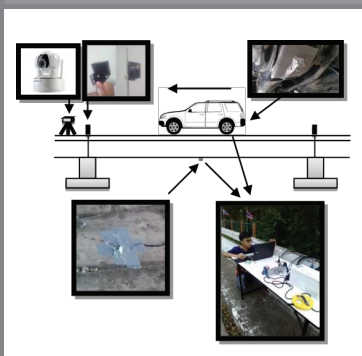
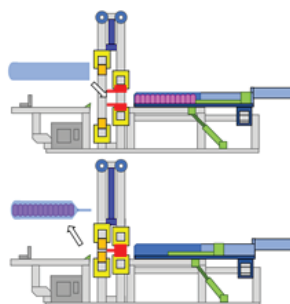




วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

SRINAKHARINWIROT ENGINEERING JOURNAL ปีที่ 12 ฉบับที่ 2 เดือนกรกฎาคม - ธันวาคม พ.ศ.2560



คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เป็นวารสารในศูนย์ข้อมูลดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (Thai – Journal Citation Index Centre: TCI) กลุ่มที่ 1 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 ซึ่งบทความที่ได้รับการตีพิมพ์ทุกบทความจะผ่านการทบทวนโดยผู้รู้เสมอ (peer review) โดยผู้ทรงคุณวุฒิสองคนในสาขาที่เกี่ยวข้องแบบอำพรางฝ่ายเดียว (single-blind) และสงวนสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พุทธศักราช 2521 จัดส่งและเผยแพร่แบบเอกสารพิมพ์ตามสถาบันการศึกษาทั่วประเทศ และเผยแพร่แบบออนไลน์

วัตถุประสงค์

เพื่อเป็นแหล่งรวบรวม เผยแพร่บทความวิจัย และบทความวิชาการทางด้านวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี ในสาขา วิศวกรรมเคมี วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมอุตสาหการ วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ วิศวกรรมชีวการแพทย์ และสาขาใกล้เคียงอื่นๆ ทั้งในเชิงทฤษฎีและเชิงปฏิบัติ

เจ้าของ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

63 หมู่ 7 ตำบลอรัญญิก อำเภอบางบาล

จังหวัดนครนายก 26120

โทร. 0 2649 5000 ต่อ 27073

<http://eng.swu.ac.th> และ <http://ejournals.swu.ac.th/index.php/SwuENGj>

อีเมล journalengswu@gmail.com

พิมพ์ที่ ห้างหุ้นส่วนจำกัดล้านมีเดีย เซอร์วิส

91/2 หมู่ 4 เฟสเบสโต้ หมู่บ้านปิยมณีน

ต.บึงคำพร้อย อ.ลำลูกกา จ.ปทุมธานี 12150

โทร. 084 014 0041 หรือ 086 422 4298

E-mail: new.violet@hotmail.com



วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ที่ปรึกษากองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.เวคิน	ปิยรัตน์	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริพงษ์	ฉายสินธ์	รองคณบดีฝ่ายแผนและพัฒนา

รายนามคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ

ศาสตราจารย์ ดร.ทงเกียรติ	เกียรติศิริโรจน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศาสตราจารย์ ดร.อภิรัฐ	ศิริธราธิวัตร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์	เดชะอำไพ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ์	อัครเอกผดาลัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร.โกสินทร์	จำนงไทย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ	โสภณแดง	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย	เปรมฤดีปรีชาชาญ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงพรรณ	ศฤงคารินทร์	มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.สีรุ่ง	ปรีชานนท์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รองศาสตราจารย์ ดร.ศราวุธ	ริมดุสิต	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รองศาสตราจารย์ ดร.อนันต์	มั่งวัฒนา	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต	ชาลิรักษ์ตระกูล	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.พงศ์ชนัน	เหลือองไพบูลย์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.อริคม	ฤกษ์บุตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
รองศาสตราจารย์ ดร.โกศล	โอฬารไพโรจน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
รองศาสตราจารย์ ดร.เตือนใจ	สมบูรณ์วิวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.สุรพันธ์	ยิ้มมัน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์เจต	พรหมวงศ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.จารุวัตร	เจริญสุข	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.ฤดี	มาสุจันทร์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.วิจิตร	กิมเรศ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา	ทิพย์สุวรรณพร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวหน้ากองบรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กำพล วรดิษฐ์

กองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ว่าที่ พันตรี ดร.อิทธิพร ศิริสวัสดิ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	
รองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล	นาผล	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริวรรณ	ศรีสรณ์ต์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

รองศาสตราจารย์ ดร.นิลวรรณ	ชุ่มฤทธิ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ ดร.พีชพันธุ์	เจริญพงษ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประชา	บุญยวานิชกุล	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงษ์	คงประเสริฐ	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาคภูมิ	ศรีรมรินทร์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันจิรา	จับศิลป์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
อาจารย์ ดร.สุธิดา	ทีปรัชพันธุ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ศาสตราจารย์ ดร.ทนงเกียรติ	เกียรติศิริโรจน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศาสตราจารย์ ดร.อภิรัฐ	ศิริธราธิวัตร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์	เดชะอำไพ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ	อัครเอกผาลิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร.โกสินทร์	จำนงไทย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ	โสภาแดง	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย	เปรมฤดีปรีชาชาญ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงพรรณ	ศฤงคารินทร์	มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.สีรุ่ง	ปรีชานนท์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รองศาสตราจารย์ ดร.ศราวุธ	ริมดุสิต	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รองศาสตราจารย์ ดร.อนันต์	มั่งวัฒนา	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต	ชาลิรักษ์ตระกูล	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.พงศ์ชนัน	เหลื่องไพบูลย์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.อริคม	ฤกษ์บุตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
รองศาสตราจารย์ ดร.โกศล	โอฬารไพโรจน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
รองศาสตราจารย์ ดร.เตือนใจ	สมบูรณ์วิวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.สุรพันธ์	ยิ้มมัน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์เจต	พรหมวงศ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.จารุวัตร	เจริญสุข	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.ฤดี	มาสุจันทร์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.วิจิตร	กิมเรศ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา	ทิพย์สุวรรณพร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผู้ช่วยบรรณาธิการ

นางสาวยุพาพร ประไพย์

เลขานุการ

นางชนิษฐา แก้วล้วน

บทความวิจัย

การใช้พลังงานไฟฟ้าของโรงสีข้าวขนาดกลางในเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ Electrical Energy Consumption of Medium Scale Rice Mills in the Northeast of Thailand อนุวัฒน์ ภาชนะวรรณ สมชาย ขวนอุดม ขวัญตรี แสงประชานารักษ์ เสรี วงศ์พิเชษฐ	1
สมบัติเชิงกลของไม้ไผ่ 5 ชนิด ที่ผ่านการอบแห้ง Mechanical Properties of Five Species Dried Bamboo ธวัชชัย อุโนใจม นฤมล มณีอินตา วรวัฒน์ ปัญญาคำ	8
การหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์กับเงื่อนไขการทำงานและรูปร่างของอีเจ็คเตอร์โดยใช้ วิธีแบบโครงร่างพื้นผิว Determining the Corresponding Equations between Ejector Performance and Operating Conditions and Ejector Geometries by Using Response Surface Methodology วิระพันธ์ สีหานาม กุลเชษฐ์ เพียรทอง ชญานนท์ แสงมณี	15
การดูดซับน้ำมันหล่อเย็นจากกระบวนการตัดกลึงโลหะโดยใช้ขานอ้อยดัดแปรเป็นตัวดูดซับ Adsorption of Cutting Fluid from Turning Process by Using Modified Sugarcane Bagasse as Adsorbent อัษฎิกา ประนัดดา วรัญญา แซ่มปรีชา และโกวิทย์ ปิยะมั่งคณา	26
การวิเคราะห์ทางสถิตศาสตร์ของโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงท่งยางสำหรับเก็บของเหลวภายใต้แรงดันน้ำสถิตสูง มาก Static Analysis of Fluid-Filled Toroidal Shell under High Hydrostatic Pressure วิระพันธ์ สีหานาม กุลเชษฐ์ เพียรทอง ชญานนท์ แสงมณี	36
The optimization of Biodiesel production from Brassica carinata using ultrasonic irradiation- assisted by response surface methodology Sonesaksit Niempaseuth, Prachasanti Thaiyasuit, Kulachate. Pianthong and Wirapan Seehanam	48
ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาธรรมชาติในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วของเหง้ามันสำปะหลังในเครื่องปฏิกรณ์แบบตก อิสระ Effect of Natural Catalysts in Fast Pyrolysis of Cassava Rhizome in a Free - Fall Reactor นิกรศิลป์ บุญสมบัติ อติศักดิ์ ปัตติยะ	58
การประยุกต์ Axiomatic Design และเมทริกซ์ข้อจำกัดในกระบวนการออกแบบเชิงวิศวกรรม An Application of Axiomatic Design and Constraints Relation Matrix in Engineering Design Process คึกฤทธิ์ พรหมส้อย ณัฐวุฒิ จันทร์ทอง	71

สารบัญ

บทความวิจัย (ต่อ)

การวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว Large Signal Stability Analysis of Three-Phase Bridge Rectifier with Constant Power Loads อภิชัย สุยะพันธ์ กองพันธ์ อารีรักษ์ และกองพล อารีรักษ์	83
การทดสอบภาคสนามการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานจากผลตอบสนองความเร่งของรถยนต์นั่งส่วนบุคคล Field Verification of Bridge Natural Frequency Identification from Acceleration Response of Passenger Car อธิวัฒน์ มณีรัตนโรจน์ พัทธพงษ์ อาสนจินดา	98
การพัฒนาเอลิเมนต์โครงข้อแข็งสำหรับการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ไม่เชิงเส้นของผนังรับแรงเฉือนคอนกรีตเสริมเหล็กโดยพิจารณาการเสียรูปจากแรงเฉือน DEVELOPMENT OF FRAME ELEMENT FOR NONLINEAR FINITE ELEMENT ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE SHEAR WALLS CONSIDERING SHEAR DEFORMATION ธรรมการ ภัคพิตรพิบูล ภาณุวัฒน์ จ้อยกลัด	114
พฤติกรรมโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุดของแผ่นอลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็งต่างชนิด SSM2024 และ SSM6061 Microstructural Behavior and Mechanical Properties of Friction Stir Spot Welding of Dissimilar Aluminum Semi Solid Casting Sheets SSM2024 and SSM6061 วรพงศ์ บุญช่วยแทน วรธนพร ชีวภูมิพงศ์ และรอมฎอน บุระพา	130
การพัฒนาอุปกรณ์สำหรับปรับมุมพิทช์ของใบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบแกนนอนขนาดเล็ก Development of Blade Pitch Angle Adjustment Device for Small Horizontal Axis Wind Turbine บัญญัติ นิยมवास อธิราช ภัทรางกูร อภิชาติ ศรีไชยรัตน์	143
การปรับเทียบอัตโนมัติของแบบจำลองแท็งก์โดยใช้ Microsoft Excel Solver Automatic Calibration of Tank Model Using Microsoft Excel Solver สัชชัย วิฑิตพันธ์ ชัยวัฒน์ เอกวัฒน์พานิชย์ ดวงฤดี โฆษิตกิตติวงศ์ เสฎฐา ศาสนนันท์	151
The GUI-MATLAB based Simulation Program for Principle of Communication System Course Pinit Nuangpirom Kanokwan Ruangsiri and Somsak Akatimagool	160

บทความวิจัย (ต่อ)

- การศึกษาเปรียบเทียบกระบวนการฮิวริสติกส์ในการจัดการการขนส่งสำหรับโรงงานกรณีศึกษาโรงงานจำหน่าย
อุปกรณ์ระบบงานไฟฟ้า 168
- นฤมล ไชยโคตร ภารภากร อธิษฐานันท์ รติรัตน์ กิตติปัญญาพัฒน์ สิริเดช ชาตินิยม

บทความวิชาการ

- หุ่นยนต์แบบโครงร่างสำหรับแขนท่อนบนกับกิจกรรมการกายภาพบำบัดเพื่อการฟื้นฟูสมรรถภาพผู้ป่วยโรคหลอดเลือด
สมอง 178
- อานันท์ สุตาพันธ์ วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ

บทบรรณาธิการ

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

สำหรับการบริหารจัดการทรัพยากรคนอาจารย์ให้เปลี่ยนแปลงทันกับการเปลี่ยนแปลงของหลักสูตรและความต้องการของสังคมเป็นสิ่งที่ทำได้ยาก เพราะคนอาจารย์สำเร็จการศึกษามาด้วยการทำปริญญาโทในหัวข้อที่ต้องมีความลุ่มลึก ทำให้ขาดมิติความกว้างที่จะปรับเปลี่ยนหัวข้อการสอนตามการเปลี่ยนแปลงของหลักสูตรได้ ขณะเดียวกันก็ไม่สามารถแก้ไขปัญหาได้ด้วยการเปิดรับอาจารย์ใหม่ เพราะอายุการทำงานของคนอาจารย์แต่ละคนยาวนานเกินการเปลี่ยนแปลงของความต้องการของหลักสูตร การแก้ปัญหาแนวทางนี้ เมื่อเวลาผ่านไปไม่นาน ปัญหาความไม่สอดคล้องระหว่างคนอาจารย์ที่มีความต้องการของหลักสูตรก็จะวนกลับมาเกิดซ้ำอีก ไม่นับรวมภาระค่าใช้จ่ายที่ต้องแบกรับในการจ้างคนอาจารย์กลุ่มเดิมที่ไม่สามารถสอนในหลักสูตรที่เปลี่ยนแปลงไปได้ ซึ่งจะทำให้ต้นทุนค่าธรรมเนียมการศึกษาสูงโดยไม่จำเป็น เกิดความไม่มีประสิทธิภาพในการใช้งบประมาณที่ได้รับ

ดังนั้นหากคนอาจารย์มีความพยายามที่จะทำงานวิจัยในหัวข้อใหม่ๆ ที่ไม่ถนัด และสามารถปรับเปลี่ยนหัวข้อการสอนให้ตรงตามการเปลี่ยนแปลงของหลักสูตรได้ ผู้กำกับดูแลงานวิจัยของหน่วยงานต่างๆ จึงควรทำงานบูรณาการกับหลักสูตรและการเรียนการสอน เพื่อกำหนดเป้าหมายและขอบเขตของการสนับสนุนโครงการวิจัยในหน่วยงาน ให้นำไปสู่ความสามารถในการสอนหัวข้อที่ตรงกับหลักสูตรที่เปลี่ยนแปลงไปได้ อีกทั้งผลลัพธ์ของโครงการวิจัยได้อีกทางคือ การตีพิมพ์บทความวิจัย วารสารคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒที่ท่านถืออยู่นี้ จึงเป็นกลไกสำคัญในการผลักดันให้คนอาจารย์ทำวิจัย ซึ่งกองบรรณาธิการดูแลเป็นอย่างดีเสมอมา

สุดท้ายนี้ ขอแจ้งว่ากองบรรณาธิการได้ปรับแก้รูปแบบการเขียนเอกสารอ้างอิง ให้เป็นรูปแบบ IEEE ร้อยละร้อย เพื่อให้ผู้เขียนเตรียมต้นฉบับได้สะดวกขึ้น พร้อมให้ตัวอย่างอย่างครอบคลุม ท่านผู้เขียนที่เคยส่งบทความมาก่อน โปรดใช้รูปแบบ IEEE ในการเขียนเอกสารอ้างอิง

การใช้พลังงานไฟฟ้าของโรงสีข้าวขนาดกลางในเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ Electrical Energy Consumption of Medium Scale Rice Mills in the Northeast of Thailand

อนุวัฒน์ ปาชนาวรรณ^{1,2} สมชาย ชวนอุดม^{1,2,*} ขวัญตรี แสงประชานารักษ์^{1,2} เสรี วงศ์พิเชษฐ์^{1,2}

¹สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

²กลุ่มวิจัยวิศวกรรมประยุกต์เพื่อพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

123 หมู่ 16 ถ.มิตรภาพ อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40002

E-mail: a.pachanawan@gmail.com

Anuwat Pachanawan^{1,2} Somchai Chuan-Udom^{1,2,*} Khwantri Saengprachatanarug^{1,2}

and Seree Wongpichet^{1,2}

¹Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University.

²Applied Engineering for Important Crops of the North East Research Group.

123 Moo 16 Mittapap Rd., Nai-Muang, Muang District, Khon Kaen 40002, Thailand.

*Corresponding author: E-mail: somchai.chuan@gmail.com

บทคัดย่อ

ปัจจุบันโรงสีข้าวได้มีการพัฒนาปรับปรุงขนาดและระบบการสีข้าว ส่งผลให้โรงสีมีการใช้พลังงานไฟฟ้าในกระบวนการแปรรูปข้าวเปลือกเพิ่มขึ้น ดังนั้น การวิเคราะห์การใช้พลังงานไฟฟ้าในกระบวนการสีข้าวของโรงสีข้าวขนาดกลางจึงเป็นแนวทางที่ช่วยให้ทราบถึง ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์และต้นทุนในการผลิตข้าวภายในโรงสี จากการสำรวจโรงสีข้าวขนาดกลางในเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือจำนวน 10 แห่ง และทำการวิเคราะห์ พบว่า โรงสีมีความต้องการกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุด 362 กิโลวัตต์ ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 1,183,271 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อปี การใช้พลังงานต่อปริมาณการผลิตเท่ากับ 19.50 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตัน ส่งผลให้โรงสีต้องจ่ายค่าพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 4,901,301 บาทต่อปี และมีค่าพลังงานไฟฟ้าต่อปริมาณการผลิตเฉลี่ยเท่ากับ 82.19 บาทต่อตัน โดยปริมาณการใช้ไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงไปตามขนาดของเครื่องจักร อุปกรณ์ และระบบการสีข้าวที่เปลี่ยนแปลงไป ภายในโรงสี

คำสำคัญ: โรงสีข้าว พลังงานไฟฟ้า ค่าพลังงานไฟฟ้า

ABSTRACT

Modern rice mills have improved in size and milling systems which effect to the rice milling of electrical energy consumption in rice processing. The analysis of the electrical energy consumption (EEC) of rice mills can be used as a guideline to determine the EEC and cost of each individual operation section. Ten medium scale rice mills in Northeastern Thailand were studied. The results showed that each rice mill required on average electricity power peak was 362 kW, and the average EEC usage at

1,183,271 kWh/yr, and an energy usage per production volume of 19.50 kWh/T. The average annual cost for EEC was 4,901,301 THB, and the electrical energy cost was 82.19 THB per ton

Keyword: rice mill, electrical energy, electrical energy cost.

1. บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศผู้ผลิตและส่งออกข้าวรายใหญ่ของโลก โดยในปี 2557 ส่งออกข้าวได้ราว 11 ล้านตันข้าวสาร คิดเป็นมูลค่าประมาณ 175,000 ล้านบาท [1] และข้าวยังเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีความสำคัญต่อประเทศไทยทั้งทางด้านเศรษฐกิจ และสังคม

อุตสาหกรรมข้าว เป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีการใช้พลังงานสูง ซึ่งในปัจจุบันมีโรงสีข้าวในประเทศไทยราว 40,000 โรง [2] โดยโรงสีที่มีกำลังผลิตน้อยกว่า 100 ตันต่อวัน มีจำนวนราว 38,000 โรง ส่วนโรงสีที่มีกำลังผลิตระหว่าง 100 ถึง 200 ตันต่อวัน มีจำนวนถึง 503 โรง และโรงสีที่มีกำลังผลิตมากกว่า 200 ตันต่อวัน มีจำนวนราว 100 โรง [3] ซึ่งโรงสีที่มีกำลังการผลิตมากกว่า 100 ตันต่อวัน เกือบทั้งหมดใช้กำลังไฟฟ้าไม่น้อยกว่า 250 กิโลวัตต์ โดยภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีโรงสีข้าวมากที่สุดถึง 28,644 โรง ประกอบไปด้วยโรงสีข้าวขนาดเล็กจำนวน 28,215 โรง โรงสีข้าวขนาดกลางจำนวน 149 โรง และโรงสีข้าวขนาดใหญ่จำนวน 280 โรง [4] และโรงสีมีแนวโน้มเพิ่มจำนวนมากขึ้น ซึ่งในกระบวนการแปรรูปข้าวเปลือกให้เป็นข้าวสารที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้โรงสีมีต้นทุนในการแปรรูปข้าวสูงขึ้นตามไปด้วย [5]

โรงสีมีกระบวนการสีข้าวที่ต่อเนื่องกัน ซึ่งแต่ละขั้นตอนจะใช้เครื่องจักรกลที่มีหน้าที่ต่างๆ ทำงานสัมพันธ์กัน ทุกกระบวนการตั้งแต่กระบวนการทำความสะอาดข้าว จนถึงกระบวนการซึ่งบรรจุ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งสิ้น [6]

จากการศึกษาของเอกรัฐ ชะอุ่มเอียด [7] พบว่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการสีข้าวของโรงสีส่วนใหญ่มาจากมอเตอร์ไฟฟ้าคิดเป็นสัดส่วน 80 ถึง 85 เปอร์เซ็นต์ของการใช้พลังงานทั้งหมด อีกทั้งค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้า ยังเป็นตัวแปรที่สำคัญตัวหนึ่งที่ทำให้ผู้ประกอบการโรงสีข้าว ลดค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าให้มีความต่ำลง

ปัจจุบันโรงสีข้าวใช้ต้นกำลังจากมอเตอร์ไฟฟ้า แทนต้นกำลังไอน้ำ เพื่อใช้สำหรับเดินอุปกรณ์ใน

กระบวนการสี เนื่องจากกลบมีมูลค่าเพิ่มสูงขึ้นเพราะสามารถนำไปผสมกับขานอ้อย ข้าวฟาง และผักตบชวา เพื่อผลิตเป็นถ่านอัดแท่ง [8] รวมถึงใช้กลบเป็นแหล่งพลังงาน ในการแปรรูปข้าวเปลือก โดยมีต้นทุนในกระบวนการผลิตไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 2 ถึง 7.2 บาทต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง [9] โดยปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าในกระบวนการสีข้าว จะประกอบไปด้วยประสิทธิภาพของมอเตอร์ ภาระการใช้งานของอุปกรณ์ ลักษณะการวางผังกระบวนการผลิต และคุณภาพของข้าวที่ต้องการ [10] อีกทั้งโรงสีข้าวในปัจจุบันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังนั้น การวิเคราะห์การใช้พลังงานไฟฟ้าในโรงสีขนาดกลาง จึงเป็นแนวทางที่จะช่วยให้ทราบถึง การใช้พลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์ภายในโรงสี เพื่อที่จะใช้เป็นข้อมูลสำหรับนำไปประกอบการตัดสินใจ ในการอนุรักษ์พลังงานไฟฟ้า และให้ผู้ประกอบการตระหนักถึง การใช้พลังงานไฟฟ้าในอุปกรณ์แต่ละกระบวนการได้อย่างเหมาะสม

2. วิธีดำเนินการ

การดำเนินการเก็บข้อมูลและการตรวจวัดการใช้พลังงานไฟฟ้าภายในโรงสีข้าวมีขั้นตอนดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนผังการดำเนินการวิจัย

การศึกษาการใช้พลังงานไฟฟ้าของโรงสี โดยการเก็บตัวอย่างจากโรงสีข้าวขนาดกลางจำนวน 10 โรง ในเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และคัดเลือกโรงสีข้าวที่กำลังผลิตตั้งแต่ 100 ตันต่อวัน หรือมีการติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้ารวมตั้งแต่ 250 กิโลโวลท์แอมแปร์ ขึ้นไป และต่ำกว่า 1,175 กิโลโวลท์แอมแปร์ [3,11,12] โดยทำการเก็บข้อมูลด้วยการสอบถาม และตรวจวัดการใช้พลังงานไฟฟ้าโดยรวม และการใช้พลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์ในช่วงเดือนพฤศจิกายน 2558 ถึง เดือนมิถุนายน 2559 ซึ่งเป็นช่วงที่โรงสีข้าวรับซื้อข้าวจากเกษตรกร โดยมีวิธีการดังนี้

2.1 ตรวจวัดการใช้พลังงานโดยรวมของโรงสีข้าว

โดยทำการตรวจวัดการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมตลอดการสีข้าว โดยการติดตั้งเครื่องมือวัดคุณภาพไฟฟ้ากับระบบไฟฟ้าของโรงสี แล้วทำการบันทึกค่าทุกๆ 1 นาที ด้วยเครื่องวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้า และฮาร์โมนิกส์ เพื่อศึกษาลักษณะการใช้พลังงานไฟฟ้าโดยรวมของโรงสี

2.2 ตรวจวัดการใช้พลังงานของเครื่องจักรและอุปกรณ์ในขบวนการสี

โดยทำการตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าของเครื่องจักรและอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อเครื่องยนต์เหียนนำ เช่น ตะแกรงทำความสะอาด พัดลมดูดกลบ เครื่องขัดขาว เครื่องขัดมัน เป็นต้น โดยการติดตั้งเครื่องมือวัดคุณภาพไฟฟ้ากับระบบไฟฟ้าของโรงสี แล้วทำการบันทึกค่าทุกๆ 1 นาที เพื่อศึกษาลักษณะการใช้พลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์ต่างๆ

2.3 เก็บข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าตามใบแจ้งหนี้

โดยเก็บข้อมูลซึ่งประกอบไปด้วย ประเภทของผู้ใช้ไฟฟ้า ค่าความต้องการไฟฟ้า ค่าพลังงานไฟฟ้า ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ ค่าบริการรายเดือน ค่าไฟฟ้าผันแปร และค่าภาษีมูลค่าเพิ่ม

จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ดำเนินการ มาวิเคราะห์หาค่าปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าโดยรวม ค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานไฟฟ้า โดยคิดเป็นกิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี และคิดเป็นบาทต่อปริมาณการผลิต ของการใช้พลังงานไฟฟ้าตลอดทั้งปี

ตารางที่ 1 การใช้พลังงานไฟฟ้าของโรงสีข้าว

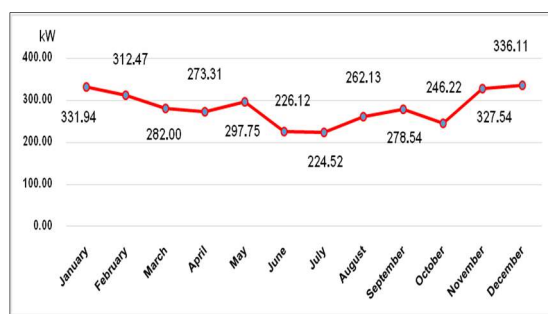
พื้นที่ ทำการศึกษา	ปริมาณการ ผลิตจริง	กำลังไฟฟ้า สูงสุด	การใช้ พลังงานไฟฟ้า	ค่าพลังงาน ไฟฟ้า	การใช้ พลังงาน จำเพาะ	ค่า พลังงาน จำเพาะ
(จังหวัด)	(ตัน/ปี)	(กิโลวัตต์)	(กิโลวัตต์- ชั่วโมง/ปี)	(บาท/ปี)	(กิโลวัตต์- ชั่วโมง/ตัน)	(บาท/ตัน)
อำนาจเจริญ	78,444	746	1,643,700	7,910,902	20.95	100.85
มุกดาหาร	45,003	458	813,528	4,046,764	18.08	89.92
มหาสารคาม	63,087	327	1,342,307	5,483,584	21.28	86.92
ขอนแก่น	129,632	749	3,789,600	14,171,779	29.23	109.32
ยโสธร	39,748	259	659,420	2,829,240	16.59	71.18
นครพนม	35,469	204	567,526	2,565,216	16.00	72.32
ร้อยเอ็ด	45,064	406	1,083,420	4,563,766	24.04	101.27
หนองคาย	33,967	160	529,200	2,376,062	15.58	69.95
อุดรธานี 1	41,799	148	688,388	2,663,390	16.47	63.72
อุดรธานี 2	42,598	160	715,620	2,402,304	16.80	56.40
เฉลี่ย	55,481	362	1,183,271	4,901,301	19.50	82.19

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

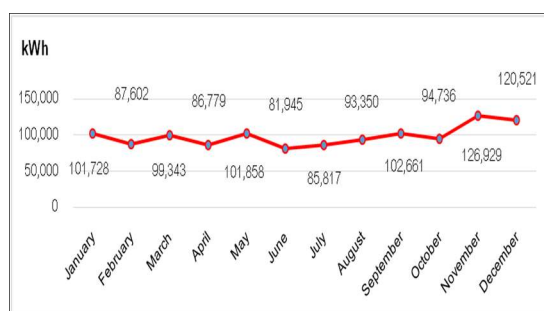
จากตารางที่ 1 พบว่า การใช้พลังงานไฟฟ้าของโรงสีข้าวขนาดกลางที่ทำการศึกษาคือเป็นจำนวนทั้งหมด 10 แห่ง พบว่า โรงสีข้าวที่ทำการศึกษามีการใช้อัตราไฟฟ้า TOU จำนวน 7 แห่ง ได้แก่ โรงสีข้าวในเขตจังหวัดขอนแก่น ยโสธร นครพนม ร้อยเอ็ด หนองคาย อุดรธานี 1 และ อุดรธานี 2 ในส่วนของผู้ใช้ไฟฟ้าอัตราปกติมีจำนวน 3 แห่ง คือ โรงสีข้าวในเขตจังหวัดอำนาจเจริญ มุกดาหาร และมหาสารคาม โดยโรงสีในเขตจังหวัดขอนแก่น มีการใช้กำลังไฟฟ้าสูงที่สุดถึง 749 กิโลวัตต์ ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้เท่ากับ 3,789,600 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อปี คิดเป็นค่าใช้จ่ายที่ต้องจ่ายให้กับการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ถึง 14,171,779 บาทต่อปี ซึ่งการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อปริมาณการผลิตเท่ากับ 29.23 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตัน คิดเป็นค่าใช้จ่ายพลังงานต่อปริมาณการผลิต ถึง 109.32 บาทต่อตัน เนื่องจากโรงสีข้าวในจังหวัดขอนแก่น มีเครื่องจักรที่มีขนาดใหญ่ และมีอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการสีข้าวเป็นจำนวนมาก และมีการสีข้าวเกินเวลาที่การไฟฟ้ากำหนด ประกอบกับมีความต้องการปริมาณผลผลิตที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ต้องจ่ายให้กับการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคสูงตามไปด้วย ส่วนโรงสีในเขตจังหวัดหนองคาย ที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำที่สุด ซึ่งมีการใช้กำลังไฟฟ้าเพียง 160 กิโลวัตต์ ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้เท่ากับ 529,200 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อปี คิดเป็นค่าใช้จ่ายที่ต้องจ่ายให้กับการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเพียง 2,376,062 บาทต่อปี ซึ่งการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อปริมาณการผลิต ของโรงสีเท่ากับ 15.58 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตัน คิดเป็นค่าใช้จ่ายพลังงานต่อปริมาณการผลิตถึง 69.95 บาทต่อตัน เนื่องจากสภาพของเครื่องจักรอุปกรณ์ค่อนข้างอยู่ในสภาพดี ประกอบกับภาระการทำงานของเครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการสีต่ำ รวมถึงโรงสีมีการซ่อมบำรุงอุปกรณ์อย่างต่อเนื่อง จึงทำให้การใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องจักร และอุปกรณ์มีค่าต่ำตามไปด้วย และในส่วนของโรงสีในเขตจังหวัดอุดรธานี 2 ที่มีค่าพลังงานจำเพาะต่ำที่สุดเพียง 56.40 บาทต่อตัน ซึ่งจากการศึกษา

พบว่า มีการควบคุมเวลาในการสี และไม่ป้อนภาระให้กับอุปกรณ์ ในกระบวนการสีมากจนเกินไป ส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตต่ำลงตามไปด้วย โดยโรงสีข้าวขนาดกลางในเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มีปริมาณการผลิตเฉลี่ยเท่ากับ 55,481 ตันต่อปี กำลังไฟฟ้าสูงสุดเฉลี่ย 362 กิโลวัตต์-พลังงานไฟฟ้าที่ใช้เฉลี่ยเท่ากับ 1,183,271 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อปี ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย 4,901,301 บาทต่อปี พลังงานไฟฟ้าต่อปริมาณผลผลิตเฉลี่ยเท่ากับ 19.50 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตัน ซึ่งมีค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าต่อปริมาณการผลิตเฉลี่ยเท่ากับ 82.19 บาทต่อตัน ดังตารางที่ 1

จากการศึกษาความต้องการไฟฟ้าเฉลี่ยในแต่ละเดือนของโรงสีข้าว ในเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ พบว่า โรงสีข้าวที่ทำการศึกษามีความต้องการไฟฟ้าสูงอยู่ในช่วงเดือนพฤศจิกายน ธันวาคม มกราคม และกุมภาพันธ์ โดยในเดือนธันวาคมมีความต้องการไฟฟ้าสูงสุดถึง 336.11 กิโลวัตต์ เนื่องจากปริมาณข้าวที่เกษตรกรมาจำหน่ายให้กับโรงสีมีปริมาณมาก ส่งผลให้โรงสีข้าวต้องทำการเดินเครื่องจักร และอุปกรณ์ภายในโรงสี เพื่อสีข้าวให้ทันต่อความต้องการของตลาด ส่งผลให้ความต้องการไฟฟ้าในช่วงเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนกุมภาพันธ์ค่อนข้างสูง อีกทั้งโรงสีข้าวมีการเก็บข้าวเปลือกไว้ในไซโล ทำให้ไม่มีปัญหาในการขาดแคลนข้าวเปลือก [13] เพื่อให้มีข้าวสีตลอดทั้งปี โดยการรับซื้อของโรงสีข้าวจะนำรถบรรทุกตระเวนออกซื้อข้าวเปลือกตามยุ้งฉางของเกษตรกร และซื้อกับพ่อค้ารวบรวมในท้องถิ่น ที่เป็นของผู้รวบรวมที่ทำการซื้อข้าวจากเกษตรกรมาจำหน่ายให้อีกต่อหนึ่ง [14] ซึ่งความต้องการไฟฟ้าสูงสุดเฉลี่ยอยู่ในช่วง 312.47 ถึง 336.11 กิโลวัตต์ เมื่อเปรียบเทียบกับเดือนมิถุนายน ถึงเดือนกรกฎาคม มีความต้องการไฟฟ้าเฉลี่ยค่อนข้างน้อย (224.52 ถึง 226.12 กิโลวัตต์) โดยในเดือนกรกฎาคม มีความต้องการไฟฟ้าสูงสุดเฉลี่ยเพียง 224.5 กิโลวัตต์ เนื่องจากปริมาณข้าวภายในโรงสีมีปริมาณข้าวลดลง ส่งผลให้ในเดือนกรกฎาคมมีความต้องการไฟฟ้าของอุปกรณ์ลดลงตามไปด้วย ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ความต้องการไฟฟ้าเฉลี่ยของโรงสีข้าว

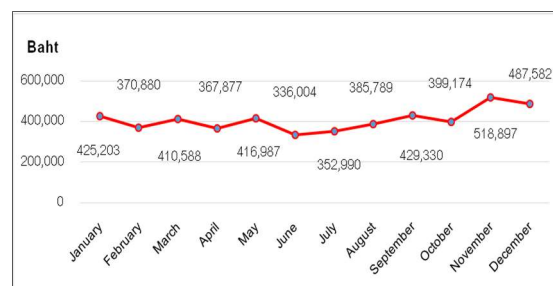


รูปที่ 3 การใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยของโรงสีข้าว

จากรูปที่ 3 พบว่า ในเดือนพฤศจิกายนมีปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยมากที่สุด ถึง 126,929 กิโลวัตต์ ชั่วโมง เนื่องจากเกษตรเก็บเกี่ยวข้าวและนำมาจำหน่ายให้กับโรงสีมากที่สุด ในช่วงเดือนพฤศจิกายน ถึง เดือนธันวาคม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของชัชรินทร์ สุภาเนตร [15] ส่งผลให้โรงสีมีการใช้พลังงานไฟฟ้าเพื่อขับอุปกรณ์ต่างๆ ในการแปรรูปข้าวเปลือกให้เป็นข้าวสาร ประกอบกับที่โรงสีข้าวใช้เวลา TOU ที่การไฟฟ้ากำหนดเพื่อให้ทันต่อความต้องการของผู้บริโภคภายในประเทศ และต่างประเทศ จึงทำให้ช่วงเดือนนี้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าสูง ส่วนในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ ถึง เดือนมิถุนายน มีการใช้พลังงานไฟฟ้าค่อนข้างสูงและต่ำสลับกัน โดยในเดือนมิถุนายนมีการใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำสุดเพียง 81,945 กิโลวัตต์ ชั่วโมง เนื่องจากปริมาณข้าวภายในโรงสีมีปริมาณข้าวลดลง ส่งผลให้ในเดือนมิถุนายนมีการใช้พลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์ลดลงตามไปด้วย

จากการศึกษา ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าของโรงสีพบว่า ในเดือนพฤศจิกายนโรงสีข้าวส่วนใหญ่จ่ายค่าพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยมากที่สุดถึง 518,897 บาท เนื่องจาก

ผู้ประกอบการโรงสีจำเป็นต้องซื้อข้าวเกินเวลา TOU ที่การไฟฟ้ากำหนด ซึ่งการซื้อข้าวเกินเวลาจะส่งผลให้ค่าพลังงานไฟฟ้าสูงขึ้นตามพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ไป เช่น ช่วงเวลา Peak จะอยู่ในช่วง 9.00 ถึง 22.00 น. วันจันทร์ ถึง วันศุกร์ ค่าพลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 3.6796 บาทต่อหน่วย ช่วงเวลา Off Peak จะอยู่ในช่วง 22.00 ถึง 9.00 น. ค่าพลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 2.1760 บาทต่อหน่วย [16] เมื่อเปรียบเทียบกับค่าพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย ในเดือนมิถุนายน ซึ่งมีค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าเพียง 336,004 บาท เนื่องจากปริมาณข้าวลดลง และความต้องการของผู้บริโภคลดลง ทำให้โรงสีสามารถควบคุมการผลิตให้อยู่ในช่วง Off Peak ได้ ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าลดลงตามไปด้วย ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ค่าพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยของโรงสีข้าว

4. สรุปผล

โรงสีข้าวที่ทำการศึกษามีการใช้อัตราไฟฟ้า TOU จำนวน 7 แห่ง และผู้ใช้ไฟฟ้าอัตราปกติจำนวน 3 แห่ง โดยการใช้พลังงานไฟฟ้าของโรงสีขนาดกลาง ในเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เปลี่ยนแปลงไปตามขนาดของเครื่องจักร อุปกรณ์ และระบบการสีข้าวที่เปลี่ยนแปลงไปภายในโรงสี ซึ่งโรงสีในเขตจังหวัดขอนแก่นมีการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงที่สุด เป็นเพราะโรงสีข้าวในจังหวัดขอนแก่น มีเครื่องจักรที่มีขนาดใหญ่ และมีอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการสีข้าวเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ต้องจ่าย ให้กับการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคสูงตามไปด้วย ในส่วนของโรงสีในเขตจังหวัดหนองคาย มีการใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำที่สุดเนื่องจาก สภาพของเครื่องจักรอุปกรณ์

ค่อนข้างอยู่ในสภาพดี ประกอบกับภาระการทำงานของเครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการสีตำ รวมถึงโรงสีมีการซ่อมบำรุงอุปกรณ์อย่างต่อเนื่อง จึงทำให้การใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องจักร และอุปกรณ์มีค่าต่ำตามไปด้วย

การใช้พลังงานไฟฟ้าของโรงสีขนาดกลาง ในเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มีปริมาณการผลิตเฉลี่ย 55,481 ตัน ความต้องการกำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 362 กิโลวัตต์ ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 1,183,271 กิโลวัตต์ ชั่วโมงต่อปี คิดเป็นค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 4,901,301 บาทต่อปี ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อปริมาณการผลิตเฉลี่ย 19.50 กิโลวัตต์ ชั่วโมงต่อตัน และคิดเป็นค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าต่อปริมาณการผลิตเฉลี่ยเท่ากับ 82.19 บาทต่อตัน

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกลุ่มวิจัยวิศวกรรมประยุกต์ เพื่อพืชเศรษฐกิจที่สำคัญ ของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น สำหรับการเอื้อเฟื้ออุปกรณ์และทุนสนับสนุนในการทำวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. สถิติการเกษตรของประเทศไทยปี 2557. ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์สำนักงานพระพุทธศาสนาแห่งชาติ, 2557.
- [2] ศูนย์สารสนเทศการเกษตร สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. *ตัวชี้วัดเศรษฐกิจการเกษตรของประเทศไทย ปี 2555*. ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2555.
- [3] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์ สวทช. (2559, พฤษภาคม, 10). เครื่องสีข้าวกับชุมชน, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: <http://www.nstda.or.th/nac2015/download/presentation/April2/CC-405-AM-Dusit.pdf>
- [4] สนั่น เกษารีย์, ระพีพันธ์ ปิตาคะโส. “การจัดการโลจิสติกส์และโซ่อุปทานข้าวในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย,” *KKU Res.J*, vol. 17, no. 1, pp. 125-141, 2555.
- [5] สุทธิชัย หาญตระกูล, “ความสำเร็จของการดำเนินการธุรกิจชุมชน กรณีศึกษาโรงสีข้าวชุมชนอีสานใต้,” *วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเศรษฐศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์*, 2543.
- [6] สุวพงษ์ หินคำ, วาทีน ไชยจันทร์, ณัฏฐา แสงกล้า, “การประเมินผลกระทบของฝุ่นละอองจากโรงอบข้าว,” *รายงานโครงการของนักศึกษาชั้นปีที่ 4 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยขอนแก่น*, 2553.
- [7] เอกรัฐ ชุ่มเอียด, “การวิเคราะห์การใช้พลังงานไฟฟ้าโรงสีข้าวในภาคกลาง,” *วิทยานิพนธ์ปริญญาครุศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี*, 2550.
- [8] lindaporn Jamradloedluk and Songchai Wiriyaumpaiwong, “ Production and Characterization of rice husk based charcoal briquettes,” *KKU Engineering Journal* 2007 Jul-Aug., vol. 34, no. 4, pp. 391-398, 2007.
- [9] T. Kapur, T. C. Kandpal, and H. P. Garg. “Electricity generation from rice husk in Indian rice mills: potential and financial viability,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 10, no. 5/6, pp. 393-403, 1996.
- [10] สุนันท์ทิพย์ สนิทวัฒนกุล, “การศึกษาแนวทางในการประหยัดพลังงานในโรงสีข้าว โดยใช้เทคโนโลยีการผลิตที่สะอาด,” *วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี*, 2551.

- [11] สุวิทย์ วงศ์แสน, “การศึกษาแนวทางการอนุรักษ์พลังงานสำหรับโรงสีข้าวขนาดกลาง ในเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือของไทย,” การศึกษาอิสระปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2552.
- [12] สำนักกำกับและอนุรักษ์พลังงาน, “คู่มือคำอธิบายพระราชบัญญัติการส่งเสริม การอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2535 (แก้ไขเพิ่มเติม พ.ศ.2550) สำหรับโรงงานควบคุมและอาคารควบคุม,” กรุงเทพฯ: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2554.
- [13] อชิรญา เลี้ยงรักษา, “การจัดการเชิงกลยุทธ์ของธุรกิจโรงสีข้าวขนาดใหญ่ กรณีศึกษาอำเภอโนนสูง จังหวัดนครราชสีมา,” การศึกษาอิสระปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาธุรกิจการเกษตร บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2546.
- [14] อภิชาติ เสริมพงษ์, “การวิเคราะห์ระบบการตลาดโรงสีข้าวในจังหวัดกาฬสินธุ์,” รายงานการศึกษาอิสระปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขา วิชาธุรกิจการเกษตร บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2546.
- [15] ชัชรินทร์ สุภาเนตร, “การวิเคราะห์อุตสาหกรรมโรงสีข้าวในเขตภาคกลาง,” การศึกษาอิสระปริญญาบริหารธุรกิจมหาบัณฑิต, สาขาบริหารธุรกิจ, บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สุพรรณบุรี, 2547.
- [16] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, (2558, กันยายน. 27). อัตราค่าไฟฟ้า2554, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา:
<https://www.pea.co.th/peawiki/Documents/Rate2012.pdf>.

สมบัติเชิงกลของไม้ไผ่ 5 ชนิด ที่ผ่านการอบแห้ง Mechanical Properties of Five Species Dried Bamboo

ธวัชชัย อุ่นใจจอม* นฤมล มณีอินตา วรวัฒน์ ปัญญาคำ

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่

128 ถนนห้วยแก้ว ตำบลช้างเผือก อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50230

Thawatchai Ounjaijom* Naruamol Manee-inta Worawat Punyacum

Department of Mechanical Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna, Chiang Mai

128 Huay Kaew Road, Muang, Chiang Mai, 50300

*Corresponding author: Email: tounjaijom@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลของชิ้นงานไม้ไผ่ที่นิยมนำมาใช้ประโยชน์ จำนวน 5 พันธุ์ ได้แก่ ไผ่รวก ไผ่ตง ไผ่สีสุก ไผ่สีซาง และไผ่เลี้ยง โดยนำชิ้นงานไม้ไผ่จากส่วนโคน ส่วนกลาง และส่วนปลายของลำต้น มาผ่านการอบแห้งเพื่อกำจัดความชื้นออกจากเนื้อไม้ ชิ้นงานไม้ไผ่ที่ผ่านการอบแห้งแล้วจะถูกนำไปทดสอบโดยการให้ภาระดึง ภาระกด และภาระดัด ด้วยเครื่องทดสอบสากล เพื่อหาค่าสมบัติเชิงกลของไม้ไผ่ ผลการศึกษาพบว่าไม้ไผ่เลี้ยงมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานในการรับแรงต่างๆ เนื่องจากมีความต้านทานแรงสูงกว่าไม้ไผ่ชนิดอื่น โดยมีความต้านทานแรงดึงสูงสุด 124.05 MPa ความต้านทานแรงอัดสูงสุด 92.29 MPa ความต้านทานแรงดัดสูงสุด 265.47 MPa และมีค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น 13.17 GPa ตามลำดับ

คำสำคัญ: ไม้ไผ่, สมบัติเชิงกล, มอดูลัสของความยืดหยุ่น

ABSTRACT

The purpose of this research is to study the mechanical properties of five popular bamboo species, i. e., *Pai Ruak* (*Thyrsostachys siamensis*), *Pai Tong* (*Dendrocalamus asper*), *Pai See Suk* (*Bambusa blumeana*), *Pai Sang* (*Dendrocalamus strictus*), and *Pai Liang* (*Bambusa sp.*). Three parts of bamboo culm, i.e. parts from the bottom, middle and top, were used as specimens. These specimens were dried in order to remove moisture content from the wood. Each dried bamboo specimen was tested under either tensile, compressive or bending load using the Universal Testing Machine. This process was to evaluate the bamboos mechanical properties. The result shows that mechanical properties of *Pai Liang* are in higher than other species. The maximum tensile strength, compressive strength, bending strength, and modulus of elasticity are 124.05 MPa, 92.29 MPa, 265.47 MPa, and 13.17 GPa, respectively.

Keyword: Bamboo, Mechanical Properties, Modulus of Elasticity

1. บทนำ

ไม้ไผ่เป็นพืชเอนกประสงค์ที่อยู่คู่กับมนุษย์มาช้านาน เนื่องจากสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลายส่วนตั้งแต่หน่อไม้จนถึงลำต้น เช่น การนำหน่อไม้มาเป็นอาหาร การนำส่วนของลำต้นมาทำเครื่องใช้ไม้สอย เช่น ค้ำจอบ ตะกร้าสาน ฝ้ายนั่งและเพดาน หรือนำมาใช้ในงานโครงสร้าง เช่น การทำนั้งร้าน หรือโครงสร้างของที่พักอาศัย จากการศึกษาของ ปรัชญาและรวี [1] พบว่าสำหรับประเทศไทยนั้นพบว่ามีไผ่มากกว่า 69 ชนิด ใน 13 สกุล กระจายตัวอยู่ทั่วทุกภาคของประเทศ โดยจะพบในภาคกลางมากที่สุด 458,500 ไร่ รองลงมาคือภาคอีสาน 248,312 ไร่ ภาคเหนือ 125,500 ไร่ ภาคตะวันออก 97,875 ไร่ และภาคใต้ 9,437 ไร่ [2]

ไม้ไผ่มีลักษณะที่แตกต่างจากไม้เนื้อแข็งทั่วไป เนื่องจากมีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกกลวงและถูกแบ่งด้วยข้อที่ระยะต่างๆ ตลอดความยาวของลำต้น โครงสร้างของเนื้อไม้ไผ่ประกอบไปด้วยเซลล์พาเรนไคมา (Parenchyma Cells) 60% กลุ่มเส้นใย (Fiber) 40% และเวสเซลและซีฟทิวบ์ (Vessels and Sieve Tubes) 10% ที่เรียงตัวตามแนวยาวของลำต้น แต่ไม่มีกลุ่มเส้นใยตามแนวรัศมี หรือตามแนวเส้นรอบวง [3] โดยที่ความหนาแน่นของกลุ่มเส้นใยจะมีค่ามากที่สุดบริเวณใกล้กับผิวด้านนอก และจะค่อยๆ ลดลงจนถึงบริเวณผิวด้านใน ซึ่งส่งผลให้ลำไม้ไผ่สามารถยืนต้นและต้านทานแรงลมได้ดีโดยไม่เกิดการแตกหัก [4]

การนำไม้ไผ่ไปใช้งานในด้านโครงสร้างนั้นจำเป็นที่จะต้องทราบถึงสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของไม้ไผ่แต่ละชนิด เพื่อที่จะทำให้เกิดประโยชน์ได้สูงสุดสำหรับไม้ไผ่ที่มีอยู่ในประเทศไทยนั้นได้มีการศึกษาถึงสมบัติเชิงกลของไม้ไผ่ชนิดต่างๆ บ้างแล้ว เช่น รุติกุล [5] ได้ศึกษาสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของไม้ไผ่ตงจากจังหวัดปราจีนบุรี พบว่าไม้ไผ่ตงมีความชื้นตามธรรมชาติค่อนข้างต่ำ มีความถ่วงจำเพาะปานกลาง มีการหดตัวค่อนข้างน้อย เมื่อเทียบกับไม้ทั่วๆ ไป แต่มีสมบัติเชิงกลสูงมาก โดยเฉพาะความแข็งแรงในการต้านแรงดึงขนานเส้นมีค่าสูงกว่าไม้ชนิดอื่น และสมบัติเชิงกลต่างๆ ยังสม่ำเสมอ ตั้งแต่ส่วนโคน

ถึงส่วนปลาย จากรายงานการศึกษาการจัดการและการใช้ประโยชน์จากไม้ไผ่อย่างยั่งยืน [6] ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลของไม้ไผ่ในประเทศจำนวน 5 ชนิด พบว่าไผ่สีสุกและไผ่ไร่ มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดสูงกว่าไผ่ชนิดอื่น นอกจากนี้ สราวุธ [7] ได้ทดสอบหาสมบัติเชิงกลของไม้ไผ่แต่ละชนิดในแต่ละศูนย์พัฒนาโครงการหลวงในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ และจังหวัดเชียงราย ด้วยวิธีการทดสอบแรงดึง แรงอัด แรงดัด พบว่าสมบัติเชิงกลของไม้ไผ่ขึ้นอยู่กับชนิด อายุ สภาพแวดล้อม และอิทธิพลจากความชื้น มงคล และพิเชษฐ์ [8] ได้ศึกษาอิทธิพลของข้อปล้อง ขนาดหน้าตัด และปริมาณความชื้นต่อกำลังรับแรงดึงของไม้ไผ่ตงและไผ่สีสุก พบว่ากำลังรับแรงดึงบริเวณข้อปล้องของไม้ไผ่ตงและไผ่สีสุกมีค่าต่ำกว่ากำลังรับแรงดึงบริเวณกลางปล้องประมาณ 1.1 – 2.0 เท่า ผลกระทบของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ขนาดเล็กให้ค่ากำลังรับแรงดึงบริเวณกลางปล้องสูงกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่ 3.65 และ 3.14 เท่า ตามลำดับ ส่วนอิทธิพลของความชื้นในไม้ไผ่แสดงให้เห็นว่า ไม้ไผ่ที่มีความชื้นต่ำจะให้กำลังรับแรงดึงสูงกว่าไม้ไผ่ที่มีความชื้นสูงร้อยละ 9.4 – 31.7

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นพบว่าการศึกษาสมบัติเชิงกลของไม้ไผ่นั้นเป็นการศึกษาไม้ไผ่สดที่ยังคงมีความชื้นอยู่ในเนื้อไม้ ซึ่งส่งผลให้สมบัติเชิงกลที่ได้นั้นยังคงได้รับอิทธิพลจากความชื้นในเนื้อไม้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาสมบัติเชิงกลของไม้ไผ่ที่ผ่านการอบแห้ง เพื่อเป็นการกำจัดผลของความชื้นที่มีต่อสมบัติเชิงกลของไม้ไผ่ ภายใต้สมมติฐานที่ว่าไม้ไผ่ที่ผ่านการอบแห้งแล้วจะมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าไม้ไผ่สด

2. อุปกรณ์และวิธีการ

ในการศึกษาสมบัติเชิงกลของไม้ไผ่ในครั้งนี้ เลือกใช้ไม้ไผ่จำนวน 5 ชนิด ที่มีอายุประมาณ 3-5 ปี ในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ ได้แก่ ไผ่รวก (*Thyrsostachys siamensis*) ไผ่ตง (*Dendrocalamus asper*) ไผ่สีสุก (*Bambusa blumeana*) ไผ่ซาง (*Dendrocalamus strictus*) และไผ่เลี้ยง (*Bambusa sp.*) นำไม้ไผ่แต่ละชนิดมาตัดออกเป็น 3 ส่วนได้แก่ ส่วนโคนลำต้น ส่วนกลางลำ

ต้น และส่วนปลายลำต้น จากนั้นทำการผ่าซีกๆ ตามแนวเส้นใยเพื่อลอกผิวด้านในและผิวด้านนอกออกด้านละประมาณไม่เกิน 1 มิลลิเมตร ทั้ง 3 ส่วน นำซีกไม้ไฟที่ผ่านการลอกผิวแล้วไปอบแห้งเพื่อกำจัดความชื้นออกจากเนื้อไม้ด้วยตู้อบแห้งยี่ห้อ Binder รุ่น ED-FD ดังแสดงในรูปที่ 1 ที่อุณหภูมิภายในตู้อบแห้ง $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ จากนั้นทำการอบขึ้นไม้ไฟและชั่งมวลขึ้นไม้ไฟทุกๆ 6 ชั่วโมง เพื่อตรวจสอบมวลและเนื้อไม้ไฟไม่ให้เกิดการปริแตกเนื่องจากการอบแห้ง จนครบ 24 ชั่วโมง จึงทำการชั่งมวลขึ้นไม้ไฟทุกๆ 1 ชั่วโมง จนกระทั่งมวลขึ้นไม้ไฟไม่มีการเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 0.01 กรัม ตามมาตรฐานของ ISO/DIS 22157 [9] ไม้ไฟที่ผ่านการอบแห้งแล้วจะถูกเก็บไว้ในอุปกรณ์ควบคุมความชื้นเพื่อนำไปทำชิ้นทดลองต่อไป

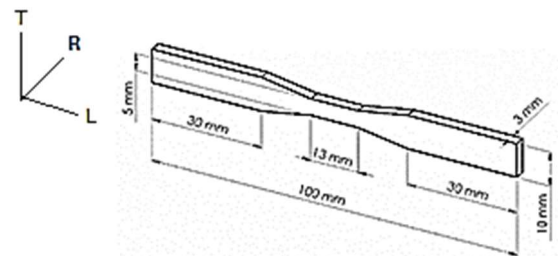


รูปที่ 1 ตู้อบแห้งยี่ห้อ Binder รุ่น ED-FD

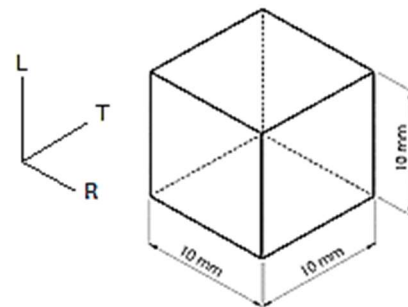
ในการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาถึงสมบัติเชิงกลตามแนวเส้นใยของไม้ไฟด้วยเครื่องทดสอบสากลยี่ห้อ Hounsfield รุ่น H50KS ความแม่นยำในการวัดค่าแรง $\pm 0.5\%$ ของค่าแรงที่วัดได้ ดังแสดงในรูปที่ 2 ตามวิธีการของ ISO/DIS 22157 [9] ได้แก่ ความต้านทานแรงดึงสูงสุด ความต้านทานแรงอัดสูงสุด ความต้านทานแรงดัดสูงสุด และมอดูลัสของความยืดหยุ่นของไม้ไฟ 5 ชนิด ทั้งส่วนโคนลำต้น ส่วนกลางลำต้น และส่วนปลายลำต้น โดยที่ชิ้นทดลองในการทดสอบมีขนาดตามแนวเส้นใย (Longitudinal, L) ตามแนวรัศมี (Radial, R) และตามแนวเส้นสัมผัส (Transverse, T) ดังแสดงในรูปที่ 3 ถึงรูปที่ 5



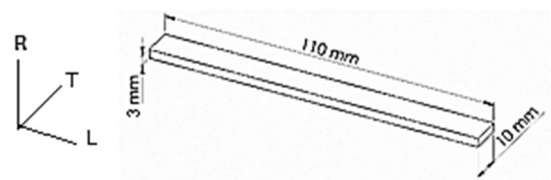
รูปที่ 2 เครื่องทดสอบสากล Hounsfield รุ่น H50KS



รูปที่ 3 ขนาดของชิ้นทดลองความต้านทานแรงดึงสูงสุด



รูปที่ 4 ขนาดของชิ้นทดลองความต้านทานแรงอัดสูงสุด



รูปที่ 5 ขนาดของชิ้นทดลองความต้านทานแรงดัดสูงสุด

ชิ้นทดลองที่ผ่านการตัดด้วยเลื่อยวงเดือนและผ่านการขัดแต่งผิวด้วยกระดาษทรายจนได้ขนาดของชิ้นทดสอบตามที่ต้องการแล้วจะถูกนำไปทดสอบหาค่าความ

ด้านแรงดึงสูงสุด ความต้านทานแรงอัดสูงสุด ความต้านทานแรงดัดสูงสุด และมอดูลัสของความยืดหยุ่นของไม้ไม้แต่ละชนิด โดยใช้ชิ้นทดลองในส่วนโคนลำต้นชนิดละ 9 ชิ้นต่อการทดสอบ ส่วนกลางลำต้นชนิดละ 9 ชิ้นต่อการทดสอบ และส่วนปลายลำต้นชนิดละ 9 ชิ้นต่อการทดสอบตามลำดับ เพื่อใช้ในการทดสอบซ้ำในแต่ละการทดสอบและแต่ละตำแหน่งของลำต้นจำนวน 9 ครั้ง โดยกำหนดให้ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวจับของเครื่องทดสอบสากลในการทดสอบดึงและกดมีค่าเท่ากับ 0.01 mm/sec และในการทดสอบดัดมีค่าเท่ากับ 0.5 mm/sec ค่าของภาระและระยะการเปลี่ยนรูปที่ได้จากการทดสอบจะถูกบันทึกไว้ในโปรแกรมสำเร็จรูป QMATtestzone[®] เพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาค่าสมบัติเชิงกลของไม้ต่อไป

การหาค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด ทดสอบด้วยวิธีการดึง (Tensile Test) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (1) คือ

$$\sigma_{ut} = \frac{F_{ut}}{A} \quad (1)$$

เมื่อ σ_{ut} คือ ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (หน่วย MPa), F_{ut} คือ ภาระดึงสูงสุด (หน่วย N), และ A คือ พื้นที่หน้าตัดที่รับภาระ (หน่วย mm²) ตามลำดับ

การหาค่าความต้านทานแรงอัดสูงสุด ทดสอบด้วยวิธีการกด (Compressive Test) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (2) คือ

$$\sigma_{uc} = \frac{F_{uc}}{A} \quad (2)$$

เมื่อ σ_{uc} คือ ความต้านทานแรงอัดสูงสุด (หน่วย MPa), และ F_{uc} คือ ภาระกดสูงสุด (หน่วย N) ตามลำดับ

การหาค่าความต้านทานแรงดัดสูงสุดและมอดูลัสของความยืดหยุ่น สามารถหาได้จากการทดสอบด้วยวิธีการดัด 3 จุด (3 Point Bending Test) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (3) และ (4) คือ

$$\sigma_{ub} = \frac{3F_{ub}L}{2bh^2} \quad (3)$$

$$E = \frac{F_{ub}L^3}{48yl} \quad (4)$$

เมื่อ σ_{ub} คือ ความต้านทานแรงดัดสูงสุด (หน่วย MPa), E คือ มอดูลัสของความยืดหยุ่น (หน่วย GPa), F_{ub} คือ ภาระดัดสูงสุด (หน่วย N), L คือ ความยาวระหว่างจุดรองรับของชิ้นทดสอบ (90 mm) b คือ ความกว้างของหน้าตัดของชิ้นทดสอบ (หน่วย mm), h คือ ความสูงของหน้าตัดของชิ้นทดสอบ (หน่วย mm), y คือ ระยะการแอ่นสูงสุดของชิ้นทดสอบ (หน่วย mm), และ I คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดลอง (หน่วย mm⁴) ($I = bh^3/12$) ตามลำดับ

3. ผลและวิจารณ์

ผลที่ได้จากการทดสอบหาค่าการทดสอบถูกนำมาหาค่าความต้านแรงดึงได้จากสมการที่ (1) ความต้านทานแรงอัดสูงสุดได้จากสมการที่ (2) ความต้านทานแรงดัดสูงสุดได้จากสมการที่ (3) และมอดูลัสของความยืดหยุ่นจากสมการที่ (4) ของไม้ไม้แต่ละชนิด ซึ่งสามารถสรุปได้ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1 จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของไม้ไม้ที่ผ่านการอบแห้งทั้ง 5 ชนิดนั้น พบว่ามีสมบัติเชิงกลที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้มีค่าที่สูงกว่าไม้ไม้ที่อยู่ในสภาพสดที่ได้จากการศึกษาของ Thaipetch [6] ซึ่งจะเห็นความแตกต่างอย่างชัดเจนเมื่อพิจารณาถึงความต้านทานแรงดัดสูงสุด เช่น ไม้ตง 190.92 MPa (84 MPa) ไม้สีสุก 200.42 MPa (92 MPa) ไม้ซาง 239.17 MPa (83 MPa) และไม้เลียง 265.47 MPa (81 MPa) โดยตัวเลขในวงเล็บคือความต้านทานแรงดัดสูงสุดที่ได้จากการศึกษาของ Thaipetch [6] สังเกตได้ว่าเนื้อไม้ส่วนโคนของลำต้นไม้ไม้ทั้ง 5 ชนิดมีความสามารถในการต้านทานแรงต่างๆ ได้ต่ำกว่าส่วนอื่นๆ ส่วนเนื้อไม้บริเวณส่วนกลางลำต้นมีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดและความต้านทานแรงอัดสูงสุดมากกว่าส่วนปลายและส่วนโคนของลำต้นอันเนื่องมาจากส่วนกลางลำต้นที่มีระยะห่างระหว่างข้อมากกว่าส่วนอื่นๆ

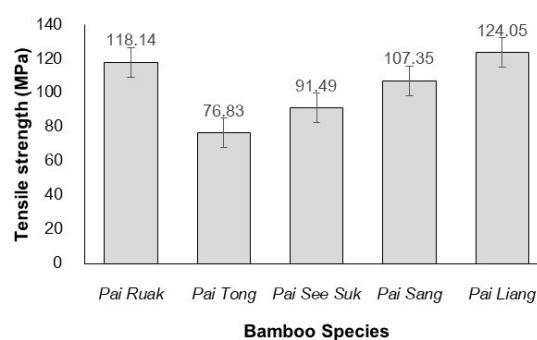
ตารางที่ 1 สมบัติเชิงกลของไม้ไผ่ทั้ง 5 ชนิด ที่ผ่านการอบแห้ง

ชนิด	ตำแหน่ง	Tensile Strength (MPa)	Compressive Strength (MPa)	Bending Strength (MPa)	Modulus of Elasticity (GPa)
ไผ่รวก <i>Thyrsostachys siamensis</i>	โคน	108.62	80.27	189.63	7.83
	กลาง	130.33	88.53	205.88	8.27
	ปลาย	115.47	80.53	228.75	9.44
	เฉลี่ย	118.14 (11.1)	83.11 (4.7)	208.08 (19.7)	8.51 (0.8)
ไผ่ตง <i>Dendrocalamus asper</i>	โคน	52.64	46.00	186.75	10.17
	กลาง	90.18	60.68	185.13	11.23
	ปลาย	87.69	54.93	200.88	12.59
	เฉลี่ย	76.83 (20.9)	53.87 (7.4)	190.92 (8.7)	11.33 (1.2)
ไผ่สีสุก <i>Bambusa blumeana</i>	โคน	83.61	82.97	196.75	5.43
	กลาง	103.20	85.57	201.25	7.09
	ปลาย	87.64	84.97	203.25	8.54
	เฉลี่ย	91.49 (10.3)	84.50 (1.4)	200.42 (3.3)	7.02 (1.6)
ไผ่ซาง <i>Dendrocalamus strictus</i>	โคน	103.91	74.57	214.13	11.18
	กลาง	109.51	79.91	251.25	11.61
	ปลาย	108.62	79.06	252.13	11.84
	เฉลี่ย	107.35 (3.0)	77.85 (2.9)	239.17 (21.6)	11.54 (0.3)
ไผ่เลี้ยง <i>Bambusa sp.</i>	โคน	113.22	82.13	232.63	12.21
	กลาง	131.00	101.46	260.00	12.99
	ปลาย	127.92	93.27	303.78	14.30
	เฉลี่ย	124.05 (9.5)	92.29 (9.7)	265.47 (35.9)	13.17 (1.1)

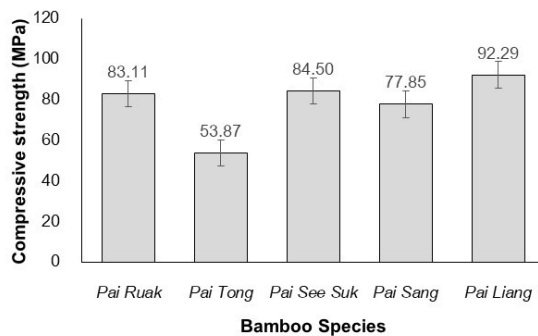
หมายเหตุ : () * Standard Deviation

และเนื้อไม้ส่วนปลายของลำต้นมีความสามารถในการต้านทานแรงดัดและค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่นของไม้ไผ่มากกว่าส่วนกลางและส่วนโคน ตามลำดับ อันเนื่องมาจากความหนาแน่นของเส้นใยบริเวณผิวด้านนอกมีค่ามากและจะค่อยๆ ลดลงไปตามความหนาของเนื้อไม้ ดังข้อมูลจากรายงานการศึกษาของนิรันดร์ [4]

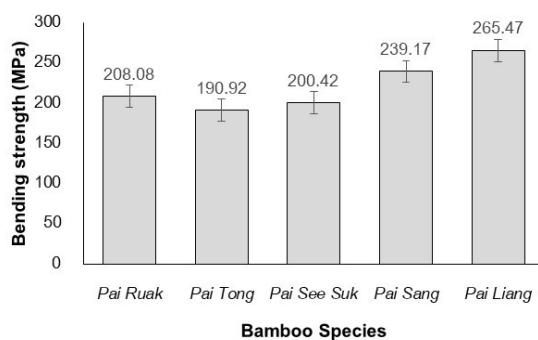
สมบัติเชิงกลของไม้ไผ่ที่ผ่านการอบแห้งทั้ง 5 ชนิด ที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้สามารถนำมาเปรียบเทียบดังแสดงได้ในรูปที่ 6-9 ได้ดังนี้



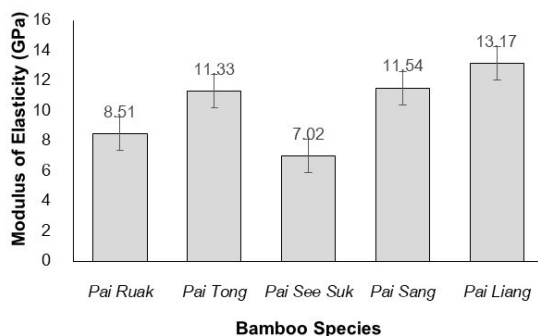
รูปที่ 6 ความต้านทานแรงดึงสูงสุดของไม้ไผ่ 5 ชนิด



รูปที่ 7 ความต้านทานแรงอัดสูงสุดของไม้ไผ่ 5 ชนิด



รูปที่ 8 ความต้านทานแรงดัดสูงสุดของไม้ไผ่ 5 ชนิด



รูปที่ 9 ค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่นของไม้ไผ่ 5 ชนิด

จากผลการเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงดึงในรูปที่ 6 พบว่าไผ่เลี้ยงและไผ่รวกมีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดเฉลี่ยสูงกว่าไม้ไผ่ชนิดอื่น (124.05 MPa และ 118.14 MPa ตามลำดับ) ไผ่ชางมีค่าเฉลี่ยปานกลาง (107.35 MPa) ส่วนไผ่สีสุกและไผ่ตงมีค่าเฉลี่ยต่ำกว่าไม้ไผ่ชนิดอื่น (91.49 MPa และ 76.83 MPa ตามลำดับ) ส่วนผลการเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงอัดสูงสุดเฉลี่ยในรูปที่ 7 พบว่าไม้ไผ่ทุกชนิดมีค่าความต้านทานแรงอัดน้อย

กว่าความต้านทานแรงชนิดอื่นเนื่องจากลักษณะทางกายภาพของเส้นใย (Fiber) ของไม้ไผ่ที่เรียงตัวตามแนวยาวของลำต้นโดยที่ไม่มีการเรียงตัวในแนวรัศมี ทำให้เมื่อได้รับแรงอัดในแนวแกน เส้นใยของเนื้อไม้จะเกิดการโก่งงอ (Bulking) และเสียหายได้ง่าย ซึ่งจากผลการเปรียบเทียบพบว่าทั้งไผ่เลี้ยง ไผ่สีสุก ไผ่รวก และไผ่ชาง มีค่าความต้านทานแรงอัดค่อนข้างสูง (92.29 MPa, 84.50 MPa, 81.11 MPa และ 77.85 MPa ตามลำดับ) ส่วนไผ่ตงมีความสามารถในการรับแรงอัดได้น้อยกว่าไม้ชนิดอื่น (53.87 MPa) ผลจากการเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงดัดสูงสุดในรูปที่ 8 พบว่าไผ่เลี้ยงมีค่าความต้านทานแรงดัดมากที่สุด (265.47 MPa) ตามด้วยไผ่ชาง (239.17 MPa) ไผ่รวก (208.08 MPa) ไผ่สีสุก (200.42 MPa) และไผ่ตง (190.92 MPa) ตามลำดับ ส่วนค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่นเฉลี่ยในรูปที่ 9 พบว่าไผ่เลี้ยง ไผ่ชาง และไผ่ตงมีค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่นเฉลี่ยที่แตกต่างกันไม่มากนัก (13.17 GPa, 11.54 GPa และ 11.33 GPa ตามลำดับ) ส่วนไผ่รวกและไผ่สีสุกมีค่าเฉลี่ยน้อยกว่าไม้ชนิดอื่น (8.51 GPa และ 7.02 GPa ตามลำดับ)

สมบัติเชิงกลของไม้ไผ่ที่ผ่านการอบแห้งทั้ง 5 ชนิดนี้เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับการศึกษาของ Thaipetch [6] นั้นพบว่าไม้ไผ่ตงที่อยู่ในสภาพสดจะให้ค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่นเฉลี่ยที่สูงกว่าไม้ไผ่ชนิดอื่นๆ แต่จากการศึกษาในครั้งนี้ซึ่งใช้ชิ้นทดสอบที่ผ่านการอบแห้งแล้วนั้นพบว่าไม้ไผ่เลี้ยงให้ค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่นเฉลี่ยที่สูงกว่าไผ่ตง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากอิทธิพลของความชื้นที่มีต่อสมบัติเชิงกลของไม้ไผ่ เมื่อความชื้นในเนื้อไม้ถูกทำให้หมดไปส่งผลให้เนื้อไม้มีค่าความต้านทานเชิงกลเพิ่มขึ้น นอกจากนี้อาจเกิดจากการที่เนื้อไม้ไผ่ชนิดเดียวกันอาจมีปัจจัยอื่นๆ ที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลแตกต่างกันได้ เช่น ลักษณะของดินที่ปลูก สภาพภูมิประเทศ หรืออายุของเนื้อไม้ เป็นต้น จึงส่งผลให้ข้อมูลจากการศึกษาในครั้งนี้แตกต่างกับงานวิจัยที่ผ่านมา

4. สรุป

จากผลการศึกษาสมบัติเชิงกลของไม้ไผ่ 5 ชนิด ที่ผ่านการอบแห้งมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าไม้ไผ่สดที่ได้ตั้งสมมติฐานไว้ข้างต้น โดยพบว่าไม้ไผ่เลี้ยงมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานในลักษณะต่างๆ ได้ดี เนื่องจากมีค่าความต้านทานแรงดึง แรงอัด แรงดัด และมอดุลัสของความยืดหยุ่นเฉลี่ยสูงกว่าไม้ไผ่ชนิดอื่นๆ แต่เมื่อพิจารณาถึงการรับแรงอัดนั้นพบว่าไม้ไผ่ทั้ง 5 ชนิด ที่นำมาศึกษาในครั้งนี้มีค่าความต้านทานแรงอัดน้อยกว่าการรับแรงดึงและดัด ดังนั้นเมื่อนำไม้ไผ่ไปใช้งานที่มีลักษณะการรับแรงอัดนั้นผู้ใช้งานควรพิจารณาถึงสมบัติเชิงกลในด้านนี้ด้วย

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณห้องวิจัยและปฏิบัติการสมบัติทางกลของวัสดุทางการเกษตร สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ และโรงฝึกฝีมือสาขาวิชาออกแบบเครื่องเรือน คณะศิลปกรรมและสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ที่จำเป็นต่อการศึกษาวิจัยในครั้งนี้เป็นอย่างสูง

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] ปรัชญา ยังวัฒนา และระวี ถาวร. “ความหลากหลายชนิดและการใช้ประโยชน์ไม้ในประเทศไทย”. *เอกสารประกอบการประชุมแลกเปลี่ยน ไม้กับวิถีชีวิตคนไทย ครั้งที่ 1: องค์ความรู้ และรูปแบบการจัดการของท้องถิ่น*, 2557, หน้า 10-18.
- [2] สุริย์ ภูมิภมร. “ไม้กับวิถีชุมชนท้องถิ่นไทย”. *เอกสารประกอบการประชุมแลกเปลี่ยน ไม้กับวิถีชีวิตคนไทย ครั้งที่ 1: องค์ความรู้ และรูปแบบการจัดการของท้องถิ่น*, 2557, หน้า 19-27.
- [3] Liese, W. , “ The Structure of Bamboo in Relation to its Properties and Utilization” . *Bamboo and its use International Symposium on Industrial use of Bamboo*, Beijing, CHINA, December 1992, pp. 7-11.
- [4] นิรันดร์ มาแทน. “ไม้: นวัตกรรมเอกของธรรมชาติ”. *WOODSPHERE*. ปีที่ 1. ฉบับที่ 3, ธันวาคม 2545 – กุมภาพันธ์ 2546, 3.
- [5] ฐิติกุล ภาคศิริ. “สมบัติทางกายภาพและเชิงกลของไม้ไผ่ตง”. *กรุงเทพมหานคร: ฐานข้อมูลวิทยานิพนธ์ไทย*, 2540.
- [6] Thaipetch, S. , “ Physical and Mechanical Properties of Five Bamboo Species in Thailand” . *Final Technical Report: Sustainable Management and Utilization from Bamboo*. Royal Forest Department, International Tropical Timber Organization, Bangkok, Thailand, September 2004. pp. 41-45.
- [7] ศราวุธ สีขาว. *การทดสอบสมบัติเชิงกลของไม้ไผ่*. วิทยานิพนธ์อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต. หลักสูตรเทคโนโลยีเครื่องกล, สาขาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา, 2550.
- [8] มงคล นามลักษณ์ และ พิเชษฐ์ เมฆแสน. “อิทธิพลของข้อปล้อง ขนาดหน้าตัด และปริมาณความชื้นต่อกำลังรับแรงดึงของไม้ไผ่”. *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม*. ฉบับที่ 9, เล่มที่ 2, พฤษภาคม-สิงหาคม, 2557, หน้า 84-96.
- [9] ISO/ DIS 22157. *International Standard. Determination of Physical and Mechanical Properties of Bamboo*, 2004.

การหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์กับเงื่อนไขการทำงานและ รูปร่างของอีเจ็คเตอร์โดยใช้วิธีแบบโครงสร้างพื้นผิว

Determining the Corresponding Equations between Ejector Performance and Operating Conditions and Ejector Geometries by Using Response Surface Methodology

วิระพันธ์ สีหนาม¹ กุลเชษฐ์ เพียรทอง² ชญานนท์ แสงมณี^{3*}

¹ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

85 ต. เมืองศรีโค อ. วารินชำราบ จ. อุบลราชธานี 34190

²รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

85 ต. เมืองศรีโค อ. วารินชำราบ จ. อุบลราชธานี 34190

³อาจารย์ สาขาวิศวกรรมการทำความเย็นและการปรับอากาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

744 ถ.สุรนารายณ์ ต. ในเมือง อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000

Wirapan Seehanam¹ Kulachate Pianthong² Chayarnon Saengmanee^{3*}

¹Assistant Professor, Department of mechanical engineering, Faculty of engineering,
Ubon Ratchathani University, 85 Sathonlamark Road, Warin Chamrap, Ubon Ratchathani, 34190

²Associate Professor, Department of mechanical engineering, Faculty of engineering,
Ubon Ratchathani University, 85 Sathonlamark Road, Warin Chamrap, Ubon Ratchathani, 34190

³Teacher, Department of Refrigeration and Air Conditioning Engineering,
Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan,

744 Suranarai Road, Naimuang, Muang, Nakhon Ratchasima, 30000

*Corresponding author: Email: chayarnon.sa@rmuti.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ในระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ ซึ่งได้แก่ อิทธิพลจากเงื่อนไขการทำงาน ได้แก่ อุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอ อุณหภูมิเครื่องระเหย และ อิทธิพลของรูปร่าง อีเจ็คเตอร์ ได้แก่ อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดของคอคอดหัวฉีดกับห้องผสม (Area ratio, AR) และอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดปาก ทางออกกับคอคอดของหัวฉีด (Area of throat ratio, ATR) โดยศึกษาด้วยระเบียบวิธีพลศาสตร์การไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) วางแผนการศึกษาด้วยวิธี Central Composite Design (CCD) และทำการ วิเคราะห์ผลของปัจจัยต่างๆเหล่านั้น ต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำ (Entrainment ratio, Rm) และความดันทางออกวิกฤต (Critical back pressure, CBP) ของอีเจ็คเตอร์ ด้วยวิธีแบบโครงสร้างพื้นผิว (Response Surface Methodology, RSM) เพื่อหาสมการถดถอย (Regression equation) จากผลการศึกษา พบว่า สภาวะการทำงานและรูปร่างของอีเจ็คเตอร์มี อิทธิพลต่อสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ การสร้างความสัมพันธ์ในรูปแบบเชิงเส้นโค้ง (Quadratic

model) มีความเหมาะสม โดยมีระดับความเชื่อมั่นที่ 95% แต่อย่างไรก็ตาม ค่าความดันทางออกวิกฤตที่ได้นั้นมีค่าเบี่ยงเบนจากการทดลองอยู่เล็กน้อยเพราะมีหลายปัจจัยที่ไม่ได้พิจารณาในการศึกษานี้

คำสำคัญ: อีเจ็คเตอร์ วิธีโครงร่างพื้นผิว ระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ที่ใช้ไอน้ำ ระบบทำความเย็น

ABSTRACT

This study is to investigate the effect of variously important parameters on an ejector performance in steam ejector refrigeration system. The parameters are the operating conditions which are boiler and evaporator temperature and ejector geometries which are area ratio (AR) and area of throat ratio (ATR). Computational fluid dynamics (CFD) is employed to examine such effects with statistical research matrix design called Central Composite Design (CCD). The regression equation of relationships between parameter and ejector performance being entrainment ratio (R_m) and critical back pressure (CBP) are determined by using the response surface methodology (RSM). From simulation results, RSM analysis indicates that the operating conditions and ejector geometries have the significant effect on ejector performances. Furthermore, the quadratic model being properly with reliability above 95%. However, critical back pressure values given from the regression is slightly deviated because some parameters are not considered in this study.

Keyword: Ejector, Response surface methodology, Steam ejector refrigeration system, Refrigeration system.

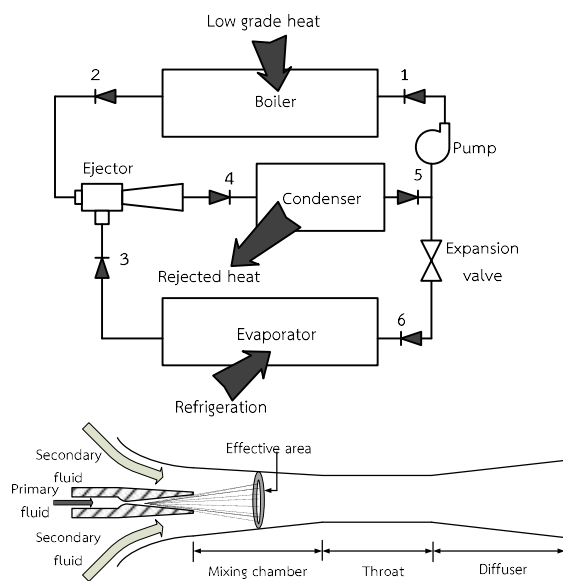
1. บทนำ

ระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์เป็นระบบทำความเย็นทางเลือกเพื่อการนำพลังงานความร้อนทิ้งหรือความร้อนราคาถูกมาใช้ในการขับเคลื่อนระบบทำความเย็น โดยเครื่องอัดไอ (compressor) ในระบบทำความเย็นทั่วไปจะถูกแทนที่ด้วยระบบให้กำเนิดไอสารทำงานแรงดันสูงจากความร้อน หลักการทำงานของระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์แสดงดังรูปที่ 1 ความร้อนจะถูกป้อนเข้าเครื่องกำเนิดไอ (boiler) เพื่อต้มสารทำความเย็นให้เดือดแล้วกลายเป็นไอแรงดันสูง ไอสารทำความเย็นนี้จะถูกป้อนเข้าอีเจ็คเตอร์เป็นสารป้อนมวล และไหลผ่านหัวฉีด (nozzle) ก่อให้เกิดบริเวณความดันต่ำภายในอีเจ็คเตอร์ ทำให้สารทุติยภูมิจากเครื่องระเหย (evaporator) จะถูกเหวี่ยงเข้าผสมกับสารป้อนมวล ทำให้ความดันของเครื่องระเหยลดลงและสารทำความเย็น

พร้อมที่ระเหิดที่อุณหภูมิต่ำและรับความร้อนจากพื้นที่ทำความเย็น ทั้งนี้ของผสมที่ออกจากอีเจ็คเตอร์จะถูกส่งไปยังเครื่องควบแน่น (condenser) เพื่อคายความร้อนออกสู่สิ่งแวดล้อม ที่เครื่องควบแน่นนี้สารทำความเย็นจะควบแน่นกลายเป็นของเหลว หลังจากนั้น สารทำความเย็นบางส่วนจะถูกปั๊มกลับไปยังเครื่องกำเนิดไอ ในขณะที่สารทำความเย็นส่วนที่เหลือนั้นจะไหลผ่านลิ้นลดความดัน (expansion valve) เข้าสู่เครื่องระเหยต่อไป

จากหลักการทำงานของระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ ดังที่กล่าวในย่อหน้าผ่านมา จะเห็นได้ว่า อีเจ็คเตอร์เป็นเสมือนหัวใจของระบบ สมรรถนะของอีเจ็คเตอร์จะส่งผลต่อสมรรถนะของระบบโดยตรง ทั้งนี้สมรรถนะหรือความสามารถในการทำงานของอีเจ็คเตอร์ในระบบทำความเย็นนั้นระบุด้วยสองพารามิเตอร์ที่สำคัญ ได้แก่ อัตราส่วนการเหวี่ยงเข้า (Entrainment ratio, R_m) ซึ่ง

เป็นอัตราส่วนอัตราการไหลของสารทุดิยภูมิต่อสารปฐุมภูมิ ดังสมการที่ (1) และความดันทางออกวิกฤต (Critical back pressure, CBP) ซึ่งเป็นความดันทางออกของอีเจ็คเตอร์สูงสุดที่อัตราส่วนการเหนี่ยวนำของอีเจ็คเตอร์จะคงที่ พารามิเตอร์เหล่านี้จะขึ้นอยู่กับสภาวะการทำงานและขนาดรูปร่างของอีเจ็คเตอร์



รูปที่ 1 ระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์และ
คุณลักษณะการไหลผ่านในอีเจ็คเตอร์

$$Rm = \frac{\text{mass flow rate of secondary fluid}}{\text{mass flow rate of primary fluid}} \quad (1)$$

ผ่านมามีการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆกับการทำงานของอีเจ็คเตอร์อย่างแพร่หลาย ซึ่งผลการศึกษาอิทธิพลของเงื่อนไขการทำงานในระบบทำความเย็นพบว่าความดันเครื่องกำเนิดไอที่สูงขึ้นจะทำให้ความดันทางออกวิกฤตของอีเจ็คเตอร์เพิ่มขึ้น แต่ส่งผลให้อัตราการเหนี่ยวนำลดลง ขณะที่หากเครื่องระเหยมีความดันสูง อัตราการเหนี่ยวนำและความดันทางออกวิกฤตของอีเจ็คเตอร์จะสูงตามไปด้วย [1] จะเห็นได้ว่าสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์นั้นจะแปรเปลี่ยนตามสภาวะการทำงานของระบบไม่ได้มีค่าคงที่ ดังนั้นการออกแบบรูปร่างอีเจ็คเตอร์

ให้เหมาะสมกับสภาวะต่างๆของระบบจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง ด้วยเหตุนี้จึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาพฤติกรรมการณ์การไหลและคุณลักษณะของอีเจ็คเตอร์ในเชิงลึกและพัฒนาเครื่องมือช่วยศึกษาซึ่งจะนำไปสู่การออกแบบอีเจ็คเตอร์ให้ได้รูปร่างที่เหมาะสมหรือช่วยตรวจสอบคุณสมบัติของอีเจ็คเตอร์ก่อนนำไปใช้งานจริง

ในปี ค.ศ. 1942 และ ค.ศ. 1950 Keenan และคณะ [2-3] ได้เสนอแบบจำลองทางทฤษฎีการไหลแบบหนึ่งมิติที่เกิดขึ้นของอีเจ็คเตอร์ที่ใช้อากาศเป็นสารทำงาน ซึ่งแบบจำลองนี้ถูกนำมาใช้ในการออกแบบอีเจ็คเตอร์อย่างแพร่หลายจนถึงปัจจุบัน เนื่องจากแบบจำลองไม่ซับซ้อนและง่ายต่อความเข้าใจ แต่อย่างไรก็ตามแบบจำลองของ Keenan ยังมีข้อบกพร่องอยู่หลายประการ โดยเฉพาะการไม่สามารถอธิบายปรากฏการณ์ของอีเจ็คเตอร์ กรณีที่อีเจ็คเตอร์จะเหนี่ยวนำสารทุดิยภูมิได้อัตราคงที่ แม้ความดันที่ปากทางออกของอีเจ็คเตอร์จะลดลงต่ำมากก็ตาม เพื่ออธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้ ในปี ค.ศ. 1997 Munday และ Bagster [4] ได้นำเสนอแบบจำลองทางทฤษฎีใหม่ที่สามารถอธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าวได้ โดยอธิบายถึงการเกิด Chocking ของสารทุดิยภูมิ (ที่เป็นการไหลผ่านคอขวด) ก่อนผสมกับสารปฐุมภูมิที่มาจากหัวฉีด พร้อมกันนั้น Munday และ Bagster ได้นิยามพื้นที่หน้าตัดของคอขวดสมมติขึ้นขึ้นมาเรียกว่า “effective area” (แสดงดังรูปที่ 1) ซึ่งจะมีขนาดขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการทำงานของระบบอีเจ็คเตอร์ ถึงแม้แบบจำลองของ Munday และ Bagster จะมีความถูกต้องและครอบคลุมปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในอีเจ็คเตอร์ทั้งหมดก็ตาม แต่ด้วยความซับซ้อนของแบบจำลองทำให้มีความยุ่งยากในการใช้งานทำให้ไม่เป็นที่นิยมที่จะนำมาใช้ในการศึกษาหรือออกแบบอีเจ็คเตอร์เท่าที่ควร

นอกจากการใช้ทฤษฎีของไหลเพื่อการศึกษาการไหลในอีเจ็คเตอร์ แล้วเมื่อเกือบ 20 ปีที่ผ่านมาได้เริ่มมีการนำเอาระเบียบวิธีเชิงตัวเลขมาใช้ในการจำลองการไหลและศึกษาพฤติกรรมต่างๆของอีเจ็คเตอร์ โดยในปี 2001 Riffat และ Omer [5] ได้ตีพิมพ์ผลงานวิจัยที่เป็นครั้งแรกที่มีการนำเอาระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่เรียกว่าพลศาสตร์

การไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamic, CFD) ในการจำลองการไหลของอีเจ็คเตอร์ในระบบทำความเย็น โดยใช้คอมพิวเตอร์สมรรถนะสูง (super computer) ซึ่งถือเป็นจุดเริ่มต้นของการนำเอา CFD มาเป็นเครื่องมือช่วยคำนวณและออกแบบอีเจ็คเตอร์ในระบบทำความเย็น แต่อย่างไรก็ตามงานศึกษาของ Riffat และ Omer ไม่ได้รายงานผลกระทบของอิทธิพลหรือปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกับอีเจ็คเตอร์อย่างครบถ้วนเท่าที่ควร อาจจะเนื่องจากช่วงเวลานั้นแบบจำลองของระเบียบวิธีเชิงตัวเลขและคอมพิวเตอร์ยังมีประสิทธิภาพและประสิทธิภาพในการคำนวณต่ำและอาจใช้เวลานานในการคำนวณแต่ละกรณีศึกษา ดังนั้น ในเวลาต่อมา เมื่อแบบจำลองและคอมพิวเตอร์ถูกพัฒนาขึ้น การใช้ CFD เพื่อศึกษา อีเจ็คเตอร์ในเชิงลึกจึงมีมากยิ่งขึ้นตามไปด้วย โดยการศึกษาที่ใช้ CFD ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ อย่างจริงจังนั้นถูกนำเสนอพร้อมๆ กันในปี ค.ศ. 2007 ได้แก่การศึกษาของ Pianthong และคณะ [6] และ Sriveerakul และคณะ [7-8] ซึ่งนักวิจัยเหล่านี้ได้ทำการเปรียบเทียบผลการจำลอง CFD กับผลการทดลอง รวมทั้งได้ทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิเครื่องกำเนิดไอและเครื่องระเหยรูปร่างของอีเจ็คเตอร์ พบว่า ผลของ CFD ให้ผลเป็นที่ยอมรับเมื่อเทียบกับการทดลอง อีกทั้งยังทำให้เห็นปรากฏการณ์การไหลและการทำงานของอีเจ็คเตอร์ภายใต้เงื่อนไขต่างๆ ซึ่งถือเป็นการเปิดแนวทางใหม่ในการศึกษาและออกแบบอีเจ็คเตอร์สมัยใหม่ที่จะต้องทำการจำลองการไหลด้วย CFD เสมอ

แต่อย่างไรก็ตาม ถึงแม้จะมีการนำเอา CFD มาใช้ในการศึกษาหรือออกแบบอีเจ็คเตอร์กันอย่างแพร่หลาย แต่การศึกษาเหล่านั้นจะเฉพาะบางปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของอีเจ็คเตอร์เท่านั้น และเป็นไปอย่างกระจัดกระจาย ไม่มีการนำผลมาเรียบเรียงหรือประมวลข้อมูลให้เป็นเชิงตัวเลข ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้จะได้ทำการจำลองการไหลในอีเจ็คเตอร์ด้วย CFD เพื่อหาอิทธิพลปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ในระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอ อุณหภูมิเครื่องระเหย อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดของคอคอดหัวฉีดกับ

ห้องผสม และอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดปากทางออกกับคอคอดของหัวฉีด แล้วทำการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่างๆ เหล่านั้นต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำ (R_m) และความดันทางออกวิกฤต (CBP) ด้วยวิธีตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิว (Response Surface Methodology, RSM) เพื่อหาสมการถดถอย (Regression equation) ของความสัมพันธ์เพื่อประโยชน์ในการนำไปใช้ออกแบบอีเจ็คเตอร์ในระบบทำความเย็นต่อไป

2. เงื่อนไขและแบบจำลอง CFD ของอีเจ็คเตอร์

ระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ในการศึกษานี้จะมุ่งที่การใช้น้ำเป็นสารทำงานแทนการใช้สารทำความเย็นในท้องตลาดมีข้อดีกว่าสารทำความเย็นชนิดอื่นหลายประการ อันได้แก่ ราคาถูก เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ไม่เป็นพิษ ไม่ติดไฟ มีจุดเดือดและความร้อนแฝงสูงซึ่งทำให้ระบบสามารถถ่ายเทพลังงานได้ในปริมาณที่มาก อีกทั้งอุปกรณ์ที่ใช้รองรับระบบจัดหาและซ่อมบำรุงง่าย [9] รูปร่างอีเจ็คเตอร์และหัวฉีดที่ใช้ในการศึกษานี้แสดงดังรูปที่ 2 ซึ่งเป็นอีเจ็คเตอร์ชนิดห้องผสมความดันคงที่ (Constant pressure mixing, CPM) โดยจะทำการจำลองการไหลด้วย CFD ในโปรแกรม Fluent 6.3 ทั้งนี้เงื่อนไขของแบบจำลองทาง CFD ใช้เป็นแบบเดียวกับการศึกษาของ Pianthong และคณะ [6] ซึ่งเป็นที่ยอมรับถึงความถูกต้องเมื่อทำการเทียบกับการทดลองและแบบจำลองทางทฤษฎี อีกทั้งเป็นแบบจำลองที่ไม่ซับซ้อนทำให้การคำนวณมีโอกาสให้ผลเฉลยที่ลู่เข้าและใช้เวลาคำนวณไม่มากเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองชนิดอื่นๆ แบบจำลอง CFD ของการไหลในอีเจ็คเตอร์สรุปไว้ในตารางที่ 1 ดังรายละเอียด สารทำงานเป็นไอน้ำอิ่มตัวที่ความหนาแน่นเปลี่ยนแปลงตามสมการแก๊สจินตภาพ (Idea gas model) สร้างรูปร่างของแบบจำลองอีเจ็คเตอร์ลักษณะแบบสมมาตรในแนวแกน (axis-symmetry) ที่มีกริดรูปร่างสี่เหลี่ยม และจำลองความปั่นป่วนด้วยแบบจำลอง k-ε model

ในการทำการจำลองการไหลในอีเจ็คเตอร์ด้วย CFD เพื่อให้ทราบอัตราส่วนการเหนี่ยวนำ (Entrainment

ratio, Rm) และความดันทางออกวิกฤต (Critical back pressure, CBP) ซึ่งเป็นผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะการทำงานและรูปร่างของอีเจ็คเตอร์ ซึ่งขนาดของหัวฉีดและอีเจ็คเตอร์เป็นปัจจัยด้านรูปร่างที่มีผลต่อสมรรถนะการทำงานของอีเจ็คเตอร์โดยตรง ในการศึกษานี้ได้กำหนดอัตราส่วนที่สำคัญสองค่าคือ อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดของคอคอดหัวฉีดต่อห้องผสม (AR) และอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดปากทางออกต่อคอคอดของหัวฉีด (ATR) ซึ่งนิยามดังสมการที่ (2) และ (3) ตามลำดับ เพื่อการศึกษาการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนทั้งสอง จะกำหนดให้เส้นผ่านศูนย์กลางที่คอคอด (D_n) มีค่าคงที่เท่ากับ 2 mm และขนาดรูปร่างในแนวยาวมีค่าคงที่ (ดังรูปที่ 2) เช่นเดียวกันทุกกรณี เพื่อให้การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของอีเจ็คเตอร์ในการศึกษาอยู่ในขอบเขตที่ทำงานได้

$$AR = \frac{A_t}{A_n} \quad (2)$$

$$ATR = \frac{A_{exp}}{A_n} \quad (3)$$

โดยที่

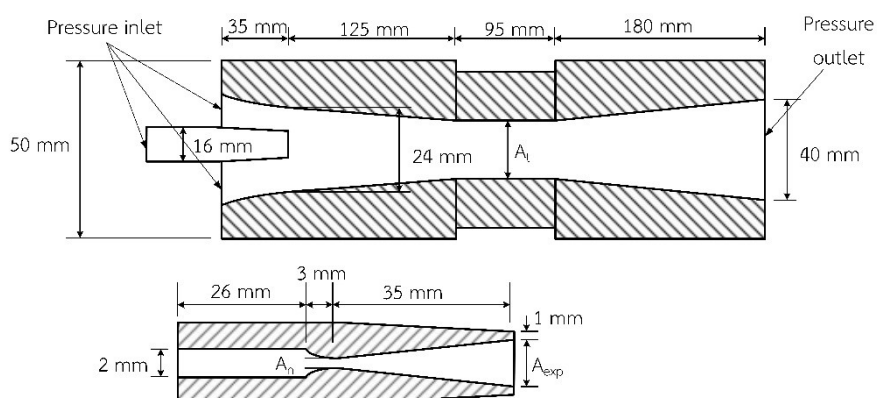
A_t คือ พื้นที่หน้าตัดคอคอดอีเจ็คเตอร์

A_n คือ พื้นที่หน้าตัดคอคอดหัวฉีด

A_{exp} คือ พื้นที่หน้าตัดปากทางออกของหัวฉีด

3. การออกแบบการทดลอง

การศึกษปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของอีเจ็คเตอร์ในระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ โดยใช้การวางแผนการศึกษาแบบ Central Composite Design (CCD) ซึ่งมีตัวแปร 4 ตัวในการศึกษา คือ อุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอ (T_g) อุณหภูมิเครื่องระเหย (T_e) อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดของคอคอดหัวฉีดกับห้องผสม (AR) และอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดปากทางออกกับคอคอดของหัวฉีด (ATR) กำหนดระดับของปัจจัยในการศึกษาออกเป็น 3 ระดับ คือ ต่ำ กลางและสูง ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งได้เงื่อนไขการคำนวณทั้งหมด 30 กรณี ทำการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่างๆเหล่านั้นต่ออัตราส่วนการเหนียวน้ำ (Rm) และความดันทางออกวิกฤต (CBP) และวิเคราะห์ผลที่ได้ด้วยระเบียบวิธีทางสถิติแบบตอบสนองแบบโครงสร้างพื้นผิว (Response surface methodology, RSM) วิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) และความแปรปรวน (ANOVA) ใช้สำหรับทดสอบความมีนัยสำคัญของความสัมพันธ์ระหว่างพื้นผิวและปัจจัยในระดับความ



รูปที่ 2 รูปร่างอีเจ็คเตอร์และหัวที่ใช้ในการศึกษา

ตารางที่ 1 แบบจำลอง CFD ของการไหลในอีเจ็คเตอร์

รูปร่าง	แบบสมมาตรในแนวแกน (axis-symmetry)
สารทำงาน	ไอน้ำอิ่มตัว
แบบจำลองความหนาแน่น	แก๊สจินตภาพ (Ideal gas model)
แบบจำลองความปั่นป่วน	k- ϵ model
ชนิดขอบเขตทางเข้าหัวฉีดและอีเจ็คเตอร์	Pressure inlet
ชนิดขอบเขตทางออกอีเจ็คเตอร์	Pressure outlet
Near wall function	Standard near wall function

ตารางที่ 2 ระดับของปัจจัย

ตัวแปรอิสระ	ระดับ			รหัส		
	ต่ำ	กลาง	สูง	ต่ำ	กลาง	สูง
T_e (°C)	5	10	15	-1	0	1
T_g (°C)	110	130	150	-1	0	1
AR	70	95	120	-1	0	1
ATR	10	17.5	25	-1	0	1

เชื่อมั่น 95% โดยทั้งหมดประมวลผลในโปรแกรมสำเร็จรูป Design-Expert® version 7

4. ผลการศึกษาและผลการถดถอย

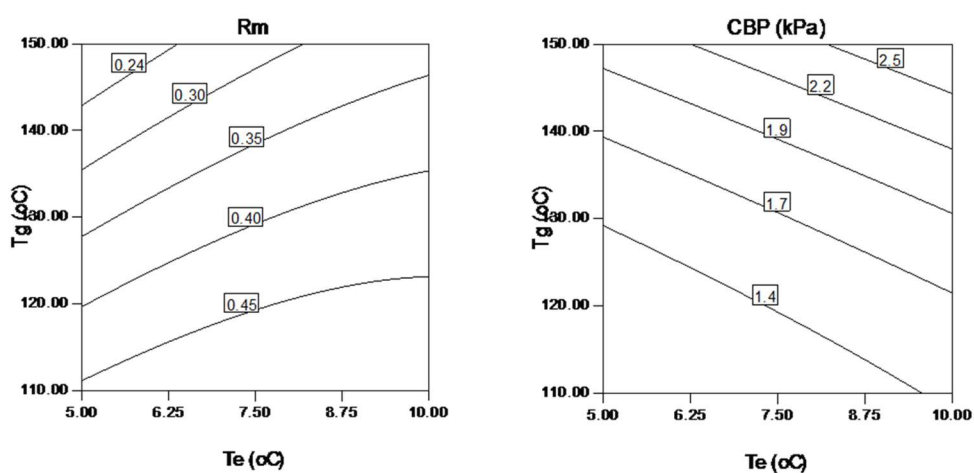
4.1 รูปแบบทางสถิติและผลการถดถอย

จากผลการศึกษาจำลองการไหลของอีเจ็คเตอร์ในระบบทำความเย็นด้วย CFD ผลกระทบของปัจจัยทั้ง 4 อย่างได้แก่ อุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอ (T_g) อุณหภูมิเครื่องระเหย (T_e) อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดของคอคอดหัวฉีดกับห้องผสม (AR) และอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดปากทางออกกับคอคอดของหัวฉีด (ATR) ที่มีต่ออัตราส่วนการเหนียวน้ำ (Rm) และความดันทางออกวิกฤต (CBP)

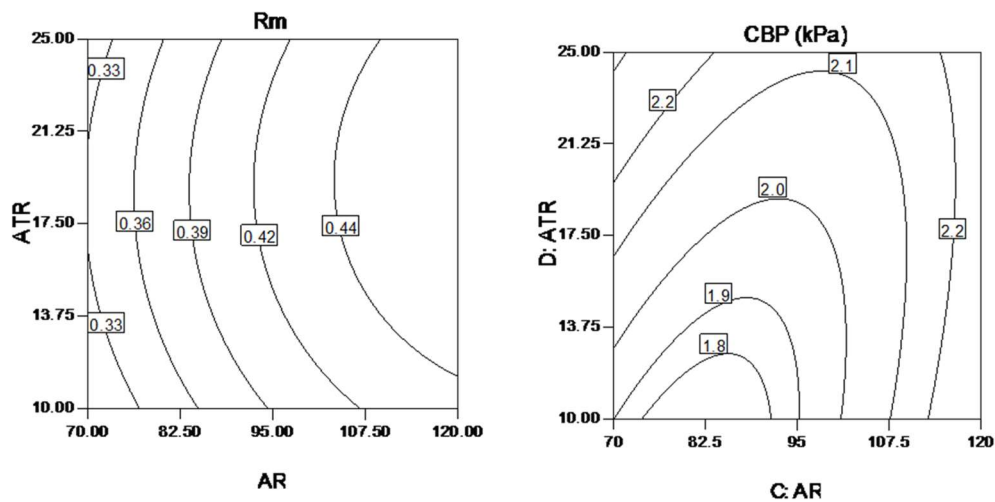
พบว่ามีความเหมาะสมในการสร้างความสัมพันธ์ในรูปแบบเชิงเส้นโค้ง (Quadratic model) ดังแสดงในตารางที่ 3 เมื่อพิจารณาจากค่า p-value ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่าค่า p-value ของแต่ละรูปแบบมีค่าน้อยกว่า 0.05 (เท่ากับ 0.0001 และ 0.002) และค่า p-value ของการทดสอบ lack of fit มีค่ามากกว่า 0.05 (มีค่าเท่ากับ 0.1135 และ 0.1731) ซึ่งแสดงให้เห็นว่ารูปแบบจำลองการถดถอยหรือความสัมพันธ์ที่ได้มีความเหมาะสมกับข้อมูลและสามารถยอมรับได้ นอกจากนี้แล้วจะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด (R^2) ของแต่ละรูปแบบมีค่าสูงใกล้เคียง 1 ซึ่งเป็นการยืนยันให้เห็นว่ารูปแบบการถดถอยที่ได้เป็นรูปแบบที่เหมาะสม

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์รูปแบบทางสถิติและสมการถดถอย

Model	Response	Regression	R ²	P-value model	P-value lack of fit
Quadratic	Rm	$= -0.63181 - 0.0184 \times T_e + 0.00397 \times T_g$ $+ 0.019705 \times AR$ $+ 0.006458 \times ATR + 0.00047 \times T_e \times T_g$ $+ 0.000126 \times T_e \times AR$ $+ 0.00022 \times T_e \times ATR - 0.000091 \times T_g \times AR$ $+ 0.0000465 \times T_g \times ATR$ $+ 0.0000172 \times AR \times ATR$ $- 0.00271 \times T_e^2 - 0.000019 \times T_g^2$ $- 0.000034 \times AR^2 - 0.00043 \times ATR^2$	0.90	0.0001	0.1135
Quadratic	CBP	$= +5.84999 - 0.14106 \times T_e - 0.07403 \times T_g$ $- 0.00516 \times AR - 0.12105 \times ATR$ $+ 0.001869 \times T_e \times T_g - 0.00127 \times T_e \times AR$ $+ 0.004035 \times T_e \times ATR - 0.00042 \times T_g \times AR$ $+ 0.001226 \times T_g \times ATR - 0.0011 \times AR \times ATR$ $+ 0.00281 \times T_e^2 + 0.000401 \times T_g^2$ $+ 0.000501 \times AR^2 + 0.001258 \times ATR^2$	0.87	0.0002	0.1731



รูปที่ 3 อิทธิพลของอุณหภูมิที่ทางเข้าที่มีต่อสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์



รูปที่ 4 อิทธิพลของอัตราส่วนรูปร่างที่มีต่อสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์

4.2 อิทธิพลของเงื่อนไขการทำงานที่มีต่อสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์

4.2.1 อุณหภูมิที่ทางเข้าทั้งสองของอีเจ็คเตอร์

อิทธิพลของอุณหภูมิที่ทางเข้าที่มีต่อสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์แสดงดังรูปที่ 3 โดยศึกษาที่รูปร่างอีเจ็คเตอร์คงที่ AR เท่ากับ 95 และ ATR เท่ากับ 17.5 พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิของเครื่องระเหยสูงขึ้น (T_e) ค่า Rm และความดัน CBP มีแนวโน้มที่จะสูงขึ้น ขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอ (T_g) ส่งผลให้ CBP มีค่าสูงขึ้น แต่ Rm จะลดลง พฤติกรรมของอีเจ็คเตอร์ที่เกิดขึ้นนี้ สอดคล้องกับผลการศึกษาที่ผ่านมา ซึ่งมีสาเหตุจากการลดลงของพื้นที่ประสิทธิภาพเมื่อความดันหรืออุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอสูงขึ้น [1,4,6,11]

4.2.2 อัตราส่วนพื้นที่ของรูปร่างอีเจ็คเตอร์

อิทธิพลของ AR และ ATR ของหัวฉีดที่มีผลต่อสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์แสดงดังรูปที่ 4 โดยแสดงผลกรณีที่ T_e เท่ากับ 10°C และ T_g เท่ากับ 130°C พบว่าการเพิ่มขนาด AR ของอีเจ็คเตอร์ จะทำให้ Rm มีแนวโน้มของค่าสูงขึ้นเนื่องจากขนาดคอคอดของอีเจ็คเตอร์ที่ใหญ่ขึ้น ทำให้สามารถดูดสารทฤษฎีของอีเจ็คเตอร์ได้มากขึ้น แต่ค่า CBP จะลดลงในช่วงบางค่าก่อนที่จะกลับมาสูงขึ้นตาม

ขนาด ATR ขณะที่การเพิ่มขนาด ATR จะทำให้ค่า CBP มีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจาก การขยายปากทางออกหัวฉีดให้โตขึ้นทำให้การขยายตัวของสารปฐภูมิมีค่ามากขึ้นและเกิดการผสมกับสารทฤษฎีของอีเจ็คเตอร์ได้ดี โมเมนตัมของของผสมจึงมีค่ามาก แต่ค่า Rm จะลดลงในช่วงบางค่าก่อนที่จะกลับมาสูงขึ้นตามขนาดของ ATR มีข้อสังเกตว่าความสัมพันธ์ของ AR และ ATR ที่มีต่อสมรรถนะอีเจ็คเตอร์นั้นไม่เป็นลักษณะเชิงเส้นแต่จะมีค่าที่ทำให้อีเจ็คเตอร์มีสมรรถนะสูงอยู่เป็นช่วง ตัวอย่างเช่น (ในกรณีของผลศึกษานี้) ค่า Rm จะมีค่าสูงประมาณ 0.44 เมื่อ AR มีค่าอยู่ระหว่าง 110-120 และ ATR มีค่าอยู่ระหว่าง 13 – 25 ขณะที่ CBP ค่าจะสูงประมาณ 2.2 kPa เมื่อ AR มีค่าอยู่ระหว่าง 110-120 และ ATR มีค่าอยู่ระหว่าง 21 – 25 ซึ่งหาก AR และ ATR มีค่าน้อยกว่าช่วงที่กำหนดนี้ อีเจ็คเตอร์จะสมรรถนะลดลง แต่อย่างไรก็ตามค่าช่วงที่แสดงนี้ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขอุณหภูมิทางเข้าของอีเจ็คเตอร์ด้วย

ทั้งนี้ยังมีปัจจัยด้านรูปร่างลักษณะของอีเจ็คเตอร์ที่ไม่ได้พิจารณาในการศึกษานี้ แต่เป็นที่ทราบกันดีว่ามีผลต่อสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ (มีผลน้อยกว่า AR และ ATR ที่นำมาศึกษา) เช่น ความยาวของอีเจ็คเตอร์แต่ละช่วง มุม

ลู่ออกและลู่ออกของอีเจ็คเตอร์ เป็นต้น ซึ่งหากปัจจัยเหล่านี้มีค่าคงที่จะให้สมรรถนะที่เหมาะสมของอีเจ็คเตอร์ค่าใดค่าหนึ่งตามสภาวะการทำงานของอีเจ็คเตอร์เท่านั้น

ดังนั้นผลปัจจัยด้านรูปร่างที่ได้ในการศึกษานี้จึงมีลักษณะไม่เชิงเส้น

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบผลของความสัมพันธ์ในรูปแบบเชิงเส้นโค้งกับการทดลองและแบบจำลองการไหลของอีเจ็คเตอร์ในหนึ่งมิติ

T_e (°C)	T_g (°C)	AR	ATR	EX		1-D		RSM	
				Rm	CBP (kPa)	Rm	CBP (kPa)	Rm	CBP (kPa)
7.5	130	90.25	4.517	0.29 ^A	4.5 ^A	0.19	5.1	0.3	1.7
7.5	130	124.9	9.391	0.42 ^A	3.5 ^A	0.57	3.9	0.53	2.8
7.5	140	124.9	9.391	0.29 ^A	4.5 ^A	0.32	4.9	0.31	2.9
7.5	150	124.9	9.391	0.19 ^A	5.8 ^A	0.21	6.2	0.22	3.1
10	130	90.25	5.641	0.35 ^B	5.2 ^B	0.32	5.3	0.33	1.8
10	120	90.25	5.641	0.49 ^B	3.7 ^B	0.36	4.0	0.37	1.7
10	140	90.25	5.641	0.27 ^B	6.5 ^B	0.29	6.8	0.27	2.1
5	130	90.25	5.641	0.28 ^B	4.8 ^B	0.27	5.1	0.32	1.5

^ARuangtrakoon et al. [10]

^BChunnanond et al. [11]

5. การทดสอบสมการวิธีตอบสนองแบบโครงสร้างพื้นผิว

ความสัมพันธ์ในรูปแบบเชิงเส้นโค้ง (Quadratic model) เป็นความสัมพันธ์ที่ได้จากการจำลองการไหลใน CFD ของอีเจ็คเตอร์เพื่อหาสมรรถนะที่เงื่อนไขต่างๆ ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมาเครื่องมือที่ใช้ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆที่มีต่อ Rm และ CBP ของอีเจ็คเตอร์ 2 ประเภท ได้แก่ การทำการทดลองและวิเคราะห์ทฤษฎีกับสมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งตารางที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบผลของความสัมพันธ์ในรูปแบบเชิงเส้นโค้งจากการศึกษานี้กับผลการทดลองของ Ruangtrakoon และคณะ [10] และ Chunnanond และคณะ [11] และผลจากแบบจำลองการไหลของอีเจ็คเตอร์ในหนึ่งมิติของ Keenan และคณะ [2-3] พบว่า ค่า Rm ที่ได้จากความสัมพันธ์มีค่าใกล้เคียงกับทั้งการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ขณะที่ผลของ CBP นั้นมีค่า

ต่างจากผลของการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ค่อนข้างมาก เนื่องจากการจำลอง CFD ไม่ได้พิจารณาการสูญเสียจากแรงเสียดทานที่ผนังของการไหลในอีเจ็คเตอร์ นอกจากนี้ที่สำคัญ มีปัจจัยด้านรูปร่างลักษณะของอีเจ็คเตอร์ที่ไม่ได้พิจารณาในการศึกษานี้ แต่เป็นที่ทราบกันดีว่ามีผลต่อสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ เช่น ความยาวของอีเจ็คเตอร์แต่ละช่วง มุมลู่ออกและลู่ออกของอีเจ็คเตอร์ เป็นต้น ซึ่งทำให้ได้ความสัมพันธ์ที่ไม่ครอบคลุมปัจจัยเหล่านั้น ดังนั้นเมื่อทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่มีค่าปัจจัยเหล่านั้นนอกช่วงการศึกษานี้ ผลที่ได้จึงแตกต่างกันอยู่มาก ซึ่งในการศึกษาในระดับต่อไปจำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยเหล่านี้

6. สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาการจำลองการไหลในอีเจ็คเตอร์ด้วย CFD เพื่อหาอิทธิพลปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์

ในระบบทำความเย็นแบบอีเจ็คเตอร์ ทั้งสภาวะเงื่อนไขที่ทางเข้าอีเจ็คเตอร์และอัตราส่วนรูปร่างของอีเจ็คเตอร์ พร้อมทำการวิเคราะห์ผลของปัจจัยเหล่านั้น ด้วยวิธีตอบสนองแบบโครงร่าง เพื่อหาสมการของความสัมพันธ์ ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์ และทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองและแบบจำลองการไหลของอีเจ็คเตอร์ในหนึ่งมิติ ซึ่งสามารถสรุปผลการศึกษา และข้อเสนอแนะได้ดังต่อไปนี้

1) การศึกษานี้ได้สมการความสัมพันธ์ในรูปแบบเชิงเส้นโค้งเป็นรูปแบบที่เหมาะสม ของอุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไอ (T_g) อุณหภูมิเครื่องระเหย (T_e) อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดของคอคอดหัวฉีดกับห้องผสม (AR) และอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดปากทางออกกับคอคอดของหัวฉีด (ATR) กับอัตราส่วนการเหนี่ยวนำ (Rm) และความดันทางออกวิกฤต (CBP) ของอีเจ็คเตอร์

2) สมการความสัมพันธ์ในรูปแบบเชิงเส้นโค้งที่ได้จากการศึกษา เมื่อทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองและแบบจำลองการไหลในหนึ่งมิติ ให้ค่า Rm ที่ใกล้เคียง ขณะที่ค่า CBP มีผลค่อนข้างต่ำ เนื่องจากมีหลายปัจจัยที่ไม่ได้พิจารณาในการศึกษา

3) สมการความสัมพันธ์ในรูปแบบเชิงเส้นโค้งที่ได้จากการศึกษาจะมีประโยชน์ในเรื่องของการลดเวลาในการประเมินสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์เบื้องต้นโดยเฉพาะการหาค่า Rm

4) การศึกษาในระดับต่อไปจำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยด้านรูปร่างอื่นๆ ของอีเจ็คเตอร์ เช่น ความยาวของอีเจ็คเตอร์แต่ละช่วง มุมลู่ออกและลู่ออกของอีเจ็คเตอร์ เป็นต้น เพื่อการปรับปรุงสมการความสัมพันธ์ที่ได้จาก RSM ของ CFD ให้ถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Chunnanond and S. Aphornratana, "Ejectors: application in refrigeration technology," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 8, pp. 129-155, 2004.
- [2] J. H. Keenan and E. P. Neumann, "A simple air ejector," Transactions of the ASME Journal of Applied Mechanics, vol. 64, pp. 75-81, 1942.
- [3] J. H. Keenan, E. P. Neumann and F. Lustwerk, "An investigation of ejector design by analysis and experiment," Transactions of the ASME Journal of Applied Mechanics, vol. 72, pp. 299 – 309, 1950.
- [4] J. T. Munday and D. F. Bagster, "A new theory applied to steam jet refrigeration," Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development, vol. 16(4), pp. 442-449, 1997.
- [5] S. B. Riffat and S. A. Omer, "CFD modeling and experimental investigation of an ejector refrigeration system using methanol as the working fluid," International Journal of Energy Research, vol. 25, 115-128, 2001.
- [6] K. Pianthong, W. Seehanam, M. Behnia, T. Sriveerakul and S. Aphornratana, "Investigation and improvement of ejector refrigeration system using computational fluid dynamics technique," Energy Conversion and Management, vol. 48, pp. 2556–2564, 2007.
- [7] T. Sriveerakul, S. Aphornratana and K. Chunnanond, "Performance prediction of steam ejector using computational fluid dynamics: Part 1. Validation of the CFD results," International Journal of Thermal Sciences, vol. 46, pp. 812–822, 2007.
- [8] T. Sriveerakul, S. Aphornratana and K. Chunnanond, "Performance prediction of steam ejector using computational fluid dynamics: Part 2. Flow structure of a steam ejector influenced by operating pressures

- and geometries,” *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 46, pp. 823– 833, 2007.
- [9] G. Besagni, R. Mereu and F. Inzoli, “Ejector refrigeration: A comprehensive review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 53, pp. 373-407, 2016.
- [10] N. Ruangtrakoon, S. Aphornratana, and T. Sriveerakul, “ Experimental studies of a steam jet refrigeration cycle: Effect of the primary nozzle geometries to system performance,” *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 35, pp. 676–683, 2011.
- [11] K. Chunnanond. and S. Aphornratana “An experimental investigation of a steam ejector refrigerator: the analysis of the pressure profile along the ejector,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 24, pp.311-322, 2004.

