความต้องการใช้น้ำเพื่อรักษาระบบนิเวศ และการอุตสาหกรรม มีค่าประมาณ 927 และ 401 ล้าน ม.³ ตามลำดับ ดังนั้นปริมาณความต้องการใช้น้ำในพื้นที่นอกเขตชลประทานในช่วงฤดูแล้ง ประจำปี 2562/2563 มีความต้องการใช้น้ำรวมประมาณ 7,957

ปีที่ 15 ฉบับที่ 3 เดือน กันยายน – ธันวาคม พ.ศ. 2563

ล้าน ม.³ โดยรายละเอียดของความต้องการใช้น้ำในพื้นที่นอกเขตชลประทาน แสดงดังรูปที่ 4 และตารางที่ 5



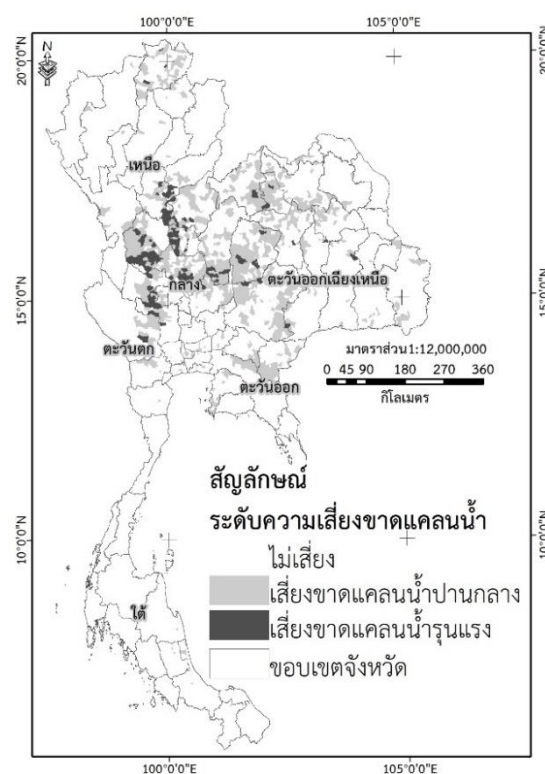
รูปที่ 4 ปริมาณความต้องการใช้น้ำในพื้นที่นอกเขตชลประทาน

ตารางที่ 5 ปริมาณความต้องการใช้น้ำในพื้นที่นอกเขตชลประทานของแต่ละภูมิภาค (หน่วย: ล้าน ม.³)

ภาค	ความต้องการใช้น้ำ				
	เกษตร	อุปโภคบริโภค	อุตสาหกรรม	รักษาระบบนิเวศ	รวม
เหนือ	1,860	134	30	193	2,217
ตะวันออกเฉียงเหนือ	2,491	332	60	167	3,050
กลาง	942	222	204	145	1,513
ตะวันออก	202	61	57	54	374
ตะวันออก	150	28	32	189	399
ใต้	47	150	18	189	404
รวม	5,692	927	401	937	7,957

4.3 ผลการวิเคราะห์สมดุลน้ำในพื้นที่นอกเขตชลประทาน

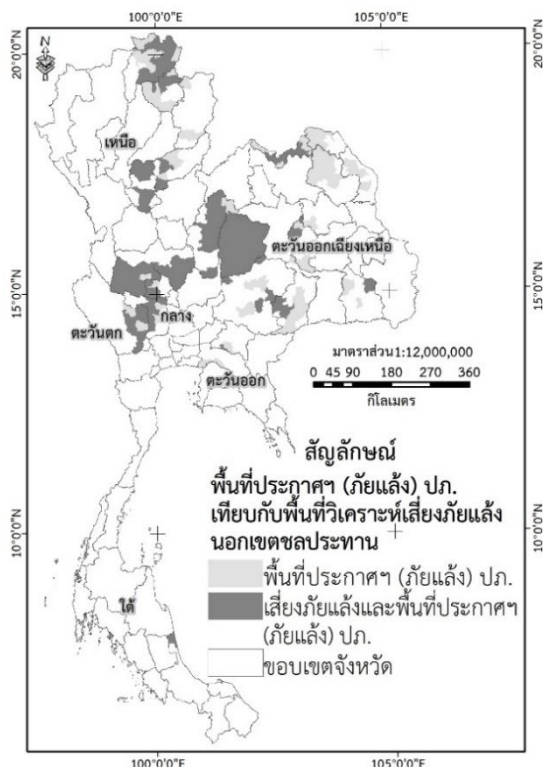
ผลการวิเคราะห์สมดุลน้ำในพื้นที่นอกเขตชลประทานระดับตำบล ในช่วงฤดูแล้งประจำปี 2562/2563 โดยการพิจารณาปริมาณน้ำต้นทุนและปริมาณความต้องการใช้น้ำในพื้นที่นอกเขตชลประทาน พบว่ามีพื้นที่ที่เสี่ยงต่อภาวะภัยแล้งในระดับปานกลางและระดับรุนแรง ครอบคลุมพื้นที่ 57 จังหวัด 305 อำเภอ 984 ตำบล โดยพื้นที่เสี่ยงภัยแล้งระดับตำบลสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 พื้นที่เสี่ยงต่อภาวะภัยแล้งประจำปี 2562/2563

การสอบเทียบผลการวิเคราะห์พื้นที่เสี่ยงภัยแล้งระดับตำบลในพื้นที่นอกเขตชลประทาน ประจำปี 2562/2563 กับข้อมูลรายงานสถานการณ์สาธารณภัยของกรมป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย กระทรวงมหาดไทย ประจำวันที่ 14 เมษายน 2563 [18] โดยกรมป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย รายงานสถานการณ์ภัยแล้งตั้งแต่วันที่ 17 ตุลาคม 2562 ถึง วันที่

14 เมษายน 2563 พบว่ามีจังหวัดที่ประกาศเขตการให้ความช่วยเหลือผู้ประสบภัยพิบัติกรณีฉุกเฉิน (ภัยแล้ง) ตามระเบียบกระทรวงการคลังว่าด้วยเงินทดรองราชการเพื่อช่วยเหลือผู้ประสบภัยพิบัติกรณีฉุกเฉิน พ.ศ.2562 โดยมีสถานการณ์ทั้งหมด 24 จังหวัด 145 อำเภอ 782 ตำบล ประกอบด้วย จังหวัดเชียงราย พะเยา น่าน อุตรดิตถ์ สุโขทัย เพชรบูรณ์ หนองคาย บึงกาฬ นครพนม สกลนคร กาฬสินธุ์ มหาสารคาม นครราชสีมา บุรีรัมย์ ชัยภูมิ ศรีสะเกษ นครสวรรค์ อุทัยธานี ชัยนาท สุพรรณบุรี กาญจนบุรี ฉะเชิงเทรา ปราจีนบุรี และสงขลา ซึ่งความสอดคล้องระหว่างผลการวิเคราะห์พื้นที่เสี่ยงภัยกับพื้นที่ประกาศเขตการให้ความช่วยเหลือผู้ประสบภัยพิบัติกรณีฉุกเฉิน (ภัยแล้ง) มีความสอดคล้อง 702 ตำบล หรือคิดเป็นร้อยละ 71 ของผลการคาดการณ์พื้นที่เสี่ยงภัยแล้ง โดยสามารถแสดงผลการสอบเทียบได้ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 การสอบเทียบพื้นที่เสี่ยงต่อภาวะภัยแล้ง กับพื้นที่ประกาศเขตการให้ความช่วยเหลือผู้ประสบภัยพิบัติกรณีฉุกเฉิน (ภัยแล้ง)

ผลการวิเคราะห์สมมูลน้ำในพื้นที่นอกเขตชลประทาน พบว่าพื้นที่ภาคเหนือและภาคกลางมีปริมาณความต้องการใช้น้ำสูงกว่าปริมาณน้ำต้นทุนที่มีอยู่ในพื้นที่ แต่อย่างไรก็ตามข้อมูลพื้นที่ประกาศเขตการให้ความช่วยเหลือผู้ประสบภัยพิบัติกรณีฉุกเฉิน (ภัยแล้ง) พบว่าหลายพื้นที่ในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคตะวันออกเฉียงเหนือประสบกับปัญหาขาดแคลนน้ำ จากข้อมูลดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าปริมาณน้ำต้นทุนในพื้นที่นอกเขตชลประทานเพียงพอกับความต้องการใช้น้ำ เมื่อเทียบกับปริมาณความต้องการใช้น้ำในแต่ละภูมิภาค แต่อย่างไรก็ตามปัญหาดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าพื้นที่นอกเขตชลประทาน ขาดระบบกระจายน้ำหรือระบบส่งน้ำจากแหล่งที่มีปริมาณน้ำมากไปสู่พื้นที่ที่มีปริมาณน้ำน้อย ซึ่งสาเหตุของปัญหาในพื้นที่นอกเขตชลประทานที่พบในการศึกษาครั้งนี้ สอดคล้องกับบทวิเคราะห์สาเหตุและปัญหาด้านการบริหารจัดการน้ำในพื้นที่นอกเขตชลประทาน คือ พื้นที่นอกเขตชลประทานอาศัยปริมาณฝนตามฤดูกาลเป็นแหล่งน้ำต้นทุนหลัก ซึ่งมีความเสี่ยงต่อการขาดแคลนน้ำจากความผันแปรของสภาพอากาศ โดยในบางพื้นที่ลักษณะทางกายภาพไม่เอื้ออำนวยต่อการลำเลียงน้ำจากแหล่งน้ำมาใช้ประโยชน์ [1] ดังนั้นมาตรการในการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำในพื้นที่นอกเขตชลประทาน เพื่อแก้ไขปัญหาภัยแล้งอย่างยั่งยืนจะต้องดำเนินการตามแนวทางต่าง ๆ ดังนี้

1. การฟื้นฟูแหล่งน้ำธรรมชาติและอ่างเก็บน้ำในพื้นที่นอกเขตชลประทานโดยการอนุรักษ์ ฟื้นฟู ขุดลอก กำจัดวัชพืช ปรับปรุงฐานลำน้ำ และเพิ่มอาคารบังคับน้ำในแหล่งน้ำธรรมชาติ
2. การพัฒนาแหล่งน้ำต้นทุนใหม่ โดยการพัฒนาฝาย อ่างเก็บน้ำขนาดเล็ก แก้มลิง และการขุดเจาะบ่อน้ำบาดาลในพื้นที่ที่หาน้ำผิวดินยาก
3. การพัฒนาระบบส่งน้ำจากแหล่งน้ำเดิม โดยการไ้ระบบกระจายน้ำด้วยพลังแสงอาทิตย์ เพื่อส่งน้ำไปสู่พื้นที่ชุมชน

4. การฟื้นฟูพื้นที่ป่าต้นน้ำ โดยการพัฒนาฝายชะลอน้ำ การปลูกหรือฟื้นฟูป่า และการจัดระเบียบการใช้ที่ดินในพื้นที่ป่าที่มีราษฎรอยู่อาศัย

5. การแจกจ่ายภาชนะเก็บกักน้ำ และการแจกจ่ายน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภค ในพื้นที่ที่ไม่สามารถพัฒนาแหล่งเก็บกักน้ำ โดยจะต้องดำเนินการสูบน้ำช่วยเหลือจากแหล่งน้ำหนึ่งไปสู่อีกแหล่งน้ำหนึ่ง การจัดสรรบรรทุกน้ำ และการแจกจ่ายภาชนะบรรจุน้ำ

5. สรุป

การบริหารจัดการภาวะภัยแล้งในพื้นที่นอกเขตชลประทาน มีความสำคัญต่อการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ เนื่องจากพื้นที่นอกเขตชลประทานครอบคลุมพื้นที่ 116.45 ล้านไร่ หรือคิดเป็นร้อยละ 78 ของพื้นที่การเกษตร นอกจากนั้นแล้วพื้นที่ดังกล่าวยังเป็นพื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดภาวะภัยแล้ง เนื่องจากพื้นที่นอกเขตชลประทานอาศัยปริมาณฝนเป็นหลัก และพื้นที่ดังกล่าวยังขาดระบบชลประทาน เพื่อการส่งน้ำจากแหล่งน้ำที่มีปริมาณน้ำต้นทุนสูงไปสู่พื้นที่ที่ขาดแคลนปริมาณน้ำต้นทุน ดังนั้นเพื่อเป็นการป้องกันและบรรเทาภาวะภัยแล้งประจำปี 2562/2563 การศึกษาครั้งนี้จึงประยุกต์ใช้หลักสมดุลน้ำเพื่อคาดการณ์พื้นที่เสี่ยงภัยแล้งระดับตำบล โดยอาศัยข้อมูลปริมาณน้ำต้นทุน (ปริมาณฝนคาดการณ์ ปริมาณน้ำในแหล่งน้ำ และลำน้ำที่ไหลผ่านพื้นที่) และข้อมูลปริมาณความต้องการใช้น้ำ (ด้านอุปโภคบริโภค ด้านการเกษตร ด้านรักษาระบบนิเวศ และด้านอุตสาหกรรม) ผลการวิเคราะห์พบว่าพื้นที่เสี่ยงต่อภาวะภัยแล้งประจำปี 2562/2563 มีความสอดคล้องกับพื้นที่เกิดภัยแล้งตามที่กรมป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย โดยมีความถูกต้องอยู่ที่ 702 ตำบล หรือคิดเป็นร้อยละ 71 ของพื้นที่คาดการณ์ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการวิเคราะห์สมดุลน้ำเป็นวิธีการหนึ่งที่เป็นประโยชน์และมีประสิทธิภาพต่อการคาดการณ์พื้นที่เสี่ยงภัยแล้งในพื้นที่นอกเขตชลประทานของประเทศไทย เพื่อการบริหารจัดการ ป้องกัน และบรรเทาภาวะภัยแล้งที่จะเกิดขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน) สำหรับการสนับสนุนข้อมูลปริมาณฝนคาดการณ์ กรมส่งเสริมการเกษตร และสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน) สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลปริมาณพื้นที่เพาะปลูก และกรมชลประทาน ในการสนับสนุนข้อมูลปริมาณน้ำท่า และข้อมูลอัตราการใช้ น้ำของพืช ซึ่งคณะผู้วิจัยต้องขอขอบคุณอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Office of the National Water Resources, “The 20-year master plan on water resources management B.E.2561-2580 (2018-2037),” Sub-committee on Strategy for Water Resources Management., Bangkok, Royal Thai Government Gazette, Sep. 2019.
- [2] Office of the National Water Resources, “The systematic water resources management information for drought prevention and mitigation B.E.2563 (2020),” Office of the Prime Minister., Bangkok, Feb. 2020.
- [3] Water Resources Act B.E.2561 (2018), Royal Thai Government Gazette 135, 2018.
- [4] Department of Disaster Prevention and Mitigation, “National disaster prevention and mitigation plan B.E.2553-2557 (2010-2014),” National Disaster Prevention and Mitigation Committee., Bangkok, Dec. 2009.
- [5] College of Disaster Prevention and Mitigation, “Disaster terminology,” Department of Disaster Prevention and Mitigation., Bangkok, Sep. 2008.
- [6] S. Tovichakchaikul, P. Chitprom, and S. Patsinghasanee, “Annual report of Thailand

- drought situation and forecasting 2007,” in *Proceeding of the fourth Kasetsart University Kamphaengsane Campus Conference 2007.*, Nakhon Pathom., Thailand, 2008, pp. 328-335.
- [7] J. Laonamsai, S. Patsinghasanee, K. Suwanprasert, J. Pracheepchai, and W. Wangpimool, “Evaluation of water balance process in dry season for the rainfed areas in Thailand: Case study from 2016 to 2018,” in *Mekong River Commission International Conference.*, Siem Reap., Cambodia, 2018, pp. 62.
- [8] X. Zhang and H. Liu, “Analysis of drought character in the Mekong River Basin,” in *Flood Prevention and Drought Relief in Mekong River Basin*, H. Liu, Ed., Singapore: Springer Tracts in Civil Engineering, 2020, pp. 95-107.
- [9] S. Patsinghasanee, J. Laonamsai, K. Suwanprasert, M. Lakmuang, R. Parasirisakul and R. Patsinghasanee, “Classification of the rainfed areas for the water development projects in Thailand,” in *THA 2019 International Conference on Water Management and Climate Change towards Asia's Water-Energy-Food Nexus and SDGs.*, Bangkok., Thailand, 2019, pp. 257-261.
- [10] Hydro-Informatics Institute (Public Organization). (2019, Sep 25). Forecasting monthly rainfall [Online] . Available: http://live1.haii.or.th/product/latest/rain/one_map/one_map_rain_forecast.html
- [11] N. Agrawal and T. S. Desmukh, “Rainfall runoff modeling using MIKE 11 nam-A review,” *Int. J. Innov. Sci. Eng. Technol.*, vol. 3, pp. 659-667, Jun. 2016.
- [12] The Policy Committee for Water Resources Management, “The strategic plan on Thailand’s water resources management,” National Water Resources Committee., Bangkok, May. 2015.
- [13] Community Development Department. (2015, Aug 5). Basic information at village level software [Online]. Available: <http://rdic.cdd.go.th/nrd-service>
- [14] Royal Irrigation Department. (2011, Jul). Evapotranspiration [Online]. Available: <http://water.rid.go.th/hwm/cropwater/CWRdata/ET/index.htm>
- [15] Hydro-Informatics Institute (Public Organization). (2016, Feb 2). Water demand in industrial sector [Online] . Available: <http://hydrolaw.thaiwater.net/web/2016/02/02/>
- [16] Department of Agriculture Extension, “The cultivation plan in dry season B.E.2562-2563 (2019-2020),” Ministry of Agriculture and Cooperatives, Bangkok, Oct. 2019.
- [17] Geo-Informatics and Space Technology Development Agency (Public Organization). (2019, Sep 25). The eco-plants monitoring by satellite system [Online] . Available: <https://ecoplant.gistda.or.th/>
- [18] Disaster Mitigation Operation Center. (2020, Apr 7). Disaster daily report on 25 March B.E.2563 (2020) [Online] . Available: http://www.disaster.go.th/th/content-disaster_news-228-1/

การพัฒนาค่าปรับแก้ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความจุของทางหลวงชนบท

สองช่องจราจรด้วยวิธีการแบบทางอ้อม

Development of Adjustment Factors affecting The Capacity of DRR Two-Lane Highways with Indirect Empirical Method

ปฐิภาณ แก้ววิเชียร วุฒิไกร ไชยปัญญา*

สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

วิทยาเขตขอนแก่น ขอนแก่น 40000

Patiphan Kaewwichian Wuttikrai Chaipanha*

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology

Isan Khon Kaen Campus, Khon Kaen, 40000

*Corresponding author Email: w.chaipanha@gmail.com

(Received: May 23, 2020; Accepted: December 28, 2020)

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์พัฒนาค่าปรับแก้ปัจจัยสำหรับใช้ในประมาณค่าความจุของทางหลวงชนบทสองช่องจราจรนอกเมือง โดยใช้การพัฒนาแบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคแทนการประมาณค่าความจุของทางหลวงโดยตรง พร้อมทั้งนำเสนอผลกระทบของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความจุของทางหลวงชนบทสองช่องจราจร ผลการศึกษาพบว่า การประมาณค่าความจุสูงสุดเฉลี่ยทั้ง 3 สายทาง เท่ากับ 3,671 pc/h โดยสัดส่วนรถจักรยานยนต์เป็นปัจจัยที่มีผลให้ค่าความจุลดลงสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพในอุดมคติเนื่องมาจากพฤติกรรมรถจักรยานยนต์ที่ขับขี่ร่วมกับยานพาหนะประเภทอื่นบนช่องจราจรหลัก ทั้งนี้ผู้วิจัยได้ทำการสรุปเป็นตารางค่าปรับแก้ปัจจัยสัดส่วนรถจักรยานยนต์ สัดส่วนรถขนาดใหญ่ และการกระจายปริมาณจราจรต่อทิศทาง สำหรับเป็นอีกแนวทางเลือกในการนำไปใช้งานในการประมาณค่าความจุของทางหลวงชนบทสองช่องจราจร

คำสำคัญ: ค่าปรับแก้ปัจจัย ความจุ ทางหลวงชนบทสองช่องจราจร

ABSTRACT

The objective of this study is to develop the adjustment factor for use in estimating capacity of DRR two-lane highways by using the development of traffic micro-simulation model instead of directly observed, as well as presenting the impact of factors affecting the capacity of the DRR two-lane highway. The results show that the estimation of the average maximum capacity of all 3 site is 3,671 pc/h, with the proportion of motorcycles being the factor that causes the maximum capacity to be reduced compared to the base condition due to the driving behavior with other vehicles on the carriageway. In this regard, the researcher has summarized the adjustment table of the proportion of

motorcycle, proportion of heavy vehicle and directional split, as an alternative way to use the capacity estimation of DRR two-lane highways.

Keyword: Adjustment factor, Capacity, DRR two-lane highway.

