

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ SRINAKHARINWIROT ENGINEERING JOURNAL ปีที่ 14 ฉบับที่ 2 เดือนพฤษภาคม - สิงหาคม พ.ศ. 2562



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 ในสาขาวิศวกรรมเคมี วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมอุตสาหการ วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ วิศวกรรมชีวการแพทย์ และสาขาใกล้เคียงอื่นๆ ทั้งในเชิงทฤษฎีและเชิงปฏิบัติ

เจ้าของ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

63 หมู่ 7 ตำบลอรัญญิก อำเภองครักษ์

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.ทนงเกียรติ	เกียรติศิริโรจน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศาสตราจารย์ ดร.อภิรัฐ	ศิริธราธิวัตร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์	เดชะอำไพ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ์	อัครเอกผาลิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร.โกสินทร์	จำนงไทย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.ศราวุธ	ริมดุสิต	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ	โสภาแดง	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย	เปรมฤดีปรีชาชาญ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงพรรณ	ศฤงคารินทร์	มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.สีรุ่ง	ปรีชานนท์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รองศาสตราจารย์ ดร.อนันต์	มั่งวัฒนา	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต	ชาลิรักษ์ตระกูล	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.พงศ์ชนัน	เหลื่องไพบูลย์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.อริคม	ฤกษ์บุตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
รองศาสตราจารย์ ดร.เตือนใจ	สมบูรณ์วิวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.สุรพันธ์	ยี่มนัน	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
รองศาสตราจารย์ ดร.โกศล	โอฬารไพโรจน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริวรรณ	ศรีสรณ์	46/18 ซอยพหลโยธิน 51 แขวงอนุสาวรีย์ เขตบางเขน กรุงเทพมหานคร 10220

บรรณาธิการอำนวยการ

รองศาสตราจารย์ ดร.จันจิรา จับศิลป์

หัวหน้ากองบรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กำพล วรดิษฐ์

กองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล	นาพล	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ ดร.นิลวรรณ	ชุ่มฤทธิ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ ดร.พิมพ์พันธุ์	เจริญพงษ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ ดร.สุนิติ	สุภาพ	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ ดร.วุฒิพล	ธาราธิ์เศรษฐ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประชา	บุญยานิชกุล	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงษ์	คงประเสริฐ	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาคภูมิ	ศรีรมรินทร์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันจิรา	จับศิลป์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
อาจารย์ ดร.สุธิดา	ทิพย์รักษ์พันธุ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ศาสตราจารย์ ดร.ทนงเกียรติ	เกียรติศิริโรจน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศาสตราจารย์ ดร.อภิรัฐ	ศิริธราธิวัตร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์	เดชะอำไพ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ	อัครเอกผาลิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร.โกสินทร์	จำนงไทย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.ศราวุธ	ริมดุสิต	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ	โสภณแดง	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย	เปรมฤดีปรีชาชาญ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงพรรณ	ศฤงคารินทร์	มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.สีรุ่ง	ปรีชานนท์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รองศาสตราจารย์ ดร.อนันต์	มั่งวัฒนา	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.ขวลิต	ชาลิรักษ์ตระกูล	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.พงศ์ชนัน	เหลื่องไพบูลย์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.อริคม	ฤกษ์บุตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
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
รองศาสตราจารย์ ดร.โกศล	โอฬารไพโรจน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริวรรณ	ศรีสรณ์ตร์	46/18 ซอยพหลโยธิน 51 แขวงอนุสาวรีย์ เขตบางเขน กรุงเทพมหานคร 10220

ผู้ช่วยบรรณาธิการ

นางสาวยุพาพร ประไพย์

บทบรรณาธิการ

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

สำหรับการบริหารจัดการทรัพยากรคนอาจารย์ให้เปลี่ยนแปลงทันกับการเปลี่ยนแปลงของหลักสูตรและความต้องการของสังคมเป็นสิ่งที่ทำได้ยาก เพราะคนอาจารย์สำเร็จการศึกษามาด้วยการทำปริญญาโทในหัวข้อที่ต้องมีความลุ่มลึก ทำให้ขาดมิติความกว้างที่จะปรับเปลี่ยนหัวข้อการสอนตามการเปลี่ยนแปลงของหลักสูตรได้ ขณะเดียวกันก็ไม่สามารถแก้ไขปัญหานี้ด้วยการเปิดรับอาจารย์ใหม่ เพราะอายุการทำงานของคนอาจารย์แต่ละคนยาวนานเกินการเปลี่ยนแปลงของความต้องการของหลักสูตร การแก้ปัญหานี้แนวทางนี้ เมื่อเวลาผ่านไปไม่นาน ปัญหาความไม่สอดคล้องระหว่างคนอาจารย์ที่มีความต้องการของหลักสูตรก็จะวนกลับมาเกิดซ้ำอีก ไม่นับรวมภาระค่าใช้จ่ายที่ต้องแบกรับในการจ้างคนอาจารย์กลุ่มเดิมที่ไม่สามารถสอนในหลักสูตรที่เปลี่ยนแปลงไปได้ ซึ่งจะทำให้ต้นทุนค่าธรรมเนียมการศึกษาสูงโดยไม่จำเป็น เกิดความไม่มีประสิทธิภาพในการใช้งบประมาณที่ได้รับ

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

ศึกษาพฤติกรรมการงอกของจมูกข้าวกล้องสำหรับพัฒนาระบบเพาะงอกแบบอัตโนมัติประสิทธิภาพสูง Studies on Germination of Brown Rice Germfor the Development of High-Efficiency Automatic Germinating System กฤษฎา พวงสุวรรณ สหพงศ์ สมวงศ์ สันติ ขำตรี	1
การปรับปรุงกระบวนการผลิตลวดแกนกลางของผลิตภัณฑ์สายสวนหลอดเลือดหัวใจด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง Process Improvement of PTCA Guide Wire by Using Design of Experiment อริวัฒน์ สันะธรรม เปรมพร เขมาวุฒม์	12
การประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ไหลออกจากแหล่งจ่ายกำลังดีซี Estimation of Average Current Flowing out from DC Power Supply ณรงค์เดช ดิงกระโทก วิโรจน์ แสงธงทอง	25
การประหยัดพลังงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นด้วยวิธีการหาค่าเหมาะที่สุด Energy Saving for Separately Excited DC Motor via Optimization Method จิรวรรณ หอมจันทร์ กองพล อารีรักษ์ ธิติรัตน์ อารีรักษ์ กองพันธ์ อารีรักษ์	37
การศึกษาถึงพฤติกรรมความร้อนและการถ่ายเทความร้อนในฮีทซิงค์สำหรับชุดโมดูลการทำความเย็นด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกด้วยระเบียบวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ Study on Heat and Flow Behaviors in Heat Sinks for Thermoelectric Cooling Module by CFD ชุติชัย หอมมาลี สงกรานต์ วิริยะศาสตร์ ไพศาล นามผล	48
การเลือกสัญญาณลำดับศูนย์ที่เหมาะสมสำหรับการมอดูเลทความกว้างพัลส์แบบสเปซเวกเตอร์สองเฟสที่ขยายการมอดูเลทเชิงเส้นสำหรับอินเวอร์เตอร์ห้ากึ่งจ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสคู่ Optimal Zero-Sequence Selection for Two-Phase SVPWM with Extended Linear Modulation Range for Five-Leg Inverter supplying Dual Two-Phase Induction Motors วัชรินทร์ พรหมคุณ วิจิตร กิณเรศ Kazuhiro Ohyama นาวิ รุจิตามพ์ ประหยัด กองสุข	61
การกำจัดฮาร์โมนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอคทีฟสำหรับระบบไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายแรงดันบิดเบี้ยว Harmonic Elimination using Active Power Filter for Non-Sinusoidal Voltage Source System ชาคริต ปานแป้น กองพล อารีรักษ์ กองพันธ์ อารีรักษ์	79
การพัฒนาเรือพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อตรวจวัดคุณภาพน้ำ Development of solar powered boats for water quality monitoring ปิยนุช ใจแก้ว สุธิดา ทิพย์รักษ์พันธุ์	91

สารบัญ

บทความวิจัย (ต่อ)

การประเมินคุณภาพน้ำคลองส่งน้ำสายใหญ่ฝั่งขวาในจังหวัดนครนายก Water Quality Assessment of Right Main Canal in Nakhon Nayok Province อรรถพร ประชานุรักษ์ ปรรารถนา ประชานุรักษ์	98
การเปรียบเทียบวิธีการควบคุมวงจรเอสวีซีสำหรับใช้ชดเชยแรงดันไฟฟ้าและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส The Comparison of SVC Control Methods for Voltage Compensation and Power Factor Improvement in Single-Phase Power Systems ภูษิต โภคาเพชรทศพร ณรงค์ฤทธิ์ กองพล อารีรักษ์	110



**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

**ศึกษาพฤติกรรมการงอกของจมูกข้าวกล้องสำหรับพัฒนาระบบเพาะงอก
แบบอัตโนมัติประสิทธิภาพสูง**
**Studies on Germination of Brown Rice Germ for the Development of
High-Efficiency Automatic Germinating System**

กฤษฎา พวงสุวรรณ^{1*} สหพงศ์ สมวงศ์² สันติ ขำตรี³

^{1,2}สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย 1 อ.เมือง จ.สงขลา 90000

³คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช จ.นครศรีธรรมราช 80280

Kritsada Puangsuwan^{1*} Sahapong Somwong² Santi Khamtree³

^{1,2}Department of electrical engineering, Faculty of Engineering,

Rajamangala University of Technology, 1, Muang District, Songkhla, 90000

³Faculty of Industrial Technology, Nakhon Si Thammarat Rajabhat University,

Nakhon Si Thammarat, 80280

*Corresponding author Email: kritsada_enet05@hotmail.com

(Received: October 19, 2018; Accepted: July 24, 2019)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมการงอกของจมูกข้าวกล้องเพื่อพัฒนาต้นแบบระบบเพาะงอกแบบอัตโนมัติให้มีประสิทธิภาพสูงสำหรับทดแทนการเพาะแบบวิสาหกิจชุมชน ระบบนี้ประกอบด้วยชุดผลิตความร้อน ชุดผลิตความชื้น ถาดบรรจุน้ำ ถาดบรรจุข้าวกล้อง และถังกักเก็บน้ำ ส่วนควบคุมระบบการเพาะงอกแบบอัตโนมัติคือ การเติมน้ำ การแช่น้ำ การบ่ม การชะล้าง และสภาวะอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ห้องเพาะ การทดลองเพาะงอกข้าวกล้องหอมมะลิ 105 เทียบเคียงระหว่างต้นแบบระบบเพาะงอกแบบอัตโนมัติและแบบวิสาหกิจชุมชน เพื่อวิเคราะห์สภาวะเพาะงอกที่เหมาะสมต่อเปอร์เซ็นต์การงอกและความยาวของจมูกข้าว ณ ช่วงเวลาเพาะ 24 และ 48 ชั่วโมง นอกจากนี้ พิจารณามิติเชิงเศรษฐศาสตร์ต้นแบบระบบเพาะงอก ผลพบว่าช่วงเวลาเพาะงอก 48 ชั่วโมง สภาวะที่เหมาะสมต่อการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ห้องเพาะ 35.25 ± 0.66 °C และ 53.29 ± 2.40 %RH ตามลำดับ มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อเปอร์เซ็นต์การงอกและความยาวของจมูกข้าวกล้องสูงขึ้น 80 ± 6.76 % และ 0.83 ± 0.041 mm. ตามลำดับ สูงกว่าการเพาะงอกกรณีอื่น นอกจากนี้ การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ต้นแบบระบบเพาะงอก ซึ่งมีกำลังการเพาะงอกต่อปี 540 kg. ระบบใช้ปริมาณไฟฟ้าทั้งสิ้น 16,956 บาทต่อปี มีกำไร 75,600 บาทต่อปี และระยะเวลาคืนทุนประมาณ 8 เดือน 15 วัน จึงเหมาะสมแก่การลงทุน

คำสำคัญ: ข้าวกล้อง ความยาวจมูก การควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์

ABSTRACT

This research studies the germination behavior of brown rice for the development of automatic germination prototype for high efficiency. It can replace the culture of a community enterprise. This system consists of a heat and moisture content generator, water tray, brown rice tray and water tank. The automatic germination control systems included water filling, soaking, curing, leaching and controlling the temperature and relative humidity conditions. The germination of jasmine rice 105 was compared between the automatic germination and the community enterprise system in order to analyze the appropriate germination conditions and germ length at 24 and 48 hr. In addition, it also considers the economic dimension of the germination system. It was found that the germination time of 48 hours had optimum conditions for temperature control and relative humidity control at 35.25 ± 0.66 °C and $53.29 \pm 2.40\%$ RH, respectively. This has a significant effect on germination percentage and the germ length was $80 \pm 6.76\%$ and 0.83 ± 0.041 mm, respectively. They were higher than that of other germination. Moreover, the economic analysis of the germination system found that the germination capacity of brown rice was 540 kg per year. This system provided 16,956 Baht per year and 75,600 Baht per year of the electricity cost and the profit, respectively. Furthermore, the payback period was about 8 month and 15 days' appropriate investments.

Keyword: Brown rice, germination, germ length, temperature and relative humidity control.

1. บทนำ

ข้าวกล้องงอก (Germinated Brown Rice) ถือเป็นนวัตกรรมหนึ่งที่มีกระแสนิยมต่อกลุ่มผู้บริโภคที่รักสุขภาพเป็นอย่างมาก บริเวณจมูกของข้าวกล้องที่เกิดการงอกหลังผ่านกระบวนการเพาะงอกจะมีสารอาหารสำคัญ อาทิ ไยอาหาร กรดไฟติก วิตามินซี วิตามินอี และกรดแกมมาอะมิโนบิวทิริกหรือกาบา (Gamma Amino Butyric Acid; GABA) ช่วยป้องกันโรคต่างๆ เช่น โรคมะเร็ง ลดอาการอัลไซเมอร์ โรคเบาหวาน ช่วยให้ผิวพรรณดี และช่วยควบคุมน้ำหนัก เป็นต้น โดยการบริโภคข้าวกล้องงอกจะมีปริมาณสาร GABA สูงกว่าข้าวกล้องปกติประมาณ 15 เท่า นอกจากนี้ ลักษณะข้าวกล้องงอกที่หุงสุกมีเนื้อสัมผัสที่อ่อนนุ่มและรับประทานได้ง่ายกว่าข้าวธรรมดา [1]-[4]

เกษตรกรมีการรวมตัวก่อตั้งวิสาหกิจชุมชน (Community Enterprise; CE) เพื่อตอบสนองกระแส

นิยมของผู้บริโภคที่รักสุขภาพเพิ่มขึ้นและยังเพิ่มมูลค่าแก่ผลผลิตเชิงการเกษตรอีกช่องทางหนึ่ง [4] ซึ่งกระบวนการเพาะงอกแบบวิสาหกิจชุมชนจะนำเมล็ดข้าวกล้องมาแช่น้ำนาน 4 ชั่วโมง ให้น้ำท่วมเมล็ดข้าวกล้องทุกเมล็ดเพื่อกระตุ้นกระบวนการเจริญเติบโตบริเวณจมูกของข้าวกล้อง หลังผ่านกระบวนการแช่น้ำเสร็จสิ้นจะนำสู่กระบวนการบ่มเมล็ดข้าวกล้องในภาชนะประมาณ 20 หรือ 44 ชั่วโมง การบ่มต้องชะล้างเมล็ดข้าวกล้องด้วยน้ำสะอาดทุกๆ 4 ชั่วโมง ทำเช่นเดิมจนครบช่วงเวลาการบ่มและให้สังเกตการงอกบริเวณจมูกข้าวกล้องที่เหมาะสมประมาณ 0.5 ถึง 1 mm. จะมีปริมาณสาร GABA สูงสุด [1],[5]-[6] แต่เนื่องด้วยกระบวนการเพาะงอกของข้าวกล้องนั้นยังไม่เป็นที่ยอมรับมากนัก เพราะมีกลิ่นอันไม่พึงประสงค์ ไม่เหมาะต่อการนำไปบริโภค ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงเมตาบอลิซึมในระหว่างการงอกของจมูกข้าวกล้อง และการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนบริเวณผิวเมล็ดข้าวกล้อง [7]

โดยมีปัจจัยหลายอย่าง เช่น สายพันธุ์ข้าว น้ำ ความชื้น อุณหภูมิ และออกซิเจน ที่ส่งผลต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอก [1]-[2], [8]-[9] โดยการเพาะงอกแบบวิสาหกิจชุมชนได้รับการควบคุมปัจจัยเหล่านี้ในการเพาะงอกที่เหมาะสม จึงได้มีงานวิจัยที่ศึกษาสภาวะการเพาะงอกที่เหมาะสมต่อสมบัติเชิงเคมีกายภาพ คุณภาพการหุงต้ม และคุณภาพการนำรับประทานของข้าวกล้องหอมมะลิ และข้าวกล้องมันปู [10] และยังมีการเทียบเคียงผลอุณหภูมิ เวลาแช่น้ำและเพาะงอก และหุงต้มที่ส่งผลต่อฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ปริมาณไทอะมิน และสาร GABA ในข้าวหอมลัดและข้าวกล้องงอกสังข์หยดพัทลุง [11] Varayanond และคณะ ได้ตรวจหาสาร GABA ในข้าวหอมไทยพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และปทุมธานี 1 พบว่าเมื่อแช่น้ำ 4 ชั่วโมง ณ อุณหภูมิ 40 °C มีสาร GABA สูงสุดในข้าวปทุมธานี 1 แต่ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 มีต่ำกว่าเล็กน้อย[8] ในปี 2553 Watcharaparpai boon และคณะ ได้ศึกษาหาปริมาณสารอาหารในข้าวกล้องงอกดอกมะลิ 105 และชัยนาท 1 พบว่าสภาวะที่ดีที่สุดสำหรับการเพาะงอกของข้าวกล้องทั้งสองพันธุ์คือ อุณหภูมิ 35 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าการงอกของข้าวกล้องดอกมะลิ 105 มีปริมาณสาร GABA โปรตีนและไขมันสูงที่สุด รองมาคือวิตามิน B1 และกรดโฟติก [2] แต่ปัญหาการเพาะงอกแบบที่กล่าวมาข้างต้นเกษตรกรยังคงเฝ้าเปลี่ยนถ่ายน้ำและชะล้างตลอดกระบวนการเพาะงอก จึงมีนักวิจัยหลายท่านพยายามพัฒนาเครื่องเพาะงอกของข้าวเปลือกและข้าวกล้องที่ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ห้องเพาะได้ แต่ยังมีขาดระบบที่ชะล้างแบบอัตโนมัติและต้นทุนการก่อสร้างระบบเพาะงอกมีราคาสูง [12],[13] ต่อมา มีระบบเพาะงอกสำหรับข้าวกล้องที่สามารถเติมน้ำ การแช่น้ำ การบ่ม และการชะล้างแบบอัตโนมัติ แต่ข้อเสียระบบเพาะงอกนี้ได้รับการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ห้องเพาะที่เหมาะสม ซึ่งอุณหภูมิเพาะงอกช่วง 35 ถึง 40 °C มีค่าเหมาะสมต่อการงอกของจมูกข้าวกล้องที่สุด [5] หากสูงกว่า 50 °C อาจทำให้กระบวนการงอกหยุดทำงานได้ [5], [9] แต่ทั้งนี้

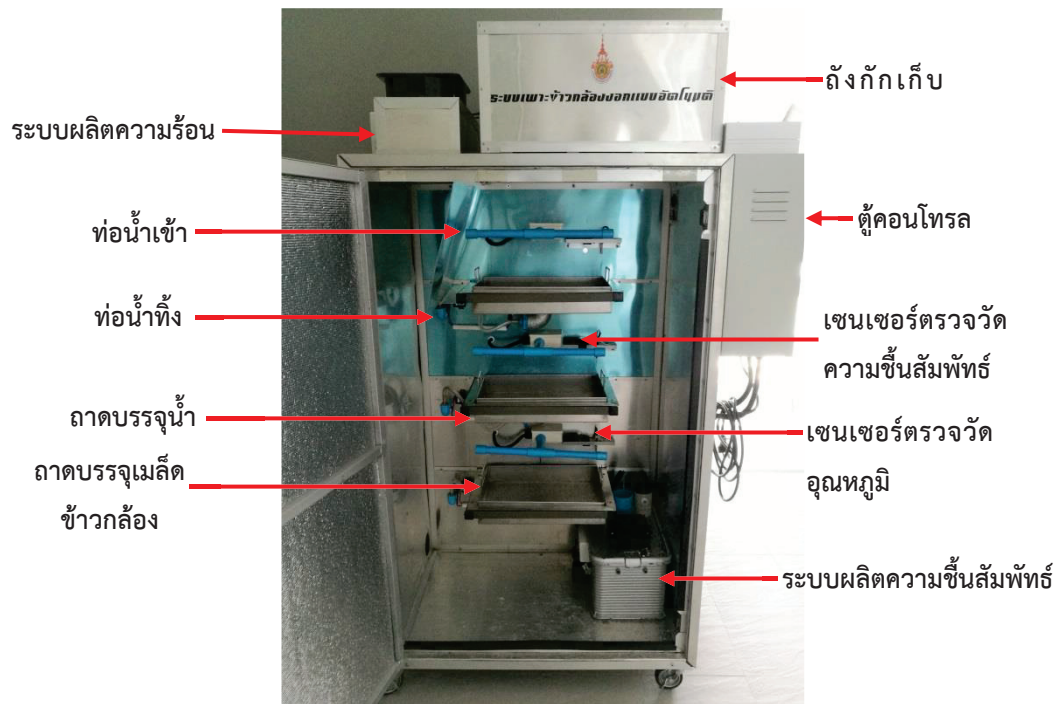
พารามิเตอร์นี้ขึ้นอยู่กับสายพันธุ์และคุณภาพของเมล็ดข้าวกล้องด้วย

จากปัญหาดังกล่าวผู้วิจัยได้เล็งเห็นจึงศึกษาพฤติกรรมการงอกของบริเวณจมูกข้าวกล้องที่ระดับปริมาณข้าวกล้องต่างกัน ณ สภาวะควบคุมการเพาะงอกที่แปรเปลี่ยน เพื่อพัฒนาต้นแบบระบบเพาะงอกแบบอัตโนมัติที่มีการเติมน้ำ การแช่น้ำ การบ่ม และการชะล้าง และควบคุมสภาวะอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ห้องเพาะที่เหมาะสมเทียบเคียงวิธีเพาะงอกแบบวิสาหกิจชุมชน นอกจากนี้ ยังพิจารณาในแง่มิติเชิงเศรษฐศาสตร์ต้นแบบระบบเพาะงอกแบบอัตโนมัติสำหรับตอบสนองวิสาหกิจชุมชน

2. การจัดสร้างและหลักการทำงานของต้นแบบระบบเพาะงอกแบบอัตโนมัติ

งานวิจัยนี้ได้จัดสร้างและทดสอบการทำงานระบบเพาะงอกแบบอัตโนมัติขนาด 50×80×137 cm³. มีการรักษาอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ห้องเพาะจะใช้ฉนวนกันความร้อนกันระหว่างแผ่นอะลูมิเนียมทั้งคู่ของโครงสร้างด้านในและด้านนอก ต้นแบบระบบเพาะงอกภายในมีช่องบรรจุภาชนะ 3 ช่อง ขนาด 30×40 cm². สำหรับวางถาดเพาะเมล็ดข้าวกล้องมีลักษณะเป็นตะแกรงขนาดรูเล็กกว่าเมล็ดข้าวกล้องและด้านล่างจะมีถาดบรรจุน้ำเพื่อรองรับน้ำในการแช่น้ำ การบ่ม และการชะล้างเมล็ดข้าวกล้อง ถาดทั้งคู่สร้างด้วยสแตนเลสหนา 1 mm. ขนาด 32.5×45×6 cm³. นอกจากนี้ มีการติดตั้งถังกักเก็บน้ำไว้บริเวณด้านบนของต้นแบบระบบเพาะงอกและมีการเติมน้ำเข้าถังเก็บในถังแบบอัตโนมัติผ่านการทำงานของวาล์วลูกลอย และการเติมน้ำสู่ระบบเพาะงอกจะมีปั้มน้ำดูดน้ำจากถังกักเก็บน้ำ ดังรูปที่ 1

การควบคุมการทำงานต้นแบบระบบเพาะงอกในกระบวนการเติมน้ำ การแช่น้ำ การบ่ม การชะล้างแบบอัตโนมัติ ผ่านการประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560 จะระบุค่าอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และช่วงเวลาเพาะงอกตามต้องการผู้ใช้งาน ซึ่งมี



รูปที่ 1 ต้นแบบระบบเพาะงอกแบบอัตโนมัติ

ส่วนระบบสำคัญต่างๆ ดังนี้

- ระบบการเติมน้ำ ใช้การควบคุมปริมาณน้ำผ่านโซลินอยด์วาล์ว 12 V_{DC} ในกระบวนการแช่น้ำจะเติมน้ำประปาที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเฉลี่ยประมาณ $6.59 \pm 0.22\text{ pH}$ ให้สูงท่วมข้าวกล้องทุกเมล็ดประมาณ 1 cm . และแช่น้ำทิ้งไว้ 4 ชั่วโมง ในส่วนกระบวนการบ่มจะพรมน้ำทุกๆ 4 ชั่วโมง เป็นเวลา 2 วินาที จนครบช่วงเวลาเพาะงอกที่ระบุไว้
- ระบบถ่ายน้ำ เมื่อกระบวนการแช่เมล็ดข้าวกล้องเสร็จสิ้นจะทำการดูดน้ำด้วยปั๊มน้ำขนาด 36 W , 12 V_{DC} ผ่านท่อน้ำทิ้งออกจากต้นแบบระบบเพาะงอก
- การควบคุมสภาวะอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ห้องเพาะได้มีการติดตั้งเซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิเบอร์ DS18B20 และเซนเซอร์ตรวจวัดความชื้นสัมพัทธ์เบอร์ AM2301 แต่ละชั้นเพาะงอกทั้ง 3 ชั้น เพาะ

● ระบบผลิตความร้อน ใช้ฮีตเตอร์แบบขดลวดขนาด $1,500\text{ W}$, 220 V_{AC} มีการพัดพาอากาศร้อนสู่ห้องเพาะด้วยพัดลมขนาด $20 \times 20 \times 6\text{ cm}^3$. จะเริ่มทำงานเมื่ออุณหภูมิห้องเพาะต่ำกว่าค่าที่ระบุไว้

● ระบบผลิตความชื้นสัมพัทธ์ ใช้ชุดพ่นหมอก 220 V_{AC} อยู่ในกล่องและพัดพาความชื้นเข้าสู่ห้องเพาะงอกผ่านทางท่อระบายเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.08 cm . ด้วยพัดลม 12 V_{DC} ขนาด $12 \times 12 \times 3.80\text{ cm}^3$. สำหรับเพิ่มความความชื้นสัมพัทธ์ห้องเพาะตามเป้าหมาย จะเริ่มทำงานเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ห้องเพาะต่ำกว่าค่าที่ระบุไว้

● ระบบดูดอากาศออกจากต้นแบบระบบเพาะงอก จะทำงานพัดลมดูดเมื่อเซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ห้องเพาะเกินค่าที่ระบุไว้

3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

การทดลองและเก็บข้อมูลการเพาะงอกที่บรรจุแต่ละ ถาดเพาะในปริมาณเมล็ดข้าวกล้อง 3 ระดับคือ 0.5, 0.75 และ 1 kg. ผ่านต้นแบบระบบเพาะงอกแบบอัตโนมัติที่มีการควบคุมสภาวะอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ห้องเพาะ ที่ต่างกัน นอกจากนี้ ยังเทียบเคียงกับการเพาะงอกแบบ วิสาหกิจชุมชน เพื่อวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์การงอกและความ ยาวของงอกข้าวกล้อง และยังพิจารณามิติเชิง เศรษฐศาสตร์ของต้นแบบระบบเพาะงอกที่มีประสิทธิภาพ ที่สุด ซึ่งนำข้อมูลทดลองมาโปรแกรมในชุดประมวลผล เพื่อควบคุมสภาวะอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ห้องเพาะ และช่วงเวลาเพาะงอกที่มีความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ ที่สุด

3.1 การเตรียมตัวอย่างข้าวกล้อง

การทดลองเพาะงอกใช้ตัวอย่างข้าวกล้องหอมมะลิ 105 ซึ่งข้าวสายพันธุ์นี้มีปริมาณสาร GABA ที่สูงกว่าข้าว สายพันธุ์อื่นๆ และเลือกข้าวกล้องที่กะเพาะเปลือกไม่เกิน 2 สัปดาห์ [5], [14] ปัจจุบันราคาข้าวกล้องสายพันธุ์นี้ ประมาณ 35 บาทต่อกิโลกรัม เตรียมตัวอย่างภายใน ต้นแบบระบบเพาะงอกแต่ละครั้งจะบรรจุเมล็ดข้าวกล้อง ในถาดเพาะที่ตวงและชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งแบบดิจิทัล ในปริมาณเท่ากันทั้ง 3 ถาด คือถาดละ 0.5, 0.75 และ 1 kg. ระดับความหนาของชั้นเมล็ดข้าวกล้อง 1, 1.5 และ 2 cm. ตามลำดับ โดยชั้นเมล็ดข้าวกล้องที่แผ่เต็มถาด เพาะไม่ควรหนาเกินไปเพราะอาจทำให้เกิดกลิ่นของการ หมักได้ [5]

3.2 การเพาะผ่านระบบเพาะงอกแบบอัตโนมัติ

กระบวนการเพาะงอกผ่านต้นแบบระบบเพาะงอก แบบอัตโนมัติ เริ่มต้นการควบคุมแบบอัตโนมัติตั้งแต่ กระบวนการเติมน้ำ การแช่น้ำ การบ่ม การชะล้าง และ สภาวะอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ห้องเพาะจนกระทั่ง สิ้นสุดกระบวนการเพาะงอก ซึ่งควบคุมสภาวะ อุณหภูมิห้องเพาะ 2 ระดับคือ 35 และ 40 °C [9], [11], [12], [15]-[16] และความชื้นสัมพัทธ์ห้องเพาะ 45 ถึง 60 %RH แต่ละการควบคุมสภาวะจะแบ่งช่วงเวลาเพาะ

งอก 24 และ 48 ชั่วโมง มีการบันทึกค่าอุณหภูมิและ ความชื้นสัมพัทธ์ห้องเพาะทุกๆ 30 นาที จนครบเวลา เพาะงอกที่ระบุไว้

ต้นแบบระบบเพาะงอกเริ่มทำงานด้วยการควบคุม โซลินอยด์วาล์วนำน้ำจากถังเก็บเติมน้ำเข้าสู่ถาดเพาะ งอกให้สูงท่วมตัวอย่างเมล็ดข้าวกล้องประมาณ 1 cm. และแช่น้ำทิ้งไว้ 4 ชั่วโมง หลังจากนั้น ถ่ายเทน้ำออกจาก ถาดเพาะงอกและเข้าสู่กระบวนการบ่มจะเปิดชุดพรมน้ำ ทุกๆ 4 ชั่วโมง จนครบเวลาบ่ม 20 และ 44 ชั่วโมง (กล่าว ได้ว่า กระบวนการเพาะงอกเวลา 24 ชั่วโมงคือ แช่น้ำ 4 ชั่วโมง และการบ่ม 20 ชั่วโมง ส่วนช่วงเวลาเพาะงอก 48 ชั่วโมงคือ แช่น้ำ 4 ชั่วโมง และการบ่ม 44 ชั่วโมง) จน เสร็จสิ้นกระบวนการ ในการทดลองแต่ละครั้งจะทำซ้ำ 3 ครั้ง สำหรับวิเคราะห์ค่าเฉลี่ย (Mean) และค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน (Standard Deviation; S.D.) เพื่อลดความ ผิดพลาดของข้อมูล

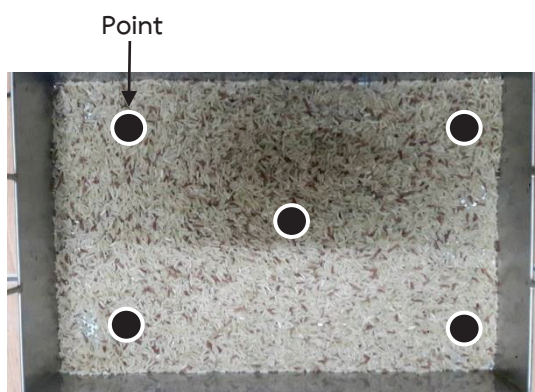
3.3 การเพาะงอกแบบวิสาหกิจชุมชน

การทดลองเพาะงอกแบบวิสาหกิจชุมชนใช้ โครงสร้างของต้นแบบระบบเพาะงอกแบบอัตโนมัติที่ ควบคุมแช่น้ำ การบ่ม และการชะล้างเมล็ดข้าวกล้องตาม ช่วงเวลาเพาะงอกที่กำหนด แต่ไม่ควบคุมสภาวะการ ทำงานอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ห้องเพาะ มีเพียงการ อ่านค่าจากเซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้น สัมพัทธ์และบันทึกข้อมูลไว้ทุกๆ 30 นาที จะทดลองซ้ำ 3 ครั้ง [5]

3.4 ตัวชี้วัดลักษณะเชิงกายภาพการงอกของข้าว กล้อง

หลังเสร็จสิ้นกระบวนการเพาะงอกของข้าวกล้องผ่าน ต้นแบบระบบเพาะงอกแบบอัตโนมัติและแบบวิสาหกิจ ชุมชน โดยสุ่มหยิบเมล็ดข้าวกล้องในถาดเพาะงอก 5 ตำแหน่ง จำนวนตำแหน่งละ 20 เมล็ด และทำเช่นนี้ทุก ถาดเพาะงอกแสดงดังรูปที่ 2 หลังจากนั้น จะพิจารณา จำนวนเมล็ดข้าวกล้องที่เกิดการงอกสมบูรณ์และจำนวน เมล็ดข้าวกล้องที่ไร้คุณภาพ เช่น ไม่มีการงอก เมล็ดหัก และเมล็ดแตก เพื่อวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์การงอก

(Germination percentage; G(%)) ดังสมการที่ (1) ตามวิธีของดวงเดือน และคณะ [15] ในส่วนปริมาณความยาวของงอก (Germ length; Lg) จะสุ่มหยิบเมล็ดข้าวกล้องที่เกิดการงอกสมบูรณ์จำนวน 5 เมล็ด ของแต่ละตำแหน่งที่สุ่มหยิบในถาดเพาะงอก 20 เมล็ด มาวัด Lg ด้วยเครื่องมือเวอร์เนียเรคาลิเปอร์แบบดิจิทัลมีความละเอียด 0.01 mm. (Mitutoyo, 150 mm/6" Absolute Digital Digimatic Vernier Caliper, Japan)



รูปที่ 2 ตำแหน่งสุ่มหยิบเมล็ดข้าวกล้องในถาดเพาะงอก

$$G(\%) = \frac{x}{n} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ x คือ จำนวนข้าวกล้องที่งอกสมบูรณ์ (เมล็ด)

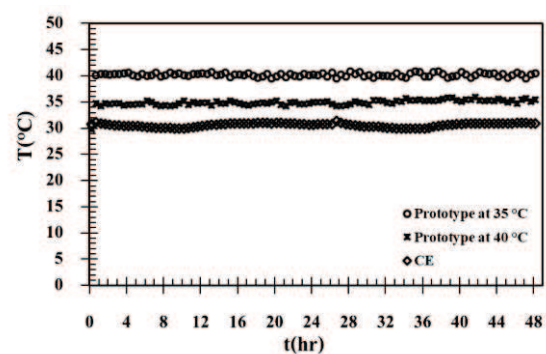
n คือ จำนวนข้าวกล้องที่สุ่มหยิบทั้งหมด (เมล็ด)

4. ผลและวิจารณ์ผล

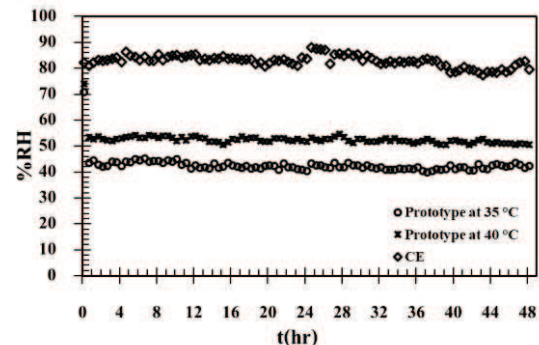
ผลทดลองเพาะงอกของเมล็ดข้าวกล้องผ่านต้นแบบระบบเพาะงอกแบบอัตโนมัติที่ควบคุมสภาวะอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ห้องเพาะเทียบเคียงการเพาะงอกแบบวิสาหกิจชุมชน ณ ช่วงเวลาเพาะงอก 24 และ 48 ชั่วโมง เพื่อศึกษาอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสมต่อ G(%) และให้ปริมาณ Lg ของเมล็ดข้าวกล้องที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

4.1 สภาวะอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ห้องเพาะ

ขณะทดลองเพาะงอกข้าวกล้องด้วยต้นแบบระบบเพาะงอกแบบอัตโนมัติและแบบวิสาหกิจชุมชน ในแต่ละครั้งจะมีการบันทึกสภาวะควบคุมการเพาะงอกทุกๆ 30 นาที ตลอดช่วงเวลาเพาะงอกผ่านเซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในห้องเพาะทั้ง 3 ตำแหน่ง และนำข้อมูลวัดจริงแต่ละตำแหน่งมาเฉลี่ยให้มีเสถียรภาพสูงสุดต่อการควบคุมสภาวะในห้องเพาะแสดงดังรูปที่ 3



(ก)



(ข)

รูปที่ 3 สภาวะควบคุมห้องเพาะ (ก) อุณหภูมิ และ (ข) ความชื้นสัมพัทธ์

รูปที่ 3 แสดงผลการควบคุมสภาวะอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ห้องเพาะขณะมีการเพาะงอกเมล็ดข้าวกล้องในกระบวนการแช่น้ำ การบ่ม และการชะล้างผ่านต้นแบบระบบเพาะงอกแบบอัตโนมัติและการเพาะแบบวิสาหกิจชุมชน ณ ช่วงเวลาเพาะงอกต่างกัน สำหรับต้นแบบระบบเพาะงอกแบบอัตโนมัติเมื่อผู้ใช้ป้อนการควบคุมสภาวะอุณหภูมิห้องเพาะที่ 2 ระดับคือ 35 และ

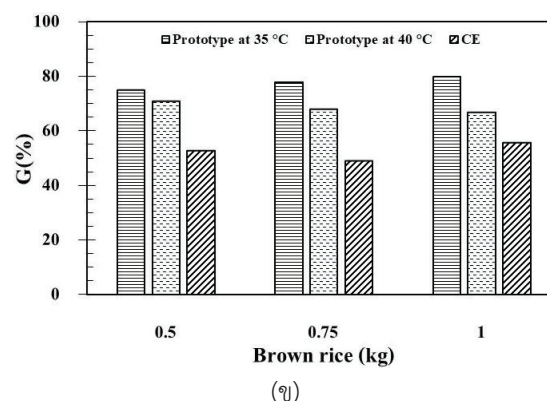
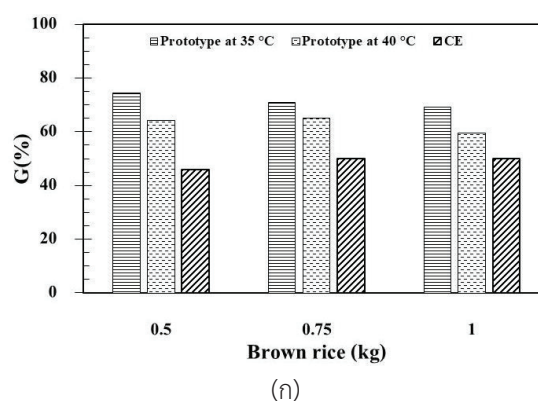
40 °C ที่ช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 45 ถึง 60 %RH สังเกตว่าที่ระดับควบคุมสภาวะอุณหภูมิ 35 °C ซึ่งระบบเพาะงอกสามารถรักษาอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ห้องเพาะ 35.25 ± 0.66 °C และ 53.29 ± 2.40 %RH ตามลำดับ ส่วนระดับการควบคุมสภาวะอุณหภูมิ 40 °C ระบบเพาะงอกสามารถควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ห้องเพาะ 40.47 ± 1.04 °C และ 43.31 ± 3.12 %RH ตามลำดับ ในทางกลับกัน การเพาะงอกแบบวิสาหกิจชุมชนจะไม่สามารถควบคุมสภาวะการเพาะงอกส่งผลให้ข้อมูลการอ่านผ่านตัวตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ห้องเพาะประมาณ 30.95 ± 0.37 °C และ 83.52 ± 2.21 %RH ตามลำดับ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าต้นแบบระบบเพาะงอกแบบอัตโนมัติสามารถควบคุมสภาวะอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ห้องเพาะได้ตามเป้าหมายตลอดช่วงเวลาเพาะงอกมีความแม่นยำและความคลาดเคลื่อนที่ต่ำ

4.2 ผล G(%) ของจมูกข้าวกลิ้ง

การศึกษาค่า G(%) ของจมูกข้าวกลิ้งที่เหมาะสมจะทดลองเพาะงอกในแต่ละสภาพเพาะปริมาณ 0.5, 0.75 และ 1 kg. ความหนาชั้นเมล็ดข้าวกลิ้ง 3 ระดับคือ 1, 1.5 และ 2 cm.ตามลำดับ ผ่านต้นแบบระบบเพาะงอกที่ควบคุมสภาวะห้องเพาะแบบอัตโนมัติเทียบเคียงกับการเพาะแบบวิสาหกิจชุมชน ณ ช่วงเวลาเพาะงอก 24 และ 48 ชั่วโมง ค่า G(%) ของจมูกข้าวกลิ้งเมื่อเปรียบเทียบกับความสมบูรณ์เมล็ดข้าวกลิ้งก่อนเพาะงอกเป็น 100 % โดยปริมาณข้าวกลิ้งเท่ากันหลังเพาะงอกด้วยต้นแบบระบบเพาะงอกแบบอัตโนมัติและการเพาะแบบวิสาหกิจชุมชน ณ ช่วงเวลาเพาะงอกที่ต่างกัน ผลพบว่าการเพาะงอกทั้ง 2 ช่วง ที่ควบคุมสภาวะห้องเพาะ 35 °C และ ให้ค่า G(%) ของจมูกข้าวกลิ้งสูงกว่าการควบคุมสภาวะห้องเพาะ 40 °C และการไม่ควบคุมสภาวะในการเพาะแบบวิสาหกิจชุมชน ตามลำดับ ดังรูปที่ 4

ดังนั้น สรุปได้ว่าตัวแปรสำคัญต่อค่า G(%) ของจมูกข้าวกลิ้งคือ สภาวะอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ห้องเพาะ และช่วงเวลาเพาะงอก ซึ่งต้นแบบระบบเพาะงอก

แบบอัตโนมัติที่จัดสร้างขึ้นเพาะนาน 48 ชั่วโมง ที่ควบคุมสภาวะอุณหภูมิห้องเพาะ 35°C มีค่าเฉลี่ย G(%) ของจมูกข้าวกลิ้งที่สูงขึ้นและสูงสุดที่ปริมาณการเพาะงอก 1 kg. ประมาณ 80 ± 6.76 % กว่ากรณีที่ควบคุมสภาวะการเพาะงอกแบบอื่นๆ ในส่วนการเพาะงอกแบบวิสาหกิจชุมชนจะไม่สามารถควบคุมสภาวะอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ห้องเพาะจึงส่งผลให้การงอกของจมูกข้าวกลิ้งไม่เกิน 60 % และยังส่งผลต่อกลิ่นเหม็นเปรี้ยวอันเนื่องด้วยการปนเปื้อนจากเชื้อจุลินทรีย์และการสะสมของเชื้อรากับข้าวกลิ้งงอกได้ [5], [9], [13]

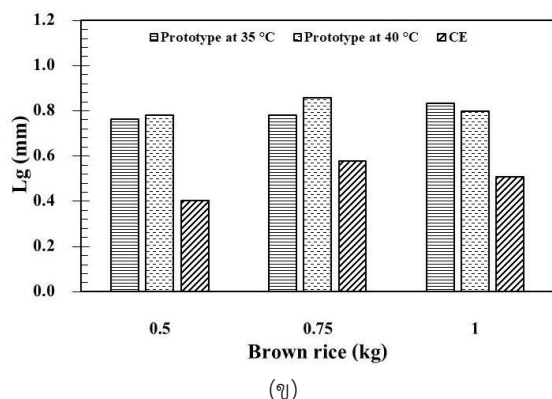
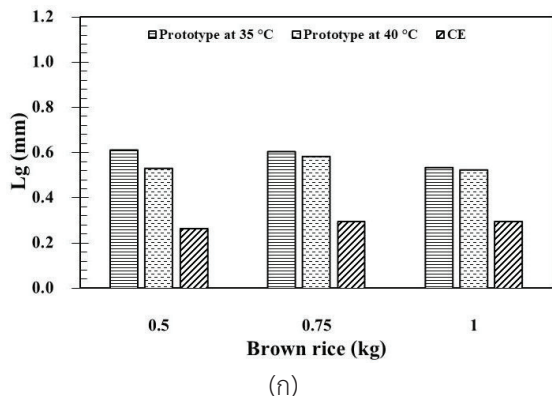


รูปที่ 4 ค่า G(%) ของจมูกข้าวกลิ้งหลังกระบวนการเพาะงอก (ก) 24 ชั่วโมง และ (ข) 48 ชั่วโมง

4.3 ผล Lg ของข้าวกลิ้ง

การพิจารณา Lg ของข้าวกลิ้งหลังผ่านกระบวนการเพาะงอกทั้ง 2 วิธี จะนำเมล็ดข้าวกลิ้งที่เกิดการงอกสมบูรณ์จำนวน 5 เมล็ด ที่สุ่มหยิบแต่ละตำแหน่ง

ในสภาพเพาะงอกและวัด Lg ของข้าวกล้องด้วยเวอร์เนียร์
คาลิเปอร์ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 Lg ของข้าวกล้องหลังเพาะงอกทั้ง 2 วิธี (ก) 24 ชั่วโมง และ (ข) 48 ชั่วโมง

รูปที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบ Lg ของข้าวกล้องหลังเพาะงอกระหว่างต้นแบบระบบเพาะงอกแบบอัตโนมัติกับการเพาะงอกแบบวิสาหกิจชุมชน โดยการเพาะงอกทั้ง 2 วิธี ใช้ปริมาณตัวอย่างข้าวกล้องที่บรรจุในแต่ละถาดเพาะงอกทั้ง 3 ถาดเท่ากัน จะทดสอบแต่ละกรณีในถาดเพาะงอกที่ระดับขึ้นความหนาตัวอย่างข้าวกล้อง 3 ระดับ ณ ช่วงเวลาเพาะงอก 24 และ 48 ชั่วโมง ผลพบว่าทั้ง 2 ช่วงเวลาเพาะงอก ณ ระดับขึ้นความหนาของเมล็ดข้าวกล้องที่ต่างกัน หลังการเพาะงอกผ่านต้นแบบระบบเพาะงอกแบบอัตโนมัติในช่วงเวลาเพาะงอก 24 ชั่วโมง ที่ควบคุมสภาวะอุณหภูมิห้องเพาะ 35 °C และ 40 °C จะไม่ส่งผลต่อปริมาณ Lg ของข้าวกล้องมีค่าเฉลี่ยประมาณ

0.58±0.042 mm. และ 0.55±0.032 mm. ตามลำดับ ในส่วนช่วงเวลาเพาะงอก 48 ชั่วโมง มีปริมาณ Lg ของข้าวกล้องเฉลี่ยประมาณ 0.79±0.036 mm. และ 0.81±0.041 mm. ตามลำดับ อาจกล่าวได้ว่า ต้นแบบระบบเพาะงอกแบบอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้นนั้นมีกระบวนการชะล้างและการพรมน้ำในลักษณะของสเปรย์ทั่วถึงทุกเมล็ดข้าวกล้องและควบคุมสภาวะห้องเพาะที่เหมาะสมนั่นเอง ซึ่งเมล็ดข้าวกล้องเมื่ออยู่ในสภาวะช่วงการเจริญเติบโตจะมีการเปลี่ยนแปลงเชิงชีวเคมีและสารอาหารที่อยู่ภายในเมล็ดข้าวกล้อง จะเริ่มเปลี่ยนแปลงเมื่อน้ำได้แทรกซึมผ่านรูพรุนเข้าไปในเนื้อเมล็ดข้าวกล้องและไปกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ เมื่อเมล็ดข้าวกล้องเริ่มเกิดการงอกบริเวณจมูกข้าวกล้องทำให้ปริมาณสารอาหารที่ถูกกักเก็บภายในเนื้อเมล็ดข้าวกล้องจะถูกย่อยสลายตามกระบวนการเชิงชีวเคมีเกิดเป็นสารประเภทน้ำตาลรีดิวซ์ (Reducing sugar) และคาร์โบไฮเดรตที่มีโมเลกุลเล็กลงหรือโอลิโกแซคคาไรด์ (Oligosaccharide) ซึ่งสารนี้จะทำหน้าที่เป็นสารพรีไบโอติก (Prebiotic) ช่วยในการย่อยอาหารและดูดซึมอาหาร นอกจากนี้ โปรตีนในเมล็ดข้าวกล้องจะถูกย่อยให้เกิดเป็นไบโพไทด์และกรดอะมิโน รวมถึงยังสะสมสาระสำคัญต่างๆ เช่น สาร GABA แกมมาออริซานอล และสารเคมีอื่นๆ [1], [5], [9], [11]

4.4 ผลมิติเชิงเศรษฐศาสตร์ของระบบเพาะงอกแบบอัตโนมัติ

การลงทุนของต้นแบบระบบเพาะงอกแบบอัตโนมัติต้องอาศัยการวิเคราะห์มิติเชิงเศรษฐศาสตร์ในการศึกษาความน่าสนใจว่ามีความคุ้มค่าหรือเหมาะสมที่จะลงทุนเชิงธุรกิจในอนาคต ซึ่งดัชนีที่สามารถบ่งชี้ว่าต้นแบบระบบเพาะงอกนั้นมีความน่าสนใจเพียงใดคือ ผลตอบแทน และระยะเวลาคืน จากผลเพาะงอกปริมาณข้าวกล้องถาดละ 1 kg. จำนวน 3 ถาด มีค่า G(%) ที่สูงและ Lg ของข้าวกล้องเมื่อผ่านต้นแบบระบบเพาะงอกที่ควบคุมห้องเพาะในสภาวะอุณหภูมิ 35.25±0.66 °C และความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 53.29±2.40 %RH ณ ช่วงเวลาเพาะงอก 48 ชั่วโมง (2 วันต่อการเพาะงอก) สามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

- กำหนดอายุการใช้งานของต้นแบบระบบเพาะ
งอก 10 ปี
- กำหนดอัตราดอกเบี้ยตลอดอายุการใช้งาน
9.75% [ธนาคารกรุงเทพ จำกัด (มหาชน)]
- เงินลงทุนในการสร้างต้นแบบระบบเพาะงอก
17,400 บาท
- มูลค่าซาก 10% ของเงินทุนในการสร้างต้นแบบ
ระบบเพาะงอกเท่ากับ 1,740 บาท
- ค่าบำรุงรักษารายปี 5% ของเงินทุนในการสร้าง
ต้นแบบระบบเพาะงอก 870 บาท
- ค่าต้นทุนข้าวกล้อง 3 kg. ต่อครั้งการเพาะงอก
(ข้าวกล้อง 1 kg. เป็นเงิน 35 บาท/kg.) ใช้ข้าวกล้อง
ทั้งหมด 540 kg./ปี เป็นเงิน 18,900 บาท
- ราคาผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องงอกสูงกว่าข้าวกล้อง
5 เท่า คิดเป็นเงิน 175 บาท/kg.
- ต้นแบบระบบเพาะงอกใช้กำลังไฟฟ้า
1,254 วัตต์ หรือ 1.254 หน่วย ค่าไฟฟ้าหน่วยละ
2.348 บาท [17] คิดค่าไฟฟ้าทั้งสิ้น 16,956 บาทต่อปี
จากเงินลงทุนสามารถคิดเป็นเงินลงทุนรายปีได้ดังนี้
[18],[19]

$$\begin{aligned}\text{เงินลงทุนรายปี} &= 17,400 \text{ CRF } (9.75\%, 10) \\ &= 17,400(i(1+i)^n)/((1+i)^n-1) \\ &= 17,400(0.0975(1+0.0975)^{10})/((1+0.0975)^{10}-1) \\ &= 2,801.429 \text{ บาทต่อปี}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{มูลค่าซากรายปี} &= 1,740 \text{ SFF } (9.75\%, 10) \\ &= 1,740(i/((1+i)^n-1)) \\ &= 1,740(0.0975/(1+0.0975)^{10}-1) \\ &= 110.492 \text{ บาทต่อปี}\end{aligned}$$

$$\text{ค่าบำรุงรักษา} = 17,400 \times 0.05 = 870 \text{ บาทต่อปี}$$

รวมเงินลงทุนรายปี = (เงินลงทุนในการสร้างต้นแบบ
ระบบเพาะงอก + เงินลงทุนในการดูแลรักษารายปี + ค่า
ต้นทุนข้าวกล้องรายปี + ค่าไฟฟ้ายรายปี) - (มูลค่าซากราย

$$\begin{aligned}\text{ปี}) &= 2,801.429 + 870 + 18,900 + 16,956 - 110.492 \\ &= 39,416.940 \text{ บาท}\end{aligned}$$