การดูดซับน้ำมันหล่อเย็นจากกระบวนการตัดกลึงโลหะโดยใช้ขานอ้อยดัดแปร เป็นตัวดูดซับ

Adsorption of Cutting Fluid from Turning Process by Using Modified Sugarcane Bagasse as Adsorbent

อัญธิกา ประนันตดา¹ วรัญญา แชมป์ปรีชา¹ และโกวิท ปิยะมงคล^{2*}

¹นักศึกษาปริญญาตรี ²รองศาสตราจารย์

ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

1518 ถนนประชากรราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

Antika Pranudta¹ Waranya Champreecha¹ Kowit Piyamongkala^{2*}

¹Undergraduate, ²Associate Professor

Department of Industrial Chemistry, Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of
Technology North Bangkok, 1518 Prachrat 1 Road, Wongsawang, Bangsue, Bangkok, 10800

*Corresponding author: Email: kowit.p@sci.kmutnb.ac.th

บทคัดย่อ

ขานอ้อยดัดแปรนำมาใช้เป็นตัวดูดซับสำหรับกำจัดน้ำมันหล่อเย็นจากกระบวนการตัดกลึงโลหะ ทำการศึกษาผล ปริมาณตัวดูดซับและความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมันหล่อเย็น โดยการทดลองแบบแบตช์ พบว่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ของขาน อ้อยดัดแปร มีค่าเท่ากับ pH 1.6 การเพิ่มปริมาณขานอ้อยดัดแปรและความเข้มข้นเริ่มต้นน้ำมันหล่อเย็น มีผลทำให้ร้อยละการดูดซับและความสามารถในการดูดซับเพิ่มสูงขึ้น ตามลำดับ ความสามารถในการดูดซับน้ำมันหล่อเย็น มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 501.7 มิลลิกรัมต่อกรัม เมื่อใช้ขานอ้อยดัดแปรปริมาณ 5.0 กรัม และความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมันหล่อเย็น 49,797 มิลลิกรัมต่อลิตร สมดุลการดูดซับสอดคล้องกับสมการแลงเมียร์มากกว่าสมการฟรุนดลิช การดูดซับน้ำเสียจริง ปริมาตร 1 ลิตร ให้ได้ร้อยละ 100 ใช้ขานอ้อยดัดแปรปริมาณ 0.24 กรัม

คำสำคัญ: การดูดซับ น้ำมันหล่อเย็น ขานอ้อยดัดแปร แลงเมียร์

ABSTRACT

The modified sugarcane bagasse was used as an adsorbent for eliminate of cutting fluid from turning process. The effects of mass of adsorbent and initial concentration of cutting fluid were thoroughly investigated in batch adsorption systems. It was found that the point of zero charge of modified sugarcane bagasse was pH 1.6. Increasing in mass of adsorbents and initial cutting fluid concentrations increased the percent adsorption and adsorption capacity, respectively. The highest adsorption capacity, 501.7 mg/ g, was obtained at 5.0 g and 49,797 mg/ L for mass of modified sugarcane bagasse and initial concentration of cutting fluid, respectively. The Langmuir adsorption

was rather fitted for describing the isotherm than Freundlich model. Batch designs of modified sugarcane bagasse for removal 100% of turning process wastewater amount 1 L was 0.24 g.

Keyword: Adsorption, Cutting Fluid, Modified Sugarcane Bagasse, Langmuir.

1. บทนำ

การตัดกลึงชิ้นรูปโลหะในงานอุตสาหกรรมมีการใช้ไบมิดเพื่อเจาะชิ้นงานให้เกิดรูและเฉือนเนื้อโลหะเพื่อให้ได้ชิ้นงานมีรูปร่างตามที่ออกแบบไว้ หากการระบายความร้อนระหว่างไบมิดและชิ้นงานทำได้ไม่ดี จะทำให้เกิดความร้อนสะสมที่ไบมิดและชิ้นงาน เป็นผลให้ไบมิดสูญเสียความแข็งแรงและสึกหรอ ชิ้นงานมีผิวไม่เรียบ ขนาดของรูที่เจาะมีการบิดเบี้ยว ในการตัดกลึงชิ้นรูปโลหะจึงต้องมีการใช้น้ำมันหล่อเย็น (Cutting fluid) เพื่อทำหน้าที่ระบายความร้อน ลดแรงเสียดทานและยังช่วยในการนำเศษชิ้นโลหะออกจากชิ้นงาน ส่งผลให้ยืดอายุการใช้งานของไบมิด ผิวชิ้นงานมีความเรียบสม่ำเสมอ ไม่สูญเสียรูปทรง [1] น้ำมันหล่อเย็นที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมมี 2 ชนิดได้แก่ น้ำมันหล่อเย็นชนิดผสมน้ำและน้ำมันหล่อเย็นชนิดไม่ผสมน้ำ โรงงานอุตสาหกรรมนิยมใช้น้ำมันหล่อเย็นชนิดผสมน้ำอย่างกว้างขวาง เนื่องจากสามารถตัดชิ้นงานได้ด้วยความเร็วรอบสูง ทำให้ได้ผลผลิตมากขึ้นนอกจากนั้นยังมีราคาถูก น้ำมันหล่อเย็นชนิดผสมน้ำมีองค์ประกอบโดยส่วนใหญ่เป็นน้ำมันแร่ ทำหน้าที่ลดการสึกหรอและลดแรงเสียดทาน กรดไขมันทำหน้าที่เป็นอิมัลซิไฟเออร์ สารป้องกันการกัดกร่อน สารต้านทานการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด-เบส สารป้องกันการเกิดฟองอากาศและสารป้องกันการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย [2]

การบำบัดน้ำมันหล่อเย็นสามารถทำได้หลากหลายกระบวนการ ได้แก่กระบวนการทางกายภาพ ทำโดยการระเหยนํ้าออกจากน้ำมันหล่อเย็น การแยกโดยใช้เยื่อแผ่น การแยกโดยการดูดซับ กระบวนการทางเคมี ทำโดยการเติมสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์เพื่อทำลายเสถียรภาพของน้ำมันหล่อเย็น การใช้สารเคมีร่วมกับความร้อนที่อุณหภูมิสูง กระบวนการทางชีวภาพ ทำโดยใช้แบคทีเรียทั้งแบบใช้ออกซิเจนและไม่ใช้ออกซิเจน [3]

แต่ละวิธีที่กล่าวมาสามารถบำบัดน้ำมันหล่อเย็นได้อย่างมีประสิทธิภาพแต่ก็มีข้อจำกัดและข้อเสียได้แก่ การใช้ความร้อนต้องทำที่อุณหภูมิสูงทำให้สิ้นเปลืองพลังงาน การใช้เยื่อแผ่นมีปัญหาการอุดตันของน้ำมันหล่อเย็นบนผิวเยื่อแผ่น ทำให้นํ้าที่ผ่านเยื่อแผ่นลดลงและต้องใช้สารเคมีล้างทำความสะอาด การทำลายเสถียรภาพของน้ำมันหล่อเย็นโดยใช้สารเคมี พบปัญหาในเรื่องจะต้องบำบัดน้ำมันหล่อเย็นที่ลอยอยู่บริเวณผิวด้านบน การใช้แบคทีเรียพบปัญหาในเรื่องระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดยาวนานมาก ในขณะทำการดูดซับเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่สามารถบำบัดน้ำมันหล่อเย็น มีข้อดีได้แก่ มีการทำงานที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ ไม่มีปัญหาเรื่องการลอยตัวของน้ำมันหล่อเย็น ไม่ต้องใช้สารเคมีล้างทำความสะอาดน้ำมันหล่อเย็นที่อยู่บนตัวดูดซับ ทำได้สะดวกและใช้เวลาสั้น [4]

ตัวดูดซับที่มีการวิจัยสำหรับนำมาใช้บำบัดน้ำมันหล่อเย็นมีหลากหลายชนิดได้แก่ ถ่านหิน [5] โคลไรต์ดัดแปร [6] ไคโตซานดัดแปร [7] ซีลี้อยดัดแปร [8] ดินเปรี้ยวสังเคราะห์ [9]

ขานอ้อย (Sugarcane bagasse) เป็นส่วนของลำต้นอ้อยที่หีบเอานํ้าอ้อยหรือนํ้าตาลออกแล้ว เป็นวัสดุที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตนํ้าตาล ขานอ้อยเปียกมีความชื้นร้อยละ 48 ประกอบด้วยขานอ้อยหรือไฟเบอร์ร้อยละ 48.5 นํ้าร้อยละ 48.0 นํ้าตาลร้อยละ 3.0 และสารประกอบอื่นๆ ร้อยละ 0.5 ขานอ้อยมีองค์ประกอบโดยส่วนใหญ่เป็นเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน ขานอ้อยเป็นวัสดุที่ไม่ละลายในนํ้า มีขนาดเล็ก มีความต้านทานต่อสารเคมีและรับแรงกระแทกได้ดี จึงมีการศึกษาเพื่อประยุกต์ใช้ประโยชน์จากขานอ้อยเป็นตัวดูดซับสีย้อมและโลหะหนัก [10, 11]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงมีความสนใจที่จะนำชานอ้อยที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำตาล มาปรับสภาพด้วยกรด ให้เป็นชานอ้อยดัดแปร ใช้เป็นตัวดูดซับน้ำมันหล่อเย็นชนิดผสมน้ำ ทำให้เพิ่มทางเลือกในการบำบัดน้ำเสียและลดปัญหาการปนเปื้อนของน้ำมันหล่อเย็นชนิดผสมน้ำในแหล่งน้ำ

1. วัสดุ-อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

1.1 การเตรียมตัวดูดซับ

ชานอ้อยจากโรงงานน้ำตาล (อำเภอตาคลี จังหวัดนครสวรรค์) นำมาตากแดดเป็นเวลา 3 วัน ได้ชานอ้อยแห้ง นำชานอ้อยแห้งมาร่อนด้วยตะแกรงหยาบ เก็บส่วนที่ผ่านตะแกรงไปอบในตู้อบ (Binder; Model FD 53) ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ได้ชานอ้อยอบแห้ง (SB) จากนั้นนำชานอ้อยอบแห้งปริมาณ 30 กรัม มาทำการดัดแปรกับกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4 , AR Grade, Ajax Finechem) ความเข้มข้น 2.0 โมลาร์ ปริมาณ 500 ลูกบาศก์เซนติเมตร กวนโดยใช้เครื่องกวน (IKA; Model: RW 16) ที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 6 ชั่วโมง กรองโดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 1 (Whatman) นำไปตากแดดให้แห้งเป็นเวลา 3 วัน ได้ชานอ้อยดัดแปร (MSB) ใช้เป็นตัวดูดซับน้ำมันหล่อเย็นชานอ้อยและชานอ้อยดัดแปร นำมาวิเคราะห์หาปริมาณรูพรุน พื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุน (BET Japan; Model: BELSORP-mini) พบว่าปริมาณรูพรุน พื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุน ของชานอ้อยมีค่าเท่ากับ 5.17×10^{-3} ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม 5.15×10^{-1} ตารางเมตรต่อกรัม และ 40.12 นาโนเมตร ตามลำดับ ในขณะที่ชานอ้อยดัดแปรมีค่าเท่ากับ 3.53×10^{-3} ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม 6.47×10^{-2} ตารางเมตรต่อกรัม และ 218.21 นาโนเมตร ตามลำดับ

1.2 การเตรียมน้ำมันหล่อเย็น

น้ำมันหล่อเย็นจากบริษัท Rifle Brand Trade Mark เกรดเชิงพาณิชย์ (ใช้งานในกระบวนการตัดกลึงโลหะทั่วไป) เป็นชนิดผสมน้ำ ก่อนการใช้งานเป็นของเหลวสีน้ำตาล มีความหนืดเล็กน้อย นำมาผสมน้ำและกวนโดย

เครื่องกวนที่ความเร็ว 1,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ตั้งทิ้งไว้ประมาณ 15 นาที เพื่อให้ฟองอากาศหายไป น้ำมันหล่อเย็นที่ได้จะอยู่ในลักษณะอิมัลชัน มีสีขาวขุ่น น้ำเสียจริงนำมาจากสาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ด้านบนเป็นน้ำมันหล่อเย็น มีสีน้ำตาลเข้ม ด้านล่างเป็นน้ำมันหล่อเย็น มีสีดำนขาว สีภายนอกของน้ำมันหล่อเย็นและน้ำเสียจริง แสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ลักษณะของน้ำมันหล่อเย็นและน้ำเสียจริง

1.3 การหาประจุที่ผิวเป็นศูนย์

ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (Point of zero charge, pH_{PZC}) ดำเนินการโดยวิธี pH-drift method [12] ทำโดยใช้น้ำปราศจากไอออน เตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl , AR Grade, BDH) ความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ นำสารละลายโซเดียมคลอไรด์ปริมาณ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร ปรับความเป็นกรด-เบสให้อยู่ในช่วงระหว่าง pH 3.0-12.0 ด้วยสารละลายกรดไนตริก (HNO_3 , AR Grade, J.T.Baker) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH , AR Grade, BDH) ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ วัดความเป็นกรด-เบส โดยใช้ pH มิเตอร์ (Eutech; Model pH 510) นำชานอ้อยและชานอ้อยดัดแปรปริมาณ 0.2 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ ปิดปากขวดรูปชมพู่ในสนิทนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า (UMAC Scientific; Model UM-S60) ที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที ใช้เวลา 48 ชั่วโมง กรองตัวดูดซับออก วัดความเป็นกรด-เบสภายหลังจากการเขย่าอีกครั้ง จากนั้นนำมาเขียนความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรด-เบสเริ่มต้น (pH)

และความเป็นกรด-เบสสุดท้าย (pH_f) โดยประจุที่ผิวเป็นศูนย์ของตัวดูดซับหาได้จากเส้นความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นและความเป็นกรด-เบสสุดท้าย ตัดกับเส้นทะแยงมุม

1.4 ผลปริมาณตัวดูดซับ

นำขานอ้อยและขานอ้อยดัดแปรปริมาณ 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5 และ 5.0 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร เติมน้ำมันหล่อเย็นความเข้มข้นเริ่มต้น 49,797 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร ลงในขวดรูปชมพู่ จากนั้นเขย่า ที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที โดยใช้เวลา 300 นาที วัดความเข้มข้นของน้ำมันหล่อเย็นที่เหลือ ด้วย Spectrophotometer (UV-VIS Spectrophotometer, Thermo electron, Model: Spectronic Genesys 20) ที่ความยาวคลื่น 395 นาโนเมตร นำผลจากการดูดกลืนแสงมาเทียบกับกราฟมาตรฐาน อ่านเป็นความเข้มข้นของน้ำมันหล่อเย็นที่เหลือภายหลังการดูดซับ คำนวณหาร้อยละการดูดซับตามสมการที่ (1)

$$\text{Percent adsorption} = \left(\frac{C_0 - C_e}{C_0} \right) \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ C_0 หมายถึงความเข้มข้นเริ่มต้นน้ำมันหล่อเย็น (มิลลิกรัมต่อลิตร) และ C_e หมายถึงความเข้มข้นน้ำมันหล่อเย็นที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

1.5 ผลความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมันหล่อเย็น

นำขานอ้อยดัดแปรปริมาณ 5.0 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ เติมน้ำมันหล่อเย็นความเข้มข้นเริ่มต้น 9,996, 18,500, 41,408 และ 49,797 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร ลงในขวดรูปชมพู่ นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที เก็บตัวอย่างน้ำมันหล่อเย็นที่เหลืออยู่ตามช่วงเวลาที่กำหนด นำมาวัดความเข้มข้นด้วยเครื่อง Spectronic 21 ที่ความยาวคลื่น 395 นาโนเมตร คำนวณความสามารถในการดูดซับน้ำมันหล่อเย็น ตามสมการที่ (2)

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t) \times V}{W} \quad (2)$$

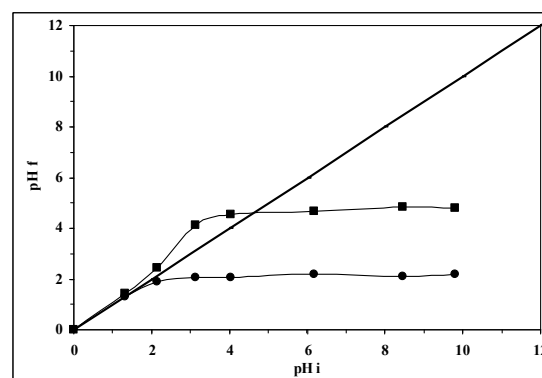
เมื่อ q_t หมายถึงความสามารถในการดูดซับน้ำมันหล่อเย็นที่เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม) C_t หมายถึงความเข้มข้นน้ำมันหล่อเย็นที่เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร) V หมายถึงปริมาตรน้ำมันหล่อเย็น (ลิตร) และ W หมายถึงปริมาณขานอ้อยดัดแปร (กรัม)

2. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

2.1 ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ของตัวดูดซับ

ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ หมายถึงค่าความเป็นกรด-เบส ที่ทำให้ประจุที่ผิวของตัวดูดซับมีค่าเป็นกลาง หรือประจรวมที่ผิวมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อความเป็นกรด-เบส มีค่าน้อยกว่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ ประจุที่ผิวของตัวดูดซับจะมีค่าเป็นบวก ในทางตรงกันข้าม เมื่อความเป็นกรด-เบส มีค่ามากกว่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ แสดงว่าประจุที่ผิวของตัวดูดซับมีค่าเป็นลบ [13]

ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ของตัวดูดซับแสดงดังรูปที่ 2 พบว่าขานอ้อยและขานอ้อยดัดแปรมีประจุที่ผิวเป็นศูนย์เท่ากับ pH 4.6 และ 1.6 ตามลำดับ ขานอ้อยดัดแปรมีประจุที่ผิวเป็นศูนย์ที่ความเป็นกรด-เบส ต่ำกว่าขานอ้อยอธิบายได้ว่าขานอ้อยดัดแปรมีความเป็นประจุบวกมากกว่าขานอ้อย เนื่องจากมีไฮโดรเจนไอออนของกรดฟอสฟอริกมาเกาะอยู่บริเวณผิวขานอ้อยดัดแปร

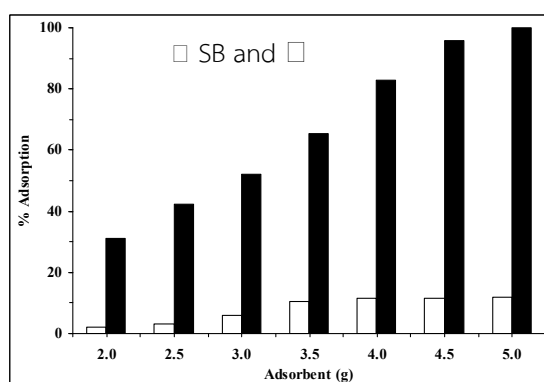


รูปที่ 2 ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ของ: □ SB และ ○ MSB

2.2 ผลปริมาณตัวดูดซับ

ร้อยละการดูดซับน้ำมันหล่อเย็นความเข้มข้นเริ่มต้น 49,797 มิลลิกรัมต่อลิตร ของขานอ้อยและขานอ้อยดัดแปร ปริมาณ 2.0-5.0 กรัม แสดงในรูปที่ 3 พบว่าที่

สภาวะสมดุล ขานอ้อยและขานอ้อยดัดแปรมีการดูดซับน้ำมันหล่อเย็นเท่ากับร้อยละ 2.0-11.9 และ 31.2-98.1 ตามลำดับ การเพิ่มปริมาณตัวดูดซับมีผลทำให้ร้อยละการดูดซับเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากตัวดูดซับมีพื้นที่ผิวในการดูดซับมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการใช้เถ้าแกลบดูดซับสีย้อม Indigo Carmine [14] ขานอ้อยดัดแปรปริมาณ 5.0 กรัม มีร้อยละการดูดซับน้ำมันหล่อเย็นมากที่สุด สูงถึงร้อยละ 98.1 ดังนั้นจึงเลือกใช้ขานอ้อยดัดแปรปริมาณดังกล่าว ทำการศึกษาผลความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมันหล่อเย็น



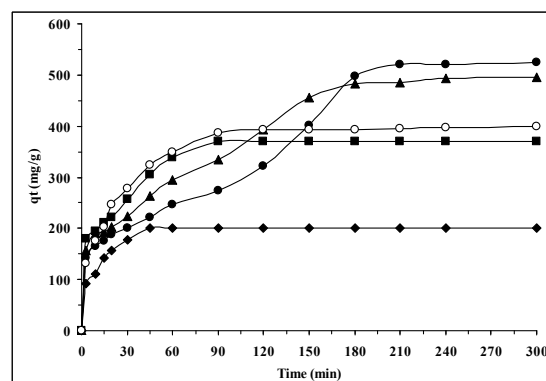
รูปที่ 3 ร้อยละการดูดซับน้ำมันหล่อเย็นของตัวดูดซับ

ขานอ้อยเป็นชีวมวลจากธรรมชาติ มีหมู่ฟังก์ชันหลักได้แก่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl, OH⁻) [10] ขานอ้อยดูดซับน้ำมันหล่อเย็นได้ในปริมาณเล็กน้อย เนื่องจากไฮโดรเจนไอออนที่ผิวของขานอ้อยมีปริมาณน้อย ดูดซับน้ำมันหล่อเย็นที่มีประจุผิวเป็นลบ [7] ได้ในปริมาณน้อย ในขณะที่ขานอ้อยดัดแปรมีไฮโดรเจนไอออนที่ผิวปริมาณเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการทำปฏิกิริยากับกรดฟอสฟอริก จึงสามารถดูดซับน้ำมันหล่อเย็นที่มีประจุผิวเป็นลบได้ในปริมาณมาก ปฏิกิริยาการดูดซับน้ำมันหล่อเย็น (CF⁻) ของขานอ้อย (SB-OH) และขานอ้อยดัดแปร (SB-OH₂⁺) เขียนได้ดังสมการที่ (3-5)



2.3 ผลความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมันหล่อเย็น

ผลการทดลองนำขานอ้อยดัดแปรปริมาณ 5.0 กรัม ดูดซับน้ำมันหล่อเย็นความเข้มข้นเริ่มต้น 9,996, 18,500, 41,408 และ 49,797 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงดังรูปที่ 4 พบว่าในช่วง 30 นาทีแรก ขานอ้อยดัดแปรมีความสามารถในการดูดซับน้ำมันหล่อเย็นเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นความสามารถในการดูดซับเกิดได้ช้าลง โดยมีสมดุลการดูดซับน้ำมันหล่อเย็นเกิดขึ้นที่เวลา 45, 90, 180 และ 210 นาที ตามลำดับ มีความสามารถในการดูดซับน้ำมันหล่อเย็นเท่ากับ 177.8, 306.1, 455.8 และ 501.7 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ การเพิ่มความเข้มข้นของน้ำมันหล่อเย็นมีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับน้ำมันหล่อเย็นเพิ่มขึ้น เนื่องจาก เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของน้ำมันหล่อเย็นมีผลทำให้เกิดความแตกต่างความเข้มข้นของน้ำมันหล่อเย็นที่ผิวของตัวดูดซับกับอิมัลชัน (น้ำมันหล่อเย็นในน้ำ, Oil in water) เพิ่มสูงขึ้น เกิดแรงผลักดัน (Driving force) ที่มากขึ้น เป็นผลทำให้ความสามารถในการดูดซับน้ำมันหล่อเย็นเพิ่มสูงขึ้น ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับวิทยุรย์ กิตติถาวร และคณะ ศึกษาการใช้ดินเปรี้ยวสังเคราะห์ดูดซับน้ำมันหล่อเย็น [9]



รูปที่ 4 ความสามารถในการดูดซับน้ำมันหล่อเย็นที่ความเข้มข้นเริ่มต้น: 9,996, □ 18,500, □ 41,408, □ 49,797 mg/L และ □ น้ำเสียจริง (27,787 mg/L)

ผลการใช้ขานอ้อยดัดแปรปริมาณ 5.0 กรัม ดูดซับน้ำเสียจริงจากกระบวนการตัดกลึงโลหะ แสดงในรูปที่ 4 พบว่าในช่วง 30 นาทีแรก ขานอ้อยดัดแปรมีความสามารถในการดูดซับน้ำเสียจริงเท่ากับ 278.4

มิลลิกรัมต่อกรัม หลังจากนั้นความสามารถในการดูดซับ
เกิดได้ช้าลง สมดุลการดูดซับเกิดขึ้นที่เวลา 90 นาที มี
ความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 392.4 มิลลิกรัมต่อกรัม

2.4 สมดุลการดูดซับ

ไอโซเทอมการดูดซับใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง
ความเข้มข้นของน้ำมันหล่อเย็นที่เหลืออยู่ที่สภาวะสมดุล
กับความสามารถในการดูดซับน้ำมันหล่อเย็นของชานอ้อย
ตัดแปร ที่อุณหภูมิคงที่ ไอโซเทอมการดูดซับและสมการ
เส้นตรงการดูดซับแบบแลงเมียร์ เขียนได้ดังสมการที่ (6)
และ (7) ตามลำดับ [15]

$$q_{e,cal} = \frac{a_{m,L} C_e}{1 + K_L C_e} \quad (6)$$

$$\frac{C_e}{q_{e,exp}} = \frac{K_L}{a_{m,L}} C_e + \frac{1}{a_{m,L}} \quad (7)$$

เมื่อ $q_{e,cal}$ หมายถึงความสามารถในการดูดซับที่
สภาวะสมดุลที่ได้จากการคำนวณ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 $q_{e,exp}$ หมายถึงความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล
ที่ได้จากการทดลอง (มิลลิกรัมต่อกรัม) $a_{m,L}$ หมายถึง
ค่าคงที่แบบแลงเมียร์ (ลิตรต่อกรัม) และ K_L หมายถึง
ค่าคงที่การดูดซับแบบแลงเมียร์ (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

นำสมการที่ (7) มาเขียนกราฟเส้นตรง แสดงในรูปที่
5 (ก) พบว่าชานอ้อยตัดแปรดูดซับน้ำมันหล่อเย็น มีค่า
สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.9968 คำนวนค่า
 $a_{m,L}$ และ K_L ได้เท่ากับ 0.22 ลิตรต่อกรัม และ 0.0004
ลิตรต่อมิลลิกรัม ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 1

กรณีใช้สมการการดูดซับแบบแลงเมียร์ ควร
คำนวณหาปัจจัยของการแยก หรือค่าตัวแปรที่สภาวะ
สมดุล (Separation factor or equilibrium
parameter, R_L) ซึ่งจะเป็นตัวบอกรูปร่างของไอโซเทอม
ว่าสอดคล้องหรือไม่สอดคล้องกับการดูดซับ ปัจจัยของ
การแยกคำนวณได้จากสมการ (8) [16]

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L C_0} \quad (8)$$

ผลที่ได้จากการคำนวณค่าปัจจัยของการแยกสามารถ
อธิบายได้ดังนี้ เมื่อ $R_L > 1$ หมายถึง Unfavorable หาก
 $R_L = 1$ หมายถึง Linear ในขณะที่ R_L มีค่าอยู่ระหว่าง 0-
1 หมายถึง Favorable และ $R_L = 0$ หมายถึง
Irreversible

ไอโซเทอมการดูดซับและสมการเส้นตรงการดูดซับ
แบบฟรุนดิช เขียนได้ดังสมการที่ (9) และ (10) ตามลำดับ
[17]

$$q_{e,cal} = K_F C_e^{1/n} \quad (9)$$

$$\log q_{e,exp} = \frac{1}{n} \log C_e + \log K_F \quad (10)$$

เมื่อ K_F หมายถึงค่าคงที่ของฟรุนดิช แสดงถึง
ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)(ลิตรต่อ
มิลลิกรัม) $^{1/n}$ และ n หมายถึงค่าคงที่ของฟรุนดิช ที่อธิบาย
ถึงความเข้มข้นของการดูดซับ (ไม่มีหน่วย)

สมการที่ (10) เมื่อนำมาเขียนกราฟเส้นตรงแสดงใน
รูปที่ 5 (ข) พบว่าชานอ้อยตัดแปรดูดซับน้ำมันหล่อเย็น มี
ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.9636 คำนวนค่าคงที่
 K_F และ $1/n$ ได้เท่ากับ 21.43 (มิลลิกรัมต่อกรัม)(ลิตรต่อ
มิลลิกรัม) $^{1/n}$ และ 0.31 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 1

ความถูกต้องของไอโซเทอมพิจารณาจากค่า The
sum of the squares of the errors (SSE) และ Chi-
square (χ^2) เขียนได้ดังสมการที่ (11) และ (12)
ตามลำดับ [18]

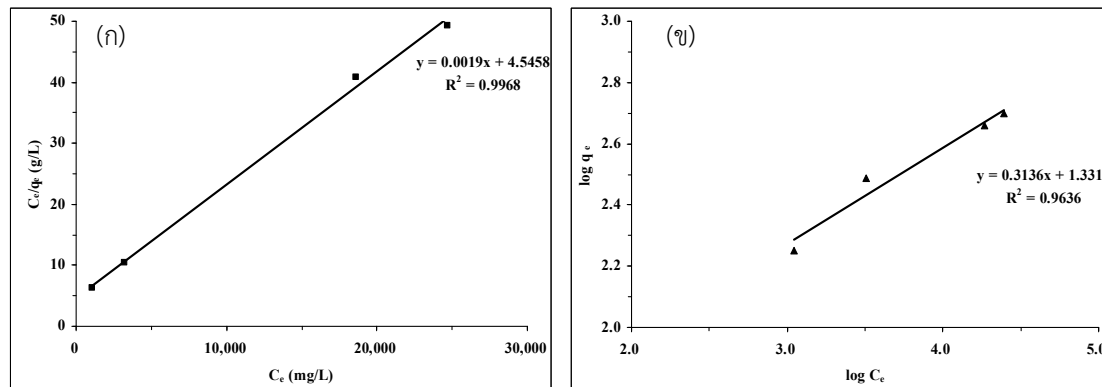
$$SSE = \sum (q_{e,cal} - q_{e,exp})^2 \quad (11)$$

$$\chi^2 = \sum \frac{(q_{e,exp} - q_{e,cal})^2}{q_{e,cal}} \quad (12)$$

คำนวณค่า SSE และ Chi-square ของสมการแลง
เมียร์มีค่าเท่ากับ 748.38 และ 2.03 ตามลำดับ ในขณะที่
สมการฟรุนดิชมีค่าเท่ากับ 1835.24 และ 6.26 ตามลำดับ

ดังแสดงในตารางที่ 1 ในขณะเดียวกันความสามารถในการดูดซับที่คำนวณได้จากสมการแลงเมียร์มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าคำนวณจากสมการฟรุนดิชแสดงในรูปที่ 6 ดังนั้นสามารถอธิบายได้ว่า การดูดซับเกิดขึ้นจากแรงดึงดูดทางเคมี โมเลกุลตัวถูกดูดซับดูดติด

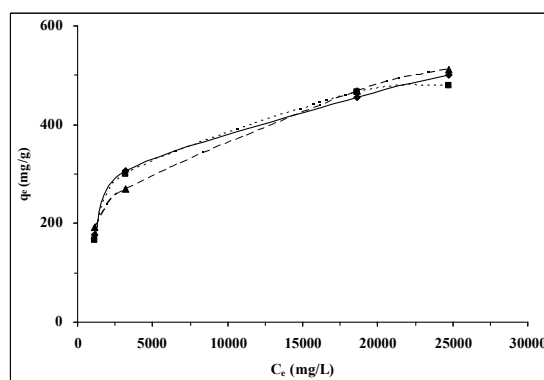
ผิวตัวดูดซับเกิดขึ้นแบบชั้นเดียว [19] ผลการคำนวณค่าปัจจัยของการแยก เมื่อใช้สมการแลงเมียร์ พบว่า มีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 แสดงให้เห็นว่า ขานอ้อยดัดแปรสามารถเกิดการดูดซับกับน้ำมันหล่อเย็นได้จริง



รูปที่ 5 ไอโซเทอมการดูดซับน้ำมันหล่อเย็นของขานอ้อยดัดแปร: (ก) แลงเมียร์ และ (ข) ฟรุนดิช

ตารางที่ 1 ค่าคงที่ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์และฟรุนดิช

Concentration (mg/L)	$q_{e, \text{exp}}$	Langmuir isotherm						Freundlich isotherm				
		$a_{m, L}$	K_L	SSE	χ^2	R_L	$q_{e, \text{cal}}$	$1/n$	K_F	SSE	χ^2	$q_{e, \text{cal}}$
9,996	177.8	0.22	0.0004	748.38	2.03	0.19	166.3	0.31	21.43	1835.24	6.26	193.0
18,500	306.1					0.12	300.9					269.2
41,408	455.8					0.06	466.4					467.9
49,797	501.7					0.05	479.9					511.4



รูปที่ 6 ไอโซเทอมการดูดซับน้ำมันหล่อเย็นของขานอ้อยดัดแปร: □ ผลการทดลอง □ สมการแลงเมียร์ และ □ สมการฟรุนดิช

ข้อมูลจากไอโซเทอมการดูดซับนำมาใช้งานอีกครั้ง สำหรับการออกแบบกระบวนการดูดซับแบบแบตช์ โดย

น้ำเสียจริงที่ต้องการกำจัดใช้สัญลักษณ์ V และความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียจริงที่ต้องการกำจัดมีค่าจาก C_0 ถึง C_1 ให้ M เป็นปริมาณตัวดูดซับ ความสามารถในการดูดซับน้ำเสียจริงเพิ่มสูงขึ้นจาก q_0 ถึง q_1 กระบวนการดูดซับในช่วงเริ่มต้นใช้ตัวดูดซับใหม่ เป็นผลให้ $q_0 = 0$ ในขณะที่กระบวนการดูดซับกำลังดำเนินการอยู่ ตัวถูกดูดซับที่อยู่ในอิมัลชันเคลื่อนที่มาเกาะอยู่บนผิวหน้าตัวดูดซับ สมดุลมวลของกระบวนการดูดซับนำเสนอโดย Vadivelan และ Vasanth Kumar [20] เขียนได้ดังสมการที่ (13)

$$V(C_0 - C_1) = M(q_0 - q_1) = Mq_1 \quad (13)$$

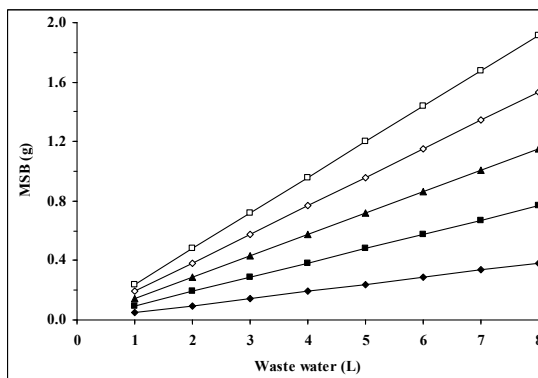
เมื่อกระบวนการดูดซับอยู่ในสภาวะสมดุล เขียนได้ดังสมการที่ (14)

$$C_1 \rightarrow C_e \text{ and } q_1 \rightarrow q_e \quad (14)$$

การดูดซับน้ำเสียจริงสำหรับขานอ้อยตัดแปร เมื่อนำไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์มาใช้อธิบาย ดังนั้นสมการที่ (13) จัดรูปใหม่และแทน q_1 ด้วยสมการที่ (6) เขียนใหม่ได้เป็นสมการที่ (15)

$$\frac{M}{V} = \frac{(C_0 - C_e)}{q_{e,cal}} = \frac{(C_0 - C_e)}{\frac{0.22C_e}{1 + 0.0004C_e}} \quad (15)$$

สมการที่ (15) นำมาใช้คำนวณหาปริมาณตัวดูดซับที่ต้องใช้สำหรับการกำจัดน้ำเสียจริง ดังแสดงในรูปที่ 7 พบว่าเมื่อต้องการกำจัดน้ำเสียจริงร้อยละ 100 ปริมาตร 1-8 ลิตร ต้องใช้ขานอ้อยตัดแปรปริมาณ 0.24-1.92 กรัม ตามลำดับ ซึ่งเป็นปริมาณที่น้อยมากสำหรับการกำจัดน้ำมันเสียจริง



รูปที่ 7 ปริมาณน้ำเสียจริงกับปริมาณขานอ้อยตัดแปรที่ต้องการกำจัดร้อยละ: □ 20, ◇ 40, △ 60, ○ 80 และ □ 100

การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับและร้อยละการดูดซับน้ำมันหล่อเย็นโดยใช้วัสดุหลากหลายชนิดดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การดูดซับน้ำมันหล่อเย็นจากตัวดูดซับหลากหลายชนิด

ตัวดูดซับ	q_e (mg/g)	% Adsorption	เอกสารอ้างอิง
ถ่านหิน		96.9	[5]
โคโลไมร์ตัดแปร	1.2		[6]
โคโตซานตัดแปร	2500		[7]
ซีล้อยตัดแปร		99	[8]
ดินเปรี้ยวสังเคราะห์	84.4		[9]
ขานอ้อยตัดแปร	501.7		งานวิจัยนี้

3. สรุปผลการทดลอง

ขานอ้อยตัดแปรปริมาณ 5.0 กรัม ดูดซับน้ำมันหล่อเย็นและน้ำเสียจริงจากกระบวนการตัดกลึงโลหะ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 49,797 และ 27,787 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่ามีความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 501.7 และ 392.4 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ สมดุลการดูดซับสอดคล้องกับสมการแบบแลงเมียร์ การดูดซับเกิดจากแรงทางเคมี บนผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว การดูดซับน้ำเสียจริงปริมาตร 1-8 ลิตร ให้ได้ร้อยละ 100 ใช้ขานอ้อยตัดแปรปริมาณเล็กน้อยเพียง 0.24-1.92 กรัม

4. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัย

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Z. Pawlak, B.E. Rauckyte, T. Rauckyte, G.P. Shpenkov and A. Kopkowski, "The tribochemical and micellar aspects of cutting fluid," Tribol. Int., vol. 38(1), pp. 1-4, January. 2005.
- [2] J.A. Anderson, B.R. Kim, S.A. Mueller and T.V. Lofton, "Composition and analysis of mineral oils and other organic compounds in metalworking and hydraulic fluids," Crit. Rev. Env. Sci. Tec., vol. 33(1), pp. 73-109, June. 2003.

- [3] C. Cheng, D. Phipps and R.M. Alkhaddar, "Treatment of spent metalworking fluids," *Water Res.*, vol. 39(17), pp. 4051–4063, October. 2005.
- [4] P. Daengbutdee, K. Kaew-in, R. Suttanan and K. Piyamongkala, "Adsorption of methylene blue dye by rice-husk in fixed-bed column," *The Journal of KMUTNB*, vol. 24 (2), pp. 399-408, May-August. 2014. (In Thai)
- [5] T. Viraraghavan and G. N. Mathavan, "Treatment of oil-in-water emulsions using peat," *Oil. Chem. Pollut.*, vol. 4(4), pp. 261-280, December. 1988.
- [6] C. Solisio, A. Lodi, A. Converti and M.D. Borghi, "Removal of exhausted oils by adsorption on mixed Ca and Mg oxides," *Water Res.*, vol. 36(4), pp. 899-904, February. 2002.
- [7] K. Piyamongkala, S. Pongstabodee and L. Mekasut, "Effluent cutting fluid removal on to chitosan and modified chitosan," *Macromol. Res.*, vol. 16 (6), pp. 492-502, August. 2008.
- [8] Á. Cambiella, E. Ortea, G. Ríos, J.M. Benito, C. Pazos and J. Coca, "Treatment of oil-in-water emulsion: Performance of a sawdust bed filter," *J. Hazard. Mater.*, vol. 131(1-3), pp. 195-199, April. 2006.
- [9] V. Kittithaworn, S. Aoonpoontarik and K. Piyamongkala, "Adsorption of cutting oil by synthetic acid soil," *The Journal of KMUTNB*, vol. 20 (2), pp. 266-277, May-August. 2010. (In Thai)
- [10] N.K. Amin, "Removal of reactive dye from aqueous solution by adsorption onto activated carbons prepared from sugarcane bagasse pith," *Desalination*, vol. 223(1-3), pp. 152-161, March. 2008.
- [11] Y. Jiang, H. Pang and B. Liao, "Removal of copper (II) ions from aqueous solution by modified bagasse," *J. Hazard. Mater.*, vol. 164(1), pp. 1-9, May. 2009.
- [12] J. Rivera-Utrill, I. Bautista-Toledo, M.A. Ferro-García and C. Moreno-Castilla, "Activated carbon surface modifications by adsorption of bacteria and their effect on aqueous lead adsorption," *J. Chem. Technol. Biot.*, vol. 76(12), pp. 1209-1215, December. 2001.
- [13] M.V. Lopez-Ramon, F. Stoeckli, C. Moreno-Castilla and F. Carrasco-Marin, "On the characterization of acidic and basic surface sites on carbons by various techniques," *Carbon*, vol. 37(8), pp. 1215-1221, January. 1999.
- [14] U.R. Lakshmi, V.C. Srivastava, I.D. Mall and D.H. Lataye, "Rice husk ash as an effective adsorbent: evaluation of adsorptive characteristics for indigo carmine dye," *J. Environ. Manage.*, vol. 90(2), pp. 710-720, February. 2009.
- [15] I. Langmuir, "Chemical reactions at low pressures," *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 37(5), pp. 1139-1167, May. 1915.
- [16] A. Mittal, L. Kurup and J. Mittal, "Freundlich and Langmuir adsorption isotherms and kinetics for the removal of tartrazine from aqueous solutions using hen feathers," *J. Hazard. Mater.*, vol. 146(1-2), pp. 243-248, July. 2007.
- [17] L.D. Benefield, J.F. Judkins and B.L. Weand, *Process Chemistry for Water and*

- Wastewater Treatment*. New Jersey, Prentice-Hall, pp. 202-209, 1982.
- [18] M.C. Ncibi, “Applicability of some statistical tools to predict optimum adsorption isotherm after linear and non-linear regression analysis,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 153(1-2), pp. 207-212, May. 2008.
- [19] B. Crittenden and W.J. Thomas, *Adsorption Technology & Design*. Oxford, Butterworth-Heinemann, pp. 38-39, 1998.
- [20] V. Vadivelan and K. Vasanth Kumar, “Equilibrium, kinetics, mechanism, and process design for the sorption of methylene blue onto rice husk,” *J. Colloid. Interf. Sci.*, vol. 286(1), pp. 90-100, June. 2005.

การวิเคราะห์ทางสถิตศาสตร์ของโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงห่วงยางสำหรับเก็บ ของเหลวภายใต้แรงดันน้ำสถิตสูงมาก

Static Analysis of Fluid-Filled Toroidal Shell under High Hydrostatic Pressure

วีรพันธุ์ เจียมมีปรีชา^{1*} กมล ตรีผอง² จิระยุทธ สืบสุข³

¹อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

²อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

วิทยาเขตวังไกลกังวล อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ 77110

³ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

Weeraphan Jiammeepreecha^{1*} Kamon Treepong² Jirayut Suebsuk³

¹Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture,

Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima, 30000

²Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of

Technology Rattanakosin, Wang Klai Kang Won Campus, Prachaup Kiri Khan, 77110

³Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture,

Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima, 30000

*Corresponding author: Email: weeraphan.ji@rmuti.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์ทางสถิตศาสตร์ของโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงห่วงยางสำหรับเก็บของเหลวในทะเลลึกภายใต้เงื่อนไขการจำกัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรในงานวิศวกรรมนอกชายฝั่งสำหรับการจัดเก็บปิโตรเลียมเหลว การคำนวณรูปทรงเรขาคณิตของโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงห่วงยางสำหรับเก็บของเหลวจะอาศัยหลักการของเรขาคณิตเชิงอนุพันธ์ ฟังก์ชันพลังงานของโครงสร้างเปลือกบางและของเหลวที่บรรจุแสดงในรูปแบบที่เหมาะสมตามหลักการของงานเสมือนในทอมของค่าการเสียรูป ผลตอบสนองทางสถิตศาสตร์ของโครงสร้างเปลือกบางและค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันภายในภายใต้การแปรเปลี่ยนค่าความความลึกของระดับน้ำทะเล ความหนาของโครงสร้างและความยาวรัศมีของรูปหน้าตัดรูปทรงห่วงยางจะสามารถคำนวณได้โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าเงื่อนไขการจำกัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรจะทำให้เกิดการปรับเปลี่ยนความดันภายในเพื่อให้โครงสร้างเปลือกบางรูปทรงห่วงยางอยู่ในสภาวะสมดุล ส่งผลทำให้โครงสร้างดังกล่าวสามารถรับแรงกระทำจากภายนอกได้สูง

คำสำคัญ: โครงสร้างเปลือกบางรูปทรงห่วงยางสำหรับเก็บของเหลว เงื่อนไขการจำกัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตร เรขาคณิตเชิงอนุพันธ์ ฟังก์ชันพลังงาน วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ABSTRACT

This paper presents a static analysis of fluid-filled toroidal shell serviced under deep sea water with constraint volume conditions in offshore engineering deployments for LNG storage containers. The geometry of fluid-filled toroidal shell was computed by differential geometry. Energy functional of shell and internal fluid are expressed in the appropriate forms based on the principle of virtual work in terms of displacements. The static response of the shell and change of pressure with various sea water depths, thicknesses, and toroid cross-section radii can be determined using finite element method. Numerical results show that the change of internal pressure based on the constraint volume condition is required in order to maintain the fluid-filled toroidal shell in equilibrium position. Then the shell is very effective in resisting high external loading.

Keyword: Fluid-filled toroidal shell, constraint volume conditions, differential geometry, energy functional, finite element method.

1. บทนำ

โครงสร้างเปลือกบางรูปทรงห่วงยาง (Toroidal shell) เป็นโครงสร้างที่นิยมใช้กันในวิศวกรรมหลากหลายแขนงได้แก่ วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมเครื่องกลและวิศวกรรมนอกชายฝั่งทะเล เป็นต้น [1]–[2] การวิเคราะห์โครงสร้างเปลือกบางรูปทรงห่วงยางนั้นได้มีการเสนอใช้ทฤษฎีเชลล์ (Shell theory) จากงานวิจัยของ Clark [3] เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าการเสียรูปของโครงสร้าง อย่างไรก็ตามถ้าความหนาของโครงสร้างมีค่าน้อยมาก การใช้ทฤษฎีเมมเบรน (Membrane theory) [4] ในการวิเคราะห์โดยไม่พิจารณาผลของการดัดให้คำตอบที่มีความถูกต้องมากกว่าการใช้ทฤษฎีเชลล์ในการวิเคราะห์ นอกจากนี้โครงสร้างเปลือกบางรูปทรงห่วงยางยังนิยมใช้บรรจุของเหลวภายในซึ่ง Zingoni [5] ได้ทำการรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงห่วงยางสำหรับใช้บรรจุของเหลวภายในโดยที่การวิเคราะห์โครงสร้างประเภทนี้จะต้องคำนึงถึงผลของแรงดันและน้ำหนักของของเหลวที่บรรจุด้วย สำหรับการประยุกต์โครงสร้างเปลือกบางรูปทรงห่วงยางกับงานทางด้านวิศวกรรมนอกชายฝั่งถูกนำเสนอโดย Willson และคณะ [6] โดยใช้ทฤษฎีเชลล์ในการวิเคราะห์ปัญหา และกำหนด

เงื่อนไขของฐานรองรับที่บริเวณรัศมีด้านในและด้านนอกของโครงสร้างเป็นแบบยึดหมุนเคลื่อนที่ตลอดความยาวรอบแกนหมุน และใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการคำนวณหาค่าการเสียรูป

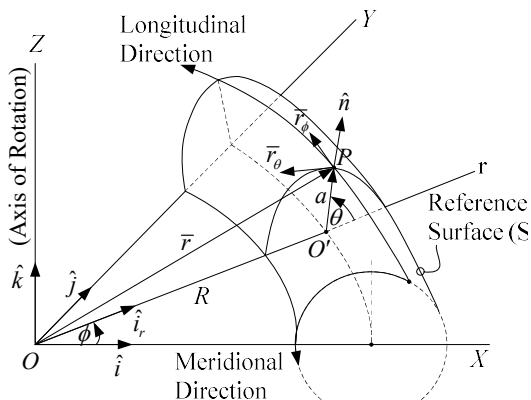
วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาผลตอบสนองทางสถิติศาสตร์ของโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงห่วงยางสำหรับบรรจุของเหลวติดตั้งในทะเลลึกโดยใช้ทฤษฎีเมมเบรน ซึ่งปัญหาลักษณะดังกล่าวนี้ไม่มีการศึกษามาก่อน โครงสร้างดังกล่าวมีข้อดีซึ่งเหมาะนำไปใช้งานคือมีน้ำหนักเบาและสามารถต้านทานแรงดันได้ดีทั้งจากแรงดันภายในและภายนอก ซึ่งมีความเหมาะสมในการใช้กักเก็บของเหลวหรือก๊าซธรรมชาติที่มีแรงดันขนาดใหญ่ภายใต้ทะเลลึก นอกจากนี้งานวิจัยยังพิจารณาเงื่อนไขการจำกัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของโครงสร้างเปลือกบางและของเหลวที่บรรจุภายในภายใต้การรับแรงดันน้ำสถิต [7]–[8] โดยมีสมมติฐานว่ารูปทรงเรขาคณิตของโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงห่วงยางสำหรับบรรจุของเหลวมีหน้าตัดเป็นรูปวงกลมและสามารถคำนวณได้จากหลักการของเรขาคณิตเชิงอนุพันธ์ (Differential geometry) การวิเคราะห์ปัญหาสามารถเขียนได้ในรูปแบบการแปรผัน (Variational form) โดยใช้ทฤษฎีของเชลล์ [9] การเสีย

รูปแบบสถิติศาสตร์ของโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงห้ว
ยงสามารถคำนวณได้โดยใช้หลักการของงานเสมือนและ
วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยการจำลองโครงสร้างเปลือกบาง
รูปทรงห้วยงด้วยชิ้นส่วนของคานแบบ 1 มิติ จากนั้น
คำนวณหาค่าการเสียรูปและการเปลี่ยนแปลงแรงดัน
ภายในของโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงห้วยงสำหรับ
บรรจุของเหลวเมื่อรับแรงดันน้ำสถิตสูงมากได้ทะเล็ก

2. ทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์

2.1 รูปทรงเรขาคณิตของโครงสร้างเปลือกบาง

โครงสร้างเปลือกบางที่นำมาพิจารณาแบ่งออกเป็น 3
สภาวะคือที่สภาวะเริ่มต้นเป็นสภาวะที่โครงสร้างไม่ได้
บรรจุของเหลวและปราศจากค่าความเครียด (Initial
unstrained state, IUS) หลังจากนั้นเมื่อโครงสร้างถูก
บรรจุของเหลวและเกิดแรงดันภายในขึ้นเนื่องจาก
ของเหลวซึ่งมีค่าคงที่ เรียกสภาวะดังกล่าวว่าสภาวะอ้างอิง
(Reference state, ES1) และสามารถคำนวณหารูปทรง
เรขาคณิตของโครงสร้างได้ ดังแสดงในรูปที่ 1 สำหรับ
สภาวะสุดท้ายคือสภาวะการเสียรูป (Deformed state,
ES2) ของโครงสร้างเปลือกบางที่บรรจุของเหลวภายใต้
แรงกระทำจากภายนอก ดังนั้นถ้ากำหนดให้ (X, Y, Z)
เป็นระบบพิกัดฉากและ $(\hat{i}, \hat{j}, \hat{k})$ เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วย
ที่มีทิศทางตามแนวแกนในระบบพิกัดฉากดังแสดงในรูปที่
1 ซึ่งสามารถนิยามได้จาก



รูปที่ 1 โครงสร้างเปลือกบางรูปทรงห้วยง

$$X(\theta, \phi) = (R + a \cos \theta) \cos \phi \quad (1)$$

$$Y(\theta, \phi) = (R + a \cos \theta) \sin \phi \quad (2)$$

$$Z(\theta, \phi) = a \sin \theta \quad (3)$$

R = ความยาวรัศมีจากแกนหมุนถึงจุดศูนย์กลางของรูป
หน้าตัดทรงห้วยง

a = ความยาวรัศมีของรูปหน้าตัดทรงห้วยง

(θ, ϕ) = ค่าพารามิเตอร์ของพื้นผิวซึ่งวัดตามแนวเส้น
พิกัดเมอร์ริเดียนและเส้นพิกัดลองจิจูด ตามลำดับ

สำหรับกรณีที่พื้นผิวสมมาตรตามแนวแกนจะเกิด
การเปลี่ยนแปลงเฉพาะเส้นเมอร์ริเดียนเท่านั้น ถ้า
กำหนดให้ $\bar{r} = \bar{r}(\phi, \theta)$ คือเวกเตอร์ระบุตำแหน่ง
(Position vector) มีค่าดังสมการ

$$\bar{r}(\theta, \phi) = X(\theta, \phi)\hat{i} + Y(\theta, \phi)\hat{j} + Z(\theta, \phi)\hat{k} \quad (4)$$

ซึ่งเป็นเวกเตอร์ระบุตำแหน่งของจุด P บนพื้นผิวอ้างอิง
(Reference surface) ดังแสดงในรูปที่ 1 จากนั้นเมื่อ
โครงสร้างเกิดการเสียรูปจะทำให้พื้นผิวอ้างอิงเคลื่อนที่ไป
ยังพื้นผิวที่ตำแหน่งใหม่เรียกว่าพื้นผิวหลังการเสียรูป
(Deformed surface) ดังนั้นเวกเตอร์ระบุตำแหน่ง $\bar{R}$
บนพื้นผิวที่เกิดการเสียรูปจะสามารถคำนวณได้จาก
สมการ

$$\bar{R}(\theta, \phi) = \bar{r}(\theta, \phi) + \bar{q}(\theta, \phi) \quad (5)$$

$\bar{q}(\theta, \phi)$ = เวกเตอร์ของค่าการเสียรูป (Displacement
vector) จากพื้นผิวไปยังพื้นผิวที่เกิดการเสียรูปซึ่งสามารถ
แสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\bar{q}(\theta, \phi) = \frac{u\bar{r}_\theta(\theta, \phi)}{\sqrt{E}} + w\hat{n}(\theta, \phi) \quad (6)$$

u = ค่าการเสียรูปตามแนวสัมผัสกับเส้นเมอร์ริเดียน

w = ค่าการเสียรูปตามแนวตั้งฉากกับเส้นเมอร์ริเดียน

$\hat{n}(\theta, \phi)$ = เวกเตอร์ในแนวตั้งฉากกับพื้นผิวอ้างอิงซึ่ง
สามารถนิยามได้ดังสมการดังนี้

$$\hat{n} = \frac{\bar{r}_\phi \times \bar{r}_\theta}{\|\bar{r}_\phi \times \bar{r}_\theta\|} = \frac{rZ_\theta(\cos \phi \hat{i} + \sin \phi \hat{j}) - r\phi_\theta \hat{k}}{D} \quad (7)$$

$$\text{โดยที่ } D = r\sqrt{r_\theta^2 + Z_\theta^2} \quad (8)$$

ในที่นี้ตัวห้อย θ และ ϕ จะแสดงถึงอนุพันธ์ย่อยตามแนวระบบพิกัดของโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงห้วงยาง

จากหลักการเรขาคณิตเชิงอนุพันธ์ จะสามารถนิยามรูปแบบพื้นฐานอันดับหนึ่ง (First fundamental form) ของพื้นผิวอ้างอิงและพื้นผิวหลังการเสียรูปได้ดังสมการ

$$d\bar{r} \cdot d\bar{r} = E d\theta^2 + 2F d\theta d\phi + G d\phi^2 \quad (9)$$

$$d\bar{R} \cdot d\bar{R} = E^* d\theta^2 + 2F^* d\theta d\phi + G^* d\phi^2 \quad (10)$$

(E, F, G) = ส่วนประกอบของเมตริกซ์เทนเซอร์ที่สภาวะอ้างอิง จะมีค่าตามสมการต่อไปนี้

$$E = \bar{r}_\theta \cdot \bar{r}_\theta \quad (11a)$$

$$F = \bar{r}_\theta \cdot \bar{r}_\phi \quad (11b)$$

$$G = \bar{r}_\phi \cdot \bar{r}_\phi \quad (11c)$$

(E^*, F^*, G^*) = ส่วนประกอบของเมตริกซ์เทนเซอร์ที่สภาวะหลังการเสียรูป จะมีค่าตามสมการต่อไปนี้

$$E^* = \bar{R}_\theta \cdot \bar{R}_\theta \quad (12a)$$

$$F^* = \bar{R}_\theta \cdot \bar{R}_\phi \quad (12b)$$

$$G^* = \bar{R}_\phi \cdot \bar{R}_\phi \quad (12c)$$

และรูปแบบพื้นฐานอันดับสอง (Second fundamental form) ของพื้นผิวอ้างอิงแสดงส่วนประกอบของเมตริกซ์ความโค้งได้ดังสมการต่อไปนี้

$$e = \bar{r}_{\theta\theta} \cdot \hat{n} \quad (13a)$$

$$f = \bar{r}_{\theta\phi} \cdot \hat{n} \quad (13b)$$

$$g = \bar{r}_{\phi\phi} \cdot \hat{n} \quad (13c)$$

2.2 รูปทรงเรขาคณิตของโครงสร้างเปลือกบาง

ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและระยะการเสียรูปตามนิยามความเครียดแบบโททอลลากรองจ์ (Total Lagrangian strains) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\varepsilon^L = \varepsilon_0 \frac{ds^2}{ds_0^2} + \varepsilon \frac{ds^2}{ds_0^2} \quad (14)$$

ε_0 = ค่าความเครียดเริ่มต้นแบบออยเลอร์ (Initial Eulerian strains)

ε = ค่าความเครียดที่เพิ่มขึ้น (Added strains)

ซึ่งค่าความเครียดแบบโททอลลากรองจ์ในสมการที่ (14) จะสามารถเขียนได้ในรูปแบบเมตริกซ์ดังนี้

$$\{\varepsilon^L\} = [T] (\{\varepsilon_0\} + \{\varepsilon\}) \quad (15)$$

$[T]$ = เมตริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างชิ้นส่วนกับวัสดุ ซึ่งสามารถจะเขียนความสัมพันธ์ได้ตามสมการดังนี้

$$[T] = \begin{bmatrix} \frac{1}{1-2\varepsilon_{0\theta}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{1-2\varepsilon_{0\phi}} \end{bmatrix} \quad (16)$$

2.3 พลังงานความเครียดของโครงสร้างเปลือกบาง

พลังงานความเครียดของโครงสร้างเปลือกบาง (Strain energy of a shell) ที่มีคุณสมบัติยืดหยุ่นแบบเชิงเส้นทั่วไปมีค่าตามสมการนี้

$$U = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{1}{2} (\{\varepsilon_0\}^T + \{\varepsilon\}^T) [C] (\{\varepsilon_0\} + \{\varepsilon\}) d\theta \quad (17)$$

$$\text{โดยที่ } [C] = 2\pi [T]^T [C'] [T] h D_0 \quad (18)$$

$$\text{และ } D_0 = D \sqrt{(1-2\varepsilon_{0\theta})(1-2\varepsilon_{0\phi})} \quad (19)$$

h = ความหนาของโครงสร้างเปลือกบาง

$[C']$ = เมตริกซ์สมบัติของวัสดุโครงสร้างซึ่งสามารถนิยามได้ตามสมการนี้

$$[C'] = \frac{E'}{1-\mu^2} \begin{bmatrix} 1 & \mu \\ \mu & 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

E' = โมดูลัสยืดหยุ่น

μ = อัตราส่วนปัวส์ซอง

ดังนั้นการแปรผันของพลังงานความเครียดของโครงสร้างเปลือกบางคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\delta U = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \delta \{g\}^T (\{\tilde{c}\} + [\tilde{k}]\{g\}) d\theta \quad (21)$$

$$\text{โดยที่ } \{\tilde{\epsilon}\} = [\{L_1\} \{L_2\}] [C] \{\epsilon_0\} \quad (22)$$

$$[\tilde{k}] = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 C_{ij} (\{L_i\} \{L_j\}^T) \quad (23)$$

2.4 พลังงานความเครียดของโครงสร้างเปลือกบาง

ค่าพลังงานความเครียดของของเหลวที่บรรจุ (Strain energy due to contained fluid) สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\Gamma = \frac{1}{2} k_0 \left[\frac{\Delta V_{ow} + \Delta V}{V_{ow}} \right]^2 V_{ow} \quad (24)$$

k_0 = โมดูลัสเชิงปริมาตรของของเหลว

V_{ow} = ปริมาตรของของเหลวที่สถานะเริ่มต้นปราศจากค่าความเครียด

ΔV_{ow} = การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของของเหลวภายในที่บรรจุจากสถานะเริ่มต้นไปยังสถานะอ้างอิง

ΔV = การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของของเหลวภายในที่บรรจุจากสถานะอ้างอิงไปยังสถานะการเสียรูป ซึ่งมีค่าตามสมการนี้

$$\Delta V = \frac{2\pi}{3} \int_{\theta_1}^{\theta_2} (\bar{R}_\theta \times \bar{R}_\phi \cdot \bar{R} - \bar{r}_\theta \times \bar{r}_\phi \cdot \bar{r}) d\theta \quad (25)$$

ดังนั้นค่าการแปรผันของการเปลี่ยนแปลงปริมาตรภายในของโครงสร้างเปลือกบางกับปริมาตรของเหลวภายในที่บรรจุจะคำนวณได้จากสมการ

$$\delta(\Delta V) = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \delta\{g\}^T \{\tilde{v}\} d\theta \quad (26)$$

$$\text{โดยที่ } \{\tilde{v}\} = [v_1 \ v_2 \ v_3 \ v_4] \quad (27)$$

$$\text{และ } v_1 = \frac{d(G^{1/2})}{d\theta} (\bar{r} \cdot \hat{n}) - \frac{e\sqrt{G}}{E} (\bar{r} \cdot \bar{r}_\theta) \quad (28a)$$

$$v_2 = \sqrt{EG} - \left[g \left(\frac{E}{G} \right)^{1/2} + e \left(\frac{G}{E} \right)^{1/2} \right] (\bar{r} \cdot \hat{n}) \quad (28b)$$

$$v_3 = \sqrt{G} (\bar{r} \cdot \hat{n}) \quad (28c)$$

$$v_4 = - \left(\frac{G}{E} \right)^{1/2} (\bar{r} \cdot \bar{r}_\theta) \quad (28d)$$

กำหนดให้ค่าแรงดันภายในที่สภาวะอ้างอิงมีค่าเป็น

$$p_0 = -k_0 \left(\frac{\Delta V_{ow}}{V_{ow}} \right) \quad (29)$$

ดังนั้นค่าการแปรผันของพลังงานความเครียดของของเหลวที่บรรจุมีค่าตามดังนี้

$$\delta\Gamma = -(p_0 + \lambda) \delta(\Delta V) \quad (30)$$

λ = ค่าการปรับเปลี่ยนแรงดันภายในจากสภาวะอ้างอิงไปยังสถานะการเสียรูป ซึ่งมีค่าดังนี้

$$\lambda = -k_0 \left(\frac{\Delta V}{V_{ow}} \right) \quad (31)$$

จากความสัมพันธ์ของค่า p_0 และ λ จะได้เงื่อนไขการจำกัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรดังสมการต่อไปนี้

$$\Delta V + \frac{V}{k_0 - p_0} \lambda = 0 \quad (32)$$

V = ปริมาตรของของเหลวที่สภาวะอ้างอิง โดยที่สมการดังกล่าวข้างต้นจะใช้สำหรับการพิจารณาให้ของเหลวที่ถูกบรรจุอยู่ในโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงห้วยางปราศจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรภายใต้แรงกระทำจากภายนอก โดยที่ตัวคูณลากรองจ์ (Lagrange multiplier) คือค่าปรับเปลี่ยนความดันภายในเพื่อให้โครงสร้างเปลือกบางรูปทรงห้วยางอยู่ในสภาวะสมดุลภายใต้เงื่อนไขการจำกัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตร

2.5 งานเสมือนเนื่องจากแรงดันน้ำสถิต

ค่าแรงดันน้ำสถิตแบบเป็นเชิงเส้น (Linearly hydrostatic pressure) ที่กระทำในแนวตั้งฉากกับพื้นผิวของโครงสร้างเปลือกบางสามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$p_w = \rho_w g' Z_w \quad (33)$$

ρ_w = ค่าความหนาแน่นของน้ำทะเล

g' = ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก

Z_w = ระยะในแนวดิ่งวัดจากระดับผิวน้ำทะเล

ดังนั้นงานเสมือนเนื่องจากแรงดันน้ำสถิตแบบเชิงเส้น
(Virtual work done by linearly hydrostatic pressure) สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\delta \Omega = 2\pi \int_{\theta_1}^{\theta_2} p_w \{\delta w\} D d\theta \quad (34)$$

2.6 ผลรวมของงานเสมือนและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ผลรวมของงานเสมือนของโครงสร้างเปลือกบาง
สำหรับบรรจุของเหลวติดตั้งในทะเลลึกดังแสดงในรูปที่ 2
แสดงได้ดังนี้

$$\delta U + \delta \Gamma + \delta \Omega = 0 \quad (35)$$

เมื่อแทนค่าสมการที่ (21), (30) และ (34) ลงในสมการที่
(35) จะพบว่าสมการดังกล่าวเป็นสมการเชิงอนุพันธ์แบบ
ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear differential equation) ใน
เทอมของค่าการเสียรูป $u(\theta)$ และ $w(\theta)$ จำนวนสอง
สมการถูกเขียนอยู่ในรูปของสมการออยเลอร์ (Euler's
equation) ซึ่งมีความยุ่งยากซับซ้อนในการคำนวณหาค่า
ผลเฉลยแม่นยำ และเนื่องจากเป็นปัญหาของโครงสร้าง
เปลือกบางรูปทรงท่งที่ยาวที่มีความสมมาตรตามแนวแกน
ซึ่งค่าแรงดันน้ำสถิตแบบเป็นเชิงเส้นจะส่งผลให้พื้นผิวของ
โครงสร้างเกิดการเปลี่ยนแปลงเฉพาะเส้นเมอร์ริเดียน
เท่านั้น

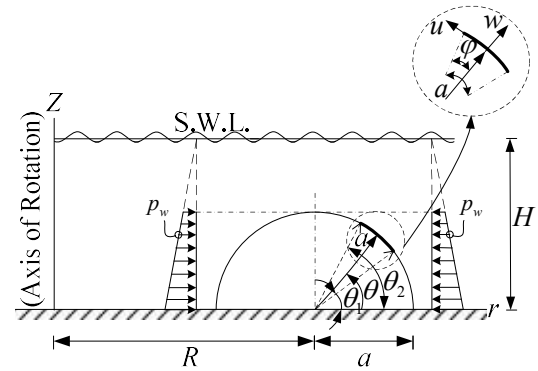
ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการหา
ผลลัพธ์เชิงตัวเลข โดยการจำลองโครงสร้างเปลือกบางไว้
แรงดัดด้วยชิ้นส่วนของคานแบบ 1 มิติ และแบ่งเป็น
ชิ้นส่วนของโครงสร้างเปลือกบางออกเป็นชิ้นส่วนย่อยๆ
ตามแนวพิกัด θ การประมาณค่าการเสียรูปในแนวสัมผัส
 u และแนวตั้งฉาก w สามารถทำได้โดยใช้ฟังก์ชันโพลี
โนเมียลอันดับที่สาม (Cubic polynomial) ดังสมการ

$$\{g\} = [\psi] \{d\} \quad (36)$$

$\{g\}$ = เวกเตอร์การเคลื่อนที่ที่จุดต่อ

$\{d\}$ = เวกเตอร์ของดักิริอิสระที่จุดต่อ

$[\psi]$ = เมตริกซ์ฟังก์ชันรูปร่างโพลีโนเมียลอันดับที่สาม ซึ่ง
จะมีค่าดังสมการต่อไปนี้



รูปที่ 2 โครงสร้างเปลือกบางรูปทรงท่งที่ยาวติดตั้งในทะเลลึก

$$[\psi] = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & | & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & | & 0 & 0 & 0 & 0 \\ N_{1,\varphi} & 0 & N_{2,\varphi} & 0 & | & N_3 & 0 & N_4 & 0 \\ 0 & N_{1,\varphi} & 0 & N_{2,\varphi} & | & 0 & N_3 & 0 & N_4 \\ & & & & & N_{3,\varphi} & 0 & N_{4,\varphi} & 0 \\ & & & & & 0 & N_{3,\varphi} & 0 & N_{4,\varphi} \end{bmatrix} \quad (37)$$

$$\text{โดยที่ } N_1 = 1 - 3\frac{\varphi^2}{\alpha^2} + 2\frac{\varphi^3}{\alpha^3} \quad (38a)$$

$$N_2 = \varphi - 2\frac{\varphi^2}{\alpha} + \frac{\varphi^3}{\alpha^2} \quad (38b)$$

$$N_3 = 3\frac{\varphi^2}{\alpha^2} - 2\frac{\varphi^3}{\alpha^3} \quad (38c)$$

$$N_4 = -\frac{\varphi^2}{\alpha} + \frac{\varphi^3}{\alpha^2} \quad (38d)$$

$$\text{และ } N_{1,\varphi} = \frac{6}{\alpha} \left(-\frac{\varphi}{\alpha} + \frac{\varphi^2}{\alpha^2} \right) \quad (39a)$$

$$N_{2,\varphi} = 1 - 4\frac{\varphi}{\alpha} + 3\frac{\varphi^2}{\alpha^2} \quad (39b)$$

$$N_{3,\varphi} = \frac{6}{\alpha} \left(\frac{\varphi}{\alpha} - \frac{\varphi^2}{\alpha^2} \right) \quad (39c)$$

$$N_{4,\varphi} = -2\frac{\varphi}{\alpha} + 3\frac{\varphi^2}{\alpha^2} \quad (39d)$$

ดังนั้นเมื่อแทนค่าสมการที่ (36) ลงในสมการที่ (35) จะได้

$$\int_{\theta_1}^{\theta_2} [\psi]^T \left(\{\tilde{c}\} - (p_0 + \lambda) \{\tilde{v}\} \right) d\theta$$

$$+\int_{\theta_1}^{\theta_2} [\psi]^T [\tilde{k}] [\psi] d\theta \{d\} + \{f\} = 0 \quad (40)$$

$$\text{โดยที่ } \{f\} = \{\delta w\}^T \int_{\theta_1}^{\theta_2} p_w \{\psi\} D d\theta \quad (41)$$

เนื่องจากดิสกรีอิสรเฉพาะที่ $\{d\}$ จะเหมือนกับดิสกรีอิสรรวม $\{Q\}$ ดังนั้นผลรวมของงานเสมือนสามารถรวมได้โดยตรงโดยใช้สมการที่ (40) ดังนี้

$$\{C\} - (p_0 + \lambda)\{V\} + [K]\{Q\} + \{F\} = \{0\} \quad (42)$$

จากสมการที่ (32) สมการเงื่อนไขการจำกัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\{Q\}^T \{V\} + \frac{V}{k_0 - p_0} \lambda = 0 \quad (43)$$

สมการที่ (42) และ (43) ถูกเขียนรวมในรูปเมตริกซ์สมมาตรดังนี้

$$\begin{bmatrix} [K] & | & -\{V\} \\ \hline -\{V\}^T & | & -V/(k_0 - p_0) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{Q\} \\ \lambda \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} p_0 \{V\} - \{C\} \\ 0 \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} \{F\} \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (44)$$

สำหรับเงื่อนไขที่บริเวณฐานรองรับพิจารณาดังนี้

$$u = w_\theta = 0 \quad (45)$$

3. ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

การศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงห้วงยางดังแสดงในรูปที่ 2 ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ถูกพัฒนาเขียนด้วยโปรแกรม MATLAB R2015b จำเป็นต้องทำการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยที่คุณสมบัติของโครงสร้างเปลือกบางสำหรับการคำนวณในครั้งนี้จะใช้ตามตารางที่ 1 โดยเริ่มจากการทดสอบการลู่เข้าของค่าการเสียรูปในแนวนอนและที่ตำแหน่งบนสุดของโครงสร้างซึ่งจะทำให้ได้จำนวนชิ้นส่วนย่อยที่มีความเหมาะสมดังแสดงในตารางที่ 2 เพื่อให้ได้คำตอบที่มีค่าความถูกต้องสูงสุด ซึ่งจะพบว่าถ้าใช้จำนวนชิ้นส่วนย่อยระหว่าง 24 กับ 28 ชิ้นส่วนจะให้ค่าความแตกต่างของการเสียรูปตำแหน่งบนสุดของโครงสร้างน้อยกว่าร้อยละ 0.02 และค่าการเสียรูปในแนวนอนที่ตำแหน่งอิกเซอร์เตอร์ด้านในและด้านนอกไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นงานวิจัยนี้เลือกใช้แบบจำลองที่มีจำนวนชิ้นส่วนย่อยเท่ากับ 24 ชิ้น เพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่มีความถูกต้องสำหรับการวิเคราะห์ในลำดับต่อไป

ตารางที่ 1 ข้อมูลและคุณสมบัติที่ใช้ในการวิเคราะห์

รายการ	สัญลักษณ์	ปริมาณ
ความยาวรัศมีจากแกนหมุนถึงจุดศูนย์กลางของรูปหน้าตัดทรงห้วงยาง (เมตร)	R	6
ความยาวรัศมีของรูปหน้าตัดทรงห้วงยาง (เมตร)	a	4
ความหนาของโครงสร้างเปลือกบาง (เมตร)	h	0.075
โมดูลัสยืดหยุ่น (นิวตัน/ตร.ม.)	E'	2×10^{11}
อัตราส่วนปัวส์ซอง	μ	0.3
ความลึกของระดับน้ำทะเล (เมตร)	H	200
ความหนาแน่นของน้ำทะเล (กก./ลบ.ม.)	ρ_w	1,025
โมดูลัสเชิงปริมาตรของของเหลว (นิวตัน/ตร.ม.)	k_0	1.45×10^9
แรงดันภายในเริ่มต้น (นิวตัน/ตร.ม.)	p_0	5×10^6

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบการลู่เข้าของค่าการเสียรูปในแนวรัศมีและที่ตำแหน่งบนสุดของโครงสร้าง

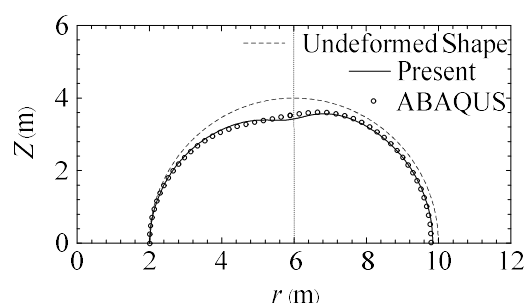
จำนวนชิ้นส่วนย่อย	$\Delta r_{inrados}$ (เมตร)	$\Delta r_{extrados}$ (เมตร)	u_{crest} (เมตร)	w_{crest} (เมตร)
8	-0.00006038	-0.00076756	-0.00044449	-0.00270412
12	-0.00006012	-0.00076781	-0.00044021	-0.00276814
16	-0.00006011	-0.00076781	-0.00044024	-0.00278385
20	-0.00006011	-0.00076782	-0.00044033	-0.00278779
24	-0.00006011	-0.00076782	-0.00044037	-0.00278901
28	-0.00006011	-0.00076782	-0.00044038	-0.00278948

จากนั้นทำการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมพบว่าค่าที่ได้จากงานวิจัยนี้ให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับผลการคำนวณโดยใช้ชิ้นส่วนโครงสร้างเปลือกบางที่มีรวมผลของแรงดัด (Shell elements) ด้วยโปรแกรม ABAQUS ดังแสดงในรูปที่ 3 และจากตารางที่ 3 จะพบกว่าผลที่ได้จากโปรแกรม ABAQUS จะให้คำตอบของค่าระยะการเสียรูปที่สูงกว่างานวิจัยนี้ ยกเว้นค่าการเสียรูปในแนวเส้นตั้งฉากเท่านั้นที่ให้ผลตรงข้าม สำหรับการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ABAQUS การเลือกใช้ชิ้นส่วนของโครงสร้างเปลือกบางที่รวมผลของแรงดัดในการคำนวณจะให้คำตอบที่ค่อนข้างไม่เหมาะสมกับปัญหาของโครงสร้างเปลือกบางที่มีความหนาแน่นมาก ในขณะที่การเลือกใช้ชิ้นส่วนของโครงสร้างเปลือกบางที่ไม่รวมผลของแรงดัด (Membrane elements) จากโปรแกรม ABAQUS ก็ให้คำตอบที่มีความผิดพลาด ดังนั้นการเลือกใช้ทฤษฎีเมมเบรนสำหรับงานวิจัยนี้ในการวิเคราะห์โครงสร้างเปลือกบางที่มีความหนาแน่นมากจึงให้คำตอบที่ได้มีความเหมาะสมกับลักษณะปัญหาของโครงสร้างดังกล่าว

การศึกษาผลตอบสนองทางสถิตศาสตร์ของโครงสร้างเปลือกบางและค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันภายในภายใต้การแปรเปลี่ยนค่าความความลึกของระดับน้ำทะเล ความหนาของโครงสร้างและความยาวรัศมีของรูปหน้าตัดทรงห้วงยางจะสามารถทำได้โดยการแปรเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบการเสียรูปของโครงสร้าง

ตำแหน่ง	งานวิจัยนี้ ($\times 10^{-3}$ เมตร)	ABAQUS ($\times 10^{-3}$ เมตร)	ความ แตกต่าง (ร้อยละ)
$\Delta r_{inrados}$	-0.06011	-0.06587	-8.74
$\Delta r_{extrados}$	-0.76782	-0.93653	-18.01
u_{crest}	-0.44037	-0.46096	-4.47
w_{crest}	-2.78901	-2.46780	13.02

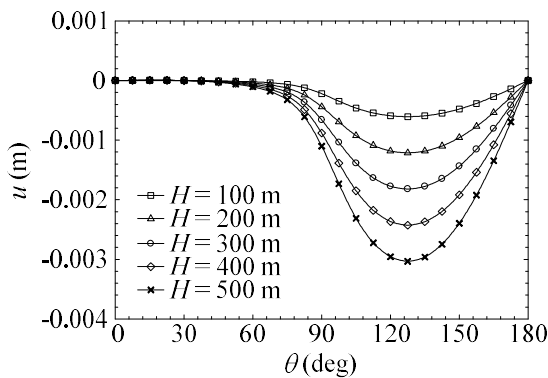


รูปที่ 3 การเสียรูปของโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงห้วงยางสำหรับบรรจุของเหลวภายใต้แรงดันน้ำสถิต

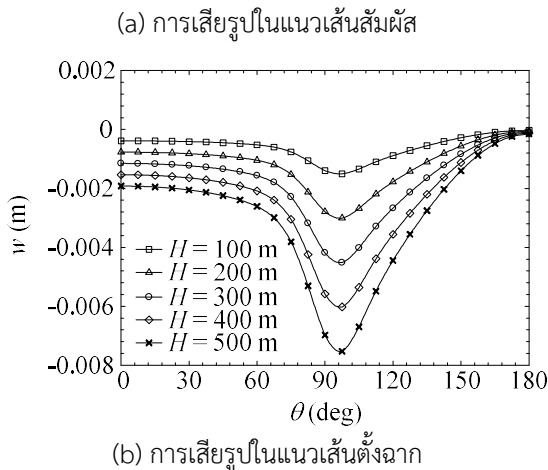
3.1 ผลของความลึกของระดับน้ำทะเลที่มีต่อโครงสร้างเปลือกบาง

การศึกษาผลของแรงดันน้ำสถิตแบบเชิงเส้นที่มีต่อโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงห้วงยางโดยการแปรเปลี่ยนค่าความลึกของระดับน้ำทะเลตั้งแต่ 100 ถึง 500 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 4 จะพบว่าค่าการเสียรูปในแนวเส้นสัมผัสและตั้งฉากของโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงห้วงยางมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อระดับน้ำทะเลมีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยที่ค่า

ระยะการเสียรูปสูงสุดในแนวเส้นตั้งฉากเกิดขึ้นที่ตำแหน่งบนสุดของโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงห้วยาง (Toroid crest) สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงดันภายใน λ/p_0 กับค่าความลึกของระดับน้ำทะเลจะมีสัดส่วนต่อกันเป็นแบบเชิงเส้น ดังแสดงในรูปที่ 5 และที่ระดับความลึกของน้ำทะเลสูงสุดจะมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันภายในเกิดขึ้นสูงสุด นอกจากนี้ผลการศึกษายังพบว่าเมื่อค่าแรงดันภายในเริ่มต้นมีค่าสูงส่งผลให้อัตราส่วนแรงดันภายใน λ/p_0 มีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่มีค่าแรงดันภายในเริ่มต้นมีค่าต่ำกว่า



รูปที่ 5 ผลของการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำทะเลที่มีต่ออัตราส่วน λ/p_0



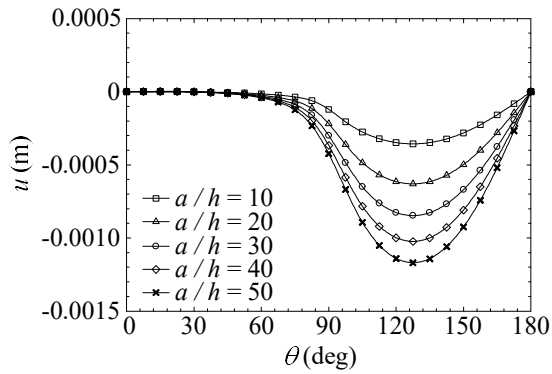
รูปที่ 4 ผลของการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำทะเลที่มีต่อการเสียรูปของโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงห้วยาง

3.2 ผลของความหนาที่มีต่อโครงสร้างเปลือกบาง

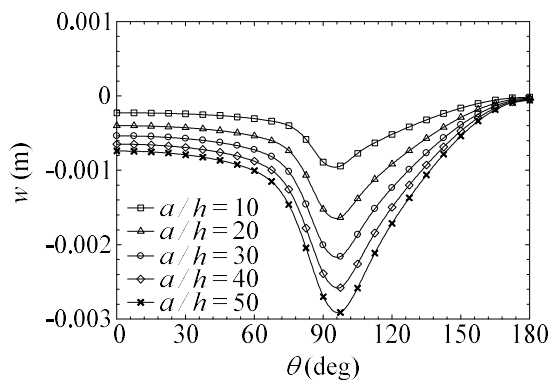
สำหรับการศึกษาผลของความหนาที่มีต่อโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงห้วยางจะทำได้โดยการแปรเปลี่ยนค่าอัตราส่วนความยาวรัศมีของรูปหน้าตัดทรงห้วยางต่อความหนาของโครงสร้างเปลือกบางตั้งแต่ 10 ถึง 50 โดยที่ค่าความยาวรัศมีของรูปหน้าตัดทรงห้วยางไม่มีการเปลี่ยนแปลง จากผลการวิเคราะห์จะพบว่าระยะการเสียรูปของโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงห้วยางจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อค่าอัตราส่วน a/h มีค่าสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 6 และค่าระยะการเสียรูปสูงสุดในแนวเส้นตั้งฉากเกิดขึ้นที่ตำแหน่งบนสุดของโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงห้วยาง เช่นเดียวกับรูปที่ 4 และความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงดันภายใน λ/p_0 กับค่าความอัตราส่วนความหนาต่อความยาวรัศมีของรูปหน้าตัดทรงห้วยางแสดงในรูปที่ 7

รูปที่ 7 จะแสดงให้เห็นว่าเมื่อความหนาของโครงสร้างมีค่าน้อยจะเกิดค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันภายในมากขึ้น และยังพบว่าเมื่อค่าแรงดันภายในเริ่มต้นมีค่าสูงส่งผลให้อัตราส่วนแรงดันภายใน λ/p_0 มีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่มีค่าแรงดันภายในเริ่มต้นมีค่าต่ำกว่า เช่นเดียวกับผลการวิเคราะห์ในรูปที่ 5 สำหรับกรณีของการศึกษาผลที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงระดับความลึกของน้ำทะเล แต่ค่าความชันของเส้นกราฟอัตราส่วนแรงดันภายใน λ/p_0 จะมีค่าลดลงเมื่อค่าอัตราส่วน a/h มีค่าสูงขึ้น และจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อค่า

อัตราส่วน a/h มีค่าลดลง โดยที่ผลการวิเคราะห์จะมีลักษณะเป็นกราฟรูปโค้งคว่ำ

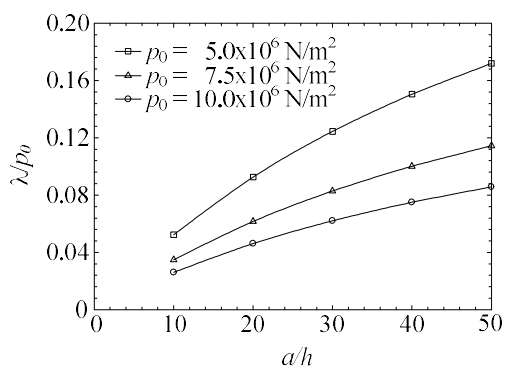


(a) การเสียรูปในแนวเส้นสัมผัส



(b) การเสียรูปในแนวเส้นตั้งฉาก

รูปที่ 6 ผลของการเปลี่ยนแปลงความหนาที่มีต่อการเสียรูปของโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงห้วยาง

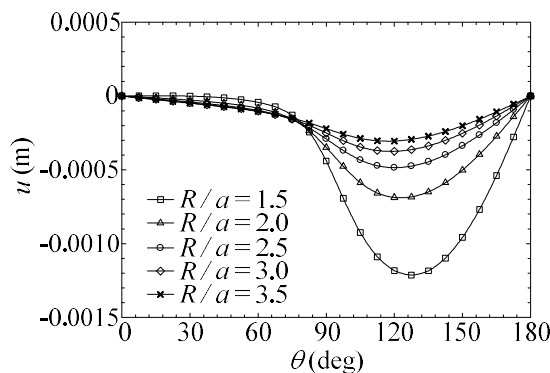


รูปที่ 7 ผลของการเปลี่ยนแปลงความหนาที่มีต่ออัตราส่วน λ/p_0

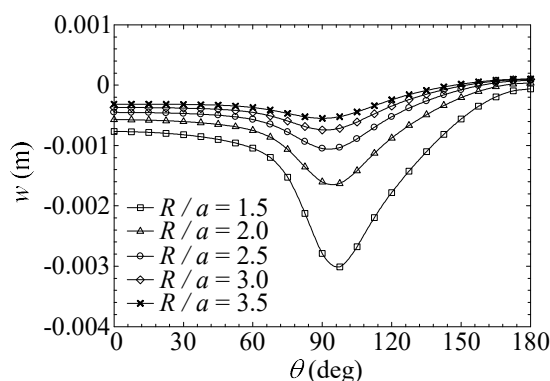
3.3 ผลของความยาวรัศมีของรูปหน้าตัดที่มีต่อโครงสร้างเปลือกบาง

ค่าพารามิเตอร์สุดท้ายที่จะทำการศึกษาผลตอบสนองทางสถิตศาสตร์ของโครงสร้างเปลือกบางและค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันภายในโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงห้วยาง จะเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญสำหรับโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงห้วยางโดยเฉพาะนั้น คือการศึกษาผลของอัตราส่วนความยาวรัศมีจากแกนหมุนถึงจุดศูนย์กลางของรูปหน้าตัดทรงห้วยางต่อความยาวรัศมีของรูปหน้าตัดที่มีต่อโครงสร้างเปลือกบาง (R/a ratio) โดยการแปรเปลี่ยนค่าอัตราส่วน R/a ตั้งแต่ 1.0 ถึง 3.5 โดยที่ R จะมีค่าคงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังแสดงในรูปที่ 8 และ 9 สำหรับค่าการเสียรูปและอัตราส่วนแรงดันภายใน λ/p_0 ตามลำดับ

จากผลการศึกษาจะพบว่าค่าการเสียรูปในแนวเส้นสัมผัสและตั้งฉากของโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงห้วยางมีค่าลดลงเมื่อค่าอัตราส่วน R/a มีค่าเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากโครงสร้างจะมีค่าความแข็งแกร่ง (Rigidity) เพิ่มขึ้นนั่นเอง เพราะค่าความยาวรัศมีของรูปหน้าตัดมีค่าลดลงในขณะที่ความหนาของโครงสร้างยังมีค่าเท่าเดิม นอกจากนี้ยังพบว่าจุดตัดกัน (Intersection point) สำหรับค่าการเสียรูปในแนวเส้นสัมผัสจะอยู่ที่ตำแหน่งเดียวกันไม่ขึ้นอยู่กับการแปรเปลี่ยนค่าอัตราส่วน R/a ดังแสดงในรูปที่ 8a สำหรับรูปที่ 9 จะแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงดันภายใน λ/p_0 กับอัตราส่วน R/a มีผลการวิเคราะห์เป็นลักษณะกราฟรูปโค้งหงายซึ่งจะให้ผลตรงกันข้ามกับการศึกษาผลที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาของโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 7 และที่อัตราส่วน R/a มีค่าสูงสุดมีค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันภายในเกิดขึ้นต่ำสุด นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อค่าแรงดันภายในเริ่มต้นมีค่าสูงส่งผลให้อัตราส่วนแรงดันภายใน λ/p_0 มีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ค่าแรงดันภายในเริ่มต้นมีค่าต่ำกว่า



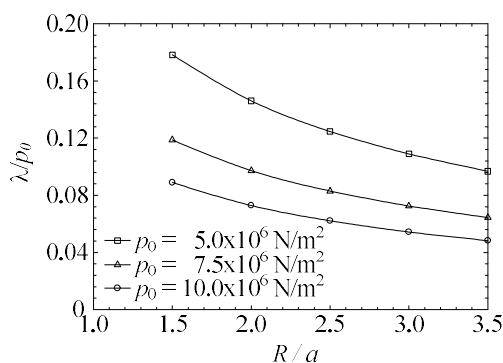
(a) การเสียรูปในแนวเส้นสัมผัส



(b) การเสียรูปในแนวเส้นตั้งฉาก

รูปที่ 8 ผลของการเปลี่ยนแปลงความยาวรัศมีของรูปหน้าตัดที่มีต่อการเสียรูปของโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงห้ว

ยง



รูปที่ 9 ผลของการเปลี่ยนแปลงความยาวรัศมีของรูปหน้าตัดที่มีต่ออัตราส่วน λ/p_0

4. สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอผลตอบสนองทางสถิตศาสตร์ของโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงห้วยงติดตั้งในทะเลลึกภายใต้เงื่อนไขการจำกัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตร ซึ่ง

ปัญหาสามารถเขียนได้ในรูปแบบการแปรผัน และใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการคำนวณหาค่าตอบเชิงตัวเลข จากผลการศึกษาจะพบว่าค่าการแปรเปลี่ยนค่าความความลึกของระดับน้ำทะเล ความหนาของโครงสร้างและความยาวรัศมีของรูปหน้าตัดทรงห้วยงจะส่งผลโดยตรงต่อการตอบสนองทางสถิตศาสตร์ของโครงสร้างเปลือกบางและค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันภายใน นอกจากนี้ยังพบว่าการแปรเปลี่ยนค่าความความลึกของระดับน้ำทะเลจะมีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราส่วนแรงดันภายใน λ/p_0 ในขณะที่การแปรเปลี่ยนค่าความหนาของโครงสร้างกับความยาวรัศมีของรูปหน้าตัดจะส่งผลทำให้ค่าอัตราส่วนแรงดันภายใน λ/p_0 มีลักษณะความสัมพันธ์เป็นเส้นโค้งคว่ำและโค้งหงายตามลำดับ นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ยังแสดงให้เห็นว่าเงื่อนไขการจำกัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรจะทำให้เกิดการปรับเปลี่ยนความดันภายในเพื่อให้โครงสร้างเปลือกบางรูปทรงห้วยงอยู่ในสภาวะสมดุล ส่งผลทำให้โครงสร้างดังกล่าวสามารถรับแรงกระทำจากภายนอกได้สูงขึ้นกว่าโครงสร้างเปลือกบางโดยทั่วไปที่ไม่ได้บรรจุของเหลว ดังนั้นโครงสร้างประเภทนี้จึงเป็นที่นิยมอย่างมากทั้งในด้านอุตสาหกรรมปิโตรเคมีและวิศวกรรมหลากหลายแขนง รวมถึงนำไปประยุกต์ใช้กับปัญหาทางด้านกลศาสตร์ชีวภาพได้อีกด้วย

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยลำดับที่ 1 ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสานที่ได้สนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้ และผู้วิจัยลำดับที่ 2 ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล ที่ได้ร่วมสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. K. Naboulsi, A. N. Palazotto, and J. M. Greer Jr. , " Static- dynamic analyses of toroidal shells," ASCE Journal of Aerospace Engineering, vol. 13, pp. 110–121, 2000.