1. บทนำ

ทางหลวงชนบทสองช่องจราจรเป็นหนึ่งในประเภทของทางหลวงตามพระราชบัญญัติทางหลวง พ.ศ. 2535 แก้ไขเพิ่มเติมโดยพระราชบัญญัติทางหลวง (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2549 ซึ่งอยู่ในความรับผิดชอบของกรมทางหลวงชนบท [1] ซึ่งโครงข่ายทางหลวงชนบทสองช่องจราจรโดยส่วนใหญ่ทำหน้าที่เป็นโครงข่ายรองในการสนับสนุนการคมนาคมขนส่งกับโครงข่ายถนนหลักหรือให้บริการในลักษณะการเป็นทางหลวงท้องถิ่นให้แก่องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น ทำหน้าที่หลักในการเชื่อมโยงการเดินทางระหว่างชุมชนและหมู่บ้าน จึงทำให้ทางหลวงชนบทโดยทั่วไปมีมาตรฐานชั้นทางที่ไม่สูงมากนัก

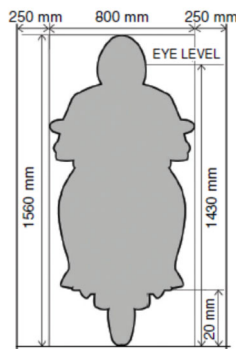
ด้วยทิศทางและนโยบายในการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านการคมนาคมขนส่งทางบกหรือทางถนนในปัจจุบันที่โครงการพัฒนาส่วนใหญ่ให้ความสำคัญกับการปรับปรุงประสิทธิภาพการให้บริการด้วยการขยายช่องจราจร (จากสองช่องจราจรเป็นสี่หรือหกช่องจราจร) หรือการพัฒนาเส้นทางสายใหม่เป็นหลัก ซึ่งทั้งหมดล้วนต้องผ่านกระบวนการในการประเมินประสิทธิภาพในการรองรับการจราจรที่เกิดขึ้นในปัจจุบันและอนาคต เพื่อพิจารณาถึงความเหมาะสมหรือความเป็นไปได้ในการดำเนินการโครงการ ทำให้ดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพในการรองรับปริมาณจราจรจึงมีความสำคัญอย่างมากในการช่วยประเมินความเหมาะสมของโครงการข้างต้น

ถึงแม้ว่าใน HCM2010 จะระบุวิธีการในการประเมินประสิทธิภาพในการให้บริการของทางหลวงสองช่องจราจรโดยใช้ตัวชี้วัดต่างๆ ได้แก่ ความเร็วในการเดินทางเฉลี่ย (Average Travel Speed, ATS) ร้อยละของเวลาที่ใช้ในการขับตาม (Percent Time-Spent Following, PTSF) และร้อยละของความเร็วในการไหลอิสระ

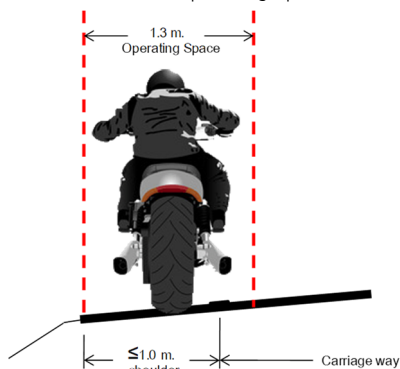
(Percent of Free-Flow Speed, PFFS) แต่ในทางปฏิบัติสำหรับการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการรองรับปริมาณจราจรหรือการให้บริการของทางหลวงชนบทในประเทศไทยส่วนใหญ่ ยังคงใช้ปริมาณจราจรต่อความจุ (volume to capacity ratio, v/c) เป็นดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพการจราจรอยู่ เนื่องจากสามารถวิเคราะห์ได้อย่างสะดวกเข้าใจง่าย และสามารถอธิบายให้เห็นภาพชัดเจนมากกว่า

แต่อย่างไรก็ตามการประเมินประสิทธิภาพการรองรับปริมาณจราจรโดยพิจารณาจากความจุ (Capacity) นั้นหากอ้างอิงแนวทางจากคู่มือการวิเคราะห์ความจุทางหลวงหรือ Highway Capacity Manual (HCM) ซึ่งเป็นคู่มือที่ถูกพัฒนาขึ้นในต่างประเทศ จะส่งผลให้การประยุกต์ใช้งานโดยตรงกับทางหลวงสองช่องจราจรในประเทศไทยที่มีลักษณะการจราจรเฉพาะตัวขาดความสมเหตุสมผลได้

สาเหตุสำคัญประการหนึ่งคือ การมีปริมาณรถจักรยานยนต์ในสัดส่วนที่สูงมีผลอย่างมากที่ทำให้การประมาณค่าความจุโดยใช้วิธี HCM เกิดความคลาดเคลื่อนไปจากสภาพความเป็นจริง โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับทางหลวงสองช่องจราจรที่มีมาตรฐานชั้นทางที่ต่ำ ไหล่ทางมีความกว้างไม่เพียงพอให้รถจักรยานยนต์ขับชิดได้อย่างปลอดภัยและต้องขับขึ้นทางหลวงร่วมกับยวดยานประเภทอื่นๆ Federal Highway Administration [2] ความกว้างของไหล่ทางมีผลกระทบอย่างมากต่อการให้บริการจราจรและความจุของทางหลวง Hussain et.al., [3] ความกว้างอย่างน้อยที่ต้องการในการขับขึ้นช่องทางจักรยานยนต์อย่างปลอดภัย (Operating Space) สำหรับความเร็วเฉลี่ย 60 กม./ชม. เท่ากับ 1.3 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 1



(ก) ความกว้างอย่างน้อยที่ต้องการในการขับขี่จักรยานยนต์อย่างปลอดภัย (Operating Space) [3]



(ข) การขับขี่รถจักรยานยนต์บนไหล่ทางกว้างไม่เกิน 1.0 เมตร [4]
รูปที่ 1 ระยะความกว้างอย่างน้อยที่ต้องการในการขับขี่บนช่องทางจักรยานยนต์อย่างปลอดภัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาค่าปรับแก้ปัจจัย (Adjustment factor) สำหรับใช้ในประมาณค่าความจุของทางหลวงชนบทสองช่องจราจรนอกเมือง ด้วยวิธีการประมาณค่าความจุแบบทางอ้อม (Indirect-Empirical Method) โดยใช้แนวทางในการพัฒนาแบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาค (Traffic Micro-simulation Model) แทนการประมาณค่าความจุของทางหลวงโดยตรงที่ทำได้ค่อนข้างยากในทางปฏิบัติ นอกจากนี้ได้ทำการนำเสนอผลกระทบของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความจุของทางหลวงชนบทสองช่องจราจร เพื่อเป็นแนวเลือกในการนำไปใช้งานในการประมาณค่าความจุของทางหลวงชนบทสองช่องจราจร

2. วัตถุประสงค์

เพื่อพัฒนาค่าปรับแก้ปัจจัย (Adjustment factor) สำหรับใช้ในประมาณค่าความจุของทางหลวงชนบทสองช่องจราจรนอกเมือง ด้วยวิธีการประมาณค่าความจุแบบทางอ้อม (Indirect Empirical Method) จากแบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาค (Traffic micro-simulation model)

3. เนื้อหาของบทความ

วิธีการดำเนินการวิจัยในการศึกษานี้ ประกอบด้วย 5 ขั้นตอน ดังนี้

3.1 ขอบเขตพื้นที่ศึกษาและกรณีศึกษา

การศึกษานี้ทำการเลือกทางหลวงชนบทขนาดสองช่องจราจรนอกเมือง ซึ่งมีความกว้างของช่องจราจร 3.0 – 3.2 เมตร ความกว้างของไหล่ทางทางไม่เกิน 1.20 เมตร ซึ่งรถจักรยานยนต์จะมีผลกระทบอย่างมากต่อการให้บริการจราจรและความจุของทางหลวง โดยผู้วิจัยได้กำหนดขอบเขตในการคัดเลือกช่วงถนนทางหลวงชนบทที่อยู่ในเขตอำเภอเมืองขอนแก่น และอ้างอิงเกณฑ์ในการเลือกพื้นที่ศึกษาเบื้องต้น ตามแนวทางของการวิเคราะห์ความจุในสภาพอุดมคติ [5-7] ซึ่งผู้วิจัยได้เลือกทางหลวงชนบทสองช่องจราจร จำนวน 3 สายทาง (ดังแสดงในรูปที่ 2) ได้แก่ ทางหลวงชนบท ขก.2009 ทางหลวงชนบท ขก.1011 และทางหลวงชนบท ขก.1027 เป็นกรณีศึกษา

3.2 การสำรวจข้อมูลด้านการจราจร

การสำรวจและรวบรวมข้อมูลที่เป็นในการพัฒนาแบบจำลองสภาพการจราจร เพื่อใช้ในการประมาณค่าความจุของทางหลวงชนบทสองช่องจราจร ได้แก่

(1) ข้อมูลปริมาณจราจรและสัดส่วนยานพาหนะแยกตามประเภทยวดยาน 3 ประเภท ได้แก่ รถยนต์ส่วนบุคคล (PC) รถขนาดใหญ่ (HV) (ยวดยานที่มีมากกว่า 4 ล้อ สำหรับรถบรรทุกและรถบัสโดยสาร ซึ่งจะครอบคลุมทุกประเภทของรถบรรทุก ยกเว้นรถกระบะบรรทุกซึ่งมี 4 ล้อ [5]) และรถจักรยานยนต์ (MC)

(2) ข้อมูลสำหรับปรับเทียบแบบจำลอง ได้แก่ ความเร็วเฉพาะจุด เวลาในการเดินทาง และเวลาห่าง



(ก) ทางหลวงชนบท ขก.2009



(ข) ทางหลวงชนบท ขก.1011



(ค) ทางหลวงชนบท ขก.1027

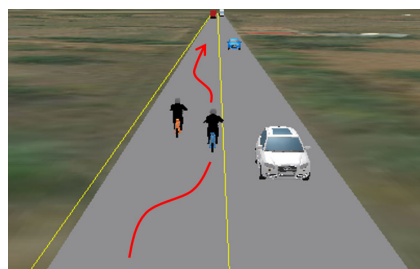
รูปที่ 2 กรณีศึกษา

3.3 การพัฒนาแบบจำลองกรณีฐาน

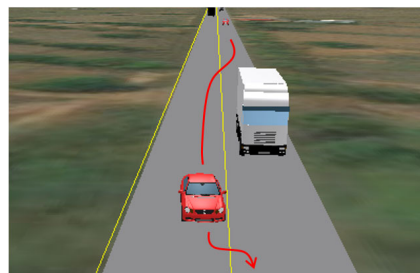
ในการศึกษานี้ใช้โปรแกรม PTV VISSIM ในการพัฒนาแบบจำลองฐาน เนื่องจากโปรแกรมที่มีความสามารถและประสิทธิภาพในการจำลองสภาพการจราจรและพฤติกรรมของผู้ขับขี่ได้อย่างใกล้เคียงกับสภาพจริงที่เกิดขึ้นบนทางหลวงชนบทสองช่องจราจร เช่น พฤติกรรมการขับที่ไม่อยู่ตรงกลางช่องจราจร (Non-Lane Based Behavior) และการแซงบนช่องจราจรในทิศทางตรงข้าม (Has passing lane) ดังแสดงในรูปที่ 3

โดยการพัฒนาแบบจำลองกรณีฐานมีขั้นตอน ดังนี้

(1) Base Data for Simulation เป็นการตั้งค่าเบื้องต้นของโครงข่ายและแบบจำลองยานยนต์ เช่น Distributions, Functions และ Behavior Parameters ตัวอย่างการตั้งค่า Desired Speed Distributions ซึ่งเป็นการกำหนดการกระจายตัวของความเร็วในการขับขี่ของยานยนต์แต่ละประเภทในแบบจำลอง ดังรูปที่ 4



(ก) Non-Lane Based Behavior



(ข) Has passing lane

รูปที่ 3 แบบจำลอง Non-Lane Based Behavior และ Has passing lane ในโปรแกรม PTV VISSIM

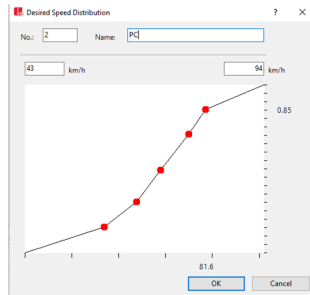
(2) Traffic Network Build เป็นการสร้างโครงข่ายถนนในแบบจำลอง โดยการศึกษาที่กำหนดความยาวของช่วงทางหลวงชนบทที่ทำการวิเคราะห์เท่ากับ 1 กิโลเมตร

(3) Simulation Parameters Setting เป็นการตั้งค่าตัวแปรในการประมวลผล ได้แก่ ช่วงเวลาในการประมวลผล ความละเอียดในการประมวลผล และ Random Seed

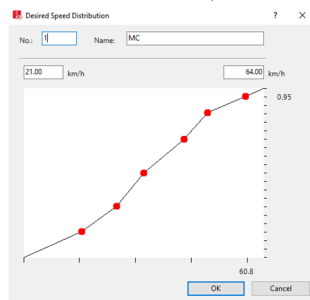
(4) Evaluations Configuration เป็นการตั้งค่าการประมวลผลผลลัพธ์ของแบบจำลอง เช่น การตั้งค่าการส่งออกผลลัพธ์ และการกำหนดตำแหน่งวัดค่าผลลัพธ์ต่างๆ เป็นต้น

ปีที่ 15 ฉบับที่ 3 เดือน กันยายน – ธันวาคม พ.ศ. 2563

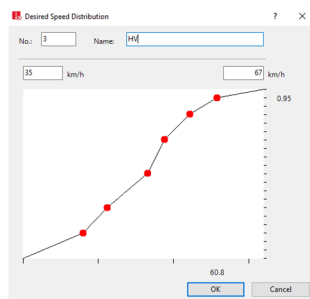
(5) Simulation Run and Error Checking เป็นขั้นตอนในการประมวลผล และค้นหาข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นในขั้นตอนการสร้างโครงข่ายและการป้อนข้อมูลเข้าสู่แบบจำลอง



(ก) รถยนต์ส่วนบุคคล



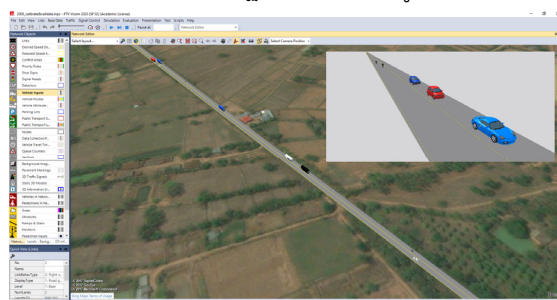
(ข) รถจักรยานยนต์



(ค) รถขนาดใหญ่

รูปที่ 4 Desired speed Distributions

ตัวอย่างแบบจำลองฐาน ดังแสดงในรูปที่ 5

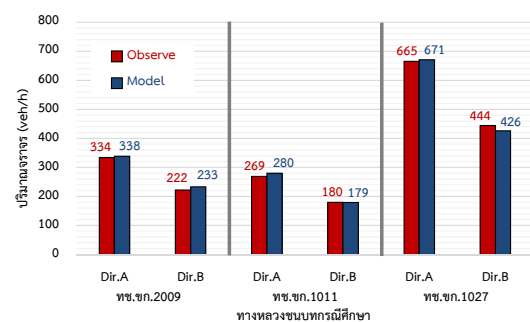


รูปที่ 5 แบบจำลองฐานที่พัฒนาขึ้นจากโปรแกรม VISSIM

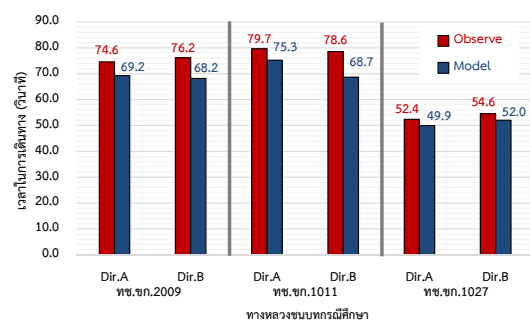
3.4 การเปรียบเทียบแบบจำลอง

การเปรียบเทียบแบบจำลองนี้ใช้ปริมาณจราจรบนช่วงถนน และเวลาในการเดินทาง เป็นดัชนีชี้วัดความ

สอดคล้อง โดยผลของการเปรียบเทียบปริมาณจราจรมีค่า GEH อยู่ในช่วง 0.07 – 0.86 (GEH ไม่เกิน 5) และค่าร้อยละความแตกต่างของการปรับเทียบเวลาในการเดินทาง อยู่ในช่วง 5.54 – 12.56 (คลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 15) ซึ่งผ่านตามเกณฑ์การปรับเทียบแบบจำลอง [8] ผลการเปรียบเทียบแบบจำลอง ดังแสดงในรูปที่ 6



(ก) เปรียบเทียบปริมาณจราจร



(ข) เปรียบเทียบเวลาในการเดินทาง

รูปที่ 6 ผลการปรับเทียบแบบจำลอง

3.5 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความจุในแบบจำลอง

ตัวอย่างปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความจุของทางหลวงชนบทสองช่องจราจร ดังตารางที่ 1 ทั้งนี้เมื่อทำการวิเคราะห์ความจุโดยพิจารณาสภาพที่เข้าใกล้อุดมคติ (เช่น ไม่มีจำนวนทางเชื่อม สภาพผิวไหล่ทาง และสภาพผิวจราจรปกติ สภาพอากาศและทัศนวิสัยดี เป็นต้น) เกณฑ์ในการเลือกพื้นที่ศึกษา (เช่น สภาพภูมิประเทศเป็นแบบราบเรียบมีความลาดชันน้อยกว่า 3% เป็นทางตรงไม่มีทางโค้งและการยกโค้ง) และสมมติฐานลักษณะทางกายภาพ

ของทางหลวงชนบท 2 ช่องจราจร ที่เป็นไปตามรูปแบบที่ให้บริการในปัจจุบัน (เช่น จำนวน 2 ช่องจราจร ความกว้างของช่องจราจร 3.0 -3.2 เมตร ความกว้างของไหล่ทาง 1.0-1.2 เมตร) จึงไม่นำบางปัจจัยเข้าร่วมพิจารณาในการศึกษา โดยได้พิจารณากำหนดปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความจุของทางหลวงชนบทสองช่องจราจรสำหรับกรณีศึกษาและกำหนดช่วงในการแปรผันค่าปัจจัยในการศึกษานี้ ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความจุของทางหลวงชนบทสองช่องจราจร [4]

กลุ่มปัจจัย	ปัจจัยที่มีผลต่อความจุ
สภาพถนน	- จำนวนทางเชื่อม - จำนวนช่องจราจร - ความกว้างของช่องจราจร - ความกว้างของไหล่ทาง - สภาพผิวไหล่ทาง (ปกติ-ชำรุด) - สภาพผิวจราจร (ปกติ-ชำรุด)
สภาพภูมิประเทศ	- ความลาดชัน - ทางโค้ง - การยกโค้ง
สภาพการจราจร	- การกระจายปริมาณจราจรต่อทิศทาง - รถขนาดใหญ่ - รถจักรยานยนต์
สภาพการควบคุมการจราจร	การจอดรถริมถนน
สภาพสิ่งแวดล้อม	สภาพอากาศ (พายุฝน)
พฤติกรรมรถขับขี่	พฤติกรรมการปฏิบัติตามขีดจำกัดความเร็ว

ตารางที่ 2 กำหนดปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความจุของทางหลวงชนบทสองช่องจราจรสำหรับกรณีศึกษา

ปัจจัย	ช่วงการแปรผันค่า
สัดส่วนรถจักรยานยนต์	0%, 10%, 20%, 30%
สัดส่วนรถขนาดใหญ่	0%, 5%, 10%
การกระจายปริมาณจราจรต่อทิศทาง	50/50, 60/40, 70/30

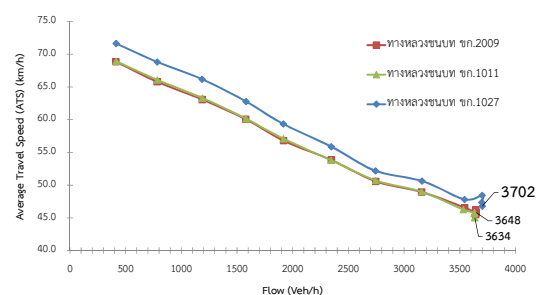
3.6 ประมาณค่าความจุจากแบบจำลองสภาพจราจร

การประมาณค่าความจุจากการประมวลผลด้วยแบบจำลองสภาพการจราจร โดยการกำหนดสถานการณ์ในการจำลองที่มีการปรับเปลี่ยนค่าปัจจัย และเพิ่มปริมาณจราจรตั้งแต่ 200, 400, 600, 800, 1,000, 1,200, 1,400, 1,600, 1,800, 2,000, 2,200, 2,400 คัน/ชั่วโมง/ทิศทาง หรือเพิ่มปริมาณจราจรขึ้นจนกระทั่งเกินความจุที่จะสามารถรับได้ สร้างเป็น Speed-Flow curve โดยใช้ค่าเฉลี่ยจากการประมวลผลแบบจำลอง 11 ครั้ง โดยแต่ละครั้งจะทำการเปลี่ยนค่า Random seed เพื่อเป็นการสุ่มพฤติกรรมรถขับขี่ให้แตกต่างกัน

4. ผลการวิจัย

4.1 ความจุในสภาพอุดมคติ

ผลจากการประมาณค่าความจุสูงสุดของทางชนบทสองช่องจราจรในสภาพอุดมคติด้วยแบบจำลองสภาพการจราจร เมื่อไม่มีรถจักรยานยนต์ ไม่มีรถขนาดใหญ่ และการกระจายปริมาณจราจรต่อทิศทางในสองทิศทางเท่ากัน พบว่า กรณีศึกษาทางหลวงชนบท ขก.1027 มีความจุสูงสุด (รวมสองทิศทาง) เท่ากับ 3,702 pc/h และค่าเฉลี่ยทั้ง 3 สายทาง เท่ากับ 3,671 pc/h ซึ่งสูงกว่าค่าความจุของทางหลวงสองช่องจราจรสูงสุดใน HCM2010 ซึ่งเท่ากับ 1,700 pc/h ในทิศทางเดียว และสูงสุดที่ 3,200 pc/h รวมสองทิศทาง [5] ค่าความจุสูงสุดและ Speed-Flow curve ของแบบจำลองทางชนบทสองช่องจราจรในสภาพอุดมคติของแต่ละสายทาง ดังแสดงในรูปที่ 7

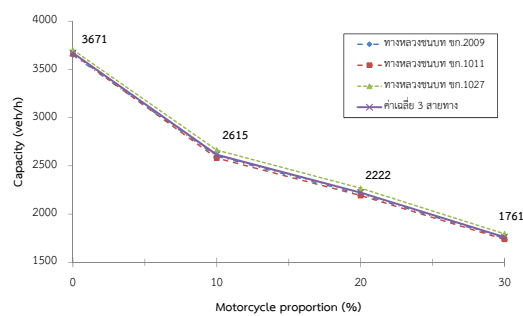


รูปที่ 7 ค่าความจุสูงสุดและ Speed-Flow curve ของแบบจำลองทางชนบทสองช่องจราจรในสภาพอุดมคติ

4.2 ผลกระทบจากปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความจุ

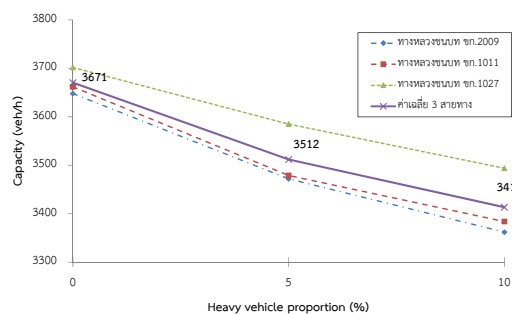
การวิเคราะห์ผลกระทบจากปัจจัยที่มีต่อความจุของทางหลวงชนบทสองช่องจราจร ดังนี้

(1) สัดส่วนรถจักรยานยนต์ มีผลให้ค่าความจุรวมสองทิศทาง (ไม่รวมปริมาณรถจักรยานยนต์) ค่าเฉลี่ยทั้ง 3 สายทาง เท่ากับ 2,615, 2,222 และ 1,761 veh/h สำหรับสัดส่วน 10%, 20% และ 30% เมื่อเปรียบเทียบกับสภาพในอุดมคติจะเห็นว่าความจุมีค่าลดลงเฉลี่ยร้อยละ 28.8, 55.4 และ 85.9 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 ผลกระทบจากสัดส่วนรถจักรยานยนต์ต่อความจุ

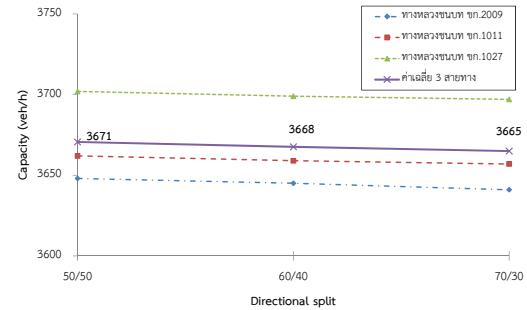
(2) สัดส่วนรถขนาดใหญ่ มีผลให้ค่าความจุรวมสองทิศทาง เฉลี่ยทั้ง 3 สายทาง เท่ากับ 3,512 และ 3,413 veh/h สำหรับสัดส่วนรถขนาดใหญ่ 5% และ 10% ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพในอุดมคติจะเห็นว่าความจุมีค่าลดลงเฉลี่ยร้อยละ 4.32 และ 7.01 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 ผลกระทบจากสัดส่วนรถขนาดใหญ่ต่อความจุ

