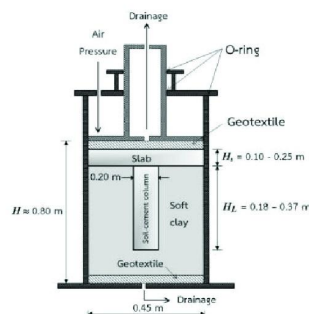
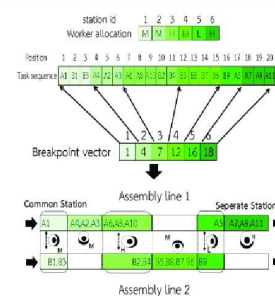
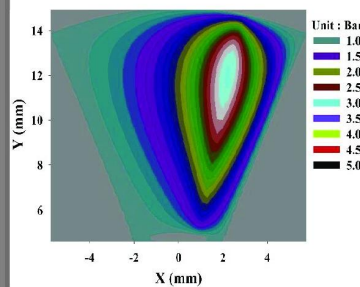




วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

SRINAKHARINWIROT ENGINEERING JOURNAL ปีที่ 13 ฉบับที่ 2 เดือนพฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2561



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	บุญวานิชกุล	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงษ์	คงประเสริฐ	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาคภูมิ	ศรีรมรินทร์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันจิรา	จับศิลป์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
อาจารย์ ดร.สุธิดา	ทีปักษ์พันธุ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ศาสตราจารย์ ดร.ทนงเกียรติ	เกียรติศิริโรจน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศาสตราจารย์ ดร.อภิรัฐ	ศิริธราธิวัตร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์	เดชะอำไพ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ์	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

บทบรรณาธิการ

ปัจจุบันนี้เป็นที่พูดถึงกันมากว่า ประเทศไทยกำลังเข้าสู่สังคมที่มีจำนวนคนชราเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่คนในวัยทำงานจะมีจำนวนน้อยลงอย่างขาดสมดุล สาเหตุเนื่องมาจากการลดลงของอัตราการเกิด ซึ่งคาดการณ์ว่าจะส่งผลกระทบมากกว่าหนึ่งด้าน 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

บทความวิจัย

การลดการประสานสัมพันธ์ที่ผิดพลาดของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบมีทิศทางด้วยขั้นตอนวิธีมีมิติก	1
Miscoordination Reduction of Directional Overcurrent Relay by Memetic Algorithm	
วิวัฒน์ ทิพจร อนุสรณ์ ยอดใจเพชร สมนึก หม่อไ้ปะกู่ เฉลิมวุฒิ แก้วตา	
การวิเคราะห์เสถียรภาพวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าเมื่อต่อกับวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ในระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์	12
Stability Analysis of a Power-switching Converter with an EMI Filter for PV Systems	
สันติชัย บุญเรือง วุฒิพล ธาราธิรเศรษฐ์	
อัลกอริธึมอิงกระแสสำหรับการตามรอยจุดกำลังสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ	23
Current Based Algorithm for the Maximum Power Point Tracking of Stand-alone Photovoltaic System	
ชวริย์ เกื่อนพังเทียม กองพันธ์ อารีรักษ์ กองพล อารีรักษ์	
การเปรียบเทียบโครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสำหรับการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้า	38
กระแสสลับ	
The Comparison of Shunt Active Power Filter Structure for the Harmonic Elimination in AC-Electric Railway Systems	
ฐานันดร ตรึงใจ ทศพร ณรงค์ฤทธิ์ กองพล อารีรักษ์	
การประยุกต์ใช้วิธีวิวัฒนาการด้วยผลต่างเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาหลายวัตถุประสงค์ที่มีค่าต่อเนื่อง	52
Application of Differential Evolutionary Algorithm to Compare the Performance of Continuous Multi-Objective Problem Optimization	
ตรัยรัตน์ เกิดโภคทรัพย์ ปารเมศ ชูติมา	
Balancing Coffee Kit Assembly Line: a Case Study of a Sample Factory	72
Paiboon Yamphuan	
การประยุกต์ใช้วิธีเชิงวิวัฒนาการแบบมาวต์ดูละสงค์สำหรับการจัดสมดุลคู่สายการประกอบรูปตัวยู	80
Application of Many-Objective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition for Double U-Shaped Assembly Line Balancing	
สุชานันท์ ดันชนะประดิษฐ์ ปารเมศ ชูติมา	
การทดสอบในห้องปฏิบัติการด้วยแบบจำลองเพื่อตรวจสอบพฤติกรรมการยุบตัวของดินเหนียวที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึกกับแผ่นพื้นดินซีเมนต์	97
Laboratory Model Testing for Investigating the Consolidation Behavior of Soft Clayey Deposit Improved by a Floating Soil-Cement Column with a Cement Stabilized Slab	
สุธี ปิยะพิพัฒน์ ศุภสิทธิ พงศ์วิระสถิตย์	

สารบัญ

บทความวิจัย (ต่อ)

- ผลของตัวทำละลายที่ใช้เตรียมเหง้ามันสำปะหลังต่อผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว 106
Influence of Solvents Used for Cassava Rhizome Pretreatment on Fast Pyrolysis Products
กฤษฎา ลำพองชาติ นวนค์ ชลคุป อติศักดิ์ ปัตติยะ
- พฤติกรรมการหล่อลื่นของร่องลื่นกันรุนอากาศแบบแผ่นเอียงและแผ่นเรียบ 118
Behavior of Lubrication in Tapered-land Type Air Thrust Bearing
สรวิศ โชติวิสุทธิ์ เจษฎา พานิชกรณ์ ขนิษฐา วงษ์สีดาแก้ว
- การวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยันปัจจัยความสำเร็จโครงการการจัดซื้อจัดจ้างก่อสร้างภาครัฐ 131
A Confirmatory Factors Analysis of the Success factors on Government Construction
Procurement Project
ธนายุทธ ไชยธรรตน์ ณรงค์ เหลืองบุตรนาค พิรินธิ อักษร
- การประเมินเทคนิคการประมาณค่าฝนร่วมกับข้อมูลแผนที่ภูมิประเทศเชิงตัวเลขในลุ่มน้ำตาปี 141
Assessment an Areal Rainfall Technique with Digital Elevation Model Data in Tapi Basin
ฐาปนีย์ มีขำนาญ ธเนศร์ สมบูรณ์ วิษุวัตม์ แต่สมบัติ

บทความวิชาการ

- การทบทวนวิธีวินิจฉัยข้อบกพร่องในระบบควบคุมพลวัต 153
A Review of Fault Diagnosis in Dynamic Control Systems
เจษฎา สายใจ เฉลิมภักดิ์ พองสมุทร
- บทความวิชาการ: การประยุกต์ใช้การอบแห้งแบบกระแสน้ำวนสำหรับวัสดุทางการเกษตรในประเทศไทย 166
A review: Application of Impinging Stream Drying Process for Agricultural Products in Thailand
ปราชญา ตรีสุทธาชีพ กิตติ สถาพรประเสริฐ
- Studying College Lifestyles Affected by ICT 181
Achara Suksakorn Aukkara Sodok Palida Chawiang Arnon Tubtiang

การลดการประสานสัมพันธ์ที่ผิดพลาดของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบมีทิศทางด้วย ขั้นตอนวิธีมีมติก

Miscoordination Reduction of Directional Overcurrent Relay by Memetic Algorithm

วิวัฒน์ ทิพจรรย์* อนุสรณ์ ยอดใจเพชร สมนึก หม่อโป๊ะกู๋ เฉลิมวุฒิ แก้วตา

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย

Wiwat Tippachon* Anusorn Yodjaiphet Somnuek Morpoku Chalermwut Keawta

Department of Electrical Engineering Rajamangala University of Technology Lanna Chiangrai

*Corresponding author: Email: wiwat@rmutl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการจัดลำดับความสัมพันธ์ของรีเลย์กระแสเกินแบบมีทิศทางด้วยเทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุดโดยใช้ขั้นตอนวิธีมีมติกซึ่งเป็นการผสมรวมกันระหว่างวิธีเชิงพันธุกรรมและชัฟเฟิลฟรอกลิปปิง บทความนี้ยังได้นำเสนอสมการวัตถุประสงค์ใหม่แบบไม่มีเงื่อนไขบังคับเพื่อลดการประสานสัมพันธ์ที่ผิดพลาดของรีเลย์หลักและรีเลย์สำรองเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นที่จุดใกล้และจุดไกล วิธีการที่นำเสนอถูกนำไปทดสอบกับระบบไฟฟ้า 3 บัส และ 6 บัส ผลการทดสอบพบว่าในระบบ 3 บัสเวลาการประสานสัมพันธ์ลดลง และในระบบไฟฟ้า 6 บัสพบว่าสมการวัตถุประสงค์ที่นำเสนอสามารถลดการประสานสัมพันธ์ที่ผิดพลาดของรีเลย์เมื่อกระแสลัดวงจรเกิดขึ้นที่จุดไกลจาก 8 จุดเหลือ 2 จุด และพบว่าในการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีมีมติกมีประสิทธิภาพและหาค่าผลเฉลยได้ดีกว่าวิธีเชิงพันธุกรรมและชัฟเฟิลฟรอกลิปปิง

คำสำคัญ: การประสานสัมพันธ์ของรีเลย์ รีเลย์กระแสเกินแบบมีทิศทาง การหาค่าเหมาะสมที่สุด ขั้นตอนวิธีมีมติก ขั้นตอนวิธีชัฟเฟิลฟรอกลิปปิง ลูกผสม

ABSTRACT

This paper presents coordination of directional overcurrent relays by optimization technic using memetic algorithm, combined with genetic algorithm and shuffled frog leaping algorithm. In addition, this paper proposes a new unconstrained objective equation to reduce miscoordination of main and backup relays, considered near and far-end faults. The proposed method is implemented in two different test cases, three and six bus network. The results show that, in the case of the 3 bus system, the discrimination times are decreased. And in the case of the 6-bus system, the proposed objective equation can reduce miscoordination, at the far-end fault, from 8 points to 2 points. It is found that the effectiveness and superiority of the memetic algorithms compared with the performance of genetic and shuffled frog leaping algorithm.

Keyword: Relay coordination, directional overcurrent relay, optimization, memetic algorithm, shuffled frog leaping algorithm, hybrid.

1. บทนำ

อุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้ากำลังมีหน้าที่สำคัญคือ ตรวจสอบความผิดปกติในระบบไฟฟ้าและแยกส่วนที่เกิดความผิดปกติออกจากระบบเพื่อให้กระทบกับระบบโดยรวมน้อยที่สุด รีเลย์ป้องกันกระแสเกิน เป็นรีเลย์ใช้งานง่าย ราคาไม่แพงจึงถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการป้องกันสถานี ระบบจำหน่าย และระบบส่งกำลังไฟฟ้า รีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบมีทิศทางนั้นเป็นรีเลย์ที่ตอบสนองต่อทิศทางการไหลกระแสลัดวงจรที่แตกต่างกัน [1]

การประสานสัมพันธ์ของรีเลย์กระแสเกินแบบมีทิศทางในระบบไฟฟ้าคือการปรับตั้งเวลาการทำงาน (TSM) และปรับตั้งกระแสเริ่มต้น (PS) ของรีเลย์แต่ละตัวให้ทำงานประสานกันเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้น รีเลย์ที่ถูกกำหนดให้เป็นรีเลย์หลักต้องทำงานก่อนแต่หากรีเลย์หลักไม่ทำงานในช่วงเวลาที่กำหนด รีเลย์สำรองต้องทำหน้าที่แทน ในระบบไฟฟ้ารีเลย์แต่ละตัวถูกกำหนดให้ทำหน้าที่ทั้งรีเลย์หลักและรีเลย์สำรองซึ่งต้องทำงานประสานกับรีเลย์ที่อยู่ข้างเคียง ดังนั้นในระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่การตั้งค่าให้รีเลย์ทั้งหมดให้ประสานสัมพันธ์กันอย่างถูกต้องจึงมีความซับซ้อนมาก [2]

ที่ผ่านมาการแก้ปัญหาการประสานสัมพันธ์รีเลย์กระแสเกินโดยใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุด (Optimization) ซึ่งคำนวณหาค่าผลรวมที่น้อยที่สุดของเวลาการทำงานของรีเลย์กระแสเกินแบบมีทิศทางทั้งหมดในระบบ โดยพิจารณาจุดลัดวงจรเพียงจุดเดียว [2][3][4] และต่อมาได้มีผู้นำเสนอการประสานสัมพันธ์รีเลย์โดยพิจารณาการลัดวงจรสองจุดคือจุดใกล้กับรีเลย์ (Close-in fault) และจุดไกล (Far-bus fault) [5] แต่งานวิจัยดังกล่าวใช้สมการวัตถุประสงค์แบบมีเงื่อนไขบังคับ (Constrain) ซึ่งมีข้อเสียหลายอย่างเช่น หากเงื่อนไขบังคับไม่สมบูรณ์ทำให้หาผลเฉลยไม่ได้ [6] และหากประชากรเริ่มต้นไม่อยู่ในขอบเขตเงื่อนไขบังคับจะถูกคัดออกทำให้ไม่ได้รับการปรับปรุงหรือพัฒนาให้เป็นประชากรรุ่นใหม่ที่ดีขึ้น

การประสานสัมพันธ์รีเลย์กระแสเกินด้วยวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดโดยไม่มีเงื่อนไขบังคับได้ถูกนำเสนอใน

[7][8] แต่ยังมีปัญหาการเลือกผลเฉลยที่ไม่ได้ประชากรที่มีค่าความเหมาะสมที่สุด ต่อมาได้นำเสนอการปรับปรุงสมการวัตถุประสงค์ให้เลือกได้ถูกต้องมากขึ้น โดยทำให้ค่าความเหมาะสมมีค่ามากเมื่อความแตกต่างเวลาการในการประสานสัมพันธ์เป็นค่าลบ [9] อย่างไรก็ตามสมการวัตถุประสงค์ดังกล่าวพิจารณาจุดกระแสลัดวงจรที่จุดใกล้เพียงจุดเดียว ซึ่งทำให้รีเลย์มีการประสานสัมพันธ์ที่ผิดพลาดเมื่อเกิดลัดวงจรที่จุดไกล

วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดเพื่อแก้ปัญหาการประสานสัมพันธ์ของรีเลย์กระแสเกินแบบมีทิศทางนั้นมีผู้นำเสนอการใช้ขั้นตอนวิธี (algorithms) หลายแบบเช่น การใช้วิธีการโปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming) [10][11] โปรแกรมเชิงวิวัฒนาการ (Evolutionary Programming) [9] การหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization) [12][13] ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) [9][14] การค้นหาสิ่งมีชีวิตชีวภาพ (Symbiotic Organism Search) [15] วิธีการค้นหาความบรรสาน (Harmony Search) [16]

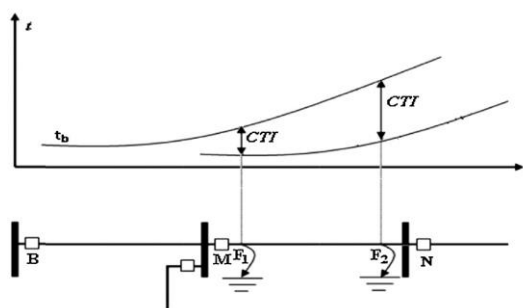
บทความนี้นำเสนอ สมการวัตถุประสงค์ใหม่แบบไม่มีเงื่อนไขบังคับ ในการประสานสัมพันธ์ของรีเลย์กระแสเกินด้วยวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุด โดยพิจารณาจุดลัดวงจรจุดใกล้ และจุดไกล เพื่อลดการประสานสัมพันธ์ที่ผิดพลาดเมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นทั้งสองกรณี โดยใช้วิธีการผสมผสานระหว่างวิธีพันธุกรรม และวิธีซัพเฟลพรอกลิปปิงหรือเรียกว่าวิธีมีมติก [17] ซึ่งนำข้อดีของวิธีการซัพเฟลพรอกลิปปิงที่มีความสามารถในการค้นหาเฉพาะที่ได้ดีเสริมเข้ากับวิธีพันธุกรรมที่ง่ายและรวดเร็วเพื่อหาคำตอบที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

2. วิธีดำเนินการ

2.1 การประสานสัมพันธ์รีเลย์กระแสเกินแบบมีทิศทาง

รูปที่ 1 แสดงการประสานสัมพันธ์กันระหว่างรีเลย์กระแสเกิน โดยกำหนดให้รีเลย์ที่จุด M เป็นรีเลย์หลักและรีเลย์ที่จุด B เป็นรีเลย์สำรอง เมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นรีเลย์

หลักต้องทำงานก่อน ในกรณีที่รีเลย์หลักไม่ทำงานในเวลาที่กำหนด รีเลย์สำรองต้องทำหน้าที่แทน การปรับตั้งรีเลย์กระแสเกินแต่ละตัวนั้นต้องปรับตั้งสามตัวแปร คือการเลือกเส้นโค้งของรีเลย์(Char) ปรับตั้งค่าตัวคูณเวลา (TSM) และค่ากระแสเริ่มต้น (PS) ช่วงระยะห่างเวลาที่กำหนดเรียกว่าเวลาในการประสานสัมพันธ์(CTI)



รูปที่ 1 การประสานสัมพันธ์ของรีเลย์กระแสเกิน[18]

สมการวัตถุประสงค์แบบไม่มีเงื่อนไขบังคับ[9] ซึ่งได้แก้ไขข้อผิดพลาดของแบบมีเงื่อนไขบังคับโดยรวมเงื่อนไขบังคับเข้าไปในสมการวัตถุประสงค์ดังแสดงในสมการที่ (1) คือ

$$OF = \alpha_1 \sum_{i=1}^N (t_i)^2 + \alpha_2 \sum_{j=1}^M (\Delta t_{mbj} - \beta_1 (\Delta t_{mbj} - |\Delta t_{mbj}|))^2 \quad (1)$$

เมื่อ t_i คือเวลาการทำงานของรีเลย์ตัวที่ i

$\Delta t_{mbj} = t_{bj} - t_{mj} - CTI$ คือช่วงเวลาของการประสานงานระหว่างรีเลย์

t_{mj} และ t_{bj} คือเวลาทำงานของรีเลย์หลักและรีเลย์สำรองเมื่อเกิดลัดวงจรกรณี F_1 ที่จุด j

α_1 , α_2 และ β_1 คือค่าคงที่ถ่วงน้ำหนัก

N คือ จำนวนรีเลย์

M คือจำนวนคู่ของรีเลย์หลักและรีเลย์สำรอง

เวลาในการทำงานของรีเลย์หาได้จากสมการที่ (2)

$$t = TMS \left(\frac{K}{(I_{SC} / I_P)^\alpha - 1} + L \right) \quad (2)$$

เมื่อ I_{SC} คือค่ากระแสลัดวงจร I_P คือค่ากระแสเริ่มต้นของรีเลย์ K, α, L เป็นค่าเฉพาะของรีเลย์แต่ละลักษณะดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณลักษณะของรีเลย์กระแสเกิน [6]

No.	type	standard	K factor	α factor	L factor
1	Short Time	AREVA	0.05	0.04	0
2	Standard	IEC	0.14	0.02	0
3	Very	IEC	13.5	1	0
4	Extremely	IEC	80	2	0
5	Long Time	IEC	120	1	0
6	Moderately	ANSI/IEEE	0.0515	0.02	0.114
7	Very	ANSI/IEEE	19.61	2	0.491
8	Extremely	ANSI/IEEE	28.2	2	0.1217

เมื่อพิจารณาสมการที่ (1) แล้วพบว่าเป็นการพิจารณาจุดลัดวงจรที่จุด F_1 เท่านั้น ดังนั้นเพื่อให้ การประสานสัมพันธ์ที่มีการพิจารณาจุดลัดวงจรทั้งสองจุด สมการวัตถุประสงค์ใหม่ที่สมบูรณ์คือการเพิ่มเทอมที่สามเข้าไปในการพิจารณาจุดลัดวงจรที่จุด F_2 แสดงดังสมการที่ (3)

$$OF = \alpha_1 \sum_{i=1}^N (t_i)^2 + \alpha_2 \sum_{j=1}^M (\Delta t_{mbj|F_1} - \beta_1 (\Delta t_{mbj|F_1} - |\Delta t_{mbj|F_1}|))^2 + \alpha_2 \sum_{j=1}^M (\Delta t_{mbj|F_2} - \beta_2 (\Delta t_{mbj|F_2} - |\Delta t_{mbj|F_2}|))^2 \quad (3)$$

เมื่อ $\Delta t_{mbj|F_1} = t_{bj|F_1} - t_{mj|F_1} - CTI$ คือช่วงเวลาของการประสานงานระหว่างรีเลย์หลักและสำรองกรณี F_1 ที่จุด j และ $\Delta t_{mbj|F_2} = t_{bj|F_2} - t_{mj|F_2} - CTI$ คือช่วงเวลาของการประสานงานระหว่างรีเลย์หลักและสำรองกรณี F_2 ที่จุด j

จากสมการที่ (3) เทอมที่หนึ่งเป็นผลรวมเวลาของรีเลย์ทั้งหมด เทอมที่สองและสามเป็นการเช็คการประสานสัมพันธ์ระหว่างรีเลย์หลักและรีเลย์สำรอง กรณี $\Delta t_{mbj|F_1}$ และ $\Delta t_{mbj|F_2}$ มีค่าเป็นบวกคือการประสานสัมพันธ์ถูกต้องเทอมที่สองและสามมีค่าเท่ากับ $\Delta t_{mbj|F_1}$ และ

$\Delta t_{mbj|F_2|}$ แต่หากมีค่าเป็นลบผลลัพธ์ของเทอมที่สองมีค่าเป็น $(1+2\beta_1)(\Delta t_{mbj|F_1|})$ และเทอมที่สามมีค่าเป็น $(1+2\beta_2)(\Delta t_{mbj|F_2|})$ ดังนั้นหากค่าคงที่ β_1 และ β_2 เป็นบวกทำให้ผลของสมการวัตถุประสงค์มีค่าสูง ซึ่งทำให้ไม่ถูกเลือกในกระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุด

2.2 การใช้มีติดกอัลกอริทึมในการประสานสัมพันธ์รีเลย์กระแสเกินแบบมีทิศทาง

ในการศึกษาครั้งนี้เสนอวิธีการประสานสัมพันธ์รีเลย์กระแสเกินแบบมีทิศทาง โดยใช้เทคนิคซัพเฟิลพรอกลิปปีง(SFL) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการค้นหาค่าเฉพาะที่ (Local Search) ของเจเนติกอัลกอริทึม(GA)[19] หรือเรียกว่า มีติดกอัลกอริทึม(MA)[17] โดยมีลำดับขั้นตอนแสดงในรูปที่ 2

แผนผังการทำงานของ MA ในรูปที่ 2 สามารถอธิบายได้ตามขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 เริ่มต้นสร้างประชากรด้วยการสุ่ม โดยกำหนดให้แต่ละโครโมโซมประกอบด้วยค่าปรับตั้งรีเลย์ทั้งหมด โดยการปรับตั้งรีเลย์แต่ละตัว (R_i) ประกอบด้วยสามตัวแปรคือ ตัวคูณเวลา(TMS) กระแสเริ่มต้น(PS) และลักษณะของเส้นเค้งการทำงาน(Char) ค่าเริ่มต้นจากตัวแปรทั้งสามหาได้จากสมการที่ (4)

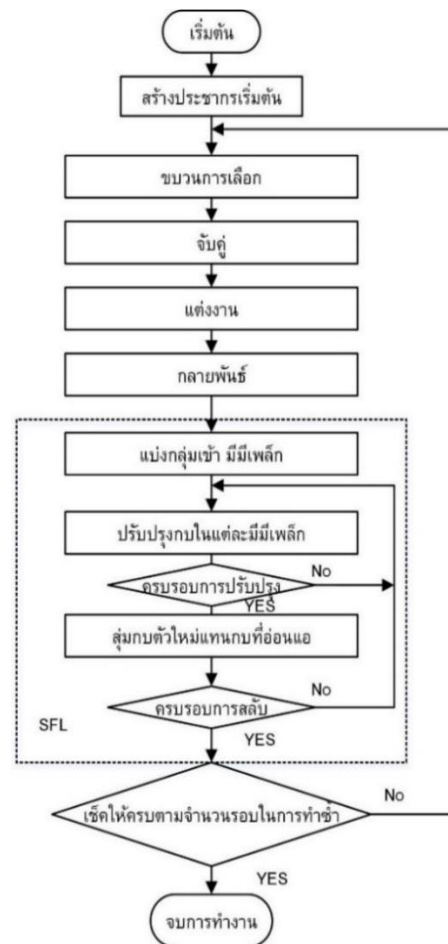
$$p = rand() * (p_{hi} - p_{lo}) + p_{lo} \quad (4)$$

เมื่อ p_{hi} และ p_{lo} คือค่าสูงสุดต่ำสุดของตัวแปรตามลำดับ $rand()$ คือการสุ่มตัวเลขแบบยูนิฟอร์มช่วง (0,1)

ตัวแปรลักษณะของเส้นเค้งการทำงานเป็นแบบไม่ต่อเนื่องคือเป็นตัวเลขจำนวนเต็ม ดังนั้นใช้การสุ่มตัวเลขที่มีทศนิยมและปัดขึ้นเป็นจำนวนเต็ม โครงสร้างโครโมโซมในบทความนี้แสดงในรูปที่ 3

R1			R...			R.n		
TMS1	PS1	Char1	TMS...	PS...	Char...	TMS.n	PS.n	Char.n

รูปที่ 3 รูปแบบโครโมโซมของ GA



รูปที่ 2 แผนผังการทำงานของวิธี MA

ขั้นตอนที่ 2 การเลือก(Selection) เป็นกระบวนการเลือกโครโมโซมเพื่ออยู่รอดและสร้างลูกหลานรุ่นต่อไป การเลือกทำได้โดยกำหนดจำนวนที่อยู่รอด (N_{keep}) ค่าความเหมาะสม จากสมการวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้เรียงลำดับจากน้อยไปหามาก และคัดเลือกประชากรต้นแบบจากโครโมโซมที่ค่าความเหมาะสมดีที่สุดจำนวนเท่ากับ N_{keep}

ขั้นตอนที่ 3 การจับคู่ (Pairing) ขั้นตอนนี้เป็นการเลือกพ่อและแม่เพื่อจับคู่แต่งงาน ทำได้โดยสร้างความน่าจะเป็นของโครโมโซมแต่ละตัวโดยใช้ค่าความเหมาะสม และสุ่มเพื่อเลือกโครโมโซมที่โชคดีมาแต่งงานกันด้วยวิธีปั่นล้อรูเล็ต(spinner the roulette wheel)[19] โดยพ่อแม่หนึ่งคู่จะสร้างลูกออกมา 2 โครโมโซม ดังสมการที่ (5) และ (6)

ปีที่ 13 ฉบับที่ 2 เดือนพฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2561

$$Rd = [R_{d1}, R_{d2}, R_{d3}, R_{d4}, \dots, R_{dN \text{ var}}] \quad (5)$$

$$Rm = [R_{m1}, R_{m2}, R_{m3}, R_{m4}, \dots, R_{mN \text{ var}}] \quad (6)$$

ขั้นตอนที่ 4 แต่งงาน คือการสลับสายพันธุ์(Crossover) ยีนข้ามระหว่างพ่อและแม่ในการศึกษาครั้งนี้ทำการสลับสายพันธุ์แบบจุดเดียว ทำได้โดยสุ่มจุด μ ขึ้นมาเพื่อเป็นจุดแลกเปลี่ยนยีนระหว่างพ่อและแม่ และปรับเปลี่ยนยีนที่เป็นจุดแลกเปลี่ยน ดังสมการที่ (7) และ (8)

$$Roff1 = [R_{m1}, R_{m2} \dots R_{\mu1} \dots, R_{dn}] \quad (7)$$

$$Roff2 = [R_{d1}, R_{d2} \dots R_{\mu2} \dots, R_{dn}] \quad (8)$$

เมื่อ

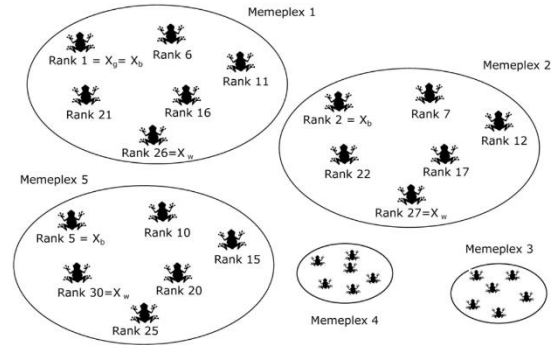
$$R_{\mu1} = R_{m\mu} - \chi[R_{m\mu} - R_{d\mu}]$$

$$R_{\mu2} = R_{m\mu} + \chi[R_{m\mu} - R_{d\mu}]$$

$$\chi \text{ คือค่าสุ่มช่วงระหว่าง } (0,1)$$

ขั้นตอนที่ 5 การกลายพันธุ์(Mutation) เป็นขั้นตอนปรับเปลี่ยนโครโมโซมที่มีอยู่เดิม เพื่อช่วยหลีกเลี่ยงปัญหาการเวียนซ้ำอยู่กับค่าใดค่าหนึ่ง วิธีการคือสุ่มตำแหน่งที่ต้องการการกลายพันธุ์ขึ้นมาภายใต้ความน่าจะเป็นในการกลายพันธุ์ และเปลี่ยนแปลงค่าในบางส่วนของโครโมโซมของกลุ่มประชากรเพื่อให้สมาชิกของกลุ่มประชากรมีความหลากหลายมากขึ้นโดยใช้สมการที่ (4)

ขั้นตอนที่ 6 เริ่มกระบวนการชฟเฟิลฟรอกลิปปีงอัลกอริทึม(SFL) โดยกำหนดให้ประชากรเป็นประชากรกบคำนวณค่าความเหมาะสมหรือความแข็งแรงของกบแต่ละตัว ผ่านสมการวัตถุประสงค์ จากนั้นแบ่งกลุ่มโดยเรียกแทนกลุ่มนั้นว่า มีมิเพล็กซ์(Memplex) ในการแบ่งกลุ่มจัดให้กบที่มีค่าความเหมาะสมหรือความแข็งแรงสูงสุดเป็นลำดับที่หนึ่ง กบตัวที่สองจัดให้อยู่ในมิมิเพล็กซ์ที่สองเรียงลำดับดังรูปที่ 4 ในแต่ละมิมิเพล็กซ์ กบตัวใดมีค่าความเหมาะสมมากที่สุดแทนเป็น X_b และกบตัวใดมีค่าความเหมาะสมน้อยที่สุด แทนเป็น X_w ส่วน X_g คือกบที่มีค่าความเหมาะสมมากที่สุดของกบทั้งหมด แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 4 การแพร่กระจายของกบในมิมิเพล็กซ์ของ SFL[20]

ขั้นตอนที่ 7 การปรับปรุงกบ ค่าความเหมาะสมของกบตัวที่มีค่าความเหมาะสมน้อยที่สุดเดิม X_w^{old} ให้มีค่าความเหมาะสมมากขึ้นตามสมการที่ (9)

$$X_w^{new} = X_w^{old} + D_i \quad (9)$$

เมื่อ

$$D_i = rand() * (X_b - X_w^{old})$$

ขั้นตอนที่ 8 ตรวจสอบการปรับปรุงตามรอบที่กำหนด

ขั้นตอนที่ 9 หากปรับปรุงแล้วค่าความเหมาะสมไม่ดีเท่า X_g ให้กำจัดออกและสุ่มตัวใหม่เข้ามาแทนที่ ทำจนครบทุกมิมิเพล็กซ์

ขั้นตอนที่ 10 สลับกบอีกครั้งโดยนำกบทุกมิมิเพล็กซ์มาเรียงลำดับใหม่ทำซ้ำขั้นตอนที่ 5 ตามจำนวนรอบที่กำหนดไว้เพื่อให้ได้ประชากรกบที่ดีที่สุด

ขั้นตอนที่ 11 การตรวจสอบเงื่อนไขหยุดการทำงาน โดยกำหนดรอบการทำงาน ซึ่งหากยังไม่ถึงรอบที่กำหนดให้วนรอบซ้ำในขั้นตอนที่ 2

3. การทดสอบและผล

การทดสอบวิธีการประสานสัมพันธ์รีเลย์กระแสเกินแบ่งเป็นสองกรณีคือ กรณีที่ 1 ระบบทดสอบสามบัส[18] และกรณีที่ 2 ระบบทดสอบหกบัส[15] โดยเปรียบเทียบการแบบเดิมหรือสมการที่ (1) และสมการที่นำเสนอหรือสมการที่ (3) ด้วยมีค่าคงที่ $\alpha_1 = 1, \alpha_2 = 2$, $\beta_1 = 1000, \beta_2 = 100$ และแสดงเปรียบเทียบผลที่ได้จาก MA GA และ SFLแบบดั้งเดิม ซึ่งกำหนดให้โดยให้อัตราส่วน CT สำหรับรีเลย์ทุกตัวเท่ากับ 500:1, CTI

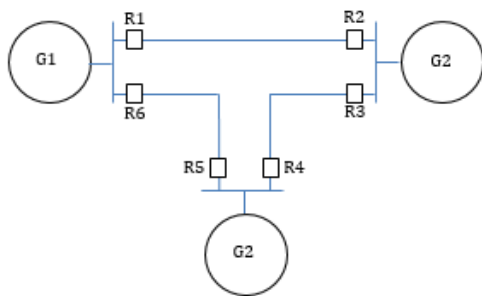
เท่ากับ 0.2 วินาที, TSM มีค่าตั้งแต่ 0.025 ถึง 1.2 และ PS มีค่าตั้งแต่ 0.1 ถึง 0.875 เส้นโค้งของรีเลย์เลือกได้ 8 แบบ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของ GA SFL และ HGASFL ที่ใช้ในการทดสอบ

Parameters	GA	SFL	MA
Population size	100	100	100
Generations	3000	3000	3000
Crossover rate	0.8	-	0.8
Mutation rate	0.05	-	0.05
Memeplex Size	-	20	20
Number of Memeplexes	-	5	5

3.1 กรณีที่ 1 ระบบทดสอบ 3 บัส

ระบบทดสอบ 3 บัสแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งประกอบไปด้วยบัสเชื่อมต่อ 3 บัส เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เครื่อง สายส่ง 3 เส้น และรีเลย์กระแสเกินแบบมีทิศทาง 6 ตัว



รูปที่ 5 โครงข่ายระบบ 3 บัส[18]

ตารางที่ 3 แสดงค่า TSM PS และ Char ที่ได้จากการใช้ MA ในกรณีที่ 1 เปรียบเทียบระหว่างสมการที่ 1 และสมการที่ 3 ตารางที่ 4 แสดงเวลาการทำงานของรีเลย์ทั้งหมด ตารางที่ 5 การประสานสัมพันธ์ของจุดลัดวงจรทั้งสองจุด คือ จุดใกล้(F1) และ จุดไกล(F2)

ตารางที่ 3 ผล TSM, PS และ Char กรณีที่ 1

รีเลย์	สมการที่ 1			สมการที่ 3		
	TSM	PS	Char	TSM	PS	Char
1	0.093	0.783	4	0.844	0.162	3
2	0.028	0.668	4	0.655	0.152	3
3	0.236	0.347	4	0.794	0.154	1
4	0.156	0.527	4	0.500	0.151	6
5	0.181	0.287	4	0.458	0.127	3
6	0.113	0.573	4	0.633	0.151	6
เฉลี่ย	0.135	0.531	-	0.647	0.149	-

ตารางที่ 4 ผลเวลาการทำงานของรีเลย์ กรณีที่ 1

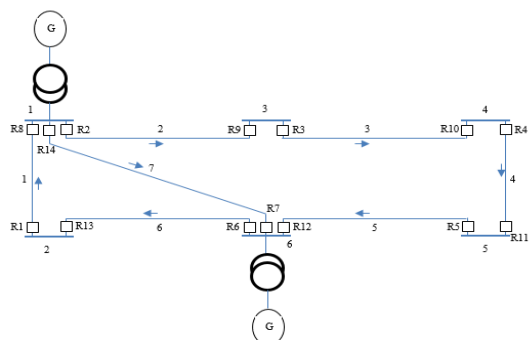
รีเลย์	สมการที่ 1		สมการที่ 3	
	F1	F2	F1	F2
1	0.038	0.216	0.171	0.410
2	0.027	0.143	0.224	0.517
3	0.054	0.174	0.246	0.295
4	0.057	0.192	0.370	0.429
5	0.021	0.158	0.105	0.300
6	0.025	0.207	0.437	0.559
เฉลี่ย	0.037	0.182	0.259	0.418

ตารางที่ 5 เวลาการประสานสัมพันธ์ของรีเลย์ กรณีที่ 1

Discrimination times	สมการที่ 1		สมการที่ 3	
	F1	F2	F1	F2
$\Delta t_{1,5}$	0.001	1.708	0.000	0.558
$\Delta t_{6,2}$	0.000	4.743	0.015	0.015
$\Delta t_{3,1}$	0.002	1.132	0.001	0.563
$\Delta t_{4,6}$	0.002	3.298	0.007	0.260
$\Delta t_{5,3}$	0.000	16.214	0.002	0.313
$\Delta t_{6,2}$	0.000	0.097	0.011	0.189
เฉลี่ย	0.001	4.532	0.006	0.316

3.2 กรณีที่ 2 ระบบทดสอบ 6 บัส

ระบบทดสอบ 6 บัส ประกอบไปด้วยบัสเชื่อมต่อ 3 บัส เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 2 เครื่อง สายส่ง 7 เส้น หม้อแปลง 2 ตัวและรีเลย์กระแสเกินแบบมีทิศทาง 14 ตัว



รูปที่ 6 โครงข่ายระบบ 6 บัส [15]

ตารางที่ 6 แสดงค่า TSM PS และChar ที่ได้จากการใช้ MA ในกรณีที่ 2 เปรียบเทียบระหว่างสมการที่ 1 และสมการที่ 3 ตารางที่ 7 แสดงเวลาการทำงานของรีเลย์ ตารางที่ 8 แสดงเวลาการประสานสัมพันธ์ของจุดลัดวงจร ตารางที่ 9 และตารางที่ 10 แสดงค่าเฉลี่ยเวลาการทำงานเวลาประสานสัมพันธ์ และจำนวนจุดที่มีการประสานสัมพันธ์ที่ผิดพลาด ของกรณีที่ 1 และ กรณีที่ 2 ตามลำดับ รูปที่ 7 แสดงการใส่ค่าคำตอบซึ่งเปรียบเทียบทั้งสามอัลกอริทึม คือ GA SFL และ MA

ตารางที่ 6 ผล TSM, PS และ Char กรณีที่ 2

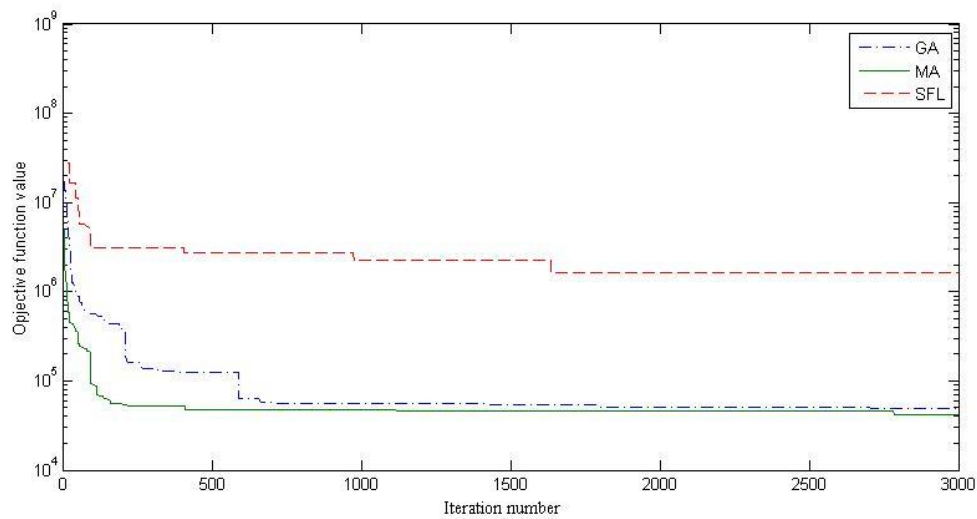
รีเลย์	สมการที่ 1			สมการที่ 3		
	TSM	PS	Char	TSM	PS	Char
1	0.540	0.142	4	0.069	0.625	4
2	1.035	0.405	4	0.587	0.300	3
3	0.069	0.794	4	1.173	0.253	4
4	0.099	0.371	4	0.541	0.309	1
5	0.081	0.138	4	0.064	0.609	1
6	0.372	0.473	4	0.348	0.527	4
7	0.763	0.226	4	0.501	0.114	6
8	0.245	0.549	4	0.132	0.785	4
9	0.038	0.197	4	0.047	0.643	1
10	0.029	0.698	4	0.426	0.382	1
11	0.449	0.426	4	0.995	0.107	7
12	0.557	0.621	4	0.122	0.359	5
13	0.090	0.361	4	0.094	0.487	4
14	0.920	0.218	4	0.911	0.107	6
เฉลี่ย	0.378	0.401	-	0.429	0.401	-

ตารางที่ 7 ผลเวลาการทำงานของรีเลย์ กรณีที่ 2

รีเลย์	สมการที่ 1		สมการที่ 3	
	F1	F2	F1	F2
1	0.030	0.301	0.076	0.859
2	0.116	0.272	0.225	0.350
3	0.071	0.285	0.123	0.472
4	0.089	0.226	0.264	0.328
5	0.026	0.258	0.061	0.530
6	0.068	0.226	0.079	0.263
7	0.045	0.304	0.345	0.431
8	0.061	0.233	0.067	0.260
9	0.021	0.251	0.044	0.587
10	0.043	0.218	0.194	0.280
11	0.123	0.240	0.493	0.497
12	0.146	0.320	0.499	0.749
13	0.038	0.339	0.072	0.665
14	0.050	0.341	0.619	0.771
เฉลี่ย	0.066	0.272	0.226	0.503

ตารางที่ 8 เวลาการประสานสัมพันธ์ของรีเลย์ กรณีที่ 2

Discrimination times	สมการที่ 1		สมการที่ 3	
	F1	F2	F1	F2
$\Delta t_{2,1}$	0.004	1.040	0.496	10.000
$\Delta t_{4,1}$	0.079	-	0.133	0.000
$\Delta t_{3,2}$	0.007	0.593	0.031	0.052
$\Delta t_{4,3}$	0.003	0.369	0.019	0.693
$\Delta t_{5,4}$	0.006	2.558	0.070	0.072
$\Delta t_{6,5}$	0.013	-	0.445	-
$\Delta t_{7,5}$	0.042	-	0.242	0.156
$\Delta t_{1,6}$	0.002	1.971	0.000	1.871
$\Delta t_{2,7}$	0.002	1.012	0.009	0.000
$\Delta t_{8,7}$	0.060	-	0.167	36.297
$\Delta t_{13,8}$	0.002	1.723	0.000	1.974
$\Delta t_{8,9}$	0.015	-	0.772	-
$\Delta t_{14,9}$	0.031	-	0.414	0.262
$\Delta t_{9,10}$	0.006	67.579	0.039	0.064
$\Delta t_{10,11}$	0.002	0.762	0.103	0.048
$\Delta t_{11,12}$	0.002	0.198	0.061	0.380
$\Delta t_{7,13}$	0.127	-	0.186	0.100
$\Delta t_{12,13}$	0.014	1.106	0.009	2.809
$\Delta t_{6,14}$	0.091	-	0.497	4.486
$\Delta t_{12,14}$	0.009	0.878	0.076	0.001
เฉลี่ย	0.026	6.649	0.189	3.293



รูป 7 การลู่เข้าหาคำตอบของทั้งสามอัลกอริทึม

ตารางที่ 9 ผลการประสานสัมพันธ์รีเลย์กรณีที่ 1
เปรียบเทียบระหว่าง GA SFL และ MA

		GA	SFL	MA
สมการที่ 1	เวลาทำงาน F1	0.038	0.076	0.037
	เวลาทำงาน F2	0.186	0.379	0.182
	Δt F1	0.006	0.218	0.001
	Δt F2	3.809	8.717	4.532
	จุดผิดพลาด F1	0	0	0
	จุดผิดพลาด F2	0	0	0
สมการที่ 3	เวลาทำงาน F1	0.564	0.501	0.259
	เวลาทำงาน F2	0.742	0.895	0.418
	Δt F1	0.025	0.335	0.006
	Δt F2	0.446	1.899	0.316
	จุดผิดพลาด F1	0	0	0
	จุดผิดพลาด F2	0	0	0

ตารางที่ 10 ผลการประสานสัมพันธ์รีเลย์กรณีที่ 2
เปรียบเทียบระหว่าง GA SFL และ MA

		GA	SFL	MA
สมการที่ 1	เวลาทำงาน F1	0.069	0.544	0.066
	เวลาทำงาน F2	0.284	1.524	0.272
	Δt F1	0.038	0.945	0.026
	Δt F2	1.187	11.512	6.649
	จุดผิดพลาด F1	0	0	0
	จุดผิดพลาด F2	8	8	8
สมการที่ 3	เวลาทำงาน F1	0.318	0.942	0.226
	เวลาทำงาน F2	0.649	2.112	0.503
	Δt F1	0.288	0.964	0.188
	Δt F2	5.220	4.119	3.293
	จุดผิดพลาด F1	0	2	0
	จุดผิดพลาด F2	2	5	2

4. วิเคราะห์ผล

จากผลการทดสอบในกรณีที่ 1 ซึ่งเป็นระบบไฟฟ้าสามบัส ในตารางที่ 3 4 และ 5 พบว่าผลที่ได้จากสมการวัดอุปกรณ์ที่นำเสนอและสมการเดิมสามารถจัดลำดับการทำงานของรีเลย์ได้ทั้งสองสมการ แต่สมการที่นำเสนอได้ค่าเฉลี่ยเวลาการประสานสัมพันธ์ ที่จุดลัดวงจรที่ F2 ต่ำกว่า

ในกรณีที่ 2 เป็นระบบไฟฟ้าหกบัส มีรีเลย์ที่ต้องจัดลำดับความสัมพันธ์ 12 ตัวนั้น จากตารางที่ 6, 7 แสดง

ให้เห็นว่าสมการที่ 3 มีค่าเฉลี่ย TSM PS และเวลาการทำงานสูงกว่าแต่ จากตารางที่ 8 พบว่า สมการเดิมการประสานสัมพันธ์ที่ผิดพลาดที่ F2 ถึง 8 จุด แต่สมการที่นำเสนอสามารถลดลงเหลือ 2 จุด และค่าเฉลี่ยเวลาการประสานสัมพันธ์ต่ำกว่า เนื่องจากสมการที่ 1 เน้นการประสานสัมพันธ์ในจุด F1 เพียงจุดเดียว ส่วนสมการที่ 3 พิจารณาการประสานสัมพันธ์ทั้งสองจุด

รูปที่ 7 แสดงค่าจากการคำนวณได้จากสมการวัดอุปกรณ์ซึ่งเป็นเวลารวมและผลต่างของเวลาที่คูณกับ

ค่าคงที่ถ่วงน้ำหนักต่าง ๆ ในแต่ละรอบการคำนวณ เปรียบเทียบกันระหว่างวิธี MA GA และ SFL ซึ่งวิธี MA สามารถรู้เข้าคำตอบได้ดีกว่า SFL และ GA เนื่องเป็นการผสมผสานข้อดีของทั้งสองวิธีเข้าด้วยกัน จากตารางที่ 9 และ 10 เห็นได้ชัดว่าเมื่อใช้สมการที่นำเสนอวิธี MA สามารถลดการประสานสัมพันธ์ที่ผิดพลาดที่ F2 ได้เท่ากับ GA แต่ได้เวลาการประสานสัมพันธ์ที่ F2 ดีกว่าทั้งสองวิธี

จากผลการทดลองพบว่า ค่าคงที่ $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ มีผลต่อการจัดลำดับเวลาการทำงานของรีเลย์ โดยค่า α_1 เป็นค่าถ่วงน้ำหนักของเวลาการทำงานของรีเลย์แต่ละตัว α_2 เป็นค่าถ่วงน้ำหนักของผลต่างเวลาการทำงานของรีเลย์หลักและรีเลย์สำรอง β_1 เป็นค่าถ่วงน้ำหนักของความถูกต้องในการจัดลำดับเวลาของกรณี F1 และ β_2 เป็นค่าถ่วงน้ำหนักของความถูกต้องในการจัดลำดับเวลาของกรณี F2 ดังนั้นเมื่อกำหนดให้ค่าไหนต่ำผลก็คือการเน้นให้เทอมนั้นมีความสำคัญมากกว่า ค่าที่เลือกใช้ในบทความนี้ได้มาจากการลองผิดลองถูก(Trial and error)

การใช้วิธี MA ที่มีการผสมผสานระหว่าง GA และ SFL เพื่อปรับปรุงการค้นหาเฉพาะที่ ทำให้การคำนวณของวิธี MA ในแต่ละรอบสูงกว่าวิธีทั้งสอง แต่ด้วยความเร็วของคอมพิวเตอร์ในปัจจุบันทำให้การคำนวณต่างกันเล็กน้อยในวินาที ซึ่งไม่มีความสำคัญเมื่อเทียบกับผลลัพธ์ที่ทำให้ลดเวลาการประสานสัมพันธ์ของรีเลย์ลงได้

5.สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการใช้วิธีที่มีดีกัลกอริทึมสำหรับแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดเพื่อประสานการทำงานของรีเลย์กระแสเกินแบบมีทิศทาง ได้ทำการทดสอบในระบบกำลังไฟฟ้า 3 บัส และ 6 บัส โดยได้นำเสนอสมการวัดอุปสรรคใหม่แบบไม่มีเงื่อนไขบังคับที่พิจารณาจุดลัดวงจรสองจุดคือจุดใกล้และจุดไกลจากตำแหน่งติดตั้งรีเลย์ จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับวิธีเจเนติกอัลกอริทึมและซัพเฟิลฟรอกลิบปีง พบว่าวิธีที่มีดีกัลกอริทึมมีการรู้เข้าคำตอบที่ดีกว่า และสมการ

วัดอุปสรรคใหม่ที่น่าสนใจนั้นสามารถลดการประสานสัมพันธ์ที่ผิดพลาดได้ดีกว่าสมการเดิม

6.กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาเชียงราย ที่ให้การสนับสนุนเอื้อเฟื้อสถานที่สำหรับการทำวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบคุณอาจารย์ เจ้าหน้าที่ และนักศึกษาทุกคนที่มีส่วนช่วยให้การทำงานประสบความสำเร็จด้วยดี

7.เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Horak, "Directional overcurrent relaying (67) concepts," in 59th Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, TX, 2006, pp.164-176.
- [2] P. P. Bedekar and S. R. Bhide, "Optimum coordination of directional overcurrent relays using the hybrid GA- NLP Approach," IEEE Trans. Power Deliv., vol. 26, no. 1, pp. 109-119, 2011.
- [3] A. S. Noghabi, J. Sadeh and H. R. Mashhadi, "Considering different network topologies in optimal overcurrent relay coordination using a hybrid GA," IEEE Trans. Power Deliv., vol. 24, no. 4, pp. 1857 – 1863, 2009.
- [4] P. P. Bedekar and S. R. Bhide, "Optimum coordination of overcurrent relay timing using continuous genetic algorithm," Expert Syst. Appl., vol. 38, no. 9, pp. 11286-11292, 2011.
- [5] R. Thangaraj, M. Pant and K. Deep, "Optimal coordination of over- current relays using modified differential evolution algorithms," Eng. Appl. Artif. Intell., vol. 23, no, 5, pp. 820-829, Aug. 2010.

- [6] R. M. Chabanloo, H. A. Abyaneh, S. S. H. Kamangar and F. Razavi, "Optimal combined overcurrent and distance relays coordination incorporating intelligent overcurrent relays characteristic selection," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 26, no 3, pp. 1381-1392, 2011.
- [7] C. W. So, K. K. Li, K. T. Lai and K. Y. Fun, "Application of genetic algorithm for overcurrent relay coordination," in *6th International Conference on Developments in Power Systems Protection.*, Nottingham, UK, 1997, pp. 66–69.
- [8] C.W. So and K.K. Li, "Overcurrent relay coordination by evolutionary programming," *Elect. Power Syst. Res.*, vol. 53, no. 2, pp. 83–90, 2000.
- [9] F. Razavi, H. A. Abyaneh, M. Al-Dabbagh, R. Mohammadia and H. Torkaman, "A new comprehensive genetic algorithm method for optimal overcurrent relays coordination," *Elect. Power Syst. Res.*, vol. 78, no. 4, pp. 713–720, 2008.
- [10] B. Chattopadhyay, M. S. Sachdev and T. S. Sidhu, "An on-line relay coordination algorithm for adaptive protection using linear programming technique," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 11, no. 1, pp. 165 – 173, 1996.
- [11] A. S. Noghabi, H. R. Mashhadi and Javad Sadeh, "Optimal coordination of directional overcurrent relays considering different network topologies using interval linear programming," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 25, no. 3, pp. 1348–1354, 2010.
- [12] H. H. Zeineldin, E. F. El-Saadany and M. M. A. Salama, "Optimal coordination of overcurrent relays using a modified particle swarm optimization," *Elect. Power Syst. Res.*, vol. 76, no. 11, pp. 988–995, 2006.
- [13] Z. Moravej, M. Jazaeri and M. Gholamzadeh, "Optimal coordination of distance and overcurrent relays in series compensated systems based on MAPSO," *Energy Convers. Manage.*, vol. 56, pp. 140–151, Apr. 2012.
- [14] M. Ezzeddine and R. Kaczmarek, "A novel method for optimal coordination of directional overcurrent relays considering their available discrete settings and several operation characteristics," *Elect. Power Syst. Res.*, vol. 81, no. 7, pp. 1475–1481, 2011.
- [15] D. Saha, A. Datta and P. Das, "Optimal coordination of directional overcurrent relays in power systems using Symbiotic Organism Search Optimisation technique," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 10, no. 11, pp. 2681–2688, 2016.
- [16] V. N. Rajput and K. S. Pandya, "Coordination of directional overcurrent relays in the interconnected power systems using effective tuning of harmony search algorithm," *Sustainable Computing: Informatics and Syst.*, vol. 15, pp. 1–15, Sep. 2017.
- [17] S. Chompuming, P. Itthipong, and P. Pongcharoen, "The application of shuffled frog-leaping technique to improve the performance of a memetic algorithm," (in Thai), in *National Operations Research*

Conference 2007, Bangkok., 2007, pp. 162-174.

- [18] Z. Moraveja, F. Adelniaa and F. Abbasi, “ Optimal coordination of directional overcurrent relays using NSGA- II,” *Elect. Power Syst. Res.*, vol. 119, pp. 228-236. Feb. 2015.
- [19] R. L. Haupt and S. E. Haupt, *Practical Genetic Algorithms*, NY : Wiley, 2004.
- [20] D.Mora-Melia, P. L. Iglesias-Rey, F. J. Martínez-Solano and P.Muñoz-Velasco, “The efficiency of setting parameters in a modified shuffled frog leaping algorithm applied to optimizing water distribution networks,” *Water.*, vol 8, no. 5, pp. 1-14, Apr. 2016.

การวิเคราะห์เสถียรภาพวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าเมื่อต่อกับวงจรกรองสัญญาณรบกวน แม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ในระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์

Stability Analysis of a Power-switching Converter with an EMI Filter for PV Systems

สันติชัย บุญเรือง¹ วุฒิพล ธาราธิระเศรษฐ์^{2*}

¹นักศึกษาระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ถ.รังสิต-นครนายก อ.องครักษ์ จ.นครนายก 26120

²รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์

ถ.รังสิต-นครนายก อ.องครักษ์ จ.นครนายก 26120

Santichai Boonruang¹ Vuttipon Tarateeraseth^{2*}

¹Student, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Srinakarinwirot University

Rangsit - Nakhon Nayok Rd., Ongkharak, Nakhonnayok, 26120

²Associate/Professor, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering

Srinakarinwirot University, Rangsit - Nakhon Nayok Rd., Ongkharak, Nakhonnayok, 26120

Corresponding author: Email: santichai3546@gmail.com, vuttipon@g.swu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้ทำการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าเมื่อต่อกับวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ในระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ หลักการของการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการเปรียบเทียบขนาดอิมพีแดนซ์จะถูกนำมาใช้เพื่อทำการศึกษาว่า ขนาดอินพุตอิมพีแดนซ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าต้องมากกว่าขนาดเอาต์พุตอิมพีแดนซ์วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเท่าไรที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพ โดยทำการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ในวงจรกรองเพื่อให้ขนาดเอาต์พุตอิมพีแดนซ์เกิดการเปลี่ยนแปลง นอกจากนั้นเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของวิธีดังกล่าว แผนภาพโบเด แผนภาพไนควิสต์ แผนภาพโพล-ซีโร่ และการหารากจากสมการคุณลักษณะของระบบจากโพลของฟังก์ชันถ่ายโอนวงรอบปิด ได้ถูกนำมาใช้วิเคราะห์เสถียรภาพโดยนำผลที่ได้มาทำการเปรียบเทียบผลการจำลอง จากผลการจำลองพบว่าขนาดที่แตกต่างกันจากการเปรียบเทียบขนาดอิมพีแดนซ์ที่น้อยที่สุดที่ยังคงทำให้ระบบนั้นมีเสถียรภาพคือ 10 dB โดยที่มีขนาดแตกต่างกันเพียงแค่ช่วงหนึ่งของย่านความถี่ทั้งหมดเท่านั้น

คำสำคัญ: วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ระบบผลิตไฟฟ้าชนิดเชื่อมต่อกริด วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า
เสถียรภาพ

ABSTRACT

This paper presents the stability analysis of a power-switching converter with an EMI filter for PV systems. Impedance comparison technique, typically used by EMI filter designers, is investigated. The accuracy of this technique is compared to other techniques i.e. Bode plot, Nyquist plot, Pole-

Zero plot, and closed-loop poles. From the simulated results, it can be concluded that the impedance comparison technique is valid, and the overall system is stable if the input impedance of a power-switching converter is at least 10 dB higher than the output impedance of an EMI filter only at some certain frequency.

Keyword: EMI filters, grid-connected systems, power-switching converters, stability.

1. บทนำ

ในปัจจุบันการใช้พลังงานทดแทนเพื่อที่จะนำมาใช้ในการผลิตไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง การใช้เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) ถือว่าเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ยินยมนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย ในการผลิตไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ดีจะต้องสามารถผลิตไฟฟ้าได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยระบบต้องมีความเสถียร (ในที่นี้คือแรงดันเอาต์พุตที่ได้จะต้องมีค่าคงที่) และเมื่อเชื่อมต่อเข้ากับระบบแล้วจะต้องไม่มีการรบกวนจากสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในวงจร [1]

ในงานวิจัย [2] ได้ทำการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI filter) โดยใช้วงจรกรอง LCL สำหรับกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากอินเวอร์เตอร์ โดยวงจรกรอง LCL จะถูกเชื่อมต่อระหว่างอินเวอร์เตอร์กับกริดของการไฟฟ้า ซึ่งการเชื่อมต่อวงจรกรองจะแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบคือ 1) การเชื่อมต่อวงจรกรองแบบวาย 2) การเชื่อมต่อวงจรกรองแบบเดลตา จากผลการทดลองพบว่าการใช้วงจรกรอง LCL สามารถลดสัญญาณรบกวนได้ตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ (IEEE-519 และ IEEE-1547) แต่ไม่สามารถระบุได้ว่าเมื่อใส่วงจรกรอง LCL เข้าไปแล้วจะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบหรือไม่

ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบเซลล์แสงอาทิตย์สามารถทำได้หลากหลายวิธี [3]-[5] ในงานวิจัย [3]-[5] ได้ทำการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบเมื่อทำการใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าโดยวิเคราะห์จากแผนภาพโบเด (Bode-plot) และวิธี

เรอท์เฮอรวิท (Routh-Hurwitz criterion) ซึ่งได้มาจากฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบเมื่อทำการใส่วงจรกรอง แต่ไม่ได้คำนึงถึงเงื่อนไขในการออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ระบบมีผลตอบสนองที่ดีซึ่งเป็นการบ่งบอกได้ว่าระบบนั้นเป็นระบบที่มีเสถียรภาพมาก

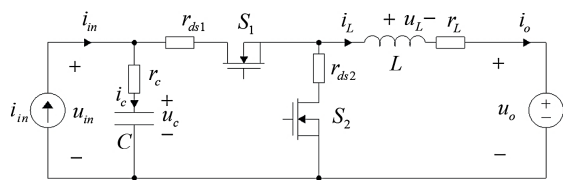
โดยทั่วไปในทางปฏิบัติจะนิยมใช้วิธีการเปรียบเทียบขนาดอิมพีแดนซ์ (Impedance comparison) มาใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพเนื่องจากในการหาค่าอิมพีแดนซ์สามารถหาได้จากการจำลองหรือจากการวัดได้จริง โดยที่ไม่มีความยุ่งยากซับซ้อนเหมือนวิธีอื่น แต่จากนิยาม [6], [7] $|Z_o(s)| \ll |Z_{in}(s)|$ ของการเปรียบเทียบขนาดอิมพีแดนซ์ที่ไม่สามารถระบุได้ชัดเจนว่า ขนาดอินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าต้องมากกว่าขนาดเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเท่าไรนั้นที่ยังทำให้ระบบมีเสถียรภาพ ดังนั้น จุดประสงค์ของบทความนี้จึงได้ทำการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการเปรียบเทียบขนาดอิมพีแดนซ์เพื่อศึกษาว่าความแตกต่างของขนาดอิมพีแดนซ์เล็กน้อยเพียงใดที่ยังคงทำให้ระบบมีเสถียรภาพ โดยทำการปรับเปลี่ยนค่าความจุไฟฟ้าและค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าในวงจรกรองเพื่อให้ขนาดเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงและเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของวิธีการเปรียบเทียบขนาดอิมพีแดนซ์ วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพจาก แผนภาพโบเด (Bode plot) แผนภาพไนควิสต์ (Nyquist plot) แผนภาพโพล-ซีโร่ (Pole-Zero plot) และการหารากจากสมการคุณลักษณะของระบบจากโพลของฟังก์ชันถ่ายโอน

วงรอบปิด (Closed-loop-poles) ถูกนำมาใช้ในการเปรียบเทียบผลการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB

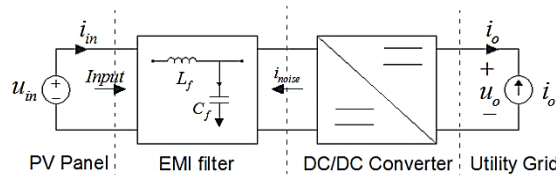
2. ทฤษฎีการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าเมื่อต่อกับวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

2.1. การสร้างแบบจำลองของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบแหล่งจ่ายกระแส

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบแหล่งจ่ายกระแส (current-fed DC-DC converter) เหมาะที่จะนำมาใช้กับระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ [4], [5] จากรูปที่ 1 แสดงถึงวงจรทบทระดับแรงดันไฟฟ้าแบบแหล่งจ่ายกระแส (current-fed boost converter) ที่ใช้เพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์และรูปแบบการติดตั้งวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI filter) เพื่อลดทอนสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า โดยที่ส่วนอินพุตเชื่อมต่อกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 1 วงจรทบทระดับแรงดันไฟฟ้าแบบแหล่งจ่ายกระแส



รูปที่ 2 วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเชื่อมต่อกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่ต่อกับกริดของการไฟฟ้า

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจะดำเนินการโดยการหาฟังก์ชันถ่ายโอนและการสร้างแบบจำลอง เนื่องจากบทความนี้ได้ทำการศึกษาวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจร

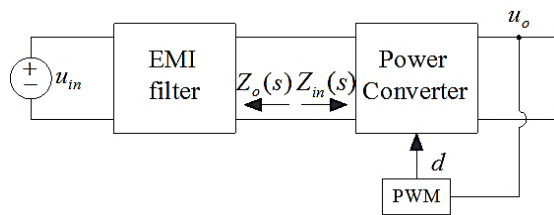
กรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบแหล่งจ่ายกระแสของระบบผลิตพลังงานด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ จึงทำให้ต้องพิจารณาเงื่อนไขสถานะการทำงานของวงจรสวิตช์ในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า ซึ่งก็คือสถานะ on-time และสถานะ off-time ดังนั้นเทคนิคค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะ (State-Space Averaging ; SSA) จึงถูกนำมาใช้เพื่อช่วยในการหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ และเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์เสถียรภาพนั้น ฟังก์ชันถ่ายโอนดังกล่าวนี้จะถูกจัดให้อยู่ในรูปแบบของ H พารามิเตอร์ (Hybrid Parameters) โดยที่แบบจำลองโครงข่าย 2 ทาง (two-port model) จะถูกนำมาใช้เพื่ออธิบายถึงความสัมพันธ์ทางด้านอินพุตและเอาต์พุต โดยที่อยู่ในรูปแบบของ H พารามิเตอร์เช่นเดียวกัน ผลกระทบจากแหล่งกำเนิดและโหลดจะถูกนำมาพิจารณา ดังนั้นในการคำนวณหาฟังก์ชันถ่ายโอนจึงจะพิจารณาในผลกระทบดังกล่าวนี้ด้วย

2.2. เสถียรภาพของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบแหล่งจ่ายกระแส

โดยทั่วไปวิธีที่นำมาวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าสามารถสรุปได้ดังนี้ [6]-[8]

2.2.1. ทฤษฎีอิมพีแดนซ์

โดยทั่วไปการหาเสถียรภาพของระบบสามารถหาได้จากการเปรียบเทียบขนาดอิมพีแดนซ์ โดยถ้าระบบเป็นระบบที่มีเสถียรนั้น ขนาดอินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า $Z_{in}(s)$ ต้องมากกว่าขนาดเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า $Z_o(s)$ [6], [7] โดยขนาดอิมพีแดนซ์ถูกแสดงไว้ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 $Z_o(s)$ ขนาดเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า และ $Z_{in}(s)$ ขนาดอินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า

จากทฤษฎี $|Z_o(s)| \ll |Z_{in}(s)|$ ที่นิยมนำกันมาใช้ อย่างแพร่หลายดังที่กล่าวมาในข้างต้นนั้น พบว่ายังไม่มีข้อกำหนดที่แน่ชัดว่าขนาดของอินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าควรมีขนาดที่มากกว่าขนาดเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเท่าใดจึงจะทำให้ระบบมีเสถียรภาพและควรจะต้องมีขนาดที่มากกว่าตลอดย่านความถี่ที่พิจารณาหรือไม่ ดังนั้นจุดประสงค์หลักของบทความฉบับนี้จึงได้ทำการตอบปัญหาดังกล่าว

2.2.2. แผนภาพโบเด

เกณฑ์การวิเคราะห์เสถียรภาพของโบเดนั้นจะพิจารณาจากฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิด โดยมีหลักการพื้นฐานคือ 1) สำหรับระบบ minimum phase ที่มีเสถียรภาพนั้น ส่วนเผื่ออัตราขยาย (gain margin) และส่วนเผื่อเฟส (phase margin) จะต้องมีค่าเป็นบวก 2) ถ้าระบบนั้นมีเพียงส่วนเผื่ออัตราขยายหรือส่วนเผื่อเฟสอย่างใดอย่างหนึ่งเป็นไปตามเกณฑ์จะถือว่ายังไม่สามารถสรุปได้ว่าระบบนั้นมีเสถียรภาพหรือไม่ 3) สำหรับระบบ non minimum phase จะไม่สามารถใช้เกณฑ์เสถียรภาพของโบเดวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบได้ [8]

2.2.3. แผนภาพไนควิสต์

ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบด้วยวิธีแผนภาพไนควิสต์นั้น จะพิจารณาจากฟังก์ชันถ่ายโอนวงรอบเปิด โดยเกณฑ์การวิเคราะห์เสถียรภาพจะพิจารณาว่า ถ้ากราฟที่ได้นั้นมีเส้นกราฟวนตัดกันที่จุด -1 ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา แสดงว่าระบบที่พิจารณานั้นเป็นระบบที่ไม่มีเสถียรภาพ

2.2.4. แผนภาพโพล-ซีโร่

ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบด้วยวิธีแผนภาพโพล-ซีโร่นั้นจะพิจารณาจากฟังก์ชันถ่ายโอนวงรอบเปิด โดยเกณฑ์การวิเคราะห์เสถียรภาพจะพิจารณาว่า ถ้ามีโพลอยู่ทางฝั่งขวาของระนาบแสดงว่าระบบที่พิจารณานั้นไม่มีเสถียรภาพ

2.2.5. การหารากจากสมการคุณลักษณะของระบบจากโพลของฟังก์ชันถ่ายโอนวงรอบปิด

ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบด้วยวิธีการหารากจากสมการคุณลักษณะของระบบจากโพลของฟังก์ชันถ่ายโอนวงรอบปิดนั้น ถ้าไม่มีโพลอยู่ทางฝั่งขวาของระนาบแสดงว่าระบบนั้นมีเสถียรภาพ

3. ขั้นตอนการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงการสร้างแบบจำลองในแต่ละส่วนที่ทำการศึกษาและหาฟังก์ชันถ่ายโอนเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพ โดยจะทำการสร้าง 1) แบบจำลองของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบแหล่งจ่ายกระแส 2) แบบจำลองของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า และ 3) แบบจำลองของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า โดยมีกระบวนการทั้งหมดเป็นดังนี้

3.1. แบบจำลองของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบจ่ายกระแส

จากรูปที่ 1 แสดงถึงวงจรสมมูลของวงจรทระดับแรงดันไฟฟ้าแบบแหล่งจ่ายกระแส (current-fed boost converter) โดยพิจารณาถึงค่าพารามิเตอร์แฝงของตัว

เก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำ และพารามิเตอร์แฝงของอุปกรณ์สวิตชิง

จากรูปที่ 1 สมการค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะ (State-Space Averaging) ที่พิจารณาถึงช่วงเวลา on-time และ off-time ของวงจรที่อยู่ในรูปแบบของสมการเมทริกซ์เป็นดังนี้

$$\begin{bmatrix} \frac{d\hat{i}_L}{dt} \\ \frac{d\hat{u}_C}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_L}{L} & \frac{D}{L} \\ -\frac{D}{C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_L \\ \hat{u}_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{Dr_C}{L} & -\frac{1}{L} & \frac{R_2}{L} \\ \frac{1}{C} & 0 & -\frac{I_L}{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_{in} \\ \hat{u}_o \\ \hat{d} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{u}_{in} \\ \hat{i}_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1+r_C C \frac{d}{dt} \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_L \\ \hat{u}_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_{in} \\ \hat{u}_o \\ \hat{d} \end{bmatrix} \quad (2)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} R_1 &= r_L + D(r_C + r_{ds1}) + D'r_{ds2} \\ R_2 &= U_C - (D'r_C + r_{ds1} - r_{ds2})I_L \\ D' &= (1-D) \end{aligned}$$

จากสมการที่ (1) และ (2) สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงรอบเปิดได้จากสมการ $C(sI - A)^{-1}B + D$ หรือการใช้ Symbolic toolbox ของโปรแกรม MATLAB ซึ่งสามารถจัดให้อยู่ในรูปแบบของไฮบริดพารามิเตอร์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} Z_{in-con} & T_{oi-con} & G_{ci-con} \\ G_{io-con} & -Y_{o-con} & G_{co-con} \end{bmatrix} = \frac{\begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & -h_{22} & h_{23} \end{bmatrix}}{\Delta} \quad (3)$$

ในที่นี้ฟังก์ชันถ่ายโอนอินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าวงรอบปิด (Z_{in-c}) ที่นำมาใช้เปรียบเทียบกับขนาดอิมพีแดนซ์เพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพคือ

$$Z_{in-c} = \frac{Z_{in-con}}{1 + L_{in-con}} \quad (4)$$

จากสมการที่ (4) L_{in-con} คืออัตราขยายวงรอบเปิด และ Z_{in-con} คือฟังก์ชันถ่ายโอนอินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าวงรอบเปิดซึ่งแสดงในสมการที่ (5) และ (6) ตามลำดับ

$$L_{in-con} = G_{cc} G_a H_v G_{ci-con} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} Z_{in-con} &= \frac{(1+sr_C C) \left(-\frac{Dr_C}{LC} + \frac{s}{C} \right)}{s^2 + s \left(\frac{(r_C + r_{ds1}) + D'r_{ds2}}{L} \right) + \frac{D^2}{LC}} \\ &+ \frac{(1+sr_C C) \left(\frac{r_L + D(r_C + r_{ds1}) + D'r_{ds2}}{LC} \right)}{s^2 + s \left(\frac{(r_C + r_{ds1}) + D'r_{ds2}}{L} \right) + \frac{D^2}{LC}} \quad (6) \end{aligned}$$

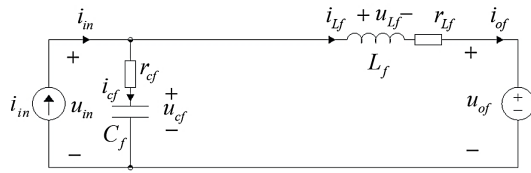
จากสมการที่ (5) G_{cc} คือฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม G_a คือตัวปรับขยาย H_v คือแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ตรวจจับได้ สำหรับค่าฟังก์ชันถ่ายโอน control-to-input ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า (G_{ci-con}) แสดงตามสมการที่ (7)

$$\begin{aligned} G_{ci-con} &= \frac{(1+sr_C C) \left(s \frac{I_L}{C} \right)}{s^2 + s \left(\frac{(r_C + r_{ds1}) + D'r_{ds2}}{L} \right) + \frac{D^2}{LC}} \\ &+ \frac{(1+sr_C C) \left(\frac{(D^2 r_C + r_{ds2} + r_L) I_L + D U_C}{LC} \right)}{s^2 + s \left(\frac{(r_C + r_{ds1}) + D'r_{ds2}}{L} \right) + \frac{D^2}{LC}} \quad (7) \end{aligned}$$

3.2 แบบจำลองวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

รูปที่ 4 แสดงถึงวงจรสมมูลของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า โดยพิจารณาถึงค่าพารามิเตอร์แฝงของตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ

ปีที่ 13 ฉบับที่ 2 เดือนพฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2561



รูปที่ 4 วงจรสมมูลของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

จากรูปที่ 4 สมการค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ในรูปแบบของสมการเมทริกซ์คือ

$$\begin{bmatrix} \frac{di_{L_f}}{dt} \\ \frac{du_{C_f}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{(r_{C_f} + r_{L_f})}{L_f} & \frac{1}{L_f} \\ -\frac{1}{C_f} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L_f} \\ u_{C_f} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{r_{C_f}}{L_f} & -\frac{1}{L_f} \\ \frac{1}{C_f} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{in} \\ u_{of} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} u_{in} \\ i_{of} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 + r_{C_f} C_f \frac{d}{dt} \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L_f} \\ u_{C_f} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{in} \\ u_{of} \end{bmatrix} \quad (9)$$

จากสมการที่ (8) และ (9) สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงรอบเปิด ที่อยู่ในรูปแบบของไฮบริดพารามิเตอร์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \hat{u}_{in} \\ \hat{i}_{of} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{in-f} & T_{oi-f} \\ G_{io-f} & -Y_{o-f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_{in} \\ \hat{u}_{of} \end{bmatrix} \quad (10)$$

ในที่นี้ฟังก์ชันถ่ายโอนเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อพิจารณาผลกระทบจากแหล่งจ่าย (Z_{o-f-s}) ที่นำมาใช้เปรียบเทียบกับขนาดอิมพีแดนซ์ถูกแสดงไว้ดังนี้

$$Z_{o-f-s} = \frac{(1 + Z_{in-f} Y_s)}{(1 + Y_s Z_{in-f_{oc}}) Y_{o-f}} \quad (11)$$

โดย $Z_{in-f_{oc}}$ คืออินพุตอิมพีแดนซ์ช่วงจรเปิด Y_s คือแอดมิตแตนซ์ของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งถูกแสดงไว้ดังนี้

$$Z_{in-f_{oc}} = Z_{in-f} + \frac{G_{io-f} T_{oi-f}}{Y_{o-f}} \quad (12)$$

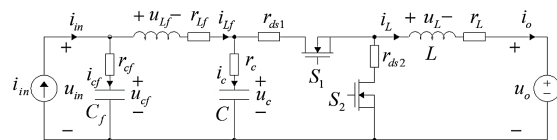
สำหรับค่าฟังก์ชันถ่ายโอนเอาต์พุตแอดมิตแตนซ์ (Y_{o-f}) และฟังก์ชันถ่ายโอนอินพุตอิมพีแดนซ์ (Z_{in-f}) ของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ถูกแสดงไว้ดังสมการที่ (13) และ (14) ตามลำดับ

$$Y_{o-f} = \frac{s C_f}{(C_f L_f) s^2 (C_f r_{L_f} + C_f r_{C_f}) s + 1} \quad (13)$$

$$Z_{in-f} = \frac{(C_f L_f r_{C_f}) s^2 + (L_f + C_f r_{L_f} r_{C_f}) s + r_{L_f}}{(C_f L_f) s^2 (C_f r_{L_f} + C_f r_{C_f}) s + 1} \quad (14)$$

3.3. แบบจำลองวงจรทระดับแรงดันที่เชื่อมต่อกับวงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

รูปที่ 5 แสดงถึงวงจรสมมูลของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบแหล่งจ่ายกระแส (Current-fed converter) ที่เชื่อมต่อกับวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า โดยพิจารณาถึงค่าพารามิเตอร์แฝงของตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำ และพารามิเตอร์แฝงของอุปกรณ์สวิตซ์



รูปที่ 5 วงจรสมมูลของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าต่อกับวงจรทระดับแรงดัน

จากรูปที่ 5 สมการค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะที่พิจารณาถึงช่วงเวลา on-time และ off-time ของวงจรที่อยู่ในรูปแบบของสมการเมทริกซ์ ถูกแสดงไว้ในสมการที่ (15) และ (16) ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \frac{d\hat{u}_{cf}}{dt} \\ \frac{d\hat{u}_c}{dt} \\ \frac{d\hat{i}_{lf}}{dt} \\ \frac{d\hat{i}_l}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{1}{C_f} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{C} & \frac{D'}{C} \\ \frac{1}{L_f} & -\frac{1}{L_f} & -\left(\frac{r_{cf}+r_{lf}+r_c}{L_f}\right) & \frac{D'r_c}{L_f} \\ 0 & \frac{D'}{L} & \frac{D'r_c}{L} & -\left(\frac{r_L+Dr_{ds1}+D'(r_c+r_{ds2})}{L}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{u}_{cf} \\ \hat{u}_c \\ \hat{i}_{lf} \\ \hat{i}_l \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{C_f} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{I_L}{C} \\ \frac{r_{cf}}{L_f} & 0 & -\frac{r_c I_L}{L_f} \\ 0 & -\frac{1}{L} \left(\frac{r_c+r_{ds2}-r_{ds1}}{L}\right) I_L & -\frac{U_c}{L} - \frac{r_c I_{lf}}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_{in} \\ \hat{u}_o \\ \hat{d} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{u}_{in} \\ \hat{i}_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1+sr_{cf}C_f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{u}_{cf} \\ \hat{u}_c \\ \hat{i}_{lf} \\ \hat{i}_l \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_{in} \\ \hat{u}_o \\ \hat{d} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$G_{co-o} = \frac{(I_L(D'+C_f D' L_f s^2 + C_f D' r_{cf} s + C_f D' r_{lf} s)) - ((U_c + I_{lf} r_c - I_L(r_c - r_{ds1} + r_{ds2})) (Cs + Cs + CC_f L_f s^3 + CC_f r_c s^2 + CC_f r_{cf} s^2 + CC_f r_{lf} s^2)) - (C_f I_L r_c s (D' + CD' r_c s))}{(D^2 + Cr_L s + C_f r_L s + CLs^2 + C_f Ls^2 - C_f D^2 r_{cf} s + C_f D^2 r_{lf} s + C_f D^2 L_f s^2 + CD' r_c s + CD r_{ds1} s + CD' r_{ds2} s + C_f D' r_c s + C_f D r_{ds1} s + C_f D' r_{ds2} s - CC_f D^2 r_c^2 s^2 + CC_f L L_f s^4 + CC_f L r_c s^3 + CC_f L r_{cf} s^3 + CC_f L r_{lf} s^3 + CC_f L_f r_L s^3 + CC_f r_c r_L s^2 + CC_f r_{cf} r_L s^2 + CC_f r_L r_{lf} s^2 + CC_f D' r_c^2 s^2 + CC_f D' L_f r_c s^3 + CC_f D L_f r_{ds1} s^3 + CC_f D' L_f r_{ds2} s^3 + CC_f D' r_{cf} s^2 + CC_f D' r_c r_{lf} s^2 + CC_f D r_c r_{ds1} s^2 + CC_f D' r_c r_{ds2} s^2 + CC_f D r_{cf} r_{ds1} s^2 + CC_f D' r_{cf} r_{ds2} s^2 + CC_f D r_{lf} r_{ds1} s^2 + CC_f D' r_{lf} r_{ds2} s^2) / (CC_f L L_f)} \quad (17)$$

จากสมการที่ (15) และ (16) สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงรอบเปิด ที่อยู่ในรูปแบบของไฮบริดพารามิเตอร์ ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} Z_{in-o} & T_{oi-o} & G_{ci-o} \\ G_{io-o} & -Y_{o-o} & G_{co-o} \end{bmatrix} = \frac{\begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & -h_{22} & h_{23} \end{bmatrix}}{\Delta} \quad (18)$$

ในการวิเคราะห์เสถียรภาพนั้น จะพิจารณาจากอัตราขยายวงรอบเปิดของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบแหล่งจ่ายกระแสที่เชื่อมต่อกับวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งถูกแสดงไว้ดังนี้

$$L_{in_o} = G_{cc} G_a H_v G_{co-o} \quad (19)$$

โดยที่ G_{co-o} คือฟังก์ชันถ่ายโอน control-to-output ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบแหล่งจ่ายกระแสที่เชื่อมต่อกับวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ดังแสดงไว้ในสมการที่ (17)

ในบทความนี้จะทำการศึกษาความแตกต่างของขนาดอิมพีแดนซ์เพื่อที่จะแสดงให้เห็นว่าความแตกต่างของขนาดอิมพีแดนซ์มากหรือน้อยเท่าไรนั้นที่ยังคงทำให้ระบบมีเสถียรภาพ โดยทำการเปรียบเทียบขนาดอินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่อยู่ในรูปแบบของฟังก์ชันถ่ายโอนวงรอบเปิด (Z_{in_c}) ที่ได้จากหัวข้อ 3.1 กับขนาดเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ($Z_{o_f_s}$) ที่ได้จากหัวข้อ 3.2 การปรับเปลี่ยนค่าความจุไฟฟ้าและค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจะเป็นการทำให้ขนาดเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลง วิธีการ

ปีที่ 13 ฉบับที่ 2 เดือนพฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2561

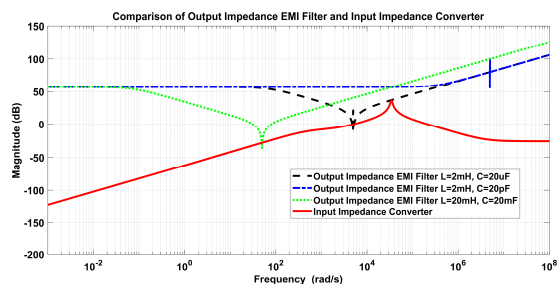
วิเคราะห์เสถียรภาพเพื่อนำมาใช้เปรียบเทียบผลการจำลองจาก แผนภาพโบเด แผนภาพไนควิสต์ แผนภาพโพล-ซีโร และการหาค่าจากสมการคุณลักษณะของระบบ จาก โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนวงรอบปิดจะพิจารณาจาก อัตราขยายวงรอบเปิดของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบ แหล่งจ่ายกระแสที่เชื่อมต่อกับวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (L_{in_o}) ที่ได้จากหัวข้อ 3.3 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการจำลองถูกแสดงไว้ในตารางที่ 1 ดังนี้

ตารางที่ 1 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

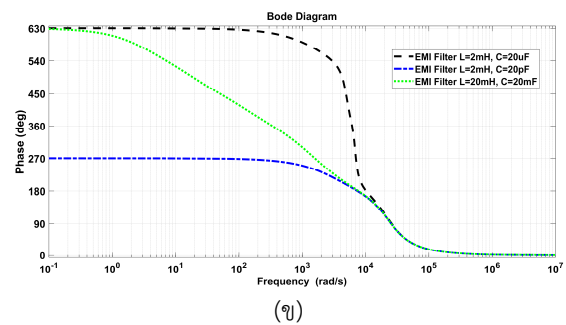
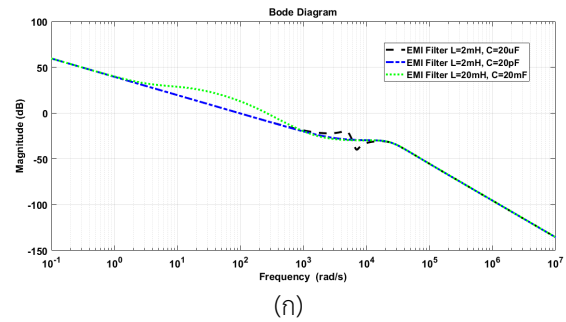
U_o	6 V	C	20 μ F
I_{in}	0.93 A	r_c	10 m Ω
D	0.53	r_L	500 m Ω
f_s	400 kHz	r_{ds1}	15 $\mu\Omega$
T_s	$1 / f_s$	r_{ds2}	15 $\mu\Omega$
L_f	20×10^{-18} - 20mH	C_f	20×10^{-18} - 20mF
I_o	1.93 A	U_{in}	15 V
r_{cf}	100 m Ω	U_{cf}	15.93 V
r_{Lf}	500 m Ω	U_c	15.47 V
L	20 μ H	R_{s-MPP}	10.4 Ω

3.4 ผลการจำลองและวิเคราะห์ผลการจำลอง

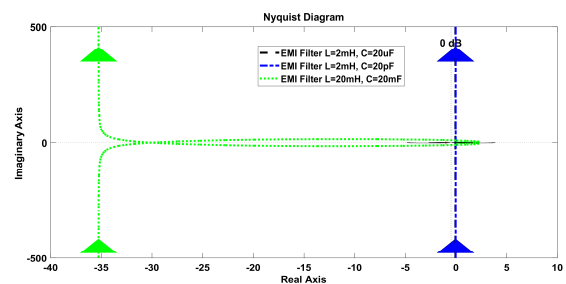
ผลการจำลองเมื่อทำการวิเคราะห์เสถียรภาพจากแบบจำลองในหัวข้อ 3.1-3.3 แสดงดังในรูปที่ 6-8



รูปที่ 6 ผลการจำลองเปรียบเทียบขนาดอิมพีแดนซ์ในกรณีต่างๆ



รูปที่ 7 ผลการจำลองที่ได้จากแผนภาพโบเดในกรณีต่างๆ (ก) การเปรียบเทียบขนาด (ข) การเปรียบเทียบมุมเฟส



รูปที่ 8 ผลการจำลองที่ได้จากแผนภาพไนควิสต์ในกรณีต่างๆ

ผลการจำลองที่ได้จากการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีต่างๆนั้น สามารถสรุปผลการวิเคราะห์ตามตารางที่ 2 ได้ดังนี้

ด้วยแผนภาพโบเดจะไม่สามารถนำมาใช้วิเคราะห์เสถียรภาพของระบบได้ ส่วนในกรณีของแผนภาพไนควิสต์นั้น ผลการจำลองจะนำมาใช้ได้ก็ต่อเมื่อ ผลที่ได้จากจำลองแสดงออกมาว่าไม่มีเสถียรภาพ ซึ่งทำให้สรุปได้ว่าระบบที่พิจารณานั้นไม่มีเสถียรภาพ แต่ถ้าผลการจำลองแสดงออกมาว่ามีเสถียรภาพ จะไม่สามารถสรุปได้ทันทีว่าระบบที่พิจารณานั้นมีเสถียรภาพซึ่งจะต้องพิจารณาผลจากแผนภาพโพล-ซีโรเข้ามาประกอบด้วย โดยถ้าผลการจำลองจากแผนภาพไนควิสต์และแผนภาพโพล-ซีโรแสดงผลออกมาว่ามีเสถียรภาพ จะทำให้สามารถสรุปได้ว่าระบบที่พิจารณานั้นมีเสถียรภาพ [8] หรืออาจจะพิจารณาจากวิธีการหารากจากสมการคุณลักษณะของระบบจากโพลของฟังก์ชันถ่ายโอนวงรอบปิดได้เช่นกัน ดังนั้นสำหรับกรณีนี้ทำให้สรุปได้ว่าระบบที่พิจารณาอยู่นั้นไม่มีเสถียรภาพเนื่องจากผลที่ได้จากวิธีการหารากจากสมการคุณลักษณะของระบบจากโพลของฟังก์ชันถ่ายโอนวงรอบปิดแสดงผลว่าระบบไม่มีเสถียรภาพ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าวิธีการเปรียบเทียบขนาดอิมพีแดนซ์ยังสามารถนำมาใช้วิเคราะห์เสถียรภาพในกรณีนี้ได้

กรณีที่ 3) เมื่อทำการเลือกใช้ค่าความจุไฟฟ้า $C_f = 20 \text{ mF}$ และค่าความเหนี่ยวนำ $L_f = 20 \text{ mH}$ จากผลการจำลองในรูปที่ 6 ซึ่งพบว่าขนาดอินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในเส้นสีแดงมีค่ามากกว่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในเส้นจุดสีเขียวอยู่ที่ 8 dB ณ ความถี่ประมาณ 50 Hz ซึ่งมีขนาดมากกว่าแค่ช่วงหนึ่งของย่านความถี่ทั้งหมด ซึ่งตามทฤษฎีอิมพีแดนซ์จะถือว่าระบบมีเสถียรภาพ อย่างไรก็ตามเนื่องจากผลที่ได้จากการหารากจากสมการคุณลักษณะของระบบจากโพลของฟังก์ชันถ่ายโอนวงรอบปิดแสดงผลออกมาว่าระบบไม่มีเสถียรภาพ ดังนั้นขนาดอิมพีแดนซ์ที่แตกต่างกันนี้จึงไม่เพียงพอที่จะทำให้ระบบมีเสถียรภาพ ส่วนในรูปที่ 7 และ 8 เป็นการแสดงผลการทดลองที่ได้จากแผนภาพโบเด และไนควิสต์ตามลำดับซึ่งแทนผลการจำลองด้วยเส้นจุดสีเขียว โดยผลการวิเคราะห์ถูกแสดงไว้ดังตารางที่ 2 ซึ่งอธิบายได้ว่าเมื่อ

วิเคราะห์เสถียรภาพของระบบด้วยวิธีต่างๆที่ใช้ในตารางนั้นผลการจำลองที่ได้ ให้ผลที่สอดคล้องกันคือแสดงผลว่าระบบที่ได้ทำการวิเคราะห์นั้นไม่มีเสถียรภาพ แต่มีเพียงวิธีการวิเคราะห์จากแผนภาพโพล-ซีโรที่แสดงผลว่าระบบมีเสถียรภาพ ซึ่งสามารถอธิบายเหตุผลเช่นเดียวกันกับกรณีที่ 2) ดังนั้นสำหรับกรณีนี้ทำให้สรุปได้ว่าระบบที่พิจารณาอยู่นั้นไม่มีเสถียรภาพเนื่องจากผลที่ได้จากวิธีการหารากจากสมการคุณลักษณะของระบบจากโพลของฟังก์ชันถ่ายโอนวงรอบปิดแสดงผลว่าระบบไม่มีเสถียรภาพ ซึ่งในกรณีนี้ใช้เพื่อพิสูจน์ว่าถ้าขนาดอิมพีแดนซ์ต่างกันน้อยกว่า 10 dB วิธีการเปรียบเทียบขนาดอิมพีแดนซ์จะไม่สามารถนำมาใช้วิเคราะห์เสถียรภาพในกรณีนี้ได้

4. สรุปผลการทดลอง

ในบทความนี้ได้ทำการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าในระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้วิธีการเปรียบเทียบขนาดอิมพีแดนซ์จากนิยาม $|Z_o(s)| \ll |Z_m(s)|$ ที่ไม่สามารถระบุได้ชัดเจนว่าขนาดอินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าต้องมากกว่าขนาดเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเท่าไรที่ยังคงทำให้ระบบมีเสถียรภาพ

จากผลการจำลองพบว่าความแตกต่างของขนาดอิมพีแดนซ์ที่น้อยที่สุดที่ยังคงทำให้ระบบมีเสถียรภาพคือ 10 dB ซึ่งมีขนาดมากกว่าเพียงแค่ช่วงหนึ่งของย่านความถี่ทั้งหมด โดยเมื่อวิเคราะห์ผลการจำลองที่ได้ทำการศึกษาทั้งหมดนั้น พบว่าผลการจำลองที่ได้จากการเปรียบเทียบขนาดอิมพีแดนซ์สามารถนำมาใช้วิเคราะห์เสถียรภาพของระบบได้เนื่องจากให้ผลสอดคล้องกับการหารากจากสมการคุณลักษณะของระบบจากโพลของฟังก์ชันถ่ายโอนวงรอบปิด ซึ่งเป็นวิธีที่ถูกต้องและแม่นยำที่สุดในการวิเคราะห์เสถียรภาพ จากผลการจำลองที่ได้ทำการศึกษาทั้งหมดนั้นทำให้สามารถสรุปได้ว่าถ้าขนาด

อินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ามีค่ามากกว่าขนาดเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเกิน 10 dB ขึ้นไปเพียงแค่ช่วงหนึ่งของย่านความถี่ทั้งหมดหรือมากกว่าเป็นช่วงๆ นั้น ระบบที่พิจารณาอยู่นั้นจะเป็นระบบที่มีเสถียรภาพ

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ สัญญาเลขที่ 379/2559 ซึ่งในที่นี้ผู้เขียนต้องขอขอบคุณสำหรับความช่วยเหลือจาก น.ส. รักษิณา ชณะฤกษ์ และ น.ส. อรอนงค์ พรวงค์เลิศ ที่ช่วยทำให้งานวิจัยนี้ สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Md. H. Shahriar, Md. J. Sadiq and Md. F. Uddin, "Stability analysis of grid connected PV array under maximum power point tracking." in 2016 9th International Conference on Electrical and Computer Engineerin., Dhaka., 2016, pp. 499-502.
- [2] A. Reznik, M. G. Simões, A. Al-Durra and .S. M. Mueen, "LCL Filter Design and Performance Analysis for Grid-Interconnected Systems," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 50, pp.1225-1232, Mar. 2014.
- [3] J. Zhang, W. Chen, B. Zhang, X. Song and H. Huang, "Optimal design of EMI filters for PV system based on parasitic parameter and stability analysis," in 2015 9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia., Seoul., 2015, pp. 2744-2751.
- [4] R. A. Shaheen, "Stability analysis of a current sourced converter when an EMI filter is added at the input for PV

applications," M.S. thesis, Dept. Radio Frequency Electronics., Tampere Univ. of Tech., Tampere, Finland, 2011.

- [5] T. Suntio, *Dynamic Profile of Switched-Mode Converter*, Wein-heim: WILEY-VCH, 2009.
- [6] W. E. Robert, M. Dragan, *Fundamentals of Power Electronics*, United States of America: Kluwer, 2011.
- [7] M. J. Nave, *Power Line Filter Design for Switched Mode Power Supplies*, Gainesville: Mark Nave Consultants, 2010.
- [8] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, New Jersey: Tom Robbins, 1997.

อัลกอริธึมอิงกระแสสำหรับการตามรอยจุดกำลังสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ

Current Based Algorithm for the Maximum Power Point Tracking of Stand-alone Photovoltaic System

ชวรีย์ เกื่อนพังเทียม กองพัน อารีรักษ์* กองพล อารีรักษ์

กลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Chavaree Thueanpangthaim, Kongpan Areerak* and Kongpol Areerak

Power Electronic, 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

บทความนี้นำเสนออัลกอริธึมอิงกระแสในการตามรอยจุดกำลังสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ อัลกอริธึมดังกล่าวสามารถปรับปรุงสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังสูงสุดเมื่อเทียบกับวิธีรบกวนและสังเกต โดยอัลกอริธึมอิงกระแสจะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์โดยตรงทำให้การตอบสนองที่รวดเร็วขึ้นและสามารถถึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้อย่างถูกต้องเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมของการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ การยืนยันผลการตอบสนองทางพลวัตของอัลกอริธึมอิงกระแสในบทความจะอาศัยการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบนโปรแกรม MATLAB นอกจากนี้ยังมีการทดสอบด้วยชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ ผลการทดสอบพบว่าอัลกอริธึมอิงกระแสสามารถถึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้อย่างถูกต้องและลดการกวัดแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสภาวะคงตัว อีกทั้งยังให้เวลาตอบสนองในสภาวะชั่วคราวที่รวดเร็วกว่าเมื่อเทียบกับวิธีรบกวนและสังเกต

คำสำคัญ: ระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ การตามรอยจุดกำลังสูงสุด วิธีรบกวนและสังเกต อัลกอริธึมอิงกระแส

ABSTRACT

This paper present current based algorithm for the maximum power point tracking of stand-alone system. The proposed algorithm can improve the tracking performance compared with the conventional perturb and observe (P&O) method. The current based algorithm directly uses the change of photovoltaic current. As a result, the response and the achieved power are better than there of the P&O method. To verify the advantage of the proposed algorithm, the simulation via MATLAB and the experimental results from the hardware implementation are used. The results show that the current based algorithm can provide the better performance in both transient and steady-state response compared with the P&O method.

Keyword: Stand-alone photovoltaic, Maximum power point tracking, Perturb and observe method, Current based algorithm.