- [2] B. Sun, “Closed- form solution of axisymmetric slender elastic toroidal shells,” *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, vol. 136, pp. 1281–1288, 2010.
- [3] R. A. Clark, “On the theory of thin elastic toroidal shells,” *Journal of Mathematics and Physics*, vol. 29, pp. 146–178, 1950.
- [4] J. L. Sanders Jr and A. Liepins, “Toroidal membrane under internal pressure,” *AIAA Journal*, vol. 1, pp. 2105–2110, 1963.
- [5] A. Zingoni, “Liquid-containment shells of revolution: A review of recent studies on strength, stability and dynamics,” *Thin-Walled Structures*, vol. 87, pp. 102–114, 2015.
- [6] E. L. Wilson, T. M. Hsueh, and L. R. Jones, “Nonlinear analysis of deep ocean structures,” in *Proceedings of the 1971 Symposium of the International Association for Shell Structures Pacific Symposium Part*, The University Press of Hawaii, Honolulu, 1971, pp. 457–474.
- [7] W. Jiammeepreecha, S. Chucheeepsakul, and T. Huang, “Nonlinear static analysis of an axisymmetric shell storage container in spherical polar coordinates with constraint volume,” *Engineering Structures*, vol. 68, pp. 111–120, 2014.
- [8] W. Jiammeepreecha, S. Chucheeepsakul, and T. Huang, “Parametric study of an equatorially anchored deepwater fluid-filled periodic symmetric shell with constraint volume,” *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, vol. 141, pp. 04015019–1–13, 2015.
- [9] Langhaar, H. L., “Foundations of Practical Shell Analysis,” Department of Theoretical and Applied Mechanics, University of Illinois at Urbana-Champaign, Illinois, U.S.A., 1964.

The optimization of Biodiesel production from Brassica carinata using ultrasonic irradiation-assisted by response surface methodology

Sonesaksit Niempaseuth, Prachasanti Thaiyasuit*, Kulachate. Pianthong and Wirapan Seehanam

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering

Ubon Ratchathani University, Ubonratchahani, 34190

*Corresponding author: E-mail: prachasanti.t@ubu.ac.th

ABSTRACT

This research presents the production of biodiesel from Brassica carinata oil by using ultrasonic irradiation as a reactor. The potassium hydroxide is a catalyst and 40 Hz 400 W ultrasonic irradiation is applied as a reactor. The Response Surface Methodology (RSM) in conjunction with the central composite design (CCD) was used to design the experimental. The process was carried out in a batch laboratory scale. The experiment setup were 5:1–7:1 of methanol to oil molar ratio, 1–2 wt% of catalyst concentration, 35–45°C of reaction temperature and 6–12 minute of reaction time. From the result, it is found that the maximum percentage of conversion to biodiesel is 99.71% at 5:1 of methanol to oil molar ratio, 2 wt% of the catalyst concentration, 45°C of the reaction temperature and 6 minute of the reaction time. The predicted optimum conversion to biodiesel percentage by quadratic polynomial is 99.02% at 5:1 of methanol to oil molar ratio, 1.69 wt% of catalyst concentration, 35 °C of reaction temperature and 6 minute of reaction time. This conversion to biodiesel percentage have been verified by the 0.9137 of determination coefficient (R^2), 0.8332 of the adjust determination coefficient (Adj. R^2) and 0.94% of standard error.

Keyword: Biodiesel, ultrasonic irradiation, brassica carinata, optimization

1. Introduction

The diesel engine has been widely used in industry, transportation, power generation, mineral machine, and agricultural machine. However, the diesel engine still using energy from fossil also increasing greenhouse gas and sulfur emissions to the atmosphere. Biodiesel is possible choices, because it is renewable and lower emissions released from diesel engine.

The production of biodiesel can be generated from soybean oil, rapeseed oil, sunflower oil, palm oil, jatropha oil, rubber seed oil or animal fat with alcohols. The transesterification is chemical process between triglycerides and alcohols. During the process can use alkaline or acid catalyst. The production of transesterification process was methyl or ethyl esters and glycerin [1].

Application of ultrasonic irradiation in biodiesel production is an attractive and effective technique to solve the problems related with the immiscible nature of the reactants [2] . A low frequency ultrasonic irradiation could be useful for the transesterification of triglyceride with alcohol. Ultrasonic provides the mechanical energy for mixing and the required activation energy for initiating the transesterification reactants [3] . Ultrasonic increases the chemical reaction speed and yield of the transesterification for vegetable oils and animal fats into biodiesel [4]. Mootabadi at al. [5] have investigated on 20 kHz ultrasonic cavitation assisted transesterification of palm oil in presence of three alkaline earth metal oxide catalysts, (CaO, SrO and BaO) . The catalytic activity was in the sequence of $\text{CaO} < \text{SrO} < \text{BaO}$. At optimum conditions, 60 min was required to achieve 95% yield compared to 2–4 h with conventional stirring. Also, the yields achieved in 60 min increased from 5.5% to 77.3% (CaO), 48.2% to 95.2% (SrO), and 67.3% to 95.2 (BaO).

Conventionally, the optimization study for biodiesel production process was performed with the variation of one component at a time and the response is a function of a single parameter (one-variable-at-a-time technique) that is much time consuming and exorbitant in cost. This technique does not include interactive effects among the variables and it does not depict the complete effect of the parameters on the process. However, application of response surface methodology (RSM) technique in

multivariable system is able to provide a research strategy in studying the interaction of the parameters using statistical methods. The experiment model of biodiesel synthesis which developed by using RSM is able to simulate the reaction under various transesterification conditions with good estimations of errors. [6]

The main objective of this study is apply the Response Surface Methodology (RSM) for biodiesel production from *Brassica carinata* by using ultrasonic irradiation as a reactor. The optimum and effect of parameters compose of methanol to oil molar ratio, catalyst concentration, reaction temperature and reaction time were analyzed.

2. Materials and methods

2.1. Materials and reagents

The oil in this study is crude *Brassica carinata* (CBC) oil. The CBC seeds were collected from field crops in Vientiane province of Lao people's Democratic Republic (Lao PDR). The CBC seed was grinded and then the oil was extracted from seed by hydraulic press machine. The CBC oil was filtrated to remove solid impurities and then was heated to evaporate the moisture in the oil at 105°C for 30 minute.

The fatty acid compositions of CBC were analyzed by the Thailand institute of Scientific and Technological Research (TISTR) with gas chromatographic method as shown in Table 1. The main composition are 45.4% of Erucic acid (C22:1), 16.59% of Linolelaidic acid (C18:2 n-6), 10.29% of Octade-catrienoic acid (C18:3 n-3), 10.24% of Elaidic acid (C18:1 n-9), and 6.21% of

Eicosenoic acid (C20:1 n-9). Knowing the fatty acid composition, the molecular mass of the CBC can be then estimated. In this study, the molecular mass of CBC was determined as 974.23 g/mole.

Table 1
Fatty acid composition of crude *Brassica carinata* seed oil

Fatty acid composition	Results (%wt)
C12:0	0.06
C14:0	0.1
C16:0	3.24
C16:1n9	0.04
C16:1 n-7	0.18
C18:0	1.09
C18:1n9	10.24
18:2n6	16.59
C18:3 n-3	10.29
C20:0	0.86
C20:1 n-9	6.21
C20:2 n-6	0.84
C20:3 n-3	0.15
C22:0	1.02
C22:1	45.4
C22:2	1.28
C23:0	0.04
C24:0	0.6
C24:1	1.73

The catalyst used in the experimental is KOH which 98.8% purity. And reactant is methanol which 98% purity.

2.2. Experimental setup

Ultrasonic processor (KCME-KORN, Model AK-Nano/ Bio-System 400 UL) was used as the source of the ultrasonic irradiation for assisting the produce of biodiesel. The processor operated at 40 kHz with the 400 watt. The ultrasonic irradiation times for the reaction was

adjust from 1 to 12 minute. All of experimental reaction were carried out in ultrasonic batch reactor (500 mL) made from stainless steel. An ultrasonic batch reactor was immersed in a water batch on the hot plate. The tip of a horn diameter is 10 mm and 120 mm length and transmit the ultrasound into the solution was submerged up to 55 mm deep into solution contained in the ultrasonic batch reactor. The temperature of the reaction mixture was controlled by water bath. A temperature indicator was used for measuring the reaction temperature as shown in Fig 1.

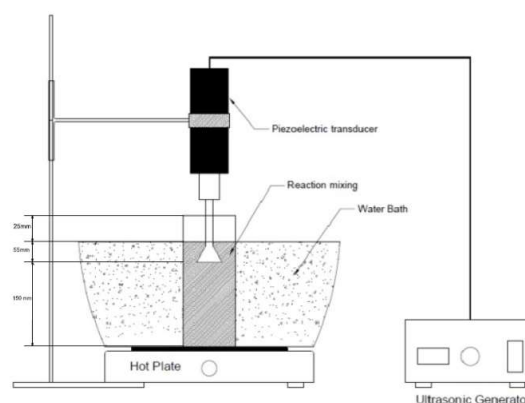


Fig. 1 The connection diagram experimental

2.3. Experimental design

A central composite design (CCD) was applied with four independent variables: methanol to oil molar ratio (X_1), catalyst concentration (X_2), reaction temperature (X_3) and reaction time (X_4). The experimental designs were 5:1 to 7:1 of methanol to the oil molar ratio, 1 to 2 wt% of catalyst concentration, 35 °C to 45 °C of reaction temperature and 6 minutes to 12 minutes of reaction time as shown in Table 2.

Table 2
Independent variables for experimental design

Independent variables	Levels				
	-2(- α)	-1	0	1	2(α)
Methanol to oil molar ratio (X_1)	4	5	6	7	8
Catalyst concentration(X_2)	0.5	1	1.5	2	2.5
Reaction temperature(X_3)	30	35	40	45	50
Reaction time (X_4)	3	6	9	12	15

The experimental design was obtained by 2^4 factorial which CCD for five levels of four independent variables. The CCD experimental were design giving 30 experiments according to 2^k+2k+2 , where k is the number of independent variables, which included 16 factorial points, 8 axial points and 6 center points [7] . The regressions were analyzed by Design Expert 9 (STAT-EASE Inc) software [8]. The model was verified by observation of the coefficients of determination (R^2). A quadratic polynomial equation is shown in Equation (1).

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i>j}^k \sum_j^k \beta_{ij} x_i x_j + e \quad (1)$$

Where, Y is the predicted response (conversion to biodiesel), β_0 , β_i , β_{ii} , and β_{ij} are regression coefficients, k is the number of studied factors and optimized in the experiment; e is the random error, x_i and x_j are the encoded independent variable [9].

2.4. Experimental procedure

The experimental was performed according to following procedure: 500 mL of CBC oil was added to the reactor then was preheated to the desire temperature by heating plate before the reaction started. The mixing intensity of the ultrasonic irradiation was fixed at 40 kHz frequency and 400 watt power supplied.

The methanol to oil molar ratio, catalyst concentration, reaction temperature and reaction time were set according to the values proposed in the design.

2.5. Product analysis

The conversion to biodiesel was analyzed by NMR method that performed on a Bruker DMX 300 MHz spectrometer using chloroform-d ($CDCl_3$) as the solvent. For each analysis, 0.2 mL of each biodiesel sample was dissolved in 0.4 mL of deuterated chloroform and transferred to an NMR probe. Spectra was recorded at room temperature with tetramethylsilane as internal standard [10]. The percentage conversion to biodiesel can be calculated by Equation (2).

$$\text{Conversion to biodiesel} = [(A/3)/(B/2)] \times 100 \quad (2)$$

Where A is the peak area of hydrogen of the methoxy groups in the methyl esters and B is peak area of hydrogen of the CH_2 groups of all fatty acid derivatives.

3. Results and discussions

3.1. Conversion to biodiesel percentage by 1H NMR analysis

The conversion to biodiesel percentage of CBC oil was analyzed by the Department of Chemistry, Ubon Ratchathani University with NMR method as show in Table 3. The maximum presented of conversion to biodiesel is 99.71%. at 5:1 of methanol to oil molar ratio, 2 wt% of catalyst concentration, 45 C° of reaction temperature and 6 minute of reaction time conditions.

The percentage of conversion to biodiesel were used to select from Independent variables of alkaline catalyzed transesterification process with methanol to oil molar ratio (X_1), catalyst concentration (X_2), reaction temperature (X_3) and reaction time (X_4). These experimental parameters and the percentage of conversion to biodiesel were shown in Table 3.

The CCD was experimental design. All of the 30 designed experiments were conducted and analyzed. The minimum and maximum of conversion to biodiesel are 70.36 % and 99.71 % at design point No. 19 and No. 7 respectively. The maximum percentage of conversion to biodiesel was obtained at 5:1 of methanol to oil molar ratio, 2 wt% of catalyst concentration, 45 °C of reaction temperature and 6 minute of reaction time.

Table 3
Experimental design matrix and results of conversion to biodiesel

Run	Real variables				Conversion to biodiesel
	X_1	X_2	X_3	X_4	
1	5	1	35	6	91.63
2	7	1	35	6	88.73
3	5	2	35	6	98.62
4	7	2	35	6	94.49
5	5	1	45	6	91.04
6	7	1	45	6	89.30
7	5	2	45	6	99.71
8	7	2	45	6	97.49
9	5	1	35	12	89.15
10	7	1	35	12	88.44
11	5	2	35	12	99.07
12	7	2	35	12	96.30
13	5	1	45	12	93.51
14	7	1	45	12	90.26
15	5	2	45	12	98.98
16	7	2	45	12	97.01
17	4	1.5	40	9	99.12

18	8	1.5	40	9	93.31
19	6	0.5	40	9	70.36
20	6	2.5	40	9	99.46
21	6	1.5	30	9	96.26
22	6	1.5	50	9	97.22
23	6	1.5	40	3	95.55
24	6	1.5	40	15	97.17
25	6	1.5	40	9	95.70
26	6	1.5	40	9	96.70
27	6	1.5	40	9	95.50
28	6	1.5	40	9	95.50
29	6	1.5	40	9	96.00
30	6	1.5	40	9	95.40

The properties of the maximum of conversion to biodiesel were tested by the Department of Chemical Technology, Chulalongkorn University with gas chromatographic method. The results are shown in Table 4.

Table 4
Fuel properties of methyl ester from Brassica carinata oil

Fuel properties	Test method	Results	Biodiesel Standard D6751
Specific gravity	ASTM D1298	0.89	0.86-0.9
Viscosity (cSt)	ASTM D4455	5.6	1.6-6
LHV (MJ/kg)	ASTM D5865	41.94	N/A
Flash point (°C)	ASTM D97	80	100
Fire point (°C)	ASTM D97	82	182

3.2. Regression model and analysis of variance (ANOVA)

Among the models that fitted to the response (linear, two factor interaction (2FI), quadratic and cubic polynomial), the quadratic model was selected due to higher order polynomial with signification. The quadratic polynomial model was suggested. The additional model cubic polynomial was not aliased by the RSM [11]. A quadratic polynomial

equation obtained from the design and the following equation was generated to predict the conversion to biodiesel as shown in Equation (3).

$$Y = 95.8 - 1.3X_1 + 4.91X_2 + 0.53X_3 + 0.21X_4 - 0.16X_1X_2 + 0.083X_1X_3 + 0.14X_1X_4 - 0.091X_2X_3 + 0.024X_2X_4 + 0.17X_3X_4 + 0.17X_1^2 - 2.65X_2^2 + 0.31X_3^2 + 0.21X_4^2 \quad (3)$$

Here, Y is response conversion to biodiesel and X_1 , X_2 , X_3 and X_4 are the values in the experimental form the studied variables.

Table.5
Analysis of variance (ANOVA) for the quadratic model

Sources of variations	Sum of squares	Degrees of freedom	Mean squares	F-value	P-value
Model	846.49	14	60.46	11.35	0.0001
Residual	79.94	15	5.33	-	-
Lack of fit	78.74	10	7.87	32.81	0.0006
Pure error	1.2	5	0.24	-	-
Total	926.42	29	-	-	-

$R^2=0.9137$, Adj. $R^2=0.8332$, C.V.=2.45, Std.Dev.=2.31

Statistical analysis of the model was performed to evaluate the analysis of variance (ANOVA), the desired level of confidence was considered at 92% of quadratic model as shown in Table 5. The p -value (probability of the error) of the model was less than 0.0001 demonstrating high significant in predicting the response values and the suitability of deduced model (a model term p -value<0.0001 indicates that the model is significant at the 95% confidence interval). The F -value of the model was 11.35 that implies the model is significant, there being only a 0.01% chance that model F -

value is large could occur due to noise. The lack of fit is the weighted sum of squared deviations between the mean responses at each parameter level and the corresponding fitted value. The p -value of lack of fit was 0.0006 that indicated there was significant relative to a pure error. The F -value of lack of fit was 32.81 implies that there is a 0.06% chance that a lack of fit this large could occur due to noise. The high value of R^2 (0.9137) is an indication that the fitted model can be used for prediction with reasonable precision. The goodness of fit the model was evaluated by the adjusted coefficient of determination (Adj. R^2). The value of the Adj. R^2 (0.8332) that indicates a high proportion of variability (83.32%) in the response variables to the four predictor variable and a very small portion of variability. The coefficient of variation (CV= 2.45) indicated the results of the fitted model reliable.

Effect of different independent variables on the response surface can be studied on data in Table 6. The standard error and P -values indicate the significant of each coefficient. In general, the smaller P -values indicate higher significant of the corresponding variables [12]. As the linear effect (X_1) and (X_2) were considered, 5% level being significant was found. The X_2 term had the most significant linear effect. In term of interaction effect not found to be significant at 5% level. However, for quadratic effect, the X_2^2 was found to be significant effect on conversion to biodiesel.

Table.6

Regression coefficients for second-order polynomial model

Model term	Estimate coefficient	Standard error	P-value
Intercept	95.8	0.94	
X_1	-1.3	0.47	0.0143
X_2	4.91	0.47	<0.0001
X_3	0.53	0.47	0.2758
X_4	0.21	0.47	0.6678
$X_1 X_2$	-0.16	0.44	0.7911
$X_1 X_3$	0.083	0.44	0.8874
$X_1 X_4$	0.14	0.44	0.8075
$X_2 X_3$	-0.091	0.44	0.8773
$X_2 X_4$	0.024	0.58	0.9669
$X_3 X_4$	0.17	0.58	0.7716
X_1^2	0.17	0.58	0.6971
X_2^2	-2.65	0.58	<0.0001
X_3^2	0.31	0.58	0.4980
X_4^2	0.21	0.58	0.6388

3.3. The interaction between the parameters

The interactive effect between methanol to oil molar ratio and the catalyst concentration while the other variables kept at their center values was shown in Fig.2. The high percentage of conversion to biodiesel was obtained at high catalyst concentration and low methanol to oil molar ratio.

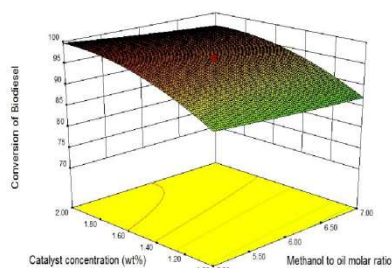


Fig.2 interaction methanol to oil molar ratio and catalyst concentration

The Fig.3 shows the interactive effect between catalyst concentration and reaction temperature while the other variables kept at their center values. The high percentage of conversion to biodiesel was obtained at high catalyst concentration and low reaction temperature, also the catalyst concentration had more effect than reaction temperature.

The interactive effect between catalyst concentration and reaction time while the other variables kept at their center values was shown in Fig.4. The high percentage of conversion to biodiesel was obtained at high catalyst concentration and low reaction time, moreover the catalyst concentration had more effect than reaction time. The most important independent variables were catalyst concentration and methanol to oil molar ratio.

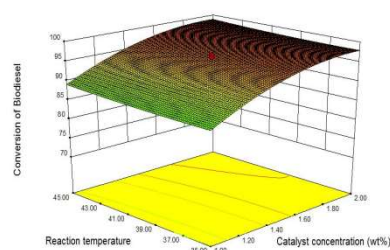


Fig.3 interaction catalyst concentration and reaction temperature

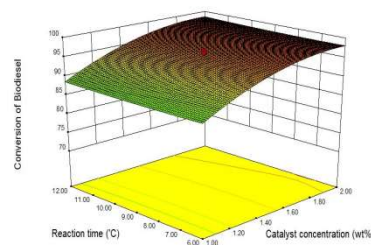


Fig.4 interaction catalyst concentration and reaction time

3.4. Optimization of process parameters

The experimental range were studied, optimum conditions for synthesis biodiesel from CBC were predicted using optimization function of the Design Expert software version 9.0. In numerical optimization, the independent variables with methanol to oil molar ratio, catalyst concentration (wt%), reaction temperature (°C) and reaction time (minute) were set within the range between (-2) and (+2) while the conversion to biodiesel to setup minimum and maximum value [12] . The constraints used for the optimum study as shown in Table 7.

Table.7

Rang of input parameters and response for optimization

Criteria	Goal	Lower limit	Upper limit
Methanol to oil molar ratio X_1	Range	5	7
Catalyst concentration X_2 (wt%)	Range	1	2
Reaction temperature X_3 (°C)	Range	35	45
Reaction time X_4 (minute)	Range	6	12
Conversion to biodiesel (%)	Maximize	70.36	99.71

The optimum values of the selected independent variables were obtained by solving the regression Equation 3. The experimental data obtained for the conversion to biodiesel were found maximum percentage 99.71% [10]. The response surface indicated the predicted optimum percentage of conversion to biodiesel was 99.02 % by transesterification process. Additional experiment was carried out to validate. The optimization result obtained by the response surface analyzed optimum conversion to biodiesel 98.84% at 5: 1 of

methanol to oil molar ratio, 1.69 wt% of catalyst concentration, 35°C of reaction temperature and 6 minutes of reaction time conditions. It is well agreed with the predicted values 99.02%, with a relatively standard error 0.94%.

The prediction and experiment were response values at these optimum conditions. The average conversion to biodiesel from the experimental was 99.84% and very close to the prediction, as detailed in Table 8.

Table.8

Experimental and predicted response at the optimum conditions model

Optimal condition				Conditions to biodiesel		
X_1	X_2	X_3	X_4	Experimental	Predicted	Error (%)
5	1.69	35	6	98.84	99.02	0.94

4. Conclusion

The RSM was a useful tool to investigate the optimum condition for biodiesel production from Brassica carinata oil. The interactive effect from multiple independent variables, including the methanol to oil molar ratio, catalyst concentration, reaction temperature and reaction time to the conversion to biodiesel were investigated. The main conditions that affect to percentage of conversion to biodiesel were catalyst concentration and methanol to oil molar ratio. The optimum conversion to biodiesel predicted by quadratic polynomial was 99.02% at 5:1 of methanol to oil molar ratio, 1.69 wt% of catalyst concentration, 35 °C of reaction temperature and 6 minute of reaction time conditions. This optimum has been verified by 0.9137 of R^2 , 0.8332 of Adj. R^2 and 0.94% of

standard error. Thus, this statistical model is adequate for predicting the conversion to biodiesel of *Brassica carinata*.

5. Acknowledgements

The authors would like to acknowledge Department of Mechanical Engineering Ubonratchathani University, Department of Chemical Technology, Chulalongkorn University and Dr Deuansavanh Phomavongsa of National University of Laos for providing the research facilities.

6. References

- [1] A. Abuhabaya, J. Fieldhouse and D. Brown, "The optimization of biodiesel production by using response surface methodology and its effect on compression ignition engine," *Fuel Processing Technology*, vol. 113, pp. 57-62, 2013.
- [2] A. S. Badday, A. Z. Abdullah and L. Keat-Teong, "Optimization of biodiesel production process from *Jatropha* oil using supported heteropolyacid catalyst and assisted by ultrasonic energy," *Renewable Energy*, vol. 50, pp. 427-432, 2013.
- [3] D. Kumar and G. Easy, "Ethanolysis of coconut oil for biodiesel production assisted by ultrasonication," *Ultrason. Sonochem*, vol. 17, pp. 555-559, 2010.
- [4] V. Makareviciene and P. Janulis, "Environmental effect of rapeseed oil ethyl ester," *Renewable Energy*, vol.28, pp. 2395-2403, 2003.
- [5] H. Mootabadi, B. Salamatinia, S. Bhatia and A. Z. Abdullah, "Ultrasonic-assisted biodiesel production process from palm oil using alkaline earth metal oxides as the heterogeneous catalysts," *Fuel*, vol. 89, pp. 1818-1825, 2010.
- [6] H. V. Lee and R. Yunus, "Process optimization design for *jatropha*-based biodiesel production using response surface methodology," *Fuel Processing Technology*, vol. 92, pp. 2420-2428, 2011.
- [7] K. Noipin and K. Kumar, "Optimization of ethyl ester productions assisted by ultrasonic irradiation," *Ultrasonics sonochemistry*, vol. 22, pp. 548-558, 2015.
- [8] U. Rashid, F. Anwar and T. M. Ansari, "Optimization of alkaline tranesterification of rice bran oil for biodiesel production using response surface methodology," *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, vol. 84, pp. 1364-1370, 2009.
- [9] R. Sen, "Response surface optimization of the critical media components for production of surfactin," *J Chem Tcehnol Biot*, vol. 68, pp. 263-270, 1997.
- [10] B. Salamatinia, H. Mootabadi and S. Bhatia, "Optimization of ultrasonic-assisted heterogeneous biodiesel production from palm oil: A response surface methodology approach," *Fuel Processing Technology*, vol. 91, pp. 441-448, 2010.

- [11] A. Hanif, G. Partha, S. Ritesh and S. Vijayan,
“ Ultrasonic biodiesel synthesis from crude
Jatropha curcas oil with heterogeneous
base catalyst: Mechanistic insight and
statistical optimization,” Ultrasonics
Sonochemistry, vol. 21, pp. 1050-1064,
2014.
- [12] M. Hamed and S. Subhash, “ Ultrasonic-
assisted biodiesel production process from
palm oil using alkaline earth metal oxides
as the heterogeneous catalysts,” Fuel, vol.
89, pp. 1818-1825, 2010.

ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาธรรมชาติในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว ของเหง้ามันสำปะหลังในเครื่องปฏิกรณ์แบบตกอิสระ Effect of Natural Catalysts in Fast Pyrolysis of Cassava Rhizome in a Free - Fall Reactor

นิกรศิลป์ บุญสมบัติ¹ อติศักดิ์ ปัตติยะ^{2*}

¹นักศึกษาปริญญาโท ²ผู้ช่วยศาสตราจารย์ หน่วยปฏิบัติการวิจัยพลังงานชีวภาพและทรัพยากรหมุนเวียน
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ตำบลขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150
Nikornsin Boonsombut¹ Adisak Pattiya^{2*}

¹Student, ²Assistant Professor, Bio-Energy and Renewable Resources Research Unit, Faculty of
Engineering Mahasarakham University Khamriang, Kantharawichai, Maha Sarakham, 44150

*Corresponding author: Email: adisak_pattiya@yahoo.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษากระบวนการไพโรไลซิสของเหง้ามันสำปะหลังในเครื่องปฏิกรณ์แบบตกอิสระเพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิไพโรไลซิส และตัวเร่งปฏิกิริยาธรรมชาติต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้ อุณหภูมิไพโรไลซิสที่ศึกษาได้แก่ 350 400 และ 500 องศาเซลเซียส สำหรับการทดลองที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการผลิตที่ให้ปริมาณผลได้โดยมวลและเชิงพลังงานสูงสุด ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าปริมาณผลได้โดยมวลสูงสุดของไบโอออยล์มีค่าเป็นร้อยละ 62 ซึ่งเทียบเท่ากับปริมาณผลได้เชิงพลังงานร้อยละ 46 เมื่อใช้อุณหภูมิไพโรไลซิส 400 องศาเซลเซียส ไบโอออยล์ที่ผลิตจากการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานี้มีค่าความร้อนสูง 15.8 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ขณะที่สมบัติอื่น ๆ เช่น ค่าพีเอช ความหนืด และความหนาแน่น ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ASTM D7544-12 อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส นี้ถูกเลือกมาสำหรับการทดลองไพโรไลซิสชนิดใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้อุณหภูมิของตัวเร่งปฏิกิริยาครั้งที่ 500 องศาเซลเซียส เพื่อทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยา 3 ชนิด ได้แก่ ซีโอไลด์ธรรมชาติ เพอร์ไลต์ ดินขาวเคโอลิน ตัวเร่งปฏิกิริยาทุกชนิดทำให้ปริมาณผลได้โดยมวลและเชิงพลังงานของไบโอออยล์มีค่าลดลง สมบัติของไบโอออยล์บางชนิดสามารถถูกปรับปรุงได้ด้วยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ในบรรดาตัวเร่งปฏิกิริยาที่ศึกษาทั้งหมด ดินขาวเคโอลินพบว่าเหมาะสมที่สุด การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาดินขาวเคโอลินให้ปริมาณผลได้โดยมวลของไบโอออยล์ร้อยละ 46 และเชิงพลังงานร้อยละ 20 นอกจากนี้ ค่าความร้อนของไบโอออยล์ที่ได้จากการใช้ดินขาวเคโอลินเร่งปฏิกิริยามีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 19.5 เมกะจูลต่อกิโลกรัม

คำสำคัญ: ชีวมวล ไบโอออยล์ ไพโรไลซิสแบบเร็ว ตัวเร่งปฏิกิริยา เครื่องปฏิกรณ์แบบตกอิสระ

ABSTRACT

Fast pyrolysis of cassava rhizome was carried out in a free-fall reactor to investigate the effect of pyrolysis temperature and natural catalysts on the pyrolysis products. The pyrolysis temperatures

of 350, 400 and 500°C were tested for non-catalytic experiments in order to determine optimum temperature for maximising the bio-oil mass and energy yields. The results showed that the maximum bio-oil mass yield of 62wt% with the corresponding energy yield of 46% was achieved at 400°C. The non-catalytic bio-oils produced had a higher heating value (HHV) of 15.8 MJ/kg. Other properties of the non-catalytic bio-oil such as pH, viscosity and density were found to meet the standard requirements of the ASTM D7544-12. The pyrolysis temperature of 400°C was selected for the catalytic pyrolysis experiments applying a constant catalyst temperature of 500°C. Activated natural zeolite, perlite and kaolin catalysts were tested in the biomass catalytic pyrolysis experiments. Although all catalysts led to bio-oil mass and energy yield reduction, certain bio-oil properties could be improved. Among the catalysts studied, kaolin was found to be the most suitable catalyst. The use of kaolin gave the bio-oil mass yield of 46 wt% and energy yield of 20%. In addition, the HHV of the kaolin-catalysed bio-oil could be increased to 19.5 MJ/kg.

Keyword: Biomass, bio-oil, fast pyrolysis, catalyst, free-fall reactor.

1. บทนำ

เศษเหลือจากไร่มันสำปะหลังที่ถูกทิ้งโดยเปล่าประโยชน์นั้นก็คือ “เหง้ามันสำปะหลัง” ซึ่งเป็นส่วนที่อยู่ระหว่างหัวมันกับลำต้น เมื่อถึงฤดูเก็บเกี่ยว ชาวเกษตรกรจะตัดส่วนหัวเพื่อส่งขายให้กับโรงงานแป้งมัน หรือโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้มันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบ ส่วนของลำต้นจะนำไปเป็นต้นพันธุ์ เหง้ามันสำปะหลังถูกมองข้ามทั้งที่มีคุณประโยชน์ โดยเกษตรกรมักจะปล่อยทิ้งไว้ในไร่ เมื่อเวลาผ่านไปก็จะกลายเป็นปุ๋ยบำรุงดิน แต่เกษตรกรบางคนก็ยังคงเผาทิ้ง หากมีการควบคุมการเผาก็จะเกิดประโยชน์ในด้านพลังงานความร้อน โดยการนำเหง้ามันสำปะหลังมาใช้เป็นเชื้อเพลิงหม้อน้ำเพื่อใช้ในการปั่นกังหันผลิตไฟฟ้า หรือที่เรียกว่า “ไฟฟ้าชีวมวล” และการควบคุมการเผาแบบกระบวนการทางเคมีความร้อน ซึ่งสามารถเปลี่ยนรูปพลังงานชีวมวล จากของแข็งให้เป็นของเหลวได้ เรียกกระบวนการนี้ว่า “ไพโรไลซิสแบบเร็ว” ซึ่งสามารถใช้ชีวมวลประเภทไม้ พืชน้ำมัน และวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร [1-7] เซลลูโลส [8] ของเสียพอลิไธรีน [9] และถ่านหิน [3, 10] เป็นวัตถุดิบได้ โดยกระบวนการนี้ นอกจากจะเหมาะกับชีวมวลที่เป็นของแข็งหลายชนิด ยัง

ช่วยให้ค่าใช้จ่ายในการขนย้ายลดลง หากนำกระบวนการนี้เข้าใกล้แหล่งวัตถุดิบเพื่อเปลี่ยนรูปของพลังงาน

กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว คือกระบวนการย่อยสลายอนุภาคด้วยความร้อนอย่างรวดเร็วโดยปราศจากออกซิเจน อุณหภูมิการเกิด ปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 400-600 องศาเซลเซียส เวลาคงอยู่ของไอสั้น และมีการควบแน่นไอยไพโรไลซิสอย่างรวดเร็ว [11] ซึ่งผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการควบแน่นเป็นที่รู้จักว่า “ไบโอออยล์ (Bio-oil)” ส่วนของแข็งที่เหลือจากการเกิดปฏิกิริยาเรียกว่า “ถ่านชาร์ (Char)” และผลิตภัณฑ์อีกอย่างคือ แก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ (Non-condensable gas) ซึ่งกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วเกิดขึ้นได้ในเครื่องปฏิกรณ์หลายชนิด

เครื่องปฏิกรณ์ที่มีการพัฒนามาจากอดีตจนถึงปัจจุบันมีหลายชนิด เช่น เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไรซ์เบด (Bubbling fluidised bed reactor) ซึ่งทรายที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อน เมื่อเวลาผ่านไปทรายถูกถ่านชาร์เคลือบที่บริเวณผิว ทำให้ประสิทธิภาพของการแลกเปลี่ยนความร้อนลดลง [12] เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไรซ์เบดแบบหมุนวน (Circulating fluidised bed reactor) ซึ่งเป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่สามารถหมุนวนทรายกลับมาเผาไหม้ได้

ทำให้ทรายสะอาดอยู่ตลอดเวลา [12] เครื่องปฏิกรณ์แบบกรวยหมุน (Rotating cone pyrolyser) ซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกรวยหมุนด้วยความเร็วสูง ทรายจะลั่นออกมาทางขอบด้านบนของกรวยลงสู่ช่องเก็บ ซึ่งจะนำกลับมาวนเข้าเตาใหม่ [12] เครื่องปฏิกรณ์แบบเสียดละลาย (Ablative pyrolyser) ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นปาดใช้กัดคอนาคของชีวมวล มีข้อเสียด้านการควบคุมพื้นผิวให้ความร้อน และชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่มีอุณหภูมิสูง การขยายขนาดหน่วยผลิตทำได้ยาก [13] เครื่องปฏิกรณ์แบบสุญญากาศ (Vacuum pyrolyser) ซึ่งมีอัตราการให้ความร้อนต่ำ แต่สามารถดึงไอไพโรไลซิสออกได้เร็ว อุปกรณ์มีขนาดใหญ่ และราคาสูง เนื่องจากการสร้างภาวะสุญญากาศที่ความดันประมาณ 15 กิโลปาสกาล ซึ่งยากต่อการขยายขนาดหน่วยการผลิต [12] เครื่องปฏิกรณ์แบบสกรู (Auger reactor) ซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกระบอกวางในแนวนอน ภายในมีสกรูลำเลียงก่อนเริ่มกระบวนการต้องให้ความร้อนกับทรายก่อน [12] และเครื่องปฏิกรณ์แบบตกอิสระ (Free-fall reactor) [14] ซึ่งเป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่แตกต่างจากเครื่องปฏิกรณ์แบบอื่น ๆ โดยชีวมวลจะตกตามแรงโน้มถ่วงของโลก ไม่ต้องใช้ทรายในการแลกเปลี่ยนความร้อน อาศัยความยาวของเตาปฏิกรณ์ในการกำหนดเวลาของการสลายตัวของชีวมวล ปริมาณแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในระบบน้อยมากเมื่อเทียบกับแบบอื่น ๆ มีความซับซ้อนน้อย และง่ายต่อการขยายขนาดหน่วยการผลิต ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเครื่องปฏิกรณ์แบบตกอิสระมาใช้สำหรับทำการทดลอง

จากงานวิจัยที่มีการใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบตกอิสระ โดยมีหลายงานวิจัยเป็นการศึกษาตัวแปรต่าง ๆ เช่น ชนิดของชีวมวลหรือชนิดของเชื้อเพลิงแข็งที่ใช้ [1-3, 6, 7, 10] อัตราการให้ความร้อน [1] อุณหภูมิอยู่ในช่วง 400-1,100 องศาเซลเซียส [1-10, 15, 16] ขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วง 0.2-1.8 มิลลิเมตร [1, 2, 4-9, 15, 16] ระยะเวลาคงอยู่ของไอไพโรไลซิสอยู่ในช่วง 0.7-3.5 วินาที [1, 3, 15] อัตราการไหลของแก๊สอยู่ในช่วง 0.5-5 ลิตรต่อนาที [4, 16] อัตราการป้อนชีวมวล หรือวัตถุดิบของแข็งอยู่ในช่วง 1-2 กิโลกรัมต่อชั่วโมง [8, 16] และอัตราการทำปฏิกิริยา

ของถ่านชาร์ [1, 2, 10, 17] งานวิจัยที่ศึกษาการปรับปรุงสมบัติของไบโอออยล์ให้ดีขึ้นมีหลายวิธี เช่น การเติมแอลกอฮอล์ร้อยละ 2.5-10 [14] การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5 [18] โดโลไมท์ [19] ซีโอไลต์ธรรมชาติ [20] ซิงค์ออกไซด์ [21] เคโอลิน [22] โพแทสเซียมคาร์บอเนต [23] และ CoMo [24] พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของไบโอออยล์ [25]

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วช่วยในแง่ของการลดปริมาณออกซิเจนในไบโอออยล์ ซึ่งเป็นผลให้ค่าพลังงานความร้อนสูงขึ้น รวมไปถึงสมบัติต่าง ๆ ของไบโอออยล์ดีขึ้น เมื่อเทียบกับการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา [26] ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้จากแหล่งธรรมชาติ หาได้ง่าย และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังราคาถูกจึงทำให้สามารถลดต้นทุนในการทำวิจัยได้ โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้มีทั้งหมด 3 ชนิด คือ ซีโอไลต์ธรรมชาติชนิดหินลาวาแดง เพอร์ไลต์ และดินขาวเคโอลิน ซึ่งจากการศึกษา งานวิจัยพบว่า ยังไม่มีการนำตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสามชนิดมาใช้กับชุดกรองไอร้อนในเครื่องปฏิกรณ์แบบตกอิสระโดยใช้ชีวมวลเห้งหม้นสำปะหลัง และยังไม่มีการเปรียบเทียบปริมาณผลได้และสมบัติต่าง ๆ ของไบโอออยล์ที่ได้จากตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสามชนิด จึงไม่เป็นที่ทราบแน่ชัดว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดใดได้ปริมาณผลได้ร้อยละเท่าไร และสมบัติต่าง ๆ ของไบโอออยล์ผ่านมาตรฐาน ASTM D7544-12 หรือไม่ จึงเป็นที่มาของการศึกษาและทำวิจัยในครั้งนี้

2. วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 6 ส่วน ดังนี้

2.1. วัตถุดิบชีวมวล

ชีวมวลที่ใช้ในการทดลองนี้ คือ เห้งหม้นสำปะหลังได้จากไร่ในเขตพื้นที่หมู่บ้านหนองบอน ตำบลนากลาง อำเภอสว่างแดนดิน จังหวัดนครราชสีมา ก่อนการทดลองได้มีขั้นตอนการเตรียมชีวมวลโดยนำชีวมวลมาบดละเอียดตากแห้ง และคัดขนาดโดยมีอนุภาค 212-600 ไมโครเมตร

จากนั้นนำชีวมวลที่ได้มาทำการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) และวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ซึ่งค่าความร้อนสูง (ฐานแห้ง) ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Art.2060/2070 Bomb calorimeter ดำเนินการตามมาตรฐาน DIN 51900 แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมบัติของชีวมวล

การวิเคราะห์แบบประมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ฐานเปียก	ฐานแห้ง
ความชื้น	6.64	-
สารระเหย	76.13	81.54
คาร์บอนคงที่	13.46	14.42
เถ้า	3.77	4.04
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ฐานแห้ง ปราศจากเถ้า	
คาร์บอน (C)	43.16	
ไฮโดรเจน (H)	6.03	
ไนโตรเจน (N)	1.22	
กำมะถัน (S)	0.05	
ออกซิเจน (O)	45.50	
ค่าความร้อนสูง (HHV) (เมกะจูล/กิโลกรัม)	14.48	15.51
ค่าความร้อนต่ำ (LHV) (เมกะจูล/กิโลกรัม)	13.36	14.19

คาร์บอนคงที่ (ฐานแห้งปราศจากเถ้า) = 100 - สารระเหย - เถ้า

ออกซิเจน (O) = 100 - คาร์บอน - ไฮโดรเจน - ไนโตรเจน - กำมะถัน - เถ้า

2.2. ตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลองนี้จำนวน 3 ชนิด คือ ซีโอไซด์ธรรมชาติชนิดหินลาวาแดง ซึ่งมีลักษณะคล้ายก้อนหินแต่มีรูพรุน สีออกน้ำตาลเข้ม โดยทั่วไปจะพบในตู้เลี้ยงปลาใช้เพื่อประดับตกแต่ง ขนาดที่ใช้ทำการทดลอง

3-5 เซนติเมตร ซึ่งเป็นสารประกอบอลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicates) ชนิดหนึ่ง โดยก่อนการใช้สำหรับการทดลองทำการกระตุ้นด้วยการเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3.5 ชั่วโมง ดินขาวเคโอลิน ซึ่งเป็นดินภูเขาที่ได้จากจังหวัดลำปาง มีลักษณะเบาเมื่อเทียบกับดินเหนียวในปริมาณที่เท่ากัน มีสีเหลือง ขนาดที่ใช้ทำการทดลอง 0.5-1 เซนติเมตร กระตุ้นโดยการเผาที่อุณหภูมิ 732 องศาเซลเซียส ตามคำแนะนำของ [22] โดยระหว่างทำการเผาจะปล่อยไอน้ำผ่านเป็นเวลา 4 ชั่วโมง และเพอร์ไลต์ ซึ่งเป็นวัสดุที่ได้จากธรรมชาติโดยการเปลี่ยนแปลงของหินภูเขาไฟเป็นซิลิกา ที่มีสีขาวอมเทา ขนาดที่ใช้ทำการทดลอง 0.5-1 เซนติเมตร กระตุ้นด้วยการเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

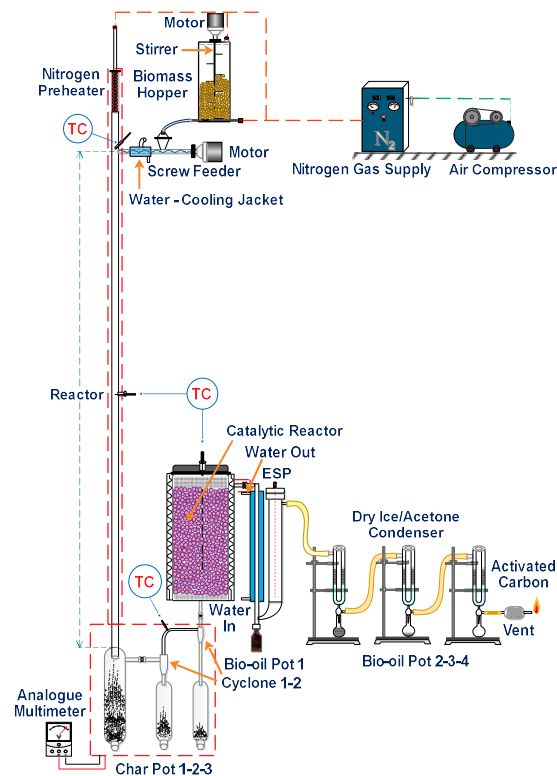
2.3. อุปกรณ์ไฟโรไลซิสแบบเร็ว

เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลองนี้คือ เครื่องปฏิกรณ์แบบตกอิสระ แสดงดังรูปที่ 1 โดยมีส่วนประกอบต่าง ๆ ดังนี้ ถังป้อนชีวมวลแบบใบกวน เตาปฏิกรณ์โดยมีความสูง 150 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 เซนติเมตร ถังเก็บถ่านชาร์จำนวน 3 ถัง ชุดไซโคลนจำนวน 2 ชุด เครื่องปฏิกรณ์ตัวเร่งปฏิกิริยาโดยมีความสูง 45 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 7.62 เซนติเมตร ชุดควบแน่นด้วยน้ำหล่อเย็นโดยใช้อุณหภูมิห้อง ชุดทำให้ตกตะกอนด้วยไฟฟ้าสถิตจำนวน 1 ชุด ชุดเครื่องแก้วที่ควบแน่นด้วยน้ำแข็งแห้งผสมแอสซิโตนจำนวน 3 ชุด และชุดกรองดักกลั่นจำนวน 1 ชุด แก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้สามารถนำกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยการหมุนวนกลับมาใช้ใหม่ในระบบเพื่อเพิ่มปริมาณผลได้และสมบัติที่ดีขึ้นของไบโอออยล์ [24] ในทำนองเดียวกันถ่านชาร์ก็สามารถนำกลับมาใช้ได้โดยนำมาเผาเพื่อเพิ่มความร้อนให้กับเตาปฏิกรณ์ [27]

2.4. การทำสมดุลมวล

การทำสมดุลมวลทำได้โดยการคำนวณผลต่างก่อนและหลังของน้ำหนักอุปกรณ์ที่ใช้ทำการทดลอง ได้แก่ ถังป้อนชีวมวล เตาปฏิกรณ์ ชุดไซโคลน ชุดกรองไอร้อน ชุดควบแน่นด้วยน้ำหล่อเย็นกับชุดทำให้ตกตะกอนด้วยไฟฟ้าสถิต ชุดควบแน่นด้วยน้ำแข็งแห้งผสมกับแอสซิโตน และชุด

กรองดักกลิ่น ซึ่งค่าผลต่างของอุณหภูมิแต่ละจุดจะบ่งบอกถึงผลิตภัณฑ์หลักที่ได้ของแต่ละส่วน



รูปที่ 1 แผนภาพอุปกรณ์การไพโรไลซิสแบบเร็ว

2.5. เงื่อนไขการทดลอง

การทดลองนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการทดลองเพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมที่มีปริมาณผลได้ของไบโอออยล์สูงสุดที่ 350 400 และ 500 องศาเซลเซียส และส่วนที่ 2 คือ การทดลองที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโดยจะใช้อุณหภูมิไพโรไลซิสที่เหมาะสมจากผลการทดลองในส่วนที่ 1 ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจำนวน 3 ชนิด ได้แก่ ซีโอไลต์ธรรมชาติชนิดหินลาวาแดง ดินขาวเคโอลิน และเพอร์ไลต์

2.6. สมบัติของไบโอออยล์

สมบัติที่ทำการวิเคราะห์ ได้แก่ ความเป็นกรด-ด่าง ความหนาแน่น ความหนืด ค่าความร้อนสูง และปริมาณของแข็ง โดยทำการวิเคราะห์จำนวน 3 ซ้ำ

2.6.1. ความเป็นกรด-ด่าง (pH value) ทำการวัดโดยใช้เครื่อง Denver instrument รุ่น UB-10 ซึ่งก่อน

ทำการวิเคราะห์ทุกครั้งจะทำการสอบเทียบเครื่องมือวัดเทียบกับของเหลวมาตรฐานที่ค่าพีเอช 4 7 และ 10

2.6.2. ความหนาแน่น (Density) ทำการวิเคราะห์โดยการชั่งน้ำหนักของไบโอออยล์เทียบกับปริมาตร ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D4052

2.6.3. ความหนืด (Viscosity) เป็นการวัดความเสียดทานของของเหลวภายในหลอดวัดความหนืดยี่ห้อแคนนอน เบอร์ 450 โดยมีค่าคงที่ 2.5 ตารางมิลลิเมตรต่อวินาที หรือเซนติสโตกส์ต่อวินาที โดยจะทำการวัดที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ตามมาตรฐาน ASTM D445

2.6.4. ค่าความร้อนสูง (Higher Heating value) ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Art.2060/2070 Bomb calorimeter ซึ่งจะใช้ไบโอออยล์ประมาณ 1 กรัม ปริมาณน้ำ 2 ลิตร ดำเนินการตามมาตรฐาน DIN 51900

2.6.5. ปริมาณของแข็ง (Solids content) ใช้วิธีการแบบสุญญากาศ (Vacuum filtration) โดยดูดไบโอออยล์ 2-3 กรัม ผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 3 ขนาด 110 มิลลิเมตร และใช้เอทานอลในการทำลายของแข็งที่ไม่สามารถผ่านกระดาษกรองได้คือ ของแข็งที่อยู่ในไบโอออยล์ ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D7579

3. ผลการศึกษา

ผลของการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการศึกษาผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อปริมาณผลได้และสมบัติของไบโอออยล์ เพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสม หลังจากนั้นนำอุณหภูมิที่เหมาะสมไปใช้ในการศึกษาผลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยรายละเอียดมีดังต่อไปนี้

3.1. ผลของอุณหภูมิไพโรไลซิส

ผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อปริมาณผลได้โดยมวลจากรูปที่ 2 แสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้แบ่งออกเป็น 5 ส่วน ได้แก่ ไบโอออยล์รวม ไบโอออยล์หนัก ไบโอออยล์เบา ถ่านชาร์ และแก๊ส โดยไบโอออยล์รวมสามารถแบ่งได้เป็นไบโอออยล์หนัก และไบโอออยล์เบา ซึ่งไบโอออยล์หนักได้จากการควบแน่นด้วยน้ำและชุดทำให้ตกตะกอนด้วยไฟฟ้าสถิต ขณะที่ไบโอออยล์เบาได้จากการควบแน่น

ด้วยน้ำแข็งแห้งผสมแอสซิโตน จากรูปที่ 1 ส่วนที่เป็น ไบโ
ออยล์ Pot 1 คือไบโออยล์หนัก และไบโออยล์ Pot 2-
4 เป็นไบโออยล์เบา นอกจากนี้ยังได้ถ่านชาร์และแก๊ส
โดยถ่านชาร์ได้จาก Char Pot 1-3 และส่วนที่ติดอยู่ในชุด
กรองไอร้อน รูปที่ 2 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิส่งผลอย่าง
ชัดเจนต่อปริมาณผลได้ของไบโออยล์รวม ไบโออยล์
หนัก และแก๊ส ขณะที่ไบโออยล์เบา และถ่านชาร์
อุณหภูมิส่งผลเพียงเล็กน้อย อุณหภูมิไพโรไลซิสที่ 400
องศาเซลเซียส ให้ปริมาณผลได้ของไบโออยล์รวมสูงสุด
อยู่ที่ร้อยละ 62 ซึ่งแบ่งได้เป็นไบโออยล์หนักร้อยละ 45
และไบโออยล์เบาร้อยละ 18 การเพิ่มอุณหภูมิจาก 350
เป็น 400 องศาเซลเซียส ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลง
ปริมาณผลได้ของไบโออยล์ซึ่งเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 4 แต่เมื่อ
เพิ่มอุณหภูมิจาก 400 เป็น 500 องศาเซลเซียส ปริมาณ
ผลได้ของไบโออยล์รวมลดลง โดยการลดลงนี้สอดคล้อง
กับการลดลงของปริมาณผลได้ของไบโออยล์หนัก และ
สอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณแก๊สจากร้อยละ 21
เป็นร้อยละ 35 แสดงให้เห็นว่าปริมาณผลได้โดยมวลที่
400 องศาเซลเซียส มีปริมาณสูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับ
งานวิจัยของ Pattiya และคณะ [28] ที่ใช้ชีวมวลเห้มน้ำ
สำปะหลัง และเครื่องปฏิกรณ์ชนิดเดียวกัน พบว่าที่
อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีปริมาณผลได้ของไบโ
ออยล์รวมสูงสุดถึงร้อยละ 50.3 ดังนั้นจึงเป็นอุณหภูมิที่
เหมาะสมกับการผลิตไบโออยล์

อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาเพียงปริมาณผลได้โดย
มวลอาจไม่เพียงพอต่อการสรุป ดังนั้นจึงมีการศึกษา
ปริมาณผลได้เชิงพลังงาน โดยนำค่าความร้อนของไบโ
ออยล์หนักและถ่านชาร์มาคำนวณ ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3
จากรูปแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิไพโรไลซิสไม่ส่งผลต่อ
ปริมาณผลได้เชิงพลังงานของถ่านชาร์ ขณะที่ปริมาณ
ผลได้เชิงพลังงานของไบโออยล์เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ
จาก 350 เป็น 400 องศาเซลเซียส แต่ลดลงเมื่อเพิ่ม
อุณหภูมิจาก 400 เป็น 500 องศาเซลเซียส ทั้งนี้แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ให้ปริมาณผลได้เชิง
พลังงานของไบโออยล์สูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 46 โดยการ

เปลี่ยนแปลงของปริมาณผลได้เชิงพลังงานของไบโออยล์
สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของแก๊สสอดคล้องกับ
งานวิจัยของ Pattiya และคณะ [28] เมื่อปริมาณผลได้
ของแก๊สเพิ่มขึ้นไบโออยล์จะมีปริมาณลดลง ดังนั้นเมื่อ
พิจารณารวมกันของทั้งรูปที่ 2 และรูปที่ 3 ในกระบวนการ
ไพโรไลซิสแบบเร็วพบว่าอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส
เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการผลิตไบโออยล์จากเห้มน้ำ
สำปะหลังในเครื่องปฏิกรณ์แบบตกอิสระ เนื่องจากให้
ปริมาณผลได้ทั้งโดยมวลและเชิงพลังงานของไบโออยล์
สูงที่สุด ดังนั้นจึงเป็นอุณหภูมิที่เลือกใช้ในการนำไปศึกษา
ในส่วนถัดไป ซึ่งเป็นส่วนการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

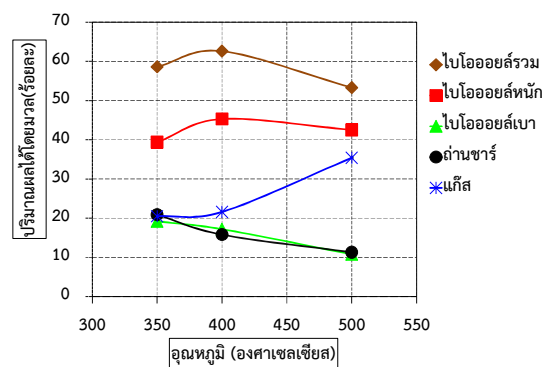
เมื่อพิจารณาสมบัติของไบโออยล์ที่ได้จาก
กระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิทั้งสามระดับโดยไม่ใช้
ตัวเร่งปฏิกิริยา ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 2 ซึ่งเทียบกับ
มาตรฐาน ASTM D7544-12 จากตารางพบว่า ไบโออยล์
ที่ผลิตมีปริมาณของแข็งอยู่ในช่วง 1.2-4.2 โดยเมื่อเพิ่ม
อุณหภูมิปริมาณของแข็งมีแนวโน้มลดลง ซึ่งสอดคล้องกับ
งานวิจัยของ Shiguang Li และคณะ [6] แต่อย่างไรก็ตาม
ยังมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ที่ร้อยละ 0.5 ซึ่ง
แสดงให้เห็นว่าระบบที่ออกแบบมานี้ ส่วนที่ส่งผลต่อ
ปริมาณของแข็ง คือชุดกรองไอร้อนยังไม่เหมาะสมและ
ควรมีการปรับปรุงระบบซึ่งสามารถทำได้โดยการเพิ่ม
ความหนาแน่นของใยแก้วที่ใช้ในการกรอง [29] หรือเพิ่ม
ขนาดของชุดกรอง หรืออาจจะสามารถทำได้โดยใช้
ตัวกลางกรองชนิดอื่น [30] ซึ่งไม่ได้อยู่ในขอบเขตของ
งานวิจัยนี้

นอกจากนี้ตารางที่ 2 แสดงค่าพีเอชของไบโออยล์
ซึ่งพบว่ามีอยู่ในช่วง 2.6-3.5 และอุณหภูมิไพโรไลซิสไม่
ส่งผลอย่างชัดเจน ค่าพีเอชของไบโออยล์ที่ได้นี้อยู่ในช่วง
ตามมาตรฐาน ASTM D7544-12 และยังมีสมบัติอีกชนิด
หนึ่งสำคัญต่อการนำไปใช้ซึ่งก็คือ ค่าความ
หนืด ข้อกำหนดได้กำหนดไว้ว่าไบโออยล์ควรมีค่าความ
หนืดไม่เกิน 125 เซนติสโตกส์ ขณะที่ตารางที่ 2 แสดง
ชัดเจนว่าไบโออยล์ที่ผลิตจากทั้งสามอุณหภูมิมีค่าความ
หนืดผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งอยู่ในช่วง 23-29 เซนติส

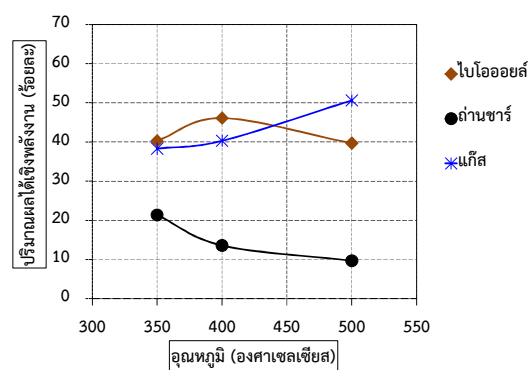
โตกส์ และยังพบว่ามีค่ามากกว่าความหนืดของไบโอออยล์ที่ได้จากเห้มน้ำมันสำปะหลังโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดเบดเป็น 5.1 เซนติสโตกส์ [29]

อุณหภูมิไม่ส่งผลชัดเจนต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืด หากไบโอออยล์มีความหนืดสูงเกินไปการนำไปใช้งานจะยาก เนื่องจากการขนถ่ายด้วยปั๊มหรือการฉีดผ่านหัวฉีดอาจมีปัญหาได้ [31] จากค่าความหนาแน่นของไบโอออยล์ดังตารางที่ 2 พบว่าอยู่ในช่วง 1.3-1.4 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โดยอุณหภูมิไพโรไลซิสที่ 400 องศาเซลเซียส ค่าความหนาแน่นเป็น 1.3 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร อยู่ในช่วงตามมาตรฐาน ASTM D7544-12 และอุณหภูมิไม่ส่งผลต่อค่าความหนาแน่นมากนัก ตารางที่ 2 ยังแสดงค่าความร้อนสูงของไบโอออยล์ซึ่งพบว่า ที่อุณหภูมิ 350 และ 500 องศาเซลเซียส ให้ไบโอออยล์มีค่าความร้อนสูงใกล้เคียงกันประมาณ 13-14 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ว่ามากกว่า 15 เมกะจูลต่อกิโลกรัม แต่อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วในเครื่องปฏิกรณ์แบบตกอิสระ พบว่าค่าความร้อนมีค่าสูงถึง 15.8 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐาน เมื่อเทียบกับงานวิจัยอื่นที่ใช้ชนิดของชีวมวล เตปปฏิกรณ์ และอุณหภูมิเดียวกันพบว่า ได้ค่าความร้อน 26.7 เมกะจูลต่อกิโลกรัม [28] แสดงให้เห็นว่ามีค่า

น้อยกว่า แต่เมื่อเทียบปริมาณผลได้โดยมวลของไบโอออยล์รวมเป็นร้อยละ 53 พบว่างานวิจัยนี้มีค่ามากกว่า



รูปที่ 2 ผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อปริมาณผลได้โดยมวลเมื่อไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 3 ผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อปริมาณผลได้เชิงพลังงานเมื่อไม่ใช้ตัวเร่ง

ตารางที่ 2 สมบัติของไบโอออยล์จากกระบวนการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

วิเคราะห์สมบัติ	อุณหภูมิไพโรไลซิส (องศาเซลเซียส)			มาตรฐาน ASTM D7544-12
	350	400	500	
ปริมาณของแข็ง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	4.2	3.2	1.2	<0.5
ค่าพีเอช	3.0	2.6	3.5	2-3
ความหนืด (เซนติสโตกส์)	28.7	23.3	25.4	<125
ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	1.4	1.3	1.4	1.1-1.3
ค่าความร้อนสูง (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	13.3	15.8	13.6	>15

3.2. ผลของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในงานวิจัยนี้ก่อนและหลังการทดลองแสดงดังรูปที่ 4 โดยจากรูปแสดงให้เห็นชัดเจนว่าหลังการใช้งาน สีของตัวเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนเป็นสีดำ ซึ่งเมื่อสังเกตพบว่าลักษณะผงถ่านขนาดเล็กไปติดอยู่บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ผงถ่านนี้อาจเกิดจากการควบแน่นของไอไฟโรไลซิส หรืออาจเกิดจากผงถ่านขนาดเล็กหลุดออกจากชุดไซโคลน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเสื่อมสภาพเมื่อใช้งานไปได้ระยะหนึ่ง โดยปริมาณถ่านที่ไปเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดไม่เท่ากัน ซีโอไลต์ธรรมชาติชนิดหินลาวาแดง ดินขาวเคโอลิน และเพอร์ไลต์มีส่วนของถ่านที่ไปเคลือบอยู่ร้อยละ 0.12 1.8 และ 0.05 ตามลำดับ



(ก่อน)



(หลัง)

ซีโอไลต์ธรรมชาติชนิดหินลาวาแดง



(ก่อน)



(หลัง)

ดินขาวเคโอลิน



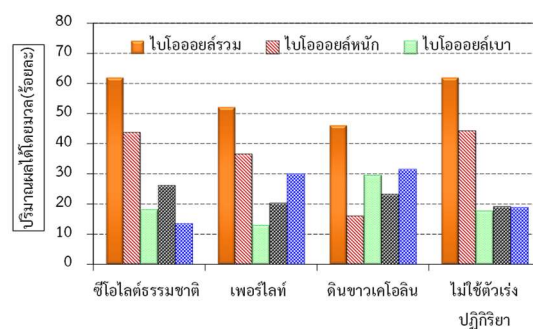
(ก่อน)



(หลัง)

เพอร์ไลต์

รูปที่ 4 ภาพถ่ายตัวเร่งปฏิกิริยา

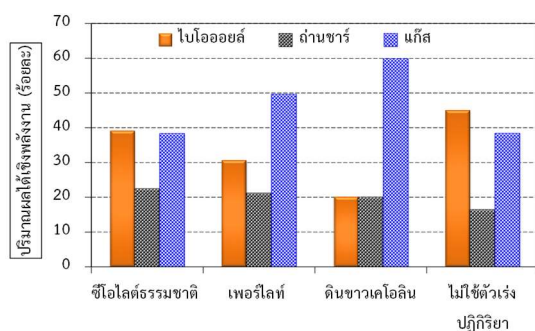


รูปที่ 5 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณผลได้โดยมวลเมื่อใช้ตัวเร่ง

จากรูปที่ 5 แสดงผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณผลได้โดยมวลของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว เมื่อไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ไบโอออยล์รวมมีปริมาณผลได้ร้อยละ 62 เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ธรรมชาติชนิดหินลาวาแดง พบว่าปริมาณผลได้ของไบโอออยล์รวมมีค่าไม่แตกต่างจากการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยทั้งไบโอออยล์หนักและไบโอออยล์เบาให้ปริมาณผลได้ใกล้เคียงกับการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแต่สิ่งที่แตกต่างคือ ปริมาณผลได้ของถ่านชาร์และแก๊ส ซึ่งพบว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ธรรมชาติชนิดหินลาวาแดง ปริมาณผลได้ของถ่านชาร์เพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 7 และสอดคล้องกับการลดลงของปริมาณผลได้ของแก๊ส การเพิ่มขึ้นของปริมาณผลได้ของถ่านชาร์นี้มาจากถ่านชาร์ที่เคลือบตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยาเพอร์ไลต์และตัวเร่งปฏิกิริยาดินขาวเคโอลิน ส่งผลให้ปริมาณผลได้ของไบโอออยล์รวมลดลงถึงร้อยละ 10 ถึง 16 การลดลงของไบโอออยล์รวมนี้สอดคล้องกับการลดลงของไบโอออยล์หนักและไบโอออยล์เบากรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพอร์ไลต์ ขณะที่เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาดินขาวเคโอลินส่งผลให้ปริมาณผลได้ของไบโอออยล์หนักลดลงแต่ปริมาณปริมาณผลได้ของไบโอออยล์เบาเพิ่มขึ้นมาก แสดงให้เห็นว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองชนิดส่งผลต่อการแตกตัวของไอไฟโรไลซิส เพื่อทำให้เกิดเป็นของเหลวที่ต่างชนิดกัน แต่สิ่งที่เหมือนกันของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองคือ การทำให้ปริมาณผลได้ของแก๊สเพิ่มสูงขึ้นประมาณร้อยละ 11 ถึง 12 เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา แต่ถ่านชาร์

เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย โดยดินขาวเคโอลินให้ปริมาณผลได้ของไบโอออยล์รวมต่ำที่สุดและให้ปริมาณแก๊สสูงที่สุด แสดงให้เห็นว่าสามารถเร่งปฏิกิริยาการแตกตัว (Cracking reactions) ได้มากที่สุด โดยตัวเร่งปฏิกิริยาดินขาวเคโอลินนี้ประกอบด้วยซิลิกอน และออกซิเจนเป็นหลัก และมีธาตุอื่นที่สามารถมีส่วนช่วยในการเร่งปฏิกิริยา เช่น เหล็ก (Fe) ร้อยละ 7.1 โพแทสเซียม (K) ร้อยละ 0.8 และ ทองแดง (Cu) ร้อยละ 1.0

เมื่อพิจารณาปริมาณผลได้โดยมวลเทียบกับปริมาณผลได้เชิงพลังงานดังรูปที่ 6 พบว่าค่าพลังงานของไบโอออยล์เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าน้อยกว่ากรณีที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโดยค่าพลังงานส่วนหนึ่งถูกเลื่อนมาเป็นถ่านชาร์และอีกส่วนหนึ่งเลื่อนมาเป็นแก๊สในกรณีของตัวเร่งปฏิกิริยาเพอร์ไลต์และตัวเร่งปฏิกิริยาดินขาวเคโอลิน แต่กรณีของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ธรรมชาติชนิดหินลาวาแดงค่าพลังงานของแก๊สมีค่าเท่ากับกรณีที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเพอร์ไลต์และตัวเร่งปฏิกิริยาดินขาวเคโอลินเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำให้ไฮโดรคาร์บอนแตกตัวกลายเป็นแก๊สได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ธรรมชาติชนิดหินลาวาแดง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาเพอร์ไลต์และตัวเร่งปฏิกิริยาดินขาวเคโอลินมีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาการแตกตัว (Cracking reaction) ได้มากที่สุด



รูปที่ 6 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณผลได้เชิงพลังงานเมื่อใช้ตัวเร่ง

อย่างไรก็ตามแม้ว่าปริมาณผลได้โดยมวลและเชิงพลังงานเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแล้วมีปริมาณลดลง แต่เมื่อพิจารณาสมบัติแล้วพบว่า สมบัติที่สำคัญของการเร่งปฏิกิริยา คือ ค่าความร้อนสูง จากตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่าเมื่อไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไบโอออยล์ที่ได้มีค่าความร้อนสูงเป็น 15.8 เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ธรรมชาติชนิดหินลาวาแดงและเพอร์ไลต์ส่งผลให้ค่าความร้อนลดลงแต่เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาดินขาวเคโอลินกลับส่งผลให้ค่าความร้อนเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาดินขาวเคโอลินสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงความร้อนของน้ำมันเชื้อเพลิงไบโอออยล์ได้ [32]

เมื่อพิจารณาสมบัติประเภทอื่น เช่น ปริมาณของแข็งพบว่า การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ปริมาณของแข็งลดลง ทั้งนี้เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาส่วนหนึ่งทำหน้าที่กรองของแข็งที่หลุดออกจากไซโคลน เมื่อพิจารณาค่าพีเอชของเชื้อเพลิงพบว่า การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ธรรมชาติชนิดหินลาวาแดงและตัวเร่งปฏิกิริยาดินขาวเคโอลินสามารถเพิ่มค่าพีเอชจาก 2.6 เป็น 4.5 ได้ ขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยาเพอร์ไลต์ไม่ทำให้ค่าพีเอชของไบโอออยล์เปลี่ยนแปลงมากนัก เมื่อพิจารณาค่าความหนืดและค่าความหนาแน่นของไบโอออยล์ที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่า ดินขาวเคโอลินให้ผลเป็นที่น่าสนใจเนื่องจากความหนืดของไบโอออยล์ที่ได้มีค่าต่ำมากและค่าความหนาแน่นมีค่าสูง ซึ่งค่าความหนืดที่ต่ำที่สุดนี้สอดคล้องกับปริมาณผลได้ของไบโอออยล์เฟสเบาที่สุดดังรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่าดินขาวเคโอลินสามารถเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวและอาจทำให้โมเลกุลของไบโอออยล์มีขนาดเล็กลง จึงมีความหนืดต่ำ นอกจากนี้ค่าความร้อนของไบโอออยล์ที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้ยังมีค่าสูงถึง 19.5 เมกะจูลต่อกรัม แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาดินขาวเคโอลินเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ปรับปรุงสมบัติของไบโอออยล์แม้ว่าปริมาณผลได้ของไบโอออยล์จะมีค่าลดลงก็ตาม

ตารางที่ 3 สมบัติของไบโอออยล์หนักจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

วิเคราะห์สมบัติ	ตัวเร่งปฏิกิริยา			ไม่ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา	มาตรฐาน ASTM D7544-12
	ซีโอไลต์ธรรมชาติชนิดหินลาวาแดง	ดินขาวเคโอลิน	เพอร์ไลต์		
ปริมาณของแข็ง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.5	0.4	1.2	3.2	<0.5
ค่าพีเอช	4.5	4.5	2.4	2.6	2-3
ความหนืด (เซนติสโตกส์)	12.2	0.6	11.4	23.3	<125
ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	1.2	1.7	1.5	1.3	1.1-1.3
ค่าความร้อนสูง (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	13.9	19.5	13.0	15.8	>15

อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยต่อไป ควรศึกษาผลของการผสมกันของตัวเร่งปฏิกิริยาจากธรรมชาติ เพิ่มเติม เพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมต่อการผลิตไบโอออยล์ที่มีสมบัติที่ดีขึ้น

4. สรุปผลการทดลอง

กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วของเหง้ามันสำปะหลังในเครื่องปฏิกรณ์แบบตกอิสระที่อุณหภูมิ 350 400 และ 500 องศาเซลเซียส เมื่อไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาให้ปริมาณผลได้โดยมวลประมาณร้อยละ 59 62 และ 53 ตามลำดับ ซึ่งพบว่าที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ให้ปริมาณผลได้โดยมวลสูงที่สุด ที่สภาวะนี้ยังให้ปริมาณผลได้เชิงพลังงานของไบโอออยล์สูงที่สุดประมาณร้อยละ 46 และยังพบว่าสมบัติของไบโอออยล์ ได้แก่ ค่าพีเอช ความหนืด ความหนาแน่น และค่าความร้อนสูงผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ASTM D7544-12

เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาธรรมชาติทั้งสามชนิดทำให้ปริมาณผลได้ของไบโอออยล์ลดลง อย่างไรก็ตามตัวเร่งปฏิกิริยาบางชนิด เช่น ดินขาวเคโอลิน ช่วยให้ค่าความร้อนของไบโอออยล์เพิ่มขึ้นจากเดิมที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าประมาณ 15.8 เมกะจูลต่อกิโลกรัม เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ค่าความร้อนมีค่าเป็น 19.5 เมกะจูลต่อกิโลกรัม แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาเพอร์ไลต์และซีโอไลต์ธรรมชาติชนิดหินลาวาแดงทำให้ค่าความร้อนของไบโอออยล์ลดลง และทำให้ค่าความหนืดลดลงด้วย ซึ่งแสดงว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเพอร์ไลต์และซีโอไลต์ธรรมชาติชนิดหินลาวาแดงนี้

อาจจะไม่ดีในแง่ของค่าความร้อนแต่ช่วยทางด้านค่าความหนืดเล็กน้อย แต่เมื่อพิจารณาโดยรวมแล้ว ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีที่สุดคือ ตัวเร่งปฏิกิริยาดินขาวเคโอลิน ทั้งค่าความหนืดก็ลดลงต่ำกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพอร์ไลต์และตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ธรรมชาติชนิดหินลาวาแดง ทั้งปริมาณของแข็งก็ต่ำกว่า ค่าพีเอชที่สูงที่สุดและสูงกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วย ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาดินขาวเคโอลินเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาเพอร์ไลต์และซีโอไลต์ธรรมชาติชนิดหินลาวาแดง และเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้ในการไพโรไลซิสแบบเร็วของเหง้ามันสำปะหลังในเครื่องปฏิกรณ์แบบตกอิสระ

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับงบประมาณสนับสนุนจากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] R. Zanzi, K. Sjöström, and E. Björnbom, "Rapid high-temperature pyrolysis of biomass in a free-fall reactor," *Fuel*, vol. 75, no. 5, pp. 545-550, 1996.
- [2] R. Zanzi, K. Sjöström, and E. Björnbom, "Rapid pyrolysis of agricultural residues at high

- temperature," *Biomass and Bioenergy*, vol. 23, no. 5, pp. 357-366, 2002.
- [3] W. C. Xu, K. Matsuoka, H. Akiho, M. Kumagai, and A. Tomita, "High pressure hydrolysis of coals by using a continuous free- fall reactor," *Fuel*, vol. 82, no. 6, pp. 677-685, 2003.
- [4] O. Onay and O. M. Koçkar, "Pyrolysis of rapeseed in a free fall reactor for production of bio-oil," *Fuel*, vol. 85, no. 12-13, pp. 1921-1928, 2006.
- [5] C. Acikgoz and O. M. Kockar, "Flash pyrolysis of linseed (*Linum usitatissimum* L.) for production of liquid fuels," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 78, no. 2, pp. 406-412, 2007.
- [6] S. Li, S. Xu, S. Liu, C. Yang, and Q. Lu, "Fast pyrolysis of biomass in free-fall reactor for hydrogen- rich gas," *Fuel Processing Technology*, vol. 85, no. 8-10, pp. 1201-1211, 2004.
- [7] L. Wei *et al.*, "Characteristics of fast pyrolysis of biomass in a free fall reactor," *Fuel Processing Technology*, vol. 87, no. 10, pp. 863-871, 2006.
- [8] V. Visentin, F. Piva, and P. Canu, " Experimental Study of Cellulose Fast Pyrolysis in a Flow Reactor," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 41, no. 20, pp. 4965-4975, 2002.
- [9] A. Karaduman, E. H. Simsek, B. Çiçek, and A. Y. Bilgesü, "Flash pyrolysis of polystyrene wastes in a free-fall reactor under vacuum," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 60, no. 2, pp. 179-186, 2001.
- [10] L. Zhang, S. Xu, W. Zhao, and S. Liu, "Co-pyrolysis of biomass and coal in a free fall reactor," *Fuel*, vol. 86, no. 3, pp. 353-359, 2007.
- [11] A. V. Bridgwater and C. Peacocke, "Fast pyrolysis processes for biomass," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 4, no. 1, pp. 1-73, 2000.
- [12] W. N. R. W. Isahak, M. W. M. Hisham, M. A. Yarmo, and T.-y. Yun Hin, "A review on bio-oil production from biomass by using pyrolysis method," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 8, pp. 5910-5923, 10// 2012.
- [13] A. Bridgwater, "Progress in Thermochemical Biomass Conversion," vol. Volume 2. London: Blackwell Science, p. p.1744, 2001.
- [14] B. Pidtasang, P. Udomsap, S. Sukkasi, N. Chollacoop, and A. Pattiya, "Influence of alcohol addition on properties of bio- oil produced from fast pyrolysis of eucalyptus bark in a free- fall reactor," *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 19, no. 6, pp. 1851-1857, 11/25/ 2013.
- [15] C. Dupont, J.-M. Commandré, P. Gauthier, G. Boissonnet, S. Salvador, and D. Schweich, " Biomass pyrolysis experiments in an analytical entrained flow reactor between 1073 K and 1273 K," *Fuel*, vol. 87, no. 7, pp. 1155-1164, 2008.
- [16] C. J. Ellens and R. C. Brown, "Optimization of a free-fall reactor for the production of fast pyrolysis bio- oil," *Bioresource Technology*, no. Accepted Manuscript.

- [17] A. Oasmaa and D. Meier, "Norms and standards for fast pyrolysis liquids: 1. Round robin test," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 73, no. 2, pp. 323-334, 6// 2005.
- [18] A. Pattiya, J. O. Titiloye, and A. V. Bridgwater, "Fast pyrolysis of cassava rhizome in the presence of catalysts," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 81, no. 1, pp. 72-79, 2008.
- [19] J. M. Encinar, J. F. González, G. Martínez, and S. Román, "Catalytic pyrolysis of exhausted olive oil waste," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 85, no. 1-2, pp. 197-203, 2009.
- [20] E. Pütün, B. B. Uzun, and A. E. Pütün, "Production of bio-fuels from cottonseed cake by catalytic pyrolysis under steam atmosphere," *Biomass and Bioenergy*, vol. 30, no. 6, pp. 592-598, 2006.
- [21] M. I. Nokkosmäki, E. T. Kuoppala, E. A. Leppämäki, and A. O. I. Krause, "Catalytic conversion of biomass pyrolysis vapours with zinc oxide," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 55, no. 1, pp. 119-131, 5// 2000.
- [22] O. D. Mante, F. A. Agblevor, and R. McClung, "Fluid catalytic cracking of biomass pyrolysis vapors," *Biomass Conversion and Biorefinery*, vol. 1, no. 4, pp. 189-201, 2011.
- [23] M. M. Barbooti, F. K. Matlub, and H. M. Hadi, "Catalytic pyrolysis of Phragmites (reed): Investigation of its potential as a biomass feedstock," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 98, no. 0, pp. 1-6, 11// 2012.
- [24] O. D. Mante, F. A. Agblevor, S. T. Oyama, and R. McClung, "The influence of recycling non-condensable gases in the fractional catalytic pyrolysis of biomass," *Bioresource Technology*, vol. 111, pp. 482-90, May 2012.
- [25] L. Qiang, L. Wen- Zhi, and Z. Xi- Feng, "Overview of fuel properties of biomass fast pyrolysis oils," *Energy Conversion and Management*, vol. 50, no. 5, pp. 1376-1383, 2009.
- [26] H. Zhang, R. Xiao, H. Huang, and G. Xiao, "Comparison of non-catalytic and catalytic fast pyrolysis of corncob in a fluidized bed reactor," *Bioresour Technol*, vol. 100, no. 3, pp. 1428-34, Feb 2009.
- [27] H. Zhang *et al.*, "Hydrodynamics of a novel biomass autothermal fast pyrolysis reactor: Solid circulation rate and gas bypassing," *Chemical Engineering Journal*, vol. 181-182, pp. 685-693, 2/1/ 2012.
- [28] A. Pattiya, S. Sukkasi, and V. Goodwin, "Fast pyrolysis of sugarcane and cassava residues in a free-fall reactor," *Energy*, vol. 44, no. 1, pp. 1067-1077, 8// 2012.
- [29] A. Pattiya and S. Suttibak, "Production of bio-oil via fast pyrolysis of agricultural residues from cassava plantations in a fluidised-bed reactor with a hot vapour filtration unit," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 95, pp. 227-235, 2012.

- [30] C. Paenpong, S. Inthidech, and A. Pattiya, "Effect of filter media size, mass flow rate and filtration stage number in a moving-bed granular filter on the yield and properties of bio- oil from fast pyrolysis of biomass," *Bioresource Technology*, vol. 139, pp. 34-42, 7// 2013.
- [31] S. Czernik and A. V. Bridgwater, "Overview of applications of biomass fast pyrolysis oil," (in English), *Energy & Fuels*, vol. 18, no. 2, pp. 590-598, Mar-Apr 2004.
- [32] H.-y. Li, Y.-j. Yan, and Z.-w. Ren, "Online upgrading of organic vapors from the fast pyrolysis of biomass," *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, vol. 36, no. 6, pp. 666-671, 12// 2008.

การประยุกต์ Axiomatic Design และเมทริกซ์ข้อจำกัดในกระบวนการออกแบบเชิงวิศวกรรม

An Application of Axiomatic Design and Constraints Relation Matrix in Engineering Design Process

ศีกฤทธิ พรหมสุ้ย ณัฐวุฒิ จันทร์ทอง

ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

Kuekrit Promsui Nattawut Jantong

Department of Production Engineering King Mongkut's University of Technology North Bangkok

1518 Pracharat 1 Road, Wongsawang, Bangsue, Bangkok 10800

*Corresponding author: Email: kuek-rit@outlook.com

บทคัดย่อ

ในกระบวนการออกแบบทางวิศวกรรมนักออกแบบมักต้องมีการแก้ไขข้อผิดพลาดอยู่เสมอ เพื่อให้สิ่งที่ออกแบบนั้นสามารถทำงานได้ตามข้อกำหนด ทั้งในด้านประโยชน์ใช้สอยและข้อจำกัดการใช้งานต่าง ๆ ความจำเป็นที่ต้องมีการแก้ไขข้อผิดพลาดส่วนใหญ่เกิดจากการที่นักออกแบบไม่สามารถวิเคราะห์ความต้องการของลูกค้าได้อย่างครบถ้วนทั้งในช่วงเริ่มต้นและระหว่างกระบวนการออกแบบ เพื่อลดปัญหาดังกล่าว งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้ทฤษฎี Axiomatic Design ในการวิเคราะห์โครงสร้างฟังก์ชันการทำงานและออกแบบชิ้นส่วนต่าง ๆ โดยอาศัยเมทริกซ์ข้อจำกัดเป็นเกณฑ์ในการควบคุมเพื่อลดทางเลือกในการออกแบบ ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นข้อจำกัดด้านการใช้งานที่สัมพันธ์กับโมดูลหลัก และข้อจำกัดด้านเทคนิคที่มีในระดับย่อยลงไป จากความเข้าใจถึงความสัมพันธ์ของข้อจำกัดในระดับต่าง ๆ ข้อจำกัดทั้งหมดจะถูกนำมาพิจารณาพร้อมกับทุกชิ้นส่วนในระหว่างกระบวนการออกแบบ ทำให้มั่นใจว่าไม่มีข้อจำกัดใดถูกมองข้ามเพื่อลดปัญหาในการออกแบบ

คำสำคัญ: ทฤษฎีเอ็กซีแมติกดีไซน์ เมทริกซ์ข้อจำกัด การออกแบบทางวิศวกรรม

ABSTRACT

Redesign often occurs during the process of the engineering design to meet specifications of customer requirements in term of functional requirements and usage limitations, since the requirements cannot be completely analyzed at the beginning and during the design process. To reduce this problem, this research proposes the application of using axiomatic design theory to analyze the function structure and physical design by applying the Constraint Relation Matrix (CRM), that was developed to consider the relationship between the design solution and design constraints at every step of the decision making for reducing the possible alternatives of design solution. The design constraints are classified into two types: operation constraints, which are considered in module level, and technique constraints, which are considered in sub module until part level. By understanding the relationship of constraints at every level, all constraints will be considered together with all component

parts related during the design process for confirming, that all constraints will be considered and the designer will not face to the problem of the redesign.

Keyword: Axiomatic Design, Constraint Relation Matrix, Engineering Design.

1. บทนำ

การออกแบบทางวิศวกรรมเพื่อให้ได้สิ่งประดิษฐ์หรือชิ้นส่วนทางกล ในแต่ละทฤษฎีการออกแบบจะมีการกำหนดระเบียบวิธีการออกแบบและมุมมองของกระบวนการออกแบบที่แตกต่างกัน โดยมีจุดประสงค์เพื่อให้เข้าใจหน้าที่การทำงานของระบบที่ต้องการออกแบบและสามารถลดความซับซ้อนหรือความไม่แน่นอนในการออกแบบทางวิศวกรรม ขั้นตอนในการออกแบบจะเป็นการแปลงความต้องการของลูกค้าเป็นหน้าที่การทำงานและนำไปสู่ทางเลือกในการออกแบบเพื่อคัดเลือกทางเลือกที่ทำให้ผลิตภัณฑ์หรือชิ้นส่วนนั้นสามารถทำงานได้ตรงตามต้องการ ดังนั้นการเข้าใจถึงโครงสร้างผลิตภัณฑ์ (Product Structure) รวมถึงการประเมินทางเลือกในการออกแบบ จะนำไปสู่การได้มาซึ่งแบบหรือชิ้นส่วนที่เหมาะสม [1]

ปัญหาส่วนใหญ่ที่มักพบในการออกแบบคือ การได้มาซึ่งโครงสร้างผลิตภัณฑ์นั้นจะอาศัยประสบการณ์ของนักออกแบบหรือวิศวกรที่มีความเชี่ยวชาญในสาขานั้นเป็นหลัก ทำให้นักออกแบบที่ขาดประสบการณ์หรือไม่เชี่ยวชาญในสาขานั้นไม่สามารถออกแบบสิ่งประดิษฐ์ได้บรรลุตามเป้าหมายที่ต้องการ หรืออาจใช้เวลาในกระบวนการออกแบบนาน ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้จะนำเสนอระเบียบวิธีการออกแบบทางวิศวกรรมอย่างเป็นระบบ เพื่อให้ให้นักออกแบบสามารถเข้าใจลำดับขั้นตอนของกระบวนการออกแบบที่ชัดเจนโดยมุ่งเน้นให้นักออกแบบที่ขาดประสบการณ์ในการออกแบบสามารถออกแบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้ทฤษฎี Axiomatic Design ในการอ้างอิงและทำความเข้าใจมุมมองของกระบวนการออกแบบ ซึ่งเป็นขั้นตอนหลักในการเรียบ

เรียงระเบียบวิธีการออกแบบ เพื่อออกแบบทางเลือกในการออกแบบให้สอดคล้องกับฟังก์ชันการทำงานตามความต้องการของลูกค้า โดยอยู่ภายใต้ข้อจำกัดในการออกแบบ ซึ่งกระบวนการออกแบบนี้จะช่วยให้นักออกแบบมองข้อจำกัดในการออกแบบได้อย่างครอบคลุมและลดการลองผิดลองถูกซึ่งส่งผลให้กระบวนการออกแบบดำเนินไปอย่างราบรื่น กล่าวคือไม่มีชิ้นส่วนใดเกิดข้อขัดแย้งกับชิ้นส่วนอื่น ๆ ในระหว่างกระบวนการออกแบบ

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในช่วงเริ่มต้นของการคิดค้นวิธีการออกแบบที่เป็นระบบ Pahl *et al.* [2] กล่าวถึง การออกแบบทางวิศวกรรมอย่างเป็นระบบโดยใช้เทคนิคและประสบการณ์ในการออกแบบเพื่อให้สามารถจินตนาการถึงฟังก์ชันเพื่อแยกฟังก์ชันย่อย จากนั้นค้นหากลุ่มชิ้นส่วนหรือโมดูลต่าง ๆ โดยรวมเพื่อตอบสนองต่อฟังก์ชันนั้น ๆ [3-4] ต่อมามีการพัฒนาระเบียบวิธีการออกแบบ โดยเริ่มต้นจากการวิเคราะห์ฟังก์ชันหลักของการทำงาน จากนั้นค้นหาทางเลือกในการออกแบบทางกายภาพที่ตอบสนองต่อฟังก์ชันหลักนั้นแล้วจึงแบ่งฟังก์ชันย่อย และดำเนินการต่อไปจนกระบวนการออกแบบเสร็จสิ้น [5] ซึ่งเป็นจุดเด่นที่ทำให้การแบ่งฟังก์ชันย่อยสามารถจินตนาการได้ง่ายกว่าและเป็นจุดที่แตกต่างจากการออกแบบของ Pahl *et al.* [2]

นอกจากนี้ยังมีทฤษฎีการออกแบบที่กล่าวถึงหลักการทางฟิสิกส์เป็นแนวคิดหลัก [6-8] กล่าวคือ การใช้งานการออกแบบทางวิศวกรรมโดยใช้ทฤษฎี เอฟ บี เอส (Function-Behavior-Structure; FBS) โดยส่วนที่เป็นจุดเด่นของทฤษฎีเป็นการวิเคราะห์พฤติกรรมที่คาดหวัง (Expected Behavior; Be) จากนั้นคิดค้นแต่ละแนวคิดและหาค่าพฤติกรรมของระบบ (System Behavior; Bs) และทำการ

หาพื้นที่ทับซ้อนกันของ Be และ Bs เพื่อตัดสินใจเลือกแนวคิดจากพื้นที่ได้กราฟที่ทับซ้อนกัน

Suh [9] นำเสนอทฤษฎี Axiomatic Design ที่มีมุมมองของกระบวนการออกแบบ 4 มุมมอง คือ ด้านความต้องการของลูกค้า (Customer Domain; CD) ด้านหน้าที่การทำงาน (Functional Domain; FD) ด้านการออกแบบและด้านกระบวนการผลิต ลดความซับซ้อนในการออกแบบ [10] โดยทฤษฎีนี้มีจุดเด่นคือ การพิจารณาฟังก์ชันการทำงานและทางเลือกในการออกแบบเป็นแบบหนึ่งต่อหนึ่ง ซึ่งเป็นการลดความซับซ้อนในงานออกแบบ [11] โดย Suh [12] กล่าวว่า ทุกแนวคิดในการออกแบบต้องอยู่ภายใต้ข้อจำกัดในการออกแบบ

ในการวิเคราะห์ข้อจำกัดในการออกแบบ Johannessson และ Claesson [13] ได้เพิ่ม Cs เข้าไปในกระบวนการสลับคิดซ้ำๆ ซึ่งกล่าวถึงการที่ Cs จะเป็นตัวกำหนดแนวคิดในการออกแบบในลำดับถัดไป ในปัจจุบันทฤษฎี Axiomatic Design มีการพัฒนาเป็น Fuzzy Axiomatic Design (FAD) โดย Kannan [14] ประยุกต์ใช้ FAD ในการวิเคราะห์เพื่อเลือกผู้ส่งมอบในห่วงโซ่อุปทานในเชิงสิ่งแวดล้อม ในด้านการออกแบบเชิงวิศวกรรมเครื่องมือหนึ่งที่ถูกนำไปใช้ร่วมกับ Axiomatic Design อย่างแพร่หลาย คือ เครื่องมือการกระจายการทำงานเชิงคุณภาพ (Quality Function Deployment; QFD) โดย M. Yang [15] นำไปใช้ในการออกแบบทางวิศวกรรมเพื่อวิเคราะห์ข้อกำหนดต่าง ๆ ทางด้านสิ่งแวดล้อม

จากทฤษฎีที่กล่าวมาข้างต้นการช่วยให้นักออกแบบที่ขาดประสบการณ์สามารถดำเนินการออกแบบได้โดยลดการลองผิดลองถูก ภายในงานวิจัยจึงเลือกใช้ทฤษฎี Axiomatic Design เนื่องจากในวิธีการสลับคิดซ้ำๆ ที่มีจุดเด่นเพื่อให้นักออกแบบสามารถค้นหาทางเลือกในการออกแบบให้สอดคล้องกับความต้องการที่ละฟังก์ชันแบบหนึ่งต่อหนึ่ง ซึ่งช่วยลดความผิดพลาดจากการออกแบบที่ฟังก์ชันไม่ครบถ้วน นอกจากฟังก์ชันที่ครบถ้วนข้อจำกัดในการออกแบบก็เป็นอีกส่วนที่สำคัญต่อ

การออกแบบเช่นกัน ดังนั้นภายในงานวิจัยได้พัฒนาเครื่องมือช่วยในการวิเคราะห์ข้อจำกัดในการออกแบบเพื่อให้มั่นใจได้ว่าทางเลือกในการออกแบบที่เลือกใช้จะไม่ขัดแย้งกับข้อจำกัดในการออกแบบ

3. เปรียบวิธีการออกแบบ

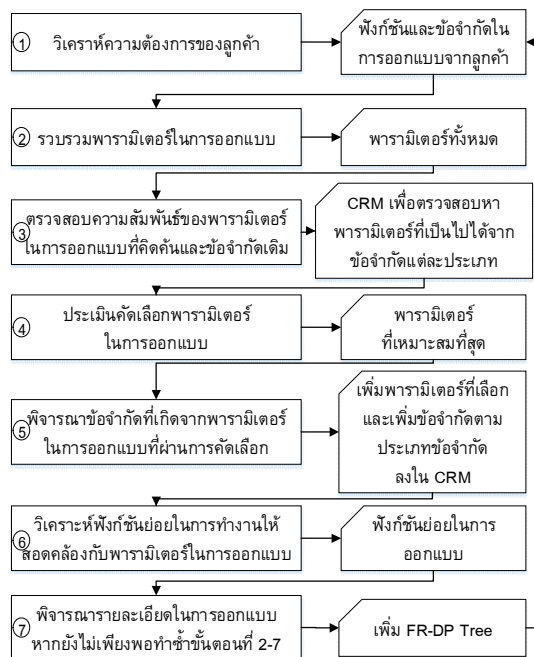
ในงานวิจัยนี้แสดงการประยุกต์ใช้ทฤษฎี Axiomatic Design ในกระบวนการออกแบบสิ่งประดิษฐ์ ทำการวิเคราะห์เพื่อหาฟังก์ชันการทำงาน และทางเลือกในการออกแบบที่มีความสัมพันธ์กันและเหมาะสมที่สุด ซึ่งขั้นตอนการพิจารณาจะอาศัยวิธีการสลับคิดซ้ำๆ เพื่อให้เกิดการแบ่งแยกฟังก์ชันการทำงานและการคิดค้นทางเลือกในการออกแบบอย่างเป็นระบบ

นอกจากการออกแบบทางเลือกในการออกแบบได้ครบถ้วนตามฟังก์ชันที่ต้องการแล้ว นักออกแบบต้องคำนึงถึงข้อจำกัดในการออกแบบ โดยภายในงานวิจัยนี้จำแนกข้อจำกัดในการออกแบบออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ ข้อจำกัดด้านการทำงาน (Operation Constraints; OC) และข้อจำกัดด้านเทคนิค (Technique Constraints; TC) แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 1 ซึ่งการแบ่งกลุ่มข้อจำกัดนี้สามารถช่วยให้นักออกแบบคำนึงถึงมุมมองการกำหนดข้อจำกัดได้ครอบคลุมยิ่งขึ้น

ตารางที่ 1 ประเภทของข้อจำกัดในการออกแบบ

ข้อจำกัดด้านการทำงาน (Operation Constraints; OC)		
End-user Operation	EO	ด้านการทำงานของผู้ใช้
Maintenance	MT	ด้านการบำรุงรักษาอุปกรณ์
Set Up	Se	ด้านการเริ่มต้นใช้งาน
Material	Ma	ด้านลักษณะของวัตถุดิบ
ข้อจำกัดด้านเทคนิค (Technique Constraints; TC)		
Geometry	G	ด้านรูปร่าง/พื้นผิวภายนอก
Position	P	ด้านตำแหน่ง/ระยะ
Energy	E	ด้านพลังงาน
Properties Specifically	S	ด้านลักษณะจำเพาะที่ต้องการ
Assembly	A	ขนาดการประกอบ/ค่าเผื่อ

จากการพัฒนาแนวคิดในการออกแบบข้างต้น ในงานวิจัยนี้สามารถสรุปขั้นตอนการออกแบบสิ่งประดิษฐ์ใหม่ ได้ 7 ขั้นตอน ดังรูปที่ 1 เป็นขั้นตอนในการออกแบบโดยประยุกต์ใช้ Axiomatic Design ในขั้นตอนการวิเคราะห์ซ้ำๆ ร่วมกับการวิเคราะห์ข้อจำกัดในการออกแบบโดยใช้เครื่องมือที่พัฒนาขึ้น มาคือ เมทริกซ์ความสัมพันธ์ข้อจำกัด(Constraints Relation Matrix; CRM) ดังรูปที่ 2 ซึ่งสามารถจำแนกรายละเอียดของขั้นตอนทั้ง 7 ขั้นตอนได้ตามขั้นตอนที่ 3.1 ถึงขั้นตอนที่ 3.7



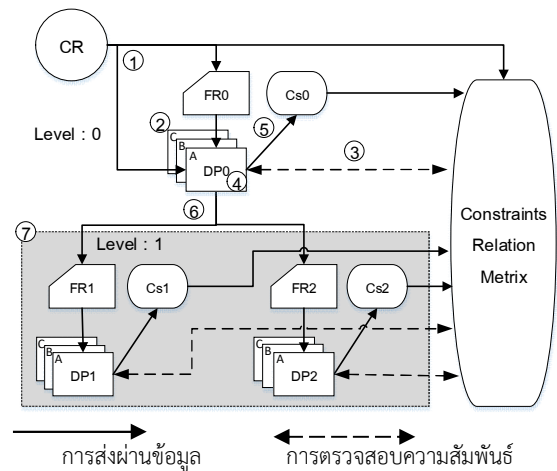
รูปที่ 1 ขั้นตอนการดำเนินงานและผลที่ได้ในแต่ละขั้นตอน โดยใช้วิธีการ Zig-zagging ร่วมกับ CRM

3.1 วิเคราะห์ความต้องการของลูกค้า

ในขั้นตอนแรกของการออกแบบสิ่งประดิษฐ์ใหม่ กระบวนการในการออกแบบเริ่มต้นจากรับข้อมูลความต้องการของลูกค้า จากนั้นต้องแปลงความต้องการของลูกค้าให้เป็นฟังก์ชันที่ต้องการ (Functional Requirement; FR) ที่ตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้า (Customer Requirement; CR) พร้อมทั้งระบุข้อจำกัดในการออกแบบ (Constraints; Cs) เพื่อค้นหาทางเลือกในการออกแบบ (Design Parameter; DP) ที่เป็นไปได้ทั้งหมดในขั้นตอน

ถัดไป โดยกระบวนการออกแบบจะแบ่งเป็นระดับตามการแบ่งฟังก์ชันย่อยดังนี้

- ระดับอุปกรณ์ (Level:0) ประกอบด้วย FR0, DP0, Cs0 เป็นระดับการวิเคราะห์ความต้องการของลูกค้า
- ระดับโมดูลหลัก (Level:1) ประกอบด้วย FR1, DP1, Cs1 หรือตัวเลขอื่น ๆ 1 หลัก
- ระดับโมดูลย่อย (Level:2) ประกอบด้วย เช่น FR11, DP11, Cs11 หรือตัวเลขอื่น ๆ 2 หลัก
- ระดับชิ้นส่วน (Level:3) ที่แทนด้วยตัวเลข 3 หลัก ซึ่งถ้าหากมีการแบ่งย่อยมากขึ้นตามการแบ่งฟังก์ชันย่อยสามารถระบุเป็นระดับที่ 4, 5 หรือ 6 ต่อไป



รูปที่ 2 แผนภูมิขั้นตอนการดำเนินงานและการส่งผ่านข้อมูลในระหว่างการออกแบบโดยใช้วิธีการ Zig-zagging ร่วมกับ CRM

3.2 รวบรวมทางเลือกในการออกแบบ

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการค้นหาทางเลือกในการออกแบบที่มีการคำนึงถึงหลักการทางวิศวกรรม โดยสามารถตอบสนองต่อฟังก์ชันการทำงานที่ตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้าได้ตามเป้าหมาย ซึ่งพบว่าความหลากหลายของทางเลือกในการออกแบบจะมาจากประสบการณ์และการค้นคว้าของนักออกแบบ โดยทางเลือกเหล่านี้จะใช้สัญลักษณ์ A, B, หรือตัวอักษรอื่น ๆ ต่อท้าย DP เหล่านั้น ตัวอย่างเช่นทางเลือกในการออกแบบของ DP0 ถ้ามี 3 ทางเลือก ได้แก่ DP0-A, DP0-B และ DP0-C

3.3 ประเมินทางเลือกในการออกแบบที่มีการพิจารณาข้อจำกัดต่าง ๆ

ขั้นตอนนี้จะนำทางเลือกมาเปรียบเทียบกับข้อจำกัดในการออกแบบทั้งหมด โดยใช้เครื่องมือ CRM ซึ่งพิจารณาว่าทางเลือกในการออกแบบที่จะผ่านการคัดเลือกไปสู่ขั้นตอนถัดไป ต้องไม่ขัดแย้งกับข้อจำกัดใด ๆ หากพบทางเลือกใดขัดแย้งกับข้อจำกัดให้พิจารณาตัดทางเลือกนั้นออก เนื่องจากทางเลือกเหล่านั้นไม่สามารถเกิดขึ้นได้จริงในงานออกแบบ

จากตารางที่ 2 เป็นตัวอย่างการใช้ CRM ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นระหว่าง DP และ Cs โดยการวิเคราะห์เริ่มต้นจากการนำทางเลือกในการออกแบบทั้งหมดใส่ลงในตารางหลักที่ 1 ซึ่งในตัวอย่างมีจำนวน 3 ทางเลือก ประกอบไปด้วย DP0-A, DP0-B และ DP0-C จากนั้นใส่ข้อจำกัดในการออกแบบที่มีในตารางแถวที่ 1 ในตัวอย่างประกอบด้วย Cs0-1, Cs0-2 และ Cs0-3 โดยการพิจารณาจะใส่ตัวเลข 0,1 หรือ -1 ตามชนิดความสัมพันธ์ที่พบ ตัวอย่างเช่น DP0-A จะมีความสัมพันธ์กับ 2 ข้อจำกัด คือ Cs0-1 และ Cs0-3 แต่เมื่อสังเกตที่ DP0-C จะเห็นว่ามีความสัมพันธ์แบบขัดแย้ง(-1) เกิดขึ้นกับ Cs0-2 ดังนั้นทางเลือก DP0-C จะถูกพิจารณาเพื่อตัดออกจากกระบวนการออกแบบในขั้นตอนนี้