(3) การกระจายปริมาณจราจรต่อทิศทาง มีผลให้ค่าความจุรวมสองทิศทาง เฉลี่ยทั้ง 3 สายทาง เท่ากับ 3,668 และ 3,665 veh/h สำหรับสัดส่วนการกระจายปริมาณ

จราจรต่อทิศทาง 60/40 และ 70/30 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพในอุดมคติจะเห็นว่าความจุมีค่าลดลงเฉลี่ยร้อยละ 0.08 และ 0.15 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 ผลกระทบจากการกระจายปริมาณจราจรต่อทิศทางต่อความจุ

4.3 ค่าปรับแก้ปัจจัย (Adjustment factor)

จากการวิเคราะห์และประมาณค่าความจุซึ่งได้รับผลกระทบจากปัจจัยที่พิจารณา สามารถระบุค่าความจุสูงสุดรวมสองทิศทางเป็นค่าคงที่เท่ากับ 3,671 pcu/h ซึ่งได้จากการเฉลี่ยค่าความจุภายใต้เงื่อนไขสภาพอุดมคติทั้ง 3 สายทาง สำหรับเป็นกรณีศึกษาหรือตัวแทนของทางหลวงชนบทสองช่องจราจรที่มีความกว้างช่องจราจร 3.0-3.2 เมตร ไหล่ทางกว้างไม่เกิน 1.2 เมตร โดยสามารถประมาณค่าความจุสำหรับทางหลวงชนบทสองช่องจราจรในการศึกษานี้ ดังสมการที่ (1)

$$C = 3,671 \times f_M \times f_H \times f_D \quad (1)$$

เมื่อ

C คือ ค่าความจุของทางหลวงชนบทสองช่องจราจร (veh/h)

f_M คือ ค่าปรับแก้สัดส่วนรถจักรยานยนต์

f_H คือ ค่าปรับแก้สัดส่วนรถขนาดใหญ่

f_D คือ ค่าปรับแก้การกระจายปริมาณจราจรต่อทิศทาง

(1) ค่าปรับแก้สัดส่วนรถจักรยานยนต์ (f_M) ความจุของทางหลวงชนบทสองช่องจราจรมีแนวโน้มลดลงเฉลี่ยร้อยละ 21.5 เมื่อสัดส่วนสัดส่วนรถจักรยานยนต์เพิ่มขึ้น 10% โดยได้ทำการประมาณค่าปรับแก้กันนอกช่วง

(Extrapolate) เพิ่มเติมจากผลการวิเคราะห์ความจุด้วยแบบจำลองการจราจรเพื่อให้ครอบคลุมช่วงของค่าปัจจัยที่อาจเป็นไปได้ ด้วยสมการเอ็กซีโพเนนเชียล $y = 3530.3e^{-0.024x}$ ($R^2 = 0.9794$) สำหรับสัดส่วนรถจักรยานยนต์ 40% และ 50% ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าปรับแก้สัดส่วนรถจักรยานยนต์ (Adjustment factor of motorcycle proportion, f_M)

สัดส่วนรถจักรยานยนต์	0%	10%	20%	30%	40%	50%
ค่าปรับแก้	1.000	0.712	0.605	0.480	0.368	0.290

(2) ค่าปรับแก้สัดส่วนรถขนาดใหญ่ (f_H) ความจุของทางหลวงชนบทสองช่องจราจรมีแนวโน้มลดลงเฉลี่ยร้อยละ 3.6 เมื่อสัดส่วนสัดส่วนรถขนาดใหญ่เพิ่มขึ้น 5% และประมาณค่าปรับแก้ช่วงเพิ่มเติมด้วยสมการ $y = 3661.1e^{-0.007x}$ ($R^2 = 0.9847$) สำหรับสัดส่วนรถขนาดใหญ่ 15% และ 20% ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าปรับแก้สัดส่วนรถขนาดใหญ่ (Adjustment factor of heavy vehicle proportion, f_H)

สัดส่วนรถขนาดใหญ่	0%	5%	10%	15%	20%
ค่าปรับแก้	1.000	0.957	0.930	0.898	0.867

ผลค่าปรับแก้สัดส่วนรถขนาดใหญ่ข้างต้นมีความสอดคล้องกับวิธีการที่เสนอโดย TRB [9] ซึ่งสามารถคำนวณค่าปรับแก้ f_{HV} สำหรับสภาพภูมิประเทศแบบราบเรียบ (Level terrain) เท่ากับ 0.957, 0.930, 0.898 และ 0.867 สำหรับสัดส่วนยวดยานขนาดใหญ่ 0%, 5%, 10%, 15% และ 20% ตามลำดับ โดยมีความแตกต่างกัน้อยเฉลี่ยร้อยละ 2.45

(3) ค่าปรับแก้การกระจายปริมาณจราจรต่อทิศทาง (f_D) ความจุของทางหลวงชนบทสองช่องจราจรมีแนวโน้มลดลงเฉลี่ยร้อยละ 0.1 เมื่อการกระจายปริมาณจราจรในทิศทางหลักมีสัดส่วนเพิ่มขึ้น 10% และประมาณค่าปรับแก้ช่วงเพิ่มเติมด้วยสมการ $y = 3684.8e^{-0.000005x}$

($R^2 = 0.9989$) สำหรับการกระจายปริมาณจราจรต่อทิศทาง 80/20 และ 90/10 ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ค่าปรับแก้การกระจายปริมาณจราจรต่อทิศทาง (Adjustment factor of directional split, f_D)

การกระจายปริมาณจราจรต่อทิศทาง	50/50	60/40	70/30	80/20	90/10
ค่าปรับแก้	1.000	0.999	0.998	0.997	0.996

4.4 เปรียบเทียบการประมาณค่าความจุของทางหลวงชนบทสองช่องจราจรด้วยสมการและค่าปรับแก้ปัจจัย กับวิธี HCM2010

ผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบผลการประมาณค่าความจุด้วยสมการและค่าปรับแก้ปัจจัยในการศึกษานี้ กับวิธีการ HCM2010 โดยใช้ตัวอย่างกรณีศึกษา 3 สายทาง โดยรวมพบว่า ค่าความจุด้วยสมการและค่าปรับแก้ปัจจัยจากการศึกษา มีค่าต่ำกว่าการประมาณค่าความจุด้วยวิธีการ HCM2010 ในช่วงประมาณร้อยละ 29.5 - 40.3 ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบการประมาณค่าความจุของทางหลวงชนบทสองช่องจราจรด้วยสมการและค่าปรับแก้ปัจจัย กับวิธี HCM2010

กรณีศึกษา	ทช.ชก. 2009	ทช.ชก. 1011	ทช.ชก. 1027
ปริมาณจราจรรวมสองทิศทาง (veh/h)	556	449	1109
สัดส่วนรถจักรยานยนต์	32.99%	22.07%	24.54%
สัดส่วนรถขนาดใหญ่	3.24%	4.68%	2.89%
การกระจายปริมาณจราจร	62.95%/37.05%	55.90%/44.10%	60.96%/39.04%
ความเร็ว (km/h)	50.4	50.1	52.5
ความจุ (veh/h)	สมการและค่าปรับแก้ปัจจัย	1,591	2,039
	HCM2010	2,666	2,972
ร้อยละความแตกต่าง		-40.3	-31.4

ตัวอย่างการคำนวณความจุ ($C_{i,ATS}$) ด้วยวิธี HCM2010 ทช.ชก.2009 (Class III) ดังสมการที่ (2)

$$C_{i,ATS} = 1,700 \times f_{g,ATS} \times f_{HV,ATS} \quad (2)$$

เมื่อ

$C_{i,ATS}$ = ความจุในทิศทางที่ทำการวิเคราะห์ภายใต้เงื่อนไขที่ขึ้นอยู่กับความเร็วเฉลี่ย (ATS)

i = “d” ทิศทางที่ทำการวิเคราะห์ หรือ “o” ทิศทางตรงข้าม

$$f_{g,ATS} = 1.00 \text{ (Level terrain)}$$

$$f_{HV,ATS} = \frac{1}{(1 + P_T(E_T - 1))} \quad (3)$$

$$f_{HV,ATS}(Dir.1) = 0.987$$

$$f_{HV,ATS}(Dir.2) = 0.984$$

$$C_{d,ATS}(Dir.1) = 1,700 \times 0.987 = 1678 \text{ veh/h}$$

$$C_{o,ATS}(Dir.2) = 1,700 \times 0.984 = 1673 \text{ veh/h}$$

อย่างไรก็ตามความจุของทางหลวงสองช่องจราจรภายใต้สภาพในอุดมคติ คือ 1,700 pc/hr ในทิศทางเดียวและสูงสุดที่ 3,200 pc/hr รวมสองทิศทาง [5] ทั้งนี้ความจุของทางหลวงสองช่องจราจรหรือปริมาณจราจรรวมสองทิศทางยังขึ้นอยู่กับ การกระจายตัวของปริมาณจราจรในแต่ละทิศทาง โดยถูกควบคุมด้วยสัดส่วนการกระจายตัวของปริมาณจราจรต่อทิศทางบนทางหลัก (ปริมาณจราจรมากกว่า) ดังสมการที่ (4) [10]

$$Capacity = \min \left\{ \frac{1700}{P_d}, 3200 \right\} \quad (4)$$

เมื่อ

P_d คือ สัดส่วนของปริมาณจราจรบนทิศทางหลัก

ดังนั้น ความจุด้วยวิธี HCM2010 ของ ทข.ชก.2009 รวมสองทิศทางเท่ากับ $1678/0.6295 = 2,666 \text{ veh/h}$

5. สรุป

แม้ว่าการใช้วิธีการ HCM ในการประมาณค่าความจุของทางหลวงจะเป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลาย แต่สำหรับทางหลวงชนบทสองช่องจราจรในประเทศไทยยังมีข้อจำกัดและปัจจัยต่างๆ ที่ทำให้การประมาณค่าความจุมีความคลาดเคลื่อนไปจากสภาพความเป็นจริง การศึกษานี้ได้ทำการพัฒนาค่าปรับแก้ปัจจัยสำหรับใช้ในการประมาณค่าความจุของทางหลวงชนบทสองช่องจราจรนอกเมือง โดยใช้การพัฒนาแบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคแทนการประมาณค่าความจุของทางหลวงโดยตรง พร้อมทั้งนำเสนอผลกระทบของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความจุของทางหลวงชนบทสองช่องจราจร ผลการศึกษารูป ได้ดังนี้

(1) ผลการวิเคราะห์และประมาณค่าความจุของทางหลวงชนบทสองช่องจราจร โดยใช้แบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคในการศึกษานี้ พบว่า การประมาณค่าความจุสูงสุดเฉลี่ยทั้ง 3 สายทาง เท่ากับ 3,671 pc/h ซึ่งสูงกว่าค่าความจุสูงสุดตามวิธีของ HCM 2010 แต่ใกล้เคียงกับผลการศึกษาของ Kim [11] ซึ่งค่าความจุ 3700 pc/h ที่ความเร็วในการไหลอิสระ 64.4 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

(2) ปัจจัยที่มีผลให้ค่าความจุลดลงสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพในอุดมคติ คือ สัดส่วนรถจักรยานยนต์ เนื่องมาจากพฤติกรรมการขับขี่ของรถจักรยานยนต์ที่เลยเข้ามาบนช่องจราจรหลักก็คขวางการสัญจรรถยนต์ประเภทอื่นๆ (PC และ HV) ซึ่งส่วนใหญ่ใช้ความเร็วในการขับขี่สูงกว่ารถจักรยานยนต์แต่ไม่สามารถขับแซงผ่านไปได้เมื่อมีปริมาณจราจรทิศทางตรงข้ามหนาแน่น รองลงมาคือสัดส่วนรถขนาดใหญ่ และการกระจายปริมาณจราจรต่อทิศทางแทบไม่มีผลต่อความจุสอดคล้องกับที่ระบุใน HCM2000 ที่ระบุว่ากระจายปริมาณจราจรต่อทิศทางเกือบจะเป็นอิสระกับความจุของทางหลวงสองช่องจราจร [12] โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อปริมาณจราจรในทิศทางตรงข้ามมีปริมาณจราจรเพิ่มสูงขึ้น

(3) การศึกษานี้ได้ทำการสรุปเป็นตารางค่าปรับแก้ปัจจัยพร้อมทั้งทำการประมาณค่านอกช่วงเพิ่มเติมจากผลการวิเคราะห์ความจุด้วยแบบจำลองการจราจรเพื่อให้ครอบคลุมช่วงของค่าปัจจัยที่อาจเป็นไปได้ ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความจุที่ได้จากสมการและค่าปรับแก้ปัจจัยจากการศึกษากัวิธี HCM2010 พบว่ามีความแตกต่างเฉลี่ยร้อยละ 33.7

อย่างไรก็ตามการศึกษานี้เป็นเพียงอีกแนวทางเลือกในการนำไปใช้งานในการประมาณค่าความจุของทางหลวงชนบทสองช่องจราจร ซึ่งการศึกษาในอนาคตอาจจำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยหรือเงื่อนไขอื่นๆ รวมทั้งการประมาณค่าความจุร่วมกับภาระการวิเคราะห์ระดับการให้บริการ (Level of service, LOS) เพิ่มเติม

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Department of Rural Road. (2020, May 17). Highway laws and regulations [Online]. Available: https://drr.go.th/?page_id=14600
- [2] Federal Highway Administration, “ Highway Functional Classification: Concepts, Criteria and Procedures, ” U. S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, 2014.
- [3] Hussain, H., Uma, R., Ahmad, R.S., Farhan, M.S. and Dadang M.M., “Key Components of A Motorcycle-Traffic System– A Study Along The Motorcycle Path In Malaysia,” *IATSS research*, 29(1), 1327-1339, 2005.
- [4] Wuttikrai Chaipanha, “ Development of Highway Capacity Analysis Guideline using Traffic Micro- Simulation Model, ” Ph. D. dissertation in Civil Engineering, Graduate School, Khon Kaen University., 2018.
- [5] Transport Research Board (TRB), “Highway Capacity Manual 2010,” 5th Ed., National Research Council, Transportation Research Board, Washington, D.C,USA: BROOKS/COLE., 2010.
- [6] Design guideline of road medians and road widening, Bureau of Surveying and Design, Department of Highways, ministry of transport, 2011.
- [7] Sharma N, Sarkar PK, Velmurugan S, “Estimation of Capacity for Multi-Lane Divided Inter-Urban Highways using Videography Technique of Data Collection,” in *6th Urban Mobility India Conference & Expo 2013*, 2004.
- [8] Design Manual for Roads and Bridges, Barton-Aschman Associates, Inc. and Cambridge Systematics, Inc, U.S. Department of Transportation, 1997.
- [9] Transport Research Board (TRB), “Planning Techniques to Estimate speed and service volumes for planning applications,” Report 387. National Research Council, Transportation Research Board, Washington, D.C, U.S.A., 1997.
- [10] Luttinen, R.T, “Percent Time Spent Following as Performance Measure for Two-Lane Highways,” *Journal of the Transportation Research Board*, 2, 52-59, 2001.
- [11] Kim J., “Capacity Estimation Method for Two-Lane, Two-Way Highways Using Simulation Modeling,” Ph.D. Thesis, The Pennsylvania State University, 2006.
- [12] Satish Chandra et. al, “Capacity estimation procedure for two-lane roads under mixed traffic conditions,” in *Indian Road Congress Paper No.498*, 2004.

Gross Domestic Product and Economic Value of Water Resources of River Basins in Thailand

Pavisorn Chuenchum Pongsak Suttinon*

Chulalongkorn University, Pathumwan, Bangkok, 10330, Thailand

*Corresponding author Email: pongsak.su@chula.ac.th

(Received: July 21, 2018, 2018; Accepted: December 15, 2020)

ABSTRACT

Water resources are mainly natural resources for the economic development of each country in the world. In recent, the climate change has affected water resources in the productive process of every economic sector. It is imperative to have a consideration for water allocation in economic efficiency. This study aims to calculate the gross domestic product (GDP) and water demand in each sub-district (tambon) and assess the economic value of water (GDP/cu.m.) of 25 basins in Thailand. GDP and water demand were considered from the main economic sectors of Thailand such as agriculture, manufacturing, and service. They were estimated using the available secondary database from government's agencies. The results showed the GDP of basins, which found that the Chao Phraya River Basin is the maximum GDP, but it consumed only the moderate water. In addition, the economic value of water in the manufacturing sector is the highest values in generating the GDP. This study can recommend the policymakers for the design of economic and environmental policies in driving Thailand's economy.

Keyword: Gross Domestic Product (GDP), water demands, economic value of water resources and river basin of Thailand.

1. Introduction

Natural resources are the primary resources for inputs in the productive processes, especially the water resources. Economic development after the industrial revolution has resulted in heavy consumption of water resources. Thailand as a developing country relies greatly on its.

For instance, rice cultivation area in Thailand was 62 million rai (rai = 1600 sq. m.) in 2015 and its water demand was approximately 1,200 cu.m./rai [1], so rice production of Thailand consumed the amount of water around 75 billion cu.m., annually [2]. However, in the drought year,

• บทความนี้ได้ถูกนำเสนอบางส่วนในการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 23

water storage in the dams is inadequate to allocate for agriculture and caused water deficits in many irrigation projects. In the same way, the manufacturing and service sectors may be dehydrated occasionally. The GDP was effected from this incident, which can be explained by Fig. 1. It shows the relationship between the annual rainfall and the GDPs. If there is one year, the annual rainfall is less than average annual rainfall. The GDP of the three sectors were decreased or settled.

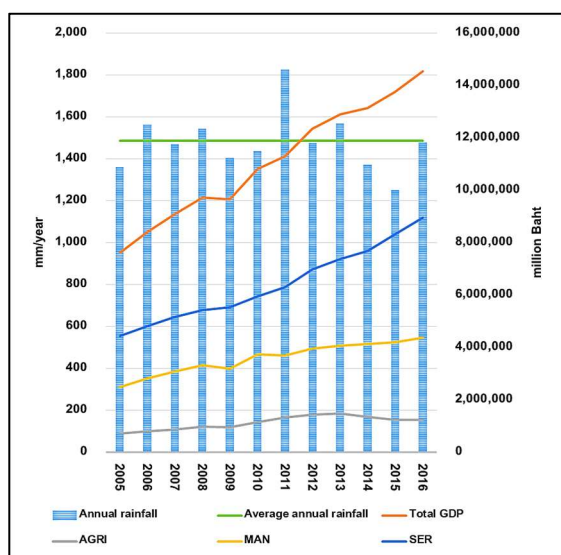


Fig. 1 The relationship between the annual rainfall and the GDPs

Therefore, the water resources is very important in driving the economy of Thailand. This is evident from the fact that the government established the Office of the National Water Resources when October 2016 [3]. It is responsible for integrated water management in all dimensions, especially socio-economic. The Information of GDP in regional and basin levels is essential for planning and national policy formulation in the future.

The purposes of this study are to build the databases and link the water resources to the economy in area-based information. Furthermore, this study estimates the economic value of water in 25 basins. These results can help provide information for policymaker in water resources management and allocation to achieve effective management and respond to the economic growth of Thailand.

2. Methodology

2.1. Study Area

This study focuses on the 25 basins in Thailand, where depending on the geographical characteristics. Thailand can be divided into four main geographical regions: The North, the Central Plains, the Northeast and the South [4]. The north region is covered by the most mountains, which serves as the origin of four major river basins, where include Ping, Wang, Yom, and Nan rivers. They converge to become the Chao Phraya river basin, the economic hub of this country. It is located in the central plains and it is the biggest agricultural area of Thailand.

The south region has the long mountains and the steep slope in many areas. It has the Tapi river and Andaman sea, where is a tourist attraction of this region. The northeast region is the most plateau and it has mainly three rivers, include Mae Klong, Chi, and Mun rivers, for farming and cultivation. This area is famous for jasmine rice, but it is also the poorest region in Thailand.

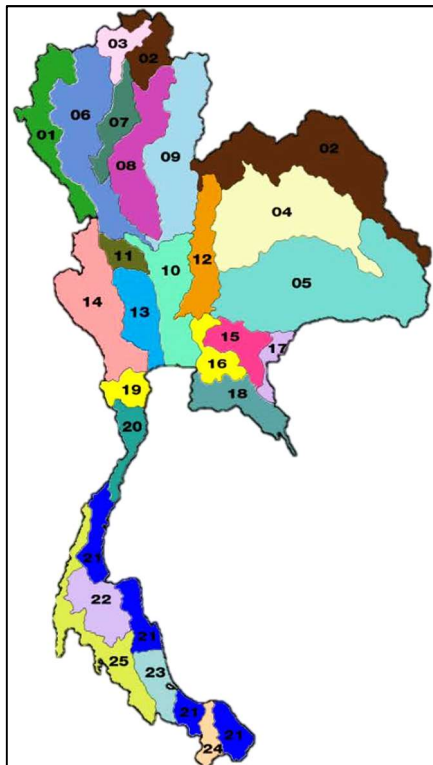


Fig. 2 The 25 river basins of Thailand [5]

Based on the geographical region, Thailand can be divided into 25 basins. It is shown in the Fig. 2 and the watershed area and annual runoff can be shown in the TABLE I. The average of annual rainfall and runoff are approximately 1,572.5 mm and 214,128 MCM [5]. The GDP of Thailand year 2010 is approximately 10,802,396 million Baht, which contributes from the agriculture, manufacturing and service sectors. Three economic sectors are about are 1,137,577, 3,725,272 and 5,939,547 million Baht [6], respectively. The maximum GDP of regions is the central region, the south, the northeast, and the north, respectively.

2.2. Methodological Framework

The methodological framework of this study consists of four parts. Firstly, we calculated the GDPs and water demand for the main economic sectors in the sub- district (Tambon) level

(agriculture, manufacturing, and service). Each economic sector has a different way of calculation. The details are discussed in the next section. The products are prepared as a Geographical Information System (GIS) format. Second, the techniques of spatial analysis were

TABLE I

Watershed areas and annual runoff of the major river basins in Thailand [4].