1. บทนำ

พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานทดแทนทางธรรมชาติที่สำคัญที่สุด ไม่มีวันหมด และเป็นพลังงานสะอาดที่ไม่ทำให้เกิดมลภาวะ ทั้งยังนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายรูปแบบ เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell หรือ Photovoltaic cell: PV) จึงเป็นอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ทางเลือกหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ผลิตไฟฟ้า เนื่องจากสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีอัตราการใช้งานที่สูง แต่เทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงไปเป็นพลังงานไฟฟ้าค่อนข้างต่ำและพลังงานไฟฟ้าที่ได้จะแปรผันตามการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมและโหลด จึงทำให้ไม่สามารถได้พลังงานสูงสุดที่จุดจ่ายกำลังสูงสุด (Maximum Power Point: MPP) ที่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตได้ จึงได้มีการนำเอาระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดเข้ามาใช้งาน เพื่อให้เซลล์แสงอาทิตย์สามารถทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ การดึงพลังงานสูงสุดที่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตได้นั้นมีหลายวิธีด้วยกัน ทั้งระบบติดตามแสงอาทิตย์และการหาจุดจ่ายกำลังสูงสุด ในบทความนี้จะอาศัยการหาจุดจ่ายกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์เนื่องจากในบางเวลาความเข้มแสงที่ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์และอุณหภูมิที่ได้รับอาจจะไม่สม่ำเสมอกันตลอดทั้งวัน จึงทำให้กระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ไม่คงที่ ดังนั้นจึงมีการนำระบบควบคุมการตามรอยจุดกำลังสูงสุด (Maximum Power Point Tracking: MPPT) มาใช้งาน เพื่อให้ได้พลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถจ่ายได้ในสภาวะแวดล้อมขณะนั้น

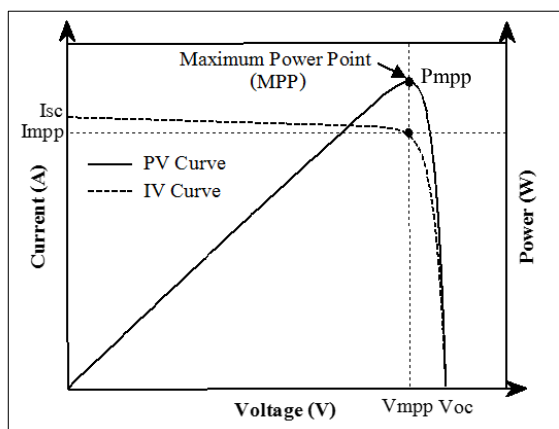
จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีตจนถึงปัจจุบัน มีวิธีการตามรอยจุดกำลังสูงสุดหลากหลายวิธีด้วยกันที่ถูกนำมาใช้งานร่วมกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น วิธีแรงดันเปิดวงจร (Fractional Open Circuit Voltage: V_{oc}) [1]-[3] วิธีกระแสลัดวงจร (Fractional Short Circuit Current: I_{sc}) [1]-[3] วิธี

รบกวนและสังเกต (Conventional Perturb and Observe method: Conventional P&O) [4]-[5] วิธีอิงกระแส (Current based Method) [6]-[8] วิธีเพิ่มค่าความนำ (Incremental Conductance Method: IncCond) [1],[9] และวิธีตรรกศาสตร์คลุมเครือหรือตัวควบคุมฟัซซี (Fuzzy Logic Method) [10]-[12] เป็นต้น โดยวิธีรบกวนและสังเกตนั้นถูกนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายและมีขั้นตอนในการคำนวณน้อย แต่ถ้ากำหนดค่าพารามิเตอร์ไม่เหมาะสมอาจทำให้เกิดปัญหาการกวัดแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสภาวะคงตัวและทำให้ไม่สามารถหาจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้อย่างถูกต้อง เพื่อแก้ปัญหาข้อเสียของวิธีรบกวนและสังเกตที่เกิดขึ้น ผลจากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าวิธีอิงกระแส สามารถดึงพลังงานสูงสุดที่จุดจ่ายกำลังสูงสุดได้อย่างถูกต้อง ลดการกวัดแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสภาวะคงตัว และมีการตอบสนองในการตามรอยจุดกำลังสูงสุดได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งจะทำให้ระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดมีประสิทธิภาพการทำงานมากยิ่งขึ้น ดังนั้นบทความนี้จึงได้เลือกนำวิธีการดังกล่าวมาศึกษาและทำการเปรียบเทียบกับวิธีรบกวนและสังเกตเพื่อยืนยันข้อดีของวิธีอิงกระแส การตรวจสอบความถูกต้องและยืนยันผลศึกษาที่ได้จากวิธีที่นำเสนอในบทความนี้จะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB พร้อมทั้งทดสอบชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ

การนำเสนอในบทความนี้ ประกอบไปด้วย 7 ส่วนด้วยกันคือ ส่วนที่ 1 บทนำที่ได้กล่าวไปข้างต้น ส่วนที่ 2 เป็นการอธิบายสมการทางคณิตศาสตร์และคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ส่วนที่ 3 กล่าวถึงการตามรอยจุดกำลังสูงสุด ส่วนที่ 4 เป็นส่วนการนำเสนอการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ ส่วนที่ 5 นำเสนอชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการทดสอบ ส่วนที่ 6 นำเสนอผลการทดสอบและอภิปราย และส่วนสุดท้ายส่วนที่ 7 เป็นส่วนสรุปผลที่แสดงถึงข้อดีของอัลกอริธึมอิงกระแสสำหรับการควบคุมการตามรอยจุดกำลังสูงสุด

2. คุณสมบัติเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้โดยตรง โดยการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า เมื่อพิจารณาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถแสดงได้โดยใช้กราฟคุณสมบัติเฉพาะกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ (I-V Curve) และกราฟคุณสมบัติเฉพาะกำลังและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ (P-V Curve) ซึ่งใช้ตรวจสอบกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สามารถผลิตได้ ถ้าหากปริมาณความเข้มแสงที่ตกกระทบบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์และอุณหภูมิของเซลล์มีค่าคงที่ที่สภาวะมาตรฐาน (Standard Test Condition: STC) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (°C) และความเข้มแสง 1000 วัตต์ต่อตารางเมตร (W/m^2) จะสามารถสร้างกราฟคุณสมบัติเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 คุณสมบัติเฉพาะของกระแส แรงดัน และกำลังของเซลล์แสงอาทิตย์

จากรูปที่ 1 จะมีจุดสำคัญที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด เรียกว่า Maximum Power Point (MPP หรือ P_{mpp}) โดยการพิจารณาคุณสมบัติทางกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ จะมีพารามิเตอร์สำคัญที่เกี่ยวข้องประกอบไปด้วย แรงดันไฟฟ้าที่จุดจ่ายกำลังสูงสุด (V_{mpp}), กระแสไฟฟ้าที่จุดจ่ายกำลังสูงสุด (I_{mpp}), กระแสขณะลัดวงจร (I_{sc}) และ แรงดันขณะเปิดวงจร (V_{oc}) โดยตัวแปรที่สำคัญที่มีส่วนทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มี

การจ่ายกำลังไฟฟ้าแตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ที่มีอยู่ด้วย 2 ตัวแปร คือ อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ และปริมาณความเข้มแสงที่ตกกระทบบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์

2.1 ผลกระทบของอุณหภูมิ

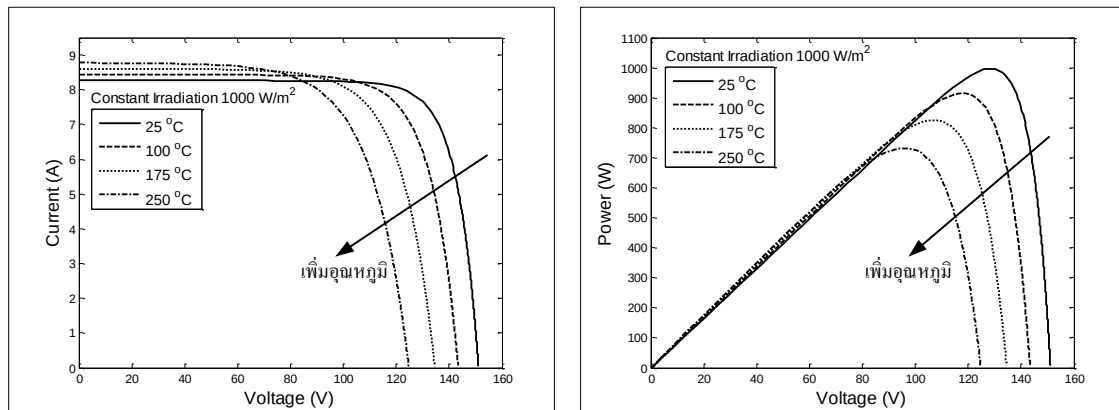
เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะมีผลต่อแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายออกมาจากเซลล์แสงอาทิตย์ โดยสามารถแสดงกราฟลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดังรูปที่ 2 จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้แรงดัน และกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าลดลง

2.2 ผลกระทบของปริมาณความเข้มแสง

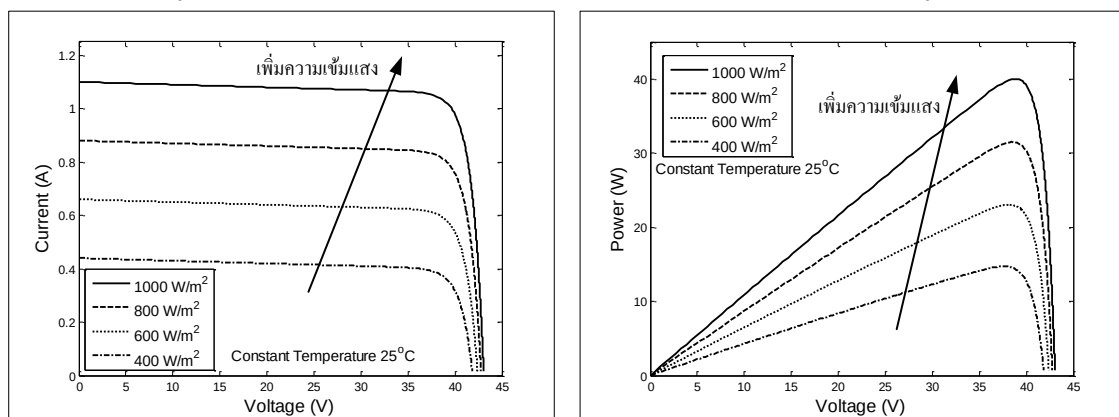
ค่ากระแสไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากเซลล์แสงอาทิตย์มีสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มแสง โดยเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มแสง จะส่งผลกระทบต่อกระแสที่จ่ายได้ของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยสามารถแสดงกราฟลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์ ได้ดังรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณความเข้มแสงที่ตกกระทบบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้กระแส และกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มขึ้น

3. การตามรอยจุดกำลังสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ

การดึงพลังงานสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถทำได้โดยใช้ระบบควบคุมการตามรอยจุดกำลังสูงสุด (MPPT) ซึ่งระบบ MPPT เป็นเทคนิคที่นิยมนำมาใช้กับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้สภาวะแวดล้อมต่าง ๆ โดยทั่วไประบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ (MPPT for stand-alone photovoltaic system) จะถูกนำมาประยุกต์ใช้กับวงจรแปลงผันตีสเป็นตีส (DC/DC Converter) ซึ่งในบทความนี้จะใช้วงจรแปลงผันแบบบัค (Buck Converter) ในการแปลงแรงดันที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมสำหรับการป้อนสู่เอาต์พุตแบตเตอรี่หรือโหลด (Load or Battery) แสดงได้ดังรูปที่ 4

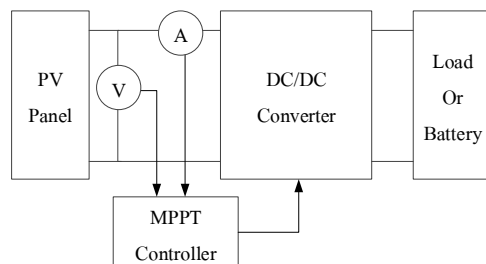


รูปที่ 2 ลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับอุณหภูมิ



รูปที่ 3 ลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับความเข้มแสง

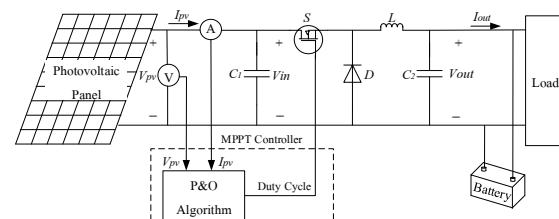
จากรูปที่ 4 วัตถุประสงค์ของตัวควบคุมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดคือเพื่อให้ได้ผลการตามรอยอย่างรวดเร็ว ถูกต้อง และลดการกวัดแกว่งเนื่องจากสภาวะแวดล้อมมีการเปลี่ยนแปลง โดยที่อัลกอริธึมของ MPPT แต่ละวิธีนั้น จะทำการคำนวณ MPP และติดตามแรงดัน (V_{mpp}) หรือ กระแส (I_{mpp}) ของเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อให้เซลล์แสงอาทิตย์ทำงานที่จุดจ่ายกำลังสูงสุด (P_{mpp}) โดยการให้สัญญาณค่าวัฏจักรหน้าที่ (Duty Cycle: D) ที่เหมาะสมกับ วงจรแปลงผัน



รูปที่ 4 การตามรอยจุดกำลังสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ

3.1 วิธีรับกวนและสังเกต

ระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีรับกวนและสังเกตสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5 ซึ่งหลักการทำงานของวิธีรับกวนและสังเกต จะอาศัยการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันแบบบักก์ในการเพิ่มหรือลดแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อกำหนดจุดการทำงานให้แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าที่จุดกำลังสูงสุด ซึ่งจะทำให้สามารถดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้

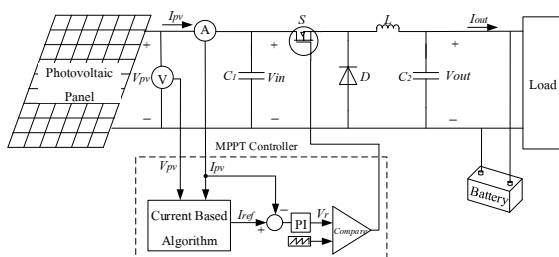


รูปที่ 5 ระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีรับกวนและสังเกต

ถ้ากำหนดค่าวัฏจักรหน้าที่ D ให้มีค่ามาก จะทำให้ช่วงเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวรวดเร็ว แต่จะทำให้เกิดปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสภาวะคงตัว และจะทำให้ไม่สามารถหาจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้อย่างถูกต้อง ในทางตรงกันข้าม ถ้ากำหนดค่าวัฏจักรหน้าที่ D ให้มีค่าน้อย จะทำให้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวช้า จากปัญหาการเลือกกำหนดขนาด D นั้นจะส่งผลกระทบต่อทางอ้อมต่อกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้ ซึ่งอาจทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้ไม่ถูกต้องตามที่คาดหวังไว้ บทความนี้จึงได้นำเสนอระบบการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยอัลกอริธึมอิงกระแส เพื่อจัดการกับปัญหาดังกล่าว ซึ่งจะทำอาศัยการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ (ΔI_{step}) โดยตรง แทนการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรหน้าที่ โดยการเลือกกำหนดค่า ΔI_{step} แทนนั้น เป็นการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับการแปลงกำลังไฟฟ้าที่ได้ของเซลล์แสงอาทิตย์โดยตรง จึงทำให้มีเวลาการตอบสนองก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัวเร็วขึ้นและทำให้เข้าใกล้จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดมากยิ่งขึ้น

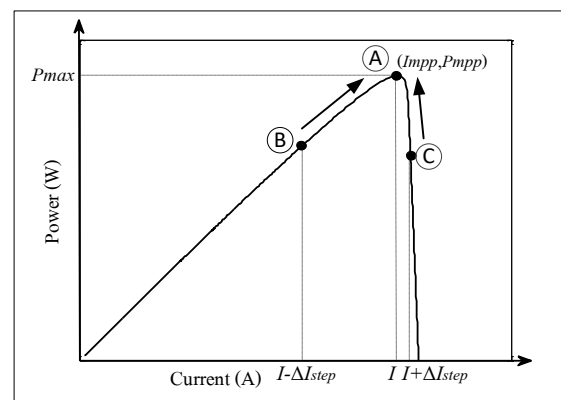
3.2 อัลกอริธึมอิงกระแส

ระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยอัลกอริธึมอิงกระแสที่พิจารณาในบทความนี้ แสดงได้ดังรูปที่ 6 ซึ่งประกอบไปด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ระบบควบคุมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดที่ใช้อัลกอริธึมอิงกระแส สำหรับนำมาประยุกต์ใช้กับวงจรแปลงผันแบบบัก เพื่อหาพลังงานสูงสุด และโหลดหรือแหล่งพลังงานสำรองแบตเตอรี่



รูปที่ 6 ระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุด
ด้วยอัลกอริธึมอิงกระแส

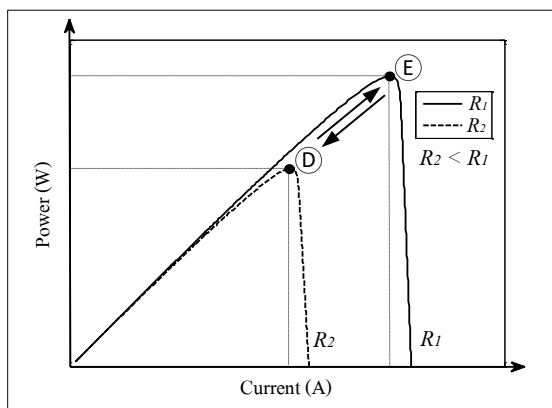
อัลกอริธึมอิงกระแส จะทำงานโดยใช้การเปรียบเทียบกำลังและกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในการหาจุดกำลังสูงสุด จากนั้นจะอาศัยการปรับเปลี่ยนกระแสไฟฟ้า เพื่อให้กระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับกระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังสูงสุด ซึ่งจะทำให้สามารถดึงกำลังไฟฟ้าที่จุดกำลังสูงสุดได้ สามารถพิจารณาหลักการทำงานของอัลกอริธึมอิงกระแสได้จากกราฟคุณลักษณะเฉพาะของกำลังและกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 คุณลักษณะเฉพาะกำลังและกระแสของเซลล์
แสงอาทิตย์ สำหรับอัลกอริธึมอิงกระแส

จากรูปที่ 7 เมื่ออุณหภูมิและปริมาณความเข้มแสงคงที่ ถ้าหากจุดการทำงานเริ่มต้นอยู่ที่จุด B ต้องการให้จุดการทำงานเปลี่ยนไปยังจุดกำลังสูงสุดที่จุด A จะทำให้ทั้งค่าผลต่างของกำลังไฟฟ้า (ΔP) และกระแสไฟฟ้า (ΔI) ของเซลล์แสงอาทิตย์ในคาบเวลาปัจจุบันกับคาบเวลาก่อนหน้านี้มีค่าเป็นบวก จึงทำให้ $\Delta P > 0$ และ $\frac{\Delta P}{\Delta I} \geq 0$ ดังนั้นกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกเพิ่มค่าโดย $I + \Delta I_{step}$ จนกระทั่ง $I = I_{mpp}$ เพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด และเมื่อพิจารณาเปลี่ยนจุดการทำงานจากจุด C ไปยังจุด A จะทำให้ค่าผลต่างของกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเป็นบวก ($+\Delta P$) ในขณะที่ค่าผลต่างของกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเป็นลบ ($-\Delta I$) มีผลทำให้ $\Delta P > 0$ และ $\frac{\Delta P}{\Delta I} < 0$ เพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดจะต้องลดค่ากระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์โดย

$I - \Delta I_{step}$ จนกระทั่ง $I = I_{mpp}$ โดยค่ากระแสที่จุดกำลังสูงสุดที่ได้นี้จะถูกกำหนดเป็นกระแสไฟฟ้าอ้างอิง (I_{ref}) ในรูปที่ 6 และนำมาเปรียบเทียบกับกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ (I_{pv}) เพื่อหาค่าความผิดพลาดผ่านตัวควบคุมพีไอ ซึ่งตัวควบคุมพีไอนี้จะให้สัญญาณแรงดันอ้างอิงในการเปรียบเทียบกับสัญญาณฟีดแบ็ค จากนั้นจะได้สัญญาณพัลส์สำหรับขับสวิตช์วงจรแปลงผันแบบบักกิ้ง ซึ่งจะให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สภาวะแวดล้อมขณะนั้น

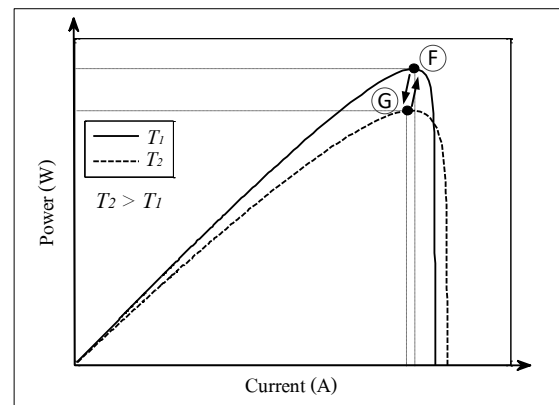


รูปที่ 8 คุณลักษณะเฉพาะกำลังและกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง

ในกรณีที่ปริมาณความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลงสามารถพิจารณาได้จาก P-I Curve ดังรูปที่ 8 โดยความเข้มแสงของ R_1 จะมีค่ามากกว่า R_2 ถ้าปริมาณความเข้มแสงมีค่าเพิ่มมากขึ้น พิจารณาจุดการทำงานจุด D (จุด MPP ของความเข้มแสง R_2) ต้องการให้จุดการทำงานเปลี่ยนไปยังจุด E (จุด MPP ของความเข้มแสง R_1) จะทำให้ $\Delta P > 0$ และ $\frac{\Delta P}{\Delta I} \geq 0$ ดังนั้นกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกเพิ่มค่าเพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดในทางตรงข้าม ถ้าปริมาณความเข้มแสงมีค่าลดลง จุดการทำงานจะเปลี่ยนจากจุด E ไปยังจุด D มีผลทำให้ $\Delta P < 0$ และ $\frac{\Delta P}{\Delta I} \geq 0$ ดังนั้นกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกปรับลดค่าลงเพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดเช่นกัน

ในกรณีที่อุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงจะพิจารณา P-I Curve ดังรูปที่ 9 ถ้าอุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้นจาก T_1 ไปยัง T_2 จุดการทำงานจุด F (จุด MPP ของอุณหภูมิ T_1) จะ

เปลี่ยนไปยังจุด G (จุด MPP ของอุณหภูมิ T_2) มีผลทำให้ $\Delta P < 0$ และ $\frac{\Delta P}{\Delta I} \geq 0$ กระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกลดค่าลงเพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด แต่ถ้าหากอุณหภูมิมียค่าลดลง จะทำให้ $\Delta P > 0$ และ $\frac{\Delta P}{\Delta I} \geq 0$ กระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกเพิ่มค่าเพื่อไปยังจุด MPP จุดใหม่



รูปที่ 9 คุณลักษณะเฉพาะกำลังและกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

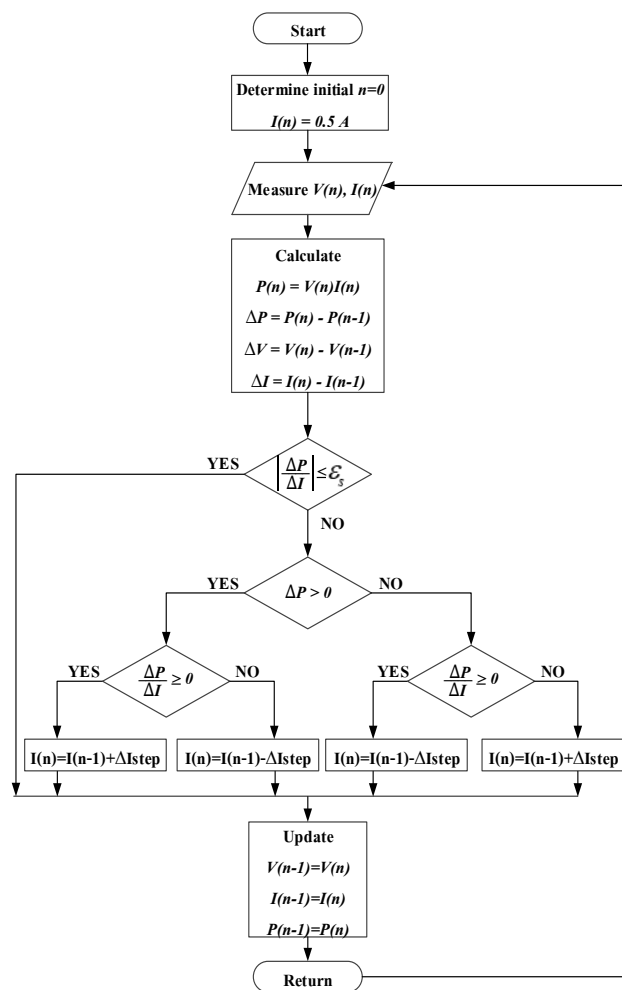
อัลกอริธึมอิงกระแสสามารถหาจุดจ่ายกำลังสูงสุดได้แม้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมอย่างรวดเร็ว และสามารถหาลำดับกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้อย่างถูกต้อง แต่ต้องอาศัยขั้นตอนการคำนวณเพิ่มมากขึ้น จากการพิจารณาจุดการทำงานของการทำงานตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยอัลกอริธึมอิงกระแส สามารถนำมาเขียนแผนภาพลำดับการทำงานของการทำงานตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยอัลกอริธึมอิงกระแสได้ดังรูปที่ 10

จากรูปที่ 10 แผนภาพลำดับการทำงานของการทำงานตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยอัลกอริธึมอิงกระแส เริ่มแรกจะทำการกำหนดค่าเริ่มต้นให้อัลกอริธึมมีค่า $P(0) = 0 \text{ W}$, $V(0) = 0 \text{ V}$ และ $I(0) = 0.5 \text{ A}$ จากนั้นจะทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้า $V(n)$ และกระแสไฟฟ้า $I(n)$ ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในคาบเวลาปัจจุบันแล้วนำมาคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ $P(n) = V(n)I(n)$ พร้อมทั้งเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้า (ΔP) และกระแสไฟฟ้า (ΔI) ในคาบเวลาปัจจุบันกับ

ปีที่ 13 ฉบับที่ 2 เดือนพฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2561

คาบเวลาก่อนหน้า เพื่อนำมาใช้ในการตรวจสอบเงื่อนไข โดยการใช้ $\frac{\Delta P}{\Delta I}$ มาเปรียบเทียบกับค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้ ε_s ก่อน ถ้า $\frac{\Delta P}{\Delta I} \leq \varepsilon_s$ อัลกอริธึมจะไม่เข้าสู่กระบวนการตรวจสอบเงื่อนไข แต่จะทำการอัปเดตค่ากำลังไฟฟ้า $P(n)$ และกระแสไฟฟ้า $I(n)$ ในคาบเวลาปัจจุบัน เพื่อนำไปใช้คำนวณในรอบต่อไป และอัลกอริธึมจะเริ่มต้นการทำงานใหม่อีกครั้ง ในทางตรงข้ามถ้า $\frac{\Delta P}{\Delta I} > \varepsilon_s$ อัลกอริธึมจะทำการเปรียบเทียบค่า ΔP และ $\frac{\Delta P}{\Delta I}$ ว่ามีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์หรือไม่ โดยจะทำการเปรียบเทียบค่า ΔP ก่อนแล้วถึงจะเปรียบเทียบค่า $\frac{\Delta P}{\Delta I}$ ซึ่งจะมีการตรวจสอบเงื่อนไขด้วยกันทั้งหมด 4 เงื่อนไขดังนี้

- 1) ถ้า $\Delta P > 0$ และ $\frac{\Delta P}{\Delta I} \geq 0$ อัลกอริธึมจะทำการปรับค่ากระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ $I(n) = I(n-1) + \Delta I_{step}$
- 2) ถ้า $\Delta P > 0$ และ $\frac{\Delta P}{\Delta I} < 0$ อัลกอริธึมจะทำการปรับค่ากระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ $I(n) = I(n-1) - \Delta I_{step}$
- 3) ถ้า $\Delta P < 0$ และ $\frac{\Delta P}{\Delta I} \geq 0$ อัลกอริธึมจะทำการปรับค่ากระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ $I(n) = I(n-1) - \Delta I_{step}$ และสุดท้าย
- 4) ถ้า $\Delta P < 0$ และ $\frac{\Delta P}{\Delta I} < 0$ อัลกอริธึมจะทำการปรับค่ากระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ $I(n) = I(n-1) + \Delta I_{step}$ จากนั้นอัลกอริธึมจะทำการอัปเดตค่า $P(n)$ และ $I(n)$ และอัลกอริธึมจะเริ่มต้นการทำงานใหม่อีกครั้ง



รูปที่ 10 แผนภาพลำดับการทำงานของอัลกอริธึมอิงกระแส

4. การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์

การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เพื่อยืนยันว่า อัลกอริธึมอิงกระแส สามารถดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดและตามรอยจุดกำลังสูงสุดได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อม ซึ่งการจำลองสถานการณ์ของระบบดังรูปที่ 6 ในบทความนี้ จะอาศัยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB ในการจำลองสถานการณ์ โดยกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าในส่วนต่าง ๆ ที่พิจารณาในการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ในส่วนต่าง ๆ ของระบบ

พารามิเตอร์แผงเซลล์แสงอาทิตย์	ค่า
V_{mpp}	38.73 V
I_{mpp}	1.033 A
V_{oc}	43.125 V
I_{sc}	1.1 A
P_{max}	40 W
พารามิเตอร์วงจรแปลงผันแบบบักค์	ค่า
C_1	100 μ F
C_2	1000 μ F
L	10 mH
f_{sw}	10 kHz
V_{batt}	12 V

4.1 ผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ของอัลกอริธึมอิงกระแส

การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ในบทความนี้ กำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มแสงและให้ค่าอุณหภูมิคงที่ที่ 25 °C ทุกความเข้มแสง โดยการจำลองสถานการณ์แบ่งเป็นลักษณะสัญญาณของความเข้มแสงออกเป็น 2 ช่วงหลัก ๆ ดังนี้ ช่วงที่ 1 สัญญาณลาดเอียง โดยเพิ่มจาก 700 ไป 800 W/m² (ในช่วงเวลา 0.2 วินาที) และลดจาก 800 ไปเป็น 600 W/m² (ในช่วงเวลา 0.2 วินาที) และ ช่วงที่ 2 สัญญาณขั้นบันไดลดจาก 600 ไป

เป็น 500 W/m² และเพิ่มจาก 500 ไปยัง 1000 W/m² ดังรูปที่ 11(ก) โดยการจำลองสถานการณ์จะทำการวัดค่า I_{pv} , V_{pv} และ P_{pv} แสดงได้ดังรูปที่ 11(ข)-(ง) ตามลำดับ พบว่าอัลกอริธึมอิงกระแสที่ได้นำเสนอ สามารถดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถจ่ายได้ ทั้งแบบที่มีความเข้มแสงแบบสัญญาณลาดเอียงและสัญญาณขั้นบันได โดยสังเกตได้ว่าถ้าปริมาณความเข้มแสงมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลง กระแสไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงตามปริมาณความเข้มแสงที่เปลี่ยนแปลง ทำให้สามารถติดตามกำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงและทำให้ได้กำลังไฟฟ้าที่จุด MPP

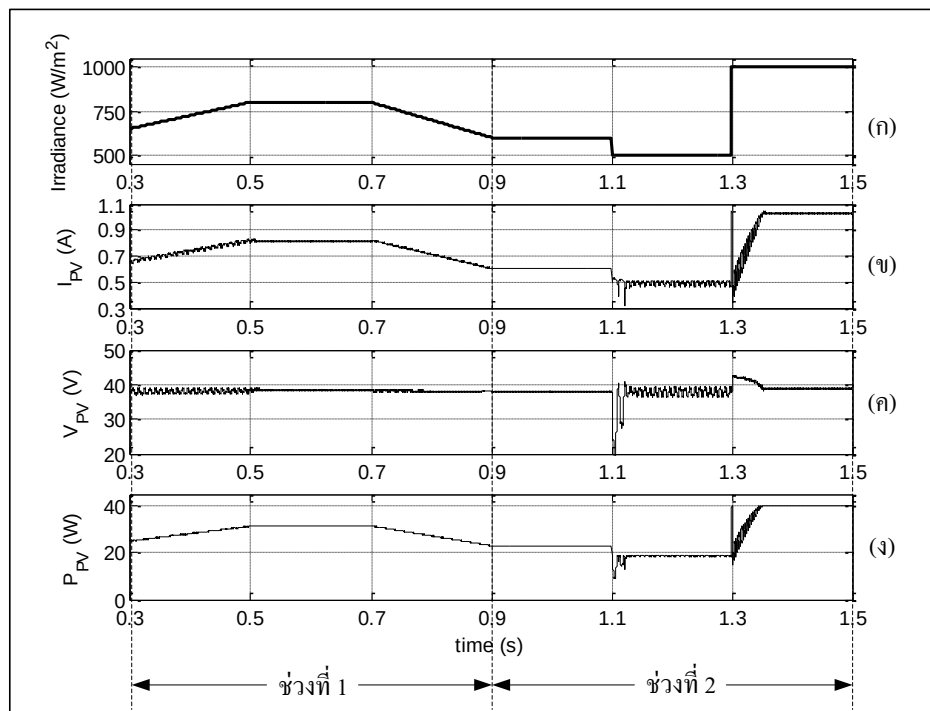
4.2 การเปรียบเทียบผลการตามรอยจุดกำลังสูงสุดระหว่างวิธีรบกวนและสังเกตกับอัลกอริธึมอิงกระแส

การจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบผลการตามรอยจุดกำลังสูงสุด ด้วยวิธีรบกวนและสังเกตกับอัลกอริธึมอิงกระแส ได้ทำการจำลองสถานการณ์เปลี่ยนแปลงความเข้มแสงแบบทันทีทันใดออกเป็น 3 ช่วงด้วยกันคือ 600, 1000 และ 800 W/m² ตามลำดับ ที่อุณหภูมิคงที่ 25 °C แสดงได้ดังรูปที่ 12 จะเห็นได้ว่าอัลกอริธึมอิงกระแสที่ได้นำเสนอในบทความนี้ มีการตอบสนองในสภาวะชั่วคราว (transient) ที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับวิธีรบกวนและสังเกต และการตอบสนองในสภาวะคงตัว (steady-state) อัลกอริธึมอิงกระแสสามารถดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ดีกว่า รวมทั้งมีความถูกต้องแม่นยำที่ดีกว่าวิธีรบกวนและสังเกต เนื่องจากวิธีรบกวนและสังเกต เกิดการกวัดแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่จุดกำลังสูงสุด และอาจทำให้เกิดข้อผิดพลาดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมได้ เนื่องจากวิธีรบกวนและสังเกต จะต้องอาศัยการกำหนดค่า ΔD ที่เหมาะสมเพียงค่าเดียว ทำให้ดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้น้อยกว่าอัลกอริธึมอิงกระแส

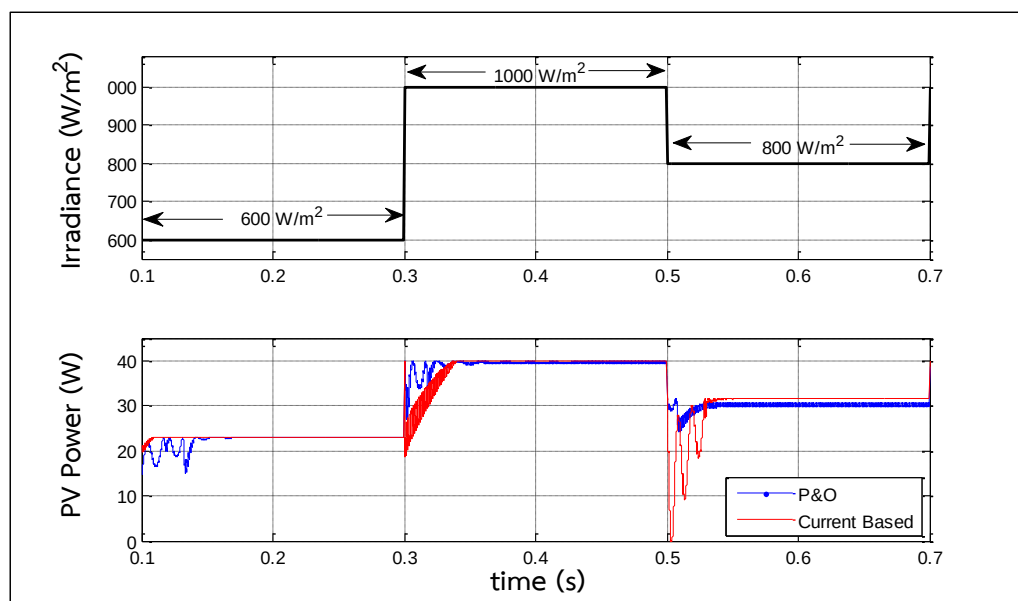
จากรูปที่ 13(ก) เมื่อพิจารณาเฉพาะช่วงสภาวะชั่วคราวในสภาวะมาตรฐาน ที่ความเข้มแสง 1000 W/m² และอุณหภูมิ 25 °C ในช่วงวินาทีที่ 0.3 ถึง 0.4s จะพบว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงแบบทันทีทันใด ในวิธีรบกวนและสังเกตมีเวลาในการตอบสนองที่ช้า โดยใช้

เวลาก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัว 0.09s แต่ในอัลกอริธึมอิงกระแสใช้เวลาในการตอบสนองที่รวดเร็วกว่า โดยใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัว 0.04s และเมื่อพิจารณาเฉพาะช่วงสภาวะคงตัว ที่ความเข้มแสงเดียวกัน ในช่วงวินาทีที่ 0.35 ถึง 0.5 ในรูปที่ 13(ข) จะสังเกตได้ว่าในวิธีรบกวนและสังเกตมีการกวัดแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่จุดกำลังสูงสุดในสภาวะคงตัวมาก และไม่สามารถหาจุดกำลังสูงสุดได้

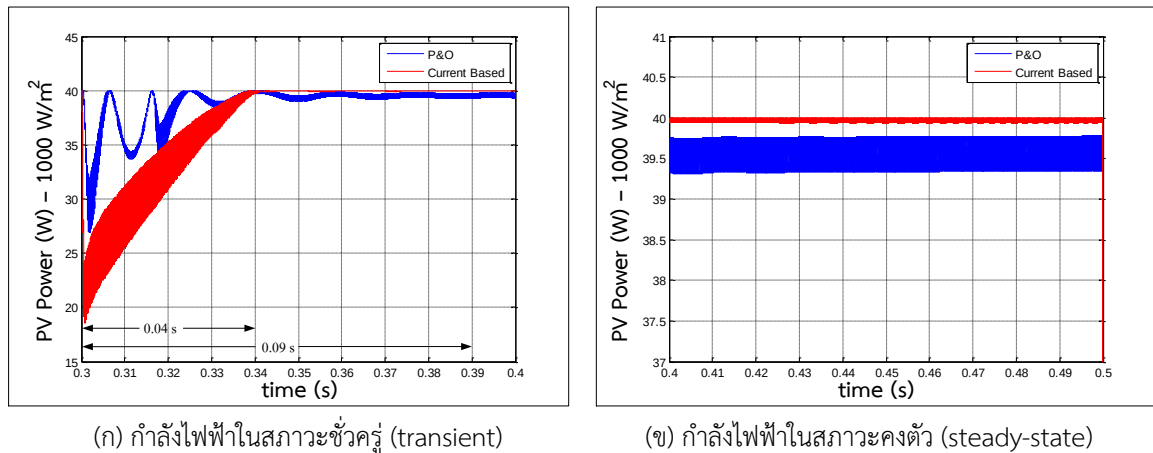
อย่างถูกต้อง โดยวิธีรบกวนและสังเกตสามารถถึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ 39.5 W แต่ในอัลกอริธึมอิงกระแสสามารถถึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้มากกว่าคือ 40 W โดยค่าดังกล่าวตรงกับค่ากำลังไฟฟ้าที่จุดจ่ายกำลังสูงสุดสำหรับความเข้มแสง 1000 W/m² ดังนั้นระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยอัลกอริธึมอิงกระแส ให้ประสิทธิภาพการทำงานที่ดีกว่าวิธีรบกวนและสังเกต



รูปที่ 11 ผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ของอัลกอริธึมอิงกระแส เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง



รูปที่ 12 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบวิธีรบกวนและสังเกตกับอัลกอริธึมอิงกระแส



(ก) กำลังไฟฟ้าในสภาวะชั่วคราว (transient)

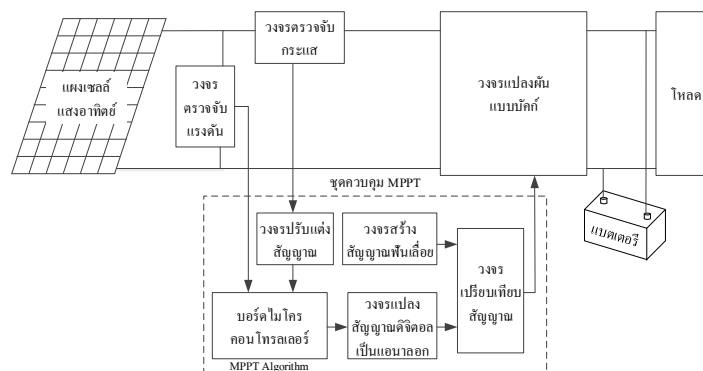
(ข) กำลังไฟฟ้าในสภาวะคงตัว (steady-state)

รูปที่ 13 พิจารณาผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ ที่ความเข้มแสง 1000 W/m²

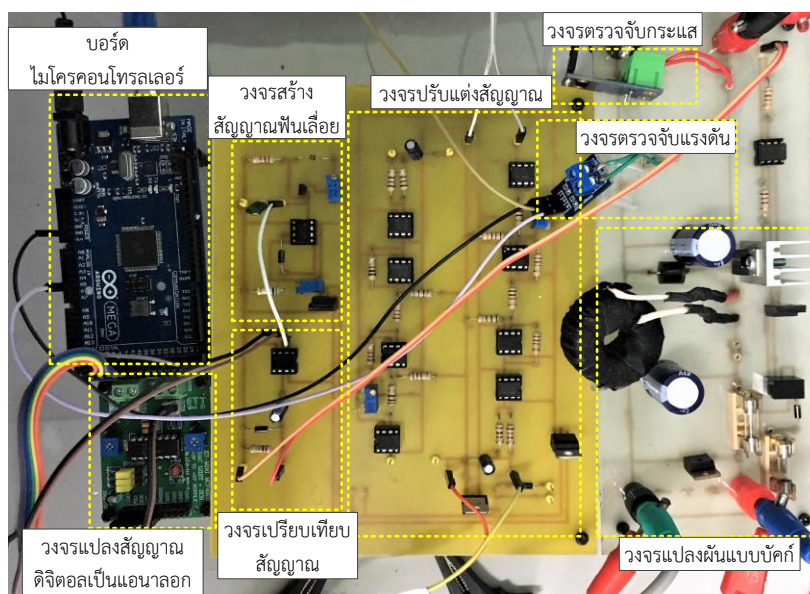
5. ชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการทดสอบ

เพื่อยืนยันผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์และแสดงให้เห็นว่าวิธีที่ได้นำเสนอในบทความ สามารถสร้างใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ จึงได้มีการสร้างชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการทดสอบระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยอัลกอริธึมอิงกระแสกับระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระซึ่งสามารถแสดงโครงสร้างได้ดังรูปที่ 14 ประกอบไปด้วย วงจรตรวจจับแรงดันและวงจรตรวจจับกระแส ที่ทำหน้าที่วัดค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ป้อนค่าให้กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR รุ่น ET-EASY MEGA 2560 ในชุดควบคุม MPPT เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งชุดควบคุม MPPT สามารถปรับโปรแกรมหรืออัลกอริธึมในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ เมื่อต้องการเปลี่ยนวิธีการตามรอยจุดกำลังสูงสุด ในอัลกอริธึมอิงกระแสนี้ บอร์ดจะคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด และให้

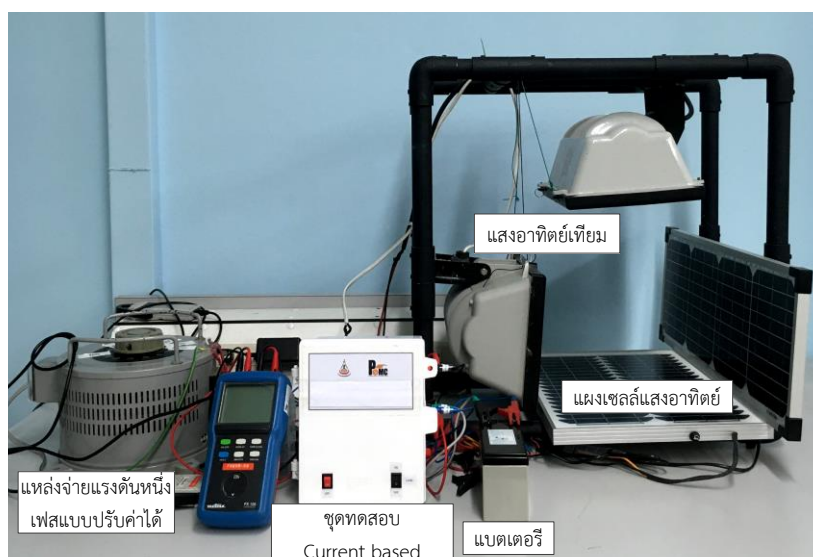
กระแสไฟฟ้าอ้างอิงออกมาเปรียบเทียบกับกระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อหาค่าความผิดพลาดผ่านตัวควบคุมพีไอ ซึ่งจะได้อ้างอิงแรงดันอ้างอิง (V_r) โดยค่าแรงดันอ้างอิงที่ได้นี้จะถูกส่งออกให้กับวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก เพื่อนำไปใช้เปรียบเทียบกับวงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อยที่สร้างขึ้น โดยใช้วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ จากนั้นจะได้สัญญาณพัลส์ที่ผ่านวงจรแยกโคตสัญญาณ เพื่อนำไปใช้ในการขับสวิทช์ของวงจรแปลงผันแบบบัก ซึ่งจะทำให้กระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับกระแสไฟฟ้าที่จุดจ่ายกำลังสูงสุด ทำให้สามารถดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดออกมาใช้งานได้ การทำงานของระบบควบคุมดังกล่าวในข้างต้น ทำให้สามารถควบคุมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระได้ตามต้องการ โดยชุดควบคุมในชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดแสดงได้ดังรูปที่ 15 และภาพรวมของระบบฮาร์ดแวร์ชุดทดสอบทั้งหมดแสดงได้ดังรูป 16



รูปที่ 14 โครงสร้างชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ของระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุด



รูปที่ 15 ชุดควบคุมในชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุด



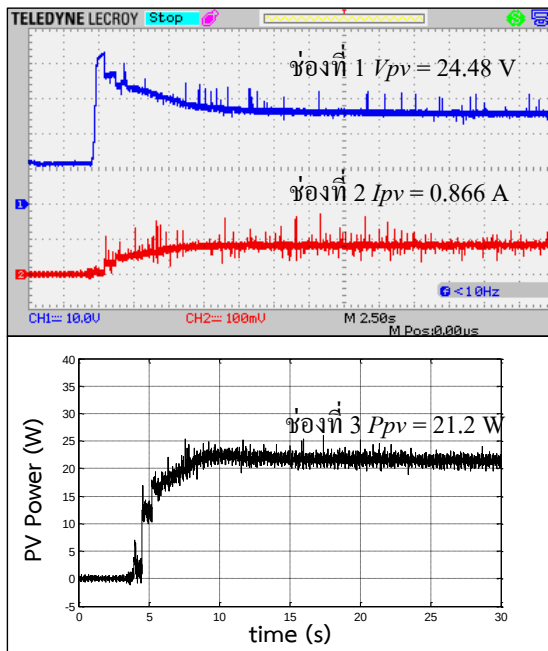
รูปที่ 16 ระบบฮาร์ดแวร์ชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยอัลกอริธึมอิงกระแส

6. ผลการทดสอบชุดทดสอบและอภิปรายผล

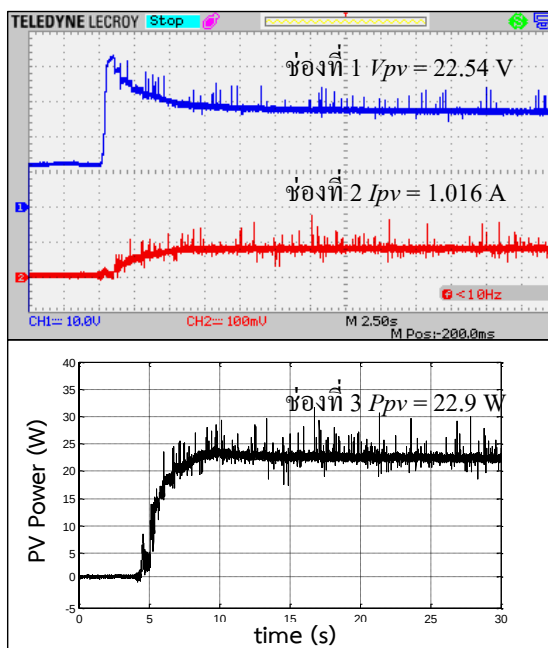
การทดสอบชุดทดสอบของระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยอัลกอริธึมอิงกระแส ดำเนินการทดสอบโดยใช้แสงอาทิตย์เทียมที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ โดยการปรับค่าแรงดันจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสแบบปรับค่าได้ (ค่าแรงดันไฟฟ้าจะมีผลต่อความเข้มแสงของแสงอาทิตย์เทียมในห้องปฏิบัติการ) ให้ความเข้มแสงที่ได้จากหลอดไฟที่ตกกระทบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อแสดงให้เห็นอัลกอริธึมอิงกระแสสามารถดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเข้มแสงต่าง ๆ ได้จริง และผลการ

ให้อุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิในสภาวะมาตรฐาน ทำให้การทดสอบในบทความนี้ไม่ได้อยู่ภายใต้สภาวะมาตรฐาน ซึ่งในบทความนี้ผู้วิจัยได้เลือกทำการทดสอบที่ความเข้มแสง 600, 800 และ 1000 W/m² โดยใช้เครื่องมือวัดความเข้มแสง (lux meter) รุ่น T-10A Konica Minolta เป็นอุปกรณ์ในการวัดค่าความเข้มแสงของหลอดไฟที่ตกกระทบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อแสดงให้เห็นอัลกอริธึมอิงกระแสสามารถดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเข้มแสงต่าง ๆ ได้จริง และผลการ

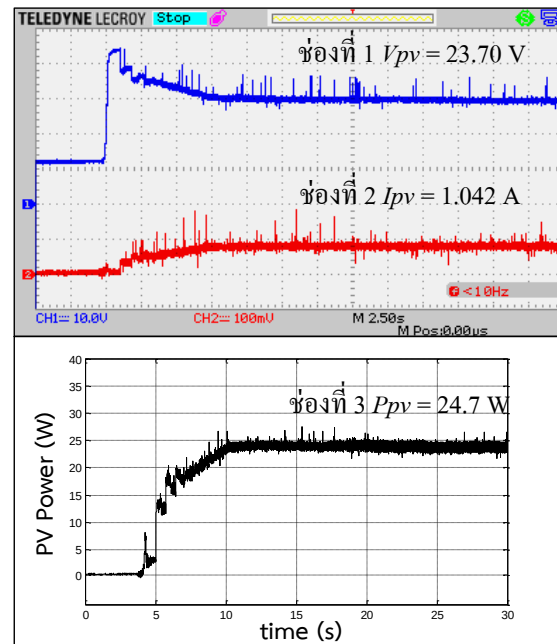
ทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 17 (ก) - (ค) โดยสัญญาณช่องที่ 1 และ 2 คือแรงดันและกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ที่วัดได้จากการทดสอบตามลำดับ ซึ่งจากจุดข้อมูลของแรงดันและกระแสที่ได้จากสัญญาณช่องที่ 1 และ 2 นั้นเมื่อนำมาคำนวณกำลังไฟฟ้าจะสามารถนำมาพล็อตกราฟได้ดังสัญญาณช่องที่ 3



(ก) ความเข้มแสง 600 W/m²



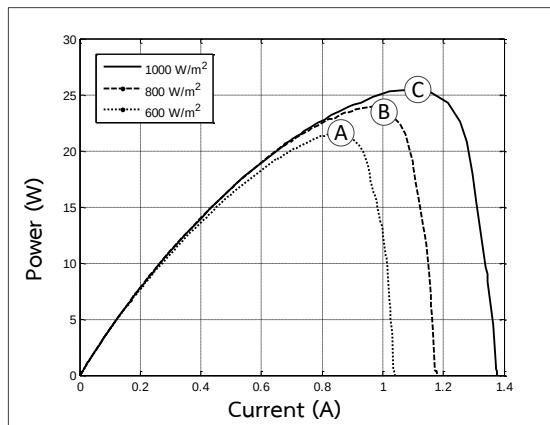
(ข) ที่ความเข้มแสง 800 W/m²



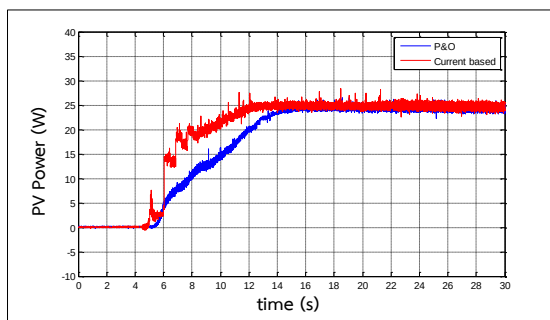
(ค) ความเข้มแสง 1000 W/m²

รูปที่ 17 ผลการทดสอบชุดทดสอบระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยอัลกอริธึมอิงกระแส

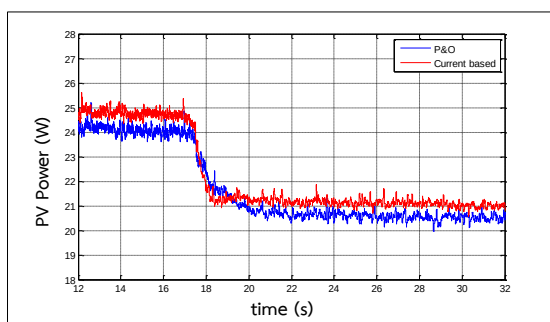
จากผลการทดสอบชุดทดสอบในรูปที่ 17 (ก)-(ค) จะเห็นได้ว่าค่า I_{pv} มีค่าใกล้เคียงกระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังสูงสุด และค่า P_{pv} มีค่าใกล้เคียงกำลังไฟฟ้าที่จุดกำลังสูงสุด โดยเมื่อความเข้มแสงเท่ากับ 600 W/m² ในรูปที่ 17(ก) จะได้ $I_{pv} = 0.866$ A และ $P_{pv} = 21.2$ W และเมื่อความเข้มแสงเท่ากับ 800 W/m² ในรูปที่ 17(ข) จะได้ $I_{pv} = 1.016$ A และ $P_{pv} = 22.9$ W และสุดท้ายเมื่อความเข้มแสงเท่ากับ 1000 W/m² ดังรูปที่ 17(ค) จะได้ $I_{pv} = 1.042$ A และ $P_{pv} = 24.7$ W ซึ่งค่า I_{pv} และ P_{pv} ที่ได้ในแต่ละความเข้มแสงสามารถแสดงจุดการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้ในกราฟคุณลักษณะเฉพาะกำลังและกระแสของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 40W ที่ได้จากการทดสอบจริงดังรูปที่ 18 โดยรูปดังกล่าวจุด A B และ C คือจุดการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำให้ได้กำลังสูงสุดในแต่ละความเข้มแสง ดังนั้นจากการทดสอบที่ได้นำเสนอไปข้างต้นยืนยันได้ว่าอัลกอริธึมอิงกระแสสามารถนำไปใช้ในการตามรอยจุดกำลังสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระได้



รูปที่ 18 กราฟคุณลักษณะเฉพาะของแผงเซลล์
แสงอาทิตย์ขนาด 40 วัตต์



รูปที่ 19 ผลการทดสอบชุดทดสอบ
จากความเข้มแสง 0 ไป 1000 W/m²



รูปที่ 20 ผลการทดสอบชุดทดสอบ
จากความเข้มแสง 1000 ไป 600 W/m²

จากผลการทดสอบชุดทดสอบของอัลกอริธึมอิงกระแส กำลังไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของวิธีรบกวนและสังเกต (ใช้ชุดทดสอบเดียวกัน ปรับโปรแกรมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เท่านั้น) กรณีที่

ระดับความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มมากขึ้นจาก 0 ไปเป็น 1000 W/m² การตอบสนองของกำลังไฟฟ้าแสดงได้ดังรูปที่ 19 และความเข้มแสงลดลงจาก 1000 ไป 600 W/m² แสดงได้ดังรูปที่ 20 จะเห็นได้ว่าอัลกอริธึมอิงกระแสใช้เวลาในการตอบสนองในสภาวะชั่วคราวที่รวดเร็วกว่าวิธีรบกวนและสังเกตเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับความเข้มแสงทั้งสองแบบ และในสภาวะคงตัวอัลกอริธึมอิงกระแสยังสามารถดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้มากกว่าอีกด้วย ดังนั้นจากการเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้ นำเสนอในบทความนี้ ยืนยันได้ว่าอัลกอริธึมอิงกระแสสามารถแก้ปัญหาข้อเสียที่เกิดขึ้นของวิธีรบกวนและสังเกตได้ ซึ่งทำให้อัลกอริธึมอิงกระแสมีประสิทธิภาพการทำงานของระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดที่ดีกว่าวิธีรบกวนและสังเกต

7. สรุป

บทความนี้แนะนำเสนออัลกอริธึมอิงกระแสสำหรับการตามรอยจุดกำลังสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ ผลจากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ แสดงให้เห็นว่าอัลกอริธึมอิงกระแสสามารถดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถจ่ายได้และสามารถตามรอยจุดกำลังสูงสุดได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง โดยในอัลกอริธึมอิงกระแสมีความจำเป็นจะต้องออกแบบตัวควบคุมพีไอให้เหมาะสมกับระบบ ซึ่งในบทความนี้จะอาศัยวิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมที่ใช้การเทียบสัมประสิทธิ์ของระบบมาตรฐานอันดับสอง [K.M. Tsang and W.L. Chan, 2005] เพื่อยืนยันผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ ในบทความนี้จึงได้นำเสนอการสร้างชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการทดสอบ สำหรับการทดสอบโดยการให้แสงอาทิตย์เทียมในห้องปฏิบัติการ จากผลการทดสอบปรากฏว่า อัลกอริธึมอิงกระแสสามารถดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่จุดจ่ายกำลังสูงสุดได้อย่างถูกต้อง ลดการกวัดแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสภาวะคงตัว และใช้เวลาตอบสนองในสภาวะชั่วคราวที่รวดเร็วกว่าวิธีรบกวน

และสังเกตภายใต้สภาวะการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงเดียวกัน การตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีดังกล่าว ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์สามารถทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น คุ่มค่าต่อการนำไปใช้งานจริง และก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด

8. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนการศึกษา “ทุนกิตติบัณฑิต” สนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] Trishan Esum and Patrick L. Chapman, “ *Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques*”, in IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 22, No. 2, pp. 439-449, June 2007.
- [2] Ali F Murtaza, Hadeed Ahmed Sher, Marcello Chiaberge, Diego Boero, Mirko De Giuseppe and Khaled E Addoweesh, “ *Comparative Analysis of Maximum Power Point Tracking Techniques for PV applications*”, Pakistan , Saudi Arabia and Italy, pp. 83-88, 2013.
- [3] Mei Shan Ngan and Chee Wei Tan, “ *A Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms for Stand- alone Photovoltaic Systems*”, in IEEE Applied Power Electronics Colloquium (IAPEC), Malaysia, pp. 22-27, April 2011.
- [4] ปทุมพร วงศ์ใหญ่ กองพันธ์ อารีรักษ์ และกองพล อารีรักษ์, “ *ระบบตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระโดยใช้วิธีรบกวนและสังเกตที่มีการปรับตัว,*” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 38, อุดรธานี, 18-20 พฤศจิกายน 2558.
- [5] R. Boukenoui, R. Bradai, A. Mellit, M. Ghanes and H. Salhi, “ *Comparative Analysis of P&O, Modified Hill Climbing- FLC, and Adaptive P&O-FLC MPPTs for Microgrid Standalone PV System*” , 4th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), Palermo, Italy, 22-25 Nov 2015, pp. 1095-1099.
- [6] Hanju Cha and Sanghoey Lee, “ *Design and Implementation of Photovoltaic Power Conditioning System using a Current based Maximum Power Point Tracking,*” Chungnam National University, Korea, 2008.
- [7] H. Toodeji, S. H. Fathi and N. Farokhnia, “ *Using Current-Based MPPT Method in New Integrated System of PV Module and STATCOM*” 5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, Iran, pp. 1028-1033, 2010.
- [8] Alivarani Mohapatra, Byamakesh Nayak and K.B.Mohanty, “ *Current Based Novel Adaptive P&O MPPT Algorithm for Photovoltaic System Considering Sudden Change in the Irradiance*”, in IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), 2014.
- [9] I. William Christopher and Dr. R. Ramesh, “ *Comparative Study of P&O and InC MPPT Algorithms*” , in American Journal of Engineering Research (AJER), Vol. 02, Issue. 12, pp. 402-408, 2013.
- [10] L. Bouselham and B. Hajji, H. Hajji, “ *Comparative Study of Different MPPT Methods for Photovoltaic System*”, ENSA-UMP, Morocco, 2015.

- [11] Md Fahim Ansaria, S. Chatterjib and Atif Iqbalc, “ *A fuzzy logic control scheme for a solar photovoltaic system for a maximum power point tracker*”, International Journal of Sustainable Energy Vol. 29, No. 4, pp. 245–255, Dec 2010.
- [12] Jaw-Kuen Shiau, Yu-Chen Wei and Bo-Chin Chen, “ *A Study on the Fuzzy-Logic-Based Solar Power MPPT Algorithms Using Different Fuzzy Input Variables*”, Tamkang University, Taiwan, pp. 100-127, 2015.

การเปรียบเทียบโครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสำหรับ การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับ

The Comparison of Shunt Active Power Filter Structure for the Harmonic Elimination in AC-Electric Railway Systems

ฐานันตร์ ตรงใจ ทศพร ณรงค์ฤทธิ์* กองพล อารีรักษ์

กลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Thanan Trongjai Tosaporn Narongrit* 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: tosaporn@sut.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการเปรียบเทียบสมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับโดยใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน 2 โครงสร้าง คือ โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก และโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วม โดยการเปรียบเทียบจะใช้ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวม (%THD) ค่าเปอร์เซ็นต์การกระเพื่อมของแรงดันบัสไฟตรง ($\% \Delta V_{DC(ripple)}$) และผลตอบสนองทางพลวัต (Dynamic response) ของแรงดันบัสไฟตรงในช่วงที่โหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงเป็นตัวชี้วัดสมรรถนะของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานทั้งสองโครงสร้าง การตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับใช้คำนวณกระแสอ้างอิงให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานทั้งสองโครงสร้างจะใช้วิธีหาค่าเฉลี่ยของฮาร์มอนิก (วิธี SRF) ระบบควบคุมการฉีดกระแสชดเชยและระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟใช้ตัวควบคุมพีไอแบบดั้งเดิม การจำลองสถานการณ์กำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าในบทความนี้ จะใช้การจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูปที่ใช้โปรแกรม Simulink/MATLAB ร่วมกับบอร์ด DSP รุ่น TMS320C2000™ Experimenter Kit ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์ พบว่า วงจรกรองกำลังแอกทีฟทั้งสองโครงสร้างให้ประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิกที่ใกล้เคียงกัน โดยค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยอยู่ในกรอบมาตรฐาน IEEE std 519-2014 นอกจากนี้ วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วมสามารถให้ผลค่าการกระเพื่อมของแรงดันบัสไฟตรงที่มีขนาดน้อยกว่าโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก อย่างไรก็ตามโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยกมีผลตอบสนองทางพลวัตที่ดีกว่าโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วมเมื่อระบบมีการเปลี่ยนแปลงโหลดมากขึ้น

คำสำคัญ: วงจรกรองกำลังแอกทีฟ การกำจัดฮาร์มอนิก ระบบรางไฟฟ้า การตรวจจับฮาร์มอนิก ระบบฮาร์ดแวร์ในลูป

ABSTRACT

This paper presents the performance comparison of harmonic elimination in electric railway systems with two shunt active power filter (SAPF) structures: split capacitor structure and joint capacitor structure. The indicators of the comparison for the two SAPF structures are the total current harmonic distortion (%THD), the ripple of DC bus voltage ($\% \Delta V_{DC(ripple)}$) and the dynamic response of DC bus voltage during load changes. The harmonic detection,

synchronous reference frame (SRF method) is used for calculating the reference current of both SAPF structures. The conventional PI controllers are used to control the compensating current and regulate the DC bus voltage of SAPF. The hardware in the loop (HIL) simulation technique which process by Simulink/MATLAB program and TMS320C2000TM Experimenter Kit board is applied to simulate harmonic elimination in AC-electric railway systems. The simulation results show that both SAPF structures can provide good performance for harmonic elimination and the %THD_i of source current after compensation are satisfied under the IEEE std 519-2014. Furthermore, the SAPF with joint capacitor structure gives less ripple of DC bus voltage than the split capacitor structure. However, the split capacitor structure has better dynamic response than the joint capacitor structure when loads in the system have been changed and greatly increased.

Keyword: Active power filter, harmonic elimination, railway systems, Harmonic detection, Hardware in the loop

1. บทนำ

ปัจจุบันการขนส่งด้วยระบบรางไฟฟ้าถูกนำมาใช้งานในหลายประเทศทั่วโลก เนื่องจากการขนส่งด้วยระบบดังกล่าวเป็นการขนส่งที่มีประสิทธิภาพและมีความปลอดภัยสูงเมื่อเทียบกับการขนส่งด้วยระบบอื่นๆ ระบบรางไฟฟ้าจำเป็นต้องมีระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเพื่อใช้ในการขับเคลื่อนตัวรถไฟฟ้า ซึ่งระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบรางที่มีระยะทางไกลหรือรถไฟฟ้าความเร็วสูงที่ใช้ในหลายประเทศ คือ ระบบไฟฟ้ากระแสสลับพิกัดใช้งานในช่วง 25-27.5 kV ความถี่ 50 Hz หรือ 60 Hz ทั้งนี้เนื่องจากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้างดงามมีระดับแรงดันไฟฟ้าสูง ทำให้มีพิสัยการจ่ายไฟฟ้าที่ไกล และส่งผลให้รถไฟฟ้าสามารถวิ่งด้วยความเร็วที่สูงกว่าระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง [1] ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบรางจะเริ่มต้นจาก สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย (Substation) รับไฟฟ้าแรงสูงตั้งแต่พิกัดแรงดัน 69 kV ขึ้นไปจากสายส่งของผู้ผลิตไฟฟ้า จากนั้นจะใช้หม้อแปลงไฟฟ้าของระบบราง (Traction Transformer) เพื่อลดระดับแรงดันไฟฟ้าลงมาที่ระดับแรงดันในช่วง 25-27.5 kV ก่อนส่งจ่ายให้กับโหลดรถไฟฟ้า (Traction Load) ในอดีตที่ผ่านมา ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบรางจะเป็นระบบหนึ่งเฟส (Single-phase Power

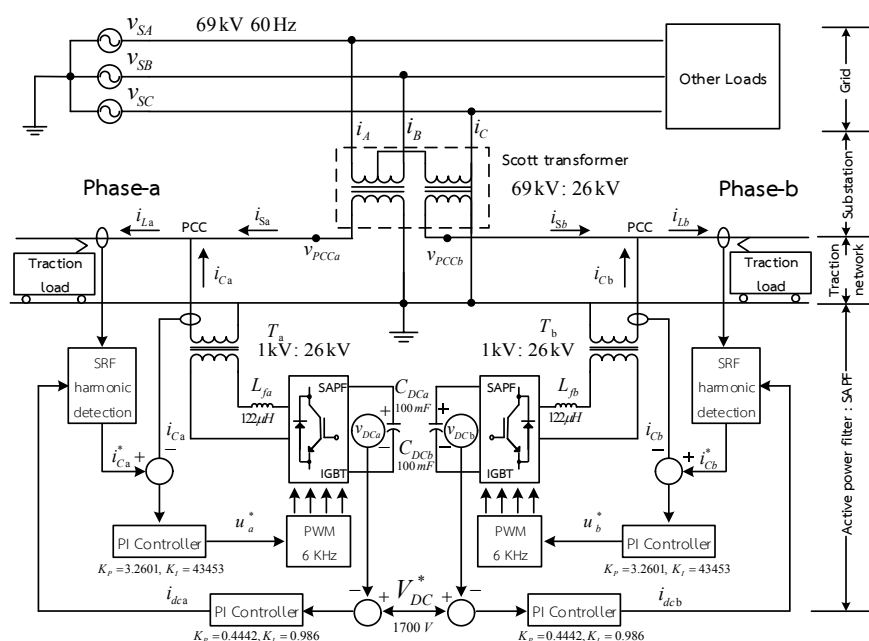
Supply Systems) ซึ่งนิยมใช้งานร่วมกับหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟส (Single-Phase Linear Transformer) เนื่องจากหม้อแปลงดังกล่าวมีต้นทุนการผลิตต่ำและมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน อย่างไรก็ตามระบบส่งจ่ายแบบหนึ่งเฟสดังกล่าวจะส่งผลให้เกิดปัญหาเฟสไม่สมดุลขึ้นที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าทางฝั่งปฐมภูมิของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า [4] จากปัญหาเฟสไม่สมดุลที่เกิดขึ้นจึงมีการใช้งานระบบหนึ่งเฟสแบบ 2 ชุด หรือ 2 เฟสจากหนึ่งสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย เรียกว่า ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบเฟสร่วม (Co-phase Power Supply Systems) [5] โดยระบบนี้จะใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแปลงแรงดันจากระบบสามเฟสให้เป็นระบบสองเฟสซึ่งสามารถช่วยลดปัญหาเฟสไม่สมดุลของกระแสไฟฟ้าทางฝั่งปฐมภูมิได้เมื่อโหลดของรถไฟฟ้าทั้งสองเฟสทางฝั่งทุติยภูมิมีขนาดเท่ากัน หม้อแปลงไฟฟ้าแบบสมดุล (balance transformer) ที่นิยมใช้งานในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบเฟสร่วมมีอยู่หลายประเภทด้วยกัน เช่น หม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก๊อต (Scott Transformer) หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอบลองซ์ (Le-blanc Transformer) หม้อแปลงไฟฟ้าแบบวูดบริดจ์ (Woodbridge Transformer) เป็นต้น [3-5] อย่างไรก็ตามในบทความนี้จะพิจารณาใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก๊อต เนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้าประเภทดังกล่าวเป็น

หม้อแปลงไฟฟ้าที่ทำให้เกิดปัญหาเฟสไม่สมดุลทางฝั่งปฐมภูมิน้อย และมีพิกัดใช้งานอยู่ในย่านเดียวกับข้อมูลของระบบรางไฟฟ้าที่นำมาใช้พิจารณาในกรณีศึกษา นี้ อีกทั้งยังไม่จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ต่อรวมทางฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าอีกด้วย [4]

โดยทั่วไปโหลดของระบบรางไฟฟ้านั้นประกอบด้วยชุดวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า ชุดวงจรควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ รวมถึงโหลดของอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ภายในขบวนรถไฟ เช่น อุปกรณ์แสงสว่าง พัดลม และเครื่องปรับอากาศ เป็นต้น ซึ่งการใช้งานโหลดดังกล่าวจะก่อให้เกิดปัญหาฮาร์มอนิกขึ้นในระบบไฟฟ้าส่งผลให้เกิดผลเสียหลายประการต่อระบบรางไฟฟ้า เช่น เกิดกำลังงานสูญเสียในสายส่งกำลัง ทำให้ความสามารถในการจ่ายโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้ามีค่าลดลง [4] เกิดสัญญาณรบกวนทำให้ระบบสื่อสารและระบบอัตโนมัติสัญญาณทำงานผิดพลาด [4] เป็นต้น ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องทำการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าให้หมดไปหรือลดน้อยลง การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าสามารถทำได้โดยการใช้วงจรกรองกำลังพาสซีฟ (Passive Power Filter: PPF) [10] การใช้วงจรกรองกำลังแอคทีฟ (Active Power Filter) [6] รวมถึงการนำวงจรทั้งสองมาใช้งาน

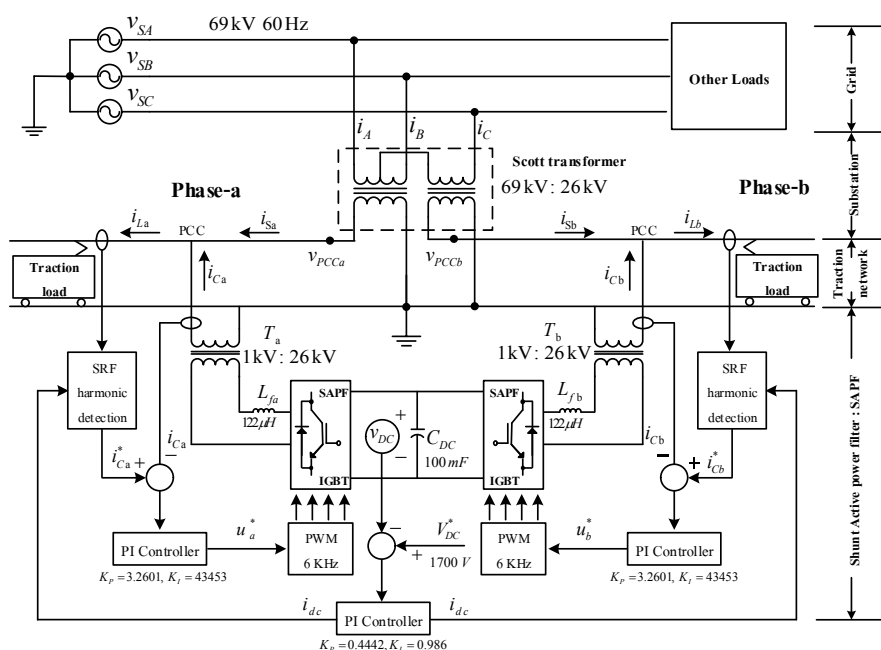
ร่วมกันเรียกว่าวงจรไฮบริดจ์ (Hybrid Filter) [7] โดยบทความนี้จะนำเสนอการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าด้วยวงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนาน (Shunt Active Power Filter: SAPF) เนื่องจากเป็นวิธีที่ให้ประสิทธิภาพสูงในการกำจัดกระแสฮาร์มอนิก มีความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงโหลดของระบบไฟฟ้าได้ดี อีกทั้งยังสามารถชดเชยค่าตัวประกอบกำลังให้กับระบบไฟฟ้าได้ด้วย [6]

การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าแบบเฟสรวมด้วยวงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนานจำเป็นต้องใช้วงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนานจำนวน 2 ชุด เพื่อให้สามารถกำจัดฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นได้ทั้งสองเฟสของระบบรางไฟฟ้า ซึ่งโดยทั่วไปวงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนานที่นิยมใช้มีอยู่ด้วยกัน 2 โครงสร้าง คือ โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยกดังแสดงในรูปที่ 1 และโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุรวมดังแสดงในรูปที่ 2 โดยจากกรูประบบการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนานทั้งสองโครงสร้างดังกล่าวมีส่วนประกอบที่สำคัญเหมือนกัน 3 ส่วน โดยส่วนที่ 1 คือ การตรวจจับฮาร์มอนิก ซึ่งจะใช้สำหรับคำนวณกระแสอ้างอิงในการชดเชยให้กับของวงจรกรองกำลังแอคทีฟเพื่อให้สามารถ



รูปที่ 1 ระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณากำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจร SAPF ที่ใช้โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก

ปีที่ 13 ฉบับที่ 2 เดือนพฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2561



รูปที่ 2 ระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณากำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจร SAPF ที่ใช้โครงสร้างแบบตัวเก็บประจรร่วม

ฉัตรกระแสนชดเชยได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพ ซึ่งปัจจุบันการตรวจจับฮาร์มอนิกมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี เช่น วิธีทฤษฎีกาลังรีแอคทีฟพาวเวอร์หนึ่ง (Instantaneous reactive power theory: PQ) [2] วิธีกรอบอ้างอิงซิงโครนัส (Synchronous Reference Frame: SRF) [2] วิธีฟูริเยร์วินโดว์เลื่อน (Sliding Window Fourier Analysis: SWFA) [8] และวิธีโครงข่ายประสาทเทียม (Neuron Network: NN) [6] เป็นต้น แต่ในบทความนี้จะเลือกใช้การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีกรอบอ้างอิงซิงโครนัส (SRF) เนื่องจากเป็นวิธีที่มีความถูกต้องในการตรวจจับฮาร์มอนิก และสามารถทำงานได้ดีทั้งกรณีแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายเป็นไซน์บริสุทธิ์และในกรณีแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกปะปน รวมถึงเป็นวิธีที่มีความซับซ้อนในการคำนวณน้อยเมื่อเทียบกับวิธีอื่น ๆ [2] ในส่วนที่ 2 คือ ระบบควบคุมกระแสชดเชย ทำหน้าที่ควบคุมให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟสามารถฉัตรกระแสนชดเชยตามค่ากระแสอ้างอิงที่ได้จากการตรวจจับฮาร์มอนิก ซึ่งในบทความนี้เลือกใช้ตัวควบคุมพีไอ [9] ที่ทำงานร่วมกับเทคนิคการสวิตช์แบบพัลส์เบรียเอม (PWM) เนื่องจากตัวควบคุมดังกล่าวถือเป็นตัวควบคุมพื้นฐานที่ให้

ประสิทธิภาพในการควบคุมที่ดี และง่ายต่อการออกแบบ สำหรับส่วนที่ 3 คือ ระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรง มีหน้าที่ควบคุมให้แรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟมีค่าตามที่ได้ออกแบบไว้ โดยในบทความนี้จะใช้ตัวควบคุมพีไอ [9] เช่นกัน เนื่องจากมีสมรรถนะที่ดีเพียงพอสำหรับการควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรง [9]

การนำเสนอเนื้อหาในบทความนี้ประกอบไปด้วยในหัวข้อที่ 2 จะอธิบายรายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่ใช้โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก และที่ใช้โครงสร้างแบบตัวเก็บประจรร่วม หัวข้อที่ 3 คือ การอธิบายทบทวนการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SRF หัวข้อที่ 4 จะนำเสนอเทคนิคการจำลองสถานการณ์กำจัดฮาร์มอนิกด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปที่จะใช้โปรแกรม Simulink/MATLAB ร่วมกับบอร์ด DSP รุ่น TMS320C2000™ Experimenter Kit ส่วนหัวข้อที่ 5 จะนำเสนอผลการจำลองสถานการณ์และการอภิปรายผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิกของวงจรกรองกำลังแอกทีฟทั้งสองโครงสร้าง และในหัวข้อสุดท้ายคือการสรุปผลของบทความนี้

2. โครงสร้างของวงจรรอกำลังแอททิฟแบบขนานสำหรับระบบรางไฟฟ้า

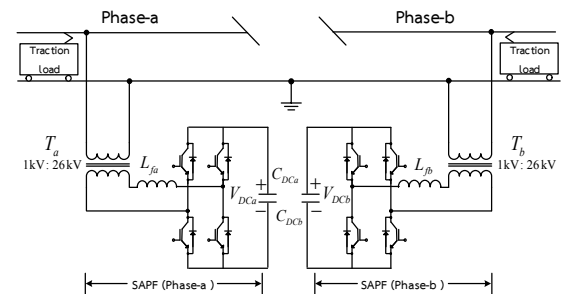
2.1. โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก

วงจรรอกำลังแอททิฟแบบขนาน ที่มีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยกสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3 จากรูปดังกล่าวประกอบด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันจำนวน 2 ชุด ซึ่งแต่ละชุดจะประกอบด้วย อุปกรณ์สวิตช์ไอจีบีที (IGBT) จำนวน 4 ตัว ต่อกันเป็นวงจรบริดจ์ นอกจากนี้ยังมีตัวเหนี่ยวนำวงจรรอก (L_{fa} , L_{fb}) จำนวน 2 ตัว และตัวเก็บประจุ (C_{DCa} , C_{DCb}) จำนวน 2 ตัว โดยหลักการทำงานของวงรดังกล่าวจะเริ่มจากตัวเก็บประจุที่เป็นแหล่งสะสมพลังงานแต่ละชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ โดยมีอุปกรณ์สวิตช์ทำหน้าที่เปิดและปิดวงจรตามสัญญาณพัลส์ที่ได้จากส่วนของการควบคุมกระแสชดเชยร่วมกับเทคนิค PWM เพื่อให้ได้แรงดันเอาต์พุตที่ต้องการ จากนั้นตัวเหนี่ยวนำวงจรรอกจะทำหน้าที่แปลงค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรให้เป็นค่ากระแสชดเชยก่อนต่อเข้ากับจุดต่อร่วม (Point of Common Coupling: PCC) เพื่อชดเชยกระแสฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้า อย่างไรก็ตามเนื่องจากระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณามีพิกัดแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC สูงจึงทำให้จำเป็นต้องใช้หม้อแปลงไฟฟ้า (T_a , T_b) ลดระดับแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC [3] ให้มีค่าเหมาะสม [1kV : 26 kV] ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟส [4] ดังที่ปรากฏในรูปที่ 3

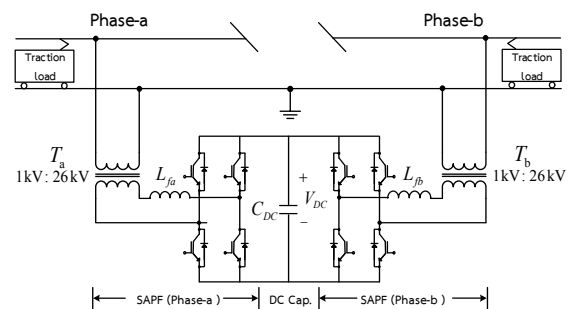
2.2. โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วม

วงจรรอกำลังแอททิฟแบบขนานที่ใช้โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4 โครงสร้างวงรดังกล่าวจะมีส่วนประกอบที่เหมือนกับโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยกทุกประการ แต่กรณีของโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วมจะใช้ตัวเก็บประจุ (C_{DC}) เพียง 1 ตัวร่วมกันทั้งสองชุดของวงจรรอกำลังแอททิฟดังปรากฏในรูปที่ 4 อย่างไรก็ตาม หลักการทำงานของวงรยังคงเหมือนกับกรณีของวงจรรอกำลังแอททิฟโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก

จากวงจรรอกำลังแอททิฟแบบขนานทั้งสองโครงสร้างสามารถสรุปเปรียบเทียบจำนวนอุปกรณ์ที่ใช้ในแต่ละโครงสร้างแสดงได้ดังตารางที่ 1 ซึ่งจะเห็นได้ว่า วงจรรอกำลังแอททิฟที่ใช้โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วมจะใช้จำนวนตัวเก็บประจุน้อยกว่าโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก 1 ตัว ดังนั้น หากพิจารณาถึงการควบคุมค่าแรงดันบัสไฟฟตรงที่ตัวเก็บประจุ จะพบว่า โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วมจะใช้ชุดควบคุมที่น้อยกว่าโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยกด้วยเช่นกัน



รูปที่ 3 SAPF โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก



รูปที่ 4 SAPF โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วม

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบอุปกรณ์ของวงจรรอกำลังแอททิฟแบบขนาน 2 โครงสร้าง

ชนิดอุปกรณ์	จำนวนอุปกรณ์ที่ใช้	
	SAPF แบบตัวเก็บประจุแยก	SAPF แบบตัวเก็บประจุร่วม
1. ตัวเก็บประจุ	2	1
2. ตัวเหนี่ยวนำ	2	2
3. อุปกรณ์สวิตช์	8	8
4. หม้อแปลงไฟฟ้า	2	2

3. การตรวจจับสนามอนิกด้วยวิธีการอ้อมอิงอิงโครนัส

การตรวจจับสนามอนิกถือเป็นส่วนที่สำคัญใช้สำหรับคำนวณกระแสอ้างอิงในการชดเชยให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟเพื่อให้สามารถลดกระแสชดเชยกำจัดฮาร์มอนิกได้อย่างถูกต้อง โดยในบทความนี้จะอธิบายการตรวจจับสนามอนิกด้วยวิธีการอ้อมอิงอิงโครนัส หรือวิธี SRF ซึ่งมีขั้นตอนการคำนวณทั้งหมด 5 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นที่ 1 แปลงค่ากระแสไฟฟ้าที่โหลด (i_L) ให้อยู่บนแกน $\alpha\beta$ ($i_{L\alpha}, i_{L\beta}$) โดยใช้สมการที่ (1)

$$\begin{bmatrix} i_{L\alpha} \\ i_{L\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_L(\omega t) \\ i_L(\omega t - (\pi/2)) \end{bmatrix} \quad (1)$$

โดยค่า $i_{L\alpha}$ คือ กระแสไฟฟ้าที่โหลดบนแกนแอลฟา

$i_{L\beta}$ คือ กระแสไฟฟ้าที่โหลดบนแกนเบตา

ขั้นที่ 2 แปลงค่ากระแสที่โหลดบนแกน $\alpha\beta$ ให้อยู่บนแกนหมุน DQ (i_{Ld}, i_{Lq}) โดยใช้สมการที่ (2) ซึ่งค่า θ ได้จากการใช้เทคนิคเฟสล็อกคูลูป (Phase-locked loop: PLL) ที่หมุนด้วยมุมของแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายที่จุดต่อร่วม (v_{PCC}) ของระบบที่พิจารณา

$$\begin{bmatrix} i_{Ld} \\ i_{Lq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{L\alpha} \\ i_{L\beta} \end{bmatrix} \quad (2)$$

โดยค่า i_{Ld} คือ กระแสไฟฟ้าที่โหลดบนแกนดี

i_{Lq} คือ กระแสไฟฟ้าที่โหลดบนแกนควิ

จากสมการที่ (2) ค่า i_{Ld} จะประกอบด้วยองค์ประกอบที่เป็นสัญญาณกระแสตรง ($\bar{i}_{Ld}$) ที่บ่งบอกถึงปริมาณมูลฐาน และสัญญาณกระแสสลับ ($\tilde{i}_{Ld}$) ที่บ่งบอกถึงปริมาณฮาร์มอนิกดังแสดงในสมการที่ (3)

$$i_{Ld} = \bar{i}_{Ld} + \tilde{i}_{Ld} \quad (3)$$

ขั้นที่ 3 ใช้วงจรกรอง (filter) แยกปริมาณมูลฐาน $\bar{i}_{Ld}$ ออกจากปริมาณฮาร์มอนิก $\tilde{i}_{Ld}$ (สำหรับบทความนี้เลือกใช้วงจรกรองผ่านต่ำ Low pass filter: LPF อันดับ 1 ความถี่ตัดเท่ากับ 15 Hz)

ขั้นที่ 4 คำนวณหากระแสอ้างอิงบนแกน $\alpha\beta$ ($i_{C\alpha}, i_{C\beta}$) โดยใช้สมการที่ (4)

$$\begin{bmatrix} i_{C\alpha} \\ i_{C\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} (\bar{i}_{Ld} - i_{dc}) \\ i_{Lq} \end{bmatrix} \quad (4)$$

โดยค่า $i_{C\alpha}$ คือ กระแสไฟฟ้าอ้างอิงบนแกนแอลฟา

$i_{C\beta}$ คือ กระแสไฟฟ้าอ้างอิงบนแกนเบตา

i_{dc} คือ ปริมาณกระแสตรงที่ได้จากส่วนของระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรง

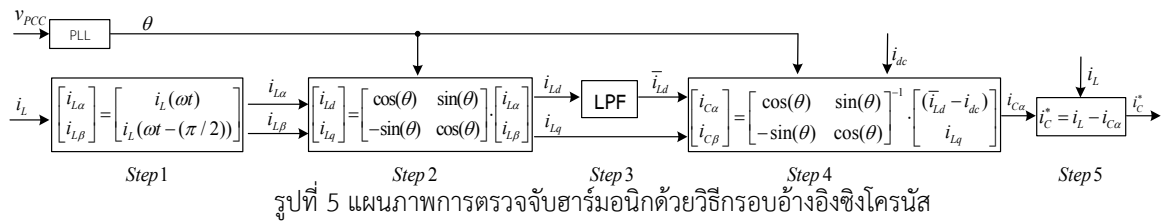
ขั้นที่ 5 คำนวณหากระแสอ้างอิงบนแกนเฟส (i_C^*) ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟได้จากสมการที่ (5)

$$i_C^* = i_L - i_{C\alpha} \quad (5)$$

จากขั้นตอนการตรวจจับสนามอนิกด้วยวิธี SRF ทั้ง 5 ขั้นตอนข้างต้น สามารถสรุปเป็นแผนภาพการคำนวณแสดงได้ดังรูปที่ 5

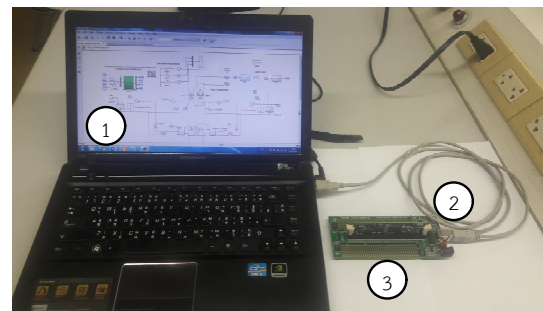
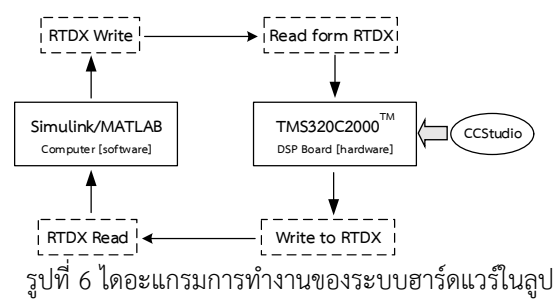
4. การจำลองสถานการณ์กำจัดฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้าด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป

การจำลองสถานการณ์ของบทความนี้จะใช้การจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป (Hardware in the loop: HIL) ที่ใช้โปรแกรม Simulink ร่วมกับบอร์ด DSP รุ่น TMS320C2000™ Experiment Kit โดยมีไดอะแกรมการทำงานของระบบแสดงได้ดังรูปที่ 6 ซึ่งประกอบด้วยส่วนของซอฟต์แวร์ (software) คือ โปรแกรม Simulink/MATLAB บนคอมพิวเตอร์ และส่วนของอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ (hardware) บอร์ด DSP ที่ทำงานร่วมกับโปรแกรม Code Composer Studio (CCStudio) การส่งและรับข้อมูลระหว่างซอฟต์แวร์และฮาร์ดแวร์ดังกล่าวจะอยู่ในรูปแบบของ Real-time data exchange (RTDX) ซึ่งในโปรแกรม Simulink จะใช้บล็อก RTDX Write สำหรับส่งข้อมูลไปยังบอร์ด DSP และใช้บล็อก RTDX Read สำหรับรับข้อมูลจากบอร์ด DSP ในขณะที่บอร์ด DSP จะใช้การโปรแกรมด้วยคำสั่ง Read From RTDX สำหรับรับข้อมูลจากโปรแกรม Simulink และใช้



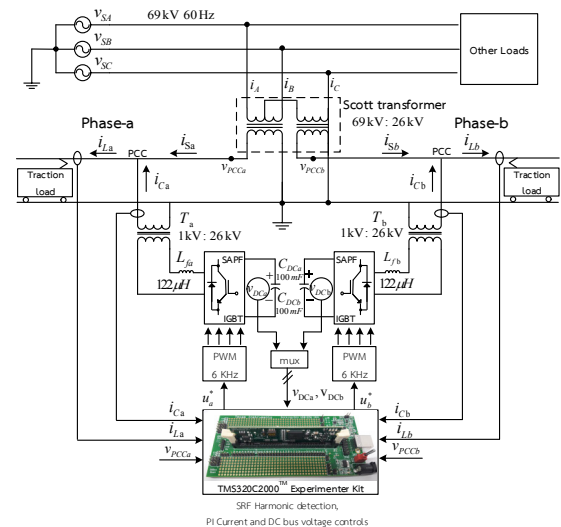
คำสั่ง Write to RTDX สำหรับส่งข้อมูลไปยังโปรแกรม Simulink [11] ซึ่งกระบวนการการเชื่อมต่อแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างโปรแกรม Simulink และบอร์ด DSP ดังกล่าวจะเชื่อมต่อกันผ่านสาย (USB JTAG emulation) ดังแสดงในรูปที่ 7

จากระบบวางไฟฟ้าที่พิจารณากำจัดฮาร์มอนิกในรูปที่ 1 และรูปที่ 2 เมื่อใช้การจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูปสามารถแสดงใหม่ได้ดังรูปที่ 8 และรูปที่ 9 ตามลำดับ จากรูปดังกล่าว ส่วนของระบบวางไฟฟ้าและวงจรกรองกำลังแอกทีฟ จะถูกสร้างขึ้นด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง (SimPowerSystem blockset) ในโปรแกรม Simulink ในขณะที่ส่วนของการตรวจจับสนามอนิกด้วยวิธี SRF การควบคุมการฉีดกระแสชดเชยและการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอจะถูกสร้างขึ้นบนบอร์ด DSP จากระบบจำลองสถานการณ์รูปที่ 8 ข้อมูลอินพุตที่ถูกส่งให้กับบอร์ด DSP ประกอบด้วย ค่าแรงดันบัสไฟตรงที่จุดต่อร่วม (v_{PCCa}, v_{PCCb}) ค่าแรงดันบัสไฟตรง (V_{DCa}, V_{DCb}) ค่ากระแสโหลด (i_{La}, i_{Lb}) และค่ากระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ (i_{Ca}, i_{Cb}) ส่วนระบบจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 9 จะเห็นได้ว่ามีข้อมูลอินพุตที่แตกต่างจากระบบในรูปที่ 8 คือ มีค่าแรงดันบัสไฟตรงเพียงชุดเดียว (V_{DC}) โดยข้อมูลเอาต์พุตที่ได้จากบอร์ด DSP ของทั้งสองระบบจำลองสถานการณ์ คือ ค่าแรงดันอ้างอิง (u_a^*, u_b^*) ที่จะถูกส่งไปยังโปรแกรม Simulink เพื่อไปเปรียบเทียบกับสัญญาณพาหะสามเหลี่ยม (triangular carrier) ตามวิธีการของเทคนิคการสวิตช์แบบ PWM จากนั้นจะนำสัญญาณพัลส์ที่ได้ไปควบคุมอุปกรณ์สวิตช์ไอสบีทีของวงจรกรองกำลังแอกทีฟเพื่อฉีดกระแสชดเชยกำจัดฮาร์มอนิกในระบบวางไฟฟ้าซึ่งสร้างอยู่บนโปรแกรม Simulink ต่อไป

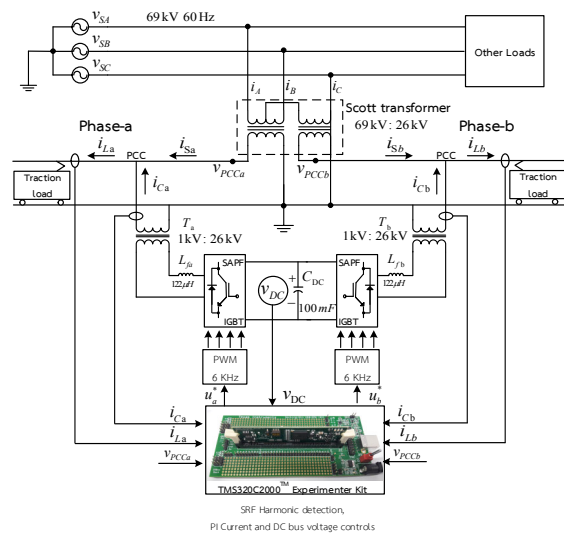


1. SimPowerSystemTM Simulink 2. JTAG emulator
3. TMS320C2000TM Experimenter Kit

รูปที่ 7 การเชื่อมต่อระหว่างโปรแกรม Simulink กับ
บอร์ด TMS320F28335



ปีที่ 13 ฉบับที่ 2 เดือนพฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2561



รูปที่ 9 ระบบ HIL กรณีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุรวม

5. ผลการจำลองสถานการณ์และการอภิปราย

การจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้าด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปดังระบบในรูปที่ 8 และ 9 จะพิจารณาแทนโหลดรถไฟฟ้ (Traction Load) ด้วยแหล่งจ่ายกระแสทางอุดมคติที่ประกอบด้วยองค์ประกอบมูลฐานและองค์ประกอบฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจริงในระบบแรงไฟฟ้า [3] โดยกรณีการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่มีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก (รูปที่ 8) และโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุรวม (รูปที่ 9) จะใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ตามที่ปรากฏในระบบรูปที่ 1 และรูปที่ 2 ตามลำดับ จากระบบการจำลองสถานการณ์จะกำหนดการเปลี่ยนแปลงจำนวนขบวนของโหลดรถไฟฟ้ที่เกิดขึ้นในแต่ละเฟสของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (เฟส a และเฟส b) ตามช่วงเวลาการเดินรถไฟฟ้สมมุติที่พิจารณาในกรณีศึกษานี้แสดงดังตารางที่ 2 ซึ่งจะแบ่งเป็น 4 ช่วงเวลา คือ ช่วงเวลาที่ 1 ตั้งแต่เวลา 0 วินาที ถึงเวลา 0.25 วินาที จะกำหนดให้มีโหลดรถไฟฟ้เพียงเฟส a เท่านั้น ส่วนช่วงเวลาที่ 2 ตั้งแต่เวลา 0.25 วินาที ถึงเวลา 0.5 วินาที กำหนดให้ขบวนรถไฟฟ้เคลื่อนที่ออกจากเฟส a ไปยังเฟส b ส่งผลให้เฟส b มีโหลดรถไฟฟ้ 1 ขบวน และเฟส a ไม่มีโหลด ต่อมาช่วงเวลาที่ 3 ตั้งแต่เวลา 0.5 วินาทีถึงเวลา

0.75 วินาที กำหนดให้มีโหลดรถไฟฟ้เพิ่มเข้ามาที่เฟส a ทำให้ทั้งเฟส a และเฟส b มีโหลดรถไฟฟ้เฟสละ 1 ขบวน และสุดท้ายช่วงเวลาที่ 4 ตั้งแต่เวลา 0.75 วินาทีถึงเวลา 1 วินาที จะพิจารณาให้มีโหลดรถไฟฟ้เพิ่มเป็นเฟสละ 2 ขบวน โดยผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในแต่ละช่วงเวลาของวงจรกรองกำลังแอกทีฟทั้งสองโครงสร้างสามารถดูได้จากนี้

ตารางที่ 2 ช่วงเวลาการเดินรถไฟฟ้สมมุติ

โหลด ระบบราง	จำนวนโหลดรถไฟฟ้ (ขบวน)			
	ช่วงเวลาที่ 1	ช่วงเวลาที่ 2	ช่วงเวลาที่ 3	ช่วงเวลาที่ 4
เฟส a	1	ไม่มี	1	2
เฟส b	ไม่มี	1	1	2

กรณีใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก

ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกของเฟส a และเฟส b กรณีใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่มีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยกสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 10 จากรูปดังกล่าว ในช่วงเวลาที่ 1 ที่มีโหลดรถไฟฟ้เฉพาะเฟส a จำนวน 1 ขบวน จะสังเกตได้ว่า ก่อนการชดเชยตั้งแต่เวลา 0 วินาทีถึง 0.1 วินาที ซึ่งยังไม่มีกรณิดกระแสชดเชยกำจัดฮาร์มอนิก รูปสัญญาณกระแสที่แหล่งจ่ายเฟส a (i_{Sa}) และกระแสที่โหลดเฟส a (i_{La}) มีลักษณะเหมือนกันคือบิดเบี้ยวไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ โดยวัดค่า %THD_i ได้เท่ากับ 22.16% จากนั้นตั้งเวลา 0.1 วินาทีเป็นต้นไป เมื่อวงจรกรองกำลังแอกทีฟของเฟส a ฉีดกระแสชดเชย (i_{Ca}) เข้าสู่ระบบรางไฟฟ้า พบว่า รูปสัญญาณของ i_{Sa} กลับมาเป็นรูปคลื่นไซน์มากขึ้นโดยค่า %THD_i ลดลงเหลือ 2.26% ในขณะที่เฟส b ยังไม่มีโหลดรถไฟฟ้ จึงไม่มีการชดเชยกำจัดฮาร์มอนิกที่เฟสดังกล่าว

ในช่วงเวลาที่ 2 ตั้งแต่เวลา 0.25 วินาที ถึง 0.5 วินาที เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดรถไฟฟ้คือ เฟส a ไม่มีโหลด ส่วนเฟส b มีโหลดรถไฟฟ้จำนวน 1 ขบวน จะสังเกตได้ว่า วงจรกรองกำลังแอกทีฟของเฟส a หยุดฉีดกระแสชดเชย

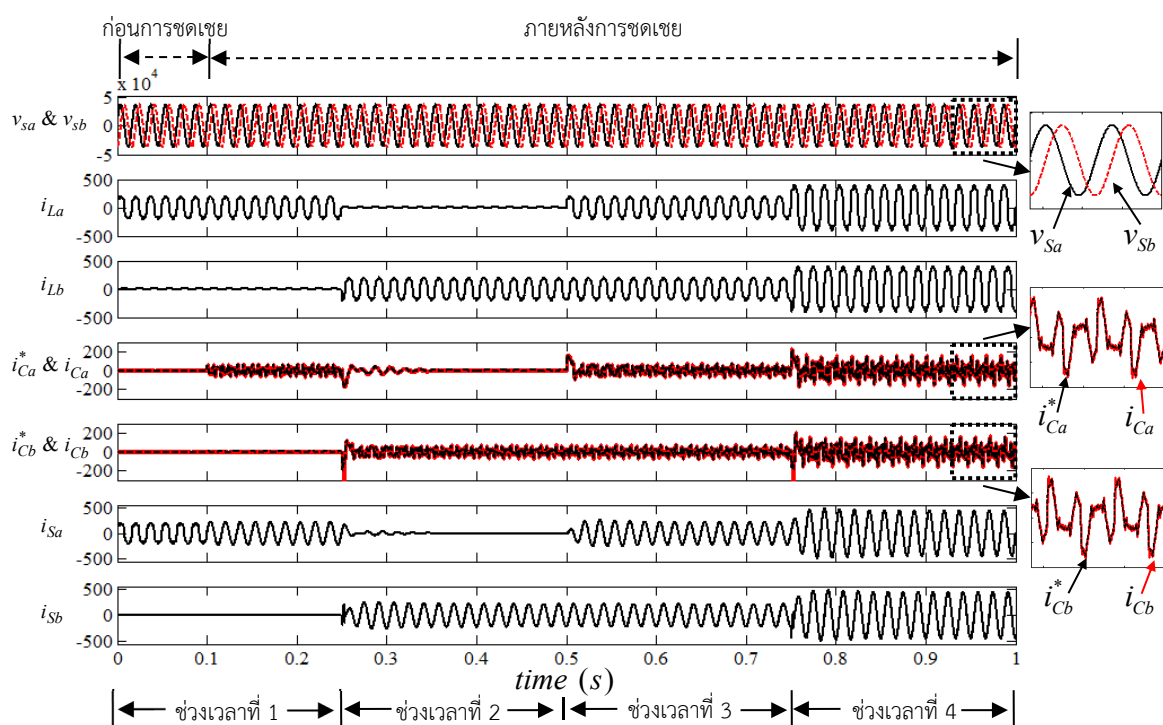
ในขณะที่วงจรรองกำลังแอกทีฟของเฟส b สามารถทำหน้าที่ฉีดกระแสชดเชยเฟส b (i_{cb}) กำจัดฮาร์มอนิกได้ โดยค่า %THD_i ของกระแสที่แหล่งจ่ายเฟส b (i_{sb}) ภายหลังการชดเชยมีค่าเท่ากับ 2.22% (ก่อนการชดเชยค่า %THD_i ของ i_{sb} สำหรับช่วงเวลานี้มีค่าเท่ากับ 22.16%)

ต่อมาในช่วงเวลาที่ 3 ตั้งแต่เวลา 0.5 วินาที ถึง 0.75 วินาที ทั้งเฟส a และเฟส b มีโหลดรฟไฟฟ้าเฟสละ 1 ขบวน จะสังเกตได้ว่า วงจรรองกำลังแอกทีฟทั้งสองเฟสสามารถฉีดกระแสชดเชยได้พร้อมกันส่งผลให้ค่า %THD_i ของ i_{sa} และ i_{sb} ภายหลังการชดเชยมีค่าเท่ากับ 2.25% และ 2.22% ตามลำดับเฟส

สำหรับช่วงเวลาที่ 4 ตั้งแต่เวลา 0.75 วินาที เป็นต้นไป เมื่อทั้งสองเฟสมีโหลดรฟไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็นเฟสละ 2 ขบวน จะสังเกตได้ว่า วงจรรองกำลังแอกทีฟทั้งสองเฟสยังคงสามารถฉีดกระแสชดเชยกำจัดฮาร์มอนิกได้ โดยที่ค่า %THD_i ของ i_{sa} และ i_{sb} ภายหลังการชดเชยสำหรับกรณีโหลดนี้มีค่าเท่ากับ 2.47 % และ 2.44 % ตามลำดับ จากผลดังกล่าวหมายความว่า วงจรรองกำลังแอกทีฟ