ตารางที่ 2 ตัวอย่าง CRM ที่ใช้ในการประเมินความสัมพันธ์ระหว่าง DP และ Cs

	Cs0-1	Cs0-2	Cs0-3	
DP0-A	1	0	1	0 ไม่มีความสัมพันธ์กัน 1 มีความสัมพันธ์กัน -1 ขัดแย้งกัน
DP0-B	1	1	0	
DP0-C	0	-1	1	

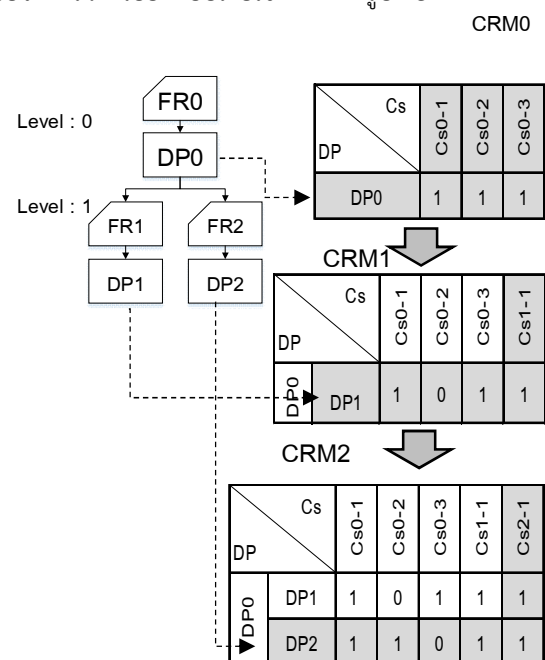
แต่ในกรณีที่ต้องการคงทางเลือกนั้นไว้ นักออกแบบต้องพิจารณาเพื่อทำการปรับปรุงทางเลือกในระดับก่อนหน้า ที่ทำให้เกิดข้อขัดแย้งนี้ ส่งผลให้ข้อจำกัดต่าง ๆ เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ดังนั้นต้องพิจารณาความสัมพันธ์ของทางเลือกและข้อจำกัดในระดับต่าง ๆ ใหม่ทั้งหมด เพื่อไม่ให้เกิดความขัดแย้งขึ้น

3.4 ประเมินคัดเลือกทางเลือกในการออกแบบ

ขั้นตอนนี้เป็นการประเมินคัดเลือกทางเลือกในการออกแบบที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งการประเมินคัดเลือกพามีเตอร์มีด้วยกันหลายวิธี เช่น Ranking Method, Datum Method และ Kesseling Method เป็นต้น การเลือกวิธีการประเมินแบบใดนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะของข้อมูลที่มีและมุมมองที่ต้องการในการเปรียบเทียบ อย่างไรก็ตามไม่ว่าจะใช้การประเมินแบบใด สิ่งสำคัญคือการกำหนดเกณฑ์การประเมินที่เหมาะสม กล่าวคือต้องเป็นเกณฑ์ที่สามารถเปรียบเทียบความแตกต่างของแต่ละทางเลือกในการออกแบบได้

3.5 พิจารณาข้อจำกัดที่เกิดจากทางเลือกในการออกแบบที่ผ่านการคัดเลือก

หลังจากการประเมินคัดเลือกเมื่อได้ทางเลือกในการออกแบบที่เหมาะสมที่สุดจากการประเมินแล้วต้องทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของทางเลือกที่ได้มารวมกับข้อจำกัดในการออกแบบโดยใช้ CRM ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 การใช้งาน CRM โดยการขยายแถวและหลักเพื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างทางเลือกที่เลือกและข้อจำกัดในการออกแบบ

จากตัวอย่างในรูปที่ 3 เป็นการเพิ่มทางเลือกในการออกแบบที่ผ่านการประเมินคัดเลือกทีละ DP โดยทุกครั้งที่มีการเพิ่ม DP จะมีการเพิ่ม Cs เข้าไปด้วยเสมอ ซึ่งจากภาพในส่วน CRM0 เป็นการเพิ่มทางเลือกของ DPO ที่ผ่านการประเมินและเพิ่ม Cs0-1, Cs0-2 และ Cs0-3 เพื่อสร้างเป็นเมทริกซ์ CRM แรกสุด จากนั้นทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นโดยการเพิ่มตัวเลข 1, 0 และ -1 เพื่อแสดงความสัมพันธ์รูปแบบต่าง ๆ ดังตารางที่ 2 ถ้าหากพิจารณาแล้วพบความสัมพันธ์ที่ขัดแย้งกัน (-1) ต้องทำการปรับปรุงทางเลือกในการออกแบบเพื่อทำให้ CRM ไม่มีข้อขัดแย้งกัน (-1) ซึ่งจะเป็นการรีดีไซน์บางชิ้นส่วน

3.6 วิเคราะห์ฟังก์ชันย่อยในการทำงานให้สอดคล้องกับทางเลือกในการออกแบบ

ในขั้นตอนนี้เป็นการวิเคราะห์หาฟังก์ชันย่อยในการทำงานทั้งหมดที่ทำงานร่วมกันเพื่อให้ทางเลือกในการออกแบบที่ได้ในขั้นตอนก่อนหน้านี้ทำงานได้ตรงตามวัตถุประสงค์ โดยการแบ่งฟังก์ชันย่อย FR ย่อยต้องมีย่อย 2 FR ขึ้นไป และถือว่า FR ที่เกิดขึ้นนี้จะอยู่ใน Level ถัดไปจากฟังก์ชันเดิม ถ้าหากเกิดกรณีที่ไม่สามารถระบุ FR ย่อยได้มาก กว่า 1 FR นักออกแบบสามารถทำการระบุรายละเอียดการออกแบบของ DP นั้น ๆ โดยไม่ต้องวิเคราะห์ FR ต่อ เพื่อเตรียมการจัดทำชิ้นงานต้นแบบ

3.7 ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2 - 7 จนกระทั่งสามารถระบุรายละเอียดในการออกแบบได้ครบถ้วน

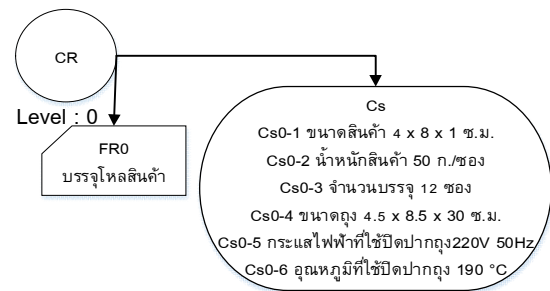
เมื่อได้ฟังก์ชันย่อยในการทำงานที่สอดคล้องกับทางเลือกในการออกแบบที่ผ่านการคัดเลือกแล้ว นักออกแบบจะต้องรวบรวมทางเลือกในการออกแบบที่ตอบสนองต่อฟังก์ชันการทำงานย่อยนั้น ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ 2 ของการออกแบบข้างต้น จากนั้นดำเนินการตามขั้นตอนถัดมาจนกว่าจะสามารถระบุรายละเอียดการออกแบบได้ครบถ้วน เพียงพอที่จะจัดทำชิ้นงานต้นแบบ

4. กรณีศึกษาการใช้ระเบียบวิธีการออกแบบในการออกแบบอุปกรณ์บรรจุโพลีลีน

ในงานวิจัยนี้จะทดลองออกแบบอุปกรณ์บรรจุโพลีลีนด้วยอาศัยขั้นตอนระเบียบวิธีการออกแบบ 7 ขั้นตอน ที่นำเสนอไปในหัวข้อที่ผ่านมาเป็นกรณีศึกษา จากการทดลองออกแบบตามขั้นตอนระเบียบวิธีการออกแบบตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1-7 ซึ่งแสดงใน 4.1-4.7

4.1 วิเคราะห์ความต้องการของลูกค้า

ความต้องการของลูกค้าที่ต้องการอุปกรณ์บรรจุโพลีลีนที่สามารถบรรจุโพลีลีนได้ที่เป็นซองเกลียวขนาดเล็กที่ไม่สามารถวางตั้งได้ โดยมีข้อกำหนดว่าการปิดปากถุงต้องปิดด้วยการซีลด้วยความร้อน



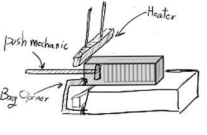
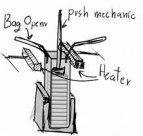
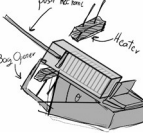
รูปที่ 4 การเปลี่ยนความต้องการของลูกค้าเป็นฟังก์ชันและข้อจำกัดในการออกแบบ

จากรูปที่ 4 เป็นการวิเคราะห์ความต้องการของลูกค้าเปลี่ยนเป็นฟังก์ชันหลักในการออกแบบ 1 ฟังก์ชัน ซึ่งแทนด้วย FR0 บรรจุโพลีลีน และข้อจำกัดในการออกแบบ 6 ข้อจำกัด Cs0-1 ถึง Cs0-6

4.2 รวบรวมทางเลือกในการออกแบบ

จากตารางที่ 3 ฟังก์ชันหลัก FR0 บรรจุโพลีลีน สามารถคิดค้นหลักการหรือแนวคิดที่เป็นไปได้มีทั้งหมด 3 แนวคิด เนื่องจากในฟังก์ชันนี้เป็นฟังก์ชันแรกของกระบวนการทำให้แนวคิดที่เป็นไปได้สามารถระบุได้เพียงลักษณะทิศทางการบรรจุเท่านั้น ได้แก่ DPO-A การบรรจุโพลีลีนแนวนอน DPO-B การบรรจุโพลีลีนแนวตั้ง และ DPO-C การบรรจุโพลีลีนแนวเอียงทำมุม

ตารางที่ 3 แสดงรายละเอียดของแนวคิดของ FR0

แนวคิดในการออกแบบ (DP)	รายละเอียด
 DP0-A อุปกรณ์บรรจุนวนอน	บรรจุนวนอนโดยการเรียงสินค้าและทำการสวมถุงนนวนอน
 DP0-B อุปกรณ์บรรจุนวนตั้ง	บรรจุนวนอนโดยการเรียงสินค้าและทำการสวมถุงนนวนตั้ง
 DP0-C อุปกรณ์บรรจุนวนทำมุม	บรรจุนวนอนโดยการเรียงสินค้าและทำการสวมถุงนนวนโดยการเรียงสินค้าและถุง

4.3 ตรวจสอบความสัมพันธ์ของทางเลือกในการออกแบบและข้อจำกัดเดิม

ตารางที่ 4 การตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างแต่ละ DP และ Cs โดยใช้ CRM

ข้อจำกัดในการออกแบบ (Constraint)	ทางเลือกในการออกแบบ (Design Parameter)					
	Cs0-1สินค้าขนาด 4 x 8 x 1 ซม.	Cs0-2 สินค้าหนัก 50 ก./ซอง	Cs0-3 จำนวนบรรจุ 12 ซอง	Cs0-4 ถุงขนาด 4.5 x 8.5 x 30 ซม.	Cs0-5 กระแสไฟฟ้าที่ใช้ปิดปากถุง 220v	Cs0-6 อุณหภูมิที่ใช้ปิดปากถุง 190 °C
ทางเลือกในการออกแบบ (Design Parameter)	Ma	Ma	Ma	Ma	Se	E
DP0-A บรรจุนวนอน	1	1	1	1	1	1
DP0-B บรรจุนวนตั้ง	1	1	1	1	1	1
DP0-C บรรจุนวนเอียงทำมุม	1	1	1	1	1	1

จากตารางที่ 4 เป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง DP และ Cs ซึ่งเป็นช่วงเริ่มต้นของการออกแบบฟังก์ชันแรกทุกอย่างเกิดจากความต้องการของลูกค้าทั้งสิ้น

ส่งผลให้ทุก ๆ แนวคิดของ DP0 เกี่ยวข้องกับ Cs ทุกข้อจำกัดและไม่ขัดแย้งกับ Cs ใด ๆ เลย ดังนั้น DP0 ทุกแนวคิดจึงถูกนำเข้าสู่กระบวนการประเมินคัดเลือก

4.4 ประเมินคัดเลือกทางเลือกในการออกแบบ

ตารางที่ 5 การประเมินคัดเลือกแนวคิดโดยใช้การประเมินประเภท Ranking Method

Criteria	DP0-A	DP0-B	DP0-C
สะดวกต่อการปฏิบัติงาน	3	2	1
ขนาดของอุปกรณ์	1	3	2
การรักษาความปลอดภัย	2	1	3
ง่ายต่อการบำรุงรักษา	3	2	1

	DP0-A	DP0-B	DP0-C
Copeland Rule	0	-4	-8
Rank-sum Rule	12	10	8
	A vs B	B vs C	A vs C
Majority Rule	DP-A	DP-B	DP-A

สีเทา คือ แนวคิดที่ผ่านการคัดเลือกในแต่ละวิธีคำนวณ

จากตารางที่ 5 เป็นการประเมินคัดเลือกประเภท Ranking Method และใช้การตัดสินใจ 3 วิธี ได้แก่ Copeland Rule, Rank-sum Rule และ Majority Rule ซึ่งผลจากการประเมินคัดเลือกพบว่า DP0-A วิธีการบรรจุนวนอน ได้รับการคัดเลือกเป็นอันดับหนึ่งจากผลการตัดสินใจจากทั้ง 3 วิธี และเมื่อผ่านการคัดเลือกแล้วให้เขียนแทน DP0-A คือ DP0

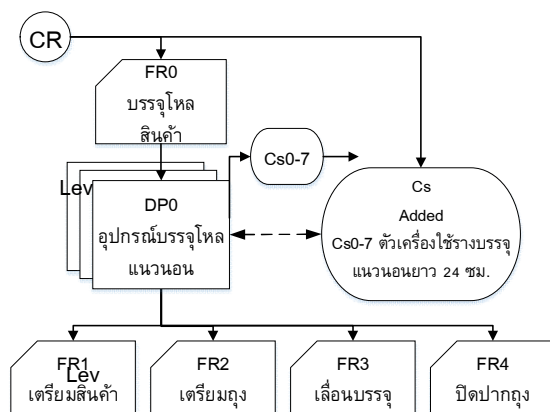
4.5 พิจารณาข้อจำกัดที่เกิดจากทางเลือกในการออกแบบที่ผ่านการคัดเลือก

จากตารางที่ 6 ทำการวิเคราะห์ว่า DP0 มีการเพิ่มข้อจำกัดหรือไม่ ในกรณีนี้มีการเพิ่ม DP0 การบรรจุนวนอน ซึ่งหมายความว่า รางบรรจุนวนต้องวางราบและต้องมีขนาดไม่น้อยกว่าสินค้า 12 ซองเรียงติดกันในนวนอน ซึ่งก็คือ 24 ซม. ดังนั้นจึงมี Cs0-7 ตัวเครื่องใช้รางบรรจุนวนอนยาว 24 ซม. เพิ่มเข้าไปใน CRM ซึ่งจะเป็นหนึ่งในข้อจำกัดที่จะควบคุม DP อื่น ๆ ทั้งหมด

ตารางที่ 6 การเพิ่มข้อมูล DP และ Cs ลงใน CRM

ข้อจำกัดในการออกแบบ (Constraint)							
	Cs0-1สินค้าขนาด 4 x 8 x 1 ซม.	Cs0-2 สินค้าหนัก 50 ก./ช่อง	Cs0-3 จำนวนบรรจุ 12 ช่อง	Cs0-4 ถังขนาด 4.5 x 8.5 x 30 ซม.	Cs0-5 กระแสไฟฟ้าที่ใช้ปิดปากถุง 220v	Cs0-6 อุณหภูมิที่ใช้ปิดปากถุง 190 °C	Cs0-7 ตัวเครื่องใช้บรรจุแวนอนยาว 24 ซม.
ทางเลือกในการออกแบบ (Design Parameter)	Ma	Ma	Ma	Ma	Se	E	EO
DPOบรรจุโหลแวนอน	1	1	1	1	1	1	1

4.6 วิเคราะห์ฟังก์ชันย่อยให้สอดคล้องกับทางเลือกในการออกแบบ



รูปที่ 5 Function Decomposition ของ DP

จากรูปที่ 5 ทางเลือกในการออกแบบ DP0 อุปกรณ์บรรจุโหลแวนอน สามารถจำแนกฟังก์ชันหลักของอุปกรณ์ได้ 4 ฟังก์ชัน ได้แก่ FR1 การเตรียมสินค้า, FR2 การเตรียมถุงบรรจุ, FR3 การบรรจุโหล และ FR4 การปิดปากถุง

4.7 ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2 - 7 จนกระทั่งสามารถระบุรายละเอียดในการออกแบบได้ครบถ้วน

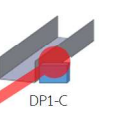
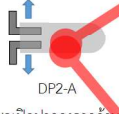
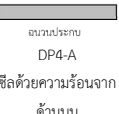
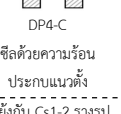
เมื่อดำเนินการออกแบบทั้ง 7 ขั้นตอน กับทุกฟังก์ชัน ประกอบด้วย FR1, FR2, FR3 และ FR4 ซึ่งทางเลือกที่ขัดแย้งกันใน CRM จะถูกตัดออก (สีเทาในตาราง) ในตารางที่ 7 และข้อจำกัดทั้งหมดที่เกิดขึ้นระหว่างการออกแบบสามารถจำแนกได้ดังตารางที่ 9

ตารางที่ 7 CRM ของการคัดเลือก DP1 จนถึง DP4

Cs																
	Cs0-1	Cs0-2	Cs0-3	Cs0-4	Cs0-5	Cs0-6	Cs0-7	Cs1-1	Cs1-2	Cs2-1	Cs2-2	Cs2-3	Cs3-1	Cs3-2	Cs3-3	Cs4-1
DP	Ma	Ma	Ma	Ma	Se	E	EO	A	G	P	A	E	P	E	G	P
DP1-A	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	-1	1
DP1-B	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0
DP1-C	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0
DP2-A	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
DP2-B	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	-1	1	0
DP2-C	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	-1	1	0
DP3-A	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0
DP3-B	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0
DP3-C	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0
DP4-A	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1
DP4-B	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1
DP4-C	1	0	1	1	1	1	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	1

จากตารางที่ 7 จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของทุก DP และ Cs โดยแบ่งตามกลุ่มตามตารางที่ 1 พบว่า มีข้อขัดแย้งกันเกิดขึ้น 4 ข้อขัดแย้ง ได้แก่ 1) DP1-A รางบรรจุสามารถปรับระยะได้ ขัดแย้งกับ Cs3-3 รางสินค้าขนาดเล็กกว่าถูง ซึ่งเป็นความขัดแย้งทางด้านรูปร่าง(G), 2) DP2-B ชุดเปิดปากดูจากด้านนอก และ 3) DP2-C ใช้แรงลมเปิดและยึดถุง ขัดแย้งกับ Cs3-2 แรงยึดถุงมากกว่าแรงที่สินค้าเลื่อนเข้า ซึ่งเป็นความขัดแย้งทางด้านแรงเสียดทาน(P), และข้อขัดแย้งข้อสุดท้ายคือ 4) DP4-C ซิลด้วยความร้อนประกบแนวตั้ง ขัดแย้งกับ Cs1-2 ถังวางเรียงแวนอน ซึ่งความขัดแย้งที่เกิดขึ้นขัดแย้งกับข้อจำกัดทางด้านรูปร่าง (G) ซึ่งแสดงเป็นภาพแนวคิดที่ผ่านการคัดเลือกและแนวคิดที่ถูกตัดออกในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 สรุปการเลือก DP ในการออกแบบ Level:1

DP FR	Alternative of Design Parameter		
FR1 เตรียมสินค้า	 DP1-A รางบรรจุปรับระยะได้ ขัดแย้งกับ Cs3-3 รางสินค้า ขนาดเล็กกว่าถู่	 DP1-B รางบรรจุขนาดเท่ากับ ความกว้างของสินค้า	 DP1-C รางบรรจุขนาดเท่ากับ ความยาวของสินค้า
FR2 เตรียมถู่	 DP2-A ชุดเปิดปากถู่จากด้าน ใน	 DP2-B ชุดเปิดปากถู่จากด้านนอก ขัดแย้งกับ Cs3-2 แรงยึด ถูงมากกว่าแรงที่สินค้า เลื่อนเข้า	 DP2-C ใช้แรงลมเปิดและยึดถู่ ขัดแย้งกับ Cs3-2 แรง ยึดถูงมากกว่าแรงที่ สินค้าเลื่อนเข้า
FR3 เลื่อนบรรจุ	 DP3-A ชุดเลื่อนถู่เข้าหาสินค้า	 DP3-B ชุดเลื่อนถู่เข้าไปใน ถู่	 DP3-C เลื่อนทั้งสินค้าและถู่ เข้าหากัน
FR4 ปิดปากถู่	 DP4-A ซิลด้วยความร้อนจาก ด้านบน	 DP4-B ซิลด้วยความร้อนจาก ด้านล่าง	 DP4-C ซิลด้วยความร้อน ประคบแนวตั้ง ขัดแย้งกับ Cs1-2 รางรูป ตัวยูวาลสินค้าเรียงติดกัน 12ช่องแนวนอน

ตารางที่ 9 ข้อจำกัดที่เกิดขึ้นในกระบวนการออกแบบ

No.Cs.	Type	รายละเอียด
Cs0-1	Ma	ขนาดสินค้า 4 x 8 x 1 ซม.
Cs0-2	Ma	น้ำหนักสินค้า 50 ก./ช่อง
Cs0-3	Ma	จำนวนบรรจุ 12 ช่อง
Cs0-4	Ma	ขนาดถู่ 4.5 x 8.5 x 30 ซม.
Cs0-5	Se	ใช้ไฟฟ้า 220V 50Hz ในการปิดปากถู่
Cs0-6	EO	ตัวเครื่องใช้รางบรรจุแนวนอนยาว 24 ซม.
Cs1-1	G	รางตัวยูวาลสินค้าเรียงติดกัน 12 ช่องแนวนอน
Cs1-2	A	รางบรรจุขนาด 4.5 x 8 x 25 ซม.
Cs2-1	P	เปิดปากถู่ได้ไม่น้อยกว่า 4.5 x 7.3 ซม.
Cs2-2	A	ส่วนที่อยู่ในถู่หนาไม่เกิน 3 มม.
Cs2-3	E	สามารถสร้างแรงยึดถู่ได้มากกว่าแรง
Cs3-1	P	ระยะเลื่อนไม่น้อยกว่า 24 ซม.
Cs3-2	E	แรงยึดถูงมากกว่าแรงที่สินค้าเลื่อนเข้า
Cs3-3	G	รางสินค้าขนาดเล็กกว่าถู่
Cs4-1	P	ระยะซิลจากปากถู่ไม่น้อยกว่า 4 ซม.
Cs4-2	G	จุดซิลกว้าง 5 มม. ยาว 15 ซม.

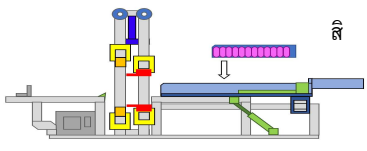
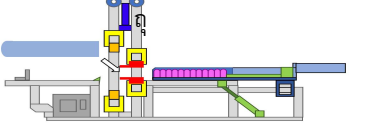
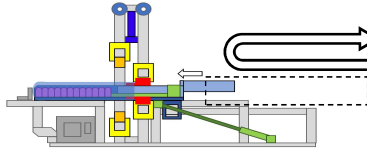
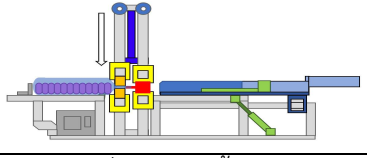
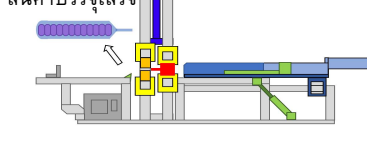
ตารางที่ 10 ความสัมพันธ์ของ FR และ DP ใน Level:1

DP FR	DP1	DP2	DP3	DP4
FR1	1	0	0	0
FR2	0	1	0	0
FR3	1	0	1	0
FR4	0	1	1	1

เมื่อเสร็จสิ้นการออกแบบในแต่ละระดับ (Level) สามารถสรุปความสัมพันธ์ของชิ้นส่วนและฟังก์ชันได้ดังตารางที่ 10 ซึ่งความสัมพันธ์เหล่านี้สามารถบอกได้ว่าในกระบวนการปรับปรุงการออกแบบหากต้องการให้ FR3 ทำงานต้องให้ชิ้นส่วน DP1 ทำงานก่อน แล้ว DP3 จึงเริ่มทำงาน จึงสามารถบรรลุได้ตามฟังก์ชัน FR3 และมี FR4 ที่

ต้องให้ DP2 และ DP3 ทำงานก่อน แล้ว DP4 จึงเริ่มทำงาน จึงจะบรรลุได้ตามฟังก์ชันของ FR4 ซึ่งการทำงานของชิ้นส่วนเหล่านี้ตามทฤษฎี Axiomatic Design ถือว่าเป็นความสัมพันธ์ของการทำงานในเชิงลำดับ (Uncoupled Design)

ตารางที่ 11 การทำงานของอุปกรณ์บรรจุโหลสินค้า

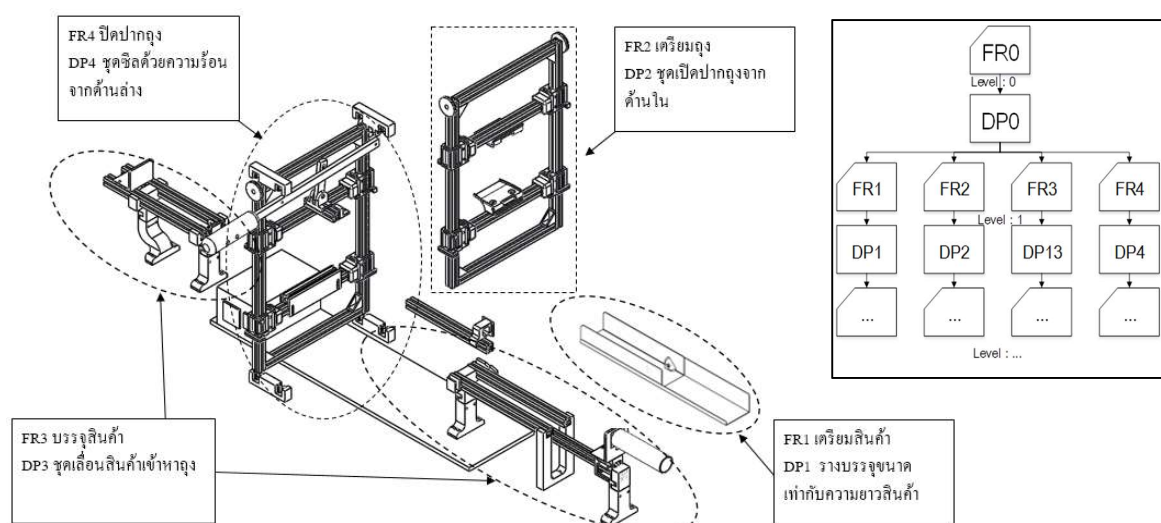
ขั้นตอน	รายละเอียดหลักการทำงานของอุปกรณ์
1.	บรรจุสินค้าเข้าไปในอุปกรณ์ 
2.	ใส่ถุงเข้าไปในอุปกรณ์ 
3.	เลื่อนรางสินค้าเข้าและเลื่อนรางออก 
4.	กดชุดให้ความร้อนเพื่อปิดปากถุง 
5.	นำสินค้าที่บรรจุเสร็จสิ้นออกจากอุปกรณ์ 

เมื่อดำเนินการออกแบบตามขั้นตอนกับทุกฟังก์ชันใน

การออกแบบจนเสร็จสิ้นอุปกรณ์สามารถทำงานได้ตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ แสดงในตารางที่ 11 โดยการทำงานผู้ปฏิบัติงานต้องทำการป้อนสินค้า ป้อนถุง เลื่อนรางบรรจุ และซีลปิดปากถุง ซึ่งผลการออกแบบสามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบและตัวอุปกรณ์สามารถช่วยให้กระบวนการบรรจุโหลทำได้รวดเร็วยิ่งขึ้น โดยรายละเอียดของชิ้นส่วนที่จำแนกตามฟังก์ชันหลัก แสดงดังรูปที่ 6 โดยอุปกรณ์มีฟังก์ชันเกิดขึ้นทั้งหมด 40 ฟังก์ชัน และ 40 ทางเลือกในการออกแบบ

ตารางที่ 12 การแบ่งกลุ่ม Cs ที่เกิดขึ้นในการออกแบบ

Level	Cs ทั้งหมดที่เกิดขึ้น	แบ่งตามกลุ่มและประเภทของข้อจำกัด	
		Operation Constraints (OC)	Technique Constraints (TC)
0	7	6 (3)Ma, (1)Se, (1)EO	1 (1)E
1	10	-	10 (3)G, (3)P, (2)E, 2(A)
2	17	1 (1)EO	16 (4)G, (6)A, (6)P
3	17	-	17 (2)P, (13)A, (2)E
4	7	-	7 (7)A



รูปที่ 6 Exploded view ของอุปกรณ์บรรจุโหลสินค้า โดยแยกตามกลุ่มชิ้นส่วนหลักของอุปกรณ์

เมื่อจำแนกข้อจำกัดในการออกแบบเป็นแต่ละประเภท แสดงดังตารางที่ 12 พบว่า Cs ที่เกิดขึ้นในช่วงแรกของการออกแบบเป็นประเภท Operation Constraints และเมื่อทำการออกแบบในระดับขั้นส่วน Technique Constraints ก็จะเป็นข้อจำกัดสำคัญที่เกิดขึ้น

5. สรุป

ในการแก้ไขปัญหการออกแบบทางวิศวกรรมโดยใช้ทฤษฎี Axiomatic Design ร่วมกับเครื่องมือ CRM ที่พัฒนาขึ้นพบว่า ข้อจำกัดในการออกแบบเป็นสิ่งสำคัญที่ช่วยให้นักออกแบบสามารถทำการออกแบบได้ตามวัตถุประสงค์ ซึ่ง CRM ก็เป็นอีกเครื่องมือหนึ่งที่ช่วยแสดงข้อจำกัดที่เกิดขึ้นในระหว่างการออกแบบ โดยจากการศึกษาพบว่าสามารถแบ่งข้อจำกัดออกเป็น 2 กลุ่มได้แก่ ข้อจำกัดในกลุ่มข้อจำกัดด้านการใช้งานและข้อจำกัดทางเทคนิค ซึ่งหากว่าสามารถระบุข้อจำกัดในการออกแบบได้ครบถ้วนจะช่วยลดการลองผิดลองถูกเพื่อให้ผลการออกแบบตอบสนองได้ตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการได้ดียิ่งขึ้น

จากการประยุกต์ใช้ทฤษฎีกับกรณีศึกษาการออกแบบอุปกรณ์บรรจุโพลีเอทิลีนพบว่า ข้อจำกัดในการออกแบบที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์ความต้องการของลูกค้า(Level:0) มักเป็นข้อจำกัดด้านการใช้งาน ซึ่งหากนักออกแบบสามารถวิเคราะห์ข้อจำกัดกลุ่มนี้ได้ชัดเจนและครบถ้วน ข้อจำกัดเหล่านี้จะกำหนดทิศทางการออกแบบที่ตรงตามความต้องการตั้งแต่ต้น และเมื่อดำเนินการออกแบบไปจนถึงระดับโมดูลหลัก(Level:1) โมดูลย่อย(Level:2) หรือจนถึงระดับขั้นส่วน มักเกิดข้อจำกัดด้านเทคนิค และเมื่อกระบวนการออกแบบไปถึงระดับที่แยกย่อยมากเพียงใด ข้อจำกัดประเภทการประกอบก็ยิ่งจะมีสัดส่วนการเกิดขึ้นมากขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากในการวิเคราะห์ระดับย่อยจนถึงขั้นส่วนประกอบ การกำหนดขนาดและพิถีพิถันความเผื่อต่าง ๆ ในการประกอบก็เป็นส่วนสำคัญ ที่ทำให้ผลการออกแบบสามารถทำงานได้ตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ

6. ข้อเสนอแนะ

การวิเคราะห์ข้อจำกัดในการออกแบบจะเป็นการกำหนดกรอบของแนวคิดของนักออกแบบซึ่งอาจจะตัดความเป็นไปได้ของทางเลือกไปตั้งแต่ต้น จึงอาจไม่เหมาะสมกับใช้ในงานออกแบบที่ใช้ความคิดสร้างสรรค์ และข้อขัดแย้งที่เกิดขึ้นเหล่านี้อาจสามารถได้รับการแก้ไขโดยใช้ทฤษฎีที่ช่วยแก้ไขปัญหในการออกแบบเช่น TRIZ หรือ Innovative theory design อื่น ๆ เข้ามาช่วยในการแก้ไขข้อขัดแย้ง แทนการตัดตัวเลือกเหล่านี้ออก

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] ณัฐวุฒิ จันทร์ทอง. “การลดความซับซ้อนในการออกแบบเชิงวิศวกรรมวารสารมหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์. ปีที่ 4 (ฉบับที่ 1) : 84-99, 2555.
- [2] G. Pahl, W. Beitz, J. Feldhusen, and K. H. Grote, “ Engineering Design - A Systematic approach,” Springer-Verlag, London, 2nd Ed., 2007.
- [3] N. Cross, “ Engineering Design Methods: Strategies for Product Design,” John Wiley & Son, West Sussex, 4th Ed., 2008.
- [4] ทศพร อัครรังษี และณัฐวุฒิ จันทร์ทอง. “ระเบียบวิธีการเพื่อการออกแบบชุดอุปกรณ์เสริมสำหรับเครื่องจักรอัตโนมัติ: กรณีศึกษาโมดูลหยิบจับชิ้นงานของเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์” วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. ปีที่ 11 (ฉบับที่ 2) : 1-13, 2016.
- [5] V. Hubka. and W.E. Eder, “Theory of Technical Systems – A Total Concept Theory for Engineering Design,” Springer-Verlag, Berlin, 1988.
- [6] J. S. Gero and U. Kannengiesser, “ The Situated Function- Behaviour- Structure Framework,” Design Studies, vol. 25, pp. 373-391, 2004.

- [7] J. S. Gero, “Design Prototypes – a Knowledge Representation Schema for Design,” *AI Magazine*, vol. 11(4), pp. 26-36, 1990.
- [8] Y. Umeda, and T. Tomiyama, “FBS modeling: Modeling scheme of function for conceptual design,” *Workshop on Qualitative Reasoning about Phys Systems*, Amsterdam, pp. 271–278, 1995.
- [9] N. P. Suh, “The Principles of Design,” Oxford University Press, New York, 1990.
- [10] N. P. Suh, “Complexity: Theory and Applications,” Oxford University Press, New York, 2005.
- [11] G. J. Park, “Analytic Methods for Design Practice,” Springer-Verlag, Germany, 2007.
- [12] N. P. Suh, “Axiomatic Design: Advances and Applications,” Oxford University Press, New York, 2001.
- [13] H. Johannesson and A. Claesson, “Systematic product platform design: A combined function means and parametric modeling approach,” *Journal of Engineering Design*, vol. 16(1), pp. 25-43, 2005.
- [14] D. Kannan, K. Govindan and S. Rajendran, “Fuzzy Axiomatic Design approach based green supplier selection: a case study from Singapore,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 96, pp. 194-208, 2015.
- [15] M. Yang, F. I. Khan, R. Sadiq and P. Amyotte, “A rough set- based quality function deployment (QFD) approach for environmental performance evaluation: a case of offshore oil and gas operations,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 19, pp. 1513-1526, 2011.

**การวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่
ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว**
Large Signal Stability Analysis
of Three-Phase Bridge Rectifier with Constant Power Loads

อภิชัย สุยะพันธุ์ กองพัน อารีรักษ์* และกองพล อารีรักษ์

กลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Apichai Suyapan Kongpan Areerak* and Kongpol Areerak

Power electronics, Energy, Machines, and Control Research Group

School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

*Corresponding author: Email: kongpan@sut.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น และการวิเคราะห์ระนาบเฟส โดยที่การทำให้เป็นเชิงเส้นเป็นวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็ก ในขณะที่การวิเคราะห์ระนาบเฟสเป็นวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ได้จากวิธีที่นำเสนอในบทความนี้จะถูกนำมาเปรียบเทียบกัน และการตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์เสถียรภาพจะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB ผลการตรวจสอบแสดงให้เห็นว่า การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น ไม่สามารถให้ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่มีความถูกต้อง ทั้งในกรณีที่โหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กและภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ ในขณะที่การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส นอกจากจะให้ผลที่มีความถูกต้องแม่นยำแล้ว ยังสามารถประมาณการสั่นไหวสูงสุดของสัญญาณของวงจรกรองได้อีกด้วย

คำสำคัญ: การวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ การวิเคราะห์ระนาบเฟส วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

ABSTRACT

This paper presents the large signal stability analysis of three-phase bridge rectifier with constant power load using linearization technique and phase-plane analysis. The linearization technique is a small signal stability analysis, while the phase-plane analysis is a large signal stability analysis. The analytical results from linearization technique are compared with those from phase-plane analysis. The intensive time-domain simulation using MATLAB is used to verify the analytical results. The results show that the stability analysis using linearization technique cannot provide an

accurate result for both small-signal and large-signal conditions. Otherwise, the phase-plane analysis can provide an accurate result with a good oscillation prediction of DC-link filter.

Keyword: Large Signal Stability Analysis, Phase-Plane Analysis, Three-Phase Bridge Rectifier, Constant Power Loads

1. บทนำ

โดยทั่วไป โหลดของระบบไฟฟ้ากำลังแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ โหลดแรงดันไฟฟ้าคงตัว (constant voltage loads : CVL) และโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (constant power loads : CPL) โดยโหลดแรงดันไฟฟ้าคงตัวเป็นโหลดที่ต้องการแรงดันไฟฟ้าคงที่สำหรับการทำงาน ยกตัวอย่างเช่น หลอดไส้ (incandescent lamp) โหลดตัวต้านทาน เป็นต้น ในขณะที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวเป็นพฤติกรรมของวงจรแปลงผันกำลัง เช่น วงจรแปลงผันเอชเป็นดีซี ดีซีเป็นดีซี ดีซีเป็นเอช และเอชเป็นเอช ที่มีการควบคุมสัญญาณขาออกให้เป็นไปตามความต้องการของผู้ใช้งาน ยกตัวอย่างเช่น วงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีที่มีการควบคุมแรงดันสัญญาณขาออก วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีการควบคุมความเร็วรอบ เป็นต้น [1-3] ซึ่งในปัจจุบัน โหลดของระบบไฟฟ้ากำลังโดยส่วนใหญ่จะเป็นวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุม เนื่องจากวงจรแปลงผันกำลังมีประสิทธิภาพสูง การดูแลบำรุงรักษาต่ำ และสามารถควบคุมการทำงานได้ง่าย จึงทำให้ได้รับความนิยมและใช้งานกันอย่างแพร่หลาย แต่วงจรแปลงผันกำลังเมื่อมีการควบคุมจะมีพฤติกรรมเปรียบเสมือนโหลดที่มีกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งโหลดในลักษณะนี้ จะมีลักษณะเป็นค่าตัวต้านทานติดลบ (negative impedance) ต่อระบบโดยรวม ซึ่งส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบได้ [4-8] ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับระบบไฟฟ้าที่มีโหลดเป็นแบบกำลังไฟฟ้าคงตัวจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างมาก เนื่องจากถ้าระบบไฟฟ้ากำลังขาดเสถียรภาพอาจส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุม หรือส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อระบบได้ และโหลดในลักษณะนี้นอกจากจะส่งผล

ต่อเสถียรภาพของระบบดังที่กล่าวไปในข้างต้นแล้วยังส่งผลทำให้ระบบมีความไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinearities) เกิดขึ้น กล่าวคือ เป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear systems) จากงานวิจัยในอดีตจนถึงปัจจุบัน การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยส่วนใหญ่จะใช้วิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น (linearization) ซึ่งเป็นวิธีการประมาณความไม่เป็นเชิงเส้นที่มีอยู่ในระบบให้มีความเป็นเชิงเส้นโดยอาศัยอนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor series) อันดับหนึ่ง จากนั้นใช้ทฤษฎีบทค่าเจาะจง (eigenvalue theorem) วิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ [5-10] โดยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นนี้เป็นวิธีที่ง่ายที่สุด แต่มีข้อจำกัดคือ ถ้าค่าเจาะจงอยู่บนแกนจินตภาพจะไม่สามารถสรุปได้ว่าระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นนั้นมีเสถียรภาพหรือขาดเสถียรภาพ [10] ซึ่งความไม่ชัดเจนดังกล่าวอาจทำให้การวิเคราะห์เสถียรภาพเกิดความผิดพลาดได้ และนอกจากนั้นแล้ววิธีการนี้เป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็ก (small signal stability analysis) ซึ่งทำให้การวิเคราะห์เสถียรภาพมีความถูกต้องเฉพาะในช่วงการทำงานที่แคบ (small range operation) ถ้าโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด อาจทำให้การวิเคราะห์เสถียรภาพเกิดความผิดพลาดได้เช่นกัน นอกจากวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นแล้ว จากงานวิจัยเพียงบางส่วนในอดีตจนถึงปัจจุบัน การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นยังสามารถทำได้โดยอาศัยวิธีการแบบไม่เป็นเชิงเส้น หรือวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ (large signal stability analysis) ซึ่งมีหลากหลายวิธี เช่น การวิเคราะห์ระนาบเฟส (phase-plane analysis) วิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ

(Lyapunov's direct method) วิธีฟังก์ชันพหุนาม (describing function) เกณฑ์ของโปพอฟ (Popov's criterion) และเกณฑ์วงกลม (circle criterion) เป็นต้น [9-13] โดยวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่เป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นโดยตรงจึงสามารถที่จะวิเคราะห์เสถียรภาพได้ในช่วงการทำงานที่กว้าง และให้ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่มีความถูกต้องแม่นยำ ดังนั้นบทความนี้จะนำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ซึ่งเป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นและโหลดของระบบมีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว การวิเคราะห์เสถียรภาพจะเริ่มต้นด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น จากนั้นจะใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส โดยบทความนี้เลือกใช้วิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส เนื่องจากเป็นวิธีการที่ง่าย มีการคำนวณไม่ซับซ้อน และให้ผลที่ถูกต้องแม่นยำ ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ได้จากวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส เพื่อแสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น มีความผิดพลาดเกิดขึ้น ดังนั้นบทความนี้จะเลือกวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ เพื่อลดความผิดพลาดดังกล่าว และทำให้ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีความถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น ซึ่งการตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ได้จากวิธีที่นำเสนอในบทความนี้จะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB ผลการตรวจสอบแสดงให้เห็นว่า การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น ไม่สามารถให้ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่มีความถูกต้องทั้งในกรณีที่โหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กและภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ ในขณะที่การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วย

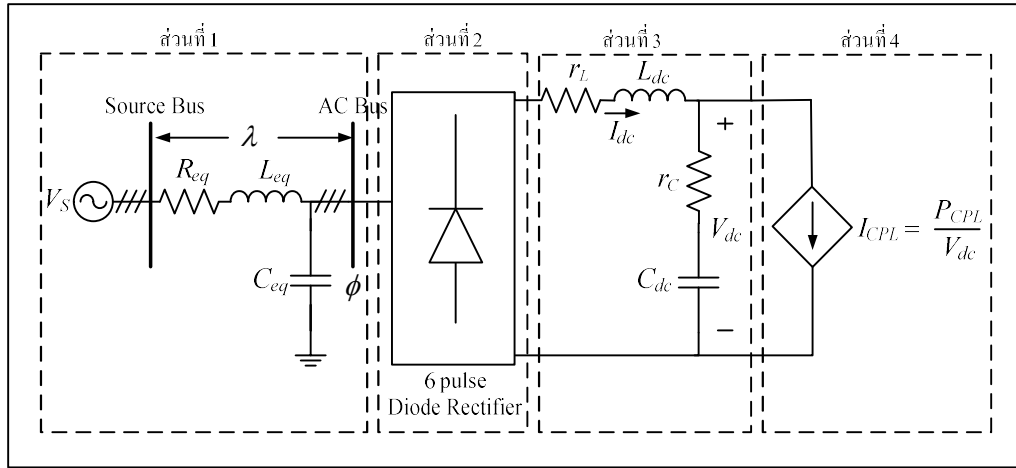
วิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส นอกจากจะให้ผลที่มีความถูกต้องแม่นยำแล้ว ยังสามารถประมาณการสั่นไหวสูงสุดของสัญญาณของวงจรกรองได้อีกด้วย

บทความนี้ประกอบไปด้วยสี่ส่วน คือ ส่วนที่หนึ่งเป็นบทนำ ส่วนที่สองเป็นการอธิบายระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ส่วนที่สามกล่าวถึงการวิเคราะห์เสถียรภาพ และการตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์ และส่วนที่สี่เป็นสรุปเพื่อใช้เป็นแนวทางสำหรับงานวิจัยในอนาคต

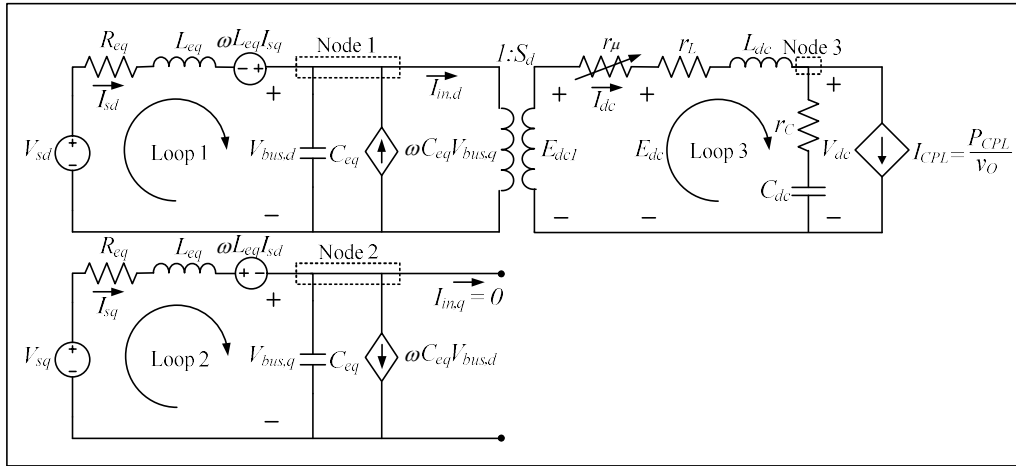
2. ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในบทความนี้คือ วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ แสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งประกอบด้วย 4 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟสแบบสมดุล โดยที่ V_s คือแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสแบบสมดุล R_{eq} , L_{eq} และ C_{eq} คือความต้านทาน ความเหนี่ยวนำ และความจุไฟฟ้าของสายส่งกำลังไฟฟ้า ตามลำดับ ส่วนที่ 2 ไดโอดเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ส่วนที่ 3 วงจรกรอง โดยที่ L_{dc} , C_{dc} , r_L และ r_C คือ ความเหนี่ยวนำ ความจุไฟฟ้า ความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำ และความต้านทานภายในตัวเก็บประจุ ของวงจรกรองตามลำดับ ซึ่งความต้านทาน ความเหนี่ยวนำ และความจุไฟฟ้า ของสายส่งกำลังไฟฟ้าและวงจรกรอง จะสมมติให้มีคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นและมีค่าคงที่ เพื่อลดความยุ่งยากและความซับซ้อนในการวิเคราะห์เสถียรภาพ และส่วนที่ 4 แหล่งจ่ายกระแสไม่อิสระแบบอุดมคติ ซึ่งใช้แทนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติที่ต่อขนานกับระบบผ่านวงจรกรอง โดยโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวนี้จะส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบดังที่กล่าวไว้แล้วข้างต้น

จากการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยวิธีดีคิว (DQ Method) และการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่พิสูจน์ได้ดังรายละเอียดที่นำเสนอไว้ใน [14] จะได้วงจรสมมูล



รูปที่ 1 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ



รูปที่ 2 วงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้าที่พิจารณานบนแกนหมุนดีคิว

อย่างง่ายของระบบไฟฟ้าที่พิจารณานบนแกนหมุนดีคิว ดังแสดงในรูปที่ 2 และจากการวิเคราะห์วงจรสมมูลอย่างง่ายที่ได้ด้วยกฎของเคอร์ชอฟฟ์ จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (time-invariant model) ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ซึ่งเป็นแบบจำลองที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ แสดงได้ดังสมการที่ (1) ซึ่งจากสมการจะสังเกตได้ว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเป็นแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยพจน์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นคือ $\frac{P_{CPL}}{C_{dc}V_{dc}}$ ซึ่งปรากฏอยู่ในสมการ $\dot{I}_{dc}$ และ $\dot{V}_{dc}$ ดังนั้นระบบไฟฟ้าที่พิจารณานี้จึงเป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น

$$\begin{cases} \dot{I}_{sd} = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}}I_{sd} + \omega I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}}V_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}}\sqrt{\frac{3}{2}}V_m \cos(\lambda) \\ \dot{I}_{sq} = -\omega I_{sd} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}}I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}}V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}}\sqrt{\frac{3}{2}}V_m \sin(\lambda) \\ \dot{V}_{bus,d} = \frac{1}{C_{eq}}I_{sd} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}}\frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}}I_{dc} \\ \dot{V}_{bus,q} = \frac{1}{C_{eq}}I_{sq} - \omega V_{bus,d} \\ \dot{I}_{dc} = \sqrt{\frac{3}{2}}\frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}}V_{bus,d} - \frac{(r_\mu + r_L + r_c)}{L_{dc}}I_{dc} - \frac{1}{L_{dc}}V_{dc} + \frac{r_c P_{CPL}}{L_{dc}V_{dc}} \\ \dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_{dc}}I_{dc} - \frac{P_{CPL}}{C_{dc}V_{dc}} \end{cases} \quad (1)$$

โดยที่ V_m คือค่ายอดแรงดันเฟสที่แหล่งจ่าย λ คือมุมการเลื่อนเฟสระหว่างบัสแหล่งจ่าย (Source Bus) และบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Bus)

คำนวณได้โดยอาศัยการนำทฤษฎีการไหลของกำลังไฟฟ้า (power flow) มาวิเคราะห์ระบบทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งรายละเอียดได้นำเสนอไว้ใน [14] ด้วยเช่นกัน และ r_μ คือความต้านทานที่ใช้แทนผลจาก L_{eq} ทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับ ที่ส่งผลให้เกิดมุมความถี่เพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้แรงดันสัญญาณขาออกของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ลดลง โดยความต้านทาน r_μ นี้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2) เมื่อ ω คือ ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ

$$r_\mu = \frac{3\omega L_{eq}}{\pi} \quad (2)$$

3. การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ

กำหนดให้พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพในบทความนี้แสดงดังตารางที่ 1 ซึ่งค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวได้มาจากการพิจารณาวจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังขนาดกันดังที่นำเสนอไว้ใน [8]

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

พารามิเตอร์	ค่า
V_s	230 V _{rms/phase}
f	50 Hz
R_{eq}	0.1 Ω
L_{eq}	24 μ H

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา (ต่อ)

พารามิเตอร์	ค่า
C_{eq}	2 nF
r_L	0.1 Ω
L_{dc}	7.5 mH
r_C	0.5 Ω
C_{dc}	1000 μ F

3.1 การทำให้เป็นเชิงเส้น

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น จะเริ่มต้นจากการทำให้เป็นเชิงเส้น ซึ่งเป็นวิธีการประมาณความไม่เป็นเชิงเส้นที่มีอยู่ในระบบให้มีความเป็นเชิงเส้นโดยอาศัยอนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่ง จากนั้นจะอาศัยการวิเคราะห์เสถียรภาพผ่านวิธีการพื้นฐานของทฤษฎีบทควบคุมที่เป็นเชิงเส้น นั่นคือ ทฤษฎีบทค่าเจาะจง [5-10] เมื่อพิจารณาการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นจะได้ว่าจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นดังสมการที่ (1) สามารถทำให้เป็นเชิงเส้นได้โดยแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นแสดงได้ดังสมการที่ (3) ดังนี้

$$\begin{cases} \delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{u} \\ \delta \mathbf{y} = \mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{u} \end{cases} \quad (3)$$

โดยที่ $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$, $\mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$, $\mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ และ $\mathbf{D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ คือเมตริกซ์จาโคเบียน (jacobian matrix)

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) = \begin{bmatrix} -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & \omega & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 \\ -\omega & -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & 0 & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_{eq}} & 0 & 0 & \omega & -\sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_{eq}} & -\omega & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} & 0 & -\frac{(r_\mu + r_L + r_C)}{L_{dc}} & -\left(\frac{1}{L_{dc}} + \frac{r_C P_{CPL}}{L_{dc} V_{dc,o}^2}\right) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_{dc}} & \frac{P_{CPL}}{C_{dc} V_{dc,o}^2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับค่าตัวแปรสถานะ $\mathbf{x}_0$ และค่าตัวแปรขาเข้า $\mathbf{u}_0$ ที่จุดปฏิบัติงานที่พิจารณา โดยจุดปฏิบัติงานหรือจุดสมดุล (operating points/equilibrium points) ของระบบคำนวณได้จาก $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{0}$

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ผ่านการทำให้เป็นเชิงเส้นด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงจะพิจารณาค่าเจาะจง (eigenvalues) ของเมตริกซ์จาโคเบียน $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ ที่แสดงได้ดังสมการที่ (4) ซึ่งจากสมการจะพบว่า เมตริกซ์ $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ มีค่าขึ้นอยู่กับค่าของแรงดันสัญญาณขาออกดีซีที่จุดปฏิบัติงาน ($V_{dc,0}$) ซึ่งค่าดังกล่าวนี้สามารถคำนวณได้จากการคำนวณหาจุดปฏิบัติงานของระบบ โดยกำหนดให้ $\dot{I}_{sd}, \dot{I}_{sq}, \dot{V}_{bus,d}, \dot{V}_{bus,q}, \dot{I}_{dc}$ และ $\dot{V}_{dc}$ ในสมการที่ (1) ให้มีค่าเท่ากับศูนย์ และค่าเจาะจงสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (5)

$$\det(\lambda \mathbf{I} - \mathbf{A}) = 0 \quad (5)$$

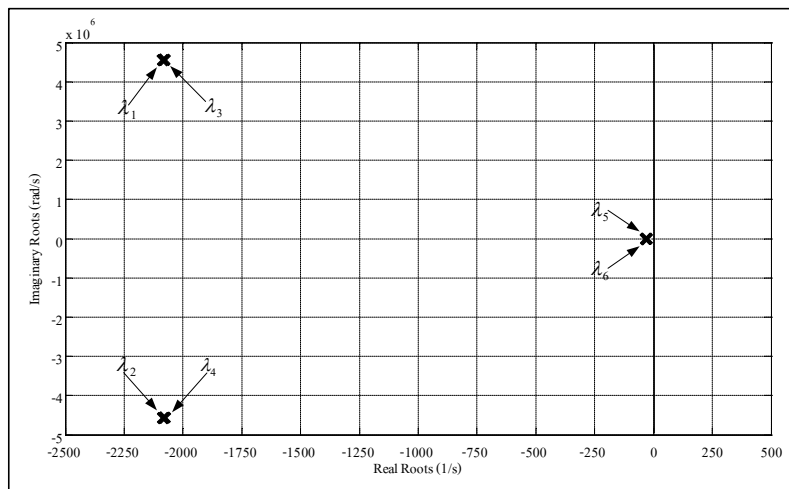
โดยที่ λ คือ ค่าเจาะจงของระบบ

ดังนั้นระบบจะมีเสถียรภาพ ถ้าส่วนจริงของค่าเจาะจงมีค่าน้อยกว่าศูนย์ เงื่อนไขดังกล่าวแสดงได้ดังสมการที่ (6)

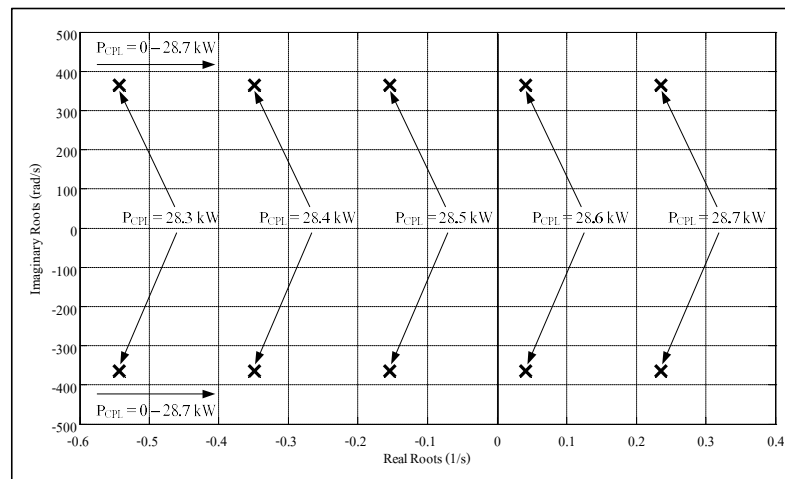
$$\text{Re}(\lambda_i) < 0 \quad (6)$$

โดยที่ $i = 1, 2, 3, \dots, n$ (n คือ จำนวนตัวแปรสถานะของระบบ)

ดังนั้นจากเมตริกซ์จาโคเบียน $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ ดังสมการที่ (4) และค่า $V_{dc,0}$ ที่คำนวณได้ จะสามารถคำนวณหาค่าเจาะจงของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ (P_{CPL}) มีค่าเท่ากับ 15 kW เส้นทางการเดินของค่าเจาะจงแสดงได้ดังรูปที่ 3 ซึ่งจากรูปจะพบว่า ค่าเจาะจงของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาประกอบด้วยค่าเจาะจง $\lambda_1 - \lambda_6$ โดยที่ค่าเจาะจง λ_5 และ λ_6 ซึ่งมีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ L_{dc} และ C_{dc} ของวงจรกรอง เนื่องจากค่าเจาะจงดังกล่าวอยู่ตรงตำแหน่งที่ใกล้กับความถี่เรโซแนนซ์ (resonance frequency) ของระบบ ซึ่งคำนวณได้จาก $1/\sqrt{L_{dc}C_{dc}} = 365.15$ เรเดียน/วินาที นั้นเป็นค่าเจาะจงเด่น (dominant eigenvalues) หรือเป็นขั้วเด่น (dominant pole) ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา โดยค่าเจาะจงเด่นหรือค่าขั้วเด่นนี้จะมีอิทธิพลต่อเสถียรภาพของระบบโดยตรง ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสามารถวิเคราะห์ได้จากค่าเจาะจงเด่นของระบบได้ ซึ่งเส้นทางการเดินของค่าเจาะจงเด่นของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา เมื่อ P_{CPL} มีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 ถึง 28.7 kW แสดงได้ดังรูปที่ 4 ซึ่งจากรูปจะสังเกตได้ว่า



รูปที่ 3 ค่าเจาะจง เมื่อ $P_{CPL} = 15$ kW



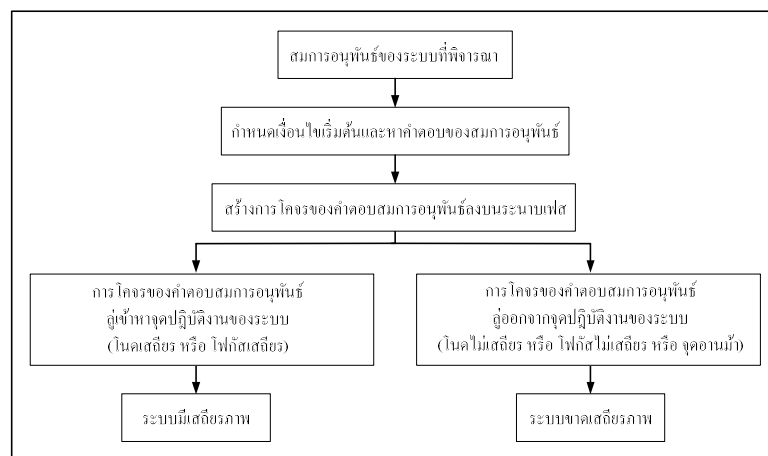
รูปที่ 4 ค่าเจาะจงที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพ

เมื่อ P_{CPL} มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 28.6 kW ส่วนจริงของค่าเจาะจงเด่นของระบบจะมีค่ามากกว่าศูนย์ ซึ่งเป็นกรณีที่ไม่น่าเป็นไปตามเงื่อนไขของสมการที่ (6) ที่กล่าวไว้ว่า ระบบจะมีเสถียรภาพ ถ้าส่วนจริงของค่าเจาะจงมีค่าน้อยกว่าศูนย์ ดังนั้นที่จุดปฏิบัติงานนี้ระบบจะขาดเสถียรภาพ จึงสามารถสรุปได้ว่าระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 1 จะขาดเสถียรภาพเมื่อ P_{CPL} มีค่ามากกว่า 28.5 kW

3.2 การวิเคราะห์ระนาบเฟส

การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสเป็นวิธีการทางกราฟิกที่มีแนวคิดพื้นฐานคือการสร้างวิถีการโคจร (motion trajectory) ที่สัมพันธ์

กับเงื่อนไขเริ่มต้น (initial conditions) ต่าง ๆ ที่แตกต่างกัน ลงบนปริภูมิสถานะ (state space) ที่ขึ้นอยู่กับตัวแปรสถานะของระบบสองตัว ซึ่งมีชื่อเรียกว่าระนาบเฟส (phase plane) โดยแต่ละวิถีการโคจรนั้นได้มาจากการหาผลเฉลยของสมการอนุพันธ์ของระบบจากเงื่อนไขเริ่มต้นที่พิจารณา และมีชื่อเรียกว่า การโคจร (trajectory) ของคำตอบสมการอนุพันธ์ จากนั้นจะตรวจสอบเสถียรภาพของระบบจากวิถีการโคจรบนระนาบเฟสที่ได้ โดยถ้าการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ลู่เข้าหาจุดปฏิบัติงานของระบบ ไม่ว่าจะเป็นจุดปฏิบัติงานแบบโนดเสถียร หรือโฟกัสเสถียร ระบบจะมีเสถียรภาพ ในขณะที่ ถ้าการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ลู่ออกจากจุดปฏิบัติงานของระบบ ไม่ว่าจะ



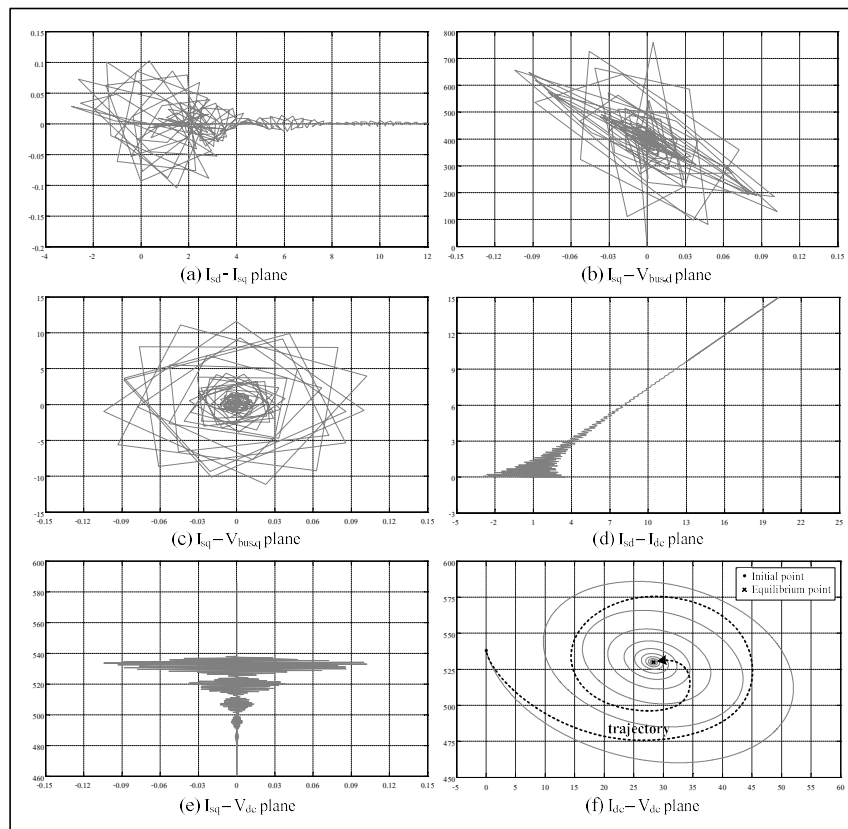
รูปที่ 5 แผนภาพการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส

จะเป็นจุดปฏิบัติงานแบบโนดไม่เสถียร หรือโฟกัสไม่เสถียร หรือจุดอานม้า ระบบจะขาดเสถียรภาพ [10-13] ดังนั้นจากแนวคิดพื้นฐานดังกล่าวข้างต้นสามารถสรุปเป็นขั้นตอนการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสได้ดังแผนภาพในรูปที่ 5

เมื่อพิจารณาการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสจะได้ว่า จากขั้นตอนดังแผนภาพในรูปที่ 5 การวิเคราะห์เสถียรภาพจะต้องสร้างการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ของระบบลงบนระนาบที่ขึ้นอยู่กับตัวแปรสถานะ 2 ตัว ซึ่งจากสมการที่ (1) จะพบว่าระบบไฟฟ้าที่พิจารณานี้มีตัวแปรสถานะทั้งหมด 6 ตัว แต่จากการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นในหัวข้อที่ 3.1 พบว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีข้อเด่นเพียงแค่ 2 ตัวเท่านั้น โดยข้อเด่นนี้จะมีอิทธิพลต่อเสถียรภาพของระบบโดยตรง ซึ่งข้อเด่นของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเป็นข้อที่อยู่ที่ตรงตำแหน่งของวงจรรอง เนื่องจากมีความสัมพันธ์กับค่าความเหนี่ยวนำและค่าความจุไฟฟ้าของวงจรรอง (I_{dc} และ C_{dc}) ดังนั้นจึงทำให้ตัวแปรสถานะ I_{dc} (กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรรอง) และ V_{dc} (แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุของวงจรรอง) เป็นตัวแปรสถานะที่มีอิทธิพลต่อเสถียรภาพของระบบ การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสจึงทำได้โดยอาศัยการสร้างการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ของระบบลงบนระนาบของตัวแปรสถานะ I_{dc} และ V_{dc} ได้ แต่การหาคำตอบของสมการอนุพันธ์เพื่อนำคำตอบที่ได้มาสร้างการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์บนระนาบ I_{dc} และ V_{dc} ยังต้องดำเนินการโดยอาศัยการหาคำตอบจากสมการอนุพันธ์ทั้ง 6 สมการ นั่นคือสมการ $\dot{I}_{sd}, \dot{I}_{sq}, \dot{V}_{bus,d}, \dot{V}_{bus,q}, \dot{I}_{dc}$ และ $\dot{V}_{dc}$ ดังสมการที่ (1) ซึ่งไม่สามารถจะดำเนินการโดยอาศัยการหาคำตอบจากเฉพาะสมการ $\dot{I}_{dc}$ และ $\dot{V}_{dc}$ โดยไม่สนใจสมการอื่น ๆ ที่เหลือไม่ได้ เพราะอาจจะทำให้คำตอบ

ของสมการอนุพันธ์ที่หาได้มีความคลาดเคลื่อนและส่งผลทำให้การวิเคราะห์เสถียรภาพเกิดความผิดพลาดได้ เพื่อเป็นการยืนยันว่า การโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์บนระนาบของ I_{dc} และ V_{dc} สามารถนำมาใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาได้ ในขณะที่ยังคงการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์บนระนาบของตัวแปรสถานะคู่อื่น ๆ ที่ไม่ใช่คู่ของ I_{dc} กับ V_{dc} ไม่สามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับเสถียรภาพของระบบได้ บทความนี้จึงดำเนินการสร้างการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ลงบนระนาบของตัวแปรสถานะคู่ต่าง ๆ เมื่อ P_{CPL} มีค่าเท่ากับ 15 kW แสดงได้ดังรูปที่ 6 ซึ่งจากรูปจะสังเกตได้ว่า การโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์บนระนาบของตัวแปรสถานะคู่อื่น ๆ ที่ไม่ใช่คู่ของ I_{dc} กับ V_{dc} ดังแสดงในรูปที่ 6(a) ถึงรูปที่ 6(e) ไม่สามารถตีความหรือให้ข้อมูลเกี่ยวกับเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาได้ ในขณะที่ยังคงการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์บนระนาบของ I_{dc} และ V_{dc} ดังแสดงในรูปที่ 6(f) มีการเคลื่อนที่เริ่มจากจุดเริ่มต้นและมุ่งเข้าหาจุดปฏิบัติงานแบบโฟกัสเสถียรของระบบเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งแสดงว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีเสถียรภาพและเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น ดังแสดงในรูปที่ 3 จะพบว่าให้ผลที่สอดคล้องกัน นั่นคือ ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะมีเสถียรภาพที่จุดปฏิบัติงานนี้ ดังนั้นจึงเป็นการแสดงให้เห็นว่า การโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์บนระนาบของ I_{dc} และ V_{dc} สามารถนำมาใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาได้

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสในบทความนี้จะแบ่งออกเป็น 2 กรณีคือ กรณีที่ 1 การวิเคราะห์เสถียรภาพเมื่อโหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดเล็ก และกรณีที่ 2 การวิเคราะห์เสถียรภาพเมื่อโหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่



รูปที่ 6 การโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์บนระนาบของตัวแปรสถานะคู่ต่าง ๆ เมื่อ $P_{CPL} = 15$ kW

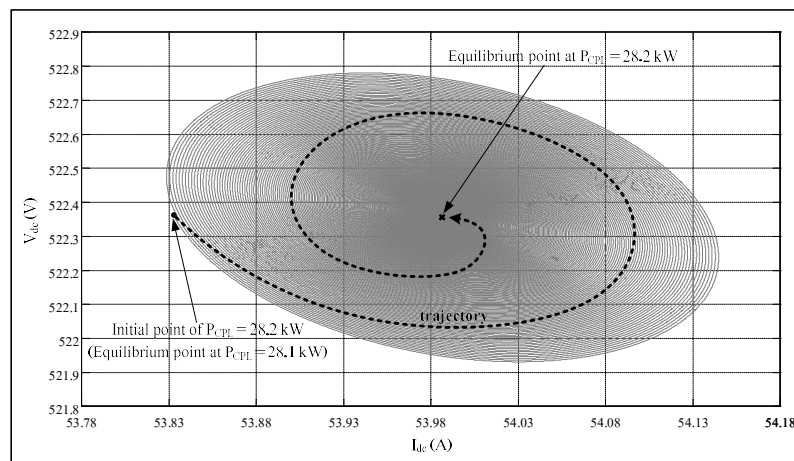
โดยการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กอาจหมายถึง โหลดขนาดใดก็ได้ที่มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ยกตัวอย่างเช่น มีการเปลี่ยนแปลงทีละ 100 W ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่อาจจะมีการเปลี่ยนแปลงในหน่วย kW ซึ่งในทางปฏิบัติ การเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กและขนาดใหญ่ที่ส่งผลทำให้ระบบขาดเสถียรภาพของแต่ละระบบไฟฟ้ามีขนาดที่แตกต่างกันออกไปและไม่สามารถจำแนกหรือแยกแยะได้อย่างแน่ชัด อีกทั้งไม่สามารถทราบได้ว่า การเปลี่ยนแปลงแค่นั้นจะทำให้การวิเคราะห์เสถียรภาพเกิดความคลาดเคลื่อนถ้าใช้วิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น ดังนั้นบทความนี้จะเลือกใช้วิธีการวิเคราะห์ระบบเฟส ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบได้ทั้งในกรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กและภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ โดยการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาทั้ง 2 กรณี แสดงรายละเอียดได้ดังนี้

กรณีที่ 1: การวิเคราะห์เสถียรภาพภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดเล็ก การเปลี่ยนแปลงโหลดในกรณีนี้จะอาศัยการเพิ่มค่า P_{CPL} ทีละ 100 W ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งจะพบว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาขาดเสถียรภาพ ซึ่งเป็นการดำเนินการเช่นเดียวกับการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นที่คำนวณหาค่าเจาะจงของระบบในทุก ๆ การเปลี่ยนแปลงค่า P_{CPL} 100 W ดังแสดงในรูปที่ 4 ดังนั้นหลักการของการวิเคราะห์เสถียรภาพในกรณีนี้คือ จุดปฏิบัติงานของระบบ ($\mathbf{x}_0$) ที่ค่าโหลดกำลังไฟฟ้างดตัวแบบอุดมคติ ณ สภาวะอยู่ตัวปัจจุบัน (P_{CPL}) จะถูกกำหนดให้เป็นเงื่อนไขเริ่มต้นการทำงานของระบบ ($\mathbf{x}(0)$) ที่ค่าโหลดกำลังไฟฟ้างดตัวแบบอุดมคติที่ถูกเพิ่มค่าขึ้นจากค่าเดิมอีก 100 W ($P_{CPL+100} = P_{CPL} + 100$ W) นั่นคือการกำหนดให้ $\mathbf{x}(0)$ ของ $P_{CPL+100} = \mathbf{x}_0$ ของ P_{CPL} ดังนั้นจากสมการที่ (1) และจุดปฏิบัติงานของระบบ ซึ่งสามารถคำนวณได้โดย

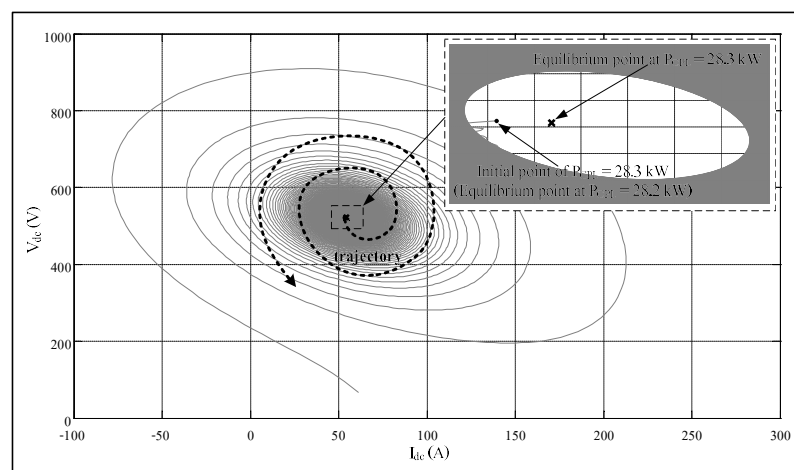
กำหนดให้ $\dot{I}_{sd}$, $\dot{I}_{sq}$, $\dot{V}_{bus,d}$, $\dot{V}_{bus,q}$, $\dot{I}_{dc}$ และ $\dot{V}_{dc}$ ในสมการที่ (1) ให้มีค่าเท่ากับศูนย์ จะสามารถสร้างการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเมื่อ P_{CPL} มีการเปลี่ยนแปลงจาก 28.1 kW ไปเป็น 28.2 kW และเปลี่ยนแปลงจาก 28.2 kW ไปเป็น 28.3 kW ได้ดังแสดงในรูปที่ 7 และรูปที่ 8 ตามลำดับ โดยจะสังเกตได้ว่า ในรูปที่ 7 เมื่อ P_{CPL} มีการเปลี่ยนแปลงจาก 28.1 kW ไปเป็น 28.2 kW การโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์จะลู่เข้าหาจุดปฏิบัติงานแบบโพลัสเสถียรของระบบ ดังนั้นที่จุดปฏิบัติงานนี้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะมีเสถียรภาพ ในขณะที่รูปที่ 8 นั้น เมื่อ P_{CPL} มีการเปลี่ยนแปลงจาก 28.2 kW ไปเป็น 28.3 kW การโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์

จะลู่ออกจากจุดปฏิบัติงานแบบโพลัสไม่เสถียรของระบบมากยิ่งขึ้นอย่างไม่มีที่สิ้นสุดเมื่อเวลาผ่านไป ดังนั้นระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะขาดเสถียรภาพที่จุดปฏิบัติงานนี้ จึงสามารถสรุปได้ว่า ภายใต้การเปลี่ยนแปลงโหลดของระบบด้วยการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็ก ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะขาดเสถียรภาพเมื่อ P_{CPL} มีค่ามากกว่า 28.2 kW

กรณีที่ 2: การวิเคราะห์เสถียรภาพภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบในกรณีนี้จะเป็นการพิจารณาว่า การเปลี่ยนแปลง P_{CPL} จาก 0 W ไปเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติค่าใดที่ส่งผลทำให้ระบบขาด



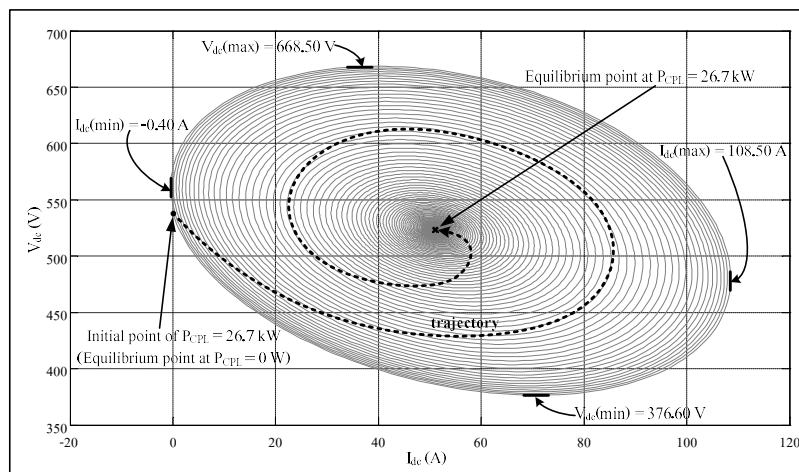
รูปที่ 7 การโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ เมื่อ P_{CPL} มีการเปลี่ยนแปลงจาก 28.1 kW ไปเป็น 28.2 kW



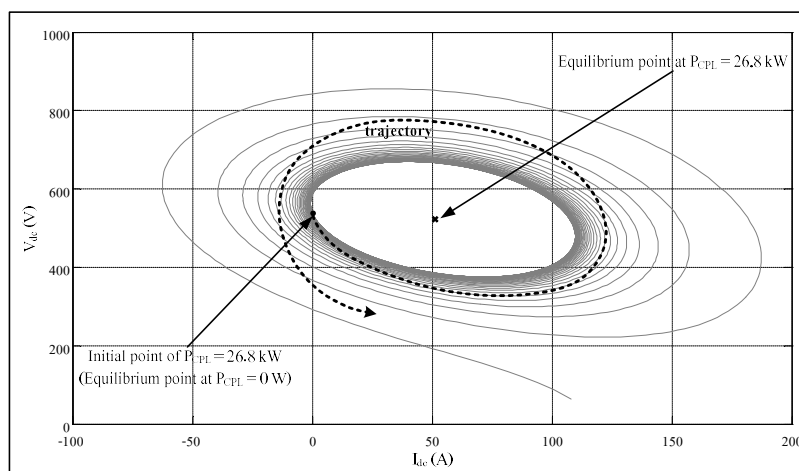
รูปที่ 8 การโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ เมื่อ P_{CPL} มีการเปลี่ยนแปลงจาก 28.2 kW ไปเป็น 28.3 kW

เสถียรภาพ ($P_{CPL,Unstable}$) โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลง โหลดเพียงครั้งเดียว กล่าวคือเป็นการเปลี่ยนแปลง โหลดจาก 0 W ไปเป็น $P_{CPL,Unstable}$ ดังนั้นหลักการของ การวิเคราะห์เสถียรภาพในกรณีนี้คือ จุดปฏิบัติงานที่ P_{CPL} มีค่าเท่ากับ 0 W จะถูกกำหนดให้เป็นจุดเริ่มต้น การทำงานให้กับระบบ นั่นคือกำหนดให้ $I_{sq}(0) = 0$ A, $I_{sq}(0) = 0$ A, $V_{bus,q}(0) = 0$ V, $V_{bus,q}(0) = 0$ V, $I_{dc}(0) = 0$ A และ $V_{dc}(0) = 537.99$ V ดังนั้นจากสมการที่ (1) และจุดเริ่มต้นการทำงานของระบบที่ได้กำหนด ไว้ข้างต้นจะสามารถสร้างการโคจรของคำตอบสมการ อนุพันธ์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา เมื่อ P_{CPL} มีการ เปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 26.7 kW และ

เปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 26.8 kW ได้ดังแสดงใน รูปที่ 9 และรูปที่ 10 ตามลำดับ โดยจะสังเกตได้ว่า ในรูปที่ 9 เมื่อ P_{CPL} มีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไป เป็น 26.7 kW การโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ จะลู่เข้าหาจุดปฏิบัติงานแบบโพลัสเสถียรของระบบ ดังนั้นที่จุดปฏิบัติงานนี้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะมี เสถียรภาพ ในขณะที่ รูปที่ 10 นั้น เมื่อ P_{CPL} มีการ เปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 26.8 kW การโคจรของ คำตอบสมการอนุพันธ์จะลู่ออกจากจุดปฏิบัติงานแบบ โพลัสไม่เสถียรของระบบมากยิ่งขึ้นอย่างไม่สิ้นสุด เมื่อเวลาผ่านไป ดังนั้นระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะขาด เสถียรภาพที่จุดปฏิบัติงานนี้ จึงสามารถสรุปได้ว่า



รูปที่ 9 การโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ เมื่อ P_{CPL} มีเปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 26.7 kW



รูปที่ 10 การโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ เมื่อ P_{CPL} มีเปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 26.8 kW

ภายใต้การเปลี่ยนแปลงโหลดของระบบด้วยการเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะขาดเสถียรภาพ เมื่อ P_{CPL} มีค่ามากกว่า 26.7 kW

จากการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสสามารถสรุปได้ว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 1 จะขาดเสถียรภาพ เมื่อ P_{CPL} มีค่ามากกว่า 28.2 kW ซึ่งข้อสรุปนี้จะเป็นจริงสำหรับการเปลี่ยนแปลงโหลดของระบบภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กเท่านั้น ในขณะที่ การเปลี่ยนแปลงโหลดของระบบภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ ระบบจะขาดเสถียรภาพ เมื่อ P_{CPL} มีค่ามากกว่า 26.8 kW

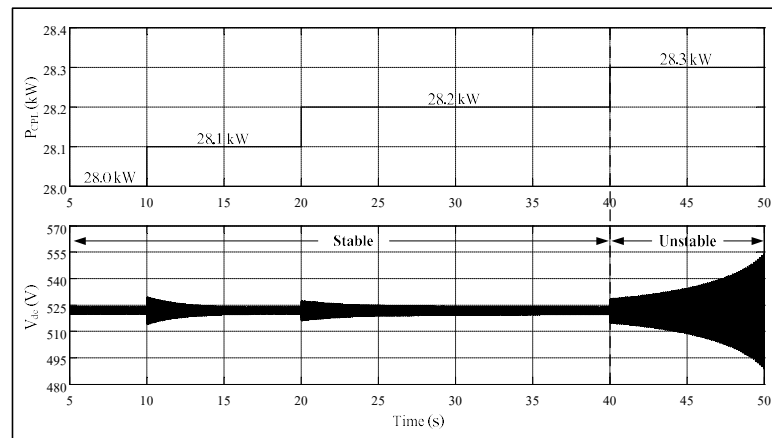
การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส นอกจากจะสามารถคาดเดาจุดขาดเสถียรภาพของระบบได้แล้ว ยังสามารถประมาณการสั่นไหวสูงสุดของสัญญาณก่อนที่ระบบจะเข้าสู่จุดปฏิบัติงานได้อีกด้วย ยกตัวอย่างเช่น เมื่อ P_{CPL} มีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 26.7 kW จากกราฟการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ในรูปที่ 9 จะสามารถประมาณการสั่นไหวสูงสุดของสัญญาณของวงจรกรองได้ดังนี้ I_{dc} จะมีการสั่นไหวสูงสุดอยู่ในช่วง -0.40 ถึง 108.50 A และ V_{dc} จะมีการสั่นไหวสูงสุดอยู่ในช่วง 376.60 ถึง 668.50 V ก่อนที่การสั่นไหวจะมีค่าลดลงจนกระทั่งเข้าสู่จุดปฏิบัติงานของระบบ

3.3 การตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์

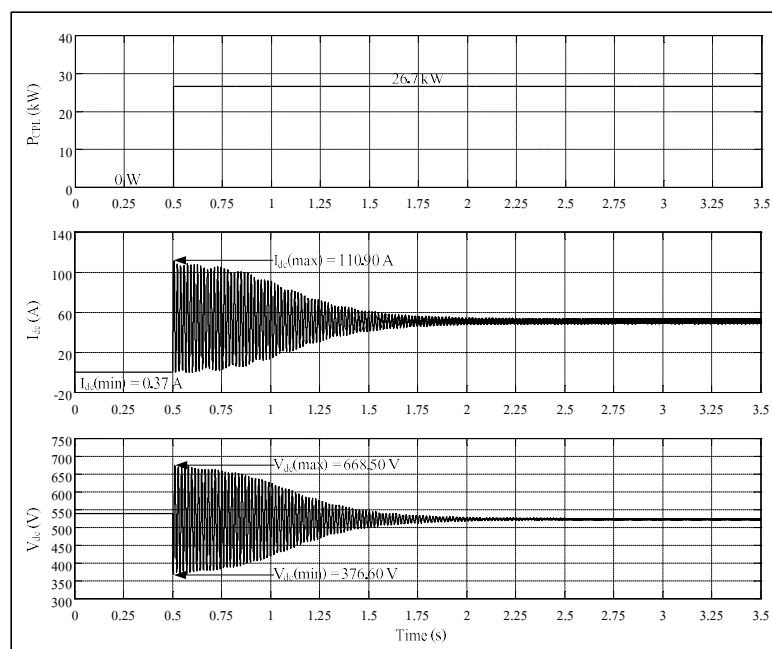
การตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์เสถียรภาพในบทความนี้อาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB ซึ่งผลการยืนยันการขาดเสถียรภาพ แสดงได้ดังรูปที่ 11 ถึงรูปที่ 13 โดยรูปที่ 11 เป็นการยืนยันการขาดเสถียรภาพในกรณีที่ P_{CPL} มีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดเล็ก ในขณะที่ รูปที่ 12 และรูปที่ 13 นั้นเป็นการยืนยันการมีเสถียรภาพและการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ในกรณีที่ P_{CPL} มีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่

จากรูปที่ 11 ซึ่งเป็นการยืนยันการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ในกรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดเล็ก จะสังเกตได้ว่า เมื่อ P_{CPL} มีการเปลี่ยนแปลงจาก 28.2 kW ไปเป็น 28.3 kW ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะขาดเสถียรภาพ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นดังแสดงในรูปที่ 4 จะพบว่า มีความคลาดเคลื่อนของจุดการขาดเสถียรภาพเกิดขึ้น โดยความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นคือ 300 W หรือคิดเป็น 1.06 % ในขณะที่เมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสดังแสดงในรูปที่ 7 และรูปที่ 8 จะพบว่า มีความสอดคล้องกัน

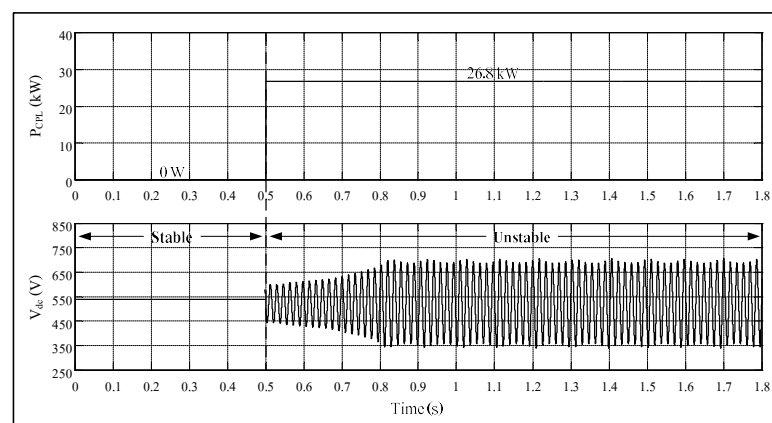
จากรูปที่ 12 และรูปที่ 13 ซึ่งเป็นการยืนยันการมีเสถียรภาพและการขาดเสถียรภาพของระบบ ในกรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่จะสังเกตได้ว่า ในรูปที่ 12 เมื่อ P_{CPL} มีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 26.7 kW ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะยังคงมีเสถียรภาพ ในขณะที่ รูปที่ 13 นั้น เมื่อ P_{CPL} มีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 26.8 kW ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะขาดเสถียรภาพ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสดังแสดงในรูปที่ 9 และรูปที่ 10 จะพบว่า มีความสอดคล้องกัน แต่เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ที่ได้จากวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นดังแสดง ในรูปที่ 4 จะพบว่า ผลการวิเคราะห์ที่ได้ระบุว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะขาดเสถียรภาพ เมื่อ P_{CPL} มีค่ามากกว่า 28.5 kW เท่านั้น นั่นหมายความว่าในกรณีที่ P_{CPL} มีค่าเท่ากับ 26.8 kW ระบบจะมีเสถียรภาพอย่างแน่นอน เนื่องจากส่วนจริงของค่าจะงมีค่าเป็นลบ ดังนั้นจะเห็นได้ว่า ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น มีความคลาดเคลื่อนของจุดการขาดเสถียรภาพเกิดขึ้น 1.8 kW หรือคิดเป็น 6.74 % ซึ่งถือว่าเป็นค่าความคลาดเคลื่อนที่มีค่าค่อนข้างสูง



รูปที่ 11 การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อ P_{CPL} มีการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กน้อย



รูปที่ 12 การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อ P_{CPL} มีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 26.7 kW



รูปที่ 13 การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อ P_{CPL} มีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 26.8 kW

จากรูปที่ 12 นอกจากจะสามารถใช้ยืนยันการมีเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาได้แล้ว ยังสามารถใช้ยืนยันการประมาณการสั้นไกวสูงสุดของสัญญาณของวงจรกรองก่อนที่ระบบจะเข้าสู่จุดปฏิบัติงาน เมื่อ P_{CPL} มีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 26.7 kW ได้อีกด้วย ซึ่งจากรูปจะสังเกตได้ว่า I_{dc} จะมีการสั้นไกวสูงสุดอยู่ในช่วง 0.37 ถึง 110.90 A และ V_{dc} จะมีการสั้นไกวสูงสุดอยู่ในช่วง 368.80 ถึง 672.80 V ก่อนที่การสั้นไกวจะมีค่าลดลงจนกระทั่งเข้าสู่จุดปฏิบัติงานของระบบ และเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการประมาณด้วยวิธีการวิเคราะห์ระบบไฟฟสดังแสดงในรูปที่ 9 จะพบว่า มีความใกล้เคียงกัน

ดังนั้นจากผลการตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์เสถียรภาพทั้งหมดที่ได้รับการอธิบายไปในข้างต้น แสดงให้เห็นว่า การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็ก ไม่สามารถให้ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่มีความถูกต้องทั้งในกรณีที่โหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กและภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ได้ ซึ่งเกิดจากการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นไม่สามารถที่จะกำหนดจุดเริ่มต้นหรือเงื่อนไขเริ่มต้นการทำงานให้กับระบบในการวิเคราะห์เสถียรภาพได้ ในขณะที่การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระบบไฟฟสสามารถที่จะกำหนดจุดเริ่มต้นหรือเงื่อนไขเริ่มต้นการทำงานของระบบในการวิเคราะห์เสถียรภาพได้ ดังนั้นจึงทำให้การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระบบไฟฟสนั้นนอกจากจะให้ผลที่มีความถูกต้องแม่นยำแล้ว ยังสามารถประมาณการสั้นไกวสูงสุดของสัญญาณของวงจรกรองได้อีกด้วย

4. สรุป

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น และ

การวิเคราะห์ระบบไฟฟส ผลจากการตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์เสถียรภาพ แสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นไม่สามารถให้ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่มีความถูกต้องทั้งในกรณีที่โหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กและภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ ในขณะที่การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระบบไฟฟส นอกจากจะให้ผลที่มีความถูกต้องแม่นยำแล้ว ยังสามารถประมาณการสั้นไกวสูงสุดของสัญญาณของวงจรกรองได้อีกด้วย ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระบบไฟฟสเป็นวิธีการที่มีประโยชน์เป็นอย่างมากสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้นสำหรับงานวิจัยในอนาคต เช่น ระบบไฟฟ้าบนเครื่องบิน หรือระบบราง ซึ่งเป็นระบบที่มีโหลดโดยส่วนใหญ่เป็นวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุม ซึ่งโหลดในลักษณะนี้จะมีพฤติกรรมเปรียบเสมือนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบ ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟสดังกล่าวจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างมาก

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Emadi and A. Khaligh, "Stabilizing Control of DC/DC Buck Converters with Constant Power Loads in Continuous Conduction and Discontinuous Conduction Modes Using Digital Power Alignment Technique," *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. 1, pp. 63–72, 2006.
- [2] A. Emadi, M. Ehsani, and J.M. Miller, "Vehicular Electric Power Systems: Land, Sea, Air, and Space Vehicles," Marcel Dekker, Inc., 2004.

- [3] S. Singh, D. Fulwani, and V. Kumar, "Robust sliding-mode control of dc/dc boost converter feeding a constant power load," *The Institution of Engineering and Technology (IET Power Electron) Journals*, vol. 8, pp. 1–8, July, 2015.
- [4] A. Emadi, B. Fahimi, and M. Ehsani, "On the Concept of Negative Impedance Instability in the More Electric Aircraft Power Systems with Constant Power Loads," *Proc. 34th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, Columbia, 1999, pp. 689-699.
- [5] C. Rivetta, G.A. Williamson, and A. Emadi, "Constant Power Loads and Negative Impedance Instability in Sea and Undersea Vehicles: Statement of the Problem and Comprehensive Large-Signal Solution," *Proc. IEEE Electric Ship Tech. Symposium*, pp. 313-320, 2005.
- [6] A. Emadi, A. Khaligh, C.H. Rivetta, and G.A. Williamson, "Constant Power Loads and Negative Impedance Instability in Automotive Systems: Definition, Modeling, Stability, and Control of Power Electronic Converters and Motor Drives," *IEEE Trans. on Vehicular Tech.*, vol. 55, pp. 1112-1125, July, 2006.
- [7] K-N. Areerak, S. Bozhko, G. Asher, L. de Lillo, and D.W.P. Thomas, "Stability Study for a Hybrid AC-DC More-Electric Aircraft Power System," *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 48, pp. 329–347, January, 2012.
- [8] T. Sopapirm, K-N. Areerak, and K-L. Areerak, "Stability Analysis of AC Distribution System with Six-Pulse Diode Rectifier and Multi-Converter Power Electronic Loads," *International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E.)*, pp. 2919-2928, November, 2011.
- [9] R. Matousek, I. Svarc, P. Pivonka, P. Osamera, and M. Seda, "Simple Methods for Stability Analysis of Nonlinear Control System," *Proceeding of the World Congress on Engineering and Computer Science*, San Francisco, 2009, pp. 226-231.
- [10] J.E. Slotine, and W. Li, "Applied Nonlinear Control," Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1991.
- [11] K. Hassan Khalil, "Nonlinear System," Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1996.
- [12] D. Weijing, Z. Junming, Z. Yang, and Q. Zhaoming, "Large Signal Stability Analysis Based on Gyrator Model with Constant Power Load," *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, United States, 2011, pp. 1-8.
- [13] A. Griffo, and J. Wang, "Large Signal Stability Analysis of 'More Electric' Aircraft Power Systems with Constant Power Loads," *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 48, pp. 477–489, January, 2011.
- [14] T. Sopapirm, K-N. Areerak, and K-L. Areerak, "Mathematical Model of a Three-Phase Diode Rectifier Feeding a Controlled Buck Converter," *International Review on Modeling and Simulation*, pp. 1426-1439, August, 2011.

**การทดสอบภาคสนามการหาความถี่ธรรมชาติของสะพาน
จากผลตอบสนองความเร่งของรถยนต์นั่งส่วนบุคคล
Field Verification of Bridge Natural Frequency Identification
from Acceleration Response of Passenger Car**

อิฐวัฒน์ มณีรัตน์โรจน์¹ พัทธพงษ์ อาสนจินดา^{2*}

¹นิสิตปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

169 ตำบลแสนสุข อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี 20131

²อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

169 ตำบลแสนสุข อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี 20131

Athiwat Maneeratroj¹ Pattarapong Asnachinda^{2*}

¹Graduate Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University,

169 Saensuk, Muang, Chonburi 20131

²Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University,

169 Saensuk, Muang, Chonburi 20131

*Corresponding author: E-mail: pattarapong@eng.buu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานจากผลตอบสนองความเร่งของรถยนต์นั่งส่วนบุคคล ด้วยวิธีการทดสอบแบบทางอ้อม เพื่อนำเสนอกระบวนการวิเคราะห์และรูปแบบการทดสอบที่เหมาะสม รวมไปถึงศึกษาผลของปัจจัยที่เกี่ยวข้อง โดยได้ทำการทดสอบภาคสนามกับสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงสั้นและใช้รถยนต์นั่งส่วนบุคคลเป็นยานพาหนะทดสอบ ความถี่ธรรมชาติของสะพานสามารถหาค่าได้ด้วยวิธีทางอ้อมจากกระบวนการวิเคราะห์สัญญาณความเร่งที่นำเสนอ จากผลการศึกษาดังกล่าวพบว่ากระบวนการที่นำเสนอสามารถหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานได้ในทุกกรณีทดสอบ ซึ่งพบว่าค่าความถี่ที่วิเคราะห์ได้เป็นความถี่ที่มีค่าตรงกันกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดทางตรงที่สะพาน

คำสำคัญ: ความถี่ธรรมชาติของสะพาน, การทดสอบทางอ้อม, รถยนต์นั่งส่วนบุคคล, ผลตอบสนองความเร่ง

ABSTRACT

This research studied bridge natural frequency identification from a passenger car's acceleration response by field testing. The research aimed to propose the analytical process and the appropriate testing scenario. In addition, effect of relevant parameters was studied. The field test was carried out with short span reinforce concrete bridges and passenger car as the test vehicles. The bridge natural frequency can be identified by using indirect method from the proposed process of signal analysis of the measured acceleration response. Regarding to the result of experimental study, it was

revealed that the proposed process was able to identify the bridge fundamental frequency in every experimental case. Moreover, it was observed that the analyzed frequencies were exactly the same to those obtained from the direct measurement to the bridge.

Keyword: Bridge natural frequency, indirect test, passenger car, acceleration response.