เมื่อพิจารณาการเพาะงอกผ่านต้นแบบระบบเพาะ
งอกแบบอัตโนมัติมาใช้ในการวิเคราะห์หารายได้ที่เพิ่มขึ้น
คือ ณ ช่วงเวลาเพาะงอก 48 ชั่วโมง (2 วันต่อการเพาะ
งอก) ได้ 3 kg. เมื่อหักต้นทุนการผลิตที่เป็นค่าวัตถุดิบ ค่า
ไฟฟ้าตลอดกระบวนการเพาะงอกข้าวกล้องแล้วกำไร
กิโลกรัมละ (175-35) = 140 บาท จะได้ผลตอบแทนจาก
การใช้ต้นแบบระบบเพาะงอกแบบอัตโนมัติต่อปีมีค่า
(140 × 540) = 75,600 บาท จากมูลค่าเงินลงทุนรายปี
39,416.940 บาท ดังนั้นจุดคุ้มทุนจากการใช้ต้นแบบ
ระบบเพาะงอกมีค่า 0.71 ปี หรือประมาณ 8 เดือน
15 วัน อย่างไรก็ตาม สรุปได้ว่าต้นแบบระบบเพาะงอก
แบบอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปใช้งานได้จริงและ
คุ้มค่าต่อการลงทุนในอนาคต นอกจากนี้ ยังสามารถช่วย
ลดค่าจ้างแรงงานเกษตรกรที่เฝ้าคอยเปลี่ยนถาดน้ำตลอด
กระบวนการเพาะงอกแบบวิสาหกิจชุมชนได้อีกด้วย

5. สรุป

งานวิจัยฉบับนี้ศึกษาพฤติกรรมการงอกของจมูกข้าว
กล้องนำไปพัฒนาต้นแบบระบบเพาะงอกแบบอัตโนมัติให้
มีประสิทธิภาพสูงเพื่อตอบสนองต่อภาควิสาหกิจชุมชน
จะควบคุมการทำงานแบบอัตโนมัติคือ การเติมน้ำ การแช่
น้ำ การบ่ม การชะล้าง และสภาวะอุณหภูมิและความชื้น
สัมพัทธ์ห้องเพาะ โดยทดลองใช้ข้าวกล้องหอมมะลิ 105
ปริมาณ 3 ระดับคือ 0.5, 0.75 และ 1 kg. ต่อถาดเพาะ
มาวิเคราะห์สภาวะการเพาะงอกที่เหมาะสมต่อ G(%)
และ Lg ของข้าวกล้องที่ช่วงเวลาเพาะงอก 24 และ 48
ชั่วโมง นอกจากนี้ ศึกษาในแง่มิติเชิงเศรษฐศาสตร์ของ
ต้นแบบระบบเพาะงอก

ผลลัพธ์พบว่าช่วงเวลาเพาะงอกที่นานขึ้นส่งผลอย่าง
มีนัยสำคัญต่อ G(%) และ Lg ของข้าวกล้องที่สูงขึ้น
ระบบเพาะงอกนี้สามารถควบคุมสภาวะอุณหภูมิและ
ความชื้นสัมพัทธ์ห้องเพาะที่เหมาะสม 35.25±0.66 °C
และ 53.29±2.40 %RH ตามลำดับ ณ ช่วงเวลาเพาะงอก

48 ข้าวโม่ มี G(%) และ Lg ของข้าวกล้องที่สูงที่สุด เทียบเคียงกับการเพาะงอกแบบกรณีอื่นๆ นอกจากนี้ ยังไม่มีกลิ่นเหม็นเปรี้ยวและไม่มีการสะสมของเชื้อรา ในส่วน มิติเชิงเศรษฐศาสตร์ต้นแบบระบบเพาะงอกแบบอัตโนมัติ ราคา 17,400 บาท เมื่อหักต้นทุนการผลิตที่เป็นค่า วัสดุดิบ ค่าไฟฟ้าตลอดกระบวนการเพาะงอกข้าวกล้อง แล้วกำไร 140 บาทต่อกิโลกรัม หรือ 75,600 บาทต่อปี จากมูลค่าเงินลงทุนรายปี 39,416.940 บาท และ จุดคุ้มทุนจากการใช้ต้นแบบระบบเพาะงอกประมาณ 8 เดือน 15 วัน จึงเหมาะสมแก่การลงทุนและยกระดับ กระบวนการผลิตข้าวกล้องงอก

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณทุนสนับสนุนข้อเสนอโครงการงาน สิ่งประดิษฐ์คิดค้นและนวัตกรรมระดับอุดมศึกษา 2561 ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย และ ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชมงคลศรีวิชัย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Komatsuzaki, K. Tsukahara, H. Toyoshima, T. Suzuki, N. Shimizu and T. Kimura, "Effect of soaking and gaseous phase sprout processing on the GABA content of pre-germinated brown rice," The American Society of Agricultural and Biological Engineer. Paper number: 036073.
- [2] W. Watcharaparpai boon, N. Laohakunjit and O. Kerdchocheun, "An Improved process for high quality and nutrition of brown rice production," Food Sci. Technol. Int., vol. 16, no. 147, pp. 147–158, 2010.
- [3] J.S. Ngyuen and B. Ooraikul, "The physico-chemical, eating and sensorial properties of germinated brown rice," Int. J. Food Agric. Environ, vol. 6, no. 2, pp. 119–124, 2008.
- [4] I. Shoichi, "Marketing of value-added rice product in Japan: germinated brown rice and bread," in *FAO Rice Conf.*, Italy: Rome, And Agriculture 50, 2004, pp. 889–892.
- [5] S. Parnsakhorn and J. Lungapin, "The easy to make germinated brown rice and its benefit," 1st ed, Triple Group Co, Ltd., Institute of research and development, RUMTT, Pathum Thani. Thailand, 2013.
- [6] National Bureau of Agricultural Commodity and Food Standards, "Good manufacturing for germinated brown rice," Ministry of Agriculture and Cooperatives, Bangkok, Thailand, Sep. 2012.
- [7] K. Ohtsubo, K. Suzuki, Y. Yasui and T. Kasumi, "Bio-functional components in the processed pre-germinated brown rice by a twin-screw extruder," J. Food Compos. Anal. vol. 18, pp. 303-316, 2005.
- [8] W. Varanyanond, P. Tungtrakul, V. Surojanametakul, L. Watansiritham and W. Luxiang, "Effect of water soaking on gamma aminobutyric acid (GABA) in germ of different Thai rice varieties," Kasetsart J. (Natural Science). vol. 39, pp. 411-415, 2005.
- [9] D. Wattanachaiyingcharoen, "Seed technology in agronomy," Dept. Agric. Sci., Faculty of Agriculture Natural Resources and Environment, Naresuan Univ., Phitsanulok, 1991.
- [10] W. Rittidech, "Effects of germination on physicochemical properties, cooking and eating qualities of brown rice and red

- rice,” M.S. thesis, Dept. Agroindustry, Naresuan Univ., Phitsanulok, 1993.
- [11] U. Wattanakul, W. Wattanakul and C. Sujarit, “Effects of temperature soaking, germination and cooking to thiamine GABA, antioxidants in sungyod malts and parboiled germinated brown rice,” Faculty of Science and Fisheries Technology, RMUTSV, Trang, Aug. 2013.
- [12] C. Thongwanchai and A. Takkatong, “The design and construction equipment for producing high GABA germinated paddy,” M.S. thesis, Chem. Eng., Khon Kaen Univ., Khon Kaen, 2011.
- [13] C. Tongwanchai, A. Artnaseaw and T. Kumsaen, “Producing apparatus of germinated paddy rice,” in *ME-NETT23*, Chiang Mai., 2011
- [14] P. Tungtrakul, “Utilization of rice germ and germinated brown rice for health food products,” Kasetsart Univ. Res. Dev., Bangkok, 2017.
- [15] D. Koonyodying, S. Elliott and P. Wangpakapattanawong, “Seed germination treatments of some rare tree species for forest restoration in Northern Thailand,” *KKU Res. J.*, vol. 15, no. 10, pp. 951-964, 2010.
- [16] SB. Patil, and MK. Khan, “Germinated brown rice as a value added rice product,” *J. Food Sci. Technol.*, vol. 48, no. 6, pp. 661-667, 2011.
- [17] Metropolitan Electricity Authority (2018, Dec. 6). Normal tariff with consumption [Online]. Available:
<http://www.mea.or.th/profile/109/111>
- [18] S. Piriawat, “Transportation Engineering,” in *chapter 6 Engineering Economics*, Dept. Civil Engineering, Faculty of Eng., Burapha Univ., Chonburi, pp. 245-247, 2008.
- [19] N. Niyomwan, “Application of Japanese mulberry paper production,” Documents for the seminar "Project mulberry paper development, Thip Chang Hotel, Lampang, June 1993

การปรับปรุงกระบวนการผลิตลวดแกนกลางของผลิตภัณฑ์สายสวนหลอดเลือดหัวใจ

ด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง

Process Improvement of PTCA Guide Wire by Using Design of Experiment

อริวัฒน์ ลีณะธรรม^{1*} เปรมพร เขมาวุฒ²

¹สาขาวิศวกรรมการจัดการและโลจิสติกส์ วิทยาลัยนวัตกรรมการเทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย
ธุรกิจบัณฑิต กรุงเทพมหานคร 10210

²ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
กรุงเทพมหานคร 10800

Athiwat Leenatham^{1*} Premporn Khemavuk²

¹Management and Logistics Engineering Major, College of Innovative Technology and Engineering,
Dhurakij Pundit University, Bangkok, 10210

²Industrial Engineering Department, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of
Technology North Bangkok, Bangkok, 10800

*Corresponding author Email: athiwat.lnt@gmail.com

(Received: October 19, 2018; Accepted: January 20, 2019)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดของเสียในกระบวนการผลิตสายสวนหลอดเลือดหัวใจ (PTCA Guide Wire) ที่เกิดจากกระบวนการขัดโดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองด้วยวิธีแฟคทอเรียลแบบ 2^k ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 เพื่อหาปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องขัดที่ทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางหลังการขัดมีค่าตามที่แผนกควบคุมคุณภาพกำหนดไว้คือ $0.061^{+0.004}_{-0.003}$ มิลลิเมตร ซึ่งมีตัวแปรต้นเป็นปัจจัยควบคุมได้ทั้งหมด 3 ปัจจัย ได้แก่ ความดัน มุม และกระดาษทราย แต่ละปัจจัยแบ่งออกเป็น 2 ระดับ ทำการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง ผลการวิจัยพบว่า ปัจจัยทั้ง 3 และปัจจัยร่วมทั้งหมดมีผลต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง ระดับปัจจัยที่เหมาะสมต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง คือ ความดัน 6.50 บาร์ มุมในการขัด 10.0667 องศา และกระดาษทราย Extra-fine ผู้วิจัยยืนยันผลการทดลองด้วยการทดสอบ T-test กับเส้นลวดที่ถูกขัดภายใต้ปัจจัยดังกล่าวจำนวน 20 เส้น โดยตั้งสมมติฐานว่ากลุ่มตัวอย่างเส้นลวดมีขนาดเท่ากับ 0.061 หรือไม่ ผลคือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีค่า 0.061 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 เมื่อนำค่าระดับปัจจัยที่ได้มากำหนดเป็นค่ามาตรฐานและใช้ในการผลิตจริง พบว่าของเสียก่อนวิจัย 108 ชิ้น ของเสียหลังวิจัย 13 ชิ้น คิดเป็นของเสียลดลงร้อยละ 87.96

คำสำคัญ: สายสวนหลอดเลือดหัวใจ การออกแบบการทดลอง แฟคทอเรียลแบบ 2^k

ABSTRACT

The purpose of this research was to reduce defects from grinding process of PTCA Guide Wire production by using 2^k factorial design of experiment method as 0.05 significant level for determine the optimal parameters that effect to diameter size $0.061^{+0.004}_{-0.003}$ mm after grinding is defined by QC department. The controllable variables of grinding machine are pressure angle and sand paper. 2^k Factorial was practiced in this research with 5 replicates. The result shows that factor affecting on diameter are all of main factors and interaction factors. The optimal levels of factor are pressure 6.50 angle 10.07 and Extra-fine. Twenty additional samples of PTCA guide wire were collected after all factors were established and it were tested by using T-test, the hypothesis is samples are equal to 0.061 or not. The result shows that these samples are equal to 0.061 at 0.05 significant level. All Factors are implemented to currently production, the defect was collect from the same initial period of this research. The result shows that the defect before and after are 108 and 13 or reducing 87.96% respectively.

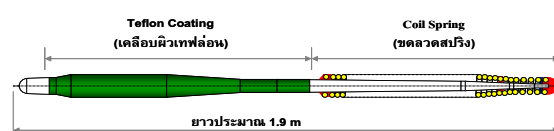
Keyword: ptca guide wire, design of experiment, 2^k factorial.

1. บทนำ

สายสวนหลอดเลือดหัวใจ (PTCA Guide Wire) เป็นเส้นลวดที่ถูกนำมาใช้สวนหัวใจเพื่อรักษาอาการโรคหัวใจ แบ่งเป็น การสวนหัวใจเพื่อเปิดทางติดต่อระหว่างหัวใจห้องบน การขยายรอยตีบ การปิดรูรั่ว [1] จากสถิติของศูนย์โรคหัวใจสมเด็จพระบรมราชินีนาถ โรงพยาบาลศิริราชพบว่า ผู้ป่วยที่มารักษาโรคหลอดเลือดหัวใจตีบมีการสวนหัวใจทางหลอดเลือดแดงเพื่อทำการวินิจฉัยและรักษาโดยการขยายหลอดเลือดเฉลี่ยมากกว่า 2,586 รายต่อปี (จากสถิติ ตั้งแต่ ม.ค 2556 - ธ.ค. 2558) [2]

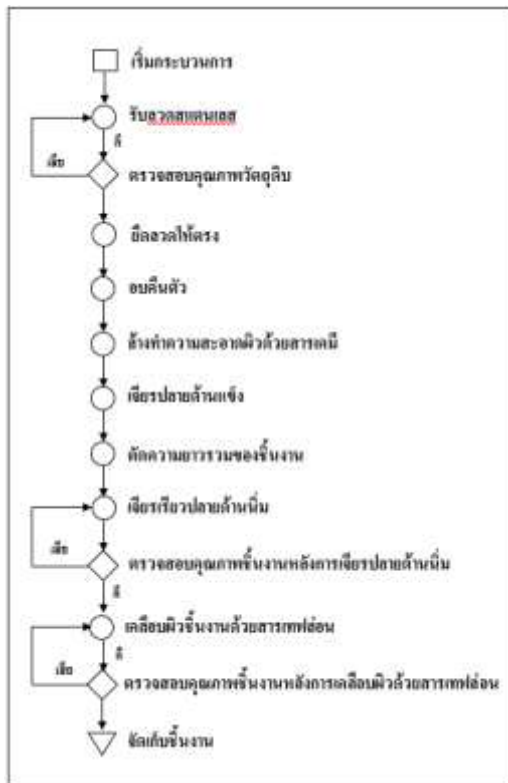
บริษัท ทรินิตี้ จำกัด ดำเนินธุรกิจการผลิตสินค้าที่เกี่ยวข้องกับลวดสแตนเลสสำหรับอุปกรณ์การแพทย์ โดยมีสินค้าหลักคือ ผลิตภัณฑ์เครื่องมือแพทย์ชนิดสายสวนหลอดเลือดหัวใจ ได้แก่ สายสวนหลอดเลือดหัวใจ ท่อสำหรับฉีดสีเอ็กซเรย์ บอลลูนขยายหลอดเลือด เป็นต้น ผลิตภัณฑ์เครื่องมือแพทย์ของบริษัทที่ได้รับการยอมรับและมีแนวโน้มความต้องการของลูกค้าเพิ่มมากขึ้นคือ สายสวนหลอดเลือดหัวใจ ซึ่งประกอบด้วยชิ้นส่วนหลัก 2 ส่วน

คือ ส่วนที่เคลือบผิวด้วยเทฟลอนและขดลวดสปริง ดังรูปที่ 1 จากบริษัท ทรินิตี้ จำกัด



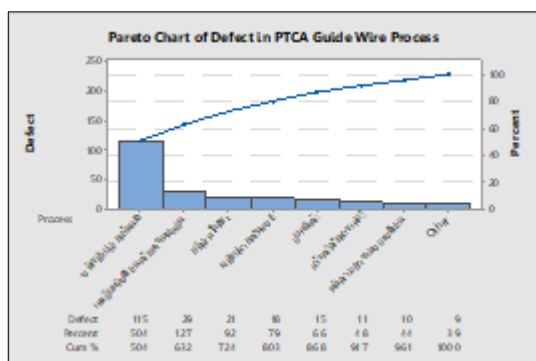
รูปที่ 1 ลักษณะผลิตภัณฑ์สายสวนหลอดเลือดหัวใจ

การเก็บข้อมูลย้อนหลัง 4 เดือนตั้งแต่มีนาคม-มิถุนายน 2561 จากขั้นตอนของกระบวนการผลิตลวดแกนกลางดังรูปที่ 2 พบของเสียแต่ละกระบวนการแสดงเป็นแผนภาพพาเรโตดังรูปที่ 3 จากหลักการของพาเรโตที่ใช้เพื่อหาปัญหาหลัก [3] พบว่ากระบวนการขัดเรียบปลายด้านนิ่มหรือกระบวนการขัดที่ถูกตรวจสอบโดยฝ่ายควบคุมคุณภาพ มีของเสียมากที่สุดถึง 115 ชิ้น คิดเป็นร้อยละ 50.4 ของปริมาณของเสียทั้งหมด บริเวณที่ขัดคือส่วนปลายของลวดแกนกลางหรือส่วนปลายของขดลวดสปริงจากรูปที่ 1

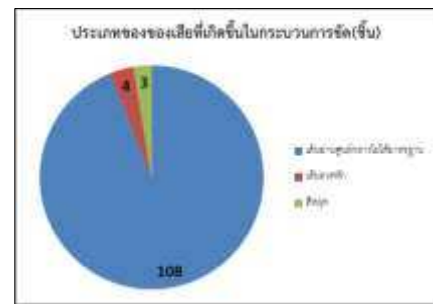


รูปที่ 2 กระบวนการผลิตลวดแกนกลาง

จากข้อมูลดังกล่าวผู้วิจัยจึงได้แจกแจงประเภทของของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตโดยใช้แผนภาพวงกลมแสดงปัญหาที่เกิดขึ้นดังรูปที่ 4 พบว่า ประเภทของของเสียที่เกิดขึ้นมากที่สุดคือ เส้นผ่านศูนย์กลางไม่ได้มาตรฐาน จำนวน 108 ชิ้น หรือร้อยละ 93.91 จากของเสียที่เกิดขึ้นทั้งหมด 3 ประเภท



รูปที่ 3 แผนภาพพาเรโตของเสียจากกระบวนการผลิตสายสวนหลอดเลือดหัวใจ



รูปที่ 4 แผนภาพวงกลมแสดงประเภทของของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต

จากข้อมูลข้างต้นผู้วิจัยจึงเลือกที่จะปรับปรุงกระบวนการผลิตจากปัญหาหลักที่เกิดขึ้นคือ เส้นผ่านศูนย์กลางไม่ได้มาตรฐาน

2. ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

การออกแบบการทดลอง เป็นวิธีการทางสถิติที่มีวัตถุประสงค์เพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อตัวแปรผลลัพธ์ของระบบ [4] เป็นเครื่องมือสำหรับการปรับปรุงกระบวนการที่สำคัญอย่างยิ่งในอุตสาหกรรม ซึ่งผู้วิจัยจะต้องกำหนด [5] ปัจจัย ตัวแปรตอบสนอง ระดับปัจจัย แผนการทดลอง และจำนวนครั้งที่ทดลองให้เหมาะสมกับปัญหา เพื่อให้ผลการทดลองมีความน่าเชื่อถือ การประยุกต์ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองตั้งแต่ในช่วงแรกของการออกแบบและพัฒนากระบวนการจะมีข้อดีคือ ช่วยปรับปรุงกระบวนการ ช่วยลดความผันแปรและทำให้ได้ค่าผลลัพธ์ตามที่กำหนด ช่วยลดเวลาและต้นทุนรวมในการพัฒนากระบวนการ [4]

มีงานวิจัยที่ทำการหาปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมที่แตกต่างกัน ไม่ว่าจะเป็นด้านการก่อสร้าง [6] ทำการศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมของปัจจัยที่ใช้ในกระบวนการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ เพื่อทำให้คอนกรีตที่ผลิตมีการรับแรงอัดตามมาตรฐานที่กำหนดด้วยการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลซึ่งประกอบด้วย 4 ปัจจัยหลักทดลองซ้ำทั้งหมด 6 ครั้ง หลังจากนั้นในปีเดียวกันก็ได้นำมาใช้ด้านการผลิตพลาสติก [7] หาปัจจัยที่เหมาะสมในการขึ้นรูป

ด้วยระบบสุญญากาศสำหรับพลาสติกชนิดโพลีไวนิลคลอไรด์ เพื่อลดของเสียที่เกิดจากปัญหาชิ้นงานมีความหนาไม่สม่ำเสมอ โดยมีปัจจัยได้แก่ อุณหภูมิในการให้ความร้อน ระยะเวลาในการให้ความร้อน ระยะเวลาในการสุญญากาศ ระยะเวลาในการให้ลมเป่า และระยะเวลาในการให้ลมเย็น โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^5 ทำการทดลองซ้ำ 1 ครั้ง ผลการทดลองคือทำให้ความหนาที่ได้ตรงตามคุณภาพที่กำหนด อีกทั้งยังนำมาใช้ในอุตสาหกรรมประเภทอื่นๆด้วย เช่น อุตสาหกรรมอาหาร [8] ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการทำแห้งแป้งบุกทดลองด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิดไชด์เบด ปัจจัยที่ศึกษาประกอบด้วย อุณหภูมิอากาศร้อน เซลเซียส ระยะเวลาในการอบแห้ง และความเร็วอากาศร้อน อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ [9] ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อปัญหาฟิล์มลอกในการเคลือบผิวฟิล์มบางแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ พบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดฟิล์มลอก ได้แก่ อุณหภูมิชิ้นงาน อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับแรงดัน และอัตราการไหลของก๊าซ ปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิ ส่วนต่างๆของตะไคร้ ขนาดของตะไคร้ พบว่าตัวแปรที่มีผลกระทบต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหย คือ ส่วนของตะไคร้และขนาดของตะไคร้ที่ได้จากการสับ อีกทั้งยังนำมาใช้กับอุตสาหกรรมเครื่องทำความเย็น [11] หาปัจจัยที่เหมาะสมในการปรับปรุงค่าการทำความเย็นของคอมเพรสเซอร์ ปัจจัยที่ควบคุมได้มีทั้งหมด 4 ปัจจัยที่เกี่ยวข้อง คือ ความหนาของแผ่นวาล์ว ปริมาตรของห้องพักสารทำความเย็น ขนาดทางไหลของสารทำความเย็นด้านอัด และความหนาของวาล์วด้านดูด ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลแบบ 2 ระดับ ผลการวิจัยทำให้ได้ค่าการทำความเย็นเพิ่มขึ้นจากเดิม 1,220 วัตต์ เป็น 1,360 วัตต์ ซึ่งเป็นค่าทำความเย็นที่สามารถแข่งขันกับคอมเพรสเซอร์ของคู่แข่งได้ อีกทั้งยังนำมาประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมเหล็กกล้าและอุตสาหกรรมย้อมสี ได้แก่ [12] ปรับปรุงกระบวนการทางความเย็นที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลและ

ปริมาณของโครเมียมคาร์ไบด์ในเหล็กกล้าเครื่องมือเกรด JIS SKD11 เพื่อส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นแต่ค่าการดูดซับแรงกระแทกลดลงและ [13] หาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยนำเข้าของกระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอยเพื่อเพิ่มผลผลิตภาพของสีย้อมผ้าประเภทติดตายผลการวิจัยพบว่าหัวฉีดขนาด 2.5 มม. อุณหภูมิของอากาศร้อน 110 องศาเซลเซียส ทำให้ค่าผลผลิตภาพเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก 19.74 เปอร์เซ็นต์เป็น 28.77 เปอร์เซ็นต์

จากการทบทวนวรรณกรรมมีงานวิจัยบางส่วนที่นำวิธีเชิงแฟคทอเรียลไปใช้ในอุตสาหกรรมการแพทย์ เช่น [14] นำมาใช้ศึกษาลักษณะของอัตราการปลดปล่อยอนุภาคขนาดเล็กสำหรับกระบวนการเลเซอร์ทางการแพทย์ด้วยวิธีแฟคทอเรียลแบบ 2^3 เหมือนกับ [15] นำมาใช้หาปัจจัยความเข้ากันได้ของอุปกรณ์การแพทย์ที่ผลิตจากโพลีไวนิลคลอไรด์ (PVC) และวัสดุโพลีเมอร์อื่นๆ ที่ถูกกัดด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์ (RIE) และพลาสมา และยังมี [16] ที่นำไปใช้เพื่อศึกษาปัจจัยของปฏิกิริยาระหว่างผู้ให้บริการและผู้ป่วยที่มีอาการโรคกรดไหลย้อนด้วยวิธีแฟคทอเรียลแบบ 2^2 ต่างกับ [17] และ [18] เนื่องจากมีเพียง 2 ปัจจัย มีงานวิจัยเป็นส่วนน้อยที่นำการออกแบบการทดลองมาใช้ในกระบวนการขัด แต่ก็มีบางส่วน เช่น [17], [18] ใช้วิธีการออกแบบการทดลองเพื่อหาระดับปัจจัยที่ส่งผลต่อความหยาบผิวของการขัดเหล็กทรงกลมแตกต่างกันที่ [17] ทดสอบกับสแตนเลสสตีล แต่ [18] ทดสอบกับเหล็ก Aisi 0-1 งานวิจัยทั้งสองมีปัจจัยที่เหมือนกันคือ ระยะป้อนลึก ความเร็ว จำนวนครั้งของการปาดผิวชิ้นงาน แต่ [19] ได้เพิ่มแรงเฉือนเข้ามาด้วยงานวิจัยที่ทบทวน [6], [7], [9]-[11], [14]-[16], [18] ใช้วิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k เพื่อหาระดับปัจจัยที่ส่งผลได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกที่จะใช้วิธีการนี้กับการหาปัจจัยที่ส่งผลต่อขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดในกระบวนการขัดเพื่อลดของเสียที่เกิดขึ้น ด้วยการทำซ้ำแบบสุ่ม 5 ครั้ง จำนวนปัจจัย 3 ปัจจัย จำนวนการทดลองทั้งหมดคือ 40 ครั้ง

3. การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^3

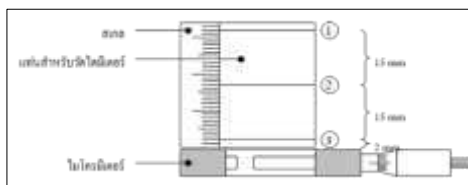
3.1 การกำหนดปัจจัยและตัวแปรตอบสนอง

ผู้วิจัยกำหนดปัจจัยหรือตัวแปรต้นจากปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ของเครื่องขัด ได้แก่ ความดัน มุม และเบอร์กระดาษทราย แสดงดังตารางที่ 1 ค่าของระดับปัจจัยต่างๆในตารางได้มาจากฝ่ายวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ของบริษัทกรณีศึกษา ซึ่งเป็นช่วงของค่าที่ฝ่ายผลิตใช้อยู่ในกระบวนการปัจจุบัน

ตารางที่ 1 แสดงระดับของปัจจัยสำหรับการทดลอง

ปัจจัย	ระดับที่ 1	ระดับที่ 2
ความดัน	4.5 bar	6.5 bar
มุม	10 องศา	12 องศา
เบอร์กระดาษทราย	Ultra-fine	Extra-fine

ตัวแปรตอบสนองหรือตัวแปรตาม คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหลังจากกระบวนการขัดต้องอยู่ในช่วงของค่าที่แผนกควบคุมคุณภาพกำหนด นั่นคือ $0.061^{+0.004}_{-0.003}$ มม. โดยการใช้เครื่องมือโครมิเตอร์วัดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 ตำแหน่ง ดังรูปที่ 5 แล้วจึงนำค่าที่วัดได้จากทั้ง 3 ตำแหน่งของแต่ละเส้นมาหาค่าเฉลี่ย

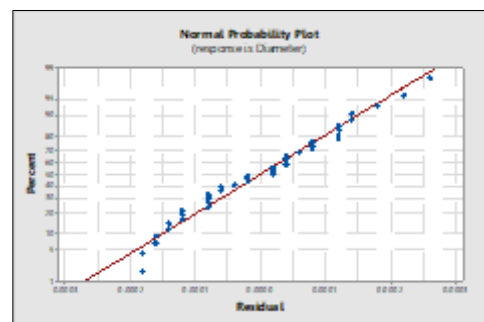


รูปที่ 5 ตำแหน่งการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดแกนกลาง

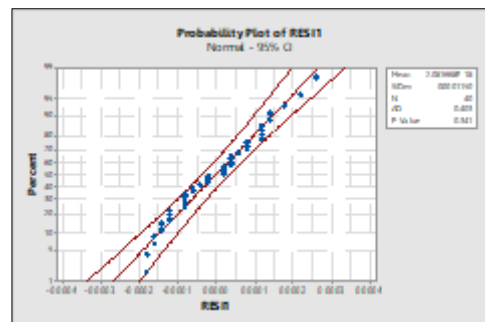
3.2 การตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)

[4], [5] กล่าวว่าไว้ว่าก่อนจะวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อดูปัจจัยที่ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนองนั้นจะต้องตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากการทดลองก่อนว่าค่าส่วนตกค้างหรือความคลาดเคลื่อนในการทดลอง (Residual) เป็นไปตามสมมติฐานแต่ละข้อดังต่อไปนี้

1.) การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติ โดยการเขียนกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติ (Normal Probability Plot) ของค่าส่วนตกค้าง ถ้าสมมติฐานนี้มีความถูกต้อง กราฟควรจะมีลักษณะเป็นเส้นตรง [20] แสดงดังรูปที่ 6 หรือพิจารณาที่ค่า p-value จากกราฟ Probability Plot [21] ของค่าส่วนตกค้างในรูปที่ 7 มีค่า 0.341 ซึ่งมากกว่า 0.05 แสดงว่าค่าส่วนตกค้างที่ได้จากการทดลองมีการแจกแจงแบบปกติ



รูปที่ 6 ความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าส่วนตกค้าง

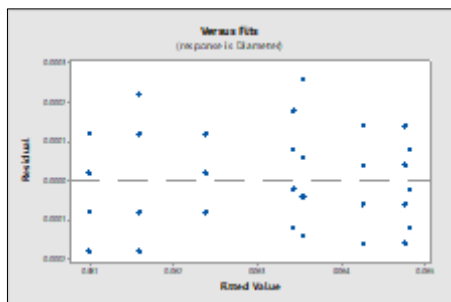


รูปที่ 7 การแจกแจงแบบปกติของค่าส่วนตกค้าง

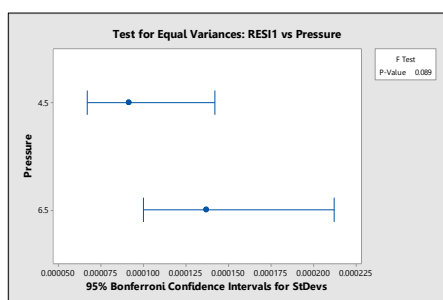
2.) การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน โดยการเขียนกราฟระหว่างค่าส่วนตกค้างกับค่าตัวแปรตอบสนองที่ได้จากตัวแบบจำลองการถดถอย (Fitted Value) ถ้าสมมติฐานนี้ถูกต้อง กราฟจะต้องมีแนวโน้มการกระจายแบบสุ่มหรือไม่เกิดแนวโน้มของรูปทรง (เช่น รูปทรงปากแตร) [4] ดังรูปที่ 8 และยังพิจารณาค่า p-value จากกราฟแสดงผลการทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวน [21] ของแต่ละปัจจัย ดังรูปที่ 9-15 ค่า p-value มากกว่า 0.05 ทุกตัวแสดงว่าค่าความแปรปรวน

ปีที่ 14 ฉบับที่ 2 เดือน พฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2562

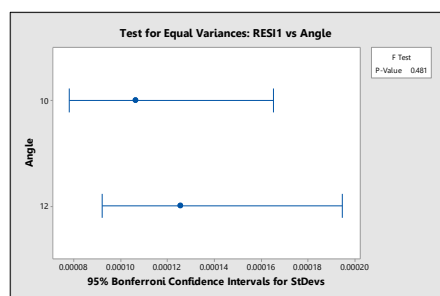
ของแต่ละปัจจัยที่ได้จากการทดลองไม่แตกต่างกัน นั่นคือความแปรปรวนมีความเสถียรตามสมมติฐานที่ตั้งไว้



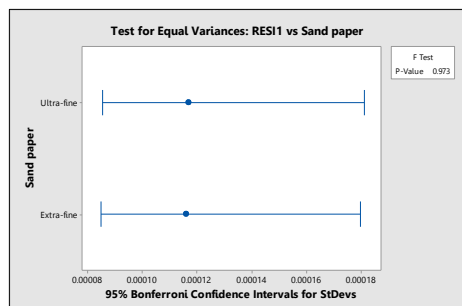
รูปที่ 8 ค่าส่วนตกค้างกับค่าตัวแปรตอบสนอง



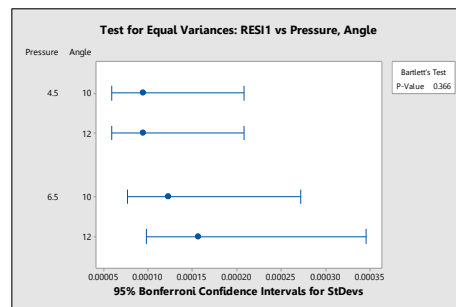
รูปที่ 9 ทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวนในปัจจัยความดัน



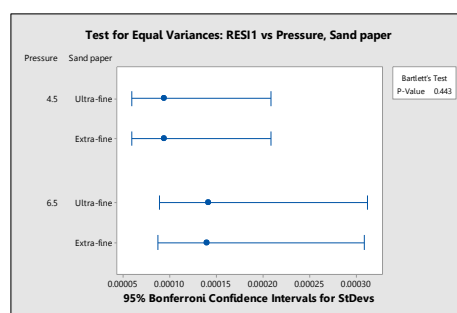
รูปที่ 10 ทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวนในปัจจัยมุม



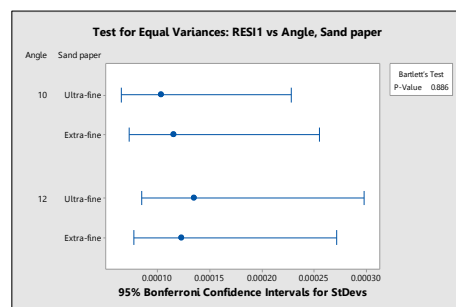
รูปที่ 11 ทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวนในปัจจัยเบอร์กระดาษทราย



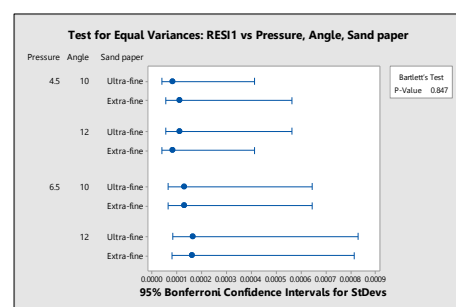
รูปที่ 12 ทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวนในปัจจัยความดันและมุม



รูปที่ 13 ทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวนในปัจจัยความดันและเบอร์กระดาษทราย

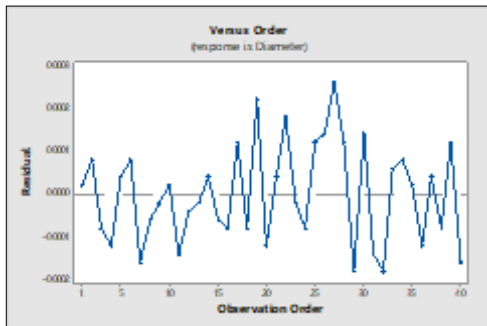


รูปที่ 14 ทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวนในปัจจัยมุมและกระดาษทราย

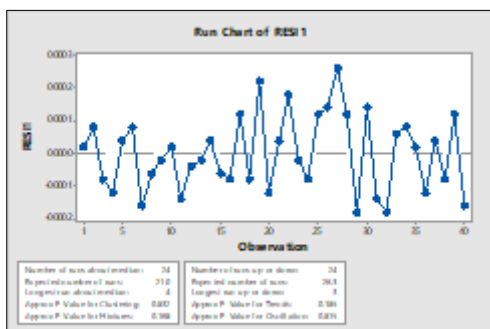


รูปที่ 15 ทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวนของปัจจัยความดัน มุม และกระดาษทราย

3.) การตรวจสอบความเป็นอิสระของค่าส่วนตกค้าง โดยการเขียนกราฟระหว่างค่าส่วนตกค้างกับลำดับการทดลอง (Observation order) ถ้าสมมติฐานนี้ถูกต้อง กราฟที่ได้จะต้องไม่มีลักษณะเป็นแนวโน้มหรือมีรูปแบบ [22] ดังรูปที่ 16 หรือพิจารณาค่า p-value จากกราฟแสดงผลของการทดสอบ Run Chart [21] ซึ่งเป็นการทดสอบว่าข้อมูลมีแนวโน้มหรือมีรูปแบบซ้ำๆ กันหรือไม่ ดังรูปที่ 17 ค่า p-value มากกว่า 0.05 ทุกตัวแสดงว่าค่าส่วนตกค้างที่ได้จากการทดลองไม่ขึ้นอยู่กับเวลาและกระจายตัวแบบไม่มีรูปแบบที่แน่นอน นั่นคือค่าส่วนตกค้างเป็นอิสระต่อกัน ตามสมมติฐานที่ตั้งไว้



รูปที่ 16 ค่าส่วนตกค้างกับลำดับการทดลอง



รูปที่ 17 การทดสอบ Run Chart

4. ผลการทดลอง

4.1 การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวน

การวิเคราะห์ความแปรปรวนถูกนำมาใช้เพื่อพิจารณาปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมที่มีผลกระทบต่อตัวแปรตอบสนอง ด้วยโปรแกรม Minitab 16 จากหลักการ

ทางสถิติของการวิเคราะห์ความแปรปรวน จะต้องตั้งสมมติฐาน เกี่ยวกับปัจจัยที่ต้องการทดสอบ [4] ดังนี้

H_0 : ปัจจัยไม่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง หรือ

$H_0 : \beta_A = \beta_B = \beta_C = \beta_{AB} = \beta_{AC} = \beta_{BC} = \beta_{ABC} = 0$

H_1 : ปัจจัยมีผลต่อตัวแปรตอบสนอง หรือ

$H_1 : \beta$ อย่างน้อยหนึ่งตัว $\neq 0$

โดย $\beta_{A,B,C}$ คือ ผลกระทบปัจจัยหลัก

$\beta_{AB,AC,BC}$ คือ ผลกระทบปัจจัยร่วม 2 ปัจจัย

β_{ABC} คือ ผลกระทบปัจจัยร่วม 3 ปัจจัย

Factorial Regression: Diameter versus Pressure, Angle, Sand paper					
Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	7	0.000073	0.000010	645.33	0.000
Linear	3	0.000056	0.000019	1362.87	0.000
Pressure	1	0.000028	0.000028	1735.52	0.000
Angle	1	0.000003	0.000003	191.02	0.000
Sand paper	1	0.000025	0.000025	1557.97	0.000
2-Way Interactions	3	0.000013	0.000004	274.45	0.000
Pressure*Angle	1	0.000008	0.000008	515.21	0.000
Pressure*Sand paper	1	0.000004	0.000004	234.86	0.000
Angle*Sand paper	1	0.000001	0.000001	45.45	0.000
3-Way Interactions	1	0.000003	0.000003	205.04	0.000
Pressure*Angle*Sand paper	1	0.000003	0.000003	205.04	0.000
Error	32	0.000001	0.000000		
Total	39	0.000073			

Model Summary			
S	R-sq	R-sq(Adj)	R-sq(Pred)
0.0001270	99.30%	99.14%	99.90%

รูปที่ 18 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน

การตั้งสมมติฐานดังกล่าวมีตัวสถิติที่ใช้ทดสอบสมมติฐานคือค่าสถิติ F ดังสมการที่ 1

$$F_0 = \frac{MS_{\text{mainfactor or interaction}}}{MS_E}; v_{\text{Factor or Interaction}}, v_E \quad (1)$$

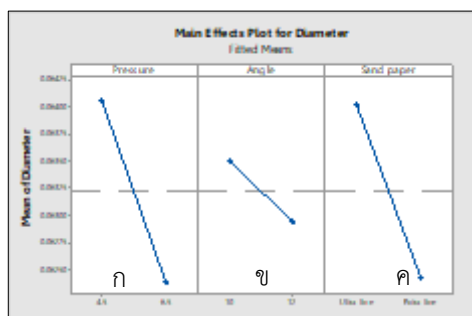
เมื่อ $MS_{\text{mainfactor or interaction}}$ คือ ค่าเฉลี่ยของผลรวมกำลังสองของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วม

MS_E คือ ค่าเฉลี่ยของผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อน

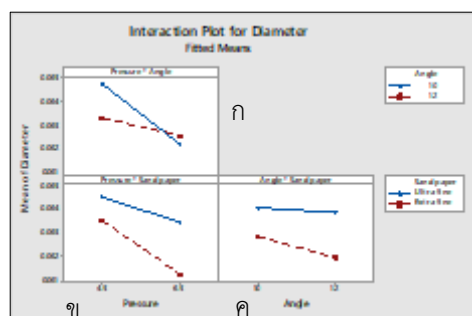
โดยมีบริเวณปฏิเสธ H_0 คือ $F_0 > F_{\alpha, v_1, v_2}$ ทั้งนี้การทดสอบสมมติฐานสามารถพิจารณาจากค่า p-value ได้จากรูปที่ 17 โดยการเปรียบเทียบค่า p-value กับระดับนัยสำคัญ ($\alpha = 0.05$) หากค่า p-value น้อยกว่า 0.05 แสดงว่าปฏิเสธสมมติฐานหลัก นั่นคือ ผลกระทบของปัจจัยนั้นมีผลต่อตัวแปรตอบสนอง จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในรูปที่ 18 แสดงว่าปัจจัยหลัก ได้แก่ ความดัน

มุม เบอร์กระดาษทราย ปัจจัยร่วม 2 ปัจจัย ได้แก่ ความดันและมุม ความดันและเบอร์กระดาษทราย มุมและเบอร์กระดาษทราย ปัจจัยร่วม 3 ปัจจัย ได้แก่ ความดันและมุม และเบอร์กระดาษทราย มีผลกระทบต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวด ดังนั้นจึงไม่ต้องตัดตัวแปรใดทิ้ง เมื่อพิจารณาค่า R-sq เท่ากับ 99.30% ซึ่งมีค่าเข้าใกล้ 100 แสดงให้เห็นว่า ตัวแบบจำลองการถดถอยที่ได้มานั้นสามารถอธิบายความผันแปรของค่าตัวแปรตอบสนอง ที่กระจายรอบค่าเฉลี่ยได้เป็นอย่างดี และ R-sq(Adj) เท่ากับ 99.14% มีค่าใกล้เคียงกับ R-sq แสดงว่าตัวแปรอิสระหรือแหล่งของความผันแปรถูกใส่เข้าไปในตัวแบบจำลองการถดถอยเหมาะสมแล้ว หรือไม่มีลักษณะของการใส่ตัวแปรมากเกินไป (Overfit) [21]

ผลจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแสดงให้เห็นว่า ทั้งปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมทุกตัวส่งผลต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวดสอดคล้องกับรูปที่ 19-20 สามารถอธิบายได้เป็นสองส่วน คือ ปัจจัยหลักและปัจจัยร่วม ดังนี้



รูปที่ 19 ผลกระทบของปัจจัยหลักต่อตัวแปรตอบสนอง



รูปที่ 20 ผลกระทบของปัจจัยร่วมต่อตัวแปรตอบสนอง

1.) ความดัน เมื่อกำหนดความดันสูงขึ้นเส้นผ่านศูนย์กลางจะมีขนาดลดลง พิจารณาได้จากที่ความดัน 4.5 เส้นผ่านศูนย์กลางจะมีขนาดประมาณ 0.064 มม. แต่ที่ความดัน 6.5 บาร์ เส้นผ่านศูนย์กลางจะมีขนาดประมาณ 0.0625 มม. ดังรูปที่ 19 (ก)

2.) มุม เมื่อกำหนดมุมสูงขึ้นเส้นผ่านศูนย์กลางจะมีขนาดลดลง พิจารณาได้จากที่มุม 10 องศา เส้นผ่านศูนย์กลางจะมีขนาดประมาณ 0.0635 มม. แต่ที่มุม 12 องศา เส้นผ่านศูนย์กลางจะมีขนาดประมาณ 0.0630 มม. ดังรูปที่ 19 (ข)

3.) เบอร์กระดาษทราย เมื่อกำหนดเบอร์กระดาษทรายเป็น Ultra-fine เส้นผ่านศูนย์กลางจะมีขนาดประมาณ 0.0640 มม. แต่เมื่อเมื่อกำหนดเบอร์กระดาษทรายเป็น Extra-fine เส้นผ่านศูนย์กลางจะมีขนาดประมาณ 0.0625 มม. หมายความว่ากระดาษทรายยิ่งหยาบจะยิ่งทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางลดลงดังรูปที่ 19 (ค)

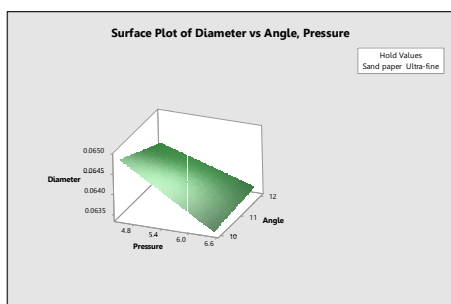
4.) ความดันและมุม เมื่อกำหนดความดันที่ 4.5 บาร์ และค่ามุม 10 องศา ค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางมีค่าประมาณ 0.065 มม. แต่เมื่อกำหนดมุมเป็น 12 องศา ทำให้ได้ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใกล้ 0.063 มม. ในทางกลับกันเมื่อกำหนดความดันที่ 6.5 บาร์ ค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางกลับลดลงมามีค่าประมาณ 0.062 มม. ทั้งกรณีที่กำหนดมุมเป็น 10 องศาและ 12 องศา ดังรูปที่ 20 (ก)

5.) ความดันและเบอร์กระดาษทราย เมื่อกำหนดความดันที่ 4.5 บาร์ และเบอร์กระดาษทรายเป็น Ultra-fine ค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางมีค่าประมาณ 0.0646 มม. แต่เมื่อกำหนดเบอร์กระดาษทรายเป็น Extra-fine ทำให้ได้ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใกล้ 0.0637 มม. ซึ่งไม่แตกต่างกันมาก ในทางกลับกันเมื่อกำหนดความดันที่ 6.5 บาร์ เบอร์กระดาษทรายเป็น Ultra-fine ค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางจะเข้าใกล้ 0.0637 มม. แต่เมื่อเปลี่ยนเบอร์กระดาษทรายเป็น Extra-fine ค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางกลับลดลงมาใกล้กับค่า 0.061 มม. ซึ่งเป็นค่าที่แผนกควบคุมคุณภาพกำหนดดังรูปที่ 20 (ข)

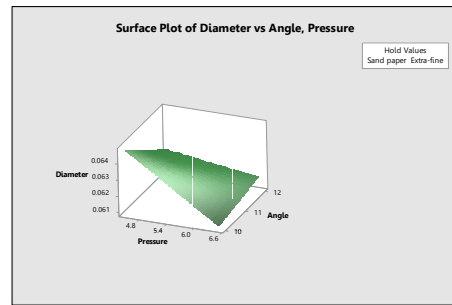
6.) มุมและเบอร์กระดาษทราย เมื่อกำหนดมุมเป็น 10 และ 12 องศาและใช้เบอร์กระดาษทรายเป็น Ultra-fine เส้นผ่านศูนย์กลางจะมีขนาดเกือบเท่ากันที่ประมาณ 0.064 มม. แต่เมื่อกำหนดมุมเป็น 10 และ 12 องศาและใช้เบอร์กระดาษทรายเป็น Extra-fine ค่ากลับมีความแตกต่างกัน เมื่อกำหนดมุมเป็น 10 เส้นผ่านศูนย์กลางจะมีค่าประมาณ 0.063 มม. ถ้ากำหนดมุมเป็น 12 เส้นผ่านศูนย์กลางจะลดลงมาใกล้กับค่า 0.062 มม. ดังรูปที่ 20 (ค)

เมื่อพิจารณารูปที่ 20 (ก) จะเห็นความแตกต่างกับรูปที่ 20 (ข) และ รูปที่ 20 (ค) เนื่องจากมีจุดตัดเกิดขึ้นระหว่างเส้นมุม 10 และมุม 12 อธิบายได้ว่า ที่ความดันค่าหนึ่งที่ถูกตัด ไม่ว่าจะปรับมุมเป็น 10 หรือ 12 ก็จะทำให้เส้นลดลงลงเท่ากัน แต่รูปที่ 20 (ข) และ รูปที่ 20 (ค) ไม่มีจุดตัดระหว่างระดับของปัจจัยเลย นั่นคือไม่มีตัวแปรร่วมใดที่ทำให้เส้นลดลงลงเท่ากัน

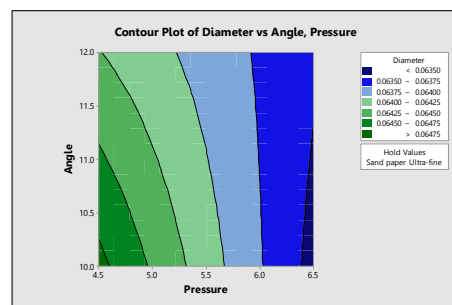
จากกราฟพื้นผิวความสัมพันธ์และกราฟ Contour รูปที่ 21-24 มีความสัมพันธ์กัน หากตัวแปรตอบสนองคือ 0.061 ควรจะใช้เบอร์กระดาษทราย Extra-fine เนื่องจากค่า 0.061 อยู่ในช่วงของตัวแปรตอบสนองที่แสดงดังในรูปที่ 24 ซึ่งจะต่างกับรูปที่ 23 และรูปที่ 21 เมื่อใช้กระดาษทราย Ultra-fine จะไม่มีช่วงของตัวแปรตอบสนองใดที่จะทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางได้ตามข้อกำหนดเลย และควรใช้ความดันและมุมที่ประมาณ 6.0-6.5 บาร์ และ 10-11 องศาตามลำดับ เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 22



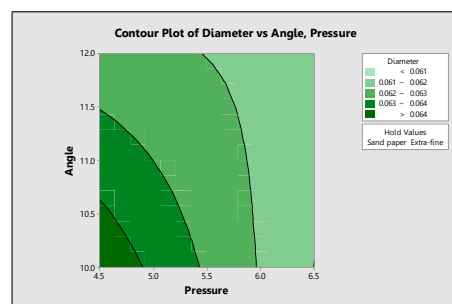
รูปที่ 21 กราฟพื้นผิวความสัมพันธ์ระหว่างความดันและมุมเมื่อกำหนดเบอร์กระดาษทรายเป็น Ultra-fine



รูปที่ 22 กราฟพื้นผิวความสัมพันธ์ระหว่างความดันและมุมเมื่อกำหนดเบอร์กระดาษทรายเป็น Extra-fine



รูปที่ 23 กราฟ Contour ระหว่างความดันและมุมเมื่อกำหนดเบอร์กระดาษทรายเป็น Ultra-fine



รูปที่ 24 กราฟ Contour ระหว่างความดันและมุมเมื่อกำหนดเบอร์กระดาษทรายเป็น Extra-fine

จากข้อกำหนดของแผนกควบคุมคุณภาพที่กำหนดไว้ว่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางหลังการขัดจะต้องอยู่ในช่วง $0.061^{+0.004}_{-0.003}$ มม. ผู้วิจัยจึงต้องกำหนดหาระดับของปัจจัย จากรูปที่ 25 สามารถเขียนสมการถดถอย เพื่อทำนายขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางได้ ดังสมการที่ 2

$$\begin{aligned} \text{Diameter} = & 0.063217 - 0.000837(\text{Pressure}) \\ & - 0.000277(\text{Angle}) - 0.000792(\text{Sandpaper}) \\ & + 0.000457(\text{Pressure} * \text{Angle}) - 0.000308 \\ & (\text{Pressure} * \text{Sand paper}) - 0.000168 \\ & (\text{Angle} * \text{Sand paper}) + 0.000287 \\ & (\text{Pressure} * \text{Angle} * \text{Sand paper}) \end{aligned} \quad (2)$$

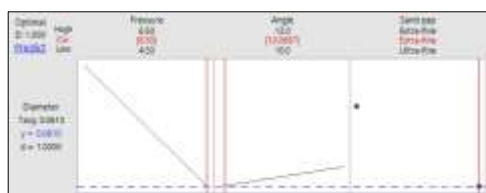
Coded Coefficients						
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		0.063217	0.000222	3148.40	0.000	
Pressure		-0.000837	0.000333	-41.71	0.000	1.00
Angle		-0.000277	0.000333	-13.83	0.000	1.00
Sand paper		-0.000792	0.000333	-39.47	0.000	1.00
Pressure*Angle		0.000457	0.000333	12.78	0.000	1.00
Pressure*Sand paper		-0.000308	0.000333	-15.32	0.000	1.00
Angle*Sand paper		-0.000168	0.000333	-8.34	0.000	1.00
Pressure*Angle*Sand paper		0.000287	0.000333	14.32	0.000	1.00

รูปที่ 25 ค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละปัจจัย

4.2 การหาระดับปัจจัยที่เหมาะสม

การหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมเพื่อใช้สมการถดถอยที่ได้มาทำนายค่าของระดับปัจจัยต่างๆ โดยการกำหนดค่าเส้นผ่านศูนย์กลางให้มีค่าอยู่ในช่วง $0.061^{+0.004}_{-0.003}$ มม. โดยการกำหนดค่าเป้าหมาย (Goal) เป็นค่าที่ต้องการ (Target) จากนั้นจึงกำหนดค่าเป้าหมายเป็น 0.061 มม. ค่าต่ำสุด (Lower) เป็น 0.058 มม. ค่าสูงสุด (Upper) เป็น 0.065 มม. เนื่องจากค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดเป็นค่าที่อยู่ในช่วงที่ต้องการ

ผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 26 พบว่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมคือ ความดัน 6.50 บาร์ มุม 10.0667 องศา เบอร์กระดาษทราย Extra-fine โดยมีค่า y เท่ากับ 0.061



รูปที่ 26 ระดับของปัจจัยที่เหมาะสม

และค่าวัดความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบสนอง (composite desirability: D) จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0–1 ถ้า D มีค่าเท่ากับ 1 หมายถึง ผลตอบนั้นได้รับความพึงพอใจอย่างสมบูรณ์ [23], [24]

4.3 การทดลองเพื่อยืนยันผล

การทดลองเพื่อยืนยันผล ผู้วิจัยทำการทดลองเพื่อยืนยันว่าระดับของปัจจัยที่เหมาะสมจากหัวข้อที่ 4.2 นั้นส่งผลให้เส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาดตามที่ต้องการหรือไม่ ด้วยการปรับค่าต่างๆตามผลที่ได้จากหัวข้อ 4.2 ซึ่งจะมีค่าของมุมที่ต้องปัดทศนิยมเป็น 10.07 องศา เนื่องจากเครื่องสามารถปรับค่ามุมได้เพียง 2 ทศนิยม แล้วทำการขัดเส้นลวดจำนวน 20 ชิ้น จากนั้นวัดค่าที่ได้ แล้วจึงทดสอบตามหลักการสถิติด้วยวิธี 1-Sample T Test [4] เนื่องจากไม่ทราบค่าความแปรปรวนของประชากรและข้อมูลที่นำมาทดสอบผ่านการตรวจสอบแล้วว่ามีการกระจายแบบปกติ

One-Sample T: Dia_Test							
Test of $\mu = 0.061$ vs $\neq 0.061$							
Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
Dia_Test	20	0.060950	0.001669	0.000373	(0.060169, 0.061731)	-0.13	0.895

รูปที่ 27 ระดับของปัจจัยที่เหมาะสม

จากรูปที่ 27 ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบว่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของกลุ่มตัวอย่างทั้ง 20 ชิ้นมีค่าเท่ากับ 0.061 หรือไม่ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่า ค่า p-value เท่ากับ 0.895 ซึ่งมากกว่า 0.05 สรุปผลได้ว่ากลุ่มตัวอย่างทั้ง 20 ชิ้นไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานได้ นั่นคือ ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง เท่ากับ 0.061 โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.060950 และช่วงแห่งความเชื่อมั่น 0.060169-0.061731 อยู่ในช่วงที่แผนกคุณภาพกำหนด ดังนั้นจึงสามารถนำค่าระดับของแต่ละปัจจัยไปใช้ในการผลิตได้จริง

5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ผู้วิจัยนำค่าของระดับปัจจัยไปใช้ในการผลิตจริงตั้งแต่วันที่เดือนกันยายน 2561 จากนั้นจึงทำการเก็บข้อมูลของเสียที่เกิดขึ้นตั้งแต่เดือนกันยายน-ธันวาคม 2561 เป็นช่วงเวลา 4 เดือนซึ่งมีระยะเวลาเท่ากับการเก็บข้อมูลก่อนการทดลอง พบว่า ปัญหาเส้นผ่านศูนย์กลางไม่ได้มาตรฐานเกิดขึ้นจำนวน 13 ชิ้น

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบของเสียก่อนและหลังการทดลอง

ปัญหา	เส้นผ่านศูนย์กลางไม่ได้มาตรฐาน
จำนวนของเสีย(ก่อนการทดลอง)	108 ชิ้น
จำนวนของเสีย(หลังการทดลอง)	13 ชิ้น
จำนวนของเสียที่ลดลง(ชิ้น)	95 ชิ้น

จากตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่าปัญหาเส้นผ่านศูนย์กลางไม่ได้มาตรฐานก่อนการทดลองคือ 108 ชิ้น หลังทดลองคือ 13 ชิ้น ลดลง 95 เส้นหรือคิดเป็นร้อยละ 87.96

งานวิจัยนี้ใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบ 2 ระดับ เพื่อจะทำให้สามารถหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) ได้ไม่ซับซ้อน ในงานทดลองถัดไปควรเพิ่มระดับเพราะเมื่อเพิ่มระดับของการทดลองจะทำให้เห็นความสัมพันธ์ของข้อมูลมากขึ้น แต่การเพิ่มระดับของการทดลองส่งผลต่อจำนวนการทดลองที่เพิ่มมากขึ้นเช่นกัน

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัทกรณีศึกษา ที่ให้ความร่วมมือในการเก็บข้อมูลและดูแลผู้วิจัยเป็นอย่างดี

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] A.Sriseng, "Transradial Catheterization," *Siriraj Medical Bulletin*, Vol. 10, 12, pp. 90-96, 2017 (in Thai).
- [2] R. Lekhawiphat, "Nursing care for children before and after," *Thai Red Cross Nursing Journal*, vol. 6, 12, pp. 15-24, 2013 (in Thai).
- [3] J.Heizer, B.Render and C. Munson, *Operations Management Sustainability*

and Supply Chain Management, 12th ed., NY: Pearson Education, 2017.