Basin No.	River Basin Name	Watershed area (sq.km.)	Annual run off (MCM)
1	Part of Salawin	17,920.19	8,156
2	Part of Mekong	57,422.07	15,800
3	Kok	7,895.38	5,119
4	Chi	49,476.58	8,035
5	Mun	69,700.44	21,767
6	Ping	33,891.71	6,686
7	Wang	10,790.74	1,429
8	Yom	23,615.59	1,430
9	Nan	34,330.16	9,518
10	Lower Chao Phraya	20,125.25	4,925
11	Sakae Krang	5,191.43	519
12	Pasak	16,292.24	2,708
13	Tha Chin	13,681.24	2,815
14	Mae Klong	30,863.76	12,943
15	Prachinburi	10,481.32	4,502
16	Bang Pakong	7,978.15	4,900
17	Part of Tonle Sap	4,149.97	1,193
18	East Coast Gulf	13,829.72	25,960
19	Phetchaburi	5,602.91	1,140
20	West Coast-Gulf	6,745.33	1,013
21	Peninsular-East Coast	26,352.78	35,624
22	Tapi	12,224.53	17,380
23	Thale Sap Songkhla	8,494.97	7,301
24	Pattani	3,857.82	3,024
25	Peninsular-West Coast	21,172.25	9,918
Total		512,065.81	214,128

used to overlay GIS data by using ArcGIS. These results can be shown the GDPs and water demand in sub-district and basin level. Next, we estimated the economic value of water of 25 basins in unit: Baht/cubic meter and compared these values between basins for policy guidelines. The methodological framework can be shown in the Fig. 3.

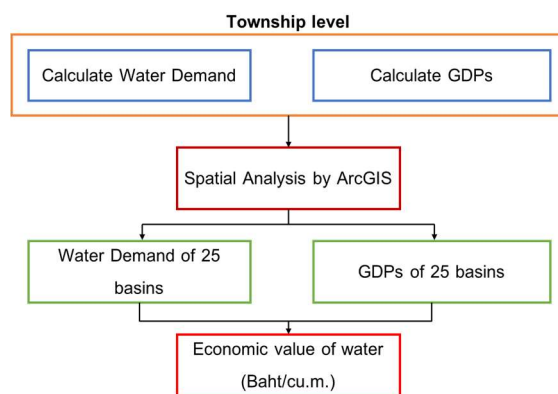


Fig. 3 The methodological framework

2.3. The GDP Calculation

The GDP is very important for the evaluation of economic status and the overall economic direction of the country. It is a monetary measure of the market value of all final goods and services produced in a period (quarterly or yearly) of time. This section is introduced the GDP calculation in each economic sector, namely the agriculture, manufacturing, and service. Based on the GDP data in 2010 from the Office of National Economic and Social Development Board (NESDB) was considered in this study.

2.3.1. The GDP of the Agricultural sector

Thailand has many cultivated crops. Thus, we consider especially five economic crops, namely rice (rainy season rice and dry season rice), sugarcane, cassava, maize, and para-rubber,

because they are approximately 60 percent of GDP agriculture.

According to Chuenchum et al. [7], the calculation of GDP agriculture is considered from land use data in 2009-2011, which obtained from the Land Development Department (LDD). The information of yields and the price of products for each crop type are obtained from the Office of Agricultural Economics (OAE) and the Department of Internal Trade (DIT), respectively. The crop area, which is divided by each sub-district, is multiplied with the yield of crop and the price of each product. Results of the calculation are the selling price of each crop, which is the sum of cost and profit, but GDP is a profit only. We must calculate the costs from the Input-Output Table or the description of the economic structure of Thailand [8]. Hence, the selling price is deducted by the cost of each crop. Summation of the profit from every crop type is the GDP of the agricultural sector.

2.3.2. The GDP of the Manufacturing sector

The calculation of GDP manufacturing is estimated from an economic model in the field of macroeconomics and forecast production, which is called “Cobb-Douglas Production Function”. It can be shown in Equation (1). This equation is based on the relationship between productive inputs and the number of outputs.

$$Q = aK^bL^c \quad (1)$$

where Q is the GDP of manufacturing (Baht). K and L are the capital and labor inputs, respectively and constants a , b , and c are the total factor productivity, the output elasticity of capital and

of labor respectively [7]. The constants a , b , and c are estimated by multiple linear regression of manufacturing data in provinces [9]. The GDP of the manufacturing sector is calculated from the number of industries, capital, and labor in the sub-districts and basins. The manufacturing data are obtained from the Department of Industrial Works (DIW) and the National Statistics Office (NSO).

2.3.3. The GDP of the Service sector

The GDP of the service sector is difficult in the calculation because many sectors cannot collect the details of the information. Thus, we assume that the density of the population represents the representation of GDP because the service sector includes the infrastructures (electricity, water supply, and gas), education and tourism etc. Therefore, the GDP of service is estimated based on Gross Province Product (GPP) from 77 provinces. The GPP is further distributed to sub-district level by weighting ratio of a number of population of the sub-district level to the number of population of provincial level. Then, the GIS is used for coverage to determine the river basin GDP.

2.4. Water Demand

The calculation of water demand in this study is considered from the secondary data of the government agencies, which are based on 2010. Water demand of three economic sectors is focused in this section.

2.4.1. Water demand of agricultural sector

In this section, we used the average water demand of the crops, which is based on the lysimeter test in the experiment from the Royal Irrigation Department (RID) [1]. Each province is

different values because of the difference in temperature, rainfall, and humidity.

2.4.2. Water demand of manufacturing sector

The calculation of water demand for manufacturing can be calculated by using horsepower from industries in the sub-districts. The horsepower (H) is multiplied with a coefficient of water demand for each type of manufacturing plant [10] as shown in Equation (2).

$$WD_{Man.} = H \times (Coeff. \times Correction\ factor) \quad (2)$$

The coefficient of water demand based on types of industries is based on the data in 2005. Thus, we must be adjusted to reflect water demand in 2010. The correction factor is used in the adjustment and is calculated from the total water demand of manufacturing in 2010 per total water demand of manufacturing in 2005, which is found to be 0.31. The correction factor is multiplied with water demand in 2005 of each manufacturing sector for adjustment data. The result will be the water demand in 2010 in each manufacturing sector.

2.4.3. Water demand of service sector

The calculation of water demand on service is complicated. A service sector consists of various sectors. Water demand of service sector can be categorized into two groups, namely household and service, and tourism as shown in Equation (3).

$$WD_{Ser.} = Household + Service \& Tourism \quad (3)$$

Water demand of household can be calculated from household water usage (Lpcd, liters per capita per day) multiplied with a

population in each sub-district. The population data are obtained from the Department of Provincial Administration, and the Lpcd is based on Suttinon et al. [11]. Similarly, water demand of the service and tourism is considered from the secondary data, which can be obtained from the National Statistics Office (NSO) of Thailand.

2.5. Economic Value of Water of 25 Basins

The definition of the economic value of water is one cubic meter of water can be generated how many monetary values (Baht/cubic meter). It is very important in water allocation for the best economic worthiness. The economic value of water can be estimated by the GDP basin per water demand. It is shown easily in Equation (4).

$$\text{Economic value of water} = \frac{\text{GDP}}{\text{Water demand}} \quad (4)$$

where the economic value of water is the value of water in generating monetary values, the GDP basin is the total of GDP in each sub-district, where is covered by basin boundary and water demand is the water used of the whole basin or each economic sector. Especially, water demand of service sector is divided as two kinds, namely the 60 percent (No generate GDP) and 40 percent (generate GDP) because water demand of service sector is combined between water consumption of people and water consumption of tourism, education and service businesses etc. Water consumption of people is water usage in the daily life of each person, which do not generate GDP, such as shower and cleaning. Conversely, water consumption of tourism, education and service businesses is water usage in service activities, which generates GDP. Thailand does not have the

proportion of water usage in the service sector for generating GDP. The proportion (60/40) is based on Suttinon et al. [11], which is the assumption of water usage in the service sector of Japan.

3. Results and Discussion

This section can be divided into two parts, including the results from the GDP calculation and water demand and the results of the economic value of water.

3.1. The GDP Calculation and Water Demand

The GDP and the water demand results in sub-district and basin levels are shown in the Fig. 4, 5, 6 and 7, and the details of the GDP and water demand are shown in the Fig. 8.

The primary GDP of agriculture is rice and para rubber, which represents approximately 28 and 27 percent of this sector, respectively [8]. Rice cultivation can be divided into two times in a year, namely the in-season and off-season rice. The majority area of rice is the north, central, west and east regions. In the same way, the most area of the south region is the para rubber. The GDP of agriculture in sub-district and basin levels presents the dark green color, which is high GDP, in the north, west, central, east and south region. The main water resources are consumed from the Ping, Nan, Sakae Krang, Mae Klong, East coast gulf, Peninsula-East coast and Tapi river basins for generating the GDP.

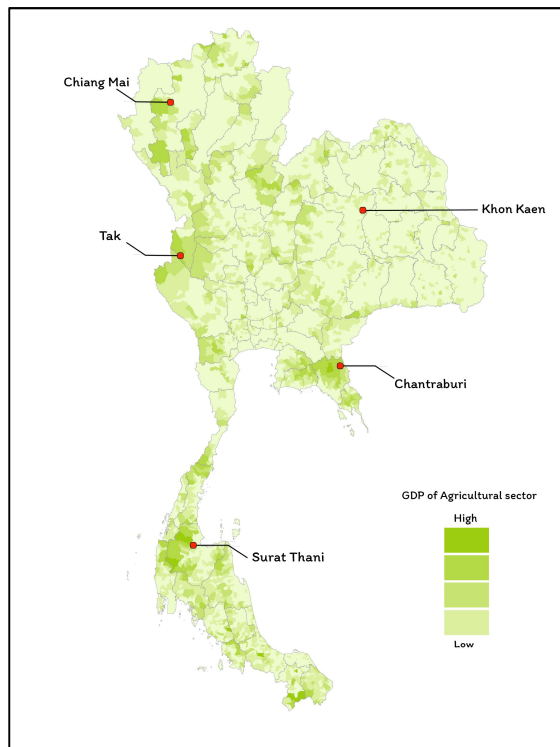


Fig. 4(a) The GDP of agricultural sector in sub-district

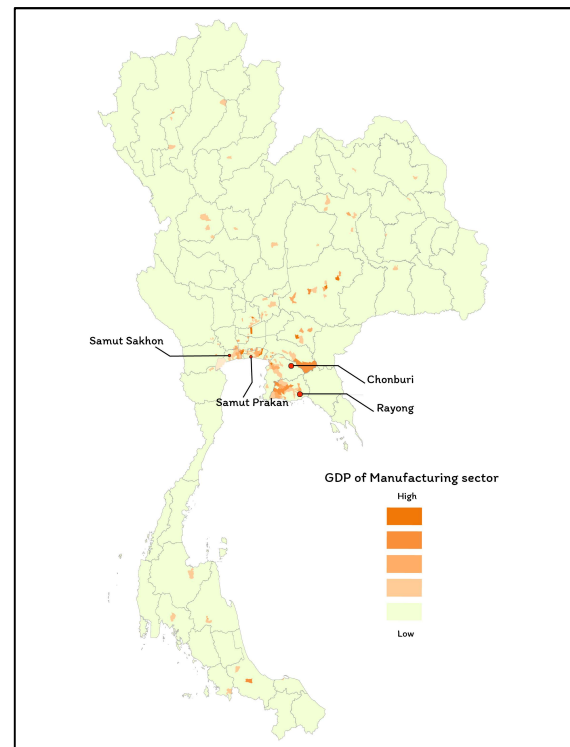


Fig. 5(a) The GDP of manufacturing sector in sub-district

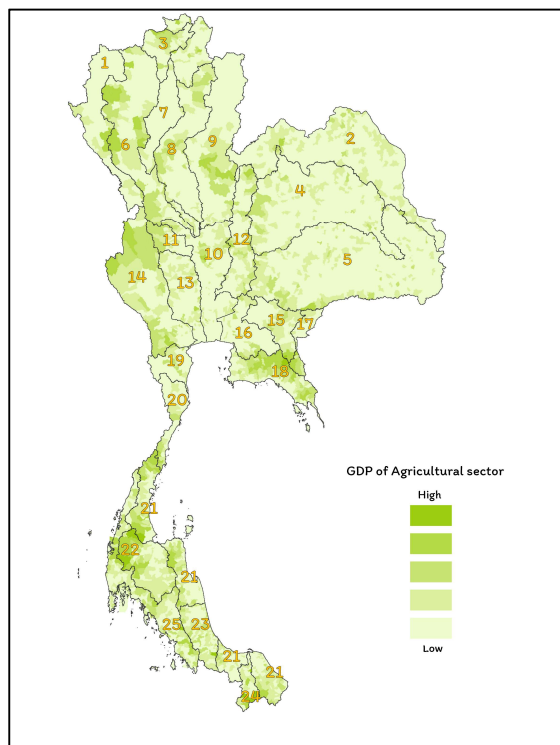


Fig. 4(b) The GDP of agricultural sector in basin level

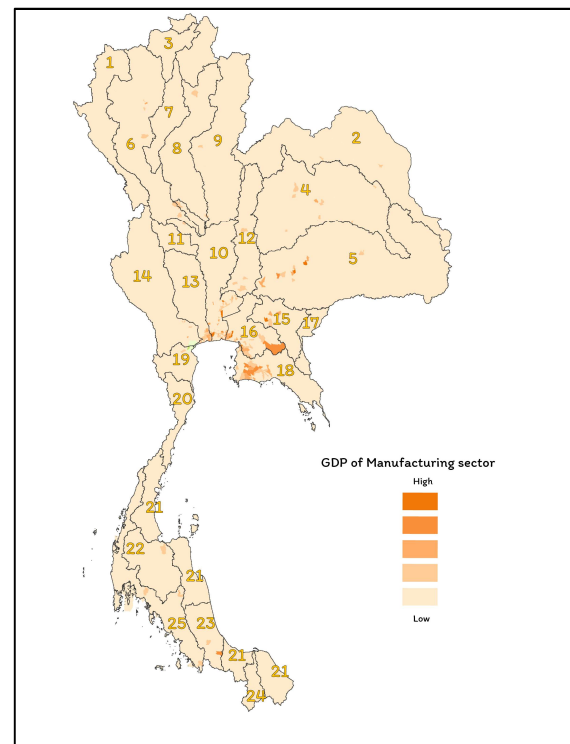


Fig. 5(b) The GDP of manufacturing sector in basin level

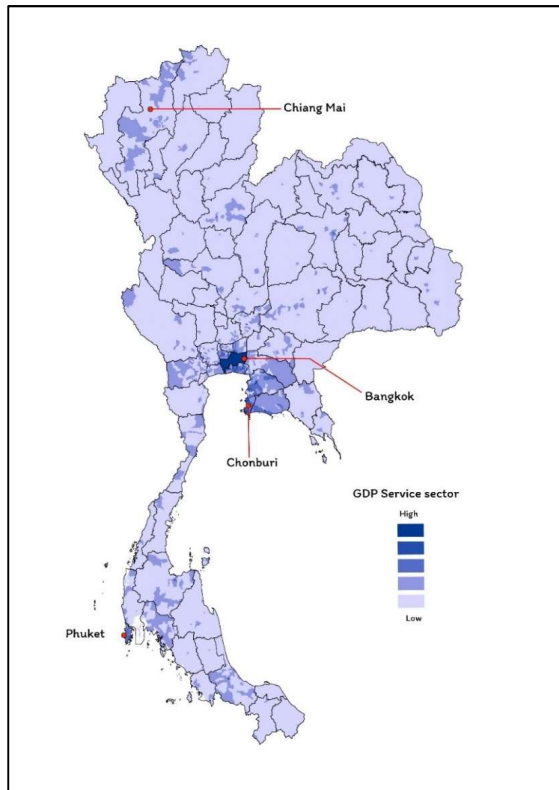


Fig. 6(a) The GDP of service sector in sub-district

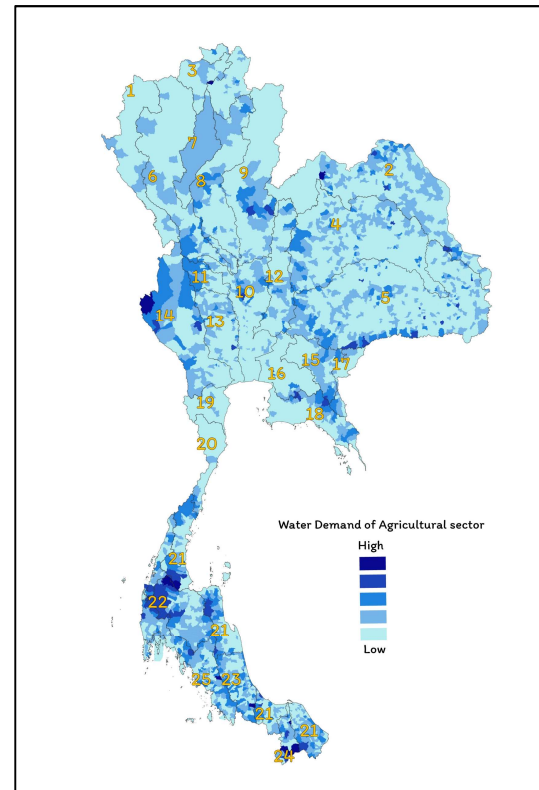


Fig. 7(a) Water demand of agricultural sector

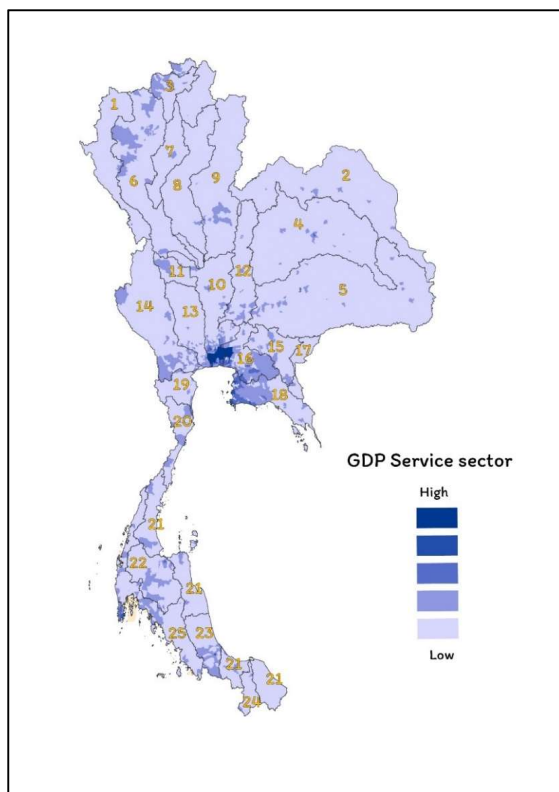


Fig. 6(b) The GDP of service sector in basin level

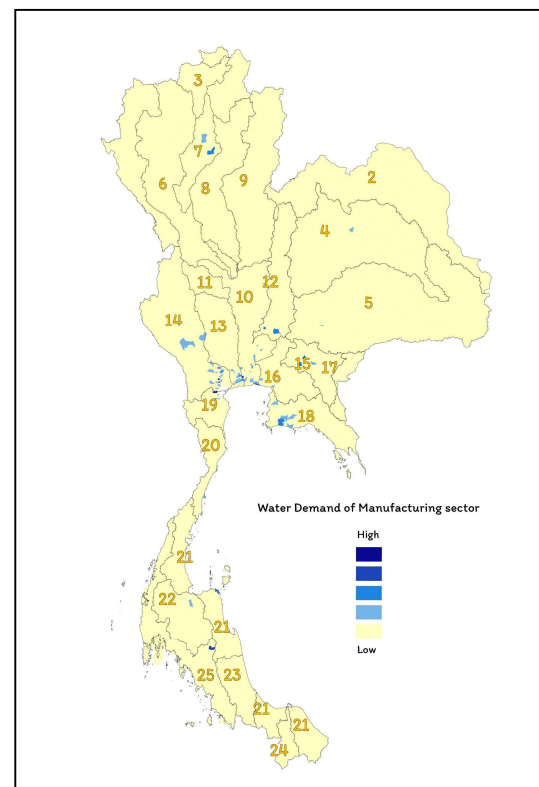


Fig. 7(b) Water demand of manufacturing sector

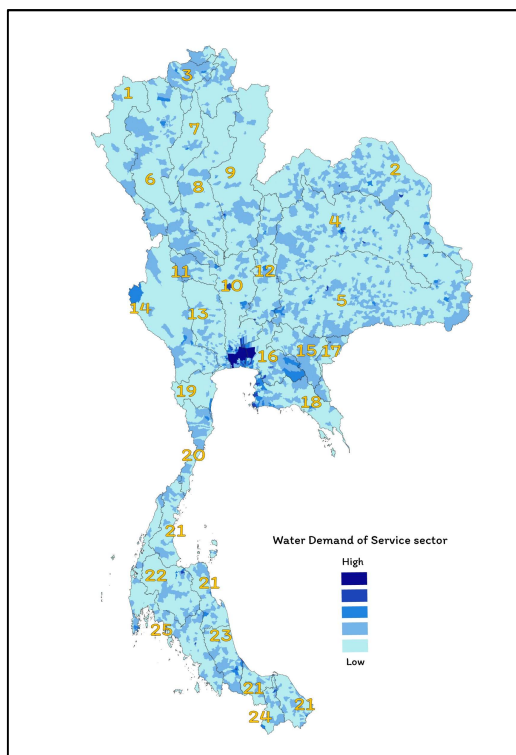


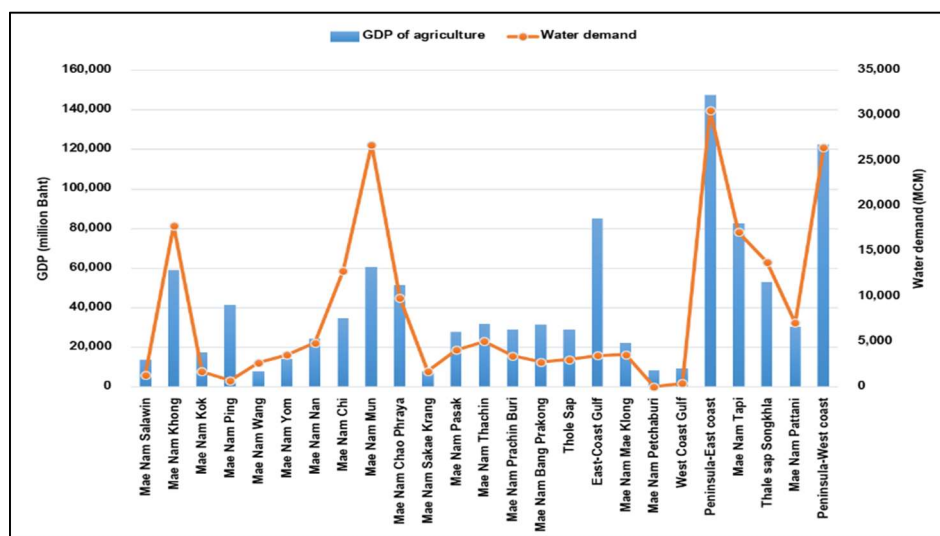
Fig. 7(c) Water demand of service sector

Fig. 8(a) shows the relationship between the GDP of agriculture and water demand. We can analyze and classify as three types of water demand for generating the GDP, including the low (Type I), moderate (Type II) and high-water demand (Type III). Type I, II and III can be explained that water used is low, moderate and high but it can produce high GDP. Hence, the results of Type I is the Ping, Petchaburi, and West coast gulf river basins. Type II is the Salawin, Kok, Pasak, Thachin, Prachinburi, Bang Prakong, Toe sap, and Mae Klong river basins. Type III is the remaining river basins. Moreover, we consider the GDP of five economic crops as GIS, which is shown in Fig. 9. The different GDP can be identified the behavior of farmers in each region. Thus, If Thailand wants to develop and reform the agricultural production, it will attempt to change as Type I and II. In addition, the government must

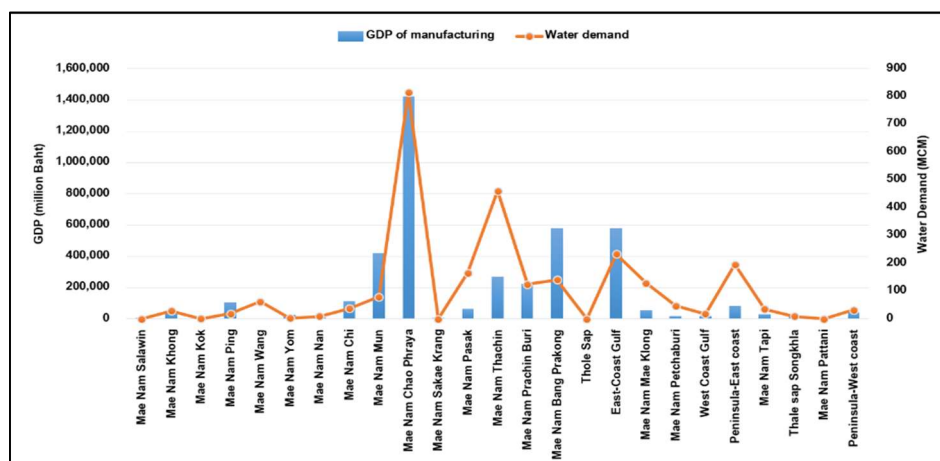
support farmers from selling the raw agricultural product to processed agricultural products.