1. บทนำ

การประเมินสภาพความแข็งแรงของสะพานโดยทั่วไปแล้วนั้นจะมุ่งประเด็นไปที่การหาค่าความถี่ของสะพาน ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและสะดวกในการตรวจสอบ เนื่องจากค่าความถี่ธรรมชาตินั้นเป็นพารามิเตอร์พื้นฐาน ซึ่งหากเกิดความเสียหายกับตัวโครงสร้างอันเนื่องมาจากการเสื่อมสภาพต่างๆ จะส่งผลให้ค่าสตีฟเนสของโครงสร้างเกิดการเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้ค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างนั้นเปลี่ยนแปลงไปด้วย แต่เนื่องจากวิธีการหาค่าความถี่ในปัจจุบัน จำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดโดยตรงที่สะพาน ซึ่งเกิดความยากลำบากในการติดตั้งและมีค่าใช้จ่ายสูง ซึ่งกลายเป็นข้อจำกัดของวิธีทางตรง ด้วยเหตุนี้วิธีการทดสอบแบบทางอ้อม (indirect approach) จึงเป็นวิธีที่ถูกนำเสนอขึ้นเพื่อความสะดวก ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการดำเนิน วิธีการทดสอบทางอ้อมนั้น ทำได้โดยการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดผลตอบสนองความถี่ไว้ที่ยานพาหนะทดสอบแทนการติดตั้งโดยตรงที่สะพาน ซึ่งมีแนวคิดที่ว่าสะพานจะส่งต่อการสั่นไหวไปยังยานพาหนะซึ่งเป็นปฏิสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน โดยยานพาหนะจะทำหน้าที่เป็นทั้งตัวกระตุ้น (exciter) ให้เกิดการสั่นไหวและตัวรับ (receiver) ผลตอบสนองการสั่นไหวในช่วงเวลาเดียวกัน โดยงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมาได้ยืนยันความเป็นไปได้ในการหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยวิธีทดสอบทางอ้อมทั้งในด้านการศึกษาเชิงทฤษฎี [1-5] การทดสอบในห้องปฏิบัติการและในภาคสนาม [6-9]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานจากผลตอบสนองความถี่ของยานพาหนะ ซึ่งการศึกษาจะทำการทดสอบในภาคสนามกับสะพานจริงที่มีการใช้งานในปัจจุบันด้วยรถยนต์นั่งส่วนบุคคลที่มีอยู่ในตลาดรถยนต์ของประเทศไทย โดยการศึกษาจะมุ่งเน้นที่จะนำเสนอประเภทและลักษณะการเคลื่อนที่ที่เหมาะสม ซึ่งสามารถเพิ่มความถูกต้องของการหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน โดยใช้ผลตอบสนองความถี่ของรถยนต์นั่งส่วนบุคคลที่เคลื่อนผ่าน และทำการวิเคราะห์ความถี่โดยพิจารณาจากสเปกตรัมของสัญญาณความถี่จากการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transformation, FFT) ประกอบกับการวิเคราะห์องค์ประกอบของสัญญาณความถี่จากเทคนิคการแยกรูปแบบเชิงประจักษ์ (Empirical Mode Decomposition, EMD) [3,5] รวมทั้งเพิ่มเติมวิธีการตัดช่วงสัญญาณความถี่ โดยการพิจารณาประสิทธิภาพของวิธีการที่นำเสนอ นั้น จะพิจารณาระดับความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่สะพานที่ระบุได้เทียบกับค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการทดสอบการสั่นไหวอิสระ และศึกษาพฤติกรรมการสั่นไหวจากระดับความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่สะพานที่ระบุได้เทียบกับค่าความถี่ของสะพานที่เกิดขึ้นในแต่ละกรณีทดสอบจากหัววัดความถี่ที่ติดตั้งที่สะพานโดยตรง ทั้งนี้เนื่องจากงานวิจัยในอดีตพบว่าค่าความถี่ของสะพานที่เกิดขึ้นเมื่อยานพาหนะสัญจรผ่านนั้นมีค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าความถี่ธรรมชาติโดยเป็นผลจากมวลและความถี่ของยานพาหนะ [10,11] โดยผลการศึกษาจะนำเสนอแนวทางการทดสอบและวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลตรวจวัดที่เหมาะสมสำหรับการหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยวิธีทางอ้อมต่อไป

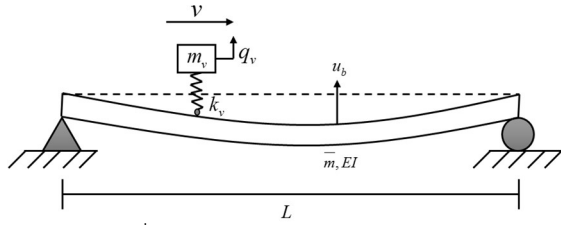
บุคคลที่มีอยู่ในตลาดรถยนต์ของประเทศไทย โดยการศึกษาจะมุ่งเน้นที่จะนำเสนอประเภทและลักษณะการเคลื่อนที่ที่เหมาะสม ซึ่งสามารถเพิ่มความถูกต้องของการหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน โดยใช้ผลตอบสนองความถี่ของรถยนต์นั่งส่วนบุคคลที่เคลื่อนผ่าน และทำการวิเคราะห์ความถี่โดยพิจารณาจากสเปกตรัมของสัญญาณความถี่จากการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transformation, FFT) ประกอบกับการวิเคราะห์องค์ประกอบของสัญญาณความถี่จากเทคนิคการแยกรูปแบบเชิงประจักษ์ (Empirical Mode Decomposition, EMD) [3,5] รวมทั้งเพิ่มเติมวิธีการตัดช่วงสัญญาณความถี่ โดยการพิจารณาประสิทธิภาพของวิธีการที่นำเสนอ นั้น จะพิจารณาระดับความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่สะพานที่ระบุได้เทียบกับค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการทดสอบการสั่นไหวอิสระ และศึกษาพฤติกรรมการสั่นไหวจากระดับความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่สะพานที่ระบุได้เทียบกับค่าความถี่ของสะพานที่เกิดขึ้นในแต่ละกรณีทดสอบจากหัววัดความถี่ที่ติดตั้งที่สะพานโดยตรง ทั้งนี้เนื่องจากงานวิจัยในอดีตพบว่าค่าความถี่ของสะพานที่เกิดขึ้นเมื่อยานพาหนะสัญจรผ่านนั้นมีค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าความถี่ธรรมชาติโดยเป็นผลจากมวลและความถี่ของยานพาหนะ [10,11] โดยผลการศึกษาจะนำเสนอแนวทางการทดสอบและวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลตรวจวัดที่เหมาะสมสำหรับการหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานด้วยวิธีทางอ้อมต่อไป

2. ทฤษฎี

2.1 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างยานพาหนะกับสะพาน

งานวิจัยนี้จะใช้การวิเคราะห์พฤติกรรมทางพลศาสตร์ของระบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างสะพานและยานพาหนะที่

เคลื่อนผ่าน (vehicle-bridge interaction) [1,3,6] โดยการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างง่ายเพื่อจำลองพฤติกรรมนี้ ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แบบจำลองปฏิสัมพันธ์ระหว่างสะพานกับยานพาหนะ

จากแบบจำลองดังรูปที่ 1 สามารถวิเคราะห์หาผลตอบสนองความถี่ของยานพาหนะ [5] ได้จากการหาอนุพันธ์อันดับที่สองของการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวตั้งของยานพาหนะเทียบกับเวลาดังสมการที่ 1

$$\ddot{q}_v(t) = \sum_n \left\{ \underbrace{\ddot{A}_{dl,n} \cos\left(\frac{(n-1)\pi V}{L}t + \ddot{A}_{dr,n} \cos\left(\frac{(n+1)\pi V}{L}t - \ddot{A}_{v,n} \cos\omega_n t\right)}_{\text{Driving Frequency}} + \underbrace{\ddot{A}_{bl,n} \cos\left(\omega_{b,n} - \frac{n\pi V}{L}t\right) - \ddot{A}_{br,n} \cos\left(\omega_{b,n} + \frac{n\pi V}{L}t\right)}_{\text{Bridge Frequency}} \right\} \quad (1)$$

จากสมการที่ 1 พบว่าผลตอบสนองที่ได้มีองค์ประกอบของสัญญาณความถี่หลายความถี่ด้วยกัน ได้แก่ 1) ความถี่ขับเคลื่อนของยานพาหนะ $\eta = n\pi V / L$ 2) ความถี่ของยานพาหนะ (ω_v) และ 3) ความถี่ของสะพานซึ่งเป็นความถี่ธรรมชาติของสะพานและเบี่ยงเบนด้วยค่าความถี่ขับเคลื่อน ($\omega_{bl,n} = \omega_b - \eta$ และ $\omega_{br,n} = \omega_b + \eta$) โดยค่าสัมประสิทธิ์ของผลตอบสนองความถี่ของยานพาหนะในสมการที่ 1 แสดงดังตารางที่ 1 และสมการที่ 2 ถึงสมการที่ 8

โดยหากพิจารณาจากสเปกตรัมของสัญญาณความถี่ของยานพาหนะเพื่อพิจารณาองค์ประกอบความถี่ของสะพานแล้วนั้น จากสมการข้างต้น พบว่าพารามิเตอร์ของยานพาหนะที่ส่งผลต่อสัมประสิทธิ์ขององค์ประกอบความถี่ธรรมชาติของสะพานนั้น ได้แก่ ความเร็วของยานพาหนะ มวลของยานพาหนะ และความถี่ของยานพาหนะ

ตารางที่ 1 ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของผลตอบสนองความถี่ของยานพาหนะ

สัญลักษณ์	ค่าสัมประสิทธิ์
$\ddot{A}_{dl,n}$	$A_{dl,n} \omega_{b,n-1}^2 S_{n-1}^2$
$\ddot{A}_{dr,n}$	$A_{dr,n} \omega_{b,n+1}^2 S_{n+1}^2$
$\ddot{A}_{v,n}$	$A_{v,n} \omega_v^2$
$\ddot{A}_{bl,n}$	$A_{bl,n} \omega_{b,n}^2 (1 - S_n)^2$
$\ddot{A}_{br,n}$	$A_{br,n} \omega_{b,n}^2 (1 + S_n)^2$

$$\text{โดยที่} \quad A_{dl,n} = \frac{\Delta_{st,n}}{2(1 - S_n^2)(1 - \mu_{n-1}^2 S_{n-1}^2)} \quad (2)$$

$$A_{dr,n} = \frac{\Delta_{st,n}}{2(1 - S_n^2)(1 - \mu_{n+1}^2 S_{n+1}^2)} \quad (3)$$

$$A_{v,n} = \frac{2\Delta_{st,n} \mu_n^2 S_n^2}{(1 - S_n^2)} \left[\frac{1}{(1 - \mu_{n-1}^2 S_{n-1}^2)(1 - \mu_{n+1}^2 S_{n+1}^2)} - \frac{1}{(1 - \mu_n^2 (1 - S_n^2))(1 - \mu_n^2 (1 + S_n)^2)} \right] \quad (4)$$

$$A_{bl,n} = \frac{\Delta_{st,n} S_n}{2(1 - S_n^2)(1 - \mu_n^2 (1 - S_n)^2)} \quad (5)$$

$$A_{br,n} = \frac{\Delta_{st,n} S_n}{2(1 - S_n^2)(1 - \mu_n^2 (1 + S_n)^2)} \quad (6)$$

$$S_n = \frac{n\pi V}{L\omega_{b,n}} = \frac{\eta}{\omega_{b,n}} \quad (7)$$

$$\Delta_{st,n} = \frac{-2m_v g L^3}{n^4 \pi^4 EI} \quad (8)$$

2.2 วิธีการแยกรูปแบบเชิงประจักษ์ (Empirical Mode Decomposition, EMD)

วิธีการแยกรูปแบบเชิงประจักษ์ได้ถูกเสนอและประยุกต์ใช้ในการแยกองค์ประกอบของสัญญาณความถี่ที่มีองค์ประกอบจากหลายค่าความถี่ [3] โดยวิธี EMD ใช้การประมาณลักษณะฟังก์ชันของสัญญาณเพื่อแยกสัญญาณออกเป็นองค์ประกอบที่โหมดความถี่ย่อยต่างๆ ซึ่งเรียกว่าฟังก์ชันโหมดแท้จริง (Intrinsic Mode Function, IMF) โดยฟังก์ชันโหมดของสัญญาณซึ่งมี

ความถี่สูงหรือมีคาบสั้นจะถูกแยกออกมาเป็นลำดับต้นๆ และฟังก์ชันโหมดที่มีความถี่ต่ำกว่าหรือคาบยาวกว่าจะถูกแยกออกมาตามลำดับถัดไป และจะหยุดเมื่อไม่สามารถแยก IMF ออกได้อีก ซึ่งผลรวมของฟังก์ชันโหมดทั้งหมดและสัญญาณคงเหลือจากการหักลบด้วย IMF ที่แยกออกจากสัญญาณไปแล้วจะมีค่าเท่ากับสัญญาณตั้งต้น แสดงได้ดังสมการที่ 9 โดยสมมติฐานของวิธี EMD เพื่อระบุสัญญาณใดมีคุณสมบัติเป็น IMF จะประกอบด้วย 2 เงื่อนไข ได้แก่ 1) จำนวนยอดของค่าสูงสุดและค่าต่ำสุด และจำนวนของข้อมูลที่ข้ามผ่านเส้นค่าเฉลี่ยศูนย์ของสัญญาณ (zero-mean) ต้องมีจำนวนที่เท่ากันหรือต่างกันไม่เกิน 1 ค่า และ 2) ค่าเฉลี่ยระหว่างเส้นกรอบ (envelope line) หรือเส้นที่ลากเป็นขอบของค่าสูงสุดกับค่าต่ำสุดต้องเท่ากับ 0

$$\mathbf{a}_v = \sum_{j=1}^n \mathbf{IMF}_j + \mathbf{r}_n \quad (9)$$

โดยที่ $\mathbf{a}_v$ คือ เวกเตอร์สัญญาณความเร่งตรวจวัด

$\mathbf{r}_n$ คือ เวกเตอร์สัญญาณความเร่งที่เหลือซึ่งเป็นฟังก์ชันที่มีองค์ประกอบความถี่เดียว

งานวิจัยนี้ได้นำประโยชน์ของวิธี EMD มาประยุกต์โดย IMF ที่ความถี่ต่างๆซึ่งแยกออกมาได้จะถูกนำมาพิจารณาว่า IMF ใดไม่ได้มาจากพฤติกรรมการสั่นไหวของสะพาน ได้แก่ IMF ซึ่งมีความถี่ตรงกับพฤติกรรมการสั่นไหวของช่วงล่างรถยนต์ทดสอบที่สั่นไหวจากการสั่นไหวตามปกติซึ่งมิใช่เกิดจากการสั่นไหวของสะพาน และ IMF ซึ่งเกิดจากสัญญาณรบกวนในการตรวจวัด จากนั้นจึงนำ IMF ดังกล่าวนี้ออกจากสัญญาณความเร่งตรวจวัดดังสมการที่ 10 ก่อนนำมาวิเคราะห์ความถี่จากสเปกตรัมด้วยการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform, FFT) ต่อไป ซึ่งกระบวนการที่อธิบายข้างต้นนี้จะแตกต่างจากงานวิจัยในอดีตซึ่งพิจารณาว่าความถี่ธรรมชาติโหมดที่ 1 ของสะพานคือ IMF ตัวสุดท้ายที่มีคาบยาวที่สุด [3]

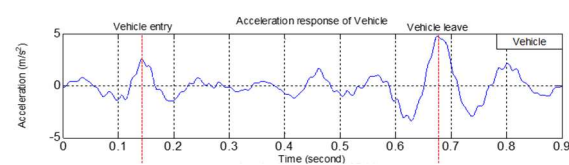
$$\overline{\mathbf{a}_v} = \mathbf{a}_v - \mathbf{IMF}_v \quad (10)$$

โดยที่ $\overline{\mathbf{a}_v}$ คือ เวกเตอร์สัญญาณความเร่งตรวจวัดที่นำไปวิเคราะห์ความถี่

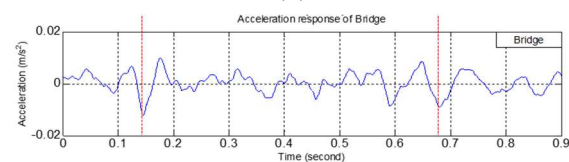
$\mathbf{IMF}_v$ คือ เวกเตอร์องค์ประกอบของสัญญาณความเร่งตรวจวัดที่ไม่ได้มาจากสะพาน

2.3 วิธีการตัดช่วงสัญญาณความเร่ง

ในขณะที่ยานพาหนะเข้าและออกจากสะพาน ในช่วงรอยต่อบริเวณคอสะพานที่มีความไม่ราบเรียบ ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนเนื่องจากความขรุขระนี้เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2



(ก)



(ข)

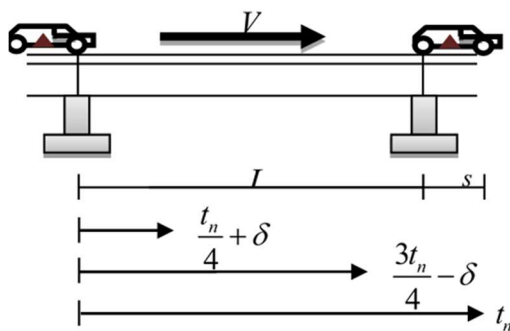
รูปที่ 2 สัญญาณความเร่งที่เกิดการกระแทกของ

ยานพาหนะช่วงเข้าและออกจากสะพาน

(ก) รถยนต์ทดสอบ และ (ข) สะพาน

ด้วยเหตุนี้ค่าความเร่งการสั่นสะเทือนของสะพานจึงมีองค์ประกอบความถี่เนื่องจากการสั่นไหวจากผลของความขรุขระดังกล่าว ซึ่งเป็นความถี่ที่ไม่พึงประสงค์เนื่องจากการสั่นไหวที่ไม่ได้เกิดจากพฤติกรรมปฏิสัมพันธ์ระหว่างสะพานและยานพาหนะที่เคลื่อนผ่าน โดยผลดังกล่าวนี้ผู้วิจัยได้สังเกตพบการกระแทกในสัญญาณความเร่งที่ตรวจวัดได้ ดังนั้นเพื่อลดผลของการกระแทกที่เกิดขึ้นผู้วิจัยจึงเห็นว่าหากพิจารณาช่วงสัญญาณความเร่งเฉพาะเวลาที่รถยนต์อยู่ในช่วงสะพานทั้งสองเพลลา และทำการตัดช่วงสัญญาณความเร่งบริเวณที่รถยนต์ผ่านช่วงรอยต่อสะพานที่มีการกระแทกออกน่าจะได้ผลลัพธ์ในการแยกองค์ประกอบความถี่ของสะพานที่ชัดเจนยิ่งขึ้น ผู้วิจัยจึงนำเสนอวิธีการตัดช่วงสัญญาณความเร่งเพื่อลดผลของความไม่ต่อเนื่องที่เกิดขึ้นขณะยานพาหนะเคลื่อนผ่านบริเวณคอสะพาน

จากการทดสอบในขณะที่ยานพาหนะที่มีความยาวช่วงเพลลา s เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ผ่านสะพานที่มีความยาวช่วง L ซึ่งทำให้เกิดการกระตุ้นทั้งหมดของยานพาหนะตั้งแต่เข้าจนกระทั่งออกจากสะพานที่เวลา t_n เท่ากับ $L+s$ เพื่อความสะดวกในการตัดสัญญาณ จะพิจารณาแบ่งช่วงสัญญาณความเร่งออกเป็น 4 ส่วน และตัดสัญญาณความเร่งที่ปลายทั้งสองด้านเท่ากับ $\frac{t_n}{4}$ ได้แก่ ที่เวลา $\frac{t_n}{4}$ และเวลา $\frac{3t_n}{4}$ ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ยานพาหนะอยู่บนสะพานเต็มคันสำหรับการทดสอบนี้ เนื่องจากในการทดสอบความเร็วยานพาหนะอาจจะไม่ได้คงที่ตลอดการทดสอบ ดังนั้น เพื่อให้ช่วงการตัดสัญญาณครอบคลุมและมั่นใจได้มากขึ้นว่าเป็นช่วงที่ยานพาหนะอยู่บนสะพานเต็มคัน จะพิจารณาช่วงสัญญาณที่ตัดช่วงทั้งสองฝั่งเพิ่มอีกฝั่งละ δ ซึ่งในงานวิจัยนี้พิจารณา δ เท่ากับ 10% ของค่า $\frac{t_n}{4}$ ทั้งช่วงขาเข้าสะพานและขาออกสะพาน โดยเพิ่มช่วงเวลาที่เริ่มตัดสัญญาณสำหรับขาเข้า และหักลบออกในช่วงเวลาที่เริ่มตัดสัญญาณสำหรับขาออก เพื่อให้มั่นใจได้ว่าช่วงที่ตัดสัญญาณนั้นเป็นช่วงที่ยานพาหนะอยู่ในช่วงสะพานเต็มคัน ดังแสดงในรูปที่ 3

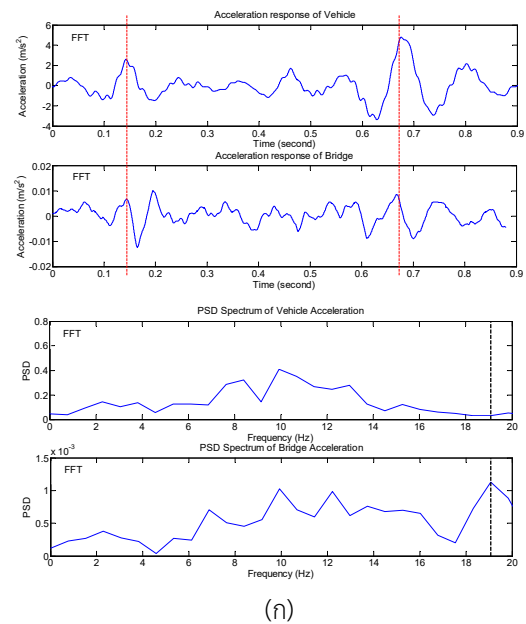


รูปที่ 3 การตัดช่วงสัญญาณความเร่ง

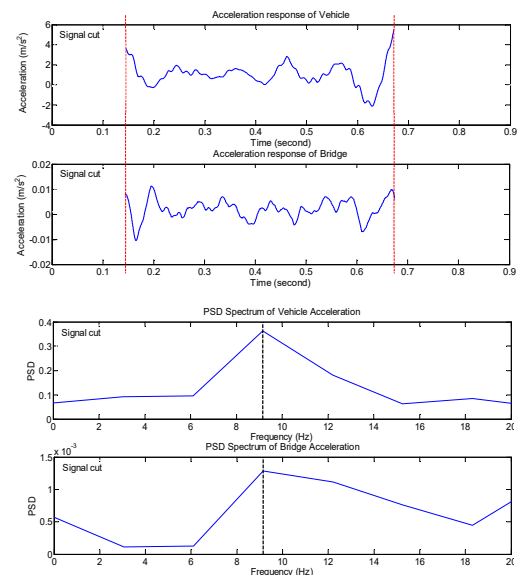
เพื่อตรวจสอบให้แน่ใจว่าช่วงสัญญาณความเร่งที่ทำการตัดเป็นช่วงที่ยานพาหนะอยู่บนสะพานเต็มคัน จึงจะได้เงื่อนไขของระยะห่างช่วงเพลลาของรถยนต์ (s) ที่ใช้จะต้องสอดคล้องกับความยาวช่วงสะพานและช่วงเวลาที่ตัดสัญญาณดังสมการที่ 11

$$s \leq \frac{\left(\frac{t_n}{4} + \delta\right)L}{\frac{3t_n}{4} - \delta} \quad (11)$$

รูปที่ 4 แสดงตัวอย่างสัญญาณความเร่งและสเปกตรัมที่วิเคราะห์ด้วยการแปลงฟูเรียร์ปกติ และการใช้วิธีการตัดสัญญาณ ซึ่งพบว่าจะได้ยอดความถี่จากสเปกตรัมที่ชัดเจนขึ้น



(ก)



(ข)

รูปที่ 4 สัญญาณความเร่งและสเปกตรัม

(ก) FFT และ (ข) วิธีการตัดช่วงสัญญาณ

3. การทดสอบภาคสนาม

3.1 การทดสอบภาคสนาม

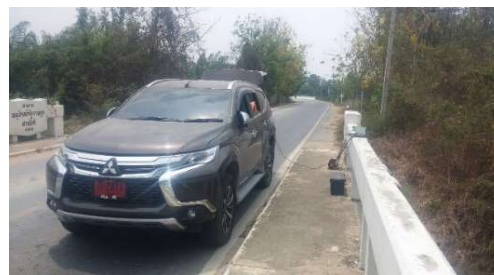
สะพานที่ใช้ในการทดสอบจะเป็นสะพานคอนกรีตช่วงสั้นทั้งแบบคอนกรีตเสริมเหล็กและแบบแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูป ซึ่งอยู่ในเขตพื้นที่อำเภอบ้านโป่ง จังหวัดลพบุรี รับผิดชอบโดยกรมทางหลวงชนบท โดยสะพานที่ถูกเลือกมาทดสอบจำนวน 3 สะพานที่มีความยาวช่วงไม่เกิน 10 เมตร ซึ่งสะพานลักษณะนี้มีจำนวนมากในประเทศไทย โดยก่อนการทดสอบภาคสนามนั้นต้องทำการหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานทั้ง 3 ตัว โดยเลือกใช้การทดสอบการสั่นไหวอิสระ (free vibration test) ค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานทั้ง 3 แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ความถี่ธรรมชาติของสะพานที่ใช้ทดสอบ

สะพาน	ความยาวช่วง (m)	ความถี่ธรรมชาติ (Hz)	สัญลักษณ์
สะพานพ.ศ. 2550	9	12.21	B1
สะพานอนุสรณ์รัฐราษฎร์	8	15.26	B2
สะพานห้วยหนองซาก	9	10.68	B3

3.2 ยานพาหนะทดสอบ

ยานพาหนะที่ใช้ทดสอบจะเลือกจากรถยนต์นั่งส่วนบุคคลที่สามารถหาได้ในตลาดรถยนต์ภายในประเทศไทย โดยถูกเลือกมา 2 ประเภท ได้แก่ รถนั่งสามตอนอเนกประสงค์ (SUV) คือ รถยนต์ยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น Pajero Sport ปี 2016 และรถนั่งสองตอนท้ายบรรทุก (pickup truck) คือ รถยนต์ยี่ห้อ Toyota รุ่น Hilux Vigo Champ ปี 2012 ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยรถยนต์ทั้งสองประเภทมีความถี่ที่เป็นผลของการสั่นไหวที่ต่างกันและมีช่วงล่างที่ต่างกัน



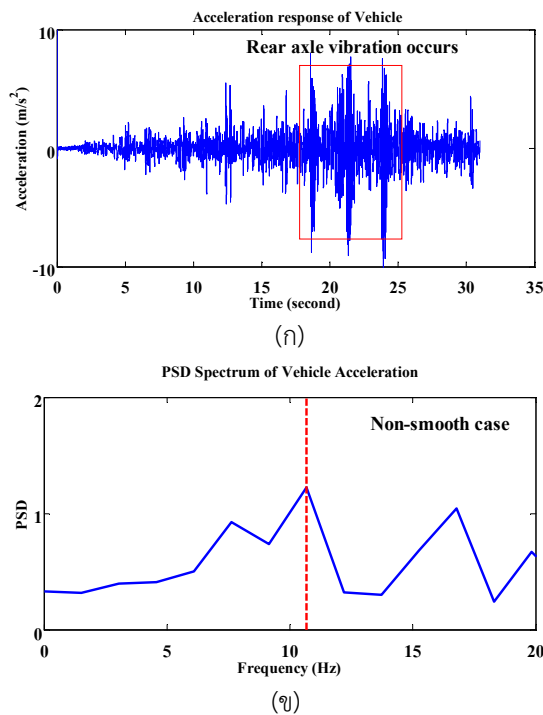
(ก)



(ข)

รูปที่ 5 ยานพาหนะทดสอบ
(ก) SUV และ (ข) Pickup

ในการศึกษานี้ได้ทดลองติดตั้งหัววัดความเร่งที่ตัวถังในช่วงกึ่งกลางช่วงเพลลา และที่บริเวณใต้เพลลาหลัง ซึ่งพบว่ามีค่าความถี่จากสเปกตรัมของสัญญาณความเร่งที่ติดตั้ง ณ กึ่งกลางช่วงเพลลา ไม่พบความถี่ของสะพานซึ่งอาจเป็นเพราะช่วงล่างรถยนต์อาจดูดซับขนาดการสั่นสะเทือนของสะพานไปจนไม่มีนัยสำคัญ ในขณะที่สเปกตรัมของสัญญาณความเร่งที่ติดตั้งบริเวณใต้เพลลาหลังพบว่ามีความถี่ของสะพานแฝงอยู่ ซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบการสั่นไหวของตัวยานพาหนะด้วยการทดสอบให้รถยนต์เคลื่อนผ่านแถบขรุขระสำหรับชะลอความเร็ว (rumble stripes) บนพื้นถนนราบ ดังลักษณะสัญญาณในกรอบสีแดงที่แสดงดังรูปที่ 6 ซึ่งเพลลาจะมีการสั่นไหวที่ไม่ได้เกิดจากพฤติกรรมปฏิสัมพันธ์ระหว่างสะพานและยานพาหนะ โดยการสั่นไหวดังกล่าวคล้ายกับกรณีที่รถยนต์เคลื่อนที่เข้าและออกสะพานในช่วงรอยต่อซึ่งไม่ราบเรียบ ทำให้ได้ค่าความถี่ที่พิจารณาได้ว่าเป็นผลจากยานพาหนะ ซึ่งจะพิจารณาความถี่นั้นให้เป็นความถี่ที่สามารถคัดกรองทิ้งได้ในการวิเคราะห์ โดยตารางที่ 3 แสดงค่าความถี่ของรถยนต์ทดสอบทั้งรถ SUV และรถ Pick up ที่พบเมื่อเคลื่อนที่ผ่านแถบชะลอความเร็ว



รูปที่ 6 สัญญาณความเร่งและสเปกตรัมที่เพลาลังของรถ SUV ขณะเคลื่อนที่บนพื้นถนนที่มีแถบขรุขระชะลอความเร็ว
(ก) สัญญาณความเร่ง (ข) สเปกตรัม

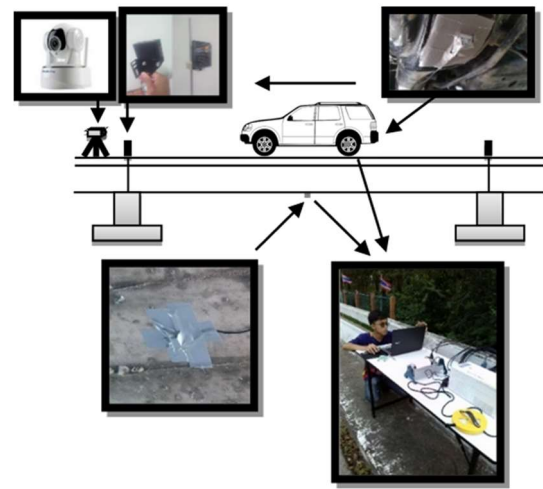
ตารางที่ 3 ความถี่ที่เกิดขึ้นในขณะที่เพลาลังของรถยนต์ทดสอบเกิดการสั่นไหว เมื่อเคลื่อนที่บนพื้นถนนที่มีแถบขรุขระชะลอความเร็ว

ยานพาหนะ	น้ำหนัก (kg)	ความถี่ที่พบ ขณะที่เกิด การสั่นไหว (Hz)	ความยาว ช่วงล้อ (mm)
SUV	2,100	10.68	2,800
Pickup	1,920	9.155	3,085

3.3 การเตรียมการทดสอบ

อุปกรณ์ตรวจวัดที่ใช้ในการเก็บข้อมูลสัญญาณความเร่ง คือ หัววัดความเร่ง (acceleration transducer) รุ่น AS-2GB ยี่ห้อ KYOWA ซึ่งสามารถวัดความเร่งได้สูงสุด 2g โดยทำการติดตั้งหัววัดความเร่งทั้งที่สะพานและยานพาหนะทั้งหมด 2 ตำแหน่ง ได้แก่ ที่กึ่งกลางความยาว

ช่วงของสะพาน โดยอยู่ในตำแหน่งที่แนวล้อของยานพาหนะเคลื่อนผ่านและที่กึ่งกลางเพลาลังของยานพาหนะและทำการติดตั้งเซนเซอร์ตรวจจับวัตถุแบบใช้แสงที่บริเวณปลายสะพานเพื่อช่วยตัดสัญญาณในขณะที่ยานพาหนะเข้าและออกจากสะพาน โดยการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบทั้งหมดในการทดสอบภาคสนามแสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบภาคสนาม

ในการเก็บข้อมูลทดสอบจะใช้ความถี่ในการเก็บข้อมูลที่ 25,000 Hz ซึ่งเป็นความละเอียดค่าสูงสุดของอุปกรณ์ตรวจวัด โดยได้ทำการกรองสัญญาณรบกวนด้วยการกรองความถี่ต่ำแบบบัตเตอร์เวิร์ธ (Low-pass Butterworth filter) ที่ 45 Hz

3.4 รูปแบบการทดสอบ

การทดสอบการหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานโดยใช้ผลตอบสนองของยานพาหนะที่เคลื่อนผ่านในภาคสนามนั้น จะทำการทดสอบด้วยกันทั้งหมด 39 กรณี โดยเปลี่ยนพารามิเตอร์ 3 ชนิด ได้แก่ สะพาน ยานพาหนะทดสอบและความเร็วของยานพาหนะ ดังแสดงในตารางที่ 4 ซึ่งในกรณีของสะพาน พ.ศ. 2550 (B1) พบว่าบริเวณที่ตั้งของสะพานนั้นเชื่อมต่อกับทางโค้งราบจึงทำให้ยากต่อการทำความเร็วของยานพาหนะที่ความเร็วสูง จึงทำการทดสอบได้ที่ความเร็ว 4 ระดับ ในช่วง 20-50 กม./ชม. เท่านั้น

ตารางที่ 4 พารามิเตอร์ที่ทำการเปลี่ยนในการทดสอบ

สะพาน	ยานพาหนะ	ความเร็ว*
B1	SUV Pickup	7 ระดับความเร็ว
B2		ในช่วง 20-80
B3		กม./ชม.

*สะพาน B1 ทดสอบ 4 ระดับความเร็ว 20-50 กม./ชม.

3.5 ค่าความคลาดเคลื่อน

จากงานวิจัยในอดีต [10,11] และจากผลการศึกษา นั้น พบว่าการสั่นไหวของโครงสร้างสะพานจะสั่นไหวด้วยความถี่ซึ่งบิดเบือนไปจากค่าความถี่ธรรมชาติด้วยผลของยานพาหนะ ทำให้หากพิจารณาความคลาดเคลื่อนโดยเทียบกับค่าความถี่ธรรมชาติจริงนั้นจะประเมินได้ถึงความสามารถในการประมาณค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานได้ แต่ไม่สะท้อนถึงพฤติกรรมของระบบการทดสอบทางอ้อม แต่เมื่อหากพิจารณาจากค่าความคลาดเคลื่อนของความถี่การสั่นไหวที่เกิดขึ้นตรวจวัดโดยตรงที่ได้ห้องสะพาน จะแสดงได้ว่าวิธีการทดสอบแบบทางอ้อมซึ่งวัดความถี่การสั่นไหวจากยานพาหนะนั้นมีพฤติกรรมเหมือนกับความถี่ที่สะพานเกิดการสั่นไหวจริงหรือไม่ ดังนั้นความคลาดเคลื่อนที่พิจารณาจึงประกอบด้วยความคลาดเคลื่อนของความถี่สะพานที่ประมาณได้เทียบกับความถี่ธรรมชาติซึ่งได้จากการทดสอบการสั่นไหวอิสระดังสมการที่ 12 และความคลาดเคลื่อนของความถี่สะพานที่ประมาณได้เทียบกับความถี่ของสะพานที่สั่นไหวเมื่อรถยนต์ทดสอบเคลื่อนที่ผ่านสะพานหรือเรียกอย่างย่อว่าความถี่ที่ได้จากการวัดทางตรง ดังสมการที่ 13

$$error_{f_{natural}} = \left(\frac{|f_{indirect} - f_{bridge}|}{f_{bridge}} \right) \times 100 \% \quad (12)$$

$$error_{f_{ambient}} = \left(\frac{|f_{indirect} - f_{ambient}|}{f_{ambient}} \right) \times 100 \% \quad (13)$$

โดยที่ f_{bridge} คือ ความถี่ธรรมชาติของสะพานที่ได้จากการทดสอบและตรวจวัดการสั่นไหวอิสระที่โครงสร้างสะพาน

$f_{ambient}$ คือ ความถี่การสั่นไหวของสะพานเนื่องจากการเคลื่อนที่ผ่านของรถยนต์ทดสอบซึ่งได้จากการตรวจวัดที่โครงสร้างสะพาน

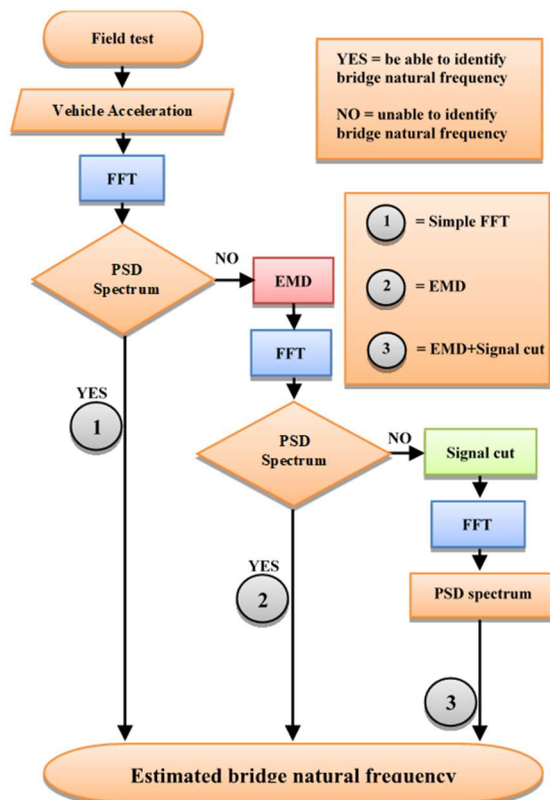
$f_{indirect}$ คือ ความถี่ธรรมชาติของสะพานที่ได้จากวิธีการวัดทางอ้อม ซึ่งได้จากการตรวจวัดที่เพลารถยนต์ทดสอบ

4. ผลการทดสอบ

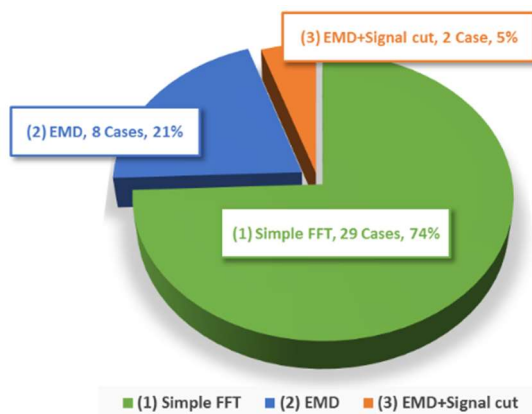
4.1 กระบวนการวิเคราะห์สัญญาณความเร่งเพื่อระบุค่าความถี่สะพาน

งานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์ผลการทดสอบเพื่อหากระบวนการวิเคราะห์ที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด โดยการวิเคราะห์ความถี่ของสะพานจะพิจารณาจากสเปกตรัมความถี่ของสัญญาณความเร่งที่ตรวจวัดจากรถยนต์ทดสอบ ซึ่งสเปกตรัมดังกล่าวจะได้จากการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (FFT) โดยงานวิจัยนี้ได้ศึกษาเปรียบเทียบกระบวนการวิเคราะห์ความถี่ซึ่งแบ่งเป็น 3 ลำดับขั้นตอน ได้แก่ 1) การระบุความถี่จากสเปกตรัมความถี่ของสัญญาณความเร่งตรวจวัดที่ทำการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วตามปกติ (Simple FFT) 2) การระบุความถี่จากสเปกตรัมความถี่ของสัญญาณความเร่งตรวจวัดที่หักลบ IMF ที่ไม่พึงประสงค์ออกจากวิธีแยกแบบเชิงประจักษ์ก่อนแล้วจึงสร้างสเปกตรัมด้วยการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (EMD) และ 3) การระบุความถี่จากสเปกตรัมความถี่ของสัญญาณความเร่งในขั้นตอนที่ 2 (EMD) ซึ่งได้นำมาทำการตัดช่วงสัญญาณแล้วจึงสร้างสเปกตรัมด้วยการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (EMD + Signal cut) โดยทั้งสามขั้นตอนมีกระบวนการวิเคราะห์ดังในรูปที่ 8

ทั้งนี้การวิเคราะห์ในแต่ละขั้นตอนจะมุ่งเน้นไปที่การระบุค่าความถี่โดยเทียบกับความถี่ที่ได้จากการวัดทางตรงเพื่ออธิบายว่าวิธีทางอ้อมสามารถใช้แทนวิธีทางตรงได้หรือไม่ จากนั้นจึงพิจารณาระดับความถูกต้องของเมื่อเทียบกับค่าความถี่ธรรมชาติจริงของสะพาน



รูปที่ 8 แผนผังกระบวนการวิเคราะห์สัญญาณ



รูปที่ 9 แผนผังสัดส่วนการระบุค่าความถี่ได้ของแต่ละขั้นตอนการวิเคราะห์สัญญาณความถี่

ผลการทดสอบพบว่า การวิเคราะห์ด้วยกระบวนการในขั้นตอนแรก (Simple FFT) สามารถระบุค่าความถี่ของสะพานได้ 29 กรณีจาก 39 กรณี หรือคิดเป็นร้อยละ 74 ดังแสดงในรูปที่ 9 ซึ่งพบว่ากรณีส่วนใหญ่ที่สามารถระบุค่าตอบได้ถูกต้องในขั้นตอนนี้คือยานพาหนะที่สัญจรด้วย

ความเร็วประมาณ 40-60 กม./ชม. โดยยานพาหนะที่มีความเร็วต่ำและสูงกว่าช่วงดังกล่าวพบว่ามีค่าความถี่ได้ยาก เนื่องจากหากรถยนต์เคลื่อนที่ช้าเกินไปจะทำให้เกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างรถและสะพานได้น้อย

ในขณะที่หากรถยนต์เคลื่อนที่เร็วเกินไปจะทำให้สัญญาณมีความละเอียดของข้อมูลที่ต่ำ และด้วยช่วงเวลาที่สั้นมากจึงทำให้สะพานสั่นไหวได้จำนวนน้อยรอบซึ่งอาจทำให้ระบุค่าความถี่ได้ยากยิ่งขึ้น อีกทั้งความละเอียดของสเปกตรัมความถี่ที่ได้จาก FFT จะมีค่าเท่ากับส่วนกลับของระยะเวลาของสัญญาณตรวจวัด ดังนั้นโดยปกติแล้วกรณีรถยนต์ทดสอบเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงกว่าจะได้สเปกตรัมความถี่ที่มีความละเอียดต่ำกว่ากรณีรถยนต์ทดสอบเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำ

จากกระบวนการแรก พบว่ามีกรณีที่ยังไม่สามารถระบุค่าความถี่ของสะพานได้จำนวน 10 กรณี จึงได้นำไปวิเคราะห์ในกระบวนการที่สอง (EMD) โดยนำสัญญาณความถี่มาแยก IMF ด้วยวิธี EMD และตัด IMF ที่มีความถี่ใกล้เคียงกับความถี่ของรถยนต์ทดสอบออกจากสัญญาณความถี่ตรวจวัด แล้วจึงนำสัญญาณไปสร้างสเปกตรัมจากการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วเพื่อระบุค่าความถี่ของสะพานต่อไป ซึ่งพบว่าขั้นตอนนี้สามารถระบุค่าความถี่ของสะพานได้ถึง 8 กรณี จาก 10 กรณีที่ไม่สามารถระบุค่าความถี่ได้จากการขั้นตอนแรก หรือคิดเป็นร้อยละ 21 ของกรณีทั้งหมด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวิธี EMD สามารถกำจัดค่าความถี่ที่ไม่พึงประสงค์จากการสั่นของรถยนต์ออกจากสัญญาณหลัก และทำให้สเปกตรัมที่ได้มีค่าความถี่ของสะพานที่ชัดเจนและสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการวัดทางตรง

อย่างไรก็ตามจากกระบวนการที่สอง ยังพบว่ามี 2 กรณี หรือคิดเป็นร้อยละ 5 ของกรณีทั้งหมดที่ยังไม่สามารถระบุค่าความถี่ได้ จึงถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยกระบวนการสุดท้าย ซึ่งคาดว่าเป็นผลจากการที่ยานพาหนะมีการสั่นสะเทือนมากจากผลของความขรุขระหรือความไม่ต่อเนื่องของพื้นผิวทางบริเวณรอยต่อคอสะพาน ดังนั้นในขั้นตอนนี้สัญญาณความถี่ที่แยก

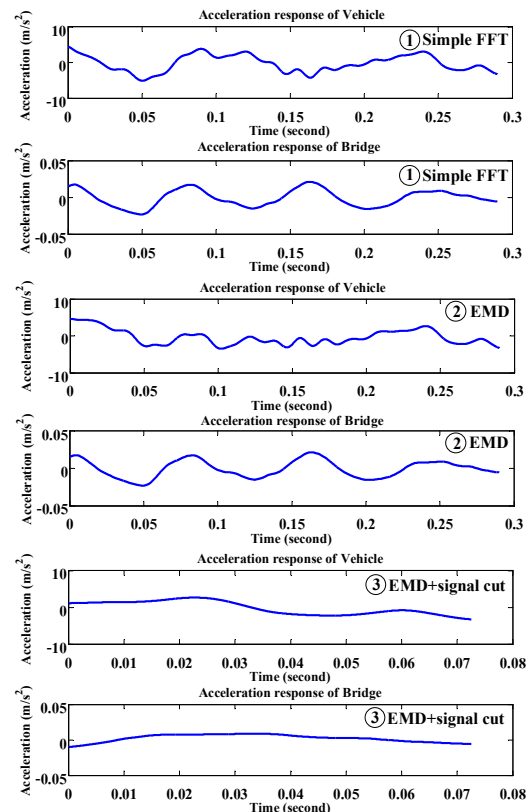
องค์ประกอบของยานพาหนะด้วยวิธี EMD แล้ว จะถูกนำมาตัดช่วงเวลาในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่เข้าและออกในช่วงรอยต่อของสะพานออก เพื่อเป็นการลดผลการสั่นสะเทือนของตัวรถยนต์เองดังที่ได้สังเกตและอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.2 ซึ่งเมื่อผ่านกระบวนการตัดสัญญาณในขั้นตอนสุดท้าย (EMD + Signal cut) นี้แล้ว พบว่าค่าความเร่งของยานพาหนะและค่าสเปกตรัมที่ได้สามารถสังเกตและระบุค่าความถี่ของสะพานได้อย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 10 และรูปที่ 11 ตามลำดับ

จากกระบวนการทั้งสามขั้นตอน สามารถแสดงได้ว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถระบุค่าความถี่ของสะพานได้ในทุกกรณีทดสอบ โดยผลลัพธ์ของแต่ละกรณีแสดงไว้ในตารางที่ 5 โดยสามารถสรุปได้ว่าการทดสอบด้วยวิธีทางอ้อมและวิเคราะห์ด้วยกระบวนการที่นำเสนอสามารถใช้แทนการทดสอบทางตรง ที่เป็นการตรวจวัดโดยตรงที่สะพาน เนื่องจากการสั่นของยานพาหนะได้ เนื่องจากค่าความถี่ที่ได้นั้นตรงกันกับค่าความถี่จากสเปกตรัมของค่าความเร่งที่ติดตั้งใต้ท้องสะพานในทุกกรณีที่ทดสอบ

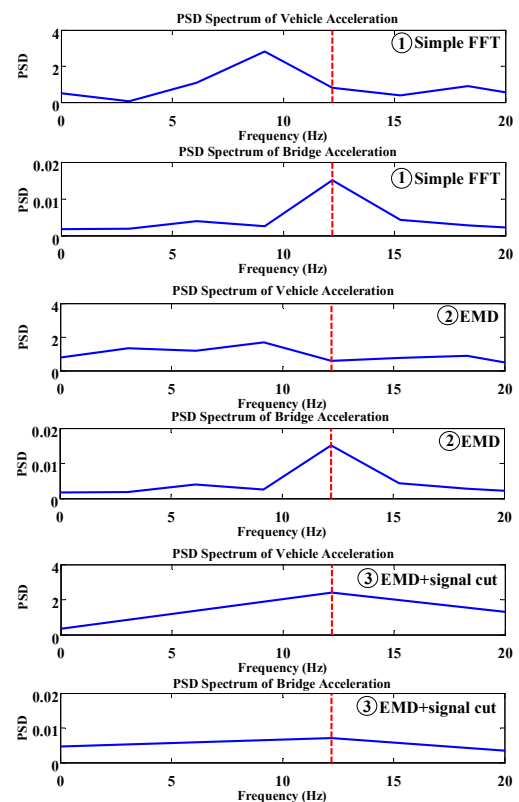
4.2 ผลของพารามิเตอร์

4.2.1 ประเภทและความถี่ของสะพาน

สะพานที่ทำการศึกษา 3 แห่ง ซึ่งพบว่ามีค่าความถี่ธรรมชาติที่ทดสอบได้แตกต่างกัน ผลการทดสอบพบว่าประเภทและความถี่ของสะพานไม่ได้มีนัยสำคัญต่อการระบุค่าความถี่จากสัญญาณความเร่งเนื่องจากค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่ที่วิเคราะห์ได้เทียบกับค่าความถี่ที่ตรวจวัดทางตรงของทั้งสามสะพานด้วยกระบวนการที่นำเสนอมีค่าเป็นศูนย์ในทุกกรณี เมื่อทดสอบด้วยรถยนต์ทั้งประเภท SUV และ Pickup ดังแสดงในตารางที่ 5 นั้นแสดงว่าเมื่อทำการทดสอบกับสะพานที่มีความถี่เพิ่มขึ้น จะสังเกตได้ว่าองค์ประกอบความถี่ของสะพานจะสังเกตจากสัญญาณความเร่งที่ตรวจวัดจากยานพาหนะได้มากยิ่งขึ้น เนื่องจากเมื่อค่าความถี่ของสะพานและยานพาหนะแตกต่างกันมากขึ้นจะทำให้เกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างกันลดลง ซึ่งแสดงว่าวิธีการทดสอบทางอ้อมนี้สามารถใช้แทนการทดสอบทางตรงได้ทุกกรณีสำหรับสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงสั้น



รูปที่ 10 สัญญาณความเร่งของรถประเภท Pickup



รูปที่ 11 สเปกตรัมความถี่ของรถยนต์ประเภท Pickup

4.2.2 ประเภทของยานพาหนะ

ยานพาหนะทดสอบที่ใช้เป็นรถยนต์นั่งส่วนบุคคล

2 ประเภท ได้แก่ รถนั่งสามตอนอเนกประสงค์ (SUV) และรถนั่งสองตอนท้ายบรรทุก (Pickup) ซึ่งยานพาหนะทดสอบที่เลือกใช้นี้มีน้ำหนักและลักษณะช่วงล่างที่ต่างกัน จากผลการทดสอบพบว่า รถประเภท SUV ที่ใช้เป็นยานพาหนะทดสอบนั้น ทำให้ระบุค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานได้ตรงกับค่าความถี่ที่ได้จากการวัดทางตรงได้ง่ายกว่า โดยส่วนมากแล้วสามารถระบุความถี่ได้จากกระบวนการ FFT แบบทั่วไป และทุกกรณีสามารถระบุความถี่สะพานได้ในขั้นตอนของ EMD โดยไม่จำเป็นต้องใช้กระบวนการตัดช่วงสัญญาณมาช่วยในการวิเคราะห์

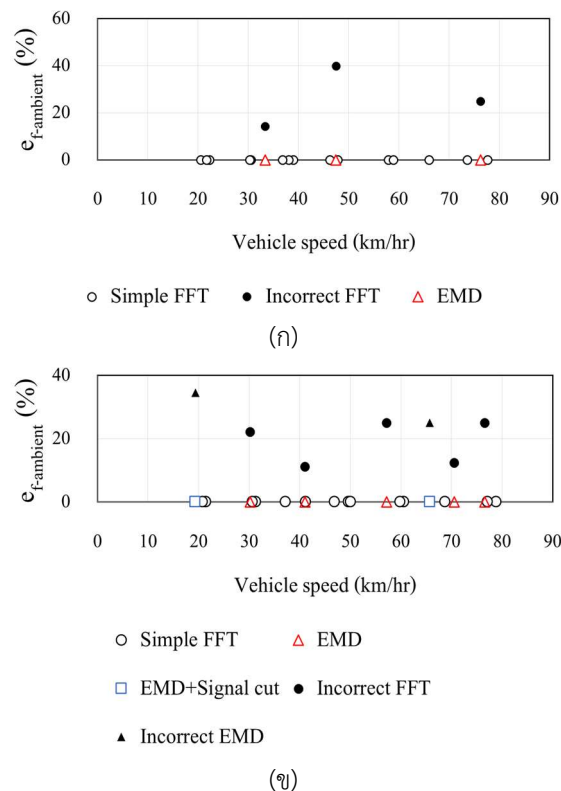
ในขณะที่รถประเภท Pickup มีหลายกรณีที่พบว่าจำเป็นต้องผ่านกระบวนการวิเคราะห์ที่มากขึ้นทั้งการใช้วิธี EMD และการตัดช่วงสัญญาณ จึงจะได้ค่าความถี่สะพานโดยรูปที่ 12 แสดงถึงระดับความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่สะพานที่ระบุได้เทียบกับค่าความถี่สะพานจากการทดสอบทางตรง ของรถประเภท SUV และ Pickup

จากรูปที่ 12 จะสังเกตได้ว่ารถยนต์ประเภท SUV ที่เลือกใช้นี้จำเป็นต้องใช้กระบวนการวิเคราะห์ที่ซับซ้อนเมื่อเทียบกับรถประเภท Pickup เนื่องจากว่ารถประเภท SUV มีน้ำหนักที่มากกว่าทำให้แอมพลิจูดของสัญญาณความถี่ที่ได้ชัดเจนกว่า [12] และการที่ช่วงล่างของรถประเภท SUV ที่ใช้ในการทดสอบมีค่าความหน่วงที่สูงกว่า ทำให้การสั่นไหวของยานพาหนะที่ถูกกระตุ้นจากสะพานหยุดสั้นได้เร็วกว่ารถประเภท Pickup และในขณะที่รถยนต์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงทำให้ผลการสั่นไหวของรถยนต์เองมีแอมพลิจูดมากซึ่งอาจไปบดบังความถี่ของสะพานได้ โดยเฉพาะกรณีของรถประเภท Pickup ที่ช่วงล่างมีความหน่วงต่ำกว่ารถประเภท SUV ซึ่งช่วงล่างมีความนุ่มนวลและความหน่วงสูงกว่า จึงทำให้การสั่นสะเทือนของรถที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยความชุกชุมหรือผลของรอยต่อบริเวณปลายสะพานมีผลต่อสัญญาณความถี่ที่นานกว่ากรณีที่ยานพาหนะมีความหน่วงสูง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องอาศัยวิธีการ EMD เข้ามาช่วยเพื่อแยกองค์ประกอบความถี่ของยานพาหนะออกจาก

ตารางที่ 5 ค่าความคลาดเคลื่อนของความถี่ที่ระบุได้เทียบกับความถี่จากการวัดทางตรง

สะพาน	ยานพาหนะ	ความเร็ว (km/hr)	$e_{f_{ambient}}$ (%)		
			Simple FFT	EMD	EMD + Signal cut
B1	SUV	22.31	0		
		30.54	0		
		38.98	0		
		47.86	0		
	Pickup	19.37	46.87	34.60	0
		30.17	22.21	0	
		37.20	0		
		46.89	0		
		57.14	25.02	0	
		65.72	25.02	25.02	0
		76.60	25.02	0	
B2	SUV	20.57	0		
		30.33	0		
		38.09	0		
		47.45	40.01	0	
		57.95	0		
		66.05	0		
		77.63	0		
	Pickup	21.44	0		
		31.30	0		
		41.03	11.14	0	
		49.66	0		
		60.63	0		
		70.59	12.45	0	
		78.90	0		
B3	SUV	21.74	0		
		33.34	14.28	0	
		36.88	0		
		46.28	0		
		58.91	0		
		73.64	0		
		76.23	25.02	0	
	Pickup	20.78	0		
		30.68	0		
		41.22	0		
		50.08	0		
		59.89	0		
		68.79	0		
		77.14	0		

สัญญาณความเร่งที่ตรวจวัด ซึ่งจะช่วยให้ยอดของค่าความถี่สะพานในสเปกตรัมเด่นชัดขึ้น



รูปที่ 12 ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่ที่ระบุได้
เทียบกับค่าความถี่จากการวัดทางตรง
(ก) รถ SUV และ (ข) รถ Pickup

4.2.3 ความเร็วยานพาหนะ

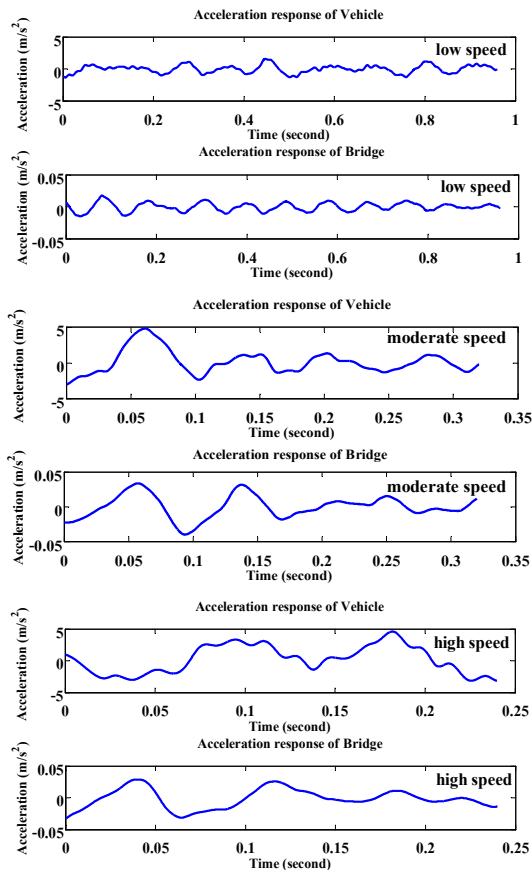
การทดสอบนี้จะทำการเปลี่ยนแปลงความเร็วของยานพาหนะ โดยใช้ความเร็วคงที่อยู่ระหว่าง 20-80 กม./ชม. จากผลการทดสอบพบว่า กรณีที่สามารถระบุค่าความถี่สะพานได้ตรงกับค่าความถี่ที่ได้จากวิธีทางตรง โดยใช้เพียงขั้นตอนการระบุค่าด้วยวิธี Simple FFT ของสัญญาณความเร่งที่ได้จากรถยนต์ซึ่งเคลื่อนที่ในช่วงความเร็วปานกลางประมาณ 40-60 กม./ชม. มีจำนวนมากกว่าเมื่อใช้สัญญาณความเร่งที่ความเร็วของรถยนต์ในช่วงที่ช้าเกินไปหรือสูงเกินไป เนื่องจากช่วงความเร็ว 40-60 กม./ชม. การสั่นไหวของยานพาหนะมีแอมพลิจูดมากเพียงพอที่จะกระตุ้นให้สะพานเกิดการสั่นไหวและ

สะท้อนการสั่นไหวกลับไปที่ยานยนต์ทดสอบได้ จึงสังเกตความถี่สะพานได้ชัดเจนในสเปกตรัมความถี่ และเป็นความเร็วที่ไม่สูงเกินไปจนทำให้การสั่นของรถยนต์ทดสอบมีผลการสั่นไหวเด่นเกินกว่าสะพานจนความถี่ของสะพานจากสเปกตรัมถูกบดบังด้วยค่าความถี่ของรถยนต์ทดสอบ

ในกรณีที่รถยนต์ทดสอบสัญญาณด้วยความเร็วต่ำ (ช้ากว่า 40 กม./ชม.) ทำให้การสั่นไหวของสะพานเนื่องจากรถยนต์ทดสอบมีแอมพลิจูดที่ต่ำ จึงทำให้อาจสังเกตเห็นยอดความถี่ของสะพานในสเปกตรัมได้ไม่ชัดเจนถึงแม้จะมีความละเอียดของสเปกตรัมความถี่สูงจากระยะเวลาของสัญญาณที่นานกว่าก็ตาม และจะสังเกตได้ยากขึ้นหากความถี่ของสะพานมีค่าใกล้เคียงกับความถี่ของรถยนต์ทดสอบ ทำให้ไม่สามารถระบุความถี่ใดความถี่หนึ่งได้อย่างชัดเจน

ในกรณีที่ยานพาหนะสัญญาณด้วยความเร็วสูงกว่า 60 กม./ชม. จะเห็นว่าค่า $e_{f_{ambient}}$ ที่เกิดขึ้นมีค่ามาก เนื่องจากยานพาหนะอยู่บนสะพานด้วยช่วงเวลาที่ยาว และการสั่นไหวของระบบมีจำนวนที่น้อยรอบ และด้วยผลของจำนวนข้อมูลที่น้อยลงในช่วงเวลาที่สั้น ประกอบกับความละเอียดของสเปกตรัมความถี่ที่ต่ำจากระยะเวลาของสัญญาณที่สั้นจึงมีแนวโน้มที่ยากต่อการระบุความถี่ของสะพานได้ละเอียดและถูกต้อง อีกทั้งยานพาหนะมีโอกาสที่จะเกิดการสั่นสะเทือนจากรอยต่อบริเวณปลายสะพาน ทั้งสองด้านมากขึ้นจากการสัญญาณด้วยความเร็วสูง ทำให้ผลของค่าความถี่ของยานพาหนะเองมีองค์ประกอบในสัญญาณความเร่งที่ตรวจวัดได้มากขึ้น ผลของการสั่นไหวด้วยความถี่ของสะพานจึงสังเกตได้ยากขึ้นในสเปกตรัม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่กล่าวถึงผลของความขรุขระที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของการระบุค่าความถี่สะพาน [13,14] โดยลักษณะสัญญาณความเร่งของยานพาหนะที่แตกต่างกันเนื่องจากระดับความเร็วแสดงได้ดังรูปที่ 13 ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าลักษณะสัญญาณความเร่งเนื่องจากการสั่นไหวของรถยนต์เทียบกับสะพานในช่วงความเร็วปานกลางจะมีความคล้ายคลึงมากที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่ารถยนต์ทดสอบมีพฤติกรรมการสั่นไหวที่

สอดคล้องกับการสั่นไหวของสะพาน ทำให้ความถี่ที่ได้จากการตรวจวัดทางอ้อมแสดงถึงความถี่ของการสั่นไหวของสะพาน มากกว่ากรณีรถยนต์ทดสอบสั่นจรด้วยความเร็วต่ำ หรือความเร็วสูง



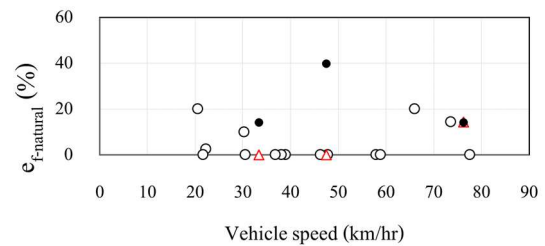
รูปที่ 13 สัญญาณความเร่งของรถยนต์ทดสอบและสะพานในช่วงความเร็วทดสอบที่แตกต่างกัน

4.3 ความถูกต้องของการหาค่าความถี่

ธรรมชาติจริงของสะพาน

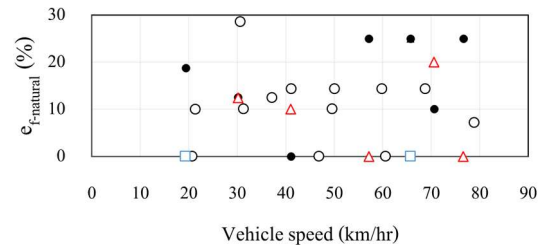
ในการทดสอบนี้ได้ทำการเปรียบเทียบค่าความถี่ที่ระบุได้จากกระบวนการที่ได้นำเสนอกับค่าความถี่จริงของสะพานที่ได้จากสัญญาณความเร่งที่ติดตั้งได้สะพานเพื่อหา ระดับความถูกต้องของค่าความถี่ที่สามารถระบุได้ พบว่าความถี่ที่ระบุได้จากสัญญาณความเร่งของรถประเภท SUV มีความถูกต้องมากกว่ารถประเภท Pickup ดังแสดงในรูปที่ 14 เนื่องจากว่าพฤติกรรมของรถ SUV มีความสอดคล้องกับพฤติกรรมการสั่นไหวของสะพาน ซึ่งระดับ

ความถูกต้องของค่าความถี่ที่ระบุได้ด้วยกระบวนการที่นำเสนออยู่ในช่วงร้อยละ 87.55 และร้อยละ 85.67 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 สำหรับรถประเภท SUV และ Pickup ตามลำดับ



○ Simple FFT △ EMD ● Incorrect FFT

(ก)



○ Simple FFT ● Incorrect FFT
△ EMD ▲ Incorrect EMD
□ EMD+Signal cut

(ข)

รูปที่ 14 ค่าความคลาดเคลื่อนของความถี่ที่ระบุได้เทียบกับความถี่ธรรมชาติจริงของสะพาน

(ก) รถ SUV และ (ข) รถ Pickup

จากผลของความเร็วยานพาหนะที่ส่งผลต่อความละเอียดของสเปกตรัมความถี่และระดับความถูกต้องของการระบุค่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน เพื่อให้การใช้วิธีการทดสอบแบบทางอ้อมมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นและมีความเชื่อถือได้ในการใช้ติดตามประเมินสภาพความแข็งแรงตามอายุของโครงสร้างสะพาน จึงแนะนำให้การทดสอบแต่ละรอบเวลาของการประเมินใช้ยานพาหนะคันเดิมและใช้ความเร็วของยานพาหนะทดสอบที่ใกล้เคียงกับการทดสอบครั้งก่อนหน้า เพื่อให้มีความละเอียดใกล้เคียงกันและสามารถเทียบอัตราการลดทอนของค่าความถี่ที่ระบุได้ว่ามีนัยสำคัญกับสภาพความแข็งแรงของสะพานอย่างไร

5. สรุปผล

จากการศึกษาการหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานจากผลตอบสนองความเร่งของรถยนต์นั่งบุคคล รวมทั้งผลจากปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง เพื่อหาแนวทางการทดสอบและกระบวนการวิเคราะห์ที่ให้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมสามารถสรุปผลได้ดังนี้

(1) ความถี่ธรรมชาติของสะพานสามารถระบุได้จากผลตอบสนองความเร่งการสั่นสะเทือนของรถยนต์นั่งส่วนบุคคล โดยวิธีการที่นำเสนอด้วยกระบวนการที่ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ได้แก่ 1) วิธีแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Simple FFT) 2) วิธีแยกรูปแบบเชิงประจักษ์ (EMD) และ 3) วิธีแยกรูปแบบเชิงประจักษ์ร่วมกับการตัดช่วงสัญญาณความเร่ง (EMD + Signal cut) ดังรูปที่ 8 พบว่าสามารถระบุความถี่ธรรมชาติของสะพานได้คำตอบเดียวกันกับความถี่ที่ได้จากการวัดทางตรงเมื่อยานพาหนะเคลื่อนที่ผ่านสะพานในทุกกรณี

(2) สำหรับสะพานคอนกรีตช่วงสั้น ความแตกต่างกันของความถี่ธรรมชาติของสะพานไม่ได้มีนัยสำคัญต่อการระบุค่าความถี่ของสะพานโดยวิธีการทดสอบทางอ้อม ซึ่งแสดงว่าวิธีการทดสอบทางอ้อมสามารถใช้ได้กับสะพานคอนกรีตแบบแผ่นพื้น และมีแนวโน้มที่ดีขึ้นเมื่อทดสอบกับสะพานที่มีความถี่ใกล้เคียงกับความถี่ที่เกิดจากยานพาหนะ

(3) ประเภทของยานพาหนะไม่ได้มีผลต่อระดับความถูกต้องของการประมาณความถี่สะพานอย่างมีนัยสำคัญ แต่อาจจะส่งผลต่อความชัดเจนของแอมพลิจูดของสเปกตรัมความถี่ของสะพาน โดยเมื่อพิจารณาในด้านของพฤติกรรมการสั่นไหวของยานพาหนะกับสะพานพบว่ารถยนต์นั่งส่วนบุคคลทั้งประเภท SUV และ Pickup ที่นำมาศึกษาสามารถนำมาใช้ระบุความถี่ของสะพานได้ตรงกับความถี่ที่ได้จากการตรวจวัดโดยตรงที่สะพานเมื่อยานพาหนะสัญจรผ่าน โดยความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากการทดสอบด้วยรถยนต์ทั้งสองประเภทยังมีความแตกต่างกันเล็กน้อย โดยระดับความถูกต้องของค่าความถี่จริงของสะพานที่ระบุได้ด้วยกระบวนการที่นำเสนออยู่

ในช่วงร้อยละ 87.55 และร้อยละ 85.67 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ของรถ SUV และ Pickup ตามลำดับ

อย่างไรก็ตามจากลักษณะของสเปกตรัมความถี่ที่วิเคราะห์ได้นั้นพบว่ารถยนต์ทดสอบที่มีช่วงล่างที่มีลักษณะของช่วงล่างที่มีช่วงล่างนุ่มนวลหรือมีความหน่วงสูงกว่าจะสามารถสังเกตยอดความถี่จากสเปกตรัมได้ง่ายกว่าจึงเหมาะสมในการประยุกต์ใช้มากกว่ารถยนต์ประเภทที่ช่วงล่างมีความนุ่มนวลน้อยกว่าหรือมีความหน่วงที่ต่ำกว่า

(4) ความเร็วของยานพาหนะเป็นปัจจัยหลักที่ต้องให้ความสำคัญในการทดสอบเพื่อวัดสัญญาณความเร่ง โดยความเร็วของยานพาหนะที่เหมาะสมอยู่ในช่วงความเร็วปานกลางประมาณ 40-60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เนื่องจากเป็นช่วงความเร็วที่เพียงพอต่อการกระตุ้นการสั่นไหวของสะพานและทำให้เกิดคลื่นการสั่นไหวที่ชัดเจนโดยที่พฤติกรรมการสั่นไหวยานพาหนะยังคงสอดคล้องกับพฤติกรรมของสะพาน การความเร็วในการทดสอบที่สูงส่งผลให้ความละเอียดของสเปกตรัมจาก FFT ลดลง เป็นเหตุให้ระดับความละเอียดของค่าความถี่สะพานที่ประมาณได้ลดลงด้วยเช่นกัน

(5) ผลการศึกษาที่ได้แสดงว่าการทดสอบด้วยวิธีการทางอ้อมสามารถใช้เป็นแนวทางการประเมินความเสียหายเนื่องจากการลดค่าคงของค่าความถี่ธรรมชาติได้ อย่างไรก็ตามเพื่อให้ผลการประเมินการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานที่พิจารณามีแนวโน้มที่ถูกต้องด้วยระดับความละเอียดของข้อมูลใกล้เคียงกัน การทดสอบในแต่ละครั้งควรเลือกใช้ยานพาหนะทดสอบคันเดิมและเคลื่อนที่ด้วยความเร็วใกล้เคียงกันให้มากที่สุด

เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบด้วยประเภทยานพาหนะและจำนวนสะพานที่จำกัด ซึ่งยังมีสะพานที่มีลักษณะองค์อาคารและความยาวช่วงที่แตกต่างกันออกไปเช่นเดียวกับรถยนต์อีกหลายประเภทที่ยังไม่ได้ถูกนำมาทดสอบ โดยมีลักษณะช่วงล่างที่แตกต่างกันเพื่อศึกษาผลของประเภทและช่วงล่างให้ชัดเจนยิ่งขึ้น ซึ่งอาจนำไปสู่การพัฒนากระบวนการทดสอบแบบทางอ้อมเพื่อนำไปใช้ในการประเมินความเสียหายของโครงสร้างสะพานได้

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักงานทางหลวงชนบทที่ 3 และแขวงทางหลวงชนบทจังหวัดชลบุรี ที่อนุญาตให้ทำการทดสอบภาคสนามในโครงสร้างสะพานที่ทำการวิจัยนี้

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณนายพงศ์ศิริ พร้อมพันธุ์ และนายธีรยุทธ ตีลังผล นิสิตระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ให้ความช่วยเหลือในการทดสอบภาคสนาม

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Y. B. Yang, C. W. Lin and J. D. Yau, "Extracting bridge frequencies from the dynamic response of a passing vehicle," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 272, pp. 471–493, 2004.
- [2] P. J. McGetrick, A. Gonzalez and E. J. O'Brien, "Theoretical investigation of the use of a moving vehicle to identify bridge dynamic parameters," *Insight Non-Destructive Testing & Condition Monitoring*, vol. 51(8), pp. 433–438, 2009.
- [3] Y. B. Yang and K. C. Chang, "Extraction of bridge frequencies from the dynamic response of a passing vehicle enhanced by the EMD technique," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 32, pp. 718–739, 2009.
- [4] A. Niyomsuk and P. Asnachinda, "Determination of bridge natural frequency from vehicle acceleration response," in *The 20th National Convention on Civil Engineering*, Chonburi, Thailand, 2015, pp. 1-8. (in Thai)
- [5] A. Niyomsuk and P. Asnachinda, "Experimental verification of bridge natural frequency identification from vibration acceleration response of vehicle," in *The 21st National Convention on Civil Engineering*, Songkhla, Thailand, 2016, pp. 1-8. (in Thai)
- [6] C. W. Lin and Y. B. Yang, "Use of a passing vehicle to scan the fundamental bridge frequencies: an experimental verification," *Engineering Structures*, vol. 27, pp. 1865–1878, 2005.
- [7] C. W. Kim, R. Isemoto, T. Toshinami, M. Kawatani, P. J. McGetrick and E. J. O'Brien, "Experimental investigation of drive-by bridge inspection," in *The 5th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure (SHMII-5)*, Cancún, México, pp. 1-9, 2011.
- [8] D. M. Siringoringo and Y. Fujino, "Estimating bridge fundamental frequency from vibration response of instrumented passing vehicle: analytical and experimental study," *Advances in Structural Engineering*, vol. 15(3), pp. 443–459, 2011.
- [9] Y. B. Yang, K. C. Chang and Y. C. Li, "Filtering techniques for extracting bridge frequencies from a test vehicle moving over the bridge," *Engineering Structures*, vol. 48, pp. 353–362, 2013.
- [10] D. Cantero and E. J. O'Brien, "Tracing the evolution of bridge natural frequencies as a vehicle traverses the bridge," in *The 11th International Conference on Vibration Problems (ICOVP 2013)*, Lisbon, Portugal, pp. 1-9, 2013.

- [11] R. Lalthlamuana and S. Talukdar, “Conditions of visibility of bridge natural frequency in vehicle vertical acceleration,” *Procedia Engineering*, vol. 144, pp. 25-33, 2016.
- [12] Y. B. Yang, W. F. Chen, H. W. Yu and C. S. Chan, “Experimental study of a hand-drawn cart for measuring the bridge frequencies,” *Engineering Structures*, vol. 57, pp.222–231, 2013.
- [13] K. C. Chan, F. B. Wu and Y. B. Yang, “Effect of road surface roughness on indirect approach for measuring bridge frequencies from a passing vehicle,” *Interaction and Multiscale Mechanics*, vol. 3(4), pp. 299–308, 2010.
- [14] Y. B. Yang, Y. C. Li and K. C. Chan, “Using two connected vehicles to measure the frequencies of bridges with rough surface: a theoretical study,” *Acta Mechanica*, vol. 223(8), pp. 1851–1861, 2012.

การพัฒนาเอลิเมนต์โครงข้อแข็งสำหรับการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ไม่เชิงเส้นของ
ผนังรับแรงเฉือนคอนกรีตเสริมเหล็กโดยพิจารณาการเสีรูปจากแรงเฉือน
DEVELOPMENT OF FRAME ELEMENT FOR NONLINEAR FINITE ELEMENT
ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE SHEAR WALLS CONSIDERING
SHEAR DEFORMATION

ธรรมการ ปักพิตรพิบูล^{1*} ภาณุวัฒน์ จ้อยกลัด²

¹นักศึกษานิพนธ์โท ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์

²อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์

Tammakarn Pakpitpibool^{1*} Panuwat Joyklad²

¹ Master Student, Srinakharinwirot University, Ongkharak, Nakhonnayok 26120

² Assistant, Srinakharinwirot University, Ongkharak, Nakhonnayok 26120

*Corresponding author: Email: pakpitpibool@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอขั้นตอนวิเคราะห์ไม่เชิงเส้นของเอลิเมนต์โครงข้อแข็งบนพื้นฐานของฟลักซ์บีบอัด ที่พิจารณาการเสีรูปเฉือน เพื่อจำลองพฤติกรรมของผนังรับแรงเฉือนคอนกรีตเสริมเหล็กซึ่งอาจวิบัติได้อย่างกะทันหันในระดับความเหนียวต่ำ การพัฒนาขั้นตอนการวิเคราะห์สำหรับการตอบสนองสภาพพลาสติกของหน้าตัดอยู่บนพื้นฐานแบบจำลองรอยแตกร้าวเฉลี่ย โดยการแบ่งแถบชั้นลงในหน้าตัด การวิเคราะห์หน้าตัดสภาพพลาสติกทำให้ทำนายกลไกการเฉือนในหน้าตัดคอนกรีตโดยรวมผลกระทบเนื่องจากอัตราส่วนโพรง การอ่อนตัว (Softening Effect) แรงดึงแข็งเกร็ง (Tension Stiffening) ของคอนกรีต หน่วยแรงโอบรัดทางข้างจากเหล็กเสริมออกจากกระนาบ (Confining Effect for Out-of-Plane Steel Reinforcement) รวมถึงการกระทำของเหล็กเดือย (Dowel action) แรงเอลิเมนต์บนพื้นฐานวิธีฟลักซ์บีบอัดได้โดยปริพันธ์เชิงตัวเลขตามพฤติกรรมหน้าตัดบนพื้นฐานความสมดุลตามความยาวเอลิเมนต์ การตรวจสอบความถูกต้องแบบจำลองด้วยตัวอย่างผนังรับแรงเฉือน ผลที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎีโดยแบบจำลองสอดคล้องกัน

คำสำคัญ: ผนังรับแรงเฉือนคอนกรีตเสริมเหล็ก การวิเคราะห์ไม่เชิงเส้น เอลิเมนต์โครงข้อแข็งฟลักซ์บีบอัด

วิธีรอยแตกร้าวกระจายตัวเฉลี่ย การตอบสนองของโครงสร้าง การเสีรูปเนื่องจากแรงเฉือน

ABSTRACT

This paper presents analytical procedures of the flexibility-based for the nonlinear analysis of frame elements with shear deformation developed to model the behavior of RC shear walls which can fail suddenly at lower ductility levels. An analytical procedure was developed for plasticity sectional response analysis modeling based on smeared crack approaches by section discretization into layers. The plasticity sectional analyses were made to capture shear mechanisms in a section of concrete, with the inclusion of nonlinear Poisson effects, softening effect of concrete, tension stiffening, as well

as confining effects for out-of-plane steel reinforcement and especially with dowel action. Based on flexibility method, element forces were obtained by performing equilibrium-based numerical integration on section behaviors along the length of the elements. Verification of the accuracy of the procedure was undertaken with six specimens. A good fit between experimental and theoretical results provided by the model was obtained.

Keyword: Reinforced Concrete Shear Walls, Non-Linear Analysis, Flexibility Frame Element, Smeared Crack Approaches, Structural Response, Shear Deformation.

1. บทนำ

การสร้างแบบจำลองพฤติกรรมของผนังรับแรงเฉือน โดยใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแข็งทั้ง 2 มิติ และ 3 มิติ สามารถอธิบายพฤติกรรมของชิ้นส่วนองค์อาคารได้อย่างถูกต้อง อย่างไรก็ตามการจำลองดังกล่าวต้องการสมการสมบัติของวัสดุสามมิติที่ซับซ้อนและเกี่ยวข้องกับ Degrees of Freedom (D.O.F) จำนวนมากดังนั้นต้องใช้เวลาในการคำนวณที่สูงทำให้จำกัดการประยุกต์ใช้ในการจำลองระบบโครงสร้างที่มีขนาดใหญ่

เอลิเมนต์โครงข้อแข็ง (Frame Element) หรือเอลิเมนต์คาน-เสา (Beam-Column Element) เป็นเอลิเมนต์ในหนึ่งมิติ (1-D Element) มีประสิทธิภาพสำหรับจำลองพฤติกรรมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เนื่องจากใช้เวลาในการวิเคราะห์ที่สั้นกว่า ในขณะที่ความถูกต้องจากการวิเคราะห์ขึ้นอยู่กับรายละเอียดของเอลิเมนต์รวมถึงแบบจำลองวัสดุที่นำมาประยุกต์

อย่างไรก็ดีเอลิเมนต์โครงข้อแข็งอย่างง่ายทั่วไปไม่สามารถทำนายพฤติกรรมของโครงสร้างที่เสียรูปโดยการเฉือน (Shear Deformation) ได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้นในอดีตที่ผ่านมาจึงมีความพยายามที่จะพัฒนาเอลิเมนต์โครงข้อแข็งที่สามารถรวมผลของพฤติกรรมข้างต้นขึ้น โดยเริ่มแรกมีการใช้เอลิเมนต์โครงข้อแข็งบนพื้นฐานจุดหมุนพลาสติก โดย [1], [2] และต่อมา [3]-[6] ได้ใช้เอลิเมนต์ข้างต้นร่วมกับเอลิเมนต์แบบสปริงแรงเฉือน (Shear Spring Element) แต่แบบจำลองเหล่านั้นไม่สามารถ

สร้างปฏิสัมพันธ์ระหว่าง แรงเฉือน แรงตามแกนและแรงดัดในระดับหน้าตัดได้

การวิจัยในลำดับถัดมาแสดงให้เห็นว่าเอลิเมนต์โครงข้อแข็งที่มีการกระจายสภาพไม่ยืดหยุ่น (Inelasticity) ไปตามความยาวเอลิเมนต์มีถูกต้องมากกว่าเอลิเมนต์ที่มีจุดหมุนพลาสติกอยู่เพียงที่ปลายเอลิเมนต์เท่านั้น ตามวิธีการกระจายหน้าตัดพลาสติกนั้นพฤติกรรมไม่ยืดหยุ่นสามารถอธิบายได้โดยการแบ่งย่อยหน้าตัดพลาสติกด้วยแถบเส้นใย (Fiber sections) และจำลองสมบัติของวัสดุคอนกรีตเสริมเหล็กแบบไม่เชิงเส้น

ตามแนวคิดใหม่ [7] ได้พัฒนาแบบจำลองเอลิเมนต์บนพื้นฐานเฟล็กซิบิลิตีโดยแบ่งย่อยหน้าตัดสำหรับวิเคราะห์เอลิเมนต์โครงข้อแข็ง ซึ่งแบบจำลองสามารถคิดผลกระทบปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงแนวแกนและแรงดัดได้ ต่อมา [8], [9] เสนอเอลิเมนต์แรงเฉือนด้วยแบบจำลองบนพื้นฐานแรง (Force method) ไปด้วยอีกทางหนึ่ง

[10] ได้พัฒนาแบบจำลองเอลิเมนต์บนพื้นฐานเฟล็กซิบิลิตีคิดผลกระทบแรงเฉือน แต่ไม่พิจารณาปฏิสัมพันธ์พฤติกรรมระหว่างแรงเฉือนกับพฤติกรรมการดัด ในขณะที่ [11] ใช้เอลิเมนต์บนพื้นฐานแรง สำหรับผลปฏิสัมพันธ์ของแรงเฉือน แรงตามแกน แรงดัด ใช้แบบจำลองสมบัติของวัสดุด้วยวิธีระนาบไมโคร (Micro-plane) ในแถบเส้นใย ซึ่งถือว่าพัฒนาการล่าสุดในการสร้างเอลิเมนต์

ในเทอมของแบบจำลองของวัสดุ การจำลองสภาพพลาสติกของคอนกรีตเสริมเหล็กในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยมากจะใช้ "วิธีรอยแตกร้าวกระจายตัวเฉลี่ย

(Smeared Crack Approaches)" ตามที่แนะนำไว้ใน ACI 445R-99 ซึ่งแบบจำลองนี้ สมการสมดุลและสมการความสอดคล้องของความเครียดถือว่าทั้งในค้ำยันคอนกรีต (Strut) และเหล็กเสริมจะกระจายตัวเฉลี่ย ในกลุ่มนี้ [12] เสนอทฤษฎีสันนามแรงอัด (Compression Field Theory, CFT) ที่สามารถทำนายพฤติกรรมไม่เชิงเส้นของเอลิเมนต์เมมเบรนคอนกรีตเสริมเหล็กโดยคิดการอ่อนตัวลงของคอนกรีต (Softening) อันเนื่องจากการแตกร้าวได้สำเร็จ อย่างไรก็ตาม CFT ไม่สามารถคำนึงถึงผลกระทบแรงดึงแข็งเกร็ง (Tension Stiffening) ของคอนกรีต

ต่อมา [13] ได้ปรับปรุงแบบจำลองและพัฒนาทฤษฎีปรับปรุงสันนามแรงอัด (Modified Compression Field Theory, MCFT) ซึ่งผลกระทบแรงดึงแข็งเกร็งของคอนกรีตได้นำมาพิจารณาในเวลาใกล้เคียงกัน [14], [15] เสนอแบบจำลองที่ต่างกัน และการพัฒนาแบบจำลองมุมหมุนโครงข้อหมุนอ่อนตัว (Rotating Angle Softened Truss Model, RA-STM) ซึ่งต่อมาได้มีการปรับปรุงและการพัฒนา แบบจำลองมุมคงที่โครงข้อหมุนอ่อนตัว (Fixed Angle Softened Truss Model, FA-STM) ซึ่งสามารถในการทำนายพฤติกรรมของคอนกรีตด้านแรงเฉือนได้เป็นอย่างดี โดย [16]-[19] ซึ่งในครั้งนั้น FA-STM ได้เพิ่มโมดูลัสเฉือนและการพัฒนาขั้นตอนแก้ปัญหาที่เรียบง่าย

โดยในกลุ่มวิจัยเดียวกัน [20] ได้เสนออัตราส่วนโพของเฉพาะตัวที่คิดค้นได้ ซึ่งนำไปสู่การพัฒนา แบบจำลองเมมเบรนอ่อนตัว (Softened Membrane Model, SMM) ที่สามารถทำนายการตอบสนองทั้งก่อนและหลังจุดสูงสุดได้อย่างแม่นยำ

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ สังเคราะห์และพัฒนาแบบจำลองรอยแตกร้าวกระจายตัวเฉลี่ยซึ่งใช้ประเมินสมบัติของวัสดุ โดยการพิจารณาผลกระทบการอ่อนตัว แรงดึงแข็งเกร็ง การขยายตัวไม่เชิงเส้น หน่วยแรงโอบรัดทางข้างจากเหล็กเสริมออกจากระนาบ และแรงกระทำของเหล็กเดือย ของคอนกรีต

เสริมเหล็กที่มีสภาพพลาสติก ในการกำหนดเอลิเมนต์โครงข้อแข็งบนพื้นฐานเฟลกซิบิลิตีสำหรับการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ไม่เชิงเส้น ที่สามารถทำนายพฤติกรรมของผนังรับแรงเฉือนคอนกรีตเสริมเหล็ก

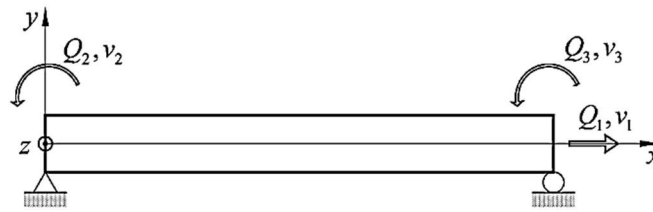
3. สมมติฐาน

กระบวนการวิเคราะห์ต่างๆในงานวิจัยนี้ มีสมมติฐานหลัก คือ

1. ความเครียดตามแนวแกนขององค์อาคาร ใช้สมมติฐานระนาบยังคงเป็นระนาบ
2. ความเครียดเฉือนตามขวางของหน้าตัด พิจารณาให้มีการกระจายเป็นรูปพาราโบลา
3. ไม่รวมผลของหน่วยแรงขมขม (Stress concentration) ที่เกิดขึ้นบริเวณแรงกระทำและฐานรองรับ
4. ไม่คิดการครูดของแรงยึดหน่วง (Bond Slip) และการโก่งเดาะของเหล็กเสริม

4. การจัดรูปแบบเอลิเมนต์โครงข้อแข็งบนพื้นฐานเฟลกซิบิลิตี

สมการเชิงอนุพันธ์ของความสมดุลสำหรับเอลิเมนต์โครงข้อแข็งของแรงตามแกน แรงเฉือนและโมเมนต์ คือ $\frac{\partial N}{\partial x} + w_x(x) = 0$, $\frac{\partial V}{\partial x} + w_y(x) = 0$, $\frac{\partial M}{\partial x} + V = 0$ เมื่อ $w_x(x)$ คือน้ำหนักกระจายสม่ำเสมอในทิศทาง x และ $w_y(x)$ คือน้ำหนักกระจายสม่ำเสมอในทิศทาง y ลักษณะสำคัญของเอลิเมนต์โครงข้อแข็งนี้คือ ภายใต้รูปทรงเรขาคณิตเชิงเส้น สมการเชิงอนุพันธ์ของความสมดุล จะแก้ไขได้เป็นอิสระจากการเปลี่ยนตำแหน่ง และการตอบสนองของวัสดุ ในกรณีที่ไม่มีน้ำหนักบรรทุกบนเอลิเมนต์ ผลเฉลยเอกพันธ์ ของสมการเชิงอนุพันธ์ของความสมดุล ให้การกระจายแรงแนวแกนคงที่ และการกระจายโมเมนต์ดัดเชิงเส้น การคำนวณจะใช้แรงเอลิเมนต์พื้นฐาน Q รูปที่ 1 เป็นค่าขอบเขตของปัญหาได้ลักษณะการกระจายดังนี้



รูปที่ 1 แรงพื้นฐานและการเสียรูปของเอลิเมนต์

$$\begin{Bmatrix} N(x) \\ V(x) \\ M(x) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L} & -\frac{1}{L} \\ 0 & \frac{x}{L}-1 & \frac{x}{L} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \end{Bmatrix} \quad (1a)$$

$$\mathbf{S}(x) = \mathbf{b}(x) \cdot \mathbf{Q} \quad (1b)$$

เมทริกซ์ $\mathbf{b}(x)$ เป็นตัวแทนฟังก์ชันประมาณภายในของแรงและนอกจากนี้ยังสามารถพิจารณาว่าเป็น เมทริกซ์การแปลงความสมดุล ระหว่าง แรงหน้าตัด $\mathbf{S}(x)$ และแรงเอลิเมนต์พื้นฐาน $\mathbf{Q}$

การคำนวณไฟไนต์เอลิเมนต์ไม่เชิงเส้นต้องการทำวนซ้ำ การเสียรูปเอลิเมนต์ที่เพิ่มขึ้น $\Delta \mathbf{v}$ ก่อให้เกิดแรงเอลิเมนต์พื้นฐานที่เพิ่มขึ้น $\Delta \mathbf{Q}$ จากเมทริกซ์ความแข็งเกร็งของเอลิเมนต์ $\mathbf{k}_{ele}^{j-1}$ ในการทำวนซ้ำก่อนหน้านี้อยู่ตามความสัมพันธ์ แรง – การเสียรูป ของเอลิเมนต์ จะได้ว่า

$$\Delta \mathbf{Q}^j = \mathbf{k}_{ele}^{j-1} \Delta \mathbf{v}^j \text{ และ } \mathbf{Q}^j = \mathbf{Q}^{j-1} + \Delta \mathbf{Q}^j \quad (2)$$

แรงเอลิเมนต์พื้นฐานที่เพิ่มขึ้น $\Delta \mathbf{Q}$ ก่อให้เกิดเวกเตอร์แรงหน้าตัดเพิ่มขึ้น $\Delta \mathbf{S}(x)$ ด้วยความสัมพันธ์ตามสมการที่ (1) จะได้ว่า

$$\Delta \mathbf{S}(x) = \mathbf{b}(x) \cdot \Delta \mathbf{Q} \quad (3)$$

$$\mathbf{S}(x)^j = \mathbf{S}(x)^{j-1} + \Delta \mathbf{S}(x)^j \quad (4)$$

เวกเตอร์แรงต้านทานหน้าตัด $\mathbf{S}_R(x)$ และเมทริกซ์ความแข็งเกร็งหน้าตัด $\mathbf{k}_s(x)$ จะถูกกำหนดจากเวกเตอร์การเสียรูปหน้าตัด (Section Deformations)

$\mathbf{e}(x) = \{\varepsilon_a(x) \quad \gamma_{xy}(x) \quad \kappa_z(x)\}^T$ โดยที่ $\varepsilon_a(x)$ เป็นความเครียดตามแกนที่พิกัดจุดกำเนิด $\gamma_{xy}(x)$ เป็นความเครียดเฉือน, $\kappa_z(x)$ เป็นความโค้งที่ทราบค่าการเสียรูปหน้าตัดที่เพิ่มขึ้น $\Delta \mathbf{e}(x)$ จะถูกกำหนดโดยการบวกเพิ่มจากเศษเหลือการเสียรูปหน้าตัด $\mathbf{e}_r(x)$ จากการทำวนซ้ำก่อนหน้านี้อยู่ต่อการเสียรูปที่เกิดจากการแรงหน้าตัดที่เพิ่มขึ้น $\Delta \mathbf{S}(x)$ โดยที่

$$\Delta \mathbf{e}^j(x) = \mathbf{f}_s^{j-1}(x) \cdot \Delta \mathbf{S}^j(x) + \mathbf{e}_r^{j-1}(x) \quad (5)$$

$$\mathbf{e}^j(x) = \mathbf{e}^{j-1}(x) + \Delta \mathbf{e}^j(x) \quad (6)$$

เมื่อ $\mathbf{f}_s(x)$ คือเฟลกซิบิลิตีของหน้าตัด หลังจากตั้งค่าความสัมพันธ์ความสมดุล สภาพความเข้ากันได้ทางเรขาคณิตของเอลิเมนต์โครงข้อแข็ง สามารถกำหนดเป็นสมการรูปแบบอ่อนปรน (Weak Form) ของไฟไนต์เอลิเมนต์ไม่เชิงเส้นได้ด้วยวิธีแรงเสมือน ดังนี้

$$\delta \mathbf{Q}^T \Delta \mathbf{v}^j = \int_L \delta \mathbf{S}^T(x) \cdot \Delta \mathbf{e}^j(x) dx \quad (7)$$

โดยใช้สมการ (1) สำหรับความสัมพันธ์ความสมดุลของระบบแรงเสมือน $\delta \mathbf{S}(x) = \mathbf{b}(x) \cdot \delta \mathbf{Q}$ และหลังจากการแทนที่ลงในสมการ (7) ให้สมการสภาพความเข้ากันได้เป็น

$$\Delta \mathbf{v}^j = \int_L \mathbf{b}^T(x) \cdot \Delta \mathbf{e}^j(x) dx \quad (8)$$

โดยการแทนที่สมการ (5) ลงในสมการ (8) การเสียรูปเอลิเมนต์ที่เพิ่มขึ้น เขียนได้เป็น

$$\Delta \mathbf{v}^j = \left[\int_L \mathbf{b}^T(x) \cdot \mathbf{f}_s^{j-1}(x) \cdot \mathbf{b}(x) dx \right] \cdot \Delta \mathbf{Q}^j + \left[\int_L \mathbf{b}^T(x) \cdot \mathbf{e}_r^{j-1}(x) dx \right] \quad (9a)$$

$$\Delta \mathbf{v}^j = [\mathbf{f}_{\text{ele}}^{j-1}] \cdot \Delta \mathbf{Q}^j + [\mathbf{v}_r^{j-1}] \quad (9b)$$

เมื่อ $\mathbf{f}_{\text{ele}}(x)$ คือเมทริกซ์เฟลกซิบิลิตี้อิเลเมนต์ $\mathbf{v}_r$ คือเสตคค้ำการเสียรูปอิเลเมนต์ในการทำให้เกิดผลเชิงตัวเลขของการกำหนดปริพันธ์ในสมการ (7)

สำหรับการคำนวณเมทริกซ์เฟลกซิบิลิตี้อิเลเมนต์และเสตคค้ำการเสียรูปอิเลเมนต์ จะใช้กฎปริพันธ์เชิงตัวเลขของ เกาส์ - เลอจองด์ หรือ เกาส์ - โลแบตโต (Gauss-Lobatto) โดยขั้นตอนทั้งหมด ได้เทียบเคียงแนวคิดของ [21] ซึ่งอธิบายกระบวนการกำหนดสถานะของอิเลเมนต์บนพื้นฐานเฟลกซิบิลิตี้อิเลเมนต์ การทำวนซ้ำภายในอิเลเมนต์และวนซ้ำระบบรวมใหญ่อย่างถูกต้อง

5. การประเมินความเครียด

อิเลเมนต์เมมเบรนคอนกรีตเสริมเหล็ก จะสมมติสี่ระบบพิกัดโดยทั่วไปรูปที่ 2(ก) ดังนี้ ระบบพิกัด (x, y) เป็นพิกัดเฉพาะที่ (Local Coordinate) ของอิเลเมนต์ ระบบพิกัดหลัก $(1, 2)$ เป็นหน่วยแรงหลัก ระบบพิกัด (r, d) หน่วยแรงหลักของคอนกรีต ระบบพิกัด (si, ti) ทิศทางของเหล็กเสริม เมื่อ α_{1x} คือมุมระหว่างแกน x และแกน 1 มุมหมุน α_{rx} คือมุมระหว่างแกน x และแกน r มุมเหล็กเสริม α_{ix} คือมุมระหว่างแกน x และแกน si เพื่อแปลงระบบของพิกัดเวกเตอร์ หน่วยแรงและความเครียด จะใช้เมทริกซ์ $[\mathbf{T}(\theta)]$ ต่อไปนี้

$$[\mathbf{T}(\theta)] = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & 2\sin \theta \cos \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & -2\sin \theta \cos \theta \\ -\sin \theta \cos \theta & \sin \theta \cos \theta & (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) \end{bmatrix} \quad (10)$$

เพื่อคำนวณหน่วยแรงและความเครียด ในทิศทางของรอยแตกร้าวจะคำนวณได้โดยมุมหมุน (Rotating Angle) α_{rx} ได้มาจากสถานะความเครียด โดยที่มุมหมุนหลัก α_{rx} มีหน่วยแรงเฉือนคอนกรีต $\tau_{xy}^c = 0$ รูปที่ 2(ข) การคำนวณมุมหลัก α_{1x} ได้จากสถานะหน่วยแรงที่ทราบค่า ทั้ง α_{rx} และ α_{1x} จะได้ดังนี้คือ

$$\tan 2\alpha_{rx} = \frac{\gamma_{xy}}{\varepsilon_x - \varepsilon_y}, \quad \tan 2\alpha_{1x} = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \quad (11)$$

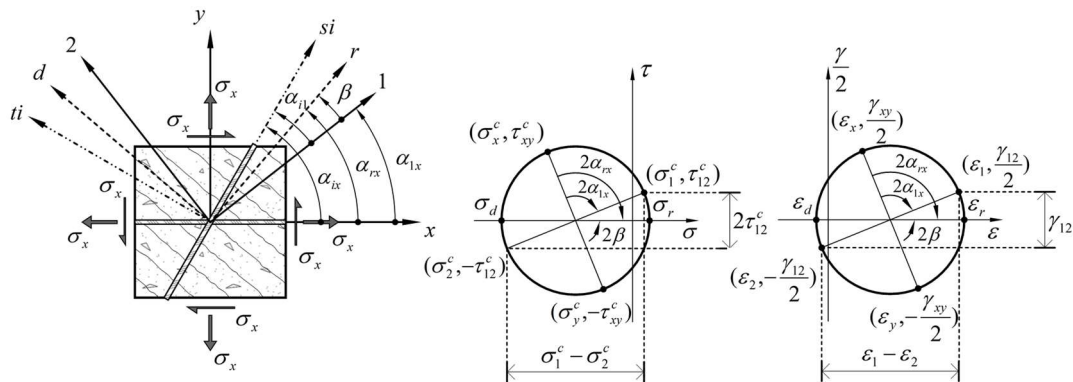
โดยทั่วไปความสัมพันธ์ของหน่วยแรง - ความเครียด (Stress-Strain Relationships) ของคอนกรีตและเหล็กเสริมจะได้มาจากการทดสอบแกนเดียว ทำให้ความเครียดสองแกนในทิศทาง $(1, 2)$, $\{\varepsilon_{12}\} = \{\varepsilon_1 \quad \varepsilon_2 \quad \gamma_{12}\}^T$ ต้องแปลงเป็นความเครียดหลักแกนเดียว $\{\bar{\varepsilon}_{12}\} = \{\bar{\varepsilon}_1 \quad \bar{\varepsilon}_2 \quad \gamma_{12}\}^T$ โดยใช้อัตราส่วน โพซงของคอนกรีตที่แตกร้าว v_{12} คืออัตราส่วนของผลการเพิ่มขึ้นของความเครียดดึงที่เกิดขึ้นในทิศทางหลัก (1) ต่อแหล่งที่มาของความเครียดอัดเพิ่มขึ้นในทิศทางหลัก (2) และ v_{21} คืออัตราส่วนของผลความเครียดอัดเพิ่มขึ้นในทิศทางหลัก (2) ต่อแหล่งที่มาของความเครียดดึงเพิ่มขึ้นในทิศทางหลัก (1) โดย [22] ความเครียดแกนเดียวได้คือ

$$\begin{Bmatrix} \bar{\varepsilon}_1 \\ \bar{\varepsilon}_2 \\ \frac{\gamma_{12}}{2} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{1-v_{12}v_{21}} & \frac{v_{12}}{1-v_{12}v_{21}} & 0 \\ \frac{v_{21}}{1-v_{12}v_{21}} & \frac{1}{1-v_{12}v_{21}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \frac{\gamma_{12}}{2} \end{Bmatrix} \quad (12a)$$

$$\{\bar{\varepsilon}_{12}\} = [\mathbf{V}] \cdot \{\varepsilon_{12}\} \quad (12b)$$

เมื่อ $[\mathbf{V}]$ คือเมทริกซ์การแปลงความเครียดความเครียดแกนเดียว $\bar{\varepsilon}_1$ และ $\bar{\varepsilon}_2$ ใช้ในการคำนวณหน่วยแรงคอนกรีตในทิศทางหลัก σ_1^c และ σ_2^c จะได้ในแบบจำลองความสัมพันธ์สมบัติของคอนกรีต

สำหรับเหล็กเสริม ความเครียดหลักแกนเดียว เหล็กเสริมตามขวางและเหล็กเสริมตามยาวตามลำดับคือ



(ก) ระบบพิกัดของเอลิเมนต์คอนกรีตเสริมเหล็ก (ข) วงกลม Mohr หน่วยแรง (ค) วงกลม Mohr ความเครียด

รูปที่ 2 ระบบพิกัดของเอลิเมนต์คอนกรีตเสริมเหล็กและวงกลมมอร์ (Mohr's circle) หน่วยแรงและความเครียด

$$\bar{\varepsilon}_{sT} = \left(\frac{1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \varepsilon_1 + \frac{\nu_{12}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \varepsilon_2 \right) \sin^2(\alpha_{1x}) + \left(\frac{\nu_{21}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \varepsilon_1 + \frac{1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \varepsilon_2 \right) \cos^2(\alpha_{1x}) + \gamma_{12} \sin(\alpha_{1x}) \cos(\alpha_{1x}) \quad (13)$$

$$\bar{\varepsilon}_{sL} = \left(\frac{1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \varepsilon_1 + \frac{\nu_{12}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \varepsilon_2 \right) \cos^2(\alpha_{1x}) + \left(\frac{\nu_{21}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \varepsilon_1 + \frac{1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \varepsilon_2 \right) \sin^2(\alpha_{1x}) - \gamma_{12} \sin(\alpha_{1x}) \cos(\alpha_{1x}) \quad (14)$$

หน่วยแรงหลักแกนเดียวเทียบเท่า f_{si} ในทิศทางของหลักเส้นจะคำนวณได้จากความเครียดหลัก $\bar{\varepsilon}_{si}$ จะได้รับในความสัมพันธ์สมบัติของเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในคอนกรีต

6. แบบจำลองความสัมพันธ์สมบัติของวัสดุ

6.1. แบบจำลองความสัมพันธ์สมบัติคอนกรีต

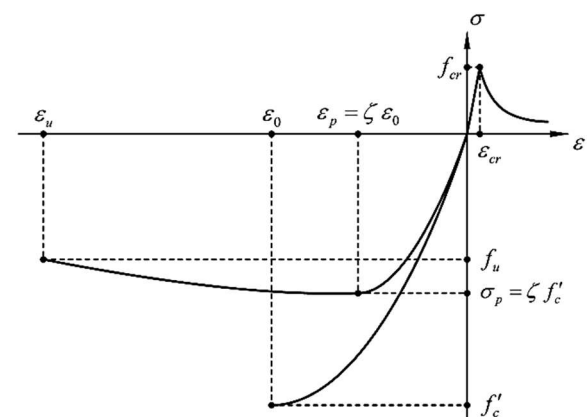
แบบจำลองสมบัติของคอนกรีตในทิศทางหลัก (1,2) ใช้ประเมินสามสถานะต่อไปนี้

คอนกรีตอยู่ภายใต้สภาวะ ความเครียดดึง - ความเครียดอัด ในกรณีนี้ ความเครียดแกนเดียวของคอนกรีต $\bar{\varepsilon}_1$ อยู่ในแรงดึงและความเครียดแกนเดียว $\bar{\varepsilon}_2$ อยู่ในแรงอัด สภาวะนี้หน่วยแรงคอนกรีตแกนเดียว σ_1^c คำนวณได้จาก $\bar{\varepsilon}_1$ และไม่ได้เป็นฟังก์ชันของความเครียดคอนกรีตในแนวตั้งฉาก $\bar{\varepsilon}_2$ ตามที่เสนอโดย [15], [16]

อย่างไรก็ดี σ_2^c จะอ่อนตัวลงเนื่องจากแรงดึงในทิศทางตั้งฉากโดย [23] ดังนี้

$$\zeta = \frac{1}{1 + 0.35 \cdot \left(\frac{\bar{\varepsilon}_1}{\bar{\varepsilon}_2} - 0.28 \right)^{0.8}} \leq 1 \quad (15)$$

เมื่อ ζ คือสัมประสิทธิ์การอ่อนตัว (รูปที่ 3) เมื่อ ε_0 เป็นความเครียดที่กำลังอัดสูงสุด f'_c และ $\zeta f'_c$ เป็นกำลังอัดคอนกรีตอ่อนตัว



รูปที่ 3 เส้นกราฟ หน่วยแรง - ความเครียด อ่อนตัว

คอนกรีตอยู่ภายใต้ สภาวะ ความเครียดดึง - ความเครียดดึง ความเครียดแกนเดียวของคอนกรีต $\bar{\varepsilon}_1$ อยู่ในแรงดึง และความเครียดแกนเดียวของคอนกรีต $\bar{\varepsilon}_2$ ยังอยู่ในแรงดึงด้วยเช่นกัน ในกรณีนี้หน่วยแรงคอนกรีต

แกนเดียว σ_1^c ประเมินจาก $\bar{\varepsilon}_1$ และ σ_2^c ประเมินจาก $\bar{\varepsilon}_2$ ทั้ง σ_1^c และ σ_2^c เป็นฟังก์ชันของความเครียดคอนกรีต $\bar{\varepsilon}_1$ และ $\bar{\varepsilon}_2$ ตามลำดับ

คอนกรีตอยู่ภายใต้ สภาวะ ความเครียดอัด - ความเครียดอัด ความเครียดแกนเดียวของคอนกรีต $\bar{\varepsilon}_1$ และ $\bar{\varepsilon}_2$ ทั้งสองอยู่ในแรงอัด การวิจัยนี้จะใช้สมการกำลังแรงอัดแบบสองแกนของ Vecchio [24] ที่ปรับจากเดิมของ [22] กำลังอัดคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นขึ้นอยู่กับหน่วยแรงทางข้าง (Confining) ในทิศทางตั้งฉาก เพิ่มประสิทธิภาพกำลัง คอนกรีตในแรงอัดจะขยายตัวด้านข้างและทำให้ค่าอัตราส่วนโพของเพิ่มขึ้น ใช้ไม่เกิน 0.5 หน่วยแรงหลัก คอนกรีตเชิงตั้งฉาก σ_1^c และ σ_2^c ที่ตรงกันกับความเครียดแกนเดียวของคอนกรีต $\bar{\varepsilon}_1$ และ $\bar{\varepsilon}_2$ สมการกรอบบีบตีในแรงอัดสองแกนคือ

$$K_{c1} = 1 + 0.92 \left(\frac{-\sigma_2^c}{f_c'} \right) - 0.76 \left(\frac{-\sigma_2^c}{f_c'} \right)^2 \quad (16)$$

$$K_{c2} = 1 + 0.92 \left(\frac{-\sigma_1^c}{f_c'} \right) - 0.76 \left(\frac{-\sigma_1^c}{f_c'} \right)^2 \quad (17)$$

เมื่อ K_{c1} และ K_{c2} เป็นตัวคูณเพิ่มกำลังสำหรับคอนกรีตในทิศทาง (1) และ (2) ตามลำดับ หน่วยแรงและความเครียดสูงสุดในทิศทาง (1) จะได้เป็น $\sigma_{1p} = K_{c1} f_c'$ และ $\varepsilon_{1p} = K_{c1} \varepsilon_0$ ตามลำดับและหน่วยแรงและความเครียดสูงสุดในทิศทาง (2) จะได้เป็น $\sigma_{2p} = K_{c2} f_c'$ และ $\varepsilon_{2p} = K_{c2} \varepsilon_0$ ตามลำดับ