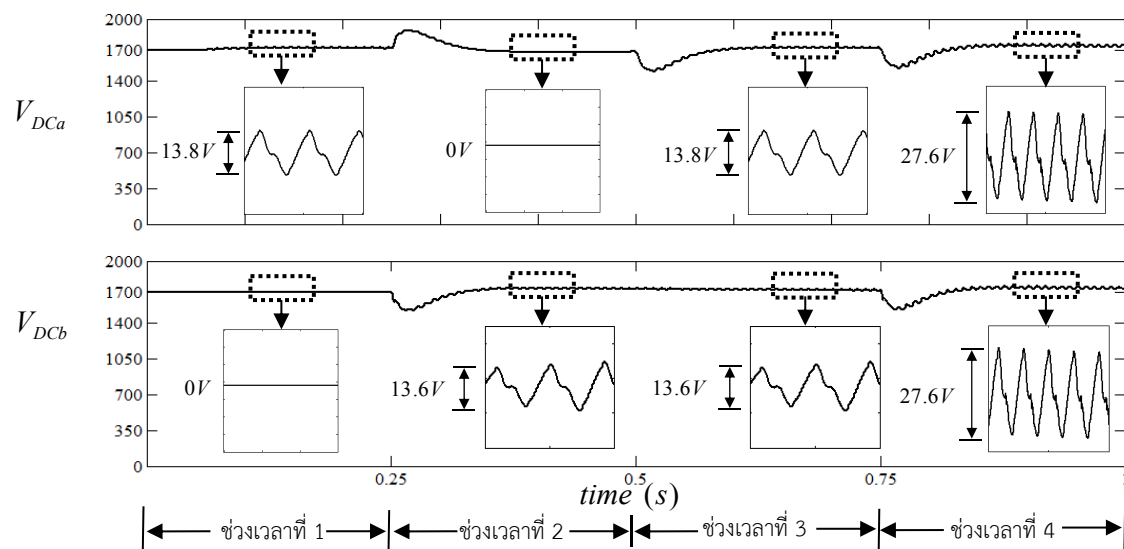
แบบขนานที่มีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยกร่วมกับตัวควบคุมพีไอ ($K_p=3.26$, $K_i=43453$) [9] ที่ใช้สำหรับควบคุมค่ากระแสชดเชย มีสมรรถนะการทำงานและควบคุมที่ดีตลอดทุกช่วงเวลาการเปลี่ยนแปลงของโหลดรฟไฟฟ้า

เมื่อพิจารณาผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรองกำลังแอกทีฟเฟส a และเฟส b ดังแสดงในรูปที่ 11 จะสังเกตได้ว่า ตัวควบคุมพีไอ ($K_p=9.4442$, $K_i=0.986$) [9] มีสมรรถนะที่ดีสามารถควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงให้มีค่าเท่ากับค่าอ้างอิงที่ 1700 V ที่ได้ออกแบบไว้ได้ทุกช่วงเวลาของการเปลี่ยนแปลงโหลดรฟไฟฟ้า จากผลดังกล่าวเมื่อพิจารณาคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การกระเพื่อมของแรงดันบัสไฟตรง ($\% \Delta V_{DC(ripple)}$) โดยใช้สมการที่ (6) พบว่า ในกรณีของเฟส a จะมีค่า $\% \Delta V_{DC(ripple)}$ ในแต่ละช่วงเวลาของการเปลี่ยนแปลงโหลดเท่ากับ 0.81%, 0%, 0.81% และ 1.62% ตามลำดับ ส่วนในกรณีของเฟส b มีค่าเท่ากับ 0%, 0.81%, 0.80% และ 1.62% ตามลำดับ นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาผลการตอบสนองทางพลวัต (Dynamic response) ของการควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 10 ผลการจำลองสถานการณ์กำจัดฮาร์มอนิกเฟส a และเฟส b กรณีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก

ปีที่ 13 ฉบับที่ 2 เดือนพฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2561

รูปที่ 11 ผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงเฟส *a* และเฟส *b* กรณีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก

ครั้งแรกที่เวลา 0.25 วินาทีสังเกตได้ว่า ค่าแรงดันบัสไฟตรงเฟส *a* มีค่าแรงดันพุ่งเกินสูงสุดเท่ากับ 1890 V ในขณะที่แรงดันบัสไฟตรงเฟส *b* มีค่าตกลงต่ำสุดเท่ากับ 1515 V โดยทั้งสองเฟสใช้เวลาในการเข้าสู่สถานะคงตัวที่ค่าแรงดัน 1700 V (Setting time: T_s) ประมาณเท่ากับ 0.12 วินาที ต่อมาในช่วงที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงครั้งที่สองที่เวลา 0.5 วินาที สังเกตได้ว่า แรงดันบัสไฟตรงเฟส *a* มีค่าตกลงต่ำสุดเท่ากับ 1500 V และใช้เวลาในการเข้าสู่สถานะคงตัวเท่ากับ 0.13 วินาที ในขณะที่แรงดันบัสไฟตรงเฟส *b* มีค่าคงที่เท่ากับ 1700 V (เนื่องจากไม่มีการเปลี่ยนแปลงโหลดที่เฟส *b*) และในช่วงที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงครั้งที่สามที่เวลา 0.75 วินาที สังเกตได้ว่า ทั้งค่าแรงดันบัสไฟตรงเฟส *a* และเฟส *b* มีค่าตกลงต่ำสุดเท่ากันประมาณเท่ากับ 1520 V โดยทั้งสองเฟสใช้เวลาในการเข้าสู่สถานะคงตัวประมาณเท่ากับ 0.12 วินาที

$$\% \Delta V_{DC(ripple)} = \frac{\Delta V_{DC}}{V_{DC}^*} \times 100 \quad (6)$$

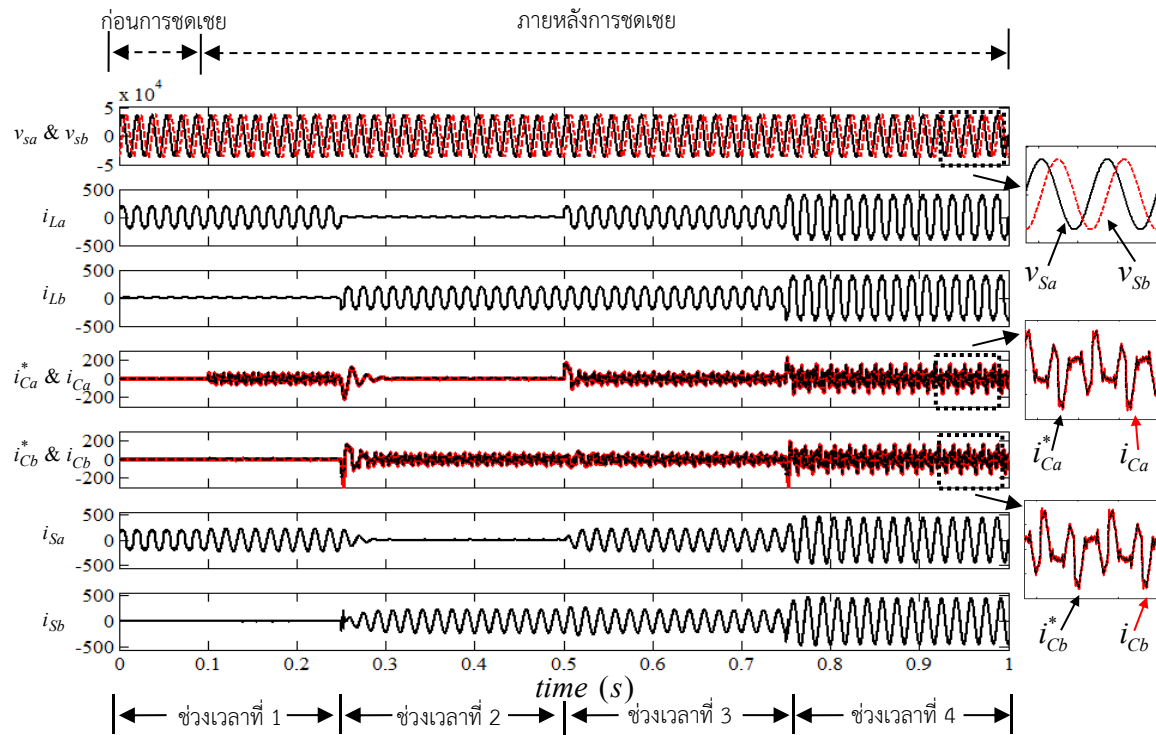
กรณีใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วม

ผลการจำลองสถานการณ์กำจัดฮาร์มอนิกของเฟส *a* และเฟส *b* กรณีใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่มี

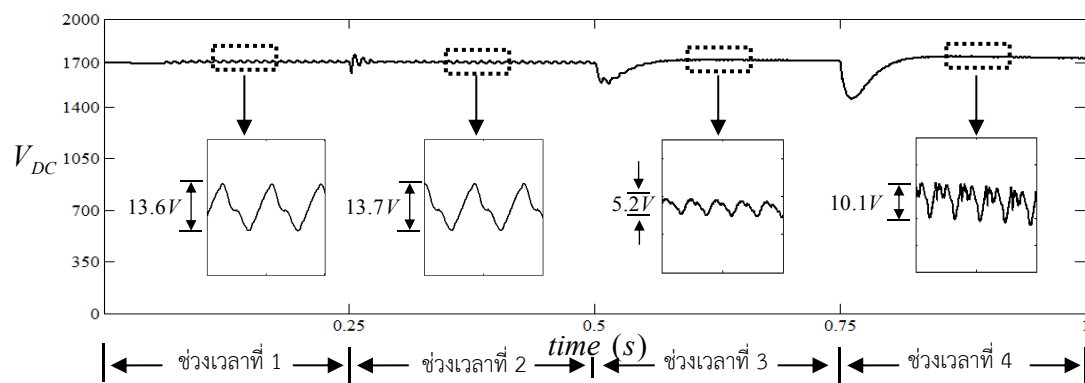
โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วม สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 12 จากรูปดังกล่าวในช่วงเวลาที่ 1 ตั้งแต่เวลา 0 วินาที ถึง 0.25 วินาที ที่มีโหลดรบกวนเฉพาะเฟส *a* พบว่า เมื่อวงจรกรองกำลังแอกทีฟของเฟส *a* ทำการฉีดกระแสชดเชยกำจัดฮาร์มอนิกตั้งแต่เวลา 0.1 วินาที เป็นต้นไป จะเห็นได้ว่า รูปสัญญาณของ i_{sa} มีลักษณะเป็นรูปไซน์มากขึ้น โดยวัดค่า $\%THD_i$ ของ i_{sa} ได้เท่ากับ 2.24% (เฟส *b* ไม่มีโหลดรบกวนไฟฟ้าจึงไม่มีการฉีดกระแสชดเชยกำจัดฮาร์มอนิก)

ต่อมาในช่วงเวลาที่ 2 ตั้งแต่เวลา 0.25 วินาที ถึง 0.5 วินาที เมื่อเฟส *a* ไม่มีโหลดรบกวนไฟฟ้า ในขณะที่เฟส *b* มีโหลดรบกวนไฟฟ้าจำนวน 1 ขบวน จะสังเกตได้ว่า วงจรกรองกำลังแอกทีฟของเฟส *a* ได้ทำการหยุดฉีดกระแสชดเชย ส่วนวงจรกรองกำลังแอกทีฟของเฟส *b* ได้ทำหน้าที่ฉีดกระแสชดเชยให้กับระบบรางไฟฟ้า โดยวัดค่า $\%THD_i$ หลังการชดเชยของ i_{sb} ได้ค่าเท่ากับ 2.23%

สำหรับในช่วงเวลาที่ 3 ตั้งแต่เวลา 0.5 วินาที ถึง 0.75 วินาที เมื่อทั้งสองเฟสมีโหลดรบกวนไฟฟ้าเฟสละ 1 ขบวน จะสังเกตได้ว่า วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามารถฉีดกระแสกำจัดฮาร์มอนิกได้ทั้งเฟส 2 เฟสพร้อมกัน โดยวัด $\%THD_i$ ของ i_{sa} และ i_{sb} ได้เท่ากับ 2.20% และ 2.21% ตามลำดับ



รูปที่ 12 ผลการจำลองสถานการณ์กำจัดฮาร์โมนิกเฟส *a* และเฟส *b* กรณีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจรร่วม



รูปที่ 13 ผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงกรณีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจรร่วม

และในช่วงเวลาที่ 4 เมื่อทั้งสองเฟสมีโวลต์
รตไฟฟ้าเพิ่มเป็นเฟสละ 2 ขบวน พบว่า วงจรกรอง
กำลังแอกทีฟโครงสร้างแบบตัวเก็บประจรร่วมยังคง
สามารถฉีดกระแสชดเชยกำจัดฮาร์โมนิกให้กับระบบ
รางไฟฟ้าทั้งสองเฟสได้เช่นเดิม โดยวัดค่า %THD_i ของ
 i_{sa} และ i_{sb} ได้เท่ากับ 2.32% และ 2.31% ตามลำดับ
จากผลดังกล่าว หมายความว่า วงจรกรองกำลังแอกทีฟ

แบบขนานที่มีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจรร่วมร่วมกับ
ตัวควบคุมพีไอ ($K_p=3.26$, $K_i=43453$) [9] สามารถให้
ประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์โมนิกดีตลอดทุกช่วงเวลา
การเปลี่ยนแปลงของโวลต์รตไฟฟ้า

ผลการควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงกรณีใช้วงจร
กรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่มีโครงสร้างแบบตัวเก็บ
ประจรร่วมสามารถแสดงในรูปที่ 13 โดยจะเห็นได้ว่า

ปีที่ 13 ฉบับที่ 2 เดือนพฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2561

การใช้ตัวควบคุมพีไอเพียง 1 ชุด สามารถควบคุมให้ค่า V_{DC} มีค่าเท่ากับ 1700 V ได้ทุกช่วงเวลาการเปลี่ยนแปลงโหลดของทั้งสองเฟสโดยวัดค่า $\% \Delta V_{DC(ripple)}$ ในแต่ละช่วงเวลา ได้ค่าเท่ากับ 0.8%, 0.79%, 0.30% และ 0.58% ตามลำดับ นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาผลการตอบสนองทางพลวัตของการควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงครั้งแรกที่เวลา 0.25 วินาที สังเกตได้ว่า ค่าแรงดันบัสไฟตรงมีการกวัดแกว่งเล็กน้อยที่ค่าสูงสุดเท่ากับ 1755 V และต่ำสุดเท่ากับ 1630 V จากนั้นสามารถเข้าสู่สถานะคงตัวที่ค่าแรงดัน 1700 V ได้โดยใช้เวลาประมาณเท่ากับ 0.03 วินาที ต่อมาในช่วงที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงครั้งที่สองที่เวลา 0.5 วินาที สังเกตได้ว่า แรงดันบัสไฟตรงมีค่าตกลงต่ำสุดเท่ากับ 1560 V โดยใช้เวลาในการเข้าสู่สถานะคงตัวเท่ากับ 0.07 วินาที และในช่วงที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงครั้งที่สามที่เวลา 0.75 วินาที สังเกตได้ว่า ทั้งค่าแรงดันบัสไฟตรงมีค่าตกลงต่ำสุดประมาณเท่ากับ 1450 V โดยในกรณีนี้ใช้เวลาการเข้าสู่สถานะคงตัวประมาณเท่ากับ 0.19 วินาที

จากผลการจำลองสถานการณ์การก่อกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟทั้งสองโครงสร้าง เมื่อทำการเปรียบเทียบสมรรถนะการก่อกำจัดฮาร์มอนิกโดยใช้ค่า $\%THD_i$ ค่า $\% \Delta V_{DC(ripple)}$ และผลตอบสนองทางพลวัตของค่าแรงดันบัสไฟตรงในช่วงที่โหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลง สามารถสรุปผลได้ดังตารางที่ 3 ถึง 5 ตามลำดับ จากตารางที่ 3 พบว่า วงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ใช้โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยกและโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วมให้ค่า $\%THD_i$ ของเฟส a และเฟส b ในแต่ละช่วงเวลาใกล้เคียงกัน โดยโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วมให้ค่า $\%THD_i$ ต่ำกว่าเล็กน้อย และเมื่อพิจารณาผลการเปรียบเทียบค่า $\% \Delta V_{DC(ripple)}$ ในตารางที่ 4 พบว่า วงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ใช้โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วมสามารถให้ค่า $\% \Delta V_{DC(ripple)}$ น้อยกว่าโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยกในทุกช่วงเวลา นอกจากนี้ ถ้าเปรียบเทียบค่าผลตอบสนองทางพลวัต

ของค่าแรงดันบัสไฟตรงในช่วงเวลาที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลง ได้แก่ ค่าแรงดันตกต่ำสุด ค่าแรงดันพุ่งเกินสูงสุด และค่าเวลาในการเข้าสู่สถานะคงตัว (T_s) ดังตารางที่ 5 จะพบว่า ในช่วงการเปลี่ยนแปลงโหลดที่เวลา 0.25 วินาที และที่เวลา 0.5 วินาที วงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ใช้โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วมสามารถให้ผลตอบสนองทางพลวัตที่ดีกว่าโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก แต่เมื่อโหลดรถไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเป็นเฟสละ 2 ขววน ที่เวลา 0.75 วินาที พบว่า วงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ใช้โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยกจะให้ผลตอบสนองทางพลวัตที่ดีกว่าโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วม ทั้งนี้เนื่องจากวงจรกรองกำลังแอกทีฟทั้งสองโครงสร้างใช้ตัวเก็บประจุที่มีขนาดเท่ากันจึงทำให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ใช้โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วมที่มีตัวเก็บประจุเพียงหนึ่งตัวมีการสูญเสียพลังงานมากกว่าโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยกที่มีตัวเก็บประจุ 2 ตัว

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบค่า $\%THD_i$

โครงสร้าง SAPF	ช่วงเวลาที่ 1		ช่วงเวลาที่ 2		ช่วงเวลาที่ 3		ช่วงเวลาที่ 4	
	เฟส a	เฟส b	เฟส a	เฟส b	เฟส a	เฟส b	เฟส a	เฟส b
$\%THD_i$ ก่อนการชดเชย								
ไม่มีวงจร SAPF	22.16%	ไม่มี	ไม่มี	22.16%	22.16%	22.16%	22.16%	22.16%
$\%THD_i$ ภายหลังการชดเชย								
แบบตัวเก็บ ประจุแยก	2.25%	ไม่มี	ไม่มี	2.22%	2.25%	2.22%	2.47%	2.44%
แบบตัวเก็บ ประจุร่วม	2.24%	ไม่มี	ไม่มี	2.23%	2.20%	2.21%	2.32%	2.31%

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบค่า $\% \Delta V_{DC(ripple)}$

โครงสร้าง SAPF	$\% \Delta V_{DC(ripple)}$							
	ช่วงเวลาที่ 1		ช่วงเวลาที่ 2		ช่วงเวลาที่ 3		ช่วงเวลาที่ 4	
	เฟส a	เฟส b	เฟส a	เฟส b	เฟส a	เฟส b	เฟส a	เฟส b
แบบตัวเก็บ ประจุแยก	0.81%	ไม่มี	ไม่มี	0.81%	0.81%	0.80%	1.62%	1.62%
แบบตัวเก็บ ประจุร่วม	0.8%		0.79%		0.30%		0.58%	

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบผลการตอบสนองทางพลวัต

โครงสร้าง SAPF	ผลการ ตอบสนองทาง พลวัต	การเปลี่ยนแปลงโหลด					
		ที่เวลา 0.25 s		ที่เวลา 0.5 s		ที่เวลา 0.75 s	
		เฟส a	เฟส b	เฟส a	เฟส b	เฟส a	เฟส b
แบบตัวเก็บ ประจุแยก	แรงดันตกต่ำสุด	-	1515 V	1500 V	-	1520 V	1524 V
	แรงดันพุ่งเกิน	1890 V	-	-	-	-	-
	T_s	0.12 s	0.12 s	0.13 s	-	0.12 s	0.12 s
แบบตัวเก็บ ประจุรวม	แรงดันตกต่ำสุด	1630 V		1560 V		1450 V	
	แรงดันพุ่งเกิน	1775 V		-		-	
	T_s	0.03 s		0.07 s		0.19 s	

6. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการเปรียบเทียบสมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าโดยใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก และโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุรวม โดยผลการจำลองสถานการณ์กำจัดฮาร์มอนิกด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูปพบว่า วงจรกรองกำลังแอกทีฟทั้งสองโครงสร้างสามารถให้ประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิกที่ดีทั้งคู่ ซึ่งค่า %THD ภายหลังการชดเชยอยู่ในกรอบมาตรฐาน IEEE std 519-2014 อย่างไรก็ตาม วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานกรณีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุรวมมีข้อดีกว่าโครงสร้างแบบประจุแยก คือ สามารถให้สมรรถนะการทำงานของวงจรที่ดีกว่าโดยมีค่าการกระเพื่อมของแรงดันบัสไฟตรงที่น้อยกว่า อีกทั้งยังใช้ตัวเก็บประจุและตัวควบคุมแรงดันบัสไฟตรงน้อยกว่า แต่โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุรวมมีข้อเสีย คือ เมื่อขนาดของโหลดรถไฟมีค่าเพิ่มขึ้นจะเกิดผลของค่าแรงดันตกที่ลดลงมากกว่า และใช้เวลาเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่นานกว่าโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก

7. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และกลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัย รวมถึงให้สถานที่และเครื่องมือต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัย

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] นคร จันทศร. “ช่วงรถไฟ: ความรู้ทั่วไปด้านวิศวกรรมรถไฟ”. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีระบบขนส่งทางรางแห่งชาติ. หน้า 229-243, (2559).
- [2] ฐานันดร ตรึงใจ, กองพล อารีรักษ์ และ ทศพร ณรงฤทธิ์, “การเปรียบเทียบวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่งและวิธีกรอบอ้างอิงเชิงโครนัสสำหรับการตรวจจับฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส,” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า eecon ครั้งที่ 40, พัทยา, โรงแรม เดอะ ซายน์, 16 พ.ย. 2560, หน้า 218-221
- [3] Sy-Ruen Huang and Bing-Nan Chen, “Harmonic study of the Le Blanc transformer for Taiwan railway's electrification system,” in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 17, no. 2, pp. 495-499, April 2002.
- [4] A. Luo, C. Wu, J. Shen, Z. Shuai and F. Ma, “Railway Static Power Conditioners for High-speed Train Traction Power Supply Systems Using Three-phase V/V Transformers,” in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 26, no. 10, pp. 2844-2856, Oct. 2011.
- [5] Z. Shu, S. Xie and Q. Li, “Single-Phase Back-To-Back Converter for Active Power Balancing, Reactive Power Compensation, and Harmonic Filtering in Traction Power System,” in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 26, no. 2, pp. 334-343, Feb. 2011.
- [6] M. Cirrincione, M. Pucci, G. Vitale and A. Miraoui, “Current Harmonic Compensation by a Single-Phase Shunt Active Power Filter Controlled by Adaptive Neural Filtering,”

- in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 56, no. 8, pp. 3128-3143, Aug. 2009.
- [7] Pee-Chin Tan, Poh Chiang Loh and D. G. Holmes, “A robust multilevel hybrid compensation system for 25-kV electrified railway applications,” in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 19, no. 4, pp. 1043-1052, July 2004.
- [8] M. El-Habrouk and M. K. Darwish, “Design and implementation of a modified Fourier analysis harmonic current computation technique for power active filters using DSPs,” in IEE Proceedings - Electric Power Applications, vol. 148, no. 1, pp. 21-28, Jan. 2001.
- [9] B. A. Angélico, L. B. G. Campanhol and S. A. Oliveira da Silva, “P-I/P-I-D tuning procedure of a single-phase shunt active power filter using Bode diagram,” IET Power Electron, vol. 7, pp. 2647–2659, Oct 2014.
- [10] H. Hu, Z. He and S. Gao, “Passive Filter Design for China High-Speed Railway With Considering Harmonic Resonance and Characteristic Harmonics,” in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 30, no. 1, pp. 505-514, Feb. 2015.
- [11] T. Narongrit, K-L. Areerak and K-N. Areerak “A New Design Approach of Fuzzy Controller for Shunt Active Power Filter,” Electric Power Components and Systems, vol. 43, pp. 685–694, Mar 2015.

การประยุกต์ใช้วิธีวิวัฒนาการด้วยผลต่างเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแก้ปัญหา หลายวัตถุประสงค์ที่มีค่าต่อเนื่อง

Application of Differential Evolutionary Algorithm to Compare the Performance of Continuous Multi-Objective Problem Optimization

ตรัยรัตน์ เกิดโคตรพิทย์¹ ปารเมศ ชุตินา^{2*}

¹นิสิตปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

²ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Tiriat Kirdphoksap¹ Parames Chutima^{2*}

¹Student, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University.

²Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University.

*Corresponding author: Email: parames.c@chula.ac.th

บทคัดย่อ

การจำแนกปัญหา (Decomposition) เป็นหลักการพื้นฐานในการแก้ปัญหาแบบหลายวัตถุประสงค์ทั่วไป ซึ่งในปัจจุบันเป็นที่สนใจและนิยมใช้ในการหาค่าที่เหมาะสมอย่างแพร่หลาย ในบทความนี้ จึงนำเสนอวิธีการวิวัฒนาการแบบปรับตัวโดยใช้ผลต่างสำหรับปัญหาหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (Adaptive MOEA/D hybridized with Differential Evolution: AMOEAD-DE) ซึ่งมีแนวคิดพื้นฐานจากวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (A Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition: MOEA/D) และวิธีเชิงวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบปรับตัว (Adaptive Differential Evolution Algorithm: ADE) โดยอัลกอริทึมนี้ จะทำการจำแนกปัญหาออกเป็นปัญหาย่อย (แบ่งปัญหาหลายวัตถุประสงค์ออกเป็นปัญหาย่อยวัตถุประสงค์เดียวหลายปัญหา) และทำการหาค่าที่เหมาะสมของทุกปัญหาย่อยไปพร้อม ๆ กัน ร่วมกับการปรับค่าพารามิเตอร์ควบคุมและกลยุทธ์ที่ใช้ในการหาค่าที่เหมาะสม เพื่อให้เกิดทิศทางการค้นหาค่าตอบที่ดีและหลากหลาย โดยแต่ละปัญหาย่อยจะพัฒนาคำตอบรุ่นใหม่ด้วยคำตอบเดิมของปัญหาย่อยข้างเคียง ด้วยวิธีนี้ จึงทำให้ AMOEAD-DE มีความซับซ้อนในการดำเนินงานที่น้อยและสามารถปรับตัวให้เหมาะสมกับสถานการณ์การค้นหาค่าตอบได้ ในบทความนี้ ได้นำ AMOEAD-DE มาเปรียบเทียบกับ MOEA/D และ MODE/D ด้วยการแก้ปัญหามาตรฐานแบบหลายวัตถุประสงค์ที่มีค่าต่อเนื่อง ซึ่งจากการทดลองพบว่า AMOEAD-DE มีประสิทธิภาพด้านอัตราการเข้าสู่ที่ดีกว่าอัลกอริทึมอื่น ๆ แต่ต้องใช้เวลาการดำเนินงานที่มากกว่า เมื่อเทียบจำนวนในการพัฒนาคำตอบที่เท่ากัน

คำสำคัญ: ปัญหาแบบมาถุประสงค์ การจำแนกปัญหา การหาค่าที่เหมาะสมสำหรับปัญหาหลายวัตถุประสงค์ วิธีการเชิงวิวัฒนาการ วิธีวิวัฒนาการด้วยผลต่างแบบปรับตัว

ABSTRACT

Decomposition is a basic strategy in traditional multi-objective optimization. At present, it has been interested and widely used in multi-objective evolutionary optimization. This article proposes an adaptive MOEA/D hybridized with differential evolution (AMOEAD-DE). The concept is based on a multi-objective evolutionary algorithm based on decomposition (MOEA/D) and adaptive differential evolution algorithm (ADE). It decomposes a multi-objective problems (MOPs) into a number of scalar optimization subproblems (decomposes a MOPs into several SOPs) and optimizes them simultaneously with adjustment of control parameters and strategies to achieve a diversity of approximated true non-dominated solutions. Each subproblem is optimized by using information from its several neighboring subproblems, which makes AMOEAD-DE had lower computational complexity and adapt itself to the current search requirements. In experiments, AMOEAD-DE is compared with a MOEA/D and a multi-objective differential evolution algorithm based on decomposition (MODE/D) in order to solve continuous MOPs. The result from experiments show that AMOEAD-DE outperforms the others in terms of convergence rate but it takes more time consumption when compared to the equivalent number of function evaluations.

Keyword: Many-objective problems, decomposition, multi-objective optimization, evolutionary algorithm, adaptive differential evolution.

1. บทนำ

การหาค่าที่เหมาะสมของปัญหาจริงในชีวิตประจำวัน ซึ่งเป็นปัญหาที่มีหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Optimization Problems: MOPs) จำเป็นต้องประมาณค่าที่เหมาะสมที่สุด เพื่อใช้ในการตัดสินใจดำเนินการต่าง ๆ โดยบางปัญหาอาจมีมากกว่า 3 วัตถุประสงค์ ที่ต้องพิจารณาพร้อมกัน แต่อาจขัดแย้งกันในบางวัตถุประสงค์ เรียกปัญหานี้ว่า ปัญหาแบบมากวัตถุประสงค์ (Many-Objective Optimization Problems: MaOPs) ทำให้ปัญหามีรูปแบบของคำตอบที่เป็นไปได้จำนวนมากหรืออาจเป็นจำนวนอนันต์, ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบมาก และเป็นไปได้น้อยที่จะพบคำตอบที่เหมาะสมทั้งหมด ทำให้การใช้วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์ (A Multi-Objective Evolutionary Algorithms: MOEAs) แบบเดิม (เช่น MOGA, NSGA II, COIN) ในการแก้ปัญหา MaOPs มีประสิทธิภาพลดลง ไม่ดีเท่าที่ควร [1]

การแก้ปัญหา MaOPs อย่างง่ายที่สุด ทำได้ด้วยการลดจำนวนวัตถุประสงค์ลง โดยการรวมวัตถุประสงค์ที่ไม่ขัดแย้งกันไว้เป็นเป้าหมายเดียว [2] อย่างไรก็ตาม วิธีการนี้ไม่สามารถใช้กับหลายปัญหาในทางปฏิบัติได้ ด้วยเหตุนี้วิธีการแบบใหม่จึงถูกพัฒนาขึ้น เรียกว่าวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบมากวัตถุประสงค์ (A Many-Objective Evolutionary Algorithms: MaOEAs) โดยหนึ่งในอัลกอริทึมที่โดดเด่นของ MaOEAs คือวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (A Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition: MOEA/D) ซึ่งถูกพัฒนาโดย Zhang and Li [3] วิธีการดำเนินงานของ MOEA/D จะทำการจำแนก MaOP ออกเป็นปัญหาแบบวัตถุประสงค์เดียว (ปัญหาย่อย) หลายปัญหา และทำการแก้ปัญหาย่อยไปพร้อมกัน แต่ละปัญหาย่อยจะได้คำตอบที่ดีที่สุด

การประยุกต์ใช้อัลกอริทึมในการ MaOPs เป็นการประมาณค่าคำตอบ ซึ่งจำเป็นต้องเลือกคำตอบสุดท้ายที่จะ

ไปดำเนินการกับ MaOPs ซึ่งส่วนใหญ่มีจำนวนคำตอบมาก และไม่รู้ขอบเขตที่แน่ชัด อีกทั้งยังใช้เวลามากในการค้นหาคำตอบ MOEA/D ซึ่งเป็นอัลกอริทึมที่โดดเด่นของ MaOEAs จึงเป็นทางเลือกที่ดี เนื่องจาก MOEA/D สามารถค้นหากลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (Pareto optimal solutions) ได้ในเงื่อนไขเดียว ไม่เกิดการค้นหาแบบกระจุยตัว เพราะแบ่งการค้นหาเป็นปัญหาย่อย ทำให้มีการกำหนดทิศทางและขอบเขตของคำตอบในแต่ละปัญหาย่อยที่ชัดเจน รวมถึงความซับซ้อนและเวลาในการค้นหาคำตอบน้อยกว่าอัลกอริทึมอื่น ๆ เช่น วิธีเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ II (Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II: NSGA II) และวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO) อีกทั้งยังคงคำตอบที่หลากหลาย โดย MOEA/D จะเห็นผลลัพธ์ที่ดีและแตกต่างกับอัลกอริทึมอื่น ๆ อย่างชัดเจน เมื่อมีวัตถุประสงค์ตั้งแต่ 4 ถึง 15 วัตถุประสงค์ [3]

ถึงแม้ว่า MOEA/D จะสามารถแก้ MaOPs ได้หลากหลายรูปแบบ แต่วิธีการพัฒนาคำตอบเชิงพันธุกรรมแบบทั่วไป (Crossover และ Mutation ของ GA) มีความละเอียดที่น้อย (ให้ค่าที่ไม่ต่อเนื่อง) ในการค้นหาคำตอบเมื่อเทียบกับวิธีการอื่น ๆ ส่งผลให้ได้คำตอบที่ไม่หลากหลายเมื่อใช้กับปัญหาแบบมกวัตถุประสงค์ที่มีค่าต่อเนื่อง (Continuous MaOPs) Li and Zhang [4] จึงออกแบบวิธีการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (A Multi-Objective Differential Evolution Algorithm based on Decomposition: MODE/D) เพื่อใช้สำหรับปัญหา Continuous MaOPs ซึ่งยังคงใช้การคัดเลือกคำตอบที่ดีของแต่ละปัญหาย่อยตามแบบ MOEA/D แต่เปลี่ยนวิธีการพัฒนาคำตอบโดยใช้กระบวนการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (Differential Evolution Operator: DE Operator) แทน โดยกำหนดให้ใช้ผลต่างของปัญหาย่อยข้างเคียงของแต่ละปัญหาย่อยในการพัฒนาคำตอบ เนื่องจากปัญหาย่อยข้างเคียงจะมีความสัมพันธ์ของค่าวัตถุประสงค์ที่ใกล้เคียงกัน โดยหลักการของ DE Operator จะใช้การกลายพันธุ์ด้วยผลต่าง

ของคำตอบในการหาคำตอบจุดใหม่บนแกนพิกัด (Coordinate) หรือเรียกว่าระยะห่างระหว่างจุดของแต่ละแกนพิกัด (Distances) ด้วยวิธีการนี้ จึงทำให้อัลกอริทึมมีประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบที่มีค่าต่อเนื่องมากขึ้นได้

ดังนั้นในงานบทความนี้ ผู้วิจัยจึงออกแบบวิธีการวิวัฒนาการแบบปรับตัวโดยใช้ผลต่างสำหรับปัญหาหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (Adaptive MOEA/D hybridised with Differential Evolution: AMOEAD-DE) โดยนำ SaDE, jDE และ JADE มาปรับปรุงและพัฒนา MOEA/D เพื่อให้อัลกอริทึมมีความเหมาะสมกับปัญหาของบทความนี้ และสามารถเรียนรู้ทิศทางของคำตอบที่กำลังเปลี่ยนแปลงไปทางที่ดีและไม่ดีได้ โดยกลยุทธ์ในการพัฒนาคำตอบของ DE Operator จะถูกเลือกใช้ตามสถานการณ์ที่เหมาะสมในการค้นหาคำตอบ และมีการปรับพารามิเตอร์ควบคุม เพื่อให้การค้นหาคำตอบมีความหลากหลายและความต่อเนื่องของคำตอบมากขึ้น อีกทั้งยังคงการค้นหาที่มีทิศทางของคำตอบที่ชัดเจน วิธีในการพัฒนาคำตอบที่ดี และเวลาในการค้นหาคำตอบและความซับซ้อนน้อย

โดยในบทความนี้ จะอธิบายเกี่ยวกับปัญหาที่มีมากกว่าหนึ่งวัตถุประสงค์ ในหัวข้อที่ 2, หลักการพื้นฐานของ MOEA/D ในหัวข้อที่ 3, หลักการพื้นฐานของ DE ในหัวข้อที่ 4, แสดงทฤษฎีและขั้นตอนการดำเนินงานของอัลกอริทึมในงานวิจัย ในหัวข้อที่ 5, ผลการทดลอง ในหัวข้อที่ 6 และสรุปผล ในหัวข้อที่ 7

2. ปัญหาแบบหลายวัตถุประสงค์

ปัญหาที่มีหลายวัตถุประสงค์ (MOPs) เป็นปัญหาที่มีจำนวนฟังก์ชันวัตถุประสงค์มากกว่า 1 ขึ้นไป ซึ่งสามารถเป็นกรณีหาค่าน้อยที่สุดหรือมากที่สุดก็ได้ แสดงรูปแบบพื้นฐานกรณีหาค่าน้อยที่สุดดังนี้

$$\text{Minimize } F(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_M(x)) \quad (1)$$

subject to $x \in R^n$

โดยที่ $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ เป็นเวกเตอร์ตัวแปรตัดสินใจหรือเวกเตอร์คำตอบ ซึ่งเป็นสมาชิกของ R^n และ

$f_k(x)$ เป็นค่าวัตถุประสงค์ที่ k ของเวกเตอร์คำตอบ x ซึ่งเป็นสมาชิกของ R^M ($k = 1, \dots, M$)

เนื่องจากแต่ละวัตถุประสงค์ของปัญหา MOPs อาจขัดแย้งกัน จึงจำเป็นต้องใช้การคัดเลือกเวกเตอร์คำตอบที่ให้ความสำคัญกับทุกวัตถุประสงค์ไปพร้อมกัน ด้วยวิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด (Pareto-optimal approach)

ตัวอย่างการคัดเลือกคำตอบ เช่น $v, u \in R^M$ ซึ่งจะบอกว่า v ครอบงำ u ได้ ก็ต่อเมื่อ $f_k(v) \leq f_k(u)$ ทุกค่า ($k = 1, \dots, M$) และ $f_k(v) < f_k(u)$ อย่างน้อย 1 ค่า

โดยเวกเตอร์คำตอบ x^* ใด ๆ ที่ไม่มีใครสามารถครอบงำและไม่สามารถครอบงำกันเองได้ จะถูกเรียกว่า Pareto-optimal solution (PS) และเวกเตอร์วัตถุประสงค์ของ x^* จะถูกเรียกว่า Pareto-optimal front (PF) [5]

3. วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบยัดหลักการจำแนก

วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยัดหลักการจำแนก (MOEA/D) [3] มีหลักแนวคิดในการรวมรวมคำตอบ [6] โดยจะแบ่ง MOPs ออกเป็นปัญหาแบบวัตถุประสงค์เดียว (Single-objective problems: SOPs) หลายปัญหา (หรือที่เรียกว่าปัญหาย่อย: subproblem) ด้วยการกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักเชิงเส้น (λ) ที่แตกต่างกันให้กับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแต่ละปัญหาย่อย ซึ่งแต่ละปัญหาย่อยจะถูกกำหนดความสัมพันธ์ด้วยระยะห่างของค่าถ่วงน้ำหนักที่ต่างกัน (เรียกว่าปัญหาย่อยข้างเคียง: Neighborhood) อีกทั้งยังพัฒนาคำตอบไปพร้อม ๆ กัน โดยใช้คำตอบจากปัญหาย่อยข้างเคียง ซึ่งผลการทดลองพบว่า MOEA/D ให้ประสิทธิภาพที่ดีกับปัญหาหลายรูปแบบ [3, 7, 8] MOEA/D ถูกจัดเป็นเครื่องมือแก้ปัญหาแบบหลายวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุดสำหรับปัญหา The Special Session on Performance Assessment of Multi-objective Optimization Algorithms of the CEC 2009 MOEA Competition (ผลถูกแสดงบนเว็บไซต์ <http://cswwww.essex.ac.uk/staff/zhang/moeacompetition09.htm>)

ในปัจจุบัน มีหลากหลายวิธีในการแปลง MOP เป็น SOP โดยในงานนี้ ได้เลือกใช้วิธีเทบีเชฟฟ์ (Tchebycheff approach) ในการคัดเลือกคำตอบของอัลกอริทึมแบบยัดหลักการจำแนก แสดงสูตรคำนวณดังนี้

$$\text{minimize } g^{te}(x|\lambda^i, z^*) = \max_{1 \leq k \leq M} \{\lambda_k^i | f_k(x) - z_k^* | \} \quad (2)$$

เมื่อ $g^{te}(x|\lambda^i, z^*)$ คือผลต่างมากที่สุดระหว่างค่าวัตถุประสงค์ของสตริง i กับค่าเป้าหมายของเวกเตอร์ค่าถ่วงน้ำหนัก λ^i ของปัญหาย่อยที่ i , z^* คือเวกเตอร์ค่าเป้าหมาย โดยที่ $z^* = z_1^*, z_2^*, \dots, z_M^*$ กรณิหาค่าของคำตอบที่น้อยที่สุด $z_k^* = \min\{f_k(x)\}$ กรณิหาค่าของคำตอบที่มากที่สุด $z_k^* = \max\{f_k(x)\}$, λ^i คือเวกเตอร์ค่าถ่วงน้ำหนักปัญหาย่อยที่ i โดยที่ $\lambda^i = \{\lambda_1^i, \dots, \lambda_M^i\}$, M คือจำนวนฟังก์ชันวัตถุประสงค์

4. วิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง

วิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (Differential Evolution: DE) เป็นเครื่องมือแก้ปัญหาโดยใช้พื้นฐานของประชากร (Population-based Optimizer) ถูกพัฒนาโดย Storn and Price [9] มีทิศทางการค้นหาคำตอบที่แตกต่างและอิสระต่อกันในแต่ละเวกเตอร์คำตอบของประชากร เริ่มต้นปัญหาโดยการสร้างเวกเตอร์เป้าหมาย (Target vector) ในหลายจุดพิภพแบบสุ่มเลือก ด้วยขอบเขตพารามิเตอร์ที่กำหนดไว้ จากนั้น DE จะเข้าสู่กระบวนการพัฒนาคำตอบ ได้แก่ การกลายพันธุ์ (Mutation), การครอสโอเวอร์ (Recombination) และการคัดเลือกคำตอบ (Selection)

กระบวนการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (DE Operator) ให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่ากระบวนการเชิงพันธุกรรมอื่น ๆ (GA Operator เช่น SBX และ UNDX) ในการแก้ปัญหาที่มีวัตถุประสงค์เดียว (Single-Objective Optimization) ด้วยเหตุผลนี้ จึงนำ DE Operator เข้ามาพัฒนาคำตอบแทนวิธี GA Operator เดิมใน MOEA/D [7]

เนื่องจาก DE เป็นอัลกอริทึมที่มีกระบวนการ รูปแบบกลยุทธ์ การคัดเลือกคำตอบ และพารามิเตอร์ควบคุมที่หลากหลาย Venske, et al. [10] ได้แบ่งประเภท DE

ออกเป็น 2 แบบ ได้แก่ วิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบคลาสสิก (Classical DE) และวิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบปรับตัว (Adaptive DE)

4.1 วิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบคลาสสิก

วิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างมีพารามิเตอร์ควบคุม 3 ตัว ได้แก่ N , F และ CR โดย N คือจำนวนหรือขนาดของประชากร ส่วนค่าปัจจัยขยายผลต่าง (F) ใช้ในการปรับขนาดของค่าผลต่างระหว่างสองเวกเตอร์สุ่ม ซึ่งจะถูกนำมาบวกเพิ่มกับเวกเตอร์พื้นฐาน (Base vector) และจะได้เวกเตอร์กลายพันธุ์ (Mutant vector: v) โดยเรียกกระบวนการนี้ว่า การกลายพันธุ์ด้วยผลต่าง (Differential mutation) จากนั้นจะทำการครอสโอเวอร์ระหว่างเวกเตอร์กลายพันธุ์ (v) กับเวกเตอร์เป้าหมาย (Target vector: x) ด้วยอัตราการครอสโอเวอร์ (CR) โดยสุดท้ายจะได้เวกเตอร์ทดลอง (Trial vector: u) เป็นเวกเตอร์คำตอบรุ่นใหม่ เพื่อนำมาเปรียบเทียบและคัดเลือกคำตอบที่ดี ส่วนประกอบของเวกเตอร์คือ จุดพิกัด (Coordinate) และจำนวนพิกัดในแต่ละเวกเตอร์คือ ขนาดเวกเตอร์ (n)

DE Operator เป็นการในการค้นหาคำตอบแบบเวกเตอร์ โดยใช้ผลต่างระหว่างจุดบนแกน (Coordinate) เดียวกันและพารามิเตอร์ควบคุม 2 ตัว เป็นตัวกำหนดทิศทางและขนาดของเวกเตอร์ x ใด ๆ ให้เปลี่ยนแปลงไป [11] จึงทำให้ DE Operator เหมาะในการแก้ปัญหา Continuous MOPs และปัญหาที่มีรูปแบบที่เป็นไปได้ของคำตอบหลากหลายได้ดี DE จะประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก ๆ ในการพัฒนาคำตอบ ได้แก่ การกลายพันธุ์ด้วยผลต่าง (Differential mutation), รีคอมบิเนชัน (Recombination) และการคัดเลือก (Selection)

4.2 วิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบปรับตัว

สำหรับวิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบคลาสสิก (Classical DE) จะกำหนดพารามิเตอร์ทั้งหมดเป็นค่าคงที่ ไม่มีเปลี่ยนแปลงในระหว่างการดำเนินงานอัลกอริทึม จึงมีการคิดค้นอัลกอริทึมแบบปรับตัว (Adaptive algorithms) ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์หรือวิธีการพัฒนาคำตอบในระหว่างดำเนินงานอัลกอริทึมได้ ตัวอย่างเช่น

SaDE, JADE, jDE, EPSDE, ENS-MOEA/D และ FADE โดยสำหรับวิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง จะแบ่งการปรับตัวออกเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ การปรับตัวด้วยพารามิเตอร์ควบคุม (Parameter adaptation) และการปรับตัวด้วยกลยุทธ์ (Strategy adaptation)

วิธีวิวัฒนาการแบบปรับตัว (Adaptive Differential Evolution) ถูกพิสูจน์ว่าเป็นอัลกอริทึมที่มีการลู่เข้าของคำตอบที่รวดเร็วและน่าเชื่อถือ (เสถียรและความแปรปรวนต่ำ) กว่า Classical DE [12, 13] โดยมีรูปแบบกลยุทธ์ของ DE ซึ่งเป็นโครงสร้างพื้นฐานสำหรับกระบวนการปรับตัวด้วยพารามิเตอร์ (Parameter adaptation operations) เป็นส่วนสำคัญต่อประสิทธิภาพอัลกอริทึมอย่างมาก Qin and Suganthan [12], Teo [14] ได้พัฒนา Adaptive DE จากโครงสร้างของ Classical DE ด้วยกลยุทธ์ DE/rand/1/bin ซึ่งมีความแข็งแกร่งและเป็นที่นิยมอย่างมาก แต่กลยุทธ์นี้มีอัตราการลู่เข้าของคำตอบที่ช้า ส่วน Huang, et al. [15] ใช้กลยุทธ์ DE/rand/1/bin ไปพร้อมกับ DE/current-to-best/1/bin ด้วยการสุ่มเลือกหนึ่งกลยุทธ์ในการพัฒนาคำตอบ และทำการปรับค่าความน่าจะเป็นในการเลือกใช้กลยุทธ์จากจำนวนความสำเร็จในการสร้างคำตอบที่ดีของแต่ละกลยุทธ์

SaDE เป็นวิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบปรับตัวด้วยกลยุทธ์ ถูกเสนอโดย Qin and Suganthan [12] ซึ่งวิธีนี้ จะมีสองกลยุทธ์ในการกลายพันธุ์คำตอบ ได้แก่ DE/rand/1 และ DE/current-to-best/1 โดยจะปรับใช้กลยุทธ์ด้วยค่าความน่าจะเป็น ซึ่งได้จากสัดส่วนความสำเร็จที่เกิดขึ้นจากการสร้างคำตอบรุ่นใหม่ที่ดีใน 50 เจเนอเรชันก่อนหน้า โดยขั้นตอนการปรับตัวนี้ จะสามารถเรียนรู้และปรับใช้กลยุทธ์ที่เหมาะสมกับสถานการณ์ที่แตกต่างกันได้ ส่วนด้านพารามิเตอร์ ปัจจัยการกลายพันธุ์ จะถูกสุ่มค่าอิสระด้วยการแจกแจงแบบปกติ (Normal distribution) ที่ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.5 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.3 โดยมีขอบเขตในช่วงระหว่าง 0 ถึง 2 ด้วยวิธีนี้ จะสามารถค้นหาคำตอบในบริเวณใกล้เคียงคำตอบเดิม (F_i มีค่าน้อย) และสามารถค้นหาคำตอบที่

แตกต่างจากคำตอบเดิมได้ (F_i มีค่ามาก) ส่วนความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์ จะถูกสุ่มค่าอิสระด้วยการแจกแจงแบบปกติที่ค่าเฉลี่ยเท่ากับ CR_m และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.1 โดย SaDE จะคงค่า F_i และ CR_i เป็นจำนวน 5 เจเนอเรชัน ก่อนจะสุ่มค่าใหม่จากค่าเฉลี่ยเริ่มต้น CR_m เท่ากับ 0.5 ซึ่งจะถูกรับปรุงค่าตามทิศทางการค้นหาคำตอบในทุก ๆ 25 เจเนอเรชัน

Brest, et al. [13] ได้นำเสนอวิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบใหม่ (A new adaptive DE: jDE) ซึ่งมีพื้นฐานมาจาก Classical DE กลยุทธ์ DE/rand/1/bin โดย jDE จะกำหนดจำนวนประชากรคงที่ตลอดการดำเนินงาน อัลกอริทึม และปรับค่าพารามิเตอร์ควบคุม F_i และ CR_i ตามความน่าจะเป็น τ_1 และ τ_2 ตามลำดับ ในการเริ่มต้นกระบวนการ จะกำหนดค่า F_i เท่ากับ 0.5 มีขอบเขตในช่วงระหว่าง 0.1 ถึง 1 และ CR_i เท่ากับ 0.9 มีขอบเขตในช่วงระหว่าง 0 ถึง 1 ซึ่ง jDE จะทำการสุ่มค่า F_i และ CR_i ด้วยการแจกแจงแบบยูนิฟอร์ม (Uniform distribution) ผลการทดลองพบว่า jDE ให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่า Classical DE กลยุทธ์ DE/rand/1/bin, FEP and CEP [16], the adaptive LEP, Best Levy [17] และ FADE [18]

Zhang and Sanderson [19] ได้นำเสนอ JADE ซึ่งเป็นวิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างที่ทำการพัฒนากลยุทธ์ขึ้นมาใหม่ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบให้หลากหลายและลู่เข้าอย่างรวดเร็ว โดยได้แก่กลยุทธ์ DE/current-to-pbest/1 และ DE/rand-to-pbest/1 และแบ่งออกเป็นอย่างละ 2 ประเภท คือ มีตัวเลือกการสุ่มภายนอก (Optional external archive: EA) และไม่มี กลยุทธ์ในการค้นหาคำตอบของ JADE มีหลักการทำงานเช่นเดียวกับ DE/current-to-best/1 แบบปกติ แต่จะสามารถเลือกสุ่มเวกเตอร์ผลต่าง (Difference vector) จาก EA ได้ ทำให้มีทิศทางที่เป็นไปได้ของผลต่างเวกเตอร์หลากหลายมากขึ้น JADE มีการปรับค่าพารามิเตอร์ควบคุมคล้ายคลึงกับ Adaptive DE อื่น ๆ โดย F_i จะถูกสุ่มค่าอิสระด้วยการแจกแจงแบบโคชี (Cauchy distribution) ที่ค่าเฉลี่ยเริ่มต้นเท่ากับ 0.5 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

เท่ากับ 0.1 โดยมีขอบเขตในช่วงระหว่าง 0 ถึง 1 และ CR_i จะถูกสุ่มค่าอิสระด้วยการแจกแจงแบบยูนิฟอร์ม ที่ค่าเริ่มต้นเท่ากับ 0.9 โดยมีขอบเขตในช่วงระหว่าง 0 ถึง 1 ผลการทดลองพบว่า JADE มีการลู่เข้าของคำตอบที่รวดเร็วกว่า Adaptive DE ทั้งหมด อีกทั้งยังมีการปรับพารามิเตอร์ได้ด้วยตนเอง

5. อัลกอริทึม AMOE/D-DE

วิธีการวิวัฒนาการแบบปรับตัวโดยใช้ผลต่างสำหรับปัญหาหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (AMOE/D-DE) มีแนวคิดและแรงบันดาลใจจากเครื่องมือการแก้ปัญหาหลายวัตถุประสงค์แบบดั้งเดิม, MOEA/D และ MODE/D [3, 7, 8] โดยมี MOEA/D เป็นอัลกอริทึมพื้นฐานในการออกแบบและพัฒนาอัลกอริทึม

ในบทความนี้ ได้นำ SaDE, jDE และ JADE ซึ่งเป็นวิธีเชิงวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบปรับตัว (Adaptive DE: ADE) มาประยุกต์ใช้กับ MOEA/D เนื่องจาก DE Operator เป็นวิธีการพัฒนาคำตอบที่ถูกพิสูจน์ว่าดีสำหรับปัญหาแบบวัตถุประสงค์เดียว อีกทั้งการนำ ADE เข้ามาปรับใช้ ยังทำให้อัลกอริทึมสามารถเรียนรู้ทิศทางของระบบว่าเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางใด และสามารถปรับตัวให้เข้ากับสถานการณ์ของอัลกอริทึมในการค้นหาคำตอบได้

5.1 การปรับตัวด้วยกลยุทธ์

การปรับตัวด้วยกลยุทธ์ (Strategy Adaptation) มีแนวคิดจาก SaDE ของ Huang, et al. [15] ซึ่งเป็นอัลกอริทึมที่มีการเรียนรู้พฤติกรรมของระบบ และสุ่มเลือกกลยุทธ์ในการค้นหาคำตอบจากค่าความน่าจะเป็นให้เหมาะสมกับสถานการณ์

ในบทความนี้ ได้พัฒนา sbest (Best so far solution) จาก best (Best solution) แบบเดิม เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพที่ดีขึ้นในการประยุกต์ใช้กับ MOEA/D โดยหลักการพื้นฐานของ sbest จะเหมือนกับ best ทุกอย่าง คือเลือกเวกเตอร์ที่ให้คำตอบที่ดีที่สุดมาเป็นเวกเตอร์เริ่มต้น (Base vector) แล้วพัฒนาคำตอบด้วยผลต่างของเวกเตอร์สุ่ม เมื่อขึ้นเจเนอเรชันถัดไป ก็จะทำการเลือกเวกเตอร์ที่ให้คำตอบที่ดี

ใหม่อีกครั้ง ซึ่งอาจจะดีหรือแย่กว่ารอบก่อนหน้าก็ได้ ดังนั้น $sbest$ จึงถูกเพิ่มการจัดเก็บเวกเตอร์ที่ให้คำตอบที่ดีที่สุดไว้ และจะถูกแทนที่คำตอบเมื่อมีคำตอบที่ดีกว่าเท่านั้น โดยผู้วิจัย ได้พัฒนาและเลือกใช้กลยุทธ์ทั้งหมด 3 แบบ ดังนี้

- 1) กลยุทธ์ที่ 1: “DE/rand/1/bin”

$$v^i = x^{r1} + F(x^{r2} - x^{r3}) \quad (3)$$

- 2) กลยุทธ์ที่ 2: “DE/sbest/1/bin”

$$v^i = sbest^i + F(x^{r1} - x^{r2}) \quad (4)$$

- 3) กลยุทธ์ที่ 3: “DE/rand-to-sbest/1/bin”

$$v^i = x^{r1} + \gamma(sbest^i - x^{r1}) + F(x^{r2} - x^{r3}) \quad (5)$$

กลยุทธ์ที่ 1: DE/rand/1/bin เป็นกลยุทธ์แบบดั้งเดิมของวิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (DE) และนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยกลยุทธ์นี้ จะทำการสุ่มเลือกเวกเตอร์พื้นฐาน (Base vector) จำนวน 1 เวกเตอร์ และสุ่มเลือกเวกเตอร์ผลต่าง (Difference vector) จำนวน 2 เวกเตอร์ มาใช้ในการคำนวณหาเวกเตอร์คำตอบกลายพันธุ์ (Mutant vector) และทำการยูนิฟอร์มครอสโอเวอร์ จะได้เวกเตอร์คำตอบรุ่นใหม่หรือเวกเตอร์ทดลอง (Trial vector) นำมาใช้ประเมินและคัดเลือกคำตอบ [9]

กลยุทธ์ที่ 2: DE/sbest/1/bin เป็นกลยุทธ์ที่มีความคล้ายคลึงกับ DE/best/1/bin แบบดั้งเดิม แต่กลยุทธ์นี้ จะจัดเก็บค่าที่ดีที่สุด (Best so far: $sbest$) ของแต่ละปัญหาย่อยไว้ โดยหากไม่มีเวกเตอร์คำตอบที่ดีกว่าเวกเตอร์ $sbest^i$ ของปัญหาย่อยที่ i จะไม่เกิดการแทนที่หรือเปลี่ยนแปลงคำตอบของเวกเตอร์ $sbest$ ดังนั้น กลยุทธ์นี้ นอกจากจะมีการสุ่มเลือกคำตอบที่รวดเร็วเหมือนกลยุทธ์แบบดั้งเดิมแล้ว อีกทั้งยังคงเก็บค่าที่ดีที่สุด ไม่เกิดการสูญหายของคำตอบที่ดีจากการแทนที่ของปัญหาย่อยข้างเคียง จึงทำให้ทิศทางการค้นหาคำตอบไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงแบบกะทันหัน

กลยุทธ์ที่ 3: DE/rand-to-sbest/1/bin เป็นกลยุทธ์ที่มีความคล้ายคลึงกับ DE/rand-to-best/1/bin แบบดั้งเดิม

โดยใช้หลักการเก็บค่าที่ดีที่สุดไว้เช่นเดียวกับ DE/sbest/1/bin โดยกลยุทธ์นี้ มีเวกเตอร์พื้นฐาน 2 เวกเตอร์ คือเวกเตอร์สุ่มและเวกเตอร์ $sbest$ ถูกถ่วงน้ำหนักด้วยค่า γ เพื่อหาจุดพิกัดเริ่มต้นในการพัฒนาคำตอบเช่นเดียวกับกลยุทธ์อื่น ๆ โดย DE/rand-to-sbest/1/bin จะมีการค้นหาคำตอบที่หลากหลายแต่ไม่มากเท่า DE/rand/1/bin และมีการสุ่มเลือกคำตอบที่รวดเร็วแต่ไม่เท่า DE/sbest/1/bin จึงทำให้กลยุทธ์นี้ มีการค้นหาคำตอบอยู่ระหว่าง 2 กลยุทธ์ข้างต้น และด้วยเหตุนี้ อาจทำให้ช่วยสร้างรูปแบบของคำตอบที่หลากหลายและดีขึ้นได้

การเริ่มต้นดำเนินการงานของการปรับตัวด้วยกลยุทธ์ ในแต่ละกลยุทธ์จะมีความน่าจะเป็นเท่ากัน โดยจะเกิดการเรียนรู้และปรับความน่าจะเป็นของกลยุทธ์ไปเรื่อย ๆ จากจำนวนความสำเร็จและไม่สำเร็จที่เกิดขึ้น [20] แสดงสูตรคำนวณซึ่งผู้วิจัยได้ดัดแปลงบางส่วนเพื่อให้เหมาะสมกับอัลกอริทึมที่ใช้ในงานวิจัย ดังนี้

$$p_{s,g+1} = p_{\min} + (1 - S \times p_{\min}) \cdot \left[(1 - \alpha)p_{s,g} + \alpha \cdot \left(\frac{Suc_{s,g}}{\sum_{s=1}^S Suc_{s,g}} \right) \right] \quad (6)$$

$$Suc_{s,g} = \frac{ns_{s,g}}{ns_{s,g} + nf_{s,g}} + \varepsilon \quad (7)$$

$$ns_{s,g} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N DSR_{i,j,g}^s \quad (8)$$

$$nf_{s,g} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (1 - SR_{i,j,g}^s) \quad (9)$$

เมื่อ $p_{s,g}$ คือค่าความน่าจะเป็นในการเลือกใช้กลยุทธ์ที่ s ในเจเนอเรชันที่ g (The probability of choosing s^{th} strategy) โดยที่ $s = 1, 2, \dots, S$, $Suc_{s,g}$ คือสัดส่วนความสำเร็จในการสร้างคำตอบรุ่นใหม่ของกลยุทธ์ที่ s ในเจเนอเรชันที่ g (The rate of offspring vectors successfully creating by the s^{th} strategy), $ns_{s,g}$ คือจำนวนความสำเร็จในการสร้างคำตอบรุ่นใหม่ของกลยุทธ์ที่ s เจเนอเรชันที่ g (Number of strategy s successfully creating survival offspring vectors in generation g), $nf_{s,g}$ คือจำนวนความไม่สำเร็จในการสร้างคำตอบรุ่นใหม่

ของกลยุทธ์ที่ s ในเจเนอเรชันที่ g (Number of strategy s unsuccessfully creating survival offspring vectors in generation g), $SR_{i,j,g}^s$ คือ การแทนที่คำตอบ (Solution Replacement) ซึ่งได้จากกลยุทธ์ที่ s จะมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อเกิดความสำเร็จในการสร้างคำตอบรุ่นใหม่ในปัญหาย่อยที่ i เวกเตอร์ที่ j เจเนอเรชันที่ g (Strategy s successfully creating offspring vector that are better than or equal to the parent vector and its neighboring solutions of subproblem i), $DSR_{i,j,g}^s$ คือ การแทนที่คำตอบแบบครอบงำ (Dominated Solution Replacement) ซึ่งได้จากกลยุทธ์ที่ s จะมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อเกิดความสำเร็จในการสร้างคำตอบรุ่นใหม่แบบครอบงำคำตอบเดิมในปัญหาย่อยที่ i เวกเตอร์ที่ j เจเนอเรชันที่ g (Strategy s successfully creating offspring vector that are better than the parent vector and its neighboring solutions of subproblem i), p_{min} คือค่าความน่าจะเป็นต่ำสุดของกลยุทธ์ (The minimum probability of each strategy), S คือจำนวนกลยุทธ์ (Number of strategy), α คืออัตราการปรับตัว (Adaptation rate) มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1, ε คือค่าคงที่เพื่อหลีกเลี่ยงกรณีค่าไม่ได้ โดยในงานวิจัยนี้ใช้ค่า 0.0001 (The constant value is used to avoid possible null rates of success), $sbest^i$ คือเวกเตอร์คำตอบที่ดีที่สุด (Best so far vector) สำหรับปัญหาย่อยที่ i โดยที่ $sbest = (sbest_1, \dots, sbest_n)$

5.2 การปรับตัวด้วยพารามิเตอร์ควบคุม

การปรับตัวด้วยพารามิเตอร์ควบคุม (Parameter Adaptation) มีกระทบต่อค่าผลลัพธ์ของคำตอบอย่างมาก เนื่องจาก DE Operator ใช้พารามิเตอร์ควบคุมเป็นตัวกำหนดระยะเคลื่อนของจุดพิกัด ตัวอย่างเช่น หากกำหนดค่า F ที่มาก จะทำให้การเคลื่อนของจุดพิกัดห่างจากจุดเริ่มต้นมาก ส่งผลให้ไม่สามารถหาค่าที่ดีกว่าในบริเวณใกล้เคียงจุดเริ่มต้นได้ หรือหากกำหนดค่า F ที่น้อย

จะทำให้การเคลื่อนของจุดพิกัดใกล้จุดเริ่มต้น ทำให้มีโอกาสติดอยู่ในคำตอบที่เฉพาะกลุ่มได้

ในงานวิจัยนี้ จึงได้นำแนวคิดของ jDE และ JADE จาก Brest, et al. [13], Zhang and Sanderson [19], Zhang and Sanderson [21] มาพัฒนาและประยุกต์ใช้กับ MOEA/D ให้เกิดการเรียนรู้และปรับค่าพารามิเตอร์ควบคุมเมื่อคำตอบที่มีในระบบไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง แสดงตัววัดการเปลี่ยนแปลงของระบบดังนี้

$$\tau_{i,g}^s = 1 - \left[(1 - \beta) \cdot \frac{\sum_{k=1}^g ASR_{i,j,k}^s}{\sum_{k=1}^g X_{i,k}^s} \right] - \left[\beta \cdot \frac{\sum_{k=1}^g \sum_{j=1}^N ASR_{i,j,k}^s}{NR \sum_{k=1}^g X_{i,k}^s} \right] \quad (10)$$

$$ASR_{i,j,g}^s = \frac{1}{2} (SR_{i,j,g}^s + DSR_{i,j,g}^s) \quad (11)$$

เมื่อ $\tau_{i,g}^s$ คือค่าสัดส่วนความสำเร็จในการสร้างคำตอบรุ่นใหม่จากการใช้กลยุทธ์ที่ s ในปัญหาย่อยที่ i เจเนอเรชันที่ g (The ratio of unsuccessfully creating offspring vector that are better than the parent vector from using strategy s in subproblem i generation g), $ASR_{i,j,g}^s$ คือค่าเฉลี่ยการแทนที่คำตอบกับการแทนที่แบบครอบงำในปัญหาย่อยที่ i เวกเตอร์ที่ j เจเนอเรชันที่ g (Average of $SR_{i,j,g}^s$ and $DSR_{i,j,g}^s$), β คือค่าถ่วงน้ำหนักระหว่างความสำเร็จในการสร้างคำตอบใหม่ของปัญหาย่อยที่ i กับความสำเร็จในการสร้างคำตอบรุ่นใหม่ของปัญหาย่อยที่ $j \in B(i)$ มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 หากกำหนดค่าเท่ากับ 1 หมายถึงสนใจเวกเตอร์คำตอบทั้งหมดของ $B(i)$ หากเท่ากับ 0 หมายถึงสนใจเฉพาะเวกเตอร์ที่ i ของปัญหาย่อย i (Scaling factor for weighting the successfully creating offspring at the subproblem i and the successfully creating offspring in the neighborhood of subproblem i), $X_{i,k}^s$ คือเลขฐานสอง เท่ากับ 1 เมื่อใช้กลยุทธ์ที่ s ในปัญหาย่อยที่ i เจเนอเรชันที่ g , NR คือจำนวนการแทนที่คำตอบสูงสุด (Maximum number of solutions replacement)

5.2.1 การปรับตัวของค่าปัจจัยขยายผลต่าง

การปรับตัวของค่าปัจจัยขยายผลต่าง (Adaptation of scaling factor) ในงานวิจัยนี้ ได้นำแนวคิดการปรับพารามิเตอร์จาก JADE โดยจะทำการปรับพารามิเตอร์ควบคุมในทุกปัญหาย่อยทุกเจเนอเรชันด้วยการแจกแจงแบบโคชี (Cauchy Distribution) เมื่อค่าสุ่มน้อยกว่าค่าสัดส่วนความสำเร็จในการสร้างคำตอบรุ่นใหม่ แสดงสูตรการปรับพารามิเตอร์ควบคุมดังนี้

$$F_{i,g+1}^s = \begin{cases} \text{cauchy}(\mu_{F,i,t+1}^s, 0.1), & \text{if } rand_1 < \tau_{i,g}^s \\ F_{i,g}^s, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

$$\mu_{F,i,g+1}^s = \begin{cases} (1-LR) \cdot \mu_{F,i,g}^s + LR \cdot F_{i,g}^s & \text{if } \sum_{j=1}^N DSR_{i,j,g}^s > 0 \\ \mu_{F,i,g}^s & \text{otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

เมื่อ $F_{i,g}^s$ คือค่าปัจจัยขยายผลต่าง (Scaling factor) ของกลยุทธ์ที่ s ปัญหาย่อยที่ i ในเจเนอเรชันที่ g , $\mu_{F,i,g}^s$ คือค่าเฉลี่ยปัจจัยขยายผลต่าง (Mean of scaling factor) ของกลยุทธ์ที่ s ปัญหาย่อยที่ i ในเจเนอเรชันที่ g , LR คืออัตราการเรียนรู้ (Learning rate)

5.2.2 การปรับตัวของอัตราการครอสโอเวอร์

การปรับตัวของอัตราการครอสโอเวอร์ (Adaptation of crossover rate) ในงานวิจัยนี้ ใช้สมการถดถอยในการปรับพารามิเตอร์ เนื่องจากค่า CR ที่น้อยจะทำให้ค่าฟิตไม่เปลี่ยนแปลงจากเดิมมาก ส่งผลให้สามารถค้นหาคำตอบที่ดีในบริเวณใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีเดิม ผู้วิจัยจึงกำหนดให้ค่า CR น้อยลงเมื่อเทียบกับจำนวนเจเนอเรชันสูงสุดในการดำเนินงานอัลกอริทึม โดยจะทำการปรับค่าพารามิเตอร์ควบคุมในทุกปัญหาย่อยทุกเจเนอเรชัน เมื่อค่าสุ่มน้อยกว่าค่าสัดส่วนความสำเร็จในการสร้างคำตอบรุ่นใหม่

เนื่องจากค่า CR มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงทิศทางของคำตอบที่มากขึ้น เมื่ออัลกอริทึมดำเนินงานใกล้ครบจำนวนเจเนอเรชันที่กำหนด จะกำหนดให้ค่า CR ลดลงอย่างรวดเร็วเพื่อหาค่าที่ดีที่สุดภายในบริเวณพิกัดนั้น ๆ ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้นำสมการถดถอยจากแนวคิดของ Lin, et al. [22] มาดัดแปลงให้เหมาะสมกับอัลกอริทึมและปัญหาที่ใช้ใน

งานวิจัย แสดงสมการถดถอยในการปรับพารามิเตอร์ควบคุมดังนี้

$$CR_{i,g+1}^s = \begin{cases} 0.55 + \left[\frac{1}{\pi} \times \arctan \left(\frac{1 - \frac{NA_{i,g}^s}{RG}}{0.1} \right) \right], & \text{if } rand_2 < \tau_{i,g}^s \\ CR_{i,g}^s, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

$$NA_{i,g}^s = \sum_{k=1}^g na_{i,k}^s \quad (15)$$

เมื่อ $CR_{i,g}^s$ คืออัตราการครอสโอเวอร์ (Crossover rate) ของกลยุทธ์ที่ s ปัญหาย่อยที่ i ในเจเนอเรชันที่ g , $NA_{i,g}^s$ คือจำนวนครั้งที่เกิดการปรับพารามิเตอร์ CR (Cumulative number of crossover probability adjustments) ของกลยุทธ์ที่ s ปัญหาย่อยที่ i ในเจเนอเรชันที่ g , $na_{i,g}^s$ คือเลขฐานสอง เท่ากับ 1 เมื่อเกิดการปรับพารามิเตอร์ CR ของกลยุทธ์ที่ s ในปัญหาย่อยที่ i เจเนอเรชันที่ g , RG คือจำนวนเจเนอเรชันที่เหลือ (Remaining number of generations)

5.2.3 การปรับตัวของค่าถ่วงน้ำหนักเวกเตอร์พื้นฐาน

การปรับตัวของค่าถ่วงน้ำหนักเวกเตอร์พื้นฐาน (Adaptation of weight of base vectors) ในงานวิจัยนี้ นำแนวคิดการปรับพารามิเตอร์จาก jDE โดยจะทำการปรับพารามิเตอร์ควบคุมในทุกปัญหาย่อยทุกเจเนอเรชันด้วยการแจกแจงแบบยูนิฟอร์ม (Uniform Distribution) เมื่อค่าสุ่มน้อยกว่าค่าสัดส่วนความสำเร็จในการสร้างคำตอบรุ่นใหม่

เนื่องจากไม่สามารถบ่งบอกได้ว่าค่าถ่วงน้ำหนักเวกเตอร์พื้นฐานควรเป็นเท่าใด จึงกำหนดให้ปรับตัวแบบกระจายเท่า ๆ กัน เพื่อเพิ่มความหลากหลายของรูปแบบคำตอบให้มากที่สุด แสดงสูตรการปรับพารามิเตอร์ควบคุมดังนี้

$$v_{i,g+1}^s = \begin{cases} rand_4, & \text{if } rand_3 < \tau_{i,g}^s \\ v_{i,g}^s, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (16)$$

เมื่อ $v_{i,g}^s$ คือค่าถ่วงน้ำหนักเวกเตอร์พื้นฐาน (Weight of base vectors) ของกลยุทธ์ที่ s ปัญหาย่อยที่ i ในเจเนอเรชันที่ g

5.3 รหัสเทียมของ AMOEAD-DE

อัลกอริทึม 1: นำเสนอวิธีการดำเนินงานอัลกอริทึม

AMOEAD-DE ด้วยรูปแบบรหัสเทียม

```

1: /* Initialization
2: Generate  $N$  weight vectors  $\lambda^i = (\lambda_1^i, \lambda_2^i, \dots, \lambda_M^i)$ ,
    $i = 1, \dots, N$ 
3: For  $i = 1, \dots, N$ , define the set of indexes  $B(i) =$ 
    $\{i_1, \dots, i_{Nb}\}$  where  $\{\lambda^{i_1}, \dots, \lambda^{i_{Nb}}\}$  are the  $Nb$  closest
   weight vectors to  $\lambda^i$  (by the Euclidean distance)
4: Generate an initial population  $P_0 = \{x^1, \dots, x^N\}$ ,  $x^i =$ 
    $(x_1^i, x_2^i, \dots, x_n^i)$ 
5: Evaluate each individual in the initial population  $P_0$ 
   and associate  $x^i$  with  $\lambda^i$ 
6: For  $i = 1, \dots, N$ , set  $sbest^i = x^i$ 
7: Initialize  $z^* = (z_1^*, \dots, z_M^*)$  by setting
    $z_k^* = \min_{1 \leq i \leq N} \{f_k(x^i)\}$ ,  $k = 1, 2, \dots, M$ 
8: Set  $g = 1$ ,  $\tau_{i,0}^s = 0$ 
9: For all strategies  $s = 1, \dots, S$ , set  $p_{s,g} = 1/S$ 
10: For all  $SR_{i,j,g}^s$  and  $DSR_{i,j,g}^s$  are set zero
11:
12: /* Main computation loop
13: repeat
14: for each parent vector  $x^i$ ,  $i = 1, \dots, N$  do
15:   Select strategy  $s$  from the pool according to  $p_{s,g}$ 
16:
17:   /* Parameter adaptation
18:   if  $rand_1 < \tau_{i,g-1}^s$  then //Adaptation of  $F$ 
     ( $rand$  in  $U[0,1]$ )
19:     Generate  $F_{i,g}^s = \text{cauchy}(\mu_{F,i,g+1}^s, 0.1)$ 
20:   else
21:      $F_{i,g}^s = F_{i,g-1}^s$ 
22:   end if (step 18)
23:   if  $rand_2 < \tau_{i,g-1}^s$  then //Adaptation of  $CR$ 
24:     Calculate  $CR_{i,g}^s$ 
       
$$= 0.55 + \left[ \frac{1}{\pi} \times \arctan \left( \frac{1 - \frac{NA_{i,g}^s}{RG}}{0.1} \right) \right]$$

25:   else
26:      $CR_{i,g}^s = CR_{i,g-1}^s$ 
27:   end if (step 23)
28:   if  $rand_3 < \tau_{i,g-1}^s$  then //Adaptation of  $\gamma$ 
29:     Generate  $\gamma_{i,g}^s = rand$ 
30:   else
31:      $\gamma_{i,g}^s = \gamma_{i,g-1}^s$ 
32:   end if (step 28)
33:
34:   /* Update real best solution
35:   If the tchebycheff value of  $x^j$  is better than
      $sbest^i$ ,  $j \in B(i)$  then
36:     Set  $sbest^i = x^j$ 
37:   end if (step 35)
38:
39:   /* Reproduction
40:   Generate a new solution  $y$  by DE operator
     (repair it if necessary)
41:   Apply polynomial mutation to produce  $y'$ 
     (repair it if necessary)
42:
43:   Update  $z^*$ ,  $z_k^* = \min(z_k^*, f_k(y'))$  and set  $n_r = 0$ 
44:
45:   /* Selection
46:   for each subproblem  $j \in B(i)$  do
47:     if  $n_r < NR$  then
48:       if  $g^{te}(y'|\lambda^j, z^*) \leq g^{te}(x^j|\lambda^j, z^*)$  then
49:         Replace  $x^j$  by  $y'$ , increment  $n_r$  and set
            $SR_{i,j,g}^s = 1$ 
50:       if  $g^{te}(y'|\lambda^j, z^*) < g^{te}(x^j|\lambda^j, z^*)$  then
51:         Set  $DSR_{i,j,g}^s = 1$  //true is equal to one
52:       end if (step 50)
53:     end if (step 48)
54:   end if (step 47)
55: end for (step 46)
56:
57: /* Update mean of scaling factor
58: if any  $DSR_{i,j,g}^s$  of subproblem  $j \in B(i)$  be true
   then
59:   Update  $\mu_{F,i,g+1}^s$ 

```



```

60: else
61:    $\mu_{F,i,g+1}^s = \mu_{F,i,g}^s$ 
62: end if (step 58)
63:
64: Calculate all  $ASR_{i,j,g}^s$  and  $\tau_{i,g}^s$  for each strategy
65: end for (step 14)
66: Calculate and update the probability  $p_{s,g+1}$  for each
    strategy
67:  $g = g + 1$ 
68: until  $g > G$ 

```

การเริ่มต้นของ AMOEVA/D-DE จะสร้างค่าถ่วงน้ำหนัก λ_k^i โดยใช้ซิมเพล็กซ์แลตทิซดีไซน์ (Simplex lattice design) เป็นเมทริกซ์ขนาดเท่ากับ จำนวนประชากร (N) x จำนวนวัตถุประสงค์ (M) และคำนวณระยะห่างระหว่างจุดพิกัดของเวกเตอร์ค่าถ่วงน้ำหนัก λ^i ทั้งหมด (Euclidean distances) ดังสมการที่ 23 และจัดเก็บเวกเตอร์ข้างเคียงของแต่ละปัญหาย่อยที่ i ลงในเซต $B(i)$

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^M (\lambda_k^i - \lambda_k^j)^2} \quad (17)$$

เมื่อได้ค่า d_{ij} แล้ว (d_{ij} คือระยะห่างระหว่างจุดของค่าถ่วงน้ำหนักเวกเตอร์ที่ i กับเวกเตอร์ที่ j โดย $i = 1, \dots, N$ และ $j = 1, \dots, N$) ให้สร้างเวกเตอร์คำตอบเริ่มต้นตามจำนวนประชากร โดยวิธีสุ่มเลือกอิสระ ขนาดเวกเตอร์เท่ากับจำนวนผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (n) จากนั้นกำหนด g และ i เท่ากับ 1, กำหนดค่าความน่าจะเป็นเริ่มต้นของทุกกลยุทธ์ ($p_{s,1}$) เท่ากับ $1/S$, คำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ($f(x^i)$) ของเวกเตอร์คำตอบเริ่มต้น และกำหนดค่าเป้าหมาย $z_k^* = \min_{1 \leq i \leq N} \{f_k(x^i)\}$ โดยที่ $k = 1, 2, \dots, M$

หลังจากจบขั้นตอนการเริ่มต้น อัลกอริทึมจะเข้าสู่ขั้นตอนการปรับปรุง ซึ่งเป็นลูปหลัก (Main loop) ในการดำเนินงาน (ขั้นตอนที่ 12-67) เริ่มต้นโดยสุ่มเลือกกลยุทธ์จากค่าความน่าจะเป็นของกลยุทธ์ในเจเนอเรชันที่ g ($p_{s,g}$) และสุ่มค่าระหว่าง 0 ถึง 1 ให้กับพารามิเตอร์ควบคุมทุกตัว หากค่าสุ่มของพารามิเตอร์ควบคุมใด น้อยกว่าค่าสัดส่วนความสำเร็จในการสร้างคำตอบรุ่นใหม่ ($\tau_{i,g-1}^s$) ของเจ

เนอเรชันที่ $g - 1$ จะทำการปรับค่าพารามิเตอร์ควบคุมนั้น ในเจเนอเรชันที่ t คำนวณได้จากสมการที่ 18 20 และ 22 จากนั้นคัดเลือก $sbest$ จากเวกเตอร์คำตอบข้างเคียง ($j \in B(i)$) ด้วยวิธีเทปปีเซฟฟ์ จากสมการที่ 2 และสุ่มเลือกเวกเตอร์ $r1, r2$ และ $r3$ จากเวกเตอร์ข้างเคียงของเวกเตอร์ที่ i (โดย $r1 \neq r2 \neq r3$) เพื่อทำการพัฒนาเวกเตอร์เป้าหมายด้วยกลยุทธ์ที่ s โดย $s = 1, 2, \dots, S$ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 9 ถึง 11 และทำครอสโอเวอร์ระหว่างเวกเตอร์เป้าหมาย (x^i) และเวกเตอร์กลายพันธุ์ (v^i) ด้วยวิธียูนิฟอร์มครอสโอเวอร์ โดยมีโอกาสเกิดการแลกเปลี่ยนค่าในแต่ละตำแหน่งที่ c บนเวกเตอร์ i เท่ากับค่าอัตราการครอสโอเวอร์ (CR_i^s) และทำการสุ่มค่าในช่วง 1 ถึง n นำเวกเตอร์กลายพันธุ์ในตำแหน่งที่สุ่มค่าไปแทนที่เวกเตอร์เป้าหมาย เวกเตอร์ที่ได้จากการครอสโอเวอร์เรียกว่า เวกเตอร์ทดลอง (Trial vector: u^i) แสดงดังสมการที่ 24

$$u_c^i = \begin{cases} v_c^i, & \text{if } rand_{i,c} \leq CR_i^s \text{ or } c = rand_{i,i} \\ x_c^i, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (18)$$

เมื่อได้เวกเตอร์ทดลองแล้ว (u_c^i คือจุดพิกัดของเวกเตอร์ทดลองตำแหน่งที่ c บนเวกเตอร์ i) จะปรับปรุงเวกเตอร์ด้วยวิธีการกลายพันธุ์แบบพหุนาม (Polynomial Mutation) เพื่อลดโอกาสการเกิดคำตอบที่เหมือนกัน คำนวณได้จากสมการที่ 25 และ 26 (กำหนดให้ $y = u^i$ โดยที่ $y = (y_1, \dots, y_n)$)

$$y_c' = \begin{cases} y_c + \sigma_c(y_c^{Up} - y_c^{Lw}) & \text{with probability } p_m \\ y_c & \text{with probability } 1 - p_m \end{cases} \quad (19)$$

$$\sigma_c = \begin{cases} (2 \times rand_\sigma)^{\frac{1}{\eta+1}} - 1 & \text{if } rand_\sigma < 0.5 \\ 1 - [2(1 - rand_\sigma)]^{\frac{1}{\eta+1}} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (20)$$

เมื่อ y_c^{Up} คือค่าขอบเขตบน (Upper bounds) ของเวกเตอร์เป้าหมายตำแหน่งที่ c บนเวกเตอร์รุ่นใหม่, y_c^{Lw} คือค่าขอบเขตล่าง (Lower bounds) ของเวกเตอร์เป้าหมายตำแหน่งที่ c บนเวกเตอร์รุ่นใหม่

ทำการคัดเลือกเวกเตอร์ $j \in B(i)$ ด้วยวิธีเทปปีเซฟฟ์ คำนวณได้จากสมการที่ 2 จากนั้นคำนวณค่าสัดส่วนความ

ไม่สำเร็จในการสร้างคำตอบรุ่นใหม่ ($\tau_{i,g}$) ของปัญหาย่อยที่ i เจเนอเรชันที่ g สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 16 และ 17 โดยที่ $s = 1, 2, \dots, S$ จบการพัฒนาคำตอบของปัญหาย่อยที่ i กำหนดให้ $i = i + 1$

เมื่อพัฒนาคำตอบของปัญหาย่อยครบทุกปัญหา จะจบการพัฒนาคำตอบของเจเนอเรชันที่ t ให้คำนวณค่าความน่าจะเป็นของกลยุทธ์ในเจเนอเรชันที่ $g + 1$ ($p_{s,g+1}$) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 12 ถึง 15 โดยที่ $s = 1, 2, \dots, S$

การหยุดอัลกอริทึม จะหยุดการปรับปรุงคำตอบตามจำนวนเจเนอเรชันสูงสุด (G) ที่กำหนด หากต้องการปรับปรุงคำตอบให้กำหนด $g = g + 1$ แล้วนำเวกเตอร์คำตอบที่ได้ในเจเนอเรชันก่อนหน้า ไปทำการปรับปรุงต่อในลูปลหลัก กำหนด $i = 1$

6. การทดลอง

6.1 ปัญหามาตรฐานหลายวัตถุประสงค์ค่าต่อเนื่อง

ในบทความนี้ ทำการเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึม MOEA/D, MODE/D และ AMOE/D-DE โดยการทดลองแก้ปัญหา 2 วัตถุประสงค์ ZDT จำนวน 3 ปัญหา [23], ปัญหา 3 วัตถุประสงค์ DTLZ จำนวน 2 ปัญหา และปัญหา 10 วัตถุประสงค์ DTLZ จำนวน 1 ปัญหา [24]

สำหรับทุกปัญหาเป็นกรณีการหาค่าน้อยที่สุด

1) ZDT1

$$\begin{aligned} f_1(x) &= x_1 \\ f_2(x) &= g(x) \left[1 - \sqrt{\frac{f_1(x)}{g(x)}} \right] \\ g(x) &= 1 + 9 \sum_{i=2}^n x_i / n - 1 \end{aligned}$$

โดยที่ $n = 30$ และ $x_i \in [0,1]$ Pareto-optimal front (PF) จาก $g(x) = 1$

2) ZDT2

$$\begin{aligned} f_1(x) &= x_1 \\ f_2(x) &= g(x) \left[1 - \left(\frac{f_1(x)}{g(x)} \right)^2 \right] \end{aligned}$$

โดยที่ $g(x)$ และขนาดเวกเตอร์ x เท่ากับของ ZDT1

3) ZDT3

$$f_2(x) = g(x) \left[1 - \sqrt{\frac{f_1(x)}{g(x)}} - \frac{f_1(x)}{g(x)} \sin(10\pi x_1) \right]$$

โดยที่ $g(x)$ และขนาดเวกเตอร์ x เท่ากับของ ZDT1 ปัญหานี้ มี PF แบ่งเป็นช่วง

4) DTLZ1

$$\begin{aligned} f_1(x) &= \frac{1}{2} x_1 x_2 \dots x_{M-1} (1 + g(x_M)) \\ f_2(x) &= \frac{1}{2} x_1 x_2 \dots (1 - x_{M-1}) (1 + g(x_M)) \\ &\vdots \\ f_{M-1}(x) &= \frac{1}{2} x_1 (1 - x_2) (1 + g(x_M)) \\ f_M(x) &= \frac{1}{2} (1 - x_1) (1 + g(x_M)) \\ g(x_M) &= 100[|x_M| + \sum_{x_i \in x_M} (x_i - 0.5)^2 - \cos(20\pi(x_i - 0.5))] \end{aligned}$$

โดยที่ $n = 10$, $x_i \in [0,1]$, M จำนวนวัตถุประสงค์, พิกัด $k = (n - M + 1)$ ตัวสุดท้ายของเวกเตอร์ x แสดงในรูปเวกเตอร์ x_M ($|x_M| = k, M = 3$) และคำตอบที่ดีที่สุด (Pareto-optimal solution: PS) คือ ทุก ๆ $x_i = 0.5$ สำหรับ $x_i \in x_M$

5) DTLZ2

$$\begin{aligned} f_1(x) &= (1 + g(x_M)) \cos \theta_1 \dots \cos \theta_{M-2} \cos \theta_{M-1} \\ f_2(x) &= (1 + g(x_M)) \cos \theta_1 \dots \cos \theta_{M-2} \sin \theta_{M-1} \\ f_3(x) &= (1 + g(x_M)) \cos \theta_1 \dots \sin \theta_{M-2} \\ &\vdots \\ f_M(x) &= (1 + g(x_M)) \sin \theta_1 \end{aligned}$$

โดยที่ $x_i \in [0,1]$, $g(x_M) = \sum_{x_i \in x_M} (x_i - 0.5)^2$ และ $\theta_i = \frac{x_i \pi}{2}$ ในบทความนี้กำหนด $n = 10$ และ $n = 20$ สำหรับปัญหา $M = 3$ และ $M = 10$ ตามลำดับ และ PS คือ $x_i = 0.5$ สำหรับ $x_i \in x_M$

6.2 การตั้งค่าพารามิเตอร์ควบคุม

การทดลองนี้ ใช้การดำเนินงานของ MOEA/D และ MODE/D ตามแบบของ Zhang and Li [3], Li and Zhang [4] โดย MOEA/D จะใช้ Simulated binary crossover (SBX) และการกลายพันธุ์แบบพหุนาม (Polynomial mutation: PM) ในการพัฒนาคำตอบ ส่วน MODE/D จะใช้ DE Operator และ PM

ประชากรเริ่มต้นของทั้ง 3 อัลกอริทึม จะถูกสุ่มเลือกอิสระตามขอบเขตที่เป็นไปได้ของคำตอบในแต่ละปัญหา

และพารามิเตอร์ควบคุมต่าง ๆ อ้างอิงจาก Zhang and Li [3], Venske, et al. [10] แสดงในตารางที่ 1

6.3 ผลการทดลอง

อัลกอริทึม MOEA/D, MODE/D และ AMOE/D-DE จะถูกนำมาการแก้ปัญหาด้วยการทำซ้ำอิสระอัลกอริทึมละ 30 ครั้ง บนเครื่องคอมพิวเตอร์ Intel(R) Core(TM) i7-4790 CPU @ 3.60GHz RAM 16 GB Windows 10 64 bit operation system และเนื่องจากลักษณะของ MOPs ควรใช้ตัวชี้วัดสมรรถนะหลายรูปแบบเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมต่าง ๆ [25-27] ในบทความนี้ใช้ตัวชี้วัดสมรรถนะ 3 ด้าน ดังนี้

1) การลู่เข้าของคำตอบ

การลู่เข้าของคำตอบ (Convergence metrics) เป็นการวัดระยะห่างที่น้อยที่สุดระหว่างกลุ่มคำตอบที่ได้จากอัลกอริทึม (Obtained Pareto Optimal Solution) กับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (True-Pareto Optimal Solution) โดยกำหนดให้ P เป็นกลุ่มคำตอบที่กระจายตัวสม่ำเสมอบนเส้น PF และ S เป็นกลุ่มคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ แสดงค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่าง S ไปยัง P ดังนี้

$$GD(S, P) = \frac{\sum_{x \in S} d(x, P)}{|S|} \quad (21)$$

เมื่อ $d(x, P)$ คือ Euclidean distance ที่น้อยที่สุดระหว่างคำตอบ x กับจุดคำตอบของ P , $|P|$ คือจำนวนคำตอบภายในเซตใด ๆ

2) การลู่เข้าและความหลากหลายของคำตอบ

การลู่เข้าและความหลากหลายของคำตอบ (Convergence and diversity metrics) เป็นการเปรียบเทียบระยะห่างที่น้อยที่สุดของคำตอบที่แท้จริงที่แต่ละค่ากับกลุ่มคำตอบที่ได้จากอัลกอริทึม แสดงค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่าง P ไปยัง S ดังนี้

$$IGD(P, S) = \frac{\sum_{y \in P} d(y, S)}{|P|} \quad (22)$$

เมื่อ $d(y, S)$ คือ Euclidean distance ที่น้อยที่สุดระหว่างคำตอบ y กับจุดคำตอบของ S

3) ความหลากหลายของคำตอบ

ความหลากหลายของคำตอบ (Diversity Metrics) แบ่งการวัดสมรรถนะเป็นสองด้าน ได้แก่ 1) การกระจายตัวที่สม่ำเสมอของคำตอบที่หาได้ (Distribution Measures) ซึ่งเป็นการวัดผลต่างระยะห่างที่น้อยที่สุดระหว่างคำตอบ โดยยังมีค่าผลต่างที่น้อยแสดงถึงคำตอบมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอมาก และ 2) ความกว้างของการแพร่กระจายของคำตอบที่หาได้ (Spread Indicates) เป็นการวัดระยะห่างที่น้อยที่สุดระหว่างคำตอบปลายสุดของคำตอบที่แท้จริงกับคำตอบที่หาได้ เพื่อประเมินว่ากลุ่มคำตอบที่หาได้มีคำตอบที่ครอบคลุมดีหรือไม่ โดยยังมีค่าระยะห่างที่น้อยแสดงถึงคำตอบมีการแพร่กระจายที่ดี แสดงสูตรคำนวณดังนี้

$$\Delta^*(S, P) = \frac{\sum_{c=1}^C d(E_c) + \sum_{j=1}^{|S_j|} |d(x_i) - \bar{d}|}{\sum_{c=1}^C d(E_c) + |S_j| \bar{d}} \quad (23)$$

เมื่อ $d(x_i)$ คือ Euclidean distance ที่น้อยที่สุดระหว่างคำตอบที่ i กับคำตอบ y ใด ๆ ของ S โดยที่ $y \neq i$, $\bar{d}$ คือค่าเฉลี่ยของ $d(x_i)$, $d(E_c)$ คือระยะห่างระหว่างคำตอบปลายสุดของคำตอบที่แท้จริง (Extreme solution in the set of true Pareto-front) กับคำตอบขอบเขตของคำตอบที่หาได้ (Boundary solution in the set of obtained solution), C คือจำนวนคำตอบปลายสุดของคำตอบที่แท้จริง

การคำนวณค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึม จะนำคำตอบที่ดีที่สุดที่แต่ละอัลกอริทึมหาได้ (พرونเทียร์ที่ 1 ของคำตอบที่หาได้) มาเปรียบเทียบกับเซต P ซึ่งเกิดการสร้างความคำตอบที่กระจายตัวสม่ำเสมอบนเส้น PF ของแต่ละปัญหา โดยจะสร้าง 500 จุดคำตอบ สำหรับปัญหา 2 วัตถุประสงค์, 990 คำตอบ สำหรับปัญหา 3 วัตถุประสงค์ และ 2002 คำตอบ สำหรับปัญหา 10 วัตถุประสงค์

เมื่อได้ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะในแต่ละด้านของแต่ละอัลกอริทึมแล้ว ให้นำตัวชี้วัดในด้านเดียวกันมาเปรียบเทียบทางสถิติ โดยในบทความนี้มีทั้งหมด 3 อัลกอริทึม จึงใช้วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และวิธีฟีชเชอร์แพร์ไวส์ (Fisher pairwise comparisons test) ในการทดสอบความแตกต่างของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึม

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ควบคุมที่ใช้ในการทดลอง

Parameter	Value	Description
DE parameter		
N	100	Population size (for instances with 2 objectives)
	300	Population size (for instances with 3 objectives)
	715	Population size (for instances with 10 objectives)
CR	1.0	Initial crossover rate
μ_F	0.5	Initial mean of scaling factor
p_m	1/n	Polynomial mutation probability
η	20	Distribution index of polynomial mutation
G	250	Maximum number of generation
MOEA/D parameter		
Nb	20	Number of weight vectors in the neighborhood
NR	5	Maximal number of solutions replaced by each offspring
Adaptive parameter		
α	0.3	Adaptation rate
β	0.3	Scaling factor for weighting the successfully creating offspring at the subproblem i and the successfully creating offspring in the neighborhood of subproblem i
LR	0.8	Learning rate
p_{min}	0.05	Minimum probability value of each strategy

ในตารางที่ 2 เป็นตารางแสดงค่าเฉลี่ยเวลาดำเนินงานของแต่ละอัลกอริทึมที่ใช้ในแต่ละปัญหา โดยจะเห็นว่า MODE/D มีเวลาดำเนินงานที่น้อยที่สุดในทุกปัญหา ส่วน AMOE/D-DE ใช้เวลาในการดำเนินงานมากที่สุด

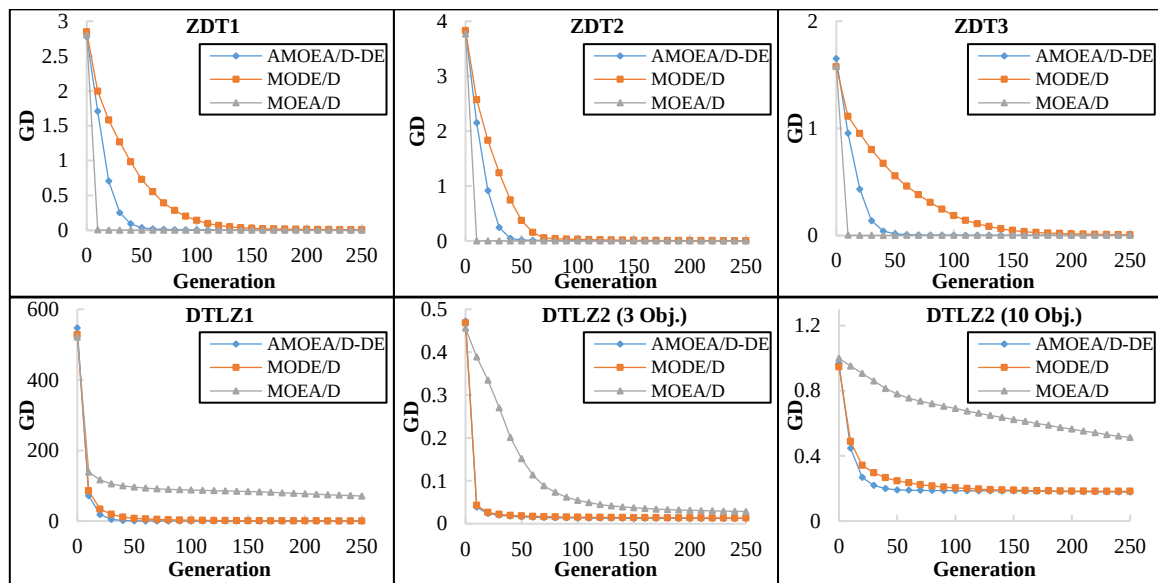
เวลาในการดำเนินงานของแต่ละอัลกอริทึมแปรผันโดยตรงกับจำนวนคำตอบที่ถูกพัฒนา (The number of function evaluations) หรือจำนวนรุ่นของคำตอบที่ถูก

พัฒนา (The maximum number of generation) ดังนั้น อัลกอริทึมที่มีการลู่เข้าของคำตอบได้รวดเร็วและมากกว่า จึงช่วยลดต้นทุนของระยะเวลาการค้นหาคำตอบได้ รูปที่ 1 แสดงวิวัฒนาการของค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าของคำตอบ (Average GD) ซึ่งพบว่า MOEA/D มีการลู่เข้าของคำตอบที่รวดเร็วที่สุดสำหรับปัญหา 2 วัดดูประสงค์ ส่วนปัญหา 3 และ 10 วัดดูประสงค์ พบว่า AMOE/D-DE มีการลู่เข้าของคำตอบแต่ที่รวดเร็วที่สุด แต่ยังคงใกล้เคียงกับ MODE/D

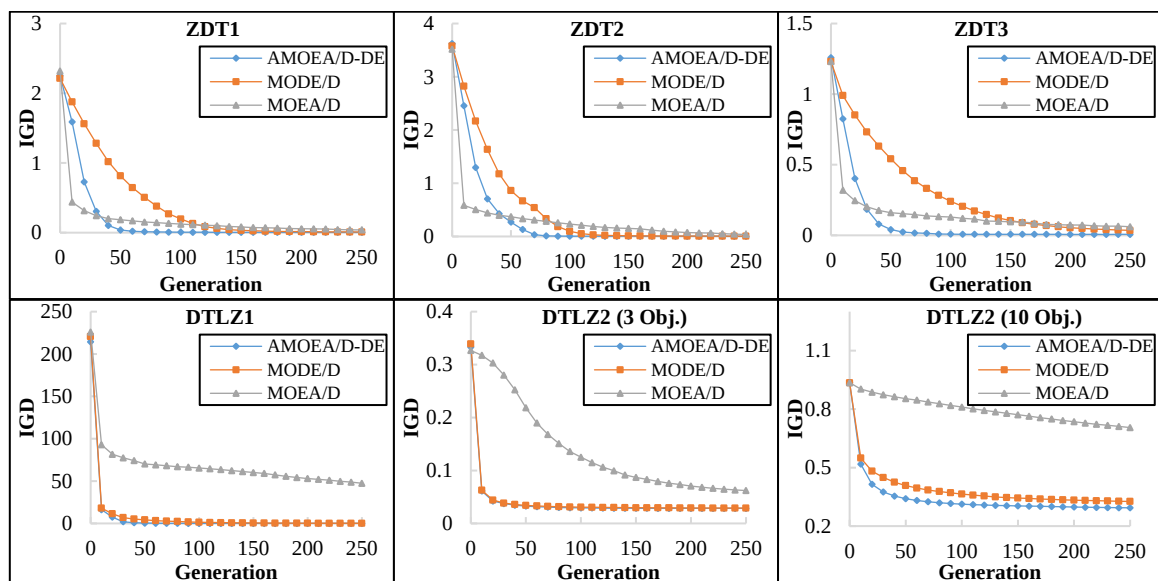
โดยผลลัพธ์สุดท้ายของตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าของคำตอบ (GD) จากการแก้ปัญหา Continuous MOPs แสดงในรูปแบบของค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ดังตารางที่ 3 ซึ่งจะเห็นได้ว่า AMOE/D-DE มีค่าเฉลี่ย GD ดีที่สุดในทุกปัญหา ยกเว้นปัญหา ZDT3 ที่ MOEA/D มีผลลัพธ์สุดท้ายของการลู่เข้าที่ดีกว่า

นอกจากอัลกอริทึมที่ดีจะให้คำตอบที่มีค่าการลู่เข้าดีแล้ว ยังควรมีความหลากหลายและการกระจายตัวของคำตอบที่สม่ำเสมออีกด้วย รูปที่ 2 แสดงวิวัฒนาการของค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าและความหลากหลายของคำตอบ (Average IGD) ซึ่งพบว่า MOEA/D มีการลู่เข้าและความหลากหลายของคำตอบที่ดีและรวดเร็วที่สุดในช่วงต้น สำหรับปัญหา 2 วัดดูประสงค์ ส่วนปัญหา 3 และ 10 วัดดูประสงค์ พบว่า AMOE/D-DE มีการลู่เข้าและความหลากหลายของคำตอบแต่ที่ดีและรวดเร็วที่สุด แต่ยังคงใกล้เคียงกับ MODE/D เช่นเดียวกับตัวชี้วัด GD และจากผลลัพธ์สุดท้ายของ IGD ในตารางที่ 4 จะเห็นได้ว่า AMOE/D-DE มีค่าเฉลี่ย IGD ดีที่สุดในทุกปัญหา

ในตารางที่ 5 เป็นตารางแสดงค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดด้านความหลากหลายของคำตอบ (Average distribution and spread) โดยจะพบว่า AMOE/D-DE มีการแผ่กระจายของคำตอบที่กว้างและมีการกระจายตัวของคำตอบที่สม่ำเสมอมากที่สุด