The GDP of the manufacturing sector is identified clearly in Fig. 5. The results show the dark orange color for high GDP, which matches with the main industrial area in some regions of Thailand, namely the central and east regions (Eastern Economic Corridor, EEC). They are one-third of the GDP in this sector. Other orange points display the major cities of the country, where the main roads cross. Fig. 8(b) shows the relationship between the GDP of manufacturing and water demand. The Chao Phraya river basin is the maximum GDP, and the Bang Prakong, East coast gulf, and Mun river basins are second values, respectively. They consume the low water demand for generating the GDP. Conversely, Thachin river basin consumes high water demand but it produces low GDP because this area has the food and food processing industries.

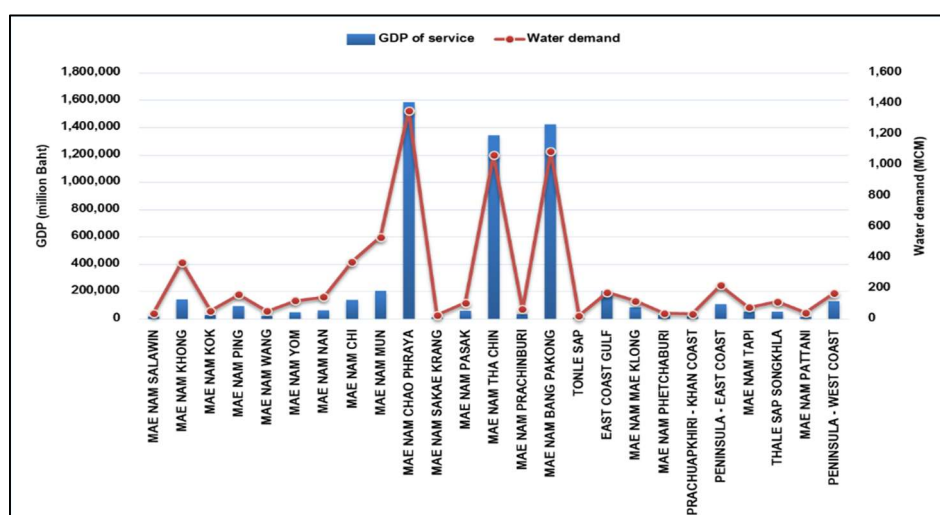
Finally, the GDP of the service sector is shown in Fig. 6. The service sector is very important because it is approximately 58 percent of the whole country. The results are similar to the manufacturing sector, but they are different in the south region. The most GDP of service is identified in the famous tourism and big cities of Thailand such as Bangkok, Chonburi, Chiang Mai, and Phuket. Fig. 8(c) presents the relationship between the GDP of service and water demand. The Chao Phraya, Bang Prakong and Thachin river basins are high GDP but they consume much water demand. On the other hand, the basins near the Gulf of Thailand and Andaman sea consume less water used but they can produce the moderate GDP.



(a)



(b)



(c)

Fig. 8(a), 8(b) and 8(c) The relationship between the GDP and water demand in each sector

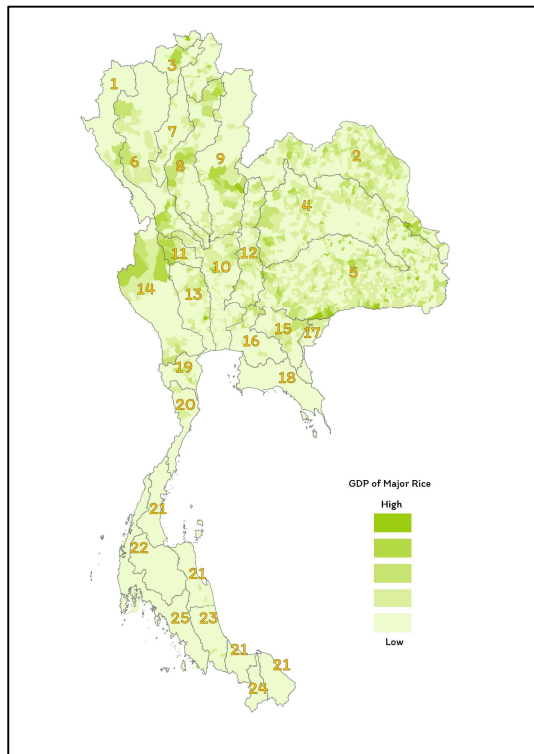


Fig. 9(a) The GDP of major rice in Thailand

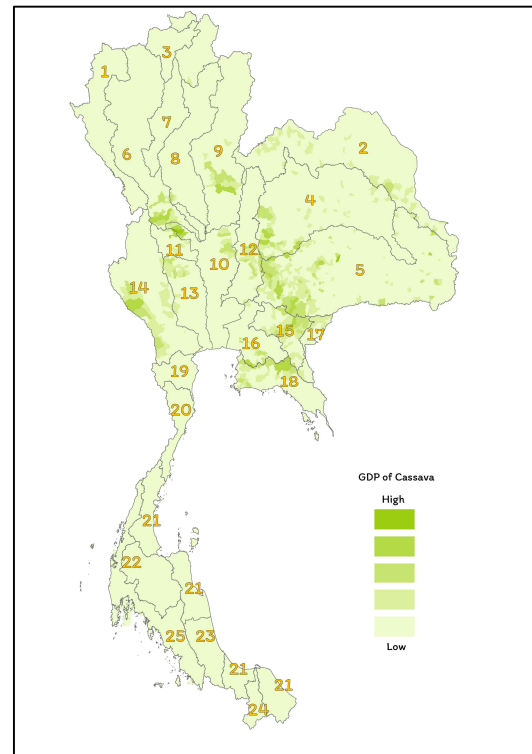


Fig. 9(c) The GDP of cassava in Thailand

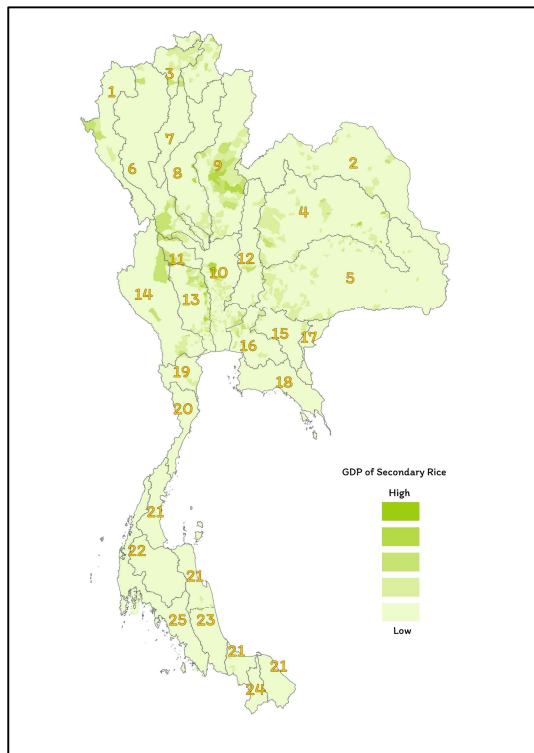


Fig. 9(b) The GDP of secondary rice in Thailand

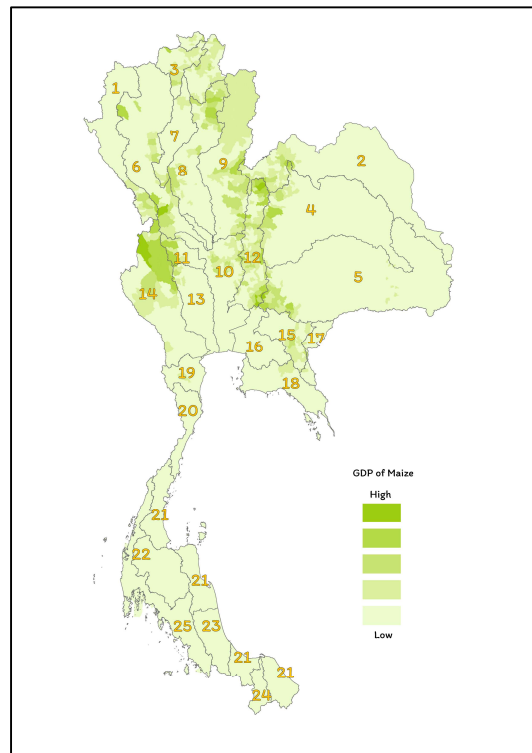


Fig. 9(d) The GDP of maize in Thailand

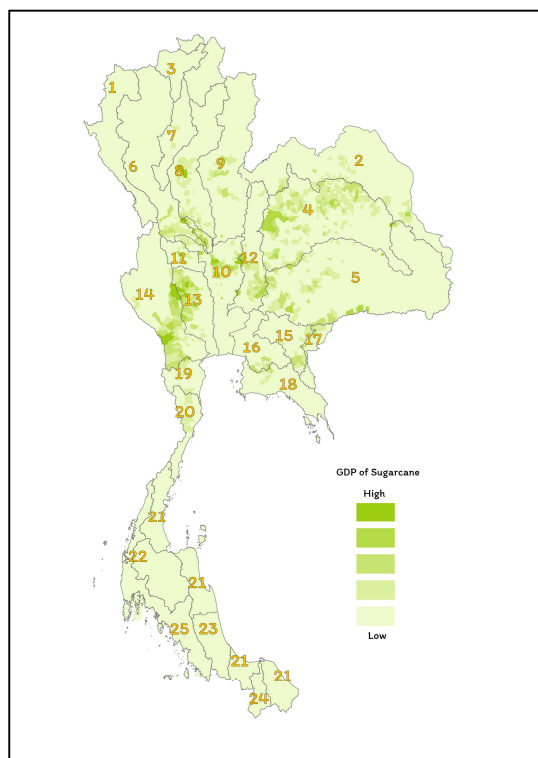


Fig. 9(e) The GDP of sugarcane in Thailand

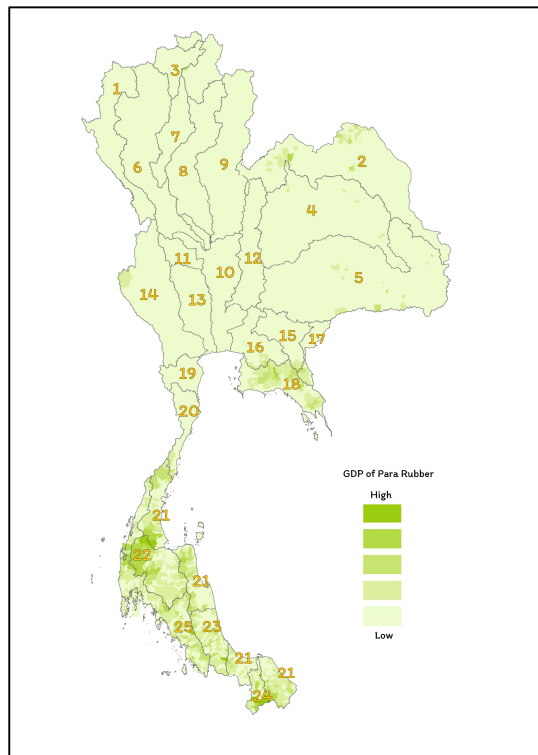


Fig. 9(f) The GDP of para rubber in Thailand

TABLE II

Economic value of water of 25 basins

(unit: Baht/cu.m.)

<i>River Basins</i>	<i>Agri</i>	<i>Man</i>	<i>Ser</i>
<i>Mae Nam Salawin</i>	10.6	1,700	1,174
<i>Mae Nam Khong</i>	3.3	1,413	972
<i>Mae Nam Kok</i>	10.1	1,606	1,226
<i>Mae Nam Ping</i>	58.2	5,589	1,503
<i>Mae Nam Wang</i>	3.0	56	1,203
<i>Mae Nam Yom</i>	3.9	8,224	1,062
<i>Mae Nam Nan</i>	5.0	1,168	1,107
<i>Mae Nam Chi</i>	2.7	3,033	932
<i>Mae Nam Mun</i>	2.3	5,295	967
<i>Mae Nam Chao Phraya</i>	5.2	1,744	2,924
<i>Mae Nam Sakae Krang</i>	4.5	2,088	1,107
<i>Mae Nam Pasak</i>	6.8	379	1,440
<i>Mae Nam Thachin</i>	6.3	586	3,151
<i>Mae Nam Prachin Buri</i>	8.5	1,790	1,407
<i>Mae Nam Bang Prakong</i>	11.4	4,119	3,264
<i>Thole Sap</i>	9.6	2,783	1,015
<i>East-Coast Gulf</i>	24.4	2,490	2,998
<i>Mae Nam Mae Klong</i>	6.3	45	1,820
<i>Mae Nam Petchaburi</i>	143.3	371	1,846
<i>West Coast Gulf</i>	22.2	929	1,718
<i>Peninsula-East coast</i>	4.8	434	1,209
<i>Mae Nam Tapi</i>	4.8	846	1,827
<i>Thale sap Songkhla</i>	3.8	1,369	1,163
<i>Mae Nam Pattani</i>	4.3	4,980	953
<i>Peninsula-West coast</i>	4.6	1,254	1,954

3.2. Economic Value of Water of 25 Basins

The results of the calculation of the economic value of water in 25 basins can be shown in TABLE II. The economic value of water in the agriculture is the least valuable of three sectors because it consumes a lot of water in production processes such as the rice

cultivation (in-season and off-season rice), sugarcane, and rubber tree etc. but generating fewer profits.

The results present that the Petchaburi, Ping, and East coast gulf river basins are the most valuable of three sectors, respectively. The service sector has the middle economic value of water because one water unit of its can generate GDP, greatly. The Bang Prakong, Thachin, and Chao Phraya river basins are the maximum GDP of service. They are the center of tourism, government office, and service businesses. Finally, the economic value of water in the manufacturing sectors shows the maximum values in some basins, where are the huge industrial areas and the industry that produces high GDP such as the automotive industry and petrochemical etc. TABLE II shows that some basins are remarkable and inferior in the agriculture, manufacturing or service from the results of the economic value of water. It can be a way to plan and solve problems in accordance with current economic propulsion.

4. Conclusion

This study demonstrates the application of the relationship between GDP and water demand in the geographical information system (GIS) and the economic value of water in 25 basins. The methodology used in this study can be well-applied with the GDP and water demand calculation in sub-district and basin levels. The results of studies show that the GDP of the service sector is the maximum values, and the economic value of water in the

manufacturing sector is the most valuable. There is the main economic driver of the country. The GDP of manufacturing sector mainly receives from the export, labor, and taxes, and the most industries are the assembly industry, which consumes our natural resources, and the products will be export to other countries. The GDP received from this sector is less than the service sector. Finally, the GDP of agriculture and the economic value of water is the least valuable because this sector consumes much water demand, but it produces less GDP. This study does not take into account social issues in consideration. Thus, it by no means implies water allocation policy to be based on the calculated economic value of water but the analysis demonstrated can be used as a tool for the policy formulation. Additionally, the procedures implemented in this study can be used as a guideline for increasing economic value of water and water planning and management in the spatial distribution.

5. Acknowledgment

This research was part of the research project “The Conceptual Framework for Water-Food-Energy Nexus Research towards Sustainable Development Planning”. The authors would like to express gratitude for the data sets used in this study from the relating government agencies such as the Royal Irrigation Department (RID), the Office of Agricultural Economics (OAE) and the Office of National Economic and Social Development

Board (NESDB). Finally, we would like to thank Mr. Tulyawat Mahawong for helping in the GIS data processing and the calculation in various parts.

6. References

- [1] The Royal Irrigation Department (RID). (2018, April 11). Evapotranspiration (ET) of crops [Online]. Available: <http://water.rid.go.th>
- [2] Centre for Agricultural Information, “Agricultural of statistics of Thailand 2010,” Ministry of Agriculture and Cooperatives, 2010.
- [3] Government Gazette. (2018, May 20). Establishment of the Office National Water Resources, Thailand [Online]. Available: <http://www.ratchakitcha.soc.go.th>
- [4] Office of National Water Resources Committee. (2018, May 20). State of water environmental issues [Online]. Available: <http://www.wepadb.net/policies/state/thailand/thailand.html>
- [5] C. Siripornpipul. (2018, May 20). Technological demand of water resources management in urban development in Thailand [Online]. Available: <https://www.asef.org/images/docs/2%20Technological%20Demand%20of%20Water%20Management%20in%20Urban%20Development%20in%20Thailand.pdf>
- [6] The National Statistics Office (NSO). (2017, January 8). Gross Domestic Product (GDP) in Thailand economy [Online]. Available: <http://service.nso.go.th/nso/nsopublish/Basestat/basestat.html>
- [7] P. Chuenchum, P. Suttinon, and P. Ruangrassamee, “Input-output analysis of water deficits in nan river basin, Thailand,” in *THA 2017 International Conference on Water Management and Climate Change Towards Asia’s Water-Energy-Food Nexus*, Bangkok, 2017, pp. 265-271.
- [8] The Office of National Economic and Social Development Board. (2017, January 8). The Input-output table of Thailand 2010 [Online]. Available: <http://www.nesdb.go.th>
- [9] N. Chuenchum, *Theory of Economics and Analysis*. Bangkok: Thammasat University Press, 2005.
- [10] S. Koontanakulvong, C. Suksri, T. Kitpaisalsakul, P. Santithamnon, A. Putthividhya, P. Hoisungwan, A.D. Gupta, and S. Nasu, “Effectiveness Aspect of Surface Water Management and Impact on Groundwater,” Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand, Final Rep., 2005.
- [11] P. Suttinon, S. Nasu, N. Bongochgetsakul, K. Uemoto, and T. Ihara, “Hybrid water input-output model for regional management,” *J. SSMS.*, vol. 9(1), pp. 1-9, Dec. 2013.

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการศึกษาระดับความสูงในการสูบน้ำ ของระบบสูบน้ำความร้อนด้วยกำลังไอน้ำแบบต่อเนื่อง

The Mathematical Modeling for a Study of Suction Heads of a Continuous Operation Thermal Water Pump with Steam System

จิรวัดน์ สิตรานนท์^{1*} กิตติวุฒิ ศุทธิวิโรจน์² ณัฐพล รุ่งประแสง³

¹สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก

43 ม.6 ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี, 20110

²ภาควิชาครุศาสตร์เครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

1518 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ, 10800

³กองกำกับและอนุรักษ์พลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน

17 ถนนพระราม 1 แขวงรอบเมือง เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ, 10300

Jirawat Sitranon^{1*} Kittiwat Sutthivirode² Natthaphon Roonprasang³

¹School of Engineering and Innovation, Rajamangala University of Technology Tawan-ok

43 Moo 6 Bang Phra Sub-district, Siracha District, Chonburi 20110

²Department of Mechanical Education, Faculty of Industrial Education, King Mongkut's University
of Technology North Bangkok

1518 Pracharat 1 Road, Wongsawang, Bangsue, Bangkok 10800

³Bureau of Energy Regulation and Conservation, Department of Alternative Energy Development
and Efficiency, Ministry of Energy

17 Rama 1 Road, Rong Muang, Pathum Wan, Bangkok 10330

*Corresponding author Email: Jirawat_solar@hotmail.com

(Received: April 29, 2020; Accepted: December 28, 2020)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาระดับความสูงในการสูบน้ำของระบบสูบน้ำความร้อนด้วยกำลังไอน้ำ ซึ่งระบบประกอบด้วย ถังผลิตไอน้ำ ถังสูบน้ำ ถังน้ำหล่อเย็น โดยในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่ระดับความสูงในการสูบน้ำ 2-8 เมตร เป็นระยะเวลา 10 ชั่วโมง และเปรียบเทียบความแตกต่างกับการทดลองของ อุณหภูมิในถังผลิตไอน้ำ อุณหภูมิถังสูบน้ำ และความดันในถังสูบน้ำ จากการศึกษาพบว่าในช่วงเริ่มต้นของการทดลอง ระบบใช้เวลานาน แต่ในรอบถัดไปจะใช้พลังงานและระยะเวลาในการทำงานน้อยลง เมื่อระดับความสูงในการสูบน้ำเพิ่ม มากขึ้นปริมาณน้ำทั้งหมดที่สูบได้จะลดลง แต่ในทางตรงกันข้ามเมื่อระยะเวลาในการทำงานแต่ละรอบเพิ่มมากขึ้นและ จำนวนรอบจะลดลง อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพปั๊มน้ำยังคงเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงในการสูบน้ำเพิ่มขึ้น ผลของระดับความสูง 8 เมตร พลังงานที่ใช้ในการสูบน้ำ 112 กิโลจูล ประสิทธิภาพปั๊มน้ำ 1.86619% ปริมาณน้ำที่สูบได้ 1,428 ลิตร และผลที่ ระดับความสูง 2 เมตร พลังงานที่ใช้ในการสูบน้ำ 40 กิโลจูล ประสิทธิภาพปั๊มน้ำ 0.66649% ปริมาณน้ำที่สูบได้ 2,040 ลิตร สรุปได้ว่าการเพิ่มระดับความสูงในการสูบน้ำช่วยให้เพิ่มประสิทธิภาพปั๊มน้ำให้สูงขึ้น จากงานวิจัยของ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.7145, 1.8714 และ 8.3831% สำหรับอุณหภูมิน้ำในถังผลิตไอน้ำ อุณหภูมิถังสูบน้ำ และความดันในถังสูบน้ำ

คำสำคัญ: แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ประสิทธิภาพปั๊มน้ำ ปั๊มน้ำความร้อน

ABSTRACT

The objectives of this article was to study the suction heads of a thermal water pump with steam system. The system consisted of a steam tank, condenser tank and feed water tank. However, in this research we studied the suction head of 2 - 8 m for 10 hours per test. However, in this research we studied the suction head of 2 - 8 m for 10 hours per test and compare the different with the experiments of the water temperature in the steam tank, temperature in the condenser tank and pressure inside the condenser tank. From the study we found a long beginning operating time. However, for the next cycle, it might use less energy and had short operating time. When the suction head increased, the total pumped water volume was reduced. But on the contrary the pumping cycle time was increased. The number of pumping cycles then decreased. However, pumping efficiency increased with the suction heads increases. At 8 m head, we got 112 kJ potential energy stored, 1.86619% pump efficiency and 1,428 L pumped water and at the 2 m head: the potential energy stored was 40 kJ, the pump efficiency was 0.66649% and the pumped water was 2,040 L. In conclusion, increasing the suction head enhanced the pump efficiencies. From this research of the mathematical model were different from the measured values by 0.7145, 1.8714 and 8.3831% for the water temperature in the steam tank, temperature in the condenser tank and pressure inside the condenser tank.