6.2. การโอบรัดโดยเหล็กเสริมตามขวางในทิศทางออกจากกระนาบ

การขยายตัวด้านข้างเนื่องจากแรงอัดก่อให้เกิดการโอบรัดโดยเหล็กเสริมตามขวางที่มีทิศทางออกจากกระนาบสามารถเพิ่มกำลังและความเหนียวของคอนกรีตภายใต้แรงอัดจากการยึดรั้งโดยเหล็กเสริม อัตราส่วนเหล็กเสริมออกจากกระนาบ ρ_z หน่วยแรงอัดใน ทิศทางออกจากกระนาบ σ_z^c มีขนาดค่อนข้างเล็กประมาณโดย

$$\sigma_z^c = -\rho_z \cdot f_{sz} \text{ และ } f_{sz} = E_s \cdot \bar{\varepsilon}_z \leq f_{yz} \quad (18)$$

ถ้าเหล็กไม่คราก

$$\bar{\varepsilon}_z = \frac{E_{cn}}{E_{cn} + \rho_z E_s} \left(-v_{12} \cdot \frac{\sigma_2^c}{E_2^c} - v_{21} \cdot \frac{\sigma_1^c}{E_1^c} \right) \quad (19)$$

กรณีอื่นๆ

$$\bar{\varepsilon}_z = -\frac{\rho_z \cdot f_{yz}}{E_{cn}} - v_{12} \cdot \frac{\sigma_2^c}{E_2^c} - v_{21} \cdot \frac{\sigma_1^c}{E_1^c} \quad (20)$$

โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตในทิศทางออกจากกระนาบ E_{cn} เท่ากับ $2 \cdot f_c' / \varepsilon_0$ สำหรับการพิจารณาผลลัพธ์หน่วยแรงคอนกรีตในการวิเคราะห์การตอบสนองหน้าตัด ข้อมูลเกี่ยวกับแบบจำลองนี้สามารถพบได้ใน [24]

6.3. การกระทำของเหล็กเดือย

การกระทำของเหล็กเดือย (Dowel Action) สามารถเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนและความเหนียวหลังจุดสูงสุดขององค์อาคาร โดยเฉพาะคานที่มีเหล็กเสริมตามขวางน้อย แรงเฉือนทิศทางตั้งฉากกับแนวแกนที่รับด้วยเหล็กเสริมจะคำนวณตามสูตรที่เสนอโดย He และ Kwan [25] หน่วยแรงเฉือนเหล็กเดือย τ_{xy}^d ได้ดังนี้

$$\tau_{xy}^d = \frac{\rho_x}{A_{sx}} \cdot V_d, V_d = E_s I_s \lambda^3 \Delta \leq V_{du} \quad (21)$$

$$\Delta_s = \left(\frac{\pi}{\lambda} \right) \cdot \gamma_{xy}, \quad I_s = \frac{\pi \cdot d_b^4}{64} \quad (22)$$

$$\lambda = 4 \sqrt{\frac{k_c \cdot d_b}{4 \cdot E_s \cdot I_s}}, \quad k_c = \frac{101.6 \cdot \sqrt{|f_c'|}}{d_b^{2/3}} \quad (23)$$

เมื่อ Δ_s คือการเปลี่ยนตำแหน่งของเหล็กเดือย E_s คือโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเดือย d_b คือเส้นผ่าศูนย์กลางของเหล็กเดือย I_s คือโมเมนต์ความเฉื่อยของเหล็กเดือย λ คือพารามิเตอร์ความแข็งแกร่งของคอนกรีตต่อความแข็งแกร่งของเหล็กเสริม k_c คือความแข็งแกร่งของฐานรองรับคอนกรีต กำลังรับแรงเฉือนของเหล็กเดือย V_d จะ ถูก จำกัด โดย $V_{du} = 1.27 \cdot d_b^2 \cdot \sqrt{|f_c'|} \sqrt{|f_y'|}$

6.4. แบบจำลองความสัมพันธ์สมบัติของเหล็กเสริม

แบบจำลองสมบัติของเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในคอนกรีต สำหรับหน่วยแรงเหล็กเสริม f_{si} ตามทิศทางของเหล็ก คำนวณได้จากความเครียดเหล็กเสริมแกนเดียว $\bar{\varepsilon}_{si}$ ผ่านความสัมพันธ์ หน่วยแรง – ความเครียด โดย [19] ดังนี้

$$f_{si} = E_s \bar{\varepsilon}_{si} \quad , \bar{\varepsilon}_{si} \leq \varepsilon_n \quad (24)$$

$$f_{si} = f_y \left[(0.91 - 2B) + \left(0.02 + 0.25B \frac{\bar{\varepsilon}_{si}}{\varepsilon_y} \right) \right] \quad , \bar{\varepsilon}_{si} > \varepsilon_n \quad (25)$$

$$\varepsilon_n = \varepsilon_y (0.93 - 2B) \quad , \quad B = \frac{1}{\rho} \left(\frac{f_{cr}}{f_y} \right)^{1.5} \quad (26)$$

เมื่อ f_{si} คือหน่วยแรงของเหล็กเสริม $\bar{\varepsilon}_{si}$ คือความเครียดแกนเดียวของเหล็กเสริม f_y คือหน่วยแรงครากของเหล็กเส้นเปลือย ε_y คือความเครียดครากเหล็กเส้นเปลือย E_s คือโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริม ρ คืออัตราส่วนของการเสริมเหล็ก f_{cr} คือกำลังการแตกร้าวของคอนกรีต

7. แรงและความแข็งแรงของหน้าตัด

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์บนพื้นฐานการแบ่งเส้นใย โดยการแบ่งหน้าตัดออกเป็นส่วนชั้นต่างๆ แต่ละเส้นใยเป็นตัวแทนพฤติกรรมของคอนกรีตและเหล็กเสริม ความเครียดตามแกนแต่ละเส้นใยจะคำนวณได้จากความเครียดที่จุดศูนย์ถ่วงและความโค้งหน้าตัดโดยสมมติฐานหน้าตัดระนาบยังคงเป็นระนาบ ความเครียดเฉือนจะสมมติว่ากระจายเป็นโค้งพาราโบลา ทั้งนี้ความเครียดตามขวางคำนวณได้โดยทวนซ้ำ

ความแข็งแรงสัมพัทธ์และแรงต้านทานของแต่ละเส้นใยจะคำนวณได้จากความสัมพันธ์หน่วยแรง – ความเครียด ความแข็งแรงของหน้าตัดและแรงต้านทานของหน้าตัดจะได้โดยรวมแรงและความแข็งแรงเส้นใยทั้งหมด

เมทริกซ์โมดูลัสสัมผัส $[E_t]$ ระบุหน่วยแรงของเอลิเมนต์คอนกรีตเสริมเหล็กได้เป็น:

$$[E_t] = [T(\alpha_{x1})] \cdot [E_c] \cdot [V] \cdot [T(\alpha_{1x})] + \sum_i [T(\alpha_{xi})] \cdot [E_{si}] \cdot [T(\alpha_{i1})] \cdot [V] \cdot [T(\alpha_{1x})] \quad (27a)$$

$$\text{หรือ} \quad [E_t] = [E_t^c] + \sum_i [E_t^i] \quad (27b)$$

ในสมการ (27a) $[E_c]$ เป็นเมทริกซ์สมบัติของวัสดุสัมผัสของคอนกรีตแกนเดียว, $[E_{si}]$ เป็นเมทริกซ์สมบัติของวัสดุสัมผัสของเหล็กเสริมแกนเดียวและ $[V]$ เป็นเมทริกซ์แปลงความเครียดที่กำหนดไว้ก่อนหน้านี้ในสมการ (12) เมทริกซ์สมบัติของวัสดุแกนเดียวของคอนกรีต $[E_c]$ และ $[E_{si}]$ ได้โดย

$$[E_c] = \begin{bmatrix} \bar{E}_1^c & \frac{\partial \sigma_1^c}{\partial \bar{\varepsilon}_2} & 0 \\ \frac{\partial \sigma_2^c}{\partial \bar{\varepsilon}_1} & \bar{E}_2^c & 0 \\ 0 & 0 & G_{12}^c \end{bmatrix}, G_{12}^c = \frac{\sigma_1^c - \sigma_2^c}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)} \quad (28)$$

$$[E_{si}] = \begin{bmatrix} \rho_{si} \bar{E}_{si} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (29)$$

โมดูลัสสัมผัส (Tangent Modulus) $\bar{E}_1^c$ และ $\bar{E}_2^c$ ในสมการ (28) ได้จากความเครียดแกนเดียวโดยแผนภาพหน่วยแรง – ความเครียด วัสดุแกนเดียวในทิศทาง 1 และ 2 ตามลำดับ เทอมของ $\partial \sigma_1^c / \partial \bar{\varepsilon}_2$ และ $\partial \sigma_2^c / \partial \bar{\varepsilon}_1$ ได้โดยใช้ความสัมพันธ์สมบัติของวัสดุแกนเดียวและสถานะของหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีตแกนเดียวในทิศทาง 1 – 2 ซึ่งไม่ได้เป็นศูนย์เพราะหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีตในแรงอัดอ่อนตัวลงจากความเครียดดึงที่ตั้งฉาก ในเทอมโมดูลัสเฉือนของคอนกรีต G_{12}^c ได้โดยหน่วยแรงเฉือน τ_{12}^c ต่อความเครียดเฉือน γ_{12} ในทิศทาง 1 – 2 ตามแนวคิดวงกลมของมอร์ หน่วย

แรงและความเครียด (รูปที่ 2(ข) และ (ค)) ในทิศทางหน่วยแรงหลักและความเครียดหลักของคอนกรีตตรงกัน ในส่วนของ $[E_{si}]$ ในระบบพิกัด (si, ti) โดยที่ $\bar{E}_{si}$ เป็นโมดูลัสสัมผัสแกนเดียวสำหรับเหล็กเส้นที่กำหนดได้โดยสถานะ หน่วยแรง/ความเครียด

จากเวกเตอร์การเสียรูปหน้าตัด (Section Deformations) $\mathbf{e}(x)$ เวกเตอร์ความเครียดในหน้าตัด

$$\hat{\mathbf{e}}(x, y) = \{\varepsilon_x \quad \gamma_{xy}/2\}^T \quad \text{ได้ดังนี้}$$

$$\hat{\mathbf{e}}(x, y) = \mathbf{a}_s(y) \cdot \mathbf{e}(x) \quad (30)$$

$$\text{เมื่อ} \quad \mathbf{a}_s(y) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -y \\ 0 & \frac{1}{2} & 0 \end{bmatrix} \quad (31)$$

เมทริกซ์ $\mathbf{a}_s(y)$ กำหนดโดยสมมติฐานระนาบหน้าตัดยังคงเป็นระนาบหลังการเสียรูป

การแก้ปัญหาเอลิเมนต์ที่นำเสนออยู่บนพื้นฐานของสมมติฐานระนาบหน้าตัด เทอมองศาอิสระของหน้าตัดตามสมการ (30) จะต้องสอดคล้องกันกับความเครียดตามขวาง ε_y จะย่อออกมาจากความสมดุลตามแนวแกน y รูปแบบอย่างย่อของเมทริกซ์โมดูลัสสัมผัส $[E_t]$ กำหนดให้เป็น $\hat{\mathbf{E}}_t$ ดังนั้นจะได้สมการความสมดุล

$$\hat{\boldsymbol{\sigma}}(x, y) = \hat{\mathbf{E}}_t \cdot \hat{\mathbf{e}}(x, y) \quad (32)$$

แรงต้านทานของหน้าตัด $\mathbf{S}_R$ และความแข็งเกร็งของหน้าตัด $\mathbf{k}_s$ ตามลำดับได้ดังนี้

$$\mathbf{S}_R = \int_A \mathbf{a}_s^T(y) \cdot \hat{\boldsymbol{\sigma}}(x, y) dA \quad (33)$$

$$\mathbf{k}_s = \int_A \mathbf{a}_s^T(y) \cdot \hat{\mathbf{E}}_t \cdot \mathbf{a}_s(y) dA \quad (34)$$

8. ตรวจสอบแบบจำลองกับผลการทดสอบ

ผนังรับแรงเฉือน (Shear Walls) สองชุด ขนาดใหญ่ ทดสอบให้วบัติโดย [26] ภายใต้การดำเนินการร่วมกันของ

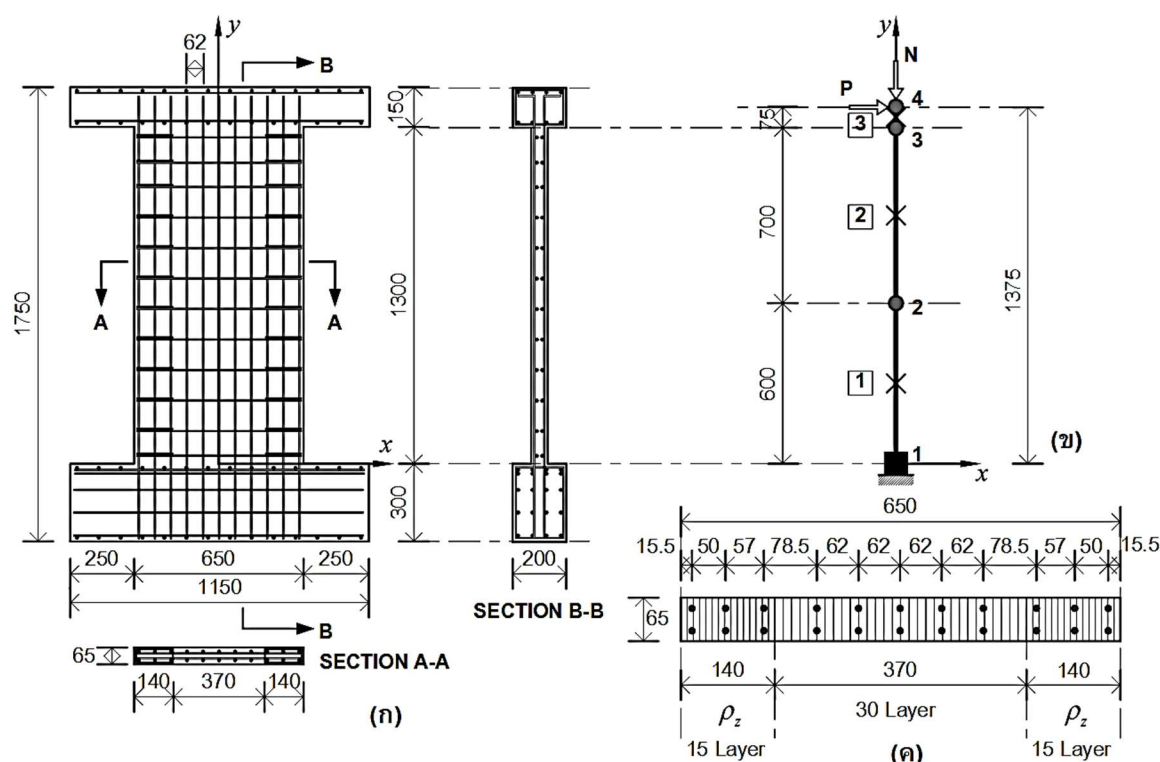
น้ำหนักบรรทุกตามแนวแกนคงที่และน้ำหนักบรรทุกทิศทางเดียว (monotonically) ที่เพิ่มขึ้นในแนวนอนเพื่อศึกษาผลกระทบของจำนวนพารามิเตอร์เกี่ยวกับพฤติกรรมของผนังรับแรงเฉือน พารามิเตอร์เหล่านี้ประกอบด้วย อัตราส่วนความสูงต่อความกว้าง น้ำหนักบรรทุกตามแนวแกน กำลังของคอนกรีตและปริมาณของเหล็กเสริมผนังแนวนอน อัตราส่วนความสูงต่อความกว้างที่นำมาใช้สำหรับผนัง: 1.0 สำหรับ ผนังประเภท I และ 2.0 สำหรับ ผนังประเภท II ตาม [27] องค์อาคารที่มีอัตราส่วนช่วงแรงเฉือนต่อความลึกมากกว่า 2.0 เหมาะสมวิเคราะห์ด้วยวิธีการตัดหน้าตัด เพราะกลไกค้ำยันคอนกรีตจะมีนัยสำคัญในอัตราส่วนน้อยกว่า 2.5 ด้วยเหตุนี้ประเภทผนัง II จะพิจารณาในการศึกษาวิเคราะห์

8.1. รายละเอียดของโครงสร้างผนังรับแรงเฉือน

ทั้งหกผนัง ชนิด II หน้าตัดขวางประกอบด้วยความกว้าง 650 มิลลิเมตรความหนา 65 มิลลิเมตรขยายในแนวตั้งสูง 1,300 มิลลิเมตร เชื่อมต่อกับสองคานด้านล่างและด้านบนให้กับผนังเพื่อเป็นที่รองรับและให้น้ำหนักบรรทุกรายละเอียดขนาดหน้าตัดและการเสริมเหล็กแสดงไว้ตามรูปที่ 4 (ก)

อัตราส่วนเหล็กเสริมรายงานได้สรุปไว้ในตาราง 1 ผลเปรียบเทียบอัตราส่วนการเสริมเหล็กตามขวาง ρ_y คำนวณจากพื้นที่หน้าตัดเต็มของผนังอัตราส่วนการเสริมเหล็กออกจากกระนาบ ρ_z พิจารณาพื้นที่หน้าตัดของเหล็กปลอกที่ปกปิดด้านข้างทั้งสอง เหล็กเสริมแนวตั้งและแนวนอนประกอบด้วยเหล็กข้ออ้อยเส้นผ่าศูนย์กลาง 8, 6.25 และ 4 มิลลิเมตร สมบัติเหล็กเสริม (ตาราง 2)

ตามการทดสอบ [26] กำหนดสมบัติของคอนกรีตไว้เพียงกำลังอัดคอนกรีตทรงลูกบาศก์ f_{cc} ดังนั้นคุณสมบัติอื่นๆจะประมาณโดย กำลังอัดคอนกรีตทรงกระบอก f'_c คิดเป็น 85 % ของ f_{cc} กำลังต้านทานแรงดึง $f_{cr} = 0.33 \cdot \sqrt{f'_c}$ และโมดูลัส $E_c = 5,000 \cdot \sqrt{f'_c}$ ค่าความเครียดที่หน่วยแรงอัดสูงสุด $\varepsilon_o = (f'_c/E_c) \cdot (n/n-1)$ เมื่อ $n = 0.8 + f'_c/17$ (ตาราง 1)



รูปที่ 4 รายละเอียดหน้าตัดผนังคอนกรีตเสริมเหล็ก และแบบจำลอง (ก) หน้าตัดคอนกรีตและเหล็กเสริม
(ข) แบบจำลองผนังรับแรงเฉือน (ค) การแบ่งแถบชั้นหน้าตัด

ตาราง 1 อัตราส่วนเหล็กเสริม สมบัติของคอนกรีตและแรงตามแกน

Wall number	ρ_y (%)	ρ_z (%)	f_{cc} (MPa)	f'_c * (MPa)	ϵ_o * (mm/mm)	E_c * (MPa)	f_{cr} * (MPa)	Axial Load (kN)
SW21	0.80	0.90	42.8	36.4	2.61	30,150	2.00	0
SW22	0.80	0.90	50.6	43.0	2.13	32,800	2.16	182
SW23	0.80	0.90	47.8	40.6	2.10	31,850	2.10	343
SW24	0.80	0.90	48.3	41.1	2.10	32,050	2.12	0
SW25	0.80	0.90	45.0	38.3	2.06	30,950	2.04	325
SW26	0.80	0.90	30.1	25.6	1.90	25,300	1.67	0

* โดยประมาณ

ตาราง 2 สมบัติของเหล็กเสริม

Bar size	Dia. (mm)	Area (mm ²)	f_y (MPa)	E_s (MPa)
$\phi 8$	8.00	50.3	470	200,000
$\phi 6.25$	6.25	30.7	520	200,000
$\phi 4$	4.00	12.6	420	200,000

8.2. การวิเคราะห์แบบจำลองผนังรับแรงเฉือน

การสร้างแบบจำลองผนังประกอบด้วยสี่ โหนด สาม เอลิเมนต์ เอลิเมนต์ทั้งหมดประกอบด้วยตำแหน่งของจุด เกาส์สามจุดที่มีความยาวเอลิเมนต์แตกต่างกัน เอลิเมนต์ที่ 1 ความยาว 600 มิลลิเมตร (ประมาณเท่ากับความกว้างของผนัง) ถูกใช้ไปทางฐานของผนังที่คาดว่าจะเสียรูป พลาสติกที่เข้มข้น คานที่ฐานของผนังไม่ได้สร้าง

แบบจำลองผนังถูกสมมติให้ยึดคงที่ที่ฐานตามรูปที่ 4 (ข) ความยาวของเอลิเมนต์ที่ 2 เพิ่มไปทางด้านบนของผนัง 700 มิลลิเมตร เอลิเมนต์ที่ 3 ความยาว 75 มิลลิเมตรใช้จำลองน้ำหนักบรรทุกทุกคานด้านบน เอลิเมนต์ที่ 3 สร้างขึ้นโดยใช้อัตราส่วนการเสริมเหล็กของ เอลิเมนต์ที่ 1 หรือ 2 โดยตัวคูณเท่ากับ 2 ด้วยเป็นจุดการให้น้ำหนักบรรทุกทุกคานด้านบนและจำลองเพียงให้สามารถส่งผ่านน้ำหนักบรรทุกทุก

แบบจำลองหน้าตัดเอลิเมนต์ที่ 1 และ 2 เสนอในรูปที่ 4 (ค) แกบชั้นคอนกรีต 60 ชั้นหนา 9.33 mm x 15 ชั้นหนา 12.33 mm x 30 ชั้นและหนา 9.33 mm x 15 ชั้นเหล็กเสริมออกจากกระนาบตามรูปที่ 4 (ค)

8.3. เปรียบเทียบการตอบสนองระหว่างผลการ

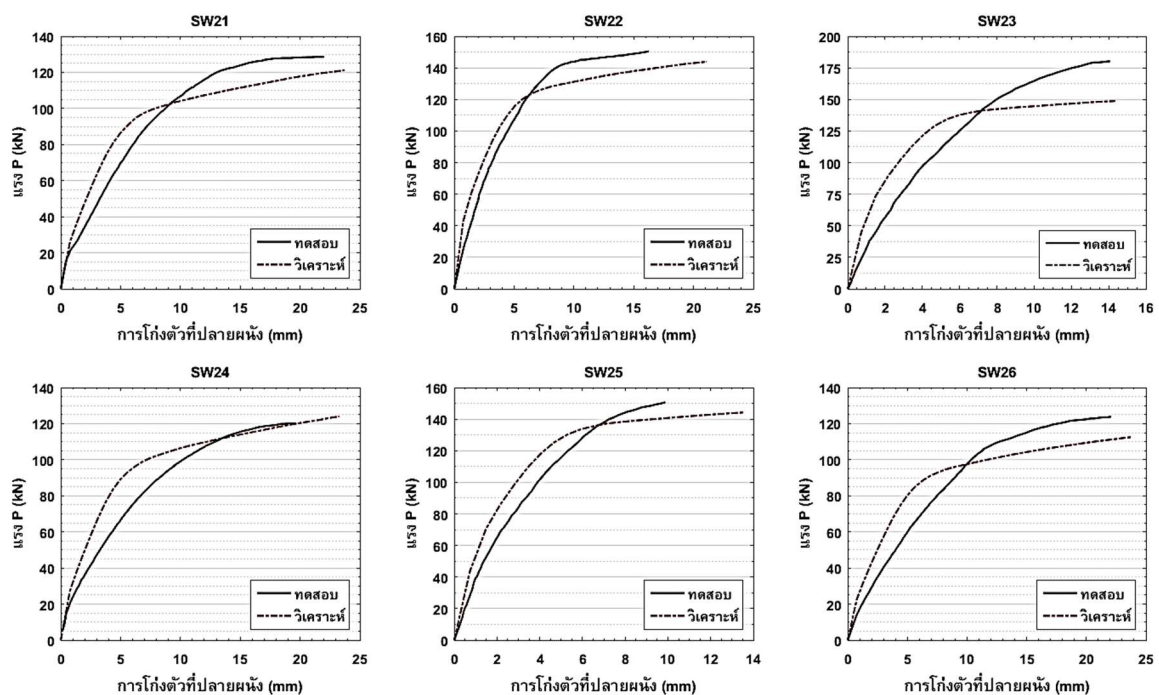
วิเคราะห์และผลการทดลองผนังรับแรงเฉือน

รูปที่ 5 เปรียบเทียบการตอบสนอง น้ำหนักบรรทุกทุกด้านข้าง - การโก่งตัว ระหว่างการวิเคราะห์ และการทดสอบใน ผลเปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุกทุกด้านข้างที่เหล็กเสริมเริ่มร้าว น้ำหนักบรรทุกทุกด้านข้างที่น้ำหนักบรรทุกสูงสุดและการเปลี่ยนตำแหน่งตรงกัน (แสดงในตารางที่ 3) จากรายงานการทดสอบได้ดำเนินการเก็บข้อมูลที่ระดับน้ำหนักบรรทุกทุกสูงสุดเท่านั้นดังนั้นการวิเคราะห์การตอบ

สนองเฉพาะเมื่อไปถึงจุดสูงสุด

อัตราส่วนกำลังที่วิเคราะห์ได้ต่อการทดสอบ มีค่าเฉลี่ย 1.06 และค่าสัมประสิทธิ์แปรผัน (Coefficient of Variation, COV) เท่ากับ ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน/ค่าเฉลี่ยx100% มีค่า 7.31% การประมาณของกำลังต่ำกว่าการทดสอบเล็กน้อยมีแนวโน้มที่มีความเกี่ยวข้องกับการพัฒนาแรงกระทำค้ำยันรับแรงอัดโดยตรงในผนัง เพราะอัตราส่วนช่วงแรงเฉือนต่อความลึกเท่ากับ 2.0

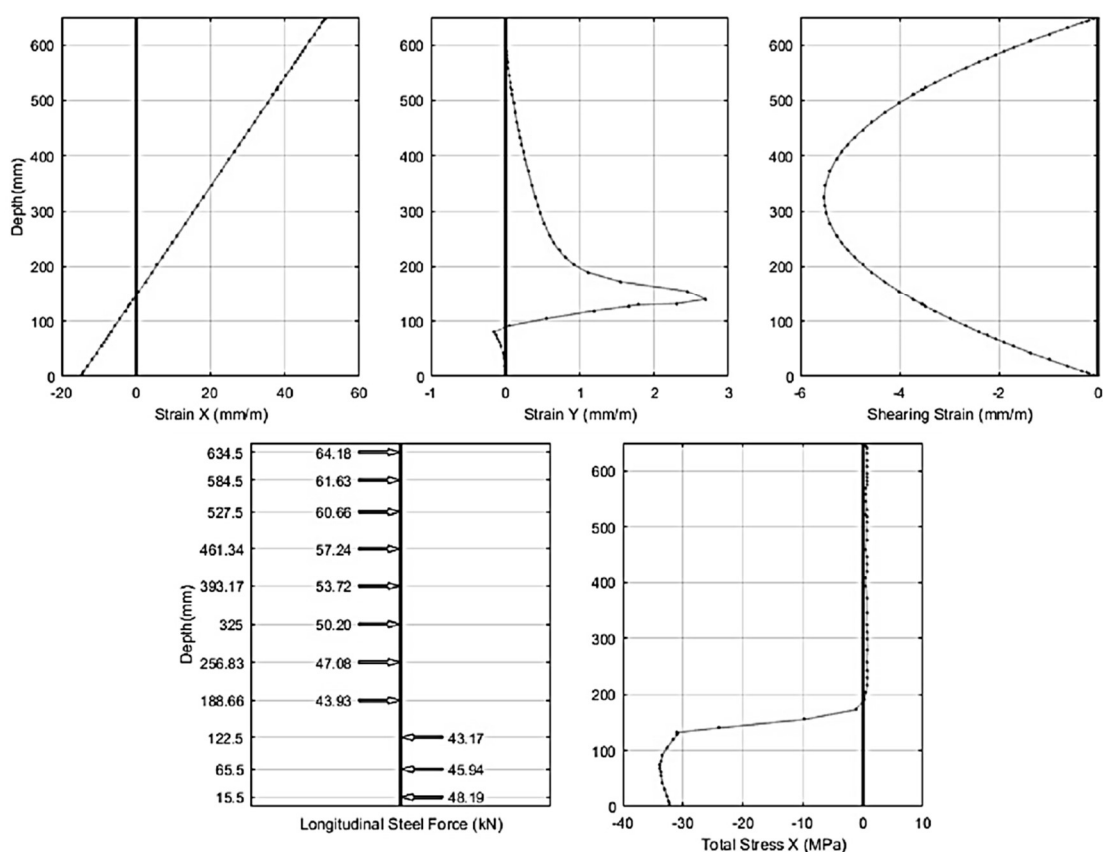
คานที่มีอัตราส่วนช่วงแรงเฉือนต่อความลึกน้อยกว่าประมาณ 2.5 น้ำหนักบรรทุกทุกส่วนใหญ่แบกรับโดยค้ำยันรับแรงอัดโดยตรง จำแนกตาม อาณาบริเวณ D การวิเคราะห์ขององค์อาคารดังกล่าวที่วิเคราะห์ด้วยการตัดหน้าตัดโดยทั่วไปเกิดผลในเชิงอนุรักษ์ขึ้นอยู่กับความลึกขององค์อาคาร อัตราส่วนช่วงแรงเฉือนต่อความลึกที่มีขนาดน้อยกว่า 2.5 การคาดการณ์การวิเคราะห์ด้วยการตัดหน้าตัดจะมีความอนุรักษ์อย่างมาก รายละเอียดของพฤติกรรมนี้สามารถพบได้ใน [27] ดังนั้นการคาดการณ์กำลังของผนังวิเคราะห์ที่นี้ ด้วยอัตราส่วนช่วงแรงเฉือนต่อความลึกเป็น 2.0 น่าจะได้รับการประเมินที่ต่ำแต่โดยภาพรวมไม่ได้มีผลกระทบมากนัก



รูปที่ 5 เปรียบเทียบการตอบสนอง น้ำหนัก-การเปลี่ยนตำแหน่ง

ตาราง 3 ผลการเปรียบเทียบของน้ำหนักบรรทุกและการเปลี่ยนตำแหน่งสำหรับผนังรับแรงเฉือน

หมายเลข ผนัง	น้ำหนักที่เหล็กยื่นเริ่มคราก			น้ำหนักประลัย			การโก่งตัวที่น้ำหนักประลัย		
	P_{y-Test}	P_{y-Calc}	$\frac{P_{y-Test}}{P_{y-Calc}}$	P_{u-Test}	P_{u-Calc}	$\frac{P_{u-Test}}{P_{u-Calc}}$	δ_{u-Test}	δ_{u-Calc}	$\frac{\delta_{u-Test}}{\delta_{u-Calc}}$
	(kN)	(kN)		(mm)	(mm)		(mm)	(mm)	
SW21	80	72.0	1.11	127	121.2	1.05	22.0	23.7	0.93
SW22	110	98.0	1.12	150	144.0	1.04	17.0	21	0.81
SW23	120	116.0	1.03	180	150.0	1.20	13.0	14.2	0.92
SW24	80	73.0	1.10	120	124.0	0.97	20.0	23.0	0.87
SW25	130	113.0	1.15	150	145.5	1.03	10.0	13.3	0.83
SW26	68	67.5	1.01	123	113.0	1.09	22.0	23.0	0.96
		Mean	1.09		Mean	1.06		Mean	0.88
		COV(%)	5.04		COV(%)	7.31		COV(%)	6.63



รูปที่ 6 ผลลัพธ์ที่จุดน้ำหนักสูงสุดของผนังรับแรงเฉือน SW21

การโก่งตัวที่ระดับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดได้รับการ
คาดการณ์ที่มีอัตราเฉลี่ยเป็น 0.88 และ สัมประสิทธิ์การ
แปรผัน (COV) เป็น 6.63%. แนวโน้มทั่วไปในการ

คาดการณ์จากการวิเคราะห์จะประมาณการตอบสนอง
การโก่งตัวมากกว่าการตอบสนองที่ได้จากการทดลองดัง
แสดงในรูปที่ 5 การทำนายความแข็งแรงของผนังในช่วง

ก่อนเหล็กเสริมครากแนวโน้มทั่วไปจะประมาณการโก่งตัวต่ำกว่าการทดลองเล็กน้อยจึงให้การตอบสนองแข็งเกร็งมากกว่าเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องจากการครูด (Slip) ของเหล็กเสริมรับแรงดึงในฐานของผนังอาจจะได้รับผลกระทบความแข็งเกร็งด้านข้างของผนังการวิเคราะห์ฐานคานรองรับผนังไม่รวมอยู่ในแบบจำลองถูกสร้างขึ้นมาด้วยสมมติฐานฐานยึดคงที่ตามรูปที่ 4 (ข) โปรดสังเกตว่าสำหรับผนังที่มีแรงตามแนวแกนคงที่ ดังเช่น SW22 และ SW25 การประมาณที่ได้จากวิเคราะห์ของการโก่งตัวมีความแตกต่างจากการทดลองน้อย นี้สามารถนำมาประกอบกับการเกิดการครูดของเหล็กเสริมที่น้อยในการทดลองเหล่านี้ ซึ่งให้เงื่อนไขฐานรองรับคล้ายคลึงกันมากขึ้นกับเงื่อนไขฐานรองรับในการวิเคราะห์

น้ำหนักที่เหล็กเสริมตามยาวเริ่มคราก มีค่าเฉลี่ยที่ 1.09 และ COV 5.04% ตามการคำนวณเหล็กเสริมเริ่มครากที่น้ำหนักด้านข้างในการวิเคราะห์มีค่าน้อยกว่าผลทดสอบอาจเกิดจากแบบจำลองของฐานยึดคงที่อย่างสมบูรณ์ ในการทดสอบคานล่างเป็นฐานยึดคงที่ตามรูปที่ 4 (ก) และเหล็กเสริมตามยาวของผนังยื่นเข้าไปในคานที่เป็นฐาน ดังนั้นเนื่องจากการแตกร้าวของคานฐานรับผนังและอาจทำให้เกิดการครูดของแรงยึดหน่วงของเหล็กเสริมตามยาวซึ่งเป็นเหตุทำให้การครากที่ระดับน้ำหนักบรรทุกทางด้านข้างมากกว่าการวิเคราะห์ที่ได้

การทดสอบพฤติกรรมของผนังเกี่ยวข้องกับขั้นตอนดังต่อไปนี้ ในขั้นตอนก่อนหน้าการวิบัติของการทดสอบจะแตกร้าวแนวนอนจากแรงดัดโดยทั่วไปจะเกิดขึ้นที่หนึ่งในสามของความสูงผนังจากทางด้านล่าง ภายใต้การเพิ่มระดับน้ำหนักบรรทุกทางด้านข้างรอยแตกเริ่มเอียงไปทางปลายด้านแรงอัดของผนัง การวิบัติสุดท้ายรอยแตกเริ่มเอียงใกล้เป็นแนวตั้งไปถึงฐานของปลายด้านรับแรงอัดและเสียหายที่รุนแรงของเหล็กเสริมรับแรงดึง ตามมาด้วยการอัดแตกของคอนกรีต

การศึกษาวิเคราะห์ผนังทั้งหมดมีพฤติกรรมแรงดัดที่โดดเด่นคล้ายกัน โหมดการวิบัติสุดท้ายส่วนใหญ่ของผนังคาดการณ์ว่าเกิดการแตกหักของเหล็กเสริมตามยาวในเขต

แรงดึงมากกว่าอัดแตกของคอนกรีตในเขตแรงอัด ตัวอย่างดังเช่นผนังรับแรงเฉือน SW21 ที่ระดับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดก่อนการวิบัติของโหนด 1 ตามรูปที่ 6 (ข) ความเครียดตามแกน (Strain X) เข้าใกล้ 50×10^{-3} ซึ่งเป็นความเครียดแตกหักที่ใช้สันนิษฐานในการวิเคราะห์ หากเกินกว่านี้เหล็กเสริมรับแรงดึงจะไม่สามารถรับแรงได้อีกต่อไปและความสามารถในการแบกรับน้ำหนักของผนังจะลดลงกะทันหัน ขณะที่ความเครียดแตกหักของเหล็กเสริมแรงดึงสูงจากการทดสอบไม่ได้รายงาน การใช้ค่าของความเครียดแตกหักขนาดใหญ่จะเพิ่มระดับการเสียรูปที่ก่อให้เกิดการอัดแตกของคอนกรีตในเขตแรงอัด อย่างไรก็ตามในการแสดงให้เห็นถึงการบังคับใช้ของขั้นตอนการปฏิบัติในสถานการณ์ที่ไม่ทราบค่าของคุณสมบัติในคอนกรีตและเหล็กเสริม ผนังเหล่านี้ถูกวิเคราะห์ด้วยคุณสมบัติของวัสดุสันนิษฐานให้อนุรักษ์ (อ่อนแอกว่าที่เกิดขึ้นจริง) ในการกำหนดค่าเริ่มต้นในการวิเคราะห์

9. อภิปรายและสรุปผล

จากหกดตัวอย่างผนังรับแรงเฉือนซึ่งทดสอบพฤติกรรมของผนังรับแรงเฉือนได้รับการเปรียบเทียบในทอมการตอบสนองของ น้ำหนักด้านข้างทำให้เริ่มคราก น้ำหนักด้านข้าง – การโก่งตัว ความเครียดเหล็กเสริม และเงื่อนไขการวิบัติ ที่แสดงถึงขั้นตอนการวิเคราะห์ที่เหมาะสมในการจำลองพฤติกรรมผนังรับแรงเฉือนคอนกรีตเสริมเหล็ก การเลือกพารามิเตอร์ถูกสร้างขึ้นมาก่อนการวิเคราะห์ การคำนวณการตอบสนอง ความโค้ง ความเครียดเฉือนของหน้าตัดถูกสร้างในระหว่างขั้นตอนวิเคราะห์

การเขียนโปรแกรมคำนวณหาโดยใช้ MATLAB ต้องการใช้เวลาคำนวณประมาณ 5 – 8 นาที ดังนั้นจุดมุ่งหมายของการจำลองเหมาะสมกับความพยายามด้านวิศวกรรม อย่างไรก็ตามเวลาในการคำนวณนี้ยังสามารถลดลงได้อีก ด้วยการเขียนโปรแกรมการทำวนซ้ำแบบขนานดังนั้นการทำวนซ้ำที่แต่ละเอลิเมนต์และแต่ละหน้าตัดสามารถถูกกระทำได้ในเวลาเดียวกันทำให้เวลาการประมวลผลลดลงได้อีกอย่างมาก

การตรวจสอบความถูกต้องดำเนินการโดยการวิเคราะห์ผนังรับแรงเฉือนหกตัวอย่างผลที่ได้ต่อไปนี้:

1. การพิจารณาผลกระทบแรงเฉือนจำเป็นสำหรับการประเมินความปลอดภัยและความสมจริงของกำลังและความเหนียวของผนังรับแรงเฉือน

2. เอลิเมนต์โครงข้อแข็งบนพื้นฐานเพลกซิบิลิตีด้วยการแบ่งย่อยแถบชั้นสำหรับการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ไม่เชิงเส้น สะดวกรวดเร็วและถูกต้องในพื้นฐานการวิเคราะห์สำหรับแบบจำลองหน้าต่างที่มีสภาพพลาสติก

3. ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ไม่เชิงเส้นด้วยเอลิเมนต์โครงข้อแข็งบนพื้นฐานเพลกซิบิลิตีให้องค์ประกอบพื้นฐานเช่น ความเครียดตามแกน ความโค้ง และความเครียดเฉือนสำหรับการสร้างแบบจำลองที่เหมาะสมในพฤติกรรมที่ไม่เชิงเส้นของผนังรับแรงเฉือนคอนกรีตเสริมเหล็ก

4. วิธีรอยแตกกระจายตัวเฉลี่ย ที่ได้นำเสนอนี้เป็นแบบจำลองที่เรียบง่ายและถูกต้องในพฤติกรรมสภาพพลาสติกของหน้าต่างโดยเฉพาะผนังรับแรงเฉือนคอนกรีตเสริมเหล็ก

5. ขั้นตอนวิเคราะห์ที่พัฒนาสามารถจำลองการตอบสนองของผนังรับแรงเฉือนคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้น้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเนื่องทางเดียวที่มีระดับความถูกต้องของกำลัง ความแข็งแรง ความเหนียว และการวิบัติ พารามิเตอร์การคำนวณเช่น ความเครียดหลักเสริมและการเสียรูปองค์อาคาร ได้อย่างเหมาะสม

6. งานวิจัยต่อไปควรพิจารณาแบบจำลองผนังรับแรงเฉือนคอนกรีตเสริมเหล็กที่ละเอียดมากขึ้นอาทิเช่นแบบจำลองการครูดของแรงยึดหน่วงหรือการครูดของเหล็กเสริมรับแรงดึง แบบจำลองการโก่งเดาะของเหล็กเสริมรับแรงอัด

10. เอกสารอ้างอิง

[1] D'Ambrisi, A. and Filippou, FC., "Correlation studies on an RC frame shaking- table

specimen," Earthquake Engineering and Structural Dynamics., vol. 26, pp. 1021-1041, 1997.

[2] Li, YR. and Jirsa, JO., "Nonlinear analysis of an instrumented structure damaged in the 1994 Northridge earthquake" Earthquake Spectra., vol. 14(2), pp. 265-283, 1998.

[3] Elwood, K. , " Modeling failures in existing reinforced concrete columns," Canadian Journal of Civil Engineering., vol. 31(5), pp. 846-859, 2004.

[4] Lee, DH., Elnashai, A. "Seismic analysis of RC bridge columns with flexure- shear interaction," Journal of Structural Engineering, ASCE., vol. 127(5), pp. 546-553, 2001.

[5] Lee, DH. , Elnashai, A. , " Inelastic seismic analysis of RC bridge piers including flexure- shear- axial interaction," Structural Engineering and Mechanics., vol. 13(3), pp. 546-553, 2002.

[6] Xu, SY. , Zhang, J. , " Axial- shear- flexure interaction hysteretic model for RC columns under combined actions," Journal of Engineering Structures. , vol. 34(1), pp. 548-563, 2012.

[7] Spacone, E., Filippou, FC., Taucer, FF., "Fiber beam-column model for nonlinear analysis of R/ C frames, part I: formulation," Earthquake Engineering and Structural Dynamics., vol. 25, pp. 711-725, 1996.

[8] Ranzo, G., Petrangeli, M.A., "Fiber finite beam element with section shear modeling for seismic analysis of RC structures," Journal of

- Earthquake Engineering. , vol. 2(3), pp. 443-473, 1998.
- [9] Shirai, N., Moriizumi, K., Terasawa K., “Cyclic analysis of reinforced concrete columns macro- element approach, modeling of inelastic behavior of RC structures under seismic load,” Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers., 2001, pp. 435-453.
- [10] Marini, A., Spacone, E., Analysis of reinforced concrete elements including shear effects. Structural Journal, American Concrete Institute., vol. 103(5), 645-655, 2006.
- [11] Petrangeli, M., Pinto, P.E., Ciampi, V., “Fiber element for cyclic bending and shear of R/C structures, part I: theory,” Journal of Engineering Mechanics, ASCE., vol. 125(9), pp. 994-1001, 1999.
- [12] Vecchio, F. J. & Collins, M. P, “Stress– Strain Characteristic of Reinforced Concrete in Pure Shear,” IABSE Colloquium, Advanced Mechanics of Reinforced Concrete, Delft, Final Report, International Association of Bridge and Structural Engineering, Zurich, Switzerland., 1981, pp. 221–225.
- [13] Vecchio, F. J. & Collins, M. P, “The Modified Compression Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear,” ACI JOURNAL., ProceedingsV. vol. 83, No. 2, pp. 219-231, Feb. 1986.
- [14] Belarbi, A. & Hsu, T. T. C, “Constitutive Laws of Concrete in Tension and Reinforcing Bars Stiffened by Concrete,” ACI Structural Journal., vol. 91, No. 4, pp. 465-474, 1994.
- [15] Pang, X. B. & Hsu, T. T. C, Behavior of Reinforced Concrete Membrane Elements in Shear, ACI Structural Journal., vol. 92(6), pp 665–679, 1995.
- [16] Belarbi, A. & Hsu, T. T. C, “Constitutive Laws of Concrete in Tension and Reinforcing Bars Stiffened by Concrete,” ACI Structural Journal., vol. 91, No. 4, pp. 465-474, July-Aug. 1994.
- [17] Hsu, T. T. C. & Zhang, L. X, “Nonlinear Analysis of Membrane Elements Fixed- Angle Softened Truss Model,” ACI Structural Journal., vol. 94, No. 5, pp. 483-492, Sept.- Oct. 1997.
- [18] Zhang, L. X. & Hsu, T. T. C, “Behavior and Analysis of 100Mpa Concrete Membrane Elements,” Journal of Structural Engineering, ASCE., vol. 124, No. 1, pp. 24-34, Jan. 1998.
- [19] Zhu, R. H.; Hsu, T. T. C.; and Lee, J. Y, “Rational Shear Modulus for Smeared Crack Analysis of Reinforced Concrete,” ACI Structural Journal., vol. 98, No. 4, pp. 443-450. 2001.
- [20] Zhu, R. H. & Hsu, T. T. C, “Poisson Effect of Reinforced Concrete Membrane Elements,” ACI Structural Journal., vol. 99, No. 5, pp. 631-640, Sept.-Oct. 2002.
- [21] Spacone, E.; V. Ciampi.; F. C. Filippou, “MIXED FORMULATION OF NONLINEAR BEAM FINITE ELEMENT,” Computers & Structures., vol. 58, No.1, pp. 71-83, 1996.
- [22] Kupfer, H. B.; Hildorf, H. K.; Rusch, H, “Behavior of concrete under biaxial stresses,” Structural Journal of the American Concrete Institute., vol. 66(8), pp. 656–66, 1969.
- [23] Vecchio, F. J, “Disturbed Stress Field Model for Reinforced Concrete: Formulation,”

Journal of Structural Engineering., vol. 12,
No.69, pp. 1070-1077, 2000.

- [24] Vecchio, F. J., “ Finite Element Modeling of Concrete Expansion and Confinement,” Journal of Structural Engineering, ASCE., vol. 118, No. 9. pp. 2390-2405, 1992.
- [25] He, X.G. and Kwan, A.K.H, “ Modeling Dowel Action of Reinforcement Bars for Finite Element Analysis of Concrete Structures,” Computers and Structures., vol. 79, No. 6, pp. 595-604, 2001.
- [26] Lefas, I. D., Kotsovos, M. D. and Ambraseys, N. N, “ Behaviour of Reinforced Concrete Structural Walls: Strength, Deformation Characteristics and Failure Mechanism,” ACI Structural Journal., vol. 87, No. 1, pp. 23-31, January-February 1990.
- [27] Collins, M. P. and Mitchell, D, “ Prestressed Concrete Structures,” Prentice- Hall, 1991, pp. 345.

พฤติกรรมโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุดของแผ่นอลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็งต่างชนิด SSM2024 และ SSM6061

Microstructural Behavior and Mechanical Properties of Friction Stir Spot Welding of Dissimilar Aluminum Semi Solid Casting Sheets SSM2024 and SSM6061

วรพงศ์ บุญช่วยแทน^{1*} วรธนพร ชีววุฒิพงศ์² และรอมฏอน บุระพา³

¹ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

²อาจารย์ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

³อาจารย์ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

Worapong Boonchouytan^{1*} Watthanaphon Cheewawuttipong² and Romadorn Burapa³

¹Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamankala University of Technology Srivijaya, Ratchadamnoen Nok, Bo Yang, Muang, Songkhla, 90000

²Instructor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamankala University of Technology Srivijaya, Ratchadamnoen Nok, Bo Yang, Muang, Songkhla, 90000

³Instructor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamankala University of Technology Srivijaya, Ratchadamnoen Nok, Bo Yang, Muang, Songkhla, 90000

*Corresponding author: Email: worapong.b@rmutsv.ac.th

บทคัดย่อ

เทคนิคการเชื่อมเสียดทานแบบจุดในครั้งนี้ได้ออกแบบมาเพื่อประสานแผ่นอลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็งต่างชนิดกันระหว่าง 2024 และ 6061 โดยมีปัจจัยการเชื่อม คือ ความเร็วหมุนเชื่อม 3 ระดับ 500 1,000 และ 1,400 รอบต่อนาที ความเร็วกด 3 ระดับ 56 112 และ 224 มิลลิเมตรต่อนาที ความลึกของปากกวนที่กดลงในเนื้อวัสดุทดลองคือ 0.5 มิลลิเมตร และระยะเวลาหมุนแช่ในเนื้อวัสดุ 10 วินาที เครื่องมือเชื่อมทรงกระบอกหมุนตามเข็มนาฬิกา ผลการทดลองพบว่า โครงสร้างจุลภาคบริเวณพินกวน (Stir Pin Zone; SpZ) ด้านล่างของหัวพินเกิดการประสานกันของวัสดุสองชนิดเป็นรูปแบบลามลาร์ (lamellar) ที่เกิดจากการแผ่ความร้อนโดยการเสียดทานของเครื่องมือเชื่อม ค่าแรงเฉือนเฉลี่ยสูงสุดของชิ้นงานทดสอบมีค่าเท่ากับ 3.77 กิโลนิวตัน ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 500 รอบต่อนาที ความเร็วกด 56 มิลลิเมตรต่อนาที และค่าแรงเฉือนเฉลี่ยต่ำสุดของชิ้นทดสอบมีค่าเท่ากับ 1.51 กิโลนิวตัน ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,400 รอบต่อนาที ความเร็วกด 224 มิลลิเมตรต่อนาที

คำสำคัญ: การเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด อลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง โครงสร้างทางจุลภาค สมบัติทางกล

ABSTRACT

Friction welding by using stir spot technique which was to design weld semi-solid aluminum castings with differenced types of SSM2024 and SSM6061. The welding factors were studied compose of rotation speeds (500, 1,000, and 1,400 rpm), the plunging rate (56, 112, and 224 mm/min), the tool shoulder plunge depths was employed 0.5 mm, and the constant dwell time for 10 sec. The rotated clockwise cylindrical welding was used. The results showed that the lamellar structure at the stir pin zone (SpZ) on the bottom revealed the combining of two materials cause of heat dissipation from the friction of welding tool. The highest result of weld shear force was 3.77 kN, at rotation speed of 500 rpm, and the plunging rate 56 mm/min. Whereas the lowest weld shear force was 1.51 kN, at rotation speed of 1,400 rpm, and the plunging rate 224 mm/min.

Keyword: Friction Stir Spot Welding, Aluminum Semi Solid Casting, Microstructural, Mechanical Properties

1. บทนำ

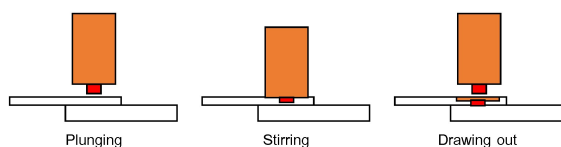
จุดมุ่งหมายสำหรับอุตสาหกรรมยานยนต์ในอนาคตคือการขยายฐานเทคโนโลยีและการใช้เทคโนโลยีใหม่ ๆ รวมไปถึงการประยุกต์ใช้การเชื่อมเสียดทานแบบจุด (Friction Stir Spot Weld; FSSW) ในวัสดุชนิดเดียวกันและต่างชนิดกัน FSSW เป็นรูปแบบของการเชื่อมที่คล้ายคลึงกับการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Weld; FSW) โดยที่กระบวนการ FSSW เครื่องมือเชื่อมหมุนอยู่กับที่และเคลื่อนที่ขึ้นลงในแนวดิ่ง แต่สำหรับกระบวนการ FSW เครื่องมือเชื่อมหมุนอยู่กับที่และเคลื่อนที่ในแนวระนาบ ในระหว่างกระบวนการ FSSW การกดลงของเครื่องมือเชื่อม และระยะเวลาในการหมุนจะเป็นตัวกำหนดความร้อนที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนรูปเชิงพลาสติกของวัสดุ เครื่องมือเชื่อม รูปทรงเรขาคณิตของเครื่องมือเชื่อมก็ส่งผลต่อสมบัติทางกลของรอยเชื่อมด้วยเช่นกัน [1-2] กระบวนการ FSSW แสดงดังรูปที่ 1 โดยการเชื่อมเริ่มจากการจับยึดชิ้นงานทดลองเชื่อม จากนั้นเปิดเครื่องกักให้เครื่องมือเชื่อมหมุนตามปัจจัยในการทดลอง เคลื่อนที่ที่ตำแหน่งของเครื่องกักในแนวแกน Z แบบอัตโนมัติตามความเร็วที่กำหนดตามปัจจัยในการทดลองให้เครื่องมือเชื่อมกดลงไปใ้เนื้อวัสดุทดลอง และสัมผัสกับปากกวน เมื่อครบเวลาที่กำหนดก็เคลื่อนที่ของโต๊ะ

งานลงเพื่อให้หัวพินลอยขึ้นออกจากรอยเชื่อม จากนั้นตอนดังกล่าว คือ กระบวนการทดลองการเชื่อมเสียดทานแบบจุด

กระบวนการ FSSW ใช้เครื่องมือเชื่อมคล้ายคลึงกับเครื่องมือเชื่อมของกระบวนการ FSW [3] โดยที่มีปากเชื่อมเพื่อสร้างแรงเสียดทานให้เกิดเป็นความร้อน และมีหัวพินมาช่วยในการไหลของวัสดุระหว่างชิ้นงาน [1] นอกเหนือจากนี้ปัจจัยการเชื่อมอื่นๆ ที่มีบทบาทสำคัญในความสมบูรณ์ของรอยเชื่อม เช่น ความเร็วรอบของเครื่องมือเชื่อม ระดับความลึกของเครื่องมือเชื่อม และระยะเวลาหมุนในเนื้อวัสดุ ปัจจัยการเชื่อมเหล่านี้มีอิทธิพลโดยตรงต่อสมบัติทางกลและโครงสร้างทางโลหะวิทยาของรอยเชื่อม [1,4-6]

อลูมิเนียมเกรด 2024 เป็นอลูมิเนียมกลุ่มผสมทองแดง มีความแข็งแรงสูง และทนต่อการกัดกร่อนได้ดี นิยมใช้ทำแม่พิมพ์เป่าพลาสติกหรือแม่พิมพ์ขึ้นรูปพลาสติกในสุญญากาศ แม่พิมพ์ร่องเท้า ชิ้นส่วนเครื่องจักรกล โครงสร้างเครื่องบินอุปกรณ์จับยึดต่างๆ อลูมิเนียม 6061 เป็นอลูมิเนียมกลุ่มผสมแมกนีเซียมและซิลิกอน ที่สามารถบ่มแข็งได้ มีความแข็งแรงสูง และทนต่อการกัดกร่อนได้ดีเยี่ยม สามารถขัดเงาได้ดี และชุบอะโนไดซ์สีได้ผิวสวยงาม นิยมใช้ทำแม่พิมพ์เป่าพลาสติก แม่พิมพ์ฉีดโฟมและยาง

โครงสร้างยานพาหนะและอาคาร หมุดยั้วราวดะพาน การเชื่อมต่อดังสองชนิดนี้เข้าด้วยกันถือเป็นความท้าทายอย่างหนึ่ง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกลของวัสดุเดิม [7-9] ในอดีตการเชื่อมแบบหลอมละลายของอลูมิเนียมที่ไม่เหมือนกันเป็นเรื่องที่ลำบาก และทำได้ยากมาก ดังนั้นกระบวนการ FSSW ใช้กันอย่างแพร่หลายในการเชื่อมวัสดุต่างชนิดกัน โดยใช้หลักการสะสมความร้อนของวัสดุทั้งสองสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมละลายของวัสดุเชื่อม โดยมีงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่เกี่ยวกับกระบวนการเชื่อม FSW และ FSSW เช่น การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของการเชื่อมเสียดทานแบบจุดระหว่างอลูมิเนียมเกรด AA1060 กับทองแดงบริสุทธิ์เกรด C11000 [10] กลไกการกระจายตัวของอนุภาค Zn ในข้อบกพร่องของรอยเชื่อมเสียดทานแบบของแมกนีเซียม-สังกะสี [11] การไหลและโครงสร้างทางจุลภาคที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอลูมิเนียมเกรด 2024 กับอลูมิเนียมเกรด 6061 [12] การศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่วัสดุต่างชนิดในโลหะผสมอลูมิเนียมเกรด 2024-T351 และอลูมิเนียมเกรด 6056-T4 [13] การศึกษาเกี่ยวกับการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของการเชื่อมโลหะ อลูมิเนียมเกรด AA 2024 และอลูมิเนียมเกรด AA 6061 [14] แรงบิดอุณหภูมิ และการกระจายความเค้นในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนวัสดุต่างชนิดระหว่างอลูมิเนียมเกรด 6061-T6 และอลูมิเนียมเกรด 2014-T6 [15]



รูปที่ 1 ขั้นตอนการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด

จากงานวิจัยดังกล่าวยังไม่มีผลการกล่าวถึงผลงานเกี่ยวกับการเชื่อมเสียดทานแบบจุดระหว่างอลูมิเนียมเกรด AA2024 และอลูมิเนียมเกรด AA6061 ดังนั้นใน

การศึกษาครั้งนี้จึงได้มีการใช้กระบวนการ FSSW เชื่อมอลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็งที่มีสมบัติทางกลดีกว่าอลูมิเนียมหล่อทั่วไป โดยชิ้นงานไม่มีโพรงอากาศ มีสมบัติทางกลดีกว่า และสามารถแปรรูปได้ดี [16] ระหว่าง SSM2024 และ SSM6061 เพื่อศึกษาโครงสร้างทางโลหะวิทยา และสมบัติทางกลที่เปลี่ยนแปลงไป โดยใช้พารามิเตอร์และเครื่องมือเชื่อมที่แตกต่างกัน

2. ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง

อลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง (Semi Solid Metal; SSM) ถูกนำมาแปรรูปด้วยเครื่องเลื่อยสายพานแนวนอน ยี่ห้อ Chenlong รุ่น CS-230 และเครื่องกัดแนวตั้ง ยี่ห้อ Brigeport เพื่อให้ได้ขนาดพร้อมใช้ในการทดลอง ขนาดของชิ้นงานทดลองมีขนาดความกว้าง x ความยาว x ความหนา โดยที่ SSM2024 มีขนาด 100 x 15 x 2 มิลลิเมตร ส่วน SSM6061 มีขนาด 100 x 15 x 4 มิลลิเมตร รอยเชื่อมเสียดทานแบบจุดมีรูปแบบการซ้อนทับกันที่ 20 mm การวางตำแหน่งการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุดแสดงดังรูปที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุทดลอง 2 ชนิด SSM2024 และ SSM6061 แสดงดังตารางที่ 1 และมีสมบัติทางกลของวัสดุทดลองแสดงดังตารางที่ 2

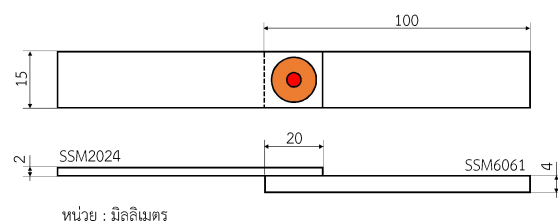
ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมี (WT%) ของ SSM2024 และ SSM6061 ที่ใช้ในการวิจัย

วัสดุ	SSM2024	SSM6061
Cr	0.1	0.2
Cu	4.4	0.3
Fe	0.5	0.7
Mg	1.5	1.0
Mn	0.6	0.2
Si	0.5	0.6
Ti	0.2	0.2
Zn	0.3	0.3
Al	91.9	96.5

การเชื่อมด้วย FSSW มีปัจจัยการเชื่อมแสดงดังตารางที่ 3 โดยที่ ความเร็วหมุนเชื่อม (Rotation Speed) มีหน่วยเป็น รอบต่อนาที (rpm) ความเร็วกด (Plunging Rate) มีหน่วยเป็น มิลลิเมตรต่อนาที (mm/min) โดยมีความลึกของบ่ากวนที่กดลงในเนื้อวัสดุทดลองคือ 0.5 มิลลิเมตร โดยมีระยะเวลาหมุนแซ่ในเนื้อวัสดุ 10 วินาที (s) เครื่องมือเชื่อมถูกผลิตด้วยวัสดุเหล็กเครื่องมือ SKD11 มีความยาวของบ่ากวน 1.4 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางหัวหิน 5 มิลลิเมตร หัวหินมีลักษณะเป็นทรงกระบอก มีรายละเอียดแสดงดังรูปที่ 3

ตารางที่ 2 สมบัติทางกลของ ของ SSM2024 และ SSM6061

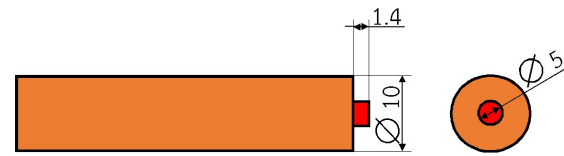
สมบัติทางกล	SSM2024	SSM6061
ความแข็งแรงดึง (MPa)	260.93	164
ความเค้นคราก (MPa)	208.75	131.2
อัตราการยืดตัว (%)	9.51	3.9
ความแข็ง (Hv)	92	68



รูปที่ 2 การวางตำแหน่งการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุด

ตารางที่ 3 ปัจจัยที่ใช้ในการทดลองการเชื่อม FSSW

ตัวอย่าง	ความเร็วหมุนเชื่อม (รอบต่อนาที)	ความเร็วกด (มิลลิเมตรต่อนาที)	จำนวน ชิ้น
FSSW1	500	56	3
FSSW2	500	112	3
FSSW3	500	224	3
FSSW4	1,000	56	3
FSSW5	1,000	112	3
FSSW6	1,000	224	3
FSSW7	1,400	56	3
FSSW8	1,400	112	3
FSSW9	1,400	224	3



หน่วย : มิลลิเมตร

รูปที่ 3 หัวหินที่ใช้ในงานวิจัย

ขั้นตอนการทดลองการเชื่อมเสียดทานแบบจุดจะเชื่อมด้วยเครื่องกัดแนวตั้ง ยี่ห้อ Heller รุ่น 2S การเชื่อมเริ่มจากการจับยึดชิ้นงานทดลองเชื่อมบนปากกาจับงาน โดยมีแท่งขนานเป็นตัวรองเชื่อมเพื่อป้องกันการหลุดตัวขณะกดเชื่อม แสดงดังรูปที่ 4 จากนั้นเปิดเครื่องกัดให้เครื่องมือเชื่อมหมุนตามปัจจัยในการทดลองลอยอยู่เหนือชิ้นงาน จากนั้นเคลื่อนที่โต๊ะงานของเครื่องกัดในแนวแกน Z แบบอัตโนมัติตามความเร็วกดที่กำหนดตามปัจจัยในการทดลองให้เครื่องมือเชื่อมกดลงไปในเนื้อวัสดุทดลอง 0.5 มิลลิเมตร และสัมผัสกับบ่ากวนเป็นระยะเวลา 10 วินาที เมื่อครบเวลาที่กำหนดก็เคลื่อนที่ของโต๊ะงานลงเพื่อให้หัวหินลอยขึ้นออกจากรอยเชื่อม จากนั้นขั้นตอนดังกล่าว คือ กระบวนการทดลองการเชื่อมเสียดทานแบบจุด

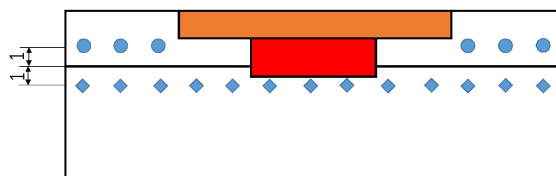


รูปที่ 4 ลักษณะการจับยึดชิ้นงานทดลองเชื่อม

การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางวิทยาประกอบด้วย 3 วิธี คือ กล้องถ่ายภาพกำลังขยาย 2 - 10 เท่า ใช้ในการดูภาพโครงสร้างมหภาคของชิ้นทดสอบ กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscopy : OM) ใช้ในการดูภาพโครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบ กล้อง

จุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) ใช้ในการดูภาพโครงสร้างจุลภาคในบริเวณจุดกวน (SZ)

การทดสอบความแข็งแรงแบบวิกเกอร์ แสดงดังรูปที่ 5 การทดสอบจะใช้เครื่องทดสอบแบบไมโครวิกเกอร์ กดบริเวณพื้นที่หน้าตัดของแนวเชื่อม โดยแบ่งออกเป็นสองแถว ซึ่งประกอบด้วยแถวบน และแถวล่าง กดตั้งแต่ตรงกลางไปจนถึงระยะห่างจากจุดศูนย์กลางแนวเชื่อม 10 มิลลิเมตร ระยะห่างของรอยกดแต่ละจุด 1 มิลลิเมตร แรงกดที่ใช้ 100 กรัม และเวลาในการกด 10 วินาที



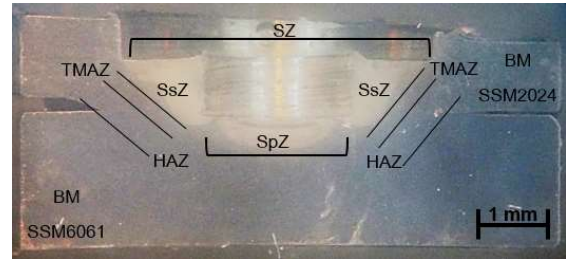
หน่วย : มิลลิเมตร

รูปที่ 5 รูปแบบการทดสอบความแข็งแรงของการเชื่อม
เสียดทานกวนแบบจุด

การทดสอบความแข็งแรงแรงเฉือน การทดสอบจะใช้เครื่องทดสอบแบบบอนกประสงค์ ทดสอบแรงเฉือนแบบ Lap Shear ดำเนินการโดยใช้ไฮดรอลิคเซลล์ขนาด 100 กิโลนิวตัน (kN) ที่มีความเร็วของหัวจับ (Crosshead) เท่ากับ 1 มิลลิเมตรต่อนาที

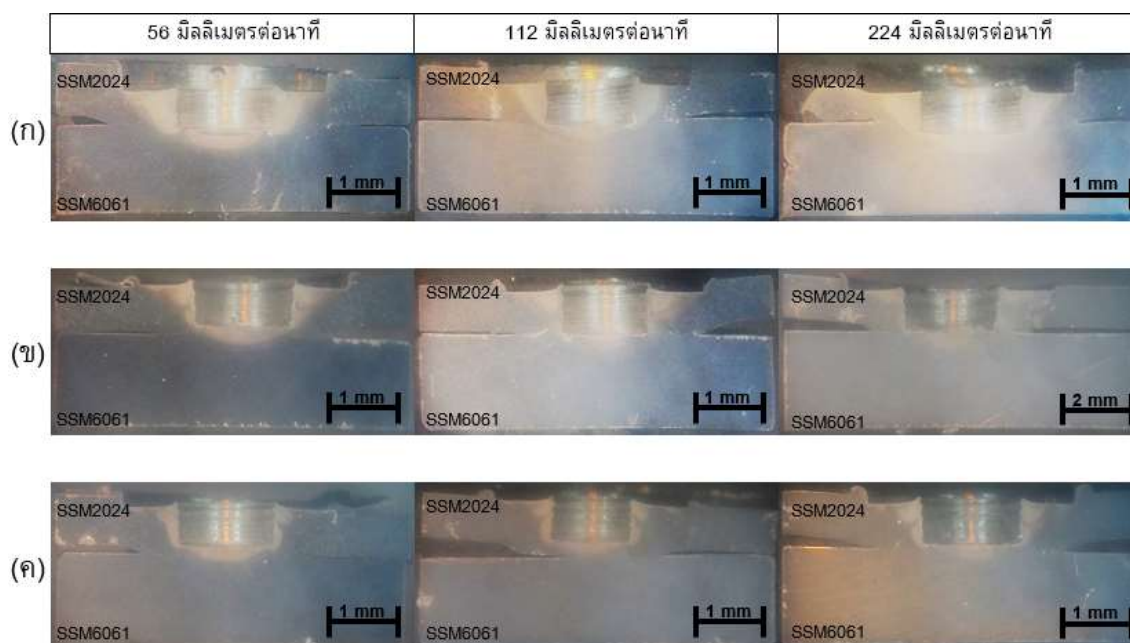
3. ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล

รูปที่ 6 แสดงให้เห็นลักษณะโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมเสียดทานแบบจุด แสดงดังรูปที่ 6 จากรูปรอยเชื่อมปรากฏเป็นรูปร่างคล้ายอ่างล้างหน้าซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 บริเวณ ได้แก่ บริเวณกวน (Stir Zone; SZ) บริเวณที่ได้รับความร้อนทางกล (Thermo Mechanical Affected Zone; TMAZ) และบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (Heat Affected Zone; HAZ) นอกจากนี้ บริเวณ SZ ประกอบด้วยบริเวณปากกวน (Stir Shoulder Zone; SsZ) และบริเวณพินกวน (Stir Pin Zone; SpZ) [17]

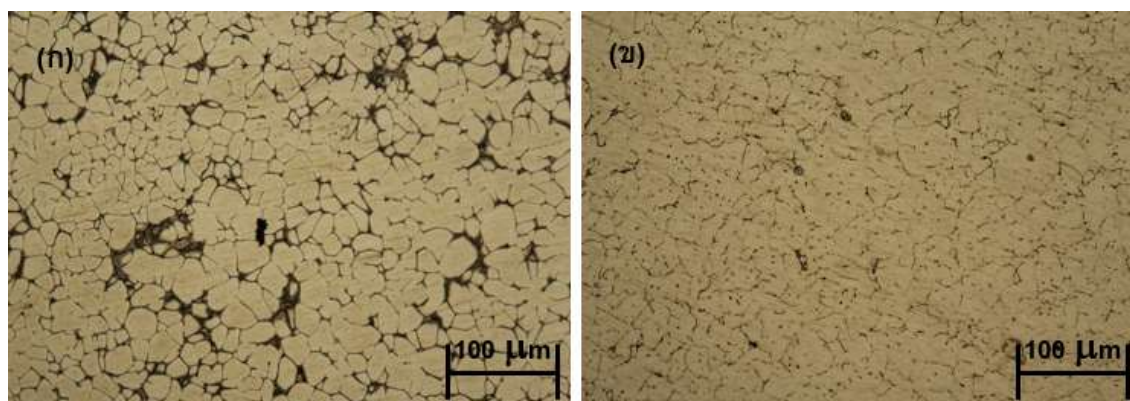


รูปที่ 6 โครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมเสียดทานแบบจุด
ที่ ความเร็วหมุนเชื่อม 500 รอบต่อนาที ความเร็วกด 56
มิลลิเมตรต่อนาที

รอยเชื่อมปรากฏรอยของเครื่องมือเชื่อมในส่วนรอยตัดขวางของรอยเชื่อมที่เกิดขึ้น โดยใช้พารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน ในส่วนของรอยเชื่อมจะเห็นบริเวณที่ประสานกันของวัสดุทั้งสอง ซึ่งมีในช่วงของความกว้างเครื่องมือเชื่อม เนื่องมาจากกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบจุดใช้ความร้อนจากการเสียดทานกันระหว่างชิ้นงานกับเครื่องมือเชื่อม บริเวณที่ได้รับความร้อนมาก คือ บริเวณที่เครื่องมือเชื่อมเสียดทานกัน ส่วนบริเวณที่ได้รับความร้อนน้อยคือบริเวณที่ไม่มีเครื่องมือเชื่อมเสียดทานกัน จึงทำให้เกิดรอยที่ไม่ประสานกันตรงบริเวณด้านข้างของรอยเชื่อม แสดงดังรูปที่ 7 ข้อสังเกตอีกประการ คือ ที่ความเร็วหมุนเชื่อมสูง (1,400 รอบต่อนาที) จะส่งผลให้รอยเชื่อมแคบกว่าความเร็วหมุนเชื่อมต่ำ (500 รอบต่อนาที) เนื่องมาจากความร้อนจากแรงเสียดทานสะสมในเนื้อวัสดุน้อย ทำให้มีการแผ่ความร้อนในเนื้อวัสดุเนื้อ นอกจากนี้ที่ความเร็วกดต่ำ (56 มิลลิเมตรต่อนาที) จะมีความกว้างของรอยเชื่อมในส่วนที่ติดกันกว้างกว่าความเร็วกดสูง (224 มิลลิเมตรต่อนาที) เนื่องมาจากความเร็วกดที่ต่ำมีแรงในการกดของเครื่องมือเชื่อมกับเนื้อวัสดุที่ไม่รวดเร็วจนเกินไป เกิดการสะสมความร้อนของแนวเชื่อมอย่างสม่ำเสมอ ในทางกลับกันความเร็วกดสูงมีแรงกดของเครื่องมือเชื่อมกับเนื้อวัสดุที่รวดเร็วมาก ทำให้เวลาในการเชื่อมสั้นลง ส่งผลต่อความร้อนที่สะสมในแนวเชื่อมมีไม่มากพอที่จะทำให้เกิดการประสานกันของแนวเชื่อมที่สมบูรณ์



รูปที่ 7 โครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อม FSSW ระหว่าง SSM2024 กับ SSM6061 (ก) ความเร็วหมุนเชื่อม 500 รอบต่อนาที (ข) ความเร็วหมุนเชื่อม 1,000 รอบต่อนาที และ (ค) ความเร็วหมุนเชื่อม 1,400 รอบต่อนาที



รูปที่ 8 โครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อวัสดุเดิม (ก) SSM2024 และ (ข) SSM6061

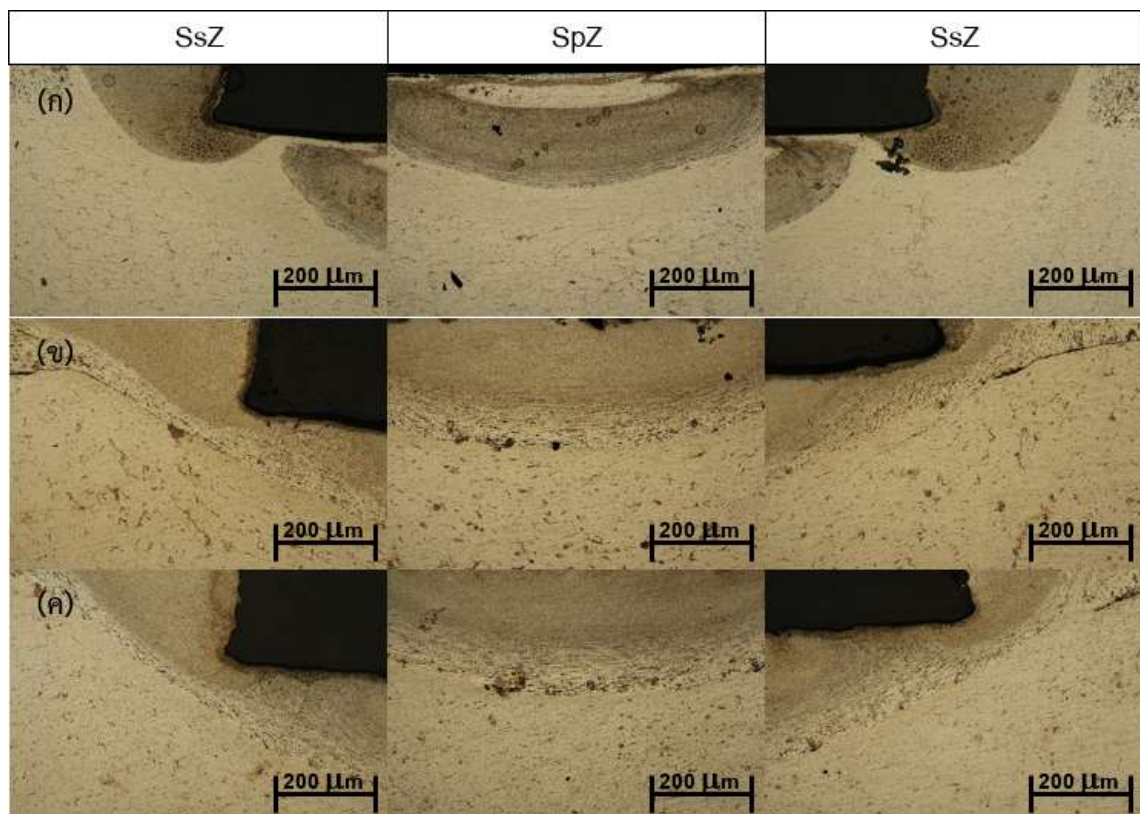
รูปที่ 8 โครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อวัสดุเดิม (Base Metal; BM) (ก) SSM2024 ประกอบไปด้วยเฟสแอลฟา (α) แบบก่อนกลมผสมกับเฟส Eutectic ประกอบไปด้วย $\alpha + \text{Al}_2\text{Cu}$ / Al_2CuMg [18] (ข) SSM6061 ประกอบไปด้วยเฟส α -Al มีลักษณะก่อนกลมต่อเนื่องกันมีเฟส Mg, Si และ Cu จับกลุ่มรอบเฟส α -Al [19] ซึ่งโครงสร้างเนื้อโลหะเดิมจะมีลักษณะเหมือนกันทุกสภาวะการเชื่อม

โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมเสียดทานแบบจุดในสภาวะต่างๆ แสดงดังรูปที่ 9-11 โครงสร้างจุลภาคของ

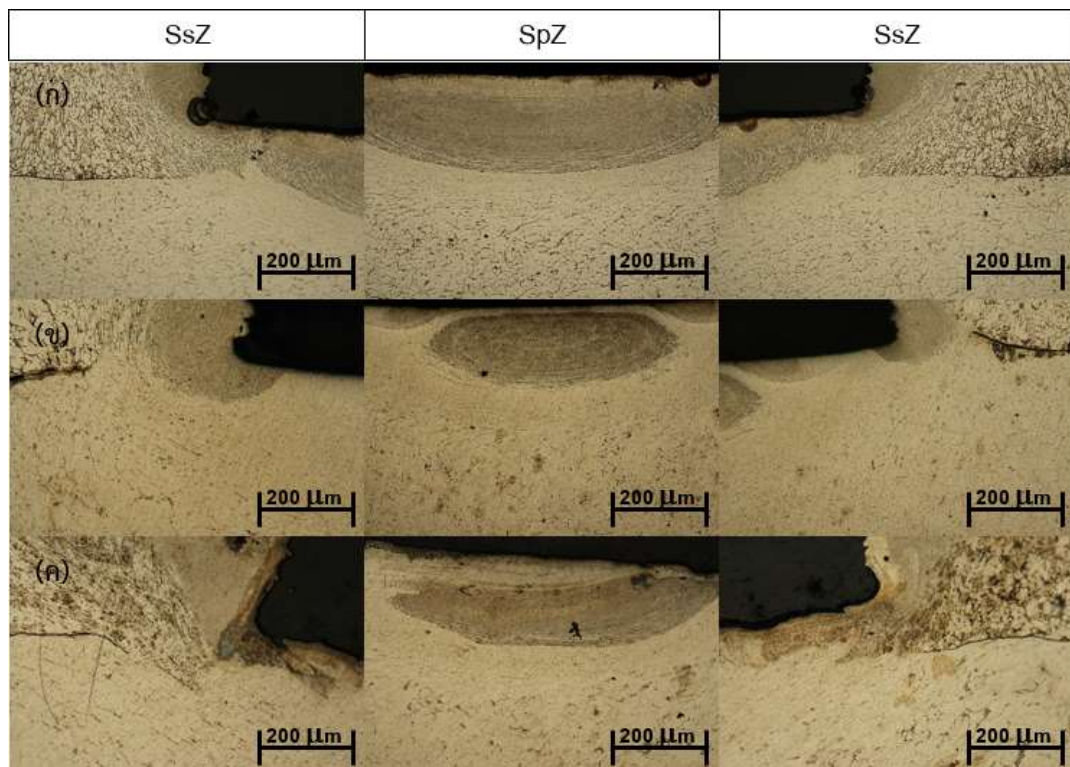
บริเวณ HAZ มีลักษณะคล้ายคลึงกับบริเวณ BM เนื่องจากมีอุณหภูมิไม่สูงมากนักในระหว่างกระบวนการเชื่อม [17] ส่วนบริเวณ TMAZ โครงสร้างเกิดการบิดเบี้ยวของเกรนด้วยรูปแบบที่เป็นอิสระต่อกันซึ่งเป็นผลมาจากการแพร่กระจายความร้อนที่เกิดจากแรงขับของเครื่องมือรวมกับแรงเฉือนในการกวนเนื้อวัสดุ [20] ในรูปที่ 9-11 แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณ SsZ และบริเวณ SpZ ปรากฏโครงสร้างจุลภาคที่เป็นเนื้อเดียวกันในสองวัสดุที่เกิดการรวมกันของความเค้นเฉือนและการแพร่กระจายความร้อนและอุณหภูมิที่สูงขึ้นจึงนำไปสู่โครงสร้างจุลภาคที่เป็นเนื้อ

เดียวกัน [17] นอกจากนี้สังเกตได้ว่าบริเวณ SpZ ด้านล่างของหัวพินเกิดการประสานกันของวัสดุสองชนิด แสดงให้เห็นว่าบริเวณพินกวนที่เกิดขึ้นมีรูปแบบ lamellar ที่เกิดจากการแผ่ความร้อนโดยการเสียดทานของเครื่องมือเชื่อม [13,21] ส่วนของบริเวณแนวกวนทั้งหมด SZ เกิดการเชื่อมประสานดีไม่มีข้อบกพร่องภายใน จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าบริเวณ SZ จะมีความละเอียดมากกว่าเมื่อเทียบกับเกรนที่บริเวณ BM เนื่องจากบริเวณ SZ จะมีอุณหภูมิที่สูงกว่าและการเสีรูปของเนื้อโลหะที่ได้จากการเสียดทานในขณะที่กวนมีปริมาณมากขึ้นส่งผลให้เกรนมีขนาดเล็กลงโครงสร้างเกรนในบริเวณ TMAZ จะมีลักษณะเรียวยาวเนื่องจากผลจากการเสีรูปจากปฏิกิริยาทางกลที่ได้รับจากตัวกวนส่วนที่บริเวณ BM ซึ่งเป็นบริเวณที่

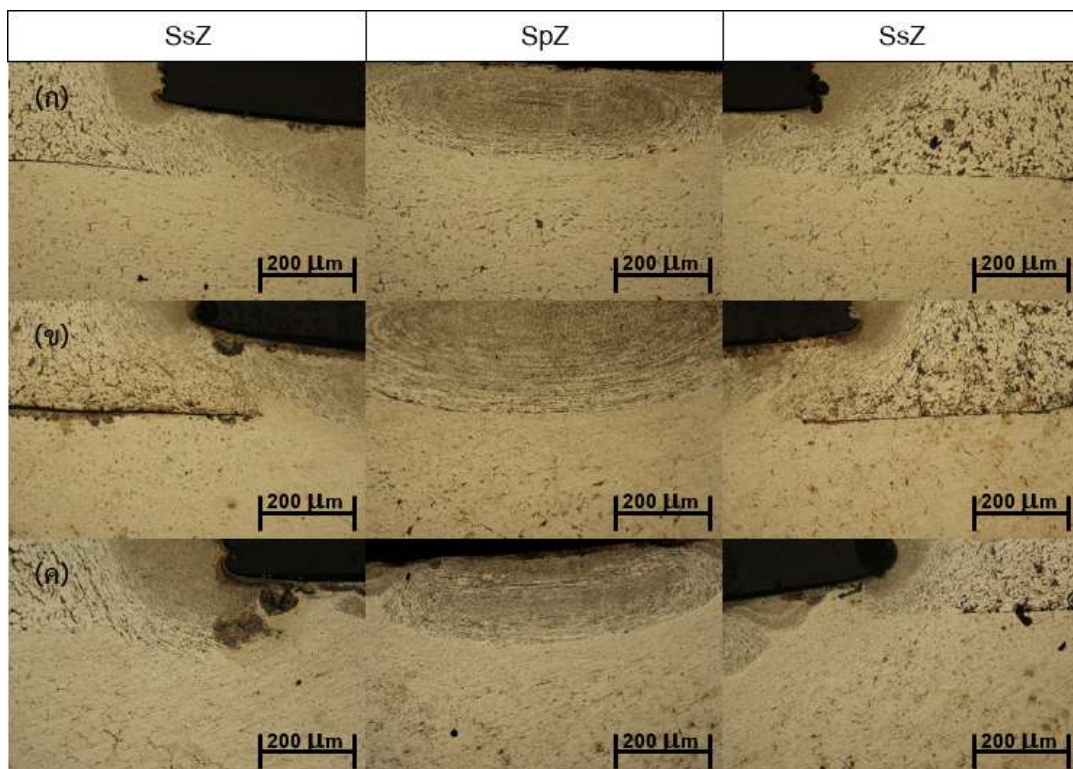
ไม่ได้รับผลกระทบทางกลที่มาจากตัวกวนและโครงสร้างเกรนในบริเวณดังกล่าวจะคล้ายกับโครงสร้างของเนื้อโลหะเดิม [22] เมื่อค่าความเร็วหมุนเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นความร้อนจากการเสียดทานและการไหลวนของเนื้อโลหะก็จะมีปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้ลักษณะเกรนในบริเวณ SZ มีความละเอียดขึ้น [23-24] ดังนั้นอิทธิพลของความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วกดที่มีต่อลักษณะโครงสร้างทางมหภาค และจุลภาคของแนวเชื่อม จากการทดลองจะพบว่า ที่ความเร็วกดเดียวกันแต่ความเร็วหมุนเชื่อมสูงขึ้นทำให้โครงสร้างบริเวณที่ถูกมีลักษณะเกรนที่ละเอียดขึ้น เนื่องจากความร้อนจากการเสียดทานแบบกวนมีมาก การเสีรูปของเนื้อวัสดุที่เกิดขึ้นมีมากตามไปด้วย



รูปที่ 9 โครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 500 รอบต่อนาที (ก) ความเร็วกด 56 มิลลิเมตรต่อนาที (ข) ความเร็วกด 112 มิลลิเมตรต่อนาที และ (ค) ความเร็วกด 224 มิลลิเมตรต่อนาที



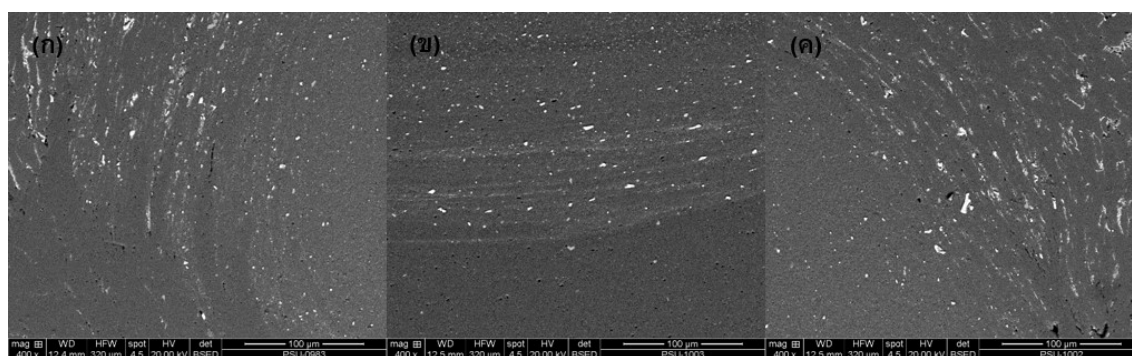
รูปที่ 10 โครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,000 รอบต่อนาที (ก) ความเร็วกด 56 มิลลิเมตรต่อนาที (ข) ความเร็วกด 112 มิลลิเมตรต่อนาที และ (ค) ความเร็วกด 224 มิลลิเมตรต่อนาที



รูปที่ 11 โครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,400 รอบต่อนาที (ก) ความเร็วกด 56 มิลลิเมตรต่อนาที (ข) ความเร็วกด 112 มิลลิเมตรต่อนาที และ (ค) ความเร็วกด 224 มิลลิเมตรต่อนาที

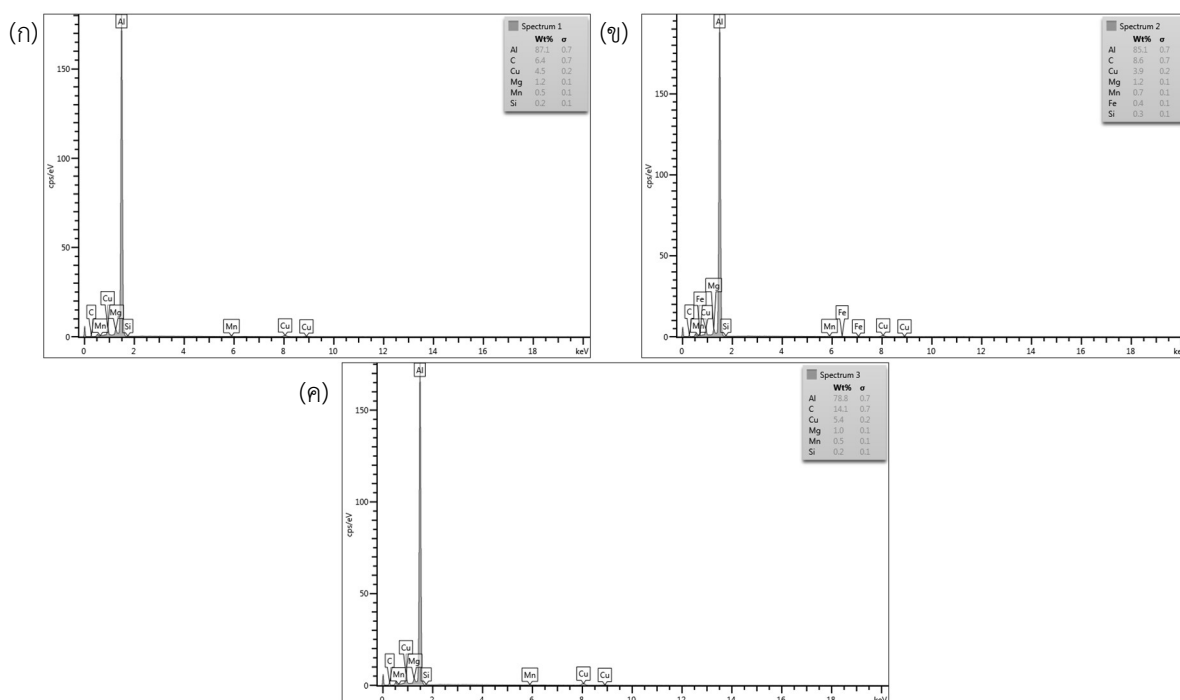
โครงสร้างจุลภาค SEM ของรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 500 รอบต่อนาที ความเร็วถด 56 มิลลิเมตรต่อนาที ซึ่งมีค่าแรงเฉือนจากการเชื่อมเสียดทานแบบจุดมากที่สุดมาทำการวิเคราะห์ โดย (ก) บริเวณ SsZ (ข) บริเวณ SpZ และ (ค) บริเวณ SsZ แสดงดังรูปที่ 12 พบว่าเกิดการหมุนวนของเกรนตามทิศทางการหมุนซึ่งเป็นผลมาจากการหมุนวนของ

เครื่องมือเชื่อม นอกจากนี้ยังพบว่าบริเวณบริเวณ SsZ มีส่วนประกอบของ Al Cu Mn Mg และ Si ส่วนบริเวณ SsZ มีส่วนประกอบของ Al Cu Fe Mn Mg และ Si และบริเวณรอบหัวพินมีการตกตะกอนของเกรน Cu เป็นอนุภาคขนาดเล็กที่กระจายตัวอยู่รอบๆ รายละเอียดแสดงดังรูปที่ 13



รูปที่ 12 โครงสร้างจุลภาค SEM ของรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 500 รอบต่อนาที ความเร็วถด 56 มิลลิเมตรต่อนาที

(ก) บริเวณ SsZ (ข) บริเวณ SpZ และ (ค) บริเวณ SsZ



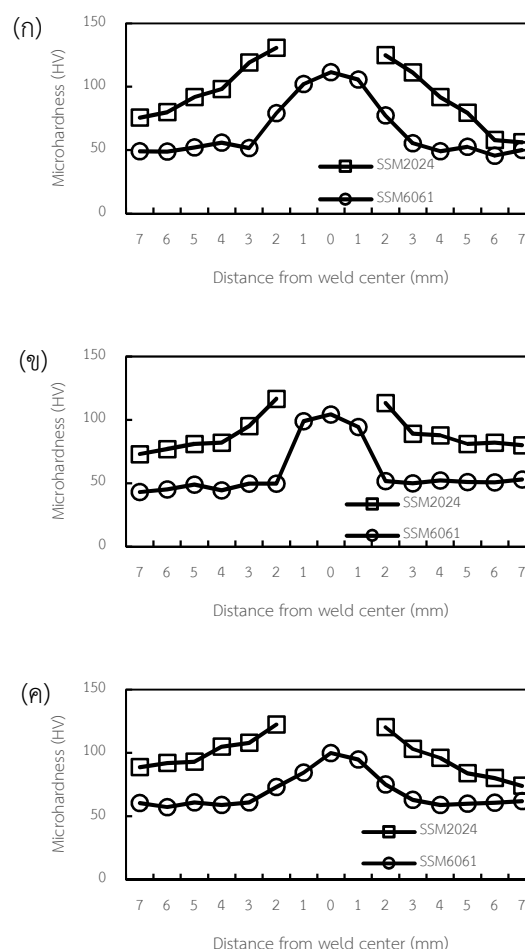
รูปที่ 13 EDX ของบริเวณรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 500 รอบต่อนาที ความเร็วถด 56 มิลลิเมตรต่อนาที

(ก) บริเวณ SsZ (ข) บริเวณ SpZ และ (ค) บริเวณ SsZ

ค่าความแข็งเฉลี่ยของรอยเชื่อมของทุกระดับความเร็ว กัด โดย (ก) ความเร็วหมุนเชื่อม 500 รอบต่อนาที (ข) ความเร็วหมุนเชื่อม 1,000 รอบต่อนาที และ (ค) ความเร็วหมุนเชื่อม 1,400 รอบต่อนาที แสดงดังรูปที่ 14 โดยมีค่าความแข็งของเนื้อวัสดุเดิม SSM2024 อยู่ในช่วงระหว่าง 60-80 Hv ส่วนค่าความแข็งของ SSM6061 อยู่ในช่วงระหว่าง 40-60 Hv ในบริเวณ SpP ค่าความแข็งปรับตัวเพิ่มมากขึ้นของทั้งสองวัสดุ และในบริเวณ SpZ ค่าความแข็งสูงสุดในพื้นที่ใกล้กับหัวพิน ซึ่งมีรายงานว่าค่าความแข็งรอบหัวพินมีการตกตะกอนของเกรน Cu เป็นอนุภาคขนาดเล็กที่กระจายตัวอยู่รอบๆ หัวพิน [25] ซึ่งสอดคล้องกันกับผลการตรวจสอบ SEM และ EDX พบว่าบริเวณรอบหัวพินมีการตกตะกอนของเกรน Cu เป็นอนุภาคขนาดเล็กที่กระจายตัวอยู่รอบหัวพิน

ค่าความแข็งสูงสุดของรอยเชื่อมในวัสดุ SSM2024 อยู่บริเวณ SsZ มีค่า 130.7 Hv และวัสดุ SSM6061 อยู่บริเวณ SpZ มีค่า 111.5 Hv ส่วนค่าต่ำสุดของรอยเชื่อมในวัสดุ SSM2024 มีค่า 60.1 Hv และวัสดุ SSM6061 มีค่า 43.2 Hv

นอกจากนี้ยังพบว่าการกระจายตัวของค่าความแข็งมีรูปร่างคล้ายระฆังคว่ำ และมีแนวโน้มของค่าความแข็งลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วหมุนเชื่อมมากขึ้น เนื่องมาจากการอัตราการกระจายตัวของความร้อนมีค่าเพิ่มมากขึ้นทำให้วัสดุอ่อนนุ่มลงเรื่อยๆ ส่งผลให้ค่าความแข็งลดลงตามไปด้วย [10] ซึ่งการกระจายตัวของค่าความแข็งก็สอดคล้องกับโครงสร้างทางจุลภาคพบว่าความหนาแน่นของเกรนในบริเวณใกล้หัวพินมีการกระจายตัวมากขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วหมุนเชื่อมมากขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็งลดลงตามไปด้วย แต่ถึงอย่างไรก็ตามบริเวณที่ใกล้กับรูของหัวพินยังคงมีค่าความแข็งมากที่สุดของรอยเชื่อม ซึ่งเป็นผลมาจากการผสมเข้ากันได้ดีของวัสดุทั้งสองในบริเวณ SpZ มีความหนาแน่นของการตกตะกอนของเฟส การเคลื่อนที่มาจัดเรียงตัวของเกรนที่เป็นรูปแบบ ที่ผลมาจากการหมุนวนของเครื่องมือเชื่อม [17] ส่งผลให้ค่าความแข็งบริเวณนี้ดีที่สุด



รูปที่ 14 ค่าความแข็งเฉลี่ยของรอยเชื่อม

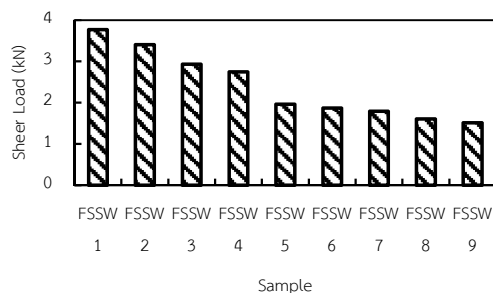
(ก) ความเร็วหมุนเชื่อม 500 รอบต่อนาที

(ข) ความเร็วหมุนเชื่อม 1,000 รอบต่อนาที และ

(ค) ความเร็วหมุนเชื่อม 1,400 รอบต่อนาที

ค่าแรงเฉือนการเชื่อมเสียดทานแบบจุด แสดงดังรูปที่ 15 พบว่าค่าแรงเฉือนลดน้อยลงเมื่อเพิ่มความเร็วหมุนเชื่อม ค่าแรงเฉือนโดยเฉลี่ยสูงสุดของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วหมุนเชื่อม 500 รอบต่อนาที ความเร็วกัด 56 มิลลิเมตรต่อนาที ความแข็งแรงของรอยเชื่อมคือ 3.77 กิโลนิวตัน จากนั้นเมื่อเพิ่มความเร็วหมุนเชื่อมเพิ่มขึ้น ความแข็งแรงของรอยต่อลดลงเรื่อยๆ จนถึงจุดต่ำสุดของการทดลองครั้งนี้เป็น 1.51 กิโลนิวตัน ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,400 รอบต่อนาที ความเร็วกัด 224 มิลลิเมตรต่อนาที จากปรากฏการณ์ดังกล่าวพบหลักฐานของการที่จะเพิ่มค่าแรงเฉือนในขณะ

ใช้ความเร็วหมุนเชื่อมสูงจำเป็นต้องใช้เวลาในการทำงานให้สั้นลงเพื่อให้ได้ค่าแรงเฉือนสูงสุด [20] กล่าวคือถ้าใช้ความเร็วหมุนเชื่อมต่ำในการเชื่อมต้องใช้เวลาในการหมุนเชื่อมมาก แต่ในขณะเดียวกันถ้าใช้ความเร็วหมุนเชื่อมสูงในการเชื่อมต้องใช้เวลาในการหมุนเชื่อมน้อยลงนั่นเอง นอกจากนี้มีงานวิจัยพบว่าระยะกดลิกในรอยเชื่อมก็ส่งผลต่อค่าแรงเฉือน โดยที่ใช้ความเร็วหมุนเชื่อมต่ำในการเชื่อมต้องกดลิกในรอยเชื่อมน้อย แต่ในขณะเดียวกันถ้าใช้ความเร็วหมุนเชื่อมสูงในการเชื่อมต้องกดลิกในรอยเชื่อมสูง [26] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยครั้งนี้ซึ่งใช้ระยะกดลิก 0.5 มิลลิเมตร ทำให้ที่ความเร็วหมุนเชื่อมต่ำมีค่าแรงเฉือนสูง



รูปที่ 15 ผลกระทบของปัจจัยในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบจุดต่อค่าแรงเฉือนเฉลี่ยของรอยเชื่อม

ค่าแรงเฉือนสูงสุดในปัจจัยความเร็วหมุนเชื่อม 500 รอบต่อนาที ความเร็วกด 56 มิลลิเมตรต่อนาที ซึ่งพบว่าสอดคล้องกับการกระจายตัวของเกรนมีพื้นที่กว้างมากกว่าปัจจัยอื่นๆ เนื่องมาจากความร้อนที่เกิดจากแรงเสียดทานของปัจจัยการเชื่อมดังกล่าวมีมากกว่า ส่งผลให้เกิดการแพร่และมีการตกตะกอนของเกรน Cu เป็นอนุภาคขนาดเล็กที่กระจายตัวอยู่รอบๆ หัวพิน ซึ่งสอดคล้องกับผลการตรวจสอบ SEM และ EDX พบว่าบริเวณรอบหัวพินมีการตกตะกอนของเกรน Cu เป็นอนุภาคขนาดเล็กที่กระจายตัวอยู่รอบหัวพิน

4. สรุปผลการทดลอง

โครงสร้างจุลภาคของบริเวณ TMAZ โครงสร้างเกิดการบิดเบี้ยวของเกรนด้วยรูปแบบที่เป็นอิสระต่อกันซึ่งเป็นผลมาจากการแพร่กระจายความร้อนที่เกิดจากแรงขับเคลื่อนของเครื่องมือรวมกับแรงเฉือนในการกวนเนื้อ

โครงสร้างจุลภาคบริเวณ SpZ ด้านล่างของหัวพินเกิดการประสานกันของวัสดุสองชนิด แสดงให้เห็นว่าบริเวณพินกวนที่เกิดขึ้นมีรูปแบบ lamellar ที่เกิดจากการแผ่ความร้อนโดยการเสียดทานของเครื่องมือเชื่อม

แนวโน้มของค่าความแข็งแรงลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วหมุนเชื่อมมากขึ้น เนื่องมาจากการอัตราการกระจายตัวของความร้อนมีค่าเพิ่มมากขึ้นทำให้วัสดุอ่อนนุ่มลงเรื่อยๆ ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงลดลงตามไปด้วย

ค่าความแข็งแรงสูงสุดในพื้นที่ใกล้กับหัวพิน ซึ่งมีรายงานว่าค่าความแข็งแรงรอบหัวพินมีการตกตะกอนของเกรน Cu เป็นอนุภาคขนาดเล็กที่กระจายตัวอยู่รอบๆ หัวพิน

ความเร็วหมุนเชื่อมสูงต้องใช้เวลาในการทำงานให้สั้นลงเพื่อให้ได้ค่าแรงเฉือนสูงสุด และต้องกดลิกในรอยเชื่อมสูงด้วย ค่าแรงเฉือนโดยเฉลี่ยสูงสุดของชิ้นงานทดสอบที่ความเร็วหมุนเชื่อม 500 รอบต่อนาที ความเร็วกด 56 มิลลิเมตรต่อนาที ความแข็งแรงของรอยเชื่อมคือ 3.77 กิโลนิวตัน และค่าแรงเฉือนต่ำสุดของการทดลองครั้งนี้เป็น 1.51 กิโลนิวตัน ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,400 รอบต่อนาที ความเร็วกด 224 มิลลิเมตรต่อนาที

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์และเครื่องจักรที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] W. M. Thomas, E. D. Nicholas, J. C. Needham, M. G. Murch, P. Temple-Smith and C. J. Dawes, "Friction stir butt welding," Patent No., PCT/GB92/02203, 1991.

- [2] M. Merzoug, M. Mazari, Berrahall and A. Imad, "Parametric studies of the process of friction spot stir welding of aluminium 6060-T5 alloys," *Mater Design.*, vol. 31(6), pp. 3023-3028, 2010.
- [3] H. Badarinarayan, "Fundamentals of friction stir spot welding," *Doctoral Dissertations, Mechanical and Aerospace Engineering, Missouri University of Science and Technology*, 2009.
- [4] Y. Bozkurt, S. Salman and G. Çam, "Effect of welding parameters on lap shear tensile properties of dissimilar friction stir spot welded AA 5754-H22/2024-T3 joints," *Sci Technol Weld Joi.*, vol. 18(4), pp. 337-345, 2013.
- [5] G. Ipekoglu and G. Çam, "Effects of initial temper condition and postweld heat treatment on the properties of dissimilar friction-stir-welded joints between AA7075 and AA6061 aluminum alloys," *Metall and Mat Trans A.*, vol. 45(7), pp. 3074-3087, 2014.
- [6] G. Çam, G. Ipekoglu and H. Tarik Serindag, "Effects of use of higher strength interlayer and external cooling on properties of friction stir welded AA6061-T6 joints," *Sci Technol Weld Joi.*, vol. 19(8), pp. 715-720, 2014.
- [7] A. Heidarzadeh, H. Khodaverdizadeh, A. Mahmoudi and E. Nazari, "Tensile behavior of friction stir welded AA 6061-T4 aluminum alloy joints," *Mater Design.*, vol. 37, pp. 166-173, 2012.
- [8] S. T. Amancio-Filho, S. Sheikhi J. F. Dos Santos and C. Bolfarini, "Preliminary study on the microstructure and mechanical properties of dissimilar friction stir welds in aircraft aluminium alloys 2024-T351 and 6056-T4," *J Mater Process Tech.*, vol. 206(1-3), pp. 132-142, 2008.
- [9] S. Babu, G. D. Janaki Ram, P. V. Venkitakrishnan, G. Madhusudhan Reddy and K. Prasad Rao, "Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Lap Welded Aluminum Alloy AA2014," *J Mater Sci Technol.*, vol. 28(5), pp. 414-426, 2011.
- [10] M. P. Mubiayi and E. T. Akinlabi, "Evolving properties of friction stir spot welds between AA1060 and commercially pure copper C11000," *T Nonferr Metal Soc.*, vol. 26(7), pp. 1852-1862, 2016.
- [11] R. Z. Xu, D. R. Ni, Q. Yang, C. Z. Liu and Z. Y. Ma, "Influencing mechanism of Zn interlayer addition on hook defects of friction stir spot welded Mg-Al-Zn alloy joints," *Mater Design.*, vol. 69, pp. 163-169, 2015.
- [12] Y. Li, L. E. Murr and J. C. McClure, "Flow visualization and residual microstructures associated with the friction-stir welding of 2024 aluminum to 6061 aluminum," *Mat Sci Eng A-Struct.*, vol. 271(1-2), pp. 213-223, 1999.
- [13] S. T. Amancio-Filho, S. Sheikhi, J. F. dos Santos and C. Bolfarini, "Preliminary study on the microstructure and mechanical properties of dissimilar friction stir welds in aircraft aluminium alloys 2024-T351 and 6056-T4," *J Mater Process Tech.*, vol. 206(1-3), pp. 132-142, 2008.
- [14] P. Sadeesh, M. Venkatesh Kannan, V. Rajkumar, P. Avinash, N. Arivazhagan, K.