รูปที่ 1 วิวัฒนาการของตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการรู้เข้าของคำตอบ



รูปที่ 2 วิวัฒนาการของตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการรู้เข้าและความหลากหลายของคำตอบ

รูปที่ 3 ถึง 8 แสดงการกระจายของคำตอบสุดท้ายที่ดีที่สุด ซึ่งได้จากการดำเนินงานของแต่ละอัลกอริทึมในแต่ละปัญหาจำนวน 30 รอบทำซ้ำ (The distribution of the final solutions obtained in the run with the lowest GD value of each algorithm for each test instance) โดยปัญหา ZDT1 ถึง 3, DTLZ1 และ DTLZ2 (3 Obj.) จะ

ถูกแสดงในรูปแบบของกราฟ Scatter plot ส่วน DTLZ2 (10 Obj.) จะถูกแสดงการกระจายด้วยกราฟ 3D-RadVis [28]

จากรูปที่ 3 ถึง 8 จะเห็นได้ว่า การกระจายตัวของคำตอบสุดท้ายของ AMOE/D-DE มีรูปแบบที่ชัดเจน ซึ่งดีกว่า MOEA/D และ MODE/D ในเกือบทุกปัญหา ยกเว้นปัญหา ZDT3 ที่ MOEA/D มีความหลากหลายมากกว่า

ปีที่ 13 ฉบับที่ 2 เดือนพฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2561

ส่วน MODE/D มีการลู่เข้าของคำตอบสุดท้ายที่ได้น้อยกว่า อัลกอริทึมอื่น ๆ โดยจะเห็นได้ว่าจุดคำตอบอยู่บนเส้น PF ในปัญหา ZDT ที่ 1 ถึง 3 แต่ MODE/D มีการกระจายตัวของคำตอบและการลู่เข้าที่ดีกว่า MOEA/D ในปัญหาที่มี 3 วัตถุประสงค์ขึ้นไป

ตารางที่ 2 เวลาการดำเนินงานเฉลี่ย (Avg. CPU time (s))

		AMOEAD-DE	MODE/D	MOEA/D
Instance	ZDT1	16.66 (0.42)	9.77 (0.30)	10.20 (0.32)
	ZDT2	17.97 (0.37)	10.97 (0.38)	11.87 (0.43)
	ZDT3	19.57 (0.61)	12.46 (0.40)	13.31 (0.43)
	DTLZ1	86.50 (13.49)	49.79 (6.44)	52.42 (6.70)
	DTLZ2 (3 Obj.)	66.81 (0.71)	39.16 (1.21)	41.06 (0.76)
	DTLZ2 (10 Obj.)	250.37 (13.54)	160.50 (16.84)	160.61 (18.75)

*อักษรตัวหนา คือ กลุ่มของผลลัพธ์ที่ดีที่สุดตามหลักสถิติ (แตกต่างจากผลลัพธ์อื่น ๆ ที่ $p - value < 0.05$)

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าของคำตอบ (Average GD)

		AMOEAD-DE	MODE/D	MOEA/D
Instance	ZDT1	7.11×10^{-4} (2.84×10^{-5})	7.36×10^{-3} (1.46×10^{-3})	9.23×10^{-4} (3.96×10^{-4})
	ZDT2	7.67×10^{-4} (4.01×10^{-5})	3.93×10^{-3} (7.38×10^{-4})	8.40×10^{-4} (2.03×10^{-4})
	ZDT3	5.05×10^{-3} (1.08×10^{-4})	9.71×10^{-3} (4.66×10^{-3})	4.15×10^{-3} (4.78×10^{-4})
	DTLZ1	1.11×10^{-2} (2.61×10^{-4})	1.70×10^{-1} (5.54×10^{-1})	7.09×10^1 (2.87×10^1)
	DTLZ2 (3 Obj.)	1.23×10^{-2} (1.90×10^{-4})	1.33×10^{-2} (3.65×10^{-4})	2.85×10^{-2} (3.28×10^{-3})
	DTLZ2 (10 Obj.)	1.78×10^{-1} (1.45×10^{-3})	1.82×10^{-1} (4.20×10^{-3})	5.13×10^{-1} (7.87×10^{-2})

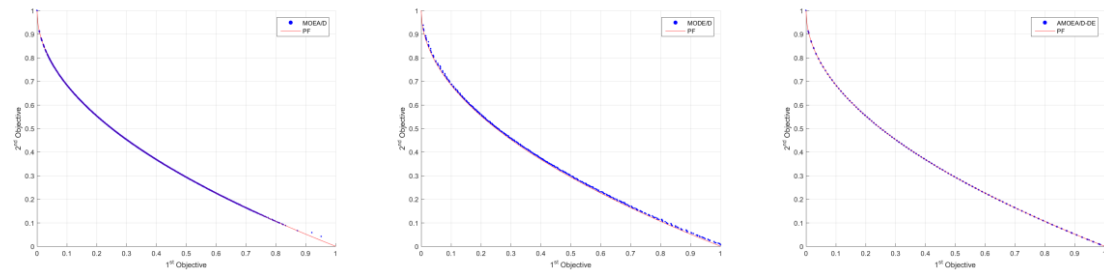
ตารางที่ 4 ค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าและความหลากหลายของคำตอบ (Average IGD)

		AMOEAD-DE	MODE/D	MOEA/D
Instance	ZDT1	3.87×10^{-3} (8.12×10^{-6})	9.09×10^{-3} (1.54×10^{-3})	3.90×10^{-2} (1.48×10^{-2})
	ZDT2	3.81×10^{-3} (1.57×10^{-5})	5.68×10^{-3} (5.60×10^{-4})	3.77×10^{-2} (5.67×10^{-2})
	ZDT3	1.07×10^{-2} (7.85×10^{-5})	4.50×10^{-2} (6.34×10^{-2})	7.52×10^{-2} (4.19×10^{-2})
	DTLZ1	2.68×10^{-2} (2.34×10^{-4})	1.47×10^{-1} (4.27×10^{-1})	4.74×10^1 (2.33×10^1)
	DTLZ2 (3 Obj.)	2.85×10^{-2} (3.18×10^{-4})	2.90×10^{-2} (2.98×10^{-4})	6.21×10^{-2} (1.24×10^{-2})
	DTLZ2 (10 Obj.)	2.94×10^{-1} (1.65×10^{-3})	3.26×10^{-1} (2.96×10^{-3})	7.05×10^{-1} (4.38×10^{-2})

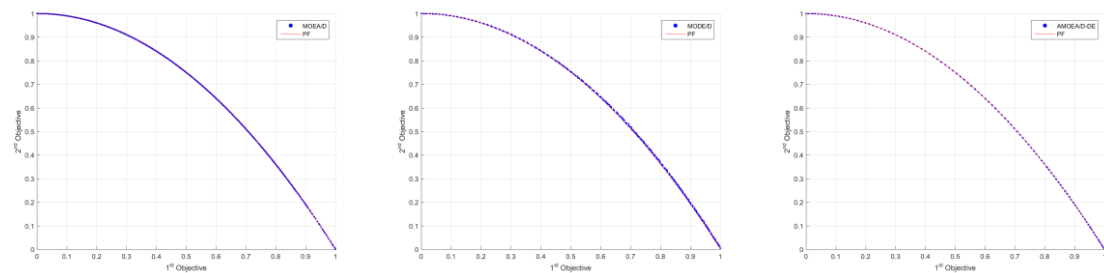
ตารางที่ 5 ค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดสมรรถนะด้านความหลากหลายของคำตอบ (Average distribution and spread)

		AMOEAD-DE	MODE/D	MOEA/D
Instance	ZDT1	0.2884 (0.0051)	0.3412 (0.0350)	0.4980 (0.1014)
	ZDT2	0.1494 (0.0068)	0.1758 (0.0317)	0.4285 (0.2496)
	ZDT3	0.6136 (0.0122)	0.7239 (0.0611)	0.7437 (0.0779)
	DTLZ1	0.3672 (0.0091)	0.3841 (0.0664)	0.7529 (0.1738)
	DTLZ2 (3 Obj.)	0.4069 (0.0099)	0.4161 (0.0131)	0.5843 (0.0740)
	DTLZ2 (10 Obj.)	0.4980 (0.0108)	0.6117 (0.0177)	0.8305 (0.0408)

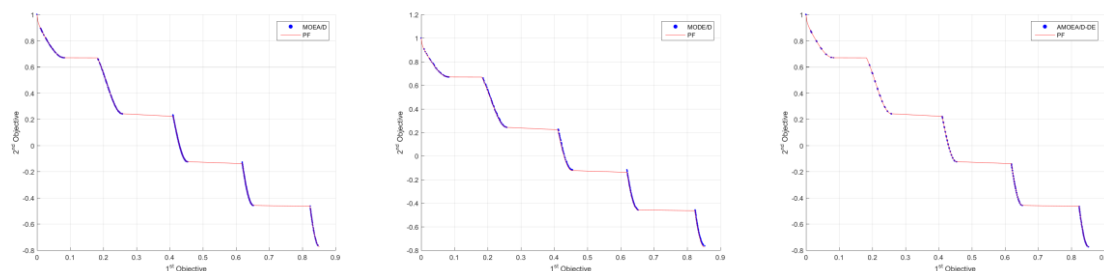
จากผลลัพธ์ที่กล่าวมา สามารถสรุปได้ว่า AMOEAD-DE ให้คำตอบที่ดีกว่าอัลกอริทึมอื่น ๆ และมีการลู่เข้าของคำตอบที่รวดเร็วกว่า ทำให้สามารถลดจำนวนรอบในการพัฒนาคำตอบลงได้ แต่ยังคงให้ประสิทธิภาพของคำตอบในด้านต่าง ๆ ดีกว่า MOEA/D และ MODE/D



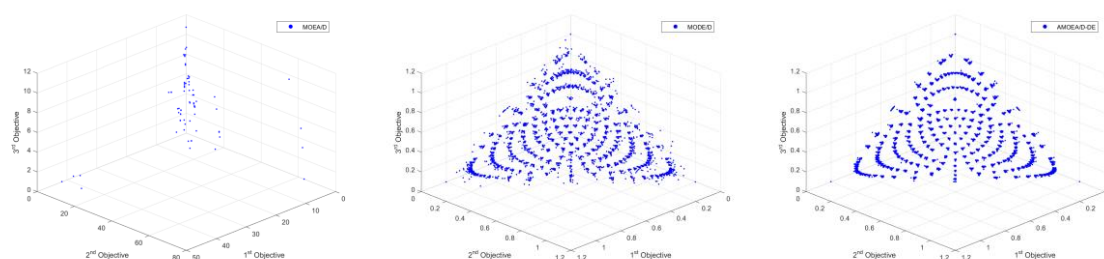
รูปที่ 3 กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (พารอนเทียร์ที่ 1) จากการทำซ้ำทั้งหมด 30 ครั้ง ของแต่ละอัลกอริทึม ในปัญหา ZDT1



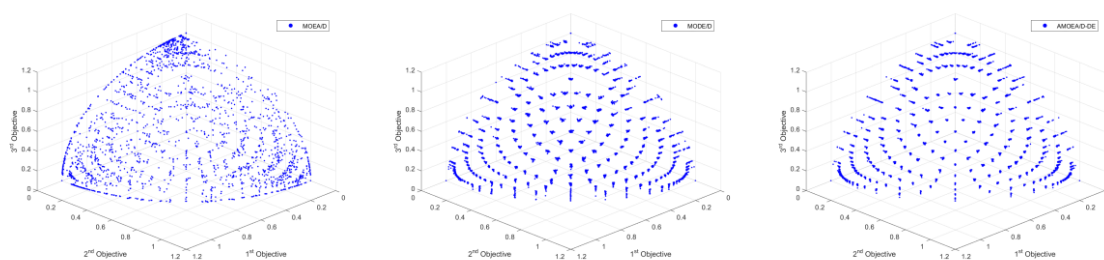
รูปที่ 4 กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (พารอนเทียร์ที่ 1) จากการทำซ้ำทั้งหมด 30 ครั้ง ของแต่ละอัลกอริทึม ในปัญหา ZDT2



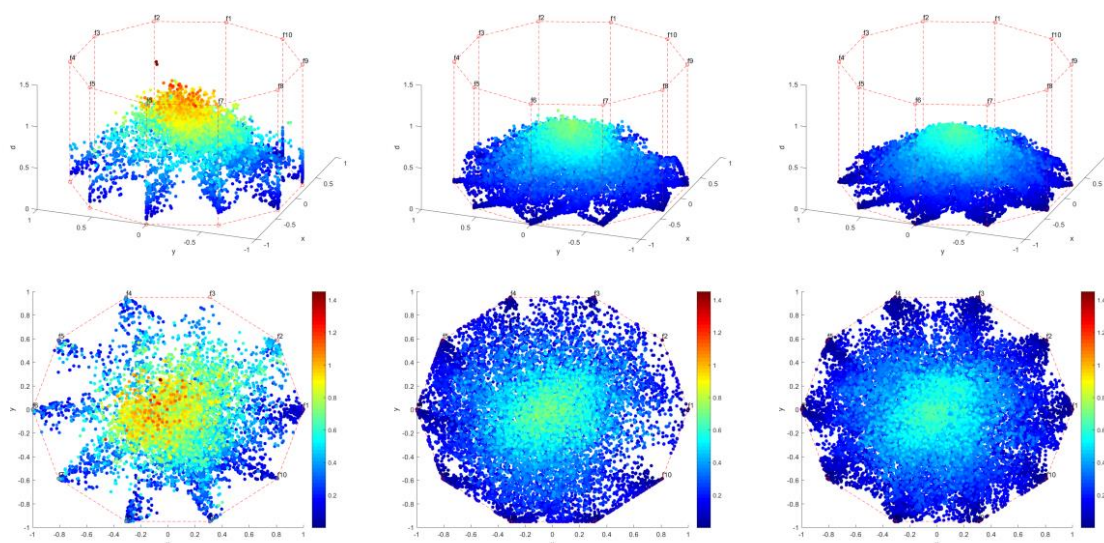
รูปที่ 5 กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (พารอนเทียร์ที่ 1) จากการทำซ้ำทั้งหมด 30 ครั้ง ของแต่ละอัลกอริทึม ในปัญหา ZDT3



รูปที่ 6 กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (พารอนเทียร์ที่ 1) จากการทำซ้ำทั้งหมด 30 ครั้ง ของแต่ละอัลกอริทึม ในปัญหา DTL2



รูปที่ 7 กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (พารอนเทียร์ที่ 1) จากการทำซ้ำทั้งหมด 30 ครั้ง DTL2 3 วัตถุประสงค์



รูปที่ 8 กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (ฟรอนเทียร์ที่ 1) จากการทำซ้ำทั้งหมด 30 ครั้ง ของแต่ละอัลกอริทึม ในปัญหา DTLZ2 10
วัตถุประสงค์ เรียงจากลำดับจากซ้ายไปขวาดังนี้ MOEA/D, MODE/D และ AMOEAD-DE

7. สรุปผล

การแบ่งปัญหาออกเป็นปัญหาย่อยถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการเขียนโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ สำหรับแก้ปัญหา MaOPs ในทางกลับกัน MOEAs ใช้การคัดเลือกคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำในการวัดคุณภาพของคำตอบระหว่างการค้นหาเท่านั้น จึงทำให้อัลกอริทึมเหล่านี้ให้ผลลัพธ์การค้นหาคำตอบที่ไม่ดีเท่าที่ควร เพราะเกิดการกระจุกตัวของคำตอบจำนวนมาก ทำให้ MOEA/D เป็นที่นิยมและถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย

ผู้วิจัย ได้นำเสนอ AMOEAD-DE ซึ่งมีพื้นฐานมาจาก MOEA/D โดย AMOEAD-DE จะแบ่ง MaOPs ออกเป็นปัญหาย่อย จากนั้นจะทำการพัฒนาคำตอบของแต่ละปัญหาย่อยไปพร้อม ๆ กันด้วยกระบวนการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (DE Operator) โดยที่แต่ละปัญหาย่อยจะถูกกำหนดปัญหาย่อยข้างเคียงด้วยระยะห่างของจุดพิกัดค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละปัญหาย่อย เพื่อเปรียบเทียบคำตอบที่พัฒนากับปัญหาย่อยในจุดพิกัดที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากปัญหาย่อยที่มีจุดพิกัดของค่าถ่วงน้ำหนักที่ใกล้เคียงกันควรมีคำตอบที่ใกล้เคียงกัน

ซึ่งจากการทดลองด้วยค่าพารามิเตอร์เทียบเคียงจากงานวิจัยอื่น ๆ พบว่า AMOEAD-DE ให้สมรรถนะที่ดีกว่าอัลกอริทึมอื่น ๆ แต่ต้องใช้เวลาในการดำเนินงานที่มากกว่าเมื่อเทียบจำนวนในการพัฒนาคำตอบที่เท่ากัน

อัลกอริทึม AMOEAD-DE ในงานวิจัยนี้ สามารถปรับตนเองและวิธีการค้นหาคำตอบให้เหมาะสมกับสถานการณ์ ขณะใด ๆ ของการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุด ทำให้สามารถค้นหาคำตอบได้หลากหลายและดีขึ้น แต่ยังมีข้อจำกัดในด้านการปรับตัวให้อัลกอริทึมเข้ากับปัญหา เนื่องจากอัลกอริทึมนี้ มีการกำหนดค่าเวกเตอร์ถ่วงน้ำหนักที่ชัดเจนและคงที่ตลอดการดำเนินงานอัลกอริทึม ซึ่งอาจทำให้อัลกอริทึมไม่สามารถค้นหาคำตอบของปัญหาที่มีรูปแบบความเป็นไปได้ของคำตอบกระจุกตัวเป็นกลุ่ม

ในงานวิจัยนี้ เป็นการพัฒนาอัลกอริทึมเพื่อนำมาทดลองแก้ไขปัญหามาตรฐาน ซึ่งเป็นปัญหาที่ไม่พบมากในชีวิตประจำวันหรืออุตสาหกรรมจริงในปัจจุบัน ดังนั้น การนำอัลกอริทึมไปประยุกต์ใช้แก้ไขปัญหาล้วนและปัญหาในอุตสาหกรรม อาจช่วยลดเวลาในการค้นหาคำตอบของปัญหาที่มีความซับซ้อนให้ลงและยังคงได้คำตอบที่มีประสิทธิภาพสูงได้

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Z. He and G. G. Yen, "Many-Objective Evolutionary Algorithm: Objective Space Reduction and Diversity Improvement," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 20, no. 1, pp. 145-160, 2016.
- [2] D. Brockhoff and E. Zitzler, "Objective reduction in evolutionary multi-objective optimization: Theory and applications," *Evolutionary Computation*, vol. 17, no. 2, pp. 135-166, 2009.
- [3] Q. Zhang and H. Li, "MOEA/D: A multiobjective evolutionary algorithm based on decomposition," *IEEE Transactions on evolutionary computation*, vol. 11, no. 6, pp. 712-731, 2007.
- [4] H. Li and Q. Zhang, "A multiobjective differential evolution based on decomposition for multiobjective optimization with variable linkages," in *Parallel problem solving from nature-PPSN IX*: Springer, 2006, pp. 583-592.
- [5] K. Miettinen, "Nonlinear Multiobjective Optimization, volume 12 of International Series in Operations Research and Management Science," ed: Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1999.
- [6] M. Ehrgott, "A discussion of scalarization techniques for multiple objective integer programming," *Annals of Operations Research*, vol. 147, no. 1, pp. 343-360, 2006.
- [7] H. Li and Q. Zhang, "Multiobjective optimization problems with complicated Pareto sets, MOEA/D and NSGA-II," *IEEE Transactions on evolutionary computation*, vol. 13, no. 2, pp. 284-302, 2009.
- [8] Q. Zhang, W. Liu, E. Tsang, and B. Virginas, "Expensive multiobjective optimization by MOEA/D with Gaussian process model," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 14, no. 3, pp. 456-474, 2010.
- [9] R. Storn and K. Price, "Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces," *Journal of global optimization*, vol. 11, no. 4, pp. 341-359, 1997.
- [10] S. M. Venske, R. A. Gonçalves, and M. R. Delgado, "ADEMO/D: Multiobjective optimization by an adaptive differential evolution algorithm," *Neurocomputing*, vol. 127, pp. 65-77, 2014.
- [11] K. Price, R. M. Storn, and J. A. Lampinen, *Differential evolution: a practical approach to global optimization*. Springer Science & Business Media, 2006.
- [12] A. K. Qin and P. N. Suganthan, "Self-adaptive differential evolution algorithm for numerical optimization," in *Evolutionary Computation, 2005. The 2005 IEEE Congress on*, 2005, vol. 2, pp. 1785-1791: IEEE.
- [13] J. Brest, S. Greiner, B. Boskovic, M. Mernik, and V. Zumer, "Self-adapting control parameters in differential evolution: A comparative study on numerical benchmark problems," *IEEE transactions on evolutionary computation*, vol. 10, no. 6, pp. 646-657, 2006.
- [14] J. Teo, "Exploring dynamic self-adaptive populations in differential evolution," *Soft Computing*, vol. 10, no. 8, pp. 673-686, 2006.
- [15] V. L. Huang, A. K. Qin, and P. N. Suganthan, "Self-adaptive differential evolution algorithm

- for constrained real-parameter optimization," in *Evolutionary Computation*, 2006. CEC 2006. *IEEE Congress on*, 2006, pp. 17-24: IEEE.
- [16] X. Yao, Y. Liu, and G. Lin, "Evolutionary programming made faster," *IEEE Transactions on Evolutionary computation*, vol. 3, no. 2, pp. 82-102, 1999.
- [17] C.-Y. Lee and X. Yao, "Evolutionary programming using mutations based on the Lévy probability distribution," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 8, no. 1, pp. 1-13, 2004.
- [18] J. Liu and J. Lampinen, "A fuzzy adaptive differential evolution algorithm," *Soft Computing*, vol. 9, no. 6, pp. 448-462, 2005.
- [19] J. Zhang and A. C. Sanderson, "JADE: adaptive differential evolution with optional external archive," *IEEE Transactions on evolutionary computation*, vol. 13, no. 5, pp. 945-958, 2009.
- [20] S. M. S. Venske, R. A. Goncalves, and M. R. Delgado, "ADEMO/D: Adaptive Differential Evolution for Multiobjective Problems," presented at the 2012 Brazilian Symposium on Neural Networks, 2012.
- [21] J. Zhang and A. C. Sanderson, *Adaptive Differential Evolution: A Robust Approach to Multimodal Problem Optimization*. Scientific Publishing Services Pvt. Ltd., Chennai, India, 2009, p. 163.
- [22] Q. Lin, Q. Zhu, P. Huang, J. Chen, Z. Ming, and J. Yu, "A novel hybrid multi-objective immune algorithm with adaptive differential evolution," *Computers & Operations Research*, vol. 62, pp. 95-111, 2015.
- [23] E. Zitzler, K. Deb, and L. Thiele, "Comparison of multiobjective evolutionary algorithms: Empirical results," *Evolutionary computation*, vol. 8, no. 2, pp. 173-195, 2000.
- [24] K. Deb, L. Thiele, M. Laumanns, and E. Zitzler, "Scalable multi-objective optimization test problems," in *Evolutionary Computation, 2002. CEC'02. Proceedings of the 2002 Congress on*, 2002, vol. 1, pp. 825-830: IEEE.
- [25] K. Deb, *Multi-objective optimization using evolutionary algorithms*. John Wiley & Sons, 2001.
- [26] E. Zitzler, L. Thiele, M. Laumanns, C. M. Fonseca, and V. G. Da Fonseca, "Performance assessment of multiobjective optimizers: An analysis and review," *IEEE Transactions on evolutionary computation*, vol. 7, no. 2, pp. 117-132, 2003.
- [27] S. Jiang, Y. S. Ong, J. Zhang, and L. Feng, "Consistencies and contradictions of performance metrics in multiobjective optimization," *IEEE Trans Cybern*, vol. 44, no. 12, pp. 2391-404, Dec 2014.
- [28] A. Ibrahim, S. Rahnamayan, M. V. Martin, and K. Deb, "3D-RadVis: Visualization of Pareto front in many-objective optimization," in *Evolutionary Computation (CEC), 2016 IEEE Congress on*, 2016, pp. 736-745: IEEE.

Balancing Coffee Kit Assembly Line: a Case Study of a Sample Factory

Paiboon Yamphuan

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathum Thani, 12110
Email: paiboon.y@en.rmutt.ac.th

ABSTRACT

This research aims to increase productivity of the coffee kit assembly process of a case study. The procedure are as following: production recording, analyzing and improving, new jobs balancing and new working methods designing by using techniques of ECRS (Eliminate, Combine, Rearrange, Simplify), line balancing techniques and motion study. They were used in real production and performance was measured for process improvements. The results obtained from the recording and analysis of data were found that there were 13 stations of coffee kit making process, straight line, and each step took very different time. This has resulted in some waiting stations and loss of production. There were 24 workers in manual coffee assembly line which was unsuitable. A processing time (takt time) took 1.266 second. The assembly line performance is 74.97 percent. To reduce a cycle time in workstation, an assembly line was balanced in order to meet the required production rate. The results showed that one workstation and 2 workers could be eliminated. Labor savings were 8.3 percent and takt time was reduced to 1.20 second. Productivity was increased by 5.2 percent. Moreover, the assembly line performance was increased to 84.93 percent.

Keyword: Coffee kit, Assembly Line, Balancing, Increase productivity.

1. Introduction

Currently, coffee has been known to have effect to people. Finland and Norway are the top of the world's biggest coffee drinkers, 12 kg and 9.9 kg per capita per year respectively. Today, Thailand is one of the top coffee producers and has exported roasted coffee bean to Poland and United State, 82 percent of total coffee exports. A coffee export amount to the United States is higher than to Poland. Vietnam has become the second largest and one of the fastest growing

coffee exporters, which has become our major coffee export's competitor. Vietnam had become the world's second coffee producer after Brazil and Vietnam Robusta has been exported worldwide. However, the coffee business in Thailand is still growing because Thai people enjoy drinking coffee. If the price of coffee is not much expensive, they will be able to drink coffee everyday so that the coffee business in Thailand will continue to grow strongly in the years ahead. Thailand produces both Robusta coffee and

Arabica coffee. The South of Thailand had already become big players in the coffee industry growing Robusta, in Krabi, Surat thani, Chumphon, and Ranong provinces and Arabica coffee is grown mainly in the north, Chiang Mai and Chiang Rai provinces. Thailand produces more tons of Robusta than Arabica. That is why coffee Arabica price is higher than coffee Robusta and the Arabica coffee grown in Thailand is mainly consumed in Thailand. Agricultural Research Development Agency (ARDA). A mixture of instant coffee or 3 in 1 coffee is mostly produced by small and midsize enterprises with the support of Thai government. In 2016, Thai government launched the project namely [1], “Increase Manufacturing Production Capacity in an Industry”. The aim of the project is to support small and midsize enterprises for increasing production capacity. There were a number of expertizes and researchers who participated in this project and helped the companies by giving useful recommendations about the causes of production losses in manufacturing in order for them to enhance productivity and decrease losses in each stage of the product life cycle or service. There were 8 companies that participated in the project. One of the company is an instant coffee company. The company needs to increase its production in each stage of the product life cycle. Interestingly, this company has been certified by ISO : 22000 : 2005 - Food safety, Good Manufacturing Practices (GMP), Hazard Analysis Critical Control Point (HACCP), Corporate Social Responsibility(CSR). The sample of instant coffee mix and coffee cups are shown in Figure 1.



Fig. 1. Instant coffee products

This company uses a conveying machine for making a complete set of instant coffee or coffee kit (including cocoa, and other products). An instant coffee kit consists of instant coffee, non-dairy creamer, coffee cup, and coffee stirrer. The company still uses workers working in each stage of the assembly line (manual packing). Nowadays, the company is facing some problems such as low productivity, number of workers, and high cost of employee. The aim of this research is to measure and increase productivity at the assembly lines by making a balanced workflow. The productivity must be improved and increased at least 5 percent and number of workers can be reduced. Figure 2 presents a group meeting and figure 3 presents the problem investigation in the assemble line. The productivity must be improved and increased at least 5 percent



Fig. 2. A group meeting



Fig. 3. Problem investigation in the assembly line

The aim of assembly line balancing is to minimize production cycle time and create a well-balanced operation to each station [2]. Assembly line balancing using Differential Evolution (DE) techniques in garment production or textile industry can be used to solve variety of textile problems and productivity is increased [3]. Assembly line efficiency can be determined. An efficient heuristic method for the assembly line balancing problem was proposed. Researchers applied the maximum acceptable time to meet the demands of the customer and minimize the balance delay of an assembly line[4]. Finally, productivity was increased by 27.18 percent.

2. Research Methodology

The process of organizing consists of following 6 steps.

2.1 Study the existing process of making an instant coffee kit, observe and evaluate a workers' performance in assembly line from VDO recorder, analyze processing time allocated for each process to determine the proper time interval

2.2 Propose suitable solutions by analyzing the balance of making coffee kit in an assembly line (using method study for Reducing cycle time) by Heuristic method and Largest Candidate Rule and find maximize performance by using equation (1). Total cycle time (T_j) ; Number of workstations (m) Maximum time ($\text{Max}(T_i)$) [5], [6]

$$\text{Max } P = \text{Max} \left[\frac{\sum_{j=1}^n T_j}{m \cdot \text{Max}(T_i)} \times 100 \right] \quad (1)$$

2.3 Train the workers to understand the process of the performance improvement plan

2.4 Monitor the outputs after amendment and revision process

2.5 Evaluate the expected outcomes

2.6 Make a final conclusion

3. Data Collection

The flow process of making instant coffee kit as shown in figure 4 consists of the followings: prepare coffee, coffee stirrer, non-dairy creamer, sugar; put them into a paper coffee cup; lid on a coffee cup; wrap a cup with shrink film and fill them in a paper tray and wrap it with shrink film; put them into box and put the box on a palette and transported by roller conveyor. The assembly line consists of 13 steps.

The number of workers in each step or workstation were collected as shown in Table 1. We found that we have many workers in steps 5-8, which leads to operations having to wait for product to be delivered due to delays (the waste of waiting). We investigate the impact of controlled imbalance levels on assembly lines.

It can be found that there are 24 assembly line workers in charge of producing product.

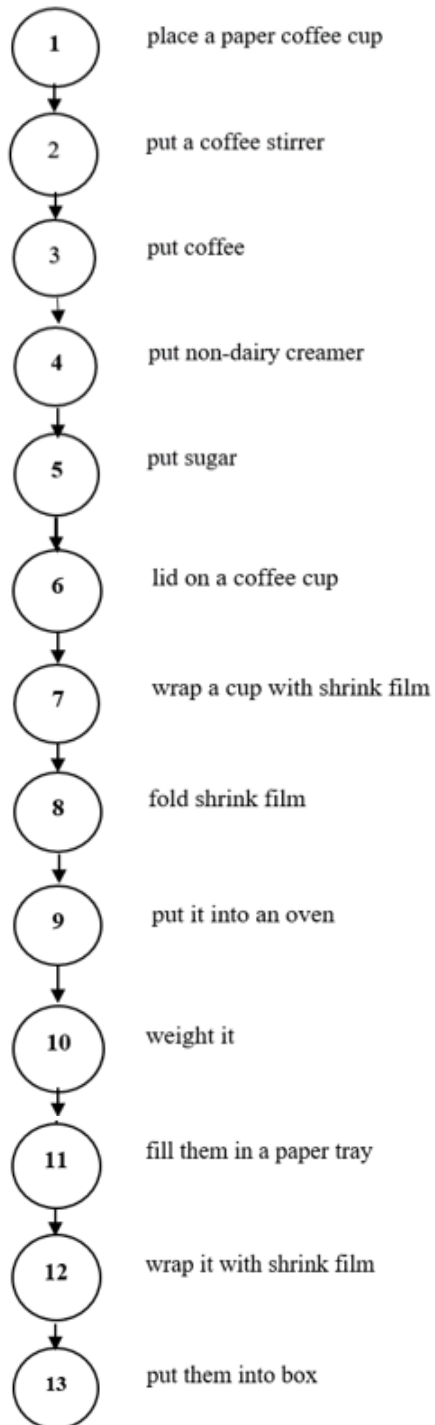


Fig. 4. The flow process of making instant coffee kit

Next, we measure the time of each step and also total time for a complete set on production. We measure 10 times and compute the average using equation (2) and find samples size using equation (3) at a 95% confidence level[7], [8].

TABLE I

No. of workers in each step (Existing procedure)

Step	Procedure	No. of worker(s)
1	place a paper coffee cup	1
2	put a coffee stirrer	1
3	Put coffee	1
4	Put non-dairy creamer	2
5	put sugar	3
6	lid on a coffee cup	2
7	wrap a cup with shrink film	4
8	fold shrink film	4
9	put it into an oven	1
10	weight it	2
11	fill them in a paper tray	1
12	wrap it with shrink film	1
13	put them into box	1
Total		24

$$\text{Mean} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{N} \quad (2)$$

$$\text{Sample Sizes (N)} = \left[\frac{40 \sqrt{n \sum x^2 - (\sum x)^2}}{\sum x} \right]^2 \quad (3)$$

Table 2 shows that step 6 (lid on a coffee cup) uses 1.266 seconds which can cause the bottleneck and delay further steps. It has a significant impact on the overall performance of an assembly line.

TABLE II

Average time for each step (Existing procedure)

Step	Procedure	Average Time Seconds
1	place a paper coffee cup	1.136
2	put a coffee stirrer	1.083
3	Put coffee	1.056
4	Put non-dairy creamer	1.181
5	put sugar	0.720
6	lid on a coffee cup	1.266
7	wrap a cup with shrink film	0.587
8	fold shrink film	0.593
9	put it into an oven	1.200
10	weight it	0.688
11	fill them in a paper tray	1.014
12	wrap it with shrink film	0.893
13	put them into box	0.923
Total cycle time		12.34

The overall performance of an assembly line (P) is computed as shown in equation. Total cycle time (T_j) = 12.34 seconds. Number of workstations (m) = 13 stations. Maximum time ($\text{Max}(T_i)$) = 1.266 seconds

$$P = \frac{(12.34)(100)}{(13)(1.266)}$$

$$= 74.97 \%$$

4. Acknowledgement Improvement of the overall performance of an assembly line

The overall performance of an assembly line was analyzed by observing on production line behavior and workers' behavior through VDO recorder[9], [10]. Then the processing time of each station was recorded and analyzed by using the principle of ECRS (Eliminate, Combine, Rearrange, Simplify)[11]. It was used at the level of process, operation and motion. ECRS is one of the motion study technique used to improve production lines. ECRS processes activities with the following core principles: E = Eliminate unnecessary work, C = Combine operations, R = Rearrange sequence of operations, S = Simplify the necessary operations[12], [13]. The proposed solution was built for target product and process to identify and improve the bottleneck[14], [15]. There were 8 workers who worked in the step 7 (wrap a cup with shrink film) and step 8 (fold shrink film) so that both steps could be combined (see figure 5). We can see that the step 7 and 8 spent less time on the average. When both steps were combined, we needed only 6 out of 8 workers and took 1.180 seconds which required less processing time than step 6 (lid on a coffee cup). In step 5 (put sugar), there were 3 workers and spent 0.720 seconds per unit. When it was compared with the total average time, we found that the processing time in step 5 was the lowest. We could reduce the number of workers from 3 to 1. The processing time was increased by 0.956 seconds. Then we could move 1 worker to work in step 6, the

processing time in step 6 was reduced from 1.266 to 0.924 seconds[16], [17].



Fig. 5 Step 7 (wrap a cup with shrink film)
and step 8 (fold shrink film)

We also offered to conduct training for workers on what performance loss and Kaizen, which are shown in Figure 6. They will be able to measure the process time and burden in each step. The detail is shown in the list below.



Fig. 6 Training for workers on what
performance loss and Kaizen

- Place a paper coffee cup into a box, we should adjust the proper position of the box placement by adjusting the height of the box placement.

- Put the coffee and non-dairy creamer, the working styles in these 2 steps looks similar but they are not. We study the characteristic of both steps based on accuracy and processing time and then we select the best one as the standard process used for both steps.

- Lid on a coffee cup, damaged lids are separated and placed into another box to avoid mixture of damaged and good ones.

- Put into an oven, a place is prepared for a basket before putting it into an oven to ensure that it will not fall down.

5. Results

After improving the overall performance of an assembly line and training workers, the processing time for each step was presented in Table3 as shown below. The overall performance of an assembly line is computed again after improvement as shown in equation (3).

Total time (T_j) = 12.216 seconds

Number of work stations (m) = 12 stations

Maximum time ($\text{Max}(T_i)$) = 1.2 seconds

TABLE III

Comparison of the performance of an assembly
line (before and after improvement)

Step	Procedure	Average Time Seconds(s)		Number of Worker (s)	
		Before	After	Before	After
1	place a paper coffee cup	1.136	1.136	1	1
2	put a coffee stirrer	1.083	1.083	1	1
3	Put coffee	1.056	1.056	1	1
4	Put non dairy creamer	1.181	1.181	2	2
5	put sugar	0.720	0.956	3	2
6	lid on a coffee cup	1.266	0.924	2	3
7+8	wrap a cup with shrink film + fold shrink film	0.587 0.593	1.181	8	6
9	put it into an oven	1.200	1.200	1	1
10	weight it	0.688	0.688	2	2
11	fill them in a paper tray	1.014	1.014	1	1
12	wrap it with shrink film	0.893	0.893	1	1

13	put them into box	0.923	0.923	1	1
Total cycle time		12.320	12.216	24	22

$$\text{So that ; } P = \frac{(12.216)(100)}{(12)(1.20)} = 84.83 \%$$

(increasing 9.86 %)

$$\text{Labor saving} = \frac{(24-22)(100)}{(24)} = 8.30 \%$$

$$\text{Increased productivity} = \frac{1.266-1.20}{1.266}(100) = 5.20 \%$$

Comparison of average time and number of workers before and after improvement at each workstation can be shown as a graphical presentation in Figure 7 and Figure 8.

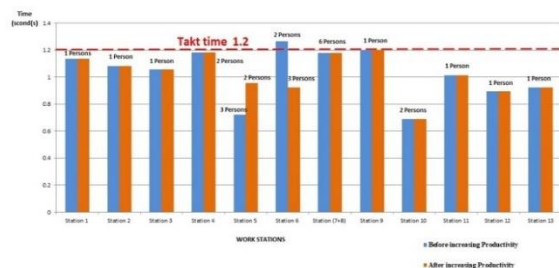


Fig. 7 Comparison of average time and number of workers before and after improvement.

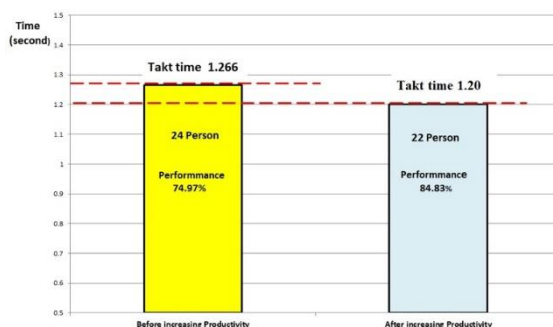


Fig. 8 Comparison of Takt time, number of workers and performance before and after improvement.

6. Conclusion

There are 13 stations for making instant coffee kit in a straight assembly line. The processing time spent for each step or workstation is different. It leads to operations having to wait for product to be delivered due to delays (waiting in queue). It causes in a loss in production time. Before improvement, there are 24 assembly line workers (manual packing). After improvement, we found that the step 7 (wrap a cup with shrink film) and step 8 (fold shrink film) can be combined. There are 22 out of 24 workers in an assembly line. Labor cost saving decreases by 8.3 percent. Maximum time is 1.2 seconds. Productivity has been increased by 5.2 percent. The overall productivity has been increased by 13.5 percent. Further study, the processing time in step 9 (put it into an oven) should be reduced. We need to improve worker performance and skill in the process that has been expensive and time-consuming.

References

- [1] Department of Skill Development, Pathum Thani. "Project to Increase Labor Productivity to SME 4.0," 2016.
- [2] M. A. H. Riyadh and Y.A.M. Jassim, "Selection of balancing method for manual assembly line of two stages gearbox," Global Perspectives on Engineering Management, vol. 2, pp. 70-81, 2013.
- [3] R. Wilaiwan, "Line Balancing in a small Diesel Engine Assembly Plant with Consideration on the Local Content Government Regulations," AIT, Thesis, AIT, Bangkok Thailand, 1976.

- [4] P. Lalhitaporn, “Planning System and Production Control,” Edition 8th. Bangkok: Technology Promotion Association (Thailand-Japan), 2002.
- [5] J. Krunkarn, “Heuristic Method for Assembly Line Balancing a Case Study in Refrigerator Factory,” *Journal of Kasem Bundit University*, 5(2), pp. 56-68, 2015.
- [6] C. Saroungkarasiri, “Production and Planning Control,” Edition 15th. Bangkok: Technology Promotion Association (Thailand-Japan), 2007.
- [7] A. L. Arcus, “COMSOAL: a computer method of sequencing operations for assembly lines,” *International Journal of Production Research*, vol. 4, pp. 277-259, 2012.
- [8] J. Heap, “Stormy productivity weather ahead,” *International Journal of Productivity and Performance Measurement*, 56(2), pp. 170-177, 2007.
- [9] S. Biswas, A. Chakraborty and N. Bhowmik, “Improving Productivity Using Work Study Technique,” *International Journal of Research in Engineering and Applied Sciences*, vol. 6, pp. 49-55, 2016.
- [10] Hamid TKA., “The slippery path to productivity improvement,” *IEEE Software*, vol.13, pp. 43-52, 1996.
- [11] RS. Raut and HM. Deshmukh, “Productivity improvement of a prestress concrete pole plant using work study technique,” *International Journal of advanced Technology in Engineering and Science*, vol.2, pp. 496-508, 2014.
- [12] PA. Ozor, LOO. Chibuike, O. Orji and KO. Chimaobi, “Productivity Improvement of Small and Medium Scale Enterprises using Lean Conceptâ :Case Study of a Bread actory,” *European Journal of Business and Management*, vol. 7, pp.73-84, 2015.
- [13] PV. Chandra, “An Effort to Apply Work and Time Study Techniques in a Manufacturing Unit for Enhancing Productivity,” *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, vol. 2, pp.4050-4058, 2013.
- [14] PP. Kulkarni, SS. Kshire and KV. Chandratre, “Productivity Improvement Through Lean Deployment and Work Study Methods,” *International Journal of Research in Engineering and Technology*, vol. 3, pp.429-434, 2014.
- [15] KN. Hassanali, “A Productivity Model Utilising a Work Study Approach for Performance Measurement,” *The Journal of the Association of Professional Engineers of Trinidad and Tobago*, vol. 40, pp.13-25, 2011.
- [16] N. Kumar and D. Mahto, “Productivity Improvement through Process Analysis for Optimizing Assembly Line in Packaging Industries,” *Global Journal of Researches in Engineering Industrial Engineering*, vol. 13, pp. 1-17, 2013.
- [17] M. Khatun, Murshida, “Effect of Time and Motion Study on Productivity in Garment Sector,” *International Journal of Scientific and Engineering Research*, vol. 5, pp. 825-833, 2014.

การประยุกต์ใช้วิธีเชิงวิวัฒนาการแบบมากวัตถุประสงค์สำหรับการจัดสมดุล คู่สายการประกอบรูปตัวยู

Application of Many-Objective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition for Double U-Shaped Assembly Line Balancing

สุชานันท์ ดันชนะประดิษฐ์¹ ปารเมศ ชุตินา^{2*}

¹นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

²ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

254 ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

Suchanun Tanchanapradit¹ Parames Chutima^{2*}

¹Graduate Student, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,
Chulalongkorn University.

² Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University.
254 Phayathai Road, Wang mai, Khet Pathum Wan, Bangkok, 10330

*Corresponding author: Email: parames.c@chula.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอคู่สายการประกอบรูปตัวยู (Double U-shaped assembly line) แบบผลิตภัณฑ์ผสม ซึ่งสายการประกอบรูปตัวยู 2 สายถูกจัดวางในลักษณะขนานแบบประชิดกัน ปัญหาการจัดสมดุลคู่สายการประกอบรูปตัวยูในงานวิจัยนี้อยู่ในรูปแบบปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบมากวัตถุประสงค์ ซึ่งประกอบไปด้วย 5 วัตถุประสงค์ที่ต้องทำการหาค่าที่ดีที่สุดไปพร้อมกัน ได้แก่ จำนวนสถานีงานน้อยที่สุด จำนวนสถานีน้อยที่สุด ความไม่สัมพันธ์ของชิ้นงานน้อยที่สุด ความไม่สมดุลของภาระงานระหว่างสถานีน้อยที่สุด และความไม่สมดุลของภาระงานภายในสถานีน้อยที่สุด งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition : MOEA/D) ซึ่งเป็นวิธีการที่ถูกค้นพบว่าสามารถแก้ปัญหาแบบมากวัตถุประสงค์ได้ดี ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า MOEA/D มีสมรรถนะในการแก้ปัญหาที่ดีกว่าวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฟูลอนภาคหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Optimization: MOPSO) ในด้านการเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง และด้านอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอรับ MOEA/D จึงเป็นอัลกอริทึมที่เหมาะสมในการแก้ปัญหาดังกล่าวในงานวิจัยนี้

คำสำคัญ: การจัดสมดุลสายการประกอบรูปตัวยู การหาค่าที่เหมาะสมของปัญหาที่มีวัตถุประสงค์จำนวนมาก วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฟูลอนภาคหลายวัตถุประสงค์

ABSTRACT

This article proposes a mixed-model double U-shaped assembly line. Two individual U-shaped lines are placed adjacently in parallel. The double U-shaped line balancing problem in this

research optimizes many objectives simultaneously, i.e. minimum number of workstations, minimum number of stations, minimum work unrelatedness, minimum different workload between and within workstation. This research applies a Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition (MOEA/D) to find the optimum solution since this approach is found to be effective for many-objective optimization problems. The experiment results show that MOEA/D performs better than MOPSO in terms of convergence and ratio of non-dominated solution. Thus MOEA/D is suitable for solving Double U-shaped line balancing problem with many objectives.

Keyword: U-shaped Line balancing, Many- objective optimization problem, Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition, Multi-Objective Particle Swarm Optimization

1. บทนำ

โรงงานอุตสาหกรรมในปัจจุบันมีการพัฒนาระบบการผลิตเพื่อให้สามารถตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้าที่มีความหลากหลายมากขึ้น สายการประกอบแบบผลิตภัณฑ์ผสม (mixed-model assembly line) จึงได้ถูกพัฒนาขึ้น และในการเพิ่มประสิทธิภาพและลดต้นทุนของสายการประกอบมีการนำระบบผลิตแบบทันเวลาพอดีมาใช้ โดยมุ่งประเด็นไปที่การลดระดับพัสดุคงคลัง และการจัดการกับความสูญเปล่าที่เกิดขึ้นในระบบ [1] สายการประกอบรูปตัวยู (U-shaped assembly line) [2] จึงถูกนำมาใช้ร่วมกับระบบผลิตแบบทันเวลาพอดี ซึ่งข้อดีของสายการประกอบรูปตัวยู คือ สามารถปรับเปลี่ยนอัตราการผลิตได้ง่าย สายการประกอบมีระยะทางสั้น และ ใช้จำนวนสถานีงานน้อย [3]

รูปแบบสายการประกอบรูปตัวยูได้ถูกพัฒนาขึ้นในลักษณะของสถานีงานขนาน (U-shaped assembly line with parallel workstation) [4],[5] ต่อมาพัฒนาเป็นสายการประกอบรูปตัวยูขนาน (Parallel U-shaped assembly line) โดย Kucukkoc and Zhang [6] เป็นการนำสายการประกอบรูปตัวยู 2 สายวางขนานกันส่งผลให้สามารถนำประสิทธิภาพของสายการประกอบขนาน [7]และรูปตัวยู [8] มาใช้ร่วมกัน ระบบผลิตแบบยูขนานนี้จึงช่วยลดการจัดตั้งสถานี และประหยัดพื้นที่การทำงาน ซึ่งงานวิจัยแบบยูขนาน[6]ที่ผ่านมาได้ทำการศึกษารูปแบบของผลิตภัณฑ์บนสายการประกอบแบบผลิตภัณฑ์เดียว

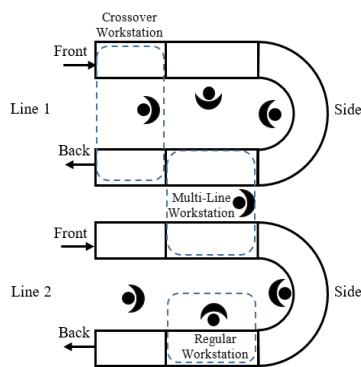
(Single Model) มีวัตถุประสงค์ในการจัดสมดุล 2 วัตถุประสงค์ และได้พัฒนาวิธีการจัดสมดุลแบบ Parallel U-Line Heuristic แต่คำตอบที่ได้จากการจัดสมดุลอาจมีรูปแบบไม่หลากหลาย ต่อมาจึงมีงานวิจัยที่ศึกษารูปแบบยูขนานแบบผลิตภัณฑ์ผสมแบบมากวัดวัตถุประสงค์ [9] ประกอบด้วยวัตถุประสงค์จำนวน 4 วัตถุประสงค์ และได้พัฒนารูปแบบวิธีการถอดรหัสตรงคำตอบในการจัดสมดุลทำให้เกิดคำตอบที่มีความหลากหลายมากขึ้น

จากงานวิจัยสายการประกอบยูขนานที่ผ่านมาเป็นรูปแบบยูขนานที่ซ้อนกัน ซึ่งมีข้อจำกัดคือสายการประกอบด้านนอกของยูขนานจำเป็นต้องมีความยาวมากกว่าสายการประกอบด้านใน ในขณะที่การใช้สายการประกอบรูปตัวยูหลายสายช่วยลดค่าใช้จ่ายด้านการจัดตั้งสถานีงานได้มากกว่าสายการประกอบรูปตัวยูแบบเดี่ยว [10] เมื่อโรงงานอุตสาหกรรมมีการใช้สายการประกอบรูปตัวยูหลายสาย คู่สายการประกอบที่มีด้านข้างที่ขนานกันและอยู่ในระยะที่สามารถมอบหมายภาระงานระหว่างสายการประกอบได้จะสามารถจัดสรรภาระงานได้เช่นเดียวกับยูขนาน บทความนี้จึงนำเสนอคู่สายการประกอบรูปตัวยู (Double U-shaped assembly line) ซึ่งเป็นสายการประกอบรูปตัวยูขนาน ในลักษณะที่ด้านข้างของสายการประกอบขนานกัน โดยมี 5 วัตถุประสงค์ซึ่งต้องทำการหาค่าที่ดีที่สุดไปพร้อมกัน ได้แก่ จำนวนสถานีงาน ความสมดุลของภาระงานระหว่างสถานีงาน ความสมดุลภายในสถานี ความสัมพันธ์ของชั้นงาน และ ความยาวของสาย

การประกอบ ในปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแบบผลิตภัณฑ์ผสมมีความซับซ้อนเนื่องจากเป็นปัญหา NP-Hard ในงานวิจัยนี้จึงประยุกต์ใช้อัลกอริทึมเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition : MOEA/D) พัฒนาโดย Zhang และคณะ [11] มาใช้ในการแก้ปัญหาโดยเปรียบเทียบกับวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาค (Multi-Objective Particle Swarm Optimization: MOPSO) [12] ซึ่งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพที่ดีในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบ

2. ปัญหาการจัดสมดุลคู่สายการประกอบรูปตัวยูในรูปแบบผลิตภัณฑ์ผสม

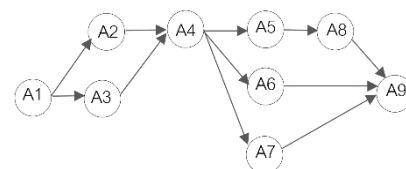
คู่สายการประกอบรูปตัวยูเป็นสายการประกอบรูปตัวยูสองสายที่นำมาประยุกต์ให้มีการจัดวางในรูปแบบขนานกันตามรูปที่ 1



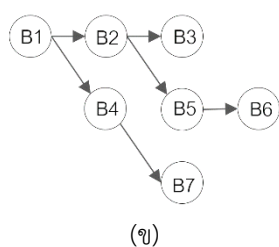
รูปที่ 1 คู่สายการประกอบรูปตัวยู

สามารถแบ่งรูปแบบสถานีงานหลัก ได้ 3 รูปแบบ ดังนี้ 1) สถานีงานร่วม (Multi-line Workstation) คือ สถานีงานที่อยู่บนสองสายการประกอบ 2) สถานีงานจุดข้าม (Crossover Workstation) เป็นสถานีที่อยู่ภายในรูปตัวยูซึ่งอยู่ระหว่างด้านหน้าและด้านหลังของสายการประกอบ และ 3) สถานีงานปกติ (Regular Workstation) จะอยู่บนสายการประกอบเดียว สายการประกอบรูปตัวยู

สองสายสามารถมีรอบเวลาการผลิตที่แตกต่างกันได้ และจะใช้วิธีการหารอบเวลาการผลิตร่วม (Common Cycle Time) [1] เพื่อปรับให้มีรอบเวลาการผลิตที่เท่ากัน และเนื่องจากสายการประกอบเป็นรูปแบบผลิตภัณฑ์ผสมสินค้าแต่ละรุ่นมีชิ้นงานที่ต้องทำและเวลาดำเนินการที่แตกต่างกันจึงอาศัยวิธีการสร้างแผนภาพลำดับก่อนหลังร่วม (Combined Precedence Diagram) [7] และการคำนวณเวลาชิ้นงานเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนัก (Combined Task Time) [13], [14] ตัวอย่างการสร้างแผนภาพลำดับก่อนหลังร่วมเป็นไปตามตามรูปที่ 2 สำหรับการคำนวณเวลาชิ้นงานเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนัก มีวิธีการคำนวณดังนี้ กำหนดให้ MA เป็นจำนวนรุ่นของสินค้าบนสายการประกอบ A, MB เป็นจำนวนรุ่นของสินค้าบนสายการประกอบ B, D_m เป็นปริมาณการผลิตสินค้ารุ่น m บนสายการประกอบ และ q_m เป็นสัดส่วนของปริมาณการผลิตสินค้ารุ่น m เมื่อเทียบกับปริมาณสินค้าทุกรุ่นบนสายการประกอบ, t_i คือเวลาชิ้นงานรวมที่ i และ $q_m = \frac{D_m}{\sum_{m=1}^M D_m}$, $t_i = \sum_{m=1}^M q_m t_{im}$ โดยที่ $M = MA$ หรือ MB เมื่อคำนวณจากสายการประกอบ A หรือ B ตามลำดับ ดังตัวอย่างในตารางที่ 1 และ 2 แสดงเวลาชิ้นงานรวมของผลิตภัณฑ์ A และ B ตามลำดับ เมื่อกำหนดให้สายการประกอบ A ผลิตสินค้า 2 รุ่น ได้แก่ A_I และ A_{II} และโดยมีสัดส่วนการผลิต $q_{A_I} = \frac{1}{3}$ $q_{A_{II}} = \frac{2}{3}$ และกำหนดให้บนสายการประกอบ B ผลิตสินค้า 2 รุ่น ได้แก่ B_I และ B_{II} โดยมี $q_{B_I} = q_{B_{II}} = \frac{1}{2}$



(ก)



รูปที่ 2 แผนภาพลำดับก่อนหลังร่วม (ก) ผลิตภัณฑ์ A บนสายการประกอบ 1 (Jaeschke 9-tasks) และ (ข) ผลิตภัณฑ์ B บนสายการประกอบ 2 (Mertens 7-tasks)

ตารางที่ 1 เวลาชิ้นงานร่วมของผลิตภัณฑ์ A บนสายการประกอบที่ 1 ซึ่งผลิตสินค้ารุ่น AI และ All

Task	Task Time		Combined Task Time
	AI	All	
A1	15	15	15
A2	9	9	9
A3	12	9	10
A4	15	12	13
A5	12	9	10
A6	15	15	15
A7	3	3	3
A8	12	12	12
A9	18	15	16

ตารางที่ 2 เวลาชิ้นงานร่วมของผลิตภัณฑ์ B บนสายการประกอบที่ 2 ซึ่งผลิตสินค้ารุ่น BI และ BII

Task	Task Time		Combined Task Time
	BI	BII	
B1	2	0	1
B2	10	10	10
B3	8	6	7
B4	6	6	6
B5	10	10	10
B6	12	12	12
B7	10	10	10

3. ฟังก์ชันหลายวัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นปัญหาแบบมากวัตถุประสงค์ (Many-objective Optimization Problem) ซึ่งมีความสำคัญต่อปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบ เพื่อช่วยให้การจัดสมดุลสายการประกอบมีประสิทธิภาพ สอดคล้องกับระบบการผลิตแบบทันเวลาพอดี และเป็นประโยชน์ต่อการนำไปปรับใช้ในทางปฏิบัติได้ดีขึ้น โดยใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดไปพร้อมกันทุกวัตถุประสงค์ ประกอบไปด้วย 5 วัตถุประสงค์ ได้แก่ จำนวนสถานีงาน ความยาวของสายการประกอบ ความสัมพันธ์ของงานในสถานี ความสมดุลของภาระงานระหว่างสถานีงาน ความสมดุลของภาระงานภายในสถานีงาน มีรายละเอียด ดังนี้

3.1 จำนวนสถานีงานน้อยที่สุด

วัตถุประสงค์แรกคือ การลดจำนวนสถานีงาน ซึ่งเป็นวัตถุประสงค์หลักของปัญหาการจัดสมดุลประเภทที่ 1 ซึ่งมีการกำหนดรอบเวลาการผลิตมาให้และทำการหาจำนวนสถานีงานที่น้อยที่สุด เป็นการลดค่าใช้จ่ายในการสร้างสถานีงานและค่าแรงของพนักงาน รวมถึงประหยัดพื้นที่ใช้สอย เมื่อ N_w เป็นจำนวนสถานีงาน (Workstation)

$$\text{Minimize : } N_w \quad (1)$$

3.2 จำนวนสถานีน้อยที่สุด

คือการทำให้ความยาวสายการประกอบสั้นที่สุดเพื่อให้ใช้พื้นที่การทำงานน้อยที่สุด โดยกำหนดให้ N_s เป็นจำนวนสถานี (station)

$$\text{Minimize : } N_s \quad (2)$$

ในการจัดสมดุลทำให้เกิดคำตอบของการจัดสมดุลได้หลายรูปแบบ ซึ่งการนับจำนวนสถานีงานแสดงในรูปที่ 3 (ก)-(ค) ตามลำดับ การแบ่งประเภทการนับจำนวนสถานีงานเพื่อมุ่งเน้นให้เกิดคำตอบจากการจัดสมดุลในรูปแบบคู่สายการประกอบรูปด้วย ดังรูปที่ 3(ค) มากที่สุด

3.3 ความสัมพันธ์ของงานที่ไม่เกี่ยวเนื่องกันภายใน สถานีนงานน้อยที่สุด

เป็นการลดความไม่สัมพันธ์กันของงานในสถานีนงานให้น้อยที่สุด มีจุดประสงค์เพื่อจัดสรรให้งานที่มีความเกี่ยวข้องกันอยู่ในสถานีนงานเดียวกันให้มากที่สุด ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการมอบหมายงานเนื่องจากสามารถเลือกจัดสรรพนักงานเข้าทำงานได้ตรงตามความถนัด สามารถคำนวณได้ดังสมการ (3)

$$\text{Minimize } MIWR = \frac{N_w}{\sum_{k=1}^{N_w} SN_k} \quad (3)$$

เมื่อ SN_k คือจำนวนเครือข่ายของชั้นงานที่มีความสัมพันธ์กันโดยตรงในสถานีนงานที่ k

3.4 ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีนงานมี ค่าน้อยที่สุด

ในวัตถุประสงค์นี้เป็นการทำให้ผลรวมของเวลาการทำงานในแต่ละสถานีนงานมีความใกล้เคียงกันมากที่สุดโดยการไม่ทำให้การจัดสมดุลเกิดการแบ่งภาระงานที่มากเกินไปในบางสถานีนงาน มีขั้นตอนในการคำนวณดังนี้

กำหนดให้ m_h คือรุ่นของสินค้าบนสายการประกอบ h , M_h คือ จำนวนผลิตภัณฑ์บนสายการประกอบ h , CCT คือรอบเวลาการผลิตรวม, TT_{k,b,m_h} คือเวลาชั้นงานทั้งหมด ในสถานีนงานที่ k ซึ่งเป็นประเภท b ที่ประกอบสินค้ารุ่น m บนสายการประกอบ h , ค่า S_{kb,m_h} คือค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์ของรอบเวลาการผลิตรวมและเวลาชั้นงานรวม ซึ่งแบ่งตามสถานีนงานประเภทสถานีน ตามสมการ 4,5 และ 6 ตามลำดับ

สถานีนงานปกติ

$$S_{kbm_h} = |CCT - TT_{kbm_h}| \quad (4)$$

สถานีนงานร่วม

$$S_{kbm_{(h,h+1)}} = |CCT - TT_{kbm_h} - TT_{kbm_{h+1}}| \quad (5)$$

สถานีนงานจุดข้าม

$$S_{k,CW,m_{(h(front),h(back))}} = |CCT - TT_{kbm_h(front)} - TT_{kbm_h(back)}| \quad (6)$$

จากนั้นนำค่า S_{kb,m_h} ที่หาได้จากสมการ 4, 5 และ 6 มาใช้ในการหาค่า S_{kb} ซึ่งเป็นค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์เฉลี่ยของสถานีนงานที่ k ตามประเภทสถานีนงาน ดังสมการ 7,8 และ 9 ตามลำดับ

สถานีนงานปกติ

$$S_{kb} = \sum_{m_h=1}^{M_h} q_{m_h} \times S_{k,RW,m_h} \quad (7)$$

สถานีนงานร่วม

$$S_{kb} = \sum_{m_h=1}^{M_h} \sum_{m_{h+1}=1}^{M_{h+1}} q_{m_h} \times q_{m_{h+1}} \times S_{k,MW,m_{(h,h+1)}} \quad (8)$$

สถานีนงานจุดข้าม

$$S_{kb} = \sum_{m_h=1}^{M_h} \sum_{m_s=1}^{M_s} q_{m_h} \times q_{m_s} \times S_{k,CW,m_{(h(front),s(back))}} \quad (9)$$

ค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์รวม (TAD) สามารถหาได้จากสมการ (10) เมื่อ N_w คือจำนวนสถานีนทั้งหมด

$$TAD = \sum_{k=1}^{N_w} \sum_{b=RW}^{MW} S_{k,b} \quad (10)$$

ค่าความสมดุลของภาระงานระหว่างสถานีนงาน B_b สามารถหาได้จากสมการ (11) ซึ่งดัดแปลงมาจากสมการของ Vilarinho และ Simaria [15] โดย B_b จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ค่า B_b ที่ได้มีค่าต่ำจะหมายถึงภาระงานมีความสมดุล

Minimize

$$B_b = \frac{N_w}{N_w - 1} \sum_{k=1}^{N_w} \sum_{b=RW}^{CW} \left(\frac{S_{k,b}}{TAD} - \frac{1}{N_w} \right)^2 \quad (11)$$

3.5 ความสมดุลเฉลี่ยของภาระงานภายในสถานีมาก ที่สุด

ในวัตถุประสงค์นี้จึงเป็นการแบ่งภาระงานการผลิตให้
ใกล้เคียงกันในแต่ละผลิตภัณฑ์ เพื่อให้การจัดสมดุลไม่
ทำให้บางผลิตภัณฑ์เกิดการผลิตที่มากหรือน้อยจนเกินไป

กรณีนี้ สถานีงานอยู่บนสายการประกอบเดียว ได้แก่
สถานีงานปกติ และสถานีงานจุดข้ามจะมีวิธีการคำนวณ
ค่าความสมดุลภายในสถานีงาน ($B_{w,h}$) ดังนี้

กำหนดให้ N_h คือจำนวนสถานีงานที่อยู่บนสายการ
ประกอบ h เท่านั้น, s_{km} คือ เวลาว่างงานของผลิตภัณฑ์
 m ในสถานีงาน k และ, S_{km} คือ สัดส่วนเวลาว่างงาน
ของแต่ละผลิตภัณฑ์ สำหรับสถานีงานที่อยู่บนสายการ
ประกอบ h สามารถหาค่า s_{km} และ S_{km} ได้จากสมการ
(12) และ (13) ตามลำดับ

$$s_{km} = \max(0, CCT - TT_{kbm}) \quad (12)$$

$$S_{km} = \frac{q_m \times s_{km}}{\sum_{m=1}^{M_h} q_m \times s_{km}} \quad (13)$$

จากนั้นหาค่า $B_{w,h}$ ซึ่งเป็นค่าความสมดุลของภาระ
งานภายในสถานีงานบนสายการประกอบ h ได้จาก
สมการ (14)

$$B_{w,h} = \frac{M_h}{N_h(M_h-1)} \sum_{k=1}^{N_h} \sum_{m=1}^{M_h} \left(S_{km} - \frac{1}{M_h} \right)^2 \quad (14)$$

ในกรณีที่สถานีงานเป็น สถานีงานร่วมจะมีผลิตภัณฑ์
ที่มาจากสองสายการประกอบ จะใช้การหาความสมดุล
ภายในสถานีงานร่วม ($B_{w,(h,h+1)}$) ดังนี้

เริ่มจาก คำนวณค่า $s_{km,(h,h+1)}$ ซึ่งเป็นเวลาว่างงาน
ที่เกิดจากรูปแบบการทำงานร่วมกันของผลิตภัณฑ์ m ที่
อยู่บนสายการประกอบ h และ $h+1$ ได้จากสมการ
(15) จนครบทุกรูปแบบ จากนั้นหาค่า $S_{km,(h,h+1)}$ ซึ่งเป็น
สัดส่วนเวลาว่างงาน ในสถานีงาน k ที่เกิดจากรูปแบบการ
ทำงานร่วมกันของผลิตภัณฑ์ m บนสายการประกอบ h
และ $h+1$ โดยคำนวณได้ตามสมการที่ (16)

$$s_{km,(h,h+1)} = \max(0, CCT - TT_{kbm_h} - TT_{kbm_{h+1}}) \quad (15)$$

$$S_{km,(h,h+1)} = \frac{q_{m_h} \times q_{m_{h+1}} \times s_{km,(h,h+1)}}{\sum_{m_h=1}^{M_h} \sum_{m_{h+1}=1}^{M_{h+1}} q_{m_h} \times q_{m_{h+1}} \times s_{km,(h,h+1)}} \quad (16)$$

หาค่า $B_{w,(h,h+1)}$ ซึ่งเป็นค่าความสมดุลของภาระ
งานภายในสถานีงานร่วม (Multi-workstation) บนสาย
การประกอบ h และ $h+1$ ได้จากสมการ (17) เมื่อ
กำหนดให้ W คือจำนวนสถานีงานร่วม และ MC คือ จำนวน
รูปแบบการทำงานร่วมกันทั้งหมดของผลิตภัณฑ์บนสาย
การประกอบ h และ $h+1$,

$$B_{w,(h,h+1)} = \frac{MC}{W(MC-1)} \sum_{k=1}^W \sum_{c=1}^{MC} \left(S_{kc} - \frac{1}{MC} \right)^2 \quad (17)$$

ดังนั้นวัตถุประสงค์ที่ห้าคือ การทำให้ความสมดุล
ภายในสถานีงานเฉลี่ย ($B_{w(avg)}$) มากที่สุด

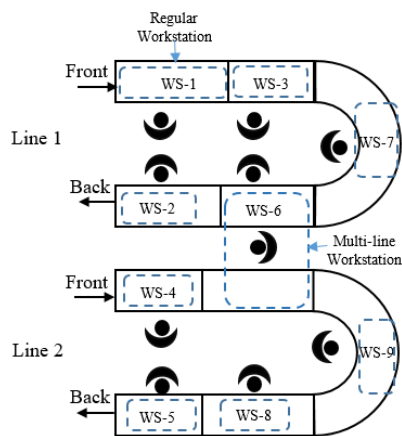
$$\text{Minimize } B_{w(avg)}$$

$$B_{w(avg)} = \frac{1}{2+T} (B_{w,h} + B_{w,h+1} + B_{w,(h,h+1)}) \quad (18)$$

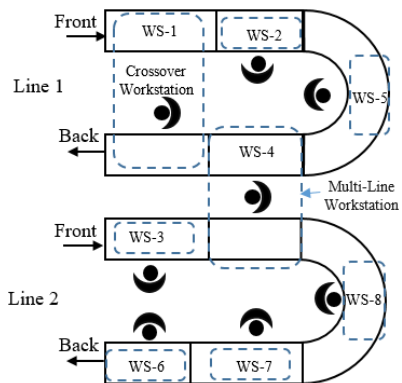
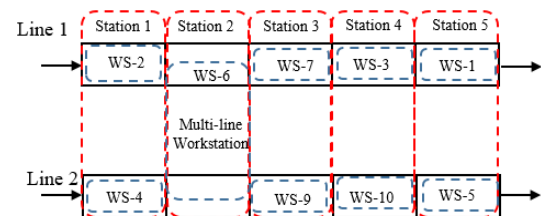
$$\text{โดยที่ } T = \begin{cases} 1, & \text{เมื่อเกิดสถานีงานร่วม} \\ 0, & \text{คือไม่เกิดสถานีงานร่วม} \end{cases}$$

คำตอบของปัญหาหลายวัตถุประสงค์จะอยู่ในรูปของ
กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมเชิงพาเรโต ดังนั้นจึงใช้วิธี
เปรียบเทียบคำตอบตามหลักการครอบงำแบบพาเรโตมี
นิยามดังนี้ ในกรณีปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบ
ทำให้มีค่าน้อยที่สุด k วัตถุประสงค์ คำตอบ x จะถือว่า
ครอบงำหรือดีกว่าคำตอบ y ($x < y$) ก็ต่อเมื่อเป็นไปตาม
เงื่อนไขดังนี้

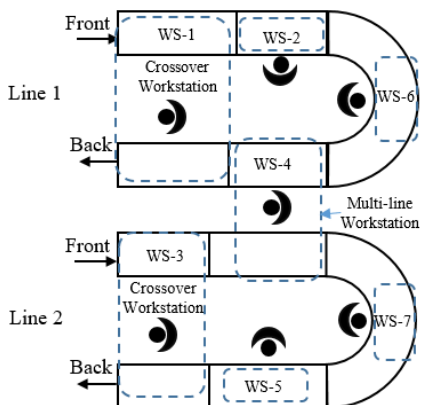
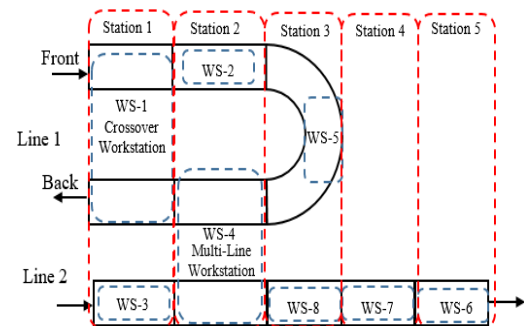
- 1) $f_i(x) \leq f_i(y)$ สำหรับทุกค่า และ
 - 2) $f_i(x) < f_i(y)$ ในอย่างน้อยหนึ่งค่า
- เมื่อ $i \in \{1, 2, \dots, k\}$



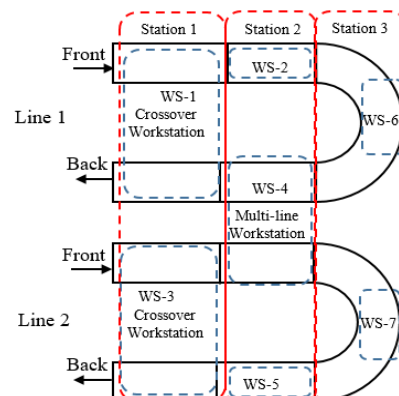
(ก)



(ค)



(จ)



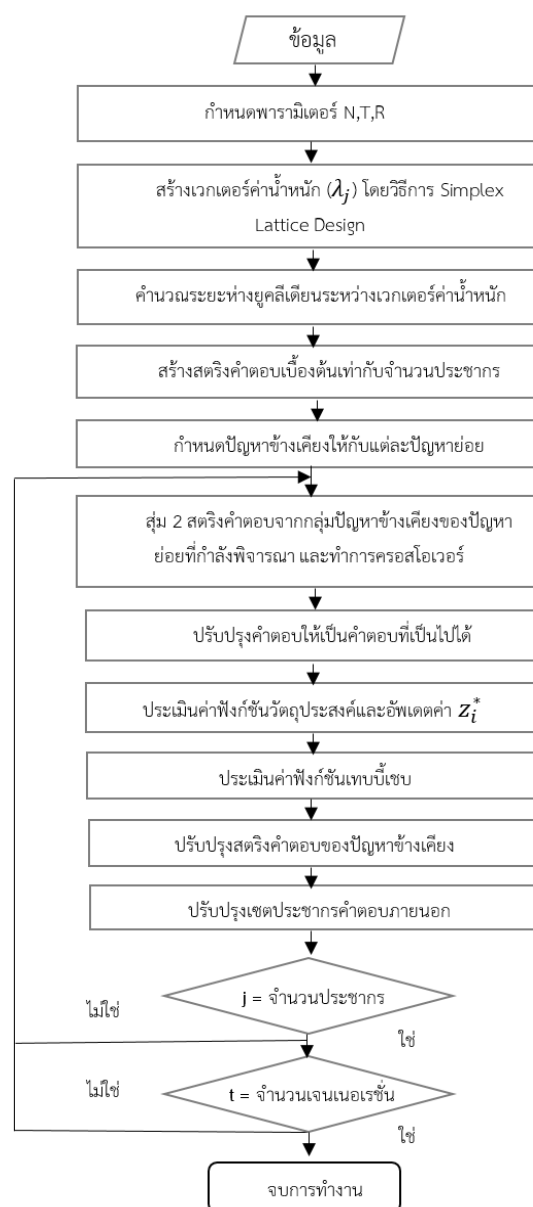
รูปที่ 3 การนับความยาวคู่สายการประกอบรูปตัวยู (ก) สถานีงานปกติทั้งหมดและมีสถานีงานร่วม (ข) สถานีงานจุดข้ามบนสายการประกอบเดียวและมีสถานีงานร่วม (ค) สถานีงานจุดข้ามทั้งสองสายการประกอบและมีสถานีงานร่วม

4. วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์

วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition : MOEA/D) มีหลักการในการแก้ปัญหาหลายวัตถุประสงค์ด้วยการแบ่งให้เป็นปัญหาย่อยจำนวนหลายปัญหาและหาค่าที่เหมาะสมที่สุดไปพร้อมกัน และพัฒนาคำตอบโดยนำสตริงคำตอบรุ่นลูกที่ได้ไปแทนที่สตริงคำตอบในปัญหาย่อยที่อยู่ข้างเคียงเพื่อให้ได้คำตอบที่จะพัฒนาไปสู่รุ่นถัดไป

4.1 สตริงคำตอบ

ในแต่ละขั้นงานนั้นจะมีการระบุลำดับความสำคัญของขั้นงานหรือเรียกว่าค่าสิทธิในการเลือกงาน (Priority) ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 1 จนถึง n เมื่อ n เป็นจำนวนขั้นงานทั้งหมด โดยงานที่มีความสำคัญมากที่สุดจะมีค่าสิทธิที่น้อยที่สุด เช่น ขณะที่กำลังพิจารณา มีงานที่สามารถจัดลงสถานีงานได้หลายงาน งานที่มีค่าสิทธิน้อยกว่าจะถูกเลือกก่อน ตัวอย่างสตริงคำตอบเป็นดังตารางที่ 3 ซึ่งมีจำนวนขั้นงานทั้งหมด 16 ขั้นงานจึงแบ่งออกเป็น 16 บิต สตริงคำตอบเริ่มต้นจะสร้างโดยการสุ่มค่าสิทธิตั้งแต่ 1 ถึง 16 ให้กับแต่ละขั้นงาน ซึ่งแต่ละขั้นงานจะมีค่าสิทธิไม่ซ้ำกัน การจัดสรรขั้นงานลงสถานีงานจะมีข้อจำกัดด้านตำแหน่งของขั้นงานที่จัดลงได้เพื่อให้พนักงานในสถานีงานร่วมและสถานีจุดข้ามสามารถทำงานได้บนสายการประกอบด้านที่อยู่ติดกันและสถานีงานทั้งสองรูปแบบนี้จะอยู่ในตำแหน่งที่เยื้องกันได้ไม่เกิน 1 สถานี



รูปที่ 4 ขั้นตอนการทำงานของ MOEA/D

ตารางที่ 3 ตัวอย่างสตริงคำตอบของการจัดสมดุลคู่สายการประกอบรูปด้วยแบบผลิตภัณฑผสม

String	Task															
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
1	4	2	3	1	15	10	8	7	9	6	13	5	11	14	16	12

4.2 การถอดรหัสสตริงคำตอบ

กระบวนการถอดรหัสสตริงคำตอบจะจัดชั้นงานให้เป็นไปตามข้อจำกัดด้านตำแหน่งของชั้นงานโดยมีชั้นงานดังต่อไปนี้

1. หาเซตของชั้นงานที่สามารถเริ่มได้
2. เลือกชั้นงานจากเซตงานในข้อที่ 1 โดยชั้นงานที่มีค่าสิทธิน้อยจะถูกจัดลงสถานีนานก่อน
3. พิจารณาเงื่อนไขด้านตำแหน่งของชั้นงาน และเวลาดำเนินงานในสถานีนานจะต้องไม่เกินรอบเวลาการผลิต ถ้าไม่เป็นไปตามเงื่อนไขจะกลับไปเลือกงานใหม่ที่มีค่าสิทธิน้อยรองลงมาในข้อ 2
5. หลังจากเลือกชั้นงานใดลงสู่สถานีนานแล้วจะตัดชั้นงานนั้นออกจากแผนภาพชั้นงานรวม
6. หากไม่มีชั้นงานที่สอดคล้องกับเงื่อนไขที่กำหนดแล้วจะทำการขึ้นสถานีนานใหม่ โดยทำการจัดสรรชั้นงานลงสู่สถานีนานจนครบทุกชั้นงาน

7. ประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์

4.3 ฟังก์ชันเทบปีเซฟ

วิธีการในการแปลงปัญหาหลายวัตถุประสงค์ให้เป็นปัญหาย่อยในเชิงสเกลาร์มีหลายวิธี วิธีที่เป็นที่นิยมคือการใช้ฟังก์ชันเทบปีเซฟ ตามสมการ (19)

$$\text{Minimize } g_j(x) = \min_{1 \leq i \leq m} \{ \lambda_{ij} |f_i(x) - z_i^*| \} \quad (19)$$

เมื่อ $g_j(x)$ คือ ผลต่างมากที่สุดระหว่างค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์กับค่าเป้าหมายที่คูณกับค่าน้ำหนักของสตริง j เมื่อ $j = 1, 2, \dots, N$ โดยที่ N เป็นจำนวนประชากร และ $i = 1, 2, \dots, m$ โดยที่ m คือ จำนวนวัตถุประสงค์ทั้งหมด, λ_{ij} คือ ค่าน้ำหนักของ วัตถุประสงค์ i ของปัญหาย่อย j , z_i^* คือ ค่าเป้าหมาย ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ i ในกรณีปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่น้อยที่สุดค่า $z_i^* = \min\{f_i(x)\}$ ในแต่ละจุด x^* จะเป็นคำตอบที่เหมาะสม

4.4 ขั้นตอนของอัลกอริทึม MOEA/D

ขั้นตอนของ MOEA/D ในการแก้ปัญหาหลายวัตถุประสงค์สำหรับการจัดสมดุคู่สายการประกอบรูปตัวยูซึ่งเป็นปัญหาการหาค่าที่น้อยที่สุด มีดังนี้

กำหนดพารามิเตอร์ของ MOEA/D

- จำนวนประชากร (N) = 11
- จำนวนปัญหาข้างเคียง (T) = 5
- จำนวนครั้งในการแทนที่คำตอบสูงสุด (R) = 2 ครั้ง/หนึ่งกลุ่มปัญหาข้างเคียง

ขั้นที่ 1 กำหนดจำนวนปัญหาย่อย (N) และสร้างเวกเตอร์ค่าน้ำหนักให้กับแต่ละปัญหาย่อยโดยใช้ซิมเพล็กซ์แลตทิซดีไซน์ (Simplex lattice design) ซึ่งเป็นเมทริกซ์ขนาด เท่ากับ จำนวนประชากร (N) $\times$ จำนวนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (m) ดังนั้นจำนวนมิติของค่าน้ำหนักจะเท่ากับจำนวนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ โดยที่ $\lambda_j = (\lambda_{1j}, \lambda_{2j}, \dots, \lambda_{mj})^T$ คือเวกเตอร์ค่าน้ำหนักของปัญหาย่อย j และ λ_{ij} คือค่าน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่ i ของปัญหาย่อยที่ j โดยที่ $j = 1, 2, \dots, N$, $i = 1, 2, \dots, m$, $\lambda_{ij} \geq 0$ และ $\sum_{i=1}^m \lambda_{ij} = 1$ ตัวอย่างเช่น เวกเตอร์ค่าน้ำหนักของปัญหาย่อยที่ 1 ซึ่งมีจำนวนวัตถุประสงค์ทั้งหมด 5 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ($m = 5$) $\lambda_1 = (\lambda_{11}, \lambda_{21}, \dots, \lambda_{51})^T = (0.1, 0.1, 0.6, 0.1, 0.1)^T$

ขั้นที่ 2 คำนวณค่า d_{jk} ซึ่งเป็นค่าระยะห่างระหว่างจุด (Euclidean distances) ของเวกเตอร์ค่าน้ำหนักของปัญหาย่อยที่ j กับ k

ขั้นที่ 3 สร้างสตริงคำตอบเบื้องต้นจำนวน N สำหรับปัญหาย่อยจำนวน N โดยให้ความยาวของสตริงเท่ากับจำนวนชั้นงานทั้งหมด ดังตารางที่ 4

ขั้นที่ 4 กำหนดจำนวนปัญหาข้างเคียง (T) ให้กับแต่ละปัญหาย่อย (N) โดยพิจารณาจากระยะห่างยูคลิดีเนียนของเวกเตอร์ค่าน้ำหนักระหว่างปัญหาย่อย

ขั้นที่ 5 พิจารณาปัญหาย่อยตัวแรก และปัญหาข้างเคียงของปัญหาย่อยแรกนี้ ทำการสุ่มสตริงคำตอบมาจำนวน 2 ตัว จากปัญหาข้างเคียงของปัญหาย่อยแรกที่กำลังพิจารณา เพื่อครอสโอเวอร์โดยวิธีการ Partial-Mapped Crossover (PMX) [16] คำตอบที่ได้จะเป็น

คำตอบรุ่นลูกจำนวน 2 คำตอบ จากตัวอย่างในที่นี้สุ่มได้ String 2 และ 3 และได้สตริงคำตอบรุ่นลูกตามตารางที่ 6

ขั้นที่ 6 ปรับปรุงคำตอบให้เป็นคำตอบที่เป็นไปได้

ขั้นที่ 7 ประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบทั้งหมดรวมทั้งสตริงคำตอบรุ่นลูก ดังตารางที่ 7

ขั้นที่ 8 ปรับปรุงค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด (z_i^*) จากประชากรทั้งหมด โดยกำหนดให้ $z_i^* = \min\{f_i(x)\}$ โดย $i = 1, 2, \dots, m$ ในตัวอย่างนี้จากประชากรทั้งหมดจะได้ $z_1^* = 6$, $z_2^* = 3$, $z_3^* = 5.4546$, $z_4^* = 0.0492$ และ $z_5^* = 0.2918$

ขั้นที่ 9 ประเมินค่าฟังก์ชันเทบปีเซบ $g_j(x)$ ของปัญหาข้างเคียง ดังตัวอย่างตารางที่ 8 โดยใช้การนอมอลไลซ์ (Normalization) ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์โดยจะใช้สมการที่ (21) ซึ่งเป็นสมการที่ปรับมาจากสมการ (19)

$$\text{Minimize } g_j(x) = \max_{1 \leq i \leq m} \left\{ \lambda_{ij} \left| \frac{f_i - z_i^*}{f_{i(\max)} - z_i^*} \right| \right\} \quad (21)$$

เมื่อ $j = 1, 2, 3, \dots, N$, f_i คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรปัจจุบันสำหรับวัตถุประสงค์ที่ i , z_i^* คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดตั้งแต่การดำเนินงานในรอบแรกถึงรอบปัจจุบันสำหรับวัตถุประสงค์ที่ i , $f_{i(\max)}$ คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มากที่สุดในรอบปัจจุบันในวัตถุประสงค์ที่ i ซึ่งในรอบนี้ได้ค่า

$$f_{1(\max)} = 7, \quad f_{2(\max)} = 6, \quad f_{3(\max)} = 6.4615 \\ f_{4(\max)} = 6.4515 \text{ และ } f_{5(\max)} = 0.5447 \text{ ดังตารางที่ 7}$$

ขั้นที่ 10 ประเมินค่าฟังก์ชันเทบปีเซบใหม่ โดยการแทนค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูกและพิจารณาแทนที่สตริงคำตอบ (ตัวอย่างการหาค่าดังตารางที่ 9) ดังนี้

1. สุ่มสตริงคำตอบรุ่นลูกเพื่อเลือกใช้เพียง 1 คำตอบโดยใช้ความน่าจะเป็นเท่ากัน ในที่นี้สุ่มได้ Offspring 2-1

2. กำหนดให้มีการนำค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูกที่ได้จากการสุ่มในข้อที่ 1 แทนลงใน

ฟังก์ชันเทบปีเซบของปัญหาข้างเคียงซึ่งเป็นตัวเดียวกับปัญหาย่อยที่พิจารณา ดังนั้นปัญหาย่อยนี้จะได้ค่าฟังก์ชันเทบปีเซบใหม่

3. สุ่มปัญหาข้างเคียงมา 1 ปัญหาโดยไม่ซ้ำปัญหาที่ถูกสุ่มแล้ว โดยให้ปัญหาข้างเคียงมีความน่าจะเป็นในการถูกสุ่มเลือกเท่ากัน แล้วแทนค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูกลงในฟังก์ชันเทบปีเซบของปัญหาข้างเคียงดังนั้นปัญหาข้างเคียงนี้จะได้ค่าฟังก์ชันเทบปีเซบใหม่

4. ค่าฟังก์ชันเทบปีเซบใหม่ที่ได้ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าฟังก์ชันเทบปีเซบเดิม (ที่ได้ในขั้นที่ 9) สามารถแบ่งได้เป็น 2 กรณี 1) ค่าฟังก์ชันเทบปีเซบใหม่ได้ค่าที่มากกว่าค่าเดิมในกรณีนี้แสดงว่าคำตอบใหม่ที่ได้จากสตริงคำตอบรุ่นลูกเป็นคำตอบที่ไม่เหมาะสมสำหรับปัญหาข้างเคียงนั้นจึงไม่ทำการแทนที่สตริงคำตอบเดิม 2) ค่าฟังก์ชันเทบปีเซบใหม่ได้ค่าที่น้อยกว่าค่าเดิมหรือเท่ากับที่ได้จากขั้นที่ 9 จะทำการแทนที่สตริงคำตอบเดิมของปัญหาข้างเคียงด้วยสตริงคำตอบรุ่นลูก

5. ทำขั้นตอน 3,4 ซ้ำ โดยสุ่มปัญหาข้างเคียงตัวอื่น ที่ไม่ซ้ำเดิมเพื่อให้เกิดการเพื่อแทนค่าฟังก์ชันเทบปีเซบโดยสตริงคำตอบรุ่นลูก และหยุดกระบวนการสุ่มในข้อที่ 3 เมื่อเกิดการแทนที่สตริงคำตอบครบตามจำนวนการแทนที่คำตอบสูงสุดที่กำหนด (R) หรือเมื่อสุ่มสตริงข้างเคียงจนครบ จะได้ค่าดังตารางที่ 9 และทำต่อในขั้นที่ 11

ขั้นที่ 11 เก็บค่าสตริงคำตอบของประชากรที่ดีที่สุด ในเซตของประชากรคำตอบภายนอก (External population :EP) เมื่อเซต EP ไม่มีสตริงคำตอบโดยอยู่จะทำการเพิ่มคำตอบเข้าไปในเซตนี้ แต่กรณีที่คำตอบเดิมอยู่จะเก็บค่าเฉพาะสตริงคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำจากคำตอบที่อยู่ในเซตนี้เท่านั้น

ขั้นที่ 12 ย้อนกลับไปทำขั้นที่ 5 โดยพิจารณาปัญหาหลักตัวถัดไป และปัญหาข้างเคียงของปัญหาย่อยที่กำลังพิจารณา และทำซ้ำขั้นตอนเดิมจนครบตามจำนวนประชากร เมื่อครบแล้ววนซ้ำตามเงื่อนไขที่กำหนด

ตารางที่ 4 สตริงคำตอบเริ่มต้นของการจัดสมมูลคู่สายการประกอบรูปตัวยูแบบผลิตภัณฑ์ผสม

String	Task															
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
1	4	2	3	1	15	10	8	7	9	6	13	5	11	14	16	12
2	8	13	12	10	15	9	11	16	6	5	4	7	2	14	1	3
3	8	11	10	15	16	9	7	12	6	1	5	13	4	14	2	3
4	15	16	7	5	14	8	6	13	1	10	2	3	11	9	4	12
5	3	8	2	14	10	6	11	1	16	15	5	13	9	4	7	12
6	9	12	6	3	11	1	16	8	15	5	13	2	10	7	14	4
7	12	16	14	11	5	13	6	9	7	8	10	15	1	3	2	4
8	15	16	7	5	14	8	6	13	1	10	2	3	11	9	4	12
9	7	14	2	4	1	11	9	15	8	12	13	5	6	3	10	16
10	14	3	4	9	1	11	13	16	2	15	6	8	7	10	12	5
11	10	12	5	11	2	6	3	9	15	1	13	7	4	14	16	8

ตารางที่ 5 เวกเตอร์ค่าน้ำหนักของประชากร (Weight vector)

String (j)	λ_j
1	(0.1, 0.1, 0.6, 0.1, 0.1)
2	(0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.6)
3	(0.1, 0.6, 0.1, 0.1, 0.1)
4	(1, 0, 0, 0, 0)
5	(0.6, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1)
6	(0, 0, 0, 1, 0)
7	(0, 0, 0, 0, 1)
8	(0.2, 0.2, 0.2, 0.2, 0.2)
9	(0, 1, 0, 0, 0)
10	(0, 0, 1, 0, 0)
11	(0.1, 0.1, 0.1, 0.6, 0.1)

ตารางที่ 6 สตริงคำตอบรุ่นลูก (feasible solution) ที่ได้จากการครอสโอเวอร์ของ String 2 และ String 3

Offspring	Task															
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
1-1	8	11	15	10	16	9	7	12	6	1	5	13	4	14	2	3
1-2	8	13	10	12	15	9	11	16	6	5	4	7	2	14	1	3

ตารางที่ 7 ตัวอย่างการประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรข้างเคียงและสตริงคำตอบรุ่นลูก

Neighborhood String (j)	Objective				
	N_w	N_s	$MIWR$	B_b	$B_{w(avg)}$
1	7	4	6.4167	0.1394	0.3874
8	7	5	6.3000	0.1029	0.4548
10	7	3	6.4167	0.0492	0.2918
2	7	4	6.4167	0.1137	0.4435
3	7	4	6.4615	0.1370	0.4333
Offspring 1-1	7	4	6.4167	0.1298	0.4388
Offspring 1-2	7	4	6.4167	0.1137	0.4435

ตารางที่ 8 ค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟของปัญหาข้างเคียง

Neighborhood String (j)	$\lambda_{ij} \left \frac{f_j - z_j^*}{f_{j(max)} - z_j^*} \right $					$g(x)$
	Obj. 1	Obj. 2	Obj. 3	Obj. 4	Obj. 5	
1	0.1000	0.0333	<u>0.5733</u>	0.1000	0.0378	0.5733
8	<u>0.2000</u>	0.1333	0.1679	0.1191	0.1289	0.2000
10	0.0000	0.0000	<u>0.9555</u>	0.0000	0.0000	0.9555
2	0.1000	0.0333	0.0956	0.0715	<u>0.3599</u>	0.3599
3	0.1000	<u>0.2000</u>	0.1000	0.0973	0.0560	0.2000

ตารางที่ 9 ค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟใหม่ของปัญหาข้างเคียงที่เกิดจากการแทนค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของ Offspring1-2 โดยใช้ค่าน้ำหนักของ String 1 และ 8

String (j)	$\lambda_{ij} \left \frac{f_j - z_j^*}{f_{j(max)} - z_j^*} \right $					New $g(x)$
	Obj. 1	Obj. 2	Obj. 3	Obj. 4	Obj. 5	
1	0.1000	0.0333	0.5733	0.0715	0.0600	0.5733
8	0.2000	0.1333	0.1679	0.1191	0.1289	0.2000

ตารางที่ 10 ปัญหาชิ้นงานที่ใช้ในการจัดสมมูลคู่สายการประกอบรูปตัวยู

No.	ปัญหา	จำนวน รุ่น	อัตราส่วน การผลิต	ปัญหา	จำนวน รุ่น	อัตราส่วน การผลิต	ชิ้น งาน รวม	รอบเวลา การผลิต (นาทีก)	Generation
P1	Jackson_11	3	1:2:1	Rosieg_25	2	3:1	36	18,22,26	500
P2	Rosieg_25	3	1:2:1	Rosieg_25	3	2:1:2	50	42,50,32	500
P3	Kilbridge_45	2	1:1	Heskiaoff_28	2	2:3	73	10902,4510, 11880	800
P4	Tonge_70	2	3:1	Wee-mag_75	3	1:1:1	145	210,252,303	1000

5. การทดลองทางคอมพิวเตอร์

5.1 การออกแบบทางการทดลอง

ในการทดลองได้ใช้ปัญหาตัวอย่างทั้งสิ้น 4 ปัญหา ซึ่งเป็นปัญหาที่อยู่ในช่วง 36 ถึง 145 ชิ้นงานโดยแต่ละปัญหาจะแบ่งออกเป็น 3 ปัญหาย่อยตามรอบเวลาการผลิตที่ต่างกันออกไป (รวมทั้งสิ้น 12 ปัญหาย่อย) ดังตารางที่ 10 ซึ่งจากปัญหาที่นำมาใช้ในการทดลองเป็นเซตของปัญหามาตรฐานสำหรับสายการประกอบรูปตัวยูเดี่ยว ซึ่งถูกนำมาจับคู่ ดังนั้นในแต่ละปัญหาดลอง (P1-P4) จึงประกอบด้วยปัญหามาตรฐาน 2 ปัญหา ที่แบ่งขนาดของปัญหาตามจำนวนชิ้นงานรวมได้ 4 ระดับตั้งแต่ปัญหา P1 ซึ่งเป็นปัญหามาตรฐานเล็กมีจำนวนชิ้นงานรวมน้อยที่สุด ไปจนถึงปัญหา P4 ซึ่งเป็นปัญหามาตรฐานใหญ่ที่มีจำนวนชิ้นงานรวมมากที่สุด เพื่อทำการทดสอบให้ครอบคลุมต่อช่วงขนาดชิ้นงานรวมของปัญหาดังกล่าว และทำการเปรียบเทียบกับอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบ

ฝูงอนุภาค พารามิเตอร์ของอัลกอริทึมที่ใช้ในการแก้ปัญหาแสดงดังตารางที่ 11 โดยในงานวิจัยนี้ใช้วิธีชิมเพลกแลกทิตในการสร้างเวกเตอร์น้ำหนักซึ่งส่งผลต่อการกำหนดจำนวนประชากรซึ่งในที่นี้ ใช้จำนวนประชากรเท่ากับ 131 ทั้ง อัลกอริทึม MOEA/D และ MOPSO สำหรับการแบ่งค่าน้ำหนักโดยวิธีชิมเพลกซ์แลตทิสเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการหาค่าตอบจะมีความแตกต่างกันโดยขึ้นอยู่กับจำนวนวัตถุประสงค์และการกำหนดการแบ่งช่วงของค่าน้ำหนัก ซึ่งสามารถศึกษาเพิ่มเติมจากงานวิจัย[11] กำหนดจำนวนปัญหาข้างเคียงของ MOEA/D เท่ากับ 10 [11] จำนวนครั้งในการแทนที่สูงสุดต่อรอบดำเนินงานของ 1 ปัญหาย่อย (Maximum number of replacement: R) ของ MOEA/D ถูกกำหนดให้เท่ากับ 5 (หรือคิดเป็น 50% ของจำนวนประชากรข้างเคียง) ในส่วนของ MOPSO ค่าน้ำหนักการหน่วง (inertia weight) กำหนดให้เท่ากับ 1 ([17], [18]) สำหรับพารามิเตอร์อื่นๆ ได้แก่ ค่าสัมประ

สิทธิ์การเรียนรู้ (Learning factor: c_1, c_2) ของ MOPSO ได้มาจากการทดลองแบบ Full Factorial Design จำนวน 3 Replicate

ตารางที่ 11 พารามิเตอร์ของอัลกอริทึมสำหรับปัญหา P1-P4

MOEA/D	
Population size	131
Neighborhood	10
Maximum number of replacement	5
MOPSO	
Population size	131
Inertia weight	1
Learning factor	$c_1 = 1.5, c_2 = 1$

5.2 ตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึม

งานวิจัยนี้ใช้ตัวชี้วัดเชิงปริมาณเพื่อประเมินและเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ จำนวนทั้งสิ้น 5 ตัวชี้วัด ได้แก่ 1) การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (Convergence to Pareto optimal Set) 2) การกระจายตัวของกลุ่มคำตอบที่ได้ (Spread) ซึ่งหากกลุ่มคำตอบมีระยะห่างระหว่างคำตอบที่สม่ำเสมอจะมีการกระจายตัวที่ดี 3) อัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำของอัลกอริทึมที่อยู่ในกลุ่มคำตอบที่แท้จริงเทียบกับจำนวนคำตอบที่ดีที่สุดที่อัลกอริทึมหาได้ (Ratio of Non-dominated Solutions: self-comparison: RNDs1) 4) อัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำซึ่งเป็นคำตอบที่แท้จริงที่อัลกอริทึมหาได้ เมื่อเทียบกับกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริงทั้งหมด (Ratio of Non-dominate solution: Pareto-optimum comparison: RNDs2) ซึ่ง RNDs1 เป็นตัวบ่งชี้ว่าคำตอบที่ดีที่สุดที่อัลกอริทึมนั้นได้มาจะมีคำตอบที่แท้จริงอยู่เป็นอัตราส่วนเท่าไร ซึ่งเป็นการประเมินประสิทธิภาพการหาคำตอบ

ของอัลกอริทึมเดียวเท่านั้น จึงจำเป็นต้องนำ RNDs2 มาพิจารณาร่วมด้วยซึ่ง RNDs2 จะเป็นตัวเปรียบเทียบว่าคำตอบที่แท้จริงที่ได้จากอัลกอริทึมที่สนใจมีอัตราส่วนเป็นเท่าไรเมื่อเปรียบเทียบกับจำนวนคำตอบที่แท้จริงทั้งหมดที่รวบรวมคำตอบจากอัลกอริทึมอื่นด้วย และ 5) เวลาที่ใช้ในการหาคำตอบ

5.3 ผลการทดลอง

ในการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับปัญหาการจัดสมดุลในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม MATLAB ประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์ Intel® Core™ i7-7700HQ CPU@2.8GHz RAM 8.00 GB ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 12

จากการทดลองเมื่อพิจารณาจำนวนสถานีงาน (N_w) และ จำนวนสถานี (N_s) น้อยที่สุดที่ได้ พบว่าอัลกอริทึม MOEA/D สามารถค้นหาคำตอบได้ดีเทียบเท่ากับ MOPSO โดยให้ค่าที่เหมาะสมที่สุดเท่ากัน ซึ่งมีจำนวนสถานีงานเท่ากับค่า lower bound ในปัญหา P1 ที่รอบเวลาการผลิตเท่ากับ 36 และ P2 ที่รอบเวลาการผลิต 50 และ 52 และในปัญหาที่เหลือสามารถหาค่าจำนวนสถานีงานที่น้อยที่สุดได้เท่ากับค่า Optimal ยกเว้นปัญหา P4 ที่รอบเวลาการผลิตเท่ากับ 252 มีจำนวนสถานีงานที่ได้มากกว่าค่า Optimal

เมื่อเปรียบเทียบสมรรถนะในการหาคำตอบโดยดูจากค่าตัวชี้วัด แสดงให้เห็นว่า MOEA/D มีสมรรถนะที่เหนือกว่า MOPSO ในด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่า MOEA/D มีค่า convergence ที่มีค่าน้อยกว่าค่าของ MOPSO และมีตัวชี้วัดด้านอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำค่า RNDs1 และ RNDs2 ที่มากกว่า MOPSO แสดงให้เห็นถึงคุณภาพคำตอบที่ MOEA/D หาได้นั้นมีอัตราส่วนของคำตอบที่แท้จริงมีมากกว่าและมีจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำอยู่ในกลุ่มคำตอบที่แท้จริงมากกว่า MOPSO

ในด้านการกระจายตัวของคำตอบ MOEA/D และ MOPSO มีความใกล้เคียงกันและมีค่าการกระจายตัว เข้า

ใกล้ 1 ซึ่งหมายถึงการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบไม่สม่ำเสมอ

ด้านเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบ พบว่าทั้งสองอัลกอริทึมใช้เวลาในการหาคำตอบใกล้เคียงกัน

จากผลการทดลองข้างต้นจึงสามารถสรุปได้ว่า MOEA/D มีสมรรถนะในการหาคำตอบที่ดีกว่า MOPSO ในด้านการเข้าสู่คำตอบที่แท้จริง (Convergence) และ

ด้านอัตราส่วนที่ไม่ถูกครอบงำ (RND S1, RND S2) ในปัญหาทุกขนาด ซึ่งจะเห็นได้จากการที่คำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริงที่ประมาณได้มาจาก MOEA/D เป็นส่วนใหญ่ โดยที่การกระจายตัวของคำตอบของทั้งสองอัลกอริทึมไม่สม่ำเสมอซึ่งมีค่าการกระจายตัวใกล้เคียงกัน และทั้งสองอัลกอริทึมสามารถหาค่าจำนวนสถานีงาน (N_w) และจำนวนสถานี (N_s) ที่น้อยที่สุดได้ดีและไม่แตกต่างกัน

ตารางที่ 12 ผลการทดลองในการแก้ปัญหาตัวอย่าง

Problem	P1			P2			P3			P4		
No. of Task (Line1-Line2)	32 (21-11)			50 (25-25)			73 (45-28)			145 (70-75)		
Cycle Time	30	36	42	42	50	52	10902	4510	648	210	252	303
Number of workstation (Nw)												
Optimal	11	10	8	9	8	12	15	10	10	39	32	27
Lower bound (Balance together)	11	9	8	9	7	11	15	10	10	38	32	27
MOEA/D	11	9	8	9	7	11	15	10	10	39	33	27
MOPSO	11	9	8	9	7	11	15	10	10	39	33	27
Number of Station (Ns)												
MOEA/D	4	4	3	3	3	4	5	4	4	12	11	9
MOPSO	4	4	3	3	3	4	5	4	4	12	11	9
Convergence												
MOEA/D	0.065	0.029	0.017	0.110	0.085	0.039	0.086	0.073	0.057	0.005	0.000	0.000
MOPSO	0.094	0.129	0.120	0.136	0.184	0.276	0.487	0.108	0.218	0.385	0.223	0.181
Spread												
MOEA/D	0.880	0.864	0.924	1.020	0.869	0.780	0.962	0.974	1.049	0.996	0.842	0.872
MOPSO	0.713	0.885	0.816	0.824	0.861	0.969	0.862	0.863	0.838	0.685	0.721	0.786
RND S1												
MOEA/D	0.534	0.682	0.736	0.333	0.513	0.723	0.545	0.587	0.702	0.980	1.000	0.990
MOPSO	0.236	0.196	0.081	0.420	0.217	0.076	0.043	0.094	0.077	0.017	0.064	0.100
RND S2												
MOEA/D	0.673	0.753	0.893	0.424	0.712	0.915	0.925	0.880	0.909	0.962	0.943	0.933
MOPSO	0.327	0.247	0.131	0.576	0.288	0.085	0.075	0.120	0.091	0.038	0.057	0.067
CPU time(s)												
MOEA/D	2286	2161	1873	2798	4995	4204	10589	11541	8462	52158	56729	47794
MOPSO	2216	1940	2057	2764	4636	3684	11335	9951	8522	49273	56714	44023

6. สรุป

บทความนี้นำเสนอการแก้ปัญหาการจัดสมดุลคู่สายการประกอบรูปตัวยูซึ่งเป็นการประยุกต์ใช้ประโยชน์ของสายการประกอบขนาน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการจัดสมดุลสายการประกอบรูปตัวยูแบบเดี่ยว และเพื่อลดข้อจำกัดด้านพื้นที่ของสายการประกอบขนานในงานวิจัยที่ผ่านมา งานวิจัยนี้เสนอปัญหาการจัดสมดุลในรูปแบบมากวัตถุประสงค์ โดยใช้วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (MOEA/D) ในการแก้ปัญหาและทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบฝูงนก (MOPSO) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้แก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบ พบว่าอัลกอริทึม MOEA/D นั้นสามารถหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดในปัญหามากวัตถุประสงค์ได้ดีกว่า MOPSO เนื่องจาก MOEA/D มีผลค่าตัวชี้วัดสมรรถนะในด้านการเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง และตัวชี้วัดด้านอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำ (RND1, RND2) ที่ดีกว่าอัลกอริทึม MOPSO ในปัญหาทุกขนาด ซึ่งจะเห็นว่าคำตอบที่ MOEA/D หาได้เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงเกือบทั้งหมด จึงสามารถสรุปได้ว่า MOEA/D เป็นอัลกอริทึมที่สามารถนำมาใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลคู่สายการประกอบรูปตัวยูที่มีรูปแบบผลิตภัณฑ์ผสมและมีวัตถุประสงค์จำนวนมากได้อย่างมีประสิทธิภาพ

สำหรับแนวทางการศึกษาต่อยอดการแก้ปัญหาการจัดสมดุลในอนาคต สามารถพัฒนาวิธีการจัดสมดุลในรูปแบบของสายการประกอบรูปตัวยูหลายสาย (Multiple U-shaped line) หรือนำปัญหาการจัดลำดับการผลิตมาพิจารณาเป็นวัตถุประสงค์เพิ่มเติมเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพมากขึ้น นอกจากนี้ยังมีวัตถุประสงค์ในด้านอื่นที่สามารถนำมาพิจารณาเพิ่มเติมในทางปฏิบัติเช่น การลดค่าใช้จ่ายด้านเครื่องมือ การลดรอบเวลาการผลิต การจัดตารางการผลิต และ การพัฒนาผลิตภาพแรงงาน (labor productivity) เป็นต้น

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] ปารเมศ ชูติมา, รณชัย ศิริโรვნกุล.เทคนิคการจัดสมดุลสายการประกอบ.2560. ครั้งที่1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [2] G. J. Miltenburg, and J. Wijnngaard, "The U-line line balancing problem," Management science, vol. 40, pp. 1378-1388, 1994.
- [3] C. H. Cheng, J. Miltenburg, and J. Motwani, "The effect of straight-and U-shaped lines on quality," IEEE Transactions on Engineering Management, vol. 47, no. 3, pp. 321-334, 2000.
- [4] R. Askin and M. Zhou, "A parallel station heuristic for the mixed-model production line balancing problem," International Journal of Production Research, vol. 35, no. 11, pp. 3095-3106, 1997.
- [5] สุชาติ คัดอ่าน, "การประยุกต์ใช้เมมเมติกอัลกอริทึมสำหรับปัญหาการจัดสมดุลที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวยูที่มีสถานีงานแบบขนาน ในระบบผลิตแบบทันเวลาพอดี," วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม. จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย, 2553.
- [6] I. Kucukkoc and D.Z. Zhang, "Balancing of parallel U-shaped assembly lines," Computers & Operations Research, vol. 64, pp. 233-244, 2015.
- [7] H. Gökçen, K. Ağpak, and R. Benzer, "Balancing of parallel assembly lines," International Journal of Production Economics, vol. 103, no. 2, pp. 600-609, 2006.