- [4] D. C.Montgomery, *Design And Analysis Of Experiments*, 9thed., NJ:John Wiley & Sons, 2017.
- [5] P. Sudasna na ayudthya and P. Luangpaiboon, *Design and analysis of experiments*, Bangkok: Top Publishing, 2008 (in Thai).
- [6] K. Praputtakun and T. Wuttiornpun, "A Study of Optimal Proportion of Factors in Concrete Ready Mixed," *The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok*, vol. 21, 12, pp. 313-320, 2011 (in Thai).
- [7] P. Chumpanya and C. Chanwichit, "A Study of Optimal Factor in Vacuum Thermoforming Process for Polyvinyl Chloride Plastic," *RMUTP Research Journal*, Vol 5, 12, 33-45, 2011 (in Thai).
- [8] W. Noanlumduan, N. Poomsa- ad, L. Wiset and Ch. Borompichaichartkul, "The Study of Optimum Condition for Dehydration of Konjac Flour," *UBU Engineering Journal*, vol. 6, 12, pp. 55-63, 2013 (in Thai).
- [9] Y. Srisawat, K. Mano and W. Suntornkanokpong, "A Study of Factors Affecting to the Film Peeling Problem in Silicon," *Journal of Industrial Education*, vol. 14, 12, pp. 291-298, 2015 (in Thai).
- [10] J. Visedmanee and A. Khadwilard, "Analysis of Factors Affecting the Volume of Lemongrass Oil from Distiller

- by Experimental Design,” *RMUTP Research Journal*, vol. 11, 11, pp. 34-42, 2017 (in Thai).
- [11] K. Theptawee, T. Wuttiornpun, “Cooling Capacity Improvement of Reciprocating Compressor with a DOE Approach,” *The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok*, vol. 23, 11, pp. 138-147, 2013 (in Thai).
- [12] M. Ritinyo, C. Peeratatsuan, N. Thammachot, P. Runkratok, A. Kongrit and J. Nithikarnjanatharn “Effect of Sub-Zero Treatment on Chromium Carbide in Tool Steel JIS SKD 11,” *SWU Engineering Journal*, Vol 12, 11, 43-50, 2017 (in Thai).
- [13] A. Chantamat and M. Osothsilp, “Productivity Improvement of Spray Drying Process in Textile Dye Manufacturing,” *SWU Engineering Journal*, Vol 12, 11, pp. 72-80, 2017 (in Thai).
- [14] R. Lopez, S. E. Lacey, J. F. Lippert, L. C. Liu, N. A. Esmen and L. M. Conroy, “Characterization of Size-Specific Particulate Matter Emission Rates for a Simulated Medical Laser Procedure - A Pilot Study,” *The Annals of occupational hygiene*, vol. 59, 4, pp. 514-524, 2015
- [15] D. C. Oliveira, L. A. Calixto, I. M. Fukuda, A. M. Saviano, A. J. Moreira, Y. Kawano, R. D. Mansano, T. J. A. Pinto, F. R. Lourenco, “Compatibility of Polyvinyl Chloride (PVC) Medical Devices and Other Polymeric Materials with Reactive Ion Etching (RIE) and Inductively Couple Plasma (ICP) Sterilization Using a Quality by Design (QbD) Approach,” *Journal of Pharmaceutical Innovation*, vol. 13, 2, pp.110-120, 2018
- [16] M. L. Dossett, L. Mu, R. B. Davis, I. R. Bell, A. J. Lembo, T. J. Kaptchuk, G. Y. Yeh, “Patient-Provider Interactions Affect Symptoms in Gastroesophageal Reflux Disease: A Pilot Randomized, Double-Blind Placebo-Controlled Trial,” *PLoS ONE*, vol. 10, 9, pp.1-13, 2015
- [17] A. S. Padda, S. Kumar and A. Mahajan, “Effect of Varying Surface Grinding Parameters on the Surface Roughness of Stainless Steel,” *International Journal of Engineering Research and General Science*, vol. 3, 16, pp. 314-319, 2015.
- [18] M.Melwin Jagadeesh Sridhar and P.Sathish Kumar, “Effect of Process Parameters on Surface Roughness of Cylindrical Grinding Process on Ohns (Aisi 0-1) Steel Rounds using ANOVA,” *International Journal of Engineering Trends and Technology*, vol. 33, 19, pp. 429-434, 2016.
- [19] H. Demir, A. Gullu, I. Ciftci and U. Seker, “An Investigation into the Influences of Grain Size and Grinding Parameters on Surface Roughness and Grinding Forces when Grinding,” *Strojniski vestnik* -

- Journal of Mechanical Engineering*, vol. 56, 17-8, pp. 447-454, 2010.
- [20] B. Panprasitvech and P. Hongsuwan, “Education Factors Suitable for The Production of Foam Glass Foam Amber Glass Splinter,” *Engineering Journal Chiang Mai University*, vol. 25, 13, pp. 102-112, 2018 (in Thai).
- [21] K. Asawarungsaengkul, Applied statistical for engineer :Design of experiments, Bangkok: Yongpon Trading Limited Partnership, 2016 (in Thai).
- [22] J. Klunngien and A. Phonyaim , “The Quality Control Of Neat-Soap Process With Factorial Experimental Design,” *Kasem Bundit Engineering Journal*, Vol. 5, 11, pp. 1-12, 2015 (in Thai).
- [23] D. Awapak, N. Mahae and D. Pichairat, “Optimization of Polysaccharide Extraction from *Gracilaria fisheri* Using Response Surface Methodology,” *KKU SCIENCE JOURNAL*, Vol. 41, 2, pp. 414-430, 2013 (in Thai).
- [24] A. Chanpirak, P. Dumnin and A. Hongpuay, “Optimization of Oil Extraction form Spent Coffe Grounds (*Coffea canephora* var. *robusta* /*Coffea arabica*) by Hexane Using Response Surface Methodology,” *The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok*, vol. 28, 14, pp. 799-811, 2018 (in Thai).

การประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ไหลออกจากแหล่งจ่ายกำลังดีซี

Estimation of Average Current Flowing out from DC Power Supply

ณรงค์เดช ดึงกระโทก¹ วิโรจน์ แสงธทอง^{2*}

¹นักศึกษาปริญญาโท ²อาจารย์ กลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม (PEMC)
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ถนนมหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

Narongdech Dungkratoke¹ Wirote Sangtungton^{2*}

¹Master student, ²Lecturer, Power electronics Energy Machines and Control research group,
School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology,
111 University Avenue, Muang District, Nakhon Ratchasima, 30000

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

(Received: May 19, 2019; Accepted: August 20, 2019)

บทคัดย่อ

ระบบควบคุมการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้ามีแผงพีวีที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายกำลังดีซี และต้องการเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวี เพราะแผนการควบคุมจะใช้กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแผงพีวีในการค้นหาจุดเอ็มพีพี บทความนี้จะนำเสนอหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่คำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ไหลออกจากแหล่งจ่ายกำลังดีซี และทบทวนตัวสังเกตโหมดการเลื่อนอันดับหนึ่งที่มีประมาณค่ากระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งที่เกิดจากแหล่งจ่ายกำลังดีซี การสร้างหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยและตัวสังเกตโหมดการเลื่อนมีจุดประสงค์แทนที่การใช้งานเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าของแหล่งจ่ายกำลังดีซี การใช้วงจรเรียงกระแสแทนที่แผงพีวีจะทำให้เกิดความสับสนในการเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยและตัวสังเกตโหมดการเลื่อน ผลการจำลองสถานการณ์และผลการทดลองจะแสดงถึงกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้จากการคำนวณมีค่าที่ใกล้เคียงกับกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้จากการวัด

คำสำคัญ: หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย ตัวสังเกตโหมดการเลื่อน แหล่งจ่ายกำลังดีซี

ABSTRACT

The control system of solar-energy conversion into electricity incorporates a PV panel served as DC power supply and needs a sensor sensing solar-array DC current. The control scheme utilizes the average of solar-array current for seeking a MPP of the PV panel. This paper presents the average-current estimator which computes the mean current flowing out from a DC power supply and also reviews the first-order sliding-mode observer which evaluates an instantaneous current that issues from the same DC power supply. The proposed estimator and the previous observer are formulated in order to further supplant such a sensor. When the PV panel is displaced by a single-phase rectifier, performance comparison between the estimator and the observer will be facilitated. Simulation and experiment results point out the closeness of the estimated and measured average currents.

Keyword: Average-current estimator, sliding-mode observer, DC power supply.

1. บทนำ

พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์หรือแผงฟิวด์ เป็นพลังงานสะอาด เพราะการผลิตไฟฟ้าของแผงฟิวด์ไม่ปล่อยมลพิษถึงสิ่งแวดล้อมและชั้นบรรยากาศของโลก ผู้ใช้ไฟฟ้าสามารถติดตั้งแผงฟิวด์บนหลังคาบ้านหรือบนชั้นดาดฟ้าของตึกและอาคาร การใช้แผงฟิวด์ผลิตไฟฟ้าจึงได้รับความนิยมและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อผู้ใช้ไฟฟ้าติดตั้งอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับกลางระหว่างแผงฟิวด์และกริดเอชของการไฟฟ้า ผู้ใช้ไฟฟ้าสามารถขายพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงฟิวด์ถึงการไฟฟ้าได้ เพราะอินเวอร์เตอร์จะบังคับการไหลของพลังงานไฟฟ้าจากแผงฟิวด์ และป้อนพลังงานไฟฟ้าเข้ากริดเอชหรือวงจรขาย นั่นคืออินเวอร์เตอร์จะบังคับกริดเอชให้เป็นโหนดไฟฟ้า เนื่องจากแผงฟิวด์คือแหล่งจ่ายกำลังดีซีและกริดเอชคือระบบไฟฟ้าเอซี วิธีการแปลงกำลังงานดีซีไปเป็นกำลังงานเอชที่ง่ายที่สุดคือการใช้อินเวอร์เตอร์ภาคเดียวที่มีด้านอินพุตเชื่อมต่อกับแผงฟิวด์และมีด้านเอาต์พุตเชื่อมต่อกับกริดเอช [1] แผนการควบคุมวงปิดหรือแผนการควบคุมป้อนกลับจะกำหนดฟังก์ชันการทำงานที่ถูกต้องของอินเวอร์เตอร์ ระบบควบคุมการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าที่ไม่ซับซ้อน จะประกอบด้วยแผนการควบคุมและอินเวอร์เตอร์ดังกล่าว แผนการควบคุมนี้ต้องการเซนเซอร์ 4 ตัวที่ประกอบด้วยเซนเซอร์วัดแรงดันดีซีที่ตกคร่อมแผงฟิวด์ เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าเอซีที่ไหลเข้ากริด เซนเซอร์วัดแรงดันกริดเอซีและเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าดีซีที่ไหลออกจากแผงฟิวด์ [2]

ในทางปฏิบัติ ไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำหน้าที่เป็นแผนการควบคุม [3] และไมโครคอนโทรลเลอร์ในปัจจุบันมีความรวดเร็วในการประมวลผลมากขึ้น และมีหน่วยความจำและรีจิสเตอร์มากขึ้น แต่มีราคาถูกลง ไมโครคอนโทรลเลอร์จึงสามารถทำงานอื่น ๆ ได้เพิ่มเติม นอกเหนือจากการทำหน้าที่เป็นแผนการควบคุม เมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์ทำหน้าที่เป็นตัวสังเกตสถานะที่ประมาณค่าปริมาณทางกายภาพหรือปริมาณทางไฟฟ้า

บางปริมาณ ตัวสังเกตสถานะจะแทนที่เซนเซอร์บางตัว งานวิจัยก่อนหน้านี้ที่มีเพียงงานวิจัยเดียวได้พัฒนาตัวสังเกตโหมดการเคลื่อนที่ประมาณค่ากระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งที่ไหลออกจากแผงฟิวด์ และใช้งานแทนที่เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าของแผงฟิวด์ [4] การประมาณค่ากระแสไฟฟ้าในวิธีการอื่นที่แตกต่างจากตัวสังเกตโหมดการเคลื่อนที่คือหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่คำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยโดยตรง เพราะแผนการควบคุมต้องการกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ไหลออกจากแผงฟิวด์ นั่นคือการใช้งานตัวสังเกตโหมดการเคลื่อนที่เพิ่มเติมการเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งที่ได้จากการประมาณค่า การใช้วงจรเรียงกระแสแทนที่แผงฟิวด์จะทำให้เกิดความง่ายและความสะดวกในการเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างตัวสังเกตโหมดการเคลื่อนที่และหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย เพราะวงจรเรียงกระแสคือตัวอย่างหนึ่งของแหล่งจ่ายกำลังดีซี บทความนี้จะกล่าวถึงระบบควบคุมการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า การใช้งานวงจรเรียงกระแสแทนที่แผงฟิวด์ หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย การทบทวนตัวสังเกตโหมดการเคลื่อนที่ในงานวิจัยก่อนหน้านี้ และการเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างตัวสังเกตโหมดการเคลื่อนที่และหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย

2. ระบบควบคุมการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า

เมื่อพิจารณาระบบควบคุมการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าที่แสดงในรูปที่ 1 แผงเซลล์แสงอาทิตย์หรือแผงฟิวด์ได้รับแสงอาทิตย์และผลิตกำลังงานไฟฟ้าดีซี แผงฟิวด์จ่ายกระแสไฟฟ้าดีซี (i_{pv}) และให้แรงดันดีซี (v_{pv}) ถึงตัวเก็บประจุ (C) และด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่แปลงแรงดันดีซีไปเป็นแรงดันเอซีและอินเวอร์เตอร์จ่ายกระแสไฟฟ้าเอซี (i_g) ถึงกริดเอซี (v_g) ของการไฟฟ้า อินเวอร์เตอร์มีด้านอินพุตที่มีแบบจำลองพลวัตคือ

$$\frac{dv_{pv}}{dt} = \frac{1}{C}(-i_g \cdot u + i_{pv}) \quad (1)$$

โดยที่ t คือเวลา

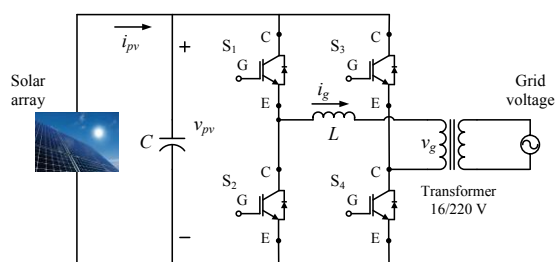
v_{pv} คือแรงดันที่ตกคร่อมแผงพีวีและตัวเก็บประจุ

i_{pv} คือกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวี

i_g คือกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำและไหลเข้ากริด

C คือค่าความจุของตัวเก็บประจุ และ

$i_g \cdot u$ คือกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์



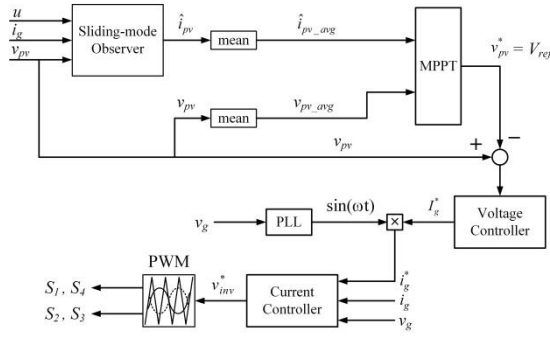
รูปที่ 1 อินเวอร์เตอร์พีวีเต็มบริดจ์เฟสเดียวที่เชื่อมต่อกับกริด

ระบบควบคุมดังกล่าวประกอบด้วยแผงพีวีอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันเต็มบริดจ์เฟสเดียวที่มีไอจีบีที 4 ตัว (เซมิบริดจ์) ตัวเก็บประจุที่เชื่อมต่อกับแผงพีวี ตัวเหนี่ยวนำ (L) กริดเอซี เซนเซอร์วัดแรงดันดิซีที่ตกคร่อมแผงพีวี เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าเอซีที่ไหลเข้ากริด เซนเซอร์วัดแรงดันกริดเอซี หน่วยติดตามจุดกำลังงานสูงสุดของแผงพีวีหรือเอ็มพีพีที (MPPT) หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยหรือตัวสังเกตโหมดการเลื่อน ตัวควบคุมแรงดันดิซีที่ตกคร่อมแผงพีวีหรือตัวควบคุมแรงดันดิซี เฟสล็อกกลูป (phase-locked loop : PLL) ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริดเอซีหรือตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริด และหน่วยมอดูเลตความกว้างพัลส์หรือหน่วยพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM) ตัวเก็บประจุจะรักษาการเปลี่ยนแปลงแรงดันของแผงพีวีให้มีความต่อเนื่องหรือทำหน้าที่เป็นตัวกรองแรงดัน ตัวเหนี่ยวนำที่เชื่อมต่อกันกลางระหว่างด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์และกริดเอซี จะรักษาการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้ากริดให้มีความ

ต่อเนื่องและมีความราบเรียบ (smooth) มากขึ้น หรือทำหน้าที่เป็นตัวกรองกระแสไฟฟ้า กริดเอซีคือหม้อแปลงเพิ่มแรงดันที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าเฟสเดียวของการไฟฟ้า เฟสล็อกกลูปได้รับแรงดันกริดเอซีที่มีความถี่เชิงมุม ω ประมาณค่าตำแหน่งเชิงมุม (ωt) ของแรงดันกริดเอซี และคำนวณค่าไซน์ของตำแหน่งเชิงมุมนี้ ($\sin(\omega t)$) ตัวสังเกตโหมดการเลื่อนจะใช้งานแทนที่เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าดิซีที่ไหลออกจากแผงพีวี และทำหน้าที่ประมาณค่ากระแสไฟฟ้าขณะหนึ่ง ($\hat{i}_{pv}$) ที่ไหลออกจากแผงพีวีหรือกระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งของแผงพีวี การเฉลี่ยกระแสไฟฟ้า (mean) จะประมวลกระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งให้เป็นค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวี ($\hat{i}_{pv_avg}$) ที่แสดงได้ในรูปที่ 2 แรงดันดิซีที่ตกคร่อมแผงพีวีหรือแรงดันของแผงพีวีและกระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งของแผงพีวีที่ได้จากการประมาณค่าในสถานะอยู่ตัว มีความพลัว (ripple) ที่มีความถี่เป็นสองเท่าของความถี่ของแรงดันกริดเอซี เอ็มพีพีทีที่ได้รับแรงดันเฉลี่ย (v_{pv_avg}) ที่ตกคร่อมแผงพีวี และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย ($\hat{i}_{pv_avg}$) ที่ได้จากการประมาณค่าและนำค่าเฉลี่ยมาคำนวณหาค่าพลังงานเฉลี่ยและค้นหาจุดเอ็มพีพีของแผงพีวี การเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งจะคำนวณได้ดังนี้

$$\hat{i}_{pv_avg} = \frac{2}{T} \int_0^{0.5T} \hat{i}_{pv} dt \quad (2)$$

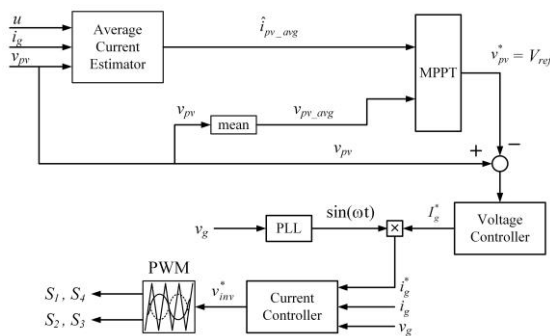
โดยที่ $T = \frac{1}{f}$ คือคาบระยะเวลาของแรงดันกริดเอซี และ f คือความถี่ของแรงดันกริดเอซี เอ็มพีพีทีจะได้รับ $v_{pv_avg}(k)$ และ $\hat{i}_{pv_avg}(k)$ ที่เวลาการสุ่มปัจจุบัน โดยที่ k คือจำนวนครั้งของการวนซ้ำตั้งแต่เวลาเริ่มต้นจนถึงเวลาปัจจุบัน



รูปที่ 2 แผนการควบคุมอินเวอร์เตอร์พีวีที่เชื่อมต่อกิต
ที่ใช้ตัวสังเกตโหมดการเลื่อน

หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยอาจจะใช้งานแทนที่เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวี หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยคำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแผงพีวีโดยตรงที่แสดงได้ในรูปที่ 3 และป้อนค่าเฉลี่ยถึงเอ็มพีพีทีที่ค้นหาหรือคำนวณแรงดันดีซีอ้างอิงของแผงพีวี เอ็มพีพีทีจะป้อนแรงดันดีซีอ้างอิงถึงตัวควบคุมแรงดันดีซีที่มีโครงสร้างของตัวควบคุมพีไอตัวควบคุมแรงดันดีซีจะใช้เวลาผิดพลาดระหว่างแรงดันดีซีอ้างอิงและแรงดันที่ตกคร่อมแผงพีวีที่ได้จากการวัด นำมาสร้างค่ายอดของกระแสไฟฟ้ากริดอ้างอิง (I_g^*) ผลคูณระหว่างค่ายอดของกระแสไฟฟ้ากริดอ้างอิงและสัญญาณไซน์ที่สัมพันธ์กับตำแหน่งเชิงมุม ($\sin(\omega t)$) ของแรงดันกริดเอซี จะสร้างกระแสไฟฟ้ากริดอ้างอิง (i_g^*) ที่ซิงโครไนซ์ (synchronize) กับแรงดันกริดเอซี (v_g)

$$i_g^* = I_g^* \sin(\omega t) \quad (3)$$



รูปที่ 3 แผนการควบคุมอินเวอร์เตอร์พีวีที่เชื่อมต่อกิต
ที่ใช้หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย

ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริดที่มีโครงสร้างของตัวควบคุมพีไอและการป้อนไปหน้า (feedforward) จะได้รับความผิดพลาดระหว่างกระแสไฟฟ้ากริดอ้างอิงและกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริดเอซีที่ได้จากการวัด (i_g) และสร้างแรงดันอ้างอิงที่นำมาบวกกับแรงดันกริดเอซีที่ได้จากการวัด ผลบวกที่เกิดขึ้นคือแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงของอินเวอร์เตอร์ (v_{inv}^*)

$$v_{inv}^* = v_g + K_{PI}(i_g^* - i_g) + K_{II} \int_0^t (i_g^* - i_g) dt \quad (4)$$

โดยที่ K_{PI} และ K_{II} คือค่าเกนพีและค่าเกนไอของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริดตามลำดับ หน่วยพีดับเบิลยูเอ็มชนิดขั้วเดียว (unipolar) จะนำแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงของอินเวอร์เตอร์มาเปรียบเทียบกับสัญญาณพาหะสามเหลี่ยมที่มีความถี่สูง การเปรียบเทียบนี้จะสร้างสัญญาณพัลส์ที่มีความกว้างเปลี่ยนแปลงได้ 4 สัญญาณ (S_1, S_2, S_3 และ S_4) และหน่วยพีดับเบิลยูเอ็มจะป้อนสัญญาณพัลส์ถึงขาเกตของไอจีบีทีแต่ละตัว สัญญาณพัลส์ 4 สัญญาณจะกำหนดลำดับและรูปแบบการสวิตช์ของไอจีบีที 4 ตัวที่ทำให้อินเวอร์เตอร์ผลิตแรงดันเอซีพีดับเบิลยูเอ็ม ค่าบรรทัดฐาน (normalized value) ของแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงของอินเวอร์เตอร์ คือสถานะของการสวิตช์สมมูล (u)

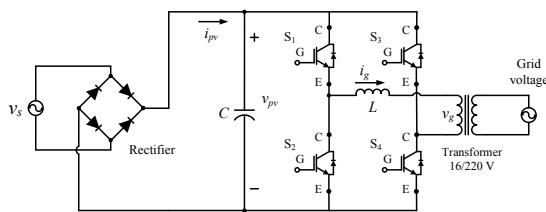
$$u = \frac{v_{inv}^*}{V_{oc, PV}} \quad (5)$$

โดยที่ $V_{oc, PV}$ คือแรงดันวงจรเปิด (open-circuit voltage) ของแผงพีวี ตัวสังเกตโหมดการเลื่อนและหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย จะได้รับสถานะของการสวิตช์สมมูลที่มีค่าอยู่ในช่วง $-1 \leq u \leq 1$

3. การใช้วงจรเรียงกระแสทำหน้าที่เป็นแผงพีวี และแผนการควบคุม

เนื่องจากแผงพีวีคือแหล่งจ่ายกำลังดีซีและวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นเฟสเดียวให้แรงดันดีซี (v_{pv}) และจ่าย

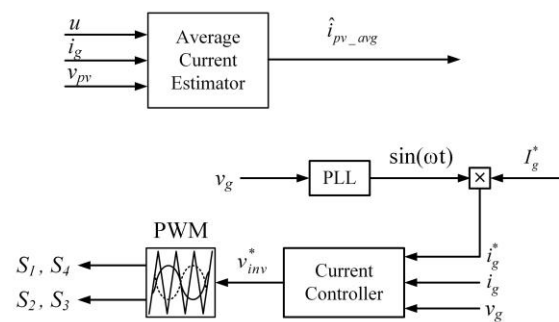
กระแสไฟฟ้าดีซี (i_{pv}) การใช้วงจรเรียงกระแสแทนที่แผงพีวีจะทำให้เกิดความสับสนในการทดลองเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวสวิตช์โหมดการเลื่อนและหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย เพราะวงจรเรียงกระแสมีด้านอินพุตที่เชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันเอซีหรือกริดเอซีแปลงแรงดันเอซีไปเป็นแรงดันดีซี และให้แรงดันเฉลี่ยที่มีค่าคงที่และสัมพันธ์กับค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดันเอซี แต่แผงพีวีให้แรงดันดีซีเฉลี่ยและจ่ายกระแสไฟฟ้าดีซีเฉลี่ยที่ขึ้นอยู่กับระดับการถ่ายรังสีของแสงอาทิตย์และอุณหภูมิแวดล้อม การรักษาระดับแรงดันเฉลี่ยที่ตกคร่อมแผงพีวีให้มีค่าคงที่เท่ากันทุกครั้งที่ในการทดลอง จึงมีความยุ่งยากและไม่สะดวก การรักษาระดับดีซีเฉลี่ยของวงจรเรียงกระแสให้มีค่าคงที่เท่ากันทุกครั้งที่ในการทดลอง มีความง่ายและสะดวกมากกว่า วงจรเรียงกระแสที่ใช้งานและแทนที่แผงพีวีแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 วงจรเรียงกระแสที่ใช้งานแทนที่แผงพีวี

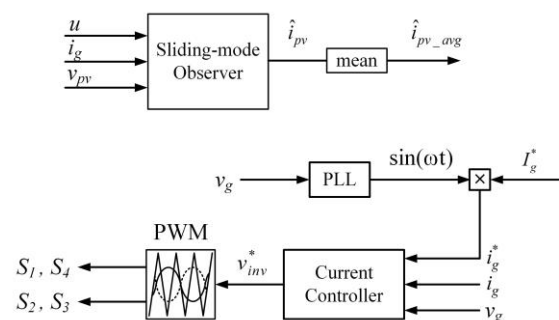
วงจรเรียงกระแสจ่ายกระแสไฟฟ้าดีซีถึงตัวเก็บประจุและด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์ ไอจีบีที 4 ตัวที่เชื่อมต่อเป็นเฮกซ์บริดจ์ในอินเวอร์เตอร์ มีลำดับและรูปแบบการสวิตช์ที่ไม่เปลี่ยนแปลงแรงดันเฉลี่ยของวงจรเรียงกระแสแผนการควบคุมจึงไม่มีเอ็มพีพีทีและตัวควบคุมแรงดันดีซีแต่มีเฟสล็อกกลู ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริด และหน่วยพีดับเบิลยูเอ็ม ค่ายอดของกระแสไฟฟ้ากริดอ้างอิงจะมีค่าคงที่ค่าหนึ่ง ตัวสวิตช์โหมดการเลื่อนและหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยจะไม่ใช่ส่วนหนึ่งของแผนการควบคุม เพราะกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ไหลออกจากวงจรเรียงกระแสที่เกิดจากการคำนวณ ($\hat{i}_{pv_avg}$) ไม่ได้นำมาใช้ในการควบคุมกระแสไฟฟ้ากริด แผนการควบคุมอินเวอร์เตอร์หรือแผนการควบคุมกระแสไฟฟ้ากริดและ

หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่คำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยเท่านั้นจะแสดงได้ในรูปที่ 5 หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยจะได้รับแรงดันดีซีเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแส (v_{pv}) กระแสไฟฟ้ากริดที่ได้จากการวัด (i_g) และสถานะของการสวิตช์สมมูล (u) และนำมาใช้คำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย ($\hat{i}_{pv_avg}$) ของวงจรเรียงกระแส



รูปที่ 5 แผนการควบคุมกระแสไฟฟ้ากริดและหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย

แผนการควบคุมอินเวอร์เตอร์และตัวสวิตช์โหมดการเลื่อนที่ประมาณค่ากระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งเท่านั้นจะแสดงได้ในรูปที่ 6 ตัวสวิตช์โหมดการเลื่อนจะได้รับแรงดันดีซีเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแส (v_{pv}) กระแสไฟฟ้ากริดที่ได้จากการวัด (i_g) และสถานะของการสวิตช์สมมูล (u) และนำมาใช้ประมาณค่ากระแสไฟฟ้าขณะหนึ่ง ($\hat{i}_{pv}$) ที่ไหลออกจากวงจรเรียงกระแส การเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าจะประมวลกระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งให้เป็นค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากวงจรเรียงกระแส ($\hat{i}_{pv_avg}$)



รูปที่ 6 แผนการควบคุมกระแสไฟฟ้ากริดและตัวสวิตช์โหมดการเลื่อน

4. การประมาณค่ากระแสไฟฟ้า

แบบจำลองพลวัตด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์พีวีที่เชื่อมต่อกับกริด ได้นำมาใช้สร้างตัวสังเกตโหมดการเคลื่อนและหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย แต่ตัวสังเกตและหน่วยประมาณค่ามีโครงสร้างที่แตกต่างกัน

4.1. หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย

แหล่งจ่ายกำลังคือแผงพีวีและวงจรเรียงกระแสที่เชื่อมต่อกับตัวเก็บประจุและด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์ เมื่อพิจารณาสมการที่ (1) การเฉลี่ยแบบจำลองพลวัตด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์ในช่วงระยะเวลาครึ่งคาบของแรงดันกริดเอซี จะสร้างหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่คำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ไหลออกจากแหล่งจ่ายกำลังดีซี ($\hat{i}_{pv_avg}$) ดังนี้

$$\hat{i}_{pv_avg} = \frac{\int_t^{t+0.5T} (i_g \cdot u) dt}{0.5T} + C \frac{v_{pv}(t+0.5T) - v_{pv}(t)}{0.5T} \quad (6)$$

โดยที่ v_{pv} คือแรงดันที่ตกคร่อมแหล่งจ่ายกำลังดีซีและตัวเก็บประจุ เมื่อ $f = 50$ Hz จะได้ว่า $0.5T = 10$ ms นั่นคือหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยจะคำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยทุกช่วงระยะเวลา 10 ms

4.2. ตัวสังเกตโหมดการเคลื่อนอันดับหนึ่ง

งานวิจัยก่อนหน้านี้ [4] พิจารณาแบบจำลองพลวัตด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์ที่อธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง v_{pv} , i_{pv} , i_g และ u และนำแบบจำลองพลวัตดังกล่าวมาสร้างตัวสังเกตโหมดการเคลื่อนอันดับหนึ่งที่ประมาณค่ากระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งๆที่ไหลออกจากแผงพีวี การสร้างตัวสังเกตโหมดการเคลื่อนได้สมมุติว่าแผงพีวีจ่ายกระแสไฟฟ้าเกือบคงที่ ($\frac{di_{pv}}{dt} \approx 0$) ตัวสังเกตโหมดการเคลื่อนมีโครงสร้างที่ซับซ้อนมากกว่าหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย ตัวสังเกตโหมดการเคลื่อนจะใช้แรงดันดีซี v_{pv} กระแสไฟฟ้าเอซี i_g ที่ได้จากการวัด และสถานะของ

การสวิตช์สมมูล u นำมาประมาณค่าแรงดันขณะหนึ่ง $\hat{v}_{pv}$ ของแหล่งจ่ายกำลังดีซีและกระแสไฟฟ้าขณะหนึ่ง $\hat{i}_{pv}$ ที่ไหลออกจากแหล่งจ่ายกำลังดีซี เมื่อพิจารณา $\hat{v}_{pv}$ และ $\hat{i}_{pv}$ เป็นตัวแปรสถานะที่ได้จากการประมาณค่า i_g และ u คือตัวแปรอินพุต ตัวสังเกตโหมดการเคลื่อนอันดับหนึ่งที่มิโครงสร้างแบบวงปิด มีสมการปริภูมิสถานะ

$$\frac{d\hat{v}_{pv}}{dt} = \frac{1}{C}(-i_g \cdot u + \hat{i}_{pv}) + h_1 e_v + k_1 \text{sgn}(e_v)$$

$$\frac{d\hat{i}_{pv}}{dt} = h_2 e_v \quad (7)$$

$$e_v = v_{pv} - \hat{v}_{pv}$$

$$\text{sgn}(e_v) = \begin{cases} +1 & \text{if } e_v > 0 \\ 0 & \text{if } e_v = 0 \\ -1 & \text{if } e_v < 0 \end{cases}$$

โดยที่ $\hat{v}_{pv}$ คือการประมาณค่าของ v_{pv} , $\hat{i}_{pv}$ คือการประมาณค่าของ i_{pv} , h_1 , k_1 , h_2 คือค่าเกนของตัวสังเกตที่มีค่าบวก และ e_v คือความผิดพลาดที่เกิดจากการประมาณค่าแรงดัน v_{pv} ที่ตกคร่อมแหล่งจ่ายกำลังดีซี

5. ผลการจำลองสถานการณ์และผลการทดลอง

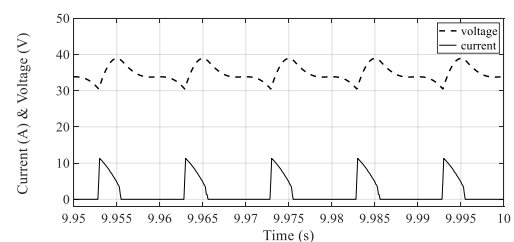
การจำลองสถานการณ์และการทดลองจะแบ่งออกเป็นกรณีที่หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่คำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของวงจรเรียงกระแส และกรณีที่ตัวสังเกตโหมดการเคลื่อนอันดับหนึ่งและการเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าที่ประมาณค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากรีเรียงกระแส ผลการจำลองสถานการณ์และผลการทดลองจะใช้ตรวจสอบความเป็นไปได้ในการใช้งานหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยแทนที่เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าดีซีที่ไหลออกจากแหล่งจ่ายกำลังดีซีอินเวอร์เตอร์ แผนการควบคุมกระแสไฟฟ้ากริด และตัวสังเกตโหมดการเคลื่อนมีค่าพารามิเตอร์ที่แสดงในตารางที่ 1 การจำลองสถานการณ์มีขั้นเวลาคงที่ (fixed stepsize) 1 μ s หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้า

เฉลี่ยและตัวสังเกตโหมดการเลื่อนมีคาบระยะเวลาของการสุมวัด 50 μ s (ความถี่ของการสุมวัด 20 kHz) แผนการควบคุมมีคาบระยะเวลาของการสุมวัด 50 μ s ค่ายอดของกระแสไฟฟ้ากริดอ้างอิงมีค่า 5 A ($I_g^* = 5$ A) เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากวงจรเรียงกระแส จะทำหน้าที่เฝ้าตรวจ (monitor) กระแสไฟฟ้าและให้สัญญาณวัดเท่านั้น ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการวัด (average actual current) จะนำมาเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณและการประมาณค่า และกระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งที่ได้จากการวัด (actual current) จะนำมาเปรียบเทียบกับกระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งที่ได้จากการประมาณค่า

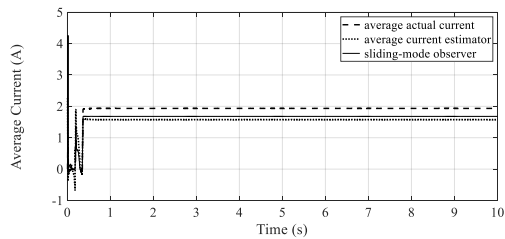
ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์และการทดลอง

แหล่งจ่ายกำลังดีซี	v_{pv_avg}	33 V _{DC}
อินเวอร์เตอร์	C	1000 μ F
	L	5 mH
	$v_g(t) = 22.63 \sin(100\pi t + 180^\circ)$	16 V _{RMS} 50 Hz
	f_c (ความถี่ของสัญญาณพาหะ)	20 kHz
	f_s (ความถี่ของการสุมวัด)	20 kHz
	I_g^*	5 A
ตัวสังเกตโหมดการเลื่อนอันดับหนึ่ง	h_1	1000
	h_2	6000
	k_1	1000
ค่าเกนของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริด	K_{Pi}	100
	K_{Ii}	10

ในการจำลองสถานการณ์ การคำนวณสถานะของการสวิตช์สมมูลจะเลือกใช้ $V_{oc,pv} = 34$ V วงจรเรียงกระแสเฟสเดียวให้แรงดันดีซีขณะหนึ่งที่มีความพลัวที่มีความถี่ 100 Hz และมีค่าเฉลี่ย 33 V และจ่ายกระแสไฟฟ้าดีซีขณะหนึ่งที่มีลักษณะคล้ายพัลส์ (pulse) รายคาบที่มีค่ายอด (peak) 11 A โดยประมาณ และไม่ต่อเนื่องที่แสดงในรูปที่ 7 กระแสไฟฟ้าดีซีจะเกิดขึ้นและเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันถึงค่ายอดในแต่ละรอบ และมีค่าเฉลี่ย $i_{pv_avg} \approx 1.92$ A ในสถานะอยู่ตัว หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยคำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย $i_{pv_avg} \approx 1.58$ A ในสถานะอยู่ตัวที่แสดงในรูปที่ 8 และ 9 ตัวสังเกตโหมดการเลื่อนจะใช้ช่วงระยะเวลาสั้น ๆ ในการประมาณค่ากระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งที่มีค่าเพิ่มขึ้นถึงค่ายอด 12 A ในแต่ละรอบที่แสดงในรูปที่ 10 ตัวสังเกตโหมดการเลื่อนประมาณค่ากระแสไฟฟ้าที่ติดตาม (track) การเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากวงจรเรียงกระแส การเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าประมาณค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้า $i_{pv_avg} \approx 1.68$ A ในสถานะอยู่ตัวที่แสดงในรูปที่ 8 และ 9 นั่นคือตัวสังเกตโหมดการเลื่อนและการเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าจะประมาณค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่มีความผิดพลาดน้อยกว่า และหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยจะคำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่มีความผิดพลาดมากกว่าในสถานะอยู่ตัว เพราะตัวสังเกตโหมดการเลื่อนมีโครงสร้างแบบวงปิด แต่หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยมีโครงสร้างแบบวงเปิด

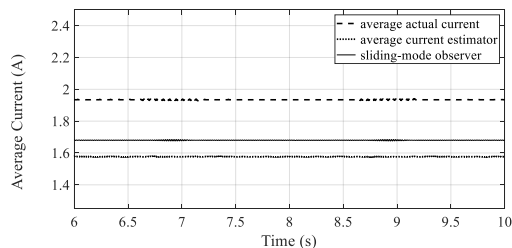


รูปที่ 7 แรงดันดีซีขณะหนึ่งและกระแสไฟฟ้าดีซีขณะหนึ่งของวงจรเรียงกระแส (ผลการจำลองสถานการณ์)

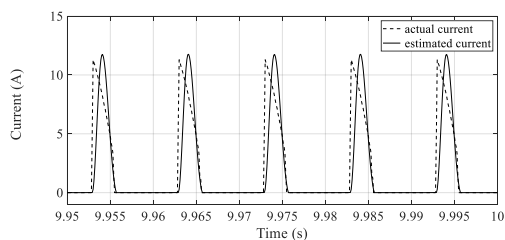


รูปที่ 8 กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของวงจรเรียงกระแส

กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้จากการคำนวณของหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย และที่ได้จากการประมาณค่าของตัวสังเกตโหมดการเลื่อน (ผลการจำลองสถานการณ์)

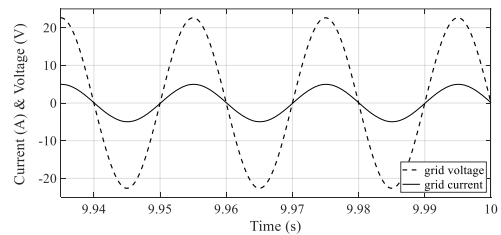


รูปที่ 9 การพิจารณารูปที่ 8 ในสถานะอยู่ตัว



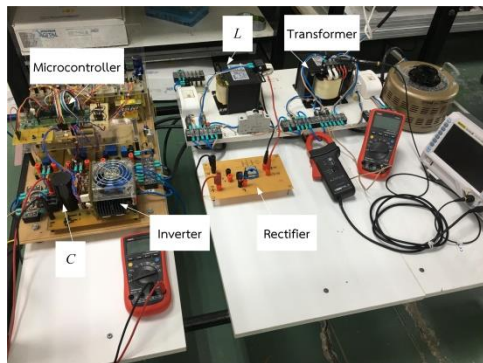
รูปที่ 10 กระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งของวงจรเรียงกระแสและที่ได้จากประมาณค่าของตัวสังเกตโหมดการเลื่อน (ผลการจำลองสถานการณ์)

กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริดเอซี (i_g) ที่มีค่ายอด 5 A โดยประมาณจะมีมุมเฟสที่ตรงกับหรือชิงโครโนซ์กับแรงดันกริดเอซี (v_g) ที่แสดงในรูปที่ 11 โดยแกนตั้งมีสเกล 10V/div (10 โวลต์ต่อช่อง) และ 10A/div (10 แอมแปร์ต่อช่อง) กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริดมีความราบเรียบมาก และไม่มีสัญญาณยอดแหลม (spike) ดังนั้นกริดเอซีมีตัวประกอบกำลังเป็นหนึ่งและทำหน้าที่เหมือนกับโหลดตัวต้านทาน กริดเอซีจึงได้รับกำลังงานเฉลี่ยจากวงจรเรียงกระแส

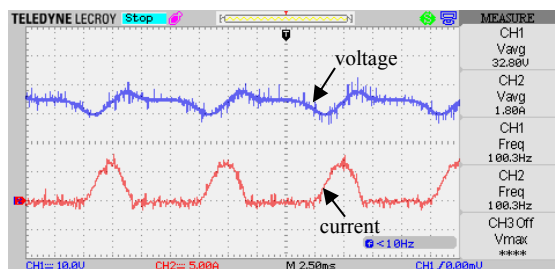


รูปที่ 11 แรงดันกริดและกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริด (ผลการจำลองสถานการณ์)

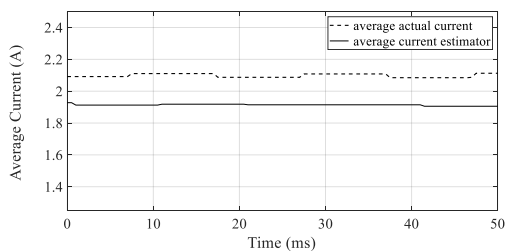
ชุดทดลองที่ใช้งานแสดงในรูปที่ 12 ในการทดลองการคำนวณสถานะของการสวิตช์สมมูลจะเลือกใช้ $V_{oc,PV} = 100$ V เพราะการคำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยและการประมาณค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้ามีความผิดพลาดน้อย เมื่อพิจารณาการทดลองหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย วงจรเรียงกระแสให้แรงดันดีซีขั้วหนึ่งที่มีความพลัฟที่มีความถี่ 100 Hz และมีค่าเฉลี่ย 32.8 V และจ่ายกระแสไฟฟ้าดีซีขั้วหนึ่งที่มีลักษณะคล้ายครึ่งคลื่น (half wave) รายคาบที่มีค่ายอด 6 A โดยประมาณที่แสดงในรูปที่ 13 กระแสไฟฟ้าดีซีมีค่าเฉลี่ย $i_{pv_avg} \approx 1.8$ A และกระแสไฟฟ้าดีซีขั้วหนึ่งใช้ช่วงระยะเวลาสั้น ๆ ในการเพิ่มขึ้นถึงค่ายอดในแต่ละรอบ เพราะวงจรเรียงกระแสมีด้านอินพุตที่เชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันเอซีที่มีความเหนี่ยวนำกริด และหม้อแปลงแปรแรงดันได้หรือหม้อแปลงรวมขดลวดที่มีด้านปฐมภูมิเชื่อมต่อกับกริดเอซี จะทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดันเอซี เช่นเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากวงจรเรียงกระแสจะให้ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้า $i_{pv_avg} \approx 2.1$ A โดยประมาณ และหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยคำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย $i_{pv_avg} \approx 1.95$ A ที่แสดงในรูปที่ 14



รูปที่ 12 ชุดทดลองวงจรเรียงกระแสและอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกิต

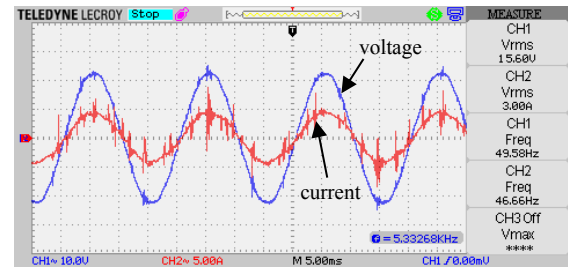


รูปที่ 13 แรงดันดีซีขณะหนึ่ง (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้าดีซีขณะหนึ่ง (สีแดง) ของวงจรเรียงกระแส (ผลการทดลอง)



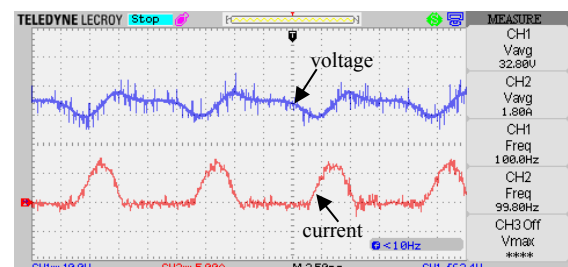
รูปที่ 14 กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของวงจรเรียงกระแสที่ได้จากการวัดและที่ได้จากการคำนวณของหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย (ผลการทดลอง)

กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริดเอซี (i_g) ที่มีค่าอยู่ 4 A โดยประมาณจะมีมุมเฟสที่ตรงกับหรือชิงโครไนซ์กับแรงดันกริดเอซี (v_g) ที่มีค่าอยู่ 22 V โดยประมาณที่แสดงในรูปที่ 15 ดังนั้นกริดเอซีได้รับกำลังงานเฉลี่ยจากวงจรเรียงกระแส แต่กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริดมีสัญญาณยอดแหลม

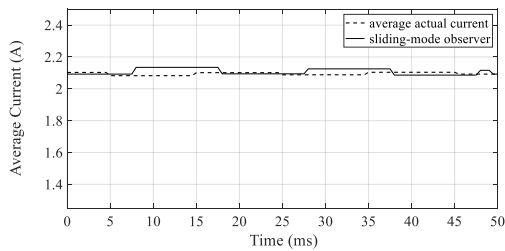


รูปที่ 15 แรงดันกริด (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริด (สีแดง) (ผลการทดลอง)

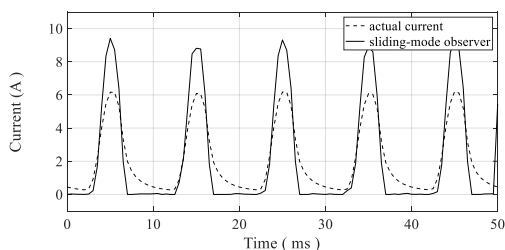
เมื่อพิจารณาการทดลองตัวสังเกตโหมดการเลื่อนอันดับหนึ่งและการเฉลี่ยกระแสไฟฟ้า วงจรเรียงกระแสให้แรงดันดีซีขณะหนึ่งและจ่ายกระแสไฟฟ้าดีซีขณะหนึ่งที่มีค่าอยู่ 6 A โดยประมาณ ที่แสดงในรูปที่ 16 กระแสไฟฟ้าดีซีมีค่าเฉลี่ย $i_{pv_avg} \approx 1.8$ A เช่นเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากวงจรเรียงกระแสให้ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้า $i_{pv_avg} \approx 2.1$ A โดยประมาณที่แสดงในรูปที่ 17 ตัวสังเกตโหมดการเลื่อนประมาณค่ากระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งที่มีค่าอยู่ 9 A โดยประมาณที่แสดงในรูปที่ 18 แต่การเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าประมาณค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้า $i_{pv_avg} \approx 2.1$ A โดยประมาณที่แสดงในรูปที่ 17 ตัวสังเกตโหมดการเลื่อนประมาณค่ากระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งที่มีค่าอยู่มากกว่าค่าอยู่ของกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากวงจรเรียงกระแส แต่มีค่าเฉลี่ยเกือบเท่ากับค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากวงจรเรียงกระแสที่ได้จากการวัดที่แสดงในรูปที่ 17