- Devendranath Ramkumar and S. Narayanan, "Studies on friction stir welding of AA 2024 and AA 6061 dissimilar metals," *Procedia Eng.*, vol. 75, pp. 145-149, 2014.
- [15] C. Jonckheere, B. D. Meester, A. Denquin and A. Simar, "Torque, temperature and hardening precipitation evolution in dissimilar friction stir welds between 6061-T6 and 2014-T6 aluminum alloys," *J Mater Process Tech.*, vol. 213(6), pp. 826-837, 2013.
- [16] รอมฎอน บุระพา รังสิณี แคนยุกต์ และเจษฎา วรณสินธุ์. "การพัฒนาระบบการผลิตโลหะกึ่งของแข็งโดยการพ่นพองแก๊สขณะแข็งตัวสำหรับอะลูมิเนียมผสมเกรด A356". การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 7 ประจำปี 2552. 21-22 พฤษภาคม 2552. สงขลา : 549-554, 2552.
- [17] C. Gao, R. Gao and Y. Ma, "Microstructure and mechanical properties of friction spot welding aluminium- lithium 2 A9 7 alloy," *Mater Design.*, vol. 83, pp. 719-727, 2015.
- [18] S. Thanabumrungskul, S. Janudom, R. Burapa, P. Dulyapraphant and J. Wannasin, "Industrial development of gas induced semi-solid process," *T Nonferr Metal Soc.*, vol. 20(3), pp. s1016-s1021, 2010.
- [19] N. Pajaroen, T. Plookphol, J. Wannasin and S. Wisutmethangoon, "Influence of Solution Heat Treatment Temperature and Time on the Microstructure and Mechanical Properties of Gas Induced Semi-Solid (GISS) 6061 Aluminum Alloy," *App Mech Mater.*, vol. 313-314, pp. 67-71, 2013.
- [20] E. Fereiduni, M. Movahedi and A. H. Kokabi, "Aluminum/ steel joints made by an alternative friction stir spot welding process," *J Mater Process Tech.*, vol. 224, pp. 1-10, 2015.
- [21] L. E. Murr, Y. Li, and J. C. McClure, "A Comparative Study of Friction Stir Welding of Aluminium Alloys," *Aluminium Trans.*, vol. 1, pp. 141-154, 1999.
- [22] O. Hatamleh and A. DeWald, "An investigation of the peening effects on the residual stresses in friction stir welded 2195 and 7075 aluminum alloy joints," *J Mater Process Tech.*, vol. 209, pp. 4822-4829, 2009.
- [23] P. Cavaliere, E. Cerri and A. Squillace, "Mechanical response of 2024 - 7075 aluminium alloys joined by Friction Stir Welding," *J Mater Sci.*, vol. 40, pp. 3669-3676, 2005.
- [24] P. Cavaliere, A. De Santis, F. Panella and A. Squillace, "Effect of welding parameter on mechanical and microstructural properties of dissimilar AA 6082 - AA 2024 joints produced by friction stir welding," *Mater Design.*, vol. 30, pp. 609-616, 2009.
- [25] M. Shiraly, M. Shamanian, M. R. Toroghinejad and M. Ahmadi Jazani, "Effect of Tool Rotation Rate on Microstructure and Mechanical Behavior of Friction Stir Spot-Welded Al/ Cu Composite," *J Mater Eng Perform.*, vol. 23(2), pp. 413-420, 2014.
- [26] R. Heideman, J. C. Johnson and S. Kou, "Metallurgical analysis of Al/Cu friction stir spot welding," *Sci Technol Weld Joi.*, vol. 15(7), pp. 597-604, 2010.

การพัฒนาอุปกรณ์สำหรับปรับมุมพิทช์ของใบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบแกนนอน ขนาดเล็ก

Development of Blade Pitch Angle Adjustment Device for Small Horizontal Axis Wind Turbine

บัญญัติ นิยมवास^{1*} อธิราช ภัทรางกูร² อภิชาติ ศรีไชยรัตน์²

¹ผู้ช่วยศาสตราจารย์, ²อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย อ.เมือง จ.สงขลา 90000

Banyat Niyomvas^{1*} Atirat Pattarangkun² Apichit Srichairattana²

¹Assistant Professor, ²Lecturer Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of technology Srivijaya, Songkhla, 90000

*Corresponding author: Email: banyat@engineer.com

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาอุปกรณ์สำหรับปรับมุมพิทช์ของใบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบแกนนอนขนาดเล็กเพื่อให้กังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กทำงานได้ที่มีมุมพิทช์ต่างๆ ซึ่งจะแก้ปัญหาที่ส่วนใหญ่กังหันลมผลิตไฟฟ้าจะถูกติดตั้งใบกังหันลมไว้ที่มีมุมพิทช์เพียงค่าเดียว โดยอุปกรณ์ดังกล่าวมีลักษณะเป็นชุดรางสไลด์แนวโค้ง ฐานของรางสไลด์แนวโค้งจะยึดติดกับคานของแกนหมุนของกังหันลมผลิตไฟฟ้า ส่วนใบกังหันลมจะยึดอยู่กับรางสไลด์แนวโค้ง จึงทำให้สามารถปรับมุมพิทช์ของใบกังหันลมให้เป็นมุมต่างๆ ได้ตามที่ต้องการ ใบกังหันลมที่ใช้ในการทดลองเป็นใบกังหันลมอะคริลิก ใบกังหันมีความยาวเท่ากับ 70 เซนติเมตร โดยมุมพิทช์ของใบกังหันลมที่ทำการทดลองมี 5 ค่า คือ 10°, 20°, 30°, 40° และ 50° ความเร็วลมที่ใช้ในการทดลองมีค่าอยู่ระหว่าง 0 – 9.0 เมตรต่อวินาที จากผลการทดลองพบว่ากังหันลมผลิตไฟฟ้าที่มีใบกังหันลมอะคริลิกและได้ติดตั้งอุปกรณ์สำหรับปรับมุมพิทช์ของใบกังหันลม เมื่อปรับมุมพิทช์ของใบกังหันลมให้เท่ากับ 10° ที่ความเร็วลม 9.0 เมตรต่อวินาที จะสามารถผลิตกำลังงานไฟฟ้าได้เท่ากับ 10.4 วัตต์ และ เมื่อปรับมุมพิทช์ของใบกังหันลมให้เท่ากับ 20° ที่ความเร็วลม 9.0 เมตรต่อวินาที จะสามารถผลิตกำลังงานไฟฟ้าได้เท่ากับ 12.3 วัตต์

คำสำคัญ: กังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบแกนนอนขนาดเล็ก มุมพิทช์ของใบกังหันลม ชุดรางสไลด์แนวโค้ง

ABSTRACT

The objective of this research was to develop a device for adjusting the pitch angle of small horizontal axis wind turbine generators in order that they were functional in different pitch angles as well as solved the problem of one fixed pitch angle. Device has a curve rail, which base of curve rail was attached with the hub of the wind turbine. Wind turbine blades were attached with rail curve of the device, then blade pitch angle could adjust to several degree. Acrylic wind turbine blades was used for this experiment. Wind turbine blade is 70 cm long. The experiment was carried out with the pitch

blade angles at 10° , 20° , 30° , 40° , and 50° and the wind velocities at 0 – 9.0 m/s. The study's result revealed that electric power of wind turbine with acrylic blades which pitch blade angle at 10° and wind velocity at 9.0 m/s was 10.4 W, and electric power of wind turbine with acrylic blades which pitch blade angle at 20° and wind velocity at 9.0 m/s was 12.3 W.

Keyword: Small horizontal axis wind turbine, pitch blade angle of wind turbine, curve rail device

1. บทนำ

การผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานลมทำได้ด้วยกังหันลมผลิตไฟฟ้า โดยสามารถแบ่งออกได้เป็นกังหันลมผลิตไฟฟ้าแนวตั้ง (vertical axis wind turbine) และกังหันลมผลิตไฟฟ้าแนวนอน (horizontal axis wind turbine) ซึ่งมีความแตกต่างกันก็คือกังหันลมผลิตไฟฟ้าแนวตั้งจะมีลักษณะการหมุนของใบกังหันอยู่ในแนวตั้งหรือแนวดิ่ง และมีลักษณะของการหมุนของแกนกังหันที่ตั้งฉากทิศทางการไหลของลม ส่วนกังหันลมผลิตไฟฟ้าแนวนอนจะมีการหมุนของใบกังหันอยู่ในแนวนอนและมีลักษณะของการหมุนของแกนกังหันที่ขนานกับทิศทางการไหลของลม การผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมผลิตไฟฟ้าแนวนอนจะได้รับความนิยมมากกว่ากังหันลมผลิตไฟฟ้าแนวตั้งเนื่องจากสามารถผลิตไฟฟ้าได้มากกว่าในช่วงการทำงานที่ค่าความเร็วลมเดียวกันและมีประสิทธิภาพการทำงานที่สูงกว่า

การผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมผลิตไฟฟ้าแนวนอนส่วนใหญ่งานวิจัยจะมุ่งเน้นไปในส่วนของการศึกษาความสัมพันธ์ของโปรไฟล์ (profile) ของใบกังหันลมที่เหมาะสมต่อการทำงานในช่วงความเร็วลมค่าใดค่าหนึ่งหรือช่วงใดช่วงหนึ่ง มิฉะนั้นก็เป็นการศึกษาในส่วนของการออกแบบชุดเจเนอเรเตอร์ (generator unit) ให้มีประสิทธิภาพที่สูงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้า แต่อย่างไรก็ตามก็ยังพบปัญหาว่าหากนำใบกังหันลมที่เหมาะสมกับการใช้งานในช่วงความเร็วลมค่าใดค่าหนึ่ง ไปใช้งานในพื้นที่ ที่มีความเร็วลมอยู่นอกช่วงของการออกแบบใบกังหันลม ก็จะเกิดการทำงานที่ต่ำกว่าสมรรถนะและประสิทธิภาพที่ควรจะเป็น

กังหันลมผลิตไฟฟ้าโดยทั่วไปจะมีการติดตั้งใบกังหันลมที่มีมุมพิทช์ (pitch angle) ที่คงที่ ซึ่งจะมีความเหมาะสมต่อการใช้งานในช่วงของความเร็วลมช่วงหนึ่งเท่านั้น แต่หากเป็นความเร็วลมนอกช่วงที่ได้ออกแบบให้เหมาะสมสำหรับมุมพิทช์นั้น กังหันลมผลิตไฟฟ้าก็จะไม่สามารถทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ ทำให้ผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะออกแบบอุปกรณ์ที่สามารถปรับมุมพิทช์ของใบกังหันลมเพื่อให้สามารถนำกังหันลมไปใช้งานในพื้นที่ที่มีความเร็วที่แตกต่างกันได้

การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กที่กล่าวถึงมุมพิทช์และอุปกรณ์ในการปรับมุมพิทช์ สามารถกล่าวถึงได้พอสังเขปดังต่อไปนี้

ยุทธชัย เกียรติสันเทียะ [1] ได้ศึกษาจำนวนใบพัดและมุมติดตั้งของกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบแกนแนวนอนขนาดเล็กที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัดเท่ากับ 0.7 เมตร ใบพัดเป็นแบบแผ่นเรียบ ยาว 0.2 เมตร และกว้าง 0.1 เมตรหนา 1 มิลลิเมตร ผลการวิจัยพบว่าจำนวนใบพัดที่เหมาะสมที่สุดคือ 12 ใบพัดและมุมติดตั้งใบพัดเท่ากับ 20 องศา โดยมีค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุดเท่ากับ 0.29 ที่อัตราส่วนความเร็วลมปลายใบเท่ากับ 1.6

W. Xei และคณะ [2] ได้ศึกษากังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบแกนแนวนอนขนาดเล็กใบพัดเป็นแบบแอร์ฟอยล์ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัดเท่ากับ 0.8 เมตร โดยที่ระยะ 17 เซนติเมตร จากปลายใบพัดจะมีจุดเชื่อมต่อที่ทำให้สามารถบิดส่วนปลายของใบดังกล่าวให้มีแนวที่เอียงจากแนวใบพัดเดิมอันมีผลให้พื้นที่กวาด (swept area) ของใบพัดลดลง ส่งผลให้เมื่อความเร็วลมมีค่าสูงขึ้นแต่สามารถควบคุมกำลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ให้มีค่าคงที่

A. F. A. Gawad [3] ได้พัฒนากังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กที่สามารถปรับมุมพิทช์ของใบกังหันลมขณะทำงาน โดยใช้หลักการการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ผลิตได้ แล้วนำมาควบคุมมุมพิทช์ของใบกังหันลมด้วยมอเตอร์กระแสตรงที่มีเฟืองขับอยู่กับแกนที่ต่อกับแขนที่ยับได้ของใบกังหันลม ทำให้มอเตอร์กระแสตรงดังกล่าวสามารถขับให้แกนหมุนทวนเข็มนาฬิกาหรือหมุนตามเข็มนาฬิกา ซึ่งจะส่งผลให้มุมพิทช์ของใบกังหันลมเพิ่มขึ้นหรือลดลงได้ ขณะที่ใบพัดกำลังหมุน เมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นหรือลดลง อันจะส่งผลให้สามารถควบคุมค่าความต่างศักย์ของไฟฟ้าที่ผลิตได้จากกังหันลมให้มีค่าคงที่นั่นเอง

R.N. Sharma และ U.Madawala [4] ได้นำเสนอแนวคิดในการดึงพลังงานจากลมให้มากขึ้นในขณะที่มีความเร็วลมมีค่าต่ำ โดยการออกแบบให้ใบพัดของกังหันลมสามารถยืดขยายความยาวออกมาได้หากความเร็วลมที่วัดได้ต่ำกว่าค่าที่กำหนด อันจะส่งผลให้พื้นที่กวาด (swept area) ของใบกังหันลมมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้สามารถดึงพลังงานจากลมได้เพิ่มขึ้นด้วยนั่นเอง

Y.J. Chen และคณะ [5] ได้นำเสนอแนวคิดที่ได้รับการจดสิทธิบัตร สำหรับการปรับมุมพิทช์ของกังหันลมแกนนอนขนาดเล็ก โดยอาศัยหลักการของแรงหนีศูนย์กลาง (centrifugal force) ของอุปกรณ์ปรับมุมพิทช์ที่ประกอบไปด้วย แบร็ง, สปริง และมวลของโรลเลอร์ นั่นคือเมื่อกังหันลมหมุนด้วยความเร็วรอบสูง อุปกรณ์ดังกล่าวก็จะทำงานในลักษณะที่จะเกิดการปรับให้ใบพัดมีมุมพิทช์มากขึ้นเพื่อพยายามรักษาความเร็วรอบของกังหันลมไม่ให้สูงมากเกินไปนั่นเอง

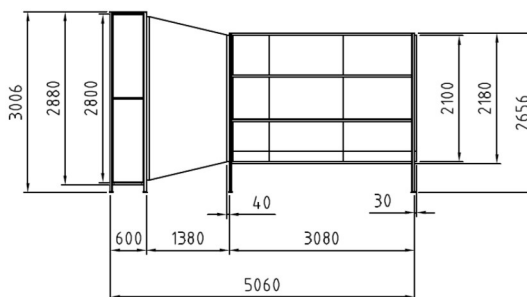
จากงานวิจัยที่ได้กล่าวไปแล้ว [1 - 5] พบว่ายังไม่มีอุปกรณ์ที่ตรงกับแนวคิดของผู้วิจัย ทำให้ผู้วิจัยต้องการพัฒนาอุปกรณ์นี้ขึ้นมาโดยมีวัตถุประสงค์ให้กังหันลมผลิตไฟฟ้าสามารถผลิตไฟฟ้าได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ โดยการปรับมุมพิทช์ของใบกังหันลมให้มีความสอดคล้องกับความเร็วลม

อุปกรณ์สำหรับปรับมุมพิทช์ของใบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบแกนนอนขนาดเล็กมีลักษณะเป็นชุดรางสไลด์แนวโค้ง ที่ฐานของรางสไลด์แนวโค้งจะยึดติดกับดุมเดิม

ของแกนหมุนของกังหันลมผลิตไฟฟ้า ส่วนใบกังหันลมจะยึดอยู่กับรางสไลด์แนวโค้ง จึงทำให้สามารถปรับมุมพิทช์ของใบกังหันลมให้เป็นมุมต่างๆ ได้ตามที่ต้องการ เพื่อให้สอดคล้องกับความเร็วลมที่มีในพื้นที่ ที่ได้ทำการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้า

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

อุปกรณ์การทดลองประกอบไปด้วย อุปกรณ์คลัมสำหรับผลิตลมเพื่อใช้ในการทดลอง โดยอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นมีมิติดังแสดงในรูปที่ 1 โดยติดตั้งพัดลมไฟฟ้า จำนวน 4 ชุด แต่ละชุดมี 6 ใบพัด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด 48 นิ้ว ต่อกับมอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 2 แรงม้า โดยสามารถแปรค่าความเร็วลมที่ทางออกด้วยการควบคุมความถี่ไฟฟ้าของพัดลมไฟฟ้าด้วยชุดอินเวอร์เตอร์ ยี่ห้อ Schneider รุ่น ATV312HU75N4 ขนาด 7.5kW 400V



รูปที่ 1 อุปกรณ์ (หน่วย มิลลิเมตร)

อุปกรณ์สำหรับปรับมุมพิทช์ของใบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบแกนนอนขนาดเล็กมีลักษณะเป็นชุดรางสไลด์แนวโค้ง ที่ฐานของรางสไลด์แนวโค้งจะยึดติดกับดุมเดิมของแกนหมุนของกังหันลมผลิตไฟฟ้า ส่วนใบกังหันลมจะยึดอยู่กับรางสไลด์แนวโค้ง อุปกรณ์ดังกล่าวมีมวลชิ้นละ 0.5 กิโลกรัม แสดงลักษณะของอุปกรณ์ได้ดังรูปที่ 2 ต่อไปนี้



รูปที่ 2 อุปกรณ์สำหรับปรับมุมพิทช์ของใบกังหันลมที่ติดตั้งกับคัมของกังหันลม

ใบกังหันลมที่ใช้ในการทดลองเป็นใบกังหันลมอะคลิลิกมีความยาวของใบเท่ากับ 70 เซนติเมตร กว้าง 10 เซนติเมตร หนา 10 มิลลิเมตร และมีมวลเท่ากับ 1.00 กิโลกรัม สามารถแสดงลักษณะของใบกังหันลม ได้ดังรูปที่ 3 ต่อไปนี้



รูปที่ 3 ใบกังหันลมอะคลิลิก (หน่วย เซนติเมตร)

เมื่อประกอบใบกังหันลมอะคลิลิกและอุปกรณ์สำหรับปรับมุมพิทช์ของใบกังหันลมกับชุดกังหันลมผลิตไฟฟ้า สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4 ต่อไปนี้ โดยวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัดได้เท่ากับ 1.48 เมตร



รูปที่ 4 ใบกังหันลมที่ติดตั้งอุปกรณ์สำหรับปรับมุมพิทช์ของใบกังหันลมอะคลิลิก

เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลองประกอบไปด้วย เครื่องวัดความเร็วลมยี่ห้อ DIGICON รุ่น DA - 42 มีช่วงการวัด 0.4 - 30.0 m/s ความละเอียดในการวัด 2% เครื่องวัดความเร็วรอบยี่ห้อ Wachendorff รุ่น Handy-2 มีช่วงการวัด 5 - 99,999 รอบต่อนาที ความละเอียดในการวัด 0.05% และเครื่องวัดกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้า ยี่ห้อ UNI-T รุ่น UT200A เครื่องวัดอุณหภูมิยี่ห้อ TES รุ่น 1312 ช่วงการวัด -50 ถึง 1,350 องศาเซลเซียส ความละเอียดในการวัด ± 0.1 องศาเซลเซียส

กังหันลมผลิตไฟฟ้าต่อกับชุด charge controller และหลอดไฟขนาด 100 W เพื่อใช้ในการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเพื่อนำมาคำนวณหากำลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ สามารถแสดงชุด charge controller และหลอดไฟได้ดังรูปที่ 5 ต่อไปนี้



รูปที่ 5 ชุด Charge Controller

การทดลองจะประกอบไปด้วย 2 การทดลอง
ดังต่อไปนี้

การทดลองที่ 1 ทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่าง
ความถี่ของไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ของพัดลมไฟฟ้ากับ
ความเร็วลมที่ปากทางออกของอุโมงค์ลม โดยจะทำการ
ปรับค่าความถี่ของไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าของพัด
ลมด้วยชุดอินเวอร์เตอร์ ตั้งแต่ 0 – 60 Hz และทำการวัด
ความเร็วลมที่ปากทางออกของอุโมงค์ลมจำนวน 4
ตำแหน่ง เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของไฟฟ้า
กระแสสลับที่จ่ายให้กับมอเตอร์ของพัดลมไฟฟ้ากับ
ความเร็วลมที่ปากทางออกของอุโมงค์ลม

การทดลองที่ 2 ทดลองชุดกังหันลมที่มีใบกังหันลม
เป็นใบอะคลิลิคพร้อมติดตั้งอุปกรณ์สำหรับปรับมุมพิทช์
ของใบกังหันลม โดยจะทำการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับปรับ
มุมพิทช์ของใบกังหันลมกับใบกังหันลมอะคลิลิคและ
ประกอบชุดกังหันลมผลิตไฟฟ้าดังกล่าวเข้ากับปาก
ทางออกของอุโมงค์ลม หลังจากนั้นทำการทดลองด้วยค่า
มุมพิทช์ของใบกังหันลมจำนวน 5 ค่า คือ 10°, 20°, 30°,
40° และ 50° ในการทดลองที่แต่ละมุมพิทช์ของใบกังหัน
ลมจะแปรค่าความเร็วลมที่ทางออกตั้งแต่ 0 – 9.0 เมตร
ต่อวินาที โดยในแต่ละค่าความเร็วลมจะทำการวัดและ
บันทึกค่าความเร็วรอบ ความต่างศักย์ และกระแสไฟฟ้าที่
ผลิตได้จากกังหันลม

ขณะทำการปรับมุมพิทช์ของกังหันลมผลิตไฟฟ้า
ขนาดเล็กแบบแกนนอนด้วยอุปกรณ์สำหรับปรับมุมพิทช์
แสดงได้ดังรูปที่ 6 ต่อไปนี้



ก. มุมพิทช์ 10°



ข. มุมพิทช์ 20°

รูปที่ 6 ตัวอย่างการปรับมุมพิทช์ของใบกังหันลมที่มุม 10°
และ 20°

การพิจารณาเปรียบเทียบสมรรถนะการทำงานของ
กังหันลมผลิตไฟฟ้าสามารถหาได้จากค่าต่างๆ ดังต่อไปนี้

- กำลังงานไฟฟ้า (P_T)

$$P_T = vi \quad (1)$$

เมื่อ

P_T = กำลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากกังหันลม (วัตต์)

v = ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)

i = กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

- อัตราส่วนความเร็วลมปลายใบ (λ)

$$\lambda = \frac{2\pi nr}{V} \quad (2)$$

เมื่อ

n = ความเร็วรอบของใบกังหันลม (รอบต่อวินาที)

V = ความเร็วลม (เมตรต่อวินาที)

r = รัศมีของใบกังหันลม (เมตร)

- ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด (C_P)

$$C_P = \frac{2P_T}{\rho_a A_T V^3} \quad (3)$$

เมื่อ

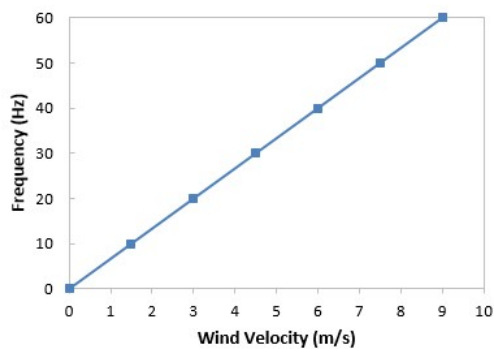
ρ_a = ความหนาแน่นของอากาศ (กิโลกรัมต่อ

ลูกบาศก์เมตร)

A_T = พื้นที่หน้าตัดของกังหันลม (ตารางเมตร)

3. ผลการทดลอง

จากการทดลองที่ 1 สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับที่จ่ายให้กับมอเตอร์ของพัดลมไฟฟ้าและความเร็วลมเฉลี่ยที่ปากทางออกของอุโมงค์ลม ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยจากการวัดความเร็วลมที่ปากทางออก ณ ตำแหน่งต่างๆ กัน 4 ตำแหน่ง ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 7 ต่อไปนี้

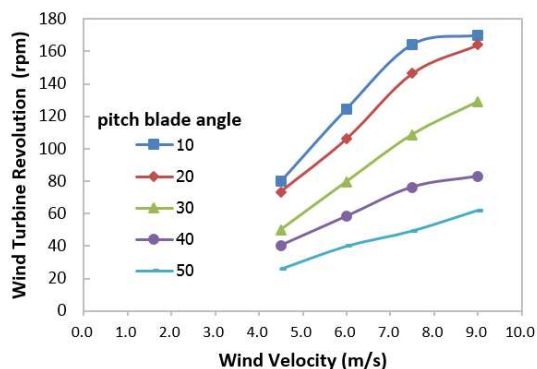


รูปที่ 7 ความเร็วลมที่ปากทางออกของอุโมงค์ลม

จากการทดลองที่ 2 สามารถนำผลการทดลองมาแสดงค่าความสัมพันธ์ได้ดังต่อไปนี้

1. ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมและความเร็วรอบของใบกังหันลม

จากผลการทดลอง สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมและความเร็วรอบของใบกังหันลม ที่มีมุมพิทช์ของใบกังหันลมค่าต่างๆ ได้ดังรูปที่ 8 ต่อไปนี้

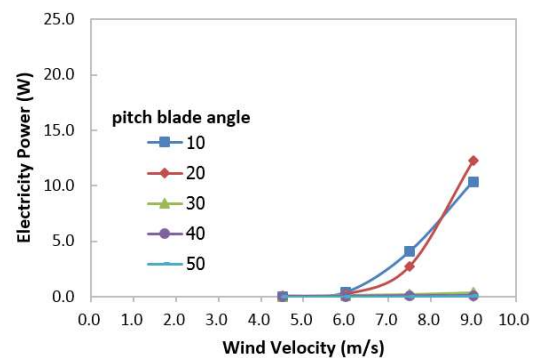


รูปที่ 8 ความเร็วลมและความเร็วรอบของกังหันลม

จากความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับความเร็วรอบของกังหันลม ที่ความเร็วลมค่าต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 8 พบว่า กังหันลมจะเริ่มหมุนที่ความเร็วลมเท่ากับ 4.5 เมตรต่อวินาที และเมื่อความเร็วลมมีค่าสูงขึ้นความเร็วรอบของกังหันลมก็จะสูงขึ้นด้วยเช่นกัน โดยมีค่าสูงที่สุดเมื่อใบกังหันลมมีค่ามุมพิทช์เท่ากับ 10 องศา และต่ำสุดเมื่อใบกังหันลมมีค่ามุมพิทช์เท่ากับ 50 องศา

2. ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมและกำลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้

จากผลการทดลอง สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมและกำลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ที่มุมพิทช์ของใบกังหันลมค่าต่างๆ ได้ดังรูปที่ 9 ต่อไปนี้



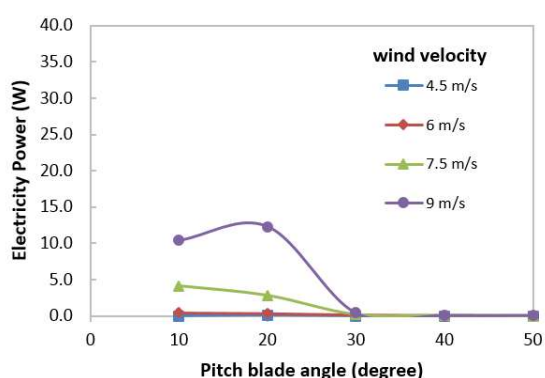
รูปที่ 9 ความเร็วลมและกำลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ของกังหันลมที่มีใบกังหันลมทำด้วยวัสดุอะคลิลิก

จากรูปที่ 9 ซึ่งแสดงค่าความเร็วลมและกำลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ของกังหันลมที่มีใบกังหันลมทำด้วยวัสดุอะคลิลิก พบว่ากังหันลมจะสามารถผลิตไฟฟ้าได้เมื่อใบกังหันลมมีมุมพิทช์เท่ากับ 10 และ 20 องศา ส่วนมุมพิทช์ที่เหลือคือ 30, 40 และ 50 องศา จะไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ อีกทั้งยังพบว่าเมื่อความเร็วลมมีค่าต่ำกว่า 8.5 เมตรต่อวินาที ควรปรับมุมพิทช์ของใบกังหันลมให้มีค่าเท่ากับ 10 องศา เพราะจะสามารถผลิตกำลังงานไฟฟ้าได้สูงสุด แต่หากความเร็วลมมีค่าสูงกว่า 8.5 เมตรต่อวินาที ควรปรับมุมพิทช์ของใบกังหันลมให้มีค่าเท่ากับ 20 องศา เพราะจะสามารถผลิตกำลังงานไฟฟ้าได้สูงสุด โดยที่ความเร็วลมเท่ากับ 9.0 เมตรต่อวินาที กังหันลมที่มีใบกังหันลมที่ปรับ

มุมพิทช์ไว้เท่ากับ 10 และ 20 องศา จะสามารถผลิตกำลังงานไฟฟ้าได้สูงสุดเท่ากับ 10.4 วัตต์ และ 12.3 วัตต์ตามลำดับ

3. ความสัมพันธ์ระหว่างมุมพิทช์ของใบกังหันลมและกำลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้

จากผลการทดลอง สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมพิทช์ของใบกังหันลมและกำลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ที่ความเร็วลมค่าต่างๆ ได้ดังรูปที่ 10 ต่อไปนี้



รูปที่ 10 มุมพิทช์ของใบกังหันลมและกำลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ของกังหันลม

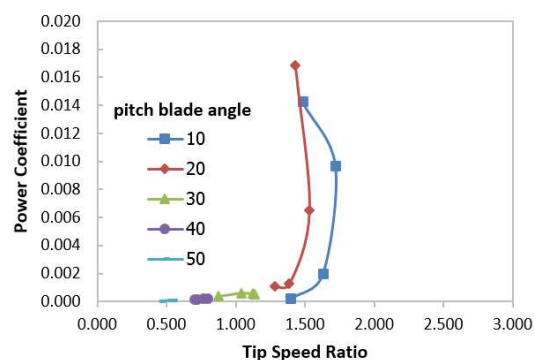
จากรูปที่ 10 ซึ่งแสดงค่ามุมพิทช์ของใบกังหันลมและกำลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ของกังหันลม พบว่าที่ความเร็วลม 7.5 เมตรต่อวินาที กำลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ของกังหันลมที่ปรับมุมพิทช์ของใบกังหันลมเท่ากับ 10 องศาจะมีค่าสูงกว่าที่ปรับมุมพิทช์ของใบกังหันลมเท่ากับ 20 องศา แต่เมื่อความเร็วลมมีค่าเท่ากับ 9.0 เมตรต่อวินาที กำลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ของกังหันลมที่ปรับมุมพิทช์ของใบกังหันลมเท่ากับ 20 องศาจะมีค่าสูงกว่าที่ปรับมุมพิทช์ของใบกังหันลมเท่ากับ 10 องศา ส่วนกังหันลมที่ปรับมุมพิทช์ไว้ที่ 30, 40 และ 50 องศา จะไม่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าออกมาได้

4. ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด และ อัตราส่วนความเร็วลมปลายใบ

จากผลการทดลอง สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด และ อัตราส่วน

ความเร็วลมปลายใบ ที่มุมพิทช์ของใบกังหันลมค่าต่างๆ ได้ดังรูปที่ 11

จากรูปที่ 11 ซึ่งแสดงค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด และ อัตราส่วนความเร็วลมปลายใบ ของใบกังหันลมอะคลิลิค พบว่ากังหันลมที่ปรับมุมพิทช์ของใบกังหันลมเท่ากับ 10 องศาจะมีค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุดเท่ากับ 0.014 เมื่อ อัตราส่วนความเร็วลมปลายใบมีค่าเท่ากับ 1.483 และกังหันลมที่ปรับมุมพิทช์ของใบกังหันลมเท่ากับ 20 องศาจะมีค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุดเท่ากับ 0.017 เมื่อ อัตราส่วนความเร็วลมปลายใบมีค่าเท่ากับ 1.430



รูปที่ 11 ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด และ อัตราส่วนความเร็วลมปลายใบ ของใบกังหันลมอะคลิลิค

4. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองสามารถสรุปผลได้ว่า อุปกรณ์สำหรับปรับมุมพิทช์ของใบกังหันลมผลิตไฟฟ้าบบแกนนอนขนาดเล็กสามารถนำมาใช้งานร่วมกับใบกังหันลมที่สร้างขึ้นจากวัสดุอะคลิลิค หรือใบกังหันลมที่มีลักษณะเป็นใบเรียบ โดยทำให้เมื่อติดตั้งชุดอุปกรณ์ดังกล่าวกับกังหันลมผลิตไฟฟ้า จะทำให้สามารถปรับมุมพิทช์ของใบกังหันลมเพื่อให้กังหันลมผลิตไฟฟ้าได้ สำหรับความเร็วลมค่าต่างๆ

จากผลการทดลองพบว่ากังหันลมผลิตไฟฟ้าที่มีใบกังหันลมอะคลิลิคและได้ติดตั้งอุปกรณ์สำหรับปรับมุมพิทช์ของใบกังหันลม เมื่อปรับมุมพิทช์ของใบกังหันลมให้เท่ากับ 10° ที่ความเร็วลม 9.0 เมตรต่อวินาที จะ

สามารถผลิตกำลังงานไฟฟ้าได้เท่ากับ 10.4 วัตต์ และ เมื่อปรับมุมพิทช์ของใบกังหันลมให้เท่ากับ 20° ที่ความเร็วลม 9.0 เมตรต่อวินาที จะสามารถผลิตกำลังงานไฟฟ้าได้เท่ากับ 12.3 วัตต์ ส่วนที่มุมพิทช์ 30° , 40° และ 50° ตลอดช่วงความเร็วลมที่ใช้ในการทดลองคือ 0 – 9 เมตรต่อวินาที กังหันลมจะไม่สามารถผลิตกำลังงานไฟฟ้า

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ในการอนุเคราะห์สถานที่และอุปกรณ์ เครื่องมือในการทำวิจัย และขอขอบคุณอาจารย์ประจำสาขาวิชาทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำที่มีประโยชน์ต่อการทำวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] ยุทธชัย เกียวิสันเทียะ. “จำนวนใบพัดและมุมติดตั้งที่เหมาะสมของชุดใบกังหันลม กรณีศึกษาใบพัดแบบแผ่นเรียบ”. *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23*. 4 – 7 พฤศจิกายน 2552. จังหวัดเชียงใหม่, (2552).
- [2] W. Xei, P. Zeng and L. Lei, “Wind tunnel experiment for innovative pitch regulated blade of horizontal axis wind turbine,” *Energy*, vol. 91, pp. 1070–1080, 2009.
- [3] A. F. A. Gawad, “New, Simple Blade-Pitch Control mechanism for Small-Size, Horizontal-Axis Wind Turbines,” *Journal of Energy and Power Engineering*, vol. 7, pp. 2237–2248, 2013.
- [4] R.N. Sharma and U.Madawala, “The Concept of a Smart Wind Turbine System,” *16th Australasian Fluid Mechanics Conference*. 2-7 December 2007. Crown Plaza, Gold Coast, Australia: 481-486, 2013).
- [5] Y.J. Chen, Y.F. Tsai, C.C. Huang, M.H. Li and F. B. Hsiao, “The Design and Analysis of

Passive Pitch Control for Horizontal Axis Wind Turbine,” *Energy Procedia*, vol. 61, pp. 683–686, 2014.

การปรับเทียบอัตโนมัติของแบบจำลองแท็งก์โดยใช้ Microsoft Excel Solver Automatic Calibration of Tank Model Using Microsoft Excel Solver

สีมศิษฐ์ วิทิตพันธ์¹ ชัยวัฒน์ เอกวัฒน์พานิชย์² ดวงฤดี โฆษิตกิตติวงศ์³ เสฏฐา ศาสนนันท์^{4*}

¹ วิศวกรโยธาปฏิบัติการ สำนักวิศวกรรมผังเมือง กรมโยธาธิการและผังเมือง 224 ถ.พระราม 9 แขวงห้วยขวาง
เขตห้วยขวาง กรุงเทพมหานคร 10320

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร 10140

³ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร 10140

⁴ อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ตำบลอ้อมครีษ อำเภอบางบาล จังหวัดนครนายก 26120

Srikasit Wititpan¹, Chaiwat Ekkawatpanit² Duangrudee Kositgittiwong³ Setta Sasananan⁴

¹ Public Works Engineer, Town and Country Planning Engineering Bureau, Department of Public
Works and Town & Country Planning, 224 Rama 9 Road, Huaykwang, Bangkok 10320

² Assistant Professor, Civil Engineering Department, King Mongkut's University of Technology
Thonburi, 126 Pracha Uthit Rd., Bang Mod, Thung Khru, Bangkok 10140

³ Assistant Professor, Civil Engineering Department, King Mongkut's University of Technology
Thonburi, 126 Pracha Uthit Rd., Bang Mod, Thung Khru, Bangkok 10140

⁴ Lecturer, Civil Engineering Department, Srinakharinwirot University, 63 Moo 7, Rangsit-
Nakhonnayok Road, Ongkharak, Nakhonnayok 26120

*Corresponding author E-mail: e41stomos@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอการหาค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ในแบบจำลองแท็งก์ โดยทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณระหว่างวิธีการสุ่มแทนค่า (Trial and error) ของพารามิเตอร์และการประยุกต์ใช้ Microsoft Excel Solver เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ผลการศึกษาพบว่าการปรับเทียบแบบจำลองแท็งก์ในลุ่มน้ำยมตอนบนโดยใช้ Microsoft Excel Solver ได้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าการสุ่มแทนค่าของพารามิเตอร์ในเชิงความถูกต้องและมีความสะดวกรวดเร็ว ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า Microsoft Excel Solver สามารถนำไปประยุกต์ใช้หาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองแท็งก์ในลุ่มน้ำยมตอนบน นอกจากนี้ได้ทำการหาค่าสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสมในการใช้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการหาค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองแท็งก์โดยกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ ได้แก่ IA, Nash, R2 และ RMSE ซึ่งพบว่าการใช้ค่าสัมประสิทธิ์ IA เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์จะให้ค่าที่ดีที่สุด

คำสำคัญ: การปรับเทียบอัตโนมัติ ค่าสัมประสิทธิ์ แบบจำลองแท็งก์ แบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า Microsoft Excel Solver

ABSTRACT

The objective of research is to determine optimal parameters of tank model using Microsoft Excel Solver. The parameters can be optimized and compared by using trial and error method and Microsoft Excel Solver. It can be concluded that model parameters using Microsoft Excel Solver showed better correlations more than that of trial and error method by increasing accuracy and convenience. The results showed that Microsoft Excel Solver can be used to calibrated Tank model parameter in Upper Yom River Basin. Additionally, for the research at hand, it was found that the best of objective function from the group of IA , $Nash$, R^2 and $RMSE$ is IA

Keyword: Automatic calibration, coefficient, Rainfall-Runoff model, Tank model, Microsoft Excel Solver

1. บทนำ

อุทกภัยเป็นภัยธรรมชาติที่สร้างความเสียหายให้กับชีวิตและทรัพย์สิน ปัจจุบันมีแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่าเพื่อใช้ในการพยากรณ์ปริมาณน้ำท่าให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นเป็นอย่างมาก แต่แบบจำลองต่าง ๆ นั้นต้องเสียค่าใช้จ่ายให้กับผู้พัฒนาแบบจำลองหรือใช้เวลาในการคำนวณนานอีกทั้งยังมีข้อจำกัดอื่นๆ หากสามารถพัฒนาแบบจำลองให้นำมาใช้ได้ง่ายโดยการคำนวณจาก Microsoft Excel ที่มีในคอมพิวเตอร์ทั่วไป โดยแบบจำลองแท็งก์(Tank model) เป็นแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่าที่สามารถใช้การคำนวณโดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel ได้ แต่แบบจำลองแท็งก์ก็ยังคงมีปัญหาที่ยากในการปรับค่าพารามิเตอร์ เพราะมีค่าพารามิเตอร์มากถึง 16 พารามิเตอร์ โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองแท็งก์ประกอบด้วยหลายปัจจัย เช่น สภาพการใช้ที่ดิน, ลักษณะพื้นที่หรือลักษณะทางธรณีวิทยาเป็นต้น ซึ่งยากต่อการปรับค่าพารามิเตอร์เพื่อให้ผลของแบบจำลองมีความถูกต้อง โดยในอดีต ประเทศไทยมีการใช้แบบจำลองแท็งก์เช่น การศึกษาเตือนภัยน้ำท่วมในจังหวัดเชียงใหม่พบว่าแบบจำลองแท็งก์มีความแม่นยำสูงและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการพยากรณ์และเตือนภัยน้ำหลากในกลุ่มน้ำปิงตอนบนของจังหวัดเชียงใหม่ได้ [1]

การปรับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของแบบจำลองแท็งก์สามารถทำได้โดยสุ่มค่าของพารามิเตอร์ (Trial and error) และทำการด้วยการเปรียบเทียบผลการคำนวณกับข้อมูลจากการตรวจวัด [3] แต่วิธีการนี้ต้องเสียเวลาในการ

ปรับค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมมากที่สุด นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการหาพารามิเตอร์ให้มีความเหมาะสมต่อสภาพพื้นที่ โดยหาความสัมพันธ์กับใช้ลักษณะการใช้ที่ดินและธรณีวิทยาเป็นสมการถดถอยพหุคูณ ซึ่งใช้วิธีการของ Standardized Powell และ Powell ในการหาค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ต่างๆ [4] ซึ่งวิธีการหรือ สมการดังกล่าวนี้มีความซ้ำซ้อน

ในการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อพัฒนาแบบจำลองแท็งก์ใน Microsoft Excel เพื่อคำนวณค่าอัตราการไหลโดยใช้การปรับเทียบพารามิเตอร์แบบอัตโนมัติซึ่งจะทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณจากวิธีการใช้ Microsoft Excel Solver กับวิธีการสุ่มค่าพารามิเตอร์ว่าผลที่ได้มีความแตกต่างกันมากน้อยเพียงใด และนอกจากนี้จะทำการหาค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์โดยการกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ IA , $Nash$, R^2 และ $RMSE$ เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ที่ให้ผลการคำนวณที่ดีที่สุด

2. วิธีการศึกษา

2.1 แบบจำลองแท็งก์

แบบจำลองแท็งก์เป็นแบบจำลองน้ำฝน - น้ำท่าโดยจำลองให้พื้นที่ลุ่มน้ำมีสภาพเป็นถังน้ำและมีการไหลของน้ำไปยังทางออกด้านข้างที่เปรียบเสมือนการไหลของน้ำท่าซึ่งแบบจำลองแท็งก์มีการแบ่งถังน้ำเป็นชั้นๆ เปรียบเสมือนชั้นของดินโดยจะมีพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์น้ำท่าของการไหลออกด้านข้าง (a) ค่า

สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (i) ค่าความสูงของทางไหลออกด้านข้าง (z) และค่าความสูงของน้ำในถัง (h) ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งแสดงผังและองค์ประกอบของแบบจำลองแท็งก์แบบ 4 ถัง โดยที่แบบจำลองนี้จะจำลององค์ประกอบ

ทางด้านอุทกวิทยาที่สำคัญไว้ คือ ความเข้มข้น (r) อัตราการระเหย (e) อัตราการไหล (q) อัตราการซึมระหว่างชั้นดิน (I) และสภาวะการไหลของน้ำใต้ดิน ซึ่งจะเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ข้างต้นได้ตามสมการที่ (1) - (4)

$$q(x,n) = \begin{cases} a(x) \times (h(x,n) - z(x)), & (h(x,n) > z(x)) \\ 0, & (h(x,n) \leq z(x)) \end{cases} \quad (1)$$

$$I(x,n) = i(x) \times h(x,n) \quad (2)$$

$$h(x,n+1) = \begin{cases} h(x,n) - q(x,n) \times \Delta t - I(x,n) \times \Delta t + r(n+1) \times \Delta t, & (x=1) \\ h(x,n) - q(x,n) \times \Delta t - I(x,n) \times \Delta t + I(x-1,n) \times \Delta t, & (x \neq 1) \end{cases} \quad (3)$$

$$Q(n) = \sum_{x=1}^4 q(x,n) \quad (4)$$

เมื่อ

x = จำนวนชั้นของถังนับจากถังบน

n = จำนวนวันนับจากวันที่เริ่มต้นการคำนวณน้ำท่า (1/day)

Δt = ความยาวของช่วงเวลาในการคำนวณ

$a(x)$ = ค่าสัมประสิทธิ์การไหลออกของน้ำท่าในถังที่ x (1/day)

$i(x)$ = ค่าสัมประสิทธิ์ของการซึมผ่านในถังที่ x (1/day)

$h(x,n)$ = ค่าความสูงของน้ำในถังที่ x ในวันที่ n (mm)

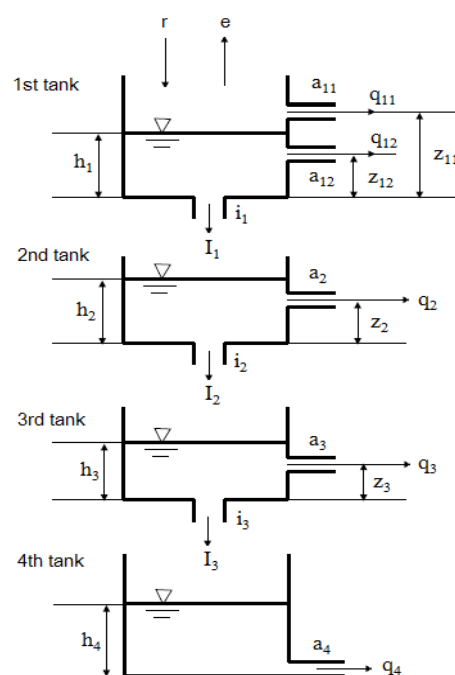
$I(x,n)$ = อัตราการซึมผ่านของน้ำจากถังที่ x ในวันที่ n (mm/day)

$r(n)$ = ปริมาณความเข้มข้นในวันที่ n (mm/day)

$Q(n)$ = อัตราการไหลทั้งหมดของกลุ่มน้ำวันที่ n (mm/day)

$q(x,n)$ = อัตราการไหลของถังที่ x ในวันที่ n (mm/day)

$z(x)$ = ความสูงของรูน้ำท่าในถังที่ x (mm)



รูปที่ 1 ผังและองค์ประกอบของแบบจำลองแท็งก์แบบ 4 ถัง

2.2 การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมโดยใช้ Microsoft Excel Solver ซึ่งเป็นคำสั่งที่ใช้หาค่าที่เหมาะสม โดยต้องกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต้องการ

หาค่า ซึ่งสามารถกำหนดให้หาค่าเหมาะสมสูงสุดหรือต่ำสุดได้ และต้องกำหนดเซลล์ที่ต้องการเปลี่ยนค่า ซึ่งก็คือค่าพารามิเตอร์ และกำหนดช่วงของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อควบคุมการหาค่าที่เหมาะสม โดยในการศึกษานี้จะใช้ค่าสัมประสิทธิ์ทั้งหมด 4 ตัวคือ ค่าการยอมรับได้ Index of Agreement (IA), ค่า

ประสิทธิภาพของ Nash และ Sutcliffe [2] (Nash), ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) และ รากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย Root mean square error (RMSE) ดังแสดงอยู่ในสมการที่ (5)-(8) โดยจะทำการเปรียบเทียบระหว่างวิธีหาค่าพารามิเตอร์ กับวิธีการใช้ Solver โดยใช้ค่า Nash เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์

$$IA = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (s_i - o_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|s_i - \bar{o}| + |o_i - \bar{o}|)^2} \right] \quad (5)$$

$$Nash = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (o_i - s_i)^2}{\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})^2} \right] \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (o_i - s_i)^2} \quad (7)$$

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})(s_i - \bar{s})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})^2 \sum_{i=1}^n (s_i - \bar{s})^2}} \right)^2 \quad (8)$$

เมื่อ

S = ค่าที่ได้จากแบบจำลอง (m^3/s)

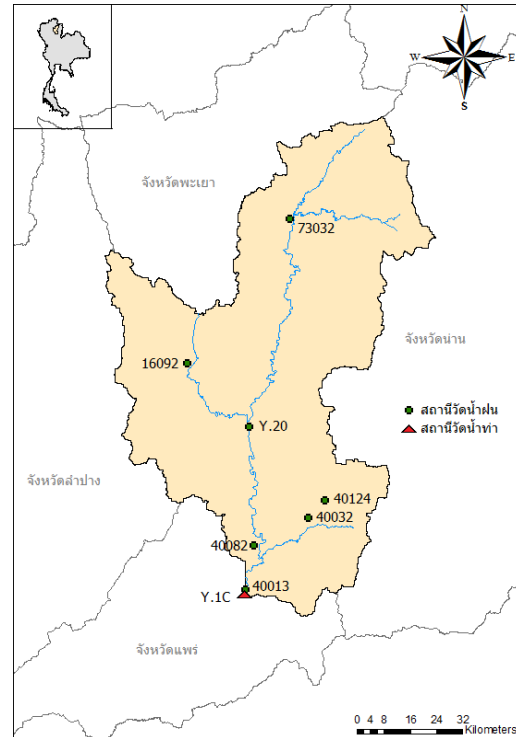
$\bar{S}$ = ค่าเฉลี่ยที่ได้จากแบบจำลอง (m^3/s)

O = ค่าที่ได้จากการตรวจวัด (m^3/s)

$\bar{O}$ = ค่าเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัด (m^3/s)

3. พื้นที่การศึกษา

ในการศึกษาครั้งนี้ จะทำการศึกษาในพื้นที่ลุ่มน้ำยมตอนบนซึ่งอยู่ในภาคเหนือของประเทศไทยโดยมีพื้นที่ลุ่มน้ำครอบคลุมพื้นที่ 4 จังหวัดได้แก่ จังหวัดพะเยา, น่าน, ลำปาง และแพร่ มีต้นกำเนิดเริ่มต้นจากดอยขุนยวม ซึ่งตั้งอยู่ในทิวเขาผีปันน้ำพื้นที่อำเภอปงและอำเภอเชียงม่วน จังหวัดพะเยา ไหลผ่านหุบเขาที่มีความลาดชันสูง ประกอบกับมีบางช่วงของพื้นที่เป็นที่ราบแคบก่อนที่จะไหลเข้าสู่จังหวัดแพร่ ผ่านไปยังอำเภอสองแคว เป็นการสิ้นสุดขอบเขตของพื้นที่ช่วงตอนบนของลุ่มน้ำ มีพื้นที่รับน้ำประมาณ 7,434 ตารางกิโลเมตร โดยมีสถานีวัดน้ำฝนรายวันทั้งหมด 7 สถานีได้แก่ 16092, 40013, 40032, 40082, 40124, 73032 และ Y.20 และใช้ข้อมูลอัตราการไหลรายวันจากสถานีวัดน้ำท่า 1 สถานีคือสถานี Y.1C ซึ่งรูปพื้นที่การศึกษาและตำแหน่งสถานีจะแสดงอยู่ในรูปที่ 2



รูปที่ 2 พื้นที่ลุ่มน้ำยมตอนบนและตำแหน่งสถานีน้ำฝนและน้ำท่า

4. รูปภาพ ตาราง และสมการ

ในขั้นตอนการประยุกต์ โดยการใช้ข้อมูลที่จะนำมาเปรียบเทียบต้องเลือกปีที่ไม่ใกล้เคียงกันเพื่อไม่ให้ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของการใช้ที่ดิน ซึ่งได้ใช้ข้อมูลในปี พ.ศ. 2548 ในการเปรียบเทียบแบบจำลอง โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ พร้อมกับใช้ Solver และตั้งค่าของฟังก์ชันต่างๆ เพื่อให้การปรับค่าพารามิเตอร์นั้นมีเป้าหมายในการปรับค่าพารามิเตอร์ และใช้ข้อมูลปี พ.ศ. 2549 ในการตรวจสอบ

4.1. ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function)

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการศึกษานี้จะกำหนดให้ค่าต่างๆ ทั้งหมด 4 ตัวได้แก่ค่า IA , $Nash$, R^2 และ $RMSE$ โดยค่า IA , $Nash$ และ R^2 ให้ค่าเหมาะสมที่สุดคือมีค่าเท่ากับ 1 ดังนั้นต้องกำหนดฟังก์ชันเป็นแบบการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่สูงสุดแต่ค่า $RMSE$ ค่าเหมาะสมที่สุดคือมีค่าเท่ากับ 0 ดังนั้นต้องกำหนดฟังก์ชันเป็นแบบการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่ต่ำที่สุด

4.2 ฟังก์ชันควบคุม (Constrain function)

ฟังก์ชันควบคุมจะกำหนดค่าสูงสุดหรือต่ำสุดของพารามิเตอร์ที่จะทำการเปลี่ยนค่าดังสมการที่ 9-11

$$a(x) \begin{cases} \geq 0, (x=1,2,3,4) \\ \leq 1, (x=1) \\ \leq 0.8, (x \neq 1) \end{cases} \quad (9)$$

$$i(x) \begin{cases} \geq 0.01, (x=1) \\ \geq 0.001, (x \neq 1) \\ \leq 1, (x=1,2,3,4) \end{cases} \quad (10)$$

$$z(x) \geq 0 \quad (11)$$

4.3 ค่าในสภาพเริ่มต้น (Initial Condition)

ในขั้นตอนนี้อาจกำหนดค่าในสภาพเริ่มต้นของการคำนวณคือค่าความสูงของน้ำในถังแต่ละถัง โดยสามารถหาได้จากการคำนวณด้วยโมเดลของปีก่อนหน้านำมาใช้เป็นค่าเริ่มต้นของปีที่ทำการคำนวณซึ่งค่าต่างๆจะแสดงอยู่ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าคงที่ของพารามิเตอร์ในสภาพเริ่มต้น

พารามิเตอร์	ค่าคงที่ในสภาพเริ่มต้นของปีพ.ศ. 2548 (mm)	ค่าคงที่ในสภาพเริ่มต้นของปีพ.ศ. 2549 (mm)
h_1	5	5
h_2	9	0
h_3	14	15
h_4	0	0

5. ผลการศึกษา

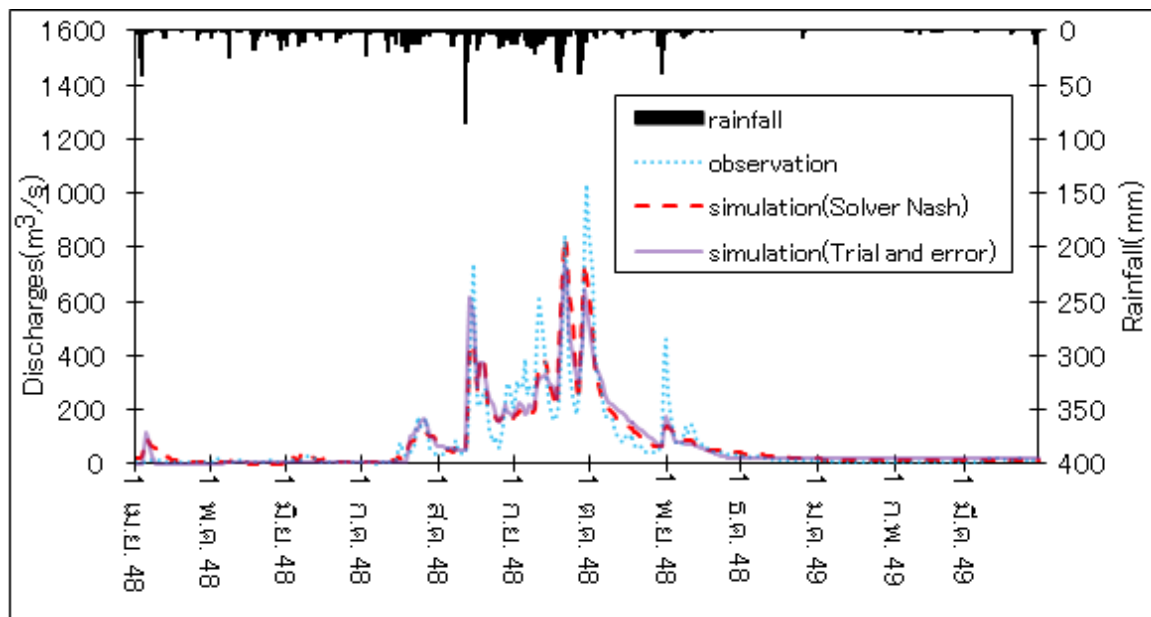
ผลการคำนวณโดยแบบจำลองแท็งค์โดยใช้ข้อมูลลุ่มน้ำยมตอนบนในการเปรียบเทียบปี พ.ศ. 2548 และ การตรวจสอบแบบจำลองโดยใช้ข้อมูลปี พ.ศ. 2549 โดยใช้ Microsoft Excel Solver ในการปรับค่าพารามิเตอร์แบบอัตโนมัติโดยกำหนดให้ค่า Nash เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์และนำมาเปรียบเทียบกับการใช้วิธีการหาค่าพารามิเตอร์โดยใช้การพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ Nash

ซึ่งผลของค่า Nash แสดงในตารางที่ 2 และรูปที่ 3 และ 4 พบว่าผลที่ได้จากการใช้ Microsoft Excel Solver จะให้ผลที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดทั้งช่วงน้ำแล้งและน้ำหลากเนื่องจากการหาค่าพารามิเตอร์นั้นจะใช้วิธีการปรับค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีลองผิดลองถูกและได้ค่า Nash ที่ดีที่สุด แต่การใช้ Microsoft Excel Solver จะเป็นการปรับค่าพารามิเตอร์ให้มีค่าเหมาะสมแบบอัตโนมัติโดยค่า Nash ที่ได้จะเป็นค่าที่ดีที่สุด

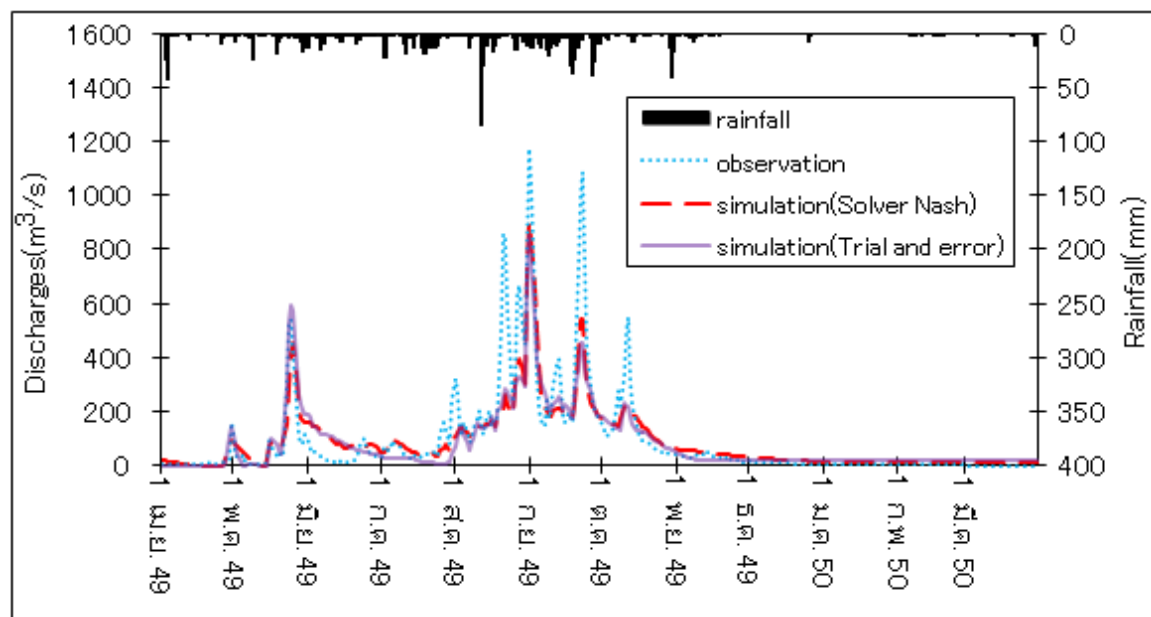
ตารางที่ 2 ค่า Nash ของการปรับพารามิเตอร์

วิธีการ	Nash	
	การปรับเทียบปี พ.ศ. 2548	การตรวจสอบปี พ.ศ. 2549
หาค่าพารามิเตอร์(Trial and error)	0.807	0.718
Microsoft Excel Solver โดยใช้ Nash เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์	0.840	0.747

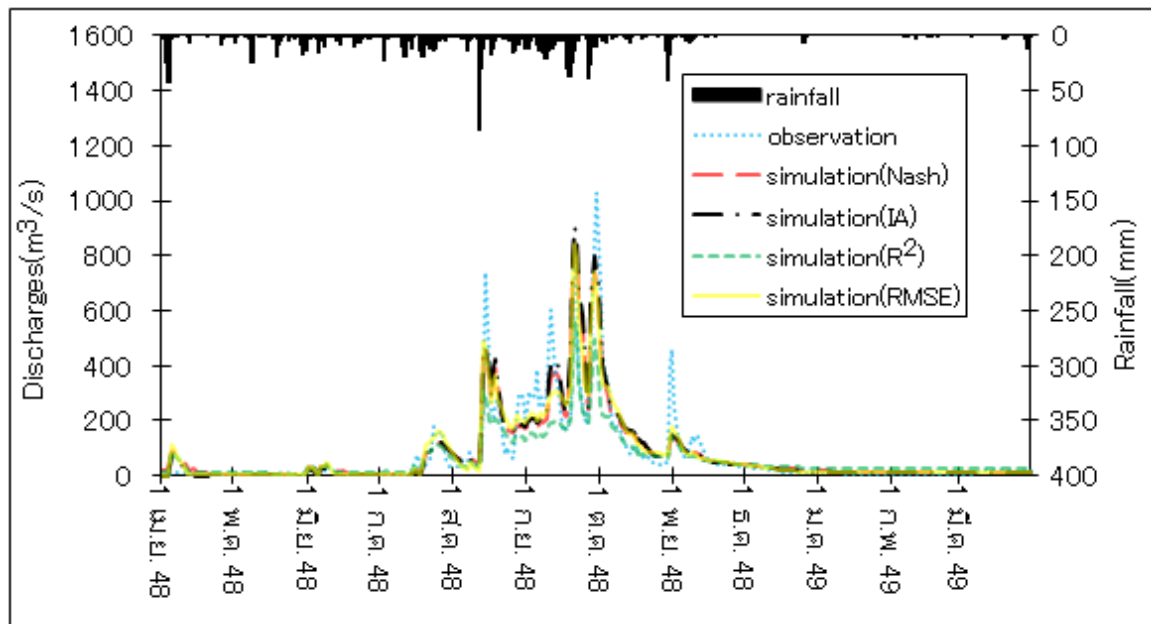
จากการเปรียบเทียบแบบจำลองแท็งค์ด้วยข้อมูลอัตราการไหลในปี พ.ศ. 2548 โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ครั้ง 1 ตัว คือ IA , $Nash$, R^2 และ $RMSE$ จะทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ IA , $Nash$, R^2 และ $RMSE$ ดังแสดงในตารางที่ 3 และรูปที่ 5 เมื่อตรวจสอบค่าแบบจำลองโดยใช้ข้อมูลอัตราการไหลในปี พ.ศ. 2549 โดยกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ IA , $Nash$, R^2 และ $RMSE$ ให้มีค่าสูงสุดจะทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ IA , $Nash$, R^2 และ $RMSE$ ดังแสดงในตารางที่ 4 โดยพบว่าการกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุดเป็น IA จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจทั้ง 4 ตัวดีที่สุด นอกจากนี้กราฟรูปที่ 6 และ รูปที่ 7 พบว่าการกำหนดฟังก์ชันเป้าหมายสูงสุดเป็น IA จะได้ค่าอัตราการไหลสะสมที่ดีที่สุดและอัตราการไหลในช่วงน้ำหลากดีกว่าค่าอื่นๆ ส่วนในช่วงน้ำแล้งการกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้ง 4 ตัวให้ค่าไม่แตกต่างกันแต่ค่า R^2 ให้ค่าที่สูงกว่าค่าอื่นๆ เล็กน้อย



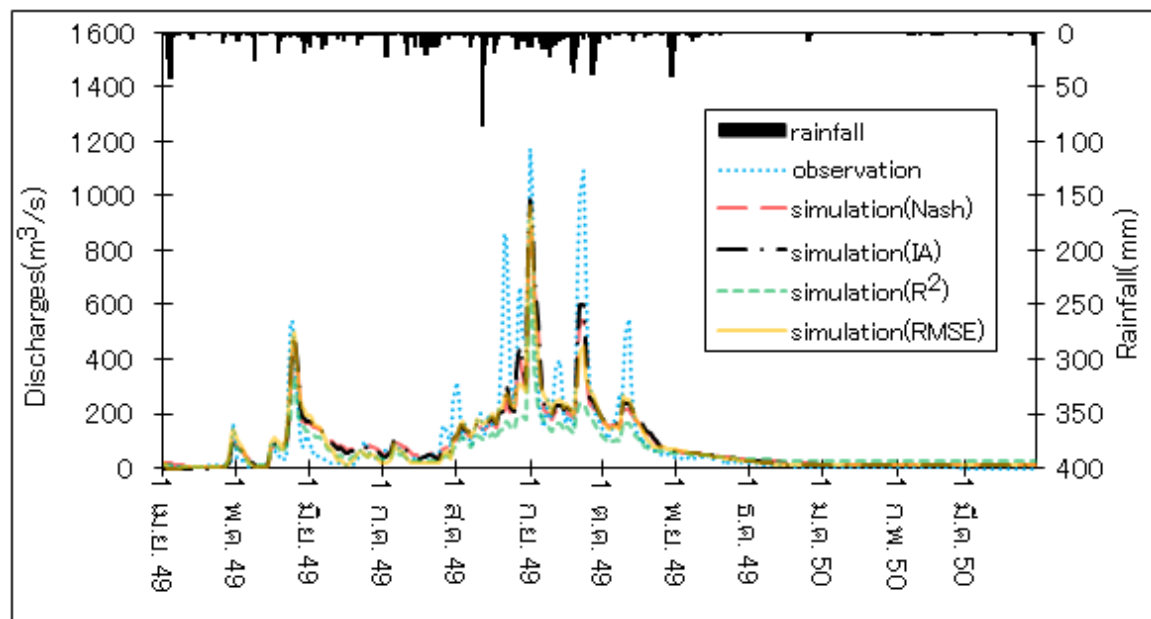
รูปที่ 3 ผลการคำนวณอัตราการไหลจากแบบจำลอง tank ที่สถานี Y.1C ปี พ.ศ. 2548-2549 ซึ่งปรับค่าพารามิเตอร์โดยวิธีสุ่มค่าและMicrosoft Excel Solver



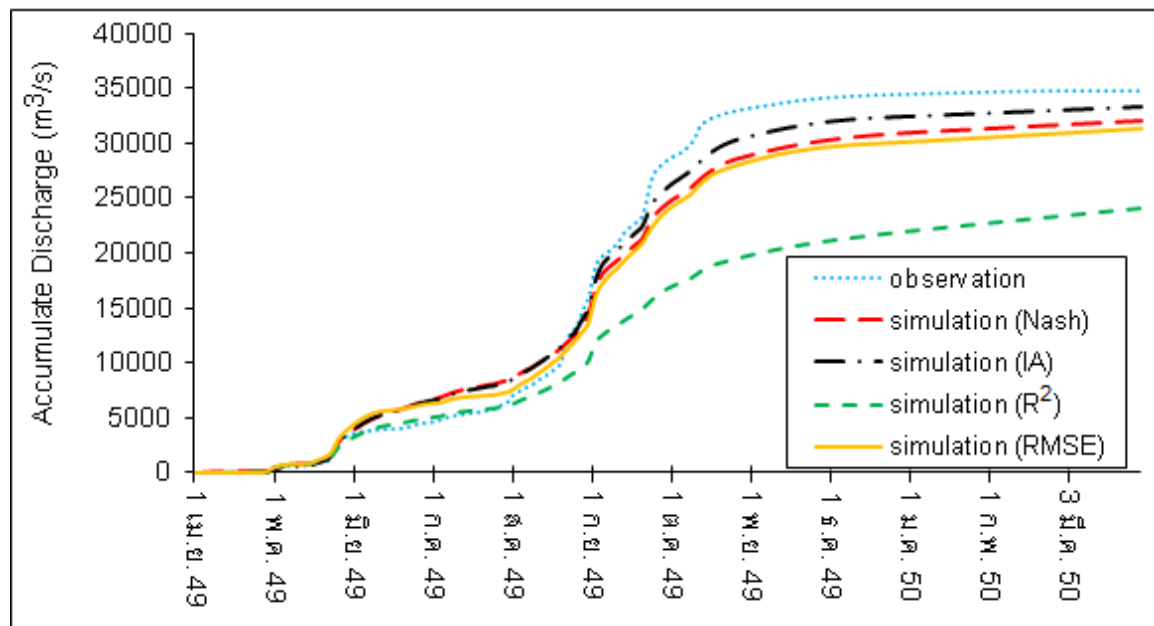
รูปที่ 4 ผลการคำนวณอัตราการไหลจากแบบจำลอง tank ที่สถานี Y.1C ปี พ.ศ. 2549-2550 ซึ่งปรับค่าพารามิเตอร์โดยวิธีสุ่มค่าและMicrosoft Excel Solver



รูปที่ 5 ผลการคำนวณอัตราการไหลจากแบบจำลอง tank ที่สถานี Y.1C ปี พ.ศ. 2548-2549 ปรับค่าพารามิเตอร์ โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต่างๆ



รูปที่ 6 ผลการคำนวณอัตราการไหลจากแบบจำลอง tank ที่สถานี Y.1C ปี พ.ศ. 2549-2550 ปรับค่าพารามิเตอร์ โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต่างๆ



รูปที่ 7 อัตราการไหลสะสมจากแบบจำลอง tank ที่สถานี Y.1C ปี พ.ศ. 2549-2550 ซึ่งปรับค่าพารามิเตอร์โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต่างๆ

ตารางที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์ตัดสินใจตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการเปรียบเทียบ

ค่าสัมประสิทธิ์ตัดสินใจ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์	IA	Nash	R^2	RMSE (m³/s)
IA	0.956	0.811	0.821	64.210
Nash	0.963	0.840	0.837	59.689
R^2	0.868	0.695	0.843	81.516
RMSE	0.963	0.838	0.838	59.461

ตารางที่ 4 ค่าสัมประสิทธิ์ตัดสินใจตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการตรวจสอบ

ค่าสัมประสิทธิ์ตัดสินใจ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์	IA	Nash	R^2	RMSE (m³/s)
IA	0.937	0.807	0.825	78.373
Nash	0.905	0.747	0.799	89.707
R^2	0.753	0.522	0.743	123.38
RMSE	0.901	0.734	0.773	92.065

5. สรุป

การปรับค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองแท็งค์สามารถทำได้โดยการสุ่มค่าพารามิเตอร์ซึ่งเป็นการหาพารามิเตอร์ที่เข้าใจได้ง่ายแต่เนื่องจากพารามิเตอร์ของแบบจำลองแท็งค์นั้นมีจำนวนมากทำให้ต้องหาวิธีการใหม่ๆ เพื่อช่วยในการคำนวณโดยในการศึกษานี้ได้ทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณจากวิธีการใช้ Solver กับวิธีการสุ่มค่าพารามิเตอร์ ซึ่งผลที่ได้คือการใช้ Solver ได้ผลการคำนวณที่ใกล้เคียงกับค่าจากการตรวจวัดมากกว่า ซึ่ง Solver เป็นเครื่องมือที่มีอยู่ใน Microsoft Excel จึงสามารถทำให้ง่ายต่อการนำมาใช้งาน และใช้เวลารวดเร็วในการหาค่าที่เหมาะสม ดังนั้นการใช้งาน Solver จึงเหมาะกับการนำมาวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองแท็งค์ที่สร้างโดยโปรแกรม Microsoft Excel นอกจากนั้นยังพบว่า การกำหนดค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นค่าสัมประสิทธิ์ $1/A$ จะได้ค่าอัตราการไหลและอัตราการไหลสะสมที่ใกล้เคียงกับค่าจากการตรวจวัดมากที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำและการเกษตร(องค์การมหาชน) สำหรับการสนับสนุนทุนในการศึกษาวิจัย และกรมชลประทานสำหรับการอนุเคราะห์ข้อมูล ปริมาณน้ำฝนและอัตราการไหล ซึ่งคณะผู้วิจัยต้องขอขอบคุณอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] สนิท วงษา, “การพยากรณ์และเตือนภัยโดยใช้ข้อมูลรายวัน : กรณีศึกษาลุ่มน้ำปิงตอนบนจังหวัดเชียงใหม่,” วารสารวิจัยและพัฒนา มจร., ฉบับที่ 30(2), หน้า 315-327, 2007.
- [2] J. Nash and J. Sutcliffe, "River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles", Journal of Hydrology, vol. 10, no. 3, pp. 282-290, 1970.

- [3] M. Sugawara, "Automatic calibration of the tank model / L'étalonnage automatique d'un modèle à cisterne", Hydrological Sciences Bulletin, vol. 24, no. 3, pp. 375-388, 1979.
- [4] Y. Yokoo, S. Kazama, M. Sawamoto and H. Nishimura, "Regionalization of lumped water balance model parameters based on multiple regression", Journal of Hydrology, vol. 246, no. 1-4, pp. 209-222, 2001.

The GUI-MATLAB based Simulation Program for Principle of Communication System Course

Pinit Nuangpirom^{1*} Kanokwan Ruangsiri² and Somsak Akatimagool³

¹ Faculty of Engineer, Rajamangala University of Technology Lanna, Chiang Mai, Thailand

² Faculty of Industrial Technology, Chitralada Technology College, Bangkok, Thailand

³ Faculty of Technical Education, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand

*Corresponding author: hs5qab@hotmail.com

ABSTRACT

This article aims to develop a simulation program using GUI-MATLAB in telecommunication engineering course. The instruments used in this research are the GUI-MATLAB based simulation program for signal processing subject including 1) basic signal, 2) modulation signal, and 3) voice signal. The sample group consists of 30 students who registered in the Principle of Communication System course at Rajamangala University of Technology Lanna. The research results are as follows; 1) the result of evaluation of developed GUI-MATLAB simulation program assessed by 5 experts, shows that the quality of the simulation program is more appropriate, 2) the efficiency of the GUI-MATLAB simulation program is consistent with the standard criteria of Meguigans's formula (equaled to 1.10), and 3) the students' satisfaction is at high level (mean = 4.45, S.D. = 0.33). Therefore, the developed simulation program can be applied and developed in the teaching of telecommunication engineering and related as well.

Keyword: GUI MATLAB Software, Simulation Program, Signal Processing Subject.

1. Introduction

In the 21st century skills consortium (AT21CS), the teaching and assessment of knowledge, attitudes and organization skills are divided into four categories as following; ways of thinking, ways of working, tools for working, and living in the world. Most highlight similar types of complex thinking, learning, and communication skills, and all demand learning through teaching and learning more than rote skills. These

capabilities are also more commonly referred to as higher-order thinking skills, deeper learning outcomes, and complex thinking and communication skills [1]. The STEM education purposes to provide students to be professional which integrates four subjects: Science, Technology, Engineering and Mathematics. This is done by taking the nature of instruction as well as different teaching disciplines to come together seamlessly, which can provide students to get

knowledge of all fields. For several years, this has been used to solve the educational research and there has been recent development [2], in telecommunication engineering. The various developed instructional tools were utilized in teaching, in order to design and to construct electronic circuits. However, typically, in an experiment set, an oscilloscope, and signal generator were not enough and incurred high costs. [3], [4], [5]. This problem issues have been found in many universities that lack integration of modern instructional media [6], [7]. Thus, the STEM education promotes development of important and necessary skills for the globalization of the 21st century [8]. The educational simulation development is necessary to use in engineering education [9], [10] such as, IE3D, Sonnet Lite, Computer Simulation Technology (CST), Pspice, and etc. Moreover, it can be found that most researchers have applied the GUI-MATLAB for the simulation program in electrical engineering course such as a GUI-MATLAB program for learning controller design in the frequency domain [11], GUI-MATLAB based simulation platform design of flexible satellite attitude control and vibration suppression [12] and implementation of a GUI-MATLAB function to visualize electromagnetic fields [13].

The contents of the subject matter can be intricate and difficult, which leads to the inefficiency of learning by students. The applications of knowledge to real life situations are emphasized by the STEM education concept in higher education. In this paper, the GUI-MATLAB based simulation program is implemented in the

teaching of signal processing subject in Principle of Communication System course.

2. Theory

Considering an arbitrary signal $f(t)$ of finite energy, which is specified for all time (t), a segment of the signal $f(t)$, shown in Fig.1(a), postulates that we sample the signal $f(t)$ instantaneously and at a uniform rate, once every T_s seconds. Consequently, we obtain an infinite sequence of samples spaced T_s seconds apart and denoted by $\{f(nT_s)\}$, where n takes on all possible integer values, both positive and negative. We refer to T_s as the sampling period or sampling interval and to its reciprocal $f_s=1/T_s$ as the sampling rate. This ideal form of sampling is called instantaneous sampling.

Let $f_\delta(t)$ denote the signal obtained by weighting individually the elements of a periodic sequence of Dirac delta functions spaced T_s seconds apart by the sequence of numbers $\{f(nT_s)\}$, as shown by [10].

$$f_\delta(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f(nT_s) \delta(t - nT_s) \quad (1)$$

We refer to $f_\delta(t)$ as the instantaneously sampled signal. The term $\delta(t - nT_s)$ represents a delta function positioned at time $t = nT_s$. A delta function weighted is closely approximated by a rectangular pulse of duration Δt and amplitude $f(nT_s) / \Delta t$; the smaller, we make Δt , the better the approximation will be used.

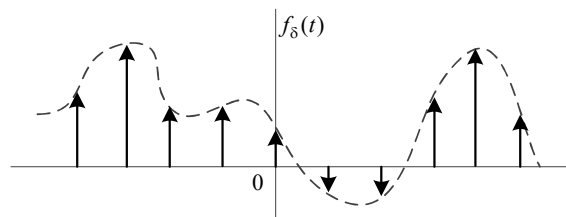
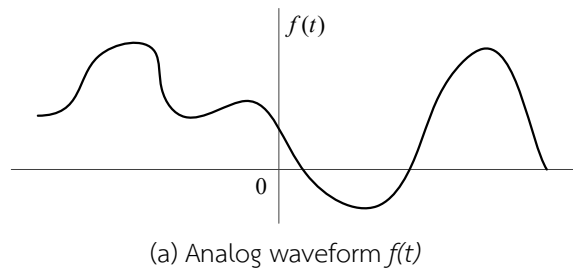


Fig. 1 Illustration of the sampling process.

The waveform of a PAM signal is illustrated in Fig.2. The dashed curve in this figure depicts the waveform of the message signal $m(t)$, and the sequence of amplitude-modulated rectangular pulses shown as solid lines represents the corresponding PAM signal $s(t)$.

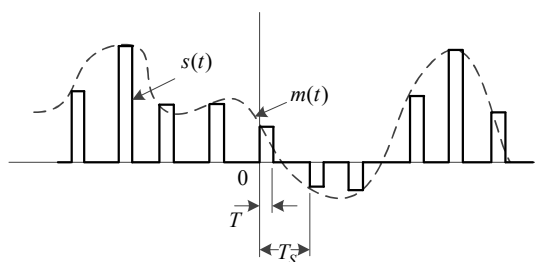


Fig.2 Flat-top sampling of message signal.

Amplitude quantization is defined as the process of transforming the sample amplitude $m(nT_s)$ of a baseband signal $m(t)$ at time $t = nT_s$ into a discrete amplitude $v(nT_s)$ taken from a finite set of possible levels. We confine attention to a quantization process that is memory less and instantaneous, which means that the

transformation at time $t = nT_s$ is not affected by earlier or later samples of the message signal. This form of quantization, though not optimal, is commonly used in practice because of its simplicity.

Quantizes can be a uniform or non-uniform type. In a uniform quantize, the representation levels are uniformly spaced; otherwise, the quantize is non-uniform. The quantization considered in this section are of the uniform variety. The quantized characteristic can also be a midrise type. Fig. 3 shows the corresponding input-output characteristic of a uniform quantize of the midrise type, in which the origin lies in the middle of a rising part of the staircase like graph.

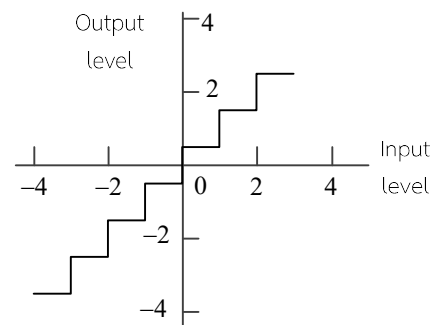


Fig.3 Signal quantization

3. GUI-MATLAB Based Simulation Design

GUI-MATLAB software means that the graphical user interfaces contain windows, cursors, buttons, menu, text and other objects. Using GUI function optimizes performance, by providing a visual for the user, it reduces the need of unnecessary thinking.

The process of designing a GUI function for voice signal processing is applied to the study of Principle of Communication System, as shown in Fig. 4. The GUI-MATLAB based simulation program

consists of 3 parts: 1) signal plot simulation, 2) signal modulation, and 3) voice signal processing. We can select the desired circuit type, afterwards, the initial calculating values are set up. The simulation program will calculate and process according to various signal types and will show the analyzed results.

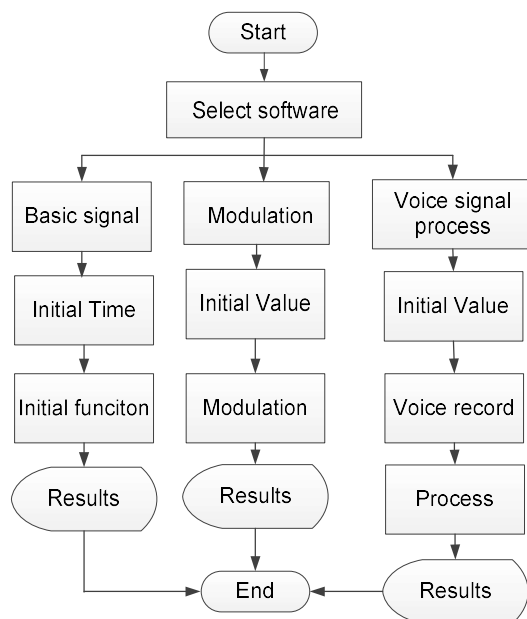


Fig. 4 Flow chart of GUI-MATLAB based simulation program

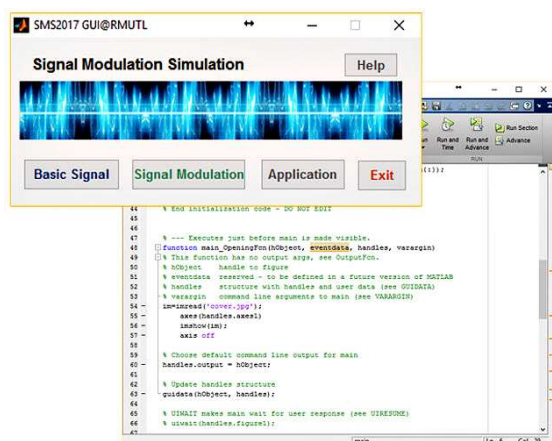


Fig.5 Example of signal processing software

The development of the simulation program makes use of the graphical user interface (GUI)

function of MATLAB software, as illustrated in Fig.5. The developed simulation program can simulate both analog and digital modulation systems, as a basic signal function, analog modulation, digital modulation and voice signals process.

4. Results

The research is carried out in 3 sections including 1) the developed simulation program, 2) the quality evaluation of simulation program by 5 experts, and 3) the students' satisfaction.

4.1 The result of developed simulation program

The developed simulation program can be analyzed within the basic signal time domain, as shown in Fig.6. In this topic, we illustrated an example for basic signal simulation as shown in equation (2).

$$f(t) = \sin(t) + \frac{\sin(3t)}{3} + \frac{\sin(5t)}{5} \quad (2)$$

In Eq. (2), we can state that the Fourier series of the square wave function simulated by the developed simulation program can be displayed and is consistent with signal theory. Moreover, The users can set up required equation parameters in a text box of $f(t)$ and these signal will appear, as illustrated in Fig.6.

Moreover, the developed simulation program can be analyzed in 8 modulating signals, including Amplitude Modulation (AM), Frequency Modulation (FM), Phase Modulation (PM), Amplitude-Shift Keying (ASK), Frequency-Shift Keying (FSK), Phase-Shift Keying (PSK), Pulse Width Modulation (PWM) and Pulse Amplitude Modulation (PAM). The example of frequency

modulation is shown in Fig. 7. The diagram of frequency modulation defines the peak amplitude of message signal that equals 5 V, and the frequency of message signal that is at 25 Hz. For the carrier signal, we set the peak amplitude equal to 1 V and frequency at 400 Hz. The results of simulation tool are shown in Fig. 8.

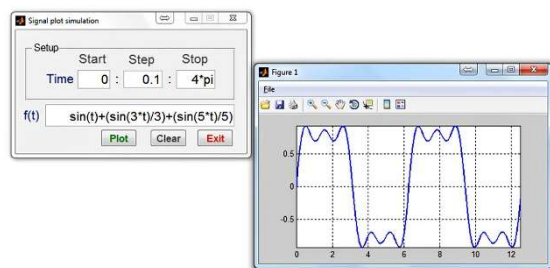


Fig.6 Example of basic signal simulation

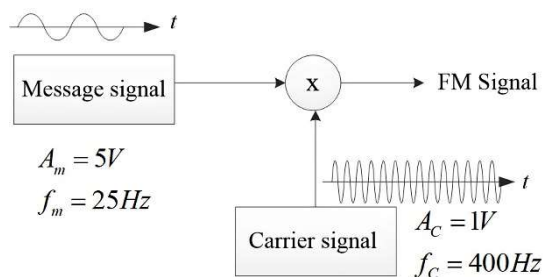


Fig 7. Diagram of amplitude modulation

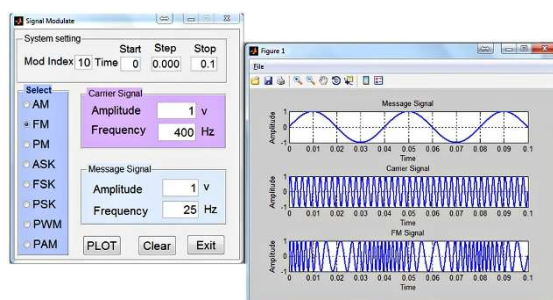


Fig. 8. The FM simulation using developed simulation program

Fig. 8 presents the results of the frequency modulation. We can observe that the frequency

of carrier signal is varied depending on the message signal. The result is therefore analyzed as consistent with the properties of frequency modulation. For simulation of voice signal processing, the voice signals are recorded by using the sound card on a personal computer (PC) and WINDOWS operating system. The microphone is connected to the voice input on PC, and the voice signal is saved on the recorder, as shown in Fig.9.

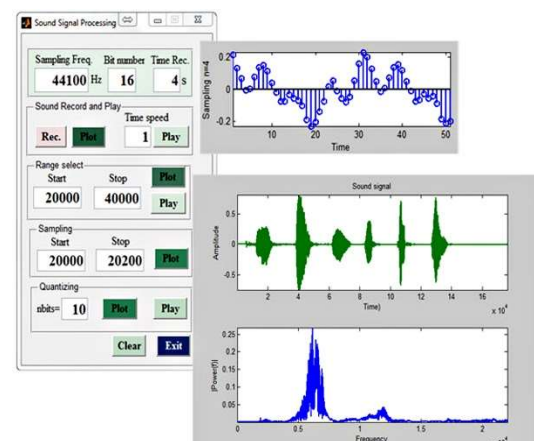


Fig.9 Windows of voice signal processing

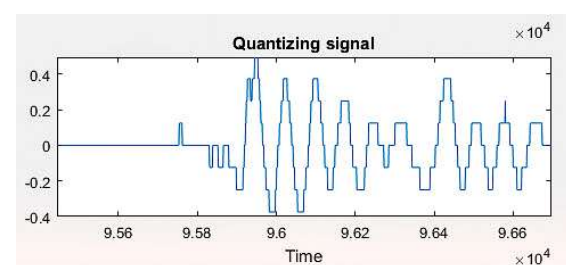


Fig.10 The example of quantize characteristic

Fig. 9 shows an example of audio signals in time domain and frequency domain. Moreover, the program can also reveal the appearance of quantize according to the theory [10], as shown in Figure 10.

4.2 The quality evaluation of simulation program

The developed GUI-MATLAB based simulation program in the teaching of Principle of Communication System course was evaluated by 5 experts who hold a long experience in the teaching of electronic engineering or related fields. The findings shows that the quality of simulation program is highly appropriate (mean value equals 4.48, and S.D. equals 0.52), as shown in table 1.

The developed GUI- MATLAB based simulation program was implemented by using a sampling group of 30 students who registered in the Principle of Communication System course in academic year 2/2016 at Rajamangala University of Technology Lanna.

TABLE I The results of the quality of simulation program

Evaluated topics	$\bar{X}$	S.D.
1. Appropriation of simulation program	4.60	0.89
2. Accurately simulation program	4.80	0.45
3. Easy to use	3.40	0.55
4. Appropriation of content and design	4.20	0.84
5. Encourage student to understand knowledge	4.40	0.89
Total	4.48	0.52

The validation of the efficiency of simulation program can be found in the pre-test and the post-test score percentage that are equal to 49.40

and 86.46 respectively. The efficiency of the GUI-MATLAB simulation program is conformed to the standard criteria of Meguigans's formula (1.10), as shown in Table II.

TABLE II The efficiency of simulation program

Test	Average (out of 80)	Percent
Pre – test	39.52	49.40
Post – test	69.17	86.46
Efficiency	1.10	

4.3 The students' satisfaction

The developed GUI-MATLAB based simulation program was experimented by 30 students, as shown in Fig.11. The sample group was taught by using the developed simulation program. After learning all lessons, we evaluated students' satisfaction using a 5 rating scale of questionnaire. The findings after learning and teaching using the developed simulation program can be stipulated that the students are able to gain more knowledge and understand the contents more clearly. The students' satisfaction is in high level (mean value equals 4.45 and S.D. equals 0.33), as shown in table 3.



Fig. 11 The experiment in a classroom

TABLE III The students' satisfaction of simulation program

Evaluated topics	$\bar{X}$	S.D.
1. Appropriation for students	4.46	0.37
2. Accurate results	4.40	0.52
3. Easy to use	4.41	0.38
4. Appropriation for content and purpose	4.55	0.35
5. Encourage students to learn	4.51	0.32
Total	4.45	0.33

5. Conclusion

This research presents the development of the GUI-MATLAB based simulation program in the teaching of telecommunication engineering. The developed simulation program is able to analyze and simulate correctly various signals used in communication systems and is consistent with the signal theory.

Considering the research results, it can be seen that instructional media development for engineering education based on 21st century and STEM education [14], [15], [16] will encourage students to acquire complex knowledge, practical and creative thinking skills and a positive attitude towards learning. Moreover, the students' learning achievement will increase more significantly.

6. Acknowledgement

This research was funded by Rajamangala University of Technology Lanna, contract no. 59LHRENCM206.

7. References

- [1] K. Wanwisa, K. Wittarit and S. Akatimagool, "Study of Learning and Teaching Problem

Issues of Antenna Engineering in Bachelor Curriculum of Rajamangala University of Technology," in National Conference on Technical Education (NCTechED2016) , Bangsue, BKK, 2016, pp.87-91.

- [2] B. M. Jonathan, S. Harkness, C. Johnson and C. M. Koehler, "What is STEM a Discussion about Conceptions of STEM in Education and Shelly Sheats Harkness Partnerships. School Science and Mathematics," School Science and Mathematics, vol. 112, no.1, pp.3-11, 2012.
- [3] P. Fenglin and J. Xuping, "A Novel Education System Requirements Engineering Methodology," in International Symposium on IT in Medicine and Education (ITME) , Cuangzhou, 2011, pp.428-430.
- [4] K. Klinbumrung, R. Jinawong and S. Akatimagool, " Study of Teaching and Learning Conditions and Development Guidelines in High Frequency Electronic Circuit Analysis Subject of High Vocational Certificate level: Upper Central Provinces I Case," in National Conference on Technical Education (NcTechEd2014) , Bangsue, BKK, 2014, pp.133-138.
- [5] T. Somsak, K. Parichart and S. Jirarote, " An Evaluation of Learning and Teaching Management Issues of Department of Electronics and Telecommunication Technical Education Rajamangala University of Technology Isan KhonKaen Campus," in National Conference on Technical Education (NcTechEd2016), Bangsue, BKK, 2016, pp.97-102.

- [6] S. Khamkleang and S. Akatimagool, "Microwave Planar Circuit Design Tool in the Teaching of Microwave Engineering," in International Conference on Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Pattaya, CBI, 2009, pp.830-833.
- [7] A. Mekptyom, S. Tansriwong, S. Akatimagool. "The Conditions to Teaching and Learning in Telecommunication Engineering Case study: Digital Communication System Topic, Undergraduate Program," in The 4th National Conference on Technical Education, Bangsue, BKK, 2012, pp. 451-456.
- [8] K. Kanyawit, W. Warinee, U. Pichit and A.Somsak, "Development of REPEA Learning Model based on STEM-T Education," in The International STEM Education Conference, Pattaya, CBI, 2016, pp.123-126.
- [9] E. Ghaneie and X. Gong, "A Time-Domain/Frequency Domain Simulation Tool for Microwave Component Analysis in Microwave Engineering Courses," in Antennas and Propagation Society International Symposium, San Diego, CA, 2008, pp.1-4.
- [10] P.D. van der Puije, Telecommunication Circuit Design. Wiley-Interscience Press, 2002.
- [11] R. I. Mitchell, "A MATLAB GUI for learning controller design in the frequency domain," in International Conference on Control (UKACC), Loughborough, 2014, pp.1-4.
- [12] J. Tao and et al., "Matlab GUI-based simulation platform design of flexible satellite attitude control and vibration suppression," in International Conference on Control and Decision Conference (CCDC), Qingdao, 2015, pp.1-4.
- [13] A. Sinha, C. Mandal and S. K. Mandal, "Implementation of a GUI to visualize EM fields using MATLAB," in International Conference on Microelectronics, Computing and Communications (MicroCom), Durgapur, 2016, pp.1-4.
- [14] K.Linda. P.Greg and F. Michael, Engineering in K- 12 Education. The National Academies Press, 2009.
- [15] P. W. James and H. L. Margaret, Education for Life and Work: Developing Transferable Knowledge and Skills in the 21st Century. National Academy Press, 2012.
- [16] N. K. DeJarnette, "America's Children: Providing Early Exposure to STEM (Science, Technology, Engineering and Math) Initiatives. Education," Education Fall2012, vol. 133, no. 1, pp. 77-84, 2012.

**การศึกษาเปรียบเทียบกระบวนการฮิวริสติกส์ในการจัดการ
การขนส่งสำหรับโรงงานกรณีศึกษาโรงงานจำหน่ายอุปกรณ์ระบบงานไฟฟ้า
A Comparative Study Of Two Heuristic Procedures
For Managing Transportation
Of The Sample Electric Equipment Company**

นฤมล ไชยโคตร¹ กรปภากร อธิชยานันท์² รติรัตน์ กิตติปัญญาพัฒน์^{3*} สิริเดช ชาตินิยม⁴

^{1,2}บัณฑิตวิศวกรรมอุตสาหกรรม ³ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ⁴อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์ นครนายก 26120

Narumon Chaikotr¹ Ponphapakon Atichayanant² Ratirat Kittipanyapat^{3*} Siradej Chartniyom⁴

^{1,2} Graduated Engineering Student, ³ Assistant Professor, ⁴ Lecturer, Industrial Engineering Department
Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University, Ongkharak, Nakhonayok Province, 26120

*Corresponding author: Email: thmitmanee@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการจัดเส้นทางในการกระจายสินค้าของโรงงานอุปกรณ์ระบบไฟฟ้า ซึ่งมีคลังสินค้าแห่งเดียว ภายใต้ข้อจำกัดในเรื่องความสามารถในการบรรทุกสินค้าของยานพาหนะและรอบเวลาในการขนส่งต่อวัน การวิเคราะห์ปัญหาอาศัยข้อมูลจากผู้จัดการโลจิสติกส์และผู้อำนวยการงานในการจัดเส้นทางเดินรถของโรงงาน ผู้จัดทำได้พัฒนากระบวนการขั้นตอนฮิวริสติกส์สองชุดโดยปรับปรุงจากอัลกอริทึมวิธีการหาค่าตอบที่ใกล้เคียงที่สุด และอัลกอริทึมแบบประหยัด ผลการทดสอบกระบวนการขั้นตอนฮิวริสติกส์ พบว่าสามารถลดระยะทางรวมในการขนส่งสินค้าลงได้มาก และสามารถปฏิบัติงานภายใต้ข้อจำกัดของปัญหาจริงได้ดี เมื่อพิจารณาในมิติของค่าใช้จ่าย พบว่ากระบวนการทางฮิวริสติกส์ซึ่งปรับปรุงจากอัลกอริทึมแบบประหยัดให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด สามารถลดค่าใช้จ่ายลงถึง 18.6 % เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีปฏิบัติงานเดิม และกระบวนการทางฮิวริสติกส์ซึ่งปรับปรุงจากอัลกอริทึมเพื่อนบ้านที่ใกล้เคียงที่สุดสามารถลดค่าใช้จ่ายลงได้ 13.1% การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า การพัฒนากระบวนการขั้นตอนฮิวริสติกส์จะช่วยให้ผู้ประกอบการโลจิสติกส์ลดค่าใช้จ่ายในการกระจายสินค้าลงได้มาก

คำสำคัญ: การจัดเส้นทางขนส่ง กระบวนการขั้นตอนฮิวริสติกส์ อุตสาหกรรมอุปกรณ์ระบบไฟฟ้า

ABSTRACT

This research aims to study the vehicle routing problem for a single-warehouse system of the electronic manufacturer. The problem is bounded by vehicle capacity and delivery time-window constraints. Transportation data is collected from the logistic manager and routing experts. To tackle with the problem, we construct two modified heuristic procedures based on the traditional Nearest Neighborhood and Saving Algorithm methods. Our procedures reach the routing solutions that save

both distance and total costs. The Modified Saving Procedure produces best performance which saves 18.6% of the total cost comparing to the actual operation of the system. Comparatively, the Modified Nearest Neighborhood Procedure gives the reduction of 13.1% in the total cost. The study shows that the design of heuristic procedures could assist any logistic companies to increase transportation performance, as well as reduce their total cost.