Keyword: Mathematical model, Pump efficiency, Thermal water pump.

1. บทนำ

น้ำมีความสำคัญอย่างยิ่งกับชีวิตของพืชและสัตว์บนโลกรวมทั้งมนุษย์เราด้วย เป็นทรัพยากรที่สามารถเกิดหมุนเวียนได้เรื่อย ๆ ไม่มีวันหมด เป็นแหล่งกำเนิดชีวิตของสัตว์และพืช คนเรามีชีวิตอยู่โดยขาดน้ำได้ไม่เกิน 3 วัน และยังมีความจำเป็นทั้งในภาคเกษตรกรรมและอุตสาหกรรม ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งในการพัฒนาประเทศ ดังนั้นการนำน้ำมาใช้ก็นับว่าเป็นปัญหาอย่างหนึ่งที่จะต้องตอบสนองความต้องการเพียงพอดังความต้องการของมนุษย์และสัตว์ ซึ่งปัจจัยสำคัญในการชลประทานก็คือการสูบน้ำ โดยใช้พลังงานส่วนใหญ่จาก น้ำมัน และไฟฟ้า

การสูบน้ำเพื่อการเกษตร ถือได้ว่าเป็นสิ่งสำคัญและจำเป็นมากสำหรับประเทศไทย ทั้งนี้เพื่อตอบสนองความต้องการพื้นฐานด้านเกษตรกรรม การเพาะปลูก 1 ไร่ ต้องใช้น้ำ 1,000 m³/year โดยประมาณ [1] ปัจจุบันเกษตรกรใช้เครื่องสูบน้ำด้วยพลังงานเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นส่วนใหญ่ มีบางท้องที่ใช้เครื่องสูบน้ำด้วยไฟฟ้า อย่างไรก็ตามในพื้นที่ที่มีไฟฟ้าใช้ การสูบน้ำด้วยไฟฟ้าก็ยังมีข้อจำกัด เฉพาะบริเวณที่มีสายส่งถึงส่วนบริเวณที่ไม่มีสายส่งถึง ที่เป็นบริเวณการเกษตรทางไฟฟ้าหลายกิโลเมตร และมีความต้องการน้ำ จะไม่สามารถสูบน้ำด้วยไฟฟ้าได้ แต่เนื่องจากการเกษตรส่วนใหญ่ที่ใช้เครื่องสูบน้ำแบบใช้

ปีที่ 15 ฉบับที่ 3 เดือน กันยายน – ธันวาคมพ.ศ. 2563

น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง มีต้นทุนภายใต้เงื่อนไขราคา น้ำมันที่เป็นอยู่ปัจจุบัน ทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในด้านเชื้อเพลิงมากขึ้น เมื่อต้องการสูบน้ำในปริมาณที่มากขึ้น การใช้พลังงานรังสีอาทิตย์ในการสูบน้ำโดยวิธีการเปลี่ยนพลังงานโดยตรงผ่านเซลล์รังสีอาทิตย์ และปั๊มไฟฟ้า พบว่าระบบดังกล่าวมีต้นทุนการสูบน้ำต่อหน่วยสูง

การออกแบบเครื่องสูบน้ำ โดยที่ไม่มีชิ้นส่วนเคลื่อนที่ทำงานอัตโนมัติแบบซาเวรี ใช้อุณหภูมิมากกว่า $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยให้ใช้ตัวรวมแสงในการผลิตไอน้ำ โดยมีประสิทธิภาพปั๊มประมาณ 4.5% แต่ยังมี การสูญเสียความร้อนส่วนหนึ่ง ในขณะที่ทำให้น้ำจากอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมกลายเป็นน้ำร้อนที่อุณหภูมิสูงถึง $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ และการสูญเสียไปกับการกลั่นตัวของไอน้ำ [2]

การเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนเพื่อการขับเคลื่อนน้ำ โดยควบคุมการไหลของของเหลวด้วยวาล์วกันกลับ อาศัยกลไกการขยายตัวของไอและของเหลว ที่เกิดขึ้นจากความร้อนเป็นการทำงานของระบบปั๊มน้ำ และการควบแน่นของการระบายความร้อนด้วยอากาศ จนทำให้เกิดความดันสุญญากาศในการสูบน้ำ การเคลื่อนของของเหลวทำหน้าที่เป็นลูกสูบเหลวในการปั๊มน้ำ [3]

การออกแบบปั๊มความร้อน ขึ้นอยู่กับแหล่งความร้อนและความสูงในการส่งน้ำ ถ้าเกิดจากการสูบน้ำ ระดับความสูงในการสูบน้ำจะมีความสำคัญอย่างมากในการเลือกแหล่งความร้อน หากแหล่งความร้อนถูกกำหนดแล้ว การเลือกสารทำงานเป็นทางเลือกเดียวที่จะกำหนดระดับความสูงในด้านส่งและด้านสูบได้ ตามความดันในการทำงาน [4]

การเลือกสารทำงานที่เข้ากันได้กับวัสดุของไดอะแฟรม ซึ่งการเลือกสารทำงานจะส่งผลโดยตรงกับอุณหภูมิของการระเหย และการควบแน่น ทำให้จำเป็นต้องเลือกแหล่งความร้อนที่เหมาะสม ดังนั้นจึงได้ปรับเปลี่ยนวัสดุที่ใช้เป็นไดอะแฟรมให้สอดคล้องกับสารทำงาน ซึ่งจะกระทบกับการออกแบบปั๊มน้อยที่สุด เพื่อเป็นการประยุกต์ใช้กับแหล่งพลังงานความร้อนที่มีอุณหภูมิต่ำได้ [5] ปั๊มไดอะแฟรมมักถูกใช้เป็นส่วนหนึ่งใน

การสูบน้ำขนาดเล็กกระหว่างสารทำงาน 2 ชนิด ที่ไม่ต้องการให้สารทำงานทั้งสองชนิดรวมตัวกัน การออกแบบปั๊มที่ไม่มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่โดยใช้ความร้อนและแรงโน้มถ่วงช่วยในการขับเคลื่อนสารทำงาน และนำไปประยุกต์ใช้กับแหล่งความร้อนจากชีวมวล [6]

การปั๊มน้ำโดยอาศัยการขยายตัวของไอน้ำ ความดันที่ตั้งไว้สำหรับใช้ในการส่งน้ำแปรผันตรงกับปริมาตรในการส่งน้ำ สมรรถนะของระบบขึ้นอยู่กับปริมาตรน้ำที่สูบได้ และความสูง ประสิทธิภาพในการสูบน้ำมีค่าประมาณ 0.03% ที่ความสูงรวม 2-3 m [7] ในปี พ.ศ. 2555 ได้มีการจดอนุสิทธิบัตรเรื่อง ปั๊มน้ำพลังงานความร้อน ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี [8]

การประยุกต์การนำระบบปั๊มน้ำความร้อนด้วยกำลังไอน้ำ โดยการใช้ไอน้ำขับเคลื่อนอากาศ ไปทดลองใช้งานจริงสำหรับการเกษตร โดยการแทนที่ปริมาตรอากาศด้วยไอน้ำ ที่อุณหภูมิ $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ที่ความดันบรรยากาศ โดยใช้พลังงานความร้อนจากฟืน เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพปั๊มน้ำของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยใช้ไอน้ำเป็นสารทำงาน และหล่อเย็นด้วยอากาศ จากวัฏจักรคาร์โนต์สามารถสูบน้ำได้ที่ระดับความลึก 10.3 m และมีค่าประสิทธิภาพปั๊มน้ำสูงสุด 4.5% การพัฒนาระบบสูบน้ำโดยใช้ไอน้ำเป็นสารทำงาน และหล่อเย็นด้วยน้ำโดยตรง สามารถสูบน้ำได้ที่ระดับความลึก 2-6 m และมีค่าประสิทธิภาพปั๊มน้ำอยู่ในช่วง 0.028-0.0489% ดังนั้นการเพิ่มปริมาตรน้ำที่สูบได้ และการเพิ่มความสูงในการสูบน้ำจะส่งผลโดยตรงกับประสิทธิภาพปั๊มน้ำ เป็นที่มาของระบบสูบน้ำด้วยกำลังไอน้ำที่ใช้ถังสูบน้ำขนาดใหญ่ ซึ่งพบว่ามีค่าประสิทธิภาพปั๊มน้ำ 0.041% สามารถสูบน้ำได้ที่ระดับความลึก 3 m แต่ระบบดังกล่าวยังไม่สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง จึงทำให้ระบบสามารถสูบน้ำได้เพียงแค่อบเดียว [9]

การจำลองอุณหภูมิผสมที่ทำให้เกิดความดันสุญญากาศ โดยมีขนาดถังสูบน้ำ ตั้งแต่ 100-1,000 L พบว่าความดันสุญญากาศไม่มีการเปลี่ยนตามขนาดของถังสูบน้ำ แต่กลับพบว่าต้องใช้ปริมาณน้ำหล่อเย็นมากขึ้น

ตามขนาดถังสูบน้ำ และประสิทธิภาพปั้มน้ำเฉลี่ยสูงขึ้นตามขนาดถัง [10]

การทดลองการสูบน้ำด้วยกำลังไอน้ำ ปริมาตรถังสูบน้ำ 240 L ควบคุมการทำงานด้วยมือ ที่การจำลองการให้พลังงานความร้อนด้วยไฟฟ้าจนถึงสูบน้ำมีอุณหภูมิ 97 °C และระบายความร้อนด้วยอากาศ ประสิทธิภาพปั้มเพิ่มขึ้นตามความสูง 0.03, 0.09 และ 0.15% ที่ระดับความลึกในการสูบน้ำ 1, 3 และ 5 m ตามลำดับ เมื่ออุณหภูมิแวดล้อมลดลงจะเกิดการควบแน่นภายในถังสูบน้ำได้ง่ายขึ้น และจะใช้ระยะเวลาในการระบายความร้อนลดลง ซึ่งส่งผลเพียงเล็กน้อยกับประสิทธิภาพปั้ม ดังนั้นการใช้น้ำหล่อเย็นแทนการระบายความร้อนด้วยอากาศ จะลดระยะเวลาในการระบายความร้อนลง 87.5% แต่ก็ไม่ส่งผลกระทบกับประสิทธิภาพปั้มมากนัก [11] การศึกษาระดับความสูงในการส่งน้ำด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เมื่อความสูงในการส่งน้ำเพิ่มขึ้น ปริมาณความร้อนสะสมจะลดลง ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพทางความร้อนลดลงตามไปด้วย แต่อุณหภูมิที่ผลิตได้จะสูงขึ้นตามความสูงในการส่งน้ำ [12]

การเปลี่ยนสถานะของสารทำงาน โดยใช้อุณหภูมิอ้างอิงของเหลวอิ่มตัวของสารทำงาน เพื่ออธิบายพฤติกรรมของเอนทัลปี ในช่วงที่ของเหลวเปลี่ยนสถานะเป็นไอ เมื่อป้อนพลังงานเข้าไป แต่ในทางตรงกันข้าม การเปลี่ยนสถานะของไอเป็นของเหลวก็จะคายพลังงานออกมา เป็นการกำหนดเพื่อให้ได้มาของสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของไออิ่มตัวและของเหลวอิ่มตัวของเพนเทน [13] ปั้มที่ขับเคลื่อนด้วยความร้อนถูกประยุกต์ใช้กับวัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์ขนาดเล็ก ทดแทนปั้มไฟฟ้าเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับแหล่งพลังงานความร้อนอุณหภูมิต่ำ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของวัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์ [14]

จากงานวิจัยที่ผ่านมา เครื่องสูบน้ำด้วยพลังงานความร้อนแบบใช้กำลังไอน้ำขับเคลื่อนอากาศ ไม่สามารถสูบน้ำได้อย่างต่อเนื่อง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาและออกแบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบให้สามารถทำงาน

ได้อย่างต่อเนื่อง และศึกษาระดับความสูงในการสูบน้ำ ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพปั้มน้ำ โดยการเพิ่มจำนวนถังสูบน้ำ และเพิ่มขนาดถังผลิตไอน้ำให้สามารถผลิตไอน้ำเพียงพอกับความต้องการของไอน้ำในระยะเวลา 10 h ที่ความสูงในการสูบน้ำ 2 ถึง 8 m โดยเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดลองที่ระดับความสูงในการสูบน้ำ 3 m

2. ทฤษฎีและสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานกลในการสูบน้ำ โดยอาศัยการเปลี่ยนสถานะของสารทำงานในระบบปั้มน้ำ เริ่มจากการให้ความร้อนกับของเหลวจนกลายเป็นไอ เพื่อไล่อากาศจนหมด และหล่อเย็นด้วยน้ำโดยตรง จะทำให้เกิดการควบแน่น และเกิดความดันสุญญากาศภายในระบบ ดังนั้นจึงทำให้ระบบสามารถสูบน้ำจากแหล่งน้ำขึ้นมากักเก็บไว้ภายในระบบ และเริ่มทำงานในรอบต่อไป การเปลี่ยนสถานะของน้ำจากอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมจนกลายเป็นไอน้ำ ด้วยการระเหย (Evaporation) ที่ความดันบรรยากาศ เมื่อน้ำได้รับพลังงานความร้อนสะสมจนกระทั่งมีอุณหภูมิถึงจุดเดือด (100 °C) จะทำให้น้ำเปลี่ยนสถานะเป็นไอน้ำอย่างรวดเร็ว แต่ในทางกลับกันการเปลี่ยนสถานะไอน้ำให้กลายเป็นน้ำ จะเป็นการคายตัวของความร้อนแฝงในระบบปิด จึงเกิดการสูบน้ำ ที่เรียกกันว่าลูกสูบเหลว โดยการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม Visual Basic for Application เปรียบเทียบกับการทดลองวินาทีต่อวินาที

โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะพิจารณาสมการดังต่อไปนี้ เพื่อทำนายผลของอุณหภูมิ ความดันจำนวนรอบการทำงาน ปริมาตรน้ำที่สูบได้ และพลังงานที่ใช้ในการสูบน้ำ รวมถึงประสิทธิภาพปั้มน้ำด้วย

$$\eta_p = \frac{NW_h}{Q_{input}} \times 100\% \quad (1)$$

$$W_h = V_c \rho_w g h \quad (2)$$

ประสิทธิภาพปั๊มน้ำสามารถคำนวณได้จากพลังงานที่ได้ในการสูบน้ำต่อพลังงานที่ป้อนให้กับระบบ ดังสมการที่ 1 เมื่อ η_p คือประสิทธิภาพปั๊มน้ำ (%) W_h คือ พลังงานที่ได้ในการสูบน้ำต่อรอบ (kJ) N คือ จำนวนรอบ Q_{input} คือ พลังงานที่ป้อนให้กับระบบ (kJ) V_c คือ ปริมาตรที่สูบน้ำได้ต่อรอบ (m^3) ρ_w คือ ค่าความหนาแน่นของน้ำ (kg/m^3) g คือ ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (m/s^2) h คือ ระดับความสูงในการสูบน้ำ (m) การให้ความร้อนกับน้ำให้ถึงผลิตไอน้ำที่ให้น้ำเปลี่ยนสถานะเป็นไอน้ำ เกิดจากการป้อนพลังงานเข้าระบบ ดังสมการที่ 3 แต่มีพลังงานบางส่วนสูญเสียกับสิ่งแวดล้อม ดังสมการที่ 4 และ 5 [9] โดยสมมติให้อุณหภูมิของของไหลภายในถังมีค่าเท่ากัน จึงไม่คิดการสูญเสียความร้อนที่เกิดจากการพาความร้อนภายในถัง ส่วนการสูญเสียความร้อนจากการพาความร้อนและการแผ่รังสีภายนอก ยังมีค่าน้อยมากจึงไม่นำมาคิด เนื่องจากได้หุ้มฉนวนรอบถังทั้งหมด จึงคิดการสูญเสียความร้อนเนื่องจากการนำความร้อนเท่านั้น

$$\dot{Q}_{input} = m_w C_{p,w} \frac{d(T_w)}{dt} + Q_{loss,ST} \quad (3)$$

$$Q_{loss,ST} = Q_{cond,ST} = UA_{ST}(T_{ST} - T_a) \quad (4)$$

$$U = \frac{k_i}{L_i} \quad (5)$$

$\dot{Q}_{input}$ คือ อัตราพลังงานที่ป้อนให้กับระบบ (kW) m_w คือ มวลน้ำในถังผลิตไอน้ำ (kg) $C_{p,w}$ คือ ค่าความจุความร้อนของน้ำ ($kJ/kg \text{ } ^\circ C$) $\frac{d(T_w)}{dt}$ คือ ผลต่างของอุณหภูมิในถังผลิตไอน้ำที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ($^\circ C/s$) $Q_{loss,ST}$ คือ อัตราพลังงานความร้อนที่สูญเสียของถังผลิตไอน้ำ (kW) U คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อน ($W/m^2 K$) A_{ST} คือ พื้นที่การนำความร้อนของถังผลิตไอน้ำที่หุ้มฉนวน (m^2) T_{ST} คือ อุณหภูมิในถังผลิตไอน้ำ ($^\circ C$) T_a

คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ($^\circ C$) k_i คือ ค่าการนำความร้อนของฉนวน ($W/m K$) L_i คือ ความหนาของฉนวน (m) [15] การเดือดของน้ำทำให้น้ำเปลี่ยนสถานะเป็นไอน้ำ ดังสมการที่ 6

$$Q_{steam} = \dot{m}_e h_{fg} \quad (6)$$

Q_{steam} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนจากการเดือด (kW) $\dot{m}_e$ อัตราการระเหยของน้ำ (kg/s) h_{fg} คือ ค่าความร้อนแฝงของการเปลี่ยนสถานะจากน้ำเป็นไอน้ำ (kJ/kg)

สมดุลพลังงานภายในถังซับตันน้ำ เมื่อไอน้ำเคลื่อนที่เข้าถึงสูบน้ำ จะเกิดการถ่ายโอนพลังงานให้กับถังสูบน้ำ ถ่ายโอนพลังงานให้กับน้ำและอากาศภายในถังสูบน้ำ และสูญเสียความร้อนที่ถังสูบน้ำ ดังสมการที่ 7

$$Q_{steam} = C_{p,w} \frac{d(m_{w,CT} T_{w,CT})}{dt} + m_{CT} C_{p,CT} \frac{dT_{CT}}{dt} + \frac{d(m_{a,CT} C_{p,a} T_{a,CT})}{dt} + Q_{loss,CT} \quad (7)$$

$$Q_{loss,CT} = Q_{cond,CT} = UA_{CT}(T_{CT} - T_a) \quad (8)$$

$m_{w,CT}$ คือ มวลของน้ำในถังสูบน้ำ (kg) m_{CT} คือ มวลของถังสูบน้ำ (kg) $m_{a,CT}$ คือ มวลอากาศในถังสูบน้ำ (kg) $C_{p,a}$ คือ ค่าความจุความร้อนของอากาศในถังสูบน้ำ ($kJ/kg \text{ } ^\circ C$) $T_{a,CT}$ คือ อุณหภูมิอากาศในถังสูบน้ำ ($^\circ C$) T_{CT} คือ อุณหภูมิถังสูบน้ำ ($^\circ C$) $Q_{loss,CT}$ คือ อัตราพลังงานความร้อนที่สูญเสียในถังสูบน้ำ (kW) A_{CT} คือ พื้นที่การนำความร้อนของถังสูบน้ำที่หุ้มฉนวน (m^2) [15]

การหาค่าอุณหภูมิของน้ำในถังสูบน้ำหาได้จากสมการที่ 9 และนำมาคำนวณหาความดันที่เกิดขึ้นในถังสูบน้ำ ดังสมการที่ 10 ที่แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับความดันที่ใช้ในการสูบน้ำ [16] ขณะที่ระบบเริ่มสูบน้ำ (ความดันสูญญากาศ)

$$m_{v,CT}(h_{g,T_{100}} - h_{f,T_x}) + m_{w,CT} C_{p,w}(100 - T_x) + m_f(h_{f,T_x} - h_{f,30}) = \dot{m}_e h_{fg,T_x} \quad (9)$$

$$P = 133.32 \times 10^{\left(8.07131 - \frac{1730.63}{T+233.426}\right)} \quad (10)$$

โดยที่ T_x คือ อุณหภูมิผสม °C $m_{v,CT}$ คือ มวลไอน้ำในถังสูบน้ำ (kg) $m_{w,CT}$ คือ มวลน้ำในถังสูบน้ำ (kg) m_f คือ มวลน้ำหล่อเย็น (kg) m_e คือ มวลของน้ำที่ระเหยเป็นไอ (kg) $h_{g,T_{100}}$ คือ เอนทัลปีของไอน้ำ 100 °C (kJ/kg) h_{f,T_x} คือ เอนทัลปีของน้ำที่อุณหภูมิผสม (kJ/kg) $h_{f,30}$ คือ เอนทัลปีของน้ำหล่อเย็น 30 °C (kJ/kg) h_{fg,T_x} คือ ค่าความร้อนแฝงของการเปลี่ยนสถานะจากน้ำเป็นไอที่อุณหภูมิผสม (kJ/kg) สมการที่ 10 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับความดันที่ใช้ในการสูบน้ำ [16]

การสูบน้ำเข้าถังสูบน้ำ สามารถคำนวณได้จากการสมดุล Energy equation ดังสมการที่ 11

$$\frac{P_2}{\gamma_w} + H_2 + \frac{v_2^2}{2g} = \frac{P_1}{\gamma_w} + H_1 + \frac{v_1^2}{2g} + k_s \frac{v_1^2}{2g} \quad (11)$$

$$V_{flow} = v_1 A_{tube} \quad (12)$$

P_2 คือ ความดันเกจที่ปลายท่อสูบน้ำ (kPa) P_1 คือ ความดันเกจในถังสูบน้ำ (kPa) $H_1 - H_2$ คือ ระดับความสูงในการสูบน้ำ (m) v_2 คือ ความเร็วของของไหลที่ปลายท่อสูบน้ำ (m/s) v_1 คือ ความเร็วของของไหลที่ไหลเข้าถังสูบน้ำ (m/s) γ_w คือ น้ำหนักจำเพาะของน้ำ (N/m³) k_s คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียในการสูบน้ำ V_{flow} คือ อัตราการไหลของน้ำ (m³/s) A_{tube} คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อสูบน้ำ (m²) ซึ่งอัตราการไหลของน้ำที่คำนวณได้จากสมการที่ 12 สามารถนำไปคำนวณต่อในสมการที่ 2 ในเทอมของปริมาตรน้ำที่สูบได้ต่อรอบ