- [8] H. Gökçen, et al., "A shortest route formulation of simple U-type assembly line balancing problem. Applied Mathematical Modelling," vol. 29, no. 4, pp. 373-380, 2005.
- [9] เพ็ญนภัส จิรัชัย, "การแก้ปัญหาการจัดสมดุล สายการประกอบมากวัตถุประสงค์บนสายการ ประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวยูขนาน,"วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2561.
- [10] W. C. Chiang , P. Kouvelis, and T.L. Urban, "Line balancing in a just-in-time production environment: balancing multiple U-lines," IIE Transactions, vol. 39, no. 4, pp. 347-359, 2007.
- [11] Q.Zhang and H. Li, "MOEA/D: A multiobjective evolutionary algorithm based on decomposition," IEEE Transactions on evolutionary computation, vol. 11, no. 6, pp. 712-731, 2007.
- [12] D.I. Petropoulos and A.C. Nearchou, "A particle swarm optimization algorithm for balancing assembly lines", Assembly Automation, vol. 31, no. 2, pp. 118-129, 2011.
- [13] D. Sparling and J. Miltenburg, "The mixed-model U-line balancing problem," International Journal of Production Research, vol. 36, no. 2, pp. 485-501, 1998.
- [14] ณัฐชัย โยธาบริบาร และ ปารเมศ ชูติมา, "การจัดสมดุลที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการ ประกอบแบบขนานผลิตภัณฑ์ผสมด้วยการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์," Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok (วารสาร วิชาการ พระจอมเกล้า พระนครเหนือ), vol. 25, no. 1, pp. 73-90, 2015.
- [15] A.S.Simaria and P.M. Vilarinho, "A genetic algorithm based approach to the mixed-model assembly line balancing problem of type II", Computers & Industrial Engineering, vol. 47, no. 4, pp. 391-407, 2004.
- [16] V. Singh, and S. Choudhary, "Genetic algorithm for traveling salesman problem: Using modified partially-mapped crossover operator," 2009 International Multimedia, Signal Processing and Communication Technologies., India., Aligarh, 2009, pp. 23-26.
- [17] P.Fattahi and P. Samouei, "A Multi-Objective Particle Swarm Optimization for Mixed-Model Assembly Line Balancing with Different Skilled Workers," Journal of Optimization in Industrial Engineering, vol. 9, no. 20, pp. 9-18, 2016.
- [18] P.Chutima and P. Chimklai, "Multi-objective two-sided mixed-model assembly line balancing using particle swarm optimisation with negative knowledge," Computers & Industrial Engineering, vol. 62, no. 1, pp. 39-55, 2012.

การทดสอบในห้องปฏิบัติการด้วยแบบจำลองเพื่อตรวจสอบพฤติกรรมการยุบตัวของ
คาน้ำของชั้นดินเหนียวที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์
แบบไม่หยั่งลึกกับแผ่นพื้นดินซีเมนต์

Laboratory Model Testing for Investigating the Consolidation Behavior of
Soft Clayey Deposit Improved by a Floating Soil-Cement Column with a
Cement Stabilized Slab

สุธี ปิยะพิพัฒน์^{1*} ศุภสิทธิ์ พงศ์วิเศษสิทธิ์²

^{1,2}ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Suthee Piyaphipat^{1*} Supasit Pongsivasathit²

^{1,2}Assistance Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering

Rajamangala University of Technology Thanyaburi

*Corresponding author: Email: suthee.p@en.rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติการยุบตัวของคาน้ำ ของชั้นดินเหนียวอ่อนที่ถูกปรับปรุงด้วย เสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึกร่วมกับแผ่นพื้นดินซีเมนต์ด้วยการทดสอบแบบจำลองในห้องปฏิบัติการ แบบจำลองรูป ทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.45 เมตร สูงเท่ากับ 0.8 เมตร ถูกนำเป็นแบบจำลองการทดสอบ ทำ การทดสอบ 4 กรณีศึกษาเพื่อศึกษาถึงผลกระทบของความหนาแน่นและค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของ แผ่นพื้น ส่วนค่าพารามิเตอร์ได้แก่ อัตราส่วนการปรับปรุงพื้นที่ อัตราส่วนการปรับปรุงความลึก และน้ำหนักกระทำ ถูก กำหนดให้คงที่ ดินที่นำมาทำชั้นดินเหนียวเพื่อศึกษาคุณสมบัติได้แก่ ดินเหนียวกรุงเทพ จากผลการทดสอบพบว่า การ เพิ่มขึ้นของความหนาแน่นแผ่นพื้นดินซีเมนต์ทำให้ลดค่าการทรุดตัวของชั้นดินอย่างมีนัยสำคัญ ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ ระบายน้ำของแผ่นพื้นไม่มีผลต่อคุณสมบัติการยุบตัวของคาน้ำ จากนั้นนำสูตรที่มีอยู่ของ Pongsivasathit และคณะ มา ประยุกต์ใช้กับทั้ง 4 กรณีศึกษาเพื่อหาค่าการทรุดตัวสุดท้าย นำผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณมาเปรียบเทียบกับผลทดสอบ พบว่า สูตรดังกล่าวให้ค่าการทรุดตัวเกินกว่าค่าที่วัดได้มากขึ้นเมื่อแผ่นพื้นดินซีเมนต์มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: การปรับปรุงคุณภาพดิน เสาเข็มดินซีเมนต์ การทดสอบในห้องปฏิบัติการด้วยแบบจำลอง

ABSTRACT

This research aims to investigate the consolidation behavior of soft clayey deposit improved by the floating soil cement column with the cement stabilized slab on the ground surface by the laboratory model test. The cylinder mold with 0.45 m in diameter and 0.8 m in height was used for the laboratory model test. Four cases of testing were conducted for investigating the effect of slab thickness and undrained shear strength of slab. The other parameters as the area improvement ratio,

the depth improvement ratio and loading intensity were fixed. Bangkok clay was used as soil sample for making a soft clayey deposit. As results, it can be seen that the increase of slab thickness reduces the consolidation settlement significantly. The undrained shear strength of slab effects on the consolidation behavior slightly. The existing method of Pongsivasathit et al. was applied to 4 cases of laboratory test for estimating the final consolidation settlement. The calculated results were compared with the measured results. Obviously, this method over-predicts gradually the settlement when the slab thickness increases gradually.

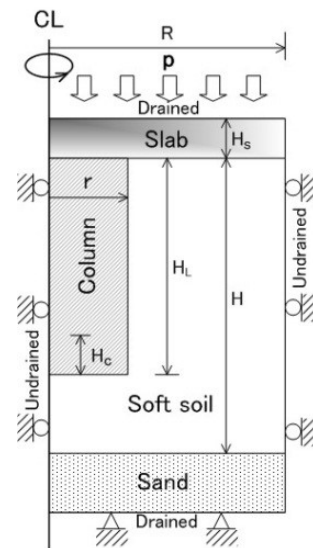
Keyword: Ground improvement, floating soil-cement column, laboratory model test.

1. บทนำ

เทคนิคการผสมปูนซีเมนต์แบบลึก (Deep Mixing Method) เพื่อให้ปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยาจับตัวกันกับดินแล้วแข็งตัวเป็นลักษณะของเสาเข็มในชั้นดิน ทำให้ชั้นดินเหนียวอ่อนมีค่าการทรุดตัวลดลงและมีความสามารถในการรับน้ำหนักที่สูงขึ้น ([1], [2]) เป็นเทคนิคที่ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศไทย ในปัจจุบันมีความพยายามที่จะลดราคาค่าก่อสร้างและลดผลกระทบอันเนื่องจากความยาวเสาเข็มไปรบกวนระดับน้ำใต้ดิน โดยการใช้เสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึก (Floating Soil-Cement Column) ทั้งแบบที่มีและไม่มีแผ่นพื้นดินผสมซีเมนต์ (Cement Stabilized Slab) บนผิวดินหรือหัวเสาเข็มดินซีเมนต์ ([3], [7]) การออกแบบเสาเข็มดินซีเมนต์ประเภทนี้จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องคำนวณค่าการทรุดตัวขั้นปฐมภูมิ แต่เนื่องจากพฤติกรรมการยุบตัวของคาน้ำของเสาเข็มดินซีเมนต์ประเภทนี้จะมีควมซับซ้อนมากกว่าเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีความยาวแบบปกติ ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาวิจัยเพิ่มเติม

JICE [5] ได้เสนอวิธีการคำนวณการทรุดตัวสุดท้ายของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึก ที่ใช้ปรับปรุงชั้นดินเหนียวอ่อน และวิธีนี้ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศญี่ปุ่น วิธีนี้ค่าการจมสัมพัทธ์ของเสาเข็มดินซีเมนต์ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการปรับปรุงพื้นที่ (Area improvement ratio, α) เมื่อค่า α เป็นอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม (d_c) กับเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นที่

ที่ถูกปรับปรุง (d_e) โดยค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้น แต่วิธีนี้ในทางปฏิบัติพบว่า ค่าการทรุดตัวที่ได้ ยังห่างจากค่าที่ได้จากการวัดในภาคสนามอยู่พอสมควร [3]



รูปที่ 1 แบบจำลองหนึ่งหน่วยสำหรับเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึก

Chai et al. [3] ได้ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการด้วยแบบจำลองหนึ่งหน่วย (Unit cell model) และทำการวิเคราะห์ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขด้วย วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) ของชั้นดินเหนียวที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ จากนั้นทำการเสนอวิธีการคำนวณค่าการทรุดตัวสุดท้าย โดยวิธีนี้สามารถพิจารณาผลกระทบเนื่องจากค่า α และค่าอัตราส่วนการปรับปรุง

ความลึก (Depth improvement ratio, β) เมื่อค่า β คือ อัตราส่วนระหว่างความยาวของเสาเข็ม (H_L) ไม่รวมความหนาของแผ่นพื้นดินซีเมนต์ กับความลึกของชั้นดินเหนียว (H) สำหรับค่าการทรุดตัว สามารถคำนวณได้จากการแบ่งดินเป็นสองชั้น โดยที่ชั้นบนหรือชั้นที่ถูกปรับปรุง (H_1) มีความหนาเท่ากับ $H-H_c$ แล้วใช้ทฤษฎียึดหยุ่นคำนวณหาการยุบตัวของชั้นดินชั้นนี้ โดยที่ค่า H_c ดังแสดงในรูปที่ 1 เป็นฟังก์ชันของค่า H_L , β และ α ส่วนชั้นล่างหรือชั้นดินที่ถือว่าไม่ได้ถูกปรับปรุง มีความหนาเท่ากับ $H-H_1$ ค่าการทรุดตัวของชั้นนี้ให้คำนวณจากคุณสมบัติของชั้นดินเหนียวเพียงอย่างเดียว

จากนั้น Chai and Pongsivasathit [4] ได้เสนอวิธีการคำนวณหาเส้นโค้งการทรุดตัวกับเวลา ของชั้นดินที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึก โดยที่ค่าองศาการยุบอัดตัวคายน้ำ (Degree of Consolidation) ของระบบนี้ สามารถหาได้จากทฤษฎีการยุบอัดตัวคายน้ำของดินที่มีลักษณะเป็นสองชั้น (Double soil-layer consolidation theory) สำหรับวิธีการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Coefficient of permeability, k) และค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงปริมาตร (Coefficient of volume compressibility, m_v) ได้ถูกนำเสนอ แต่วิธีจะให้ค่าการทรุดตัวที่มากเกินไปในกรณีน้ำหนักบรรทุกทุก (Loading intensity, p) น้อยกว่า 50 kPa และจะให้ค่าต่ำเกินไปในกรณีที่ค่า p มากกว่า 150 kPa

Pongsivasathit et al. [6] ได้ทำการศึกษาทดลองภายในระหว่างเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึกกับดินที่อยู่บริเวณรอบๆ ด้วยการทดลองแบบจำลองในห้องปฏิบัติการควบคู่ไปกับการทำ FEM โดยใช้แบบจำลองหนึ่งหน่วยสมมาตร (Axisymmetric Unit cell model) อีกครั้ง ในครั้งนี้ทั้งแบบมีและไม่มีแผ่นพื้นดินซีเมนต์กับกรณีที่ไม่แผ่นพื้นดินซีเมนต์ ด้วยค่าอัตราส่วนการปรับปรุงความลึกเดียวกัน ค่าพารามิเตอร์ใหม่สำหรับกรณีที่มีแผ่นพื้นดินซีเมนต์ได้ถูกนำเสนอ ดังนี้

$$\beta' = \frac{H_L + H_s}{H + H_s} \quad (1)$$

เมื่อค่า β' คืออัตราส่วนการปรับปรุงความลึกในกรณีที่มีแผ่นพื้นดินซีเมนต์

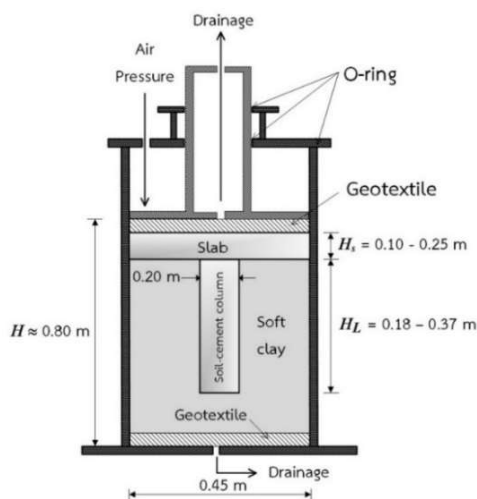
จากนั้น นำผลการศึกษาที่ได้มาปรับปรุงวิธีการคำนวณหาเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลาของ Chai and Pongsivasathit [4] โดยที่ H_c ถูกปรับปรุงให้เป็นฟังก์ชันของค่า H_L , อัตราส่วนการปรับปรุงพื้นที่ (Area improvement ratio, α), อัตราส่วนการปรับปรุงความลึก (Depth improvement ratio, β), น้ำหนักที่กระทำ (Loading intensity, p) และค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained shear strength, s_u) ของดินเหนียวบริเวณปลายเสาเข็ม

อย่างไรก็ตามการที่มีแผ่นพื้นดินซีเมนต์วางบนเสาเข็มนั้น เพื่อช่วยลดความเข้มข้นของหน่วยแรง (Stress concentration, n) ที่กระทำบนเสาเข็ม พบว่าความยึดหยุ่นของแผ่นพื้นดินซีเมนต์มีผลลงเมื่อมีความหนาของแผ่นพื้นดินซีเมนต์ (Slab thickness, H_s) เพิ่มขึ้น ยิ่งความหนาของแผ่นพื้นมากๆ แผ่นพื้นยังมีพฤติกรรมเป็นวัสดุแข็งเกร็ง แต่ในการวิเคราะห์ด้วย FEM ของ Pongsivasathit et al. [6] ได้สมมติให้ค่าความหนาของแผ่นพื้นคงที่เท่ากับ 1 เมตร ซึ่งมีพฤติกรรมเป็นแบบวัสดุยึดหยุ่น ดังนั้นงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของการทรุดตัวของชั้นดินที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึกร่วมกับแผ่นพื้นดินซีเมนต์ ที่มีผลต่อค่า H_s และค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของแผ่นพื้น ($(q_u)_{slab}$) เพื่อหาข้อสรุปในการปรับปรุงวิธีการหาค่าการทรุดตัวกับเวลาของระบบนี้ต่อไป

2. แบบจำลองทดสอบและวัสดุที่ใช้

รูปที่ 2(a) และ 2(b) แสดงรูปแบบจำลองทดสอบและภาพจำลองภายในของแบบจำลอง ซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.45 เมตร และมีความสูงเท่ากับ 0.8 เมตร ทำจากวัสดุ PVC

ดินที่ใช้ในการวิจัยนี้ คือ ดินเหนียวกรุงเทพฯ ที่ถูกเก็บตัวอย่างแบบถูกรบกวน มีคุณสมบัติของดินดังแสดงในตารางที่ 1 ในการบรรจุจะค่อยๆ ไล่ดินลงไปโดยระมัดระวังไม่ให้เกิดช่องว่างในระหว่างบรรจุ ส่วนซีเมนต์ใช้ปูนปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งเป็นซีเมนต์ที่นิยมใช้เพื่อปรับปรุงคุณภาพชั้นดินสำหรับประเทศไทย ใช้แผ่นใยสังเคราะห์ (Geotextile) ทำจากวัสดุประเภท Polypropylene ที่มีความหนาแน่นประมาณ 140 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความหนา 3 มิลลิเมตร เป็นวัสดุในการช่วยระบายที่บริเวณด้านล่างและด้านบนของแบบจำลองทดสอบ การเร่งอัตราการทรุดตัวใช้ Mini-PVD ที่ทำจาก แผ่นใยสังเคราะห์ม้วนเป็นแท่งประมาณ 3 ชั้นซ้อนกัน มีหน้าตัดประมาณ 30×9 ตารางมิลลิเมตร



(a) ภาพรูปตัดจำลองภายในของแบบจำลอง



(b) แบบจำลองทดสอบ

รูปที่ 2 แบบจำลองในห้องปฏิบัติการ

สำหรับกรณีศึกษาแบ่งออกเป็น 4 กรณี ดังแสดงในตารางที่ 2 กรณีศึกษาที่ 1, 2 และ 4 ใช้สำหรับศึกษาผลกระทบเนื่องจากความหนาของแผ่นพื้น ส่วนกรณีที่ 3 และ 4 ใช้สำหรับตรวจสอบผลกระทบเนื่องจากค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของแผ่นพื้น ($(q_u)_{slab}$) จากตารางที่ 2 ที่ปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 16.42% และ 25.65 % ของน้ำหนักดินแห้ง มีค่ากำลังรับแรงกดอัดทิศทางเดียว (q_u) เท่ากับ 400 kPa และ 800 kPa ตามลำดับ ซึ่งได้จากผลการทดสอบแรงกดอัดทิศทางเดียวของดินเหนียวกรุงเทพฯ ผสมซีเมนต์ที่ปริมาณต่างๆ

3. ขั้นตอนการทดลอง

สำหรับขั้นตอนการทดสอบ สามารถแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.1 ขั้นตอนการทำชั้นดินเหนียว

เริ่มจากวางแผ่นใยสังเคราะห์จำนวน 3 แผ่นที่ด้านล่างของแบบจำลองเพื่อเป็นชั้นระบายน้ำ จากนั้นหาจาระบีบางๆ ที่บริเวณผิวด้านในของแบบจำลอง เพื่อลดแรงเสียดทานที่จะเกิดขึ้นระหว่างดินเหนียวกับผนังของแบบจำลอง จากนั้นนำดินเหนียวตัวอย่างผสมกับน้ำ (Reconstituted soil samples) ให้มีปริมาณความชื้นเท่ากับ 68% ซึ่งสูงกว่าค่าขีดจำกัดเหลว ทั้งนี้เพื่อความง่ายต่อการบรรจุดินลงในแบบจำลอง จากนั้นค่อยๆ บรรจุดินเหนียวลงในแบบจำลองโดยระวังไม่ให้เกิดช่องว่าง จนกระทั่งชั้นดินเหนียวมีความหนาประมาณ 800 มิลลิเมตร จึงทำการใส่ Mini-PVD ที่กึ่งกลางของแบบจำลองโดยใช้แท่งเหล็กดันเข้าไปในชั้นดินเหนียวจนถึงด้านล่าง แล้ววางทับด้วยแผ่นใยสังเคราะห์จำนวน 3 แผ่นที่ผิวบนของชั้นดิน ดังแสดงในรูปที่ 3 ประกอบอุปกรณ์ให้น้ำหนักกระทำด้วยแรงดันลม ดังแสดงในรูปที่ 2 จากนั้นเริ่มให้น้ำหนักกระทำคงที่เท่ากับ 40 kPa เพื่อให้ดินยุบอัดตัวคายน้ำ ภายใต้สภาพการระบายน้ำแบบสองทาง (Two-ways drainage) ในระหว่างการให้น้ำหนักกระทำ ทำการจดบันทึกค่าการทรุดของชั้นดิน

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของดินที่ใช้ในการทดสอบ

ชนิดดิน	w_L (%)	w_p (%)	γ_t (kN/m ³)	ν	λ	e_0	G_s	k_h ($\times 10^{-5}$ m/day)	k_v ($\times 10^{-5}$ m/day)
Bangkok clay	46.64	35.15	16.321	0.3	0.2496	1.38	2.67	0.432	0.432

หมายเหตุ: w_L คือค่าขีดจำกัดความเหลว, w_p คือค่าขีดจำกัดพลาสติก, γ_t คือหน่วยน้ำหนักรวม, ν คือค่าอัตราส่วนปัวซอง, λ คือความชันของเส้น virgin compression ในกราฟความสัมพันธ์ $e - \ln p'$, e_0 คือค่าอัตราส่วนช่องว่างตอนเริ่มต้น, G_s คือค่าความถ่วงจำเพาะ, k_h และ k_v คือค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินในแนวระนาบและในแนวดิ่ง ตามลำดับ.

ตารางที่ 2 กรณีสึกษา

กรณีสึกษา	ปริมาณซีเมนต์ (%)		ความหนา H_s (mm)	α (%)	β' (%)	β (%)
	เสาเข็ม	แผ่นพื้น				
1	16.42	16.42	0	20	70	70
2	16.42	16.42	100	20	70	64.1
3	16.42	25.65	100	20	70	64.3
4	16.42	16.42	250	20	70	49.6



รูปที่ 3 แผ่น Geotextile และ Mini-PVD

3.1 ขั้นตอนการทำเสาเข็มและแผ่นพื้นในแบบจำลอง

เมื่อค่าระดับการยุบตัวของดินเหนียวในแบบจำลองมีค่าประมาณ 90% จึงหยุดการให้น้ำหนักกระทำ เปิดแบบจำลองออก นำแผ่นใยสังเคราะห์ที่ด้านบน และ Mini-PVD ที่กึ่งกลางของแบบจำลองออกจากแบบจำลอง ถึงขั้นตอนนี้ดินเหนียวเกิดการหลุดตัวเหลือความหนาของดินเหนียวประมาณ 630 มิลลิเมตร เพื่อพิจารณาผลกระทบของแผ่นพื้นดินซีเมนต์ ค่า α และ

ค่า β ถูกทำให้คงที่เท่ากับ 20% และ 70% ตามลำดับ ในทุกกรณีสึกษา จากนั้นเจาะรูที่บริเวณกึ่งกลางของแบบจำลองให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 200 มิลลิเมตร และมีความลึกเท่ากับ 440 มิลลิเมตร ด้วยอุปกรณ์การเจาะสำรวจดินด้วยมือเปล่า (Hand auger) ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 การเจาะดินเพื่อทำเสาเข็มดินซีเมนต์

หลังจากการเจาะรูเสร็จสิ้น สำหรับกรณีสึกษาที่ 2, 3 และ 4 ให้ทำการขุดหน้าผาดินออกลึกประมาณ 100

– 250 มิลลิเมตร สำหรับเตรียมทำแผ่นพื้น เนื่องจากการนำ Mini-PVD ออกจะเกิดรูเล็กๆ ที่บริเวณด้านล่างของรูเจาะ นำดินมาเติมรูเล็กๆ นั้นจนเต็ม จากนั้นดินที่ถูกขุดออกมานำมาผสมกับซีเมนต์ (16.6% และ 25.65% โดยน้ำหนักดินแห้ง) และเพื่อให้ง่ายต่อการผสม ดินที่ถูกขุดออกมาถูกนำมาผสมน้ำให้มีค่าปริมาณความชื้นเท่ากับ 68% ก่อนการผสม สำหรับกรณีที่ 1 ซึ่งเป็นกรณีไม่มีแผ่นพื้นดินซีเมนต์นำดินที่ผสมซีเมนต์มาบรรจุจนพอตื้นรูเจาะเมื่อแข็งตัวจะกลายเป็นเสาเข็ม สำหรับกรณี 2, 3 และ 4 (มีแผ่นพื้น) หลังจากบรรจุดินซีเมนต์จนเต็ม ให้นำดินอีกส่วนหนึ่ง (จากการขุดผิวหน้าดินออก) มาผสมซีเมนต์ แล้วดาบคืนกลับด้วยความหนาเท่าเดิม เพื่อหลังจากแข็งตัวจะกลายเป็นแผ่นพื้น บ่มเสาเข็มและแผ่นพื้นดินซีเมนต์เป็นเวลา 28 วัน ก่อนเริ่มทำการทดสอบการยุบตัวของคาน้ำ

3.2 ขั้นตอนการทดสอบการยุบตัวของคาน้ำ

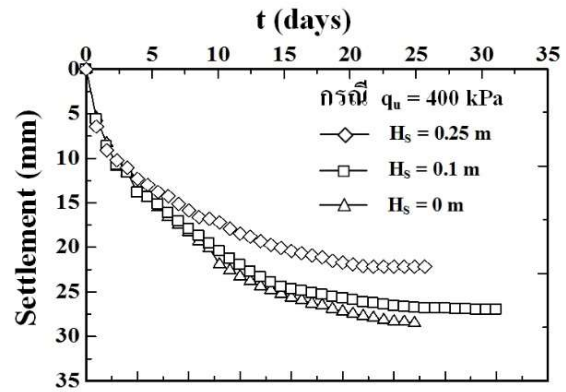
เมื่อได้อายุการบ่มครบ 28 วัน วางแผ่นใยสังเคราะห์จำนวน 3 แผ่น ที่ด้านบนเพื่อเป็นวัสดุช่วยระบายน้ำ จากนั้นใส่อุปกรณ์ส่วนที่เหลือทั้งหมดเพื่อเตรียมตัวทดสอบ ก่อนเริ่มทำการทดสอบ ให้นำน้ำหนักกระทำเท่ากับ 40 kPa ก่อนเพื่อให้ชั้นดินที่เกิดการบวมตัวหดตัวเท่าเดิมกับในขั้นตอนที่ 1 เป็นเวลา 1 – 2 วัน แล้วจึงเริ่มทำการทดสอบโดยปรับเพิ่มแรงดันกระทำตัวอย่างเป็นเท่ากับ 120 kPa ระหว่างการทดสอบ วัดอัตราการหดตัวที่เกิดขึ้นตลอดการทดสอบ

4. การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

4.1 ผลกระทบของความหนาของแผ่นพื้นดินซีเมนต์

เมื่ออัตราการยุบตัวของคาน้ำเกิน 95% ทำการหยุดการทดสอบ ใช้เวลาประมาณ 32 – 40 วัน จากนั้นเปรียบเทียบผลทดสอบเพื่อดูผลกระทบเนื่องจากความหนาของแผ่นพื้นดินซีเมนต์ ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่าการเพิ่มความหนาของแผ่นพื้นที่ผลทำให้ค่าการหดตัวของชั้นดินเหนียวที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบสั้นร่วมกับแผ่นพื้นดินซีเมนต์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะความหนาที่เพิ่มขึ้นทำให้อัตราการจมทะลุ

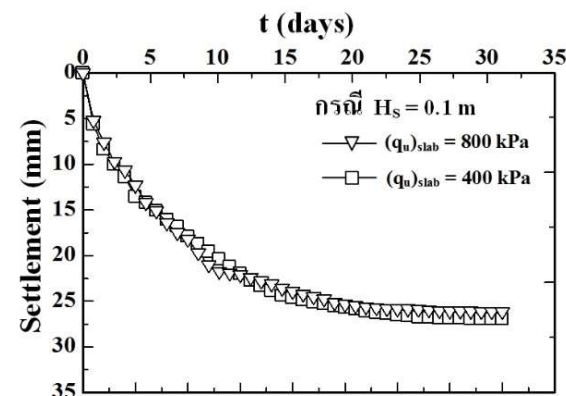
ของเสาเข็มดินซีเมนต์มีค่าน้อยลง ส่งผลให้ค่าการหดตัวลดลงตามไปด้วย



รูปที่ 5 ผลกระทบของค่า H_s ต่อการหดตัวกับเวลา

4.2 ผลกระทบของค่ากำลังรับแรงกดอัดทิศทางเดียวของแผ่นพื้นดินซีเมนต์

ในรูปที่ 6 แสดงผลกระทบของค่า $(q_u)_{slab}$ ต่อค่าการหดตัวของชั้นดินเหนียวที่ถูกปรับปรุง พบว่า การเพิ่มขึ้นของค่า $(q_u)_{slab}$ มีผลต่อค่าการหดตัวอย่างไม่มีนัยสำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 ผลกระทบของค่า $(q_u)_{slab}$ ต่อการหดตัวกับเวลา

5. วิธีการหาค่าการหดตัวสุดท้ายของชั้นดินเหนียวที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึก

Pongsivasathit et al. [6] ได้เสนอวิธีการคำนวณหาค่าการหดตัวของชั้นดินที่ถูกปรับปรุงด้วย เสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึกร่วมกับแผ่นพื้นดินซีเมนต์ โดย

ปีที่ 13 ฉบับที่ 2 เดือนพฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2561

พิจารณาชั้นดินเหนียวที่ถูกปรับปรุง ออกเป็น 2 ชั้น ดังนี้
ชั้นแรกได้แก่ ชั้นบน หรือชั้นดินที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็ม
ดินซีเมนต์ ความหนาของชั้นนี้ (H_1) เท่ากับ $H - H_c$ การ
หาค่าการทรุดตัวสุดท้ายสามารถหาได้จาก

$$s_1 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta p_{1i} H_{1i}}{D_{ci}\alpha + (1-\alpha)D_{si}} \right) \quad (2)$$

ส่วนชั้นที่สอง ได้แก่ชั้นล่าง หรือชั้นดินที่ไม่ได้ถูก
ปรับปรุง มีความหนาเท่ากับ $H - H_1$ โดยมีค่าการทรุดตัว
สุดท้าย ที่สามารถหาได้จาก

$$s_2 = \sum_{i=1}^n \left[H_{2i} \frac{\lambda_i}{1 + e_{0i}} \ln \left(1 + \frac{\Delta p_{2i}}{\sigma'_{vi}} \right) \right] \quad (3)$$

เมื่อ H_{1i} และ H_{2i} คือความหนาของชั้นดินเหนียวที่ถูก
แบ่งย่อยจากชั้นดินเหนียวที่มีความหนา H_1 และ H_2
ตามลำดับ ทั้งนี้การแบ่งชั้นดินนี้เพื่อผลการคำนวณที่
ละเอียดขึ้น, σ'_{vi} คือหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้งก่อน
มีน้ำหนักระทำในชั้นดิน H_{2i} , e_{0i} คือค่าอัตราส่วนช่องว่าง
ก่อนมีน้ำหนักระทำ, λ_i คือความชันของเส้น virgin
compression ในกราฟความสัมพันธ์ $e - \ln p'$, Δp_{1i}
และ Δp_{2i} คือหน่วยแรงรวมที่เพิ่มขึ้นในแนวตั้งในชั้นดิน
 H_{1i} และชั้นดิน H_{2i} ตามลำดับ, D_{ci} และ D_{si} คือค่าโมดูลัส
ของเสาเข็มดินซีเมนต์และดินที่อยู่รอบเสาเข็มนั้นในชั้นดิน
 H_{1i} ซึ่งสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$D_{ci} = \frac{E_i(1-\nu_i)}{(1+\nu_i)(1-2\nu_i)} \quad (4)$$

$$D_{si} = \frac{(1+e_i)\sigma'_{avi}}{\lambda_i} \quad (5)$$

เมื่อ E_i คือค่าโมดูลัสของยังค์สำหรับเสาเข็ม, ν_i คือค่า
อัตราส่วนปัวส์ซองของเสาเข็ม, e_i คืออัตราส่วนช่องว่าง

ของเสาเข็ม และ σ'_{avi} คือหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง
เฉลี่ยของชั้นดินรวมกับหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องจาก
น้ำหนักที่กระทำ

ในสมการที่ (3) และ (5) ให้ใช้ค่าความชันของเส้น
unloading – reloading ในกราฟความสัมพันธ์ $e - \ln p'$
นั่นคือใช้ค่า κ_i แทนค่า λ_i ในกรณีที่ชั้นดินอยู่ในช่วงสภาวะ
การยุบอัดตัวเกินปกติ (Overconsolidated state) ดังนั้น
ค่าการทรุดตัวสุดท้ายรวมที่เกิดขึ้นกับเวลา (s) สามารถหา
ได้จาก

$$s = s_1 + s_2 \quad (6)$$

สำหรับสมการหาค่า H_c นั้น Pongsivasathit et al.
[6] ได้เสนอไว้ดังนี้

สำหรับกรณีมีแผ่นพื้นดินซีเมนต์

$$H_c = H_L \cdot f(\alpha) \cdot g(\beta) \cdot h(\gamma) \quad (7)$$

สำหรับกรณีที่ไม่มีแผ่นพื้นดินซีเมนต์

$$H_c = H_L \cdot f_1(\alpha) \cdot g(\beta) \cdot h(\gamma) \quad (8)$$

เมื่อ

$$f(\alpha) = \begin{cases} 0.75 - 0.025(\alpha) & (\alpha \leq 20\%) \\ 0.45 - 0.010(\alpha) & (20\% < \alpha \leq 45\%) \\ 0 & (\alpha > 45\%) \end{cases} \quad (9)$$

$$g(\beta) = \begin{cases} 1.62 - 0.016\beta & (20\% \leq \beta \leq 70\%) \\ 0.5 & (70\% \leq \beta \leq 90\%) \end{cases} \quad (10)$$

$$h(\gamma) = 0.27 \ln(\gamma) - 0.41 \quad (\gamma > 10) \quad (11)$$

$$\gamma = \frac{p \cdot p_a^{1.5}}{s_u^{2.5}} \quad (12)$$

เมื่อ p_o คือความดันบรรยากาศ และ s_u คือค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวบริเวณปลายเสาเข็มซึ่งสามารถประมาณได้จาก

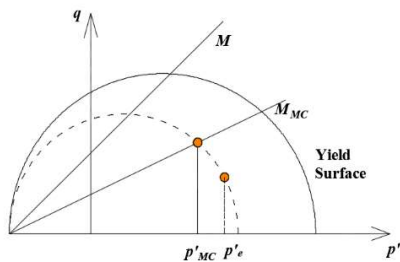
$$s_u = \frac{M_{MC}}{2} p'_{MC} (OCR_e)^\Lambda \quad (13)$$

$$p'_{MC} = p'_e \left(\frac{M^2 + \eta_e^2}{M^2 + M_{MC}^2} \right)^\Lambda \quad (14)$$

$$OCR_e = \left(\frac{\frac{\sigma'_v OCR(1+2K_o^{nc})}{3} + c' \cot \phi'}{p'_e} \right) \quad (15)$$

$$\eta_e = \frac{q}{p'_e} \quad (16)$$

เมื่อ p'_e คือค่า Equivalent initial mean stress; q คือค่า deviator stress; η_e คือค่า Stress ratio; M คือค่าความชันของเส้นวิถีใน $q - p'$ พล็อต (ดังแสดงในรูปที่ 7); K_o^{nc} คือค่าสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างแบบไม่เคลื่อนที่ในสภาวะที่ดินมีการยุบอัดตัวปกติ; M_{MC} คือค่าความชันของเส้นสมการเงื่อนไขการวิบัติของมอร์-คูลอมป์ใน $q - p'$ พล็อต; p'_{MC} คือค่า Equivalent mean stress บนเส้น M_{MC} line; $\Lambda = 1 - \kappa / \lambda$; λ, κ คือค่าความชันของเส้น Virgin compression และเส้น swelling ใน $e - \ln p'$ พล็อต (e คืออัตราส่วนช่องว่าง และ p' คือค่า Effective mean stress) ตามลำดับ; OCR_e คือค่าอัตราส่วนการยุบอัดตัวเกินปกติ; c' คือค่าแรงยึดเกาะประสิทธิผล; ϕ' คือค่าองศาความเสียดทานภายในดิน; σ'_v คือค่าแรงดันดินที่ได้รับในปัจจุบัน



รูปที่ 7 แบบจำลอง Soft soil ใน $p'-q$ พล็อต

6. การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการคำนวณด้วยสูตรของ Pongsivasathit et al. [6]

ประยุกต์ใช้สูตรการคำนวณหาค่าการทรุดตัวรวมของ Pongsivasathit et al. [6] กับกรณีศึกษาทั้ง 4 กรณีสำหรับพารามิเตอร์ที่จำเป็นต้องใช้ในการคำนวณได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 1 และ 2

เพื่อให้ง่ายต่อการอธิบาย กำหนดให้ค่าความคลาดเคลื่อน (Relative error, RE) สามารถนิยามได้ดังต่อไปนี้

$$RE = \frac{s - s_{mea}}{s} \quad (17)$$

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการคำนวณ

กรณีศึกษา	H_s (mm)	ค่าการทรุดตัวสุดท้าย (mm)		RE (%)
		$(s_f)_{mea}$	$(s_f)_{cal}$	
1	0	28.50	29.60	3.72
2	100	26.97	28.83	6.90
3	100	25.21	28.40	11.23
4	250	22.92	26.22	12.59

เมื่อค่า s สามารถหาได้จากสมการที่ [6] และค่า s_{mea} คือค่าการทรุดตัวสุดท้ายที่ได้จากการทดสอบ (s_{mea}) เมื่อนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณ ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่า ในกรณีที่ความหนาของแผ่นพื้นดินซีเมนต์เพิ่มขึ้น ผลการคำนวณด้วยวิธีของ Pongsivasathit et al. [6] มีความคลาดเคลื่อนกับผลการทดสอบสูงขึ้น การมีแผ่นพื้นดินซีเมนต์ทำให้ผลการคำนวณด้วยสูตรดังกล่าวมีค่ามากกว่าผลที่ได้จากการทดสอบอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะในการวิเคราะห์ด้วย FEM เพื่อหาสมการในการคำนวณค่า H_c ของ Pongsivasathit et al. [6] ค่า H_s ถูกให้คงที่เท่ากับ 1.0 m จึงทำให้ผลการวิเคราะห์แตกต่างกันในกรณีที่ค่า H_s มีค่าไม่เท่ากับ 1.0 m

7. สรุป

1) การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นพื้นดินซีเมนต์มีผลทำให้ค่าการทรุดตัวของชั้นดินที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึกร่วมกับแผ่นพื้นดินซีเมนต์มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

2) ค่ากำลังรับแรงกดอัดทิศทางเดียว ของแผ่นพื้นดินซีเมนต์มีผลกระทบต่อค่าการทรุดตัวของชั้นดินที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึกร่วมกับแผ่นพื้นดินซีเมนต์น้อยมาก

3) จากผลการของ Pongsivasathit et al. [6] ค่าการทรุดตัวที่ได้ จะมีค่ามากกว่าค่าการทรุดตัวที่ได้จากการทดลองในกรณีแผ่นพื้นดินซีเมนต์มีความหนาแน่นมากขึ้น

8. กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้เป็นส่วนหนึ่งของการวิจัยเรื่อง การพัฒนาการใช้ดินเสริมด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบลอยเพื่อป้องกันน้ำท่วม ซึ่งได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ด้วยทุนงบประมาณแผ่นดิน ประจำปี 2557 (วช.) จึงขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] D. T. Bergado, J. C. Chai, M. C. Alfaro and A. S. Balasubramaniam, *Improvement Techniques of Soft Ground in Subsiding and Lowland Environment*. Rotterdam, Balkema, 1994.
- [2] B. B. Broms and P. O. Boman, "Lime column a new foundation method," J. Geotec. Eng. D, ASCE, vol. 105, no. GT4, pp. 539-556, 1979.
- [3] J. C. Chai, N. Miura, T. Kirekawa and T. Hino, "Settlement prediction for soft ground improved by columns," Proc. Inst. Civil Eng - Ground Improvement, vol. 163, no. 2, pp. 109-119, 2010.
- [4] J. C. and S. Pongsivasathit, "A method for calculating consolidation settlements of floating column improved clayey subsoil," Frontiers Arch. Civil Eng., vol. 4, no. 2, pp. 241-251, 2010.
- [5] Japanese Institute of Construction Engineering (JICE), "Flexible foundation," in Foundation Structure Part. Design Code for Flexible Box Culvert-II, Tokyo: San-kai-dou Press (in Japanese), 1999, pp. 233-248.
- [6] S. Pongsivasathit, J. C. Chai and W. Q. Ding, "Consolidation Settlement of floating-column-improved soft clayey deposit," Proc. Inst. Civil Eng - Ground Improvement, vol. 166, no. 1, pp. 44-58, 2013.
- [7] S. L. Shen, J. C. Chai and N. Miura, "Stress distribution in composite ground of column-slab system under road pavement," in the 1st Asian-Pacific Congress on Computational Mechanics, Sydney, 2001, pp. 485-490.

ผลของตัวทำละลายที่ใช้เตรียมเหง้ามันสำปะหลังต่อผลิตภัณฑ์ จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว

Influence of Solvents Used for Cassava Rhizome Pretreatment on Fast Pyrolysis Products

กฤษฎา ลำพองชาติ¹ นวรงค์ ชลคุป² อติศักดิ์ ปัตติยะ^{3*}

¹นักศึกษานิเทศศาสตร์, ³ผู้ช่วยศาสตราจารย์ หน่วยปฏิบัติการวิจัยพลังงานชีวภาพและทรัพยากรหมุนเวียน
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ตำบลขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

²นักวิจัย ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ 114 อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย

ถนนพหลโยธิน ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

Gridsada Lampongchat¹ Nuwong Chollacoop² Adisak Pattiya³

¹Student, ³Assistant Professor Bio-Energy and Renewable Resources Research Unit
Faculty of Engineering Mahasarakham University, Khamriang, Kantharawichai, Maha Sarakham, 44150

²Researcher, National Metal and Materials Technology Center (MTEC), 114 Paholyotin Rd, Klong 1
Klong Luang, Pathumthani, 12120

*Corresponding author: Email: adisak_pattiya@yahoo.com

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้แสดงผลการศึกษาผลของตัวทำละลาย 3 ชนิด ได้แก่ น้ำ อะซิโตน และเฮกเซน ที่ใช้เตรียมเหง้ามันสำปะหลังเพื่อลดสัดส่วนของสารสกัดก่อนนำชีวมวลไปผ่านกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไซ์เบดแบบพอง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเหง้ามันสำปะหลังที่ผ่านการสกัดด้วยน้ำ เฮกเซน และอะซิโตน ให้ปริมาณผลได้ไบโอออยล์รวม ไบโอออยล์หนัก และแก๊สเพิ่มขึ้น ขณะที่ปริมาณผลได้ไบโอออยล์เบา และถ่านชาร์มีค่าลดลง เมื่อเทียบกับชีวมวลตั้งต้น ปริมาณผลได้ไบโอออยล์รวมสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 54 โดยน้ำหนัก ซึ่งได้จากการใช้น้ำในการสกัดเหง้ามันสำปะหลัง จากการวิเคราะห์สมบัติของไบโอออยล์ ค่าพีเอช ความหนาแน่น ปริมาณของแข็ง และปริมาณเถ้าของไบโอออยล์ไม่ขึ้นอยู่กับชนิดตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัด แต่การสกัดด้วย เฮกเซนและอะซิโตนส่งผลให้ค่าความร้อนของไบโอออยล์เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ตัวทำละลายยังทำให้จุดวาบไฟ จุดติดไฟ ปริมาณไฮโดรเจน และปริมาณออกซิเจนของไบโอออยล์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนปริมาณคาร์บอนในไบโอออยล์มีแนวโน้มลดลงยกเว้นเมื่อสกัดด้วยอะซิโตน

คำสำคัญ: ไพโรไลซิสแบบเร็ว ผลของตัวทำละลาย สารสกัด ไบโอออยล์

ABSTRACT

Three solvents including water, hexane and acetone were used to pretreat cassava rhizome. The pretreated biomass samples had lower extractives content compared to the non-extracted one. The pretreated samples together with the original biomass were fast pyrolysed in a fluidised bed reactor

producing bio-oil, char and gas. The results showed that after extraction with water, hexane and acetone, the yields of total bio-oil, heavy bio-oil and gas increased at the expense of light bio-oil and char yields. A maximum total bio-oil yield of 54 wt% was achieved when using water as solvent. Based on the property analyses, all solvents hardly affect the pH, solids content, ash content and density of bio-oils. However, hexane and acetone could increase the bio-oil heating value. In addition, the flash point, fire point, hydrogen and oxygen contents were increased by the solvent extraction, whereas the carbon content of bio-oil reduced except when using acetone.

Keyword: Fast pyrolysis, solvent effect, extractives, bio-oil.

1. บทนำ

ไพโรไลซิสแบบเร็วคือการแยกสลายทางความร้อนอย่างรวดเร็ว โดยใช้อุณหภูมิ 400-600 องศาเซลเซียส ในสถานะไร้ออกซิเจน เวลาคงอยู่ของไอสั้น สามารถแปลงสภาพเชื้อเพลิงของแข็ง เช่น ชีวมวล ให้กลายเป็นเชื้อเพลิงเหลว ซึ่งเรียกว่า “ไบโอออยล์ (Bio-oil)” ในปริมาณร้อยละ 40-70 โดยน้ำหนัก ผลิตภัณฑ์รอง ได้แก่ ถ่านชาร์ (Char) ปริมาณร้อยละ 17-27 โดยน้ำหนัก และแก๊ส (Gas) ปริมาณร้อยละ 9-38 โดยน้ำหนัก [1-8] ผลิตภัณฑ์ที่ได้เหล่านี้สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ทั้งหมด ไม่ว่าจะเป็นเป็นถ่านชาร์ที่สามารถนำมาทำเป็นถ่านอัดแท่ง แก๊สสามารถนำมาเผาไหม้ร่วมกับแก๊สธรรมชาติ และไบโอออยล์ที่ได้มีลักษณะและสมบัติเทียบเคียงกับน้ำมันเตา ซึ่งสามารถนำไปเผาไหม้ให้ความร้อนแก่หม้อกำเนิดไอน้ำเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า และยังสามารถนำไปสกัดเป็นสารเคมี ข้อดีเหล่านี้ทำให้นักวิจัยและหน่วยงานต่าง ๆ หันมาสนใจในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วที่สามารถผลิตพลังงานทดแทนที่เป็นพลังงานสะอาดและใช้แล้วไม่มีวันหมดไป วัตถุดิบส่วนใหญ่ที่นำมาใช้คือ ชีวมวลซึ่งหาได้จากภาคเหลือใช้จากภาคเกษตรกรรมและอุตสาหกรรมการเกษตร เช่น ใบและยอดอ้อย กากเมล็ดสับดำ และเหง้ามันสำปะหลัง เป็นต้น

อย่างไรก็ตาม ไบโอออยล์ที่ผลิตได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว เมื่อนำมาใช้งานยังคงมีข้อด้อยเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงจากฟอสซิล เนื่องจากปริมาณน้ำ

จุควาไฟ จุดติดไฟ และปริมาณออกซิเจนมีค่าค่อนข้างสูง ส่งผลให้ความสามารถในการเผาไหม้และค่าความร้อนมีค่าต่ำ สมบัติของไบโอออยล์เหล่านี้สัมพันธ์กับตัวแปรของกระบวนการ และโครงสร้างของชีวมวลที่ใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้น

งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ตัวแปรในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วส่งผลต่อปริมาณผลได้ไบโอออยล์ ถ่านชาร์ และแก๊สเป็นส่วนใหญ่ เช่น เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 500 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ไบโอออยล์มีปริมาณลดลงสูงถึงปริมาณร้อยละ 20 และได้ถ่านชาร์เพิ่มขึ้นสูงถึงปริมาณร้อยละ 60 [7] และที่อุณหภูมิสูงกว่า 500 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ไบโอออยล์มีปริมาณลดลงสูงถึงปริมาณร้อยละ 11 และได้แก๊สเพิ่มขึ้นสูงถึงปริมาณร้อยละ 58 [7] ส่วนค่าความร้อน ปริมาณออกซิเจน และปริมาณสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในไบโอออยล์ มีค่าไม่แตกต่างกันในช่วงอุณหภูมิ 450-550 องศาเซลเซียส [7, 9] นอกจากนี้อัตราการป้อน ชีวมวลที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ไบโอออยล์มีปริมาณลดลง ถ่านชาร์ และความหนืดมีค่าเพิ่มขึ้น [10] ความเหมาะสมของอัตราการป้อนยังขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องปฏิกรณ์ เนื่องจากเป็นอุปกรณ์หลักที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสขึ้น เครื่องปฏิกรณ์แบ่งออกเป็นหลายชนิดและชนิดที่นิยมใช้กันมากคือ เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคด์แบบพอง ที่มีตัวกลางถ่ายโอนความร้อนอยู่ภายในเครื่อง ทำให้สามารถถ่ายโอนความร้อนได้อย่าง

รวดเร็ว จึงส่งผลให้ปริมาณผลได้ของไบโอเอทานอลสูงถึงร้อยละ 70-75 โดยน้ำหนัก [2]

โครงสร้างชีวมวลประกอบไปด้วยเซลลูโลสร้อยละ 12-42 โดยน้ำหนัก [8, 11-13] เฮมิเซลลูโลสร้อยละ 37-59 โดยน้ำหนัก [8, 11-13] ลิกนินร้อยละ 19-31 โดยน้ำหนัก และสารสกัด (อินทรีย์+อนินทรีย์หรือเถ้า) ร้อยละ 2-32 โดยน้ำหนัก [8, 11-14] เมื่อนำมาไฟโรไลซิสพบว่าเซลลูโลสให้ปริมาณไบโอเอทานอลสูงสุดประมาณร้อยละ 65 โดยน้ำหนัก และมีการก่อดังของถ่านชาร์น้อยที่สุด ส่วนเฮมิเซลลูโลสให้ปริมาณแก๊สสูงสุดประมาณร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก และลิกนินให้ปริมาณถ่านชาร์สูงสุดประมาณร้อยละ 47 โดยน้ำหนัก ไบโอเอทานอลที่ได้จากลิกนินอุดมไปด้วยสารฟีนอล ซึ่งสามารถเปลี่ยนรูปเป็นสารอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม [15] ส่วนการศึกษาสารสกัดอินทรีย์หรือเถ้าพบว่า การลดเถ้าในชีวมวลลงส่งผลให้ปริมาณไบโอเอทานอลเพิ่มขึ้นโดยถ่านชาร์และแก๊สมีปริมาณลดลง [16] เมื่อพิจารณาสมบัติของไบโอเอทานอลพบว่า เถ้าในชีวมวลที่ลดลงช่วยลดความเป็นกรดในไบโอเอทานอล และยังไปช่วยเร่งให้เกิดการก่อดังของสารประกอบฟีนอล [16] การศึกษาผลของสารสกัดในชีวมวลต่อผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสทั่วไป มุ่งเน้นไปที่สารสกัดส่วนที่เป็นสารอินทรีย์ที่สามารถแยกออกโดยการล้างด้วยน้ำ ขณะที่งานวิจัยที่ใช้ตัวทำละลายชนิดอื่นสำหรับศึกษาสารสกัดในส่วนที่เป็นสารอินทรีย์ด้วยมีอยู่อย่างจำกัด และส่วนใหญ่มุ่งไปที่การใช้ชีวมวลประเภทพืชน้ำมัน สารสกัดจากพืชที่ไม่ใช่พืชน้ำมันมีลักษณะและองค์ประกอบทางเคมีคล้ายกับพืชน้ำมัน คือ เป็นสารไตรกลีเซอไรด์ของกรดไขมันหรืออาจเป็นสารเคมีชนิดอื่นขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่ใช้ ตัวอย่างงานวิจัย เช่น งานวิจัยของ Melzer M. และคณะ [3] ที่ศึกษาจากเมล็ดสบู่ดำ กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ และกากเชียนท์ โดยพบว่าการลดลงของสารสกัดอินทรีย์ในชีวมวลเหล่านี้ส่งผลให้ไบโอเอทานอลมีปริมาณลดลง ถ่านชาร์และแก๊สมีปริมาณเพิ่มขึ้น ค่าความร้อน ปริมาณคาร์บอน และปริมาณไฮโดรเจนในไบโอเอทานอลมีค่าลดลง ผลที่ได้เหล่านี้มาจากชีวมวล

ประเภทพืชน้ำมัน แต่ชีวมวลที่ไม่ใช่พืชน้ำมันยังไม่พบงานวิจัยที่ศึกษาผลของสารสกัดโดยเฉพาะอย่างยิ่งสารสกัดอินทรีย์ซึ่งสามารถสกัดได้โดยใช้ตัวทำละลายชนิดต่างๆ ในการศึกษากระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกศึกษาผลของชนิดตัวทำละลายที่แตกต่างกัน ได้แก่ น้ำ เฮกเซน และอะซิโตน เทียบกับการไม่ใช้ตัวทำละลายในการสกัดเห้งน้ำมันสำหรับผลิตผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชเบตแบบพอง

2. วัสดุและวิธีการ

2.1 การเตรียมชีวมวล

ชีวมวลที่ใช้ในการทดลองคือ เห้งน้ำมันสำหรับผลิตพันธุ์ระยะ 72 ได้จากบ้านสมสะอาด ตำบลสมสะอาด อำเภอกุฉินารายณ์ จังหวัดกาฬสินธุ์ นำมาผ่านกระบวนการเตรียมด้วยเครื่องบดหยาบ เครื่องบดละเอียด และนำไปผ่านตะแกรงแยกให้ได้ขนาด 0.212-0.600 มิลลิเมตร สุดท้ายนำไปอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หรืออบจนกว่าความชื้นจะเหลือน้อยกว่าร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

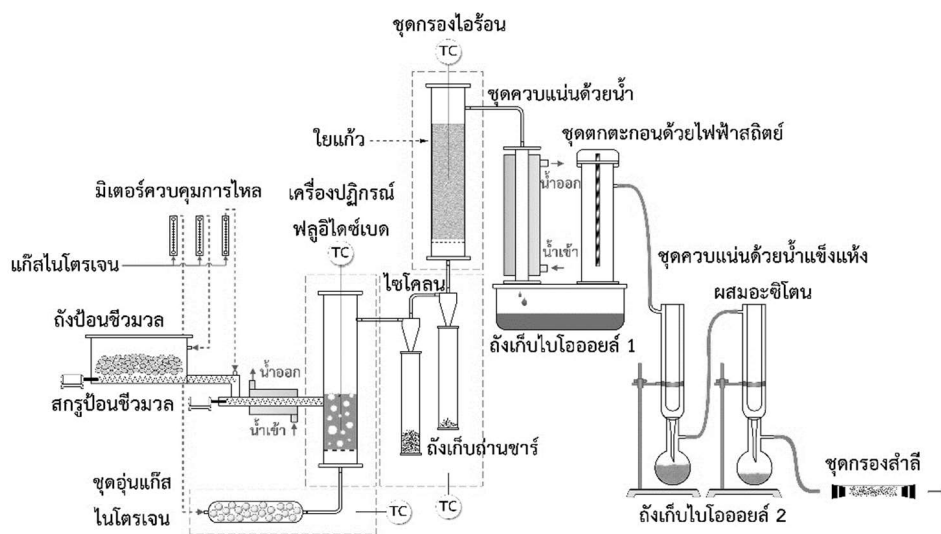
2.2 การใช้ตัวทำละลายสกัดชีวมวล

ชีวมวลที่ผ่านการเตรียมในหัวข้อ 2.1 นำมาสกัดด้วยตัวทำละลายชนิดต่าง ๆ โดยใช้เครื่องสกัดที่ประกอบด้วย ถังทรงกระบอกขนาด 19 ลิตร ขดลวดทำความร้อน ใบกวน มอเตอร์กวน เทอร์มอคัปเปิล ชุดรีฟลักซ์ (Reflux) ชุดควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ และชุดควบคุมอุณหภูมิ โดยใช้อัตราส่วนชีวมวล 160 กรัมต่อตัวทำละลาย (น้ำ เฮกเซน หรืออะซิโตน) 1,000 มิลลิลิตร ใช้อุณหภูมิจุดเดือดของตัวทำละลาย เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นนำชีวมวลมากรองเพื่อแยกสารละลายออก แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง หรืออบจนกว่าความชื้นหรือตัวทำละลายเหลือน้อยกว่าร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

2.3 การไฟโรไลซิสแบบเร็ว

ชีวมวลก่อนและหลังผ่านกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลายถูกนำมาไฟโรไลซิสแบบเร็ว โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบพองดังรูปที่ 1 [17] ซึ่งประกอบไปด้วยถังป้อนชีวมวล เครื่องปฏิกรณ์ ไฮโคลน ถังเก็บถ่านชาร์ กรองไอร้อน ชุดควบแน่นด้วยน้ำ ชุดควบแน่นด้วยไฟฟ้าสถิต ชุดควบแน่นด้วยน้ำแข็งแห้ง และชุดกรองสำหรับระบบให้ความร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้า การทดลอง เริ่มจากบรรจุชีวมวลลงในถังป้อนประมาณ 300 กรัม บรรจุตัวกลางถ่ายโอนความร้อนขนาดอนุภาค 0.250-0.425 มิลลิเมตร ลงไปในเครื่องปฏิกรณ์ประมาณ 300 กรัม และบรรจุใยแก้วลงในชุดกรองไอร้อนประมาณ 10 กรัม เสร็จแล้วชั่งน้ำหนักอุปกรณ์ชุดต่าง ๆ ก่อนการทดลองแล้วประกอบอุปกรณ์เข้าด้วยกัน จากนั้นให้ความร้อนกับชุดเครื่องปฏิกรณ์ที่ 500 องศาเซลเซียส ขณะที่ชุดไฮโคลน ชุดกรองไอร้อน ชุดข้อต่อและชุดท่อลำเลียงแก๊ส ตั้ง

อุณหภูมิไว้ที่ 420 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิคงที่ตามต้องการจึงปล่อยแก๊สไนโตรเจนเข้าสู่ตำแหน่งสกรูป้อนชีวมวลและส่วนด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ในปริมาณ 1 และ 6 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ โดยที่ชุดควบแน่นด้วยไฟฟ้าสถิตตั้งค่าความต่างศักย์ไว้ประมาณ 15-20 กิโลโวลต์ ส่วนชุดควบแน่นด้วยน้ำแข็งแห้ง ประกอบด้วยน้ำแข็งแห้งผสมกับอะซิโตนทำให้อุณหภูมิมีค่าประมาณ -70 องศาเซลเซียส เมื่อเสร็จขั้นตอนเหล่านี้จึงเริ่มป้อนชีวมวลเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ก่อให้เกิดปฏิกิริยาไฟโรไลซิสขึ้น เมื่อทดลองเสร็จถอดอุปกรณ์ชุดต่าง ๆ มาชั่งน้ำหนักหลังการทดลอง โดยที่ไบโอออยล์หนักได้จากชุดควบแน่นด้วยน้ำ และชุดควบแน่นด้วยไฟฟ้าสถิต ไบโอออยล์เบาได้จากชุดควบแน่นด้วยน้ำแข็งแห้ง ถ่านชาร์ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ชุดไฮโคลน ถังเก็บถ่านชาร์ และกรองไอร้อน ส่วนที่ไม่สามารถควบแน่นก็คือแก๊ส



รูปที่ 1 แผนภาพเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบพอง [17]

2.4 การวิเคราะห์ชีวมวล

2.4.1 แบบประมาณ

การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) เพื่อหาปริมาณความชื้นตามมาตรฐาน ASTM E1756-08 ปริมาณสารระเหยตามมาตรฐาน ASTM E872-82 ปริมาณเถ้าตามมาตรฐาน ASTM E1755 และ

ปริมาณคาร์บอนคงที่ซึ่งวิเคราะห์ได้จากน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป

2.4.2 แบบแยกธาตุ

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) เพื่อหาปริมาณธาตุพื้นฐานที่มีอยู่ในชีวมวล ได้แก่ คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ไนโตรเจน (N) และ

กำมะถัน (S) วิเคราะห์ด้วยเครื่อง CHN Analyzer ยี่ห้อ Leco รุ่น 628 และเครื่อง S Analyzer ยี่ห้อ Leco รุ่น 628S จากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)

2.4.3 ปริมาณสารสกัด

การวิเคราะห์หาปริมาณสารสกัด (Extractives content analysis) เป็นการวิเคราะห์สารสกัดที่เหลืออยู่ในชีวมวลที่ผ่านการสกัดตามหัวข้อ 2.2 และชีวมวลที่ไม่สกัด โดยนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือสกัดแบบซอกซ์เลท (Soxhlet extractor) ซึ่งใช้ชีวมวล 5 กรัม บรรจุลงในกรวยเซลลูโลส (Cellulose thimble) ต่อตัวทำละลายเอทานอลร้อยละ 95 ผสมกับโทลูอีน (1:2 โดยปริมาตร) เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ตามด้วยเอทานอลร้อยละ 95 เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และตามด้วยน้ำกลั่นเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ใช้อุณหภูมิจุดเดือดของตัวทำละลาย เมื่อแยกสารสกัดเสร็จนำกรวยเซลลูโลสไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

2.4.4 ค่าความร้อน

ค่าความร้อน (Heating value) หาได้จากเครื่องมือวิเคราะห์ค่าความร้อน (Bomb Calorimeter) ยี่ห้อ Leco รุ่น AC-350 จากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ค่าที่ได้เป็นค่าความร้อนสูง (Higher heating value : HHV) และสามารถคำนวณเป็นค่าความร้อนต่ำ (Lower heating value : LHV) ได้ตามสมการที่ (1) [18]

$$LHV = HHV - \alpha \times \beta \left(\frac{H}{100} \right) \quad (1)$$

เมื่อ LHV = ค่าความร้อนต่ำ (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)

HHV = ค่าความร้อนสูง (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)

α = ความร้อนแฝงที่ไ้ระเหยน้ำที่อุณหภูมิ

30 องศาเซลเซียส เท่ากับ 2.430 เมกะจูลต่อกิโลกรัม

β = มวลของน้ำที่เกิดจากการเผาไหม้ของไฮโดรเจน 1 กิโลกรัม ซึ่งมีค่าเท่ากับ 8.936 กิโลกรัม น้ำ ต่อ กิโลกรัมไฮโดรเจน

H = ร้อยละของไฮโดรเจน จากการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ

2.4.5 ความหนาแน่น

การวิเคราะห์ความหนาแน่นของชีวมวล (Density of biomass) แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ชนิดแรกวิเคราะห์แบบความหนาแน่นรวม (Bulk density) คือน้ำหนักของอนุภาคชีวมวลรวมกับน้ำหนักของช่องว่างระหว่างอนุภาคชีวมวลต่อปริมาตร และชนิดที่สองเป็นการวิเคราะห์แบบความหนาแน่นอนุภาค (Particle density) คือน้ำหนักของอนุภาคชีวมวลต่อปริมาตร

2.5 การวิเคราะห์ไบโอออยล์

2.5.1 ค่าพีเอช

ค่าพีเอช (pH value) วิเคราะห์โดยเครื่องมือวัดค่าพีเอชยี่ห้อ Denver รุ่น UB-10 โดยมีการทดสอบหาความคลาดเคลื่อนของเครื่องกับสารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐานที่มีค่าพีเอช 4.7 และ 10

2.5.2 ปริมาณของแข็ง

ปริมาณของแข็ง (Solids content) ในไบโอออยล์วิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D7579 โดยใช้กระดาษกรองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 90 มิลลิเมตร และใช้เอทานอลในการทำละลายไบโอออยล์

2.5.3 ปริมาณเถ้า

ปริมาณเถ้า (Ash content) ในไบโอออยล์วิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D482-03 โดยนำไบโอออยล์มาเผาที่อุณหภูมิ 775±25 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 20 นาที แล้วคำนวณหาปริมาณเถ้าจากน้ำหนักก่อนและหลังเผา

2.5.4 ความหนาแน่น

การวิเคราะห์ความหนาแน่นไบโอออยล์ (Density of bio-oil) ทำโดยหยดไบโอออยล์ลงใน

กระบอกตวงประมาณ 2 มิลลิลิตร แล้วชั่งหาน้ำหนัก
ไบโอเออยล์ จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณตามสมการที่ (2)

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2)$$

เมื่อ ρ = ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์
เมตร)

m = มวล (กิโลกรัม)

V = ปริมาตร (ลูกบาศก์เมตร)

2.5.5 ค่าความร้อน

การวิเคราะห์ค่าความร้อนของไบโอเออยล์
วิเคราะห์ตามหัวข้อ 2.4.4

2.5.6 จุดวาบไฟ

จุดวาบไฟ (Flash Point) วิเคราะห์ตาม
มาตรฐาน ASTM D93 ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์จุดวาบไฟ
และจุดติดไฟ โดยให้ความร้อนที่อัตรา 10 องศาเซลเซียส
ต่อนาที เมื่ออุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส ทำการ
ลดอัตราการให้ความร้อนเป็น 5-6 องศาเซลเซียสต่อนาที
จากนั้นสังเกตการเปลี่ยนแปลงบนถ้วยทดสอบ แสงสว่างที่
วาบขึ้นและดับไปนั้นคือ จุดวาบไฟ

2.5.7 จุดติดไฟ

จุดติดไฟ (Fire Point) วิเคราะห์ตาม
มาตรฐาน ASTM D93 ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์จุดวาบไฟ
และจุดติดไฟ เป็นขั้นตอนต่อจากการวิเคราะห์จุดวาบไฟ
อัตราการให้ความร้อน 5-6 องศาเซลเซียสต่อนาที
หลังจากเกิดจุดวาบไฟได้ไม่นานก็จะพบกับจุดที่ไฟลุก
ไหม้ไบโอเออยล์ 3-4 วินาที นั่นคือ จุดติดไฟ

2.5.8 แบบแยกธาตุ

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุของไบโอเออยล์
วิเคราะห์ตามหัวข้อ 2.4.2

3. ผลการทดลองและอภิปราย

3.1 ผลของตัวทำละลายต่อสมบัติของชีวมวล

การวิเคราะห์ผลของตัวทำละลายต่อสมบัติของ
ชีวมวลแสดงดังตารางที่ 1 เหน้ามันสำปะหลังตั้งต้นที่ไม่

ผ่านกระบวนการสกัดนำมาวิเคราะห์ปริมาณสารสกัดตาม
หัวข้อ 2.4.3 พบว่ามีสารสกัดรวมอยู่ร้อยละ 12.5 โดย
น้ำหนัก แบ่งเป็นสารสกัดอินทรีย์ร้อยละ 7.9 โดยน้ำหนัก
และสารสกัดอนินทรีย์ร้อยละ 4.6 โดยน้ำหนัก เมื่อสกัด
ด้วยน้ำทำให้สารสกัดอินทรีย์หลุดออกมากที่สุดจากร้อย
ละ 4.6 โดยน้ำหนัก เหลืออยู่ร้อยละ 2.7 โดยน้ำหนัก
เนื่องจากน้ำเป็นสารมีขั้วโพรติก (Polar protic) สามารถ
ให้โปรตอน (H^+) กับสารสกัดอนินทรีย์ ส่งผลให้สารสกัด
อนินทรีย์หลุดออกมากที่สุด ส่วนการใช้ตัวทำละลายเฮกเซน
ทำให้สารสกัดอินทรีย์หลุดออกมากที่สุดจากร้อยละ 7.9
โดยน้ำหนัก เหลืออยู่ร้อยละ 6.5 โดยน้ำหนัก เนื่องจาก
สารสกัดอินทรีย์ประกอบไปด้วยสารจำพวกไขมันหรือลิพิด
(Lipid) ซึ่งเป็นสารที่ไม่มีขั้ว เมื่อสารประเภทนี้เจอตัวทำ
ละลายเฮกเซนที่ไม่มีขั้ว (Non Polar) จึงทำให้สารสกัด
อินทรีย์หลุดออกมากที่สุด

เมื่อพิจารณาผลของอะซีโตนปรากฏว่า ดึงสาร
สกัดอินทรีย์และสารสกัดอนินทรีย์ออกมาได้น้อยที่สุด
เนื่องจากอะซีโตนเป็นสารมีขั้วอะโพรติก (Polar aprotic)
ซึ่งเป็นตัวทำละลายที่ขาดไฮโดรเจนจึงไม่สามารถให้
โปรตอน (H^+) กับสารสกัดอนินทรีย์ และไม่สามารถดึงสาร
สกัดอินทรีย์ที่ไม่มีขั้วออกมาได้ จึงทำให้สารสกัดหลุด
ออกมาได้น้อยที่สุด และการลดลงของสารสกัดส่งผลให้
สัดส่วนของลิโนเชลลูโลสมีปริมาณเพิ่มขึ้น [19] การ
วิเคราะห์แบบประมาณพบว่า เถ้าและสารระเหยมีปริมาณ
ลดลงเมื่อสกัดสารสกัดออกจากชีวมวล เนื่องจากสาร
ระเหยคือส่วนหนึ่งของสารสกัดอินทรีย์ และเถ้าคือส่วน
หนึ่งของสารสกัดอนินทรีย์ เมื่อสารสกัดลดลงจึงทำให้เถ้า
และสารระเหยลดลงไปด้วย ยกเว้นกรณีที่สกัดด้วยน้ำทำ
ให้สารระเหยเพิ่มขึ้น เนื่องจากตัวน้ำสามารถดึงสารสกัด
อนินทรีย์ออกมาได้สูงสุด จึงทำให้สารระเหยมีสัดส่วน
เพิ่มขึ้น ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุแสดงให้เห็นว่า
ปริมาณคาร์บอนและไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น เมื่อสกัดสารสกัด
ออกจากชีวมวล [19] และตัวทำละลายน้ำให้ปริมาณ
คาร์บอนและไฮโดรเจนสูงกว่ากลุ่มอื่น เนื่องจากสามารถ
ลดปริมาณสารสกัดอนินทรีย์ได้สูงสุด การวิเคราะห์ค่า

ความร้อนแสดงให้เห็นว่า ค่าความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อสกัดชีวมวล และตัวทำละลายน้ำให้ปริมาณคาร์บอนและไฮโดรเจนสูงกว่ากลุ่มอื่น เนื่องจากสารสกัดอินทรีย์ไม่สามารถให้พลังงานออกมาได้เมื่อนำไปเผาไหม้ นั่นก็คือ

ถ้ามีอยู่ในชีวมวลมากค่าความร้อนก็จะต่ำ นอกจากนี้ความหนาแน่นยังมีค่าลดลง เมื่อสกัดด้วยตัวทำละลายชนิดต่าง ๆ เนื่องจากการหลุดของสารสกัดอินทรีย์และอินทรีย์นั้นก็น้ำหนักลดลงแต่ปริมาตรยังเท่าเดิม [6]

ตารางที่ 1 สมบัติของชีวมวลที่ผ่านการสกัดด้วยตัวทำละลายชนิดต่าง ๆ

การวิเคราะห์	ตัวทำละลายที่ใช้สกัดแห้งมันสำปะหลัง			
	ไม่ใช้	น้ำเปล่า	เฮกเซน	อะซีโตน
สารสกัด (ร้อยละโดยน้ำหนัก, ฐานแห้ง)				
ลิกโนเซลลูโลส ¹	87.5	90.3	89.5	88.2
สารสกัดรวม	12.5	9.7	10.5	11.8
สารสกัดอินทรีย์	7.9	7.0	6.5	7.4
สารสกัดอนินทรีย์	4.6	2.7	4.0	4.4
แบบประมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก, ฐานแห้ง)				
สารระเหย	75.3±0.7	76.6±0.5	73.9±0.2	74.3±0.4
คาร์บอนคงที่	20.1±0.4	20.7±0.4	22.1±0.2	21.3±0.4
เถ้า	4.6±0.3	2.7±0.0	4.0±0.1	4.4±0.1
ความชื้น ²	0.1±0.1	0.2±0.1	0.1±0.1	0.4±0.2
แบบแยกธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก, ฐานแห้ง)				
คาร์บอน (C)	52.5±0.0	54.2±0.0	52.9±0.2	52.3±0.1
ไฮโดรเจน (H)	6.6±0.2	6.9±0.0	6.8±0.0	6.8±0.0
ไนโตรเจน (N)	0.7±0.0	0.7±0.0	0.6±0.0	0.6±0.0
กำมะถัน (S)	0.2±0.0	0.2±0.0	0.1±0.0	0.2±0.0
ออกซิเจน ³ (O)	35.4±0.0	35.3±0.1	35.5±0.3	35.4±0.2
ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)				
ค่าความร้อนสูง	18.3±0.1	19.3±0.0	18.5±0.2	18.3±0.0
ค่าความร้อนต่ำ	16.8±0.1	17.8±0.0	17.0±0.2	16.8±0.0
ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)				
ความหนาแน่นรวม	182.0±1.2	140.4±3.7	154.8±3.3	166.2±2.6
ความหนาแน่นอนุภาค	912.4±3.6	676.3±5.3	727.6±5.0	742.8±4.4

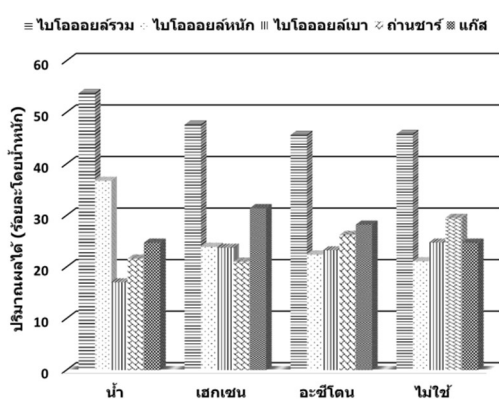
¹คำนวณโดยความแตกต่าง ลิกโนเซลลูโลส=100-สารสกัดรวม

²(ร้อยละโดยน้ำหนัก, ฐานเปียก)

³คำนวณโดยความแตกต่าง O=100-C-H-N-S-เถ้า

3.2 ผลของตัวทำละลายที่ใช้สกัดชีวมวลต่อปริมาณ ผลได้ของผลิตภัณฑ์จากการกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว

ผลของตัวทำละลายที่ใช้สกัดชีวมวลต่อปริมาณ
ผลได้ของผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิสแบบเร็วในเครื่อง
ปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไเบดแบบพองแสดงดังรูปที่ 2 ตัวทำ
ละลายนํ้าที่ใช้สกัดชีวมวลให้ปริมาณ ไบโอออยล์สูงสุดร้อยละ
53.7 โดยนํ้าหนัก และให้ปริมาณไบโอออยล์หนักสูงสุด
ร้อยละ 36.7 โดยนํ้าหนัก เนื่องจากนํ้าสามารถลดสาร
สกัดอินทรีย์ได้สูงสุด ซึ่งสารสกัดอินทรีย์ไม่สามารถ
สลายตัวเป็นไบโอออยล์ [5, 16] รองลงมาคือ เฮกเซน อะ
ซีโตน และไม่สกัด ไบโอออยล์เบาและถ่านชาร์มีปริมาณ
ผลได้ลดลงเมื่อเทียบกับชีวมวลไม่สกัด เนื่องจากสารสกัด
อินทรีย์ส่วนใหญ่สลายตัวเป็นไบโอออยล์เบา และสาร
สกัดอินทรีย์ไม่สามารถสลายตัวกลายเป็นไบโอออยล์ได้
แต่จะอยู่ในรูปของแข็งติดอยู่กับถ่านชาร์ [16, 19] ส่วน
แก๊สมีปริมาณผลได้เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับชีวมวลไม่สกัด
งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าสารสกัดอินทรีย์ช่วยยับยั้งการเกิด
แก๊สได้ [3] ขณะที่สารสกัดอินทรีย์ช่วยเร่งให้ไพโรไล
ซิสเกิดการแตกตัวเป็นแก๊สมากมากขึ้น (Cracking) [16]



รูปที่ 2 ผลของตัวทำละลายที่ใช้สกัดชีวมวลต่อปริมาณ
ผลได้ของผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิสแบบเร็ว

เมื่อพิจารณารูปที่ 2 ร่วมกับตารางที่ 1 พบว่าเมื่อสารสกัด
รวมมีค่าเป็นร้อยละ 10.5 ปริมาณผลได้ของแก๊สมีค่าสูง
ที่สุด ซึ่งเป็นกรณีที่ใช้ตัวทำละลายเฮกเซนในการสกัดชีว
มวล ซึ่งพบว่าชีวมวลมีปริมาณสารสกัดอินทรีย์ร้อยละ 6.5

โดยนํ้าหนัก และอินทรีย์ร้อยละ 4.0 โดยนํ้าหนัก หรือก็
คือมีสัดส่วนของสารสกัดอินทรีย์น้อยที่สุด และสารสกัด
อินทรีย์ค่อนข้างสูง มีส่วนทำให้เร่งการแตกตัวของไพโร
ไลซิสกลายเป็นแก๊สมากขึ้น

3.3 ผลของตัวทำละลายที่ใช้สกัดชีวมวลต่อสมบัติ ของไบโอออยล์จากการกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว

ผลของตัวทำละลายที่ใช้สกัดชีวมวลต่อสมบัติ
ของไบโอออยล์จากการกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วแสดง
ดังตารางที่ 2 ซึ่งพบว่าการสกัดชีวมวลด้วยตัวทำละลาย
ชนิดต่าง ๆ ไม่ส่งผลต่อค่าพีเอช ปริมาณของแข็ง ปริมาณ
เถ้า และความหนาแน่นของไบโอออยล์เนื่องจากปริมาณ
ของแข็ง และปริมาณเถ้าขึ้นอยู่กับกระบวนการไพโรไลซิส
แบบเร็ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งประสิทธิภาพของชุดกรองไออ
รอน [20] การสกัดชีวมวลด้วยเฮกเซน และอะซีโตน ส่งผล
ให้ค่าความร้อนเพิ่มขึ้นเนื่องจากการลดลงของสารสกัดอิน
ทรีย์ ซึ่งสารสกัดอินทรีย์ไม่สามารถให้พลังงาน
ออกมาได้เมื่อนำไปเผาไหม้ ยกเว้นสกัดด้วยตัวทำละลาย
นํ้า ที่ส่งผลให้ค่าความร้อนลดลง ส่วนจุดวาบไฟ และจุด
ติดไฟมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากการลดลงของสารสกัด
อินทรีย์ ซึ่งสารสกัดอินทรีย์เป็นตัวเร่งให้ไบโอออยล์ที่มี
โมเลกุลใหญ่เกิดการแตกตัวกลายเป็นไบโอออยล์ที่มี
โมเลกุลเล็กลง และพร้อมที่จะติดไฟ ดังนั้นยังมีสารสกัด
อินทรีย์น้อยก็ทำให้จุดวาบไฟ และจุดติดไฟมีค่าสูงไป
ด้วย ส่วนปริมาณคาร์บอน และปริมาณไฮโดรเจนมี
แนวโน้มลดลง ปริมาณคาร์บอนที่ลดลงส่งผลให้สัดส่วน
ออกซิเจนเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [3, 19,
21] เนื่องจากสารสกัดอินทรีย์อุดมไปด้วยสารจำพวกไขมัน
หรือลิพิดที่มีคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก
เมื่อสกัดออกจึงทำให้คาร์บอน และไฮโดรเจนมีปริมาณ
ลดลง ยกเว้นสกัดด้วยอะซีโตนที่มีปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้น
และสกัดด้วยเฮกเซนทำให้ไฮโดรเจนมีปริมาณเพิ่มขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบสมบัติของไบโอออยล์ที่ผลิตได้จาก
งานวิจัยนี้กับมาตรฐานสากล ASTM D7544 ปรากฏว่า
ไบโอออยล์หนักที่ผลิตได้จากเหง้ามันสำปะหลังที่ไม่ผ่าน
การสกัดและผ่านการสกัดด้วยตัวทำละลายประเภทนํ้า

เฮกเซน และอะซีโตน ปรากฏว่าผ่านมาตรฐานทั้ง Grade D และ Grade G ในด้านปริมาณของแข็ง ซึ่งมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก ด้านปริมาณเถ้า มีค่าน้อยกว่าร้อยละ 0.15 โดยน้ำหนัก ด้านค่าความหนาแน่น มีค่าอยู่ระหว่าง 1.1-1.3 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เดซิเมตร ด้านค่า

ความร้อนสูง มีค่ามากกว่า 15 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ด้านจุดวาบไฟ มีค่ามากกว่า 45 องศาเซลเซียส และด้านปริมาณกำมะถัน มีค่าน้อยกว่าร้อยละ 0.15 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 2 ผลของชนิดตัวทำละลายที่ใช้สกัดเหง้ามันสำปะหลังต่อสมบัติของไบโอดีเซล

การวิเคราะห์	ตัวทำละลาย				มาตรฐาน ASTM D7544	
	น้ำ (9.7)*	เฮกเซน (10.5)*	อะซีโตน (11.8)*	ไมโซ (12.5)*	Grade D	Grade G
ค่าพีเอช	3.3±0.0	3.9±0.1	3.6±0.1	3.7±0.1	-	-
ปริมาณของแข็ง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.2±0.0	0.2±0.0	0.2±0.1	0.2±0.0	< 0.25	< 2.5
ปริมาณเถ้า (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.1±0.0	0.1±0.0	0.1±0.0	0.1±0.0	< 0.15	< 0.25
ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เดซิเมตร)	1.2±0.0	1.1±0.0	1.2±0.0	1.3±0.0	1.1-1.3	1.1-1.3
ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม, ฐานเปียก)						
ค่าความร้อนสูง	20.2±0.0	26.5±0.0	26.5±0.1	24.7±0.0	> 15	> 15
ค่าความร้อนต่ำ	18.5±0.0	24.5±0.0	24.7±0.1	22.9±0.0	-	-
จุดวาบไฟ (องศาเซลเซียส)	117.2±1.4	109.5±0.9	109.3±1.4	104.0±1.3	> 45	> 45
จุดติดไฟ (องศาเซลเซียส)	131.2±1.3	121.4±1.1	122.6±1.8	112.1±1.8	-	-
ปริมาณแร่ธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก, ฐานแห้ง)						
คาร์บอน (C)	54.8±0.1	53.5±1.5	69.1±0.2	65.1±0.4	-	-
ไฮโดรเจน (H)	8.0±0.3	9.4±0.1	8.2±0.0	8.2±0.0	-	-
ไนโตรเจน (N)	0.9±0.0	1.1±0.0	1.6±0.0	1.5±0.0	-	-
กำมะถัน (S)	0.0±0.0	0.0±0.0	0.0±0.0	0.0±0.0	< 0.15	< 0.15
ออกซิเจน ¹ (O)	36.2±0.4	35.9±1.6	21.0±0.1	25.1±0.4	-	-

*ปริมาณสารสกัดรวมที่เหลืออยู่ในชีวมวล (ร้อยละโดยมวล)

¹ คำนวณโดยความแตกต่าง O=100-C-H-N-S-ปริมาณเถ้า

Grade D : เชื้อเพลิงสำหรับเตาเผาอุตสาหกรรมเชิงพาณิชย์ที่มีของแข็งและเถ้าต่ำ และ Grade G : เชื้อเพลิงสำหรับเตาเผาอุตสาหกรรม

4. สรุป

เหง้ามันสำปะหลังเริ่มต้นมีปริมาณสารสกัดรวมร้อยละ 12.5 โดยน้ำหนัก แบ่งเป็นสารสกัดอินทรีย์ร้อยละ 7.9 และสารสกัดอนินทรีย์ร้อยละ 4.6 สารสกัดอินทรีย์คือส่วนที่สามารถเผาไหม้ได้ ขณะที่สารสกัดอนินทรีย์คือส่วนที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้หรือก็คือส่วนที่เป็นเถ้า เหง้ามันสำปะหลังเมื่อผ่านการสกัดด้วยน้ำ เฮกเซน และอะซีโตน ทำให้ปริมาณสารสกัดอินทรีย์และอนินทรีย์เปลี่ยนไป โดยน้ำทำให้ปริมาณสารสกัดอนินทรีย์ลดลงมากที่สุด ส่งผลให้ชีวมวลมวลเหลือปริมาณสารสกัดอนินทรีย์เพียงร้อยละ 2.7 โดยน้ำหนัก ขณะที่เฮกเซนช่วยลดปริมาณสารสกัดอินทรีย์ได้มากที่สุด ทำให้ชีวมวลเหลือปริมาณสารสกัดอินทรีย์เพียงร้อยละ 6.5 โดยน้ำหนัก เมื่อนำชีวมวลที่ผ่านและไม่ผ่านการสกัดด้วยตัวทำละลาย มาผ่านกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไคซ์เบดแบบพองพบว่า ชีวมวลที่ผ่านการสกัดให้ไบโอออยล์รวมเพิ่มขึ้นเมื่อใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย ปริมาณไบโอออยล์รวมมีค่าสูงสุดร้อยละ 53.7 โดยน้ำหนัก ขณะที่ปริมาณผลได้ของไบโอออยล์หนักมีแนวโน้มเช่นเดียวกับไบโอออยล์รวม ไบโอออยล์เบาและถ่านชาร์มีแนวโน้มลดลงเมื่อลดปริมาณสารสกัดรวมด้วยการใช้ตัวทำละลายชนิดต่าง ๆ ผลการวิเคราะห์สมบัติของไบโอออยล์หนักพบว่า ชนิดของตัวทำละลายไม่ส่งผลต่อค่าพีเอช ปริมาณของแข็ง ปริมาณเถ้า และความหนาแน่นของไบโอออยล์ การใช้ตัวทำละลายสกัดช่วงทำให้ค่าความร้อนของไบโอออยล์เพิ่มขึ้น ยกเว้นกรณีที่ใช้น้ำ จุดวาบไฟ จุดติดไฟ ปริมาณไฮโดรเจน และปริมาณออกซิเจนในไบโอออยล์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ขณะที่ปริมาณคาร์บอนมีค่าลดลง ยกเว้นกรณีที่ใช้อะซีโตน

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับงบประมาณสนับสนุนจากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ รหัสโครงการ P-14-50020 (MT-B-57-END-53-101-G) และทุนโครงการทุน

สถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (TGIST)
เลขที่สัญญาทุน SCA-CO-2558-994-TH

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] H. Nam, S. C. Capareda, N. Ashwath and J. Kongkasawan, “ Experimental investigation of pyrolysis of rice straw using bench- scale auger, batch and fluidized bed reactors, ” J. Energy., vol. 93, pp. 2384-2394, Dec. 2015.
- [2] S. Sirijanusorn, K. Sriprateep and A. Pattiya, “ Pyrolysis of cassava rhizome in a counter- rotating twin screw reactor unit, ” Bioresour. Technol., vol. 139, pp. 343-348, Jul. 2013.
- [3] M. Melzer, J. Blin, A. Bensakhria, J. Valette and F. Broust, “Pyrolysis of extractive rich agroindustrial residues, ” J. Anal. Appl. Pyrolysis, vol. 104, pp. 448- 460, Nov. 2013.
- [4] T. Suchithra, S. Adhikari, H. Ravindran, R. B. Gupta, O. Fasina, M. Tu, S. D. Fernando, “ Physiochemical properties of bio- oil produced at various temperatures from pine wood using an auger reactor, ” Journal of Bioresour. Technol., vol. 101, no. 21, pp. 8389-8395, 2010.
- [5] R. Fahmi, A. V. Bridgwater, I. Donnison, N. Yates and J. M. Jones, “ The effect of lignin and inorganic species in biomass on pyrolysis oil yields, quality and stability, ” J. Fuel, vol. 87, no. 7, pp. 1230-1240, 2008.
- [6] K. Duanguppama, N. Suwapaet and A. Pattiya, “ Fast pyrolysis of contaminated

- sawdust in a circulating fluidised bed reactor, " J. Anal. Appl. Pyrolysis, vol. 118, pp. 63-74, Mar. 2016.
- [7] 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, " J. Ind. Eng. Chem., vol. 19, no. 6, pp. 1851-1857, 2013.
- [8] K. Raveendran, A. Ganesh and K. C. Khilar, "Influence of mineral matter on biomass pyrolysis characteristics, " J. Fuel, vol. 74, no. 12, pp. 1812-1822, 1995.
- [9] S. W. Kim, B. S. Koo and D. H. Lee, "Catalytic pyrolysis of palm kernel shell waste in a fluidized bed, " Bioresour. Technol., vol. 167, pp. 425-432, Sep. 2014.
- [10] บุญศิริ ปิตตาแสง, สิทธา สุขกสิ, และ อติศักดิ์ ปัตติยะ, "ผลของอัตราการป้อนชีวมวลต่อผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วโดยใช้เตาปฏิกรณ์แบบตกอิสระ, " วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยมหาสารคาม, ปีที่ 32 ฉบับที่ 4, หน้า 499-503, กรกฎาคม-สิงหาคม 2556.
- [11] P. Kaewpengkrow, D. Atong and V. Sricharoenchaikul, "Catalytic upgrading of pyrolysis vapors from Jatropha wastes using alumina, zirconia and titania based catalysts, " Bioresour. Technol., vol. 163, pp. 262-269, Jul. 2014.
- [12] A. Pattiya, J. O. Titiloye and A. V. Bridgwater, "Evaluation of catalytic pyrolysis of cassava rhizome by principal component analysis, " J. Fuel, vol. 89, no. 1, pp. 244-253, 2009.
- [13] M. Nik-Azar, M. R. Hajaligol, M. Sohrabi and B. Dabir, "Mineral matter effects in rapid pyrolysis of beech wood, " Fuel Process. Technol., vol. 51, no. 1-2, pp. 7-17, 1997.
- [14] X. Guo, S. Wang, K. Wang, Q. Liu and Z. Luo, "Influence of extractives on mechanism of biomass pyrolysis, " J. Fuel Chem. Technol., vol. 38, no. 1, pp. 42-46, 2010.
- [15] S. D. Stefanidis, K. G. Kalogiannis, E. F. Iliopoulou, C. M. Michailof, P. A. Pilavachi, and A. A. Lappas, "A study of lignocellulosic biomass pyrolysis via the pyrolysis of cellulose, hemicellulose and lignin, " J. Anal. Appl. Pyrolysis, vol. 105, pp. 143-150, Jan. 2014.
- [16] G. Yildiz, F. Ronsse, R. Venderbosch, R. v. Duren, S. R. A. Kersten and W. Prins, "Effect of biomass ash in catalytic fast pyrolysis of pine wood, " Appl. Catal., B, vol. 168-169, pp. 203-211, Jun. 2015.
- [17] ณัฐพันธ์ พรหมสำเภา, นุชิดา สุวแพทย์, และ อติศักดิ์ ปัตติยะ, "การผลิตไบโอออยล์จากการไพโรไลซิสแบบเร็วของกากเปลือกเมล็ดมะเขือเทศและกากเมล็ดปาล์มโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไเซดแบบฟอง, " วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, ปีที่ 9 ฉบับที่ 2, หน้า 23-32, กรกฎาคม-ธันวาคม 2557.
- [18] Y. A. Cengel and M. A. Boles, Thermodynamics: An Engineering Approach, New York: McGraw-Hill, 2006.

- [19] S. R. G. Oudenhoven, R. J. M. Westerhof, and S. R. A. Kersten, “Fast pyrolysis of organic acid leached wood, straw, hay and bagasse: Improved oil and sugar yields, ” J. Anal. Appl. Pyrolysis, vol. 116, pp. 253-262, Nov. 2015.
- [20] A. Pattiya and S. Suttibak, “Fast pyrolysis of sugarcane residues in a fluidised bed reactor with a hot vapour filter, ” J. Energy Inst., vol. 90, no. 1, pp. 110-119, 2015.
- [21] Y. Wang, L. Wu, C. Wang, J. Yu, and Z. Yang, “ Investigating the influence of extractives on the oil yield and alkane production obtained from three kinds of biomass via deoxy- liquefaction, ” Bioresour. Technol., vol. 102, no. 14, pp. 7190-7195, 2011.

พฤติกรรมการหล่อลื่นของร่องลื่นกันรุนอากาศแบบแผ่นเอียงและแผ่นเรียบ Behavior of Lubrication in Tapered-land Type Air Thrust Bearing

สรวิศ โชติวิสุทธิ์^{1*} เจษฎา ปานิชกรณ์² ขนิษฐา วงษ์สีดาแก้ว²

¹นักศึกษาปริญญาโท ²ผู้ช่วยศาสตราจารย์

ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

1518 ถนนประชากรราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

Soravit Chotvisut^{1*} Jesda Panichakorn² Khanittha Wongseedakaew²

¹Master Student, ²Assistant Professor

Department of Mechanical Engineering Technology, College of Industrial Technology

King Mongkut's University of Technology North Bangkok,

1518 Prachrat 1 Road, Wongsawang, Bangsue, Bangkok, 10800

*Corresponding author: Email: soravit.chotvisut@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอพฤติกรรมการหล่อลื่นทางทฤษฎีแบบไฮโดรไดนามิกของร่องลื่นกันรุนอากาศแบบแผ่นเอียงและแผ่นเรียบ (Tapered-land Type Air Thrust Bearing) ในสภาวะคงตัว เมื่อไม่พิจารณาผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของฟิล์มอากาศที่อยู่ภายในร่องลื่นกันรุน โดยใช้ระเบียบวิธีผลต่างสลับเชิงและระเบียบวิธีมัลติกริดร่วมกับระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสัน แก๊สการโมดิฟายเรย์โนลด์ เพื่อหาการกระจายตัวของความดันฟิล์มของอากาศและความหนาฟิล์มของอากาศ เมื่อเปลี่ยนแปลงภาระที่ร่องลื่นกันรุนได้รับ ความเร็วรอบของเพลลา ความสูงของแผ่นเอียง และอุณหภูมิของอากาศที่เข้าร่องลื่นกันรุน จากการจำลองพบว่าเมื่อภาระที่ร่องลื่นกันรุนได้รับเพิ่มขึ้นทำให้ความดันฟิล์มของอากาศสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ความหนาของฟิล์มของอากาศต่ำสุดมีค่าลดลง เมื่อเพิ่มความเร็วรอบในการหมุนของเพลลาทำให้ความดันฟิล์มของอากาศสูงสุดมีค่าลดลงแต่ความหนาของฟิล์มอากาศต่ำสุดมีค่าเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของความสูงของแผ่นเอียงทำให้ความดันของฟิล์มอากาศสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่าความหนาของฟิล์มอากาศต่ำสุดมีค่าลดลง และเมื่ออุณหภูมิอากาศที่เข้าร่องลื่นกันรุนมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความดันของฟิล์มของอากาศสูงสุดมีค่าลดลงแต่ค่าความหนาฟิล์มของอากาศต่ำสุดมีค่าเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: การหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิก การหล่อลื่นด้วยอากาศ ร่องลื่นกันรุนแบบแผ่นเอียง-แผ่นเรียบ สมการโมดิฟายเรย์โนลด์

ABSTRACT

The paper presents the theoretical behavior of hydrodynamic air lubrication of Tapered-land type air thrust bearing under steady state condition. When not considering the effect of temperature changes on the air film in thrust bearing. Using the finite difference method and multi-grid multilevel

technique with Newton-Raphson method for solving modified Reynolds Equation to obtain the air film pressure and air film thickness profiles in thrust bearing surface with various the applied load, shaft speeds, thrust tapered height and air inlet temperature. The simulation results shown the increasing of applied load, the maximum film pressure increases but the minimum film thickness decreases. When shaft speed increases cause the maximum film pressure decreases but minimum film thickness increases. For increasing of thrust tapered height, the maximum film pressure increases but minimum film thickness decreases, and air inlet temperature increases cause the maximum film pressure decreases but minimum film thickness increases.

Keyword: Hydrodynamic lubrication, air lubrication, tapered-land type thrust bearing, modified Reynolds equation.