Keyword: vehicle routing, modified heuristic procedure, electric equipment industries

1. บทนำ

ในปัจจุบันการขนส่งมีความสำคัญต่อธุรกิจเกือบทุกประเภท ธุรกิจต่างๆจะได้เปรียบทางการแข่งขันนั้น จะต้องบริการลูกค้าได้รวดเร็วกว่าคู่แข่ง และใช้ทรัพยากรที่มีอยู่ได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยอยู่ภายใต้ต้นทุนที่เหมาะสม จากสิ่งทีกล่าวนมาเป็นสาเหตุทำให้ธุรกิจต่างๆหันมาสนใจเกี่ยวกับการจัดการระบบให้มีคุณภาพโดยการวางแผนการจัดการโลจิสติกส์ให้ดี ดังนั้นปัจจุบันโลจิสติกส์จึงเข้ามามีบทบาทอย่างมากต่อกระบวนการทำงานในธุรกิจต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นการวางแผนระบบ การบริหารสินค้าคงคลัง และด้านการขนส่ง [1] ซึ่งในปัจจุบันพบว่าธุรกิจหลากหลายประเภทให้บริการเสริมโดยการขนส่งสินค้าเพื่อดึงดูดลูกค้าให้มาใช้บริการมากยิ่งขึ้น เจ้าของธุรกิจต้องรับภาระในเรื่องของต้นทุนด้านการขนส่งมากขึ้น ทำให้ตัวแปรต่างๆที่เป็นปัจจัยต่อการขนส่งสินค้า เช่น ระยะทาง การบรรทุกสินค้าให้เต็มคันรถ นั้นจะถูกนำมาวิเคราะห์ในการจัดเส้นทางเดินรถ

จากการศึกษาโรงงานกรณีศึกษาพบว่า ในปัจจุบันการจัดเส้นทางขนส่งยังไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร เนื่องมาจากกระบวนการขนส่งสินค้าจากคลังสินค้าไปยังลูกค้าตามจุดต่างๆนั้นจะอาศัยการตัดสินใจและประสบการณ์ของพนักงานขับรถที่ทำงานมาเป็นเวลานาน และรู้จักที่ตั้งของลูกค้าต่างๆ เป็นอย่างดีโดยมีการพิจารณาจากที่ตั้งของลูกค้าแต่ละรายที่อยู่ใกล้เคียงกันให้เป็นเส้นทางขนส่งเดียวกัน ซึ่งลูกค้าของทางโรงงานมีจำนวนมากในแต่ละวันและการสั่งซื้อของลูกค้าไม่แน่นอน ทำให้การจัดเส้นทางขนส่งแบบเดิมมีความเสี่ยงกับค่าใช้จ่ายในการขนส่งที่เกินความจำเป็น เนื่องจากการขนส่งแบบเดิมไม่มี

ข้อมูลอ้างอิงอย่างชัดเจนว่าเป็นการจัดเส้นทางขนส่งที่ดี ดังนั้นปัญหาการขนส่งจึงเป็นปัญหาสำคัญมาก การที่เราจัดเส้นทางเดินรถอย่างมีแบบแผนที่ดี จะทำให้เราสามารถลดจำนวนพาหนะ ลดระยะทางการขนส่งลงได้ และลดค่าใช้จ่ายในด้านน้ำมันเชื้อเพลิง รวมทั้งต้นทุนในการขนส่งอื่นๆอีกด้วย

ดังนั้นเพื่อให้การจัดการการขนส่งได้รับการพัฒนาได้อย่างเต็มรูปแบบ งานวิจัยนี้จึงศึกษาเปรียบเทียบเส้นทางเดินรถในปัจจุบันกับการจัดเส้นทางเดินรถแบบกระบวนการฮิวริสติกส์ โดยมีเป้าหมายในการลดระยะทางการขนส่งและเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พาหนะ

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการสืบค้นงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่ามีการประยุกต์ใช้อัลกอริทึมแบบประหยัดในหลายบทความ เพื่อเป้าหมายในการจัดเส้นทางขนส่งที่เหมาะสม และเพิ่มประสิทธิภาพในการขนส่ง [2]-[7] ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นความพยายามในการจัดเส้นทางเดินรถจากโรงงานหรือคลังสินค้าสู่ปลายทาง และสภาพพื้นฐานของปัญหาดังเดิมคือ มีการขนส่งสินค้าน้ำหนักไม่เต็มคัน และองค์กรเหล่านั้นมักใช้ประสบการณ์ของบุคลากรเป็นหลักในการตัดสินใจ และไม่สามารถมั่นใจได้ว่าการจัดการขนส่งนั้นจะสร้างประโยชน์ให้กับองค์กรได้ การประยุกต์ใช้อัลกอริทึมแบบประหยัดในบทความเหล่านั้นจึงกระทำเพื่อให้ได้เส้นทางที่สั้นที่สุดตามรูปแบบของอัลกอริทึมแบบประหยัดแต่อย่างไรก็ตาม อัลกอริทึมแบบประหยัดไม่สามารถครอบคลุมถึงสภาพการดำเนินงานจริงและเงื่อนไขอื่นๆ

ของระบบการขนส่งในตัวอย่างข้างต้น เช่น จำนวนรถ ชนิดและขนาดของรถที่แตกต่างกัน ระยะเวลาเดินทาง กรอบเวลาการเดินทางขนส่ง ทำให้ไม่สามารถมั่นใจได้ว่าอัลกอริทึมแบบประหยัดจะให้ผลซึ่งสามารถใช้ดำเนินงานได้จริง

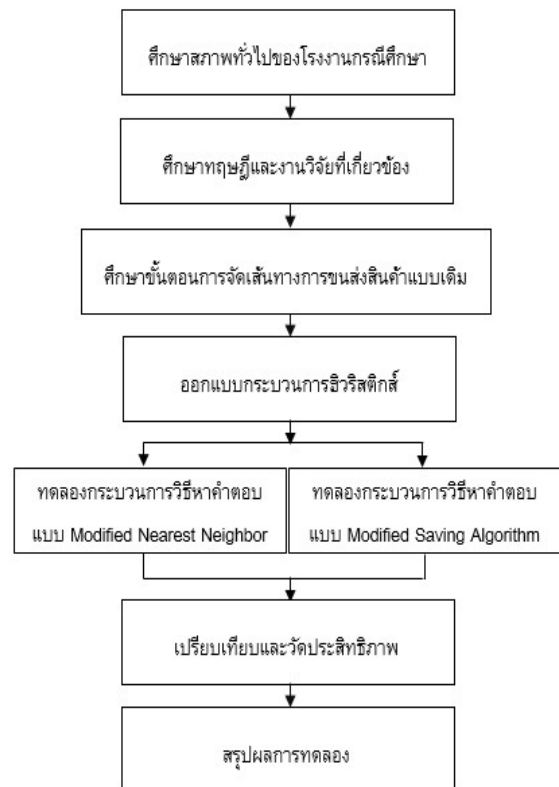
ด้วยเหตุผลข้างต้นจึงได้มีงานวิจัยต่อเนื่องซึ่งพยายามประยุกต์ใช้งานอัลกอริทึมแบบประหยัดร่วมกับวิธีการอื่นๆ หรือปรับปรุงอัลกอริทึมให้ดีขึ้น เช่น ใน [8] ได้มีการพัฒนาวิธีการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะที่มีคลังสินค้าหลายแห่ง โดยมีเป้าหมายเพื่อให้ระยะทางรวมของระบบน้อยที่สุด โดยวิธีเลือกจุดหมายที่ใกล้ที่สุดก่อน (Arbitrary Nearest Neighbor Algorithm) จากนั้นเส้นทางของพาหนะจะถูกสร้างขึ้นโดยใช้อัลกอริทึมแบบประหยัด และพัฒนาต่อมาโดยวิธีแทรกจุดที่ใกล้ที่สุด (Arbitrary Insertion) และใช้ อัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) ในขั้นตอนสุดท้ายเพื่อปรับปรุงผลเฉลยของระบบ และใน [9] ได้มีการทดลองปรับปรุงวิธีการใหม่จากอัลกอริทึมมาตรฐาน เพื่อการจัดเส้นทาง การเดินทางให้การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ซึ่งการเดินทางเป็นแบบลักษณะไปส่งเที่ยวเดียว มีการบรรทุกพัสดุที่ไม่เต็มคันรถหรือเต็มคันรถและการเลือกใช้ประเภทรถไม่เหมาะสม โดยนำวิธีฮิวริสติกส์มาตรฐานของวิธี Nearest Neighbor Heuristic (NNH) และวิธี Saving Algorithm (SA) มาพัฒนาต่อได้เป็น 6 แบบใหม่ ให้สามารถรองรับเงื่อนไขเพิ่มเติมของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้

ผลจากการสืบค้นงานวิจัยที่ผ่านมา ทำให้ผู้วิจัยมองเห็นโอกาสในการพัฒนาปรับปรุงอัลกอริทึมในรูปแบบใหม่ๆ เพื่อแก้ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งให้กับโรงงาน ตัวอย่าง และแนวทางจากการปรับปรุงวิธีการหาคำตอบยังสามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาระบบสำหรับองค์กรอื่นๆ ได้

3. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ในการพัฒนาวิธีการหาคำตอบสำหรับระบบปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย

ขั้นตอนที่สำคัญ คือ การศึกษาระบบการขนส่งและวิธีการดั้งเดิม การออกแบบกระบวนการฮิวริสติกส์ และการทดลองเปรียบเทียบวิธีการที่ได้ออกแบบไว้ ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยโดยละเอียด สามารถสรุปได้ตามรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

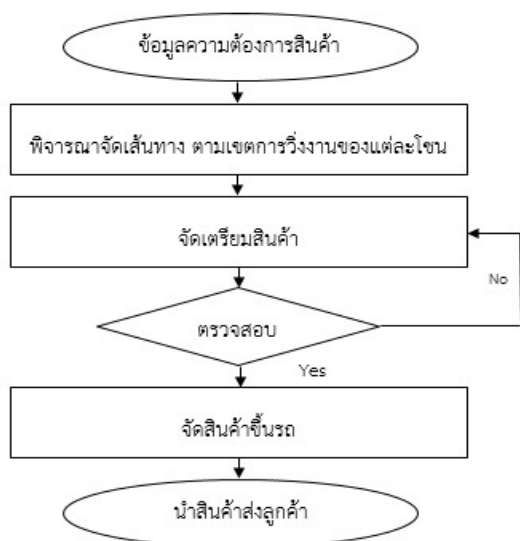
4. ระบบการจัดการขนส่งของโรงงานตัวอย่าง

4.1 ข้อมูลทั่วไปของโรงงาน

โรงงานกรณีศึกษาดำเนินธุรกิจหลัก 2 ประเภท ได้แก่ การเป็นตัวแทนจัดจำหน่ายและการให้บริการติดตั้ง โดยโรงงานได้รับการแต่งตั้งให้เป็นตัวแทนจัดจำหน่ายสายไฟฟ้า และอุปกรณ์อื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับระบบงานไฟฟ้ารวมถึงวัสดุและอุปกรณ์ป้องกันไฟลามจากผู้ผลิตตราสินค้าชั้นนำระดับสากลต่างๆ

4.2 กระบวนการทำงาน

กระบวนการของการจัดเส้นทางขนส่งของโรงงานตัวอย่าง แสดงดังรูปที่ 2 และตัวอย่างผลการจัดเส้นทางแสดงในตารางที่ 1 และรูปที่ 3



รูปที่ 2 กระบวนการทำงานในส่วนจัดเส้นทางขนส่งสินค้า

5. การออกแบบกระบวนการฮิวริสติกส์

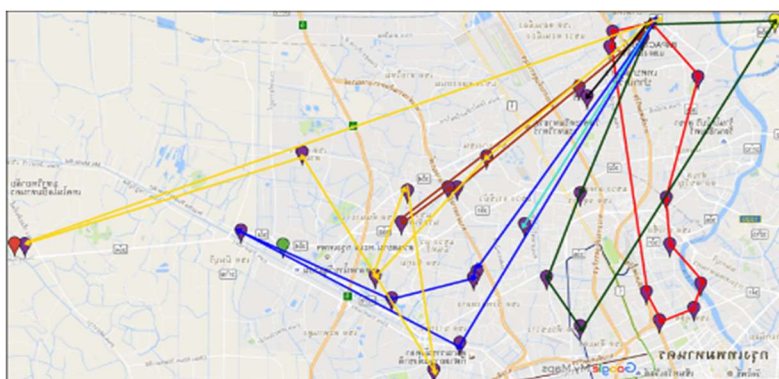
5.1 การปรับปรุงกระบวนการฮิวริสติกส์แบบ

Modified Nearest Neighbor

วิธีการหาคำตอบที่ใกล้เคียงที่สุด ได้ถูกนำเสนอใน [10] สำหรับการแบ่งกลุ่มหาเส้นทางที่ใช้หลักการพยายามวิ่งไปยังจุดที่ใกล้ที่สุด โดยปริมาณสินค้าไม่เกินความจุของรถ ทั้งนี้ความใกล้เคียงพิจารณาจากระยะทางหรือระยะเวลาในการเดินทางได้ตามความเหมาะสมวิธีการสร้างแบบจำลองนี้ เริ่มจากจุดเริ่มต้นของเส้นทางเป็นจุดที่ใกล้กับคลังสินค้ามากที่สุด จากนั้นค้นหาจุดที่ใกล้กับจุดสุดท้ายมากที่สุด เพิ่มจุดเข้าเส้นทาง และทำวนซ้ำจนจุดทุกจุดอยู่ในเส้นทาง ดังนั้นจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดสุดท้าย ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

ตารางที่ 1 การจัดเส้นทางเดินรถด้วยวิธีเดิมของโรงงานการศึกษา โซนบางซื่อ

ลำดับที่	เส้นทางเดินรถ	น้ำหนัก (กก.)	ระยะทาง (กม.)	เวลาในการขนส่งสินค้า (นาที)
1	F-A058-A060-A059-A032-F	764.6	68	174
2	F-A053-A054-A055-A056-A057-F	1,063.1	60	175
3	F-A048-A049-A050-A051-A052-F	1,353.9	93	230
4	F-A036-A033-A034-A035-A037-A038-F	1,357.3	147	335
5	F-A039-A040-A041-A042-A044-A045-A043-A046-A047-F	723.9	61	337
6	F-A062-F	525.1	42	85
7	F-A061-F	770.5	20	49
รวม		6,557.9	491	1,385



รูปที่ 3 เส้นทางเดินรถวิธีเดิมของโรงงานการศึกษา โซนบางซื่อ

- 1) สร้างเมตริกซ์ระยะทางจาก i ไป j
- 2) เริ่มจากจุดเริ่มต้นที่คลังสินค้าหรือโรงงาน
กรณีศึกษาโดยเริ่มมีเวลาเดินทางเท่ากับศูนย์ทุกเส้นทาง
- 3) เลือกเส้นทางที่มีระยะทางสั้นที่สุด
- 4) เลือกจุดใกล้กับจุดปลายทางใน ขั้นตอนที่ 2 ไป
ยังจุดที่ใกล้ที่สุด
- 5) รวมระยะการเดินทางเป็นระยะการเดินทาง
รวมของเส้นทางนั้น
- 6) ทำตามขั้นตอนที่ 2 ถึง 4 จนกระทั่งเลือกครบ
ทุกจุด เลือกเส้นทางที่มีค่าต่ำสุด

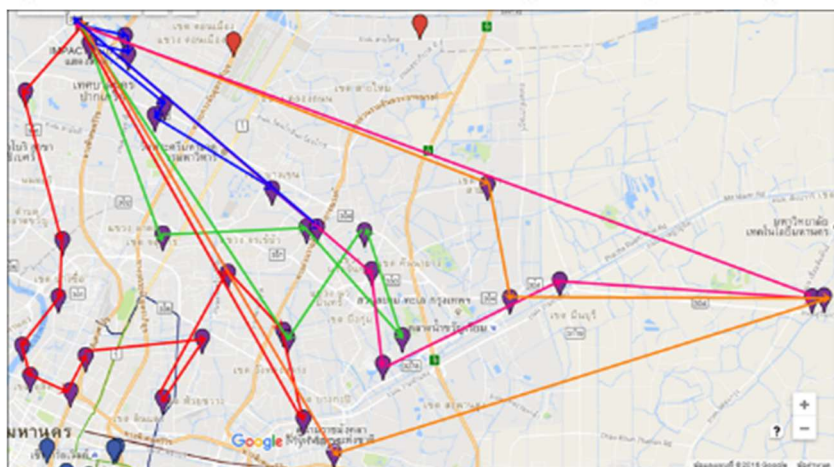
- 7) ถ้าระยะทางไม่เหมาะสมกันให้ทำการหา
เส้นทางใหม่

5.2 การปรับปรุงกระบวนการฮิวริสติกส์แบบ Modified Saving Algorithm

อัลกอริทึมแบบประหยัดถูกนำเสนอครั้งแรกโดย
นักวิจัยในประเทศอังกฤษ ในปี ค.ศ. 1964 พิจารณาการจัด
เส้นทางยานพาหนะที่เหมาะสมจากระยะทางที่ประหยัด
ที่สุดของแต่ละคู่ของลูกค้า โดยที่สินค้าออกจากคลังสินค้า
เพียงแห่งเดียว ซึ่งวิธีการแบบประหยัดสามารถจัดเส้นทาง
ยานพาหนะให้เหมาะสมกับช่วงเวลาที่สามารถส่งของได้ ณ
สถานที่รับสินค้าและข้อจำกัดอื่นๆ

ตารางที่ 2 การจัดเส้นทางเดินรถด้วยวิธี Modified Nearest Neighbor โชนบางซื่อ

ลำดับที่	เส้นทางเดินรถ	น้ำหนัก (กก.)	ระยะทาง (กม.)	เวลาในการ ขนส่งสินค้า (นาที)
1	F-A039-A040-A053-A057-A061-A036-A055-F	1,456.6	51	190
2	F-A047-A046-A043-A045-A044-A042-A041- A060-A059-A062-A048-A052-F	1,499.2	101	349
3	F-A058-A054-A033-A034-A049-F	1,466.8	71	194
4	F-A056-A050-A051-A038-F	1,442.5	97	222
5	F-A037-A064-A063-A035-F	1,187.1	123	265
รวม		7,052.2	443	1,220



รูปที่ 4 ตัวอย่างเส้นทางเดินรถจากการใช้วิธีการ Modified Nearest Neighbor โชนบางซื่อ

วิธีการแบบประหยัดนี้เรียบง่าย ไม่ซับซ้อน และสามารถนำไปปฏิบัติได้ โดยมีขั้นตอน ดังนี้

1) เลือกจุด (Node) ที่เป็นจุดเริ่มต้น ขึ้นมาหนึ่งจุด แล้วกำหนดเป็นจุดที่หนึ่ง

2) คำนวณระยะทางในการขนส่งที่ประหยัด ที่จะผนวกเป็นเส้นทางเดียวกันของคู่จุดส่ง i ใดๆ ไปยังจุดส่ง j ใดๆ ซึ่งค่าการประหยัด (S_{ij}) มีค่าเท่ากับ $C_{Di} + C_{Dj} - C_{ij}$ เมื่อ i, j คือลูกค้าและ D คือคลังสินค้า

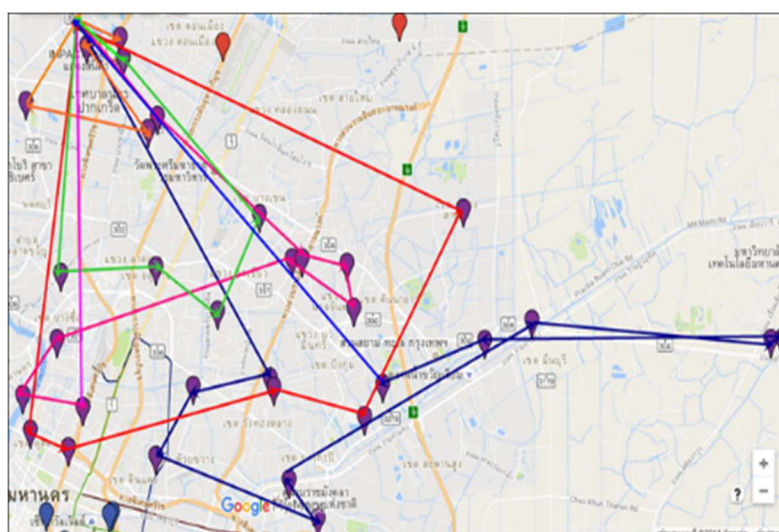
3) เรียงลำดับค่าการประหยัด (S_{ij}) จากมากไปหาน้อย

4) สร้างเส้นทางของยานพาหนะโดยเลือกค่าการประหยัด (S_{ij}) มากที่สุดจากคู่จุดส่ง i และ j โดยที่ i และ j ต้องไม่ซ้ำกัน

5) พิจารณาจุดสองจุดถัดไปที่มีการการประหยัดรองลงมา เข้ามาอยู่ในเส้นทาง โดยถ้าจุดส่งทั้งสองไม่เคยอยู่ในเส้นทางมาก่อนให้นำจุดส่งทั้งสองมาตั้งเป็นเส้นทางใหม่ แต่หากมีจุดส่งใดอยู่ในเส้นทางแล้วให้นำเส้นทางดังกล่าวมารวมกัน โดยเส้นทางจะต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขของข้อจำกัดในการเดินทางแต่ละยานพาหนะต้องมีสินค้าไม่เกินความจุของยานพาหนะ และต้องใช้เวลาในการขนส่งสินค้าไม่เกินระยะเวลาที่กำหนด

ตารางที่ 3 ตัวอย่างการจัดเส้นทางเดินรถด้วยวิธี Modified Saving Algorithm โชนบางซื่อ

ลำดับที่	เส้นทางเดินรถ	น้ำหนัก (กก.)	ระยะทาง (กม.)	เวลาในการขนส่ง สินค้า (นาที)
1	F-A048-A060-A059-A035-A052-A051-A038-A063-A064-A033-F	1,433.8	125	358
2	F-A044-A042-A049-A050-A037-F	1,491.0	93	231
3	F-A057-A055-A034-A056-A054-A043-A045-A041-F	1,489.4	82	257
4	F-A046-A058-A062-A036-A040-F	1,500.5	53	164
5	F-A039-A053-A061-A047-F	1,137.5	33	115
	รวม	7,052.2	386	1,125



รูปที่ 5 ตัวอย่างเส้นทางการเดินรถจากวิธีการ Modified Saving Algorithm โชนบางซื่อ

6. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกระบวนการฮิวริสติกส์ที่พัฒนาขึ้น

หลังจากการปรับปรุงเส้นทาง และการจัดลำดับเส้นทางก่อน-หลังอย่างมีระเบียบแบบแผน จะส่งผลให้ระยะทางลดลง สามารถเพิ่มจุดส่งได้มากขึ้น และประสิทธิภาพด้านการบรรทุกสินค้าเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้จำนวนรถและจำนวนเที่ยวในการขนส่งสินค้าลดลง สามารถลดค่าใช้จ่ายด้านต้นทุนการขนส่ง

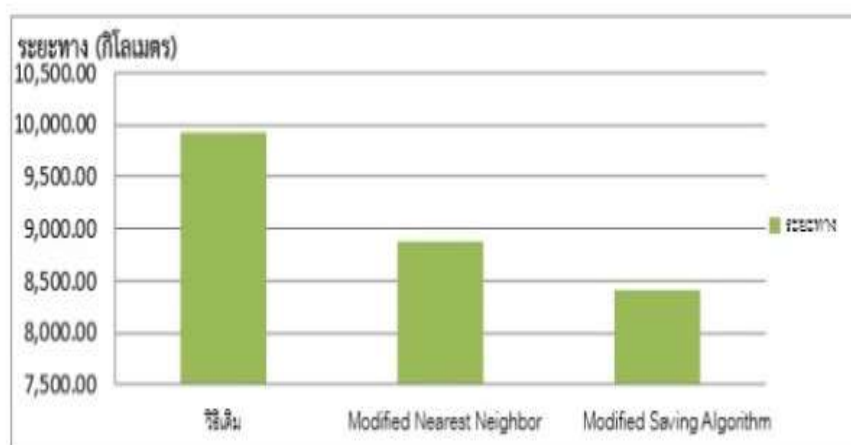
6.1 เปรียบเทียบระยะทางที่เกิดขึ้นกับวิธีเดิมของโรงงานกรณีศึกษา

กระบวนการฮิวริสติกส์ที่พัฒนาขึ้นให้ผลเฉลย ซึ่งสามารถเปรียบเทียบเป็นระยะทางรวมในการเดินทางขนส่งทั้งหมด และสามารถเปรียบเทียบกับผลจากการจัดการเดินทางด้วยวิธีการดั้งเดิมของโรงงานตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 และรูปที่ 6 แสดงให้เห็นถึงผลเฉลยโดยวิธีการ Modified Saving Algorithm มีระยะทางรวมน้อยที่สุด ระยะทางรวม 6 วันลดลงจากวิธีเดิม 1,506 กิโลเมตร ส่วนวิธี Modified Nearest Neighbor มีระยะทางรวม 6 วันลดลงจากวิธีเดิม 1,042 กิโลเมตร

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบระยะทางการขนส่งของวิธีการดั้งเดิมของโรงงานกรณีศึกษา วิธี Modified Nearest Neighbor และวิธี Modified Saving Algorithm

วันที่	วิธีเดิม (กม.)	วิธี Modified Nearest Neighbor (กม.)	วิธี Modified Saving Algorithm (กม.)
15 ธ.ค. 2558	1,852	1,635	1,455
16 ธ.ค. 2558	1,626	1,381	1,381
17 ธ.ค. 2558	1,939	1,819	1,707
14 พ.ค. 2559	1,622	1,479	1,382
16 พ.ค. 2559	928	855	821
17 พ.ค. 2559	1,957	1,713	1,672
รวม	9,924	8,882	8,418



รูปที่ 6 เปรียบเทียบระยะทางรวมที่เกิดขึ้นของการจัดเส้นทางขนส่งโดยวิธีดั้งเดิมของโรงงานกรณีศึกษา วิธี Modified Nearest Neighbor และวิธี Modified Saving Algorithm

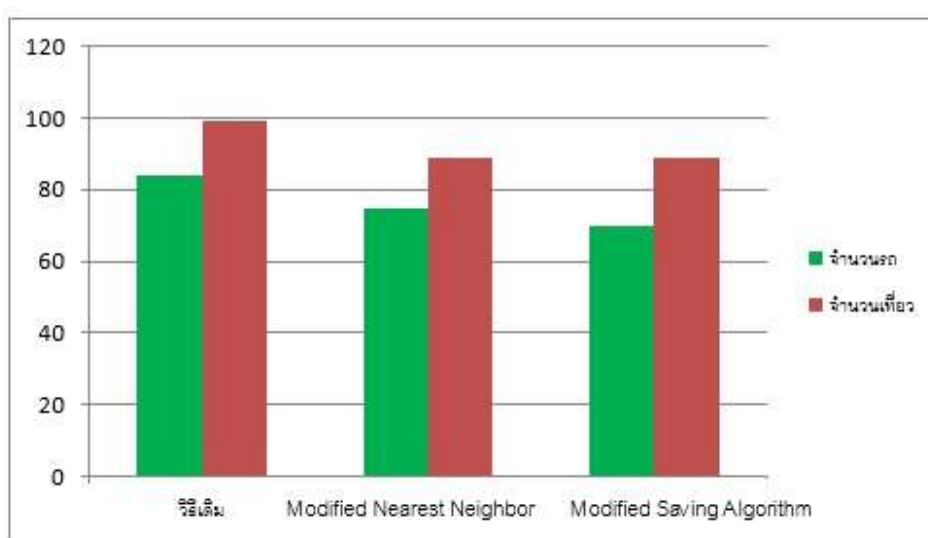
6.2 เปรียบเทียบจำนวนรถและจำนวนเที่ยวที่เกิดขึ้นกับวิธีเดิมของโรงงานกรณีศึกษา

ในมิติด้านประสิทธิภาพของระบบการจัดการขนส่งสามารถเปรียบเทียบจำนวนรถที่ใช้และจำนวนเที่ยวรถที่

เกิดขึ้นจากกระบวนการฮิวริสติกส์ที่พัฒนาขึ้นทั้งสองแบบ กับผลจากวิธีการดั้งเดิมของโรงงานตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 5 และเปรียบเทียบการใช้ทรัพยากรการขนส่งในรูปที่ 7

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบจำนวนรถและจำนวนเที่ยวที่เกิดขึ้นของการจัดเส้นทางขนส่งวิธีเดิมของโรงงานกรณีศึกษา วิธี Modified Nearest Neighbor และวิธี Modified Saving Algorithm

วันที่	รถที่ใช้	วิธีเดิม	วิธี Modified Nearest Neighbor	วิธี Modified Saving Algorithm
15 ธ.ค. 2558	จำนวนรถ (คัน)	17	14	13
	จำนวนเที่ยว (เที่ยว)	20	17	17
16 ธ.ค. 2558	จำนวนรถ (คัน)	15	13	12
	จำนวนเที่ยว (เที่ยว)	15	13	13
17 ธ.ค. 2558	จำนวนรถ (คัน)	16	15	14
	จำนวนเที่ยว (เที่ยว)	20	18	19
14 พ.ค. 2559	จำนวนรถ (คัน)	13	12	12
	จำนวนเที่ยว (เที่ยว)	17	17	16
16 พ.ค. 2559	จำนวนรถ (คัน)	9	7	6
	จำนวนเที่ยว (เที่ยว)	9	8	8
17 พ.ค. 2559	จำนวนรถ (คัน)	14	14	13
	จำนวนเที่ยว (เที่ยว)	18	16	16
จำนวนรถรวม (คัน)		84	75	70
จำนวนเที่ยวรวม (เที่ยว)		99	89	89



รูปที่ 7 แผนภูมิเปรียบเทียบจำนวนรถและจำนวนเที่ยวที่เกิดขึ้นของการจัดเส้นทางขนส่งวิธีเดิมของโรงงานกรณีศึกษา วิธี Modified Nearest Neighbor และวิธี Modified Saving Algorithm

จากตารางที่ 5 และรูปที่ 7 พบว่าการจัดเส้นทางด้วยวิธี Modified Saving Algorithm มีการใช้รถและจำนวนเที่ยวที่น้อยที่สุด ลดลงจากวิธีเดิมถึง 14 คัน จำนวนเที่ยวลดลง 10 เที่ยว ในขณะที่วิธีการ Modified Nearest Neighbor จำนวนรถรวม 6 วันลดลงจากวิธีเดิม 9 คัน และจำนวนเที่ยวลดลง 10 เที่ยว

6.3 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้น

จากตารางที่ 6 พบว่าการจัดเส้นทางด้วยวิธี Modified Saving Algorithm มีค่าใช้จ่ายลดลงมากที่สุด โดยมีค่าใช้จ่ายรวมลดลงจากวิธีเดิม 26,099.50 บาท หรือลดลงเฉลี่ยวันละ 4,349.92 บาท ส่วนวิธี Modified Nearest Neighbor มีค่าใช้จ่ายรวมลดลงจากวิธีเดิม 18,374.50 บาท หรือลดลงเฉลี่ยวันละ 3,062.42 บาท

หากคิดเป็นอัตราการลดต้นทุนลงเทียบกับวิธีดั้งเดิมของโรงงานตัวอย่าง จะได้เป็น 18.65% และ 13.12% ตามลำดับ

จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบการจัดการขนส่งในหลายมิติที่แตกต่างกัน คือ ระยะทางรวม จำนวนรถที่ใช้ จำนวนเที่ยวที่รถวิ่ง และค่าใช้จ่ายโดยรวม จะพบว่าการใช้งานกระบวนการฮิวริสติกส์ (Heuristic Procedure) ซึ่งได้รับการพัฒนาต่อเนื่องมาจากวิธีการแบบประหยัดและวิธีการแบบจุดใกล้ที่สุดนั้น ให้ผลเฉลยที่มีคุณภาพสูงกว่าวิธีการดั้งเดิม ซึ่งทำให้โรงงานตัวอย่างสามารถจัดสรรการขนส่งได้ในเส้นทางที่เป็นไปได้ ด้วยระยะทางที่สั้นกว่าและมีค่าใช้จ่ายโดยรวมต่ำ

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นของการจัดเส้นทางขนส่งวิธีเดิมของโรงงานกรณีศึกษา วิธี Modified Nearest Neighbor และวิธี Modified Saving Algorithm

วัน/เดือน/ปี	วิธีเดิม (บาท)	วิธี Modified Nearest Neighbor (บาท)	วิธี Modified Saving Algorithm (บาท)
15 ธ.ค. 2558	27,011.50	21,531.00	20,238.00
16 ธ.ค. 2558	22,969.00	19,525.00	17,997.00
17 ธ.ค. 2558	25,937.00	23,337.00	22,074.00
14 พ.ค. 2559	23,192.00	21,593.00	20,516.00
16 พ.ค. 2559	15,300.00	12,420.00	11,157.00
17 พ.ค. 2559	25,552.00	23,181.00	21,880.00
รวม	139,961.50	121,587.00	113,862.00

7. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาระบบการขนส่งสินค้าของโรงงานกรณีศึกษา เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ และค้นหาแบบการจัดการขนส่งเพื่อใช้ทดแทนการตัดสินใจแบบไม่แน่นอนของพนักงานในโรงงาน เจาะใจหลักของระบบคือ คำนึงถึงปริมาณการบรรทุกสินค้า โดยพยายามจัดสินค้าให้เต็มความจุรถมากที่สุดต่อคันในแต่ละวัน ผู้วิจัยได้ทำการปรับปรุงกระบวนการฮิวริสติกส์ขึ้นมาใหม่ 2 แบบ

คือ Modified Nearest Neighbor และ Modified Saving Algorithm ซึ่งเป็นการพัฒนาต่อมาจากขั้นตอนเดิมของวิธีการนั้น และได้ทำการทดสอบกระบวนการที่พัฒนาขึ้นกับข้อมูลจริงของโรงงานตัวอย่าง ผลการทดสอบพบว่า กระบวนการฮิวริสติกส์ทั้งสองแบบที่พัฒนาขึ้นนั้นสามารถใช้งานได้ดี และกระบวนการแบบ Modified Saving Algorithm ให้ผลการจัดเส้นทางที่ดีที่สุด โดยมีข้อได้เปรียบจากวิธีการอื่นๆ ทั้งในด้าน

ระยะทาง จำนวนรถที่ใช้ จำนวนเที่ยว และค่าใช้จ่ายรวม นอกจากนี้ด้วยตรรกะของกระบวนการที่พัฒนาขึ้นจะทำให้สามารถใช้ความจุของยานพาหนะได้สูงสุดตามเงื่อนไขของระบบ งานวิจัยนี้จึงแสดงให้เห็นว่าผู้ประกอบการสามารถใช้แนวคิดการพัฒนากระบวนการฮิวริสติกส์ขึ้นใหม่ โดยอ้างอิงจากตรรกะการคิดคำนวณที่เห็นว่าเหมาะสม เพื่อพัฒนาเป็นวิธีการวางแผนการขนส่งที่เป็นรูปแบบที่ชัดเจนและสามารถปฏิบัติจริงได้ และการพัฒนากระบวนการฮิวริสติกส์ใหม่นั้นมีแนวโน้มที่จะให้ผลลัพธ์การวางแผนที่ดีกว่าวิธีการแบบเดิมๆ

8. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณโรงงานจำหน่ายอุปกรณ์ระบบงานไฟฟ้า ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลต่างๆ เพื่อเป็นกรณีศึกษาในการวิจัยในครั้งนี้

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] คำนาย อภิปรัชญาสกุล, *การขนส่งสินค้าในงานโลจิสติกส์ - Goods Transportation in Logistics Works*, พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ, โฟกัสมีเดีย แอนด์พับลิชชิง, 2556.
- [2] พรชกร รัศมีชนาพัทธ์, “การประยุกต์อัลกอริทึมแบบประหยัดเพื่อจัดเส้นทางขนส่งที่เหมาะสมในโรงงานผลิตรายูนิฟอร์มเส้น”, บัณฑิตวิทยาลัย, สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2554.
- [3] นคร ไชยวงศ์ศักดิ์ และคณะ, “การจัดเส้นทางขนส่งโดยใช้เซฟวิ่งอัลกอริทึมและตัวแบบปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย กรณีศึกษาโรงงานน้ำตาล”, วารสารไทยการวิจัยดำเนินงาน. ปีที่ 3(1), 2558.
- [4] พรภินันท์ ธรรมราช, ศุภรณันท์ วิเศษศรี; และอนิวรรณ โสตาจันทร์, “การพัฒนาเส้นทางเดินทางสำหรับบริษัทเวชภัณฑ์ตัวอย่าง”,

วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต, วิศวกรรมอุตสาหกรรม. มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 2555.

- [5] ปฏิพัทธ์ หงษ์สุวรรณ, วิชัย จันทรักษา; และสรวิทย์ เชื้อพิสุทธ์กุล, “การศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการจัดเส้นทางเดินทางขนส่งน้ำดื่มจังหวัดสมุทรสงคราม”, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมและการจัดการ, มหาวิทยาลัยศิลปากรนครปฐม, 2556.
- [6] ปาลีรัฐ บุญก่อน, “แนวทางการพัฒนาการจัดเส้นทางเดินทางขนส่งสินค้า กรณีศึกษา ศูนย์กระจายสินค้าประเภทเซรามิค”, วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, สาขาวิชาการจัดการโลจิสติกส์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2554.
- [7] ศิริลักษณ์ อเนกบุญลาภ, “การจัดเส้นทางเดินทางสำหรับกลุ่มตัวอย่าง กรณีศึกษา โรงพยาบาลนครปฐม”, บัณฑิตวิทยาลัย, สาขาวิชาการจัดการอุตสาหกรรม, สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น, 2557.
- [8] อุบลรัตน์ เขียรธนาคม, “การใช้วิธีเชิงฮิวริสติกส์เพื่อแก้ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งสินค้าหลายแห่ง”, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2551.
- [9] รื่นฤดี อัครมณี, “การพัฒนาการจัดเส้นทางเดินทางของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค”, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาการจัดการโลจิสติกส์, บัณฑิตวิทยาลัยการจัดการและนวัตกรรมมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2553.
- [10] D.J. Rosenkrantz, R.E. Stearns, P.M. Lewis II, “An analysis of several heuristics for the traveling salesman problem”, SIAM J. Comput., vol 6, pp. 563-581, 1977.

หุ่นยนต์แบบโครงร่างสำหรับแขนท่อนบนกับกิจกรรมการกายภาพบำบัดเพื่อการฟื้นฟู สมรรถภาพผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมอง

Upper-limb Exoskeleton Robot with Rehabilitation Activities for Stroke Rehabilitation

อานันท์ สุตาพันธ์ วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

*Corresponding author: Email: viboon.s@chula.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการพัฒนาหุ่นยนต์แบบโครงร่างเพื่อฟื้นฟูสมรรถนะผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมองที่มีอาการอัมพฤกษ์ อัมพาตที่แขนท่อนบน (บริเวณหัวไหล่และข้อศอก) และมีการพัฒนาส่วนเชื่อมต่อกับเกมคอมพิวเตอร์ที่เพื่อใช้สำหรับ กิจกรรมการกายภาพบำบัดของผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมอง ในส่วนของหุ่นยนต์ที่พัฒนาขึ้นนี้คือหุ่นยนต์ CUREs เป็นหุ่นยนต์ที่ พัฒนาขึ้นโดยผู้เขียนบทความนี้และดำเนินการจดสิทธิบัตรตามคำขอที่ 1601006553 [23] สามารถเคลื่อนที่ได้ 4 องศา อิสระ หุ่นยนต์ที่พัฒนาขึ้นนี้มีส่วนของการชดเชยน้ำหนักที่ช่วยลดผลกระทบของน้ำหนักแขนหุ่นยนต์อันเนื่องมาจากแรง โน้มถ่วงของโลกเป็นผลให้ระบบควบคุมทางพลศาสตร์ทำงานได้ดีขึ้น ตัวแขนที่เคลื่อนที่มีน้ำหนักเบาเมื่อเทียบกับหุ่นยนต์ ประเภทเดียวกัน ทำให้เหมาะสำหรับสำหรับกิจกรรมการกายภาพบำบัด ในส่วนของการพัฒนาตัวหุ่นยนต์นั้นสามารถดู รายละเอียดได้ใน [15], [18] ซึ่งจะมีรายละเอียดเกี่ยวกับการออกแบบกลไกและระบบควบคุมที่ใช้ในหุ่นยนต์นี้ ในที่นี้ในส่วนที่เกี่ยวกับหุ่นยนต์จะกล่าวเฉพาะในส่วนของการวิเคราะห์ทางด้านระบบจลนศาสตร์และระบบพลศาสตร์ซึ่งจำเป็น สำหรับการพัฒนาร่วมเชื่อมต่อกับเกมที่จะช่วยในการฝึกปฏิบัติเพื่อการฟื้นฟู การพัฒนาร่วมเชื่อมต่อระหว่างแขนหุ่นยนต์กับ เกมที่เป็นมาตรฐานทำให้สามารถใช้หุ่นยนต์ที่พัฒนาขึ้นกับเกมที่มีเป็นจำนวนมากได้ การใช้เกมในการฝึกปฏิบัติมี 2 แบบ คือ เกมที่พัฒนาขึ้นมาเฉพาะหุ่นยนต์แต่ละตัวเพื่อการฟื้นฟูในรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งปกติจะมีลักษณะเฉพาะเจาะจงมีความ หลากหลายไม่มาก และเกมที่มีอยู่แล้วในท้องตลาดที่สามารถช่วยในการเสริมสร้างความสามารถในการเคลื่อนไหวและสร้าง ความเพลิดเพลินในการฝึกปฏิบัติได้ ซึ่งระบบหุ่นยนต์ที่พัฒนาขึ้นนี้มีทั้ง 2 แบบ แต่ในที่นี้จะนำเสนอเป็นแบบหลังที่ เหมาะสำหรับการเสริมสมรรถนะในการเคลื่อนไหวใกล้เคียงกับการเคลื่อนไหวของมือปกติและสร้างความเพลิดเพลินในการฝึก ปฏิบัติ ทำให้เกิดความหลากหลายในการทำกิจกรรมการกายภาพบำบัด นอกจากนั้นระบบควบคุมยังสามารถปรับแรงต้าน การเคลื่อนที่เพื่อช่วยให้ผู้ป่วยมีการฟื้นฟูได้เร็วขึ้น

คำสำคัญ: หุ่นยนต์การกายภาพบำบัด การชดเชยน้ำหนักของหุ่นยนต์ หุ่นยนต์แบบสวมใส่ เกมคอมพิวเตอร์

ABSTRACT

The objective of this research was to develop an upper-limb exoskeleton robot with interfacing to rehabilitation activity games for hemiplegic stroke patients. The developed robot is CUREs. The

CUREs robot is patenting under the author names with patent request no. 1601003553 [23]. It has four-degree-of-freedom. The robot arm has gravity compensation so that the smaller actuators can be used and the better performance of the dynamic control system can be achieved compared to the heavier arm that normally seen in the market. The detail of the development of robot arm and controller design can be consulted in [15], [18]. In this paper, the kinematics and the dynamic model of the robot arm will be analyzed in detail. Both are used for developing the interface between the robot arm and rehabilitation games or activities. The rehabilitation activities can improve recovery rate compare to normal treatment in hemiplegic stroke patients. The interface technique between the robot and rehabilitation game, developed in this paper, can be implemented not just only the in-house game but also to most of the commercial games. Actually, there are two types of rehabilitation activity games. One will cover the activities for specific treatments assigned by a physician or a physical therapist. The other is for relaxing after going through a period of specific training. The second type of training activity is based on available arcade games or commercial games and will help to improve arm movement control close to the normal arm movement. The force control, of the dynamic controller, of the robot arm can be adjusted force to suit to individual patients. The main benefit of the interfacing can help to extend to various type of rehabilitation activities.

Keyword: Rehabilitation Robot, Gravity Compensation, Exoskeleton Robot, Games.

1. บทนำ

โรคหลอดเลือดสมอง (Stroke) เกิดจากการที่สมองหยุดทำงานชั่วคราวจากการขาดเลือดไปเลี้ยงสมอง ซึ่งผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมองจะมีอาการกล้ามเนื้ออ่อนแรง อัมพฤกษ์ อัมพาตครึ่งซีก อาจจะมีปัญหาทางด้านความสามารถทำความเข้าใจหรือพูดได้ หรือถ้ารุนแรงมากอาจทำให้ถึงตายได้ การรักษาจะแยกออกจากกันคือการรักษาในส่วนของโรคหลอดเลือดสมอง และการฟื้นฟูสมรรถนะของผู้ป่วยหลังทุเลาจากโรคหลอดเลือดสมองแล้ว การฟื้นฟูสมรรถนะผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมองคือจำเป็นต้องฝึกกายภาพบำบัดเพื่อให้ร่างกายกลับมาฟื้นฟูสมรรถภาพดังเดิม ซึ่งการทำกายภาพบำบัดที่มีประสิทธิภาพจำเป็นจะต้องฝึกหลายท่าทาง แต่ละท่าทางต้องฝึกซ้ำๆ อย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอ ปัจจุบันเรามีจำนวนผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมองมีอัตราเพิ่มขึ้นทุกปี ไม่น้อย

กว่า 200,000 รายต่อปี มีผู้ป่วยสะสมอยู่ราว 500,000 คน ด้วยอัตราส่วนที่สูงของผู้พิการจากโรคหลอดเลือดสมอง ทำให้มีมูลค่าสูญเสียทางเศรษฐกิจไม่น้อยกว่าปีละ 7,100 ล้านบาท และต้องเสียค่ารักษาประมาณปีละไม่ต่ำกว่า 20,000 ล้านบาท และในอนาคตอันใกล้สังคมส่วนใหญ่ของไทยและของโลกกำลังเข้าสู่สังคมผู้สูงอายุซึ่งเป็นวัยที่มีโอกาสจะเป็นโรคหลอดเลือดสมองสูง ทำให้การรักษาที่ต้องใช้คนในการช่วยกายภาพบำบัดนั้นอาจจะมีไม่เพียงพอต่อการเพิ่มขึ้นของจำนวนผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมองในอนาคต นอกจากนี้ในการทำกายภาพบำบัดยังมีอีกหนึ่งปัญหาหลัก คือ ผู้ป่วยรู้สึกเบื่อกับการทำกายภาพบำบัดแบบเดิมๆ ทำให้ผู้ป่วยไม่ยอมทำกายภาพบำบัด ดังนั้นในหลายประเทศทั่วโลกได้มีการพัฒนาหุ่นยนต์เพื่อช่วยในการกายภาพบำบัด และผลลัพธ์ที่ได้เป็นที่น่าพอใจ [1]–[5]

หุ่นยนต์กายภาพบำบัดในปัจจุบันสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ [6] ได้แก่ หุ่นยนต์กายภาพบำบัดประเภทสัมผัสที่จุดปลาย (end-effector-base) [7]–[9] และหุ่นยนต์กายภาพบำบัดประเภทโครงร่างภายนอกแบบสวมใส่ (exoskeleton base) [10]–[16] โดยหุ่นยนต์กายภาพบำบัดประเภทสัมผัสที่จุดปลาย จะมีการสัมผัสระหว่างหุ่นยนต์กับผู้ป่วยอยู่จุดเดียวคือที่ตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์ คล้ายกับหุ่นยนต์ที่ใช้อยู่ในอุตสาหกรรมทั่วไป ซึ่งมีโครงสร้างกลไกที่ไม่ซับซ้อนมากนักและออกแบบง่าย เกิดขึ้นก่อนมีการใช้อย่างแพร่หลาย แต่มีข้อเสียคือ ไม่สามารถกำหนดการเคลื่อนไหวของข้อต่อแต่ละจุดของผู้ป่วยได้ ในขณะที่หุ่นยนต์โครงร่างภายนอกแบบสวมใส่จะสามารถกำหนดการเคลื่อนไหวเฉพาะข้อต่อได้และกำหนดการเคลื่อนไหวของท่าทางของแขนได้ตามต้องการ ทำให้เชื่อว่าประสิทธิภาพในการฟื้นฟูจะดีกว่าแบบสัมผัสที่จุดปลาย หุ่นยนต์แบบโครงร่างภายนอกสวมใส่นี้ยังมีการศึกษาไม่มากนักเท่ากับแบบสัมผัสที่จุดปลาย เนื่องจากความซับซ้อนของระบบทั้งทางกลและระบบควบคุมการทำงาน

ระบบควบคุมที่ใช้ในงานกายภาพบำบัดฟื้นฟูมีหลายประเภท [17] ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 4 กลุ่ม คือ 1) ระบบควบคุมแบบ assistive control คือ ระบบควบคุมที่ช่วยการเคลื่อนไหวของผู้ป่วยให้สามารถขยับแขนขาตามท่าทางกายภาพบำบัดที่กำหนดได้ 2) ระบบควบคุมแบบ challenge-based control คือ ระบบควบคุมที่เพิ่มความท้าทายและเพิ่มความสนใจในการทำกายภาพบำบัดให้กับผู้ป่วย 3) ระบบควบคุมแบบ haptic stimulation ระบบนี้จะมีตัวตรวจรู้ทางตำแหน่งติดไว้บนร่างกายของผู้ป่วยหรือสัมผัสกับผู้ป่วยโดยตรง เช่น encoder เป็นต้น 4) ระบบควบคุมแบบ non-contacting coaching ระบบนี้จะไม่มีการตรวจรู้ทางตำแหน่งที่สัมผัสกับผู้ป่วยโดยตรงซึ่งอาจจะใช้กล้องตรวจรู้ลักษณะท่าทางการเคลื่อนไหวของผู้ป่วยเท่านั้น

หุ่นยนต์กายภาพบำบัด CUREs (Chulalongkorn University Rehabilitation robotic Exoskeleton

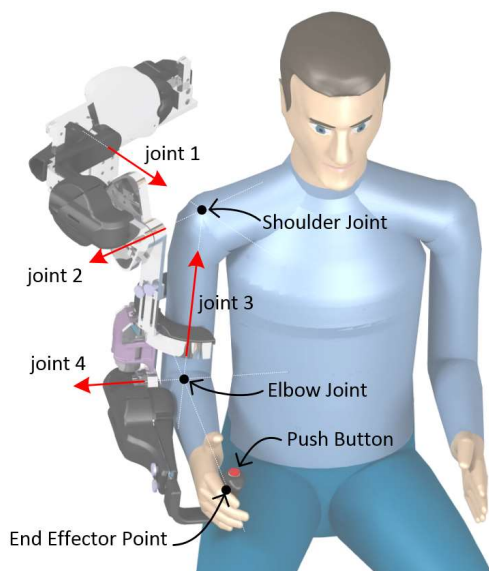
system) [15] ซึ่งเป็นงานวิจัยที่ทำร่วมกันระหว่างคณะวิศวกรรมศาสตร์และคณะแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ถูกพัฒนาเพื่อใช้เสริมการทำกายภาพบำบัดแบบดั้งเดิม ตัวแขนกลมีการเคลื่อนที่ที่ราบเรียบ [18] และได้ผ่านการทดสอบแล้วว่าหุ่นยนต์ CUREs สามารถนำมาใช้งานด้านกายภาพบำบัดได้โดยไม่มีผลกระทบข้างเคียง [19] ซึ่งปัจจุบันหุ่นยนต์ CUREs มีโปรแกรมช่วยการเคลื่อนที่ (Assistive Control Strategy) สำหรับช่วยผู้ป่วยที่ไม่สามารถเคลื่อนที่แขนได้เองหรือเคลื่อนที่แขนได้เล็กน้อย และสำหรับผู้ป่วยที่สามารถเคลื่อนที่แขนได้ดีแล้วแต่ต้องการเพิ่มความแข็งแรงของกล้ามเนื้อ ก็สามารถใช้งานโปรแกรมสำหรับเล่นเกม โดยเกมในการฝึกปฏิบัติมี 2 แบบคือ เกมที่พัฒนาขึ้นมาเฉพาะหุ่นยนต์แต่ละตัวเพื่อการฟื้นฟูในรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งปกติจะมีลักษณะเฉพาะเจาะจงมีความหลากหลายไม่มาก และเกมที่มีอยู่แล้วในท้องตลาดที่สามารถช่วยในการเสริมสร้างความสามารถในการเคลื่อนไหวและสร้างความเพลิดเพลินในการฝึกปฏิบัติได้ ปัจจุบันหุ่นยนต์กายภาพบำบัด CUREs ถูกใช้งานอยู่ที่ศูนย์เวชศาสตร์ฟื้นฟูสรวงคนิवासภากาชาดไทย และที่ตึก สธ. โรงพยาบาลจุฬาลงกรณ์ สภากาชาดไทย

บทความนี้อธิบายถึงวิธีการประยุกต์ใช้งานหุ่นยนต์กายภาพบำบัดแบบสวมใส่ CUREs ร่วมกับโปรแกรมเกมคอมพิวเตอร์ที่มีอยู่แล้ว ซึ่งการนำเกมคอมพิวเตอร์มาช่วยเสริมในการทำกายภาพบำบัดแบบเดิมนี้อาจจะช่วยเพิ่มความสนใจในการทำกายภาพบำบัดได้ โดยระบบควบคุมที่เลือกใช้เป็นระบบควบคุมแบบ challenge-based control คือ เป็นระบบควบคุมที่มีการชดเชยน้ำหนักแขนของหุ่นยนต์ที่เป็นผลมาจากแรงโน้มถ่วงของโลก

2. หุ่นยนต์กายภาพบำบัด CUREs

หุ่นยนต์ CUREs [15] จัดอยู่ในประเภทหุ่นยนต์โครงร่างภายนอกแบบสวมใส่ (Exoskeleton Base) มีลักษณะเป็นแขนกลเป็นโครงร่างภายนอกของแขนมนุษย์ดังแสดงในรูปที่ 1 หุ่นยนต์ CUREs มี 4 องศาอิสระ มีมอเตอร์

ช่วยในการเคลื่อนที่ทุกจุดหมุน แบ่งเป็นการเคลื่อนที่ของหัวไหล่ 3 องศาอิสระ และการเคลื่อนที่ของข้อศอกอีก 1 องศาอิสระ



รูปที่ 1 หุ่นยนต์กายภาพบำบัดแบบสวมใส่ CUREs

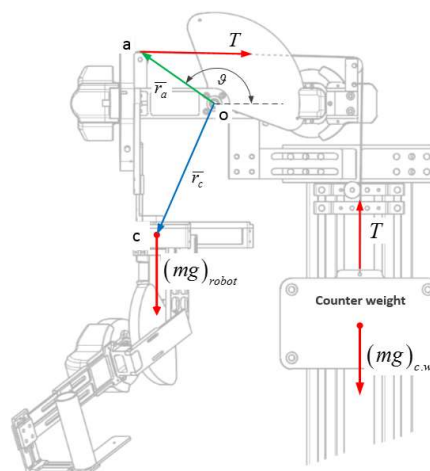
นอกจากนี้หุ่นยนต์ CUREs ยังสามารถปรับความยาวของแขนท่อนบนและแขนท่อนล่างให้ได้ขนาดตามความยาวแขนของผู้สวมใส่ ซึ่งการสวมใส่ ผู้สวมใส่จะกำที่ด้ามจับที่อยู่ตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์ซึ่งตำแหน่งนี้จะมีปุ่มกดอยู่ด้านบนเพื่อใช้ในการเล่นเกม ตำแหน่งหัวไหล่ของผู้สวมใส่ควรจะอยู่ที่จุดตัดของจุดหมุนที่ 1 ถึง 3 โดยสามารถปรับความสูงของหัวไหล่ได้จากเก้าอี้ที่สามารถปรับความสูงได้ของผู้สวมใส่นั่ง และตำแหน่งจุดหมุนของข้อศอกของผู้สวมใส่ควรอยู่ในแนวแกนเดียวกันกับแกนหมุนของจุดหมุนที่ 4

2.1 ระบบช่วยชดเชยน้ำหนัก

เนื่องจากหุ่นยนต์ CUREs มีน้ำหนักของชิ้นส่วนที่เคลื่อนไหวได้ประมาณ 4.23 กิโลกรัม ซึ่งเป็นน้ำหนักที่ชุดขับเคลื่อนที่ 1 ที่จุดหมุนที่ 1 (joint 1) ต้องออกแรงเพื่อรับน้ำหนักแขนหุ่นยนต์ตลอดเวลา ดังนั้นเพื่อเป็นการลดภาระและขนาดของชุดขับเคลื่อน จึงได้ออกแบบระบบชดเชยน้ำหนัก (Counter Weight) ดังแสดงในรูปที่ 2 ค่าโมเมนต์ที่เกิดจากน้ำหนักถ่วง $\tau_{C.W.}$ จะมีค่าเท่ากับ

$\vec{r}_a \times T$ โดยที่ T คือ เวกเตอร์แสดงขนาดและทิศทางของแรงดึงในเส้นเชือกมีค่าเท่ากับน้ำหนักถ่วง $(mg)_{C.W.}$ และ $\vec{r}_a$ คือ เวกเตอร์แสดงทิศทางและระยะจากจุดหมุนที่ 1 ที่จุด o ไปยังตำแหน่งจุดยึดสายเคเบิลที่จุด a โดยสามารถเขียนในรูปสมการดังแสดงในสมการที่ 1

$$\tau_{C.W.} = \vec{r}_a \times T = |\vec{r}_a| |T| \sin \theta \quad (1)$$

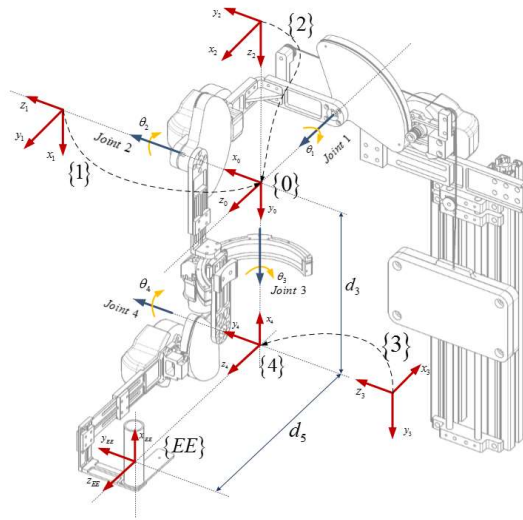


รูปที่ 2 ภาพระบบชดเชยน้ำหนัก (Counter Weight) ของหุ่นยนต์ CUREs

2.2 สมการจลนศาสตร์ของหุ่นยนต์ (Kinematics)

การหาพิกัดของตำแหน่งปลายแขนหุ่นยนต์และท่าทางของหุ่นยนต์ ณ เวลาใดๆ สามารถหาได้จากการวิเคราะห์จลนศาสตร์ของแขนกล โดยเริ่มจากการกำหนดพิกัดอ้างอิงให้กับชิ้นส่วนของแขนหุ่นยนต์แต่ละชิ้น ซึ่งการกำหนดพิกัดอ้างอิงของหุ่นยนต์ CUREs สามารถแสดงดังภาพที่ 3 (วิธีการติดพิกัดอ้างอิง (Frame) ใช้ตามวิธีของ Denavit-Hartenberg สามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จาก [20]–[22]) โดยพิกัดอ้างอิงเริ่มต้น เริ่มที่ตำแหน่งจุดตัดบริเวณหัวไหล่ที่พิกัดอ้างอิงศูนย์ $\{0\}$ ต่อจากนั้นเป็นพิกัดอ้างอิงของลิงก์หนึ่ง $\{1\}$ และพิกัดอ้างอิงของลิงก์สอง $\{2\}$ ตามลำดับ ความยาวของแขนท่อนบน คือ ระยะระหว่างจุดหมุนที่สี่กับจุดตัดบริเวณหัวไหล่ ซึ่งสามารถปรับความยาวได้โดยมีค่าเท่ากับ d_3 ที่ตำแหน่งข้อศอกมีพิกัดอ้างอิงของลิงก์สาม $\{3\}$ และพิกัดอ้างอิงของลิงก์

{4} ตามลำดับ ความยาวของแขนท่อนล่าง คือ ระยะระหว่างจุดหมุนที่สี่กับด้ามจับที่ปลายแขน ซึ่งสามารถปรับความยาวได้โดยมีค่าเท่ากับ d_5 และพิกัดอ้างอิงสุดท้ายคือพิกัดอ้างอิงของตำแหน่งปลายแขน $\{EE\}$ จะอยู่ที่ตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์บริเวณด้ามจับ โดยที่ค่าพารามิเตอร์ที่เป็นความสัมพันธ์ของพิกัดอ้างอิง $\{i\}$ เทียบกับพิกัดอ้างอิง $\{i-1\}$ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1



รูปที่ 3 ภาพพิกัดอ้างอิงของลิงก์ต่างๆ ของหุ่นยนต์ CUREs

ตารางที่ 1 ตารางแสดงค่า Denavit-Hartenberg ของหุ่นยนต์ CUREs

i (Link)	θ_i Rot(z)	d_i Tran(z)	α_i Rot(x)	a_i Tran(x)
1	θ_1	0	$\pi/2$	0
2	θ_2	0	$\pi/2$	0
3	θ_3	d_3	$\pi/2$	0
4	θ_4	0	$\pi/2$	0
EE	0	d_5	0	0

ตารางที่ 1 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการแปลงโดยคอลัมน์ที่ 1 แสดงหมายเลขของพิกัดอ้างอิงที่ i ที่อยู่บนหุ่นยนต์, คอลัมน์ที่ 2 แสดงมุม θ_i ที่หมุนรอบแกน z_{i-1} ,

คอลัมน์ที่ 3 แสดงระยะการเลื่อน d_i ของพิกัดในแนวแกน z_{i-1} , คอลัมน์ที่ 4 แสดงมุม α_i ที่หมุนรอบแกน x_i และคอลัมน์ที่ 5 แสดงระยะการเลื่อน a_i ของพิกัดในแนวแกน x_i

เมทริกซ์การแปลง (Homogeneous Transformation matrix) เป็นเมทริกซ์ขนาด 4x4 ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดอ้างอิง $\{i\}$ เทียบกับพิกัดอ้างอิง $\{i-1\}$ สามารถหาได้ดังแสดงในสมการที่ (2) โดยเริ่มจากการหมุนด้วยมุม θ_i ที่หมุนรอบแกน z_{i-1} จากนั้นเลื่อนด้วยระยะ d_i ในแนวแกน z_{i-1} จากนั้นหมุนด้วยมุม α_i รอบแกน x_i และสุดท้ายเลื่อนด้วยระยะ a_i ในแนวแกน x_i โดยผลลัพธ์ที่ได้จากสมการที่ (2) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3) โดย $i = 1, 2, 3, 4$ และ EE

$$A_i^{i-1} = Rot_{z, \theta_i} Trans_{z, d_i} Rot_{x, \alpha_i} Trans_{x, a_i} \quad (2)$$

$$A_i^{i-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

เนื่องจากในแขนกลของหุ่นยนต์มีถึง 5 พิกัดอ้างอิงด้วยกัน ซึ่งทำให้เมทริกซ์การแปลงจากสมการที่ (3) มีอยู่ทั้งหมด 5 สมการ ซึ่งการรวมเมทริกซ์การแปลงทั้ง 5 ตัวนั้นสามารถเขียนได้ดังแสดงในสมการที่ (4) โดยที่ A_{EE}^0 คือเมทริกซ์การแปลงของพิกัดอ้างอิงที่ตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์ $\{EE\}$ เทียบกับพิกัดอ้างอิงของพิกัดอ้างอิงที่ศูนย์ของหุ่นยนต์ $\{0\}$ ซึ่งผลลัพธ์ของเมทริกซ์การแปลงที่ได้สามารถเขียนได้ดังแสดงในสมการที่ (5) โดยที่ตัวแปร c_1, c_2, c_3 และ c_4 ย่อมาจาก $\cos \theta_1, \cos \theta_2, \cos \theta_3$ และ $\cos \theta_4$ ตามลำดับ และ s_1, s_2, s_3 และ s_4 ย่อมาจาก $\sin \theta_1, \sin \theta_2, \sin \theta_3$ และ $\sin \theta_4$ ตามลำดับ

$$A_{EE}^0 = A_1^0 A_2^1 A_3^2 A_4^3 A_{EE}^4 \quad (4)$$

$$A_{EE}^0 = \begin{bmatrix} c_4(s_1s_3 + c_1c_2c_3) + c_1s_2s_4 & c_1c_2s_3 - c_3s_1 & s_4(s_1s_3 + c_1c_2c_3) - c_1c_4s_2 & d_5(s_4(s_1s_3 + c_1c_2c_3) - c_1c_4s_2) + d_3c_1s_2 \\ s_1s_2s_4 - c_4(c_1s_3 - c_2c_3s_1) & c_1c_3 + c_2s_1s_3 & -s_4(c_1s_3 - c_2c_3s_1) - c_4s_1s_2 & -d_5(s_4(c_1s_3 - c_2c_3s_1) + c_4s_1s_2) + d_3s_1s_2 \\ c_3c_4s_2 - c_2s_4 & s_2s_3 & c_2c_4 + c_3s_2s_4 & d_5(c_2c_4 + c_3s_2s_4) - d_3c_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

จากสมการที่ (5) จะสามารถหาตำแหน่งของตำแหน่งปลายแขน $\{EE\}$ เทียบกับพิกัดอ้างอิง $\{0\}$ ได้ดังสมการที่ (6) โดยที่ P_{EE}^0 คือ เวกเตอร์การเลื่อนทางตำแหน่ง (Translation Vector) ของพิกัด $\{EE\}$ เทียบกับพิกัดอ้างอิง $\{0\}$

$$P_{EE}^0 = \begin{bmatrix} x_{EE}^0 \\ y_{EE}^0 \\ z_{EE}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_5(s_4(s_1s_3 + c_1c_2c_3) - c_1c_4s_2) + d_3c_1c_2 \\ -d_5(s_4(c_1s_3 - c_2c_3s_1) + c_4s_1s_2) + d_3s_1s_2 \\ d_5(c_2c_4 + c_3s_2s_4) - d_3c_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

2.3 สมการพลศาสตร์ของหุ่นยนต์ (Dynamics)

สมการทางพลศาสตร์ของหุ่นยนต์ [20], [21] สามารถเขียนในรูปทั่วไปได้ดังแสดงในสมการที่ (7)

$$B(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + F_v\dot{\theta} + F_s \operatorname{sgn}(\dot{\theta}) + G(\theta) = \tau + \tau_{cw}(\theta) - J^T(\theta)h_e \quad (7)$$

โดยที่ $B(\theta)\ddot{\theta}$ คือ พจน์ของแรงบิดที่เกิดเนื่องจากความเร่งเชิงมุมคูณกับโมเมนต์ความเฉื่อยของแขนของหุ่นยนต์, $C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta}$ คือ พจน์ของแรงบิดที่เกิดขึ้นเนื่องจากความเร็วเชิงมุม (Coriolis force and centrifugal force), $F_v\dot{\theta}$ คือ พจน์ของแรงเสียดทานที่เกิดจากความหนืด (viscous friction), $F_s \operatorname{sgn}(\dot{\theta})$ คือ พจน์ของแรงเสียดทานที่เกิดจากแรงเสียดทานสถิตหรือแรงเสียดทานจลน์ (coulomb friction), $G(\theta)$ คือ พจน์ของโมเมนต์เนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกที่ขึ้นอยู่กับรูปแบบของหุ่นยนต์และท่าทางของหุ่นยนต์ ณ ขณะนั้น, τ คือ พจน์ของแรงบิดของมอเตอร์แต่ละจุดหมุน, $\tau_{cw}(\theta)$ คือ พจน์

ของโมเมนต์ที่ช่วยชดเชยน้ำหนัก (counter weight) และ $J^T(\theta)h_e$ คือ พจน์ที่เกิดจากแรงภายนอกที่กระทำที่ตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์

จากสมการที่ (7) พบว่าสมการทางพลศาสตร์ของหุ่นยนต์ทั่วไปนั้นมีความซับซ้อนและต้องใช้ทรัพยากรในการคำนวณเป็นจำนวนมาก ซึ่งในการประยุกต์ใช้งานบางประเภทสามารถลดเวลาในการคำนวณได้โดยตัดสมการบางพจน์ที่มีผลกระทบน้อยทิ้งไปได้ ในบทความนี้ได้สมมติให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ช้า ๆ ทำให้สามารถตัดพจน์ $B(\theta)\ddot{\theta}$ และพจน์ $C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta}$ ได้ และสมมติว่าหุ่นยนต์เคลื่อนที่โดยไม่มีความเสียดทานทำให้สามารถตัดพจน์ $F_v\dot{\theta}$ และพจน์ $F_s \operatorname{sgn}(\dot{\theta})$ ได้ นอกจากนี้ยังไม่คิดแรงกระทำภายนอกที่กระทำที่ตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์ ดังนั้นจึงตัดพจน์ $J^T(\theta)h_e$ ได้ ซึ่งสุดท้ายจะทำให้สมการทางพลศาสตร์ของหุ่นยนต์เหลือดังแสดงในสมการที่ (8)

$$G(\theta) - \tau_{cw}(\theta) = \tau \quad (8)$$

2.4 การหาโมเมนต์เนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

เวกเตอร์ของแรงบิดเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก $G(q)$ สามารถหาได้ดังนี้ [21]

$$G_i = \sum_{p=i}^n -m_p g^T U_{pi} \bar{r}_p \quad \text{เมื่อ } i = 1, 2, 3, 4 \quad (9)$$

โดยที่

G_i คือ ค่าโมเมนต์เนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกที่กระทำต่อจุดหมุนที่ i เมื่อ $i = 1, 2, 3, 4$

m_p คือ มวลของลิงก์ที่ p เมื่อ $p = 1, 2, 3, 4$

g^T คือ เวกเตอร์ของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกเทียบกับพิกัดอ้างอิงที่ศูนย์ มีขนาดเท่ากับ g (m/s^2)

U_{pi} คือ สมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial Differentiation) ของเมทริกซ์การแปลง A_p^0 เทียบกับ θ_i

$\bar{r}_p = \begin{bmatrix} r_{x_p} & r_{y_p} & r_{z_p} \end{bmatrix}^T$ คือ เวกเตอร์ของตำแหน่งศูนย์กลางมวลของลิงก์ p เทียบกับแกนอ้างอิง $\{p\}$ เมื่อ $p = 1, 2, 3, 4$

เมื่อแทนค่าตัวแปรและทำการจัดรูปสมการใหม่ สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (10) – (13)

$$\begin{aligned} G_1 = & -m_1 g (c_1 r_{x_1} + s_1 r_{z_1}) - m_2 g (c_1 c_2 r_{x_2} + s_1 r_{y_2} + c_1 s_2 r_{z_2}) \\ & - m_3 g ((c_1 c_2 c_3 + s_1 s_3) r_{x_3} + c_1 s_2 r_{y_3} + (c_1 c_2 s_3 - s_1 c_3) r_{z_3} + d_3 c_1 s_2) \\ & - m_4 g (((c_1 c_2 c_3 + s_1 s_3) c_4 + c_1 s_2 s_4) r_{x_4} + (c_1 c_2 s_3 - s_1 c_3) r_{y_4} + ((c_1 c_2 c_3 + s_1 s_3) s_4 - c_1 s_2 c_4) r_{z_4} + d_3 c_1 s_2) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} G_2 = & -m_2 g (s_1 c_2 r_{x_2} - s_1 s_2 r_{z_2}) - m_3 g (-s_1 s_2 c_3 r_{x_3} + s_1 c_2 r_{y_3} - s_1 s_2 s_3 r_{z_3} + d_3 s_1 c_2 r_{z_3}) \\ & - m_4 g ((-s_1 s_2 c_3 c_4 + s_1 c_2 s_4) r_{x_4} - s_1 s_2 s_3 r_{y_4} - (s_1 s_2 c_3 s_4 + s_1 c_2 c_4) r_{z_4} + d_3 s_1 c_2) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} G_3 = & -m_3 g ((s_1 c_2 c_3 - c_1 s_3) r_{x_3} - (s_1 c_2 s_3 + c_1 c_3) r_{x_3}) \\ & - m_4 g ((-s_1 c_2 s_3 - c_1 c_3) c_4 r_{x_4} + (s_1 c_2 c_3 - c_1 s_3) r_{y_4} - (s_1 c_2 s_3 + c_1 c_3) s_4 r_{z_4}) \end{aligned} \quad (12)$$

$$G_4 = -m_4 g (((-s_1 c_2 c_3 + c_1 s_3) s_4 + s_1 s_2 c_4) r_{x_4} + ((s_1 c_2 c_3 - c_1 s_3) c_4 + s_1 s_2 s_4) r_{z_4}) \quad (13)$$

3. การพัฒนาส่วนเชื่อมต่อกับเกมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้สำหรับกิจกรรมกายภาพบำบัด

การนำเกมคอมพิวเตอร์มาใช้ร่วมกับหุ่นยนต์เพื่อใช้ในการฝึกกายภาพบำบัดเป็นอีกวิธีที่ได้รับความนิยม ซึ่งการเลือกเกมที่เหมาะสมจะทำให้ผู้ที่เข้ารับการฝึกกายภาพไม่รู้สึกเบื่อ ทั้งยังสามารถฟื้นฟูสมรรถภาพและฟื้นฟูกล้ามเนื้อได้ในระหว่างเล่นเกมได้อีกด้วย โดยเกมคอมพิวเตอร์ที่ใช้งานร่วมกับหุ่นยนต์เพื่อการกายภาพนั้นมี 2 วิธี คือ

3.1 เกมที่พัฒนาขึ้นมาเฉพาะหุ่นยนต์แต่ละตัวสำหรับการฟื้นฟูในรูปแบบต่าง ๆ [7], [16]

ข้อดีของวิธีนี้คือ หุ่นยนต์จะรู้ตำแหน่งที่แน่นอนและเส้นทางการเคลื่อนที่ที่แน่นอนของเกม ทำให้สามารถ

กำหนดตำแหน่งที่แน่นอนที่หุ่นยนต์ต้องเคลื่อนที่ไปได้ ซึ่งในการกรณีของการทำกายภาพบำบัดมีข้อดี คือ หากหุ่นยนต์กายภาพบำบัดมีมอเตอร์ช่วยในการเคลื่อนที่แล้ว หุ่นยนต์สามารถช่วยผู้ป่วยเคลื่อนที่เข้าหาเป้าหมายได้หากผู้ป่วยเคลื่อนที่ไปไม่ถึงเป้าหมาย แต่อย่างไรก็ตามวิธีนี้มีข้อเสียตรงที่การพัฒนาโปรแกรมเกมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้งานกับหุ่นยนต์มีความยุ่งยาก ซับซ้อน และต้องใช้เวลาในการพัฒนาค่อนข้างนาน

3.2 การใช้งานหุ่นยนต์ร่วมกับเกมที่มีอยู่แล้วในท้องตลาด

เกมคอมพิวเตอร์ที่มีอยู่แล้วในท้องตลาด หมายถึงเกมที่มีผู้พัฒนาไว้ก่อนแล้วเพื่อใช้เล่นกับเครื่องคอมพิวเตอร์ หรือบนโทรศัพท์มือถือประเภทสัมผัส

หน้าจอ (Smart phone หรือ Tablet) สามารถหาซื้อหรือดาวน์โหลดได้ทั่วไป ข้อดีของวิธีนี้คือผู้พัฒนาหุ่นยนต์ไม่ต้องเสียเวลากับการพัฒนาเกม ซึ่งทำให้ได้เกมที่มีกราฟิกที่ดีและรูปแบบการเล่นที่ดี นอกจากนี้ยังสามารถอัปเดตเกมใหม่ๆ ได้ตลอดเวลา แต่วิธีนี้ก็ยังมีข้อเสียตรงที่ไม่สามารถนำตำแหน่งเป้าหมายจากเกมมาใช้กับหุ่นยนต์ได้ ทำให้หุ่นยนต์ไม่รู้ตำแหน่งที่แน่นอนที่จะต้องเคลื่อนที่ไป ดังนั้น ผู้ป่วยที่ใช้งานหุ่นยนต์กายภาพบำบัดที่ประยุกต์ด้วยวิธีนี้ต้องมีสมรรถภาพทางร่างกายค่อนข้างดี คือสามารถเคลื่อนที่ได้ดีในระดับหนึ่ง

3.3 การประยุกต์ใช้งานหุ่นยนต์ CUREs ร่วมกับโปรแกรมเกมคอมพิวเตอร์

บทความนี้ได้ประยุกต์ใช้งานหุ่นยนต์กายภาพบำบัด CUREs ร่วมกับโปรแกรมเกมคอมพิวเตอร์ที่มีอยู่แล้วในท้องตลาด โดยเกมที่เลือกใช้ เป็นเกมที่อยู่บนโทรศัพท์มือถือประเภทสแน็ปหน้าจอ (Smart phone หรือ Tablet) และเป็นเกมที่ใช้เพียงนิ้วเดียวในการเล่น

ชุดหุ่นยนต์กายภาพบำบัด CUREs ประกอบไปด้วยแขนกลสำหรับกายภาพบำบัดพื้นฟูที่มีระบบคอมพิวเตอร์อยู่ภายใน และมีจอมอนิเตอร์ ซึ่งในการทดลองนี้ใช้จอทีวีขนาด 49 นิ้ว ซึ่งผู้ป่วยจะนั่งบนเก้าอี้หันหน้าเข้าหาหน้าจอ มอนิเตอร์ จากนั้นสวมใส่แขนกลและรัดแขนให้เรียบร้อย ดังแสดงในรูปที่ 4 เมื่อผู้ป่วยขยับแขนตนเองที่ติดอยู่กับแขนหุ่นยนต์ ตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์จะถูกส่งไปใช้ในการควบคุมตำแหน่งของเมาส์อีกทีหนึ่ง และหากผู้ป่วยกดปุ่มที่อยู่บนด้ามจับของหุ่นยนต์จะแทนการคลิกซ้ายของเมาส์ที่ตำแหน่งนั้น ๆ

เนื่องจากตำแหน่งปลายแขนที่หุ่นยนต์รับรู้ เทียบกับพิกัดอ้างอิงศูนย์ $\{0\}$ อยู่ในหน่วยเมตร (meter) แต่หน้าจอ มอนิเตอร์ที่ใช้ในการแสดงภาพนั้นอยู่ในหน่วยพิกเซล (pixel) และงานวิจัยนี้ใช้หน้าจอแสดงผลภาพเป็นแบบ 2 มิติ แต่หุ่นยนต์ CUREs เคลื่อนที่ใน 3 มิติ ดังนั้นจึงต้องมีการสอบเทียบ (Calibration) ระหว่างระบบพิกัดของหน้าจอ มอนิเตอร์และระบบพิกัดของหุ่นยนต์ก่อนนำมาใช้งาน โดยได้กำหนดให้พิกัดอ้างอิงที่ศูนย์ $\{0\}$ ของ

หุ่นยนต์มีแกน z_o พุ่งเข้าหาหน้าจอ มอนิเตอร์, แกน x_o อยู่ในแนวระดับและมีทิศทางเดียวกันกับแกน $Pixel_x$ ของหน้าจอแสดงผล และแกน y_o อยู่ในแนวดิ่งและชี้ในทิศทางเดียวกันกับแกน $Pixel_y$ ของหน้าจอแสดงผลดังแสดงในรูปที่ 5 ทำให้ตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์ที่จะนำมาควบคุมตำแหน่งของเมาส์เหลือเพียงแค่ (x_{EE}^0, y_{EE}^0)



รูปที่ 4 ภาพการประยุกต์ใช้งานหุ่นยนต์ CUREs ร่วมกับโปรแกรมเกมคอมพิวเตอร์ที่มีอยู่แล้วในท้องตลาด

การแปลงระหว่างตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์กับตำแหน่งของเมาส์ที่อยู่บนหน้าจอสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (14) โดยที่ฝั่งซ้ายของสมการเป็นตำแหน่งเมาส์ในหน่วยพิกเซล โดยทั่วไปพิกเซลที่ $(0,0)$ จะเริ่มจากมุมซ้ายบนของหน้าจอแสดงผล ความกว้างของหน้าจอเท่ากับ w พิกเซล และความสูงของหน้าจอเท่ากับ h พิกเซล และตำแหน่งของเมาส์แทนด้วย $(x, y)_{\text{cursor}}$ พิกเซล และฝั่งขวาของสมการเป็นการแปลงตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์โดยใช้ตำแหน่ง (x_{EE}^0, y_{EE}^0) เมตร, ค่า S_x และ S_y เป็นค่าที่ได้จากการสอบเทียบระหว่างความละเอียดของหน้าจอจะแสดงผลกับพื้นที่ทำงานของแขนผู้ป่วยที่สวมกับแขนกลที่สามารถเคลื่อนที่ได้, ค่า c_x และ c_y เป็นค่าที่ได้จากการสอบเทียบตำแหน่งศูนย์กลางของหน้าจอแสดงผลและตำแหน่งศูนย์กลางของการเคลื่อนที่ของแขนของผู้ป่วยที่สวมกับแขนกล, ค่า $w/2$ และ $h/2$ เป็นค่าจุดศูนย์กลางของหน้าจอแสดงผล

การหาสมการพลศาสตร์ (Dynamic model) ของหุ่นยนต์ ซึ่งความผิดพลาดในสมการพลศาสตร์มีสาเหตุหลัก ๆ มาจาก น้ำหนักและตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวลของชิ้นงานที่ ออกแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ไม่ตรงกันกับชิ้นงานที่ ทำขึ้นจริง แต่อย่างไรก็ตามจากการทดลองพบว่า สมการ ทางพลศาสตร์ที่หาได้ค่อนข้างใกล้เคียงกับของจริง ซึ่ง พิจารณาได้จากเมื่อใช้ระบบควบคุมเพื่อชดเชยน้ำหนัก แล้วผู้สวมใส่อันรู้สึกถึงน้ำหนักแขนของหุ่นยนต์มากขึ้นเมื่อ เทียบกับการไม่ใช้ระบบชดเชยน้ำหนักเลย, มีการ เคลื่อนที่ที่ราบเรียบ และไม่รู้สึกร่างแรงด้านที่ผิดปกติ นอกจากนี้ผู้วิจัยยังออกแบบให้มีการเพื่อน้ำหนักของแขน กลเล็กน้อยทำให้ในเวลาผู้สวมใส่ใช้งานจะรู้สึกสบายขึ้น เนื่องจากหุ่นยนต์ช่วยยกแขนด้วย

6. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากเงินทุนวิจัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย รหัสโครงการ IC-59-005-IC

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Hogan, H. I. Krebs, J. Charnnarong, P. Srikrishna and A. Sharon, "MIT-MANUS: a workstation for manual therapy and training. I," IEEE Proc. Intl. Workshop on Robot and Human Communication, pp. 161-165, Sept. 1992.
- [2] P. S. Lum, C. G. Burgar, P. C. Shor, M. Majmundar, and M. van der Loos, "Robot-assisted movement training compared with conventional therapy techniques for the rehabilitation of upper limb motor function after stroke," Arch. Phys. Med. Rehabil., vol. 83, pp.952-959, 2002.
- [3] S.E. Fasoli, et al., "Effects of robotic therapy on motor impairment and recovery in chronic stroke" ; Arch. Of Phys. Med. & Rehabil, vol.84, pp.477-482, 2003.
- [4] R. Loureiro, F. Amirabdollahian, M. Topping, B. Driessen and W. Harwin, "Upper Limb Robot Mediated Stroke Therapy – GENTLE/s Approach" Special Issue on Rehabilitation Robotics Journal of Autonomous Robots, 2003.
- [5] N.A. Bayona, J. Bitendky, K. Salter and R. Teasell, "The role of task-specific training in rehabilitation therapies," Top. Stroke Rehabil, vol. 12, no. 3, pp. 58-68, summer 2005.
- [6] P. Maciejasz, J. Eschweiler, K. Gerlach-Hahn, A. Jansen-Troy and S. Leonhardt, "A survey on robotic devices for upper limb rehabilitation." Journal of Neuroengineering and Rehabilitation, 2014, 11:3.
- [7] H. I. Krebs, J. J. Palazzolo, L. Dipietro, M. Ferraro, J. Krol, K. Ranekleiv, B.T. Volpe and N. Hogan, "Rehabilitation robotics: performance-based progressive robot-assisted therapy." Autonomous Robots 15, 2003.
- [8] C.G. Burgan, P.S. Lum, P.C. Shor and H.F. Machiel Van der Loos, "Development of robots for rehabilitation therapy: the Palo Alto VA/Stanford experience." J. Rehabil. Res. Dev., Vol. 37, no. 6, pp. 663-673, 2000.
- [9] R. Loureiro, F. Amirabdollahian, M. Topping, B. Driessen and W. Harwin, "Upper limb robot mediated stroke therapy – GENTLE/s approach." Autonomous Robots, vol. 15, no. 1, pp. 35-51, 2003.

- [10] J.C. Perry, J. Rosen and S. Burns, “*Upper-Limb powered exoskeleton design.*” IEEE/ ASME Transactions on Mechatronics, 2007, 12(4), 408-417.
- [11] T. Nef and R. Riener, “ARMin – Design of a novel arm rehabilitation robot.” 9th International Conference on Rehabilitation Robotics, June 28 – July 1, 2005, Chicago, IL, USA.
- [12] M. Mihelj, T. Nef, and R. Riener, “ARMin II – 7 DoF rehabilitation robot: mechanics and kinematics.” IEEE International Conference on Robotics and Automation, Roma, Italy, 10-14 April, 2007.
- [13] T. Nef, M. Guidali and R. Riener, “ARMin III – arm therapy exoskeleton with an ergonomic shoulder actuation.” Applied Bionics and Biomechanics, Vol. 6, No. 2, June, 2009, 127-142.
- [14] S.J. Ball, I.E. Brown and S.H. Scott, “MEDARM: a rehabilitation robot with 5DOF at the shoulder complex.” IEEE/ASME International Conference on Advanced intelligent mechatronics, 4-7 Sept., 2007.
- [15] A. Sutapun and V. Sangveraphunsiri, “A 4-DOF upper limb exoskeleton for stroke rehabilitation: kinematics mechanics and control,” *International of Mechanical Engineering and Robotics Research*, vol. 4, no. 3, 2015, pp.269-272.
- [16] D. GijBels, L. Lamers, L. Kerkhofs, G. Alders, E. Knippenberg and P. Feys, “The Arneo Spring as training tool to improve upper limb functionality in multiple sclerosis: a pilot study.” J Neuroeng Rehabil, vol. 8, no. 5, 2011.
- [17] L. Marchal-Crespo and D.J. Reinkensmeyer, “*Review of control Strategies for robotic movement training after neurologic injury.*” Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, 2009, 6:20.
- [18] A. Sutapun. and V. Sangveraphunsiri, “Dexterity measures for 4DOF Exoskeleton Robot,” *Applied Mechanics and Materials*, vol. 619, 2014, pp. 214 – 218.
- [19] W. Kitisomprayoonkul, P. Bhodhiassana and V. Sangveraphunsiri, “Upper Extremity Training with CUREs Robot in Subacute Stroke: A Pilot Study,” *Converging Clinical and Engineering Research on Neurorehabilitation II*, pp. 317-322, 2016.
- [20] J. J. Craig, “Introduction to Robotics: mechanics and control 3rd edition.” Pearson Education Inc., USA, 2005.
- [21] B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani and G. Oriolo, “Robotics: modeling, planning and control.” Springer-Verlag London Limited, London, 2009.
- [22] S.B. Niku, “Introduction to robotics: analysis, control, Applications – 2nd edition.” John Wiley & Sons Inc., USA, 2011.
- [23] วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ, อานันท์ สุตาพันธ์, ระบบหุ่นยนต์สำหรับสวมใส่ที่แขนแบบโครงร่าง 4 ข้อต่อที่มีชุดขดเชยน้ำหนัก, คำขอสิทธิบัตรเลขที่ 1601003553, 2559.

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิ (Reader)

ต้นฉบับบทความวิจัยที่ตีพิมพ์วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีที่ 12 ฉบับที่ 2 (เดือนกรกฎาคม – ธันวาคม พ.ศ. 2560) ได้รับการตรวจสอบแก้ไขจากผู้ทรงคุณวุฒิดังรายนามต่อไปนี้

- | | |
|---|---|
| 1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธีรภัทร หล้าบุญเรือง | ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงษ์ คงประเสริฐ | ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 3. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภรณ์ ศรีมรินทร์ | ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 4. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วุฒิพล ธาราธิระเศรษฐ์ | ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 5. ว่าที่ร้อยตรี ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภชัย สีนถาวร | ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 6. รองศาสตราจารย์ ดร.กัณวรัช พลุปราบชัย | ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 7. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันจิรา จัปศิลป์ | ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 8. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาคภูมิ ศรีมรินทร์ | ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 9. ผู้ช่วยศาสตราจารย์เกียรติชัย รักษาชาติ | ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 10. อาจารย์ ดร.อัมราพร บุญประเทือง | ภาควิชาวิศวกรรมชีวการแพทย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 11. อาจารย์ ดร.บุญชัย ผึ้งไผ่งาม | ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 12. รองศาสตราจารย์ ดร.วิโรจน์ ลิมตระการ | ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต |
| 13. รองศาสตราจารย์ ดร.กวิน สนธิเพิ่มพูน | ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยนเรศวร |
| 14. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรเมศวร์ พิริยะวัฒน์ | ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยบูรพา |
| 15. รองศาสตราจารย์ ดร.ประจวบ กล่อมจิตร | ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยศิลปากร |
| 16. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยวัฒน์ นุ่มทอง | ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรี
ราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา |
| 17. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภรัชชัย วรรัตน์ | สาขาวิชาการจัดการทางวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์ |

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิ (Reader)

ต้นฉบับบทความวิจัยที่ตีพิมพ์วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีที่ 12 ฉบับที่ 2 (เดือนกรกฎาคม – ธันวาคม พ.ศ. 2560) ได้รับการตรวจสอบแก้ไขจากผู้ทรงคุณวุฒิดังรายนามต่อไปนี้

- | | |
|--|---|
| 18. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อิทธิพล วรพันธ์ | สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา |
| 19. อาจารย์ ดร.กฤษ สมนึก | ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ |
| 20. รองศาสตราจารย์ ดร.เดชา พวงดาวเรือง | สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ |
| 21. รองศาสตราจารย์ ดร.อดิศักดิ์ กาญจนหลัทย | ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 22. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงษ์ อาริมิตร | ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น |
| 23. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรรณสิริ พันธุ์ไร | ภาควิชาวิศวกรรมโยธา และสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล |
| 24. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มงคล นามลักษณ์ | ภาควิชาครุศาสตร์โยธา
คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| 25. รองศาสตราจารย์ ดร.วรรณวิทย์ แต้มทอง | ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 26. อาจารย์ ดร.จตุรงค์ แป้นพงษ์ | สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก |
| 27. ดร.สุวัฒน์ วิวรรณภักทกิจ | สถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 28. ดร.นงศ์ ชลคุป | ห้องปฏิบัติการพลังงานทดแทน
ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ |
| 29. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภรินทร์ ไชยกลางเมือง | ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ |
| 30. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ | ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| 31. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ขวัญชัย จ้อยเจริญ | ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 32. รองศาสตราจารย์ ดร.ปฐมศก วิไลพล | ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยนเรศวร |
| 33. รองศาสตราจารย์ ดร.สมิทธิ์ เอี่ยมสอาด | สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร |

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิ (Reader)

ต้นฉบับบทความวิจัยที่ตีพิมพ์วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีที่ 12 ฉบับที่ 2 (เดือนกรกฎาคม – ธันวาคม พ.ศ. 2560) ได้รับการตรวจสอบแก้ไขจากผู้ทรงคุณวุฒิดังรายนามต่อไปนี้

- | | |
|---|---|
| 34. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จุฬารักษ์ เบญจปิยะพร | ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น |
| 35. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชินพัฒน์ บัวชาติ | ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ |
| 36. รองศาสตราจารย์ ดร.จรูญ รุ่งอมรรัตน์ | ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 37. รองศาสตราจารย์ ดร.สถาพร โภคา | ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี |
| 38. อาจารย์ ดร.ชาญยุทธ กาฬกาญจน์ | ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยบูรพา |
| 39. อาจารย์ ดร.วรุณศักดิ์ เลี่ยมแหลม | ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต |
| 40. อาจารย์อภัยธร ออกะลา | ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน |
| 41. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชีรวัฒน์ เหล่านากุล | ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น |
| 42. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติพงศ์ กิมะพงศ์ | ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 43. อาจารย์ ดร.จรวัยพร แสนทวีสุข | ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี |
| 44. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภวิทย์ ลวณะสกุล | ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 45. รองศาสตราจารย์ ดร.สินชัย ชินวรรณ | ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและอวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 46. อาจารย์ ดร.พงศกร บำรุงไทย | ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา |
| 47. อาจารย์ ดร. ภูมิพงศ์ สุทธิโสภณพันธ์ | สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น |
| 48. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นรารัตน์ เรืองชัยจุฑพร | ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น |
| 49. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาคม แก้วระวัง | ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น |
| 50. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กิตติพิชญ์ มีสวัสดิ์ | ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น |

คำแนะนำสำหรับผู้เขียนบทความลงตีพิมพ์
วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒจัดพิมพ์ปีละ 3 ฉบับ ฉบับที่ 1 ช่วงเดือน มกราคม – เมษายน ฉบับที่ 2 ช่วงเดือน พฤษภาคม – สิงหาคม และฉบับที่ 3 ช่วงเดือน กันยายน – ธันวาคม โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะให้เป็นการรวบรวมผลงานทางวิชาการ และงานวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ซึ่งบทความที่ได้รับการตีพิมพ์ทุกบทความจะผ่านความการพิจารณาและความเห็นชอบจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาที่เกี่ยวข้องและสงวนสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พุทธศักราช 2521 จัดส่งและเผยแพร่ตามสถาบันการศึกษาทั่วประเทศ

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 หรือดัดทอนผลงานวิจัยของผู้อื่นโดยที่ไม่ได้รับอนุญาต และมีการอ้างอิงที่เหมาะสม
- 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 ควรมีหัวข้อเรียงเรียงตามลำดับดังต่อไปนี้

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>

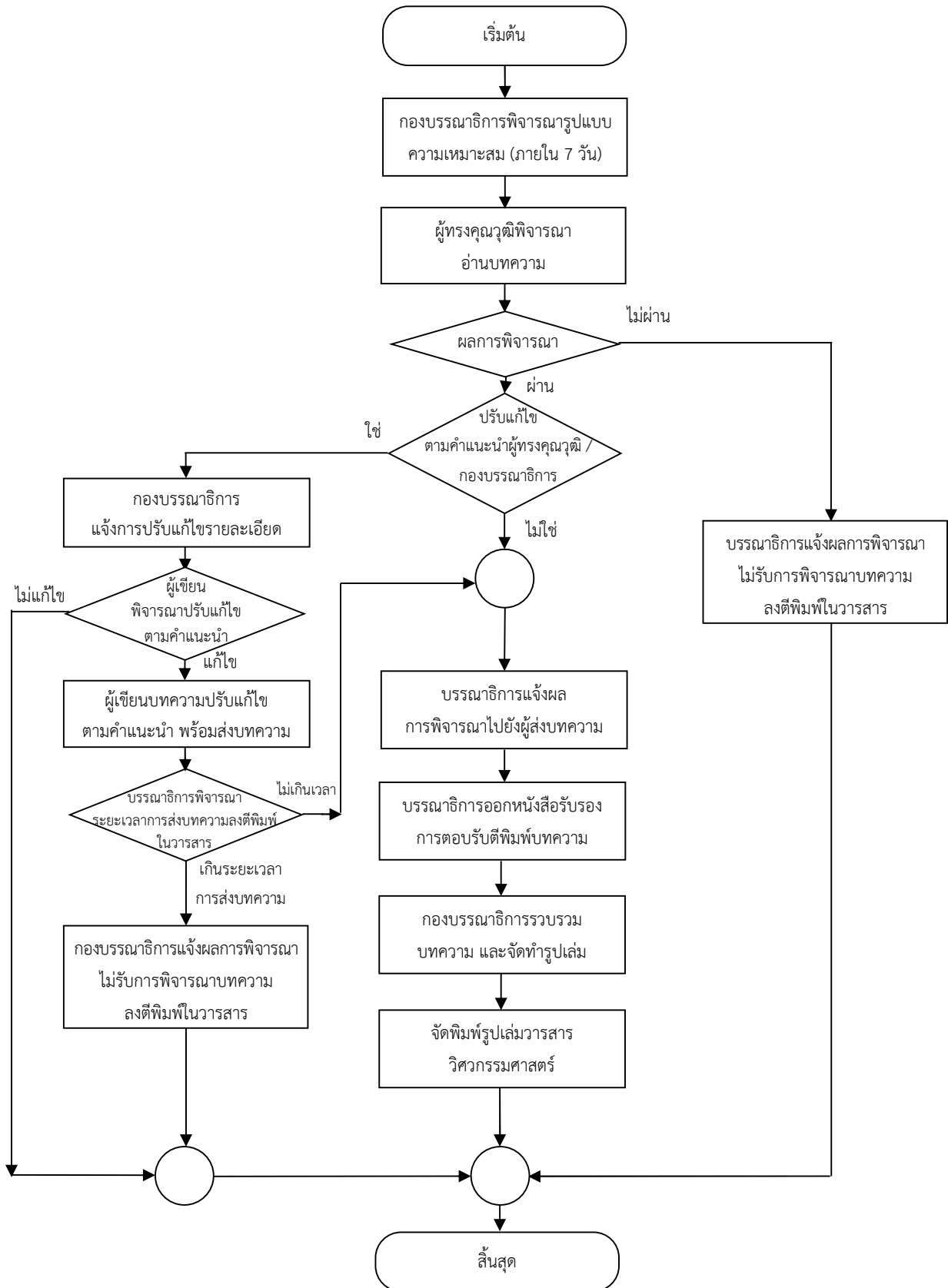
2. วิธีการส่งบทความ

- 1) ส่งต้นฉบับบทความ ไฟล์ Microsoft Word และ pdf พร้อมแนบไฟล์สแกนแบบเสนอผลงานวิชาการเพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
- 2) ส่งไฟล์ต้นฉบับทางออนไลน์ที่
<http://ejournals.swu.ac.th/index.php/SwuENGj/user/register>
หรือทางอีเมล JournalEngSWU@gmail.com, yupapomp@g.swu.ac.th
- 3) ดูข้อมูลวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒเพิ่มเติม และดาวน์โหลดแบบฟอร์มประกอบการส่งบทความ ได้ที่ <http://eng.swu.ac.th/re.html>
- 4) ชำระค่าธรรมเนียมเพื่อใช้เป็นค่าตอบแทนผู้ทรงคุณวุฒิ 2,000 บาท โดยโอน ทั้งนี้ การชำระค่าธรรมเนียม ไม่ได้เป็นการรับรองว่าบทความจะได้รับการตอบรับให้ตีพิมพ์

3. ขั้นตอนการประเมินบทความ

- การประเมินบทความวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ มีขั้นตอนดังนี้
- 1) การทบทวนโดยผู้รู้เสมอกัน (peer review) โดยผู้ทรงคุณวุฒิอย่างน้อยสองคนในสาขาที่เกี่ยวข้อง แบบอำพรางฝ่ายเดียว (single-blind)
 - 2) การเขียนตอบข้อซักถามและการแก้ไขปรับปรุงต้นฉบับตามข้อคิดเห็น (comments) ของผู้ทรงคุณวุฒิโดยผู้เขียน และการพิจารณาอีกครั้งโดยผู้ทรงคุณวุฒิคนเดิม หากผู้ทรงคุณวุฒิได้แจ้งความประสงค์ขอพิจารณาอีกครั้งไว้
 - 3) การประชุมกองบรรณาธิการเพื่อพิจารณาผลการทบทวนโดยผู้รู้เสมอกันจากผู้ทรงคุณวุฒิ และการแก้ไขปรับปรุงต้นฉบับ เพื่อตัดสินใจว่าจะตอบรับหรือไม่ในขั้นสุดท้าย
 - 4) สำหรับบทความที่ได้รับการตอบรับ กองบรรณาธิการจะพิจารณาความถูกต้องของรูปแบบเพื่อแจ้งผู้เขียนแก้ไข
 - 5) บรรณาธิการออกหนังสือรับรองการเผยแพร่ให้ผู้เขียน และมอบวารสารให้ผู้เขียนทุกคนคนละ 1 เล่ม เมื่อตีพิมพ์เผยแพร่เป็นรูปเล่มแล้ว โดยมอบไว้กับผู้เขียนหลัก

ขั้นตอนการพิจารณาผลงานเพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารคณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ





**แบบเสนอผลงานวิชาการเพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ**

เรียน บรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ข้าพเจ้า ☐ นาย ☐ นาง ☐ นางสาว ☐ อื่น ๆ (โปรดระบุ)

ชื่อ - สกุล

(ภาษาอังกฤษ).....

ตำแหน่งทางวิชาการ (โปรดระบุ) ☐ ศาสตราจารย์ ☐ รองศาสตราจารย์ ☐ ผู้ช่วยศาสตราจารย์

☐ อื่น ๆ (โปรดระบุ).....

ที่อยู่และหมายเลขโทรศัพท์ (ที่ติดต่อได้).....

โทรศัพท์ที่ทำงาน..... โทรศัพท์มือถือ.....

โทรสาร..... อีเมล.....

มีความประสงค์ขอส่งบทความ เรื่อง :

ชื่อผลงาน (ภาษาไทย)

ชื่อผลงาน (ภาษาอังกฤษ)

ประเภทของผลงานวิชาการ

☐ บทความรับเชิญ ☐ บทความวิจัย ☐ บทความวิชาการ

พร้อมกันนี้ ได้แนบเอกสาร ☐ ต้นฉบับบทความเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ในวารสาร จำนวน 3 ชุด
☐ แบบเสนอผลงานวิชาการ (JournalEngSWU-03) จำนวน 1 แผ่น
☐ ซีดีบันทึกข้อมูลการพิมพ์บทความในรูปแบบไฟล์ Microsoft Word จำนวน 1 แผ่น

ในกรณีที่ไม่สามารถติดต่อข้าพเจ้าได้ กองบรรณาธิการสามารถติดต่อบุคคลดังต่อไปนี้

ชื่อ - สกุล.....

โทรศัพท์..... โทรสาร

อีเมล..... มีความเกี่ยวข้องเป็น.....

ข้าพเจ้าขอรับรองว่าผลงานนี้ ☐ เป็นผลงานของข้าพเจ้าเพียงผู้เดียว
☐ เป็นผลงานของข้าพเจ้าและผู้ที่เกี่ยวข้องในผลงาน

ผลงานนี้ยังไม่เคยลงตีพิมพ์ในวารสารใดมาก่อน และจะไม่นำไปเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารอื่นๆ อีก นับจากวันที่ข้าพเจ้าได้ส่งผลงานต้นฉบับนี้มายังกองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ลายมือชื่อ.....

(.....)

เจ้าของผลงาน



คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
เลขที่ 63 หมู่ 7 ถนนรังสิต - นครนายก อำเภองครักษ์ จังหวัดนครนายก 26120
โทร 0 2649 5000 ต่อ 27073 22010 22011 โทร 0 3732 2602
<http://eng.swu.ac.th>

บทความวิจัย

- การใช้พลังงานไฟฟ้าของโรงสีข้าวขนาดกลางในเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ
Electrical Energy Consumption of Medium Scale Rice Mills in the Northeast of Thailand
โดย อนุวัฒน์ ภาชนะวรรณ สมชาย ขวนอุดม ขวัญตรี แสงประชานารักษ์ เสรี วงศ์พิเชษฐ
- สมบัติเชิงกลของไม้ไผ่ 5 ชนิด ที่ผ่านการอบแห้ง
Mechanical Properties of Five Species Dried Bamboo
โดย ธวัชชัย อุ้นใจจอม นฤมล มณีอินตา วรวัฒน์ ปัญญาคำ
- การหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะของอีเจ็คเตอร์กับเงื่อนไขการทำงานและรูปร่างของอีเจ็คเตอร์โดยใช้วิธีแบบโครงร่างพื้นผิว
Determining the Corresponding Equations between Ejector Performance and Operating Conditions and Ejector Geometries by Using Response Surface Methodology
โดย วีระพันธ์ สีหามาน กุลเชษฐ์ เพียรทอง ชญานนท์ แสงมณี
- การดูดซับน้ำมันหล่อเย็นจากกระบวนการตัดกลึงโลหะโดยใช้ขาน้อยดัดแปรเป็นตัวดูดซับ
Adsorption of Cutting Fluid from Turning Process by Using Modified Sugarcane Bagasse as Adsorbent
โดย อัญญิกา ประนัสดา วรัญญา แซ่มปรีชา และโกวิทย์ ปิยะมั่งคณา
- การวิเคราะห์ทางสถิติศาสตร์ของโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงท่งยางสำหรับเก็บของเหลวภายใต้แรงดันน้ำสถิตสูงมาก
Static Analysis of Fluid-Filled Toroidal Shell under High Hydrostatic Pressure
โดย วีรพันธุ์ เจียมมีปรีชา กมล ตรีมอง จิระยุทธ สืบสุข
- The optimization of Biodiesel production from Brassica carinata using ultrasonic irradiation-assisted by response surface methodology
By Sonesakst Niempaseuth, Prachasanti Thaiyasuit, Kulachate. Pianthong and Wirapan Seehanam
- ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาธรรมชาติในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วของเหง้ามันสำปะหลังในเครื่องปฏิกรณ์แบบตกอิสระ
Effect of Natural Catalysts in Fast Pyrolysis of Cassava Rhizome in a Free - Fall Reactor
โดย นิกรศิลป์ บุญสมบัติ อติศักดิ์ ปัตติยะ
- การประยุกต์ Axiomatic Design และเมทริกซ์ข้อจำกัดในกระบวนการออกแบบเชิงวิศวกรรม
An Application of Axiomatic Design and Constraints Relation Matrix in Engineering Design Process
โดย ศักดิ์ฤทธิ์ พรหมสัย ณัฐวุฒิ จันทพรทอง
- การวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว
Large Signal Stability Analysis of Three-Phase Bridge Rectifier with Constant Power Loads
โดย อภิชัย สุษะพันธ์ กองพันธ์ อารีรักษ์ และกองพล อารีรักษ์
- การทดสอบภาคสนามการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานจากผลตอบสนองความถี่ของรถยนต์นั่งส่วนบุคคล
Field Verification of Bridge Natural Frequency Identification from Acceleration Response of Passenger Car
โดย อธิวัฒน์ มณีรัตน์โรจน์ พัทธพงษ์ อาสนจินดา
- การพัฒนาเอลิเมนต์โครงข้อแข็งสำหรับการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ไม่เชิงเส้นของผนังรับแรงเฉือนคอนกรีตเสริมเหล็กโดยพิจารณาการเสียรูปจากแรงเฉือน
DEVELOPMENT OF FRAME ELEMENT FOR NONLINEAR FINITE ELEMENT ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE SHEAR WALLS CONSIDERING SHEAR DEFORMATION
โดย ธรรมกร ภักดิ์พิบูล ภาณุวัฒน์ จ้อยกัลดี
- พฤติกรรมโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของการเชื่อมเสียดทานกวนแบบจุดของแผ่นอลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็งต่างชนิด SSM2024 และ SSM6061
Microstructural Behavior and Mechanical Properties of Friction Stir Spot Welding of Dissimilar Aluminum Semi Solid Casting Sheets SSM2024 and SSM6061
โดย วรพงศ์ บุญช่วยแทน วรธนพร ชีววุฒิพงศ์ และรอมฎอน บุระพา
- การพัฒนาอุปกรณ์สำหรับปรับมุมพิทช์ของใบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบแกนนอนขนาดเล็ก
Development of Blade Pitch Angle Adjustment Device for Small Horizontal Axis Wind Turbine
โดย บัญญัติ นิยมवास อธิราช ภัทราภรณ์ อภิชาติ ศรีไชยรัตน์
- การปรับเทียบอัตโนมัติของแบบจำลองแท็งก์โดยใช้ Microsoft Excel Solver
Automatic Calibration of Tank Model Using Microsoft Excel Solver
โดย สิชชัย วัชรพันธ์ ชัยวัฒน์ เอกวัฒน์พานิชย์ ดวงฤดี โฆษิตกิตติวงศ์ เสฎฐา ศาสนนันท์
- The GUI-MATLAB based Simulation Program for Principle of Communication System Course
By Pinit Nuangpirom Kanokwan Ruangsiri and Somsak Akatimagool
- การศึกษาเปรียบเทียบกระบวนการอิวิริสติกส์ในการจัดการการขนส่งสำหรับโรงงานเคมีศึกษาโรงงานจำหน่ายอุปกรณ์ระบบงานไฟฟ้า
โดย นฤมล ไชยโคตร ภารปภากร อธิชญาพันธ์ รัตติรัตน์ กิตติปัญญาพัฒน์ สิริเดช ขาดินิยม

บทความวิชาการ

- หุ่นยนต์แบบโครงร่างสำหรับแขนท่อนบนกับกิจกรรมการกายภาพบำบัดเพื่อการฟื้นฟูสมรรถภาพผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมอง
โดย อานันท์ สุตาพันธ์ วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