รูปที่ 16 แรงดันดีซีขณะหนึ่ง (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้าดีซีขณะหนึ่ง (สีแดง) ของวงจรเรียงกระแส (ผลการทดลอง)



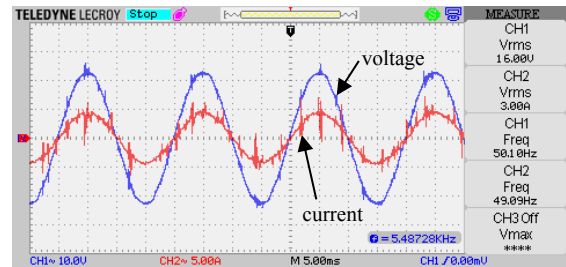
รูปที่ 17 กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของวงจรเรียงกระแสที่ได้จากการวัดและที่ได้จากการประมาณค่าของตัวสังเกตโหมดการเลื่อน (ผลการทดลอง)



รูปที่ 18 กระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งของวงจรเรียงกระแสที่ได้จากการวัดและที่ได้จากการประมาณค่าของตัวสังเกตโหมดการเลื่อน (ผลการทดลอง)

กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริดเอซี (i_g) ที่มีค่าอยู่ 4 A โดยประมาณจะมีมุมเฟสที่ตรงกับแรงดันกริดเอซี (v_g) ที่มีค่าอยู่ 22 V โดยประมาณที่แสดงในรูปที่ 19 ดังนั้นกริดได้รับกำลังงานเฉลี่ยจากวงจรเรียงกระแส แต่กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริดมีสัญญาณยอดแหลม เมื่อตัวสังเกตโหมดการเลื่อนได้รับกระแสไฟฟ้ากริดเอซี (i_g) ที่ได้จากการวัดสัญญาณยอดแหลมที่ปะปนในสัญญาณวัดกระแสไฟฟ้ากริดจะมีผลกระทบถึงการประมาณค่ากระแสไฟฟ้าขณะหนึ่งของวงจรเรียงกระแส เนื่องจากตัวสังเกตโหมดการเลื่อนมีพลวัตของการประมาณค่ากระแสไฟฟ้าที่รวดเร็ว สัญญาณยอดแหลมที่ปะปนในสัญญาณวัดอาจจะเป็นสาเหตุหนึ่งของความผิดพลาดในการประมาณค่ากระแสไฟฟ้า

ผลการทดลองได้แสดงถึงตัวสังเกตโหมดการเลื่อนและการเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าที่ประมาณค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่มีความผิดพลาดน้อยกว่าและหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่คำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย



รูปที่ 19 แรงดันกริด (สีน้ำเงิน) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ากริด (สีแดง) (ผลการทดลอง)

ที่มีความผิดพลาดมากกว่าแต่หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยมีโครงสร้างที่ซับซ้อนน้อยกว่า เพราะหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยคำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยโดยตรง ผลการทดลองได้แสดงถึงความเป็นไปได้ในการใช้งานหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยแทนที่เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแหล่งจ่ายกำลังดีซี และผลการจำลองสถานการณ์จะสอดคล้องกับผลการทดลอง แต่ผลการจำลองสถานการณ์ให้การคำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยและการประมาณค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่มีความผิดพลาดมากกว่า กล่าวคือในผลการจำลองสถานการณ์ หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่มีความผิดพลาด 0.34 A โดยประมาณ (มีความผิดพลาด 17%) ในผลการทดลอง หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่มีความผิดพลาด 0.2 A โดยประมาณ (มีความผิดพลาด 7%) และผลการจำลองสถานการณ์ ตัวสังเกตโหมดการเลื่อนและการเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าประมาณค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่มีความผิดพลาด 0.24 A โดยประมาณ (มีความผิดพลาด 12%) ในผลการทดลอง ตัวสังเกตโหมดการเลื่อนและการเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าประมาณค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่มีความผิดพลาด 0.1 A โดยประมาณ (มีความผิดพลาด 2%) ผลการจำลองสถานการณ์และผลการทดลองจึงแสดงถึงความเป็นไปได้มากหรือน้อยเบื้องต้นในการใช้งานหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยแทนที่เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้า

6. ความผิดพลาดของกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้จากการคำนวณ และการประมาณค่าในการจำลองสถานการณ์

ในการจำลองสถานการณ์ วงจรเรียงกระแสเฟสเดียวจ่ายกระแสไฟฟ้าดีซีชนิดหนึ่ง i_{pv} ในลักษณะรายคาบที่เพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันจากศูนย์ถึงค่ายอด (peak) และลดลงอย่างต่อเนื่องถึงศูนย์ที่แสดงในรูปที่ 7 ความไม่ต่อเนื่องที่เกิดจากการเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันดังกล่าวจะเป็นสาเหตุที่ทำให้แรงดันดีซีชนิดหนึ่ง v_{pv} มีค่าเปลี่ยนแปลงที่ไม่ต่อเนื่องในเวลาเดียวกัน นั่นคือ $\frac{dv_{pv}}{dt}$ มีค่าเปลี่ยนแปลงจากค่าลบไปเป็นค่าบวกอย่างฉับพลัน การเปลี่ยนแปลงของ $\frac{dv_{pv}}{dt}$ อย่างฉับพลันอาจจะเป็นสาเหตุที่ทำให้หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยคำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่มีความผิดพลาดมากกว่า และตัวสังเกตโหมดการเลื่อนและการเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าประมาณค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่มีความผิดพลาดมากกว่าเช่นเดียวกัน

แต่ในการทดลอง วงจรเรียงกระแสจ่ายกระแสไฟฟ้าดีซีชนิดหนึ่ง i_{pv} ในลักษณะรายคาบที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจากศูนย์ถึงค่ายอด (peak) ในช่วงระยะเวลาหนึ่งและลดลงอย่างต่อเนื่องถึงศูนย์ที่แสดงในรูปที่ 13 และ 16 การเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องนี้จะเป็สาเหตุที่ทำให้แรงดันดีซีชนิดหนึ่ง v_{pv} มีค่าเปลี่ยนแปลงที่ต่อเนื่อง นั่นคือ $\frac{dv_{pv}}{dt}$ มีค่าเปลี่ยนแปลงจากค่าลบไปเป็นศูนย์และเปลี่ยนแปลงจากศูนย์ไปเป็นค่าบวกอย่างต่อเนื่อง การเปลี่ยนแปลงของ $\frac{dv_{pv}}{dt}$ อย่างต่อเนื่องอาจจะเป็นสาเหตุที่ทำให้หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยคำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่มีความผิดพลาดน้อยกว่า และตัวสังเกตโหมดการเลื่อนและการเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าประมาณค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่มีความผิดพลาดน้อยกว่าเช่นเดียวกัน เพราะหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยและตัวสังเกตโหมดการเลื่อนมีโครงสร้างที่พัฒนามาจากแบบจำลองพลวัตในสมการที่ (1) ถ้าวจรเรียงกระแส

จ่ายกระแสไฟฟ้าดีซีชนิดหนึ่ง i_{pv} ที่มีความต่อเนื่อง และอินเวอร์เตอร์ได้รับกระแสไฟฟ้าที่มีความต่อเนื่องที่ไหลเข้าด้านอินพุต $\frac{dv_{pv}}{dt}$ จะมีค่าเปลี่ยนแปลงที่ต่อเนื่องแบบจำลองพลวัตในสมการที่ (1) จะมีคำตอบหรือผลเฉลย (solution) ที่มีความเป็นไปได้เพียงอย่างเดียว (uniqueness) [5]

เมื่อวงจรเรียงกระแสจ่ายกระแสไฟฟ้าดีซีชนิดหนึ่ง i_{pv} ที่มีความไม่ต่อเนื่องในการจำลองสถานการณ์ $\frac{dv_{pv}}{dt}$ จะมีค่าเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันและแบบจำลองพลวัตในสมการที่ (1) จะไม่มีเงื่อนไขลิปชิตซ์ (Lipschitz condition) ในเวลาเดียวกัน [5] ผลเฉลยจึงไม่มีความเป็นไปได้เพียงอย่างเดียว การใช้แบบจำลองพลวัตนี้คำนวณหากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณในสมการที่ (6) จึงมีความผิดพลาดมากกว่า และเมื่อวงจรเรียงกระแสจ่ายกระแสไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่มีความไม่ต่อเนื่องหรือมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วมาก (อัตราการเปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลาสูงมาก) ตัวสังเกตโหมดการเลื่อนและการเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าจะประมาณค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่มีความผิดพลาดมากกว่าเช่นเดียวกัน

7. สรุป

หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยคำนวณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของวงจรเรียงกระแสโดยตรง ตัวสังเกตโหมดการเลื่อนอันดับหนึ่งและการเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าประมาณค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากวงจรเรียงกระแส หน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยให้ความผิดพลาดของการคำนวณค่าเฉลี่ยมากกว่า ตัวสังเกตโหมดการเลื่อนและการเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าให้ความผิดพลาดของการประมาณค่าเฉลี่ยน้อยกว่า ตัวสังเกตโหมดการเลื่อนจึงมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าสมรรถนะของหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย แต่ผลการทดลองได้แสดงถึงความเป็นไปได้ในการใช้งานหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยแทนที่เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าของวงจรเรียงกระแสที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายกำลังดีซี ผลการจำลอง

สถานการณ์มีความใกล้เคียงโดยประมาณกับผลการทดลอง งานวิจัยต่อไปจะใช้งานหน่วยประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยแทนที่เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแผงพีวีในระบบควบคุมการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า

8. กิตติกรรมประกาศ

การสร้างอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกิตได้รับเงินอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และเงินกองทุนนวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์ สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี และโครงการมหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติของสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] Remus Teodorescu, Marco Liserre and Pedro Rodriguez, *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems*, A John Wiley & Sons Ltd, Southern Gate, Chichester, West Sussex, PO19 8SQ, 2011.
- [2] ณรงค์เดช ตั้งกระโทก และคณะ, “การควบคุมวงปิดของอินเวอร์เตอร์พีวีที่เชื่อมต่อกิตเฟสเดียว,” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 40, ชลบุรี, 15-17 พฤศจิกายน 2560, หน้า 146-149
- [3] ถาวร หินชุย และคณะ, “การควบคุมวงจรรินเวอร์เตอร์ PWM เฟสเดียวที่เชื่อมต่อกิตเอชซีด้วย TMS320F28335,” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 38, พระนครศรีอยุธยา, 18-20 พฤศจิกายน 2558, หน้า 253-256
- [4] Kim, I. -S. , and Youn, M. -J. , “ Variable-Structure Observer for Solar-Array Current Estimation in a Photovoltaic Power-Generation System,” IEE Proc.–Electr. Power Appl., vol. 152(4), pp. 953-959, July 2005.

- [5] Hassan K Khalil, *Nonlinear Systems*, Third Edition, Pearson Education Prentice-Hall International Inc., Upper Saddle River, New Jersey 07458, USA, 2000.

การประหยัดพลังงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น ด้วยวิธีการหาค่าเหมาะที่สุด Energy Saving for Separately Excited DC Motor via Optimization Method

จิรวรรณ หอมจันทร์¹ กองพล อารีรักษ์^{1*} ทิดารัตน์ อารีรักษ์² กองพัน อารีรักษ์¹

¹กลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

²สาขาวิชาคณิตศาสตร์ สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Jeerawan Homjan¹ Kongpol Areerak^{1*} Tidarut Areerak² Kongpan Areerak¹

¹Power electronics, Energy, Machines, and Control Research Group,

School of Electrical Engineering, Institute of Engineering,

Suranaree University of Technology, Nakhon Rachasima, 30000

² School of Mathematics, Institute of Science,

Suranaree University of Technology, Nakhon Rachasima, 30000

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

(Received: May 19, 2019; Accepted: August 20, 2019)

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการเปรียบเทียบการประหยัดพลังงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น (Separately Excited DC Motor) โดยพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างวิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์วิธีดั้งเดิม กับวิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์ที่อาศัยการหาค่าเหมาะที่สุด (Optimization Method : OM) ซึ่งวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดมีการนำหลักการทางคณิตศาสตร์เข้ามาใช้ในการหาค่ากระแสสนามที่ทำให้เกิดค่ากำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด เมื่อกำลังงานสูญเสียมีค่าน้อยจะส่งผลต่อการประหยัดพลังงานในการขับเคลื่อนมอเตอร์ ทำให้การใช้พลังงานในการขับเคลื่อนมอเตอร์มีค่าน้อยลง ส่งผลให้เกิดการประหยัดพลังงานในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น ซึ่งจากผลการทดสอบเปรียบเทียบการขับเคลื่อนมอเตอร์ทั้งสองวิธี พบว่า วิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์ที่อาศัยการหาค่าเหมาะที่สุดให้ผลการประหยัดพลังงาน ได้สูงสุดถึง 85.92 เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ: มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น กำลังงานสูญเสีย วิธีการหาค่าเหมาะที่สุด กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุด

ABSTRACT

The paper presents the comparison results about the energy saving of separately excited DC motor. The conventional and optimization methods are concerned for this comparison. The optimization method is applied to calculate the appropriate field current for loss minimization or energy

saving. The experimental results show that the drive approach using the optimization method can save the energy consumed by the motor to 85.92% in maximum.

Keyword: Separately excited DC motor, power loss, optimization method, loss minimization.

1. บทนำ

บทความนี้นำเสนอเกี่ยวกับการประหยัดพลังงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น เนื่องมาจากปัจจุบันมีการใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเพิ่มมากขึ้นทั้งในภาคครัวเรือน และภาคอุตสาหกรรม ซึ่งมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นนิยมใช้กับงานขับเคลื่อนที่มีแรงบิดสูง งานยกของ อุดลาก เป็นต้น และมีคุณสมบัติที่สำคัญในการควบคุมความเร็วรอบที่ง่าย เพราะสามารถแยกการควบคุมในแต่ละวงจรของมอเตอร์ได้โดยอิสระ [1] ในบทความได้นำเสนอการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ที่พิจารณาเรื่องการลดกำลังงานสูญเสีย โดยการหาค่าพารามิเตอร์ของสมการกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น ใช้วิธีทางปัญญาประดิษฐ์ ที่เรียกว่า วิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว (Adaptive Tabu Search : ATS) เมื่อทราบค่าพารามิเตอร์ของสมการกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น จะนำค่าดังกล่าวมาใช้ในการคำนวณหาค่ากระแสสนามด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์เพื่อให้เกิดการประหยัดพลังงาน ซึ่งในอดีตมีผู้วิจัยเกี่ยวกับการประหยัดพลังงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นกันอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน โดยใช้วิธีการควบคุมกระแสสนามเพื่อให้เกิดกำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดด้วยวิธีการต่าง ๆ เช่น การใช้ตัวควบคุมเพื่อคำนวณหาค่ากระแสสนามโดยใช้แบบจำลองแม่เหล็ก [2] การใช้ตัวควบคุมที่สามารถวัดกำลังงานในการขับเคลื่อนและค้นหาค่ากระแสสนามที่เหมาะสม [3-5] และการใช้วิธีฐานแบบจำลองในการหาค่ากระแสสนามสำหรับการประหยัดพลังงาน [6] เป็นต้น โดยบทความนี้นำเสนอวิธีหาค่าที่เหมาะสมที่สุด เพื่อคำนวณหาค่ากระแสสนามที่เหมาะสมสำหรับการประหยัดพลังงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ชนิดแยกกระตุ้น โดยในบทความนี้จะใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการหาค่ากระแสสนาม เพื่อใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

การนำเสนอเนื้อหาในบทความ ประกอบด้วยทฤษฎีกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น การใช้วิธีหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับประหยัดพลังงาน ผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นด้วยวิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์วิธีดั้งเดิม และวิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์ที่อาศัยการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด และส่วนสุดท้ายเป็นการอภิปรายผลและสรุปผล

2. กำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

กำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น [7-9] ประกอบด้วย กำลังงานสูญเสียเนื่องจากขดลวด (copper losses) กำลังงานสูญเสียจากแรงเสียดทาน และแรงต้านอากาศ (friction and windage losses) กำลังงานสูญเสียจากแกนเหล็ก (core losses) กำลังงานสูญเสียจากแปรงถ่าน (brush losses) และกำลังงานสูญเสียจากภาระการใช้งาน (stray losses)

2.1 กำลังงานสูญเสียเนื่องจากขดลวด

เป็นกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในขดลวดทองแดง เนื่องจากกระแสไหลผ่านความต้านทานของขดลวดทองแดง ทำให้เกิดกำลังงานสูญเสีย และมีค่าไม่คงที่ขึ้นอยู่กับกระแสที่ไหลผ่านขดลวดยกกำลังสอง [1] ซึ่งกำลังงานสูญเสียดังกล่าวเกิดขึ้นทั้งในขดลวดอาร์เมเจอร์ และขดลวดสนาม แสดงได้ดังสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ

$$P_a = i_a^2 R_a \quad (1)$$

$$P_f = i_f^2 R_f \quad (2)$$

โดยที่ P_a คือ กำลังงานสูญเสียที่ขดลวดอาร์เมเจอร์ (W)

i_a คือ กระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ (A)

R_a คือ ความต้านทานอาร์เมเจอร์ (Ω)

P_f คือ กำลังงานสูญเสียที่ขดลวดสนาม (W)

i_f คือ กระแสไฟฟ้าสนาม (A)

R_f คือ ความต้านทานสนาม (Ω)

2.2 กำลังงานสูญเสียจากแรงเสียดทาน และแรงต้านอากาศ

กำลังงานสูญเสียประเภทนี้เป็นกำลังงานสูญเสียที่เกิดจากความเสียดทานระหว่างตลับลูกปืนกับแกนของมอเตอร์ (bearing friction) ความเสียดทานระหว่างหน้าสัมผัสของแปรงถ่านกับหน้าสัมผัสของคอมมิวเตเตอร์ (brush friction) และความเสียดทานระหว่างอากาศในช่องว่างอากาศ (airgap) ที่อยู่ใตสนามแม่เหล็กระหว่างขั้วเหนือและขั้วใต้ กับแกนอาร์เมเจอร์ (armature core) กำลังงานสูญเสียนี้ทำให้เกิดความร้อน ส่งผลให้ประสิทธิภาพของมอเตอร์ลดลง และกำลังงานสูญเสียจากแรงเสียดทานนี้จะมีค่ามากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับความเร็วของมอเตอร์ [1] ซึ่งสามารถแสดงสมการความสัมพันธ์ของกำลังงานสูญเสียได้ดังสมการที่ (3)

$$P_m = K_m N^3 \quad (3)$$

โดยที่ P_m คือ กำลังงานสูญเสียจากแรงเสียดทานและแรงต้านอากาศ (W)

K_m คือ ค่าคงที่ของกำลังงานสูญเสียจากแรงเสียดทาน และแรงต้านอากาศ

N คือ ความเร็วรอบมอเตอร์ (rpm)

2.3 กำลังงานสูญเสียจากแกนเหล็ก

กำลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก (core losses) เป็นกำลังงานที่เกิดขึ้นเนื่องจากมีเส้นแรงแม่เหล็กตัดกับแกน

เหล็ก จะทำให้เกิดกระแสไหลวน (eddy current loss) อยู่ในแกนเหล็กเป็นการสูญเสียที่สูญเสียเปล่า และการเปลี่ยนแปลงทิศทางของสนามแม่เหล็กทำให้เกิดการสูญเสียที่เรียกว่า ฮิสเตอร์รีซิส (hysteresis loss) [11] กำลังงานสูญเสียจากแกนเหล็กแสดงได้ดังสมการที่ (4)

$$P_i = K_h \omega i_f^2 + K_e \omega^2 i_f^2 \quad (4)$$

โดยที่ P_i คือ กำลังงานสูญเสียจากแกนเหล็ก (W)

K_h คือ ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับวัสดุ

K_e คือ ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับความเหนียวของวัสดุ

ω คือ ความเร็วรอบของมอเตอร์ (rad/s)

2.4 กำลังงานสูญเสียจากแปรงถ่าน

กำลังงานสูญเสียจากแปรงถ่านเกิดจากค่าความต้านทานของแปรงถ่าน เมื่อกระแสไหลผ่านแปรงถ่านจะเกิดแรงดันที่แปรงถ่าน เมื่อแรงดันนี้คูณกับกระแสที่ไหลผ่าน จะเกิดกำลังงานสูญเสียที่ตัวแปรงถ่าน กำหนดให้ค่าแรงดันตกคร่อมเท่ากับ 1 โวลต์ ต่อแปรงถ่าน 1 ชุด ในกรณีที่มีแปรงถ่านบวกและลบ จำนวนทั้งหมด 2 ชุด จะได้แรงดันตกคร่อมแปรงถ่านรวมทั้งหมด 2 โวลต์ [9] สามารถแสดงความสัมพันธ์ของกำลังงานสูญเสียได้ดังสมการที่ (5)

$$P_{BD} = V_e i_a \quad (5)$$

โดยที่ P_{BD} คือ กำลังงานสูญเสียจากแปรงถ่าน (W)

V_e คือ แรงดันตกคร่อมแปรงถ่านมีค่าเท่ากับ 2 โวลต์

2.5 กำลังงานสูญเสียจากภาระการใช้งาน

กำลังงานสูญเสียประเภทนี้เป็นผลมาจากการบิดเบี้ยวของฟลักซ์แม่เหล็กเนื่องจากปฏิกิริยาอาร์เมเจอร์ และกระแสลัดวงจรในกระบวนการคอมมิวเตชัน [8] ซึ่งกำลังงานสูญเสียนี้มีค่าแปรผันโดยตรงกับขนาดของ

กระแสไหลและความเร็วรอบของมอเตอร์ [1] สามารถแสดงความสัมพันธ์ของกำลังงานสูญเสียจากภาระการใช้งาน ได้ดังสมการที่ (6)

$$P_s = K_{st} i_a^2 N^2 \quad (6)$$

โดยที่ P_s คือ กำลังงานสูญเสียจากภาระการใช้งาน (W)

K_{st} คือ ค่าคงที่ของกำลังงานสูญเสียจากภาระการใช้งาน

จากการอธิบายกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ข้างต้น สามารถพิจารณากำลังงานสูญเสียรวมในมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น แสดงได้ดังสมการที่ (7)

$$P_{loss} = i_a^2 R_a + i_f^2 R_f + K_m N^3 + K_h \omega i_f^2 + K_e \omega^2 i_f^2 + 2i_a + K_{st} \frac{60^2}{4\pi^2} i_a^2 \omega^2 \quad (7)$$

ถ้าไม่พิจารณากำลังงานสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานและแรงต้านอากาศ ที่มีค่าน้อยมากสำหรับมอเตอร์ที่พิจารณาในบทความนี้ เนื่องจากมอเตอร์มีขนาดเล็ก [7] สามารถเขียนสมการกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ได้ใหม่ ดังสมการที่ (8)

$$P_{loss} = i_a^2 R_a + i_f^2 R_f + K_h \omega i_f^2 + K_e \omega^2 i_f^2 + 2i_a + K_{st} \frac{60^2}{4\pi^2} i_a^2 \omega^2 \quad (8)$$

การคำนวณกำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นในสมการที่ (8) มีพารามิเตอร์ บางตัวที่ไม่ทราบค่า ได้แก่ ค่าคงที่ของกำลังงานสูญเสียฮิสเตอร์ซิส (K_h) ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับความเหนี่ยวนำของวัสดุจากกำลังงานสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (K_e) และค่าคงที่ของกำลังงานสูญเสียจากภาระการใช้งาน (K_{st}) ในบทความนี้ได้นำวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวในการหาค่าพารามิเตอร์ทั้ง 3 ค่า เนื่องจากการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวเป็นอัลกอริทึมที่ถูกพัฒนาขึ้น

จากอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบู่ โดยเพิ่ม 2 กลไกเข้าไปในการค้นหาแบบตาบู่ คือ การเดินย้อนรอย (back tracking) และการปรับอัตราค่าการค้นหา เพื่อให้วิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวมีประสิทธิภาพมากขึ้น และวิธีการค้นหานี้มีการทดสอบฟังก์ชันมาตรฐาน คือ Bohachevsky, Rastrigin, Shekel's Shubert และ Schwefel [14-19] เพื่อให้มั่นใจได้ว่าจะสามารถเข้าถึงผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดในเวลาที่จำกัด การหาค่าพารามิเตอร์ทั้ง 3 ค่า ที่ได้จากการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวได้แสดงไว้ใน [20] ซึ่งผลการค้นหาดังกล่าวเป็นดังนี้

$$K_h = 2.9386 \frac{W \cdot s}{rad \cdot T \cdot m^3}$$

$$K_e = 0.0041 \frac{W \cdot s^2}{T \cdot rad^2 \cdot m^5}$$

$$K_{st} = 5.29096 \times 10^{-6} \frac{W \cdot s^2}{rad^2 \cdot A^2}$$

ในกรณีที่มอเตอร์ที่พิจารณามีขนาดใหญ่ จะพิจารณาค่ากำลังงานสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานและแรงต้านอากาศ ดังสมการที่ (7)

3. การใช้วิธีหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับประหยัดพลังงาน

วิธีการหาค่าเหมาะที่สุด (Optimization Method : OM) สำหรับการประหยัดพลังงาน เป็นวิธีทางคณิตศาสตร์ ที่อาศัยการหาอนุพันธ์ของสมการกำลังงานสูญเสียเทียบกับกระแสสนามให้เท่ากับศูนย์ เพื่อให้ได้ค่ากระแสสนามที่มีค่าน้อยที่สุด

บทความนี้ใช้สมการกำลังงานสูญเสียสมการที่ (8) ในการหาค่ากระแสสนามที่มีค่าน้อยที่สุดสำหรับการประหยัดพลังงานในการขับเคลื่อนมอเตอร์ ที่ค่าความเร็วและแรงบิดต่าง ๆ โดยค่าพารามิเตอร์ที่ใช้มีสองส่วน คือ ส่วนที่ 1 ค่าความต้านทานที่ได้จากการวัดฝั่งอาร์เมเจอร์ 8.8 โอห์ม และฝั่งสนาม 654 โอห์ม ส่วนที่ 2 คือ

ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว มีค่าดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในสมการกำลังงานสูญเสีย

พารามิเตอร์	ค่า
R_a	8.8 Ω
R_f	654 Ω
K_h	2.9386 $\frac{\text{W} \cdot \text{s}}{\text{rad} \cdot \text{T} \cdot \text{m}^3}$
K_e	0.0041 $\frac{\text{W} \cdot \text{s}^2}{\text{T} \cdot \text{rad}^2 \cdot \text{m}^5}$
K_{st}	$5.29096 \times 10^{-6} \frac{\text{W} \cdot \text{s}^2}{\text{rad}^2 \cdot \text{A}^2}$

จากการศึกษาของ Kusko and Galler [21] ได้กำหนดว่ากระแสอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (9) ดังนี้

$$i_a = \frac{T}{K'_e K_f i_f} \quad (9)$$

แทนค่าสมการที่ (9) ลงในสมการที่ (8) และทำการจัดรูปสมการใหม่ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (10)

$$P_{loss} = \left(R_a + K_{st} \left(\frac{60\omega}{2\pi} \right)^2 \right) \cdot \left(\frac{T}{K'_e K_f i_f} \right)^2 + \frac{2T}{K'_e K_f i_f} + (R_f + K_h \omega + K_e \omega^2) i_f^2 \quad (10)$$

จากวัตถุประสงค์ของการวิจัย คือ ต้องการคำนวณค่ากระแสสนามที่ทำให้กำลังงานสูญเสียมีค่าน้อยที่สุด ดังนั้น จึงดำเนินการหาอนุพันธ์ของกำลังงานสูญเสีย ในสมการที่ (10) เทียบกับกระแสสนามให้เท่ากับศูนย์ ดังสมการที่ (11)

$$\frac{\partial P_{loss}}{\partial i_f} = \frac{\partial}{\partial i_f} \left(R_a + K_{st} \left(\frac{60\omega}{2\pi} \right)^2 \right) \cdot \left(\frac{T}{K'_e K_f i_f} \right)^2 + \frac{2T}{K'_e K_f i_f} + (R_f + K_h \omega + K_e \omega^2) i_f^2 = 0$$

จะได้

$$\frac{\partial P_{loss}}{\partial i_f} = -2 \left(R_a + K_{st} \left(\frac{60\omega}{2\pi} \right)^2 \right) \cdot \left(\frac{T}{K'_e K_f} \right) \cdot \frac{1}{i_f^3} - \frac{2T}{K'_e K_f i_f^2} + 2(R_f + K_h \omega + K_e \omega^2) i_f = 0 \quad (14)$$

จัดรูปสมการที่ (11) ได้ดังสมการที่ (12)

$$(R_f + K_h \omega + K_e \omega^2) i_f^4 - \frac{T}{K'_e K_f} i_f - \left(R_a + K_{st} \left(\frac{60\omega}{2\pi} \right)^2 \right) \cdot \left(\frac{T}{K'_e K_f} \right)^2 = 0 \quad (12)$$

ทำการกำหนดตัวแปรใหม่ ดังนี้

$$A = R_f + K_h \omega + K_e \omega^2$$

$$D = -\frac{T}{K'_e K_f}$$

$$E = -\left(R_a + K_{st} \left(\frac{60\omega}{2\pi} \right)^2 \right) \cdot \left(\frac{T}{K'_e K_f} \right)^2$$

ดังนั้น สมการที่ (12) สามารถจัดรูปใหม่ได้ดังสมการที่ (13)

$$A i_f^4 + D i_f + E = 0 \quad (13)$$

จากสมการที่ (13) เป็นสมการพหุนามกำลังสี่ สามารถแก้สมการด้วยวิธีการของ Lodovico Ferrari [22] วิธีการแก้สมการที่ (13) อธิบายเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1:

$$\text{คำนวณ } \beta \text{ จาก } \beta = \frac{D}{A} \text{ และ } \gamma \text{ จาก } \gamma = \frac{E}{A}$$

ขั้นตอนที่ 2:

$$\text{ใช้สมการ } P = -\gamma \text{ และ } Q = -\frac{\beta^2}{8} \text{ คำนวณค่า } P \text{ และ } Q$$

ขั้นตอนที่ 3:

$$\text{คำนวณค่า } R \text{ จาก } R = -\frac{Q}{2} \pm \sqrt{\frac{Q^2}{2} + \frac{P^3}{27}}$$

ขั้นตอนที่ 4:

$$\text{ใช้ค่า } R \text{ จากขั้นตอนที่ 3 คำนวณค่า } U \text{ จาก } U = \sqrt[3]{R}$$

ขั้นตอนที่ 5:

$$\text{คำนวณค่า } y \text{ จากสมการที่ (14)}$$

$$y = \begin{cases} U - \frac{P}{3U}, & \text{if } U \neq 0 \\ U - \sqrt[3]{Q}, & \text{if } U = 0 \end{cases} \quad (14)$$

ขั้นตอนที่ 6:

$$\text{คำนวณค่า } W \text{ โดยใช้สมการ } W = 2y$$

ขั้นตอนที่ 7:

คำนวณค่า i_f ที่ทำให้ค่ากำลังงานสูญเสียมีค่าน้อยที่สุด ดังสมการที่ (15)

$$i_f = \frac{\pm_s W \mp \sqrt{-\left(2y \pm_s \frac{2\beta}{W}\right)}}{2} \quad (15)$$

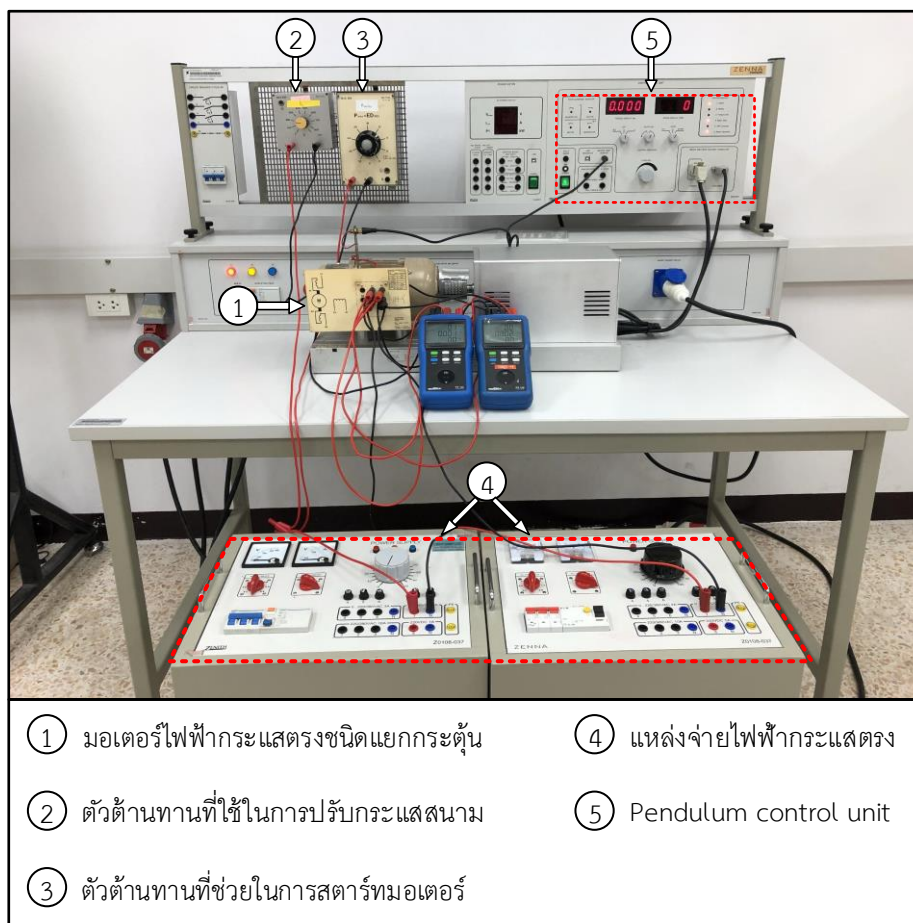
จากการคำนวณทั้ง 7 ขั้นตอน จะได้ค่ากระแสสนามที่ทำให้กำลังงานสูญเสียน้อยที่สุดในการขับเคลื่อนมอเตอร์ ค่ากระแสสนามที่ได้จากสมการที่ (15) จะได้คำตอบออกมาทั้งหมด 4 ค่า ซึ่งค่าจากกระแสสนามทั้ง 4 ค่าจะต้องเลือกเพียง 1 ค่า ที่นำไปใช้ในการคำนวณหาค่ากำลังงานสูญเสีย โดยเกณฑ์การเลือกคำตอบที่เหมาะสมคือ ค่ากระแสสนามต้องไม่ติดลบ ค่ากระแสสนามต้องไม่มีค่าเป็นศูนย์ และค่ากระแสสนามต้องมีค่าไม่เกินพิกัดหลังจากได้ค่ากระแสสนามแล้วจะต้องนำค่าที่ได้ไปแทนลงในสมการที่ (13) ถ้าค่ากระแสสนามดังกล่าวทำให้สมการเป็นจริง จึงสรุปได้ว่า ค่ากระแสสนามนั้นให้ค่ากำลังงานสูญเสียที่มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งทำให้เกิดการประหยัดพลังงาน

4. ผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นด้วยวิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์วิธีดั้งเดิม และวิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์ที่อาศัยการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

4.1 วิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์วิธีดั้งเดิม

การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นด้วยวิธีดั้งเดิม จะใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 2 ชุด ป้อนให้กับวงจรอาร์เมเจอร์ และวงจรสนาม โดยการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์สามารถแบ่งการควบคุมออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ 1 ที่ค่าความเร็วรอบตั้งแต่ศูนย์ถึงความเร็วพิกัด จะควบคุมค่าแรงดันอาร์เมเจอร์ และคงค่ากระแสสนามไว้ที่พิกัด กรณีที่ 2 ที่ค่าความเร็วรอบตั้งแต่พิกัดขึ้นไป จะปรับค่ากระแสสนาม และคงค่าแรงดันอาร์เมเจอร์ไว้ที่พิกัด

การทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นด้วยการขับเคลื่อนวิธีดั้งเดิม ได้ทำการทดสอบมอเตอร์ในห้องปฏิบัติการ แสดงได้ดังรูปที่ 1 โดยมอเตอร์



รูปที่ 1 การทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

ที่ใช้ในการทดสอบมีค่าพิกัด โดยฝั่งอาร์เมเจอร์มีแรงดัน 220 โวลต์ กระแส 2.2 แอมแปร์ ฝั่งสนามมีแรงดัน 220 โวลต์ กระแส 0.3 แอมแปร์ กำลังไฟฟ้า 370 วัตต์ ความเร็วรอบ 2,360 รอบต่อนาที โดยทำการทดสอบที่ ความเร็วรอบต่ำกว่าพิกัด (80% ของพิกัด) เท่ากับพิกัด และสูงกว่าพิกัด (120% ของพิกัด) ตามลำดับ ซึ่งจะได้ค่า กำลังงานอินพุตของการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีดั้งเดิม เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับกำลังงานอินพุตของวิธีการ ขับเคลื่อนมอเตอร์ที่อาศัยการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ดังตาราง ที่ 2

ค่ากำลังงานอินพุต และกำลังงานเอาต์พุตของ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น สามารถ คำนวณได้จากสมการที่ (16) และ (17) ตามลำดับ

$$P_{in} = v_a i_a + v_f i_f \quad (16)$$

$$P_{out} = T_L \omega \quad (17)$$

4.2 วิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์ที่อาศัยการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยก กระตุ้นด้วยวิธีการที่อาศัยการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด จะนำ ค่ากระแสสนามที่ได้จากการคำนวณมาใช้ในการควบคุม มอเตอร์ ที่ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์มีค่าต่ำกว่าพิกัด เท่ากับพิกัด และมากกว่าพิกัด

การทดสอบมอเตอร์จะเริ่มต้นจากการกำหนด ค่ากระแสสนามของมอเตอร์ให้ได้ค่าตามการคำนวณ จากนั้น ปรับค่าแรงดันอาร์เมเจอร์เพื่อทำการปรับค่า ความเร็วรอบของมอเตอร์ให้ได้ค่าตามที่ต้องการ โดยทำ การทดสอบในห้องปฏิบัติการ แสดงได้ดังรูปที่ 1

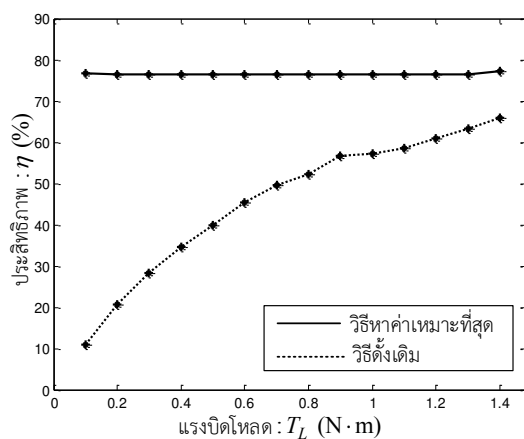
ตารางที่ 2 ผลการคำนวณเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานระหว่างวิธีดั้งเดิมกับวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

speed		T_L (N·m)	P_{out} (W)	วิธีดั้งเดิม				วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด				เปอร์เซ็นต์การ ประหยัด พลังงาน
%	rpm			i_f (A)	v_a (V)	P_m (W)	η (%)	i_f (A)	v_a (V)	P_m (W)	η (%)	
80	1880	0.1	19.69	0.30	161.40	174.30	11.03	0.08	45.55	25.70	76.61	85.25
100	2360		24.71	0.30	202.60	217.95	11.34	0.08	57.88	30.68	80.54	85.92
120	2832		29.66	0.20	220.00	222.46	11.33	0.09	70.93	35.62	83.27	83.99
80	1880	0.2	39.37	0.30	163.50	190.91	20.62	0.11	64.63	51.43	76.55	73.06
100	2360		49.43	0.30	205.10	239.10	20.67	0.11	82.13	61.39	80.52	74.33
120	2832		59.31	0.19	220.00	253.47	23.40	0.12	100.63	71.27	83.22	71.88
80	1880	0.3	59.06	0.30	165.90	208.18	28.37	0.13	79.29	77.16	76.54	62.94
100	2360		74.14	0.30	207.30	261.90	28.31	0.14	100.69	92.09	80.51	64.84
120	2832		88.97	0.16	220.00	304.76	29.19	0.15	123.40	106.93	83.20	64.91
80	1880	0.4	78.75	0.30	167.80	227.42	34.63	0.16	91.66	102.89	76.54	54.76
100	2360		98.86	0.30	209.60	286.50	34.51	0.16	116.38	122.81	80.50	57.13
120	2832		118.63	0.15	220.00	358.24	33.11	0.17	142.57	142.58	83.20	60.20
80	1880	0.5	98.44	0.30	169.20	246.87	39.88	0.17	102.51	128.62	76.54	47.90
100	2360		123.57	0.30	211.80	311.26	39.70	0.18	130.22	153.53	80.49	50.68
120	2832		148.28	0.17	220.00	362.53	40.90	0.19	159.47	178.24	83.19	50.83
80	1880	0.6	118.12	0.30	168.90	260.57	45.33	0.19	112.39	154.36	76.52	40.76
100	2360		148.28	0.30	210.40	321.43	46.13	0.20	142.65	184.23	80.49	42.68
120	2832		177.94	0.18	220.00	377.54	47.13	0.21	174.71	213.89	83.19	43.35
80	1880	0.7	137.81	0.30	170.50	278.10	49.55	0.21	121.41	180.08	76.53	35.24
100	2360		173.00	0.30	212.60	350.67	49.33	0.22	154.14	214.59	80.62	38.70
120	2832		207.60	0.16	220.00	457.11	45.42	0.23	188.77	249.56	83.19	45.41
80	1880	0.8	157.50	0.30	171.60	301.44	52.25	0.22	130.71	205.99	76.46	31.66
100	2360		197.71	0.30	212.00	368.95	53.59	0.23	164.84	245.67	80.48	33.41
120	2832		237.25	0.17	220.00	467.24	50.78	0.24	201.83	285.21	83.18	38.96
80	1880	0.9	177.19	0.30	171.40	312.82	56.64	0.23	137.77	231.56	76.52	25.98
100	2360		222.42	0.30	212.10	386.91	57.49	0.24	174.89	276.39	80.47	28.56
80	1880	1.0	196.87	0.30	174.90	343.74	57.27	0.25	145.26	257.29	76.52	25.15
100	2360		247.14	0.30	218.20	441.09	56.03	0.26	184.38	307.11	80.47	30.37
80	1880	1.1	216.56	0.30	177.30	370.42	58.46	0.26	152.33	283.02	76.52	23.59
100	2360		271.85	0.30	219.60	467.65	58.13	0.27	193.38	337.82	80.47	27.76
80	1880	1.2	236.25	0.30	177.10	387.61	60.95	0.27	159.16	308.76	76.52	20.34
100	2360		296.57	0.30	218.80	493.10	60.14	0.28	220.02	396.72	74.76	19.55
80	1880	1.3	255.94	0.30	177.00	404.78	63.23	0.28	165.69	334.50	76.51	17.36
100	2360		321.28	0.30	217.80	505.72	63.53	0.29	210.29	399.26	80.47	21.05
80	1880	1.4	275.62	0.30	176.20	418.40	65.87	0.29	171.94	357.44	77.11	14.57

ประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น สามารถหาได้จากสมการที่ (18) แสดงได้ดังตารางที่ 2 โดยผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของมอเตอร์ระหว่างวิธีหาค่าที่เหมาะสมที่สุดและวิธีดั้งเดิม พบว่าการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าวิธีดั้งเดิมในทุกสภาวะการทำงาน สามารถแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 1,880 rpm ได้ดังรูปที่ 2

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \quad (18)$$

โดยที่ η คือ ประสิทธิภาพของมอเตอร์



รูปที่ 2 ประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 1,880 rpm

เมื่อพิจารณาการประหยัดพลังงานของมอเตอร์ด้วยวิธีดังกล่าวข้างต้น สามารถคำนวณกำลังงานอินพุตเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับกำลังงานอินพุตของการขับเคลื่อนด้วยวิธีดั้งเดิม โดยการเปรียบเทียบจะดำเนินการหาเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานจากสมการที่ (19) สำหรับผลการคำนวณเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานระหว่างวิธีดั้งเดิมกับวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแสดงได้ดังตารางที่ 2

เปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน

$$= \frac{P_{in,conventional} - P_{in,OM}}{P_{in,conventional}} \times 100\% \quad (19)$$

โดยที่ $P_{in,conventional}$ คือ กำลังงานอินพุตที่อาศัยการขับเคลื่อนด้วยวิธีดั้งเดิม

$P_{in,OM}$ คือ กำลังงานอินพุตที่อาศัยการขับเคลื่อนด้วยวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุด

จากผลการทดสอบมอเตอร์ในตารางที่ 2 พบว่า การทดสอบด้วยวิธีดั้งเดิมกับวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุด เป็นการทดสอบที่สภาวะแรงบิดโหลด และความเร็วรอบต่าง ๆ ที่มีค่าเท่ากัน ส่งผลให้กำลังงานเอาต์พุตของมอเตอร์จากทั้ง 2 วิธีมีค่าเท่ากัน ในส่วนของค่ากำลังงานอินพุตของการขับเคลื่อนมอเตอร์ที่อาศัยการหาค่าเหมาะสมที่สุด มีค่าน้อยกว่ากำลังงานอินพุตของการขับเคลื่อนมอเตอร์วิธีดั้งเดิม ซึ่งค่ากำลังงานอินพุตของการขับเคลื่อนทั้งสองวิธีมีค่าแตกต่างกันค่อนข้างมาก โดยเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานด้วยวิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์ที่อาศัยการหาค่าเหมาะสมที่สุด ให้ผลการประหยัดพลังงานได้ดีในสภาวะแรงบิดโหลดต่ำ ๆ และที่แรงบิดโหลดมีค่าเท่ากับ 0.1 N·m (ที่สภาวะ 7.14 เปอร์เซ็นต์ของโหลดเต็มพิกัด) ให้ค่าการประหยัดพลังงานได้สูงสุดถึง 85.92 เปอร์เซ็นต์ และการประหยัดพลังงานจะมีเปอร์เซ็นต์ลดลงเมื่อแรงบิดโหลดมีค่าเพิ่มขึ้น และที่ค่าแรงบิดโหลดตั้งแต่ 0.9-1.4 N·m ไม่ได้ทำการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานที่ค่าความเร็วรอบ 120 เปอร์เซ็นต์ ของพิกัด เนื่องจากในการขับเคลื่อนมอเตอร์วิธีดั้งเดิม ที่สภาวะข้างต้นมีกระแสอาร์เมเจอร์เกินพิกัด นอกจากนี้ สังเกตได้ว่าเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานลดลงเมื่อแรงบิดโหลดเพิ่มขึ้น เนื่องจากค่ากระแสสนามมีค่ามากขึ้นเพราะต้องการแรงบิดของมอเตอร์ที่สูงขึ้น จึงทำให้ค่ากำลังงานอินพุตของมอเตอร์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้การประหยัดพลังงานลดลง โดยที่สภาวะแรงบิดโหลดเต็มพิกัดสามารถประหยัดพลังงานได้เพียง 14.57 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจากตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่า การประหยัดพลังงานด้วยวิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์ที่อาศัยการหาค่าเหมาะสมที่สุด

สามารถลดพลังงานในการขับเคลื่อนมอเตอร์ให้มีค่าน้อยลง ส่งผลให้เกิดการประหยัดพลังงานในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

5. สรุป

บทความนี้นำเสนอการเปรียบเทียบการประหยัดพลังงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น โดยทำการพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างวิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์วิธีดั้งเดิม กับวิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์ที่อาศัยการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยการหาค่ากระแสสนามที่ทำให้เกิดค่ากำลังงานสูญเสียที่น้อยที่สุด ได้ทำการเปรียบเทียบที่ค่ากำลังงานอินพุตของมอเตอร์ ซึ่งพบว่า วิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์ที่อาศัยการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดให้ผลการประหยัดพลังงาน ได้สูงสุดถึง 85.92 เปอร์เซ็นต์ และในช่วงที่มีแรงบิดโหลดต่ำกว่าปกติจะหาค่าการประหยัดพลังงานที่ดีกว่าช่วงที่แรงบิดโหลดสูงกว่าปกติ จากการนำเสนอในบทความนี้แสดงให้เห็นว่า เมื่อกำลังงานอินพุตมีค่าน้อยลง จะทำให้กำลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นมีค่าน้อยลง ในขณะที่กำลังงานเอาต์พุตมีค่าเท่าเดิม ด้วยเหตุผลนี้ จึงทำให้เกิดการประหยัดพลังงานในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ทู่นการศึกษาแก่นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาที่คณาจารย์ได้รับทุนวิจัยจากแหล่งทุนภายนอก กองทุนสนับสนุนการวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] W. I. Hameed, and K. A. Mohamad, "Speed Control of Separately Excited DC Motor using Fuzzy Neural Model Reference Controller," *International Journal of Instrumentation and Control Systems (IJICS)*, Vol.2, No.4, pp. 27-39, 2012.
- [2] C. De Angelo, G. Bossio, and G. Garcia, "Loss Minimization in DC Motor Drives," *IEEE International Electric Machines and Drives Conference. IEMDC'99.*, Vol. 4, No. 2, pp. 701-703, 9-12 May. 1999.
- [3] S. C. Hong, and M. H. Park, "Microprocessor – based optimal efficiency drive of separately excited dc motor," *Proc. 1984 IEEE TENCON.*, pp. 126-128, 1984.
- [4] N. Margaris, and T. Goutas, Z. Doulgeri, and A. Paschali, "Loss Minimization in DC Drives," *IEEE Transaction on Industrial Electronics.*, Vol. 38, No. 5, pp. 328-336, 1991.
- [5] E. S. Sergaki, G. S. Stavrakakis, and A. D. Pouliezios, "Optimal Robot Speed Trajectory by Minimization of the Actuator Motor Electromechanical Losses," *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, Vol. 33, pp. 187-207, 2002.
- [6] S. Udomsuk, K-L. Areerak, and K-N. Areerak, "The Energy Saving for Separately Excited DC Motor Drive via Model Based Method," *J Electr Eng Technol (JEET)*, Vol. 11, pp. 470-479, 2015.
- [7] P. F. Ryff, "ELECTRIC MACHINERY," Prentice Hall, New Jersey, 1994.
- [8] S. A. Nasar, "Electric Machine and Power Systems," McGraw-Hill, New York, 1995.
- [9] S. J. Chapman, "ELECTRIC MACHINERY FUNDAMENTALS," McGraw-Hill, Boston, 1999.
- [10] Toro, V. D., "Basic Machines," NJ : Prentice-Hill, 1990

- [11] G. Bertotti, “*Hysteresis in magnetism : for physicists, materials scientists, and engineers*,” Academic Press, 1998.
- [12] S. A. Nasar, “*Electric Machine and Power Systems*,” New York: McGraw-Hill, 1995.
- [13] A. Kusko, and M. T. Thompson, “*Power quality in electrical systems*,” McGraw-Hill, 2007.
- [14] D. Puangdownreong, T. Kulworawanichpong and S. Sujitjorn, “Finite convergence and performance evaluation of adptive tabu search,” in *knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems*, Vol. 3215 of Lecture Notes in Computer Science, M.G. Negoita, R.J. Howlett and L.C. Jain, Ed. Heidelberg: Springer, pp. 710-717, 2004.
- [15] T. Kulworawanichpong, D. Puangdownreong and S. Sujitjorn, “Finite convergence of adaptive tabu search,” *ASEAN Journal on Science and Technology for Development*, Vol. 21, No. 2-3, pp. 103-115, 2004
- [16] D. Puangdownreong, S. Sujitjorn and T. Kulworawanichpong, “convergence analysis of adaptive tabu search,” *Science Asia Journal of the Science Society of Thailand*, Vol. 30, No. 2, pp. 183-190, 2004.
- [17] S. Sujitjorn, T. Kulworawanichpong, D. Puangdownreong and K-N. Areerak, “Adaptive Tabu Search and Applications in Engineering Design,” in *Integrated Intelligent Systems for Engineering Design*, Zha and R.J. Howlett, Ed. Amsterdam, The Netherlands: ISO Press, pp. 233-257, 2006.
- [18] S. Sujitjorn, J. Kluabwang, D. Puangdownreong and N. narasiri “Adaptive tabu search management agent,” *The ECTI Trans. on Electrical Engineering, Electronics, and Communications*, Vol. 7, No. 2, pp. 1-10, 2009.
- [19] J. Kluabwang, D. Puangdownreong and S. Sujitjorn, “Multipath adaptive tabu search for a vehicle control problem,” *Journal of Applied Mathematics*, Vol. 2012, pp.1-20, 2012.
- [20] จีรวรรณ หอมจันทร์, กองพล อารีรักษ์, จิตรัตน์ อารีรักษ์ และกองพัน อารีรักษ์. การระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์กำลังงานสูญเสียของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น. *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 40*, ชลบุรี, 15 - 17 พฤศจิกายน 2560, ฉบับที่ 2, หน้า 447 - 450.
- [21] A. Kusko, and D. Galler, “Control Means for Minimization of Losses in AC and DC Motor Drives,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. IA-19, No. 4, pp. 561-570, 1983.
- [22] S. Jean, and P. Tignol, “*Galois’ Theory of algebraic Equations*,” World Scientific, 2001.