1. บทนำ

ปัจจุบันความเจริญก้าวหน้าในภาคอุตสาหกรรมเป็นไปอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้โรงงานอุตสาหกรรมต้องปรับตัวอย่างต่อเนื่องเพื่อที่จะตอบสนองต่อการแข่งขันที่สูงขึ้น ดังนั้นเครื่องจักรกลจำเป็นต้องมีประสิทธิภาพและความแม่นยำในการทำงานสูง การศึกษาพฤติกรรมการหล่อลื่นของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลจึงเป็นแนวทางหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องจักรหรือเพิ่มอายุการใช้งานได้ยาวนานขึ้น ร่องลื่นกันรุนมีหน้าที่รองรับเพลาคำทำงานได้อย่างเที่ยงตรงตามแนวแกนเพื่อไม่ให้เกิดการเคลื่อนตัวหรือเปลี่ยนตำแหน่งเกินค่าที่ออกแบบไว้ ร่องลื่นกันรุนที่ใช้อากาศเป็นสารหล่อลื่นใช้งานอย่างแพร่หลายในเครื่องจักรและอุปกรณ์ที่มีระบบการส่งกำลังด้วยเพลาลมและทำงานด้วยความเร็วรอบสูง เช่น เครื่องยนต์เทอร์โบโมเตอร์ความเร็วสูง เป็นต้น เนื่องจากง่ายต่อการใช้งาน ราคาถูก และมีค่าการสูญเสียความเสียดทานที่ต่ำ รวมทั้งยังไม่เกิดปัญหาเรื่องควาวิเดชั่น (Lubricant Cavitation) ในขณะทำงาน และปัญหาเกี่ยวกับซีลเนื่องจากอุปกรณ์ออกแบบให้ปราศจากการใช้น้ำมันหล่อลื่นจึงทำให้มีการบำรุงรักษาได้ง่าย

Lbrahim et al. [1] ได้ประยุกต์ใช้วิธีการเพิ่มประสิทธิภาพที่เหมาะสมในการออกแบบร่องลื่นกันรุนอากาศสำหรับมอเตอร์ความเร็วสูง พบว่าความสามารถในการต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่เหมาะสมมีผล

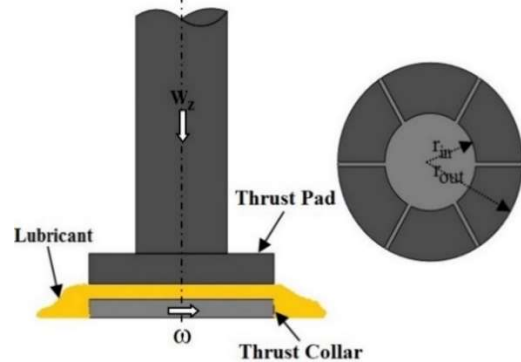
จากค่าความหนาฟิล์มอากาศที่ยอมรับได้ ซึ่งมีค่าสอดคล้องกับพิกัดความเผื่อของร่องลื่นกันรุน Masayoshi [2] ศึกษาพฤติกรรมการหล่อลื่นของร่องลื่นกันรุนอากาศของอุปกรณ์ที่ทำงานด้วยความเร็วรอบสูงด้วยการจำลองเปรียบเทียบกับกรณีทดลอง พบว่าความเร็วรอบเพลาคำเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนาฟิล์มอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย และภาระที่กระทำมีค่าเพิ่มขึ้นมีผลให้ความหนาฟิล์มอากาศมีค่าลดลง ขนิษฐา [3] ได้นำเสนอพฤติกรรมการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกของร่องลื่นกันรุนแบบแผ่นเอียง พบว่าความดันเกิดขึ้นสูงสุดที่บริเวณทางออกของแผ่นร่องลื่นกันรุน A. Charki et al. [4] ได้ทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณเชิงตัวเลขกับการทดลองของร่องลื่นกันรุนอากาศแบบมีหลายช่องทางเข้า พบว่าความหนาฟิล์มอากาศแปรผกผันกับภาระที่กระทำ P. R. Kiogora et al. [5] ได้ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงจำนวนแผ่นร่องลื่นกันรุนแบบแผ่นเอียงภายใต้การหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิก พบว่าจำนวนแผ่นร่องลื่นกันรุนมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้การกระจายตัวของความดันฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าลดลง Dimitrios G Fouflias et al. [6] ศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของร่องลื่นกันรุนแบบต่างๆ ด้วยสารหล่อลื่นที่มีพฤติกรรมแบบนอนนิวโตเนียน พบว่าภาระที่กระทำและอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความหนาฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าลดลง Y. Henry et al. [7], A. Charitopoulos et

al. [8] ได้ศึกษาการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกของร่องลื่นกันรุนแบบแผ่นเอียงและแผ่นเรียบด้วยการทดลองพบว่าอุณหภูมิของฟิล์มสารหล่อลื่นที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อความเร็วรอบเพลามากกว่าภาระที่ร่องลื่นกันรุนได้รับ และการกระจายตัวของความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดมักเกิดจากภาระที่กระทำต่อร่องลื่นกันรุนที่มีค่าเพิ่มขึ้น เจษฎาและคณะ [9] นำเสนอพฤติกรรมของการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกของร่องลื่นกันรุนแบบแผ่นเอียงและแผ่นเรียบด้วยสารหล่อลื่นที่เป็นของไหลนิวโตเนียนพบว่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นสูงสุดเกิดที่ตำแหน่งกึ่งกลางของตำแหน่งที่เป็นรอยต่อของแผ่นเอียงกับแผ่นเรียบ Farooq et al. [10] ศึกษาและวิเคราะห์ประสิทธิภาพการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกของร่องลื่นกันรุนด้วยสารหล่อลื่นน้ำมันเมื่อเปลี่ยนแปลงขนาดกริดที่ใช้คำนวณมีผลต่อค่าความเที่ยงตรงของการกระจายตัวความดันฟิล์มสารหล่อลื่น การหาคำตอบด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขมีความยุ่งยากและใช้เวลาการคำนวณนาน Lubrecht [11], Francisco [12] ได้แนะนำวิธีลดทอนเพื่อลดระยะเวลาในการคำนวณ

บทความนี้ศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมการหล่อลื่นทางทฤษฎีของร่องลื่นกันรุนแบบแผ่นเอียงและแผ่นเรียบ ภายใต้การหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกโดยใช้อากาศเป็นสารหล่อลื่นมีพฤติกรรมเป็นของไหลนิวโตเนียน ด้วยการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษา Fortran เพื่อหาความดันของฟิล์มอากาศและความหนาของฟิล์มอากาศ เมื่อทำการเปลี่ยนภาระที่ร่องลื่นกันรุนได้รับ (Applied load) ความเร็วรอบของเพล (Shaft speed) ความสูงของแผ่นเอียง (Thrust tapered height) อุณหภูมิของอากาศที่เข้าร่องลื่นกันรุน (Air inlet temperature) และเปรียบเทียบผลของการพิจารณาการเคลื่อนไถลของชั้นโมเลกุลอากาศ (Molecular slip flow) และไม่พิจารณาผลของการเคลื่อนไถลของชั้นโมเลกุลอากาศ (Continuous flow)

2. ทฤษฎี

รูปร่างของแผ่นร่องลื่นกันรุน และลักษณะการลอยตัวเมื่อมีสารหล่อลื่นแทรกตัวระหว่าง Thrust Pad และ Thrust Collar แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ลักษณะของแผ่นร่องลื่นกันรุน

2.1 สมการโมดิฟายเรย์โนลด์

จากสมการนาเวียร์-สโตกเมื่อไม่คิดผลของ body force จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของความดันและความเค้นเฉือน ตามพิกัด $r-\theta-z$ เป็นไปตามความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (pr) = \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} \quad \text{และ} \quad \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} = \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial z} \quad (1)$$

$$\text{เมื่อ } \tau_{rz} = \mu \frac{\partial u_r}{\partial z} \quad \text{และ} \quad \tau_{\theta z} = \mu \frac{\partial u_\theta}{\partial z}$$

สมมติให้อากาศเป็นก๊าซในอุดมคติ (Ideal gas) และพิจารณาผลการเลื่อนไถลของโมเลกุลชั้นอากาศ ที่ค่า $0.01 \leq K_N \leq 15$ เมื่อ $K_N = \lambda_a / h_a$ จะได้สมการโมดิฟายเรย์โนลด์ในพิกัดทรงกระบอก สำหรับร่องลื่นกันรุนในสภาวะคงตัวดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{ph^3}{\mu r} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} (pr) \right\} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left[\frac{ph^3}{\mu r} \left(\frac{\partial p}{\partial \theta} \right) \right] = 6\omega \frac{\partial}{\partial \theta} (ph) \quad (2)$$

$$\text{โดยที่ } \mu = \mu_M \cdot \mu_T$$

$$\text{เมื่อ } \mu_M = \left(\frac{\mu_0}{1 + (6K_N p_a h_a / \rho h)} \right) \quad [14]$$

$$\text{และ } \mu_T = \left(\frac{bT^{3/2}}{S+T} \right) \quad [15]$$

$$b = 1.458 \times 10^{-6} \text{ kg} / \text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{K}^{1/2}, S = 110.4 \text{ K}$$

มีเงื่อนไขขอบสมการโมดิฟายเรย์โนลด์ดังนี้

$$p(r_{in}, \theta) = p(r_{out}, \theta) = p_a$$

$$p(r, \theta_{in}) = p(r, \theta_{out}) = p_a$$

2.2 สมการความหนาฟิล์มของอากาศ

ลักษณะทางกายภาพและพิกัดต่างๆ ของแผ่นรองลื่นกันรุนที่ใช้ในบทความนี้ แสดงดังรูปที่ 2 เมื่อไม่คิดผลจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของรองลื่นกันรุน จะได้สมการความหนาฟิล์มอากาศดังนี้

$$\text{เมื่อ } \theta \leq \theta_{out} - \theta_0$$

$$h_{r,\theta} = h_{r,\theta_{out}} + S_H \left[\frac{\theta - \theta_{in}}{\theta_{out} - \theta_{in} - \theta_0} \right]$$

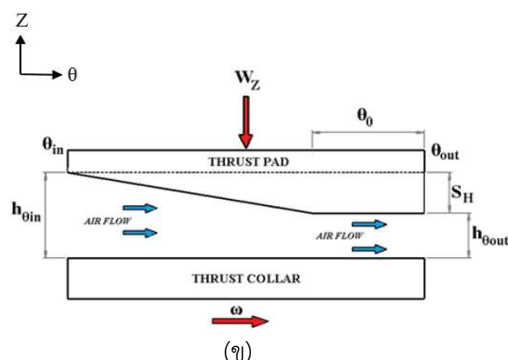
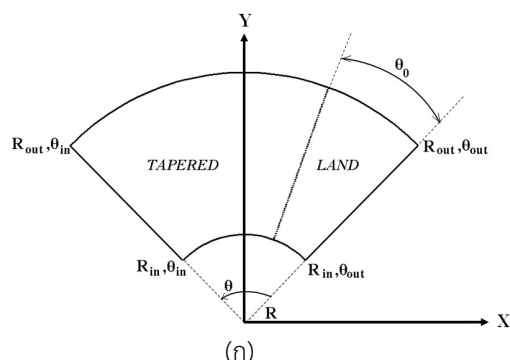
$$\text{เมื่อ } \theta \geq \theta_{out} - \theta_0$$

$$h_{r,\theta} = h_{r,\theta_{out}} \quad (3)$$

2.3 สมการสมดุลแรงที่กระทำ

บทความนี้รองลื่นกันรุนมีจำนวน 6 แผ่น โดยกำหนดให้แผ่นรองลื่นกันรุนแต่ละแผ่นรับภาระเท่ากัน ดังนั้นภาระที่กระทำต่อแผ่นรองลื่นกันรุนแต่ละแผ่นเท่ากับผลรวมของภาระที่กระทำ เนื่องจากความดันที่กระทำต่ออากาศ

$$\int_{R_{in}}^{R_{out}} \int_{\theta_{in}}^{\theta_{out}} (p - p_a) r d\theta dr = \frac{W_z}{6} \quad (4)$$



รูปที่ 2 แสดงพิกัดที่ใช้ในการจำลองของแผ่นรองลื่นกันรุน (ก) พิกัด x-y (ข) พิกัด z-θ

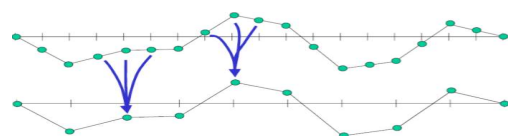
3. ระเบียบวิธีคำนวณเชิงตัวเลข

3.1 ระเบียบวิธีมีลติกริด

วิธีมีลติกริดช่วยลดเวลาการแก้ปัญหาสมการไม่เป็นเชิงเส้นโดยเริ่มจากการจัดสมการให้อยู่ในรูปแบบสมการไม่ต่อเนื่อง (Discretise equation) ด้วยวิธีผลต่างสืบเนื่อง โดยแบ่งกริดออกเป็นระดับๆ แต่ละระดับจะมีจำนวนกริดไม่เท่ากัน การคำนวณอาจจะเริ่มจากระดับที่มีความละเอียดของกริดมากที่สุดแล้วส่งค่าลงไปยังระดับที่กริดหยาบกว่าลงเรื่อยๆ จนถึงระดับที่หยาบที่สุดหลังจากนั้นส่งค่าที่คำนวณได้กลับมาที่ระดับกริดละเอียดที่สุดทำซ้ำไปเรื่อยๆ จนกว่าผลเฉลยจะเข้าสู่ค่าตอบที่มีค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้

3.2 การถ่ายโอนค่า (Grid Transfer)

การถ่ายโอนค่า คือ การส่งค่าจากตัวดำเนินการถ่ายโอน (Operator) โดยส่งค่าจากระดับกริดละเอียดไปยังระดับที่มีจำนวนกริดน้อยกว่า ตัวดำเนินการถ่ายโอนจากระดับกริดละเอียด (Ω_h) ไประดับกริดหยาบกว่า (Ω_H) เรียกว่าตัวดำเนินการถ่ายโอนจำกัด (Restriction Operator, $I_{\Omega_h}^{\Omega_H}$)



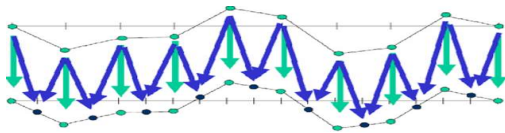
รูปที่ 3 แสดงการประมาณค่าเวกเตอร์การส่งถ่ายของระดับที่มีจำนวนกริดแบบหยาบ (Ω_H) จากการถ่ายโอนค่าจากระดับที่ละเอียดกว่า (Ω_h)

การถ่ายโอนค่าจากระดับที่มีจำนวนกริดน้อยกว่า (Ω_H) ไปยังระดับที่มีจำนวนกริดมากกว่า (Ω_h) จะเรียกตัวดำเนินการในการถ่ายโอนว่าตัวดำเนินการถ่ายโอนแบบเชิงเส้น (Linear Interpolation Operator, $I_{\Omega_H}^{\Omega_h}$) กำหนดให้ n คือจำนวนกริด และ h คือความกว้างของแต่ละกริดมีค่าเท่ากับ $\Omega_h = 1/n$

$$I_{\Omega_H}^{\Omega_h} I_{\Omega_h}^{\Omega_H} = U^{\Omega_h} \quad (5)$$

เมื่อ U^{Ω_H} คือ เวกเตอร์บนระดับที่มีจำนวนแบบหยาบ

U^{Ω_h} คือ เวกเตอร์บนระดับที่มีจำนวนแบบละเอียด



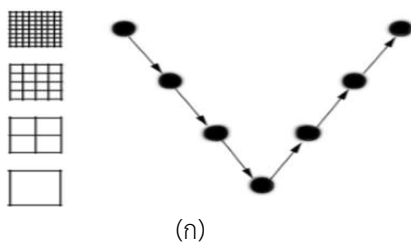
รูปที่ 4 แสดงการประมาณค่าเวกเตอร์จากระดับที่มีจำนวนกริดแบบหยาบ (Ω_H) ไปเป็นระดับที่มีจำนวนกริดแบบละเอียด (Ω_h)

ความสัมพันธ์ระหว่าง $I_{\Omega_H}^{\Omega_h}$ และ $I_{\Omega_h}^{\Omega_H}$ สามารถเขียนได้ดังนี้

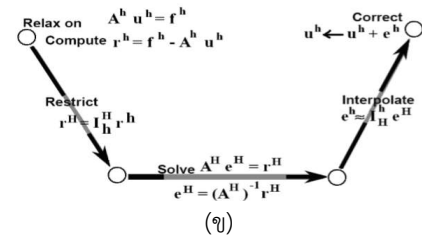
$$I_{\Omega_h}^{\Omega_H} = \frac{1}{2} \left(I \frac{\Omega_h}{\Omega_H} \right)^T \quad (6)$$

3.3 วิวัจักรของมัลติกริดแบบวี (Multigrid V-cycle)

เริ่มต้นคำนวณที่กริดละเอียดก่อนและส่งค่าเศษตกค้าง (Residual) ไประดับที่กริดหยาบและจะปรับแก้ค่าความผิดพลาด (Error) จากค่าความผิดพลาดที่ได้จากระดับที่กริดหยาบและทำการคำนวณซ้ำอีกครั้งที่กริดละเอียดจนกว่าจะได้คำตอบที่มีค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้แสดงดังรูปที่ 5



(ก)



(ข)

รูปที่ 5 แสดงวิธีการของมัลติกริดแบบวี (ก) วิวัจักรของมัลติกริดแบบวี (ข) การถ่ายโอนค่าระหว่างระดับ

สมการโมติฟายด์เรย์โนลด์เป็นสมการไม่เป็นเชิงเส้นสูงจึงได้ประยุกต์ใช้วิธีผลต่างสืบเนื่องร่วมกับระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสัน และระเบียบวิธีมัลติกริดหาคำตอบของสมการโมติฟายด์เรย์โนลด์ โดยสมมติค่าของความหนาของฟิล์มอากาศ เพื่อคำนวณหาความดันของฟิล์มอากาศทำการคำนวณซ้ำจนกระทั่ง

$$\frac{\sum_{r_{in}}^{r_{out}} \sum_{\theta_{in}}^{\theta_{out}} |p(r, \theta)^{k+1} - p(r, \theta)^k|}{\sum_{r_{in}}^{r_{out}} \sum_{\theta_{in}}^{\theta_{out}} |p(r, \theta)^{k+1}|} \leq 0.0001$$

และการรับภาระเนื่องจากความดันของฟิล์มอากาศ

$$\left| 1 - \frac{6}{w_z} \int_{R_{in}}^{R_{out}} \int_{\theta_{in}}^{\theta_{out}} (p - p_a) r d\theta dr \right| \leq 0.0001 \quad (7)$$

4. การจำลองผล

บทความนี้สนใจเรื่องสั่นกันร่นอากาศที่เป็นส่วนประกอบของอุปกรณ์ที่ทำงานด้วยความเร็วรอบสูง เช่น เครื่องยนต์เทอร์โบขนาดเล็ก (Micro gas turbine) หรือ มอเตอร์ความเร็วสูง (Spindle motor) จึงได้กำหนดมิติและขนาดของรอสั่นกันร่นอากาศที่มีขนาดใกล้เคียงกับการใช้งานจริงเพื่อศึกษาแนวโน้มของปัจจัยต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมการณ์การหล่อลื่น [7], [16]

ขนาดของรอสั่นกันร่นแสดงดังตารางที่ 1 และคุณสมบัติของอากาศแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ขนาดของร่องลื่นกันรุน

มิติของร่องลื่นกันรุน	ขนาด
Inlet radius, r_i	0.005 m
Outlet radius, r_{out}	0.015 m
Inlet angle, θ_{in}	$-\pi/8$ rad
Outlet angle, θ_{out}	$+\pi/8$ rad
Land angle, θ_0	$\pi/16$

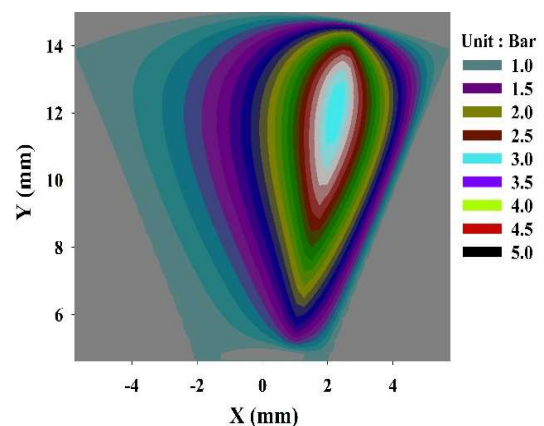
ตารางที่ 2 คุณสมบัติของอากาศ

คุณสมบัติของอากาศ	หน่วย
Atmosphere pressure, p_a	1.01325 bar
Absolute viscosity at 15 °C, μ_a	1.78×10^{-5} kg/m-s
Density at 15 °C, ρ	1.225 kg/m ³
Molecular mean Free path, λ	64.3 nm

จากการจำลองผล เมื่อภาระที่ร่องลื่นกันรุนได้รับ (w_z) เท่ากับ 30 N ความเร็วรอบในการหมุนของเพลานี้เท่ากับ 10,000 rpm อุณหภูมิอากาศที่เข้าร่องลื่นกันรุนเท่ากับ 15 °C ระยะความยาวของแผ่นเรียบ (θ_0) เท่ากับ $\pi/16$ rad ความสูงของแผ่นเอียงเท่ากับ (S_H) 1×10^{-6} m และพิจารณาผลจากการเลื่อนไหลของโมเลกุลของชั้นอากาศ พบว่าความดันฟิล์มอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดบริเวณตำแหน่งรอยต่อของแผ่นเอียงและแผ่นเรียบทำให้พื้นที่ภายใต้การไหลของอากาศถูกบีบให้มีขนาดเล็กลง ส่งผลให้การไหลของอากาศถูกเปลี่ยนจากความเร็วไปเป็นความดัน หลังจากนั้นจึงมีค่าลดลงเมื่อใกล้บริเวณทางออกจนมีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศ โดยความดันฟิล์มอากาศสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 3.17 bar และความหนาฟิล์มอากาศมีค่าน้อยสุดมีค่าเท่ากับ 1.65 μ m แสดงดังรูปที่ 6

เมื่อเปรียบเทียบกับร่องลื่นกันรุนแบบแผ่นเอียง (Tapered Type Thrust Bearing) ขนิษฐา [3] พบว่าการลดลงของความดันฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ

ที่บริเวณทางเข้าจนมีค่าสูงสุดที่บริเวณใกล้ทางออกของแผ่นร่องลื่นกันรุน จากนั้นความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วจนมีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศที่บริเวณทางออก เจษฎาและคณะ [9] แต่ร่องลื่นกันรุนแบบแผ่นเอียงและแผ่นเรียบ (Tapered-land Type Thrust Bearing) ค่าความดันฟิล์มสารหล่อลื่นที่เกิดขึ้นมีค่าสูงสุดที่บริเวณประมาณ 75% ของความยาวของแผ่นร่องลื่นกันรุน จากนั้นความดันของฟิล์มสารหล่อลื่นจึงมีค่าลดลงจนเท่ากับความดันบรรยากาศ ที่บริเวณทางออกของร่องลื่นกันรุนเป็นผลให้ร่องลื่นกันรุนแบบแผ่นเอียงและแผ่นเรียบสามารถรับภาระได้สูงกว่า หรือในสภาวะการรับภาระเดียวกัน ความดันฟิล์มอากาศของร่องลื่นกันรุนแบบแผ่นเอียงและแผ่นเรียบจะมีค่าต่ำกว่า จึงส่งผลให้โอกาสเกิดความเสียหายน้อยกว่า ดังนั้นในบทความนี้จึงเลือกศึกษาร่องลื่นกันรุนแบบแผ่นเอียงและแผ่นเรียบที่มีการประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ที่ทำงานด้วยความเร็วรอบสูง



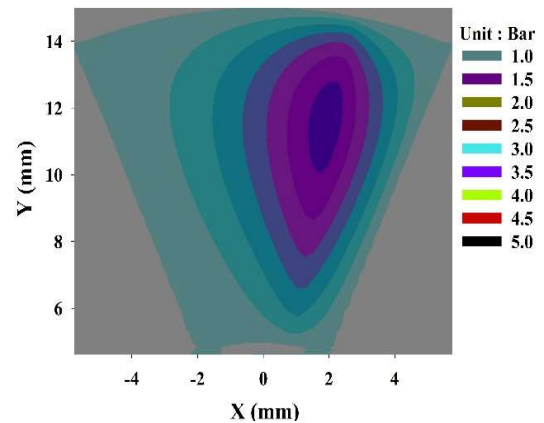
รูปที่ 6 แสดงการกระจายตัวของความดันฟิล์มอากาศที่แผ่นร่องลื่นกันรุน เมื่อ $w_z = 30$ N, Shaft speed = 10,000 rpm, $\theta_0 = \pi/16$ rad, $S_H = 1 \times 10^{-6}$ m และ Air inlet temperature = 15 °C

4.1 การจำลองผลเมื่อเปลี่ยนภาระที่ร่องลื่นกันรุนได้รับ

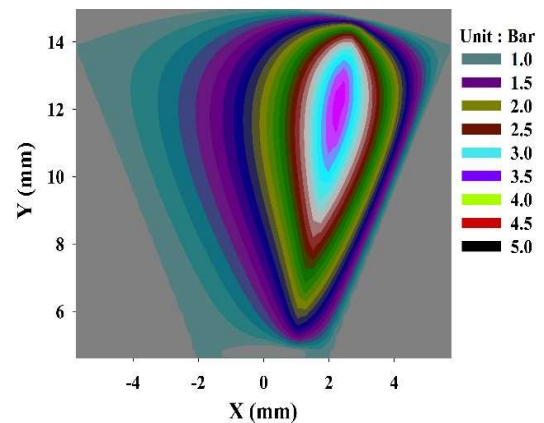
รูปที่ 7 รูปที่ 8 และรูปที่ 9 แสดงการกระจายของความดันฟิล์มอากาศ เมื่อภาระที่ร่องลื่นกันรุนได้รับเท่ากับ

10 N, 35 N และ 60 N ตามลำดับ ความเร็วรอบในการหมุนของเพลาท่อกับ 10,000 rpm อุณหภูมิของอากาศที่เข้าร่องลื่นกันรุนมีค่าเท่ากับ 15°C ระยะความยาวของแผ่นเรียบเท่ากับ $\pi/16$ rad ความสูงของแผ่นเอียงเท่ากับ 1×10^{-6} m และพิจารณาผลจากการเลื่อนไถลของโมเลกุลของชั้นอากาศ พบว่าภาระที่แผ่นร่องลื่นกันรุนได้รับมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความดันฟิล์มอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ความหนาฟิล์มอากาศมีค่าลดลง โดยความดันฟิล์มอากาศสูงสุดและความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุด มีค่าเท่ากับ (1.67 bar, $3.27 \mu\text{m}$), (3.57 bar, $1.48 \mu\text{m}$) และ (5.70 bar, $0.98 \mu\text{m}$) ตามลำดับ

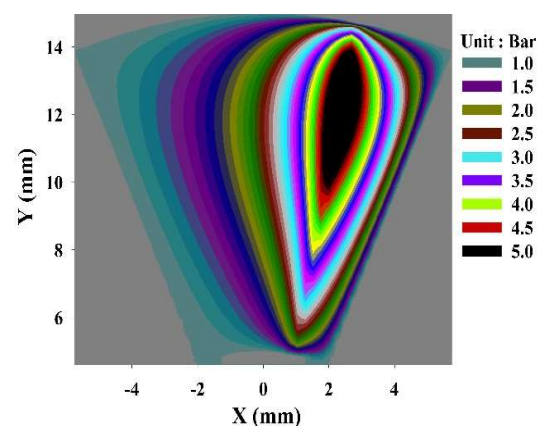
การเปลี่ยนแปลงของความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดและความดันฟิล์มอากาศสูงสุด เมื่อเปลี่ยนแปลงภาระที่ร่องลื่นกันรุนได้รับ แสดงดังรูปที่ 10 พบว่าความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดมีค่าลดลงแต่ความดันฟิล์มอากาศสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาผลจากการเลื่อนไถลของโมเลกุลของชั้นอากาศ พบว่าความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุด เมื่อคิดผลของการเลื่อนไถลของโมเลกุลอากาศมีค่าน้อยกว่าเมื่อไม่คิดผลจากการเลื่อนไถลของชั้นโมเลกุลอากาศ เนื่องจากผลของการเลื่อนไถลของโมเลกุลอากาศทำให้ความหนืดของอากาศมีค่าลดลงตามสมการ (2) เป็นผลให้อากาศไหลออกจากร่องลื่นกันรุนได้ง่ายขึ้นมีผลให้ระยะห่างระหว่างร่องลื่นกันรุนและ Thrust Collar น้อยลงหรือความหนาของฟิล์มอากาศมีค่าลดลง และผลของการลดลงของความหนาฟิล์มอากาศทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของการไหลของอากาศในลักษณะขัดขวางการไหลส่งผลให้ความดันฟิล์มอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น และการเพิ่มขึ้นของภาระที่ร่องลื่นกันรุนได้รับมีอิทธิพลต่อการกระจายตัวของความดันฟิล์มอากาศและความหนาฟิล์มอากาศค่อนข้างมาก



รูปที่ 7 แสดงการกระจายความดันของฟิล์มอากาศเมื่อภาระที่ร่องลื่นกันรุนได้รับเท่ากับ 10 N

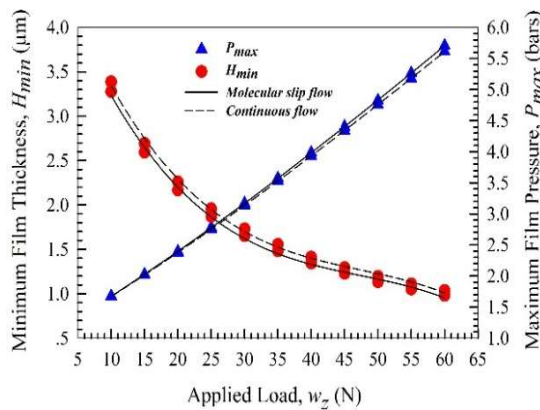


รูปที่ 8 แสดงการกระจายความดันของฟิล์มอากาศเมื่อภาระที่ร่องลื่นกันรุนได้รับเท่ากับ 35 N



รูปที่ 9 แสดงการกระจายความดันของฟิล์มอากาศเมื่อภาระที่ร่องลื่นกันรุนได้รับเท่ากับ 60 N

ปีที่ 13 ฉบับที่ 2 เดือนพฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2561

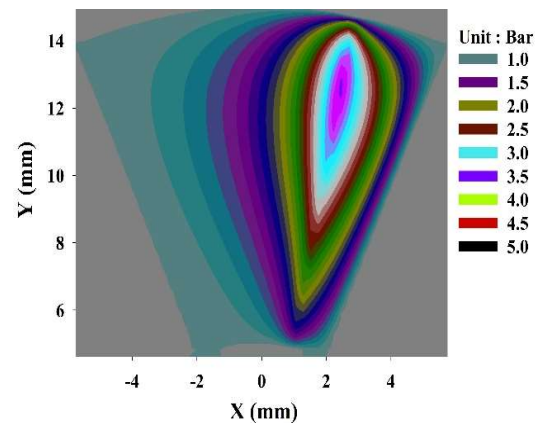


รูปที่ 10 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดและความดันฟิล์มอากาศสูงสุด เมื่อเปลี่ยนแปลงภาระที่ร่อนลื่นกันรุนได้รับ

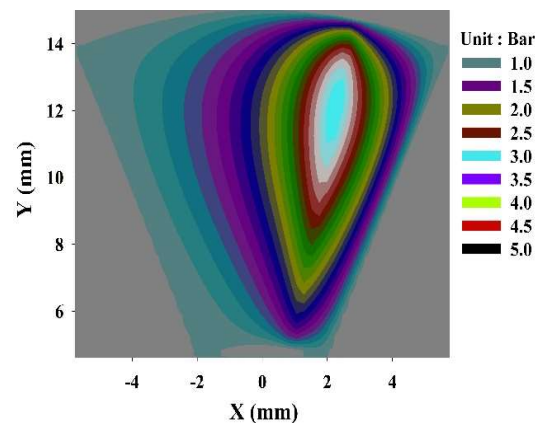
4.2 การจำลองผลเมื่อเปลี่ยนความเร็วรอบเพล

รูปที่ 11 รูปที่ 12 และรูปที่ 13 แสดงการกระจายของความดันฟิล์มอากาศ เมื่อความเร็วรอบในการหมุนของเพลเท่ากับ 5,000 rpm, 10,000 rpm และ 15,000 rpm ตามลำดับ ภาระที่ร่อนลื่นกันรุนได้รับเท่ากับ 30 N อุณหภูมิของอากาศที่เข้าร่อนลื่นกันรุนมีค่าเท่ากับ 15 °C ระยะความยาวของแผ่นเรียบเท่ากับ $\pi/16$ rad ความสูงของแผ่นเอียงเท่ากับ 1×10^{-6} m และพิจารณาผลจากการเลื่อนไถลของโมเลกุลของชั้นอากาศ พบว่าเมื่อความเร็วรอบเพลามีค่าเพิ่มขึ้นความดันของฟิล์มอากาศที่อยู่ภายใต้ผิวของร่อนลื่นกันรุนมีค่าลดลง แต่ความหนาฟิล์มอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราการไหลของอากาศที่เพิ่มขึ้นจากความเร็วรอบเพลามีค่าเพิ่มขึ้น โดยความดันฟิล์มอากาศสูงสุดและความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุด มีค่าเท่ากับ (3.66 bar, 0.91 μm), (3.17 bar, 1.65 μm) และ (2.96 bar, 2.24 μm) ตามลำดับ

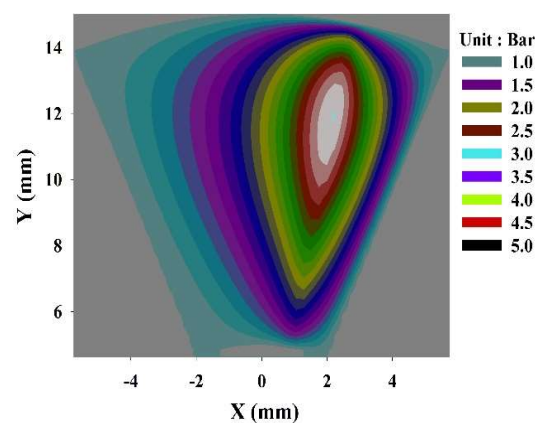
รูปที่ 14 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความดันฟิล์มอากาศสูงสุดและความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุด พบว่าความดันฟิล์มอากาศสูงสุดมีค่าลดลง แต่ความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราการไหลของอากาศที่เข้าสู่ร่อนลื่นกันรุนมีค่าเพิ่มขึ้น และการเพิ่มขึ้นของความเร็วรอบเพลามีอิทธิพลต่อความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดค่อนข้างมาก



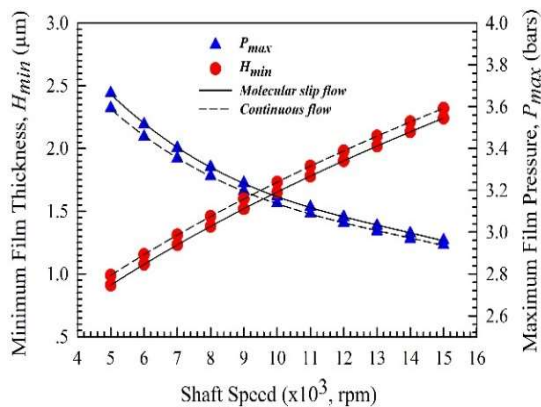
รูปที่ 11 แสดงการกระจายของความดันของฟิล์ม เมื่อความเร็วรอบในการหมุนของเพลเท่ากับ 5,000 rpm



รูปที่ 12 แสดงการกระจายของความดันของฟิล์ม เมื่อความเร็วรอบในการหมุนของเพลเท่ากับ 10,000 rpm



รูปที่ 13 แสดงการกระจายของความดันของฟิล์ม เมื่อความเร็วรอบในการหมุนของเพลเท่ากับ 15,000 rpm



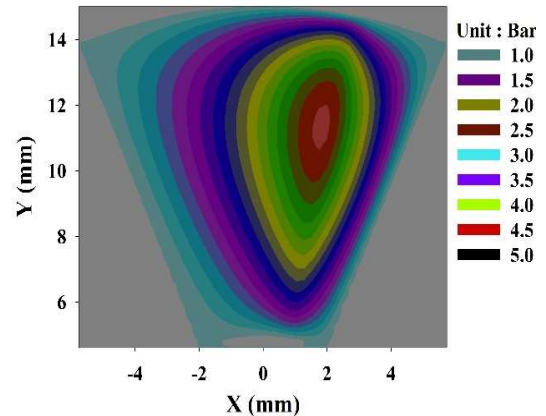
รูปที่ 14 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดและความดันฟิล์มอากาศสูงสุด เมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบเพลลา

4.3 การจำลองผลเมื่อเปลี่ยนความสูงของแผ่นเอียง

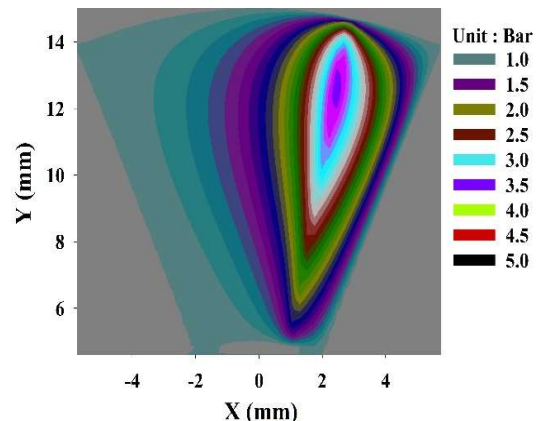
รูปที่ 15 รูปที่ 16 และรูปที่ 17 แสดงการกระจายของความดันฟิล์มอากาศ เมื่อความสูงของแผ่นเอียงมีค่าเท่ากับ 5 μm , 15 μm และ 25 μm ตามลำดับ ภาระที่ร่อนลื่นกันรุนได้รับเท่ากับ 30 N ความเร็วรอบในการหมุนของเพลลาเท่ากับ 10,000 rpm อุณหภูมิของอากาศที่เข้าเข้าร่อนลื่นกันรุนมีค่าเท่ากับ 15 $^{\circ}C$ ระยะความยาวของแผ่นเรียบเท่ากับ $\pi/16$ rad และพิจารณาผลจากการเลื่อนไถลของโมเลกุลของชั้นอากาศ พบว่าเมื่อความสูงของแผ่นเอียงมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความดันฟิล์มอากาศสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่าความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดมีค่าลดลง เนื่องจากพื้นที่การไหลของอากาศเกิดการเปลี่ยนแปลงตามความสูงของแผ่นเอียง โดยความดันฟิล์มอากาศสูงสุดและความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุด มีค่าเท่ากับ (2.67 bar, 2.07 μm), (3.73 bar, 1.25 μm) และ (4.77 bar, 0.72 μm)

การเปลี่ยนแปลงความดันฟิล์มอากาศสูงสุดและความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุด เมื่อเปลี่ยนแปลงความสูงของแผ่นเอียงแสดงดังรูปที่ 18 พบว่าความดันสูงสุดของฟิล์มอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่าความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดมีค่าลดลง เนื่องจากความสูงของแผ่นเอียงที่มีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้รูปร่างการไหลของอากาศเกิดการเปลี่ยนแปลงในลักษณะ

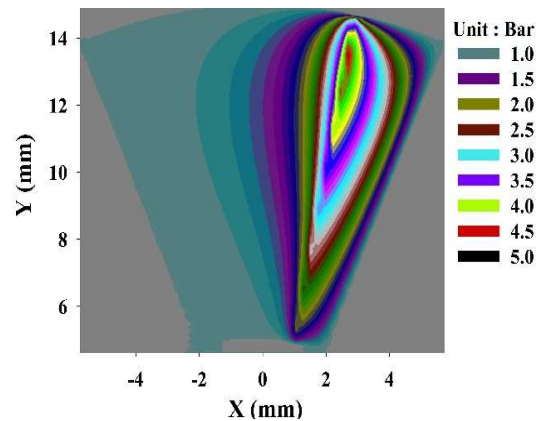
ซัดขวาง ส่งผลให้ความดันฟิล์มอากาศมีค่าสูงขึ้นจากการเปลี่ยนสถานะของความเร็วจนไปเป็นความดัน



รูปที่ 15 แสดงการกระจายของความดันของฟิล์มอากาศเมื่อความสูงของแผ่นเอียงมีค่าเท่ากับ 5 μm

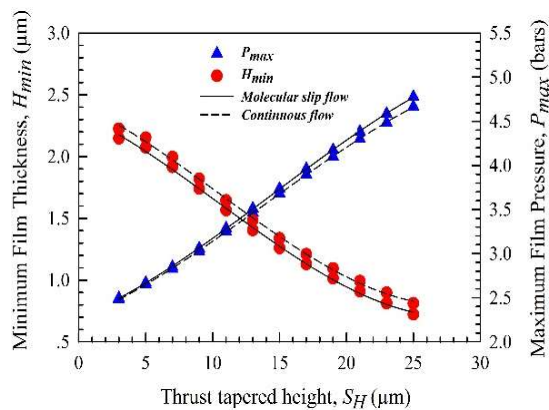


รูปที่ 16 แสดงการกระจายของความดันของฟิล์มอากาศเมื่อความสูงของแผ่นเอียงมีค่าเท่ากับ 15 μm



รูปที่ 17 แสดงการกระจายของความดันของฟิล์มอากาศเมื่อความสูงของแผ่นเอียงมีค่าเท่ากับ 25 μm

ปีที่ 13 ฉบับที่ 2 เดือนพฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2561



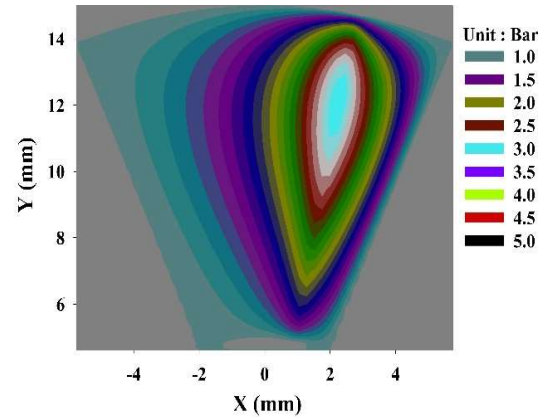
รูปที่ 18 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดและความดันฟิล์มอากาศสูงสุด เมื่อเปลี่ยนแปลงความสูงของแผ่นเอียง

4.4 การจำลองผลเมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิอากาศที่เข้ารอลื่นกันรูน

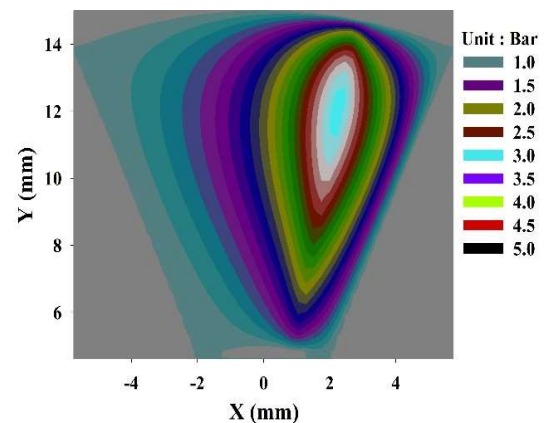
รูปที่ 19 รูปที่ 20 และรูปที่ 21 แสดงการกระจายของความดันฟิล์มอากาศ เมื่ออุณหภูมิของอากาศที่เข้ารอลื่นกันรูนมีค่าเท่ากับ 10 °C, 35 °C และ 60 °C การที่รอลื่นกันรูนได้รับเท่ากับ 30 N ความเร็วรอบในการหมุนของเพลากับ 10,000 rpm ระยะความยาวของแผ่นเรียบเท่ากับ $\pi/16$ rad ความสูงของแผ่นเอียงเท่ากับ 1×10^{-6} m และพิจารณาผลจากการเลื่อนไถลของโมเลกุลของชั้นอากาศ พบว่าเมื่ออุณหภูมิที่เข้ารอลื่นกันรูนได้รับมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความดันฟิล์มอากาศสูงสุดมีค่าลดลง แต่ค่าความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากความหนืดของอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ โดยความดันฟิล์มอากาศสูงสุดและความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุด มีค่าเท่ากับ (3.16 bar, 1.66 μ m), (3.13 bar, 1.74 μ m) และ (3.09, 1.83 μ m)

การเปลี่ยนแปลงความดันฟิล์มอากาศสูงสุดและความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุด เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เข้ารอลื่นกันรูนแสดงดังรูปที่ 22 พบว่าความดันฟิล์มอากาศสูงสุดมีค่าลดลง แต่ค่าความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิอากาศที่เข้ารอลื่นกันรูนมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความหนืดอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นตามสมการ (2) [14] และการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ

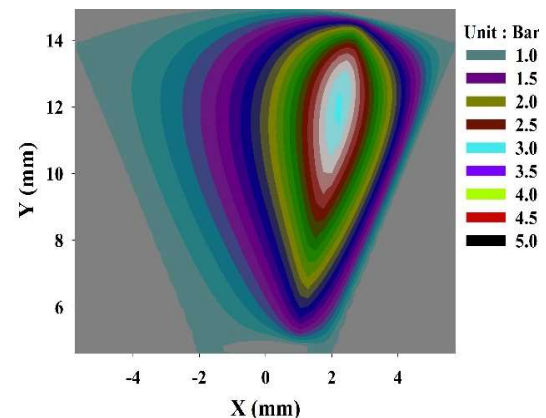
อากาศที่เข้ารอลื่นกันรูนมีอิทธิพลต่อการกระจายตัวของความดันฟิล์มอากาศค่อนข้างน้อย



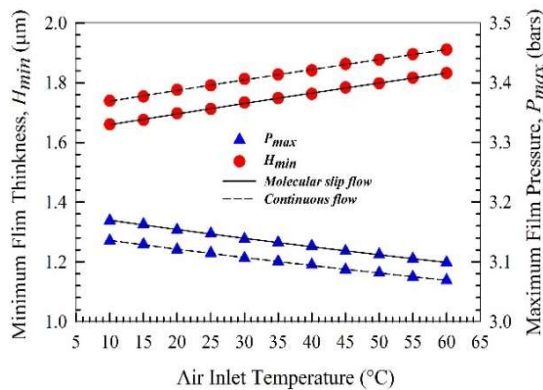
รูปที่ 19 แสดงการกระจายของความดันของฟิล์มอากาศเมื่ออุณหภูมิของอากาศเข้ารอลื่นกันรูนเท่ากับ 10 °C



รูปที่ 20 แสดงการกระจายของความดันของฟิล์มอากาศเมื่ออุณหภูมิของอากาศเข้ารอลื่นกันรูนเท่ากับ 35 °C



รูปที่ 21 แสดงการกระจายของความดันของฟิล์มอากาศเมื่ออุณหภูมิของอากาศเข้ารอลื่นกันรูนเท่ากับ 60 °C



รูปที่ 22 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดและความดันฟิล์มอากาศสูงสุด เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศที่เข้าร่องลื่นกันรูน

5. สรุปผลการจำลอง

5.1 ผลการเลื่อนไถลของโมเลกุลของชั้นอากาศทำให้ความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดมีค่าลดลงกว่าเมื่อไม่คิดผลของการเลื่อนไถลของชั้นโมเลกุลอากาศ แต่ความดันฟิล์มอากาศสูงสุดมีค่าสูงกว่าเมื่อคิดผลของการเลื่อนไถลของชั้นโมเลกุลอากาศ

5.2 เมื่อภาระที่ร่องลื่นกันรูนได้รับเพิ่มขึ้นพบว่าความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดมีค่าลดลง แต่ความดันฟิล์มอากาศสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น

5.3 ความดันของฟิล์มอากาศสูงสุดมีค่าลดลงแต่ความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วรอบในการหมุนของเพลามีค่าเพิ่มขึ้น

5.4 การเพิ่มขึ้นของความสูงของแผ่นเอียงส่งผลให้ความดันฟิล์มอากาศสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่าความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดมีค่าลดลง

5.5 เมื่ออุณหภูมิอากาศที่เข้าร่องลื่นกันรูนมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนาฟิล์มอากาศต่ำสุดมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ความดันฟิล์มอากาศสูงสุดมีค่าลดลง เนื่องจากความหนืดของอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อทำวิทยานิพนธ์สำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561

7. สัญลักษณ์

p lubricant film pressure, Pa

p_a atmosphere pressure, bar

r radius coordinate, m

r_{in} inlet radius, mm

r_{out} outlet radius, mm

$\tau_{rz}, \tau_{\theta z}$ shear stress, Pa

ω angular velocity, rad/s

ρ lubricant film density, kg/m³

h lubricant film thickness, m

S_H thrust tapered height, mm

θ angular coordinate, rad

θ_{in} inlet angle, rad

θ_{out} outlet angle, rad

θ_0 land angle, rad

T temperature, °C

K_N knudsen number, λ_a / h_a

b constant sutherland, $kg / m \cdot s \cdot K^{1/2}$

S constant sutherland, K

μ lubricant viscosity, Pa-s

μ_0 initial viscosity, Pa-s

μ_a absolute viscosity, kg/m-s

μ_M molecular slip flow viscosity, Pa-s

μ_T temperature viscosity, Pa-s

W_z applied load, N

λ_a mean free molecular path, nm

$I_{\Omega_h}^{\Omega_H}$ The coarse to fine grid transfer operator

$I_{\Omega_h}^{\Omega_H}$ The fine to coarse grid transfer operator

U^{Ω_h} The vector of fine grid

U^{Ω_H} The vector of coarse grid

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] M. D. Ibrahim, T. Namba, M. Ochiai and H. Hashimoto, "Optimum design of thrust air bearing for hard disk drive spindle motor," J. Advanced Mech. Design, Syst. Manufac., vol. 4, no. 1, pp. 70-81, 2010.
- [2] M. Otsuka, "Self-acting Air-lubricated bearing without oil lubrication," R&D review of Toyota CRDL, vol. 41, no. 1, pp. 24-35, 2006.
- [3] ขนิษฐา วงษ์สีดาแก้ว, "ผลของความหยาบผิวต่อการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกในร่องลื่นกันรุนด้วยสารหล่อลื่นนอนนิวโตเนียน," วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 26 ฉบับที่ 4, หน้า 48-53, 2552.
- [4] A. Charki, K. Diop, S. Champmartin and A. Ambari, "Numerical simulation and experimental study of thrust air bearing with multiple orifices," Inter. J. Mech. Sci., vol. 72, no. 1, pp. 28-38, 2013.
- [5] P. R. Kiogora, M. N. Kinyanjui and D. M. Theuri, "A Conservative scheme model of an inclined pad thrust bearing," Inter. J. Eng. Sci. Innovative Tech., vol. 3, no. 1, pp. 446-453, 2014.
- [6] D. Fouflias, A. Charitopoulos, C. I. Papadopoulos, L. Kaiktsis and M. Fillon, "Performance comparison between textured, pocket, and tapered-land sector-pad thrust bearings using computational fluid dynamics thermohydrodynamic analysis," J. Eng. Tribol., vol. 229, no. 1, pp. 376-397, 2015.
- [7] Y. Henry, J. Bouyer and M. Fillon, "An experimental hydrodynamic thrust bearing device and its application to the study of a tapered-land thrust bearing," J. Tribol., vol. 136, no. 2, pp. 1-11, 2014.
- [8] A. Charitopoulos, D. Fouflias, C. I. Papadopoulos, L. Kaiktsis and M. Fillon, "Thermohydrodynamic analysis of a textured sector- pad thrust bearing: effects on mechanical deformations," Mech. Industrial, vol. 15, no. 5, pp. 403-411, 2014.
- [9] เจษฎา พานิชกรณ์, ขนิษฐา วงษ์สีดาแก้ว และ วัชรพงษ์ พรหมณักรโทก, "การหล่อลื่นของร่องลื่นกันรุนแบบเอียงและแผ่นเรียบ," การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28, จังหวัดขอนแก่น, หน้า 195-201, 2557.
- [10] F. A. Najar and G. A. Harmain, "Numerical investigation of pressure profile in hydrodynamic lubrication thrust bearing," Inter. Scholarly Res. Notices, vol. 2014, no. 1, pp. 1-8, 2014.
- [11] A. A. Lubrecht, W. E. ten Napel and R. Bosma, "Multigrid, an alternative method for calculating film thickness and pressure profiles in elastohydrodynamically lubricated line contacts," ASME J. Tribol., vol. 108, no. 4, pp. 551-556, 1986.
- [12] A. Francisco, J. Frene, and A. Blouin, "Multilevel Solution to Elastohydrodynamic Contact for the Water Lubricated 3D Line Contact," Tribol. Transac., vol. 45, no. 1, pp. 110-116, 2002.
- [13] B. J. Hamrock, *Fundamentals of Fluid Film Lubrication*. New York; Basel: Marcel Dekker, Inc., 2004.
- [14] C. F. Yong et al., "Design and Modeling of Femto Air Bearing Slider," J. Des. Manuf. Autom., vol. 2, no. 11, pp. 841-854, 2010.
- [15] P. J. Pritchard and J. C. Leylegian, "Fox and Mcdonald' s Introduction to Fluid

Mechanics,” 8th Ed, U.S.A., John Wiley & Sons.
Inc., 2011.

- [16] S. Aggarwal and R. K. Pandey, “Performance behaviour of sector shape taper-flat pad thrust bearing with different taper surface profiles,” in National Tribology Conference (NTC- 2014), Bangaluru, India, 2014, pp. 1-8.

การวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยันปัจจัยความสำเร็จ โครงการการจัดซื้อจัดจ้างก่อสร้างภาครัฐ

A Confirmatory Factors Analysis of the Success factors on Government Construction Procurement Project

ธนายุทธ ไชยธงรัตน์¹ ณรงค์ เหลืองบุตธนา^{2*} พีร์นิธิ อักษร³

¹นักศึกษาปริญญาเอก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

123 หมู่ 16 ต.ในเมือง อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40002

² รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

123 หมู่ 16 ต.ในเมือง อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40002

³ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

123 หมู่ 16 ต.ในเมือง อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40002

Tanayut Chaitongrat¹ Narong Leungbootnak^{2*} Preenithi Aksorn³

¹Student, Department of Civil Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen University

Mittapap Road, Amphur Muang, Khon Kaen, 40002

²Associate Professor, Department of Civil Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen University

Mittapap Road, Amphur Muang, Khon Kaen, 40002

³Assistant Professor, Faculty of Architecture KhonKaen University, Khon Kaen University

Mittapap Road, Amphur Muang, Khon Kaen, 40002

*Corresponding author: Email: Tny.ctr@gmail.com

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อตรวจสอบความกลมกลืนของปัจจัยความสำเร็จโครงการการจัดซื้อจัดจ้างงานก่อสร้างภาครัฐกับข้อมูลเชิงประจักษ์ เก็บข้อมูลกับบุคลากรในหน่วยงานภาครัฐ จำนวน 353 คน ด้วยแบบสอบถามแบบมาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ จำนวน 22 ข้อ มีค่าความเที่ยงตรงเชิงเนื้อหา (IOC) จากผู้เชี่ยวชาญ 5 ท่านอยู่ระหว่าง 0.50 ถึง 0.10 และมีค่าความเชื่อมั่นทั้งฉบับ เท่ากับ .986 วิเคราะห์ข้อมูลด้วยเทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยันอันดับที่สอง ผลการวิจัย พบว่า ความสำเร็จต่อโครงการการจัดซื้อจัดจ้างก่อสร้างภาครัฐ มี 4 องค์ประกอบหลัก ได้แก่ หลักการและเหตุผล/ขอบเขตและการครอบคลุม ด้านการบริหารโครงการ ด้านนิติกรรมและสัญญา และด้านบริหารและการจัดการ และความแปรปรวนที่อธิบายความสำเร็จในการจัดซื้อจัดจ้างโครงการก่อสร้างภาครัฐได้ร้อยละ 61.2 โดยค่าน้ำหนักองค์ประกอบที่สูงที่สุด คือ ด้านหลักการและเหตุผล ($\beta = 0.827$) รองลงมา คือ ด้านการบริหารโครงการ ($\beta = 0.817$) ด้านนิติกรรมและสัญญา ($\beta = 0.794$) และด้านการบริหารและการจัดการ ($\beta = 0.744$) ตามลำดับ

คำสำคัญ: ความสำเร็จ โครงการก่อสร้าง การจัดซื้อจัดจ้างภาครัฐ การวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยัน

ABSTRACT

The purpose of this research is to examine the goodness of fit model of the Success factors on Government Construction Procurement Project. Data were collected from 353 procurement Staff from 353 Thai Government Agencies; the questionnaire was used a 1-5 rating scale of 22 question items. The questionnaire was tested by five experts, which item objective congruence (IOC) of .50-1.00, and reliability (α) of 0.986. The data were analyzed with second order of confirmatory factor analysis. The results showed that the questionnaire of four main factors: Scope and Coverage, Project Management, Legal Transactions and Contracts, and Administration and Management. The variance in successful Government Construction Procurement project is found at 61.2 percent. With reference to factor analysis, it was found that Scope and Coverage ($\beta = 0.827$) Project Management ($\beta = 0.817$) Legal Transactions and Contracts ($\beta = 0.794$) and Administration and Management ($\beta = 0.744$) showed the highest factor loadings respectively.

Keyword: Success factors, construction project, government procurement, confirmatory factor analysis.

1. บทนำ

ปัจจุบันวิทยาศาสตร์เทคโนโลยี และวิธีการจัดการสมัยใหม่ โดยเฉพาะระบบเทคโนโลยีสารสนเทศการสื่อสารในยุคดิจิทัล ถือได้ว่าเป็นเครื่องมือสำคัญที่ทำให้สามารถดำเนินการต่าง ๆ ได้รวดเร็ว สะดวก มีคุณภาพ และมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น การบริหารในยุคนี้มุ่งลดต้นทุนการผลิต เพิ่มคุณภาพ และการบริการที่ดีให้กระจายไปอย่างกว้างขวางได้ โดยใช้บุคลากรบริหาร ควบคุม ดูแล และใช้เทคโนโลยีช่วยอำนวยความสะดวก [1-2]

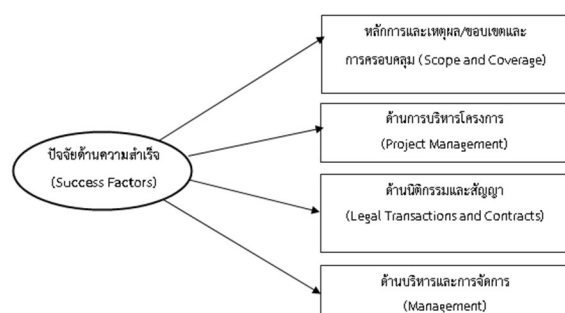
การจัดซื้อจัดจ้างในหลายประเทศต่างมีระบบการพัฒนาไปอย่างรวดเร็วในหลายๆ ด้าน การจัดซื้อจัดจ้างถือว่ามีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของเศรษฐกิจโลกและเศรษฐกิจของประเทศ จึงเป็นเหตุให้การจัดซื้อจัดจ้างภาครัฐต้องมีการปรับตัวและพัฒนาไปอย่างรวดเร็วเพื่อให้มีความคล่องตัวและมีประสิทธิภาพสูง ช่วยสนับสนุนกระบวนการทำงานภาครัฐและเอกชนให้มีความรวดเร็วโปร่งใสและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น [3-4] อันจะส่งผลให้ภาครัฐสามารถปฏิบัติหน้าที่ในการสนับสนุนภาคเอกชนให้มีความแข็งแกร่งและร่วมกันพัฒนาประเทศให้เจริญเติบโตอย่างยั่งยืน [5]

ปัจจุบันการจัดซื้อจัดจ้างและการบริหารพัสดุภาครัฐมีความสำคัญอย่างมากซึ่งภาครัฐใช้งบประมาณจำนวนมากในการจัดซื้อจัดจ้างภาครัฐ เพื่อการผลิตสินค้าและบริการ โดยประมาณมูลค่าเฉลี่ยของการจัดซื้อโดยรัฐของแต่ละประเทศอยู่ในระดับร้อยละ 10-15 ของมูลค่าผลิตภัณฑ์มวลรวมภายในประเทศ (GDP) [6] การจัดซื้อจัดจ้างภาครัฐในประเทศไทย โดยเฉพาะจำนวนโครงการที่ทำสัญญา ได้เพิ่มขึ้นเป็นลำดับจาก 79,092 โครงการในปีงบประมาณ 2555 เป็นจำนวน 1,503,393 โครงการในปีงบประมาณ 2557 นอกจากนี้เห็นได้ว่าสัดส่วนโครงการที่มีการขยายตัวในทุกปีงบประมาณ โดยอันดับมากสุดพบในหน่วยงานราชการ รองลงมาองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น มูลค่าการจัดซื้อจัดจ้างของหน่วยงานภาครัฐ ปีงบประมาณ 2555-2557 มีงบประมาณสูงขึ้น 160,775.86 ล้านบาท 569,327.73 ล้านบาท และ 328,892.52 ล้านบาท ตามลำดับ [4]

ดังนั้นผู้วิจัยมีความสนใจที่จะศึกษาปัจจัยความสำเร็จโครงการการจัดซื้อจัดจ้างก่อสร้างภาครัฐ เพื่อพัฒนาและตรวจสอบความกลมกลืนโมเดลองค์ประกอบเชิงยืนยันของปัจจัยความสำเร็จโครงการการจัดซื้อจัดจ้างก่อสร้างภาครัฐ กับข้อมูลเชิงประจักษ์

2. กรอบแนวคิดในการวิจัย

การวิเคราะห์โมเดลองค์ประกอบของปัจจัยความสำเร็จโครงการการจัดซื้อจัดจ้างก่อสร้างภาครัฐ ผู้วิจัยได้สังเคราะห์แนวคิดที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยความสำเร็จโครงการก่อสร้างภาครัฐ ของงานวิจัยในอดีต [7-13] ได้ข้อสรุป 4 องค์ประกอบ หลัก ได้แก่ 1) ด้านหลักการและเหตุผล/ขอบเขตและการครอบคลุม (Scope and Coverage) ซึ่งประกอบด้วย ความโปร่งใส ความคุ้มค่า และการมีประสิทธิภาพ [9] 2) ด้านการบริหารโครงการ (Project Management) ประกอบด้วย การวางแผนการจัดซื้อจัดจ้าง ความเชื่อมั่นของงบประมาณและเทคโนโลยี [9-12] 3) ด้านนิติกรรมและสัญญา (Legal Transactions and Contracts) ประกอบด้วย การปฏิบัติตามกฎระเบียบของกฎหมาย การจัดการเซ็นสัญญาที่ดี และการกำหนดกฎระเบียบและข้อบังคับ [13] และ 4) ด้านการบริหารและจัดการ (Administration and Management) ประกอบด้วย การจัดสรรความรับผิดชอบ และการจัดการความเสี่ยง เป็นต้น [8] ทั้งนี้ผลการสังเคราะห์ปัจจัยความสำเร็จโครงการการจัดซื้อจัดจ้างก่อสร้างภาครัฐ ได้กำหนดเป็นกรอบแนวคิดในการวิจัย ดังรูปที่ 1 ซึ่งกรอบแนวคิดในการวิจัยได้แสดงองค์ประกอบของของปัจจัยความสำเร็จโครงการการจัดซื้อจัดจ้างก่อสร้างภาครัฐ ตามภาวะสันนิษฐานทางทฤษฎี และผู้วิจัยได้กำหนดสมมติฐานการวิจัย คือ โมเดลองค์ประกอบเชิงยืนยันของปัจจัยความสำเร็จโครงการการจัดซื้อจัดจ้างก่อสร้างภาครัฐ มีความกลมกลืนกับข้อมูลเชิงประจักษ์



รูปที่ 1 กรอบแนวคิดในการวิจัย

3. วิธีการดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงปริมาณ (quantitative research) ใช้เทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยันลำดับที่สอง (secondary confirmatory factor analysis) เพื่อตรวจสอบปัจจัยความสำเร็จโครงการการจัดซื้อจัดจ้างก่อสร้างภาครัฐ ที่พัฒนาขึ้นมีความกลมกลืนกับข้อมูลเชิงประจักษ์ มีวิธีการดำเนินการวิจัย ดังนี้

3.1. หน่วยที่ใช้ในการวิเคราะห์

หน่วยที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือ โครงการจัดซื้อจัดจ้างก่อสร้างภาครัฐ

3.2. ประชากรและกลุ่มตัวอย่างในการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ดำเนินการเก็บข้อมูลกับประชากร ได้แก่ โครงการจัดซื้อจัดจ้างก่อสร้างภาครัฐ จำนวน 3,025 โครงการ (ข้อมูลเมื่อ เดือน มกราคม 2557 ถึง เดือน มกราคม 2558) การใช้สถิติการวิเคราะห์ตัวประกอบ (Factor Analysis) ขนาดตัวอย่าง ที่ยอมรับได้ คือ กลุ่มตัวอย่างที่ไม่ต่ำกว่า 300 ตัวอย่าง [14] และสุ่มตัวอย่างแบบมีระบบ (Systematic Random Sampling) [15] สามารถเก็บข้อมูลจริงได้ จำนวน 353 กลุ่มตัวอย่าง ซึ่งเป็นไปตามข้อตกลงเบื้องต้นของการใช้สถิติ

3.3. เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ แบบสอบถาม เพื่อประเมินปัจจัยความสำเร็จโครงการการจัดซื้อจัดจ้างก่อสร้างภาครัฐ ได้แก่ หลักการและเหตุผล/ขอบเขตและการครอบคลุม ด้านการบริหารโครงการ ด้านนิติกรรมและสัญญา และด้านบริหารและการจัดการเป็นแบบมาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ จำนวน 30 ข้อ ที่พัฒนามาจากแนวคิดกรอบแนวคิด (รูปที่ 1)

3.4. คุณภาพของเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

ผู้วิจัยแบ่งการตรวจสอบเป็น 2 ส่วน คือ การตรวจสอบความเที่ยงตรงเชิงเนื้อหา (Content Validity) จากผู้ทรงคุณวุฒิ จำนวน 5 ท่าน ที่มีประสบการณ์ในกระบวนการจัดซื้อจัดจ้างโครงการก่อสร้าง มากกว่า 10 ปี ได้ค่าดัชนีความสอดคล้อง (Index of Item-Objective Congruence: IOC) ไม่ต่ำกว่า 0.50 จำนวน 22 ข้อ และค่า

ความเชื่อมั่น จากการทดลองใช้ (Try out) จำนวน 30 คน กลุ่มประชากรที่ไม่ใช่กลุ่มตัวอย่าง ซึ่งได้จากรฐานข้อมูลของกรมบัญชีกลาง โดยใช้เทคนิคแบบอัลฟาของครอนบาค (Cronbach alpha) พบว่า แต่ละองค์ประกอบย่อยมีค่าความเชื่อมั่นทั้งฉบับเท่ากับ 0.980 แสดงให้เห็นว่าแบบสอบถามที่ใช้เก็บรวบรวมข้อมูลมีความน่าเชื่อถือในระดับสูง [15-16]

3.5. การเก็บรวบรวมข้อมูล

ผู้วิจัยเลือกใช้การเก็บรวบรวมข้อมูลด้วยวิธี Web Surveys [15] ด้วยความอนุเคราะห์กรมบัญชีกลาง กระทรวงการคลัง ที่เผยแพร่แบบสอบถามบน <https://www.gprocurement.go.th> ระหว่างเดือนเมษายน 2559 ถึงพฤษภาคม 2559 และได้รับการตอบกลับ จำนวน 353 ชุด

3.6. การวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยัน

วิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยัน (Confirmatory factor analysis, CFA) เพื่อทดสอบความกลมกลืน แต่ละตัวแปรกับข้อมูลเชิงประจักษ์ [16] โดยการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยัน (CPA) เป็นการทดสอบความสอดคล้องโมเดลองค์ประกอบตามแนวคิดทฤษฎีกับข้อมูลเชิงประจักษ์ ด้วยดัชนีวัดความสอดคล้อง คือ ค่าไค-สแควร์สัมพันธ์ (relative Chi-square: X^2/df) [17-18] ค่าไค-สแควร์ (Chi-Square, X^2) [19] ค่าดัชนีความสอดคล้องความสัมพันธ์ (Normal fit index: NFI) [17], [19] ดัชนีวัดระดับความกลมกลืน (Goodness of Fit Index: GFI) [17] ดัชนีวัดระดับความกลมกลืนเชิงเปรียบเทียบ (Comparative fit index: CFI) [20] ค่าดัชนีรากที่สองกำลังสองเฉลี่ย (Root mean squared residual: RMR) [17] และค่ารากของค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนโดยประมาณ (Root Mean Square Error of Approximation: RMSEA) [21] – [22] ดังแสดงในตารางที่ 1 และการปรับโมเดล (Model modification) เป็นขั้นตอนที่กระทำก็ต่อเมื่อค่าพารามิเตอร์บางค่าที่ไม่แตกต่างจากศูนย์ ($|t| > 1.96$) หรือมีทิศทางของค่าพารามิเตอร์ไม่ตรงกับ

ทฤษฎีที่กำหนดไว้ หรือเกิดปัญหาทั้งสองอย่าง โดยการปรับโมเดลสามารถดำเนินได้ 2 กรณี [23] ดังนี้

กรณีที่ 1 การปรับโมเดลในส่วนที่เป็น ความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่าที่เกิดจากเครื่องมือที่ใช้ในการวัด ซึ่งสามารถทำการปรับโมเดลได้ทันที ไม่มีผลกระทบต่อโครงสร้างของโมเดลตามสมมติฐาน และ

กรณีที่ 2 การปรับโมเดลในส่วนที่เป็นการตัดหรือเพิ่มการประมาณค่าพารามิเตอร์ ซึ่งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งปัญหาอาจเกิดจากการที่โมเดลตามสมมติฐานที่กำหนดขึ้นไม่มีความแข็งแรงเพียงพอ

นอกจากนี้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปในการการวิเคราะห์สถิติ โดยพิจารณานัยสำคัญของค่าสถิติทดสอบ t-test น้ำหนักองค์ประกอบมาตรฐาน (Standardized Factor Loading: β) ที่มากกว่า 0.4 ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standard Error: SE) และค่าความแปรปรวนของตัวแปรสังเกตที่อธิบายได้ด้วยความแปรปรวนของตัวแปรแฝง (Squared Multiple Correlations: SMC) ที่มากกว่า 0.50 [17-20]

ตารางที่ 1 ดัชนีที่ใช้ในการตรวจสอบความกลมกลืนของโมเดล (Goodness of Fit)

ค่าดัชนี	เกณฑ์	อ้างอิง
X^2/df	น้อยกว่า 3.00	[17], [18]
X^2	มากกว่า 0.05	[19]
NFI	มากกว่า 0.90	[20], [21]
GFI	มากกว่า 0.90	[17]
CFI	มากกว่า 0.95	[20]
RMR	มากกว่า 0.08	[17]
RMSEA	มากกว่า 0.08	[21], [22]

4. ผลการวิจัย

4.1. ข้อมูลเบื้องต้นของกลุ่มตัวอย่าง

กลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่เป็นเพศชาย คิดเป็นร้อยละ 54.4 มีอายุระหว่าง 41 ปี ถึง 50 ปี ร้อยละ 33.7 ระดับการศึกษาส่วนใหญ่ระดับปริญญาตรี ร้อยละ 63.74 ผู้ตอบ

ส่วนใหญ่มีตำแหน่ง หัวหน้าพัสดุและเจ้าหน้าที่พัสดุ คิดเป็นร้อยละ 46.7 รองลงมา คือ คณะกรรมการตรวจการจ้าง คิดเป็นร้อยละ 22.9 และมีประสบการณ์ทำงานด้านการจัดซื้อจัดจ้างก่อสร้าง เฉลี่ย 9.5 ปี (SD=7.6) นอกจากนี้ โครงการจัดซื้อจัดจ้างก่อสร้างส่วนใหญ่สังกัดองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น คิดเป็นร้อยละ 36.5 รองลงมาส่วนราชการทั่วไป ร้อยละ 34.6 ตำแหน่งที่ตั้งส่วนใหญ่ภาคกลางของประเทศ ร้อยละ 38.0 ประเภทงานก่อสร้างที่จัดซื้อจัดจ้างส่วนใหญ่เป็นงานก่อสร้างอาคาร คิดเป็นร้อยละ 35.1 รองลงมา คือ งานก่อสร้างทาง คิดเป็นร้อยละ 34.0 และวิธีการจัดหาส่วนใหญ่เลือกใช้วิธีพิเศษ คิดเป็นร้อยละ 34.6 รองลงมาวิธีประกวดราคา คิดเป็นร้อยละ 25.8 และวิธีประกวดราคาอิเล็กทรอนิกส์ (e-bidding) คิดเป็นร้อยละ 24.4 ตามลำดับ ซึ่งจากข้อมูลเบื้องต้นของโครงการจัดซื้อจัดจ้างก่อสร้างภาครัฐ ส่วนใหญ่เป็นงานก่อสร้างอาคารและงานก่อสร้าง สังกัดองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น และนิยมจัดจ้างด้วยวิธีพิเศษ ซึ่งวิธีนี้กำหนดวงเงิน 100,000 บาท ถึง 2,000,000 บาท และใช้ระยะเวลาจัดหา 10-15 วัน [24] ซึ่งหลายหน่วยงานพิจารณาเลือกใช้วิธีนี้

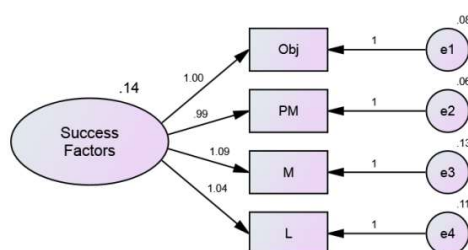
4.2. ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยัน

4.2.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยันอันดับแรก มีค่าน้ำหนักองค์ประกอบอยู่ระหว่าง 0.558 ถึง 0.973 และความแปรปรวนที่อธิบายด้านความสำเร็จในการจัดซื้อจัดจ้างก่อสร้างภาครัฐ (SMC) ได้ร้อยละ 41.2 ถึง 94.6 โดยค่าน้ำหนักองค์ประกอบที่สูงที่สุด คือ การปฏิบัติตามกฎระเบียบของกฎหมาย ($\beta = 0.973$) รองลงมา คือ การจัดสรรความรับผิดชอบ ($\beta = 0.930$) การสร้างระบบธรรมาภิบาล ($\beta = 0.901$) มีความพร้อมรับผิดชอบ ($\beta = 0.892$) และค่าน้ำหนักองค์ประกอบน้อยที่สุด คือ เทคโนโลยี ($\beta = 0.558$) ดังตารางที่ 2

4.2.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยันอันดับที่สองของปัจจัยความสำเร็จโครงการการจัดซื้อจัดจ้างก่อสร้างภาครัฐ มีค่าสถิติที่ไม่ผ่านเกณฑ์ตามที่กำหนดกล่าวคือ ค่าสถิติ ไคสแควร์ มีนัยสำคัญ (P-value <0.05)

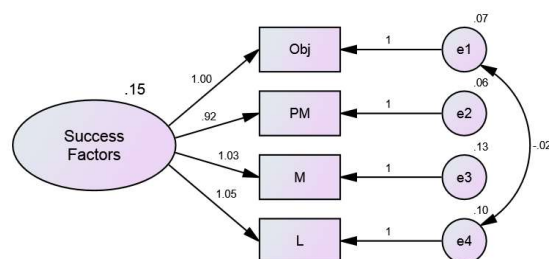
และ ค่าไค-สแควร์สัมพันธ์เท่ากับ 4.290 (สูงกว่าเกณฑ์) ดังตารางที่ 3 แสดงว่าโมเดลยังไม่สอดคล้องกับข้อมูลเชิงประจักษ์ จึงมีความจำเป็นต้องปรับโมเดลให้มีความกลมกลืนมากขึ้น โดยผู้วิจัยได้ปรับโมเดลตามค่าเสนอแนะจากดัชนีปรับโมเดล (Model Modification Indices: MI) ผลการวิเคราะห์โมเดลที่ปรับแล้ว ดังนี้ $\chi^2 = 0.637$, df = 1, p-value = .425; NFI = 0.999; GFI = .999; CFI = 1.00; RMR = .0001; RMSEA = .001 ดังรูปที่ 2 และตารางที่ 3 พบว่า มีความกลมกลืนกับข้อมูลเชิงประจักษ์ โดยปัจจัยความสำเร็จโครงการการจัดซื้อจัดจ้างก่อสร้างภาครัฐ ประกอบด้วย 4 องค์ประกอบ ได้แก่ หลักการและเหตุผล/ขอบเขตและการครอบคลุม (Obj) ด้านการบริหารโครงการ (PM) ด้านนิติกรรมและสัญญา (L) และด้านบริหารและการจัดการ (M) องค์ประกอบหลักมีค่าน้ำหนักองค์ประกอบมาตรฐาน (standardize Score : λ) อยู่ระหว่าง 0.744 - 0.827 ซึ่งองค์ประกอบด้านหลักการและเหตุผล/การครอบคลุม มีค่าสูงที่สุด และความแปรปรวนที่อธิบายความสำเร็จในการจัดซื้อจัดจ้าง (SMC) ได้ร้อยละ 55.4 ถึง 68.4 ดังตารางที่ 4

เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์โมเดลองค์ประกอบเชิงยืนยันอันดับที่สองของปัจจัยความสำเร็จโครงการการจัดซื้อจัดจ้างงานก่อสร้างภาครัฐ พบค่าน้ำหนักองค์ประกอบที่สูงที่สุด คือ ด้านหลักการและเหตุผล ($\beta = 0.827$) รองลงมา คือ ด้านการบริหารโครงการ ($\beta = 0.817$) และด้านนิติกรรมและสัญญา ($\beta = 0.794$) น้อยที่สุด คือ ด้านการบริหารและการจัดการ ($\beta = 0.744$) ดังตารางที่ 4 นอกจากนี้พบว่า ด้านหลักการและเหตุผล (Obj) และด้านนิติกรรมและสัญญา (L) มีความสัมพันธ์ที่ระดับ 0.02 ดังแสดงในรูปที่ 2 (ข) ซึ่งหมายความว่าเมื่อปัจจัยด้านหลักการและเหตุผลเพิ่มขึ้นหนึ่งหน่วย ระดับความสำเร็จของโครงการจัดซื้อจัดจ้างก่อสร้างของรัฐใน ด้านนิติกรรมและสัญญาจะเพิ่มขึ้นร้อยละ 2 หน่วยเช่นกัน



Chi-square = 8.579, CMIN/DF = 4.290, df = 2, p = .014
NFI = .987, GFI = .989, CFI = .990, RAR = .005, RMSEA = .097

(ก) ก่อนปรับโมเดล



Chi-square = 637, CMIN/DF = .637, df = 1, p = .425
NFI = .999, GFI = .999, CFI = 1.000, RAR = .001, RMSEA = .000

(ข) หลังการปรับโมเดล

รูปที่ 2 ผลการวิเคราะห์โมเดลองค์ประกอบเชิงยืนยันอันดับที่สองของปัจจัยความสำเร็จโครงการการจัดซื้อจัดจ้าง
ก่อสร้างภาครัฐ

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยันอันดับแรก โมเดลความสำเร็จการจัดซื้อจัดจ้างก่อสร้างภาครัฐ

ข้อ	ปัจจัย	Standardized Factor Loading (β)	SE	t-test	SMC
Obj: หลักการและเหตุผล/ขอบเขตและครอบคลุม (Scope and Coverage)					
1	การสร้างระบบธรรมาภิบาล	0.901	1	**	0.648
2	มีความพร้อมรับผิดชอบ	0.892	0.058	16.381**	0.796
3	ความโปร่งใสในแต่ละขั้นตอน	0.737	0.050	15.685**	0.543
4	ความคุ้มค่า	0.785	0.060	14.131**	0.617
5	การมีประสิทธิภาพ	0.777	0.059	13.684**	0.604
6	การเปิดเผยข้อมูล	0.677	0.067	13.013**	0.459
7	การไม่เลือกปฏิบัติ	0.651	0.079	11.076**	0.497
8	ความคุ้มค่าของราคาก่อสร้าง	0.589	0.063	9.368**	0.545
PM: ด้านการบริหารโครงการ (Project Management)					
9	การตอบสนองเป้าหมายการจัดการ ตารางเวลา	0.703	1	**	0.494
10	การวางแผนการจัดซื้อจัดจ้าง	0.736	0.057	17.984**	0.542
11	ความเชื่อมั่นด้านเวลาให้แล้วเสร็จ	0.693	0.054	17.390**	0.480
12	ประสิทธิภาพที่เกิดจากการใช้ประโยชน์ งบประมาณอย่างคุ้มค่า	0.785	0.080	14.068**	0.617
13	ความน่าเชื่อถือด้านการออกแบบและ ความทนทาน	0.770	0.082	13.150**	0.593

ตารางที่ 2 (ต่อ)

ข้อ	ปัจจัย	Standardized Factor Loading (β)	SE	t-test	SMC
14	ความยืดหยุ่นในขั้นตอนการทำงานงาน	0.686	0.086	11.707**	0.471
15	ความเชื่อมั่นของงบประมาณ	0.866	0.243	5.392**	0.555
16	เทคโนโลยี	0.558	0.092	8.467**	0.412
L: ด้านนิติกรรมและสัญญา (Legal Transactions and Contracts)					
17	การปฏิบัติตามกฎระเบียบของกฎหมาย	0.973	1	**	0.946
18	การจัดการเซ็นสัญญาที่ดี	0.862	0.032	27.166**	0.742
19	การกำหนดกฎระเบียบและข้อบังคับ	0.866	0.034	25.552**	0.781
M: ด้านบริหารและการจัดการ (Administration and Management)					
20	การมีส่วนร่วมของผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย	0.803	1	**	0.645
21	การจัดสรรความรับผิดชอบ	0.930	0.66	14.860**	0.865
22	การจัดการความเสี่ยง	0.681	0.115	6.026**	0.608
					0.612

หมายเหตุ: ** หมายถึง ระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01 และ * หมายถึง ระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ตารางที่ 3 ค่าสถิติความสอดคล้องของโมเดลองค์ประกอบกับข้อมูลเชิงประจักษ์ เที่ยงยืนอันดับที่สองของ
ปัจจัยความสำเร็จโครงการการจัดซื้อจัดจ้างก่อสร้างภาครัฐ

ค่าดัชนี	เกณฑ์	ก่อนการปรับโมเดล		หลังการปรับโมเดล	
		ค่าสถิติ	ผลการพิจารณา	ค่าสถิติ	ผลการพิจารณา
X^2/df	< 3.00	4.290	ไม่ผ่านเกณฑ์	0.637	ผ่านเกณฑ์
p-value of X^2	> 0.05	<0.014	ไม่ผ่านเกณฑ์	0.425	ผ่านเกณฑ์
NFI	> 0.90	0.987	ผ่านเกณฑ์	0.999	ผ่านเกณฑ์
GFI	> 0.90	0.989	ผ่านเกณฑ์	0.999	ผ่านเกณฑ์
CFI	> 0.95	0.990	ผ่านเกณฑ์	1.000	ผ่านเกณฑ์
RMR	< 0.08	0.005	ผ่านเกณฑ์	0.001	ผ่านเกณฑ์
RMSEA	< 0.08	0.097	ไม่ผ่านเกณฑ์	<0.001	ผ่านเกณฑ์

ตาราง 4 ผลการวิเคราะห์โมเดลองค์ประกอบเชิงยืนยันอันดับที่สองของปัจจัยความสำเร็จ

โครงการการจัดซื้อจัดจ้างก่อสร้างภาครัฐ

ข้อ	ปัจจัย	Mean	SD	λ	SE	t-test	SMC
Obj	ด้านหลักการและเหตุผล	4.37	0.60	0.827	1**	**	0.684
PM	ด้านการบริหารโครงการ	4.36	0.57	0.817	0.062	14.847**	0.667
L	ด้านนิติกรรมและสัญญา	4.39	0.60	0.794	0.074	14.227**	0.635
M	ด้านการบริหารและ การจัดการ	4.34	0.58	0.744	0.075	13.801**	0.554

หมายเหตุ : Obj หมายถึง ด้านหลักการและเหตุผล/ขอบเขตและการครอบคลุม (Scope and Coverage)

PM หมายถึง ด้านการบริหารโครงการ (Project Management)

L หมายถึง ด้านนิติกรรมและสัญญา (Legal Transactions and Contracts)

M หมายถึง ด้านการบริหารจัดการโครงการ (Administration and Management)

SD หมายถึง ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation)

 λ หมายถึง ค่าน้ำหนักองค์ประกอบ (Factor Loading)

SE หมายถึง ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (standard error)

** หมายถึง ระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01

SMC หมายถึง ความแปรปรวนของตัวแปรแฝง (Squared Multiple Correlations)

5. สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1. ข้อมูลเบื้องต้นของกลุ่มตัวอย่าง

การวิจัยครั้งนี้มีองค์ประกอบเชิงยืนยันปัจจัยความสำเร็จโครงการการจัดซื้อจัดจ้างก่อสร้างภาครัฐจากกรอบแนวคิดจากการวิจัยในอดีต ซึ่งสรุปได้ว่าปัจจัยที่เป็นองค์ประกอบของความสำเร็จโครงการการจัดซื้อจัดจ้างก่อสร้างภาครัฐ ประกอบด้วย 4 องค์ประกอบ โดยองค์ประกอบด้านหลักการและเหตุผล/ขอบเขตและการครอบคลุมมีความสำคัญมากที่สุด รองลงมาด้านการบริหารโครงการ ด้านนิติกรรมและสัญญา และด้านการบริหารและการจัดการ ตามลำดับ ทั้งนี้ผลการวิจัยที่มีความกลมกลืนกับข้อมูลเชิงประจักษ์ในระดับที่ยอมรับได้

5.2. ข้อมูลเบื้องต้นของกลุ่มตัวอย่าง

งานวิจัยนี้มีข้อเสนอแนะสำหรับเป็นแนวทางสำหรับผู้สนใจในการนำผลวิจัยไปใช้ คือ (1) โครงการการจัดซื้อจัดจ้างภาครัฐให้มีความสำเร็จโครงการการจัดซื้อจัดจ้าง

ก่อสร้างภาครัฐ ควรพัฒนา ส่งเสริมและกำกับดูแลให้ครอบคลุมทั้ง 4 องค์ประกอบ เพราะเป็นการพัฒนาที่ตรงกับโครงสร้างที่แท้จริงในบริบทดังกล่าว ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการตรวจสอบแล้วตามที่ได้เสนอ โดยองค์ประกอบที่สำคัญที่สุดในการพัฒนา คือ ด้านหลักการและเหตุผล/ขอบเขตและการครอบคลุม เพราะเป็นด้านที่มีค่าน้ำหนักองค์ประกอบมากที่สุด และจากผลการวิจัยนี้สามารถเป็นข้อมูลพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยความสำเร็จโครงการการจัดซื้อจัดจ้างงานก่อสร้างภาครัฐ สามารถนำไปพัฒนาระบบการจัดซื้อจัดจ้างก่อสร้างภาครัฐ ในระดับต่าง ๆ อาทิ ระดับนโยบาย โดยผู้บริหารควรกำหนดกิจกรรมที่ส่งเสริมให้สร้างระบบการจัดซื้อจัดจ้างก่อสร้างให้แก่หน่วยงานของรัฐตามผลการวิจัยนี้ เช่น การสร้างระบบสารสนเทศในการบริหารโครงการก่อสร้างหรือบริหารสัญญา เป็นต้น และในระดับปฏิบัติการควรออกแบบกิจกรรมที่สอดคล้องกับองค์ประกอบจากการวิจัยนี้ เพื่อ

ความสำเร็จโครงการการจัดซื้อจัดจ้างก่อสร้างภาครัฐต่อไป เช่น การกำหนดคอร์สอบรมหรือถ่ายทอดความรู้ให้แก่ผู้ปฏิบัติงาน เป็นต้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยมหาสารคามที่ให้ทุนอุดหนุนในการวิจัย และขอขอบคุณกรมบัญชีกลาง กระทรวงการคลังที่อำนวยความสะดวกในการติดต่อประสานงานหน่วยงานของรัฐที่เก็บรวบรวมข้อมูล ในครั้งนี้จนสำเร็จด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Aree, K. Patarapong, and P. Thongphon, "Adjustment under globalization," *Skr Academic J.*, vol. 7, no. 1, pp. 1-12, 2014.
- [2] V. Miller, *Understanding Digital Culture*, London, SAGE Publications Ltd., 2011.
- [3] กองบริหารงานวิจัยและประกันคุณภาพการศึกษา. (23 ธันวาคม 2559). พิมพ์เขียว Thailand 4.0 โมเดลขับเคลื่อนประเทศไทยสู่ความมั่งคั่ง มั่นคง และยั่งยืน, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: www.libarts.up.ac.th/v2/img/Thailand-4.0.pdf.
- [4] คณะกรรมการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ สำนักงาน. (20 มีนาคม 2558). การจัดทำแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 12 (พ.ศ. 2560-2564), [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: http://www.nesdb.go.th/more_news.php?cid=297
- [5] H. Walker and S. Brammer, "Sustainable procurement in the United Kingdom public sector," *Supply Chain Manage.*, vol. 14, no. 2, pp. 128-137, 2009.
- [6] S. Khoman, M. Wanrak, T. Vatcharceya, T. Chayun, C. Chatchai, S. Sutthi, N. Sittikorn, and S. Napon, "The world trade organisation's government procurement Agreement: A Study of Thailand's preparation for accession," Research report, The Comptroller-General's Department, Ministry of Finance., Bangkok, October 2009.
- [7] M. Podlogar, "E-Procurement Success Factors: Challenges and Opportunities for a Small Developing Country," PA: IDEA Group Publishing, 2007, pp. 34-75.
- [8] T. R. Berkland, "Performance based contracting and improving the current contracting process," M.S. Thesis, Dept. Civil Eng., Clemson University, USA, 2007.
- [9] B. Aschhoff and W. Sofka, "Innovation on Demand: Can public procurement drive market success of innovations," *Research Policy*, vol. 38, no. 8, pp. 1235-1247, 2008.
- [10] H. Doloj, K. C. Iyer and A. Sawhney, "Structural equation model for assessing impacts of contractor's performance on project success," *Inter. J. Proj. Manage.*, vol. 29, pp. 687-695, 2011.
- [11] N. Gudiene, A. Banaitis, N. Banaitiene and J. Lopes. "Development of a conceptual critical success factors model for construction projects: a case of Lithuania," in 11th International Conference on Modern Building Materials, Structures and Techniques, Lithuania: Elsevier, 2013, pp. 392-397.
- [12] S. M. H. M. Al-tmeemy, H. Abdul-Rahman and Z. Harun, "Future criteria for success of building projects in Malaysia," *Inter. journal of PM*, vol. 29, no. 3., pp. 337-348, 2011.

- [13] J. I. Alzahrani, and M. W. Emsley, "The impact of contractors' attributes on construction project success: A post construction evaluation," *Inter. J. Proj. Manage.*, vol. 31, no. 2., pp. 313-322, 2013.
- [14] A. P. Field, *Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics*, London, SAGE Publications Ltd., 2012.
- [15] W. Lawrence Neuman, *Social Research Methods: Qualitative and Quantitative Approaches*, Boston: Pearson/AandB, 2006.
- [16] ชัยวิชิต เชียรชนะ. "การใช้สถิติหลายตัวแปรเพื่อการวิจัย: การออกแบบ การวิเคราะห์ และตีความหมาย," กรุงเทพมหานคร, โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.
- [17] R. B. Kline, *Methodology in The Social Sciences. Principles and Practice of Structural Equation Modeling*, NY, USA: Guilford Press., 2005.
- [18] สุกมาศ อังศุโชติ, สมถวิล วิจิตรวรรณ และ รัชนิภา ญญโณภาณุวัฒน์. "สถิติวิเคราะห์สำหรับการวิจัยทางสังคมศาสตร์และพฤติกรรมศาสตร์: เทคนิคการใช้โปรแกรม LISREL," กรุงเทพมหานคร, มิสชั่นมีเดีย, 2551.
- [19] ยุทธ ไกยวรรณ, "การวิเคราะห์โมเดลสมการโครงสร้างด้วย Amos," กรุงเทพมหานคร, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2556.
- [20] นงลักษณ์ วิรัชชัย. "โมเดลลิสเรล: สถิติวิเคราะห์สำหรับการวิจัย," พิมพ์ครั้งที่ 3, กรุงเทพมหานคร, โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
- [21] L. Hu and B. M. Peter, "Cutoff criteria for fit indexes in covariance structure analysis: conventional criteria versus new alternatives," *Struct. Equ. Modeling.*, vol. 6, no. 1., pp. 1-55, 1999.
- [22] J. F. Hair, W. C. Black, B. J. Babin, R. E. Anderson and R. L. Tatham, *Multivariate data analysis*, New Jersey: Prentice Hall, 2006.
- [23] พูลพงศ์ สุขสว่าง. "หลักการวิเคราะห์โมเดลสมการโครงสร้าง," วารสารมหาวิทยาลัยนาธิวาสราชนครินทร์, ปีที่ 6, ฉบับที่ 2, หน้า 136-145, 2557.
- [24] สำนักนายกรัฐมนตรี. (23 กุมภาพันธ์ 2561). ระเบียบสำนักนายกรัฐมนตรีว่าด้วยการพัสดุ พ.ศ. 2535 และที่แก้ไขเพิ่มเติม, [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.anti-corruption.ops.go.th/files/การป้องกันการทุจริต/2535.pdf>

การประเมินเทคนิคการประมาณค่าฝนร่วมกับข้อมูลแผนที่ภูมิประเทศเชิงตัวเลข ในลุ่มน้ำตาปี

Assessment an Areal Rainfall Technique with Digital Elevation Model Data in Tapi Basin

ฐาปนีย์ มีชำนาญ¹, ธเนศร์ สมบูรณ์² วิษุวัตก์ แท้สมบัติ^{3*}

¹สำนักงานจัดรูปที่ดินกลาง กรมชลประทาน เขตดุสิต กรุงเทพมหานคร

²สำนักบริหารจัดการน้ำและอุทกวิทยา กรมชลประทาน เขตดุสิต กรุงเทพมหานคร

³ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน นครปฐม

Tapanee Meechamnan¹ Thanet Somboon² Wisuwat Taesombat^{3*}

¹Bureau of Central Land Consolidation, Royal Irrigation Department, Dusit District, Bangkok

²Office of Water Management and Hydrology, Royal Irrigation Department, Dusit District, Bangkok

³Irrigation Engineering Department, Faculty of Engineering, Kasetsart University

Kamphaeng Saen Campus

*Corresponding author: Email: fengwwt@ku.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการประมาณค่าฝนเชิงพื้นที่ของข้อมูลฝนรายวันที่ตรวจวัดจากภาคพื้นดิน โดยการประยุกต์ใช้เทคนิคการประมาณค่าเชิงพื้นที่ จำนวน 3 วิธี คือ Co-Kriging, Thin plate spline และ Thiessen Polygon ร่วมกับข้อมูลลักษณะภูมิประเทศเชิงตัวเลข SRTM-DEM ของ NASA ซึ่งมีความละเอียดในทางราบประมาณ 90 เมตร โดยใช้ข้อมูลปริมาณฝนรายวันจากสถานีวัดน้ำฝนลุ่มน้ำตาปี จำนวน 12 สถานี และพื้นที่ข้างเคียง 8 สถานี พิจารณาข้อมูลปริมาณฝนเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2553 มีนาคมปี พ.ศ. 2554 พฤศจิกายน พ.ศ. 2554 และ มกราคมปี พ.ศ. 2555 โดยทำการทดสอบความถูกต้องในการประมาณค่าโดยใช้สถิติค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน (ME) ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (MAE) และค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนยกกำลังสอง (RMSE) ผลการศึกษาพบว่า ในลุ่มน้ำตาปี ซึ่งมีภูมิประเทศส่วนใหญ่เป็นที่ราบมีภูเขาไม่มากนัก มีค่า ME เป็นลบ ทั้ง 3 วิธี แสดงว่า มีการประมาณค่าที่สูงกว่าค่าจริง (Over-Estimate) และยังพบว่าวิธีที่มีค่า MAE และ RMSE ที่ดีที่สุดคือวิธี Thin plate spline รองลงมาคือวิธี Co-Kriging และ วิธี Thiessen Polygon ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่าวิธี Thin plate spline มีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นวิธีการประมาณค่าฝนเชิงพื้นที่ลุ่มน้ำตาปี

คำสำคัญ: การประมาณค่าฝนเชิงพื้นที่ ทินเพลท สปาย โค-คริกกิง ลุ่มน้ำตาปี

ABSTRACT

This study aims to compare the areal daily rainfall interpolation derived from ground measurement rainfall by applying 3 techniques of areal interpolation: Co-Kriging, Thin plate spline, and Thiessen polygon. All the techniques were used with SRTM-DEM numerical topographic information of NASA whose horizontal resolution is 90 meters by using daily rainfall data from 12 rainfall stations in Tapi Basin and 8 adjoining stations. This study focused on rainfall data in November 2010, March 2011, November 2011, and January 2012 by testing the accuracy of the interpolation using ME, MAE and RMSE. The result shows that in southern part, whose topography is plain area with few mountains, ME from all methods were negative which means that the interpolation was over-estimated. It was also found that the best ME and RMSE came from Thin plate spline technique, following by Co-Kriging and Thiessen Polygon, respectively. The Thin plate spline is suitable areal rainfall interpolation in Tapi Basin.

Keyword: Areal rainfall interpolation, thin plate spline, co-kriging, Tapi basin.