ผลความแตกต่างระหว่างการทดลอง และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ประเมินผลด้วย RMSE (Root Mean Squared Error) ซึ่งแสดงผลของความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ [9] ดังนี้

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_E - X_S)^2}{N}} \quad (13)$$

เมื่อ X_E คือ ค่าของผลการทดลอง X_S คือ ค่าของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ N คือ จำนวนข้อมูล

3. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการวิจัย

3.1 วัสดุอุปกรณ์

1. ถังสูบน้ำ (Condenser tank) ทรงกระบอกแนวตั้ง ทำจากเหล็กหนา 10 mm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 54 cm ความสูง 89.5 cm ปริมาตร 204 L วัสดุที่ใช้ทำฉนวนเป็นยางสังเคราะห์หนา 2.54 cm

2. ถังผลิตไอน้ำ (Steam Tank) ทรงกระบอกแนวนอน วัสดุที่ใช้ทำถังเป็นสแตนเลส หนา 3 mm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 cm ยาว 30 cm ปริมาตร 21.19 L วัสดุที่ใช้ทำฉนวนเป็นยางสังเคราะห์หนา 2.54 cm

3. ถังน้ำหล่อเย็น (Feed Water Tank) ทรงกระบอกตั้ง วัสดุที่ใช้ทำถังเป็นพลาสติกพีวีซี หนา 2 mm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 cm ยาว 20 cm ปริมาตร 3.5 L

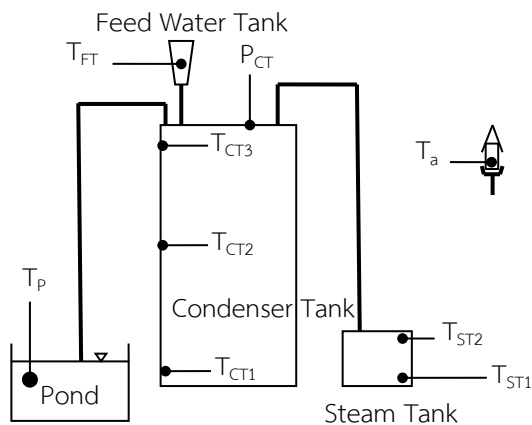
วาล์วกันกลับ (แบบ swing check valve) ใช้แรงกดของน้ำควบคุมการเปิดปิด ใช้กับน้ำ

ตัวแปลงสัญญาณความดัน (Pressure transducers) ช่วงการวัด -14.7 ถึง 30 psi (0 ถึง 5 VDC) อุณหภูมิของสารทำงาน -40 ถึง 125 °C แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ 9 ถึง 30 VDC

ตัววัดอุณหภูมิ (thermocouple wire) type K ช่วงการวัด 0 - 200 °C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฉนวนหุ้มภายนอกและภายใน 0.32 x 0.2 cm

เครื่องบันทึกอุณหภูมิและความดัน (data logger) ช่วงการวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้า 20 mVDC ถึง 50 VDC ช่วงของการวัดอุณหภูมิ -10 ถึง 300 °C

T_{ST1} คืออุณหภูมิด้านล่างภายในถังผลิตไอน้ำ T_{ST2} คืออุณหภูมิด้านบนภายในถังผลิตไอน้ำ T_{CT1} คืออุณหภูมิด้านล่างภายในถังสูบน้ำ T_{CT2} คืออุณหภูมิตรงกลางภายในถังสูบน้ำ T_{CT3} คืออุณหภูมิด้านบนภายในถังสูบน้ำ T_{FT} คืออุณหภูมิภายในถังน้ำหล่อเย็น T_p คืออุณหภูมิบ่อน้ำ T_a คืออุณหภูมิสิ่งแวดล้อม และ P_{CT} คือความดันภายในถังสูบน้ำ ดังรูปที่ 1

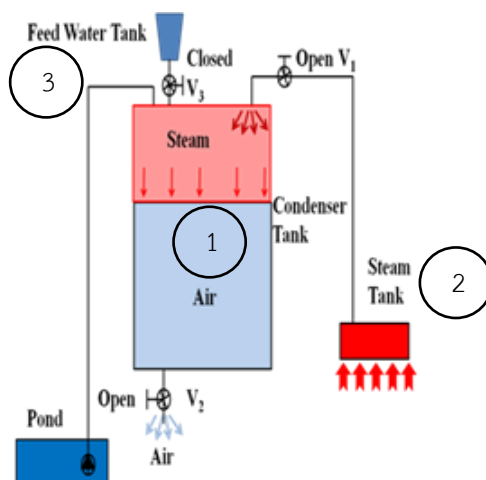


รูปที่ 1 ตำแหน่งการติดตั้งจุดวัด

3.2 วิธีการวิจัย

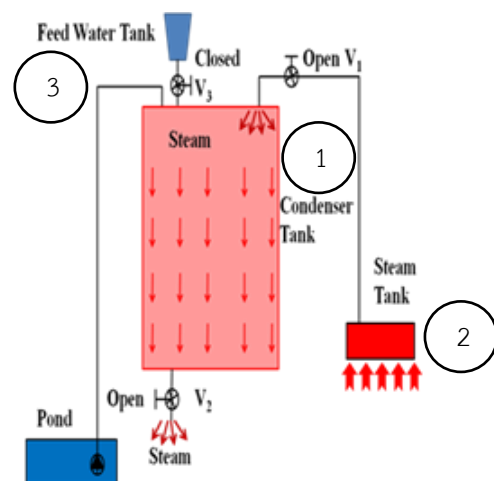
หลักการทำงานของระบบสูบน้ำด้วยกำลังไอน้ำ ประกอบด้วย ช่วงผลิตไอน้ำและขับเคลื่อนอากาศ ช่วงระบายไอน้ำ ช่วงหล่อเย็น และช่วงสูบน้ำ [9]

ช่วงผลิตไอน้ำและขับเคลื่อนอากาศ เริ่มต้นเปิด วาล์วตัวที่ 1 กับ วาล์วตัวที่ 2 และปิด วาล์วตัวที่ 3 เมื่อน้ำในถังผลิตไอน้ำซึ่งบรรจุน้ำ 16 L และอากาศ 5 L ได้รับความร้อนจากเตาเผา จนกระทั่งมีอุณหภูมิ 100 °C จะเกิดไอน้ำขึ้นภายในถังผลิตไอน้ำ และเคลื่อนผ่านท่อส่งไอน้ำ และ วาล์วตัวที่ 1 ไปยังด้านบนของถังสูบน้ำ และขับเคลื่อนอากาศ ออกทางด้านล่างผ่านวาล์วตัวที่ 2 ดังรูปที่ 2

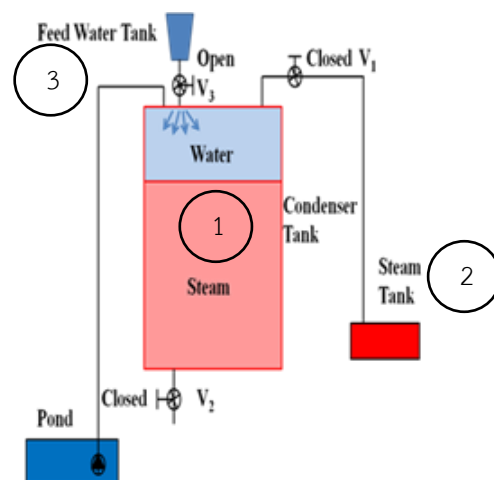


รูปที่ 2 ช่วงผลิตไอน้ำและขับเคลื่อนอากาศ

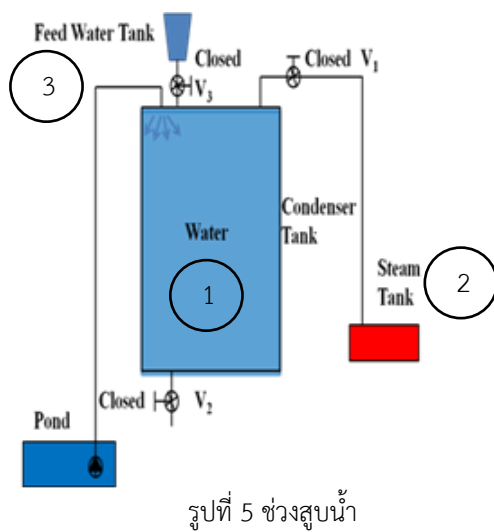
และเมื่อไอน้ำขับเคลื่อนอากาศภายในถังสูบน้ำจนหมด หรือจนกระทั่งไอน้ำจะแทนที่อากาศภายในถังสูบน้ำได้หมด ที่อุณหภูมิ 100 °C ดังรูปที่ 3 เรียกว่าช่วงระบายไอน้ำ หลังจากนั้นจึงปิด วาล์วตัวที่ 1 กับวาล์วตัวที่ 2 และเปิด วาล์วตัวที่ 3 เพื่อให้ น้ำหล่อเย็นไหลเข้าถังสูบน้ำในปริมาตร 3 L (ช่วงหล่อเย็น) พร้อมกับปิด วาล์วตัวที่ 3 และหยุดให้ความร้อนกับถังผลิตไอน้ำ ดังรูปที่ 4 เมื่อไอน้ำที่อุณหภูมิ 100 °C ผสมกับน้ำหล่อเย็นที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม จึงทำให้เกิดการควบแน่นภายในถังสูบน้ำ เป็นสุญญากาศ และสูบน้ำจากบ่อน้ำขึ้นมาเก็บไว้ที่ถังสูบน้ำจนเต็ม หรือจนกระทั่งความดันภายในถังเท่ากับความดันที่ระดับความลึกในการสูบน้ำ ดังรูปที่ 5 เป็นช่วงการสูบน้ำ



รูปที่ 3 ช่วงระบายไอน้ำ



รูปที่ 4 ช่วงหล่อเย็น



วิธีการทดลอง ตั้งค่าระดับน้ำหล่อเย็น 3 L ตั้งค่าระดับความสูงในการสูบน้ำ 3 m เติมน้ำถังผลิตไอน้ำ 16 L เริ่มทำการทดลองโดยเปิด-ปิดวาล์วต่างๆ ตามหลักการทำงานของระบบ บันทึกอุณหภูมิ และความดันวัดปริมาณน้ำที่สูบได้ ระยะเวลาการทดลอง 1 รอบการทำงาน เปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบสูบน้ำด้วยกำลังไอน้ำแบบต่อเนื่อง กำหนดอุณหภูมิเริ่มต้น 30°C กำหนดปริมาณน้ำหล่อเย็น 3 L ปริมาณน้ำถังผลิตไอน้ำ 25 L ถังสูบน้ำ ขนาด 204 L จำนวน 2 ถัง โดยการสูบน้ำเข้าถังสูบน้ำรอบละ 1 ถัง สลับกัน เพื่อลดความร้อนที่สูญเสียจากการผลิตไอน้ำเมื่อสิ้นสุดการทำงาน และเพื่อเพิ่มจำนวนรอบในการสูบน้ำให้เพิ่มมากขึ้น ระดับความสูงในการสูบน้ำ 2, 4, 6 และ 8 m ระยะเวลาในการทำงานของระบบ 10 h เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการทำงานอย่างต่อเนื่องของระบบ และศึกษาความเป็นไปได้ของความสูงที่ส่งผลต่อจำนวนรอบการทำงาน

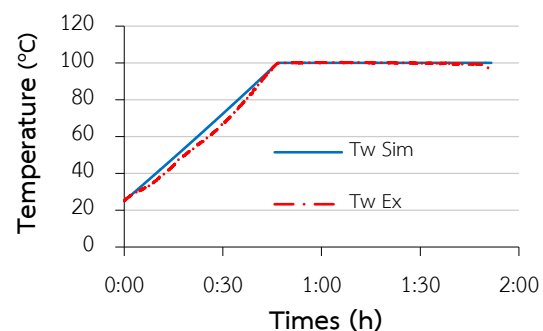
4. ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 ผลการทดลองเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากการทดลองที่ระดับความสูงในการสูบน้ำ 3 m ระยะเวลาการทดลอง 1 รอบการทำงาน เปรียบเทียบอุณหภูมิในถังผลิตไอน้ำ อุณหภูมิในถังสูบน้ำ และความ

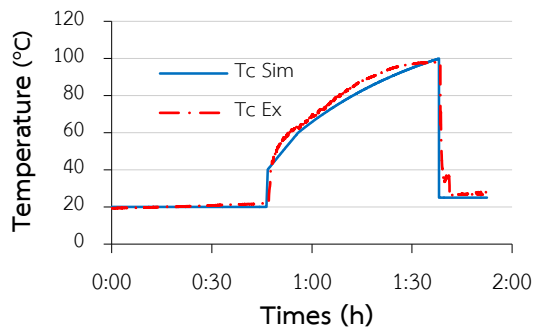
ดันภายในถังสูบน้ำ กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เงื่อนไขเดียวกัน มีผลดังต่อไปนี้

อุณหภูมิในถังผลิตไอน้ำเพิ่มขึ้นเนื่องจากการให้พลังงานความร้อนกับน้ำจนอุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 100 °C และหยุดนิ่งเนื่องจากความดันบรรยากาศที่ควบคุมจุดเดือดของน้ำ ความดันภายในระบบจะเปิดสู่บรรยากาศที่ด้านล่างของถังสูบน้ำ ผลการทดลองของอุณหภูมิในถังผลิตไอน้ำร้อนเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันดังรูปที่ 6 เนื่องจากการสูญเสียความร้อนในช่วงการให้ความร้อนกับถังผลิตไอน้ำ มีค่าใกล้เคียงกับการทดลอง ทำให้อุณหภูมิในถังผลิตไอน้ำมีค่าสอดคล้องกับการทดลอง และจะหยุดนิ่งที่อุณหภูมิ 100 °C เนื่องจากที่ความดันบรรยากาศน้ำมีจุดเดือดที่อุณหภูมิ 100 °C โดยมีค่า *RMSE* เท่ากับ 2.5421 และมีความคลาดเคลื่อน 0.7145%



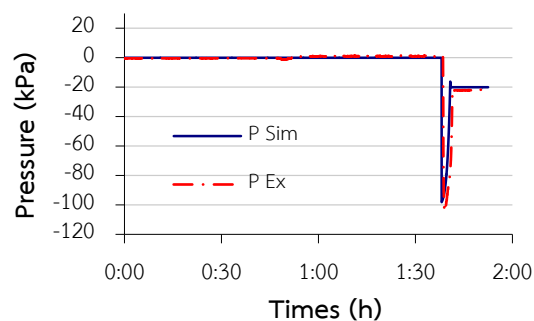
รูปที่ 6 ผลของอุณหภูมิในถังผลิตไอน้ำร้อนระหว่างการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากรูปที่ 7 เมื่ออุณหภูมิในถังผลิตไอน้ำเพิ่มขึ้นจนถึง 100 °C ไอน้ำจะเคลื่อนที่เข้าสู่ถังสูบน้ำ และขับเคลื่อนอากาศออกจากถังสูบน้ำ ไอน้ำที่เคลื่อนที่จะแลกเปลี่ยนความร้อนภายในถังสูบน้ำจนมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิในถังผลิตไอน้ำ (100 °C) อากาศที่มีค่าความหนาแน่นมากกว่าไอน้ำก็จะถูกขับเคลื่อนออกจนหมดถังสูบน้ำ และหลังจากนั้นอุณหภูมิในถังสูบน้ำจะลดลงเนื่องจากการหล่อเย็นโดยตรงของน้ำ โดยมีค่า *RMSE* เท่ากับ 6.0325 และมีความคลาดเคลื่อน 1.8714%



รูปที่ 7 ผลของอุณหภูมิในถังสูบน้ำระหว่างการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากรูปที่ 8 ความดันที่ลดลงเนื่องจากภายในถังสูบน้ำเกิดการควบแน่น ทำให้เกิดความดันสุญญากาศ และสูบน้ำจากแหล่งน้ำตามความสูงที่ตั้งไว้ จนความดันภายในถังสูบน้ำไม่สามารถเอาชนะความสูงในการสูบน้ำได้ระบบจึงหยุดสูบน้ำ (-20 kPa) และหยุดทำงาน โดยมีค่า *RMSE* เท่ากับ 8.1573 และมีความคลาดเคลื่อน 8.3831%



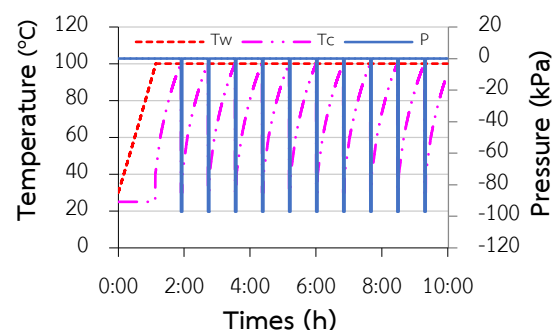
รูปที่ 8 ผลของความดันในถังสูบน้ำระหว่างการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

4.2 ผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบสูบน้ำด้วยกำลังไอน้ำแบบอัดโนมิติ ที่ระดับความสูงในการสูบน้ำ 2, 4, 6 และ 8 m

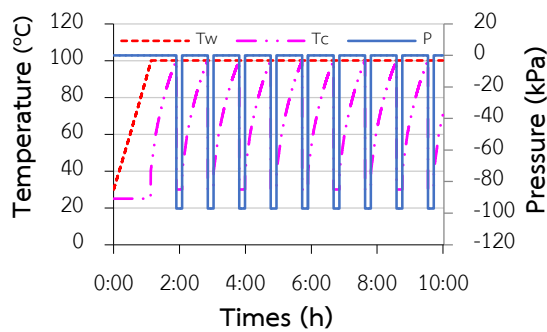
การเริ่มต้นของอุณหภูมิภายในถังผลิตไอน้ำจนถึง 100 °C เป็นช่วงที่ใช้พลังงานในการให้ความร้อนมาก ดังนั้นเมื่อผลต่างของอุณหภูมิมีน้อยจะส่งผลให้พลังงานที่ใช้ในการให้ความร้อนลดลง เพราะฉะนั้น หลังจากจากระบบได้ทำงานไปแล้ว 1 รอบการทำงาน การให้ความร้อนซ้ำกับถังผลิตไอน้ำที่อุณหภูมิ 100 °C

สามารถทำให้ระบบทำงานได้อย่างต่อเนื่อง และมีจำนวนรอบการทำงานเพิ่มขึ้น การเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในแต่ละระดับความสูงในการสูบน้ำ ในช่วงที่อุณหภูมิภายในถังสูบน้ำเริ่มสูงขึ้นจนใกล้เคียงกับอุณหภูมิไอน้ำในถังผลิตไอน้ำเป็นการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างไอน้ำในถังผลิตไอน้ำกับถังสูบน้ำ

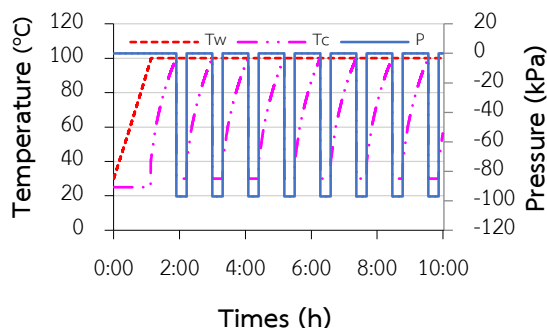
โดยอาศัยหลักการแทนที่ของไอน้ำขับเคลื่อนอากาศออกจากถังสูบน้ำ จนกระทั่งมวลไอน้ำมีปริมาตรเท่ากับปริมาตรของถังสูบน้ำ (204 L) แสดงให้เห็นว่าไม่มีอากาศในถังสูบน้ำ เนื่องจากไอน้ำที่อุณหภูมิ 100 °C มีความหนาแน่นน้อยกว่าอากาศ หรือเบากว่าอากาศ จึงทำให้อากาศที่ซึ่งอยู่ด้านล่างถูกขับดันออกจากถังสูบน้ำ ดังนั้นการควบแน่นของไอน้ำจึงเกิดขึ้นในช่วงที่การหล่อเย็นจากอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ผสมกับไอน้ำโดยปริมาตร จากรูปที่ 9-12 จำนวนรอบลดลงเมื่อความสูงเพิ่มมากขึ้น ความดันที่ใช้ในการสูบน้ำเกิดจากการควบแน่นของไอน้ำที่ 100 °C ผสมกับน้ำหล่อเย็น ทำให้ไอน้ำภายในถังสูบน้ำยุบตัวเกิดเป็นความดันสุญญากาศ ระยะเวลาในการสูบน้ำในแต่ละรอบจะขึ้นอยู่กับความเร็วที่ใช้ในการสูบน้ำ ความเร็วในการสูบน้ำจะลดลงเมื่อความสูงเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดการสูญเสียความดัน และความเสียดทานของของไหลภายในท่อสูบน้ำ เมื่อความสูงเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นความสูงในการสูบน้ำจึงส่งผลกับจำนวนรอบในการสูบน้ำด้วย ซึ่งมีผลดังนี้ 10, 9, 8 และ 7 รอบ ที่ระดับความสูงในการสูบน้ำ 2, 4, 6 และ 8 m ตามลำดับ



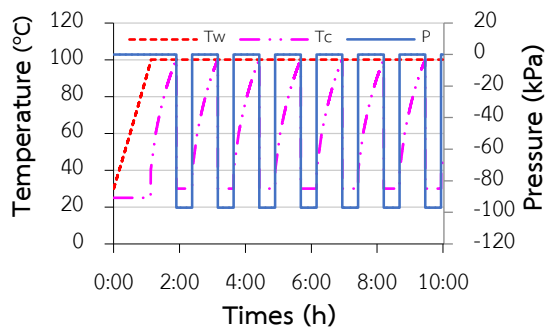
รูปที่ 9 ผลอุณหภูมิในถังผลิตไอน้ำ อุณหภูมิในถังสูบน้ำ และความดันภายในถังสูบน้ำ ที่ความสูงในการสูบน้ำ 2 m



รูปที่ 10 ผลอุณหภูมิในถังผลิตไอน้ำ อุณหภูมิในถังสูบน้ำ และความดันภายในถังสูบน้ำ ที่ความสูงในการสูบน้ำ 4 m



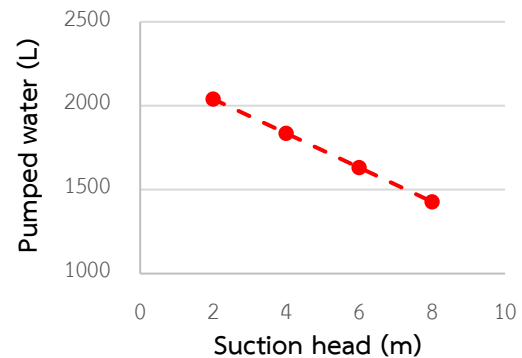
รูปที่ 11 ผลอุณหภูมิในถังผลิตไอน้ำ อุณหภูมิในถังสูบน้ำ และความดันภายในถังสูบน้ำ ที่ความสูงในการสูบน้ำ 6 m