การศึกษาถึงพฤติกรรมการไหลและการถ่ายเทความร้อนในฮีทซิงค์สำหรับชุดโมดูลการทำความเย็นด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกด้วยระเบียบวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

Study on Heat and Flow Behaviors in Heat Sinks for Thermoelectric Cooling Module by CFD

ชุตติชัย หอมมาลี^{1*}, สงกรานต์ วิริยะศาสตร์¹, ไพศาล นาผล¹

¹ห้องปฏิบัติการเทอร์โม-ของไหลและการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (TFHT),
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 63 ถนนรังสิต-นครนายก
อำเภอองครักษ์ จังหวัดนครนายก, 26120

Chootichai Hommalee^{1*} Songkran Wiriyaart¹ Paisarn Naphon¹

¹Thermo-Fluid and Heat Transfer Enhancement Lab. (TFHT), Department of Mechanical
Engineering, Srinakharinwirot University, 63 Rangsit-Nakhornnayok Rd., Ongkharak, Nakhorn-Nayok
26120, Thailand

*Corresponding author Email: chootichai.champ@swu.ac.th, songkranw@swu.ac.th

(Received: May 19, 2019; Accepted: August 20, 2019)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์ถึงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของชุดครีบบระบายความร้อนที่มีลักษณะของช่องการไหลต่างกันที่เชื่อมกับเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับระบายความร้อนให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โดยใช้ระเบียบวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) รูปแบบของชุดครีบบระบายความร้อนที่ใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อน สมการหลักที่ใช้ในการแก้ปัญหาประกอบไปด้วย สมการความต่อเนื่อง สมการโมเมนตัม และสมการพลังงานซึ่งใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะการไหลของของไหลและการถ่ายเทความร้อน จากผลการศึกษาพบว่าลักษณะของช่องการไหลภายในชุดครีบบระบายความร้อนที่มีขนาดเล็กและจำนวนครีบบวกกว่าทำให้มีพื้นที่การถ่ายเทความร้อนที่มากกว่า ส่งผลให้มีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนได้ดียิ่งขึ้น แต่อย่างไรก็ตามจะพบว่าผลของความเร็วมีค่าลดลงขณะที่ความดันตกคร่อมมีค่าสูงขึ้น จากผลการศึกษาสามารถนำไปเป็นต้นแบบในการวิเคราะห์ชุดครีบบเพื่อใช้ในการผลิตน้ำเย็นเพื่อนำไปใช้ในระบระบายความร้อนให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้

คำสำคัญ: ครีบบระบายความร้อน โมดูลการทำความเย็นด้วยเทอร์โมอิเล็กทริก พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

ABSTRACT

In this paper, a numerical study on the heat transfer characteristics of various heat sink configurations coupled with thermoelectric cooling module for electronic cooling applications is investigated. Effects of flow channel configurations on the heat transfer and flow behaviors are considered. In the numerical model, the main governing equations of continuity equation, momentum and energy equation are used to analyzed the problem. It can see from the result that the number of

fins and size have significant effects on the heat transfer rate which results in thermal performance enhancement. However, the pressure drops also increased. The result obtained from this study are expected to lead to guidelines that will allow the optimum designing heat sink coupled with thermoelectric for electronic cooling applications.

Keyword: Heat sink, Thermoelectric cooling module, CFD

1. บทนำ

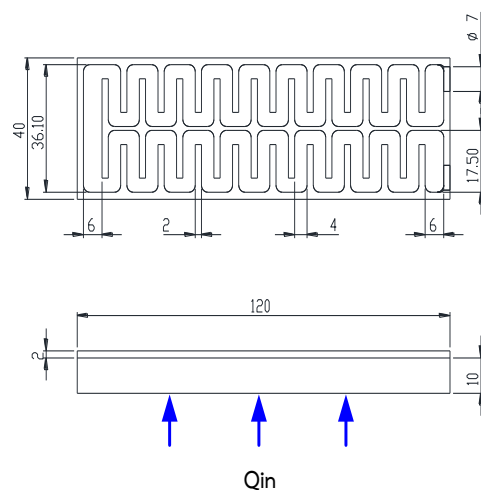
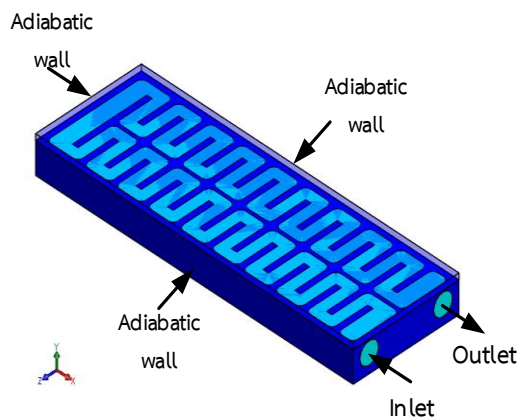
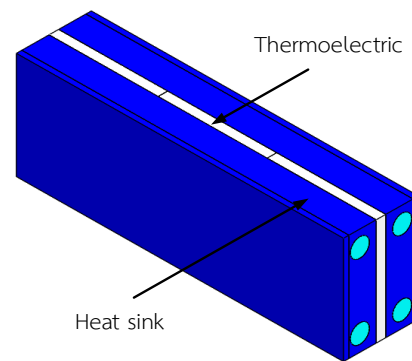
อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบันได้ถูกพัฒนาให้มีขนาดเล็กลง ในขณะที่ประสิทธิภาพการทำงานนั้นเพิ่มสูงขึ้นเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภค ซึ่งทำให้เกิดความท้าทายเป็นอย่างมากในการออกแบบอุปกรณ์ระบายความร้อนเนื่องจากพื้นที่ถูกจำกัด ความร้อนเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เกิดความเสียหายหรือทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ การจัดการกับความร้อนที่ไม่เพียงพออาจทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีอุณหภูมิการทำงานที่สูงขึ้น ซึ่งจะทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จำเป็นต้องมีการระบายความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูง เพื่อลดความเสียหายเนื่องจากความร้อนที่อาจเกิดกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้ จึงจำเป็นต้องมีการพัฒนาอุปกรณ์ระบายความร้อนเพื่อเพิ่มขีดความสามารถการระบายความร้อน สามารถนำมาใช้กับอุปกรณ์ที่ติดตั้งในพื้นที่จำกัด มีน้ำหนักเบาและที่สำคัญคือมีราคาที่ไม่สูงจนเกินไป เทอร์โมอิเล็กทริกเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เปลี่ยนกระแสไฟฟ้าให้เป็นความเย็นและความร้อนได้ในเวลาเดียวกัน ซึ่งในปัจจุบันได้ถูกนำมาใช้เพื่อระบายความร้อนให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เนื่องจากข้อดีของเทอร์โมอิเล็กทริกที่ไม่มีเสียงรบกวนขณะทำงาน มีการใช้งานทั้งงานเพียงจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับเทอร์โมอิเล็กทริกก็จะเกิดความร้อนและความเย็นสามารถควบคุมอุณหภูมิได้โดยการเพิ่มหรือลดกระแสไฟฟ้า เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงเทอร์โมอิเล็กทริกจึงต้องใช้ชุดครีบบระบายความร้อนเพื่อช่วยในการแลกเปลี่ยนความร้อน ถ้าระบายความร้อนของเทอร์โมอิเล็ก-

เลกทริกด้านร้อนได้สูง เทอร์โมอิเล็กทริกด้านเย็นก็จะมี ความเย็นมาก ชุดครีบบระบายความร้อนที่จะนำมาใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนจึงต้องมีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนที่สูง ที่ผ่านมามีนักวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการระบายความร้อนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ด้วยเทอร์โมอิเล็กทริก ดังนี้ [1] ศึกษาโมดูลระบายความร้อนแบบเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ผลกระทบของภาระความร้อน และกระแสไฟฟ้าที่ป้อน [2] ศึกษาด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนและการไหลในฮีตซิงค์ช่องการไหลขนาดเล็กสำหรับระบายความร้อนซีพียู [3] ทำการศึกษาวิจัยประสิทธิภาพทางด้านความร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกที่ระบายความร้อนด้วยน้ำ สำหรับระบายความร้อนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ผลกระทบของภาระความร้อนและกระแสไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพการทำความเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก [4] ศึกษาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของเทอร์โมอิเล็กทริกในการระบายความร้อนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ [5] วิเคราะห์ขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสมของเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอิเล็กทริก ผลกระทบของการจัดสรรพื้นที่การถ่ายเทความร้อน [6] ศึกษาการระบายความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริกด้วยท่อเทอร์โมไฮฟอน ผลกระทบของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเทอร์โมอิเล็กทริก [7] ศึกษาเกี่ยวกับการพาความร้อนของของไหลนาโนในฮีตซิงค์ที่มีช่องการไหลขนาดจิ๋ว [8] ทำการวิเคราะห์และทดลองเกี่ยวกับระบบระบายความร้อนแบบเทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับท่อความร้อน เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบทำความเย็นโดยใช้ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนแบบหนึ่งมิติ

[9] ศึกษาด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเกี่ยวกับประสิทธิภาพของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกโดยใช้ฮีทซิงค์ที่แตกต่างกัน [10] ทำการการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเกี่ยวกับลักษณะการถ่ายเทความร้อนและของเหลวแบบไดนามิกของฮีทซิงค์ที่มีช่องการไหลขนาดเล็ก ใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนแบบสามมิติเพื่อวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน

จากการทบทวนเอกสารงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ามี การศึกษาการถ่ายเทความร้อนโดยเทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อใช้ระบายความร้อนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เป็นจำนวนมาก แต่อย่างไรก็ตาม การนำเทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับชุดครี ระบายความร้อนเพื่อผลิตน้ำเย็นสำหรับนำไปใช้ระบาย ความร้อนให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์นั้นมีน้อยมาก เพื่อให้ได้ชุดครีระบายความร้อนที่เหมาะสมโดยใช้ ร่วมกับด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อนำไปผลิตน้ำเย็น สำหรับระบายความร้อนให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้มุ่งเน้นการออกแบบเพื่อศึกษา

ประสิทธิภาพการทำน้ำเย็นของชุดครีระบายความร้อนที่ ใช้ร่วมกับด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกด้วยระเบียบวิธี เชิงตัวเลขโดยใช้ระเบียบวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) โดยรูปแบบของชุดครีระบายความร้อนที่จำลองมี ทั้งหมด 6 รูปแบบ และเป็นแบบ 3 มิติ ผลที่ได้จาก การศึกษานี้สามารถนำไปใช้เพื่อออกแบบชุดครีระบาย ความร้อนที่เหมาะสมสำหรับการทำความร้อนและความ เย็นร่วมกับเทอร์โมอิเล็กทริกได้



รูปที่ 1 แบบจำลองของครีระบายความร้อนสำหรับทำความเย็นร่วมกับเทอร์โมอิเล็กทริก

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

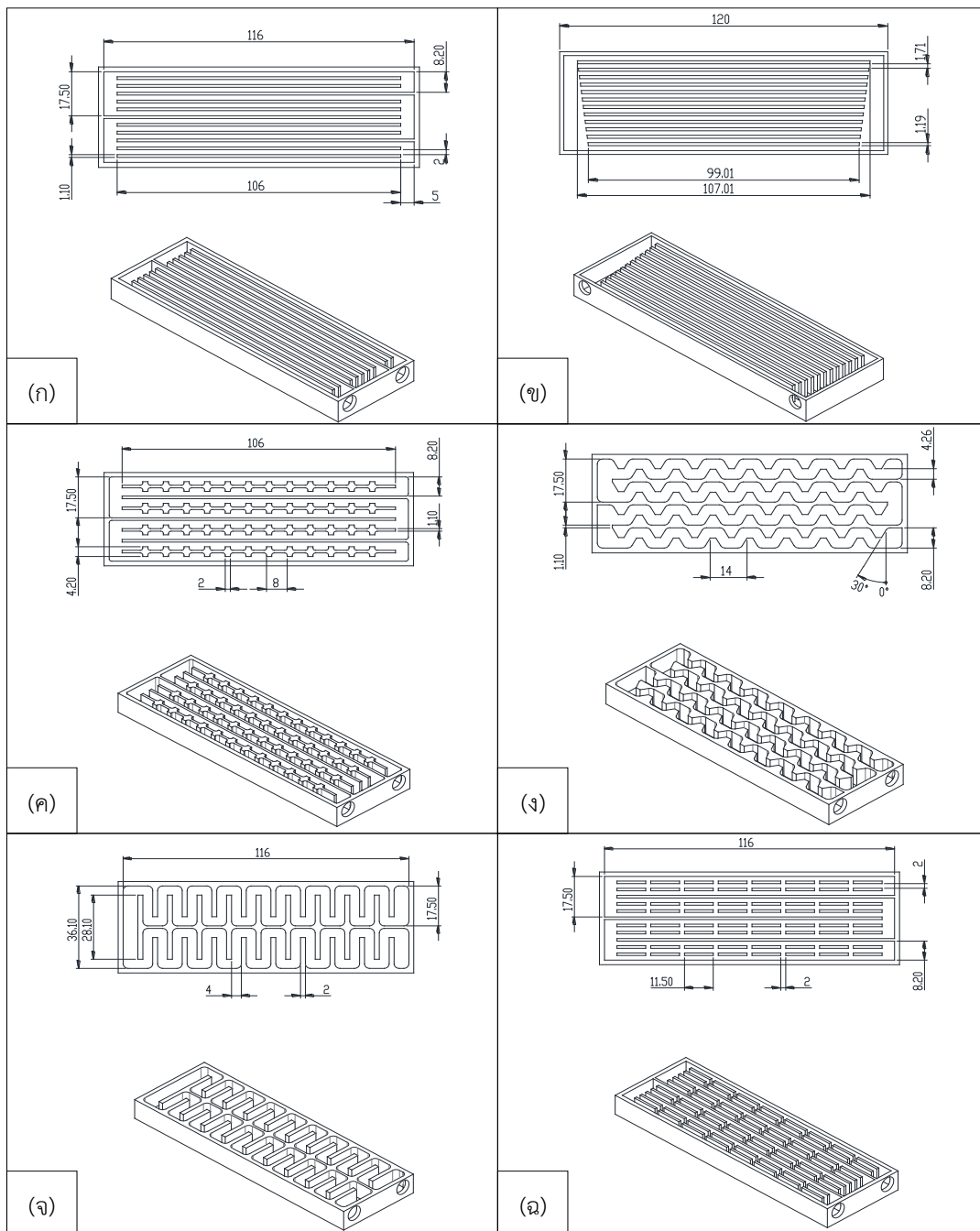
2.1 แบบจำลอง

รูปที่ 1 แสดงแบบจำลองของครีระบายความร้อน สำหรับทำความเย็นร่วมกับเทอร์โมอิเล็กทริก ในการศึกษา นี้จะใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขด้วยระเบียบวิธีพลศาสตร์ของ ไหลเชิงคำนวณ (CFD) ในการวิเคราะห์แบบจำลองการ

ไหลแบบปั่นป่วนเพื่อวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนและ ลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นในชุดครีระบายความร้อนแบบ ต่างๆภายใต้สภาวะชั่วครู่ (Transient) โดยครีระบาย ความร้อนของแบบจำลองทำจากวัสดุอลูมิเนียมที่มีขนาด 120×40 มม. ความหนาแน่นเท่ากับ 12 มม. โดยกำหนด อัตราการไหลของไหลหล่อเย็นไหลที่ทางเข้าชุดครี

ระบายความร้อนเท่ากับ 1.15 ลิตร/นาที่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องการไหลที่ทางเข้าและออกของของไหลมีขนาดเท่ากันเท่ากับ 7 มม. กำหนดให้พื้นผิวผนังโดยรอบของชุดครีบระบายความร้อนไม่มีการสูญเสียหรือได้รับความร้อน (Adiabatic) เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิของอากาศโดยรอบยกเว้นพื้นที่ผิวผนังด้านฐาน

ของชุดครีบระบายความร้อนที่กำหนดให้มีการรับความเย็นจากด้านเย็นของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกโดยมีอุณหภูมิคงที่เท่ากับ 5 °C ในการศึกษาครั้งนี้จะแบ่งแบบจำลองชุดครีบระบายความร้อนที่มีลักษณะช่องการไหลแตกต่างกันจำนวน 6 แบบ โดยรายละเอียดของชุดครีบระบายความร้อนแต่ละแบบจะแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ลักษณะของชุดครีบระบายความร้อนทั้ง 6 แบบ

ชุดครีบบระบายความร้อนแบบที่ 1 และ 2 แสดงดังรูปที่ 2 (ก) และ (ข) ตามลำดับ เป็นชุดครีบบระบายความร้อนที่ถูกผลิตขึ้นและใช้สำหรับผลิตน้ำเย็นด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกแบบดั้งเดิมที่มีใช้อยู่ในปัจจุบัน ขณะที่แบบที่ 3 – 6 แสดงดังรูปที่ 2 (ค), (ง), (จ), และ (ฉ) ตามลำดับ เป็นชุดครีบบระบายความร้อนที่ออกแบบเพื่อจำลองและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนกับชุดครีบบระบายความร้อนแบบดั้งเดิม เนื่องจากมีข้อจำกัดของพื้นที่ของชุดครีบบระบายความร้อน ในการออกแบบจะกำหนดให้ลักษณะโครงสร้างเหมือนกับชุดครีบบระบายความร้อนแบบเดิมแต่ปรับเปลี่ยนลักษณะของช่องการไหล และรูปแบบของครีบบระบายความร้อนภายในแตกต่างกัน โดยรูปแบบที่ 3 – 6 แสดงดังรูปที่ 2 (ค), (ง), (จ), และ (ฉ) จะออกแบบให้ช่องการไหลเหมือนกับแบบที่ 1 โดยแบบที่ 3 แสดงดังรูปที่ 2 (ค) จะเพิ่มครีบบางตามทิศทางการไหลของของไหล แบบที่ 4 และ 5 แสดงดังรูปที่ 2 (ง) และ (จ) ตามลำดับ จะออกแบบให้ช่องการไหลเป็นแบบซิกแซกตามทิศทางการไหลของของไหล แต่ทั้งสองแบบมีมุมการไหลที่ต่างกัน ส่วนแบบที่ 6 แสดงดังรูปที่ 2 (ฉ) จะมีครีบบางแผ่นและตัดเป็นช่องตามความยาวและวางในทิศทางเดียวกับช่องการไหลของของไหล ชุดครีบบระบายความร้อนทั้ง 6 แบบจะมีช่องทางการไหลเข้า-ออกของของไหลหล่อเย็นด้านเดียวกันโดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8.2 มม. ในการจำลองจะกำหนดอุณหภูมิและความเร็วคงที่ ที่ผิวด้านล่างจะให้ฟังก์ชันความร้อนคงที่

ในการวิเคราะห์แบบจำลองจะกำหนดเงื่อนไขขอบเขต ดังต่อไปนี้

- เป็นการวิเคราะห์ที่แบบชั่วครู่ (Transient)
- การไหลเป็นแบบปั่นป่วน (Turbulent flow)
- ของไหลอัดตัวไม่ได้
- ไม่คิดค่าแรงโน้มถ่วง
- ไม่คิดค่าความต้านทานที่ผิวสัมผัสระหว่างผนังของชุดครีบบระบายความร้อนกับของไหลหล่อเย็น
- ไม่คิดการแผ่รังสีความร้อน

จากรูปที่ 2 แสดงช่องการไหลของชุดครีบบระบายความร้อนแบบต่าง ๆ โดยรูปที่ 2 (ก) เป็นช่องการไหลแบบสลับและมีครีบบางจำนวน 2 แถว ในทุกช่องการไหล รูปที่ 2 (ข) เป็นช่องการไหลแบบทางเดียวและมีครีบบางจำนวน 12 แถว รูปที่ 2 (ค) เป็นช่องการไหลแบบสลับและมีครีบบางจำนวน 1 แถว โดยจะมีครีบบางขวางขนาดเล็กอยู่บนครีบบางหลัก รูปที่ 2 (ง) เป็นช่องการไหลแบบสลับซ้ายขวาเป็นแถวหลัก 4 แถว และมีครีบบางลักษณะสามเหลี่ยมสลับบนล่าง รูปที่ 2 (จ) เป็นช่องการไหลแบบสลับซ้ายขวาเป็นแถวหลัก 2 แถว และมีครีบบางลักษณะสี่เหลี่ยมผืนผ้าสลับบนล่าง รูปที่ 2 (ฉ) เป็นช่องการไหลแบบสลับและมีครีบบางจำนวน 2 แถว โดยถูกแบ่งออกเป็น 7 ตอน ในทุกช่องทางการไหล

2.2. สมการหลัก (Main governing equations)

สมการหลักประกอบไปด้วยสมการของมวล (mass equation) โมเมนตัม (momentum) สมการพลังงาน (energy equation) และการไหลแบบปั่นป่วน (turbulence) แสดงดังต่อไปนี้

สมการต่อเนื่อง (Continuity equation)

$$\frac{\partial \rho \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

สมการโมเมนตัม (Momentum equation)

$$\rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j \right) \quad (2)$$

สมการพลังงานสำหรับของไหล (Energy equation)

$$\rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\frac{\mu_t}{\sigma_t} + \frac{\mu_l}{\sigma_l} \right) \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \right) \quad (3)$$

สมการพลังงานสำหรับของแข็ง

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_s \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) = 0 \quad (4)$$

สมการความปั่นป่วน (Turbulence kinetic energy, k)

$$\rho \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon \quad (5)$$

สมการการแพร่ (turbulence kinetic energy dissipation, ε)

$$\rho \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 \mu_t \frac{\varepsilon}{k} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

โดยที่

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

2.3. เงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions)

ผนังด้านล่างของชุดเครื่องระบายความร้อน

$$T = T_{constant} \quad (8)$$

ผนังโดยรอบชุดเครื่องระบายความร้อน

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad (9)$$

ที่ทางเข้า

$$T = T_{in}, V = V_{in} \quad (10)$$

ที่ทางออก

$$p = p_{out} \quad (11)$$

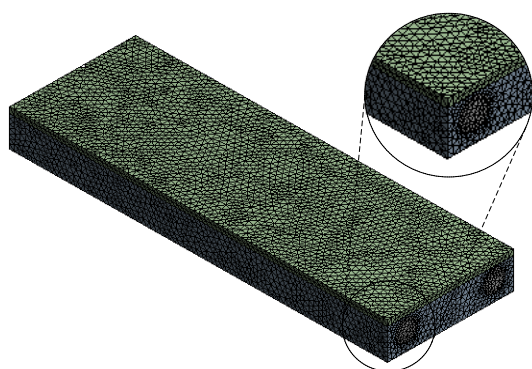
2.4. การหาจำนวนกริดที่เหมาะสม

ตารางที่ 1 การหาจำนวนกริดที่เหมาะสม

จำนวนกริด	อุณหภูมิของน้ำ ที่ทางออก (°C)	ค่าความผิดพลาด (%)
2.3×10^5	14.820	-
3.3×10^5	14.818	0.0134
4.5×10^5	14.817	0.0067

ในการศึกษาครั้งนี้ ได้ใช้โปรแกรม ANSYS / FLUENT ในการจำลองและวิเคราะห์ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข โดย กำหนดกริดรูปทรงเรขาคณิตแบบสามเหลี่ยม (Triangle) ที่มีความโค้ง (Curvature) ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งเป็นรูปทรงพื้นฐานที่เป็นมาตรฐานสามารถกำหนด ลงบนปัญหาที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ดีและทำให้การลู่เข้าหาคำตอบเป็นไปอย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ เพื่อประเมินความถูกต้องของการคำนวณผลคำตอบ การหาจำนวนกริดที่เหมาะสมทำได้โดยการสุ่มจำนวนของกริด ซึ่งพบว่าการใช้จำนวนกริดเท่ากับ 2.3×10^5 , 3.3×10^5 , และ 4.5×10^5 ให้ค่าความคลาดเคลื่อนที่ใกล้เคียงกันจึงนำมาใช้เพื่อทดสอบค่าความแม่นยำที่ได้จากการจำลอง เนื่องจากจำนวนของกริดส่งผลต่อผลลัพธ์ของปัญหาซึ่งแสดงดังตารางที่ 1 การหาจำนวนกริดที่เหมาะสมทั้งสามขนาดทำได้โดยการวัดจากผลต่างของอุณหภูมิของของไหลที่ทางออกของชุดเครื่องระบายความร้อน จากตารางที่ 1 แสดงอุณหภูมิของของไหลที่ทางออกของแบบจำลองที่มีขนาดของกริด 2.3×10^5 , 3.3×10^5 , และ 4.5×10^5

ตามลำดับ ซึ่งพบว่าค่าความผิดพลาดร้อยละของกริด 2.3×10^5 และ 3.3×10^5 เท่ากับ 0.0134 และ 3.3×10^5 และ 4.5×10^5 เท่ากับ 0.0067 ซึ่งเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของ กริดทั้งสามขนาดมีค่าต่ำกว่า 1 ดังนั้นจึงเลือกจำนวนกริดที่ 3.3×10^5 เป็นค่าที่เหมาะสมในการคำนวณหาคำตอบ โดยคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการประมวลผลใช้หน่วยประมวลผลกลาง (CPU) รุ่น intel xeon x5550 จำนวน 2 ตัว (8cores-16threads), หน่วยความจำ (RAM) ทั้งหมด 24 กิกะไบต์



รูปที่ 3 ลักษณะกริดของแบบจำลอง

ในการจำลองจะกำหนดให้โปรแกรมบันทึกข้อมูลต่างๆที่แปรผันไปตามเวลา (Transient) ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS / FLUENT ทำได้หลังจากที่กำหนดเงื่อนไขและขอบเขตของปัญหาเริ่มต้นเรียบร้อยแล้ว เพื่อลดพื้นที่การจัดเก็บข้อมูลที่ได้จากการจำลองบนฮาร์ดดิสไดรฟ์รวมทั้งการลดเวลาในการจำลองจึงประยุกต์ใช้วิธีการลดขนาดของ time step size เมื่อมีการรู้เข้าหาคำตอบอย่างต่อเนื่อง แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การลดขนาดของ time step size

ลำดับที่	Time step size	Number of time step	Max iteration per time step
1	0.0001	1,000	40
2	0.001	1,000	40
3	0.01	10,000	40

จากตารางที่ 2 เป็นการการลดขนาดของ time step size สำหรับนำไปใช้สำหรับแบบจำลองทั้ง 6 แบบ โดยเริ่มต้นที่ Time step size เท่ากับ 0.0001 ที่รอบการคำนวณ 1,000 รอบ หากผลลัพธ์ยังรู้เข้าหาคำตอบอย่างต่อเนื่องเมื่อครบ 1,000 รอบ แล้วให้ลด Time step size ลงมาเท่ากับ 0.001 และให้คำนวณต่ออีก 1,000 รอบ ทำเช่นนั้นจน Time step size เท่ากับ 0.01 และให้คำนวณต่ออีก 10,000 รอบ หรือผลลัพธ์เข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady state) ในระหว่างการคำนวณจะบันทึกผลลัพธ์ครั้งละ 100 รอบการคำนวณโดยเลือกในหมวด Solution - Calculation Activity-Autosave (Every Time Steps) จากนั้นกำหนดการบันทึกข้อมูลที่ 100 รอบ

3. ผลการทดลองและการวิจารณ์

งานวิจัยนี้เสนอผลการศึกษาระเบียบวิธีเชิงตัวเลขด้วยระเบียบวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) เพื่อวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนและลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นในชุดครีบระบายความร้อนภายใต้สภาวะชั่วครู่ (Transient) ในการศึกษาครั้งนี้จะแบ่งแบบจำลองชุดครีบระบายความร้อนที่มีลักษณะของการไหลแตกต่างกันจำนวน 6 แบบ ผลจากการศึกษาโดยการเปรียบเทียบความดันและอุณหภูมิที่ทางออกของของไหลของแบบจำลองทั้ง 6 แบบ แสดงดังตารางที่ 3

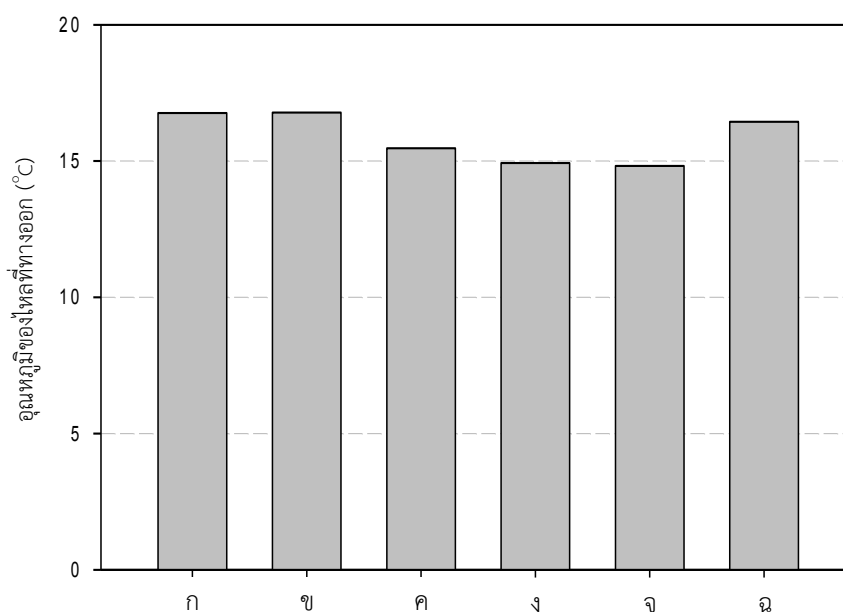
ตารางที่ 3 อุณหภูมิและค่าความดันของชุดครีบระบายความร้อน 6 แบบ

แบบจำลอง	$T_{w,in}$ (°C)	ΔT_w (°C)	ΔP (kPa)
ก	25	8.24	1.3150
ข	25	8.22	0.1120
ค	25	9.53	11.893
ง	25	10.07	3.1660
จ	25	10.18	16.082
ฉ	25	8.56	1.8990

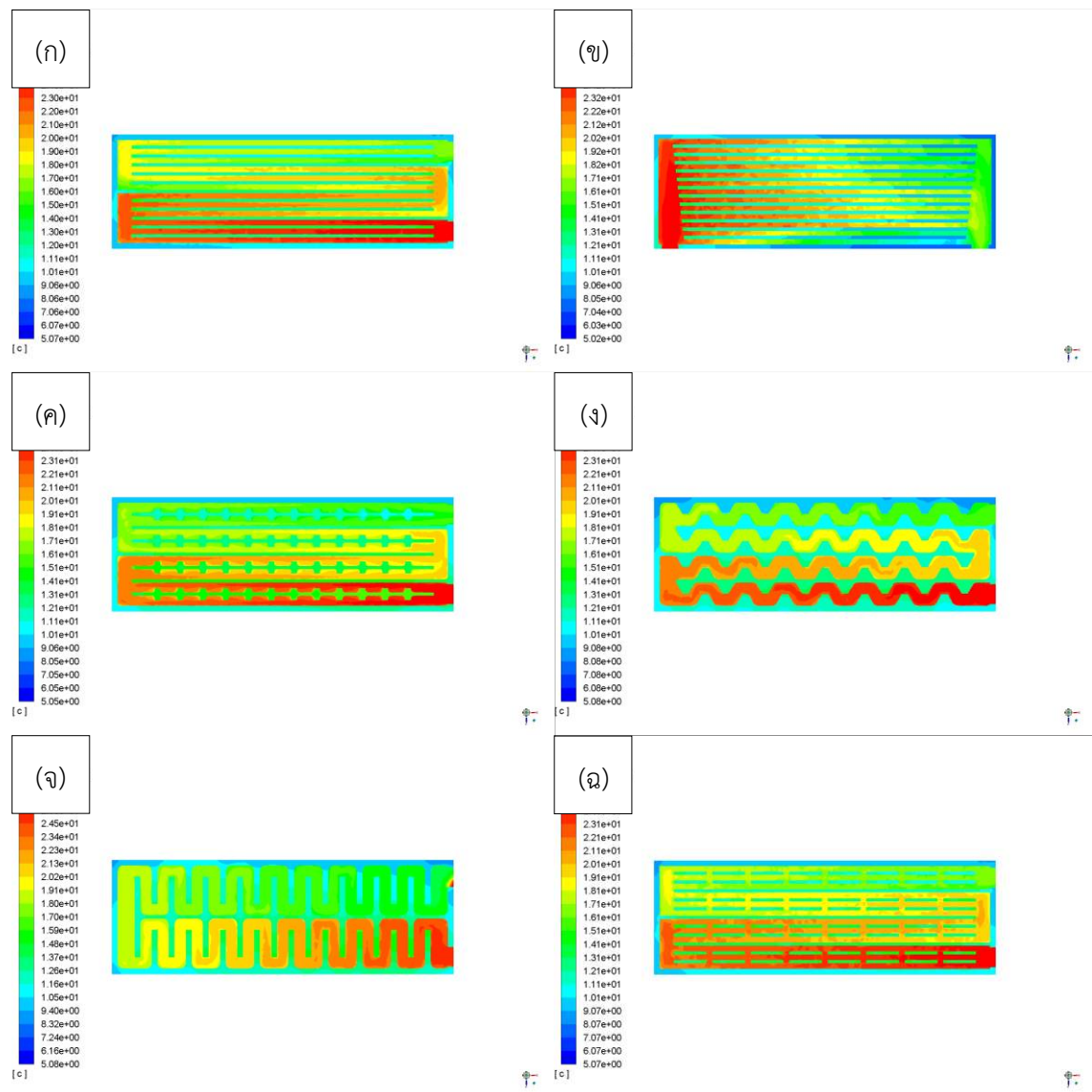
จากตารางที่ 3 แสดงอุณหภูมิและแรงดันตกคร่อมของแบบจำลองชุดcribระบายความร้อนทั้ง 6 แบบ โดยการจำลองจะกำหนดให้อุณหภูมิของไหลที่ทางเข้าเท่ากับ 25°C และอุณหภูมิผนังที่ด้านเย็นเท่ากับ 5°C จากการศึกษาพบว่าผลต่างของอุณหภูมิที่ทางเข้า-ออก และแรงดันตกคร่อมของชุดcribระบายความร้อนแต่ละแบบให้ผลที่แตกต่างกัน โดยที่ผลต่างของอุณหภูมิที่ทางเข้า-ออกของแบบจำลองทั้ง 6 แบบจะอยู่ระหว่าง $8 - 10^{\circ}\text{C}$ ชุดcribระบายความร้อนแบบ (ก) และ (ข) จะมีผลต่างของอุณหภูมิที่ทางเข้า-ออกจะมีค่าต่ำสุดที่ 8.2°C ขณะที่ชุดcribระบายความร้อนแบบ (ง) และ (จ) จะมีผลต่างของอุณหภูมิที่ทางเข้า-ออกสูงสุดที่ 10.1°C

จากรูปที่ 4 แสดงอุณหภูมิน้ำที่ทางออกของชุดcribระบายความร้อนแบบต่างๆจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของไหล

หล่อเย็นที่ทางออกของชุดcribระบายความร้อน (จ) มีอุณหภูมิต่ำสุด และชุดcribระบายความร้อน (ง), (ค), (ฉ), (ก), และ (ข) มีอุณหภูมิสูงขึ้นตามลำดับ โดยที่ชุดcribระบายความร้อน (จ) สามารถทำอุณหภูมิได้ 14.82°C ชุดcribระบายความร้อน (ง) ทำอุณหภูมิได้ 14.93°C ชุดcribระบายความร้อน (ค) ทำอุณหภูมิได้ 15.48°C ชุดcribระบายความร้อน (ฉ) ทำอุณหภูมิได้ 16.44°C ชุดcribระบายความร้อน (ก) ทำอุณหภูมิได้ 16.76°C และชุดcribระบายความร้อน (ข) ทำอุณหภูมิได้ 16.78°C จากผลการจำลองดังกล่าวนี้สามารถสรุปได้ว่าชุดcribระบายความร้อน (จ) มีประสิทธิภาพการทำความเย็นให้กับของไหลหล่อเย็นได้มากที่สุดขณะที่แรงดันตกคร่อมก็มีค่าสูงที่สุดด้วยเช่นกัน



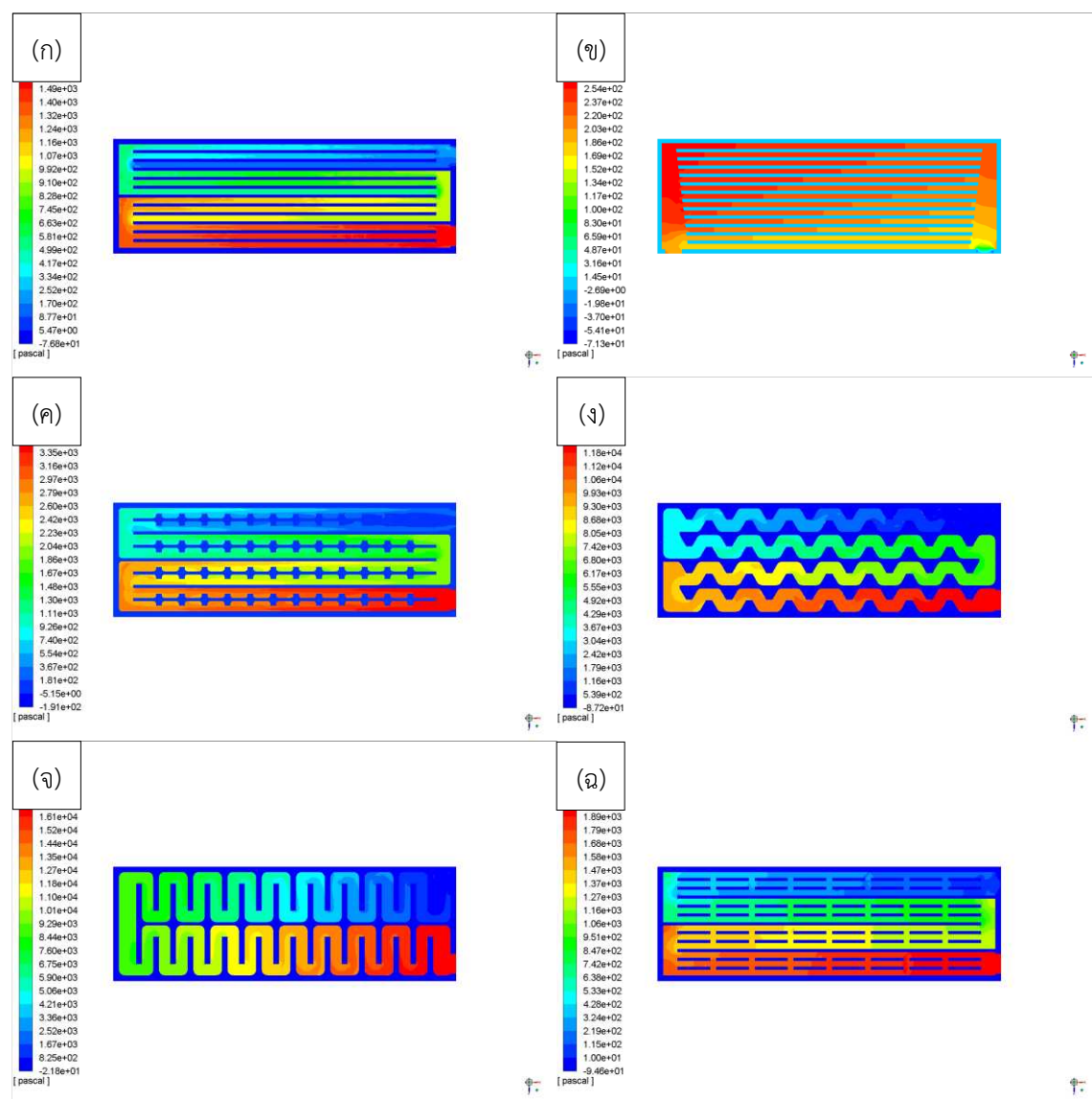
รูปที่ 4 อุณหภูมิน้ำที่ทางออกของชุดcribระบายความร้อนแบบต่าง ๆ



รูปที่ 5 อุณหภูมิภายในชุดครีบบระบายความร้อนทั้ง 6 แบบ

จากรูปที่ 5 แสดงการกระจายตัวอุณหภูมิในชุดครีบบระบายความร้อนแต่ละโมเดล จะเห็นได้ว่าช่องการไหลที่แตกต่างกันจะทำให้เกิดการบังคับทิศทางการไหลของไหลหล่อเย็นได้แตกต่างกัน จึงทำให้แลกเปลี่ยนความร้อนได้ไม่เท่ากัน โดยจะเห็นได้ว่าชุดครีบบระบายความร้อนที่มีช่องการไหลแบบรูปที่ 5 (จ) และรูปที่ 5 (ง) สามารถแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดี จึงทำอุณหภูมิของน้ำที่

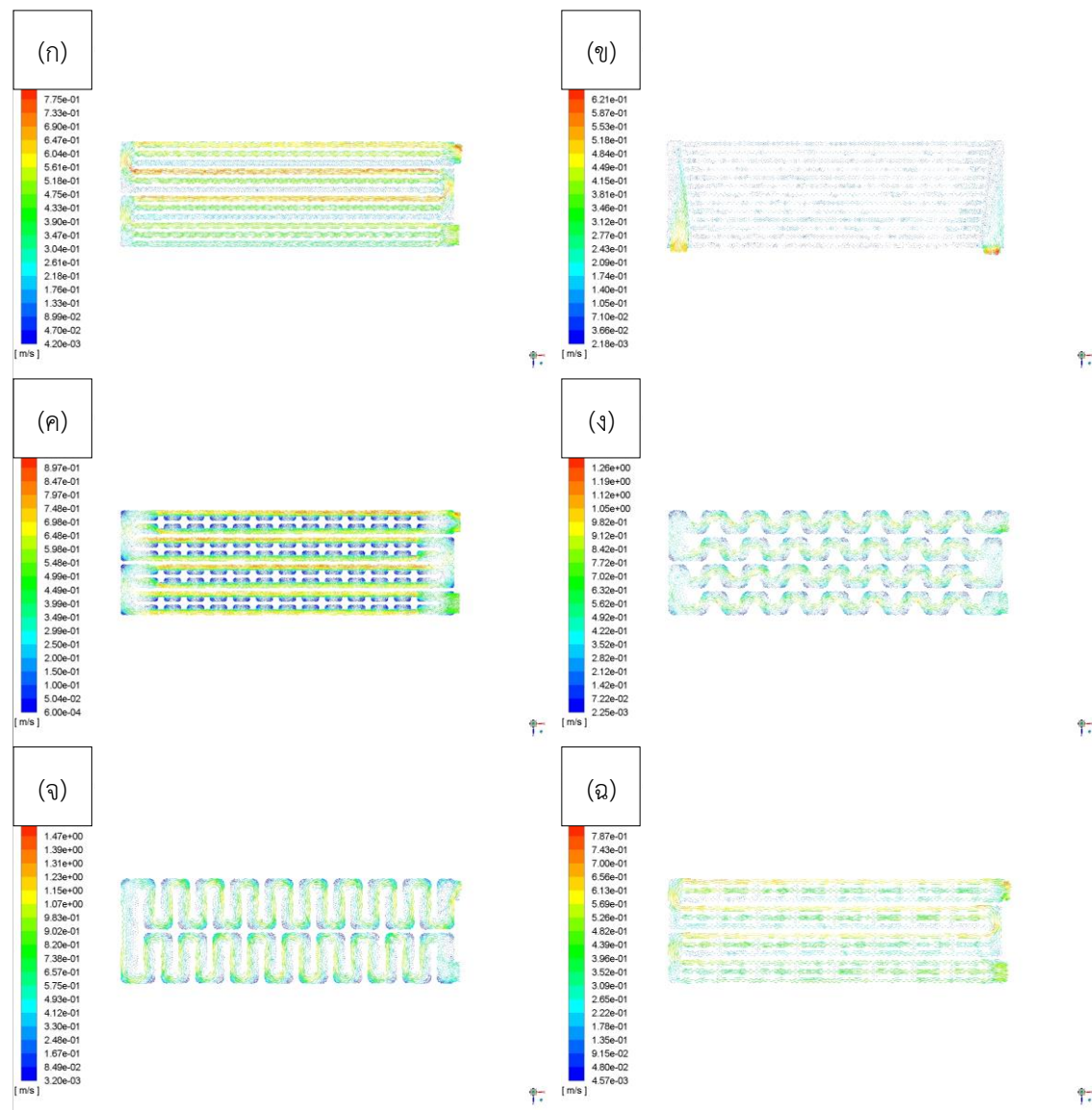
ทางออกของชุดครีบบระบายความร้อนมีค่า 14.82 °C และ 14.93 °C ตามลำดับ ชุดครีบบระบายความร้อนที่มีช่องการไหลแบบรูปที่ 5 (ด) รูปที่ 5 (ก) และรูปที่ 5 (ข) สามารถแลกเปลี่ยนความร้อนได้ไม่ดี จึงทำให้อุณหภูมิของน้ำที่ทางออกของชุดครีบบระบายความร้อนมีค่า 16.44 °C, 16.76 °C, และ 16.78 °C ตามลำดับ



รูปที่ 6 ความดันของของไหลภายในชุด cribระบายความร้อนทั้ง 6 แบบ

จากรูปที่ 6 แสดงความดันของของไหลภายในชุด cribระบายความร้อนทั้ง 6 แบบ จะเห็นได้ว่าลักษณะของช่องการไหลของชุด cribระบายความร้อนที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อความดันที่เกิดขึ้นภายในชุด cribระบายความร้อน โดยชุด cribระบายความร้อนที่มีช่องการไหลซับซ้อนและมีการเปลี่ยนทางการไหลแบบฉับพลัน จะทำให้เกิดความดันตกคร่อมที่สูงกว่าชุด cribระบายความร้อนที่มีช่องการไหลที่ไม่ซับซ้อนเนื่องจากการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของไหลและผิว crib มากขึ้น และจะเห็นได้ว่าชุด cribระบาย

ความร้อนที่มีช่องการไหลแบบ (ก) ดังแสดงในรูปที่ 6 (ก) มีความซับซ้อนไม่มากจึงทำให้เกิดความดันตกคร่อมเท่ากับ 1.315 kPa, ชุด cribระบายความร้อนที่มีช่องการไหลแบบ (ข) ดังแสดงในรูปที่ 6 (ข) เป็นช่องการไหลที่ไม่ซับซ้อนจึงเกิดทำให้เกิดความดันตกคร่อมเท่ากับ 0.112 kPa ชุด cribระบายความร้อนที่มีช่องการไหลแบบ (ค) ดังแสดงในรูปที่ 6 (ค) มี crib ขนาดเล็กในแนวขวาง ทำให้ขัดขวางการไหลของของไหลหล่อเย็น จึงทำให้เกิดความดันตกคร่อมเท่ากับ 11.893 kPa ชุด cribระบายความร้อน



รูปที่ 7 เวกเตอร์ความเร็วของของไหลภายในชุดครีบบระบายความร้อนทั้ง 6 แบบ

ที่มีช่องการไหลแบบ (ง) ดังแสดงในรูปที่ 6 (ง) เป็นชุดครีบบระบายความร้อนที่มีช่องการไหลที่ซับซ้อนมากขึ้น แต่ไม่ขัดขวางช่องทางการไหล จึงทำให้เกิดความดันตกคร่อมเท่ากับ 3.166 kPa ชุดครีบบระบายความร้อนที่มีช่องการไหลแบบ (จ) ดังแสดงในรูปที่ 6 (จ) เป็นช่องการไหลที่มีความซับซ้อนและมีการเปลี่ยนทางการไหลแบบฉับพลันจึง

ทำให้เกิดความดันตกคร่อมที่มีค่าสูงถึง 16.082 kPa และชุดครีบบระบายความร้อนที่มีช่องการไหลแบบ (ฉ) ดังแสดงในรูปที่ 6 (ฉ) เป็นชุดครีบบระบายความร้อนที่มีความซับซ้อนไม่มาก จึงทำให้เกิดความดันตกคร่อมเท่ากับ 1.899 kPa

จากการคำนวณระเบียบวิธีเชิงตัวเลขด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยกำหนดค่าอัตราการไหลหรือค่าความเร็วที่ทางเข้าของชุดครีบบระบายความร้อนที่เท่ากันในแต่ละโมเดล จากรูปที่ 7 จะเห็นได้ถึงเวกเตอร์ของความเร็วที่เกิดขึ้นภายในชุดครีบบระบายความร้อน โดยชุดครีบบระบายความร้อนแต่ละโมเดลจะมีการกระจายตัวที่แตกต่างกัน ตามลักษณะของช่องการไหล ชุดครีบบระบายความร้อนที่มีช่องการไหลแบบรูปที่ 7 (ก) เกิดการกระจายตัวของความเร็วไม่สม่ำเสมอตั้งแต่ช่วงกลางของชุดครีบบระบายความร้อนเป็นต้นไป ชุดครีบบระบายความร้อนที่มีช่องการไหลแบบรูปที่ 7 (ข) จะเกิดความเร็วสูงที่ทางเข้า ส่วนด้านล่างของชุดครีบบระบายความร้อนจะมีความเร็วที่ช้ามาก การกระจายตัวของความเร็วทำได้ไม่ดี ชุดครีบบระบายความร้อนที่มีช่องการไหลแบบรูปที่ 7 (ค) จะเกิดการไหลที่ช้าในบริเวณใกล้ครีบลำและเกิดการไหลที่เร็วบริเวณผนังของชุดครีบบระบายความร้อน ชุดครีบบระบายความร้อนที่มีช่องการไหลแบบรูปที่ 7 (ง) และรูปที่ 7 (จ) จะทำให้เกิดการไหลที่มีความสม่ำเสมอ ชุดครีบบระบายความร้อนที่มีช่องการไหลแบบรูปที่ 7 (ฉ) จะเกิดการกระจายตัวของความเร็วที่ไม่สม่ำเสมอตั้งแต่ช่วงกลางของชุดครีบบระบายความร้อนเป็นต้นไป

4. สรุป

งานวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาถึงการออกแบบและวิเคราะห์ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเกี่ยวกับลักษณะการถ่ายเทความร้อน ความเร็วและความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นภายในชุดครีบบระบายความร้อนแบบต่าง ๆ ด้วยระเบียบวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) เงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดให้กับแบบจำลองชุดครีบบระบายความร้อนแต่ละแบบจะมีค่าเท่ากัน จากการศึกษาพบว่าช่องการไหลของชุดครีบบระบายความร้อนแบบต่าง ๆ ส่งผลต่อพฤติกรรมการไหลของของไหลหล่อเย็น และส่งผลต่อประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างชุดครีบบระบายความร้อนกับของไหลหล่อเย็น ชุดครีบบระบายความร้อนแต่ละแบบมีการกระจายตัวของอุณหภูมิ ความดันตกคร่อมและ

ความเร็วที่เกิดขึ้นภายในชุดครีบบระบายความร้อนที่แตกต่างกันเนื่องจากมีลักษณะของช่องการไหลและรูปแบบครีบบที่มีลักษณะแตกต่างกัน โดยชุดครีบบระบายความร้อนแบบ (จ) สามารถถ่ายเทความร้อนได้ดีที่สุด แต่ขณะเดียวกันก็มีค่าความดันตกคร่อมสูงตามไปด้วย และยังพบว่าชุดครีบบแบบ (ง) ให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนใกล้เคียงกับชุดครีบบ (จ) แต่มีค่าความดันตกคร่อมที่มีค่าต่ำกว่า ดังนั้นในการวิเคราะห์ครั้งนี้จึงสามารถสรุปได้ว่าชุดครีบบ (ง) จึงเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการออกแบบชุดครีบบสำหรับระบายความร้อนสำหรับทำน้ำเย็นร่วมกับเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับหล่อเย็นให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้ เพื่อให้ชุดทำความเย็นเทอร์โมอิเล็กทริกนั้นมีประสิทธิภาพสูงสุด

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณทุนอุดหนุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ และขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล นามผล ที่เอื้อเฟื้อห้องปฏิบัติการเทอร์โม-ของไหลและการถ่ายเทความร้อน (TFHT) ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ รวมทั้งเครื่องมือเพื่อใช้ในการวิจัยครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Y.-W. Chang, C.-C. Chang, M.-T. Ke, S.-L. Chen, "Thermoelectric air-cooling module for electronic devices," Applied Thermal Engineering, vol. 29, pp. 2731-2737, 2009.
- [2] P. Naphon and S. Wiriyaart, "Liquid cooling in the mini-rectangular fin heat sink with and without thermoelectric for CPU," International Communications in Heat and Mass Transfer, vol. 36, pp. 166-171, 2009.
- [3] H.-S. Huang, Y.-C. Weng, Y.-W. Chang, S.-L. Chen, M.-T. Ke, "Thermoelectric water-

- cooling device applied to electronic equipment,” International Communications in Heat and Mass Transfer, vol. 37, pp. 140-146, 2010.
- [4] Y. Zhou and J. Yu, “Design optimization of thermoelectric cooling systems for applications in electronic devices,” International Journal of Refrigeration, vol. 35, pp. 1139-1144, 2012.
- [5] L. Zhu, H. Tan, J. Yu, “Analysis on optimal heat exchanger size of thermoelectric cooler for electronic cooling applications,” Energy Conversion and Management, vol. 76, pp. 685-690, 2013.
- [6] D. Liu, F.-Y. Zhao, H.-X. Yang, G.-F. Tang, “Thermoelectric mini cooler coupled with micro thermosiphon for CPU cooling system,” Energy, vol. 83, pp. 29-36, 2015.
- [7] R. Nebbati and M. Kadja, “Study of Forced Convection of a Nanofluid Used as a Heat Carrier in a Microchannel Heat Sink,” Energy Procedia, vol. 74, pp. 633-642, 2015.
- [8] S. Wiriyaart and P. Naphon, “Study on Liquid Jet Impingement Heat Transfer and Flow Behaviors of the Vapor Chambers with and without Mini-channel,” in *Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand.*, Nakhon Nayok., 2017.
- [9] S. Wiriyaart and P. Naphon, “Thermal Cooling of Electronic Devices with Cold Plate Using Liquid as Coolant,” in *Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand.*, Nakhon Nayok., 2017.
- [10] Y. Wang, Y. Shi, D. Liu, “Performance analysis and experimental study on thermoelectric cooling system coupling with heat pipe,” Procedia Engineering, vol. 205, pp. 871-878, 2017.
- [11] Y. M. Seo et al., “A numerical study on the performance of the thermoelectric module with different heat sink shapes,” Applied Thermal Engineering, vol. 128, pp. 1082-1094, 2018.
- [12] S. Wiriyaart and P. Naphon, “Study on thermal performance of cold plate unit with micro-channel for supercomputer cooling,” JP Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 15, pp. 77-92, 2018.