1. บทนำ

ในประเทศไทยการตรวจวัดปริมาณฝนเป็นแบบจุดในแต่ละสถานีตรวจวัดฝนและสถานีตรวจวัดอากาศแต่ละหน่วยงาน เช่น กรมอุตุนิยมวิทยา กรมชลประทาน กรมทรัพยากรน้ำ รวมทั้งสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำและการเกษตร (องค์การมหาชน) เป็นต้น อย่างไรก็ตามในประเทศไทยมีความหนาแน่นของจำนวนสถานีวัดน้ำฝนค่อนข้างน้อย ข้อมูลปริมาณฝนที่ได้จึงเป็นเพียงตัวแทนของข้อมูล ณ บริเวณที่ทำการตรวจวัดเท่านั้น ไม่สามารถเป็นตัวแทนบริเวณที่อยู่ห่างไกลจากสถานีตรวจวัดฝนได้ จึงจำเป็นต้องหาเทคนิคการประมาณค่าฝนเชิงพื้นที่ ทั้งนี้ในปัจจุบันเทคนิคในการประมาณค่าเชิงพื้นที่ (Spatial Interpolation) ของข้อมูลฝนได้ถูกพัฒนาไปมาพร้อมทั้งมีการนำข้อมูลสภาพภูมิประเทศมาวิเคราะห์ร่วมด้วย ได้แก่ วิธี Thin plate spline และวิธี Co-Kriging เป็นต้น ซึ่งเป็นเพราะเชื่อว่าฝนจะมีโอกาสที่ฝนจะตกมากขึ้นในพื้นที่ที่มีความสูงเพิ่มขึ้น ซึ่งลักษณะดังกล่าวมีความสำคัญต่อการประมาณค่าฝนเชิงพื้นที่ได้อย่างถูกต้องและแม่นยำมากขึ้นจากอิทธิพลของสภาพภูมิประเทศที่เกิดขึ้น

ข้อจำกัด Grimes et al. (1999) ที่เด่นชัดของการตรวจวัดปริมาณฝนจากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดินคือเป็น

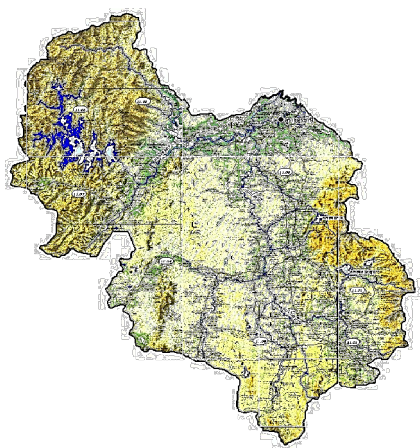
การตรวจวัดข้อมูลเป็นจุด ดังนั้น จำเป็นต้องมีจำนวนสถานีตรวจวัดภาคพื้นดินค่อนข้างหนาแน่นจึงจะทำให้การประมาณปริมาณฝนเชิงพื้นที่ที่มีความถูกต้องมากขึ้น ได้ ศึกษาการประมาณค่าเชิงพื้นที่ของข้อมูลปริมาณฝนรายวันโดยวิธี Thin plate spline ในลุ่มน้ำปิงตอนบน มาเปรียบเทียบกับประมาณค่าด้วยวิธีรูปเหลี่ยมสี่เหลี่ยมและวิธีเส้นชั้นน้ำฝน พบว่าการประมาณค่าข้อมูลฝนโดยวิธี Thin plate spline ให้ผลการประมาณค่าที่เหมาะสมกับพื้นที่ที่เป็นภูเขาสลับซับซ้อน ยกตัวอย่างเช่น (วิชูวัฒน์, 2550) พบว่าฝนในภาคเหนือในลุ่มน้ำปิงตอนบน จะมีลักษณะเป็นฝนภูเขาซึ่งพบว่าฝนจะมีปริมาณมากขึ้นในพื้นที่ที่มีความสูงเพิ่มขึ้น ซึ่งลักษณะดังกล่าวมีความสำคัญต่อการประมาณค่าฝนเชิงพื้นที่ได้อย่างถูกต้องและแม่นยำมากขึ้นจากอิทธิพลของสภาพภูมิประเทศที่เกิดขึ้น (วิชูวัฒน์, 2555)

การศึกษาวิจัยครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการศึกษาการประมาณค่าปริมาณฝนเชิงพื้นที่ของข้อมูลฝนรายวันภาคพื้นดินร่วมกับข้อมูลสภาพภูมิประเทศด้วยเทคนิคการประมาณค่าฝนเชิงพื้นที่ 3 วิธี ได้แก่ Thin Plate Spline Co-Kriging และ Thiessen Polygon กับพื้นที่ศึกษาลุ่มน้ำตาปซึ่งมีลักษณะของสภาพภูมิประเทศที่แตกต่างจาก

ภาคเหนือ และภาคอื่นๆ ทั้งนี้ วิธี Thin Plate Spline และ Co-Kriging เป็นวิธีที่ต้องใช้ค่าระดับความสูงของสถานีน้ำฝนมาเป็นตรรกะอีกตัวหนึ่งในการประมาณค่า ส่วนวิธี Thiessen Polygon ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมในการใช้ประมาณค่าน้ำฝนจะใช้ค่าปริมาณน้ำของแต่ละสถานีเพียงอย่างเดียวในการประมาณค่า

2. พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษาคือพื้นที่ลุ่มน้ำตาปีในภาคใต้ของประเทศไทย ตั้งอยู่ระหว่างเทือกเขาถนนศรีธรรมราชและทิวเขาภูเก็ด พื้นที่ส่วนใหญ่เป็นที่ราบ แม่น้ำตาปีซึ่งมีต้นกำเนิดจากเขาช่องลมใต้บริเวณเทือกเขาถนนศรีธรรมราช จะไหลขึ้นไปทางเหนือผ่านจังหวัดนครศรีธรรมราช และจังหวัดสุราษฎร์ธานี ส่วนแม่น้ำพุมดวงมีต้นกำเนิดจากเทือกเขาภูเก็ดในจังหวัดสุราษฎร์ธานี จะไหลมาบรรจบกับแม่น้ำตาปี ที่อำเภอพุนพิน จังหวัดสุราษฎร์ธานี ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ลุ่มน้ำตาปี

3. หลักการและทฤษฎีในการศึกษา

3.1 การตรวจวัดข้อมูลฝนภาคพื้นดินภาคพื้นดิน

3.1.1 การตรวจวัดน้ำฝนด้วยเครื่องวัด

น้ำฝน (Rain Gauge)

การตรวจวัดน้ำฝนด้วยเครื่องวัดน้ำฝนภาคพื้นดิน (Rain Gauge) เป็นเครื่องมือการตรวจวัดที่

นิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลาย กล่าวคือเครื่องมือดังกล่าว จะทำการบันทึกค่าปริมาณน้ำฝนที่ตกลงมาในภาชนะต่อหนึ่งหน่วยเวลาโดยตรง ตัวอย่างของเครื่องวัดน้ำฝนแบบบันทึกต่อเนื่องที่นิยมใช้ในงานอุทกวิทยามี 3 ชนิดได้แก่ เครื่องวัดน้ำฝนแบบถ้วยกระดก (Tipping Bucket Rain Gauge) เครื่องวัดน้ำฝนแบบชั่งน้ำหนัก (Weighting Bucket Rain Gauge) เครื่องวัดน้ำฝนแบบลูกลอย (Float Type Rain Gauge)

3.2 ลักษณะฝนภูเขา

ฝนภูเขา (orographic storm) มวลอากาศที่อุ่นไอน้ำพัดจากทะเล ปะทะภูเขาจะลอยตัวสูงขึ้นและกลั่นตัวเป็นน้ำฝนบริเวณด้านหน้าภูเขา ดังแสดงในรูปที่ 2

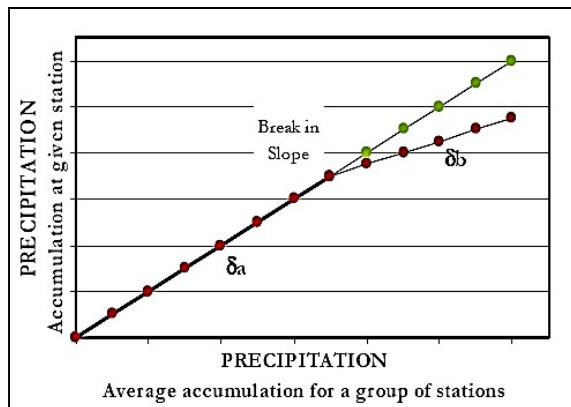


รูปที่ 2 ลักษณะฝนภูเขา

ที่มา: วิษุวัต (2555)

3.3 การตรวจสอบความกลมกลืนของข้อมูลของข้อมูลฝน (Gauge consistency)

แนวทางการตรวจสอบทำได้ด้วยการวิเคราะห์ด้วย double-mass curve ซึ่งกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำฝนสะสมของสถานีที่ต้องการตรวจสอบกับค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำฝนสะสมของกลุ่มสถานีที่อยู่ข้างเคียง กรณี ข้อมูลของสถานีนั้นมีความกลมกลืนกันตลอดช่วงเวลาที่ทำการบันทึก กราฟที่ได้จะเป็นเส้นตรง หากข้อมูลมีการเปลี่ยนแปลง กราฟจะมีลักษณะเป็นเส้นหักดังแสดงในรูปที่ 3 สังเกตได้จากการเปลี่ยนความลาดชันของเส้นกราฟ ซึ่งค่าความลาดชันเหล่านี้จะนำมาใช้ในการปรับข้อมูลให้กลับมากลมกลืนกัน



รูปที่ 3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำฝนสะสมของ
สถานีที่ต้องการตรวจสอบกับค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำฝน
สะสมของกลุ่มสถานีที่อยู่ข้างเคียง
ที่มา: วิษุวัตก์ (2555)

3.4 ความลึกเฉลี่ยของฝนทั้งพื้นที่ (Average Areal Rainfall)

3.4.1 วิธี Cokriging

วิธี Cokriging เป็นการประมาณค่าข้อมูลเชิงพื้นที่
คล้ายกับวิธี Kriging แต่มีการเพิ่มชุดข้อมูลเพื่อให้การ
ประมาณค่าดียิ่งขึ้น โดยชุดข้อมูลที่เพิ่มจะสัมพันธ์กับชุด
ข้อมูลหลักเพื่อให้ผลลัพธ์ดียิ่งขึ้น เช่น ใช้ตัวแปรร่วมระดับ
ความสูงจากน้ำทะเลพิจารณาพร้อมกับข้อมูลในการประมาณ
ค่าข้อมูลอุณหภูมิหรือปริมาณน้ำฝน เป็นต้น

$$\bar{P} = \sum_{i=1}^n P_i \times w_i + \sum_{j=1}^n \beta_j \times t_j \quad (1)$$

เมื่อ $\bar{P}$ = ค่าประมาณที่ต้องการ

P_i = ค่าของจุด

w_i = น้ำหนักที่มีความสัมพันธ์ระหว่างจุดที่
ต้องการประมาณค่ากับจุดที่ไม่ทราบค่า

β_j = แตกต่างกัน 0 และ 100%

t_j = น้ำหนักที่มีความสัมพันธ์ระหว่างจุดที่
ต้องการประมาณค่ากับ

n = จำนวนข้อมูลทั้งหมด

3.4.2 วิธี Thin Plate Spline

การประมาณค่าด้วยวิธี Thin Plate Spline จะ
สมมติให้ข้อมูลน้ำฝนที่สถานีวัดน้ำต่างๆ แปรผันไปตาม
พิกัดภูมิศาสตร์ในระบบพิกัดแบบ Latitude และ
Longitude และมีความสัมพันธ์กับระดับความสูงของ
พื้นที่ด้วย (Taesombat and Sriwongsitanon, 2009)

$$r(x_i, y_i, z_i) = z(x_i, y_i, z_i) + \varepsilon(x_i, y_i, z_i) \quad (2)$$

เมื่อ r = ข้อมูลน้ำฝนแบบจุดที่สถานีวัดน้ำฝน

z = ค่า smoothing function ที่เหมาะสม
ที่สุดที่ประเมินได้จากข้อมูลฝนแบบจุด

ε = ค่าความผิดพลาดแบบไม่ต่อเนื่องที่สถานี
วัดน้ำฝนแต่ละแห่ง

x_i = ค่า latitude ที่สถานีวัดน้ำฝนแต่ละแห่ง

y_i = ค่า longitude ที่สถานีวัดน้ำฝนแต่ละ
แห่ง

z_i = ค่าระดับความสูงที่สถานีวัดน้ำฝนแต่ละ
แห่ง

3.4.3 วิธี Thiessen Polygon

วิธีของธิเอสเซนเป็นการสร้างรูปหลายเหลี่ยม
(Polygon) ขึ้น โดยถือว่าปริมาณน้ำฝนในพื้นที่หลาย
เหลี่ยมนั้นมีค่าสม่ำเสมอเท่ากับสถานีวัดที่ตั้งในรูปหลาย
เหลี่ยมนั้น แล้วจึงหาพื้นที่แต่ละสถานีครอบคลุมเพื่อทำ
การคำนวณค่าเฉลี่ยแบบมีค่าถ่วงน้ำหนักต่อไป
(เอกสิทธิ์, 2547ข) ข้อจำกัดของวิธีนี้คือ เมื่อมีการ
เปลี่ยนแปลงรูปแบบของสถานีวัดน้ำฝน จะต้องหาค่า
Weighting Factor หรือรูปหลายเหลี่ยม Thiessen ใหม่
นอกจากนี้วิธีนี้ไม่ได้คำนึงถึงอิทธิพลของสภาพภูมิประเทศ
ต่อลักษณะการเกิดฝน โดยจะคำนึงถึงเฉพาะระยะทาง
เป็นหลักในการสร้างรูปหลายเหลี่ยมเท่านั้น (สายสุนีย์,
2546)

$$\bar{P} = \sum_{i=1}^n w_i \cdot P_i, \quad w_i = \frac{A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (3)$$

เมื่อ $\bar{P}$: ปริมาณฝนเฉลี่ยทั้งพื้นที่ศึกษา

P_i : ปริมาณฝนของแต่ละสถานีในพื้นที่
ศึกษา

n : จำนวนสถานีวัดน้ำฝนในพื้นที่ศึกษา

A_i : พื้นที่แต่ละสถานีศึกษา

w_i : สัดส่วนพื้นที่ต่อพื้นที่ทั้งหมดของ
แต่ละสถานี

3.5 วิธีการตรวจสอบผลการประมาณค่าเชิงพื้นที่

วิธีการตรวจสอบผลการประมาณค่าที่ใช้มี 3 วิธี
คือ ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (Mean Absolute
Error, MAE), ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนยกกำลังสอง
(Root Mean Square Error, RMSE) และค่าเฉลี่ยความ
คลาดเคลื่อน (Mean Error)

4. วิธีดำเนินการ

4.1 การรวบรวมข้อมูล

การรวบรวมข้อมูลประกอบด้วย ข้อมูลฝนตรวจวัด
ภาคพื้นดินแบบรายวัน และข้อมูล SRTM-DEM จาก
หน่วยงานที่เกี่ยวข้องในพื้นที่ลุ่มน้ำตาปีในภาคใต้ของ
ประเทศไทย

4.2 การตรวจสอบกลมกลืนและการคัดเลือก สถานีวัดฝน

ตรวจสอบข้อมูลน้ำฝนเบื้องต้น ทำการคัดเลือก
ข้อมูลสถานีวัดน้ำฝนที่ขาดหายไปทั้งปี หรือมีค่าผิดปกติออก

การตรวจสอบกลมกลืนและการคัดเลือกสถานีวัด
ฝนด้วยวิธี Double Mass Curve โดยพิจารณาจากกราฟ
ของสถานีฝนได้มีการเรียงตัวเป็นเส้นตรงด้วยความชัน
เดียวเมื่อเปรียบเทียบสถานีฝนโดยรอบจะถูกคัดเลือกเพื่อ
นำไปใช้วิเคราะห์ประมาณค่าฝนเชิงพื้นที่ต่อไป

คัดเลือกข้อมูลฝนจากสถานีวัดน้ำฝนโดยจะเลือก
ศึกษาในกรณีฝนสูงสุด 2 ปี

4.3 การวิเคราะห์เพื่อหาระดับความสูงของสถานีวัด ฝนภาคพื้นดิน

การวิเคราะห์เพื่อหาระดับความสูงของสถานีวัด
ฝนภาคพื้นดินโดย SRTM-DEM จะถูกรวบรวมให้
ครอบคลุมพื้นที่ภาคใต้และนำตำแหน่งของสถานีฝนแต่ละ

แห่งมาวิเคราะห์ด้วยใช้โปรแกรมระบบสารสนเทศ
ภูมิศาสตร์ (GIS) เพื่อหาระดับความสูงในหน่วยของ
ระดับน้ำทะเลปานกลาง หรือ ม.รทก. (m MSL) หลังจาก
นั้น จะทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างฝนเฉลี่ยราย
ปีกับระดับความสูงของสถานีฝนว่ามีค่าสหสัมพันธ์ที่ดี
หรือไม่ ถ้ามีค่ามากกว่า 0.6 แสดงว่า ปริมาณฝนจะแปร
ผันโดยตรงกับระดับความสูงที่เพิ่มขึ้น

การวิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์ R^2 ระหว่าง
ระดับความสูงของสถานีวัดน้ำฝนภาคพื้นดินกับค่าปริมาณ
น้ำฝนเฉลี่ยรายปี

4.4 การประมาณค่าเชิงพื้นที่ของข้อมูลฝน ภาคพื้นดินร่วมกับข้อมูลสภาพภูมิประเทศด้วยวิธีต่างๆ

4.4.1 วิธี Co-Kriging

1) สร้างขอบเขตที่ครอบคลุมพื้นที่ศึกษาใน
รูปแบบ Polygon

2) นำเข้าข้อมูลฝนที่คัดเลือกแล้ว ซึ่งเป็นฝน
รายวันของแต่ละสถานีวัดน้ำฝนแสดงในรูปที่ 4 รูป (ก)

3) ทำการปิดสถานีวัดน้ำฝนที่ต้องการทราบ
ค่า จากนั้นใช้โปรแกรม ArcGIS สร้างปริมาณฝนเชิงพื้นที่
ด้วยวิธี Co-Kriging ดังแสดงในรูปที่ 4 รูป (ข)

4) หาค่าปริมาณฝนที่ทำกรประมาณค่าที่
ตรงกับตำแหน่งพิกัดของสถานีวัดน้ำฝนที่ทำกรปิดไว้ใน
ข้อ 3) ทำการบันทึกข้อมูลเพื่อนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับ
ค่าจริงของสถานีนั้นๆ ดังแสดงในรูปที่ 4 รูป (ค)

5) ทำการสร้างค่าปริมาณฝนทุกๆสถานีวัด
น้ำฝนที่ต้องการทราบค่า จนครบทุกสถานีใน 1 เดือน

4.4.2 วิธี Thin plate spline

หาค่าปริมาณฝนเชิงพื้นที่ด้วยวิธี Thin
Plate Spline โดยใช้โปรแกรม ANUSPLIN Version 4.4
ประมาณค่าของข้อมูลฝนซึ่งมีลักษณะข้อมูลแบบจุดให้
เป็นข้อมูลในเชิงพื้นที่ในรูปแบบข้อมูลต่อเนื่องหรือเป็นก
ริดในระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์

1) สร้างขอบเขตที่ครอบคลุมพื้นที่ศึกษาใน
รูปแบบ Polygon

2) นำเข้าข้อมูลฝนที่คัดเลือกแล้ว ซึ่งเป็นฝน
รายวันของแต่ละสถานีวัดน้ำฝน

3) ทำการปิดสถานีวัดน้ำฝนที่ต้องการทราบค่า จากนั้นใช้โปรแกรม ANUSPLIN Version 4.4 สร้างปริมาณฝนเชิงพื้นที่ด้วยวิธี Thin Plate Spline โดยสร้างให้เต็มพื้นที่ขอบเขตที่กำหนดไว้ในข้อ 1)

4) หาค่าปริมาณฝนที่ทำการประมาณค่าที่ตรงกับตำแหน่งพิกัดของสถานีวัดน้ำฝนที่ทำการปิดไว้ในข้อ 3) ทำการบันทึกข้อมูลเพื่อนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าจริงของสถานีนั่นๆ

5) ทำการสร้างค่าปริมาณฝนทุก ๆ สถานีวัดน้ำฝนที่ต้องการทราบค่า จนครบทุกสถานีใน 1 เดือน

4.4.3 วิธี Thiessen Polygon

1) สร้างขอบเขตที่ครอบคลุมพื้นที่ศึกษาในรูปแบบ Polygon

2) นำเข้าข้อมูลฝนที่คัดเลือกแล้ว ซึ่งเป็นฝนรายวันของแต่ละสถานีวัดน้ำฝน

3) ทำการปิดสถานีวัดน้ำฝนที่ต้องการทราบค่า จากนั้นใช้โปรแกรม ArcGIS สร้างปริมาณฝนเชิงพื้นที่ด้วยวิธี Thiessen Polygon โดยสร้างให้เต็มพื้นที่ขอบเขตที่กำหนดไว้ในข้อ 1)

4) หาค่าปริมาณฝนที่ทำการประมาณค่าที่ตรงกับตำแหน่งพิกัดของสถานีวัดน้ำฝนที่ทำการปิดไว้ในข้อ 3)

3) ทำการบันทึกข้อมูลเพื่อนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าจริงของสถานีนั่นๆ

5) ทำการสร้างค่าปริมาณฝนทุก ๆ สถานีวัดน้ำฝนที่ต้องการทราบค่า จนครบทุกสถานีใน 1 เดือน

4.4.4 ดรรชนีทางสถิติ

โดยการบรรยายลักษณะการกระจายของปริมาณน้ำฝนโดยวิธีการประมาณค่าแต่ละวิธีด้วยลักษณะทางสถิติ ได้แก่ ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (Mean Absolute Error, MAE), ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนยกกำลังสอง (Root Mean Square Error, RMSE) และค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน (Mean Error)

1) ME (Mean Error)

ME เป็นวิธีการหาค่าเฉลี่ยของความแตกต่างระหว่างค่าจากการประมาณค่าและค่าจริง หาก ME มีค่าเป็นบวก แสดงว่า ค่าการประมาณที่ได้ต่ำกว่าค่าจริง แต่ถ้าหาก ME มีค่าเป็นลบ แสดงว่า ค่าการประมาณที่ได้สูงกว่าค่าจริง

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x) \quad (4)$$

โดย x_i = ค่าจริง

x = ค่าที่ได้จากการประมาณค่า

n = จำนวนข้อมูลทั้งหมด

2) MAE (Mean Absolute Error)

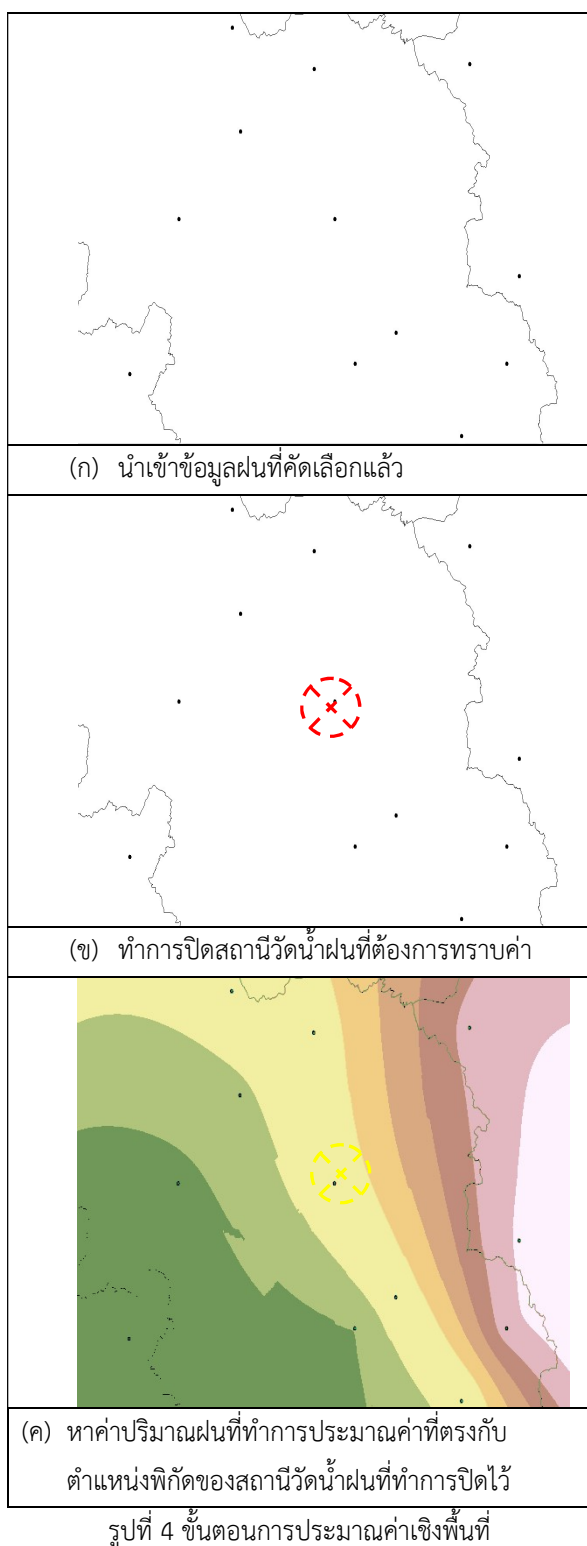
MAE เป็นวิธีการหาค่าเฉลี่ยของความแตกต่างสัมบูรณ์ระหว่างค่าจากการประมาณค่าและค่าจริง หาก MAE มีค่าน้อย แสดงว่า ค่าการประมาณที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าจริง

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - x| \quad (5)$$

3) RMSE (Root Mean Square Error)

RMSE คือการวัดค่าความแตกต่างระหว่างค่าจริงและค่าประมาณที่จากการประมาณค่าแต่ละวิธี หากค่า RMSE มีค่าน้อย แสดงว่า ค่าการประมาณที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าจริง

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x)^2} \quad (6)$$

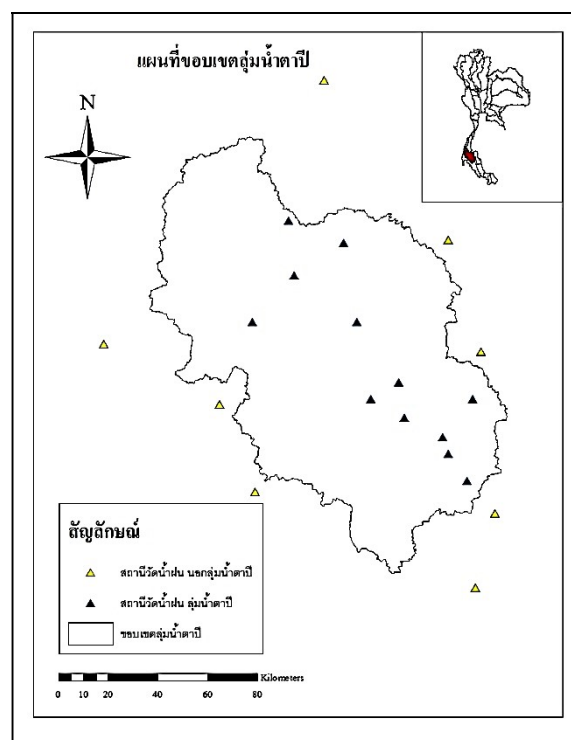


5. ผลการทดลอง

5.1 การรวบรวมข้อมูล

5.1.1 ข้อมูลฝนภาคพื้นดิน

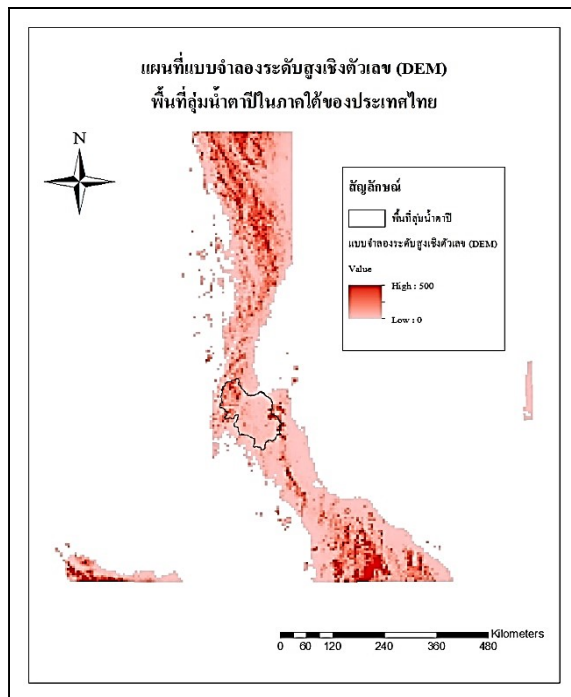
ข้อมูลฝนภาคพื้นดินจะรวบรวมจากสองหน่วยงาน ได้แก่ กรมอุตุนิยมวิทยาและสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำและการเกษตร (องค์การมหาชน) ในช่วงเดือนเมษายน 2552 ถึง เดือน มีนาคม 2557 ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ขอบเขตพื้นที่ภาคใต้ของประเทศไทยและสถานีวิัดน้ำฝน

5.1.2 ข้อมูลสภาพภูมิประเทศ

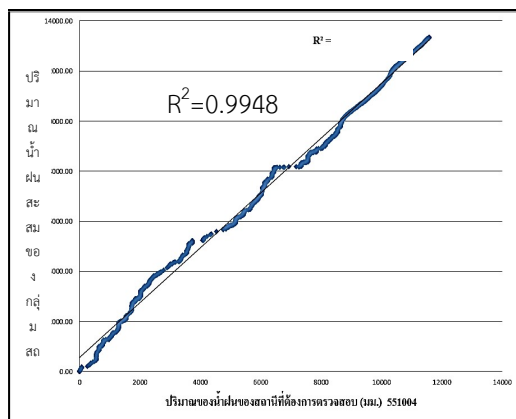
ข้อมูลสภาพภูมิประเทศจะใช้ข้อมูลแผนที่ภูมิประเทศเชิงตัวเลข DEM: Digital Elevation Model จาก SRTM ของ NASA ซึ่งมีความละเอียดทางราบประมาณ 90 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 ข้อมูลแบบจำลองระดับสูงเชิงตัวเลข (DEM) พื้นที่ลุ่มน้ำตาปีในภาคใต้ของประเทศไทย

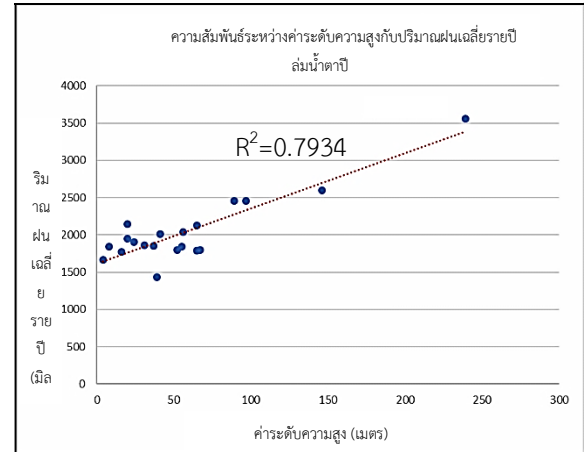
5.2 ผลการตรวจสอบความกลมกลืนและการคัดเลือกสถานีน้ำฝน

ผลของการตรวจสอบความกลมกลืนและการคัดเลือกสถานีน้ำฝนในลุ่มน้ำตาปีจำนวน 12 สถานีมีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.9993 – 0.9903 และพื้นที่ข้างเคียงจำนวน 8 สถานี มีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.9991 – 0.9781 ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 ภาพตัด ปริมาณของน้ำฝนของสถานีที่ต้องการตรวจสอบ (มม.) 551004 สมของสถานีที่ต้องการตรวจสอบกับค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำฝนสะสมของกลุ่มสถานีที่อยู่ข้างเคียงของสถานี 551004 (ศรีรัฐนิคม)

5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฝนเฉลี่ยรายปีกับระดับความสูง



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าระดับความสูงกับปริมาณฝนเฉลี่ยรายปีลุ่มน้ำตาปี

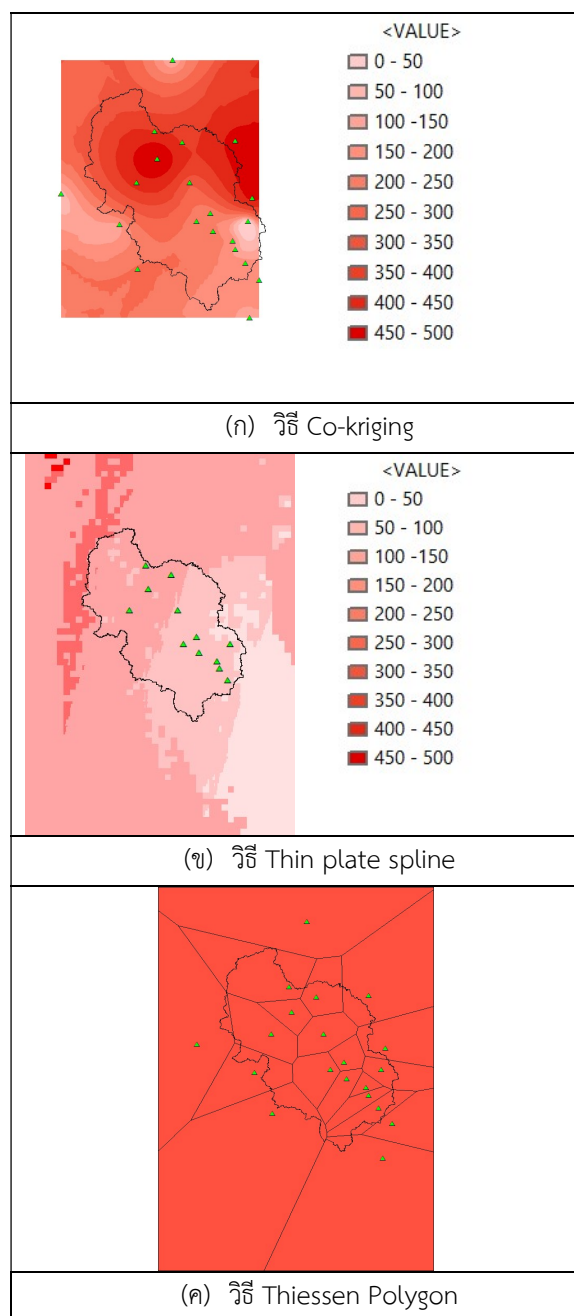
จากรูปที่ 8 จะเห็นได้ว่าปริมาณน้ำฝนกับค่าความสูงของสถานีมีความสัมพันธ์ค่อนข้างดี เนื่องจากค่า R^2 0.7934 ซึ่งถือว่ามากพอสมควร

5.4 ผลการประเมินค่าฝนเชิงพื้นที่

การศึกษาการประมาณค่าปริมาณฝนเชิงพื้นที่ด้วยวิธีการทั้ง 3 ได้คัดเลือกวันที่มีฝนตกหนักมาแสดงเป็นตัวอย่างของผลการประมาณค่าข้อมูลน้ำฝนภาคพื้นดินรายวันทั้งลุ่มน้ำตาปี ได้แก่ ข้อมูลฝนรายวันของวันที่ 29 มีนาคม พ.ศ. 2554 ดังรูปที่ 8

5.4.1 ผลการประมาณค่าเชิงพื้นที่ของข้อมูลฝนภาคพื้นดินร่วมกับข้อมูลสภาพภูมิประเทศด้วยวิธีต่างๆ

จากรูปที่ 9 เป็นการจะแสดงตัวอย่างลักษณะรูปแบบการกระจายตัวของปริมาณฝน (มิลลิเมตร) ภาคพื้นดินในแต่ละวิธีของลุ่มน้ำตาปีในภาคใต้ของประเทศไทย ณ วันที่ 29 มีนาคม พ.ศ. 2554 โดยวิธีแรก รูป (ก) คือ วิธี Co-kriging ต่อมารูป (ข) คือ วิธี Thin plate spline และสุดท้ายรูป (ค) คือ วิธี Thiessen Polygon

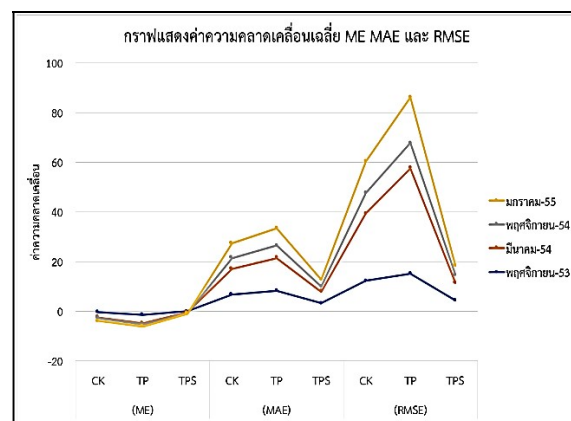


รูปที่ 9 ลักษณะรูปแบบการกระจายตัวของปริมาณฝน (มิลลิเมตร) ภาคพื้นดินในแต่ละวิธี กลุ่มน้ำตาปีในภาคใต้ของประเทศไทย ณ วันที่ 29 มีนาคม พ.ศ. 2554

5.4.2 ผลของตรรกะทางสถิติ

จากตารางที่ 1 แสดงค่า ME MAE และ RMSE ในเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2553 มีนาคม พ.ศ. 2554 พฤศจิกายน พ.ศ. 2554 และมกราคม พ.ศ. 2555 วิธีการประมาณค่าที่ดีที่สุดคือ Thin Plate Spline และจาก

รูปที่ 10 จะเห็นว่าเส้นกราฟค่า ME ทั้งวิธี Co-Kriging, Thin plate spline และ Thiessen Polygon นั้นใกล้เคียงกันและมีค่าเป็นลบ ส่วนค่า MAE และ RMSE เส้นกราฟค่าความคลาดเคลื่อนของแต่ละวิธีโดยเรียงจากน้อยไปมากคือ วิธี Thin plate spline, Co-Kriging และ Thiessen Polygon ตามลำดับ



รูปที่ 10 กราฟแสดงค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย ME MAE และ RMSE

ตารางที่ 1 ลักษณะทางสถิติในการประมาณค่าในแต่ละวิธีของกลุ่มน้ำตาปี

ลักษณะทางสถิติ	การประมาณค่า	กลุ่มน้ำตาปี			
		พ.ย. 53	มี.ค. 54	พ.ย. 54	ม.ค. 55
	ค่า	53	54	54	55
(ME)	CK	-0.48	-2.02	-0.30	-1.17
	TP	-1.53	-3.48	-0.39	-0.89
	TPS	-0.10	-0.41	-0.27	-0.20
(MAE)	CK	6.66	10.44	4.24	6.08
	TP	8.16	13.18	5.09	6.91
	TPS	3.21	4.60	2.03	2.95
(RMSE)	CK	12.26	27.11	8.15	12.75
	TP	15.02	42.57	10.22	18.40
	TPS	4.40	7.12	3.02	3.84

หมายเหตุ CK คือ Co-Kriging

TP คือ Thiessen Polygon

TPS คือ Thin Plate Spline

ME คือ ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน

MAE คือ ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์

RMSE คือ ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนยกกำลังสอง

6. วิเคราะห์ผลการทดลอง

ในการประมาณค่าฝนภาคพื้นดินจากการหาค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (Mean Absolute Error, MAE), ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนยกกำลังสอง (Root Mean Square Error, RMSE) และค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน (Mean Error) ทั้ง 3 วิธี วิธีที่เหมาะสมสำหรับกลุ่มน้ำตาปีของข้อมูลในเดือน พฤศจิกายน พ.ศ. 2553 มีนาคม พ.ศ.2554 พฤศจิกายน พ.ศ. 2554 และ มกราคม พ.ศ.2555 คือวิธี Thin plate spline ซึ่งให้ค่าประมาณความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์น้อยที่สุด เนื่องจากการหาค่าประมาณฝนด้วยวิธี Thin plate spline เนื่องจากเป็นวิธีที่ใช้ความระดับสูงของสถานีมาเป็นตรรกะอีกตัวหนึ่งในการประมาณค่าฝนเหมือนกับวิธี Co-Kriging แต่วิธี Thin plate spline นั้นสามารถใช้ได้กับข้อมูลฝนที่เป็น 0 หลายวันติดต่อกันได้ซึ่งต่างจากวิธี Co-Kriging ที่ไม่สามารถประมาณค่าน้ำฝนเชิงพื้นที่ได้แม่นยำในกรณีที่ค่าฝน มีค่าเป็น 0 ส่วนวิธี Thiessen Polygon ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้นิยมใช้ในการประมาณค่าฝนให้ค่าความคลาดเคลื่อนสูงเนื่องจากการประมาณค่าใช้เพียงค่าน้ำฝนเพียงอย่างเดียว ไม่ได้มีความระดับความสูงเข้ามาเกี่ยวข้อง

7. สรุป

7.1 บทสรุป

ในการประมาณค่าฝนภาคพื้นดินจากการหาค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (Mean Absolute Error, MAE), ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนยกกำลังสอง (Root Mean Square Error, RMSE) และค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน (Mean Error) วิธีที่ดีที่สุดคือวิธี Thin plate spline ซึ่งถือว่าเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับกลุ่มน้ำตาปีในภาคใต้ของประเทศไทย

7.2 ข้อเสนอแนะ

7.2.1 ในการศึกษาเรื่องการประมาณค่าฝนเชิงพื้นที่กรณีที่จะนำไปศึกษาต่อนั้นควรจะศึกษาทั้งในกรณีที่ปริมาณฝนมาก ปานกลาง และน้อย ในพื้นที่นั้นๆ และควรใช้ข้อมูลฝนมากกว่า 5 ปี ขึ้นไปมาพิจารณาเพื่อความน่าเชื่อถือในผลการทดลองมากขึ้น

7.2.2 การศึกษาเรื่องการประมาณค่าฝนเชิงพื้นที่ของกลุ่มน้ำตาปีในภาคใต้ของประเทศไทยเป็นเพียงส่วนเล็กน้อยเท่านั้น ดังนั้นควรจะมีการศึกษาที่ให้ครอบคลุมทั้งประเทศต่อไป

7.2.3 การศึกษาเรื่องการประมาณค่าฝนเชิงพื้นที่นอกจากจะใช้ความสูงของพื้นที่มาพิจารณาแล้วนั้น ยังสามารถนำเรื่องการใช้ที่ดิน เส้นทางพายุ ฯ มาพิจารณาร่วมได้

8. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงสำหรับผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิษุวัตม์ แต่สมบัติ ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร.ไชยพงษ์ เทพประสิทธิ์ ที่ให้คำปรึกษาเสนอแนะแนวทางในการวางแผนงานวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ของวิทยานิพนธ์ จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ และขอกราบขอบพระคุณ ดร.ธนศรี สมบูรณ์ ผู้ทรงคุณทรงวุฒิภายนอก ที่ได้ให้ความกรุณาตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมชลประทานทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนด้วยดีตลอดมา รวมถึงบุคลากรทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำต่าง ๆ ขอขอบคุณกรมอุตุนิยมิวิทยา สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำและการเกษตร (องค์การมหาชน) และเจ้าหน้าที่ของกรมชลประทาน ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลรวมทั้งให้ความช่วยเหลือด้วยดีมาตลอด

สุดท้ายขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมชลประทาน, โครงการศึกษาวางระบบและติดตั้งระบบโทรมาตรเพื่อพยากรณ์น้ำและเตือนภัยลุ่มน้ำท่าจีน, กรุงเทพมหานคร: บริษัท ล็อกซ์เลย์ จำกัด (มหาชน), 2557.
- [2] กิรติ สิวังกุล, *อุทกวิทยา*, ปทุมธานี: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรังสิต, 2543.
- [3] เฉลิมชัย เอกก้านตรง, การศึกษาและวิเคราะห์ด้านอุตุนิยมวิทยาที่มีอิทธิพลต่อการเกิดอุทกภัยในภาคใต้ของประเทศไทย ระหว่างวันที่ 18-26 พฤศจิกายน 2543, กรุงเทพมหานคร: กรมอุตุนิยมวิทยา, 2543.
- [4] ประกอบ วิโรจน์กูฏ, “การหาปริมาณน้ำฝนบนพื้นที่โดยวิธี KRINGING,” *วิศวกรรมสารมหาวิทยาลัยขอนแก่น*, ปีที่ 21, หน้า 29-43, มกราคม-กุมภาพันธ์, 2537.
- [5] รังสรรค์ อาภาคัพทะกุล, *อุตุนิยมวิทยาเบื้องต้น*, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- [6] รัศมี สุวรรณวีระกำธร, “การเปรียบเทียบวิธีการประมาณค่าน้ำฝนเชิงพื้นที่ด้วยระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ กรณีศึกษาพื้นที่ลุ่มน้ำเชิญ,” *วารสารสมาคมสำรวจข้อมูลระยะไกลและสารสนเทศภูมิศาสตร์*, ปีที่ 1, หน้า 35-48, กันยายน-ธันวาคม, 2543.
- [7] วิษุวัฒน์ก์ แต่สมบัติ, “การประมาณค่าเชิงพื้นที่ของข้อมูลปริมาณน้ำฝนรายวัน โดยวิธี Thin Plate Smoothing Spline สำหรับลุ่มน้ำปิงตอนบน,” ใน *การประชุมทางวิชาการ, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน นครปฐม ครั้งที่ 4*, 2550.
- [8] วิษุวัฒน์ก์ แต่สมบัติ, *อุทกวิทยาทางวิศวกรรม (เอกสารประกอบการสอน)*, นครปฐม: ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, 2555.
- [9] วีระพล แต่สมบัติ, *หลักอุทกวิทยา*, กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์, 2528.
- [10] สุเพชร จิรจรรกุล, *เรียนรู้ระบบภูมิสารสนเทศด้วยโปรแกรม ArcGIS Desktop 10.1*, กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาเทคโนโลยีชนบทมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2555.
- [11] เอกสิทธิ์ โสสิตสกุลชัย, *การหาค่าการใช้พื้นที่ของพืชในโครงการชลประทานขนาดใหญ่โดยใช้การสำรวจระยะไกล*, กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2547.
- [12] สายสุนีย์ พุทธาคณเจริญ, *วิศวกรรมอุทกวิทยา*, กรุงเทพมหานคร: ไบรารี นายนันท์ พัลลิตซ์, 2546.
- [13] พิระพงศ์ รัตนบุรี, “การเปรียบเทียบการประมาณฝนเชิงพื้นที่ของกลุ่มน้ำปิงตอนบนและลุ่มน้ำท่าจีน โดยเทคนิคการประมาณค่าเชิงพื้นที่,” *วิทยานิพนธ์ปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์*, กรุงเทพมหานคร, 2557.
- [14] H. Apaydin, F. Sonmez and Y. Yildirim, “Spatial interpolation techniques for climate data in the GAP region in Turkey,” *Climate Res.*, vol. 28, no.1, pp. 31–40, 2004.
- [15] P. Burrough, R. McDonnell and C. Lloyd, *Principles of Geographical Information Systems*, Oxford, Oxford University Press, 2015.
- [16] C. Chang, S. Lo and S. Yu, “The parameter optimization in the inverse distance method by genetic algorithm for estimating precipitation,” *Environ. Monitor. Assess.*, vol. 117, no. 1-3, pp. 145–155, 2006.
- [17] V. Chaplot, F. Darboux, H. Bourennane, S. Leguédais, N. Silvera and K. Phachomphon, “Accuracy of interpolation techniques for the derivation of digital elevation models in

- relation to landform types and data density,” *Geomorphology*, vol. 77, no. 1-2, pp. 126–141, 2006.
- [18] P. Goovaerts, “Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall,” *J. Hydro.*, vol. 228, no. 1-2, pp. 113–129, 2000.
- [19] M. Hutchinson, “Interpolating mean rainfall using thin plate smoothing splines,” *Inter. J. Geogr. Inform. Syst.*, vol. 9, no. 4, pp. 385–403, 1995.
- [20] M. Hutchinson and P. Gessler, “Splines — more than just a smooth interpolator,” *Geoderma*, vol. 62, no 1-3, pp. 45–67, 1994.
- [21] W. Taesombat and N. Sriwongsitanon, “Areal rainfall estimation using spatial interpolation techniques,” *Sci. Asia*, vol. 35, no. 3, pp. 268-275, 2009.

การทบทวนวิธีวินิจฉัยข้อบกพร่องในระบบควบคุมพลวัต A Review of Fault Diagnosis in Dynamic Control Systems

เจษฎา สายใจ* เฉลิมภรณ์ ฟองสมุทร

อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

169 ถนนลงหาดบางแสน ตำบลแสนสุข อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี 20131

Jedsada Saijai* Chalermpan Fongsamut

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University

169 Long Had Bangsaen Rd., Saensuk, Mueang Chonburi, Chonburi 20131

*Corresponding author: Email: jedsada@eng.buu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้มีจุดมุ่งหมายในการทบทวนวิธีวินิจฉัยข้อบกพร่องในระบบควบคุมพลวัตเพื่อให้เข้าใจแนวคิดหลักการ ทฤษฎีเบื้องต้น ได้แก่ คำจำกัดความ ชนิดของข้อบกพร่อง รวมถึงความก้าวหน้าของวิธีการและเทคนิคที่ใช้ในการวินิจฉัยข้อบกพร่องแบบต่างๆ ได้แก่ การติดตั้งอุปกรณ์ซ้ำซ้อน การใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ และวิธีวิเคราะห์ข้อมูลและสัญญาณ นอกจากนี้ยังนำเสนอแนวทางประยุกต์และพัฒนาวิธีวินิจฉัยที่ควรมีในอนาคต ซึ่งข้อมูลเหล่านี้สามารถใช้เป็นแนวทางศึกษาและปรับปรุงวิธีวินิจฉัยข้อบกพร่องในระบบควบคุมพลวัตให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

คำสำคัญ: การวินิจฉัยข้อบกพร่อง ระบบควบคุมพลวัต อุปกรณ์ซ้ำซ้อน แบบจำลองคณิตศาสตร์ ข้อมูลและสัญญาณ

ABSTRACT

This paper aims to review the techniques for fault diagnosis in dynamic control systems. The basic concept including definition and type of fault is firstly addressed. Following by the current fault diagnosis techniques published in the literatures such as hardware redundancy, model-based, data-driven and signal analysis approach. Discussion and future trend of the fault diagnosis are also presented. This information can be used for improving the fault diagnostic in dynamic control system.

Keyword: Fault diagnosis, dynamic control system, hardware redundancy, model-based, data and signal

1. บทนำ

ข้อบกพร่อง (Fault) หมายถึงสิ่งที่ทำให้ระบบหรืออุปกรณ์ทำงานแตกต่างไปจากค่าปกติ ซึ่งหากปล่อยไว้โดยไม่ได้รับการแก้ไขจะส่งผลให้ระบบหรืออุปกรณ์นั้นเกิดความล้มเหลว (Failure) ไม่สามารถใช้งานได้อีกต่อไป

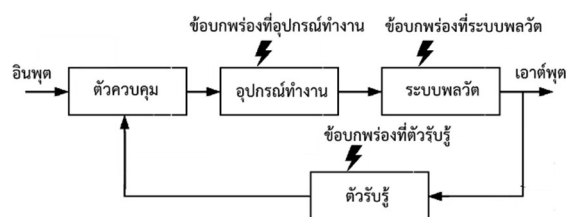
[1-2] จากความต้องการระบบพลวัตที่มีประสิทธิภาพสูง ทำให้มีการพัฒนาระบบควบคุมที่มีความซับซ้อน มีอุปกรณ์ทำงานร่วมกันเป็นจำนวนมากและคาดหวังว่าระบบจะทำงานโดยไม่มีข้อบกพร่องใดๆ แต่ในความเป็นจริงแล้วระบบควบคุมพลวัตไม่สามารถหลีกเลี่ยง

ข้อบกพร่องได้ ดังนั้นการวินิจฉัยและตรวจพบข้อบกพร่องตั้งแต่ช่วงแรกจะช่วยเพิ่มความปลอดภัย (Safety) ความน่าเชื่อถือ (Reliability) ของระบบ รวมถึงช่วยในการวางแผนซ่อมบำรุง โดยเฉพาะการซ่อมบำรุงเชิงพยากรณ์ (Predictive maintenance) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยเหตุผลดังกล่าวทำให้ระบบวินิจฉัยข้อบกพร่องในระบบควบคุมพลวัตได้รับความสนใจและพัฒนาในช่วงเวลาหลายปีที่ผ่านมา ซึ่งสังเกตได้จากจำนวนงานวิจัยและการใช้งานในภาคอุตสาหกรรมที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง [4-7]

บทความนี้จึงมุ่งให้ความรู้เกี่ยวกับวิธีวินิจฉัยข้อบกพร่องต่างๆ ในระบบควบคุมพลวัต โดยนำเสนอเป็น 5 หัวข้อดังนี้ คือ ข้อบกพร่องในระบบควบคุมพลวัต โครงสร้างของระบบวินิจฉัยข้อบกพร่อง เทคนิคการวินิจฉัยข้อบกพร่อง และบทสรุป

2. ข้อบกพร่องในระบบควบคุมพลวัต

โดยทั่วไประบบควบคุมพลวัตประกอบด้วยส่วนต่างๆ คือ อุปกรณ์ทำงาน (Actuator) ตัวรับรู้ (Sensor) และระบบพลวัต (Process) ดังนั้นสามารถจำแนกข้อบกพร่องตามตำแหน่งที่เกิดได้ 3 ส่วน คือ อุปกรณ์ทำงาน (Actuator fault) ตัวรับรู้ (Sensor fault) และระบบพลวัต (Parameter or Structure fault) [1-3] ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ข้อบกพร่องในระบบควบคุมพลวัต

ถ้าพิจารณาผลต่อการทำงานของระบบพลวัตจะจำแนกข้อบกพร่องได้ 2 รูปแบบ แบบแรกเรียกว่าข้อบกพร่องเสริมค่า (Additive fault) ซึ่งเกิดที่อุปกรณ์ทำงานและตัวรับรู้ มีผลให้อุปกรณ์ทำงานหรือตัวรับรู้ทำงานมากขึ้นหรือน้อยลงกว่าปกติ (Offset, Drift) แบบที่

สองเรียกว่าข้อบกพร่องคูณค่า (Multiplicative fault) ซึ่งเกิดที่พารามิเตอร์ของระบบพลวัต มีผลให้โครงสร้างของระบบเปลี่ยนไปจากปกติ [1-3]

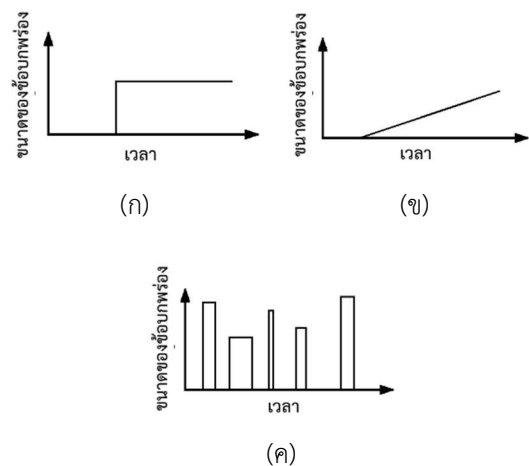
ข้อบกพร่องในระบบพลวัตสามารถแทนด้วยปริภูมิสถานะ (State space) [1] ดังสมการ

$$\dot{x} = (A + \Delta A_F)x + (B + \Delta B_F)(u + f_A) \quad (1)$$

$$y = (C + \Delta C_F)x + (D + \Delta D_F)(u + f_A) + f_S \quad (2)$$

โดยที่ f_A, f_S คือข้อบกพร่องแบบเสริมค่าที่อุปกรณ์ทำงานและตัวรับรู้ $\Delta A_F, \Delta B_F, \Delta C_F, \Delta D_F$ คือข้อบกพร่องแบบคูณค่าที่พารามิเตอร์ของระบบพลวัต

นอกจากนี้ยังสามารถแยกข้อบกพร่องในโดเมนเวลาได้ 3 รูปแบบ คือ แบบทันทีทันใด (Abrupt fault หรือ Hard fault) แบบค่อยเป็นค่อยไป (Incipient fault หรือ Soft fault) และแบบไม่สม่ำเสมอ (Intermittent fault) [1-3] ดังแสดงในรูปที่ 2



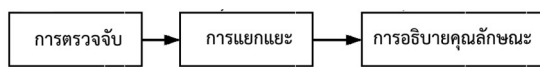
รูปที่ 2 แสดงข้อบกพร่องต่างๆในโดเมนเวลา

(ก) ข้อบกพร่องแบบทันทีทันใด (ข) ข้อบกพร่องแบบค่อยเป็นค่อยไป (ค) ข้อบกพร่องแบบไม่สม่ำเสมอ

3. โครงสร้างของระบบวินิจฉัยข้อบกพร่อง

ระบบวินิจฉัยข้อบกพร่องในระบบควบคุมพลวัตทำงานตามลำดับขั้นตอนดังนี้คือ การตรวจจับ (Fault Detection) ทำหน้าที่ตัดสินว่ามีข้อบกพร่องเกิดขึ้นใน

ระบบควบคุมพลวัตหรือไม่ ซึ่งเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในระบบวินิจฉัยข้อบกพร่อง [1-2] การแยกแยะ (Fault isolation) ทำหน้าที่ระบุตำแหน่งที่เกิดข้อบกพร่อง และการอธิบายคุณลักษณะ (Fault identification) ทำหน้าที่ให้รายละเอียดเกี่ยวกับข้อบกพร่อง เช่น ขนาด สาเหตุ เป็นต้น ซึ่งขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนเสริมที่อาจจะมีหรือไม่มีในระบบก็ได้ ดังนั้นการวินิจฉัยข้อบกพร่องในระบบควบคุมพลวัตหมายถึงการตรวจจับและการระบุตำแหน่งข้อบกพร่อง (Fault detection and isolation: FDI)



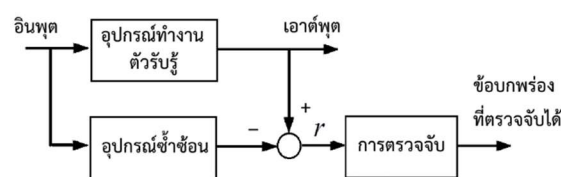
รูปที่ 3 ลำดับการทำงานของระบบวินิจฉัยข้อบกพร่องในระบบควบคุมพลวัต

4. เทคนิคการวินิจฉัยข้อบกพร่อง

การวินิจฉัยข้อบกพร่องมีด้วยกันหลายวิธี ซึ่งหัวข้อนี้จะเสนอเทคนิคที่พบเผยแพร่ในบทความวิชาการ รวมถึงการใช้งานจริงในภาคอุตสาหกรรม ดังนี้

4.1 การติดตั้งอุปกรณ์ซ้ำซ้อน (Hardware redundancy)

นิยมใช้วินิจฉัยข้อบกพร่องของอุปกรณ์ทำงานและตัวรับรู้โดยมีหลักการทำงานดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 การวินิจฉัยข้อบกพร่องด้วยการติดตั้งอุปกรณ์ซ้ำซ้อน

จากรูปที่ 4 อุปกรณ์ซ้ำซ้อนจะทำงานพร้อมกับอุปกรณ์จริง และตรวจจับข้อบกพร่องจากผลต่างระหว่างอุปกรณ์จริงและอุปกรณ์ซ้ำซ้อนตามเงื่อนไข

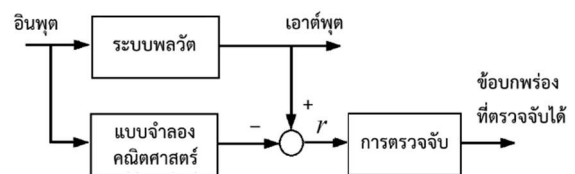
$$\begin{aligned} |r| > 0: & \text{ fault} \\ |r| = 0: & \text{ fault-free} \end{aligned} \quad (3)$$

โดยที่ r คือผลต่างระหว่างอุปกรณ์จริงกับอุปกรณ์ซ้ำซ้อน เรียกว่าตัวแปรเศษเหลือ (Residual)

การวินิจฉัยข้อบกพร่องด้วยวิธีนี้สามารถตรวจจับและระบุตำแหน่งที่เกิดข้อบกพร่องได้ในเวลาเดียวกัน นอกจากนี้ยังมีความน่าเชื่อถือสูงเหมาะสำหรับอุปกรณ์ที่มีความสำคัญ (Major component) เช่น อุปกรณ์ในเครื่องบิน เตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ เป็นต้น แต่มีข้อจำกัดในเรื่องพื้นที่และต้นทุนในการติดตั้ง

4.2 การใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ (Model-based fault diagnosis)

การวินิจฉัยวิธีนี้ใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์คำนวณตัวแปรเอาต์พุตแล้วเปรียบเทียบกับเอาต์พุตจริงของระบบ ซึ่งความแตกต่างคือตัวแปรเศษเหลือ จากนั้นใช้เงื่อนไขตามสมการที่ (3) ตัดสินว่าพบข้อบกพร่องในระบบหรือไม่ โดยโครงสร้างของการวินิจฉัยด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 การวินิจฉัยข้อบกพร่องด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์

วิธีสร้างตัวแปรเศษเหลือมีหลายวิธี เช่น วิธีอิงตัวสังเกต (Observer-based) ซึ่งทำงานแบบวงปิด (Closed-loop residual generator) สำหรับแบบจำลองชนิดตายตัว (Deterministic model) นิยมใช้ตัวสังเกตตัวแปรสถานะ (State observer) ตัวสังเกตอินพุตที่ไม่ทราบค่า (Unknown input observer) เป็นต้น [8-10]

ตัวอย่างระบบที่มีข้อบกพร่องตัวรับรู้ในรูปปริภูมิสถานะแบบเวลาไม่ต่อเนื่องดังสมการ

$$x(k) = Ax(k-1) + Bu(k-1) \quad (4)$$

$$y(k) = Cx(k) + D_f f_s(k) \quad (5)$$

เมื่อใช้ตัวสังเกตในการสร้างตัวแปรเศษเหลือจะได้พลวัตของตัวแปรเศษเหลือดังสมการ

$$r(k) = V(y(k) - \hat{y}(k)) = VCe(k) + VD_f f_s(k) \quad (6)$$

$$e(k) = (A - LC)e(k-1) \quad (7)$$

โดยที่ $\hat{y}(k) = C\hat{x}(k)$ คือค่าประมาณตัวแปรเอาต์พุต $e(k) = x(k) - \hat{x}(k)$ คือความผิดพลาดในการประมาณค่าตัวแปรสถานะ (State estimation error) L คืออัตราขยายตัวสังเกต (Observer gain) และ V คือน้ำหนักตัวแปรเศษเหลือ (Residual weighting)

จากสมการที่ (6)-(7) ตัวแปรเศษเหลือจะเปลี่ยนตาม f_s เมื่อเลือก L, V ที่ทำให้ $\lim_{k \rightarrow \infty} e(k) = 0$

สำหรับแบบจำลองชนิดสุ่ม (Stochastic model) นิยมใช้ตัวกรองคาลมาน (Kalman filter) สร้างตัวแปรเศษเหลือ เมื่อระบบมีสัญญาณรบกวนภายนอกแบบสุ่มและกระจายตัวแบบปกติ (Normal distribution) หรือตัวกรองคาลมานแบบขยาย (Extended Kalmand filter) สำหรับแบบจำลองชนิดสุ่มไม่เชิงเส้น (Nonlinear stochastic model) [11-13]

การสร้างตัวแปรเศษเหลือแบบวงเปิด (Open loop residual generation) ทำได้ด้วยวิธีปริภูมิพาริตี (Parity space) [14-16] โดยเลือกอินพุตและเอาต์พุตจำนวน N ค่า สำหรับระบบเชิงเส้นในสมการที่ (4)-(5) จะได้ข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตดังสมการ

$$Y_N(k) = H_{o,N}x(k-N) + H_{u,N}U_N(k) + H_{f,N}F_N(k) \quad (8)$$

โดยที่

$$Y_N(k) = \begin{bmatrix} y(k-N) \\ y(k-N+1) \\ \vdots \\ y(k) \end{bmatrix}, U_N(k) = \begin{bmatrix} u(k-N) \\ u(k-N+1) \\ \vdots \\ u(k) \end{bmatrix},$$

$$F_N(k) = \begin{bmatrix} f_s(k-N) \\ f_s(k-N+1) \\ \vdots \\ f_s(k) \end{bmatrix}, H_{o,N} = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^N \end{bmatrix},$$

$$H_{u,N}(k) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 \\ CB & 0 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ CA^{N-1}B & \cdots & CB & 0 \end{bmatrix},$$

$$H_{f,N}(k) = \text{diag}(D_f) = \begin{bmatrix} D_f & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & D_f & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & D_f \end{bmatrix}$$

จะได้ตัวแปรเศษเหลือจากสมการ

$$r_N(k) = V_N[Y_N(k) - H_{u,N}U_N(k)] = V_N[Q_N(k)x(k-N) + H_{f,N}F_N(k)] \quad (9)$$

ดังนั้นต้องออกแบบค่าน้ำหนักตัวแปรเศษเหลือ V_N ที่ทำให้พจน์ $V_N Q_N(k) = 0$ เพื่อให้ตัวแปรเศษเหลือเปลี่ยนค่าตามข้อบกพร่องเท่านั้น

การประมาณค่าพารามิเตอร์ (Parameter estimation) เป็นอีกวิธีหนึ่งที่เหมาะสำหรับข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นภายในกระบวนการ โดยตัวแปรเศษเหลือคือผลต่างของพารามิเตอร์จากแบบจำลองคณิตศาสตร์กับค่าประมาณจากสัญญาณอินพุตและเอาต์พุต [17-19] สำหรับระบบเชิงเส้นในสมการที่ (4)-(5) ที่มีข้อบกพร่องของพารามิเตอร์แสดงด้วยสมการ

$$x_f(k) = A_f x_f(k-1) + B_f u_f(k-1) \quad (10)$$

$$y_f(k) = C_f x_f(k) \quad (11)$$

จะได้เวกเตอร์ค่าตัวแปรเอาต์พุตจำนวน N ดังสมการ

$$Y_f(k) = \Psi_f(k)\hat{\Theta}_f(k) + E(k) \quad (12)$$

โดยที่

$$Y_f(k) = \begin{bmatrix} y_f^T(k-N+1) \\ y_f^T(k-N+2) \\ \vdots \\ y_f^T(k) \end{bmatrix}, \quad \hat{\Theta}_f(k) = \begin{bmatrix} \hat{A}_f^T \hat{C}_f^T \\ \hat{B}_f^T \hat{C}_f^T \end{bmatrix}$$

$$\Psi_f^T(k) = \begin{bmatrix} x_f(k-N) & x_f(k-N+1) & \cdots & x_f(k-1) \\ u_f(k-N) & u_f(k-N+1) & \cdots & u_f(k-1) \end{bmatrix}$$

และ $E(k)$ คือความผิดพลาดในการประมาณค่า

เมื่อ $E(k)$ ลู่เข้าสู่ศูนย์จะคำนวณค่าประมาณของพารามิเตอร์ได้จากความสัมพันธ์

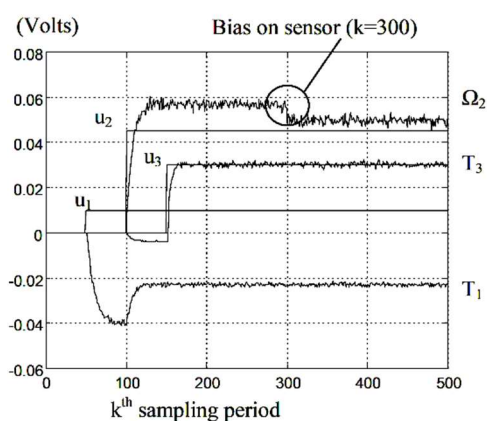
$$\hat{\Theta}_f(k) = \Psi_f^{-1}(k) Y_f(k) \quad (13)$$

และได้ตัวแปรเศษเหลือคือ

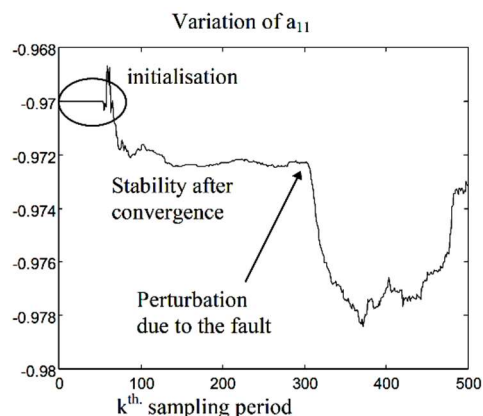
$$r(k) = \Theta - \hat{\Theta}_f(k) \quad (14)$$

โดยที่ $\Theta = \begin{bmatrix} A^T C^T \\ B^T C^T \end{bmatrix}$ คือค่าพารามิเตอร์ปกติของระบบ

ตัวอย่างการวินิจฉัยข้อบกพร่องด้วยการประมาณค่าตัวแปรในเครื่องจักรพันวัสดุ (Winding machine) แสดงในรูปที่ 6



(ก)



(ข)

รูปที่ 6 ตัวอย่างการวินิจฉัยข้อบกพร่องด้วยการประมาณค่าพารามิเตอร์ [4]

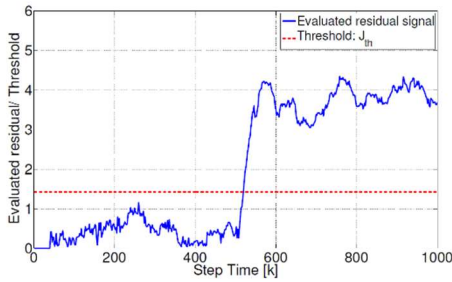
จากรูปที่ 6(ก) และ 6(ข) แสดงถึงการเปลี่ยนค่าของพารามิเตอร์ a_{11} เมื่อเกิดข้อบกพร่องในตัวรับรู้ Ω_2 ที่ลำดับ $k = 300$ ของข้อมูลสุ่ม

การวินิจฉัยข้อบกพร่องด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์สามารถลดพื้นที่และต้นทุนในการติดตั้งอุปกรณ์เข้าซ้อนเนื่องจากกระบวนการทั้งหมดทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และยังสามารถนำไปใช้กับระบบที่มีจุดทำงานหลายค่า ทำให้ได้รับความสนใจในเชิงวิชาการและภาคอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก แต่ปัญหาสำคัญของวิธีนี้คือความแม่นยำของแบบจำลองคณิตศาสตร์เนื่องจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่อธิบายการทำงานของระบบได้แม่นยำไม่ได้อยู่จริงในทางปฏิบัติ ดังนั้นการตัดสินใจด้วยสมการที่ (3) จึงไม่สามารถใช้ได้และจำเป็นต้องกำหนดค่าขีดเริ่ม (Threshold) ที่เหมาะสมเพื่อตัดสินว่าเกิดข้อบกพร่องขึ้นหรือไม่ [1] และได้เงื่อนไขในการตัดสินใจคือ

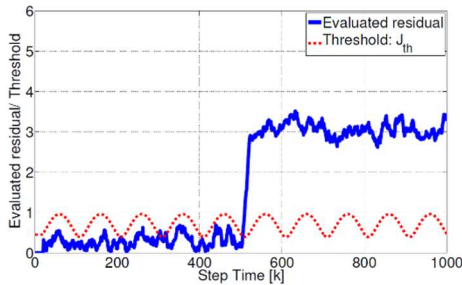
$$\begin{aligned} |r| > J_{th} &: \text{ fault} \\ |r| \leq J_{th} &: \text{ fault-free} \end{aligned} \quad (15)$$

โดยที่ J_{th} คือค่าขีดเริ่ม

การกำหนดค่าขีดเริ่มทำได้ 2 แบบ คือ แบบคงที่ (Fixed threshold) และแบบเปลี่ยนค่า (Adaptive threshold) โดยประยุกต์ใช้ทฤษฎีต่างๆ เช่น ทฤษฎีการหาค่าที่เหมาะสม (Optimization) ทฤษฎีควบคุมแบบคงทนและปรับตัว (Robust and adaptive control) เป็นต้น [20-23] ตัวอย่างค่าขีดเริ่มแบบคงที่และแบบเปลี่ยนค่าเพื่อวินิจฉัยข้อบกพร่องในแบบจำลองมาร์คอฟ (Markov system) แสดงในรูปที่ 7



(ก)



(ข)

รูปที่ 7 ตัวอย่างเปรียบเทียบการตั้งค่าขีดเริ่ม (ก) แบบคงที่ (ข) แบบเปลี่ยนค่า [23]

จากรูปที่ 7 พบว่าเมื่อเกิดข้อบกพร่องที่เวลา $k=500$ ค่าขีดเริ่มแบบเปลี่ยนค่าจะทำให้ตรวจพบข้อบกพร่องได้เร็วกว่าแบบค่าขีดเริ่มคงที่

นอกจากนี้ยังสามารถปรับปรุงตัวแปรเศษเหลือให้มีความคงทน (Robustness) ต่อความไม่แม่นยำของแบบจำลองหรือสัญญาณรบกวน แต่ให้มีความไว (Sensitivity) ต่อข้อบกพร่อง [24-26] เช่น การใช้ดัชนี H_∞ / H_- เพื่อหาค่าที่เหมาะสม ตัวอย่างระบบเชิงเส้นซึ่งแสดงด้วยสมการ

$$\dot{x} = (A + \Delta A)x + (B + \Delta B)u + B_f f + B_d d \quad (16)$$

$$y = Cx + D_f f + D_d d \quad (17)$$

โดยที่ $\Delta A, \Delta B$ คือความไม่แม่นยำของแบบจำลอง d คือสัญญาณรบกวน และ f คือข้อบกพร่อง

ขั้นตอนเริ่มจากการออกแบบตัวแปรเศษเหลือด้วยตัวสังเกตดังสมการ

$$\dot{\hat{x}} = (A - LC)\hat{x} + Bu + Ly \quad (18)$$

$$r = V(y - C\hat{x}) \quad (19)$$

จะได้พลวัตของตัวแปรเศษเหลือดังสมการ

$$\begin{aligned} \dot{e} &= (A - LC)e + \Delta Ax + \Delta Bu \\ &+ (B_f - LD_f)f + (B_d - LD_d)d \end{aligned} \quad (20)$$

$$r = VCe + VD_f f + VD_d d \quad (21)$$

จากนั้นออกแบบอัตราขยาย L และ V เพื่อหาค่าที่เหมาะสมตามเงื่อนไข

$$\min_{L, V} \frac{\|G_{rd}(s)\|_\infty}{\|G_{rf}(s)\|_-}$$

โดยที่ $G_{rd}(s)$ คือฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวแปรเศษเหลือกับสัญญาณรบกวน $G_{rf}(s)$ คือฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวแปรเศษเหลือกับข้อบกพร่อง

การใช้แบบจำลองหลายชุด (Multiple model) เป็นอีกแนวทางหนึ่งในการแก้ปัญหาความไม่แม่นยำของแบบจำลองคณิตศาสตร์และการกำหนดค่าขีดเริ่ม [27-29] แบบจำลองนี้ประกอบด้วยแบบจำลองย่อยซึ่งแทนการทำงานแบบปกติและการทำงานเมื่อเกิดข้อบกพร่องต่างๆ โดยใช้ตัวกรองคาลมานเพื่อประมาณค่าตัวแปรสถานะและความแปรปรวนร่วม (Covariance) แล้วใช้ปรับปรุงความ

น่าจะเป็นของแบบจำลองย่อย (Mode probability) โดยแบบจำลองย่อยที่มีค่าความน่าจะเป็นสูงที่สุดจะแทนการทำงานของระบบในขณะนั้น เรียกว่าการวินิจฉัยด้วยแบบจำลองหลายชุด (Interacting multiple-model fault detection and diagnosis : IMM FDD)

พิจารณาระบบเชิงเส้นแบบสุ่มซึ่งเป็นฟังก์ชันของแบบจำลองย่อย (Mode) $m(k)$ ดังสมการ

$$x(k+1) = A(m(k+1))x(k) + B(m(k+1))u(k) + T(m(k+1))\xi(k) \quad (22)$$

$$y(k) = C(m(k))x(k) + \eta(k) \quad (23)$$

โดยที่ $\xi(k), \eta(k)$ คือสัญญาณรบกวน

การเปลี่ยนแบบจำลองย่อยจำนวน N ชุด กำหนดโดยความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนแบบจำลอง (Transition probability)

$$P\{m_j(k+1) | m_i(k)\} = \pi_{ij}(k); \forall m_i, m_j \in S \quad (24)$$

$$\sum_{j=1}^N \pi_{ij}(k) = 1; \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (25)$$

และความน่าจะเป็นที่แบบจำลองย่อย j จะทำงานที่เวลา $k+1$ แทนด้วย

$$P\{m_j(k+1) | z(k+1)\} = \mu_j(k+1) \quad (26)$$

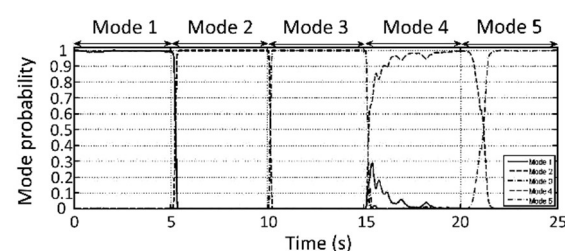
โดยที่ $S = \{m_1, m_2, \dots, m_N\}$ คือเซตแบบจำลองย่อย และ $P\{\cdot\}$ คือความน่าจะเป็นของแบบจำลองย่อย

วิธี IMM FDD ประกอบด้วย 4 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกคือการกำหนดค่าเริ่มต้นของตัวแปรสถานะ ความน่าจะเป็นของแบบจำลองย่อย (Re-initialization) และความแปรปรวนร่วม ขั้นตอนที่ 2 คือการประมาณค่าตัวแปรสถานะและความแปรปรวนร่วมจากค่าเริ่มต้นด้วยตัว

กรองคาลมาล (Filtering) ขั้นตอนที่ 3 คือการปรับปรุงค่าตัวแปรสถานะ ความแปรปรวนร่วม และความน่าจะเป็นของแบบจำลองย่อยโดยใช้ค่าเอาต์พุตที่วัดได้ (Updating) และขั้นตอนสุดท้ายคือการตัดสินใจด้วยการทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis testing) ของค่าความน่าจะเป็นของแบบจำลองย่อยตามเงื่อนไข

$$\mu_j(k+1) = \begin{cases} > \mu_T : H_j : \text{fault } j \text{ occurred} \\ < \mu_T : H_0 : \text{fault free} \end{cases} \quad (27)$$

ตัวอย่างการวินิจฉัยข้อบกพร่องด้วยวิธี IMM FDD ในอุปกรณ์สั่งการสนามแม่เหล็กขับเคลื่อน (High redundancy actuation) แสดงดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 ตัวอย่างการวินิจฉัยข้อบกพร่องแบบ IMM FDD เมื่อ Mode 1 แทนการทำงานปกติ Mode 2 แทนสภาวะความร้อนเกิน 20% Mode 3 แทนสภาวะความร้อนเกิน 50% Mode 4 แทนสภาวะที่อุปกรณ์สั่งการเสียหาย 1 ชุด และ Mode 5 แทนสภาวะที่อุปกรณ์สั่งการเสียหาย 2 ชุด [27]

จากรูปที่ 8 เมื่อความน่าจะเป็นของแบบจำลองย่อย (Mode) มีค่าเท่ากับ 1 จะเกิดข้อบกพร่องตามแบบจำลองย่อยนั้น เช่น ระหว่างเวลา 5 - 10 วินาที ความน่าจะเป็นของแบบจำลองย่อย Mode 2 มีค่าเท่ากับ 1 แสดงว่าเกิดความร้อนเกิน 20%

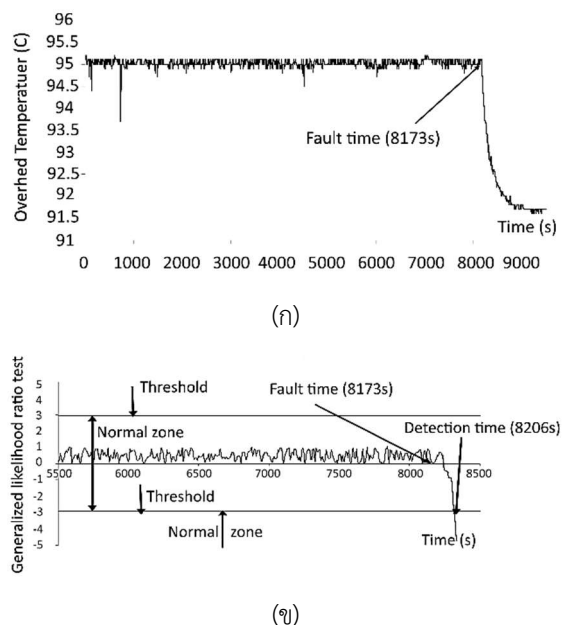
4.3 การวิเคราะห์ข้อมูลและสัญญาณ (Data driven and signal analysis)

สำหรับระบบควบคุมพลวัตที่มีขนาดใหญ่และซับซ้อนนั้นไม่สามารถหาแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่มีความ

แม่นยำเพียงพอเพื่อใช้วินิจฉัยข้อบกพร่องได้ เช่น กระบวนการทางเคมีและปิโตรเคมี กระบวนการกลั่น น้ำมัน ดังนั้นจึงนิยมใช้ข้อมูลที่วัดได้มาวิเคราะห์ พารามิเตอร์ในโดเมนเวลา (Time domain analysis) หรือโดเมนความถี่ (Frequency domain analysis)

ในโดเมนเวลาทำการวิเคราะห์จากสัญญาณโดยตรง เช่น ขนาด เฟส ตัวประกอบยอดคลื่น (Crest factor) เป็นต้น หรือใช้วิธีวิเคราะห์และทดสอบทางสถิติ เช่น ค่าเฉลี่ย (Mean) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) ค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Root mean square: RMS) ค่าความโด่ง (Kurtosis) ค่าความเบ้ (Skewness) การทดสอบยอดสะสม (Cumulative sum test : CUMSUM) อัตราส่วนความน่าจะเป็นทั่วไป (Generalized likelihood ratio: GLR) Hotelling's T^2 Q -test และ Square prediction error (SPE) เป็นต้น [30-32] ซึ่งวิธีนี้เหมาะสำหรับการวินิจฉัยที่เวลาคงตัว

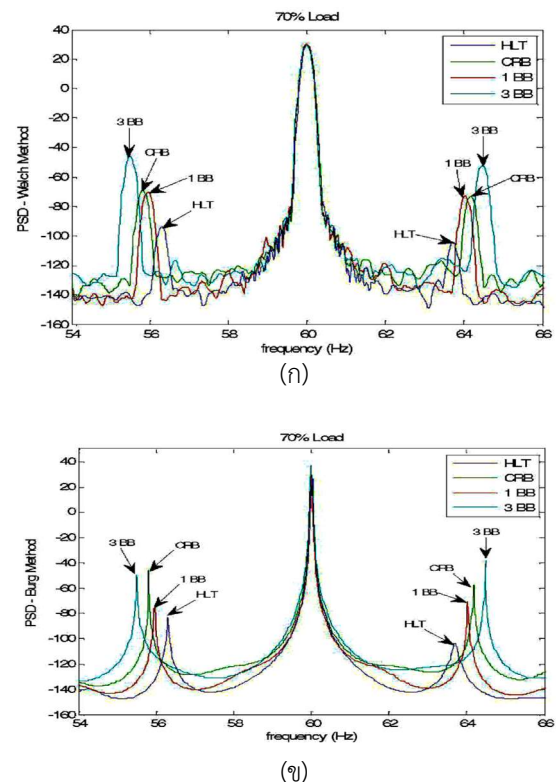
ตัวอย่างการวินิจฉัยข้อบกพร่องในหอกลั่น (Distillation unit) ด้วยวิธีทดสอบค่าอัตราความน่าจะเป็นทั่วไป [8] แสดงดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 ตัวอย่างการวินิจฉัยข้อบกพร่องด้วยการทดสอบอัตราความน่าจะเป็นทั่วไป [6]

จากรูปที่ 9(ก) เกิดข้อบกพร่องที่เวลา 8173 วินาที และสามารถตรวจจับได้ที่เวลา 8206 วินาที ดังรูปที่ 9(ข) โดยสังเกตจากอัตราความน่าจะเป็นทั่วไปที่เปลี่ยนค่าออกจากบริเวณปกติ

สำหรับการวิเคราะห์ในโดเมนความถี่ใช้เทคนิคการแปลงสัญญาณจากโดเมนเวลา เช่น การแปลงฟูริเย (Fourier transformation การประมาณค่าสเปกตรัมด้วยวิธีเวลช์ (Welch's periodogram) การประมาณค่าสเปกตรัมด้วยวิธีเบอร์ก (Burg's periodogram) เป็นต้น แล้ววิเคราะห์สเปกตรัมความถี่ที่ได้ [33-35] ตัวอย่างการวิเคราะห์ด้วยการประมาณค่าสเปกตรัมกำลังไฟฟ้าวิธีเวลช์และเบอร์กเพื่อวินิจฉัยข้อบกพร่องในตัวนำโรเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ภาระโหลด 70% แสดงดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 ตัวอย่างการวินิจฉัยข้อบกพร่องด้วยการประมาณค่าสเปกตรัม (ก) วิธีเวลช์ (ข) วิธีเบอร์ก
เมื่อ HLT คือมอเตอร์ปกติ CRB คือแท่งตัวนำโรเตอร์ร้าว 1BB และ 3BB คือแท่งตัวนำโรเตอร์หักจำนวน 1 และ 3 แท่ง ตามลำดับ [35]

จากรูปที่ 10(ก) พบว่าการประมาณค่าสเปกตรัมด้วยวิธีเวลจ์จะตรวจพบความถี่ข้างเคียงความถี่หลักมูล โดยค่าความห่างและขนาดเพิ่มขึ้นตามความรุนแรงของข้อบกพร่อง คือ มอเตอร์ปกติ แ่งตัวนำโรเตอร์หัก 1 แ่ง แ่งตัวนำโรเตอร์ร้าว และแ่งตัวนำโรเตอร์หัก 3 แ่ง ตามลำดับ แต่การแยกแยะข้อบกพร่องจากแ่งตัวนำหัก 1 แ่ง และแ่งตัวนำร้าวยังไม่ค่อยชัดเจน ในขณะที่รูป 10(ข) แสดงผลจากการประมาณค่าสเปกตรัมด้วยวิธีเบอร์ก พบว่าสามารถแยกแยะข้อบกพร่องจากแ่งตัวนำหัก 1 แ่ง และแ่งตัวนำร้าวได้ดีกว่า

นอกจากนี้ยังสามารถวินิจฉัยข้อบกพร่องโดยการประยุกต์ใช้ทฤษฎีการเรียนรู้จำ (Machine Learning) เช่น โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network : ANN) กระบวนการทางพันธุกรรม (Genetic Algorithm : GA) เป็นต้น [36-38] สำหรับวิธีโครงข่ายประสาทเทียมมีขั้นตอนทั่วไปคือ การเลือกและเก็บค่าตัวแปรอินพุตและเอาต์พุตโดยการป้อนข้อมูลพฤติกรรมของระบบทั้งสภาวะปกติและสภาวะบกพร่องต่างๆ (Data generation and collection) การกำหนดรูปแบบของข้อมูลเพื่อการรู้จำ และ แยก แยะ ข้อ บ ก พร อ ง ชนิด ต่าง ๆ (Pattern recognition and classification) วิธีวินิจฉัยนี้จะสามารถตรวจจับและแยกชนิดของข้อบกพร่องได้แต่ต้องใช้ข้อมูลในการเรียนรู้เป็นจำนวนมากและต้องครอบคลุมข้อบกพร่องทั้งหมด ซึ่งข้อมูลข้อบกพร่องบางรูปแบบอาจไม่สามารถวัดได้จริงจากระบบและจำเป็นต้องใช้โปรแกรมจำลองการทำงาน

มิติของข้อมูลเป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่ส่งผลต่อการวินิจฉัยข้อบกพร่องด้วยข้อมูล ซึ่งจำนวนมิติที่มากทำให้ใช้เวลาและเกิดความความซ้ำซ้อนของข้อมูล ดังนั้นก่อนนำข้อมูลไปวิเคราะห์จึงนิยามลดมิติของข้อมูลให้เหลือเท่าที่จำเป็นสำหรับการวินิจฉัยข้อบกพร่อง (Dimensionality reduction) ซึ่งวิธีลดมิติของข้อมูลประกอบด้วยขั้นตอนการเลือกและการดึงลักษณะเฉพาะจากข้อมูลที่วัดได้ (Feature selection and extraction) วิธีที่นิยมใช้ได้แก่การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principle component

analysis: PCA) วิเคราะห์การจำแนกกลุ่มเชิงเส้น (Linear discriminant analysis: LDA) เป็นต้น [39-41] โดยวิธี PCA จะใช้วิธีฉายข้อมูล (Projection) ไปยังปริภูมิย่อย (Subspace) ที่มีมิติต่ำกว่า

พิจารณาข้อมูลของระบบควบคุมพลวัตในสภาวะปกติ $X \in R^{n \times m}$ ซึ่งเก็บจากตัวแปร m ตัว จำนวน n ชุด ขั้นตอนการวิเคราะห์เริ่มจากการคำนวณเมตริกซ์ความแปรปรวนร่วม (Covariance matrix) แล้วทำการกระจายค่าซิงกูลาร์ (Singular value decomposition: SVD) เพื่อหาค่าลักษณะเฉพาะ (Eigenvalue) ของแต่ละมิติ ดังสมการ

$$\Sigma = \frac{1}{n-1} X^T X = V \Lambda V^T \quad (28)$$

โดยที่ $\Lambda = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m)$ คือเมตริกซ์ทแยงมุม (Diagonal matrix) ซึ่งมีค่าลักษณะเฉพาะเรียงจากค่ามากไปค่าน้อย นั่นคือ $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_m \geq 0$ และ $V \in R^{m \times m}$ คือเมตริกซ์ที่ประกอบด้วยเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะ (Eigenvector matrix) ที่สอดคล้องกับค่าลักษณะเฉพาะใน Λ

จากนั้นเลือกเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะ a ค่าจากเมตริกซ์ V เพื่อสร้างเป็นองค์ประกอบหลักในรูปของเมตริกซ์ถ่ายโอน (Transformation matrix) $P \in R^{m \times a}$ ดังนั้นข้อมูล X สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$X = TP^T + E \quad (29)$$

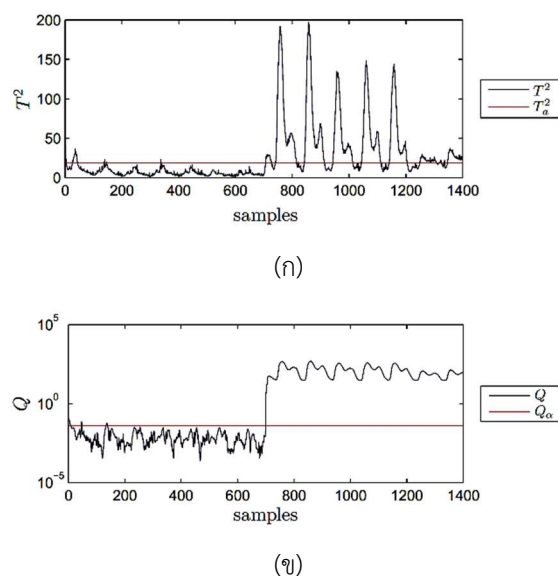
โดยที่ $T \in R^{n \times a}$ คือเมตริกซ์ข้อมูลที่มีมิติเท่ากับองค์ประกอบหลัก a ค่า $P \in R^{m \times a}$ คือเมตริกซ์ถ่ายโอน $E = X - \hat{X}$ คือเมตริกซ์เศษเหลือ เมื่อ $\hat{X}$ คือค่าประมาณของข้อมูล X

ทำการกำหนดค่าขีดเริ่มโดยใช้วิธีทดสอบทางสถิติต่างๆ ตามระดับนัยสำคัญ (Significant level: α) จากนั้นใช้การทดสอบการสถิติกับข้อมูลจริงแล้วเปรียบเทียบกับค่าขีดเริ่มที่กำหนดไว้ เช่นการทดสอบ Hotelling's T^2 ซึ่งแสดงดังสมการ

$$T^2 = xP(\Sigma_a)^{-2}P \quad (30)$$

โดยที่ $x \in R^{1 \times m}$ คือเวกเตอร์ข้อมูลจริง $\Sigma_a \in R^{a \times a}$ คือเมตริกซ์แยงมุมตามองค์ประกอบหลัก a ค่า

ตัวอย่างการวิเคราะห์หาข้อบกพร่องของระบบกำจัดน้ำเสียด้วยวิธีวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก แสดงดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 การตรวจจับข้อบกพร่องด้วยการวิเคราะห์ตัวประกอบหลัก (ก) T^2 -test (ข) Q -test [41]

จากรูปที่ 11 แสดงให้เห็นว่าการทดสอบแบบ T^2 -test และ Q -test จะเพิ่มค่ามากขึ้นจนเลยจุดขีดเริ่มเมื่อเกิดข้อบกพร่องในระบบที่ข้อมูลลำดับที่ 700 โดยการทดสอบแบบ Q -test มีอัตราการความถูกต้องมากกว่าการทดสอบแบบ T^2 -test

5. สรุป

ระบบวินิจฉัยข้อบกพร่องในระบบควบคุมพลวัตได้รับความสำคัญอย่างต่อเนื่องและถูกนำมาใช้ในภาคอุตสาหกรรมเป็นจำนวนมาก เนื่องจากต้องการเพิ่มความปลอดภัย ความน่าเชื่อถือ และช่วยในการแผนการซ่อมบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์ โดยการวินิจฉัยข้อบกพร่องในระบบควบคุมพลวัตที่นิยมใช้ได้แก่การติดตั้งอุปกรณ์เข้าซ้อนและการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์หรือวิเคราะห์จากข้อมูลและสัญญาณ โดยอุปกรณ์ที่มีความสำคัญมากจะนิยมใช้วิธีติดตั้งอุปกรณ์เข้าซ้อน การวินิจฉัยด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์เหมาะสมสำหรับระบบที่มีแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่แม่นยำเพียงพอ ในขณะที่การวิเคราะห์ข้อมูลหรือสัญญาณเหมาะสมสำหรับระบบที่มีขนาดใหญ่และซับซ้อนซึ่งการหาแบบจำลองคณิตศาสตร์ทำได้ยากกว่าการเก็บข้อมูล ระบบวินิจฉัยข้อบกพร่องในระบบควบคุมพลวัตยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นหน่วยสำคัญในระบบควบคุมคงทนต่อข้อบกพร่อง (Fault tolerant control: FTC) เพื่อให้ระบบทำงานต่อไปได้ภายใต้ข้อจำกัดแม้ว่าจะเกิดข้อบกพร่อง โดยระบบควบคุมจะใช้ข้อมูลจากระบบวินิจฉัยข้อบกพร่องเพื่อสั่งให้เกิดการเปลี่ยนโครงสร้างหรือวิธีควบคุม ทำให้ผู้ควบคุมมีเวลาในการวางแผนซ่อมบำรุงได้ทันทั่วทั้งและมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้การเข้ามามีบทบาทของโครงข่ายตัวรับรู้แบบไร้สาย (Wireless sensor network) ซึ่งทำหน้าที่ส่งข้อมูลให้กับระบบควบคุมอัจฉริยะต่างๆ เช่น อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things: IoT) โครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ (Smart grid) สำนักงานและโรงงานอัจฉริยะ (Smart office and factory) ทำให้เกิดความสะดวกสบาย ลดต้นทุนในการผลิตและแรงงานคน แต่ในขณะเดียวกันระบบควบคุมดังกล่าวก็มีความเสี่ยงเพิ่มขึ้นจากข้อบกพร่องของตัวรับรู้ซึ่งมีอยู่เป็นจำนวนมาก ดังนั้นจึงควรให้ความสำคัญกับระบบวินิจฉัยข้อบกพร่องในตัวรับรู้เพื่อให้เกิดการพัฒนาและรวมเข้าเป็นหน่วยพื้นฐานของระบบอัจฉริยะเหล่านี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. X. Ding, *Model-Based Fault Diagnosis Techniques: Design Schemes, Algorithm and Tools*. London, Springer-Verlag, 2013.
- [2] R. Isermann, *Fault Diagnosis Systems: An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance*. Heidelberg, Berlin, Springer-Verlag 2006.
- [3] L. H Chiang, E. L. Russell and R. D. Braatz, *Fault Detection and Diagnosis in Industrial Systems*. London, Springer-Verlag, 2001.
- [4] P. Weber and S. Gentil, "Fault detection using parameter estimation applied to a winding machine," In IAR Annual Conference, Duisburg, Germany, 1997, pp. 1-6.
- [5] O. Moseler and R. Isermann, "Application of model-based fault detection to a brushless DC motor," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 47, no. 5, pp. 1015-1020, 2000.
- [6] Y. Chetouani, "Change detection in a distillation column based on the generalized likelihood ratio approach," *J. Chem. Eng. & Proc. Tech.*, vol. 2, no. 5, pp. 1-6, 2011.
- [7] A. Hwas and R. Katebi, "Nonlinear observer-based fault detection and isolation for wind turbines," *The 22nd Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, Palermo, Italy, 2014, pp. 870-375.
- [8] P. Zhang, S. X. Ding and P. Liu, "A lifting Based approach to oObserver based fFault detection of linear periodic systems," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 57, no. 2, pp. 457-462, 2012.
- [9] F. Arrichiello, A. Marino and F. Pierri, "Observer-based decentralized fault detection and isolation strategy for networked multirobot systems," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 23, no. 4, pp. 1465-1476, 2015.
- [10] C. Commault, J. M. Dion, O. Sename and R. Moteyian, "Observer-based fault diagnosis for structured systems," in *The 39th IEEE Conference on Decision and Control*, Sydney, NSW, Australia, 2000, pp. 4138-4143.
- [11] R. Doraiswami and L. Cheded, "Kalman filter for parametric fault detection: an internal model principle-based approach," *IET Control Theory Appl.*, vol. 6, no. 5, pp. 715-725, 2012.
- [12] R. Picatoste, M. Butcher and A. Masi, "Use of Extended Kalman Filter in position sensor fault detection for stepper motors," in *IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Florence, Italy, 2016, pp. 1548-1553.
- [13] I. Alkov and D. Weidemann, "Fault detection with unscented Kalman filter applied to nonlinear differential-algebraic systems," in *The 18th International Conference on Methods & Models in Automation & Robotics (MMAR)*, Miedzyzdroje, Poland, 2013, pp. 166-171.
- [14] I. Izadi, S. L. Shah and T. Chen, "Parity space fault detection based on irregularly sampled data," in *2008 American Control Conference*, Seattle, WA, USA, 2008, pp. 2798-2803.
- [15] H. Wang, Z. Tian, S. Shi and Z. Weng. "A fault detection and isolation scheme based on parity space method for discrete time-delay system," in *The 7th World Congress on Intelligent Control and Automation*, Chongqing, China, 2008, pp. 6411-6414.
- [16] Y. Li and M. Zhong, "Parity space-based fault detection for linear time-varying systems with multiple packet dropouts," in *2009 Fourth International Conference on Innovative Computing, Information and Control (ICICIC)*, Kaohsiung, China, 2009, pp. 236-239.
- [17] E. M. Cimpoesu, B. D. Ciubotaru and D. Stefanoiu, "Fault detection and diagnosis

- using parameter estimation with recursive least squares,” The 19th International Conference on Control Systems and Computer Science, Bucharest, Romania, 2013, pp. 18-23.
- [18] V. Reppa and A. Tzes, “Fault detection and diagnosis based on parameter set estimation,” *IET Control Theory Appl.*, vol. 5, no. 1, pp. 69-83, 2011.
- [19] T. Jiang, K. Khorasani and S. Tafazoli, “Parameter estimation-based fault detection, isolation and recovery for nonlinear satellite models,” *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 16, no. 4, pp. 799-808, 2008.
- [20] A. Q. Khan and S. X. Ding, “Threshold computation for robust fault detection in a class of continuous-time nonlinear systems,” 2009 European Control Conference (ECC), Budapest, Hungary, 2009, pp. 3088-3093.
- [21] A. Hashemi and P. Pisu, “Adaptive threshold-based fault detection and isolation for automotive electrical systems,” The 9th World Congress on Intelligent Control and Automation, Taipei, Taiwan, 2011, pp. 1013-1018.
- [22] J. Saijai, S. X. Ding, A. Abdo, B. Shen and W. Damlakhi, “Threshold computation for fault detection in linear discrete-time Markov jump systems,” *Int. J. Adapt. Control Signal Process.*, vol. 28, no. 11, pp. 1106-1127, 2014.
- [23] J. Saijai, A. Abdo, W. Damlakhi and S. X. Ding, “Fault detection scheme for discrete-time Markov jump linear systems with mode-independent residual,” 2012 IEEE International Conference on Control Applications (CCA), Dubrovnik, Croatia, 2012, pp. 1674-1679.
- [24] M. Zhong, S. X. Ding, J. Lam and H. Wang, “An LMI approach to design robust fault detection filter for uncertain LTI systems,” *Automatica*, vol. 39, no. 3, pp. 543-550, 2003.
- [25] A. Abdo, S. X. Ding, W. Damlakhi and J. Saijai, “Robust fault detection filter design for uncertain switched systems with adaptive threshold setting,” 2011 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference, Orlando, FL, USA, 2011, pp. 5467-5472.
- [26] S. Zhang, Z. Wang, D. Ding, H. Shu, T. Hayat and A. M. Dobaie, “On Design of Robust Fault Detection Filter in Finite-Frequency Domain with Regional Pole Assignment,” *IEEE Trans. Circuits Syst. II Express Briefs*, vol. 62, no. 4, pp. 382-386, 2015.
- [27] J. Davies, H. Tsunashima, R. M. Goodall, R. Dixon, T. Steffen, “Fault detection in high redundancy actuation using an interacting multiple-model approach,” *IFAC Proc. Volumes*, vol. 42, no. 8, pp. 1228-1233, 2008.
- [28] Y. Zhang and X. R. Li, “Detection and diagnosis of sensor and actuator failures using IMM estimator,” *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 34, no. 4, pp. 1293-1313, 1998.
- [29] S. Zhao, B. Huang and F. Liu, “Fault detection and diagnosis of multiple-model systems with mismodeled transition probabilities,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 8, pp. 5063-5071, 2015.
- [30] S. R. Mohanty, A. K. Pradhan and A. Routray, “A cumulative sum-based fault detector for power system relaying application,” *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 23, no. 1, pp. 79-86, 2008.
- [31] Y. Vidya Sagar, A. K. Mishra, A. P. Tiwari and S. B. Degweker, “Online fault detection and diagnosis of in-core neutron detectors using generalized likelihood ratio method,” *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 62, no. 6, pp. 3311-3323, 2015.
- [32] E. A. Sikora, “Detection of bearing damage by statistic vibration analysis (diagnosis using the excess, the concept of crest factor),” 2015

- International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS), Tomsk, Russia, 2015, pp. 1-5.
- [33] S. Singh, A. Kumar and N. Kumar, "Motor current signature analysis for bearing fault detection in mechanical systems," *Procedia Mater. Sci.*, vol. 6, pp. 171-177, 2014.
- [34] J. Burriel-Valencia, R. Puche-Panadero, J. Martinez-Roman, A. Sapena-Bano and M. Pineda-Sanchez, "Short-frequency fourier transform for fault diagnosis of induction machines working in transient regime," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 66, no. 3, pp. 432-440, 2017.
- [35] L. A. Pereira, D. Fernandes, D. S. Gazzana, F. B. Libano and S. Haffner, "Application of the Welch, Burg and MUSIC Methods to the Detection of Rotor Cage Faults of Induction Motors," 2006 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America, Caracas, Venezuela, 2006, pp. 1-6.
- [36] S. Rajakarunakaran, P. Venkumar, D. Devaraj, K. Surya Prakasa Rao, "Artificial neural network approach for fault detection in rotary system," *Appl. Soft Comput.*, vol. 8, no. 1, pp. 740-748, 2008.
- [37] Z. Peng, P. Wei, Z. Lina and W. Dezhi, "Applications of adaptive genetic algorithm to radar engine fault diagnosis," 2010 Chinese Control and Decision Conference, Xuzhou, China, 2010, pp. 25-29.
- [38] R. J. Patton, J. Chen and G. P. Liu, "Robust fault detection of dynamic systems via genetic algorithms," *First International Conference on Genetic Algorithms in Engineering Systems: Innovations and Applications*, Sheffield, UK, 1995, pp. 511-516.
- [39] D. Y. Jung, S. M. Lee, Hong-mei Wang, J. H. Kim and S. H. Lee, "Fault detection method with PCA and LDA and its application to induction motor," *J. Cent. South Univ. T.*, vol. 17, no. 6, pp. 1238-1242, 2010.
- [40] X. Zhang, S. Chen, Y. Zhu and W. Yan, "Fault detection and diagnosis for steam turbine based on kernel GDA," *Proceedings of 2011 International Conference on Modelling, Identification and Control*, Shanghai, China, 2011, pp. 58-62.
- [41] D. Garcia-Alvarez, M. J. Fuente, P. Vega, G. Sainz, "Fault Detection and Diagnosis using Multivariate Statistical Techniques in a Wastewater Treatment Plant," *IFAC Proc. Volumes*, vol. 42, no. 11, pp. 952-957, 2009.

บทความวิชาการ: การประยุกต์ใช้การอบแห้งแบบกระแสน้ำ

สำหรับวัสดุทางการเกษตรในประเทศไทย

A review: Application of Impinging Stream Drying Process for Agricultural Products in Thailand

ปราชญา ตรีสุทธาชีพ^{1*} กิตติ สถาพรประสาธน์²

¹นักศึกษาปริญญาเอก ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์
63 หมู่ 7 ถ.รังสิต-นครนายก อ.องครักษ์ จ.นครนายก 26120

²ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์
63 หมู่ 7 ถ.รังสิต-นครนายก อ.องครักษ์ จ.นครนายก 26120

¹Student, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University, 63 Moo 7 Rangsit-Nakhonnayok Rd., Khong 16, Ongkharak, Nakhonnayok 26120

²Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University, 63 Moo 7 Rangsit-Nakhonnayok Rd., Khong 16, Ongkharak, Nakhonnayok 26120

*Email: prachaya_me@hotmail.com

บทคัดย่อ

การอบแห้งแบบกระแสน้ำเป็นเทคโนโลยีที่มีการศึกษาอย่างแพร่หลายทั่วโลก ส่วนในประเทศไทยนั้นมีการเผยแพร่ผลการวิจัยครั้งแรกในปี พ.ศ. 2550 และมีการศึกษาอย่างต่อเนื่องตั้งแต่นั้นเป็นต้นมา ในบทความนี้ได้รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับหลักการพื้นฐานของกระแสน้ำ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำที่ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการอบแห้ง ซึ่งวัสดุทดสอบส่วนใหญ่เป็นวัสดุทางการเกษตร ได้แก่ กากถั่วเหลือง ข้าวเปลือก และข้าวนึ่ง (parboiled rice) ค่าตัวแปรที่ใช้วัดประสิทธิภาพของการอบแห้งในงานวิจัยส่วนใหญ่ ได้แก่ ค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร และค่าพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง ในงานวิจัยการอบแห้งกระแสน้ำในช่วงปีหลัง ๆ ที่ได้รวบรวมมานี้ ส่วนใหญ่มุ่งเน้นการประยุกต์ใช้การอบแห้งกระแสน้ำเพื่ออบแห้งข้าวซึ่งเป็นผลผลิตทางการเกษตรที่มีความสำคัญ และได้มีการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการวัดคุณภาพของข้าวเพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้การอบแห้งแบบกระแสน้ำในอุตสาหกรรมการผลิตข้าวได้จริงในอนาคต

คำสำคัญ: การอบแห้งแบบกระแสน้ำ วัสดุทางการเกษตร ข้าวเปลือก สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร

ABSTRACT

Impinging stream drying (ISD) is technology that has been studied worldwide. In Thailand, the first publication of ISD was shown in 2007 and continuing been studied from then. This article reviewed the principle of impinging stream, and research of ISD in. Most research were focused on designing and verifying factors affected the efficiency of ISD. Testing materials are mostly agricultural products,

including soy bean residue, rice paddy and parboiled rice. To assess the efficacy of ISD, volumetric water evaporation rate, volumetric heat transfer coefficient and energy consumption were determined in most research. Recent research was focusing on using ISD in rice which is a most important agricultural product in Thailand. The research was expanded to study in the field of rice's quality. This will lead to the realistic for the application of ISD in rice production industry in the future.