รูปที่ 12 ผลอุณหภูมิในถังผลิตไอน้ำ อุณหภูมิในถังสูบน้ำ และความดันภายในถังสูบน้ำ ที่ความสูงในการสูบน้ำ 8 m

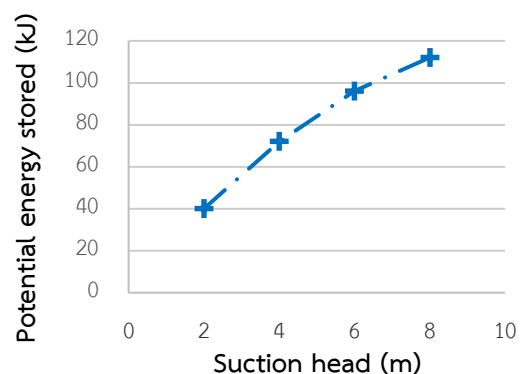
ปริมาณน้ำที่สูบตลอดทั้งวัน (10 h) จะลดลงเมื่อความสูงมากขึ้น เนื่องจากปริมาณน้ำที่สูบได้แต่ละรอบมีค่าคงที่ แต่จำนวนรอบที่ได้จะลดลง ดังนั้นเมื่อรวมปริมาณน้ำที่สูบได้ตลอดทั้งวันก็จะลดลงตามจำนวนรอบการทำงาน ดังรูปที่ 13 ปริมาณน้ำที่สูบตลอดทั้งวัน 2,040

1,836 1,632 และ 1,428 L ที่ระดับความสูงในการสูบน้ำ 2, 4, 6 และ 8 m ตามลำดับ



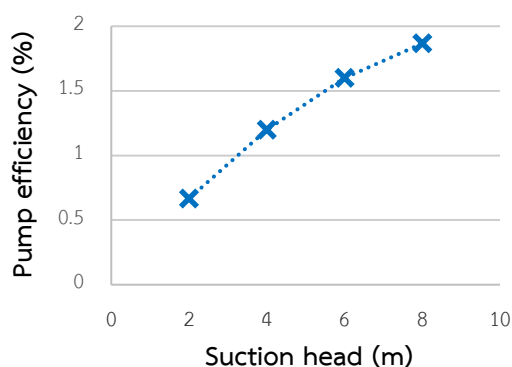
รูปที่ 13 ปริมาณน้ำที่สูบได้ ที่ระดับความสูงในการสูบน้ำต่างๆ

พลังงานที่ใช้ในการสูบน้ำมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามระดับความสูง เนื่องจากพลังงานที่ใช้ในการสูบน้ำจะแปรผันตรงกับความสูงในการสูบน้ำ ถึงแม้ว่าจำนวนรอบในการทำงานจะลดลงตามความสูงที่เพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำที่สูบได้รวมตลอดทั้งวันส่งผลต่อพลังงานที่ใช้ในการสูบน้ำเพียงเล็กน้อย จึงไม่ส่งผลกระทบต่อพลังงานรวมตลอดทั้งวันในการสูบน้ำ ดังรูปที่ 14 พลังงานในการสูบน้ำมีค่า 40, 72, 96 และ 112 kJ ที่ระดับความสูงในการสูบน้ำ 2, 4, 6 และ 8 m ตามลำดับ



รูปที่ 14 พลังงานในการสูบน้ำ ที่ระดับความสูงในการสูบน้ำต่างๆ

จากแนวโน้มของรูปที่ 15 เมื่อระดับความสูงในการสูบน้ำเพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพปั๊มน้ำเพิ่มมากขึ้นตามเนื่องจากพลังงานที่ใช้ในการสูบน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพปั๊มน้ำจะแปรผันตาม พลังงานความร้อนที่ให้กับระบบ พลังงานที่ใช้ในการสูบน้ำ ความสูงในการสูบน้ำ และปริมาณน้ำที่สูบได้ ดังนั้นการเพิ่มรอบการทำงานให้มากกว่าหนึ่งรอบ และทำงานอย่างต่อเนื่องจะช่วยลดพลังงานความร้อนที่ป้อนเข้าระบบ อีกทั้งยังช่วยเพิ่มปริมาณน้ำที่สูบตลอดทั้งวัน และเมื่อเพิ่มระดับความสูงในการสูบน้ำให้มากขึ้นไปอีก ประสิทธิภาพปั๊มน้ำก็จะมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย โดยที่ประสิทธิภาพปั๊มน้ำมีค่า 0.66649, 1.19969, 1.59959 และ 1.86619% ที่ระดับความสูงในการสูบน้ำ 2, 4, 6 และ 8 m ตามลำดับ



รูปที่ 15 ประสิทธิภาพปั๊มน้ำ ที่ระดับความสูงในการสูบน้ำต่างๆ

5. สรุปผล

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาระดับความสูงในการสูบน้ำด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ มีความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิในถังผลิตไอน้ำ อุณหภูมิถังสูบน้ำ และความดันในถังสูบน้ำ 0.7145, 1.8714 และ 8.3831% ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของปั๊มน้ำด้วยกำลังไอน้ำ สามารถจำลองให้ระบบทำงานอย่างต่อเนื่อง เป็นระยะเวลา 10 h ช่วยลดระยะเวลาในช่วง

การให้ความร้อนและจำนวนรอบในการสูบน้ำเพิ่มขึ้นมากกว่าหนึ่งรอบการทำงาน

ปริมาณน้ำที่สูบได้มากที่สุด 2,040 L และจำนวนรอบการทำงานสูงสุด 10 รอบ จะเกิดที่ความสูง 2 m ส่วนพลังงานที่ใช้ในการสูบน้ำสูงสุด 112 kJ และประสิทธิภาพปั๊มน้ำสูงสุด 1.86619% จะเกิดที่ความสูง 8 m

เมื่อระดับความสูงในการสูบน้ำเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้จำนวนรอบในการสูบน้ำลดลง เมื่อจำนวนรอบลดลง ปริมาณน้ำที่สูบได้ทั้งหมดก็ลดลงตาม ส่วนประสิทธิภาพปั๊มจะเพิ่มขึ้นตามพลังงานที่ใช้ในการสูบน้ำและตามความสูงที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นการเพิ่มระดับความสูงในการสูบน้ำจะส่งผลอย่างมากในการเพิ่มประสิทธิภาพปั๊มน้ำให้สูงขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออกที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] The Chaipattana Foundation. (2010, Jun 3). A new theory [Online]. Available: <https://www.chaipat.or.th/2010-06-03-03-39-51.html>
- [2] J. R. Jenness, "Some consideration relative to a solar power saving water pump," *Sol. Energy*, vol. 5, no. 2, pp. 58-60, Apr-Jun. 1961.
- [3] J. W. Sheldon, R.A. Crane and S. C. Kranc, "Pumping action from heat-driven oscillations in a liquid-vapour column," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 9, no.10, pp. 1419-1425. Jul. 1976.
- [4] A. Date and A. Akbarzadeh, "Theoretical study of a new thermodynamic power cycle for thermal water pumping application and its prospects when coupled to a solar pond,"

- Appl. Therm. Eng.*, vol. 58, no. 1-2, pp. 511-521, Sep. 2013.
- [5] N. Kurhe, A. Funde, P. Gokhale, S. Jadkar, S. Ghaisas and A. Date, "Development of low temperature heat engine for water pumping application," *Energy Procedia*, vol. 110, pp. 292-297, Mar. 2017.
- [6] Z.X. Wang, S. Du, L.W. Wang and X. Chen, "Parameter analysis of an ammonia-water power cycle with a gravity assisted thermal driven pump for low-grade heat recovery," *Renew. Energy*, vol. 146, pp. 651-661, Feb. 2020.
- [7] S. Liengjindathaworn, K. Kirtikara, P. Namprakai and T. Kiatsiriroat, "Parametric studies of a pulsating-steam water pump," *Int. J. Ambient Energy*, vol. 23, no. 1, pp. 37-46, Jan. 2002.
- [8] P. Namprakai, N. Roonprasang, N. Pratinthong, K. Sutthivirode and J. Sitranon, "Thermal Water Pump," Thailand Petty Patent 7709, January 27, 2012.
- [9] J. Sitranon, C. Lertsatitthanakorn, P. Namprakai, N. Pratinthong, T. Suparos and N. Roonprasang, "Parametric consideration of a thermal water pump and application for agriculture," *J. Sol. Energy Eng. (ASME)*, vol. 137, no. 3, pp. 031006-1 - 031006-12, Jun. 2015.
- [10] K. Sutthivirode, N. Pratinthong, P. Namprakai, N. Roonprasang and T. Suparos, "Waste heat water pumping model with direct contact cooling," *J. Cent. South Univ.*, vol. 21, no. 10, pp. 3896-3910, Oct. 2014.
- [11] P. Moonsri, J. Kunchornrat and P. Namprakai, "Hybrid energy thermal water pump for producing hot water from a shallow well in Thailand," *J. Energy Eng. (ASCE)*, vol. 142, no. 3, pp. 04015023-1 - 04015023-15, Sep. 2016.
- [12] J. Sitranon, K. Sutthivirode and N. Roonprasang, "A Study of Discharge Heads Affecting the Temperature and Amount of Hot Water Using Mathematical Modeling of a Solar Water Heating System," *Srinakharinwirot Eng. J.*, vol. 15, no 1, pp. 97-107, Apr. 2020.
- [13] R. Bandaru, C. Muraleedharan and M.V. Pavan Kumar, "Modelling and dynamic simulation of solar thermal energy conversion in an unconventional solar thermal water pump," *Renew. Energy*, vol. 134, pp. 292-305, Apr. 2019.
- [14] L. Jiang, R.Q. Wang and A.P. Roskilly, "Development of low temperature heat engine for water pumping application Techno-economic analysis on a small-scale organic Rankine cycle with improved thermal driven pump," *Energy Convers. Manag.*, vol. 217, pp. 112979, Aug. 2020.
- [15] Y. A. Cengel and A.J. Ghajar, *Heat and mass transfer fundamentals and applications*, 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2015.
- [16] R. H. Perry, DW. Green and JO. Maloney, *Perry's chemical engineers' handbook*, 7th ed. New York: McGraw-Hill, 1997.

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิ (Reader)

ต้นฉบับบทความวิจัยที่ตีพิมพ์วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีที่ 15 ฉบับที่ 3 (เดือนกันยายน – ธันวาคม พ.ศ. 2563) ได้รับการตรวจสอบแก้ไขจากผู้ทรงคุณวุฒิดังรายนามต่อไปนี้

- | | |
|--|---|
| 1. อาจารย์ ดร.เสกฐา ศาสนนันท์ | ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาวัต ไชยชาวนาทิก | สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต |
| 3. รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชัย ฤตวิรุฬห์ | ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยนเรศวร |
| 4. รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ต่อสกุล | ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 5. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยวัฒน์ นุ่มทอง | ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา |
| 6. รองศาสตราจารย์ ดร.ทศพล เกียรติเจริญผล | สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| 7. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ จันทร์ทอง | ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 8. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กนกพร ศรีปฐมสวัสดิ์ | สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไม้
ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 9. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยวัฒน์ เอกวัฒน์พานิชย์ | สาขาวิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| 10. รองศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย โชติษฐยางกูร | สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี |
| 11. ศาสตราจารย์ ดร.ขวลิต ชาลีรักษ์ตระกูล | ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต |
| 12. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธีรพงศ์ บริรักษ์ | สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย |
| 13. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชลัท ทิพาการเกียรติ | สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย |
| 14. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาสพิรุฬห์ วัชรศรีสำเริง | สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องมือและแม่พิมพ์
คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์นนทบุรี |
| 15. รองศาสตราจารย์ ดร.เจริญชัย โขมพัตราภรณ์ | ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิ (Reader)

ต้นฉบับบทความวิจัยที่ตีพิมพ์วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีที่ 15 ฉบับที่ 3 (เดือนกันยายน – ธันวาคม พ.ศ. 2563) ได้รับการตรวจสอบแก้ไขจากผู้ทรงคุณวุฒิดังรายนามต่อไปนี้

- | | |
|---|--|
| 16. อาจารย์ ดร.พลเทพ เวงสูงเนิน | สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องจักรกลเกษตร
คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีราชมงคลอีสาน |
| 17. รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติทัศน์ สุบรรณจ้อย | กลุ่มสาขาวิชาวัสดุศาสตร์และนวัตกรรมวัสดุ
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล |
| 18. รองศาสตราจารย์ ดร. วีระพันธ์ ด้วงทองสุข | สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเอเซียอาคเนย์ |

คำแนะนำสำหรับผู้เขียนบทความลงตีพิมพ์
วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒจัดพิมพ์ปีละ 3 ฉบับ ฉบับที่ 1 ช่วงเดือนมกราคม – เมษายน ฉบับที่ 2 ช่วงเดือนพฤษภาคม – สิงหาคม และฉบับที่ 3 ช่วงเดือนกันยายน – ธันวาคม โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะให้เป็นการรวบรวมผลงานทางวิชาการและงานวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ซึ่งบทความที่ได้รับการตีพิมพ์ทุกบทความจะผ่านความการพิจารณาและความเห็นชอบจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาที่เกี่ยวข้องและสงวนสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พุทธศักราช 2521 และเผยแพร่แบบออนไลน์ทั่วประเทศ

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 ควรมีหัวข้อเรียงตามลำดับดังต่อไปนี้

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 ขอขอบคุณสนับสนุน หรือบุคคล (ถ้ามี)

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

2. วิธีการส่งบทความ

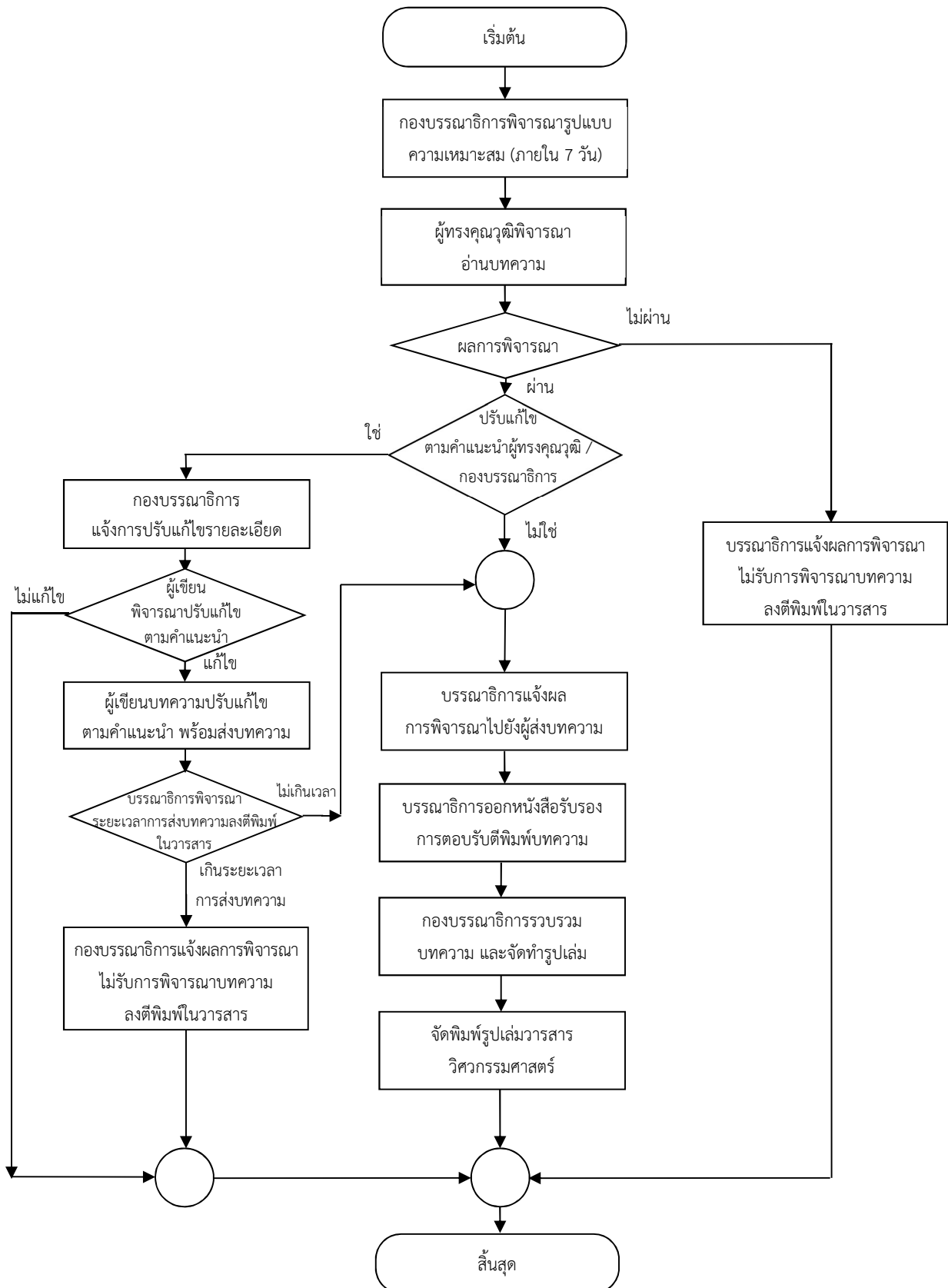
- 1) ส่งต้นฉบับบทความ ไฟล์ Microsoft Word และ pdf พร้อมแนบไฟล์สแกนแบบเสนอผลงานวิชาการเพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
- 2) ส่งไฟล์ต้นฉบับทางออนไลน์ที่
<https://www.tci-thaijo.org/index.php/sej/login>
- 3) ดูข้อมูลวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒเพิ่มเติม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

3. ขั้นตอนการประเมินบทความ

การประเมินบทความวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ มีขั้นตอนดังนี้

- 1) การทบทวนโดยผู้รู้เสมอ (peer review) โดยผู้ทรงคุณวุฒิน้อยสองคนในสาขาที่เกี่ยวข้องแบบอำพรางฝ่ายเดียว (double-blind)
- 2) การเขียนตอบข้อซักถามและการแก้ไขปรับปรุงต้นฉบับตามข้อคิดเห็น (comments) ของผู้ทรงคุณวุฒิ โดยผู้เขียน และการพิจารณาอีกครั้งโดยผู้ทรงคุณวุฒิคนเดิม หากผู้ทรงคุณวุฒิได้แจ้งความประสงค์ขอพิจารณาอีกครั้งไว้
- 3) การประชุมกองบรรณาธิการเพื่อพิจารณาผลการทบทวนโดยผู้รู้เสมอจากผู้ทรงคุณวุฒิ และการแก้ไขปรับปรุงต้นฉบับ เพื่อตัดสินใจว่าจะตอบรับหรือไม่ในขั้นสุดท้าย
- 4) สำหรับบทความที่ได้รับการตอบรับ กองบรรณาธิการจะพิจารณาความถูกต้องของรูปแบบเพื่อแจ้งผู้เขียนแก้ไข
- 5) บรรณาธิการออกหนังสือรับรองการเผยแพร่ให้ผู้เขียน โดยมอบไว้กับผู้เขียนหลัก

ขั้นตอนการพิจารณาผลงานเพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารคณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ





คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
เลขที่ 63 หมู่ 7 ถนนรังสิต - นครนายก
อำเภอองครักษ์ จังหวัดนครนายก 26120
โทร 0 2649 5000 ต่อ 27560 27070
โทรสาร 0 3739 5527
<http://eng.swu.ac.th>

บทความวิจัย

- เครื่องลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบที่บวมโดยใช้คลื่นไมโครเวฟและท่อผสมแบบสถิต
Acid Catalyzed Reactor in Mixed Crude Palm Oil Using Microwave Irradiation and Static Mixer
โดย สุทธิ นิเช็ง อาริษา โสภารจารย์ ภาณุมาศ สุยบางดำ ธนะวิทย์ ทองวิเชียร กฤษณพงศ์ สังขาสี
- การควบคุมพัสดุคงคลังสารหล่อลื่นสำหรับงานบำรุงรักษาของท่าเรือ
Lubricants Inventory Control for Marine Port Maintenance
โดย จารุวรรณ งามเลิศ สิริเดช ชาตินิยม
- การลดของเสียในกระบวนการฉีดพลาสติกของชิ้นส่วนโทรศัพท์โดยการออกแบบการทดลอง
Reducing Defectives in Plastic Injection Process of Telephone Part By Design of Experiment
โดย สุรศักดิ์ ชูไธสง ระพี ภาณุจนะ
- อิทธิพลของความเร็วเลื่อนไถลและความดันสัมผัสที่ส่งผลต่อพฤติกรรมทางไทรบอโลยีของผิวคู่สัมผัสเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 และเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก
430 HL The Influence of Sliding Velocity and Contact Pressure on Tribological Behavior of The Mating Surfaces of SKD11 Tool Steel and Ferritic Stainless Steel 430 HL
โดย เจษฎา จันทน์ผา ภาสพิรุฬห์ วัชรศรีสำเร็จ
- การจัดเส้นทางขนส่งสินค้าด้วยวิธีการผสมผสาน สำหรับผู้ประกอบการขนาดเล็ก
Vehicles Routing Using Composite Approach For Small Businesses
โดย ธนากร ชีวพิทักษ์ผล สิริเดช ชาตินิยม
- การบริหารจัดการภาวะภัยแล้งในพื้นที่นอกเขตชลประทานของประเทศไทย: กรณีศึกษา ตุลาคม 2562 ถึง เมษายน 2563
Drought Management for the Rainfed Areas in Thailand: A Case Study of October 2019 to April 2020 Period
โดย สุประภาพร พัฒนสิงห์เสนีย์ จิรวัดน์ ประชีพนาย กัลยาณี สุวรรณประเสริฐ ธนัช สระประเทศ จีรพงษ์ เหล่าน้ำใส
- การพัฒนาค่าปรับแก้ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความจุของทางหลวงชนบทสองช่องจราจรด้วยวิธีการแบบทางอ้อม
Development of Adjustment Factors affecting The Capacity of DRR Two-Lane Highways with Indirect Empirical Method
โดย ปฏิภาณ แก้ววิเชียร วุฒิไกร ไชยปัญญา
- Gross Domestic Product and Economic Value of Water Resources of River Basins in Thailand
By Pavisorn Chuenchum Pongsak Suttinon
- แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการศึกษาระดับความสูงในการสูบน้ำ ของระบบสูบน้ำความร้อนด้วยกำลังไอน้ำแบบต่อเนื่อง
The Mathematical Modeling for a Study of Suction Heads of a Continuous Operation Thermal Water Pump with Steam System
โดย จิรวัดน์ สิตรานนท์ กิตติวุฒิ ศุทธิโรจน์ ญัฐพล รุ่นประแสง