การเลือกสัญญาณลำดับศูนย์ที่เหมาะสมสำหรับการมอดูเลทความกว้างพัลส์แบบสเปซ เวกเตอร์สองเฟสที่ขยายการมอดูเลทเชิงเส้นสำหรับอินเวอร์เตอร์ห้ากึ่งจ่ายให้กับมอเตอร์ เหนี่ยวนำสองเฟสคู่

Optimal Zero-Sequence Selection for Two-Phase SVPWM with Extended Linear Modulation Range for Five-Leg Inverter supplying Dual Two-Phase Induction Motors

วัชรินทร์ พรหมคุณ^{1*} วิจิตร กิณเรศ¹ Kazuhiro Ohyama² นาวิ รุจิตาม³ ประหยัด กองสุข⁴

¹ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอยฉลองกรุง 1 ถนนฉลองกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10520

²Department of Electrical Engineering, Fukuoka Institute of Technology, Fukuoka 811-0295, Japan

³ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องค์กรักษ์

63 หมู่ 7 ถนนรังสิต-นครนายก อำเภอองค์กรักษ์ จังหวัดนครนายก 26120

⁴สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
วิทยาเขตจันทบุรี

131 หมู่ 10 ถนนบาราคนราดูล ตำบลพลวง อำเภอเขาฉกฉกญ จังหวัดจันทบุรี 22210

Watcharin Promkhun^{1*} Vijit Kinnares¹ Kazuhiro Ohyama² Navee Rujidam³ Prayad Kongsuk⁴

¹Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of
Technology Ladkrabang, Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand

²Department of Electrical Engineering, Fukuoka Institute of Technology, Fukuoka 811-0295, Japan

³Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University, Ongkharak,
Nakhonnayok, 26120, Thailand

⁴Department of Electrical Engineering, Faculty of Agro-Industry Technology, Rajamangala
University of Technology Tawan-Ok Chanthaburi Campus, Chanthaburi, 22210, Thailand

*Corresponding author Email: promkhun.w_8@hotmail.com

(Received: May 20, 2019; Accepted: August 9, 2019)

บทคัดย่อ

บทความนี้แนะนำเสนอเกี่ยวกับการเลือกสัญญาณลำดับศูนย์ที่เหมาะสมสำหรับการมอดูเลทความกว้างพัลส์แบบสเปซเวกเตอร์สองเฟสที่ขยายการมอดูเลทเชิงเส้น ป้อนให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสสองตัวที่ควบคุมอย่างอิสระต่อกัน เพื่อขยายการมอดูเลทเชิงเส้น การเลือกสัญญาณลำดับศูนย์ที่เหมาะสมนั้นสามารถลดขนาดพีคของดิแวลต์ไคเกิ้ลของอินเวอร์เตอร์ห้ากึ่ง ซึ่งจะส่งผลให้สามารถขยายการมอดูเลทเชิงเส้นของค่าดัชนีการมอดูเลทรวมได้มากกว่า 100 เปอร์เซ็นต์ ในบทความนี้ได้แนะนำและวิเคราะห์ผลทั้งฟังก์ชันการมอดูเลทของอินเวอร์เตอร์ห้ากึ่ง และการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสคู่อย่างอิสระต่อกัน ซึ่งสามารถยืนยันผลการจำลองได้จากผลการทดสอบ

คำสำคัญ: อินเวอร์เตอร์ห้ากึ่ง การมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์สองเฟส การมอดูเลตเชิงเส้น มอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส

ABSTRACT

This paper presents an optimal zero-sequence selection for two-phase SVPWM extended linear modulation for five-leg inverter supplying dual two-phase induction motors independently controlled. Optimal zero-sequence selection can reduce peak of duty cycles for five-leg inverter. The selection affects to extend linear range of total modulation index, which is higher than 100 percentages. In this paper, modulating functions of five-leg inverter and independently dual two-phase induction motors drive are presented and analyzed. All simulation results can be verified by experimental results.

Keyword: Five-leg inverter, two-phase SVPWM, linear modulation, two-phase induction motor.

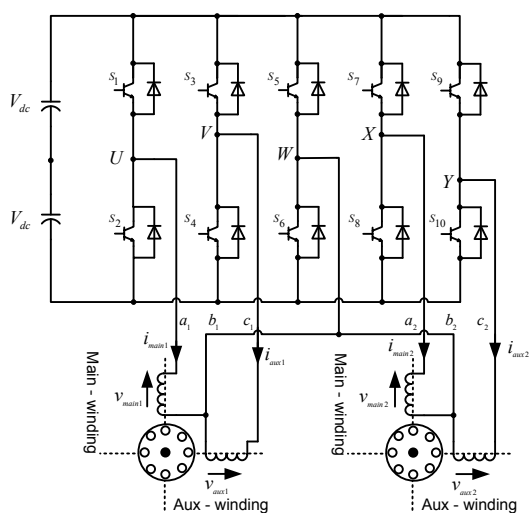
1. บทนำ

อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันห้ากึ่งถูกนำมาใช้เพื่อลดต้นทุนรวมของอินเวอร์เตอร์โดยการลดจำนวนอุปกรณ์สวิตช์ในการขับเคลื่อนมอเตอร์สองตัว การขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสสองตัวด้วยอินเวอร์เตอร์ห้ากึ่งนั้นถูกนำเสนอใน [1-2] สำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์สองตัวโดยทั่วไปนั้นจะใช้อินเวอร์เตอร์สามกึ่งจำนวนสองตัว ซึ่งใช้อุปกรณ์สวิตช์จำนวน 12 ตัวในการขับเคลื่อน แต่สำหรับการขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ห้ากึ่งนั้น จะมีการใช้กึ่งของอินเวอร์เตอร์หนึ่งกึ่งเป็นกึ่งร่วมระหว่างมอเตอร์สองตัว ทำให้ประหยัดอุปกรณ์สวิตช์ลงไปหนึ่งกึ่ง ซึ่งประหยัดอุปกรณ์ไปได้ 2 ตัว การใช้อินเวอร์เตอร์ห้ากึ่งขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสสองตัวถูกนำเสนอใน [3-4] และการนำเสนออินเวอร์เตอร์ห้ากึ่งขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสและสามเฟสถูกนำเสนอใน [5] การมอดูเลตความกว้างพัลส์สำหรับอินเวอร์เตอร์ห้ากึ่งนั้นจะแบ่งค่าดัชนีการมอดูเลตกันระหว่างมอเตอร์สองตัว โดยค่าดัชนีการมอดูเลตรวมไม่เกิน 100% [1-4] ซึ่งจะ เป็นข้อจำกัดของอินเวอร์เตอร์ห้ากึ่งที่ต้องแบ่งการใช้งานแรงดันไฟตรงเชื่อมโยง มีหลายงานวิจัยที่พัฒนาปรับปรุงเทคนิคการมอดูเลตเพื่อให้สามารถใช้ประโยชน์จากแรงดันไฟตรงได้เพิ่มขึ้นโดยการใช้อินเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่ของมอเตอร์ทั้งสองตัวไม่ต่างกันมาก และ

ขับเคลื่อนมอเตอร์ในการควบคุมแบบเวกเตอร์ [6] ซึ่งสามารถเพิ่มดัชนีการมอดูเลตขึ้นได้จากตัวละ 50% ไปเป็น 86.6% โดยส่วนใหญ่หากควบคุมมอเตอร์สองตัวให้ทำงานอย่างอิสระต่อกัน ยกตัวอย่างเช่น มอเตอร์สองตัวทำงานที่คนละความถี่ ที่ต่างกันมากและมอดูเลตทางไฟฟ้าอย่างอิสระ ฉะนั้นจึงไม่สามารถใช้เทคนิคนี้เพื่อใช้ประโยชน์แรงดันไฟตรงได้สูงขึ้นอย่างใน [6] เพราะส่วนใหญ่อะศัยการทำงานที่ความถี่ขององศาทางไฟฟ้าที่เหมาะสม และมอเตอร์สองตัวทำงานที่ความถี่ไม่ต่างกันมาก แต่ในกรณีที่มอเตอร์สองตัวทำงานอย่างอิสระต่อกัน จำเป็นต้องใช้วิธีอื่น ซึ่งได้มีการนำเสนออีกหนึ่งวิธีใน [4] ซึ่งได้นำเสนอผลการจำลองการเลือกสัญญาณลำดับศูนย์ที่เหมาะสมเพื่อปรับปรุงค่าดัชนีการมอดูเลตสำหรับอินเวอร์เตอร์ห้ากึ่งขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสสองตัว และในบทความนี้จึงได้นำเสนอผลการทดสอบในทางปฏิบัติของอินเวอร์เตอร์ห้ากึ่งดังกล่าวที่ใช้เทคนิคการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบสเปซเวกเตอร์แรงดันสองเฟส เพื่อปรับปรุงค่าดัชนีการมอดูเลตรวมให้สามารถใช้งานได้เกิน 100% โดยใช้วิธีเลือกสัญญาณลำดับศูนย์ที่เหมาะสม และได้แสดงวงจรกำลังในรูปที่ 1

การเลือกสัญญาณลำดับศูนย์ของการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบสเปซเวกเตอร์แรงดันสองเฟสสำหรับอินเวอร์เตอร์ห้ากึ่ง คือสิ่งที่สำคัญสำหรับการมอดูเลต

เนื่องจากสเปซเวกเตอร์แรงดันสองเฟสที่ใช้สำหรับอินเวอร์เตอร์สามกึ่งนำ มีหนึ่งกึ่งที่มีดิวิตไชเกิ้ลน้อยกว่ากึ่งอื่น หากเลือกดิวิตไชเกิ้ลที่มีค่าดิวิตไชเกิ้ลต่ำกว่ามาใช้เป็นสัญญาณลำดับศูนย์สำหรับอินเวอร์เตอร์ห้ากึ่งนำ จะทำให้ค่าดิวิตไชเกิ้ลรวมของอินเวอร์เตอร์ห้ากึ่งนำลดลง ซึ่งจะส่งผลให้สามารถเพิ่มค่าดัชนีการมอดูเลตได้สูงกว่า 100 % ในช่วงเชิงเส้น สำหรับวิธีการเลือกดิวิตไชเกิ้ลสำหรับใช้เป็นกึ่งร่วมที่นำเสนอนั้น คือการเลือกแบบ Common B ซึ่งเป็นการเลือกดิวิตไชเกิ้ล b ของอินเวอร์เตอร์สามกึ่งนำทั้งสองตัวมาใช้เป็นสัญญาณลำดับศูนย์ของอินเวอร์เตอร์ห้ากึ่ง



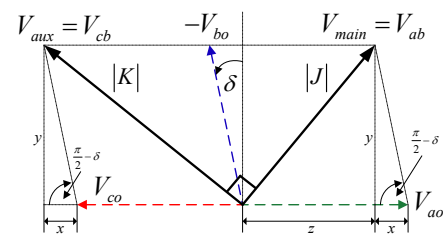
รูปที่ 1 วงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์ห้ากึ่งนำแบบ common B ขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสสองตัว

2. การมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบสเปซเวกเตอร์สองเฟส

2.1 แรงดันขาออกสองเฟสสำหรับอินเวอร์เตอร์สามกึ่ง

เวกเตอร์แรงดันขาออกสองเฟสสำหรับอินเวอร์เตอร์สามกึ่งสามารถแสดงได้ในรูปที่ 2 โดยมีเวกเตอร์แรงดันสามตัว แล้วใช้แรงดันไลน์ทูไลน์เป็นแรงดันขาออก ซึ่งใช้เวกเตอร์ V_{bo} เป็นเวกเตอร์แรงดันร่วม แรงดันขาออกสำหรับจ่ายให้กับขดลวดหลักของมอเตอร์ คือแรงดันไลน์ทูไลน์ V_{ab} และแรงดันขาออกสำหรับจ่ายให้กับขดลวดช่วยของมอเตอร์ คือแรงดันไลน์ทูไลน์ V_{cb} โดยมีแพค

เตอร์แรงดัน $|J|$ และ $|K|$ เป็นตัวคูณแรงดัน ซึ่งเป็นแพคเตอร์แรงดันขดลวดหลักและช่วยตามลำดับ การขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสให้มีสมรรถนะที่ดี จำเป็นต้องจ่ายแรงดันขดลวดช่วยและขดลวดหลักไม่เท่ากัน โดยจ่ายแรงดันเป็นอัตราส่วนตามอัตราส่วนจำนวนขดลวดช่วยต่อขดลวดหลัก สำหรับการปรับอัตราส่วนแรงดันขดลวดช่วยต่อขดลวดหลัก สามารถทำได้โดยเลื่อนมุมเฟสของแรงดันกึ่งร่วม V_{bo} ด้วยมุม δ ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 เฟสเซอร์ไดอะแกรมสำหรับแพคเตอร์แรงดัน $|J|$ และ $|K|$

อัตราส่วนจำนวนขดลวดช่วยต่อขดลวดหลักคือ α ดังนั้นมุม δ และ ϕ สามารถคำนวณได้จากสมการ (1) และ (2)

$$\delta = 2 \cdot \tan^{-1}(\alpha) - \frac{\pi}{2} \quad (1)$$

$$\phi = \frac{\delta}{2} \quad (2)$$

ขนาดของสเปซเวกเตอร์ขาออกกำหนดได้จากแพคเตอร์แรงดัน $|J|$ $|K|$ และ $|L|$ ซึ่งคำนวณได้จากสมการ (3)-(5) [7]

$$|J| = \sqrt{2} \sin\left(\frac{\pi}{4} - \phi\right) \quad (3)$$

$$|K| = \sqrt{2} \cos\left(\frac{\pi}{4} - \phi\right) \quad (4)$$

$$|L| = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{|J|}\right)^2 + \left(\frac{1}{|K|}\right)^2}} \quad (5)$$

ขณะที่ขนาดของแรงดันขาออกสองเฟสที่จ่ายให้กับขดลวดช่วย V_{aux} และขดลวดหลัก V_{main} สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6) และ (7) โดย V_{dc} คือครึ่งหนึ่งของแรงดันไฟตรงเชื่อมโยง และ M คือค่าดัชนีการมอดูเลท

$$V_{main} = MV_{dc} |J| \quad (6)$$

$$V_{aux} = MV_{dc} |K| \quad (7)$$

2.2 การมอดูเลทความกว้างพัลส์แบบสเปซเวกเตอร์สองเฟส

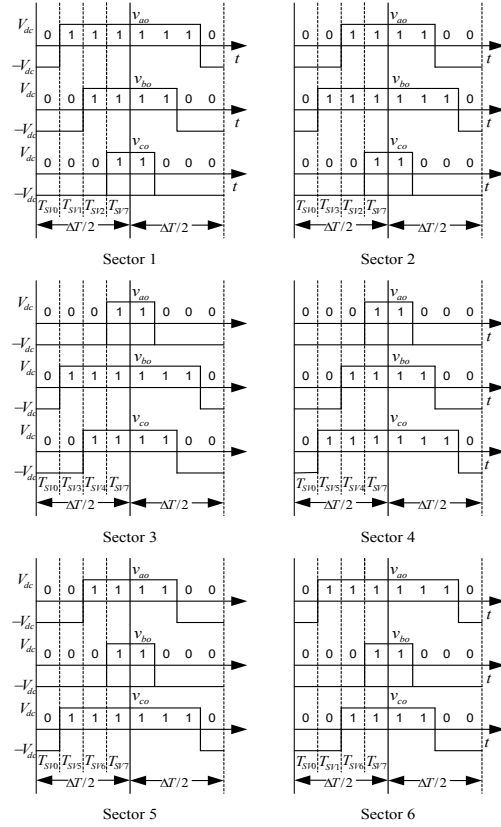
การมอดูเลทความกว้างพัลส์แบบสเปซเวกเตอร์สองเฟสนั้นสามารถทำได้โดยใช้สมการในตารางที่ 1 คำนวณหาค่าเวลาของแอกทีฟเวกเตอร์ที่อยู่ในเซกเตอร์นั้นๆ โดย θ_0 คือมุมอ้างอิงของสเปซเวกเตอร์ โดยเริ่มต้นที่ 0 องศาจากเซกเตอร์ 1 แล้วกวาดไปจนถึงเซกเตอร์สุดท้าย แล้วนำไปประกอบกับตำแหน่งการวางเวกเตอร์ในรูปที่ 3 ซึ่งจะได้ค่าออกมาเป็นดิวิตีซีเกิ้ลของสัญญาณ PWM โดยค่าดัชนีการมอดูเลทอยู่ระหว่าง $0 \leq M \leq \sqrt{2}$ [7]

สำหรับการคำนวณหาดิวิตีซีเกิ้ลของแต่ละกึ่งนั้น เมื่อคำนวณเวลาแอกทีฟของเวกเตอร์แอกทีฟแล้ว สามารถใช้ตำแหน่งการวางเวกเตอร์ในรูปที่ 3 เป็นตัวประกอบในการคำนวณ และสามารถคำนวณค่าดิวิตีซีเกิ้ลในเซกเตอร์ 1 ได้ตามสมการที่ (8)-(10) และได้แสดงรูปสัญญาณดิวิตีซีเกิ้ลเต็มลูกคลื่นในรูปที่ 4

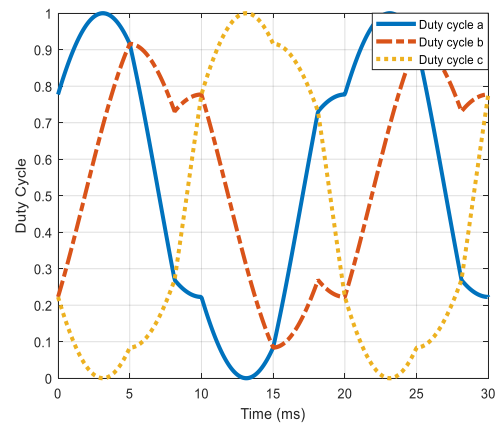
$$D_a = \frac{T_{SV1}}{\Delta T/2} + \frac{T_{SV2}}{\Delta T/2} + \frac{T_{SV7}}{\Delta T/2} \quad (8)$$

$$D_a = \frac{T_{SV2}}{\Delta T/2} + \frac{T_{SV7}}{\Delta T/2} \quad (9)$$

$$D_a = \frac{T_{SV7}}{\Delta T/2} \quad (10)$$



รูปที่ 3 ตำแหน่งการวางเวกเตอร์ของสเปซเวกเตอร์แรงดันสองเฟสสำหรับอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันสามกึ่ง



รูปที่ 4 สัญญาณดิวิตีซีเกิ้ลของสเปซเวกเตอร์สองเฟส

ตารางที่ 1 เวลาแอกทีฟของสเปซเวกเตอร์สองเฟส

Sector 1	Sector 2
$\frac{T_{SV_1}}{\Delta T/2} = \frac{M J \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta_0\right)}{2}$ $\frac{T_{SV_2}}{\Delta T/2} = \frac{M K \sin(\theta_0)}{2}$	$\frac{T_{SV_1}}{\Delta T/2} = \frac{M K \sin\left(\frac{3\pi}{4} + \phi - \theta_0\right)}{2\sin\left(\frac{\pi}{4} + \phi\right)}$ $\frac{T_{SV_2}}{\Delta T/2} = \frac{M L \sin\left(\theta_0 - \frac{\pi}{2}\right)}{2\sin\left(\frac{\pi}{4} + \phi\right)}$
Sector 3	Sector 4
$\frac{T_{SV_3}}{\Delta T/2} = \frac{M L \sin(\pi - \theta_0)}{2\sin\left(\frac{\pi}{4} - \phi\right)}$ $\frac{T_{SV_4}}{\Delta T/2} = \frac{M J \sin\left(\theta_0 - \frac{3\pi}{4} - \phi\right)}{2\sin\left(\frac{\pi}{4} - \phi\right)}$	$\frac{T_{SV_3}}{\Delta T/2} = \frac{M J \sin\left(\frac{3\pi}{2} - \theta_0\right)}{2}$ $\frac{T_{SV_4}}{\Delta T/2} = \frac{M K \sin(\theta_0 - \pi)}{2}$
Sector 5	Sector 6
$\frac{T_{SV_5}}{\Delta T/2} = \frac{M K \sin\left(\frac{7\pi}{4} + \phi - \theta_0\right)}{2\sin\left(\frac{\pi}{4} + \phi\right)}$ $\frac{T_{SV_6}}{\Delta T/2} = \frac{M L \sin\left(\theta_0 - \frac{3\pi}{2}\right)}{2\sin\left(\frac{\pi}{4} + \phi\right)}$	$\frac{T_{SV_5}}{\Delta T/2} = \frac{M L \sin(2\pi - \theta_0)}{2\sin\left(\frac{\pi}{4} - \phi\right)}$ $\frac{T_{SV_6}}{\Delta T/2} = \frac{M J \sin\left(\theta_0 - \frac{7\pi}{4} - \phi\right)}{2\sin\left(\frac{\pi}{4} - \phi\right)}$

3. การมอดูเลตสำหรับอินเวอร์เตอร์ห้ากึ่งสองภาวะไหล

การมอดูเลตความกว้างพัลส์สำหรับอินเวอร์เตอร์ห้ากึ่งสองภาวะไหล ขั้นตอนแรกคือการเลือกดิวิต์ไชเกิ้ลที่จะใช้เป็นสัญญาณลำดับศูนย์ เนื่องจากการมอดูเลตแบบห้ากึ่งสองเอาท์พุท จะใช้ดิวิต์ไชเกิ้ลหนึ่งสัญญาณของมอเตอร์ตัวที่หนึ่งไปเป็นสัญญาณลำดับศูนย์ของมอเตอร์ตัวที่สอง และใช้ดิวิต์ไชเกิ้ลหนึ่งสัญญาณของตัวที่สองไปเป็นสัญญาณลำดับศูนย์ของมอเตอร์ตัวที่หนึ่ง ซึ่งสัญญาณที่นำไปใช้เป็นสัญญาณลำดับศูนย์ทั้งสองตัวรวมกันเรียกว่า ดิวิต์ไชเกิ้ลของกึ่งร่วมของอินเวอร์เตอร์ห้ากึ่ง เมื่อสัญญาณขาออกไปใช้จะเป็นสัญญาณไลน์ทูไลน์ จะทำให้สัญญาณลำดับศูนย์หายไป หากพิจารณาที่แรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์ก็เช่นกัน แรงดันขาออกจะไม่มีแรงดันลำดับศูนย์ปรากฏที่ขั้วมอเตอร์ทั้งสองตัว และสามารถแสดงสมการสำหรับการมอดูเลตห้ากึ่งได้ดังสมการที่ (11) และแสดงบล็อกไดอะแกรมของการมอดูเลตได้ดังรูปที่ 5 ซึ่ง

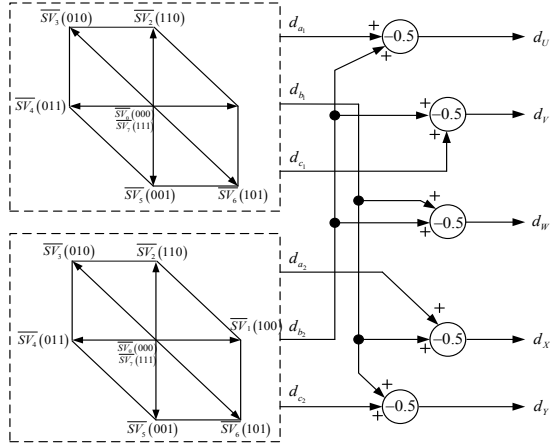
โดยปกติสัญญาณดิวิต์ไชเกิ้ลมีขนาดอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 และมีค่าออฟเซ็ทอยู่ที่ 0.5 หากนำมามอดูเลตแบบห้ากึ่งจำเป็นต้องลบค่าออฟเซ็ทออก 0.5

$$\begin{aligned}d_U &= d_{a_1} + d_{b_2} - 0.5 \\d_V &= d_{c_1} + d_{b_2} - 0.5 \\d_W &= d_{b_1} + d_{b_2} - 0.5 \\d_X &= d_{a_2} + d_{b_1} - 0.5 \\d_Y &= d_{c_2} + d_{b_1} - 0.5\end{aligned}\quad (11)$$

การเลือกดิวิต์ไชเกิ้ลกึ่งร่วมสำหรับสเปซเวกเตอร์แรงดันสองเฟส นั้นจะมีผลต่อค่าดิวิต์ไชเกิ้ลรวมของอินเวอร์เตอร์ห้ากึ่ง จากรูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่าค่าดิวิต์ไชเกิ้ล b นั้นจะมีขนาดพิคที่น้อยกว่าตัวอื่น ซึ่งเมื่อเทียบกับการเลือกดิวิต์ไชเกิ้ล a และ c หากนำดิวิต์ไชเกิ้ล b ไปใช้เป็นสัญญาณลำดับศูนย์จะทำให้ดิวิต์ไชเกิ้ลรวมนั้นลดลง แล้วจะส่งผลให้สามารถใช้ดิวิต์ไชเกิ้ลรวมได้มากกว่า 100 % การนำดิวิต์ไชเกิ้ล b ของมอเตอร์ตัวหนึ่งมาใช้เป็นสัญญาณลำดับศูนย์ของมอเตอร์อีกตัวหนึ่งจะพิจารณาจากพิคของดิวิต์ไชเกิ้ล b ของมอเตอร์ตัวที่หนึ่งดังสมการที่ (12) และสามารถคำนวณดิวิต์ไชเกิ้ลสูงสุดของมอเตอร์ตัวที่สองได้ดังสมการที่ (13) และสามารถอธิบายความสัมพันธ์ของค่าดัชนีการมอดูเลตของมอเตอร์ทั้งสองตัวดังสมการที่ (14) และ (15)

หากเลือกดิวิต์ไชเกิ้ล a หรือ c เป็นสัญญาณลำดับศูนย์ จะไม่สามารถช่วยให้ดิวิต์ไชเกิ้ลของอินเวอร์เตอร์ห้ากึ่งลดลง เนื่องจากพิคของแต่ละสัญญาณนั้นมีค่าปกติอยู่แล้ว สำหรับการเลือกสัญญาณดิวิต์ไชเกิ้ลมาเป็นสัญญาณลำดับศูนย์นั้น มีทั้งหมด 6 รูปแบบ และระบุได้ตามคู่สัญญาณที่นำมาเป็นสัญญาณลำดับศูนย์ เช่น นำสัญญาณดิวิต์ไชเกิ้ล a_1 - a_2 , b_1 - b_2 และ c_1 - c_2 มาใช้เป็นสัญญาณลำดับศูนย์ เรียกว่า common A, common B และ common C ตามลำดับ และยังมีการเลือกสัญญาณลำดับศูนย์อื่นๆอีก 4 แบบ คือ a_1 - b_2 , a_1 - c_2 , a_2 - b_1 , และ a_2 - c_1 ซึ่งจะให้ผลไปในทิศทางเดียวกันกับ common A และ common C คือไม่สามารถช่วยลดพิคของดิวิต์ไชเกิ้ลของอินเวอร์เตอร์ห้ากึ่งได้ ดังนั้นบทความนี้ จึงได้นำเสนอเฉพาะ common A,

common B และ common C ซึ่งจากสมการที่ (14) และ (15) common B สามารถลดตัวตัดไขเกล็ดได้ ส่งผลให้สามารถเพิ่มค่าดัชนีการมอดูเลตได้มากกว่า 100% ในช่วงเชิงเส้นได้ และได้แสดงพื้นที่การมอดูเลตเชิงเส้นของการเลือกตัวตัดไขเกล็ดร่วมกันต่างๆ ดังรูปที่ 6



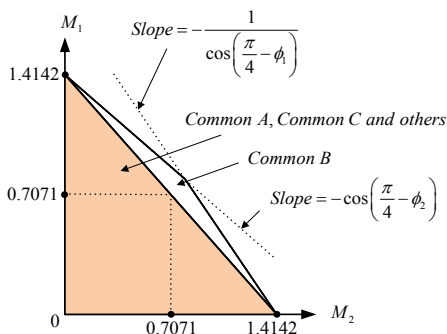
รูปที่ 5 ไดอะแกรมการมอดูเลตสำหรับอินเวอร์เตอร์ห้ากึ่ง
แบบ common B

$$D_{b1,peak} = \frac{M_1 |K_1|}{4} + 0.5 \quad (12)$$

$$D_{2,max} = 1 - D_{b1,peak} \therefore D_{2,max} = \frac{M_{2,max}}{2\sqrt{2}} \quad (13)$$

$$M_{2,max} = \sqrt{2} - M_1 \cos\left(\frac{\pi}{4} - |\phi_1|\right) \quad (14)$$

$$M_{1,max} = \sqrt{2} - M_2 \cos\left(\frac{\pi}{4} - |\phi_2|\right) \quad (15)$$



รูปที่ 6 ย่านเชิงเส้นของดัชนีการมอดูเลตสำหรับ
อินเวอร์เตอร์ห้ากึ่ง

จากรูปที่ 6 แสดงให้เห็นพื้นที่การมอดูเลตเชิงเส้นของอินเวอร์เตอร์ห้ากึ่งที่ใช้การมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบสเปซเวกเตอร์ และการเลือกตัวตัดไขเกล็ดร่วมกันแบบ common B สามารถเพิ่มย่านการมอดูเลตเชิงเส้นได้สูงกว่าแบบอื่นๆ ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ (13) และ (14)

4. การจำลอง และการทดสอบ



รูปที่ 7 ฮาร์ดแวร์อินเวอร์เตอร์ห้ากึ่ง และเครื่องมือวัด

ผลการจำลองได้จากโปรแกรม Matlab/Simulink และผลทดสอบ การเลือกสัญญาณลำดับศูนย์ที่เหมาะสมสำหรับอินเวอร์เตอร์ห้ากึ่งบนพื้นฐานการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบสเปซเวกเตอร์สองเฟส ป้อนให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสคู่ เพื่อขยายย่านการมอดูเลตเชิงเส้นของอินเวอร์เตอร์ห้ากึ่ง ได้แสดงรูปฮาร์ดแวร์ในรูปที่ 7 สำหรับการจำลอง และการทดสอบพารามิเตอร์ต่างๆ ในการเลือกสัญญาณตัวตัดไขเกล็ดร่วมกันทั้ง 3 รูปแบบ เหมือนกันทั้งหมด ดังนี้ $\alpha_1 = 1.5$, $\alpha_2 = 1.5$ $f_s = 2.5kHz$, $f_1 = 25Hz$, $f_2 = 50Hz$, $M_1 = 0.825$, $M_2 = 0.707$ ซึ่งค่าดัชนีการมอดูเลตรวมมีค่าเท่ากับ 1.532 คิดเป็น 108.3% ของค่าดัชนีการมอดูเลตปกติ และใช้แรงดันไฟตรงเชื่อมโยง 300 โวลต์

รูปที่ 8, 10 และ 12 แสดงผลการจำลอง ส่วนรูปที่ 9, 11 และ 13 แสดงผลการทดสอบสัญญาณดิฟเฟอเรนเชียลและสัญญาณ PWM ของอินเวอร์เตอร์ห้ากึ่งที่ไซสเปซเวกเตอร์สองเฟส ในรูปแบบการเลือกสัญญาณลำดับศูนย์แบบ common A, common B และ common C ตามลำดับ ซึ่งในรูปได้แสดงรูปสัญญาณของกึ่ง U, V, W, X, Y

จากผลการจำลอง และผลการทดลองในรูปที่ 8 ถึง 13 แสดงให้เห็นว่าในกรณีที่ใช้ค่าดัชนีการมอดูเลทรวม 108.3% ตามเงื่อนไขของการจำลองและทดสอบนั้น การเลือกสัญญาณลำดับศูนย์แบบ common A มีดิฟเฟอเรนเชียลของกึ่ง V และ W บางช่วงที่มีค่าเกิน 1 และดิฟเฟอเรนเชียลของกึ่ง Y มีบางช่วงที่มีค่าต่ำกว่า 0 จึงส่งผลให้เกิดการโอเวอร์มอดูเลทเกิดขึ้นที่สัญญาณ PWM กึ่ง V, W และ Y ในผลการจำลอง และสามารถยืนยันได้จากผลการทดสอบในรูปที่ 8 และรูปที่ 9

การเลือกสัญญาณลำดับศูนย์แบบ common B มีดิฟเฟอเรนเชียลของทุกกึ่งตั้งแต่ U ไปจนถึงกึ่ง Y มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 จากผลการจำลอง และการทดสอบพบว่าไม่เกิดการโอเวอร์มอดูเลทเกิดขึ้นที่สัญญาณ PWM ทั้งในผลการจำลอง และสามารถยืนยันได้จากผลการทดสอบในรูปที่ 10 และรูปที่ 11

และการเลือกสัญญาณลำดับศูนย์แบบ common C มีดิฟเฟอเรนเชียลของกึ่ง X บางช่วงที่มีค่าเกิน 1 และดิฟเฟอเรนเชียลของกึ่ง U และ W มีบางช่วงที่มีค่าต่ำกว่า 0 จึงส่งผลให้เกิดการโอเวอร์มอดูเลทเกิดขึ้นที่สัญญาณ PWM กึ่ง U, W และ X ในผลการจำลอง และสามารถยืนยันได้จากผลการทดสอบ ในรูปที่ 12 และรูปที่ 13

จากผลการจำลอง และทดสอบในรูปที่ 8 ถึง 13 แสดงให้เห็นว่า การเลือกสัญญาณลำดับศูนย์แบบ common B สามารถขยายย่านเชิงเส้นของการมอดูเลทความกว้างพัลส์ขึ้นได้เกิน 100% ซึ่งสามารถอธิบายได้ตามสมการที่ (12) ถึง (15)

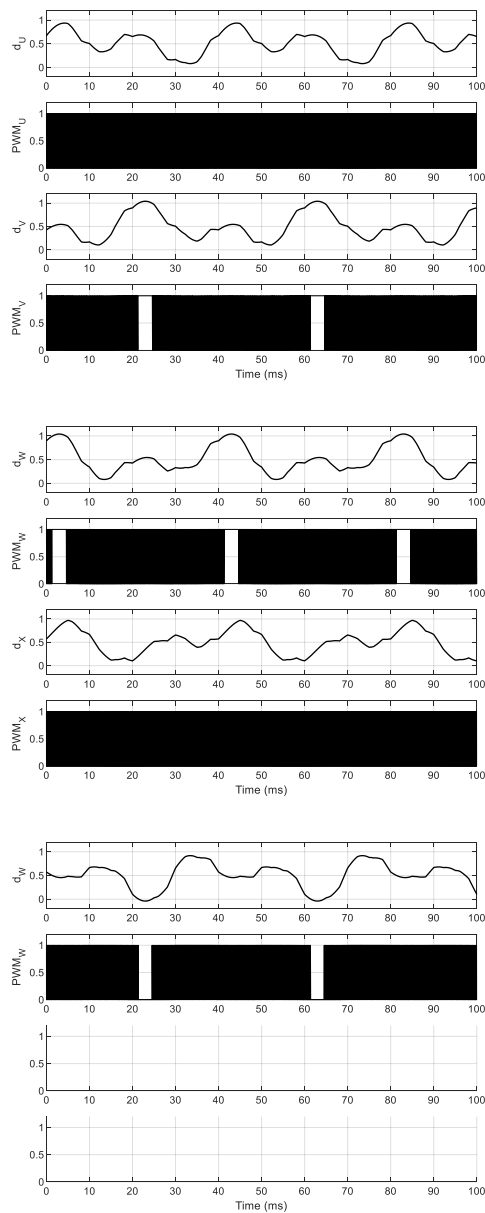
ผลการจำลอง และผลการทดสอบในรูปที่ 14 ถึง 21 แสดงผลทางด้านฮาร์โมนิก ซึ่งได้สเปกตรัมของแรงดันมอเตอร์ขดลวดหลัก และขดลวดช่วย ทั้งของมอเตอร์ตัวที่

1 และตัวที่ 2 เนื่องจากมีการเกิดโอเวอร์มอดูเลทเกิดขึ้นในการเลือกสัญญาณลำดับศูนย์แบบ common A และ common C ดังนั้นจึงได้เปรียบเทียบขนาดแรงดันฮาร์โมนิกความถี่ต่ำที่เกิดขึ้น ระหว่างการเลือกสัญญาณลำดับศูนย์แบบ common A, common B และ common C ในรูปที่ 14 ถึง 21

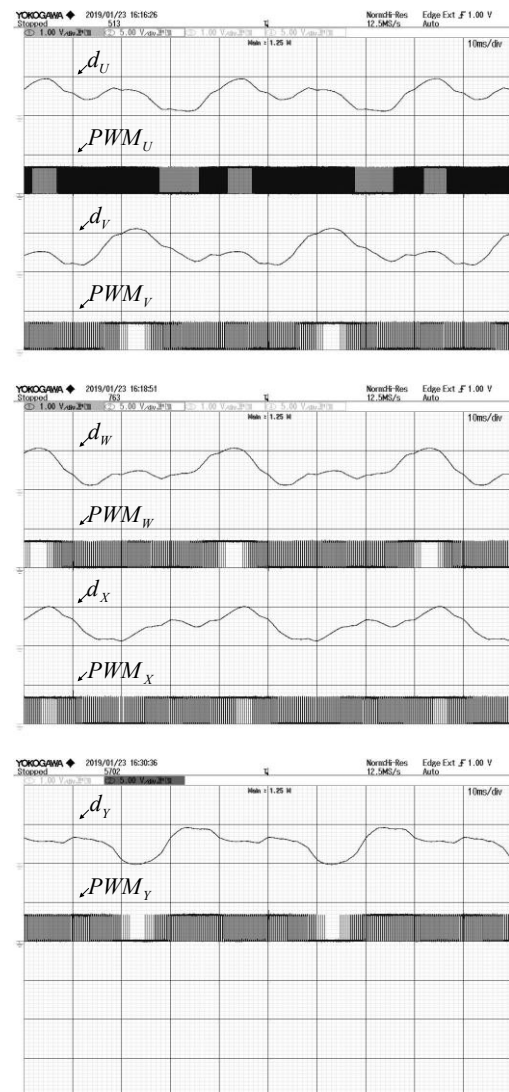
การเกิดโอเวอร์มอดูเลทสามารถให้แรงดันความถี่มูลฐานที่สูงขึ้น แต่จะไม่ได้เพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้น ซึ่งการเกิดโอเวอร์มอดูเลทจะทำให้เกิดกลุ่มฮาร์โมนิกความถี่ต่ำ ใกล้เคียงกับความถี่มูลฐานขึ้น [8]

ผลการจำลองสัญญาณแรงดันและกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสทั้งสองตัวได้แสดงในรูปที่ 22 และผลการทดสอบได้แสดงในรูปที่ 23 แสดงให้เห็นว่าทั้งผลการจำลอง และผลการทดสอบมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน

ในกรณีที่มอเตอร์ทั้งสองตัวถูกขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ห้ากึ่งนั้น จะมีช่วงการทำงานบางช่วงที่มอเตอร์สร้างพัลส์ไม่ถึงพิคกิ้ง จึงส่งผลให้มอเตอร์ไม่สามารถทำงานที่พิคกิ้งกำลังได้ มอเตอร์ทั้งสองตัวสามารถทำงานได้ทั้งในกรณีที่ขั้วภาระไหลแตกต่างกัน หรือความเร็วรอบต่างกัน ได้ ตามสภาวะเงื่อนไขที่แรงดันตกคร่อมมอเตอร์ที่ค่าดัชนีการมอดูเลทต่างๆ แต่เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการเลือกสัญญาณลำดับศูนย์ที่เหมาะสม กับวิธีการเลือกอื่นๆแล้ว วิธีการเลือกลำดับศูนย์ที่นำเสนอ (Common B) นั้นสามารถเพิ่มแรงดันขาออกให้มอเตอร์ได้สูงขึ้นเพียงวิธีเดียว ดังผลการจำลองและการทดสอบทั้งหมด

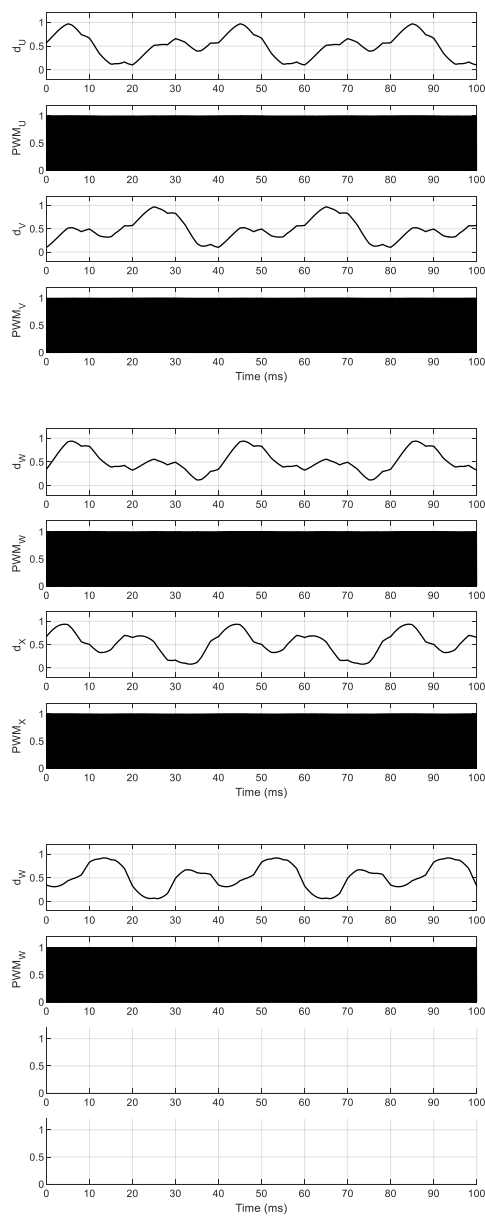


รูปที่ 8 ผลการจำลองสัญญาณดิไวตีไซเคิล และ PWM ของ
Common A

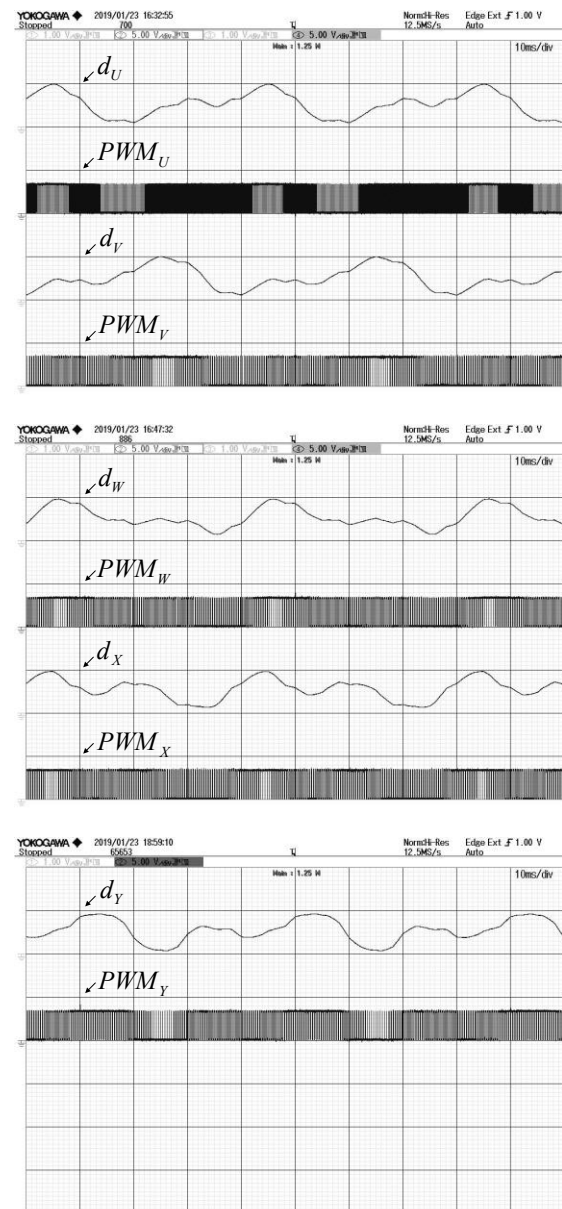


รูปที่ 9 ผลการทดสอบสัญญาณดิไวตีไซเคิล และ PWM
ของ Common A

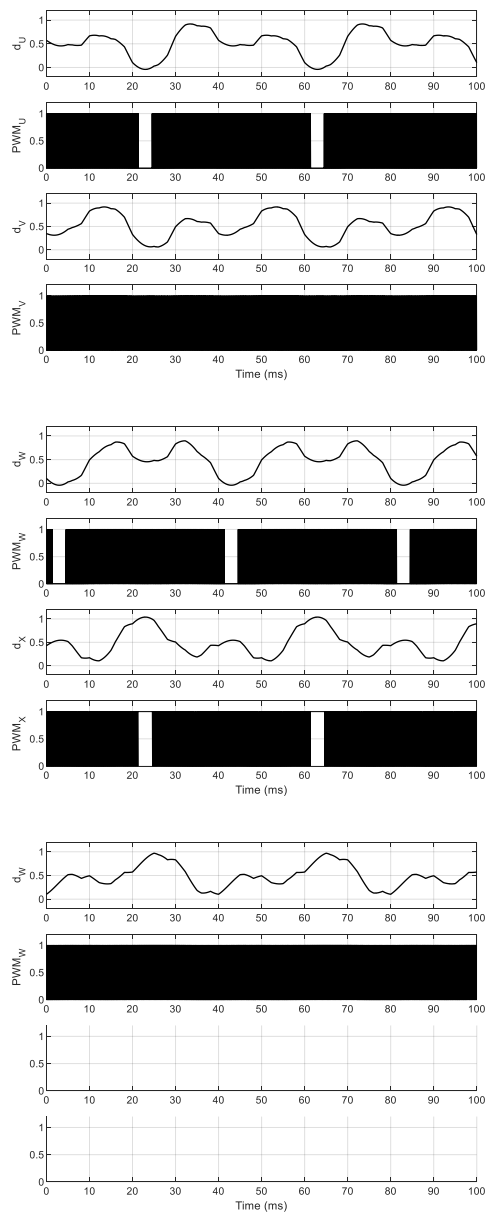
ปีที่ 14 ฉบับที่ 2 เดือน พฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2562



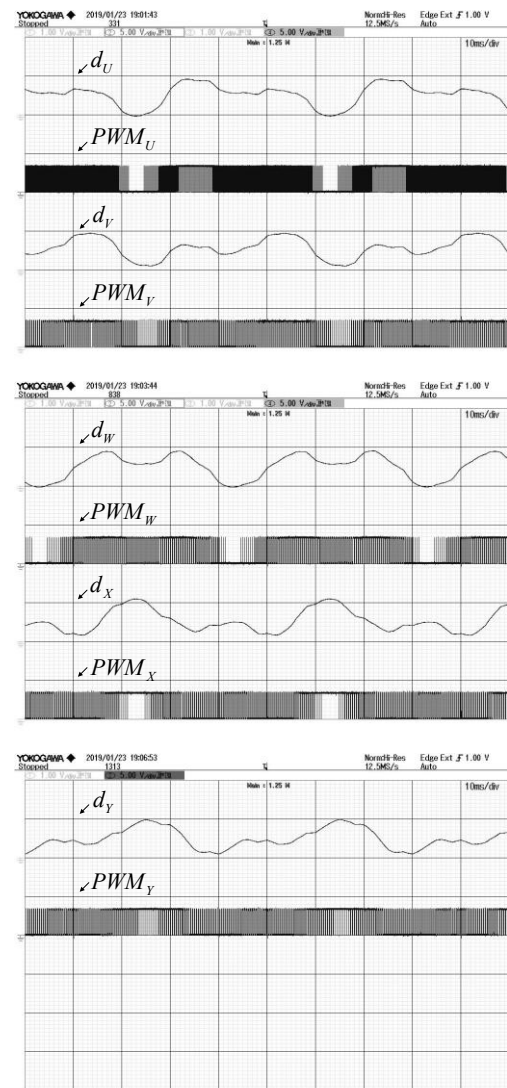
รูปที่ 10 ผลการจำลองสัญญาณดิ้ว์ไซเกิ้ล และ PWM ของ Common B



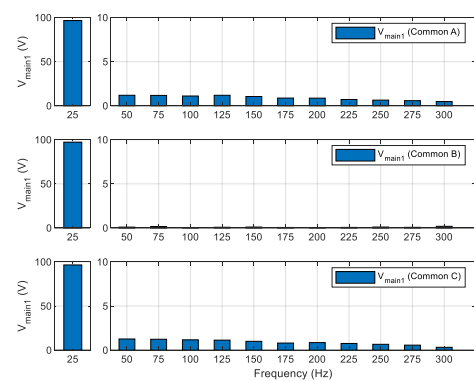
รูปที่ 11 ผลการทดสอบสัญญาณดิ้ว์ไซเกิ้ล และ PWM ของ Common B



รูปที่ 12 ผลการจำลองสัญญาณดิไค้และ PWM
ของ Common C

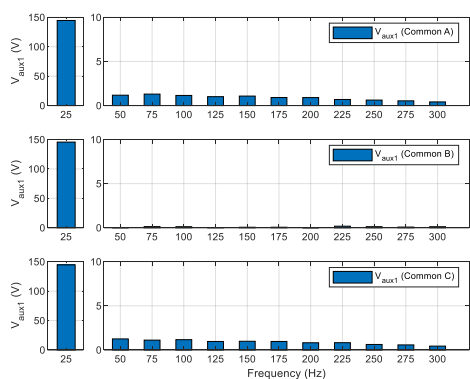


รูปที่ 13 ผลการทดสอบสัญญาณดิไค้และ PWM
ของ Common C

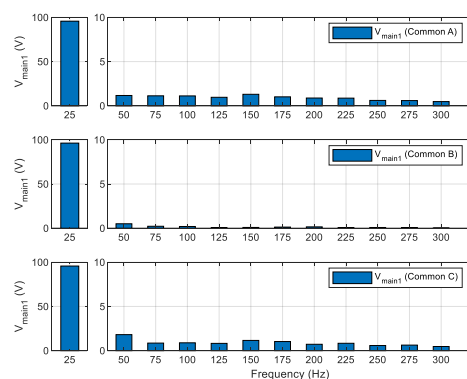


รูปที่ 14 ผลการจำลองสเปกตรัมแรงดันขดลวดหลักมอเตอร์ 1

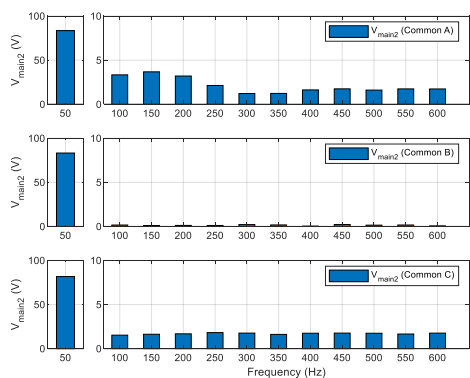
ปีที่ 14 ฉบับที่ 2 เดือน พฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2562



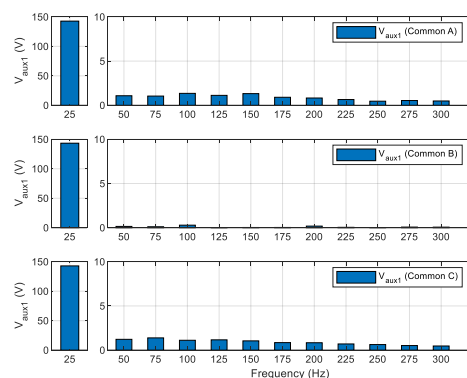
รูปที่ 15 ผลการจำลองสเปกตรัมแรงดันขดลวดช่วยมอเตอร์ 1



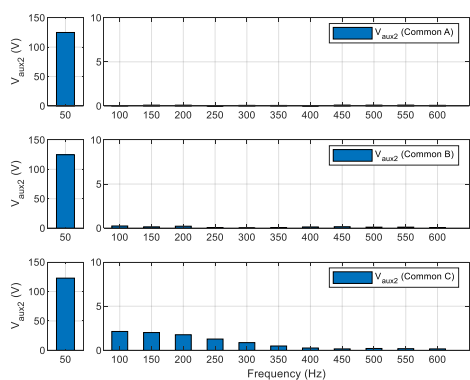
รูปที่ 18 ผลการทดสอบสเปกตรัมแรงดันขดลวดหลักมอเตอร์ 1



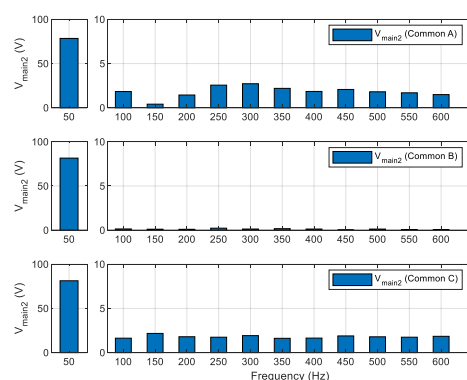
รูปที่ 16 ผลการจำลองสเปกตรัมแรงดันขดลวดหลักมอเตอร์ 2



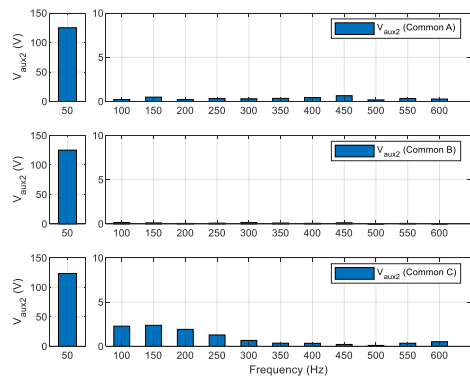
รูปที่ 19 ผลการทดสอบสเปกตรัมแรงดันขดลวดช่วยมอเตอร์ 1



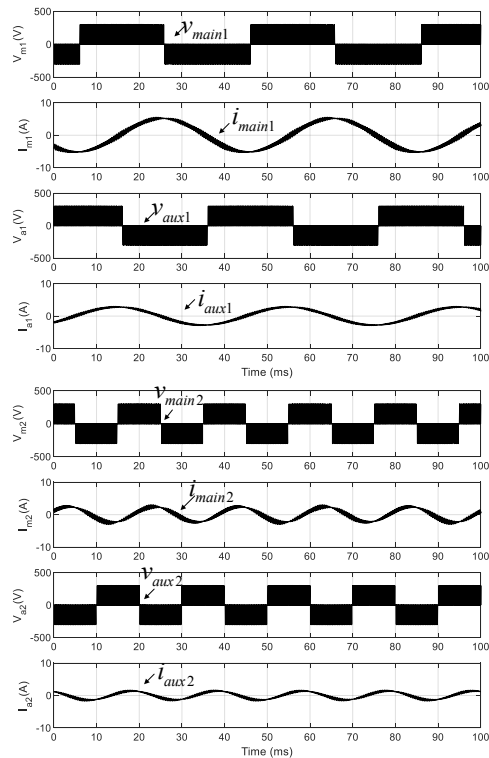
รูปที่ 17 ผลการจำลองสเปกตรัมแรงดันขดลวดช่วยมอเตอร์ 2



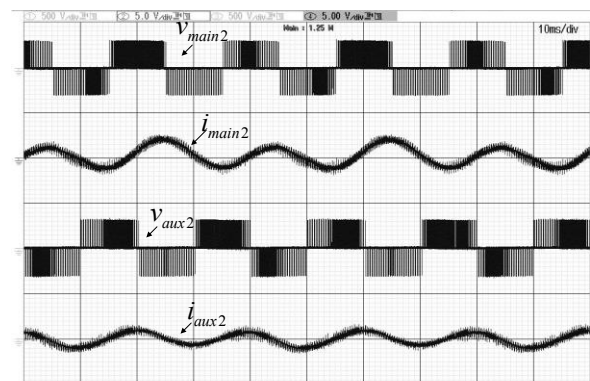
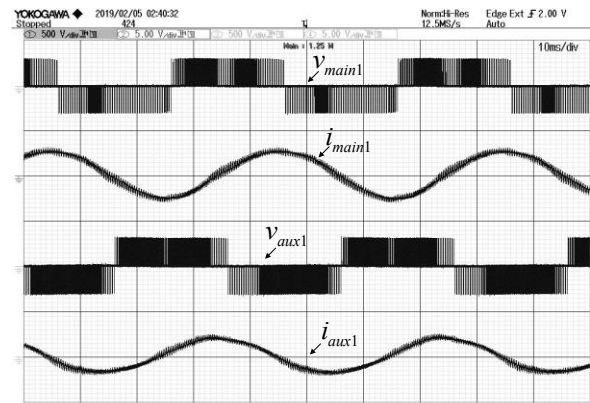
รูปที่ 20 ผลการทดสอบสเปกตรัมแรงดันขดลวดหลักมอเตอร์ 2



รูปที่ 21 ผลการทดสอบสเปกตรัมแรงดันขดลวดช่วยมอเตอร์ 2



รูปที่ 22 ผลการจำลองแรงดันและกระแสของมอเตอร์ทั้งสองตัว



รูปที่ 23 ผลการทดสอบแรงดันและกระแสของมอเตอร์ทั้งสองตัว

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟส

พิกัดกำลัง	2 hp
อัตราส่วนขดลวดช่วยต่อขดลวดหลัก (α)	1.5
จำนวนโพล	4
ความถี่พิกัด	50 Hz
ความเร็วรอบที่พิกัดกำลัง	1450 rpm

5. สรุป

จากการวิเคราะห์ผลการจำลอง และผลการทดสอบทั้งหมดสามารถสรุปผลได้ว่า การเลือกสัญญาณลำดับศูนย์ที่เหมาะสมสำหรับอินเวอร์เตอร์ห้ากึ่งบนพื้นฐานการมอดูเลทความกว้างพัลส์แบบสเปซเวกเตอร์สองเฟส ป้อนให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสสองตัวที่ควบคุมอย่างอิสระต่อกัน สามารถขยายงานการมอดูเลทเชิงเส้นได้ โดยการเลือกสัญญาณลำดับศูนย์แบบ common B นั้นสามารถลด

ขนาดพีคของดิฟฟ์ไซด์สำหรับอินเวอร์เตอร์ห้ากึ่ง ซึ่งได้ส่งผลให้สามารถขยายย่านเชิงเส้นของค่าดัชนีการมอดูเลทรวมได้มากกว่า 100 เปอร์เซนต์ ซึ่งสามารถยืนยันได้จากผลการจำลอง และผลการทดสอบ

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย โครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก (คปก.) สัญญาทุนเลขที่ PHD/0163/2558

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Jones, S.N. Vukosavic, D. Dujic, E. Levi and P. Wright, "Five-leg inverter PWM technique for reduced switch count two-motor constant applications," *IET Electr. Power Appl.*, vol. 2, no.5, pp. 275-287, Sep. 2008.
- [2] C. S. Lim and N. A. Rahim, "Model Predictive Control of a Two-Motor Drive With Five-Leg-Inverter Supply," *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, vol. 60, no.1, pp. 54-65, Feb. 2013.
- [3] S. Dangeam and V. Kinnarees, "Two Single-phase Induction Motor Drives Using a Five-leg Voltage Source Inverter," *The 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS 2015)*, Pattaya City., Thailand, pp. 156-162, Oct. 2015
- [4] W. Promkhun, V. Kinnarees, K. Ohyama and V. Thanyaphirak, "Optimal Zero-Sequence Selection for Five-Leg Inverter Based on Two-Phase SVPWM Fed Dual Two-Phase Induction Motors," *The 6th International Electrical Engineering Conference (IEECON 2018)*, Krabi, Thailand, pp. 283-286, March 2018.
- [5] G. Su, and J. S. Hsu, "A Five-Leg Inverter for Driving a Traction Motor and a Compressor Motor," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol.21, no.3, pp. 687-692, May 2006.
- [6] K. Oka, Y. Nozawa and K. Matsuse, "An Improved Method of Voltage Utility Factor for PWM Control of a Five-Leg Inverter in Two Induction Motor Drives," *IEEE Transactions on Electrical and Electronics Engineering*, vol. 1, no.1, pp. 108-111, May 2006.
- [7] V. Kinnarees and C. Charumit, "Modulating Functions of Space Vector PWM for Three-Leg VSI-Fed Unbalanced Two-Phase Induction Motors," *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2009, vol. 24, no.4, pp. 1135-1139, Apr. 2009.
- [8] D. G. Holmes, "Overmodulation of an Inverter," in *Pulse Width Modulation for Power Converters*, T. A. Lipo, Ed. New Jersey: John Willey, pp. 349-382, 2003.

การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกำลังแอคทีฟสำหรับระบบไฟฟ้า ที่แหล่งจ่ายแรงดันบิดเบี้ยว

Harmonic Elimination using Active Power Filter for Non-Sinusoidal Voltage Source System

ชาคริต ปานแป้น กองพล อารีรักษ์* และกองพัน อารีรักษ์

กลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Chakrit Panpean Kongpol Areerak* and Kongpan Areerak

Power electronics, Energy, Machines, and Control Research Group,

School of Electrical Engineering, Institute of Engineering,

Suranaree University of Technology, Nakhon Rachasima, 30000

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

(Received: May 19, 2019; Accepted: August 20, 2019)

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกำลังแอคทีฟสำหรับระบบไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายแรงดันบิดเบี้ยวมีลักษณะผิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณไซน์ การตรวจจับฮาร์มอนิกเพื่อคำนวณค่ากระแสอ้างอิงให้กับวงจรรอกำลังแอคทีฟใช้วิธีทฤษฎีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่งซึ่งประยุกต์ใช้งานร่วมกับการตรวจจับแรงดันลำดับเฟสบวกมูลฐาน เพื่อรองรับการกำจัดฮาร์มอนิกของระบบไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าบิดเบี้ยว ระบบควบคุมกระแสชดเชยและแรงดันบัสไฟตรงสำหรับวงจรรอกำลังแอคทีฟจะใช้ตัวควบคุมพีไอ โดยตัวควบคุมดังกล่าวจะทำงานร่วมกับเทคนิคการสวิตช์พิดับเบิลยูเอ็ม นอกจากนี้ได้นำเสนอการจำลองสถานการณ์ระบบกำจัดฮาร์มอนิกโดยใช้โปรแกรม Matlab Simulink ผลการจำลองสถานการณ์ดังกล่าว พบว่า ระบบควบคุมวงจรรอกำลังแอคทีฟด้วยตัวควบคุมพีไอให้สมรรถนะที่ดีในการกำจัดฮาร์มอนิกในสถานะที่แหล่งจ่ายแรงดันบิดเบี้ยว และทุกสภาวะโหลดที่ทำการทดสอบ โดยพิจารณาจากดัชนีชี้วัดสมรรถนะด้วยค่า $\%THD$ ของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับก่อนการชดเชย อีกทั้งค่า $\%THD$ หลังการชดเชยดังกล่าวยังอยู่ภายใต้มาตรฐาน IEEE Std.519-2014 และ IEEE std.1459 – 2010

คำสำคัญ: วงจรรอกำลังแอคทีฟ ทฤษฎีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่ง การตรวจจับแรงดันลำดับเฟสบวกมูลฐาน ฮาร์มอนิก

ABSTRACT

This paper presents harmonic elimination using active power filter for non-sinusoidal voltage source system. The instantaneous power theory (PQ) with positive sequence voltage detector (PSVD) is used for harmonic detection to calculate the reference current. The PI-controller is applied for compensating current control and DC bus voltage control. This controller is used with PWM switching technique. Moreover, the Matlab Simulink is applied for simulation in the paper. The simulation results show that the active power filter with PI-controller can provide the good performance to eliminate the

harmonic for all loads in non-sinusoidal voltage source system. In the paper, the performance index is %THD of source current after compensation. In addition, the %THD after compensation can follow the IEEE Std.519 – 2014 and IEEE std.1459 – 2010.

Keyword: Active power filter, Instantaneous power theory, Positive sequence voltage detector, Harmonic

1. บทนำ

เทคโนโลยีทางด้านต่าง ๆ ในปัจจุบันส่วนใหญ่มีความจำเป็นต้องใช้พลังงานไฟฟ้า ซึ่งเทคโนโลยีเหล่านี้ได้เข้ามามีบทบาทในการดำรงชีวิต ส่งผลให้พฤติกรรมการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น โดยอุปกรณ์ไฟฟ้าส่วนใหญ่ที่ใช้ทำงานกันในครัวเรือน สำนักงาน สถานที่ราชการ สถานที่ท่องเที่ยว หรือแม้กระทั่งในโรงงานอุตสาหกรรม ส่วนใหญ่แล้วมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น เช่น หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ คอมพิวเตอร์ ชูตขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้า เป็นต้น การใช้งานโหลดไม่เป็นเชิงเส้นดังกล่าวส่งผลให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า ซึ่งกระแสฮาร์มอนิกเหล่านี้ถือว่าเป็นมลพิษในระบบไฟฟ้า จึงเป็นปัญหาที่สำคัญอย่างหนึ่งของระบบไฟฟ้า ปัญหาดังกล่าวส่งผลกระทบในหลายประการ เช่น ทำให้มิเตอร์วัดไฟฟ้าทำงานผิดพลาด [1-2] เกิดกำลังงานสูญเสียทำให้ต้องออกแบบอุปกรณ์ไฟฟ้าขนาดใหญ่กว่าปกติในการใช้งานจริง [3] เกิดความร้อนต่ออุปกรณ์ขณะใช้งาน [4] อุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้าทำงานผิดพลาด และทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ มีอายุการใช้งานที่สั้นลง [5] การแก้ไขปัญหาเหล่านี้จึงเป็นประเด็นที่สำคัญสำหรับงานวิจัยด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้าในปัจจุบัน ตัวการที่สำคัญของปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น คือ กระแสฮาร์มอนิก การแก้ไขปัญหากระแสฮาร์มอนิกให้หมดไปหรือลดน้อยลง จะทำให้ระบบไฟฟ้ามีคุณภาพกำลังไฟฟ้าดีขึ้น จากการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรม พบว่า การกำจัดฮาร์มอนิกมีหลากหลายวิธี [6] โดยวิธีการหนึ่ง คือ การใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟ [7-9] เนื่องจาก วงจรดังกล่าวสามารถชดเชยกระแสฮาร์มอนิก กระแสนิวทรัล และปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังในระบบไฟฟ้ากำลังได้ บทความนี้จึงมุ่งเน้นการกำจัดฮาร์มอนิก โดยทำการศึกษา

ระบบควบคุมและการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน (Shunt Active Power Filter : SAPF) สำหรับระบบไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าไม่อุดมคติ กล่าวคือ แรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายสามเฟสมีลักษณะบิดเบี้ยวผิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณไซน์ ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการคำนวณค่ากระแสอ้างอิงที่ผิดพลาด จนกระทั่งนำไปสู่สมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิกของวงจรกรองกำลังแอกทีฟลดลง

จากการศึกษาในเบื้องต้น พบว่า สมรรถนะการทำงานของวงจรกรองกำลังแอกทีฟขึ้นอยู่กับองค์ประกอบที่สำคัญ 4 ส่วน ประกอบด้วย การตรวจจับฮาร์มอนิก โครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ การควบคุมกระแสชดเชย และการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง ภาพรวมของระบบควบคุมและกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่พิจารณาในบทความนี้ แสดงได้ดังรูปที่ 1 จากรูปดังกล่าวสามารถอธิบายในแต่ละส่วนได้ดังนี้

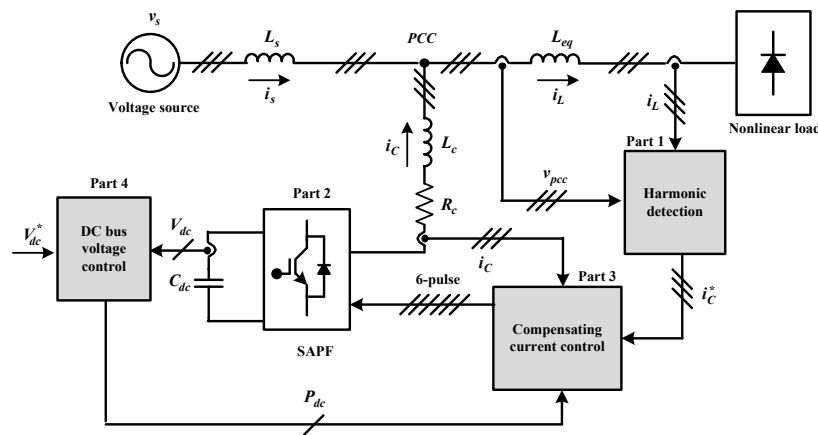
ส่วนที่หนึ่ง คือ การตรวจจับฮาร์มอนิกเพื่อคำนวณกระแสอ้างอิงให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ซึ่งมีหลากหลายวิธี เช่น วิธีทฤษฎีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่ง [10] วิธีแกนหมุนตติว [11] และวิธีกรองอ้างอิงสามเฟส [12] เป็นต้น ซึ่งในบทความนี้ได้นำวิธีทฤษฎีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่งร่วมกับการตรวจจับแรงดันลำดับเฟสบวกมูลฐาน [13] มาประยุกต์ใช้ในการตรวจจับฮาร์มอนิก เนื่องจากวิธีการดังกล่าวมีสมรรถนะที่ดีในการตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับระบบไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายแรงดันบิดเบี้ยว และมีวิธีการคำนวณที่ไม่ซับซ้อน [14]

ส่วนที่สอง คือ โครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ที่นิยมใช้มีอยู่ 2 รูปแบบ คือ โครงสร้างวงจรอินเวอร์เตอร์

ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage - Source Inverter : VSI) [15] และโครงสร้างวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแส (Current - Source Inverter : CSI) [16] บทความนี้ได้เลือกใช้โครงสร้างวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างดังกล่าวสามารถควบคุมการผิดกระแสชดเชยได้ง่าย มีขนาดเล็ก

เนื่องจากตัวควบคุมพีไอให้ผลการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงที่ดีตรงตามวัตถุประสงค์

การนำเสนอเนื้อหาในบทความนี้ ประกอบด้วย การตรวจจับฮาร์มอนิก ซึ่งได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 2 สำหรับหัวข้อที่ 3 เป็นการนำเสนอการออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ในส่วนของหัวข้อที่ 4 ได้นำเสนอการ



รูปที่ 1 ภาพรวมระบบควบคุมและกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

และมีราคาที่ถูกกว่าโครงสร้างแบบ CSI [17-18]

ส่วนที่สาม คือ การควบคุมกระแสชดเชย ซึ่งถือเป็นส่วนสำคัญอย่างยิ่งต่อสมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิก ตัวควบคุมที่ใช้ในควบคุมกระแสชดเชยมีหลายชนิด เช่น ตัวควบคุมพีไอ [19] ตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิส [20] และ ตัวควบคุมฟuzzy [21] เป็นต้น สำหรับบทความนี้ได้เลือกใช้ ตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมกระแสชดเชย เนื่องจาก ตัวควบคุมพีไอเป็นตัวควบคุมแบบเชิงเส้น ทำให้สามารถออกแบบโครงสร้างและค่าพารามิเตอร์ได้โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และตัวควบคุมพีไอมีสมรรถนะการควบคุมที่ดีและเพียงพอต่อการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

ส่วนที่สี่ คือ การควบคุมแรงดันบัลไฟตรง การทำงานของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ส่งผลให้ค่าแรงดันบัลไฟตรงไม่คงตัวตามจุดการทำงานที่เหมาะสม ผลกระทบดังกล่าวทำให้สมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิกลดลง ด้วยเหตุนี้ การควบคุมแรงดันบัลไฟตรงจึงมีความสำคัญในการกำจัดฮาร์มอนิก บทความนี้ได้เลือกใช้ตัวควบคุมพีไอ [22]

จำลองสถานการณ์และอภิปรายผล และการสรุปผล ดำเนินการของบทความนี้ได้นำเสนอไว้เป็นหัวข้อสุดท้าย

2. การตรวจจับฮาร์มอนิก

การตรวจจับฮาร์มอนิกของวงจรกรองกำลังแอกทีฟส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิกของระบบ เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวเป็นการคำนวณค่ากระแสอ้างอิงให้กับระบบควบคุมกระแสชดเชย โดยในบทความนี้จะนำเสนอ การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่ง หรือเรียกว่า วิธี PQ ซึ่งวิธีดังกล่าวได้ถูกคิดค้นขึ้นโดย Akagi, Kannazawa, and Nabae [23] ข้อดีของการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ คือ มีสมรรถนะที่ดีในการตรวจจับฮาร์มอนิกและการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ อีกทั้งยังมีคุณสมบัติด้านการคำนวณที่รวดเร็วและไม่ซับซ้อน การคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าสามเฟสสามสายด้วยทฤษฎี PQ สามารถแบ่งค่ากำลังไฟฟ้าออกเป็นสองส่วนหลัก ได้แก่ กำลังไฟฟ้าแอกทีฟ (p) ซึ่งเป็นกำลังไฟฟ้าที่ถ่ายโอนจากแหล่งจ่าย

ไปยังโหลด และกำลังไฟฟ้านอกทีฟ (q) ที่เป็นการแลกเปลี่ยนกำลังงานระหว่างเฟส โดยปราศจากการถ่ายโอนกำลังงาน ค่ากำลังไฟฟ้าสำหรับพิจารณาในระบบสามเฟสสามสาย แสดงได้ดังสมการที่ (1)

$$\begin{aligned} p &= v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta \\ q &= v_\beta i_\alpha - v_\alpha i_\beta \end{aligned} \quad (1)$$

การคำนวณกำลังไฟฟ้าด้วยทฤษฎี PQ เริ่มจากแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC บนแกนสามเฟส (v_a, v_b, v_c) และค่ากระแสไฟฟ้าที่โหลดบนแกนสามเฟส (i_a, i_b, i_c) จะถูกแปลงให้อยู่บนแกนแอลฟาและเบต้า ($\alpha\beta$) ซึ่งเรียกการแปลงดังกล่าวว่า “การแปลงของคาร์ก (Clarke transformation)” ค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC บนแกนแอลฟาและเบต้า (v_α, v_β) และค่ากระแสไฟฟ้าที่โหลดบนแกนแอลฟาและเบต้า (i_α, i_β) ถูกใช้ในการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าในสมการที่ (1)

2.1 การตรวจจับสนามอนิกด้วยวิธี PQ

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในบทความนี้เป็นระบบไฟฟ้าสามเฟสสามสาย จึงไม่พิจารณากระแสที่นิวทรัล ดังนั้นขั้นตอนการตรวจจับสนามอนิกแสดงได้ดังรูปที่ 2 โดยรายละเอียดการคำนวณค่ากระแสอ้างอิง ($i_{Ca}^*, i_{Cb}^*, i_{Cc}^*$) เป็นดังนี้

ขั้นที่ 1 : แปลงค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC และกระแสไฟฟ้าทางด้านโหลดจากปริมาณ 3 เฟสเป็นปริมาณไฟฟ้าบนแกนแอลฟาและเบต้า โดยใช้สมการตามบล็อกของ “Clark transformation” ดังรูปที่ 2

ขั้นที่ 2 : คำนวณค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟ้านอกทีฟ โดยใช้ค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าบนแกนแอลฟาและเบต้า ตามบล็อกของ “instantaneous powers calculation” ดังรูปที่ 2 ซึ่งค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟ และรีแอกทีฟที่ได้จากการคำนวณ สามารถแบ่งออกได้เป็นสองส่วน คือ ส่วนที่บ่งบอกถึงปริมาณมูลฐาน ($\bar{p}, \bar{q}$) หรือเรียกว่า ค่ากำลังไฟฟ้าสัญญาณตรง และส่วนที่บ่งบอกถึงปริมาณฮาร์มอนิก ($\tilde{p}, \tilde{q}$) หรือเรียกว่า ค่ากำลังไฟฟ้าสัญญาณสลับ แสดงได้ดังสมการที่ (2)

$$\begin{aligned} p &= \bar{p} + \tilde{p} \\ q &= \bar{q} + \tilde{q} \end{aligned} \quad (2)$$

ขั้นที่ 3 : เลือกค่ากำลังไฟฟ้าที่ต้องการชดเชย โดยการเลือกค่าดังกล่าวในขั้นนี้ ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการชดเชย ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กรณี ดังตารางที่ 1

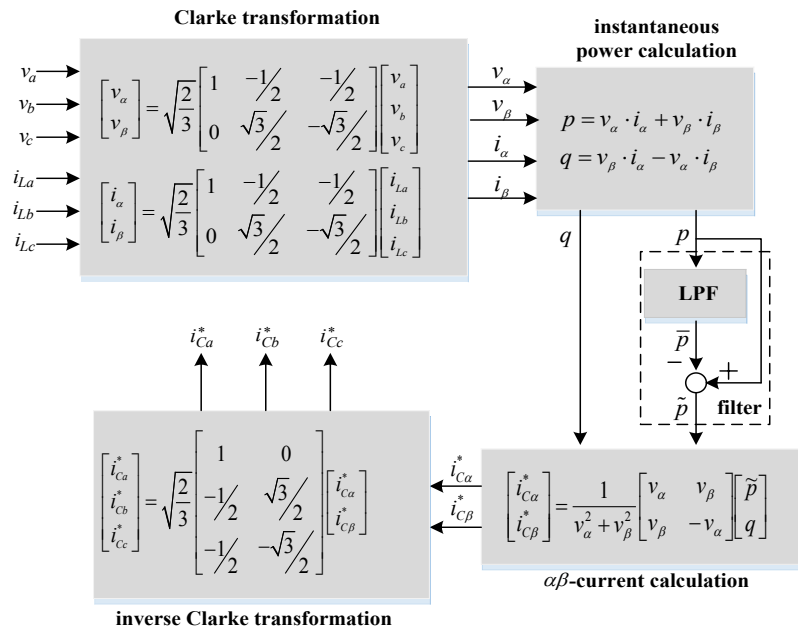
ตารางที่ 1 การระบุค่ากำลังไฟฟ้าตามวัตถุประสงค์การชดเชย

กรณี	วัตถุประสงค์การชดเชย	กำลังไฟฟ้าที่ชดเชย
1	กำจัดกระแสฮาร์มอนิก	$\tilde{p}$ และ $\tilde{q}$
2	ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง	$\bar{q}$
3	กำจัดกระแสฮาร์มอนิกและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง	$\tilde{p}$ และ q

บทความนี้มีวัตถุประสงค์ในการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง จึงเลือกค่ากำลังไฟฟ้าที่ชดเชยตามกรณีที่ 3 คือ กำลังไฟฟ้าแอกทีฟสัญญาณสลับ ($\tilde{p}$) และกำลังไฟฟ้านอกทีฟ ดังนั้น จะต้องแยกองค์ประกอบของค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟสัญญาณตรง ($\bar{p}$) ออกจากค่า p โดยใช้วงจรกรองผ่านต่ำ (low-pass filter : LPF) แสดงได้จากบล็อก “filter” ดังรูปที่ 2 ค่าความถี่ตัดของวงจรกรองผ่านต่ำ (f_c) ผู้วิจัยได้กำหนดเท่ากับ 50 เฮิรตซ์ ในส่วนของกำลังไฟฟ้านอกทีฟไม่ได้ผ่านวงจร LPF ทั้งนี้เพื่อให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้าสำหรับการชดเชยตามวัตถุประสงค์

ขั้นที่ 4 : คำนวณค่ากระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยบนแกนแอลฟาและเบต้า (i_{Ca}^*, i_{Cb}^*) ตามบล็อกของ “ $\alpha\beta$ - current calculation” ดังรูปที่ 2

ขั้นที่ 5 : คำนวณค่ากระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยบนแกนสามเฟส ($i_{Ca}^*, i_{Cb}^*, i_{Cc}^*$) ด้วยกฎการแปลงเมตริกซ์คลาร์กผกผัน ตามบล็อกของ “inverse Clark transformation” ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 กระบวนการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ

2.2 การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ ร่วมกับการตรวจจับแรงดันลำดับเฟสบวกมูลฐาน

การตรวจจับฮาร์มอนิกจะยังสามารถคำนวณค่ากระแสอ้างอิงได้อย่างถูกต้อง ในกรณีที่แรงดันไฟฟ้าสามเฟสที่แหล่งจ่ายมีลักษณะเป็นคลื่นรูปไซน์ อย่างไรก็ตาม การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ ที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.1 เมื่อแรงดันที่แหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิก (บิดเบี้ยว) จะเกิดการคำนวณค่ากระแสอ้างอิงที่ผิดพลาด จนกระทั่งนำไปสู่สมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิกของวงจรกรองกำลังแอกทีฟลดลง ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงได้นำการตรวจจับแรงดันลำดับเฟสบวกมูลฐาน (Positive Sequence Voltage Detector : PSVD) มาใช้งานร่วมกับการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว โครงสร้างการทำงานของ PSVD แสดงได้ดังรูปที่ 3 โดยมีขั้นตอนการคำนวณดังนี้

ขั้นที่ 1 : แปลงค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC จากปริมาณ 3 เฟส เป็นปริมาณไฟฟ้าบนแกนแอลฟาและเบต้า

ขั้นที่ 2 : คำนวณค่ามุมของแรงดันที่จุด PCC ด้วยวิธีเฟสล็อกกลูป (Phase Locked Loop : PLL)

ขั้นที่ 3 : ค่ามุม θ_{PCC} ที่ได้จาก PLL จะถูกนำมาใช้สำหรับคำนวณค่า i_α' และ i_β'

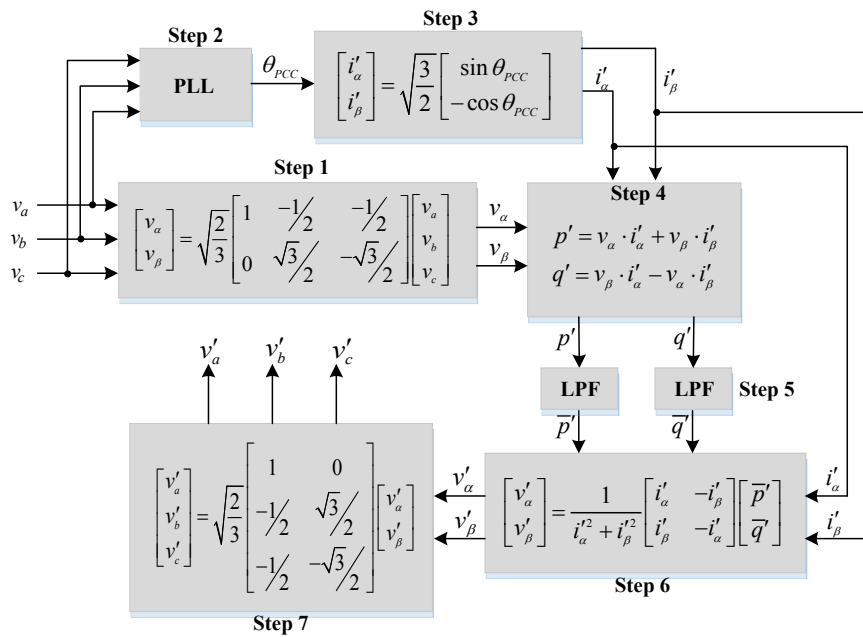
ขั้นที่ 4 : คำนวณค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟ (p') และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (q')

ขั้นที่ 5 : แยกองค์ประกอบของค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟสัญญาณตรง ($\bar{p}'$) ออกจากค่า (p') รวมทั้งแยกองค์ประกอบของค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟสัญญาณตรง ($\bar{q}'$) ออกจากค่า (q') โดยใช้วงจร LPF ความถี่ตัดเท่ากับ 50 เฮิรตซ์ ซึ่งกระบวนการในขั้นนี้จะทำให้มีเฉพาะค่ากำลังไฟฟ้าลำดับเฟสบวกมูลฐานเท่านั้น

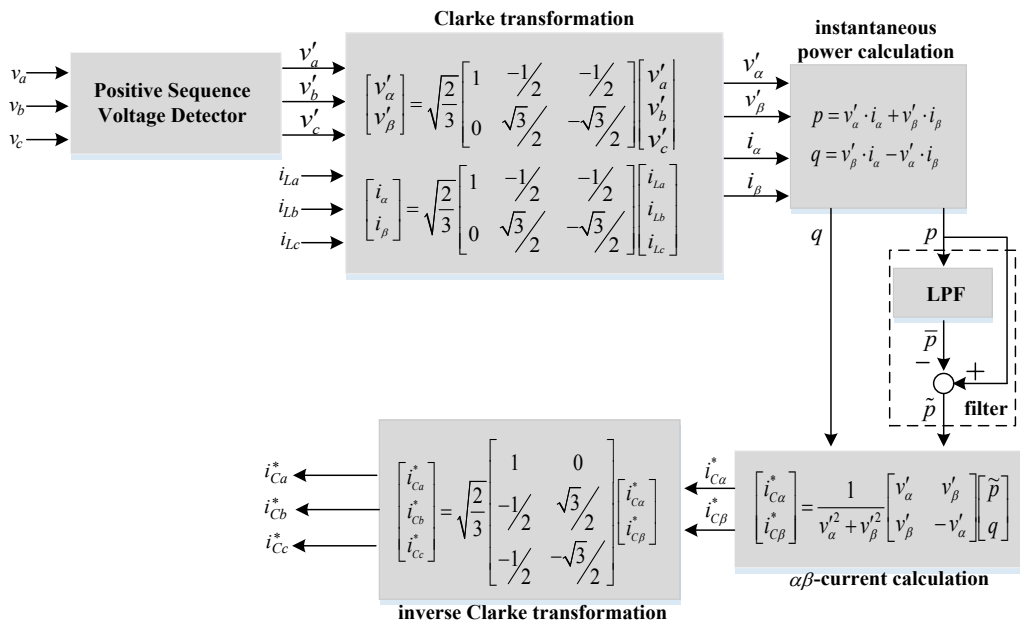
ขั้นที่ 6 : คำนวณค่าแรงดันลำดับเฟสบวกมูลฐานบนแกนแอลฟาและเบต้า (v_α', v_β') โดยใช้ค่า $\bar{p}'$ และ $\bar{q}'$ ที่ได้จากขั้นที่ 5

ขั้นที่ 7 : คำนวณค่าแรงดันลำดับเฟสบวกมูลฐานบนแกนสามเฟส (v_a', v_b', v_c') ด้วยกฎการแปลงเมตริกซ์คลาร์กผกผัน ค่า v_α', v_β' และ v_c' ที่ได้จะถูกนำไปใช้งานร่วมกับการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ ต่อไป

ค่าแรงดันลำดับเฟสบวกมูลฐานที่ได้จากวิธี PSVD จะถูกนำไปใช้งานร่วมกับการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ ซึ่งสามารถเรียกวิธีการตรวจจับฮาร์มอนิกดังกล่าวได้ว่า “การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ ร่วมกับการตรวจจับแรงดันลำดับเฟสบวกมูลฐาน (PQ+PSVD)” โดยมีกระบวนการคำนวณค่ากระแสอ้างอิง แสดงได้ดังรูปที่ 4



รูปที่ 3 โครงสร้างการทำงานของ PSVD

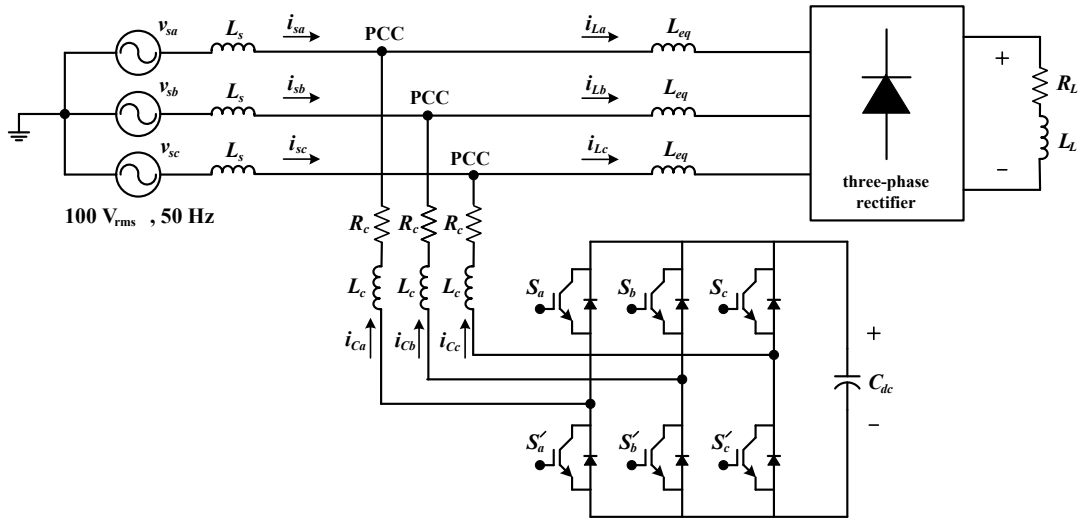


รูปที่ 4 กระบวนการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ+PSVD

3. การออกแบบระบบควบคุมของวงจรกำลังแอกทีฟ

ระบบกักจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่พิจารณาในบทความนี้ แสดงได้ดังรูปที่ 5 โดยมีลักษณะโครงสร้างเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดัน ที่ใช้ไอจีบีที ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง วงจรดังกล่าวเชื่อมต่ออยู่ระหว่าง

แหล่งจ่ายแรงดันและโหลดไม่เป็นเชิงเส้นที่จุด PCC ผ่านตัวเหนี่ยวนำ (L_c) และตัวต้านทาน (R_c) ทั้งสามเฟส โดยมีการฉีดกระแสชดเชย (i_{Ca}, i_{Cb}, i_{Cc}) จาก SAPF ไปยังจุด PCC ค่ากระแสดังกล่าวถูกนำไปหักลบกับค่ากระแสที่โหลด (i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc}) เพื่อลดทอนกระแสฮาร์มอนิกที่แหล่งจ่าย (i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}) ให้น้อยลง แสดงได้



รูปที่ 5 ระบบก่าจัดอาร์มอิกด้วยวงจรกำลังแอทฟแบบขนาน

ดังสมการที่ (3) การพิจารณาวงจรทางด้านดีซีที่เป็นแหล่งจ่ายของ SAPF พบว่า มีตัวเก็บประจุ (C_{dc}) ทำหน้าที่เก็บสะสมพลังงานเพื่อใช้สำหรับการฉีดกระแสชดเชย

$$i_{s,k} = i_{L,k} - i_{C,k} ; k = a, b, c \quad (3)$$

3.1 การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอทฟ

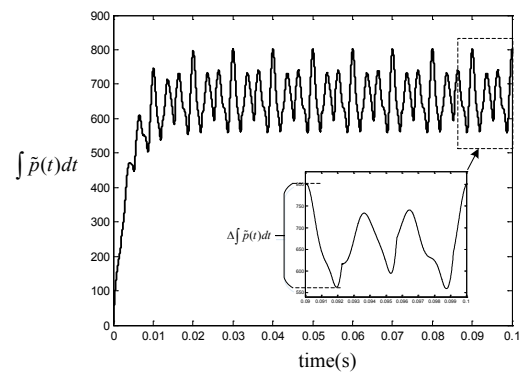
ค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอทฟ ประกอบด้วย ค่าแรงดันบัสไฟตรง (V_{dc}^*) ค่าตัวเก็บประจุ (C_{dc}) และค่าความเหนี่ยวนำ (L_c) การออกแบบค่าพารามิเตอร์ดังกล่าว มีวิธีการดังต่อไปนี้

การออกแบบค่าแรงดันบัสไฟตรง (V_{dc}^*) จะใช้วิธีการเลือกค่าแรงดันที่มีขนาดมากกว่า 1.5 เท่าของค่ายอดแรงดันที่จุด PCC (ค่ายอดแรงดันที่จุด PCC มีค่าประมาณ 142 V) เนื่องจากต้องการให้ทิศทางการไหลของกระแสชดเชยจาก SAPF ไปยังจุด PCC ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ค่าแรงดันบัสไฟตรงเท่ากับ 430 V

ค่าตัวเก็บประจุ (C_{dc}) ที่ใช้เป็นแหล่งสะสมพลังงานของวงจร SAPF สามารถออกแบบโดยใช้วิธีการของ Thomas และคณะ [24] ที่ได้นำเสนอขอบเขตค่าตัวเก็บประจุต่ำสุด ($C_{dc,min}$) การเลือกค่า C_{dc} สำหรับวงจร SAPF จะต้องมีความมากกว่า $C_{dc,min}$ ซึ่งค่า $C_{dc,min}$ คำนวณ

ได้ดังสมการที่ (4) การออกแบบตามสมการดังกล่าวพิจารณาจากค่ากระแสเฟืองของผลรวมกำลังไฟฟ้าแอทฟ ($\Delta \int \tilde{p}(t)dt$) ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าที่พิจารณาแสดงได้ดังรูปที่ 6 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 242.7 นอกจากนี้ ผู้วิจัยได้กำหนดให้ ΔV_{dc} มีค่าเท่ากับ 6 โวลต์ (ไม่เกิน 1.5% ของค่าแรงดันบัสไฟตรง) จากผลการออกแบบในสมการที่ (4) ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ค่าตัวเก็บประจุ (C_{dc}) เท่ากับ 100 mF

$$\begin{aligned} C_{dc,min} &= \frac{\Delta \int \tilde{p}(t)dt}{\Delta V_{dc} \times V_{dc}^*} \\ &= \frac{242.7}{6 \times 430} \\ &= 94 \text{ mF} \end{aligned} \quad (4)$$



รูปที่ 6 ผลรวมกำลังไฟฟ้าแอทฟ

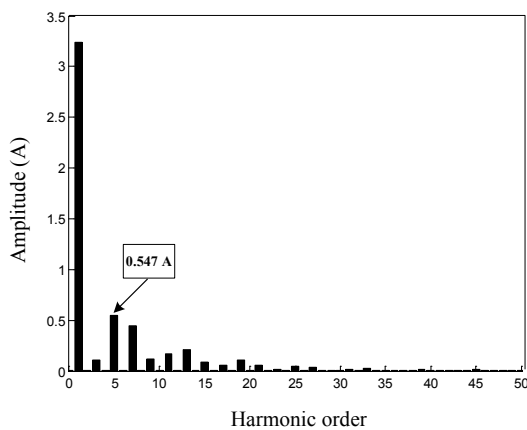
การออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำ (L_c) จะใช้วิธีการของ Ingram และ Round [25] ซึ่งผลการออกแบบค่า L_c ด้วยวิธีดังกล่าว จะได้ขอบเขตความเหนี่ยวนำที่มีขนาดไม่เกินค่าความเหนี่ยวนำสูงสุด ($L_{c,max}$) ค่าดังกล่าวสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (5)

$$L_{c,max} = \frac{V_{dc}^* - V_m}{\max(\frac{di_c^*}{dt})} \quad (5)$$

โดยที่ V_m คือ ค่ายอดของแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย (V)

$\max(\frac{di_c^*}{dt}) = 2\pi f_h I_{h,max}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสอ้างอิงสูงสุดต่อเวลา (A/s)

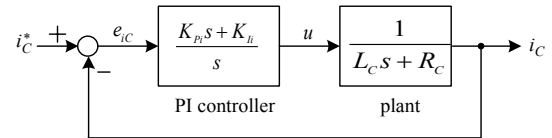
โครงสร้างของวงจร SAPF ที่พิจารณามีค่าแรงดันบัสไฟตรงเท่ากับ 430 โวลต์ และค่ายอดแรงดันที่จุด PCC เท่ากับ 142 โวลต์ ในส่วนของค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสอ้างอิงสูงสุดต่อเวลา สามารถพิจารณาได้จากสเปกตรัมขนาดของกระแสฮาร์มอนิกลำดับต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าที่พิจารณา แสดงได้ดังรูปที่ 7 ซึ่งจากรูปดังกล่าว สังเกตได้ว่า กระแสโพลาร์ฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 ($f_h = 250$ Hz) มีขนาดสูงสุดเท่ากับ 0.547 แอมแปร์ เมื่อแทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการที่ (5) จะได้ว่า ค่า $L_{c,max}$ มีค่าเท่ากับ 0.34 เฮนรี ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ L_c เท่ากับ 18 มิลลิเฮนรี



รูปที่ 7 ผลรวมกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ

3.2 การออกแบบตัวควบคุมพีไอ

ตัวควบคุมพีไอที่ใช้สำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานมีด้วยกัน 2 วัตถุประสงค์ คือ การควบคุมกระแสชดเชย และการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง สำหรับการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีไอสามารถแสดงแผนภาพไดอะแกรมของระบบได้ ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 แผนภาพไดอะแกรมการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีไอ

จากแผนภาพไดอะแกรมในรูปที่ 8 สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอน ($T_i(s)$) ของระบบควบคุมกระแสชดเชยได้ดังสมการที่ (6) เมื่อพิจารณาการออกแบบค่า K_{pi} และ K_{fi} โดยใช้วิธีการเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างพจน์พหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอน $T_i(s)$ กับพจน์พหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสองมาตรฐานดังสมการที่ (7) ผลการเทียบสัมประสิทธิ์ดังกล่าวจะทำให้ได้ค่า K_{pi} และ K_{fi} สำหรับการควบคุมกระแสชดเชย ดังสมการที่ (8) และ (9) ตามลำดับ เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ลงในสมการที่ (8) และ (9) สามารถคำนวณได้ว่า $K_{pi} = 399.7991$ และ $K_{fi} = 4.4413 \times 10^6$ สำหรับการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟในระบบที่พิจารณา

$$T_i(s) = \frac{i_c}{i_c^*} = \frac{K_{pi}}{K_{fi}} \left[\frac{s + \frac{K_{fi}}{K_{pi}}}{s^2 + \left(\frac{R_c + K_{pi}}{L_c} \right) s + \frac{K_{fi}}{L_c}} \right] \quad (6)$$

$$G(s) = \frac{\omega_{ni}^2}{s^2 + 2\zeta\omega_{ni}s + \omega_{ni}^2} \quad (7)$$

$$K_{pi} = 2\zeta\omega_{ni}L_c - R_c \quad (8)$$

$$K_{fi} = \omega_{ni}^2 L_c \quad (9)$$

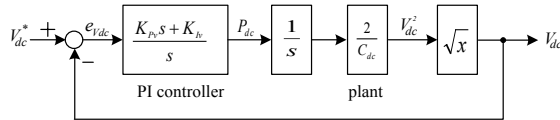
โดยที่ ζ คือ อัตราส่วนการหน่วง (damping ratio)
กำหนดให้มีค่าเท่ากับ $\frac{\sqrt{2}}{2}$
 ω_n คือ ความถี่ธรรมชาติ (natural frequency)
ของตัวควบคุมกระแสชดเชย ซึ่งมีค่าเท่ากับ $2\pi f_{h,\max}$

การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมแรงดัน
บัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอคทีฟ จะทำการออกแบบ
โดยอาศัยสมการพลังงานที่ตัวเก็บประจุ (E_{dc}) ของวงจร
VSI แสดงได้ดังสมการที่ (10) จากสมการดังกล่าว สามารถ
พิจารณาหาแรงดันบัสไฟตรงได้ดังสมการที่ (11)

$$E_{dc} = \int p_{dc}(t)dt = \frac{1}{2}C_{dc}V_{dc}^2 \quad (10)$$

$$V_{dc} = \sqrt{\frac{2}{C_{dc}} \int p_{dc}(t)dt} \quad (11)$$

จากสมการที่ (11) สามารถนำไปเขียนแผนภาพ
ไดอะแกรมการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุม
พีไอได้ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 แผนภาพไดอะแกรมการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง
ด้วยตัวควบคุมพีไอ

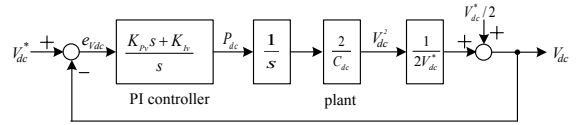
จากรูปที่ 9 สังเกตได้ว่า ภายในแผนภาพไดอะแกรม
มีส่วนที่ไม่เป็นเชิงเส้น คือ บล็อกการหาค่ารากที่สองของ
ค่า x ใด ๆ ดังนั้น เพื่อให้ระบบควบคุมดังกล่าวเป็นระบบ
เชิงเส้น จึงใช้การประมาณการหาค่ารากที่สองด้วยการ
กระจายของอนุกรมเทย์เลอร์ [26] ดังสมการที่ (12)

$$\sqrt{x} \approx \frac{\sqrt{x_0}}{2} + \frac{1}{2\sqrt{x_0}}x \quad (12)$$

จากสมการที่ (12) การหาค่ารากที่สองของ V_{dc}^2 ทำ
ได้โดยแทนค่า $\sqrt{x_0}$ เท่ากับ V_{dc}^* และค่า x เท่ากับ V_{dc}^2

แสดงได้ดังสมการที่ (13) จากสมการดังกล่าวสามารถ
นำมาเขียนแผนภาพไดอะแกรมการควบคุมแรงดันบัส
ไฟตรง ได้ใหม่ดังรูปที่ 10

$$V_{dc} \approx \frac{V_{dc}^*}{2} + \frac{1}{2V_{dc}^*}V_{dc}^2 \quad (13)$$



รูปที่ 10 แผนภาพไดอะแกรมการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง
ด้วยตัวควบคุมพีไอ โดยการประมาณค่ารากที่สอง
ด้วยอนุกรมเทย์เลอร์

จากแผนภาพไดอะแกรมในรูปที่ 10 สามารถหา
ฟังก์ชันถ่ายโอน ($T_v(s)$) ของระบบได้ดังสมการที่ (14)

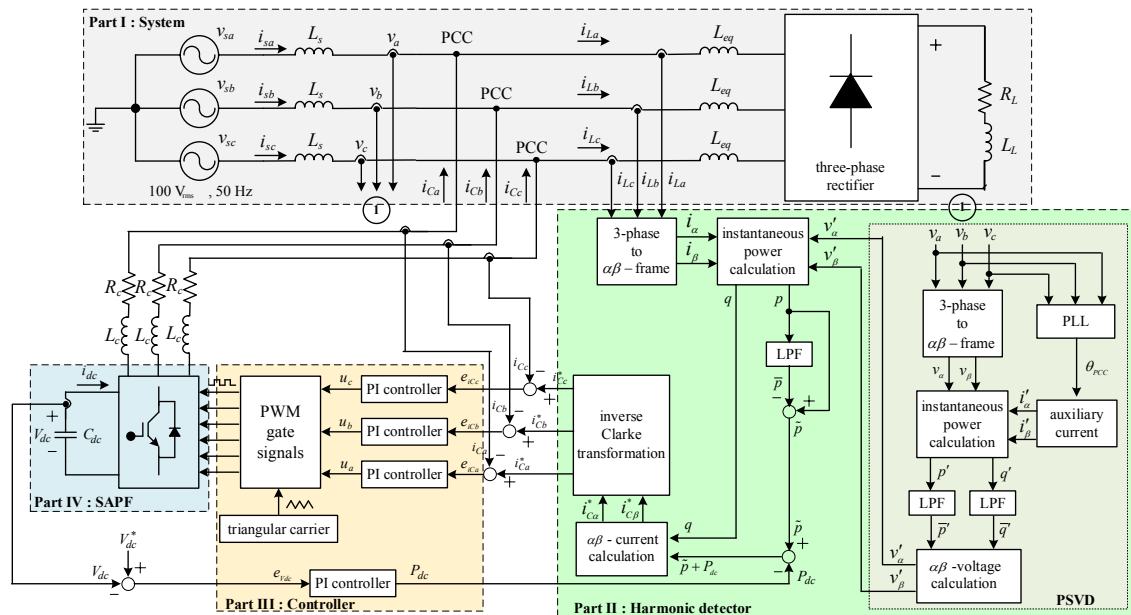
$$T_v(s) = \frac{V_{dc}}{V_{dc}^*} = \left[\frac{\frac{s^2}{2} + AK_{pv}s + AK_{iv}}{s^2 + AK_{pv}s + AK_{iv}} \right]; A = \frac{1}{C_{dc}V_{dc}^*} \quad (14)$$

การออกแบบค่า K_{pv} และ K_{iv} ของตัวควบคุมพีไอ
จะใช้วิธีการเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างพจน์พหุนาม
ลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอน $T_v(s)$ กับพจน์
พหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสอง
มาตรฐานดังสมการที่ (7) โดยผลการเทียบสัมประสิทธิ์
ดังกล่าวจะทำให้ได้ค่า K_{pv} เท่ากับ 114.6667 และ K_{iv}
เท่ากับ 152.9351 สำหรับการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง
ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (15) และ (16) ตามลำดับ

$$K_{pv} = \frac{2\zeta\omega_n}{A} = 2\zeta\omega_n C_{dc} V_{dc}^* \quad (15)$$

$$K_{iv} = \frac{\omega_n^2}{A} = \omega_n^2 C_{dc} V_{dc}^* \quad (16)$$

โดยที่ ζ คือ อัตราส่วนการหน่วง (damping ratio)
กำหนดให้มีค่าเท่ากับ $\frac{\sqrt{2}}{2}$



รูปที่ 11 ระบบกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกำลังแอกทีฟแบบขนาน

ω_n คือ ความถี่ธรรมชาติ (natural frequency) ของตัวควบคุมแรงดันบัสไฟตรง ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\frac{4}{T_s \zeta}$ เมื่อพิจารณาให้ค่าความคลาดเคลื่อนที่ สถานะอยู่ตัว (e_{ss}) มีค่าเท่ากับ $\pm 2\%$

T_s คือ ช่วงเวลาเข้าที่ (settling time) กำหนดให้มีค่าไม่เกิน 3 วินาที

4. การจำลองสถานการณ์และอภิปรายผล

การจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่พิจารณาในบทความนี้ จะใช้โปรแกรม Matlab Simulink โดยระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 11 จากรูปดังกล่าวประกอบไปด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้

ส่วนที่ 1 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟส มีลักษณะเป็นแหล่งจ่ายแรงดันอุดมคติ สามารถปรับค่ายอด ความถี่ และมุมเฟสได้ ทำให้สามารถกำหนด $\%THD_{v,dv}$ ของแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายได้ตามความต้องการ โดยกำหนดให้แรงดันไฟฟ้ามีขนาด $100 V_{rms}$ ความถี่ 50 Hz เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าดังกล่าวมีขนาดที่เหมาะสมสำหรับการสร้างระบบฮาร์ดแวร์ในอนาคต นอกจากนี้ การเปลี่ยนแปลงขนาดแรงดันไฟฟ้าและ

ความถี่ไม่มีผลต่อการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ+PSVD ระบบไฟฟ้าง่ายกล่าวต่อกับโหลดไม่เป็นเชิงเส้นคือ วงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีภาระโหลดที่เป็นแหล่งจ่ายกระแส (ตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับตัวต้านทาน) เนื่องจาก ในบทความนี้พิจารณาการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน จึงเลือกใช้โหลดทางไฟฟ้าที่ก่อให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า

ส่วนที่ 2 การตรวจจับฮาร์มอนิก ทำหน้าที่คำนวณค่ากระแสอ้างอิง ($i_{ca}^*, i_{cb}^*, i_{cc}^*$) ด้วยวิธี PQ+PSVD

ส่วนที่ 3 ระบบควบคุมการทำงานของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ได้แก่ การควบคุมกระแสชดเชยและแรงดันบัสไฟตรง โดยใช้ตัวควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการสวิตช์แบบ PWM

ส่วนที่ 4 วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่ทำหน้าที่ฉีดกระแสชดเชยเพื่อกำจัดฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า

ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 11 ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2 ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการออกแบบตามที่นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 3 ผลการจำลองสถานการณ์