Keyword: Impinging steam drying, agricultural products, paddy, volumetric heat transfer coefficient

1. หลักการของการอบแห้งแบบกระแสน

หลักการพื้นฐานของกระแสน หรือ impinging stream คือการนำกระแส 2 กระแสที่ประกอบด้วยของแข็งและแก๊สอยู่ในระบบให้ไหลสวนทางกันในทิศทางตรงกันข้ามด้วยความเร็วสูงและก่อให้เกิดการชน ส่งผลให้เกิดความเร็วสัมพัทธ์ที่มีค่าสูงมากในขณะที่เกิดการชน ซึ่งช่วยเพิ่มการถ่ายเทแลกเปลี่ยนมวลและความร้อนระหว่างเฟสของทั้ง 2 กระแส [1] เมื่อสืบย้อนงานวิจัยทางวิทยาศาสตร์ของกระแสน Wu (2007) [1] รายงานว่ามีการนำเทคนิคกระแสนมาประยุกต์ใช้ครั้งแรกในเครื่องผลิตเชื้อเพลิงจากถ่านหินที่มีชื่อว่า Koppers-Totzek gasifier ในปีค.ศ.1953 และมีการนำเสนอหลักการของกระแสนในเชิงวิทยาศาสตร์ครั้งแรกโดย Elperin ในปีค.ศ. 1961 นอกจากนี้ Wu (2007) ได้แบ่งยุคของการนำกระแสนมาประยุกต์ใช้ออกเป็น 3 ยุค ได้แก่ ยุคแรก (ช่วงปี ค.ศ. 1961 ถึงช่วงต้นของยุค 1970) โดยกลุ่มประเทศสหภาพโซเวียต ที่มุ่งเน้นการนำกระแสนที่มีแก๊สเป็นเฟสต่อเนื่อง (continuous phase) และมีทั้งของแข็งและของเหลวเป็นเฟสกระจายตัว (dispersed phase) ยุคที่ 2 (ช่วงปี ค.ศ. 1994 ถึงช่วงกลางยุค 1990) ที่นักวิจัยจากประเทศอิสราเอล นำโดย Tamir และคณะ ได้ทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับกระแสนที่มีแก๊สและของเหลวเป็นเฟสต่อเนื่อง ในช่วงนี้ได้มีการตีพิมพ์หนังสือภาษาอังกฤษเล่มแรกที่มีชื่อว่า “Impinging-Stream Reactors: Fundamentals and Applications” ซึ่งรวบรวมที่มาของกระแสน หลักการของกระแสน ตัวแปรที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของกระแสน และการ

ประยุกต์ใช้เทคนิคของกระแสนในระบบและวัสดุหลากหลายประเภท [2] ยุคที่ 3 (นับตั้งแต่ช่วงปลายยุค 1990 เป็นต้นมา) มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับกระแสนโดยนักวิทยาศาสตร์จากหลากหลายประเทศ เช่น จีน สหรัฐอเมริกา แคนาดา และ เยอรมัน เป็นต้น ซึ่งในยุคนี้มีการศึกษากระแสนที่มีของเหลวเป็นเฟสต่อเนื่องเพิ่มมากขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของเทคนิคดังกล่าวที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรม เช่น การผสมสารที่มีอนุภาคขนาดไมโคร (micro-mixing) การสกัด (extraction) การกำจัดซัลเฟอร์ (desulfurization) การทำให้เข้มข้น (concentration) และการอบแห้ง (drying) เป็นต้น

การอบแห้งแบบกระแสน (impinging stream drying) คือ การอบแห้งแบบรวดเร็ว (flash drying) ที่ความชื้นระเหยออกจากวัสดุเปียกหรือหยดของเหลว (liquid droplet) ในบริเวณที่เกิดการชนของกระแสนตรงกันข้าม 2 กระแส โดยมักมีเฟสต่อเนื่องหรือกระแสนเป็นแก๊ส และมีเฟสกระจายตัว หรือวัสดุที่ต้องการอบแห้งเป็นของแข็งหรือของเหลว การอบแห้งแบบกระแสน หรือ impinging stream drying มีชื่อคล้ายกับการอบแห้งแบบ impingement หรือ impinging jet แต่มีหลักการของการลดความชื้นวัสดุแตกต่างกัน การอบแห้งแบบ impingement คือการเป่าแก๊ส/อากาศความเร็วสูง (gas jet) จากหัวเป่า (nozzles) จำนวนมากลงบนพื้นผิวของวัสดุที่ต้องการอบแห้งที่มีลักษณะเป็นแผ่นเรียบในทิศทางตั้งฉากโดยตรง การระเหยของน้ำออกจากวัสดุจะเกิดขึ้นที่บริเวณ jet-zone [3] ดังนั้นจึงควรแยกการ

อบแห้งทั้ง 2 วิธีนี้ออกจากกัน

หลักการพื้นฐานของการอบแห้งแบบกระแสน กระบวนการอบแห้งแบบกระแสนมีองค์ประกอบสำคัญในระบบ 2 องค์ประกอบ ได้แก่ (1) กระแส 2 กระแสที่ไหลในทิศทางตรงกันข้าม และ (2) วัสดุที่ต้องการลดความชื้น กระบวนการอบแห้งแบบกระแสนอาศัยหลักการชนกันของกระแส 2 กระแสที่เท่ากันและมีระยะห่างที่เท่ากันหรือใกล้เคียงกัน และมีกระแสน้อยกว่า 1 กระแสที่มีอนุภาคหรือวัสดุที่ต้องการลดความชื้นเคลื่อนที่ร่วมด้วย กระแสที่ไหลสวนทางกันจะเกิดการชนในบริเวณตรงกลางของระบบ กระแสที่ใช้อาจเป็นกระแสลมร้อน หรือกระแสไอน้ำยิ่งยวด และให้วัสดุที่ต้องการลดความชื้นอยู่ในบริเวณตรงกลางของกระแส กระแสนี้ทำหน้าที่เป็นตัวพาวัสดุไปตามทิศทางของกระแสไปถึงระยะการชน ซึ่งเป็นบริเวณที่กระแสทั้งสองเคลื่อนที่ชนกัน และเกิดการถ่ายเทความร้อน มวลสาร และโมเมนตัมขึ้น อันเป็นผลเนื่องมาจากแรงเฉือน (shear force) ที่เกิดขึ้นจากการชนกันของกระแสนของไหล 2 กระแส หลังจากกระแสของไหลชนกันแล้วก็จะไหลออกจากระบบและทำให้วัสดุมีความชื้นลดลงเมื่อการชนของกระแสเกิดขึ้นจะเกิด narrow zone ที่มีความหนาแน่นของความปั่นป่วน (turbulent intensity) สูง ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมแก่การถ่ายเทมวลและความร้อนสูง ซึ่งในบริเวณนี้มีความหนาแน่นของอนุภาคหรือวัสดุมากที่สุด และมีความหนาแน่นลดลงเมื่อเคลื่อนที่ออกจากตำแหน่งศูนย์กลาง Elperin (1961) ได้เสนอแนะว่าขนาดของวัสดุที่เหมาะสมสำหรับระบบการอบแห้งแบบกระแสนควรมีขนาดอยู่ในช่วง $5\ \mu\text{m}$ ถึง $2\text{--}5\ \text{mm}$ [2] รูปที่ 1 แสดงการเคลื่อนที่ในอุดมคติของวัสดุเมื่ออยู่ในระบบการอบแห้งแบบกระแสน โดยวัสดุที่เป็นของแข็งหรือของเหลวเริ่มไหลไปกับกระแสใดกระแสหนึ่ง ความเร็วของวัสดุจะถูกเร่งจากความเร็วเท่ากับศูนย์ (zero velocity; U_0) จนถึงความเร็วระดับหนึ่งอันเป็นผลมาจากไฮโดรไดนามิกของการไหลของของแข็งและแก๊ส เมื่อผ่านระยะการชน (impingement plane) วัสดุจะแตกตัว

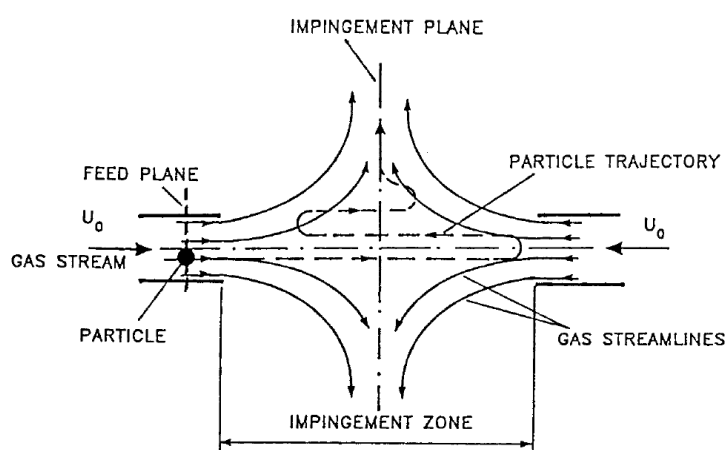
เข้าสู่กระแสนตรงกันข้ามในระนาบเดิม และเมื่อผ่านบริเวณนี้ ความเร็วของวัสดุจะลดลง และหยุดที่ระยะทางหนึ่งในบริเวณกระแสนตรงกันข้าม จากนั้นวัสดุจะมีความเร็วเพิ่มขึ้นอีกครั้ง และเคลื่อนที่ย้อนกลับเนื่องจากแรงของกระแสที่เป่าจากทิศตรงกันข้าม และเคลื่อนตัวกลับไปกลับมาเนื่องจากการเพิ่มและลดความเร็วเข้าไปมา เนื่องจากการชนกันของกระแสนตรงกันข้าม การเคลื่อนที่ในทิศทางตรงกันข้ามกันไปมาและเกิดขึ้นซ้ำ ๆ จนกระทั่งวัสดุในบริเวณที่เกิดการชน (impingement zone) มีความเร็วเท่ากับความเร็วสุดท้าย (terminal velocity) และหลุดออกจากระบบการอบแห้งแบบกระแสน [3] ด้วยกลไกการอบแห้งเช่นนี้ทำให้ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นมาก สามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับระบบการอบแห้งวัสดุ (เฟสกระจายตัว) ที่เป็นของเหลวหรือของแข็งขนาดเล็ก โดยมีแก๊สหรือของเหลวเป็นกระแส (เฟสต่อเนื่อง) แต่ทั้งนี้เนื่องจากการอบแห้งแบบกระแสนมีระยะเวลาของวัสดุที่อยู่ในระบบสั้นมาก โดยมีหน่วยของระยะเวลาเป็นวินาที ความชื้นที่ออกจากวัสดุส่วนใหญ่นั้นเป็นความชื้นที่อยู่บริเวณพื้นผิววัสดุ แต่ความชื้นในบริเวณภายในหรือตรงกลางของวัสดุนั้นถูกกำจัดออกได้ยากเนื่องจากไม่มีเวลาที่ทำให้ความชื้นแพร่ออกจากบริเวณภายในออกสู่พื้นผิว ดังนั้นจึงมีงานวิจัยที่ศึกษาวิจัยและออกแบบระบบการอบแห้งแบบกระแสนหลายรูปแบบ โดยตัวอย่างของตัวแปรที่มีการศึกษา เช่น (1) ทิศทางของกระแสแบบ coaxial และแบบ mutually perpendicular x configuration (รูปที่ 2a และ 2b) (2) ลักษณะการเคลื่อนที่ของกระแสนแบบเส้นโค้งในลักษณะต่าง ๆ (รูปที่ 2c, 2d, 2e และ 2f) (3) ระยะการชนของกระแส/รูปแบบการชน (impinging plane/zone geometries) เช่น รูปแบบกระแสนการชนแบบ planar with radial flow ที่มีลักษณะการชนแบบตรงตามแนวแกน และกระแสนเคลื่อนที่ออกจากระยะการชนเป็นแนวรัศมี (รูปที่ 3a) รูปแบบกระแสนการชนแบบ planar with circumferential flow ที่มีลักษณะการชนแบบตรงตามแนวแกนและมีการหมุนวนของกระแสและระยะนา

การชน (รูปที่ 3b) รูปแบบกระแสนการชนแบบ tubular ที่มีลักษณะทิศทางของกระแสไหลวนตามแนวทอทิศทางเดียว (รูปที่ 3c) และรูปแบบกระแสนการชนแบบ annular ที่มีลักษณะทิศทางกระแสไหลวน 2 ทิศทางในทางตรงกันข้าม (รูปที่ 3d) [3] ซึ่งเป้าหมายของการศึกษาวิจัยเหล่านี้ก็เพื่อช่วยเพิ่มระยะเวลาการคงอยู่ของวัสดุในระบบ (residual time) ให้มีเวลานานขึ้นเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการดึงน้ำออกจากวัสดุหรือเพื่อเพิ่ม

ประสิทธิภาพของการอบแห้งวัสดุให้มีประสิทธิภาพการอบแห้งดีที่สุด

2. การประยุกต์ใช้การอบแห้งแบบกระแสนใน ผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร

กระบวนการอบแห้งแบบกระแสนเป็นวิธีการอบแห้งแบบรวดเร็ว จึงทำให้สามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งวัสดุได้มากเมื่อเทียบกับการอบแห้งแบบเดิม เช่น



รูปที่ 1 หลักการของ impinging stream drying [3]

การอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์ หรือการใช้ตู้อบลมร้อน ในการอบแห้งแบบกระแสนนั้น กลไกการกำจัดความชื้นของวัสดุ เกิดขึ้นในบริเวณที่เรียกว่า impingement zone ซึ่งเกิดจากการชน (collision) โดยตรงของกระแสนตรงกันข้าม 2 กระแสที่มีคุณลักษณะเป็นแก๊สที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง และอย่างน้อย 1 ใน 2 กระแสนนี้เป็นตัวพาวัสดุที่ต้องการอบแห้งเข้าสู่บริเวณการชน ซึ่งวัสดุที่นำมาอบแห้งแบบนี้มีลักษณะเป็นอนุภาคของแข็งเปียก (wet particles) หรือหยดของเหลว (liquid droplets) ก็ได้ [3] เนื่องจากการอบแห้งแบบกระแสนเป็นวิธีการอบแห้งที่มีอัตราเร็วและประสิทธิภาพในการกำจัดความชื้นของวัสดุสูง ดังนั้นที่ผ่านมาจึงมีการศึกษาวิจัยและพัฒนา เพื่อให้สามารถนำไปสู่การใช้จริงในระดับอุตสาหกรรม ดังนั้นในบทความนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับหลักการเบื้องต้นของกระบวนการอบแห้งแบบกระแสน

ตัวแปรและปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพของการอบแห้งแบบกระแสน และงานวิจัยที่มีการศึกษาการใช้การอบแห้งแบบกระแสนเพื่ออบแห้งข้าวเปลือกซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรหลักของประเทศไทย เพื่อให้ผู้ที่สนใจสามารถนำข้อมูลนี้ไปใช้เพื่องานวิจัยหรือการใช้จริงในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

สำหรับในประเทศไทย ก่อนที่จะมีการนำการอบแห้งแบบกระแสนมาใช้อบแห้งวัสดุทางการเกษตรนั้น ในปี พ.ศ. 2550 Sathapornprasath et al. [4] ได้ออกแบบและผลิตเครื่องอบแห้งแบบกระแสนต้นแบบ (prototype) ขึ้น และศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องต้นแบบดังกล่าวโดยใช้อบแห้งเรซิน (resin) ที่มีความชื้นสูง กำหนดให้เรซินมีความชื้นเริ่มต้น 81-85% (d.b.) อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งคือ 70-110 °C และเวลาเฉลี่ยที่อนุภาคอยู่ในระบบประมาณ 2 วินาที พบว่าการอบแห้งแบบ

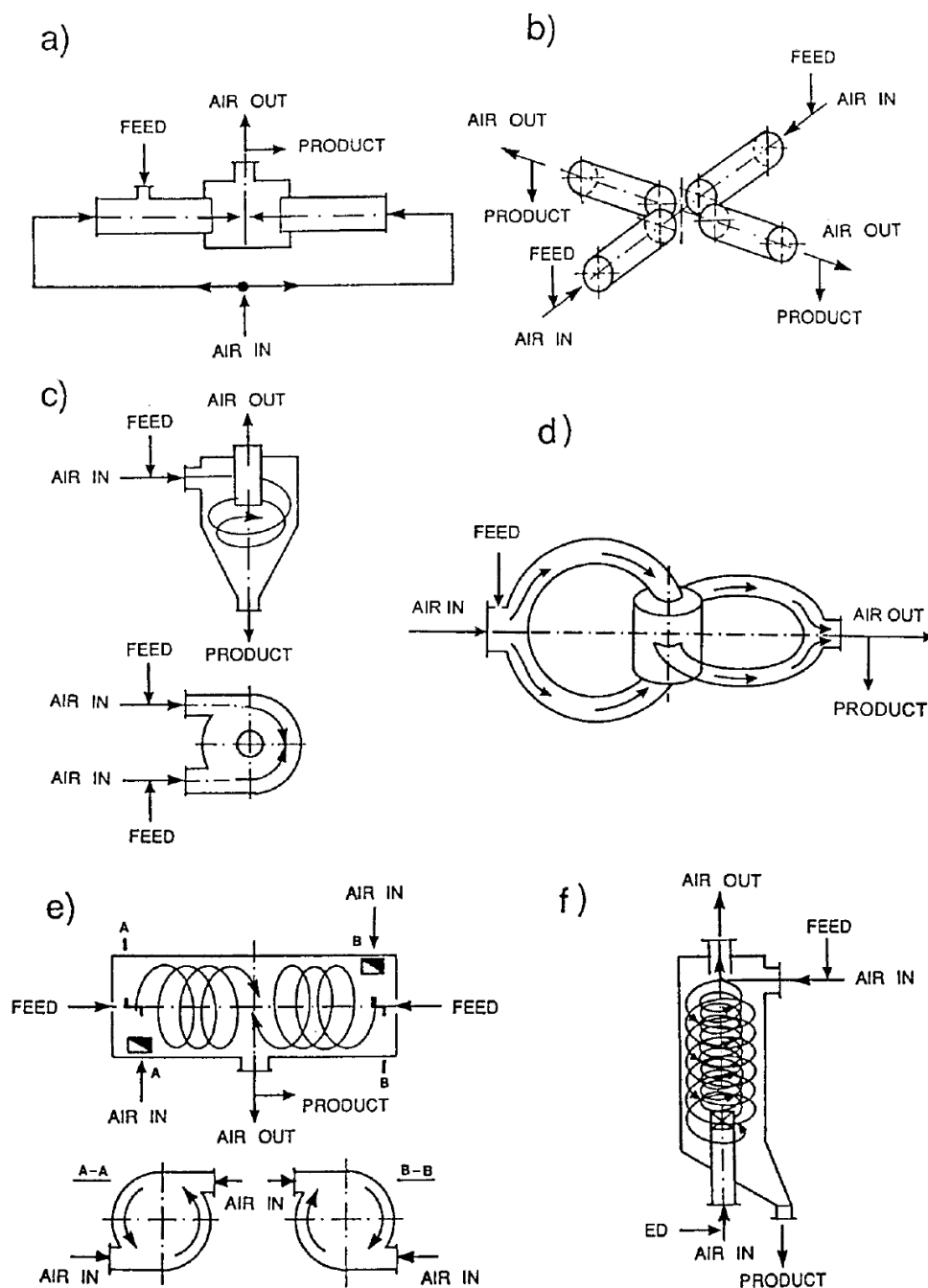
กระแสนสามารถลดความชื้นของเรซินได้ดี มีอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร $110 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{m}^3 \text{ h}$ และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรสูงถึง $880 \text{ W}/\text{m}^3 \text{ K}$ แม้ว่าในขณะนั้นเครื่องอบแห้งแบบกระแสนต้นแบบนี้ยังต้องการการพัฒนาเพิ่มเติม [5] แต่จากงานวิจัยเริ่มต้นนี้ [4] แสดงความเป็นไปได้ในการใช้การอบแห้งแบบกระแสนสำหรับลดความชื้นวัสดุทางการเกษตรที่มีขนาดอนุภาคขนาดเล็ก

ต่อมา Jantaka et al. [6] ในปี พ.ศ. 2551 ได้พัฒนาเครื่องอบแห้งแบบกระแสนจากเครื่องต้นแบบที่ใช้ในการอบแห้งเรซินเพื่อใช้อบแห้งกากถั่วเหลือง โดยมีการขยายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อส่งวัสดุเข้าเครื่องอบแห้งให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้การไหลของวัสดุในท่อส่งวัสดุดีขึ้น และการเปลี่ยนอุปกรณ์ป้อนวัสดุจากเดิมที่เป็นแบบสายพานสกรู (screw conveyor) เป็นแบบสายพานลำเลียง (belt conveyor) ช่วยลดการเกาะติดกันของวัสดุที่ต้องการอบแห้งได้ [5] และในงานวิจัยของ Jantaka et al. นี้ [6] ได้ศึกษาผลของอัตราการป้อนวัสดุ (feed rate of drying particle) ระยะการชน (impinging distance) และอุณหภูมิอากาศขาเข้า (inlet air temperature) พบว่าที่อัตราการป้อนวัสดุเท่ากับ $10 \text{ kg}/\text{h}$ การเพิ่มระยะการชนจาก 5 cm เป็น 13 cm ทำให้อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร (volumetric water evaporation rate) และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร (volumetric heat transfer coefficient) ของกากถั่วเหลืองลดลงประมาณ 16-20% แต่ในทางตรงกันข้ามการเพิ่มระยะการชนจาก 5 cm เป็น 13 cm ที่อัตราเร็วการป้อนวัสดุเท่ากับ $20 \text{ kg}/\text{h}$ และการเพิ่มอุณหภูมิอากาศขาเข้าจาก 130 เป็น $170 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ช่วยเพิ่มอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร 7.5% แต่ไม่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรของกากถั่วเหลืองอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) [6] การพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบกระแสนจากเครื่องต้นแบบของ Sathapornprasath [4] และจากงานวิจัยของ Jantaka [6] ยังคงมีการศึกษาและพัฒนาต่อโดย Choicharoen et al. [7] ได้ทำการเพิ่มจำนวน

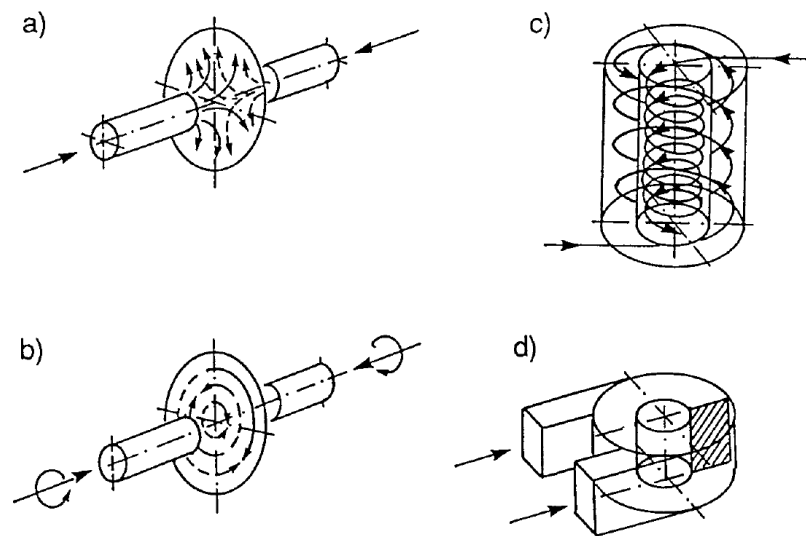
เครื่องให้ความร้อนแบบไฟฟ้า (electric heater) อีก 1 ตัวและจัดวางตำแหน่งของเครื่องให้ความร้อนแบบไฟฟ้าทั้งสองด้านของท่อส่งลมร้อนไปยังห้องอบแห้ง (drying chamber) ในระยะที่เท่ากัน นอกจากนี้ยังได้ออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิแยกเพื่อควบคุมอุณหภูมิของอากาศขาเข้าแต่ละกระแสน และเปลี่ยนรูปแบบของการป้อนวัสดุขาเข้าจากแบบ orifice-type เป็นแบบ nozzle type

เมื่อทำการพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบกระแสนดังกล่าวแล้ว Choicharoen et al. [7] ได้ศึกษาผลของตัวแปรที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการอบแห้ง ได้แก่ อุณหภูมิอากาศขาเข้า ($130, 150, 170 \text{ }^{\circ}\text{C}$) ระยะการชน ($5, 9, 13 \text{ cm}$) อัตราการป้อนวัสดุ (particle flow rate; $10, 20 \text{ kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$) ความเร็วอากาศขาเข้า (inlet air velocity; $20, 27 \text{ m/s}$) โดยใช้กากถั่วเหลืองเป็นวัสดุทดสอบ จากงานวิจัยพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิอากาศขาเข้า, ความเร็วอากาศขาเข้า และอัตราการป้อนวัสดุ ช่วยเพิ่มอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร ผลของระยะการชนต่อค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรจะขึ้นกับค่าของความเร็วอากาศขาเข้า การเพิ่มอุณหภูมิของอากาศขาเข้าไม่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อเพิ่มความเร็วอากาศขาเข้าและอัตราการป้อนวัสดุส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้น ในงานวิจัยนี้มีอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุดเท่ากับ $524 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{m}^3 \text{ h}$ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรสูงสุดเท่ากับ $4,593 \text{ W}/\text{m}^3 \text{ K}$ และค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (specific energy consumption) ต่ำสุดเท่ากับ $5.6 \text{ MJ}/\text{kg}_{\text{water}}$ ในปี พ.ศ. 2552 ธัญญาพรและกิตติ [8] ได้พัฒนาเครื่องอบแห้งแบบกระแสนจากเครื่องต้นแบบที่ได้ผลิตขึ้นครั้งแรกในปี พ.ศ. 2550 และนำเครื่องอบแห้งที่พัฒนาแล้วมาทำการอบแห้งข้าวเปลือกเป็นครั้งแรก โดยเครื่องอบแห้งแบบกระแสนที่พัฒนาขึ้นมีห้องอบแห้งถูกสร้างขึ้นจากท่อสแตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 cm (3.5 นิ้ว) ยาว 25 cm ระยะห่างในการชนเท่ากับ 20 cm

ท่ออากาศเข้าทั้งสองด้านมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4
cm



รูปที่ 2 ทิศทางพื้นฐานของการไหลแบบกระแสน: a) Coaxial; b) Mutually perpendicular X configuration; c) Curvilinear countercurrent; d) Semicircular impinging streams ("chain" configuration); e) counter rotating countercurrent; f) Co-rotating countercurrent. [13]



รูปที่ 3 Impinging plane/zone geometries: a) Planar with radial flow; b) Planar with circumferential flow; c) Tubular; d) Annular [3]

สภาวะในการทดลองคือ อัตราเร็วคงที่เท่ากับ 25 m/s อุณหภูมิของอากาศร้อนที่ใช้ในการอบแห้งอยู่ในช่วง 70, 90 และ 110 °C และแรงดันไฟฟ้าคงที่เท่ากับ 4, 10 และ 14 โวลต์ เพื่อใช้ในการควบคุมอัตราการป้อนวัสดุ มีค่าอัตราส่วนภาระ (loading ratio) ระหว่าง 0.1 – 0.7 (อัตราส่วนภาระ คืออัตราส่วนของอัตราการป้อนวัสดุต่ออัตราการไหลของอากาศ) ข้าวเปลือกที่ใช้ในการทดลองมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 20 - 30% (d.b.) ของการอบแห้งแบบกระแสน้ำเพื่อลดความชื้นของข้าวเปลือกพบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิและอัตราส่วนภาระ ความชื้นของข้าวเปลือกลดลง ซึ่งแสดงด้วยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรที่เพิ่มขึ้น ซึ่งในการทดลองนี้ สามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกได้สูงสุดประมาณ 5% (d.b.) ที่เวลาเฉลี่ยของวัสดุที่อยู่ในระบบประมาณ 1-2 วินาที

การพัฒนาและประยุกต์ใช้การอบแห้งแบบกระแสน้ำกับวัสดุอื่นยังคงมีการพัฒนาและวิจัยอย่างต่อเนื่อง ในปี พ.ศ. 2553 Nimmol and Devahastin [9] ได้ประยุกต์ใช้เครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำเพื่อทำการอบแห้งเบื้องต้นในข้าวเปลือกหลังเก็บเกี่ยวใหม่ มี

วัตถุประสงค์เพื่อลดความชื้นของข้าวเปลือกบางส่วน โดยศึกษาเปรียบเทียบระบบการอบแห้งที่มีจุดป้อนวัสดุ 1 จุด เทียบกับการมีจุดป้อนวัสดุ 2 จุด โดยมีปัจจัยที่ทำการศึกษาเพิ่มเติม ได้แก่ อุณหภูมิของอากาศขาเข้า (110, 130, 150 °C) ระยะการชน (5, 10, 15 cm) อัตราการป้อนวัสดุ (particle flow rate; 130, 150 kg_{dry solid}/h) และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการอบแห้งแบบกระแสน้ำของชุดการทดลองด้วยค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และค่าการใช้พลังงาน (energy consumption) พบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 150 °C อัตราการป้อนวัสดุ 150 kg_{dry solid}/h ระยะการชน 5 cm และระบบการป้อนวัสดุแบบ 1 จุด ส่งผลให้ค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุดเท่ากับ 198 kg_{water}/m³ h แต่การอบแห้งที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรสูงสุดคือการอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 150 °C อัตราการป้อนวัสดุ 150 kg_{dry solid}/h ระยะการชน 5 cm และระบบการป้อนวัสดุแบบ 2 จุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร 7,013 W/m³ K และจากงานวิจัยนี้พบว่าการอบแห้งแบบกระแสน้ำในสภาวะดังกล่าว

สามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกได้ถึงประมาณ 3.4 – 7.7% (d.b.) ในระยะเวลา 1.81 – 2.42 วินาที โดยไม่พบการแตกหักของเมล็ดข้าว และผู้วิจัยได้เสนอแนะว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดจากการทดลองคือ ที่อุณหภูมิ 110 °C ระยะการขน 5 cm อัตราการป้อนวัสดุ 150 kg_{dry solid}/h โดยใช้ระบบการป้อนวัสดุแบบ 2 จุด เนื่องจากมีค่าการใช้พลังงานต่ำสุด และให้ผลในการลดความชื้นของข้าวเปลือกอยู่ในช่วงที่เหมาะสม

และในปี พ.ศ. 2554 นี้ Choicharoen et al. [10] ยังคงพัฒนาระบบการอบแห้งแบบกระแสน้ำโดยใช้กากั่วเหลืองเป็นวัสดุทดสอบ แต่ได้ใช้ไอน้ำยิ่งยวด (superheated steam) เป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อนแทนลมร้อนในระบบที่ได้ทำการศึกษาในกากั่วเหลืองก่อนหน้านี้ [7,8] โดยมีปัจจัยที่ทำการศึกษาคือ การใช้อากาศร้อนที่อุณหภูมิ 130, 150 และ 170 °C เปรียบเทียบกับการใช้ไอน้ำยิ่งยวดที่อุณหภูมิ 130, 150, 170 และ 190 °C เป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อน ที่ระยะการขน 5, 9 และ 13 cm อัตราการป้อนวัสดุ (particle flow rate) 10 และ 20 kg_{dry solid}/h โดยพบว่าเมื่อใช้ไอน้ำร้อนยิ่งยวดยังเป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อนทำให้ค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าสูงกว่าการใช้อากาศร้อน สำหรับการใช้อากาศร้อนส่งผลให้อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุด 549 kg_{water}/m³ h และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรสูงสุด 4,805 W/m³ K สำหรับไอน้ำอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุด 807 kg_{water}/m³ h และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรสูงสุด 7,983 W/m³ K และนอกจากนี้ยังพบว่าการใช้ไอน้ำร้อนยิ่งยวดยังสามารถประหยัดค่าการใช้พลังงานจำเพาะทั้งหมด (total specific energy consumption) อยู่ในช่วง 9 – 46% เมื่อเทียบกับการอบแห้งแบบกระแสน้ำที่ใช้ลมร้อนเป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อน โดยงานวิจัยนี้สามารถประยุกต์ใช้กับไอน้ำร้อนที่เหลือจากกระบวนการผลิตมาเป็นแหล่งให้ความร้อนกับการอบแห้งแบบกระแสน้ำ

ซึ่งถือเป็นการนำพลังงานกลับมาใช้ซ้ำเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด

ในปี พ.ศ. 2555 สุชาติและคณะ [11] ได้ศึกษาการอบแห้งแบบกระแสน้ำในข้าวเปลือกพันธุ์พิษณุโลก 2 เพื่อติดตามผลของการอบแห้งดังกล่าวต่ออัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร ร้อยละต้นข้าว และการเปลี่ยนแปลงสีของข้าวหลังผ่านกระบวนการอบแห้งแบบกระแสน้ำ เครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำที่ใช้เป็นเครื่องที่พัฒนาจากเครื่องต้นแบบแล้ว เครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำในการทดลองนี้ ประกอบด้วย พัดลมแรงดันสูงขนาด 5.5 kW เครื่องทำความร้อนขนาด 6 kW จำนวน 2 ชุด เครื่องป้อนวัสดุแบบโรตารีขนาด 117 W พร้อมชุดควบคุมมอเตอร์ กระแสตรง ปริมาตรห้องอบแห้งมีขนาดเท่ากับ 0.018 m³ และใช้ลมร้อนเป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อน ใช้อุณหภูมิในการอบแห้งเท่ากับ 130, 150 และ 170 °C ความเร็วของอากาศเข้าห้องอบแห้ง 20 m/s ระยะทางการขนเท่ากับ 5 cm และอัตราการป้อนวัสดุ 90 kg/h จากการทดลองพบว่าผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยเบื้องต้น แต่ได้มีการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของข้าวเปลือกเพิ่มเติม โดยพบว่าค่าความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือก และร้อยละต้นข้าวมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น ในขณะที่อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้นเมื่อใช้อุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น และหลังผ่านการอบแห้งแบบกระแสน้ำที่ใช้อุณหภูมิแตกต่างกัน ค่าสีของเมล็ดข้าวหลังการอบแห้งที่แสดงด้วยค่า L^* , a^* , b^* มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก เนื่องจากการอบแห้งด้วยเทคนิคกระแสน้ำใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้น

ในปี พ.ศ. 2555 นี้ Nimmol et al. [12] ได้ทำการทดลองต่อยอดงานวิจัยเรื่องการใช้อากาศอบแห้งแบบกระแสน้ำร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมเพื่อลดความชื้นข้าวเปลือกที่มีความชื้นสูง โดยได้ทำการศึกษามลของสภาวะในการอบแห้งที่ใช้ในระบบการอบแห้งดังกล่าว ได้แก่ อุณหภูมิอบแห้ง (70, 90 และ 110 °C) อัตราการป้อนวัสดุ (22, 47 และ 62 kg/h) โดยใช้ลมร้อนเป็น ตัวกลางในการอบแห้ง และระยะห่างในการขนเท่ากับ 20

cm ส่งผลต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงาน (energy consumption coefficient) อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน การใช้พลังงาน (energy consumption) และคุณภาพของข้าวเปลือก โดยพบว่าการอบแห้งแบบกระแสน้ำวนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน อัตราการป้อนวัสดุที่สูงขึ้นช่วยเพิ่มอัตราการอบแห้งและลดการใช้พลังงาน ค่าของร้อยละต้นข้าว (head rice yield) ขึ้นกับอุณหภูมิอากาศขาเข้าและอัตราการป้อนวัสดุ เมื่ออุณหภูมิอากาศขาเข้าและอัตราการป้อนวัสดุเพิ่มขึ้นทำให้อัตราการป้อนวัสดุเพิ่มขึ้นทำให้ร้อยละต้นข้าวลดลง แต่อุณหภูมิอากาศขาเข้าและอัตราการป้อนวัสดุไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความขาว (whiteness) ของข้าวเปลือก การอบแห้งแบบกระแสน้ำวนร่วมกับการอบแห้งแบบพาหะลมร้อนสามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกได้มากถึง 9.7% (ร้อยละความชื้นเริ่มต้น – ร้อยละความชื้นหลังการอบแห้ง) ในระยะเวลา 3.2 วินาที ส่วนการอบแห้งแบบกระแสน้ำวนสามารถลดความชื้นข้าวเปลือกได้ 6.5% ในเวลา 1.9 วินาที ซึ่งเป็นระยะเวลาที่สั้นมากเมื่อเทียบกับการอบแห้งแบบ spouted bed drying และ fluidized bed drying เพื่อให้ได้อัตราการลดความชื้นที่ใกล้เคียงกันที่ต้องใช้เวลา 900 และ 144 วินาที ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิอากาศขาเข้าและอัตราการป้อนวัสดุ พบว่าเมื่ออุณหภูมิของอากาศขาเข้าและอัตราการป้อนวัสดุเพิ่มขึ้น ค่าร้อยละของต้นข้าวมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

ต่อมาในปี พ.ศ. 2556 Swasdisewi et al. [13] ได้ทำการศึกษาการอบแห้งแบบกระแสน้ำวนในข้าวเปลือกโดยใช้ตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน 2 ชนิด คือ อากาศร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (superheated steam) และยังได้ทดสอบเปรียบเทียบประสิทธิภาพการอบแห้งแบบ 1 และ 2 รอบ (passes of drying) โดยได้ทำการศึกษาผลของปัจจัยที่ส่งผลต่อการอบแห้งแบบกระแสน้ำวนต่อคุณภาพของข้าวเปลือกด้าน สี ค่าของร้อยละต้นข้าว และระดับการเกิดเจลของสตาร์ชจากแป้งข้าว (degree of starch

gelatinization) รวมถึงประสิทธิภาพของการอบแห้ง จากการทดลองพบว่าในการอบแห้งแบบ 1 รอบ อุณหภูมิในการอบแห้งที่สูงขึ้นส่งผลให้ค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ แต่ในทางตรงกันข้ามเมื่อทำการอบแห้งรอบที่ 2 อุณหภูมิในการอบแห้งที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าลดลง และนอกจากนั้นอุณหภูมิที่แตกต่างกัน (130, 150, 170 °C) ไม่มีผลต่อลักษณะสีของข้าวเปลือก แต่อย่างไรก็ตามการใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งทำให้ข้าวมีสีแดงและสีเหลืองมากกว่าข้าวที่ผ่านการอบแห้งแบบกระแสน้ำวนที่ใช้อากาศร้อน แต่ทั้งนี้การใช้อุณหภูมิในการอบแห้งที่สูงขึ้นทำให้ค่าร้อยละต้นข้าวลดลง และการอบแห้งแบบกระแสน้ำวนที่ใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งช่วยเพิ่มระดับการเกิดเจลของสตาร์ชในแป้งข้าวมากกว่าการใช้อากาศร้อน ซึ่งสามารถนำแป้งข้าวที่มีคุณสมบัติในการเกิดเจลต่างกันนี้ไปใช้ในการผลิตอาหารที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันได้

ในปี พ.ศ. 2556 และ พ.ศ. 2557 Pruengam et al. [14,15] ได้พัฒนาระบบการอบแห้งแบบกระแสน้ำวนเพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้ได้จริงในการอบแห้งข้าวเปลือกนึ่ง (parboiled paddy) ซึ่งทำการอบแห้งข้าวเปลือกนึ่งด้วยการอบแห้งแบบกระแสน้ำวนสลับกับการบ่ม (tempering) เป็นจำนวน 2 รอบ [15] และ 7 รอบ [15] เพื่อลดการเกิดรอยร้าวบนเมล็ดข้าว (kernel fissuring) หากมีการใช้อุณหภูมิสูงเพื่อลดความชื้นของเมล็ดข้าวและทำให้เกิดความเครียดภายในเมล็ดข้าว ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการแตกหักของเมล็ดข้าว หรือทำให้ค่าของร้อยละต้นข้าวต่ำลงนั่นเอง โดยในการทดลองของ Pruengam et al. [15] มีสภาวะที่ใช้ในการศึกษาคือ อุณหภูมิอากาศร้อนที่ 130, 150 และ 170 °C ความเร็วลมเท่ากับ 20 m/s ระยะการชนเท่ากับ 5 cm อัตราการป้อนข้าวเปลือกนึ่งเท่ากับ 40 kg_{dry paddy}/h ทำการอบแห้งสลับกับการบ่มเป็นจำนวน 7 รอบ แต่ละรอบของการบ่มใช้เวลาแตกต่างกัน ได้แก่ 0, 15, 30, 60 และ 120 นาที จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการลดความชื้นของข้าวเปลือกนึ่งนั้นขึ้นกับ

อุณหภูมิอากาศร้อนและเวลาในการบ่ม เมื่อรอบในการทำแห้งเพิ่มขึ้นปริมาณความชื้นของข้าวเปลือกหนึ่งลดลงตามลำดับ ทั้งนี้ในงานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นไปที่ค่าร้อยละต้นข้าวและค่าดัชนีความขาวของเมล็ดข้าว ซึ่งเป็นค่าที่ใช้บ่งชี้คุณภาพของข้าวเปลือกหนึ่ง โดยค่าร้อยละของต้นข้าวต้องมีค่าไม่ต่ำกว่าร้อยละ 60 ซึ่งถือเป็นค่าที่อุตสาหกรรมยอมรับได้ และค่าดัชนีความขาวของเมล็ดข้าวควรมีค่าสูง โดยค่าดัชนีความขาวอ้างอิงจากการอบแห้งแบบถาดที่มีการใช้ในอุตสาหกรรมปัจจุบัน มีค่าเท่ากับ 55.4 ± 0.1 ค่าดัชนีความขาวสูงหมายความว่าความชื้นมีความขาวมาก จากการทดลองผู้วิจัยได้เสนอแนะว่าการอบแห้งแบบกระแสนที่อุณหภูมิมากกว่าหรือเท่ากับ 130°C ควรมีระยะเวลาการบ่มอย่างน้อย 15 นาทีในแต่ละรอบของการอบแห้ง และการบ่มมากกว่า 30 นาทีขึ้นไปส่งผลให้ค่าร้อยละต้นข้าวมีค่าเพิ่มมากขึ้น และการอบแห้งแบบกระแสนไม่ควรใช้อุณหภูมิสูงกว่า 150°C เพื่อไม่ส่งผลให้เกิดสีเหลืองในเมล็ดข้าว

ในปี พ.ศ. 2559 Pruengam et al. [16] ได้ทำการวิจัยต่อเนื่องเพื่อประยุกต์ใช้การอบแห้งแบบกระแสนในอุตสาหกรรมการผลิตข้าวหนึ่ง (parboiled rice) โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้ข้าวกล้องหนึ่ง (parboiled brown rice kernel) ทำการทดสอบในสถานะที่คล้ายกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ [14,15] โดยทดสอบที่อุณหภูมิอากาศร้อนเท่ากับ $130, 150$ และ 170°C ความเร็วลมเท่ากับ 20 m/s ระยะการชนเท่ากับ 5 cm อัตราการป้อนข้าวเปลือกหนึ่งเท่ากับ $40\text{ kg}_{\text{dry paddy}}/\text{h}$ ทำการอบแห้งสลับกับการบ่มเป็นจำนวน 7 รอบ ใช้เวลาในการบ่มเท่ากับ 0 และ 30 นาที ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพของข้าวกล้องหนึ่งเพิ่มเติม คุณลักษณะที่ทำการศึกษ ได้แก่ ลักษณะสีฐานของเมล็ดข้าว ค่าร้อยละต้นข้าว ค่าคุณสมบัติทางกายภาพที่วัดด้วยการทดสอบ three-point bending test ที่ทำการทดสอบความสามารถในการต้านการหักของเมล็ดข้าว และการวัดค่าเนื้อสัมผัสของเมล็ดข้าวที่แสดงด้วยค่า tensile strength และ ค่า modulus of elasticity จากงานวิจัยพบว่า การอบแห้งในรอบที่ 1

และ 2 มีค่าอัตราการอบแห้งที่สูง แต่ภายหลังจากการอบแห้งรอบที่ 2 อัตราการอบแห้งมีค่าลดลง การบ่มช่วยให้ค่าร้อยละต้นข้าวมีค่าสูงกว่าการทดลองที่ไม่มีการบ่ม และในการทดลองนี้พบว่า การอบแห้งแบบกระแสนส่งผลให้เกิดรอยแยกขนาดเล็ก (microcrack) ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการในอุตสาหกรรม เนื่องจากรอยแยกนี้นำไปสู่การลดลงของร้อยละต้นข้าว โดยอุณหภูมิในการอบแห้งที่สูงขึ้นส่งผลให้เกิดรอยแยกขนาดเล็กเพิ่มมากขึ้น (มีค่ามากกว่า 25% ซึ่งเป็นค่าอ้างอิงของข้าวที่ผ่านการอบแห้งแบบถาดที่อุณหภูมิ 45°C) นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าแรงสูงสุดที่ทำให้เกิดการหัก (maximum breaking force) ค่า tensile strength และ ค่า modulus of elasticity ของเมล็ดข้าวกล้องหนึ่งมีค่าลดลงเมื่อใช้อุณหภูมิในการอบแห้งสูงขึ้น และผ่านการอบแห้งที่จำนวนรอบเพิ่มขึ้น เนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงและเวลานานส่งผลให้โครงสร้างของเมล็ดข้าวอ่อนแอลง

ในปี พ.ศ. 2560 ฉัตรชัยและคณะ [17] ทำการศึกษาเกี่ยวกับการใช้เครื่องอบแห้งกระแสนในกากถั่วเหลืองซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตน้ำมันถั่วเหลือง โดยมุ่งเน้นเรื่องการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ โดยกากถั่วเหลืองมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 288 ถึง 342% (d.b.) โดยที่ความชื้นต่ำที่สุดที่ได้จากการอบแห้งนี้เท่ากับ 23.7% (d.b.) ในการศึกษานี้ได้ใช้อุณหภูมิการอบแห้งเท่ากับ $100, 130$ และ 150°C อัตราการป้อนกากถั่วเหลืองเท่ากับ 15, 30 และ $45\text{ kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$ ได้ทำการศึกษากการอบแห้งที่ 1 รอบ และ 2 รอบ พบว่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรสูงสุดและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรสูงสุดมีค่า $1,784.2\text{ kg}_{\text{water}}/\text{m}^3\text{ h}$ และ $3,385.3\text{ W}/\text{m}^3\text{ K}$ ตามลำดับ จะเกิดขึ้นที่รอบที่ 1 ที่อุณหภูมิ 150°C และที่อัตราการป้อน $45\text{ kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$ ค่า $\text{SEC}_{\text{total}}$ ต่ำที่สุดมีค่า $2.07\text{ MJ}/\text{kg}_{\text{water}}$ ที่อุณหภูมิ 150°C และที่อัตราการป้อน $45\text{ kg}_{\text{dry solid}}/\text{h}$ ซึ่งถือว่าเป็นเงื่อนไขที่ดีที่สุดของประสิทธิภาพการใช้พลังงานของงานวิจัยนี้ และทำให้เห็นว่าค่าของ $\text{SEC}_{\text{total}}$ จะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิและอัตราการป้อนวัสดุเพิ่มขึ้น แต่ที่อัตราการป้อน 15

เมื่อ h_v คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน
เชิงปริมาตร (W/m^3K)

λ คือ ความร้อนแฝงของการระเหย
(kJ/kg)

ΔT_{lm} คือ ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยลอการิทึม
(K)

$kg_{dry\ solid}/h$ พบว่า SEC_{total} เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิการ
อบแห้ง ส่วนในการอบแห้งรอบที่ 2 พบว่าอัตราการระเหย
น้ำเชิงปริมาตรและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิง
ปริมาตรเพิ่มขึ้นตามอัตราการป้อนกากถั่วเหลือง แต่
อุณหภูมิการอบแห้งไม่ส่งผลต่ออัตราการระเหยน้ำเชิง
ปริมาตรและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร
มากนัก

3. ค่าที่แสดงถึงประสิทธิภาพของการอบแห้งแบบ กระแสน

ในงานวิจัยส่วนใหญ่ทำการวัดประสิทธิภาพการ
ทำงานของเครื่องอบแห้งแบบกระแสนจากการคำนวณ
ค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร และค่าสัมประสิทธิ์การ
ถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร และในงานวิจัยยัง
คำนึงถึงพลังงานที่ใช้ และวัดค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจาก
ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ซึ่งค่าเหล่านี้เป็นผลมา
จากหลายตัวแปร เช่นอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร
สามารถหาได้จากสมการที่ (1)

$$N_v = \frac{W_p(X_i - X_o)}{V_r} \quad (1)$$

เมื่อ N_v คือ อัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตร
(kg_{water}/m^3h)

W_p คือ อัตราการป้อนวัสดุ ($kg_{dry\ solid}/h$)

X_i คือ ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ (kg/kg ;
d.b.)

X_o คือ ความชื้นสุดท้ายของวัสดุ (kg/kg ;
d.b.)

V_r คือ ปริมาตรของห้องอบแห้ง (m^3)

ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร
หาได้จากสมการที่ (2)

$$h_v = \frac{W_p \lambda (X_i - X_o)}{V_r \Delta T_{lm}} \quad (2)$$

ค่า ΔT_{lm} หาได้จากสมการที่ (3)

$$\Delta T_{lm} = \frac{[(T_d - T_w)_o - (T_d - T_w)_i]}{\ln[(T_d - T_w)_o / (T_d - T_w)_i]} \quad (3)$$

เมื่อ T_d คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (K)

T_w คือ อุณหภูมิกระเปาะเปียก (K)

(ตัวห้อย o และ i หมายถึงทางออกและทางเข้าของห้อง
อบแห้งตามลำดับ)

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการ
อบแห้งหาได้จากสมการที่ (4)

$$SEC = \frac{E}{m_w} \quad (4)$$

เมื่อ SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของ
กระบวนการอบแห้ง (MJ/kg_{water})

E คือ พลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่พัดลม
แรงดันสูงหรือชุดทำความร้อนด้วย
ไฟฟ้า (MJ)

m_w คือ ปริมาณความชื้นที่นำออกจากวัสดุ
(kg)

ค่า m_w หาได้จากสมการที่ (5)

$$m_w = W_p (X_i - X_o) t \quad (5)$$

เมื่อ t คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (h)

4. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งแบบ กระแสน

ในงานวิจัยนั้น นักวิจัยสามารถจำลองผลการทดลองและการปรับเปลี่ยนตัวแปรต่าง ๆ ได้ด้วยจากการวิเคราะห์ผ่านโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ หรือที่เรียกว่าการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (mathematical model) โดยการจำลอง (simulation) ผลการวิจัยที่เป็นไปได้โดยการใช้สมการทางคณิตศาสตร์ทำนายผลการทดลอง และเครื่องมือที่นิยมใช้จำลองและวิเคราะห์ผลการทดลองได้ด้วยระบบคอมพิวเตอร์ คือ โปรแกรม computational fluid dynamics (CFD)

ในงานวิจัยของ Khomwachirakul et al. ในปี พ.ศ. 2559 [18] ได้ใช้โปรแกรม computational fluid dynamics (CFD) และโปรแกรม computational fluid dynamics and discrete element method (CFD-DEM) ในการจำลองการไหลและลักษณะการอบแห้งของอนุภาคความชื้นสูงในการอบแห้งแบบกระแสน จากงานวิจัยได้กำหนดตัวแปรต้นซึ่งเป็นสภาวะในการทดลอง ได้แก่ ขนาดอนุภาค ความหนาแน่นของอนุภาค ค่าความจุความร้อนของอนุภาค ค่าการนำความร้อนของอนุภาค ความชื้นเริ่มต้นของอนุภาค อุณหภูมิอากาศขาเข้า ความเร็วอากาศขาเข้า อัตราการป้อนวัสดุ และระยะการชน และในการใช้โปรแกรม CFD เพื่อจำลองการไหลและลักษณะการอบแห้งนั้น มีการกำหนดค่าตัวแปรเพิ่มเติม คือ ค่า restitution coefficient of particle-wall ค่า gas time step และค่า particle time step ในขณะที่การจำลองโดยใช้โปรแกรม CFD-DEM ได้ใช้ค่า spring constant ค่า friction coefficient และ ค่า restitution coefficient of particle-particle เพิ่มเติม โดยหลักการที่เกี่ยวข้องกับการจำลองดังกล่าว ได้แก่ พฤติกรรมเคลื่อนที่ของแก๊ส (gas motion behavior) พฤติกรรมเคลื่อนที่ของอนุภาค (particle motion behavior) และ จลนศาสตร์ของการอบแห้งของอนุภาคความชื้นสูง (kinetic drying of high moisture particle) และมี

สมการที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ สมการ continuity equation (สมการที่ (6))

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha\rho) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\alpha\rho u_i) = M_m \quad (6)$$

เมื่อ	t	คือ time (s)
	α	คือ void fraction
	ΔT_{lm}	คือ gas density (kg/m ³)
	x_i	คือ coordinates (m)
	u_i	คือ gas-phase velocity component (m/s)
	M_m	คือ source term in mass balance equation (kg/m ³ .s)

สมการโมเมนตัม (Momentum equation)
(สมการที่ (7))

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha\rho u_j) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\alpha\rho u_i u_j) = -\alpha \frac{\partial P}{\partial x_i} + \left[\alpha(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \alpha\rho g + M_F \quad (7)$$

เมื่อ	u_j	คือ gas-phase velocity component (m/s)
	P	คือ pressure (N/m ²)
	x_j	คือ coordinates (m)
	μ	คือ gas dynamic viscosity (kg/m.s)
	μ_t	คือ turbulent viscosity (kg/m.s)
	g	คือ gravitational acceleration (m/s ²)
	M_F	คือ source term in momentum balance equation (N/m ³)

สมการ Particle motion equations (สมการที่ (8))

$$m_p \frac{du_p}{dt} = F_g + F_D + F_C \quad (8)$$

เมื่อ	m_p	คือ mass of particle (kg)
-------	-------	---------------------------

u_p คือ particle velocity (m/s)

F_g คือ gravitational force (N)

F_D คือ drag force (N)

F_C คือ contact force (N)

สมการพลังงาน (energy equation for the gas phase) (สมการที่ (9))

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha \rho c_p T) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\alpha \rho c_p u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + M_h \quad (9)$$

เมื่อ c_p คือ heat capacity of drying air (J/kg.K)

T คือ อุณหภูมิ (K)

k คือ turbulence kinetic energy (m^2/s^2)

M_h คือ source term in energy balance equation (W/m^3)

และสมการ species (water) balance equation (สมการที่ (10))

$$\frac{\partial (\alpha \rho C)}{\partial t} + \frac{\partial (\alpha \rho u_i C)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha \left(\rho D + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial C}{\partial x_i} \right) + M_m \quad (10)$$

เมื่อ C คือ particle concentration (kg/m^3)

D คือ diffusion coefficient in gas phase (m^2/s)

Sc_t คือ turbulent Schmidt number

M_m คือ source term in mass balance equation ($kg/m^3.s$)

จากงานวิจัยดังกล่าว [18] ซึ่งได้นำสมการคณิตศาสตร์มาใช้จำลองการไหลและลักษณะการอบแห้งอนุภาคที่มีความชื้นสูง โดยเปรียบเทียบความแม่นยำ

ระหว่างการคำนวณผ่านโปรแกรม CFD และโปรแกรม CFD-DEM เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองจริง พบว่าการใช้โปรแกรม CFD-DEM ให้ผลการทดลองที่แม่นยำกว่าการใช้โปรแกรม CFD นอกเหนือไปจากการสร้างภาพจำลองของอนุภาคในระหว่างการอบแห้งแบบกระแสนด้วยโปรแกรมดังกล่าวแล้ว Khomwachirakul et al. [18] ได้รายงานผลค่าเฉลี่ยของระยะเวลาที่วัสดุอยู่ในระบบ (mean residence time) และค่าความชื้นของวัสดุ (moisture content of particle) โปรแกรม CFD-DEM แสดงผลค่าเฉลี่ยของระยะเวลาที่วัสดุอยู่ในระบบที่มีความคลาดเคลื่อนจากค่าจริงเพียง $\pm 4\%$ เท่านั้น แต่โปรแกรม CFD แสดงผลค่าเฉลี่ยของระยะเวลาที่วัสดุอยู่ในระบบที่มีความคลาดเคลื่อนจากค่าจริง $\pm 8\%$ สำหรับค่าความชื้นของวัสดุนั้น โปรแกรม CFD-DEM และโปรแกรม CFD แสดงค่าความชื้นของวัสดุคลาดเคลื่อน $\pm 3\%$ และ $\pm 7\%$ ตามลำดับ

5. สรุป

การอบแห้งแบบกระแสนเป็นวิธีการอบแห้งที่มีศักยภาพในการใช้ลดความชื้นของวัสดุทางการเกษตรของประเทศไทย โดยเฉพาะอย่างยิ่งข้าวเปลือก ซึ่งเป็นวัสดุทางการเกษตรที่เป็นผลผลิตหลักของประเทศไทย เนื่องจากการอบแห้งแบบกระแสนเป็นวิธีการอบแห้งที่รวดเร็วมีค่าอัตราการระเหยน้ำเชิงปริมาตรและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูง แต่ทั้งนี้ปัจจัยที่เป็นตัวแปรสำคัญต่อประสิทธิภาพของการอบแห้งแบบกระแสน เช่น ชนิดของตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อน อุณหภูมิของอากาศร้อน ระยะทางการชน อัตราการป้อนวัสดุ ระบบท่อ ต้องมีการควบคุมให้เหมาะสมเพราะมีผลต่อประสิทธิภาพของการอบแห้ง และค่าการใช้พลังงานในการอบแห้ง

ในด้านคุณภาพของวัสดุที่ผ่านการอบแห้งแบบกระแสน โดยเฉพาะอย่างยิ่งข้าวเปลือก ลักษณะคุณภาพที่คำนึงถึง ได้แก่ ค่าสีของเมล็ดข้าว ความชื้น ร้อยละต้นข้าว ระดับการเกิดเจลของเมล็ดข้าว ซึ่งเป็นค่าที่ใช้เป็น

เกณฑ์พิจารณาคุณภาพของข้าว พบว่าข้อดีของการอบแห้งแบบกระแสนคือใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้น แต่ยังไม่สามารถใช้ทดแทนวิธีการอบแห้งแบบเดิมที่ใช้ในระดับอุตสาหกรรมได้เนื่องจากคุณภาพด้านสีและการแตกหักของเมล็ดข้าวที่ยังมีค่าต่ำกว่าข้าวที่ผ่านการอบแห้งแบบเดิม ดังนั้นจึงควรทำการศึกษาต่อเนื่องเพื่อพัฒนาเครื่องมือหรือวิธีการอบแห้งที่เหมาะสมต่อไป

จากการรวบรวมงานวิจัยเกี่ยวกับการอบแห้งแบบกระแสนในวัสดุทางการเกษตร พบว่าการศึกษาวิจัยได้ศึกษาจนเข้าใจการประยุกต์ใช้จริงในระดับอุตสาหกรรมมากขึ้นเรื่อย ๆ ทั้งนี้เพื่อให้สามารถใช้เทคนิคการอบแห้งแบบกระแสนได้จริงจึงควรมีการศึกษาวิจัยอย่างต่อเนื่องต่อไป โดยต้องทำการศึกษาวิจัยเพื่อให้วัสดุทางการเกษตรที่ผ่านการอบแห้งมีคุณภาพอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ หรืออยู่ในเกณฑ์ดี และควรขยายหรือยกระดับ (Up scaling) การประยุกต์ใช้ให้สามารถใช้ในระบบการอบแห้งจริง

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Y. Wu, *Impinging Streams Fundamental Properties Application*. Amsterdam: Elsevier B.V., 2007.
- [2] A. Tamir, *Impinging- Stream Reactors*. Amsterdam: Elsevier Science, 1994.
- [3] T. Kudra, and A. S. Mujumdar, *Advanced Drying Technologies*. New York: Marcel Dekker, Inc., 2002.
- [4] K. Sathapornprasath, S. Devahastin, and S. Soponronnarit, "Performance evaluation of an impinging stream dryer for particulate materials," *Drying Technol.*, vol. 25, pp. 1121-1128, 2007.
- [5] K. Supakumnerd, and K. Sathapornprasath, "A review of the impinging stream dryer," *SWU Eng. J.*, vol. 8, pp. 16-23, 2013.
- [6] P. Jantaka, C. Nimmol and S. Devahastin, "Use of an impinging stream dryer for agricultural waste: case study with soy residue," in *The 22nd Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand*, Pathum Thani, Thailand, 2008, pp. 207-211.
- [7] K. Choicharoen, S. Devahastin, and S. Soponronnarit, "Performance and energy consumption of an impinging stream dryer for high- moisture particulate materials," *Drying Technol.*, vol. 28, pp. 20-29, 2010.
- [8] ธัญญาพร ปิตตาขาริ และ กิตติ สถาพรประสาธน์. "การศึกษาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกระแสนสำหรับวัสดุทางการเกษตร". ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23, จังหวัดเชียงใหม่, 2552, [ระบบออนไลน์].
- [9] C. Nimmol and S. Devahastin, "Evaluation of performance and energy consumption of an impinging stream dryer for paddy," *Applied Thermal Eng.*, vol. 30, pp. 2204-2212, 2010.
- [10] K. Choicharoen, S. Devahastin, and S. Soponronnarit, "Comparative evaluation of performance and energy consumption of hot air and superheated steam impinging stream dryers for high- moisture particulate materials," *Applied Thermal Eng.*, vol. 31, pp. 3444-3452, 2011.
- [11] สุชาติ ชนสุขประเสริฐ, ธนิต สวัสดิ์เสวี, สักกมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา และสมชาติ โสภณธณฤทธิ์, "การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบกระแสน," *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี* ปีที่ 1 ฉบับที่ 2, หน้า 1-10, 2555.
- [12] C. Nimmol, K. Sathapornprasath, and S. Devahastin, "Drying of High-moisture paddy

- using a combined impinging stream and pneumatic drying system," *Drying Technol.*, vol. 30, pp. 1854-1862, 2012.
- [13] T. Swasdisevi, S. Devahastin, S. Thanasookprasert, and S. Soponronnarit, "Comparative evaluation of hot-air and superheated-steam impinging stream drying as novel alternatives for paddy drying," *Drying Technol.*, vol. 31, pp. 717-725, 2013.
- [14] P. Pruengam, S. Prachayawarakorn, S. Devahastin and S. Soponronnarit, "Drying of parboiled paddy using an impinging stream dryer," in The 14th TASE National Conference and The 6th International Conference: TSAE 2013, Prachuap khiri khan, Thailand, 2013, pp. 127-130.
- [15] P. Pruengam, S. Soponronnarit, S. Prachayawarakorn and, S. Devahastin. "Rapid drying of parboiled paddy using hot air impinging stream dryer," *Drying Technol.*, vol. 32, pp. 1949-1955, 2014.
- [16] P. Pruengam, S. Soponronnarit, S. Prachayawarakorn and, S. Devahastin. "Evolution of mechanical properties of parboiled brown rice kernels during impinging stream drying," *Drying Technol.*, vol. 34, no. 15, pp. 1843-1853, 2016.
- [17] ฉัตรชัย นิยมล, อนุชา หิรัญวัฒน์ และกิตติ สถาพรประสาธน์. "สมรรถนะและประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำสำหรับถั่วเหลือง," *วารสารวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่* ฉบับที่ 24, เล่มที่ 1, หน้า 45-59, 2560.
- [18] P. Khomwachirakul, S. Devahastin, T. Swasdisevi and, S. Soponronnarit. "Simulation of flow and drying characteristics of high-moisture particles in an impinging stream dryer via CFD-DEM," *Drying Technol.*, vol. 34, no. 4, pp. 403-419, 2016.

Studying College Lifestyles Affected by ICT

Achara Suksakorn* Aukkara Sodok Palida Chawiang

Arnon Tubtiang

Graduate School of Management and Innovation,
King Mongkut's University of Technology Thonburi,

126 CB5, 8th Floor, Pracha-Utid Road, Bangmod,
Thungkru, Bangkok 10120

Email: achara.suksakorn@gmail.com

ABSTRACT

This research aims to study the college lifestyles such as behaviors and the factors that affect the use of Information and Communications Technology (ICT) in the classes of undergraduates, postgraduates, doctoral students and faculties at King Mongkut's University of Technology Thonburi. The data were taken from 1023 research participants. A conceptual framework used in this research is Technology Acceptance Model (TAM). The instruments are questionnaires, and a 5 rating scale check-list survey. The statistical analyses were Percentage, Mean, Standard Deviation and Correlation coefficient of Person (r). The results suggest that Perceived Usefulness, Perceived Ease of Use, Attitude toward the Use of ICT, Behavior Intention to Use, and Actual System Use have an effect on the ICT behaviors of undergraduates, postgraduates, doctoral students and faculties. The results can be useful for those involved with the use of ICT in classrooms, and the development of ICT for learning which can be beneficial to both the students and the professors.

Keyword: ICT, Digital Learning, Technology Management, Digital University, University 4.0.

1. Introduction

For centuries technologies have been changing and new innovations are being discovered every day. These technologies play a crucial role in human lives whether in a positive or negative way. We then need to move on with the technologies, and learn to adapt ourselves to a new environment such as reading a newspaper, listening to a radio, or watching a television on a mobile phone or a computer.

These are some examples of an effect of Information and Communications Technology (ICT).

Since the effects of ICT are wide-ranging, an awareness and an adoption of ICT in a learning society is important, especially at present when ICT is widespread and widely used in teaching which leads to extensive research on teaching and learning related to ICT to promote

education based on students' interests and aptitudes.

According to Ministry of Digital Economy & Society Thailand [1]. ICT is perceived as a more highly potential teaching tool than other teaching tools. This suggests that we can use ICT to improve the learning quality of students as well as the teaching quality of teachers. ICT can be used to store educational data and materials in a systematic way so anyone who is interested can access such information or make use of the data or materials collaboratively (ICT on Education Reform, 2552).

This use of ICT in education is also consistent with the Government's plans for economic and social development of digital Thailand BE 2559 - 2563 (Digital Economy) [2]. Digital Economy is the economy and society that use Information and Communications Technology (also known as digital technology).

Thus, ICT is an important mechanism to drive reforms as well as run business, trades, services, education, public health, and public administration. Therefore, the use of ICT covers both economic and social activities that lead to the economic development, improve the quality of people's life in the Thai society, and increase the employment opportunities (Digital Thailand).

The mechanisms to promote digital economy are promoting online community stores via digital community centers, coaching SMEs to go online and standardize product items, developing digital clusters under the government's super cluster policy, and encouraging digital technology startups to

innovate and create new products and services (Digital Thailand).

Digital Thailand plan is created with six strategies [3]: (1) Build a country-wide and high-capacity digital infrastructure, (2) Boost the economy with digital technology, (3) Create a quality and equitable society through digital technology, (4) Transform the government into the digital government, (5) Develop workforce for the digital era, and (6) Build trust and confidence in the use of digital technology (Digital Thailand). All of these are related building hard infrastructure across the country and introducing the Internet to remote villages, so that more people can get access to the Internet. Another related issue is creating a Digital Learning System that contributes to lifelong learning and digital media related to the public interest and consistent with the needs of electronic services of the public, potentially leading to increased revenue, reduced expenses, and better infrastructure facilities.

According to Digital Thailand 2016 plan, its 3rd strategy says, "Build a quality society with digital technology by creating fair use and equality throughout the country". The actions include ensuring inclusive and equal access to digital technology, developing digital literacy/media and information literacy, creating local digital contents and knowledge resources, providing education opportunities with digital technology, and increasing access to healthcare with digital technology (Digital Thailand). The goal is to ensure that people of all groups with different abilities will be able to access and

make use of digital technology, so they become digitally literate, and have access to education, healthcare, and essential public services via the digital means. In short, this means creating Digital Learning in Digital Society.

Also, the 4th strategy of Digital Thailand plan says, “Transform the government into a digital government by facilitating fast and convenient services”. The actions include transforming to citizen-centric smart services, increasing efficiency and good governance with digital technology, promoting open data and civic participation, and developing government service platforms to encourage new services (Digital Thailand). The goal is to make government services meet the demands of people and businesses with speed, accuracy, and convenience. This will help people to easily access government data to ensure transparency and civic participation. To provide such access, government functions need to be integrated into the government infrastructure (Digital Thailand).

While ICT has benefits for classrooms such as an easy access to a large amount of information making learning new things easy, it may have some other effects such as changing ways of learning, or relationship among students who interact in or do group work through online learning platforms. These effects have not given sufficient attention.

Therefore, we focus on digital learning by digital lifestyles. It is hoped that exploring this issue will help us understand more about (1) relationships within the social network that can lead to the development of relationships in a

society in a more intimate way leading to the real effective exchange, and (2) issues related to a plan to formulate policies for the university to make use of various technologies in enhancing learning and teaching.



Fig.1 Digital Thailand 6 strategies

Source: https://www.itu.int/en/ITU-D/Regional-Presence/AsiaPacific/Documents/Events/2016/Apr-Digital2016/S2_Present_Pansak_Siriruchatapong.pdf

1.1 Objectives of Study

- 1) To study the behaviors of postgraduates, doctoral students and professors related to the use of ICT in learning and teaching at King Mongkut's University of Technology, Thonburi.
- 2) To study the relationship among the perceived benefits and the perceived ease of usage, and the behaviors of the students in the use of ICT in Master and PhD courses.
- 3) To summarize the results from the survey to make recommendations on the development of ICT.

2. Materials and Method

2.1 Research Model

In studying the behaviors of post-graduates, doctoral students and professors related to the use of ICT in learning and teaching at King Mongkut's University of Technology, Thonburi, a conceptual frame-work concept was used and is presented in Fig. 2.

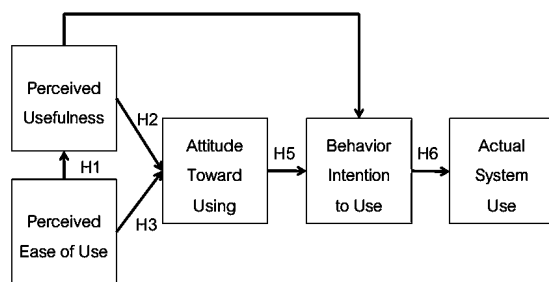


Fig.2 Conceptual Framework and Theoretical Research on technology adoption. (TAM) [4]

2.2 Assumptions

H1: External Variable of use effects in Perceived Usefulness in using Information and Communications Technology in the course. (EV $\rightarrow$ PU)

H2: Perception Ease of Use effects in Perceived Usefulness in using Information and Communications Technology in the course. (PEOU $\rightarrow$ PU)

H3: External Variable of use effects in Perception Ease of Using Information and Communications Technology in the course. (EV $\rightarrow$ PEOU)

H4: Perceived Usefulness of use affects Attitude toward the use of Information and Communications Technology in the course. (PU $\rightarrow$ A)

H5: Perceived Ease of Use affects Attitude toward the use of Information and Communications Technology in the course (PEOU $\rightarrow$ A).

H6: External Variable of use affects Behavior Intention to the use of Information and Communications Technology in the course (EV $\rightarrow$ BI).

H7: Perceived Usefulness of usage affects Behavior Intention to the use of Information and Communications Technology in the course (PU $\rightarrow$ BI).

H8: Attitude toward the use of ICT affects Behavior Intention to the use of the system and Information and Communications Technology in the course (A $\rightarrow$ BI).

H9: Behavior Intention to use affects Actual Use on the adoption of Information and Communications Technology in the course (BI $\rightarrow$ U).

3. Results and Discussion

In this study, 32 sets of questionnaire were checked for the reliability by Cronbach's Coefficient Alpha scale. [5].

TABLE I

Summary of Reliability Analysis

Variables	Cronbach's Alpha
External Variable	0.822
Perceived Usefulness	0.871
Perceived Ease of Use	0.883
Attitude toward the Use of ICT	0.885

TABLE I

Summary of Reliability Analysis (Cont.)

Variables	Cronbach's Alpha
Behavior Intention to Use	0.892
Actual System Use	0.804

The reliability test results of the research instrument presented in Table I reveals that all questions were consistent and reliable to be applied as the research instrument in this study with Alpha greater than 0.60.

TABLE II

Summary of Correlation Analysis

	EV	PU	PEOU	A	BI	U
EV	1.000	0.657	0.621	0.657	0.700	0.713
PU	0.657	1.000	0.875	0.819	0.823	0.688
PEOU	0.621	0.875	1.000	0.812	0.801	0.686
A	0.657	0.819	0.812	1.000	0.895	0.762
BI	0.700	0.823	0.801	0.895	1.000	0.807
U	0.713	0.688	0.686	0.762	0.807	1.000

Table II shows the results of Pearson Correlation Coefficients. Each variable is statistically significant at 0.01 and is in the same direction. More detailed explorations of such results are presented below.

- 1) Factors that affect the behavior of usage

TABLE III

The relationship between the factors affecting the intended usage. (Multiple Linear Regression)

Regression Test	Adjust R Square	B	Std. Error	Sig.
(Constant)		-0.193	0.113	0.088
BI	0.837			
EV		0.181	0.034	0.000
PU		0.242	0.041	0.000
A		0.619	0.037	0.000

Following:

EV = External Variable

PU = Perceived Usefulness

A = Attitude toward the Use of ICT

BI = Behavior Intention to Use

From Table III, it is found that relationship level between three factors (that is, external factor, perceived benefits as well as attitude to use) and behavior of intended usage at the level of Adjust R Square at 0.837. This suggests that external factors, perceived benefits as well as attitude to use affect the intended usage at 83.7%. Each factor is equal to the significant level at 0.000 which is statistically less significant than at the 0.05 level, so we can accept assumptions H6, H7, and H8, and these can be written as a multiple regression equation shown below.

$$BI = (-0.193) + 0.181(EV) + 0.242(PU) + 0.619(A) \quad (1)$$

From the equation, it is found that when one EV increases, the BI Increases by 0.181 units,

given that other variables stay unchanged. When one PU increases, the BI increases by 0.242 units given that other variables remain unchanged. If the value of A increases by 1, BI will increase by 0.619 units given the other variables stay still. When all variables are 0, the BI is -0.193.

TABLE IV

The relationship between factors affecting to the Actual System Use

Regression Test	Adjust R Square	B	Std. Error	Sig.
(Constant)		0.161	0.133	0.228
A	0.709			
PU		0.512	0.062	0.000
PEOU		0.416	0.058	0.000

Following:

PU = Perceived Usefulness

PEOU = Perceived Ease of Use

A = Attitude toward the Use of ICT

From Table IV, it is found that the attitude toward using (A) factors are related to perceived benefits (PU) and perceived ease of use (PEOU) at the level of Adjust R Square at 709.0. This implies that perceived benefits (PU) and perceived ease of use (PEOU) have an influence on attitude to use (A) 70.9%. Each factor is equal to the significant level at 0.000 which is statistically less significant than at the 05.0 level, so we can accept assumptions H4 and H5 which can be written as a multiple regression equation shown below.

$$A = 0.161 + 0.512(PU) + 0.416(PEOU) \quad (2)$$

If a PU is increased by 1 unit, A will increase by 0.512 units given that the other variables are unchanged. If one PEOU is increased, A will increase by 0.416 units given that the other variables remain the same. When all variables are 0, A is 0.161.

Hence, it is found that perceived benefits (PU) to use is a factor that can increase the level of attitude to use with the highest rate (0.512 units). To understand more about PU, Table V shows the related factors.

TABLE V

The relationship between factors affecting Perceived Usefulness. (Multiple Linear Regression)

Regression Test	Adjust R Square	B	Std. Error	Sig.
(Constant)		0.358	0.116	0.002
PU	0.785			
EV		0.202	0.033	0.000
PEOU		0.706	0.028	0.000

Following:

EV = External Variable

PU = Perceived Usefulness

PEOU = Perceived Ease of Use

From Table V, it is found that perceived benefits (PU) relates to external factor (EV) and perceived easy to access (PEOU) as Adjust R Square is equal to 0.785. As the result, external factor (EV) and perceived easy to access (PEOU) affect attitude to use level (A) 78.5% Each factor is equal to the significant level at 0.000 which is statistically less significant than at 0.05, so we

can accept assumptions H1 and H2 which can be written as a multiple regression equation as

$$PU = 0.358 + 0.202(EV) + 0.706(PEOU) \quad (3)$$

If one EV is added, the PU will increase by 0.202, given that the other variables remain unchanged. If one PEOU increases, the PU will increase by 0.706 units, given that the other variables stay unchanged. When all variables are 0, the PU is 0.358.

However, it is found that perceived easy to access (PEOU) to use is a factor that can increase the level of attitude to use at the highest rate (0.706 units).

To understand more about PEOU, Table VI reveals other its relationship with related factors.

TABLE VI

The relationship between factors affecting perceived easy to access. (Multiple Linear Regression)

Regression Test	Adjust R Square	B	Std. Error	Sig.
(Constant)		1.286	0.201	0.000
PEOU	0.384			
EV		0.731	0.047	0.000

Following:

EV = External Variable

PEOU = Perceived Ease of Use

From Table V, it is found that perceived easy to access (PEOU) is related to external factor (EV) as the Adjust R Square is equal to

0.384. As a result, external factor (EV) affects perceived easy to access (PEOU) 4.38%. The external factor has the significant level at 0.000 which is statistically less significant than at the 05.0, so we can accept assumption H3 which can be as a written multiple regression equation as

$$PEOU = 1.286 + 0.731(EV) \quad (4)$$

If one EV is added, the PEOU will increase by 0.731, given that the other variables stay unchanged. When EV is 0, the PEOU is equal to 1.286 units.

2) Factors that affect system usage (Actual System Use). The findings in the previous section show the relationship of factors related to the intention to use the technology. This section will show the relationship of the factors that affect the acceptance of the Actual System Use (U) as following.

TABLE VII

The relationship between factors affecting to the Actual System Use (Multiple Linear Regression)

Regression Test	Adjust R Square	B	Std. Error	Sig.
(Constant)		0.478	0.135	0.000
U	0.650			
BI		0.849	0.032	0.000

Following:

BI = Behavior Intention to Use

U = Actual System Use

From Table VII, it is found that the relationship level between behavior intention to use (BI) and actual system use (U) is at the level of Adjust R Square 0.650 which suggests that behavior intention to use (BI) affects to actual system use (U) 65.0%. Behavior Intention to use factor (BI) has the significant value at 0.000 which is statistically less significant than at 0.05, so we can accept assumption H9 which can be written as a multiple regression equation as

$$U = 0.478 + 0.849(BI) \quad (5)$$

If one BI increases, U will increase by 0.849, given that the other variables stay unchanged. When BI is 0, U is 0.478.

The results can be summarized as in Fig.3.

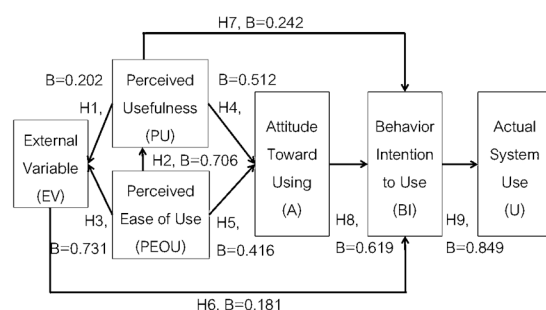


Fig.3 The research framework displays the relationship between factors and behavior intention to use. It affects the actual use by the coefficient of predictive variables in the form of raw scores.

Fig. 3 shows the research framework Technology Acceptance Model: TAM to predict the adoption of technology. It is found that TAM is a model that can explain the relationship of

factors to the intention to use. This result affects students' use of ICT as followings.

1) Behavior Intention to Use: This study shows that three factors that highly affect the intention to use (83.7%) are external factors, perceived benefits as well as attitude to use. This can be explained that when the students have the intention to make use of ICT, when they know about external factor ($B=0.081$) such as the good quality and the stable connection of the Internet as also revealed as perceived profit ($B=0.242$). They can use social networks to learn new things, connect or update information with colleagues.

Moreover, the intention to use affects the attitude in using ICT ($B=0.619$). They can update the way to study the changing of technology, essence of learning via internet by ICT devices such as smartphones, tablets, and notebooks. Besides, ICT such as the use of smart phones or notebooks is brought into learning, the intention to use ICT is also increased.

The results are consistent and different from Timothy Teo [6], who studied the effectiveness of the Technology Acceptance Model (TAM). Similar to Teo (2011), this study found that the variables that could explain the intention to use the technology were the same as the perceived benefits of using the technology, as well as attitude to use technology. However, some findings in the current study are different from Teo (2011). In Teo's work, there is an easy perception of use as a common variable describing the intent to use technology.

However, in this study, it was found the relationship of external factors with the easy perception of use ($B=0.731$). Moreover, it is found that external factors related with perceived benefit ($B = 0.202$). This result is similar to Davis, Bagozzi, Warshaw's research [7] which found that external factors are likely to influence the perceived benefits of information technology and the ease of use. This will lead to the adoption of people in using information technology eventually. Also, Andrew Burton-Jones, Geoffrey S. Hubona's research [8] that found external variables affect perceived ease of use and perceived benefits which lead to a belief of attitude and actual usage behavior.

2) Actual System Use: The study also found that the effect of behavior intention to use on the actual use of technology by university students was quite high (1.65%). To explain that, each student has the intention to show one's behavior based on the potential positive effects of the use [9] When university students show their intention to use at a higher level, it will affect the adoption of ICT-based learning systems such as online classroom, online library as well as online search by increase ($B = 0.849$). This is similar to the findings of Napaporn Chatmaneeung [10]. The TAM was used to display the factors that contributed to the acceptability of E-Learning technology in the form of supplementary media. It is found that when the teacher uses E-learning as the supplementary media, the students have a higher level of intention to learn. This has

resulted in the acceptability of E-Learning in the learning process.

4. Interpretations and Analysis of Results

The results of this study suggest that bringing Information Technology to be used in the course or in teaching undergraduates, postgraduates, and doctoral students has benefits and can develop Information Technology for studying in class as following.

1) In terms of Perceived Usefulness, the use of ICT should be promoted. Teachers and students can use ICT in classroom and research. For example, teachers may encourage students to search for the course contents, to learn through the Virtual Classroom, to interact with other students by using questions, or to communicate with the teacher. With a large media contents over the electronic system that can be used to support optimal learning and human capital development program, the students and teachers can create and use information effectively, improve critical literacy, develop ICT knowledge, and increase expertise with international standards.

2) In terms of Perceived Ease of Use of ICT, teachers and students should be encouraged to use the Mobile Application in teaching and researching to enhance the ability of teachers and education officers to use Information and Communications Technology for education. Then, teachers and educational officers will

develop the ability of using Information and Communications Technology for education.

3) In terms of Attitudes toward the Use of ICT in teaching, teachers and students should be encouraged to use the Virtual Lab and Mobile Application laboratory models to understand the course contents.

4) In terms of Information and Communications Technology usage in the course, The University should maintain the stability of the ICT network. The network should always be in a good condition in order to meet the demand of teachers, students, and university officers who use the Internet. The infrastructure of Information Technology should be standardized for e-service education which needs the unity information database. The development of ICT infrastructure which has a high speed Internet or Broadband should be available to all users in different sectors.

5) The university should develop a communication system to be more efficient in terms of expansion of the Internet speed, the access point, and the service area of wireless network (WIFI) to cover the areas within the universities to support researching and learning outside the classroom. This system also needs to be flexible, stable, and has a high level of security.

6) In terms of Internet Access, we need to be aware that apart from the Internet usage at the university. Houses, dormitories and apartment as the main points for access, there is a need to consider the number of students. The university should cooperate with operators in offering mobile Internet connections or Fixed Broad Band for a special rate for the students to support Information access on education at a reasonable price.

7) In terms of providing advice and services, students should be provided with an easy access to the advice or services such as central contact questions & answer, or suggestions on applications related to the use of ICT, especially when they need help.

5. Conclusion

The results indicate that the perceived usefulness, the perceived ease of use, the attitudes toward performance, the external variables, the quality of internet signal, the system stability and the multi-device capability, the multi-devices, and the multi-platforms of ICT systems have an influence on the intention to use ICT and the real use of the systems of graduate students, master's degree students, doctoral students, and faculty members of King Mongkut's University of Technology Thonburi.

6. Suggestions for further research

Further research can be done on the following topics:

- 1) To study groups of high school students in other schools,
- 2) To study groups of undergraduate, master and PhD students, and professors in other universities,
- 3) To compare Information and Communications Technology usage behaviors in courses at different educational levels,
- 4) To study other factors that affect the use of Information and Communications Technology in other courses such as personal factors, risk perceiving, or the environment impact.

7. References

- [1] Ministry of Information and Communication Technology (Ministry of Digital Economy & Society), Thailand Information and Communication Technology Policy Framework 2011-2020, (ICT 2020), 2011, pp. 13-65. [Online]. Available: <http://www.mdes.go.th/view/10/All%20News/e-Publication/25>
- [2] Ministry of Information and Communication Technology (Ministry of Digital Economy & Society), 2558, Digital Economy & Society Development Plan 2016-2020. [Online]. Available: <http://www.digitalthailand.in.th/digital-economy>
- [3] Ministry of Information and Communication Technology (Ministry of Digital Economy & Society), Digital Thailand 6 strategies [Online]. Available: https://www.itu.int/en/ITU-D/Regional-Presence/AsiaPacific/Documents/Events/2016/Apr-Digital2016/S2_Present_Pansak_Siriruchatapong.pdf
- [4] F. D. Davis, "Perceived Usefulness, Perceived ease of use, and User Acceptance of Information Technology." *MIS Quarterly*, vol. 13, no.3, pp. 319-339, September 1989.
- [5] Cronbach, Lee J., "Essentials of psychological testing," Harper and Row, New York: London, 1970.
- [6] Timothy Teo, "Efficiency of the technology acceptance model to explain pre-service teachers' intention to use technology: A Turkish study," *Campus-Wide Information Systems*, vol. 28, no. 2, pp. 93-101, 2011.
- [7] F. D. Davis, R. P. Bagozzi, & P. R. Warshaw, "User acceptance of computer technology: A comparison of two theoretical models," *Management Science*, vol. 35, no. 8, pp. 982-1003, August 1989.
- [8] Andrew Burton-Jones, Geoffrey S. Hubona, "The mediation of external variables in the technology acceptance model," *Information & Management*, vol. 43, Issue 6, pp. 706-717, September 2006.

- [9] Ajzen & Fishbein, “Understanding attitudes and predicting social behavior,” Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1980.
- [10] Napaporn Chatmaneering. A study of teaching and learning acceptance of e-learning for teacher and undergraduated students Kasesart University, *Kamphaeng Saen Campus*. Vol. 5, No. 2., pp. 388-389, 2011.

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิ (Reader)

ต้นฉบับบทความวิจัยที่ตีพิมพ์วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีที่ 13 ฉบับที่ 2 (เดือนพฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2561) ได้รับการตรวจสอบแก้ไขจากผู้ทรงคุณวุฒิดังรายนามต่อไปนี้

- | | |
|---|--|
| 1. อาจารย์ ดร.พงษ์เพ็ญ จันทนะ | ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 2. รองศาสตราจารย์ ว่าที่พันตรี ดร.อิทธิพร ศิริสวัสดิ์ | ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 3. รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริวรรณ ศรีสรณ์ | ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 4. อาจารย์อาคม ม่วงเขาแดง | ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 5. รองศาสตราจารย์ ดร.เวคิน ปิยรัตน์ | ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 6. ผู้ช่วยศาสตราจารย์เกียรติชัย รักษาชาติ | ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 7. อาจารย์ ดร.อัฐสิทธิ์ ศิริวิจิตรภรณ์ | ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 8. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิลดา หวังพานิช | ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 9. อาจารย์ ดร.เสกฐา ศาสนนันท์ | ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 10. รองศาสตราจารย์ ดร.นิลวรรณ ชุ่มฤทธิ์ | ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 11. รองศาสตราจารย์ ดร.วุฒิพล ธาราธิเรศรัษฎ์ | ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 12. อาจารย์ ดร.กิตติศักดิ์ วิธินันท์กิตต์ | สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
วิทยาเขตบางพระ |
| 13. อาจารย์ ดร.ณรงค์ อังกิมบัว | ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา |
| 14. อาจารย์ ดร.สัญญา ยัมศิริ | ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยบูรพา |
| 15. รองศาสตราจารย์ ดร.อริคม ฤกษ์บุตร | ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร |
| 16. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤต ไ้วธนสุวรรณ | สำนักสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม |

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิ (Reader)

ต้นฉบับบทความวิจัยที่ตีพิมพ์วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีที่ 13 ฉบับที่ 2 (เดือนพฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2561) ได้รับการตรวจสอบแก้ไขจากผู้ทรงคุณวุฒิดังรายนามต่อไปนี้

- | | | |
|-----|--|--|
| 17. | อาจารย์ ดร.ศุภกานต์ จันทร์เสรีวิทยา | สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ สำนักวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง |
| 18. | อาจารย์ ดร.ประชา คำภักดี | ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี |
| 19. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยยันต์ เจตนาเสน | ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| 20. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มุกิตา สงฆ์จันทร์ | ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร |
| 21. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พุทธา จินครวั | สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา |
| 22. | รองศาสตราจารย์ ดร.ทวีศักดิ์ ปิติคุณพงศ์สุข | ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 23. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันจักรี เล่นวารี | ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุมและเครื่องมือวัด คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| 24. | รองศาสตราจารย์ ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์ | ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 25. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กนกพร ศรีปฐมสวัสดิ์ | ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 26. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยวัฒน์ เอกวัฒน์พานิชย์ | สาขาวิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| 27. | ศาสตราจารย์ ดร.พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์ | ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต |
| 28. | ดร.จตุรงค์ แป้นพงษ์ | สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก |
| 29. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศักดิ์ระวี ระวีกุล | คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น |
| 30. | รองศาสตราจารย์ ดร.ยุทธชัย บันเทิงกิจ | ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 31. | รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยพร วงศ์พิศาล | ภาควิชาวิศวกรรมขนถ่ายวัสดุและโลจิสติกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |

คำแนะนำสำหรับผู้เขียนบทความลงตีพิมพ์
วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒจัดพิมพ์ปีละ 3 ฉบับ ฉบับที่ 1 ช่วงเดือนมกราคม – เมษายน ฉบับที่ 2 ช่วงเดือนพฤษภาคม – สิงหาคม และฉบับที่ 3 ช่วงเดือนกันยายน – ธันวาคม โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะให้เป็นการรวบรวมผลงานทางวิชาการและงานวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 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) เป็นบทความที่ไม่ได้อยู่ระหว่างการพิจารณาตีพิมพ์ของสื่อสิ่งพิมพ์อื่นๆ และไม่เคยได้รับการตีพิมพ์ในวารสารใดๆ มาก่อน
- 3) ต้องไม่มีการละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่น ไม่มีการลอกเลียน หรือตัดทอนผลงานวิจัยของผู้อื่นโดยที่ไม่ได้รับอนุญาตและมีการอ้างอิงที่เหมาะสม
- 4) ชนิดและขนาดตัวอักษร ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษให้ใช้ตัวอักษร TH Sarabun New ซึ่งขนาดตัวอักษร มีรายละเอียดดังนี้
 - 6.1) ชื่อบทความ ใช้ตัวอักษรขนาด 18 pt. ตัวหนา
 - 6.2) ชื่อ-สกุลผู้เขียนบทความ ใช้ตัวอักษรขนาด 14 pt. ตัวปกติ
 - 6.3) หัวข้อหลัก ใช้ตัวอักษรขนาด 14 pt. ตัวหนา
 - 6.4) หัวข้อรอง ใช้ตัวอักษรขนาด 14 pt. ตัวเอียง
 - 6.5) เนื้อเรื่องในหัวข้อหลักและหัวข้อรอง ใช้ตัวอักษรขนาด 14 pt. ตัวปกติ
 - 6.6) เนื้อเรื่องในตาราง ใช้ตัวอักษรขนาด 14 pt. ตัวปกติ

รูปแบบการเขียนบทความ 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

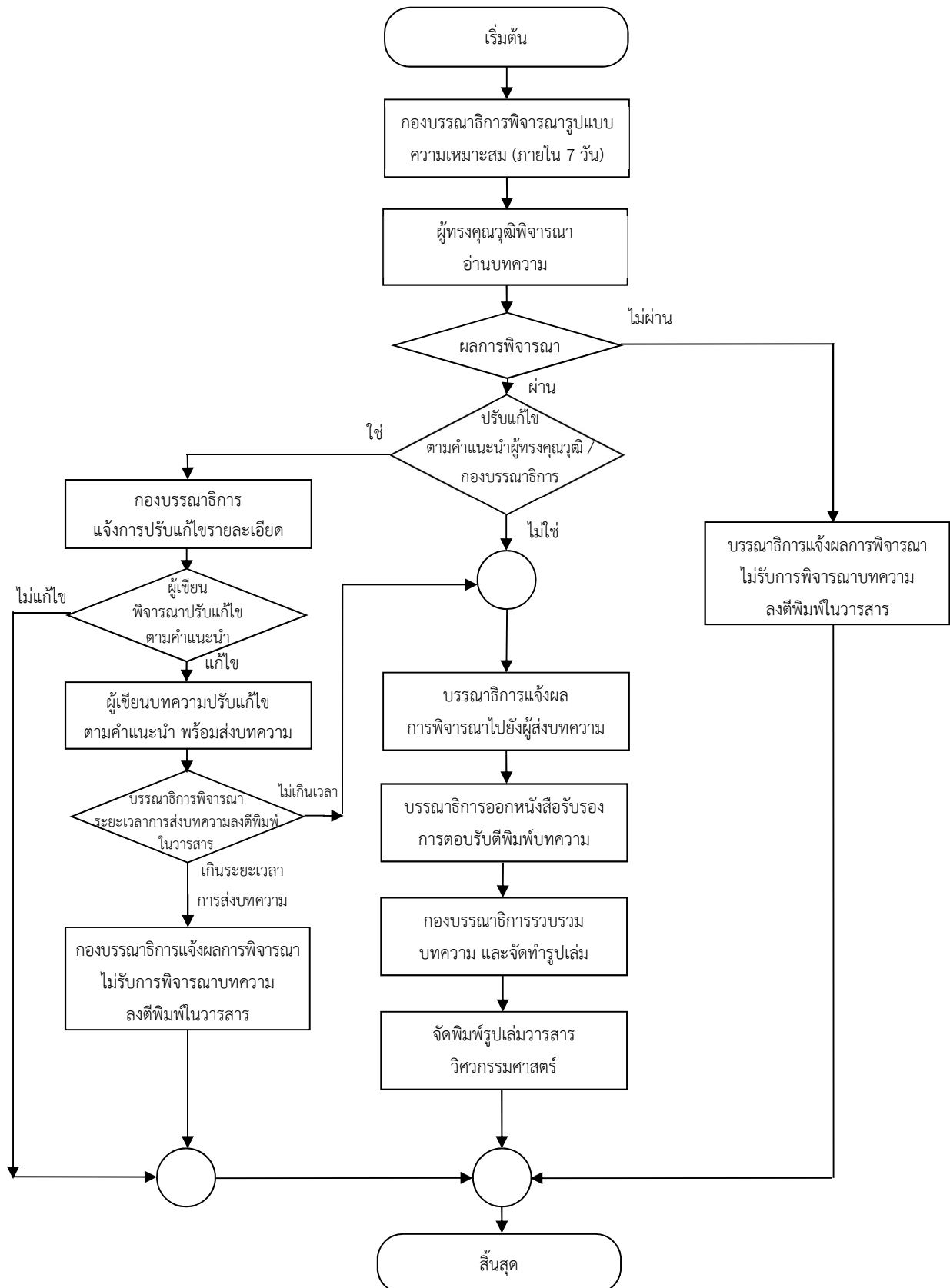
- 1) ส่งต้นฉบับบทความ ไฟล์ Microsoft Word และ pdf พร้อมแนบไฟล์สแกนแบบเสนอผลงานวิชาการเพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
- 2) ส่งไฟล์ต้นฉบับทางออนไลน์ที่
<https://www.tci-thaijo.org/index.php/sej/login>
หรือทางอีเมล JournalEngSWU@gmail.com
- 3) ดูข้อมูลวารสารวิศวกรรมศาสตร์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

3. ขั้นตอนการประเมินบทความ

การประเมินบทความวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ มีขั้นตอนดังนี้

- 1) การทบทวนโดยผู้รู้เสมอกัน (peer review) โดยผู้ทรงคุณวุฒิตั้งน้อยสองคนในสาขาที่เกี่ยวข้องแบบอำพรางฝ่ายเดียว (single-blind)
- 2) การเขียนตอบข้อซักถามและการแก้ไขปรับปรุงต้นฉบับตามข้อคิดเห็น (comments) ของผู้ทรงคุณวุฒิ โดยผู้เขียน 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 อำเภอองครักษ์ จังหวัดนครนายก 26120

โทร 0 2649 5000 ต่อ 27073 22010 22011 โทร 0 3732 2602

<http://eng.swu.ac.th>

บทความวิจัย

- การลดการประสานสัมพันธ์ที่ผิดพลาดของรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบมีทิศทางด้วยขั้นตอนวิธีมีเมติก
Miscoordination Reduction of Directional Overcurrent Relay by Memetic Algorithm
โดย วิวัฒน์ ทิพจร อนุสรณ์ ยอดใจเพชร สมนึก หมอโปะกู เฉลิมวุฒิ แก้วตา
- การวิเคราะห์เสถียรภาพของแปลงผันกำลังไฟฟ้าเมื่อต่อกับวงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ในระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์
Stability Analysis of a Power-switching Converter with an EMI Filter for PV Systems
โดย สันติชัย บุญเรือง วุฒิพล ธาราธิระเศรษฐ์
- อัลกอริธึมอิงกระแสสำหรับการตามรอยจุดกำลังสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ
Current Based Algorithm for the Maximum Power Point Tracking of Stand-alone Photovoltaic System
โดย ขวัญใจ เกื้อนพั้งเทียม กองพัน อารีรักษ์ กองพล อารีรักษ์
- การเปรียบเทียบโครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสำหรับการกำจัดฮาร์โมนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับ
The Comparison of Shunt Active Power Filter Structure for the Harmonic Elimination in AC-Electric Railway Systems
โดย สุภานันต์ ตรงใจ ทศพร ณรงค์ฤทธิ์ กองพล อารีรักษ์
- การประยุกต์ใช้วิธีวิวัฒนาการด้วยผลต่างเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาหลายวัตถุประสงค์ที่มีค่าต่อเนื่อง
Application of Differential Evolutionary Algorithm to Compare the Performance of Continuous Multi-Objective Problem Optimization
โดย ดริย์รัตน์ เกิดโคกทรัพย์ บารเมศ ชูติมา
- Balancing Coffee Kit Assembly Line: a Case Study of a Sample Factory
By Paiboon Yamphuan
- การประยุกต์ใช้วิธีเชิงวิวัฒนาการแบบมากวัตถุประสงค์สำหรับการจัดสมดุลคู่สายการประกอบรูปตัวยู
Application of Many-Objective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition for Double U-Shaped Assembly Line Balancing
โดย สุชนันท์ ต้นชนะประดิษฐ์ ปารเมศ ชูติมา
- การทดสอบในห้องปฏิบัติการด้วยแบบจำลองเพื่อตรวจสอบพฤติกรรมของการยุบตัวของดินเหนียวที่ปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึกกับแผ่นพื้นดินซีเมนต์
Laboratory Model Testing for Investigating the Consolidation Behavior of Soft Clayey Deposit Improved by a Floating Soil-Cement Column with a Cement Stabilized Slab
โดย สุธิ ปิยะพิพัฒน์ ศุภสิทธิ์ พงศ์ศิระสถิตย์
- ผลของตัวทำละลายที่ใช้เตรียมเหง้ามันสำปะหลังต่อผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว
Influence of Solvents Used for Cassava Rhizome Pretreatment on Fast Pyrolysis Products
โดย กฤษฎา ลำพองชาติ นวรงค์ ชลคุป อติศักดิ์ ปิตติยะ
- พฤติกรรมการหล่อลื่นของรอกเลื่อนกันร่นอากาศแบบแผ่นเอียงและแผ่นเรียบ
Behavior of Lubrication in Tapered-land Type Air Thrust Bearing
โดย สรวิศ ไชติวิสุทธิ เกษฎา พานิชกรณ์ ขนิษฐา วงษ์สีดาแก้ว
- การวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยันปัจจัยความสำเร็จโครงการการจัดซื้อจัดจ้างก่อสร้างภาครัฐ
A Confirmatory Factors Analysis of the Success factors on Government Construction Procurement Project
โดย ธนายุทธ ไชยธรรตน์ ณรงค์ เหลืองบุตรนาค พิธีนิธิ อักษร
- การประเมินเทคนิคการประมาณค่าฝนร่วมกับข้อมูลแผนที่ภูมิประเทศเชิงตัวเลขในลุ่มน้ำตาปี
Assessment an Areal Rainfall Technique with Digital Elevation Model Data in Tapi Basin
โดย สุภานันท์ มีขำนาญ ธนศรี สมบูรณ์ วิษุวัฒน์ แต่สมบัติ

บทความวิชาการ

- การทบทวนวิธีวินิจฉัยข้อบกพร่องในระบบควบคุมพลวัต
A Review of Fault Diagnosis in Dynamic Control Systems
โดย เกษฎา สายใจ เฉลิมกันท์ พองสมุทร
- บทความวิชาการ: การประยุกต์ใช้การอบแห้งแบบกระแสน้ำสำหรับวัสดุทางการเกษตรในประเทศไทย
A review: Application of Impinging Stream Drying Process for Agricultural Products in Thailand
โดย ปราชญา ตริสุทธาชีพ กิตติ สถาพรประสาธน์
- Studying College Lifestyles Affected by ICT
By Achara Suksakorn Aukkara Sodok Palida Chawiang Arnon Tubtiang