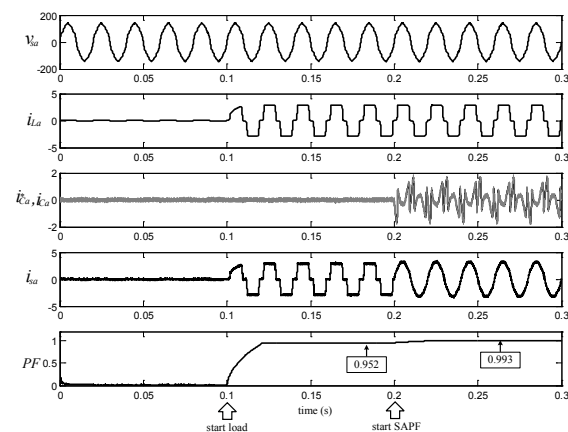
ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบที่พิจารณา

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้
1. ระบบไฟฟ้า	$v_s = 100 \text{ V}_{\text{rms}}$, 50 Hz $L_s = 0.01 \text{ mH}$ $L_{eq} = 3 \text{ mH}$
2. โหลดวงจรเรียงกระแส	$R_L = 62, 80, 120 \Omega$ $L_L = 300 \text{ mH}$
3. วงจรรองกำลังแอกทีฟ	$V_{dc}^* = 430 \text{ V}$ $C_{dc} = 100 \text{ mF}$ $L_C = 18 \text{ mH}$
4. ความถี่การสวิตช์	$f_{sw} = 5 \text{ kHz}$
5. ตัวควบคุมพีไอสำหรับการควบคุมกระแสชดเชย	$K_{pi} = 399.7991$ $K_{fi} = 4.4413 \times 10^6$
6. ตัวควบคุมพีไอสำหรับการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง	$K_{pv} = 114.6667$ $K_{fv} = 152.9351$

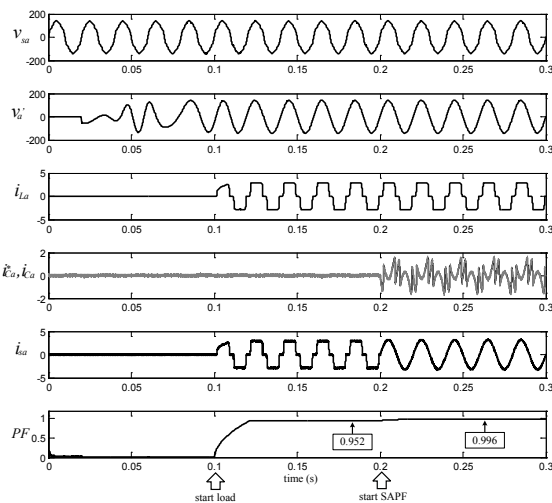
การกำจัดฮาร์มอนิกแสดงได้ดังรูปที่ 12 และ 13 จากรูปดังกล่าวได้ยกตัวอย่างระบบไฟฟ้าในเฟส a ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 12 เป็นกรณีการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ ที่ไม่มีอัลกอริทึม PSVD ส่วนรูปที่ 13 เป็นกรณีการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ+PSVD โดยใช้โหลดเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสมีภาระโหลดที่เป็นตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับตัวต้านทาน จากผลจำลองสถานการณ์ทั้งสองกรณี สังเกตได้ว่า แรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายสามเฟสมีลักษณะบิดเบี้ยวไม่เป็นรูปไซน์ โดยมีค่า $\%THD_{v,av}$ เท่ากับ 10% ในช่วงแรกตั้งแต่เวลา 0 ถึง 0.1 วินาที ไม่มีการต่อโหลด ทำให้ไม่มีกระแสฮาร์มอนิกเกิดขึ้น ช่วงที่สองตั้งแต่เวลา 0.1 ถึง 0.2 วินาที มีการต่อโหลดเข้าสู่ระบบ เรียกว่า “ช่วงก่อนการชดเชย” รูปสัญญาณ i_{sa} มีลักษณะผิดเพี้ยนไปจากคลื่นรูปไซน์เช่นเดียวกับรูปสัญญาณ i_{La} โดยที่ $\%THD_{i,av}$ ของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายมีค่าเท่ากับ 26.90% และค่า PF เท่ากับ 0.952 อย่างไรก็ตามภายหลังการต่อ SAPF เข้าสู่ระบบ ในช่วงเวลาตั้งแต่ 0.2 ถึง 0.3 วินาที หรือเรียกว่า “ช่วงหลังการชดเชย” ตัวควบคุมพีไอสามารถควบคุมกระแสชดเชย i_{Ca} ให้มีค่าใกล้เคียงกับ i_{Ca}^* แสดง

ได้จากรูปสัญญาณ i_{Ca} มีลักษณะคล้ายตาม i_{Ca}^* ดังรูปที่ 14 ซึ่งสัญญาณ i_{Ca} จะถูกฉีดเข้าสู่จุด PCC ดังนั้นสัญญาณ i_{sa} ภายหลังการชดเชยจึงมีลักษณะเป็นรูปไซน์มากขึ้นเมื่อเทียบกับก่อนการชดเชย โดยที่ $\%THD_{i,av}$ ของกรณีการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ ที่ไม่มีอัลกอริทึม PSVD มีค่าเท่ากับ 6.61% ซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่าข้อกำหนดของ IEEE Std.519 -2014 และค่า PF เท่ากับ 0.993 ในส่วนของกรณีการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ+PSVD มีค่า $\%THD_{i,av}$ ภายหลังการชดเชยเท่ากับ 2.91% และค่า PF เท่ากับ 0.996 จากผลการจำลองสถานการณ์ทั้งสองกรณี แสดงให้เห็นว่า ค่า $\%THD_{i,av}$ ภายหลังการชดเชยจะมีค่ามากหรือน้อย มีปัจจัยหลักจากผลทางด้านกระบวนการคำนวณค่า i_{Ca}^* ซึ่งในกรณีการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ ที่ไม่มีอัลกอริทึม PSVD ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของการคำนวณ i_{Ca}^* เนื่องจากการคำนวณกระแสอ้างอิงได้นำแรงดันไฟฟ้าที่มีลักษณะบิดเบี้ยวมาใช้ในการคำนวณ ดังนั้น การแก้ไขจุดบกพร่องสำหรับการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ จึงมีการประยุกต์ใช้งานร่วมกับอัลกอริทึม PSVD ซึ่งทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการคำนวณกระแสอ้างอิงมีลักษณะเป็นรูปไซน์ไม่บิดเบี้ยว แสดงได้ดังรูปสัญญาณ v_a' จากรูปสัญญาณดังกล่าวสังเกตได้ว่า เมื่อใช้อัลกอริทึม PSVD จะส่งผลให้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าสามเฟส (v_a', v_b', v_c') ที่ใช้ในการคำนวณกระแสอ้างอิงมีลักษณะเป็นรูปไซน์ไม่บิดเบี้ยว การแปลงค่า v_a', v_b', v_c' จากปริมาณสามเฟสเป็นปริมาณไฟฟ้าบนแกนแอลฟาเบต้า (v_α', v_β') จึงไม่มีผลกระทบจากความบิดเบี้ยวของแรงดันแหล่งจ่าย ส่งผลให้การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ+PSVD มีการคำนวณกระแสอ้างอิงที่มีความถูกต้อง สำหรับการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน ผลของการแก้ไขจุดบกพร่องดังกล่าวทำให้ $\%THD_{i,av}$ มีค่าลดลง จาก 6.61% เป็น 2.91% และค่าดังกล่าวเป็นค่าที่อยู่ภายใต้ข้อกำหนดของ IEEE Std.519 -2014

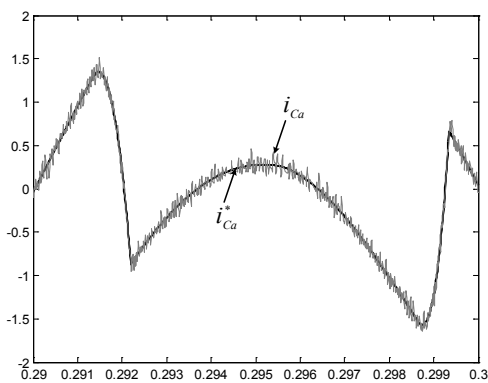
ปีที่ 14 ฉบับที่ 2 เดือนพฤษภาคม - สิงหาคม พ.ศ. 2562



รูปที่ 12 ผลการจำลองสถานการณ์กำจัดฮาร์มอนิกด้วย ตัวควบคุมพีไอ กรณีการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ ที่ไม่มีอัลกอริทึม PSVD

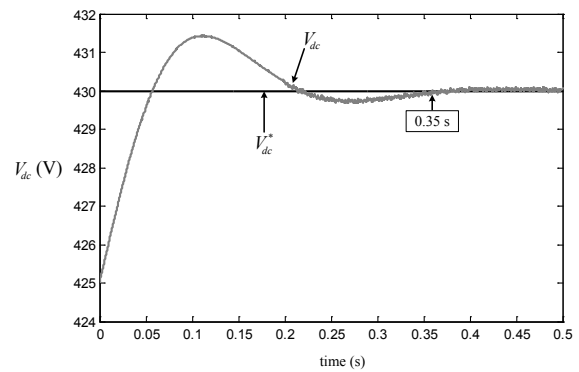


รูปที่ 13 ผลการจำลองสถานการณ์กำจัดฮาร์มอนิกด้วย ตัวควบคุมพีไอ กรณีการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ ร่วมกับอัลกอริทึม PSVD



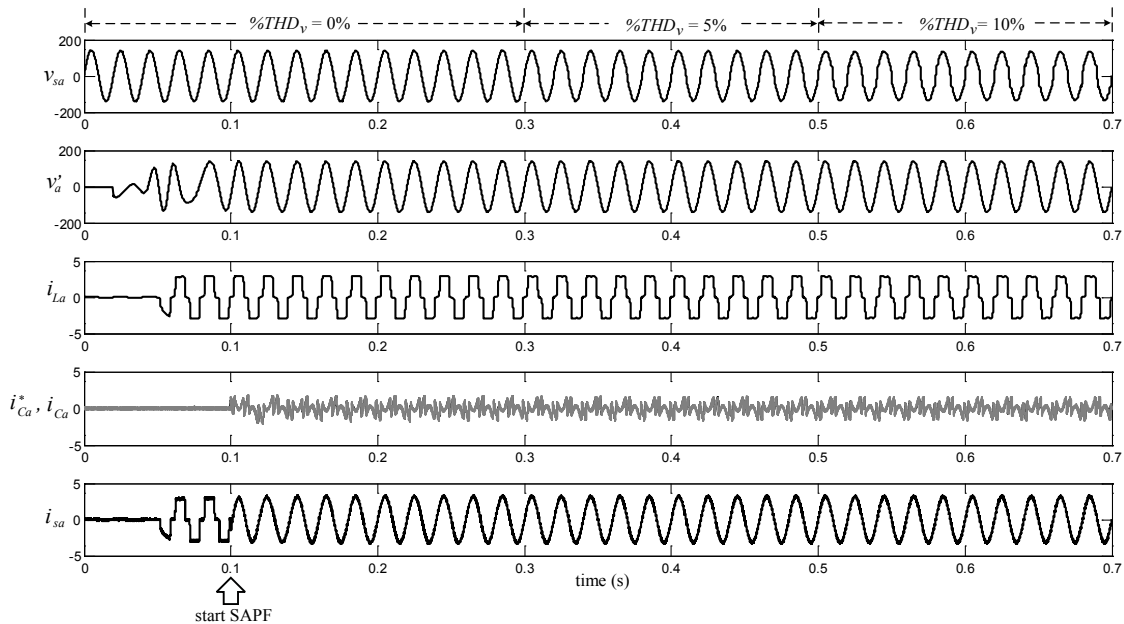
รูปที่ 14 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุม กระแสชดเชย

นอกจากนี้ ผลการจำลองสถานการณ์ของระบบ ควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ ในรูปที่ 15 สังเกตได้ว่า ตัวควบคุมพีไอสามารถควบคุมค่า V_{dc} ให้ตรงตามค่า V_{dc}^* ที่ได้ออกแบบไว้ โดยใช้เวลาลู่เข้า ประมาณ 0.35 วินาที



รูปที่ 15 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุม แรงดันบัลไฟตรง

การยืนยันสมรรถนะตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ+PSVD สำหรับการกำจัดฮาร์มอนิกของวงจรกรอง กำลังแอกทีฟแบบขนานในบทความนี้ได้ทำการจำลอง สถานการณ์ในกรณีที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟสมีการ เปลี่ยนแปลงลักษณะความบิดเบี้ยวของรูปสัญญาณ โดย แบ่งการจำลองสถานการณ์เป็นสามช่วง ได้แก่ ช่วงแรก ตั้งแต่เวลา 0 ถึง 0.3 วินาที คือ ช่วงที่แหล่งจ่ายแรงดัน สามเฟสมีลักษณะไม่บิดเบี้ยว มีค่า $\%THD_{v,av}$ เท่ากับ 0% ช่วงที่สองตั้งแต่เวลา 0.3 ถึง 0.5 วินาที คือ ช่วงที่ แหล่งจ่ายแรงดันสามเฟสมีลักษณะบิดเบี้ยว โดยมีค่า $\%THD_{v,av}$ เท่ากับ 5% และช่วงสุดท้ายตั้งแต่เวลา 0.5 ถึง 0.7 วินาที คือ ช่วงที่แหล่งจ่ายแรงดันสามเฟสมีลักษณะ บิดเบี้ยวมากขึ้น ซึ่ง $\%THD_{v,av}$ มีค่าเท่ากับ 10% โดย ยังคงใช้โหลดเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสมีภาระโหลดที่ เป็นตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับตัวต้านทาน และใช้ ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบที่พิจารณาตารางที่ 2 ดังเดิม ผลการจำลองสถานการณ์ดังกล่าวแสดงได้ ดังรูปที่ 16 จากรูปดังกล่าว พบว่า การตรวจจับ ฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ+PSVD ที่นำเสนอสามารถคำนวณ

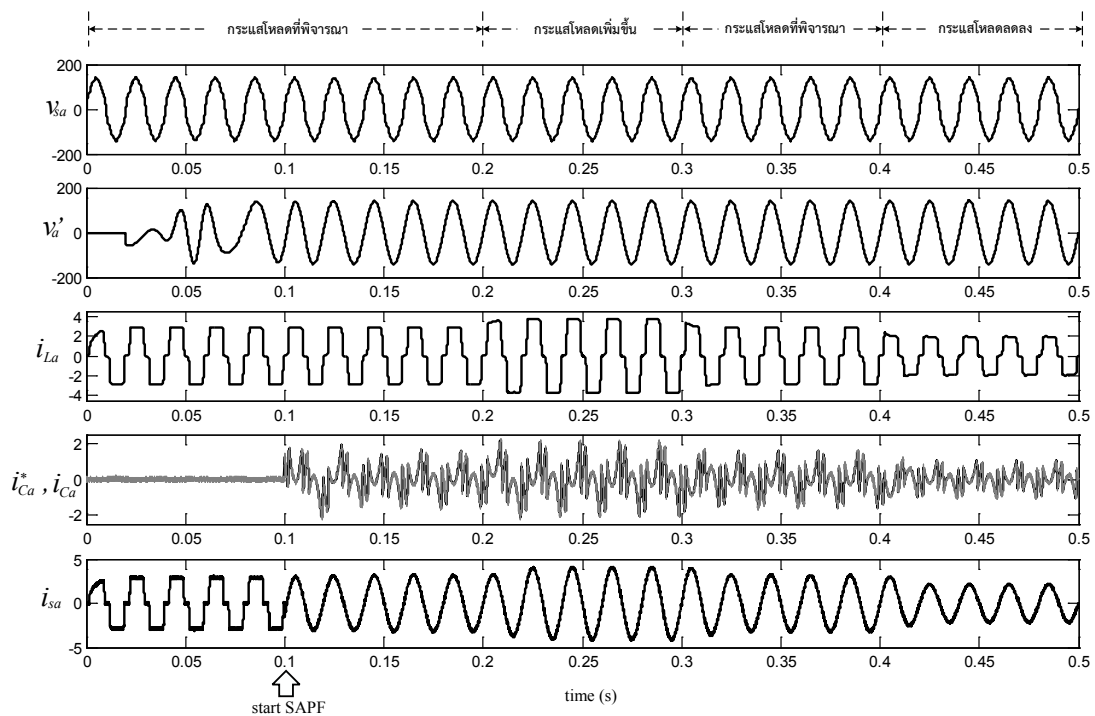


รูปที่ 16 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิก เมื่อ $\%THD_{v,av}$ ของแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายมีการเปลี่ยนแปลง

ค่ากระแสอ้างอิงสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟได้ถูกต้อง ทั้งสามช่วงของการจำลองสถานการณ์ โดยพิจารณาจากรูปสัญญาณ v_a' มีลักษณะเป็นรูปไซน์ถึงแม้มีการเปลี่ยนแปลง $\%THD_{v,av}$ ของแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย และพิจารณาจากรูปสัญญาณ i_{sa} ที่มีลักษณะเป็นรูปไซน์มากขึ้นเมื่อเทียบกับก่อนการชดเชย ทุกช่วงของแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายสามเฟสมีการเปลี่ยนแปลง $\%THD_{v,av}$ โดยมีค่า $\%THD_{i,av}$ ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการฉีดกระแสชดเชยทั้งสามช่วงของการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายเท่ากับ 2.89% 2.87% และ 2.91% ตามลำดับ จากผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้นำเสนอข้างต้น สามารถยืนยันได้ว่าการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ+PSVD มีสมรรถนะที่ดีในการคำนวณค่ากระแสอ้างอิงสำหรับการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟในระบบไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายแรงดันมีลักษณะบิดเบี้ยว แม้ว่าแหล่งจ่ายแรงดันจะมี $\%THD_{v,av}$ เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นหรือลดลง

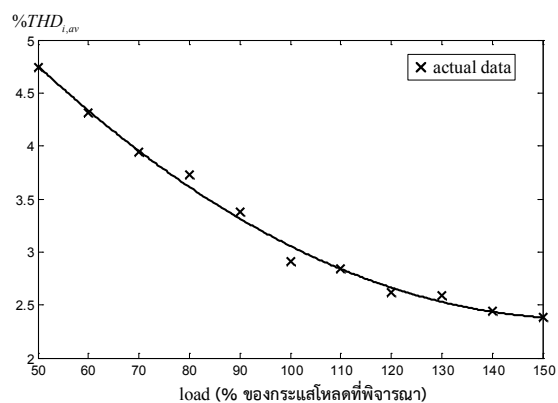
การยืนยันสมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานในบทความนี้ได้ทำการทดสอบสมรรถนะในกรณีโหลดมีการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด โดยแบ่งการทดสอบเป็นสามช่วง ได้แก่

ช่วงที่หนึ่ง ตั้งแต่เวลา 0 ถึง 0.2 วินาที คือ ช่วงกระแสโหลดที่พิจารณา ($R_L = 80 \Omega$) ช่วงที่สองตั้งแต่เวลา 0.2 ถึง 0.3 วินาที คือ ช่วงที่มีการเพิ่มกระแสโหลด ($R_L = 62 \Omega$) และช่วงที่สามตั้งแต่เวลา 0.4 ถึง 0.5 วินาที คือ ช่วงที่มีการลดกระแสโหลด ($R_L = 120 \Omega$) โดยใช้ระบบไฟฟ้าที่มีแหล่งจ่ายแรงดันบิดเบี้ยว มีค่า $\%THD_{v,av}$ เท่ากับ 10% และใช้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบที่พิจารณาตารางที่ 2 ผลการจำลองสถานการณ์ดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 17 ซึ่งสังเกตได้ว่า ทั้งสามช่วงของการจำลองสถานการณ์ตัวควบคุมพีไอสามารถควบคุมกระแสชดเชย i_{Ca} ให้มีค่าใกล้เคียงกับ i_{Ca}^* ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย (i_{sa}) เป็นคลื่นรูปไซน์มากขึ้นเมื่อเทียบกับก่อนการชดเชย โดยมีค่า $\%THD_{i,av}$ ของทั้งสามช่วงการทดสอบภายหลังการชดเชยเท่ากับ 3.29% ซึ่งลดลงจากก่อนการชดเชยที่มีค่า $\%THD_{i,av}$ เท่ากับ 27.79% นอกจากนี้ได้ทำการทดสอบโดยการเปลี่ยนแปลงโหลดตั้งแต่ 50% ถึง 150% ของกระแสโหลดที่พิจารณา โดยใช้ระบบไฟฟ้าที่มีแหล่งจ่ายแรงดันบิดเบี้ยว มีค่า $\%THD_{v,av}$ เท่ากับ 10% และใช้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบพิจารณาตารางที่ 2 ผลการทดสอบดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 18



รูปที่ 17 ผลการทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิกเมื่อกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด

จากรูปดังกล่าว พบว่า เมื่อกระแสโหลดมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงจากกระแสโหลดที่พิจารณา วงจรกรองกำลังแอกทีฟยังสามารถชดเชยกระแสฮาร์มอนิกได้ ส่งผลให้กระแสที่แหล่งจ่ายเป็นคลื่นรูปไซน์มากขึ้นเมื่อเทียบกับก่อนการชดเชย โดย $\%THD_{i,av}$ ของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายมีค่าต่ำกว่า 5% ซึ่งค่าดังกล่าวอยู่ภายใต้กรอบของมาตรฐาน IEEE Std.519-2014



รูปที่ 18 ผลการทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิก เมื่อกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลงในช่วง 50% ถึง 150% ของกระแสโหลดที่พิจารณา

จากผลการทดสอบสมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยการจำลองสถานการณ์ที่ได้กล่าวมาข้างต้น สามารถยืนยันได้ว่า วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่ได้นำเสนอ มีสมรรถนะที่ดีในการกำจัดฮาร์มอนิกสำหรับระบบไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายแรงดันบิดเบี้ยว ถึงแม้ว่ากระแสโหลดจะมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น หรือลดลงจากกระแสโหลดที่พิจารณาก็ตาม

5. สรุป

การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ+PSVD เป็นวิธีการตรวจจับฮาร์มอนิกที่มีประสิทธิภาพวิธีหนึ่งสำหรับการคำนวณกระแสอ้างอิงให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ซึ่งวิธีดังกล่าวสามารถใช้ได้ดีกับระบบไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายแรงดันเป็นรูปสัญญาณไซน์ หรือบิดเบี้ยวไม่เป็นรูปสัญญาณไซน์ แต่การใช้งานการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วย PQ+PSVD ควรออกแบบวงจรกรองผ่านต่ำให้เหมาะสมกับระบบที่พิจารณา เนื่องจากความถี่ตัดของวงจรกรองผ่านต่ำ มีผลต่อสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกของระบบ การทดสอบสมรรถนะของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่นำเสนอ

อาศัยจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม Matlab Simulink ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์ปรากฏว่า วงจรกรองกำลัง แอ็กทีฟแบบขนานที่ได้นำเสนอ มีสมรรถนะที่ดีในการ กำจัดฮาร์มอนิกสำหรับระบบไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายแรงดันบิด เบี้ยว ถึงแม้ว่ากระแสโหลดจะมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น หรือลดลงจากกระแสโหลดที่พิจารณา โดยพิจารณาจาก ค่า $\%THD_{i,av}$ ของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายภายหลังการ ชดเชยมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับก่อนการชดเชย และค่า $\%THD_{i,av}$ ภายหลังการชดเชยดังกล่าวยังอยู่ภายใต้ มาตรฐาน IEEE Std.519-2014 และ IEEE std.1459–2010

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานกองทุน สนับสนุนการวิจัย (สกว.) โครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก (คปก.) สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Indrajit, and J. S. Paul, "Effect of Harmonic on Power Measurement," *IEEE Petroleum and Chemical Industry Conference*, 1989, pp. 129-132.
- [2] B. M. Elham, L. W. Clarence, and A. G. Adly, "A Harmonic Analysis of the Induction watt-hour Meter's Registration Error," *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 7, pp. 1080-1088, July 1992.
- [3] D. E. Rice, "Adjustable Speed Drive and Power Rectifier Harmonics – Their Effect on Power Systems Components," *IEEE Transaction on Industrial*, vol. 22, pp. 161-177, Jan 1986.
- [4] V. E. Wagner, "Effects of Harmonics on Equipment," *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 8, no. 2, pp. 672-680, Apr 1993.
- [5] J. M. Ho, and C. C. Liu, "The Effects of Harmonics on Differential Relay for a Transformer," *IEE International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED)*, Amsterdam, Netherlands, 2001.
- [6] B. Singh, K. A. Haddad, and A. Chandra, "A Review of Active Filters for Power Quality Improvement," *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, vol. 46, no. 5, pp. 960-971, Oct 1999.
- [7] C. A. Quinn, and N. Mohan, "Active Filtering of Harmonic Currents in Three-phase, Four-Wire Systems with Three-phase and Single-phase Non-Linear Loads," *IEEE-APEC'92 Appl. Power Electronics Conference*, 1992, pp. 829-836.
- [8] H. Akagi, "New Trends in Active Filters," *In EPE'95-European Conference Power Electronics Appl.*, Sevilla, Spain, 1995, pp. 17-26.
- [9] H. Akagi, H. Fujita, and K. Wada, "A Shunt Active Filter Based on Voltage Detection for Harmonic Termination of Radial Power Distribution Line," *IEEE Transactions on Industrial Applications*, vol. 35, no. 3, pp. 638-645, May 1999.
- [10] H. Akagi, Y. Kanazawa, and A. Nabae, "Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components," *IEEE Transaction on Industry Applications*, vol. IA-20, no. 3, pp. 625-630, May 1984.
- [11] M. Takeda, K. Ikeda, A. Teramoto, and T. Aritsuka, "Harmonic Current and Reactive power compensation with an Active filter," *19th Annual IEEE Power Electronics*

- Specialists Conference*, Kyoto, Japan, 1988, pp. 1174-1179.
- [12] G. W. Chang, S. K. Chen, and M. Chu, "An Efficient a-b-c Reference Frame-Based Compensation Strategy for Three-Phase Active Power Filter Control," *Electric Power Systems Research*, vol. 60, pp. 161-166, Jan 2002.
- [13] H. Akagi, E. H. Watanabe, and M. Aredes, *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*. John Wiley & Sons, 2007.
- [14] O. Abdelkhalek, and C. Benachaiba, "Sensitivity Assessment of PQ Theory and Synchronous Detection Identification Methods of Current Harmonics Under Non-Sinusoidal Condition for Shunt Active Power Filter," *Journal of Electrical & Electronics Engineering*, vol. 9, no. 1, pp. 801-807, 2009.
- [15] H. Akagi, "New trends in active filters for power conditioning," *IEEE Transaction on Industry Applications*, vol. 32, no. 6, pp. 1312-1322, Nov 1984.
- [16] Y. Hayachi, N. Sato, and K. Takahashi, "A Novel Control of a Current Source Active Filter for AC Power System Harmonic Compensation," *IEEE Transaction on Industry Applications*, vol. 27, no. 2, pp. 380-384, Aug 2002.
- [17] A. Zouidi, F. Fnaiech, and K. Al-Haddad, "Voltage source Inverter Based three-phase shunt active Power Filter: Topology, Modeling and Control Strategies," *IEEE-ISIE International Symposium on Industrial Electronics*, pp. 785-790, 2006.
- [18] M. Routimo, M. Salo, and H. Tuusa, "Comparison of Voltage-Source and Current-Source Shunt Active Power Filters." *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 22, no. 2, pp. 636-643, 2007.
- [19] P. Santiprapan, K-L. Areerak, and K-N. Areerak, "Mathematical Model and Control Strategy on DQ Frame for Shunt Active Power Filters," *World Academy of Science Engineering and Technology*, vol. 60, pp. 353-361, 2001.
- [20] T. Narongrit, K-L. Areerak, and K-N. Areerak, "Optimal Design of Shunt Active Power Filters Using a Particle Swarm Optimization," *International Review on Modelling & Simulations*, vol. 4, pp. 2871-2878, 2011.
- [21] T. Narongrit, K-L. Areerak, and K-N. Areerak, "Adaptive Fuzzy Control for Shunt Active Power Filters," *Electric Power Components and Systems*, vol. 44, no. 6, pp. 646-657, 2016.
- [22] S. Rahmani, N. Mendalek, and K. Al-Haddad, "Experimental Design of a Nonlinear Control Technique for Three-Phase Shunt Active Power Filter," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, pp. 3364-3375, Jan 2010.
- [23] H. Akagi, Y. Kanazawa, and A. Nabae, "Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits," *In Proc. Int. Power Electronics Conference*, 1983, pp. 1375-1386.
- [24] T. Thomas, K. Haddad, G. Joos, and A. Jaafari, "Design and Performance of Active Power Filters," *IEEE Industry Application Magazine*, vol. 4, pp. 38-46, Sep 1998.

- [25] D. M. E. Ingram, and S. D. Round, "A Novel Digital Hysteresis Current Controller for an Active Power Filter," *International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, Singapore, 1997, vol. 2, pp. 744-749.
- [26] J. Eakburanawat, P. Darapong, U. Yangyuen, and S. Po-ngam, "A Simple Control Scheme of Single Phase Universal Active Filter for Power Quality Improvement," *In 2004 IEEE Region 10 Conference TENCN*, Chiang Mai, Thailand, 2004, pp. 248-251.

การพัฒนาเรือพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อตรวจวัดคุณภาพน้ำ^{*} Development of solar powered boats for water quality monitoring

ปิยนุช ใจแก้ว^{1*} สุธิดา ทีปรักษพันธ์²

¹ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร

²ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

Piyanuch Jaikaeuw^{1*} Suthida Theeparaksapan²

Civil and Environmental Engineering, Faculty of Science and Engineering, Province Campus

Kasetsart University, Sakon Nakhon 47000, Thailand

²Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot

University, Nakorn Nayok 26120, Thailand

*Corresponding author Email: Piyanuch.jai@ku.th

(Received: May 19, 2019; Accepted: August 20, 2019)

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาระบบตรวจสอบคุณภาพน้ำโดยใช้เรือที่ใช้พลังงานทดแทน เรือต้นแบบพลังงานแสงอาทิตย์ได้รับการออกแบบและใช้งานสำหรับการตรวจสอบคุณภาพน้ำโดยการวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวอย่างน้ำในแหล่งน้ำ ข้อมูลถูกเก็บรวบรวมโดยเซ็นเซอร์ชนิดต่างๆเช่น pH อุณหภูมิ ของแข็งที่ละลาย และปริมาณออกซิเจนในน้ำ ทั้งหมดถูกเก็บรวบรวมไว้ในระดับความลึกที่แตกต่างกันของน้ำ เรือพลังงานแสงอาทิตย์นี้มีน้ำหนักทั้งหมดประมาณ 8 กิโลกรัม ความเร็วสูงสุด 10 กิโลเมตรต่อชั่วโมง แผงเซลล์แสงอาทิตย์บนเรือสามารถสร้างกระแสไฟฟ้าได้ประมาณ 54.24 วัตต์ หลักการทำงานสูงสุดที่ 10 ซม. ระบบดังกล่าวมีข้อดี เช่น การปล่อยคาร์บอนต่ำ การใช้พลังงานต่ำ มีความยืดหยุ่นในการปรับใช้งาน

คำสำคัญ: เรือพลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานทดแทน การตรวจสอบคุณภาพน้ำ เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

ABSTRACT

This paper presents the development of a water quality monitoring system using boats powered by renewable energy. To monitor the quality of water by measuring various parameters for a water sample in water resources, a prototype boat using powered by solar cell was designed and implemented. Data collected by various sensors such as pH, temperature, total dissolved solids, and oxygen density was collected in different depth of water. The solar-powered boat's weight around 8 kg. The average speed on the water surface was 5-10 km/hr. The solar panels on the boat can create

^{*} บทความนี้ได้ถูกนำเสนอบางส่วนในการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 23

electricity as around 54.24 Wh. The principle of maximum work was around 10 hr. Our system has advantages such as low carbon emission, low power consumption, more flexible to deploy.

Keyword: Solar powered boats, Renewable energy, Water quality monitoring, Environmental friendly

1. บทนำ

น้ำเป็นทรัพยากรที่มีค่าและมีความสำคัญที่สุดอย่างหนึ่งของโลก น้ำเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับชีวิตทุกชีวิต ไม่ว่าจะเป็นพืช สัตว์ และมนุษย์ โดยเฉพาะมนุษย์ที่ได้มีการนำมาใช้ อุปโภค บริโภค การเกษตร อุตสาหกรรม กระประมง และการคมนาคม [1] ปัจจุบันปัญหาน้ำเสียกำลังเป็นปัญหาใหญ่ที่เพิ่มมากขึ้นตามอัตราการขยายตัวของชุมชน โดยน้ำเสียจะถูกระบายลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ หากไม่ได้รับการจัดการที่เหมาะสมจะส่งผลถึงแหล่งน้ำธรรมชาติเกิดการเน่าเสีย และเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตต่างๆ การตรวจสอบคุณภาพน้ำและการเก็บตัวอย่างน้ำให้ถูกต้องและได้ประสิทธิภาพมีความสำคัญเป็นอย่างมากในการเก็บตัวอย่างน้ำ ถ้าสามารถปฏิบัติงาน ณ จุดเก็บตัวอย่างน้ำได้อย่างปลอดภัย (เมื่อเอื้อมถึง) ให้ทำการตรวจวัด ณ จุดเก็บตัวอย่างได้เลย แต่บางพื้นที่ไม่สามารถเก็บตัวอย่างน้ำได้อย่างปลอดภัย และการตรวจสอบคุณภาพน้ำ ต้องเสียเวลาในการเก็บตัวอย่างและเกิดผลกระทบต่อเจ้าหน้าที่เก็บตัวอย่างน้ำอาจก่อให้เกิดอุบัติเหตุระหว่างการปฏิบัติหน้าที่ ซึ่งจะทำให้เกิดการสูญเสียตามมาที่เป็นอันตรายทั้งทางตรงและทางอ้อมที่จะเกิดขึ้นในปัจจุบัน งานวิจัยนี้ได้นำแนวคิดการใช้พลังงานแสงอาทิตย์มาออกแบบใช้กับเครื่องตรวจสอบคุณภาพน้ำ [2-3] ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งในการลดการใช้พลังงาน พร้อมทั้งช่วยส่งเสริมให้เกิดการนำพลังงานทดแทนที่มีอยู่มาประยุกต์ใช้ร่วมกับอุปกรณ์หรือเครื่องมือที่มีอยู่แล้ว และเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเก็บและตรวจสอบคุณภาพน้ำโดยเทคโนโลยีที่มีอยู่ให้เกิดประโยชน์สูงสุด

วัตถุประสงค์ของการศึกษา เพื่อสร้างเรือเป็นต้นแบบพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับตรวจสอบคุณภาพน้ำ เพื่อเพิ่มความสะดวกรวดเร็วและลดความเสี่ยงที่ของเจ้าหน้าที่ในการออกปฏิบัติงานเก็บตัวอย่างน้ำในแหล่งน้ำขนาดใหญ่

โดยการสร้างระบบควบคุมการเก็บตัวอย่างน้ำตามจุดที่กำหนดแบบบังคับวิทยุ ให้ความคลาดเคลื่อนของจุดที่กำหนดน้อยที่สุด สามารถเคลื่อนที่ได้ด้วยความเร็วบนผิวน้ำไม่น้อยกว่า 5 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และสามารถหลบหลีกสิ่งกีดขวางบนผิวน้ำที่อยู่นิ่งได้ เรือเก็บตัวอย่างน้ำจากแหล่งน้ำผิวดิน ภายในเรือติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ตรวจสอบคุณภาพน้ำ และเมื่อเสร็จสิ้นภารกิจแล้วสามารถนำค่าข้อมูลที่ได้มาตรวจสอบและวิเคราะห์ได้

2. วิธีการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงานของเรือต้นแบบเก็บตัวอย่างน้ำและตรวจสอบคุณภาพน้ำโดยพลังงานแสงอาทิตย์แสดงไว้ดังรูปที่ 1 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

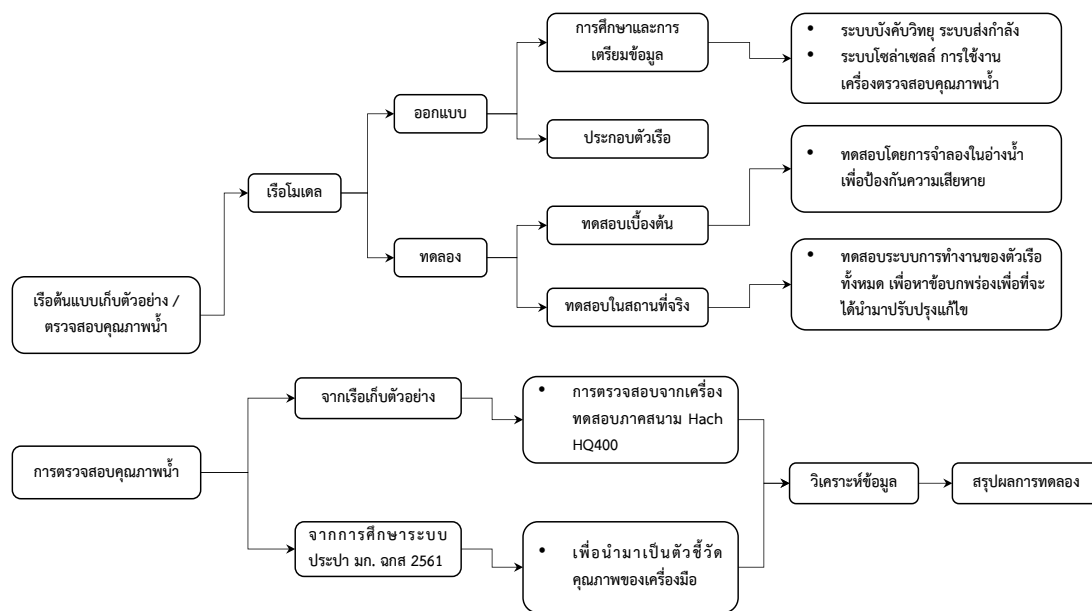
2.1 เก็บรวบรวมข้อมูลและศึกษาข้อมูลเบื้องต้น

รวบรวมข้อมูลเพื่อหาแนวคิดในการออกแบบและคาดการณ์ปริมาณวัสดุที่จะต้องใช้ในการสร้างชิ้นงาน พร้อมทั้งศึกษาการหาเครื่องตรวจสอบคุณภาพน้ำที่เหมาะสม และวิธีการใช้งาน ศึกษากระบวนการเคลื่อนที่ ระบบส่งกำลัง และวัสดุสำหรับการสร้างชิ้นงาน จากนั้นทดลองประกอบชิ้นงาน และทดสอบการใช้งานในเบื้องต้น เพื่อลดความเสี่ยงการเสียหายของอุปกรณ์ หลังจากทดสอบในห้องปฏิบัติการจนมั่นใจ จึงนำอุปกรณ์ทดสอบในสถานที่จริงเพื่อศึกษาคุณภาพน้ำต่อไป

2.2 การเก็บตัวอย่างน้ำและเครื่องวัดคุณภาพน้ำ

การการสำรวจจุดเก็บตัวอย่างน้ำ สุ่มเก็บตัวอย่างน้ำโดยใช้เครื่องมือวัดพิกัดทางภูมิศาสตร์ (GPS) สำหรับการตรวจสอบคุณภาพน้ำ ใช้เครื่องมือทดสอบคุณภาพน้ำ (Water Quality Tester) รุ่นพกพา (Hach รุ่น HQ40D) สามารถวัดได้ 6 พารามิเตอร์ในการจุ่มครั้งเดียว พารามิเตอร์ที่ตรวจวัด ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ปีที่ 14 ฉบับที่ 2 เดือน พฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2562



รูปที่ 1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

อุณหภูมิ (temperature) ค่านำไฟฟ้า (electrical conductivity: EC) ปริมาณของแข็งแขวนลอย (Total dissolved solids: TDS) ความเค็ม (Salinity) ค่าของปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำอยู่ในน้ำ (DO) เครื่องมือมีประวัติการสอบเทียบและตั้งค่าวิธีการเพื่อลดข้อผิดพลาดจากบริษัทผู้ผลิต [4-5] เครื่องจะทำการบันทึกค่าภาคสนามไว้ให้ผู้ใช้งานสามารถดึงข้อมูลมาวิเคราะห์ผลคุณภาพน้ำได้ในภายหลัง

2.3 การออกแบบระบบพลังงานแสงอาทิตย์

พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานหมุนเวียน ที่เกิดจากแสงและพลังงานที่เกิดจากความร้อน มีการนำรูปแบบการนำพลังงานของแสงอาทิตย์มาใช้งานแบบอย่างกว้าง ขึ้นอยู่กับวิธีการในการจับพลังงานแสง และการแปรรูปให้เป็นพลังงาน ในทางทฤษฎีพื้นแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นโลกเรามีค่ามหาศาลบนพื้นที่ 1 ตารางเมตร ได้พลังงานประมาณ 1,000 วัตต์ หรือเฉลี่ย 4-5 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อวัน (Wh/m²/day) ถ้าเซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานร้อยละ 15 ของปริมาณแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบ นั้นแสดงว่าเซลล์แสงอาทิตย์พื้นที่ 1 ตารางเมตร จะสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 150 วัตต์ หรือเฉลี่ย 600-750 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อวัน

(Wh/m²/day) งานวิจัยนี้มีแนวคิดในการออกแบบ คือ การนำพลังงานแสงอาทิตย์มาประยุกต์ พลังงานแสงที่ได้จะถูกแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์ในการเก็บตัวอย่างน้ำลงบ่อทดสอบ และการสูบน้ำเก็บไว้ในภาชนะและส่งเครื่องตรวจสอบคุณภาพน้ำดังรูปที่ 2

การคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ต้องการใช้ทั้งหมด เนื่องจากระบบถูกออกแบบให้ต้องสามารถทำงานได้ไม่น้อยกว่า 10 ชั่วโมงต่อวัน และปั้มน้ำสามารถทำงานได้ไม่น้อยกว่า 5 ชั่วโมงต่อวัน ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ต้องการสามารถหาได้จาก สมการที่ (1) ซึ่งสามารถคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ต้องการใช้ทั้งหมดเท่ากับ 468 วัตต์-ชั่วโมง (Wh)

$$E_{el} = P \times t \quad (1)$$

การหาขนาดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อใช้ในการรับพลังงานแสงอาทิตย์ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2) จากการคำนวณจะได้ขนาดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต้องการเท่ากับ 8 วัตต์ แต่เนื่องจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในท้องตลาดนั้น มีขนาดปริมาณไฟฟ้าต่อแผงขึ้นอยู่กับ

ทางผู้ผลิตแตกต่างกันไป ทางผู้ออกแบบจึงเลือกใช้แผง
ขนาด 10 วัตต์

$$P_{peak} = E_{cell_{STC}} / E_{g_{lobQ}} \quad (2)$$

การหาขนาดของแบตเตอรี่ที่เหมาะสมของพลังงาน
ไฟฟ้าที่ใช้ทั้งหมด เลือกใช้แบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์ และ
สามารถหาความจุของแบตเตอรี่ที่เหมาะสม ได้จากสมการ
ที่ (3) พบว่า แบตเตอรี่ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่จ่ายได้ใน 1
ชั่วโมง เท่ากับ 120 Ah

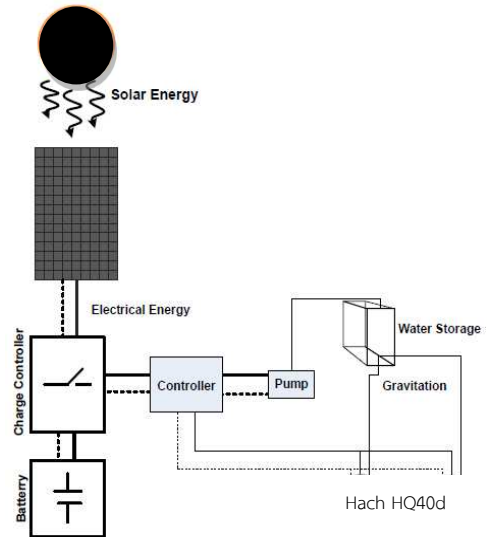
$$CB = (10) P_{peak} \quad (3)$$

การหาขนาดของเครื่องควบคุมการประจุแบตเตอรี่
คำนึงถึงกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้
ซึ่งขึ้นอยู่กับภาระต่อขานและต่ออนุกรมของแผงเซลล์
แสงอาทิตย์ และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่เลือกใช้
สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4)

$$AB = PPV / VDC \quad (4)$$

ขนาดของกระแสไฟฟ้าของเครื่องควบคุมการประจุ
แบตเตอรี่มีค่าเท่ากับ 10 แอมแปร์ ดังนั้นจึงเลือกเครื่อง
ควบคุมการประจุแบตเตอรี่ขนาด 10 แอมแปร์
แรงดันไฟฟ้าปกติขนาด 12 โวลต์ เครื่องควบคุมนี้สามารถ
เลือกใช้แหล่งจ่ายได้สองชนิด คือสามารถเลือกได้ทั้ง
แหล่งจ่ายจากไฟฟ้า 220 โวลต์ และแหล่งจ่ายจาก
พลังงานแสงอาทิตย์ โดยใช้สวิตช์สำหรับการควบคุม
กระแสไฟฟ้า (supply selector switch) การทำงานของ
เครื่องจะแบ่งเป็นสองส่วนคือ ส่วนที่หนึ่ง ควบคุมการ
ทำงานของปั๊มน้ำเพื่อสูบน้ำขึ้นไปยังถังเก็บน้ำเพื่อส่งต่อไป
ยังเครื่องตรวจสอบคุณภาพน้ำ โดยใช้แรงโน้มถ่วงของโลก
ระดับน้ำภายในถังถูกควบคุมด้วยลิมิตสวิตช์ เมื่อระดับน้ำ
ขึ้นสูงสุด (upper limit switch) และเมื่อระดับน้ำถึงจุด
ต่ำสุด (lower limit switch) ลิมิตสวิตช์สองชุดนี้จะสั่งงาน
ไปยังเครื่องสูบน้ำให้ทำงาน หรือหยุดทำงาน ส่วนที่สอง
ควบคุมการทำงานของเครื่องตรวจวัดคุณภาพน้ำให้ทำงาน
สลับกัน โดยใช้ชุดควบคุมเวลา (timer controller) ซึ่ง

สามารถตั้งค่าให้ทำงานสลับกันได้ ตั้งแต่ 0 - 180 นาที ใน
ชุดควบคุมมีไฟแสดงสถานะการทำงานของแต่ละระบบ



รูปที่ 2 องค์ประกอบของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ของ
เครื่องเก็บตัวอย่างน้ำและตรวจสอบคุณภาพน้ำโดย

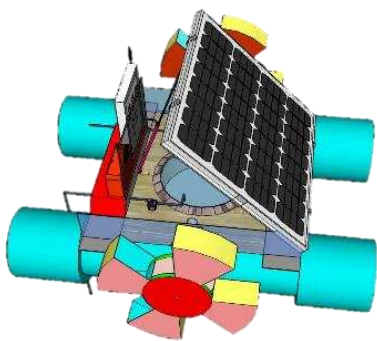
2.4 การออกแบบแรงลอยตัว

การออกแบบตัวเรือได้คำนึงถึงแรงลอยตัวเริ่มจาก
การคำนวณน้ำหนักสุทธิของตัวเรือและอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อ
นำมาคำนวณหาขนาดของทุ่นลอย จากสมการที่ (5) และ
ทำการบวกน้ำหนักเพิ่มเข้าไปร้อยละ 20 - 25 เพื่อป้องกัน
ข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการออกแบบ

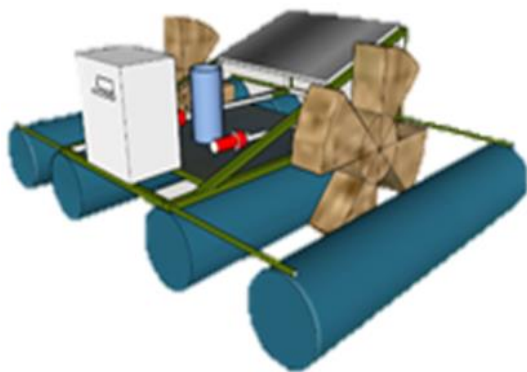
$$F_B = \rho V g \quad (5)$$

2.5 การสร้างเรือต้นแบบ

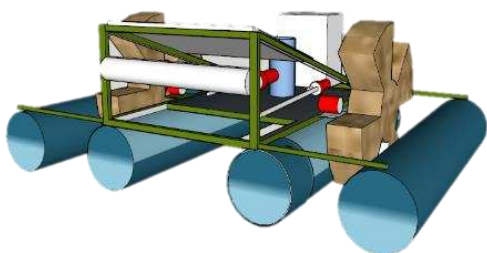
อุปกรณ์ที่สำคัญในการสร้างเรือต้นแบบประกอบด้วย
ภาชนะเก็บน้ำ (Water Tank) แผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด
10 วัตต์ เครื่องควบคุมการประจุ (Charge Controller)
แบตเตอรี่ ปั๊มน้ำกระแสตรงขนาด 12 โวลต์ สวิตช์วัด
ระดับน้ำ (Water level switch) วิทยุบังคับส่งสัญญาณ
ระยะไกล และเครื่องมือทดสอบคุณภาพน้ำ รูปแบบของ
เรือต้นแบบมีลักษณะดังรูปที่ 3 รูปที่ 4 และรูปที่ 5



รูปที่ 3 เรือต้นแบบชุดที่ 1 (กว้าง 0.3 x ยาว 0.5 ม.)



รูปที่ 4 เรือต้นแบบชุดที่ 2 (กว้าง 0.35 x ยาว 0.5 ม.)



รูปที่ 5 เรือต้นแบบชุดที่ 3 (กว้าง 0.65 x ยาว 0.5 ม.)

3. ผลการทดสอบ

3.1 การทดสอบแรงลอยตัวและความเร็วบนผิวน้ำ

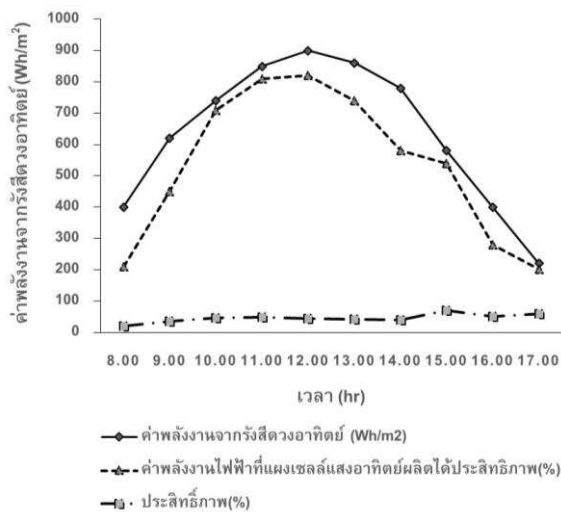
จากการทดสอบเพื่อตรวจสอบการลอยตัวและความเร็วบนผิวน้ำผลการทดสอบพบว่า เรือต้นแบบชุดที่ 1-3 มีน้ำหนักของเรือเท่ากับ 6.7 9.3 และ 8.0 กิโลกรัม ตามลำดับ ค่าความเร็วบนผิวน้ำเท่ากับ 8.0 5.4 และ 10.0

กิโลเมตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ จากการทดสอบเปรียบเทียบค่าน้ำหนักของเรือต้นแบบและความเร็วบนผิวน้ำ เรือต้นแบบชุดที่ 3 มีการลอยตัวและความเร็วบนผิวน้ำมากที่สุด เป็นรูปแบบที่เหมาะสมและสมดุลในการทดสอบ จากการประเมินราคาของวัสดุอุปกรณ์ที่นำมาสร้างเรือต้นแบบราคาอยู่ที่ประมาณ 5,500 - 8,500 บาท ไม่รวมราคาเครื่องมือทดสอบคุณภาพน้ำ ขนาดของเรือต้นแบบขนาดกว้าง 6.5 ยาว 5.0 เมตร เพื่อให้สะดวกในพื้นที่จำกัดของระบบบำบัดในปัจจุบัน

3.2 การทดสอบความสัมพันธ์การผลิตพลังงานจากค่ารังสีอาทิตย์และแผงเซลล์แสงอาทิตย์

จากการวิเคราะห์ขณะที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตพลังงานไฟฟ้าเพื่อจ่ายให้มอเตอร์และปั้มน้ำโดยผ่านชุดควบคุม ความสัมพันธ์การผลิตพลังงานจากรังสีอาทิตย์และแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในช่วงเวลาที่ทำการทดสอบ ตั้งแต่เวลา 8.00 น. ถึง 17.00 น. พบว่า ค่าพลังงานที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้จะแปรผันตามกับค่าพลังงานจากรังสีอาทิตย์ โดยช่วงเวลา 8.00 น. ถึง 9.00 น. ค่าพลังงานจากรังสีอาทิตย์มีค่า 401.56 วัตต์-ชั่วโมงต่อตารางเมตร จากนั้นค่าพลังงานจากรังสีอาทิตย์เพิ่มมากขึ้น จนมีค่าสูงสุด 919.45 วัตต์-ชั่วโมงต่อตารางเมตร ที่ช่วงเวลา 11.00 น. ถึง 12.00 น. และเริ่มลดลงเรื่อย ๆ จนถึงช่วงเวลา 17.00 น. ซึ่งสิ้นสุดการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 6 ในขณะเดียวกันค่าพลังงานไฟฟ้าที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้จะแปรผันตามกับค่าพลังงานจากรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จากผลการทดสอบตั้งแต่ 8.00 น. ถึง 17.00 น. พบว่า พลังงานจากรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบแผงเซลล์แสงอาทิตย์เฉลี่ยตลอดช่วงการทดสอบเท่ากับ 644.31 วัตต์-ชั่วโมงต่อตารางเมตร พลังงานไฟฟ้าที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้เฉลี่ยตลอดช่วงการทดสอบเท่ากับ 54.24 วัตต์-ชั่วโมง ประสิทธิภาพรวมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในการแปลงพลังงานจากรังสี

อาทิตย์มาจ่ายให้กับมอเตอร์และปั้มน้ำตลอดช่วงการเก็บข้อมูล มีค่าเท่ากับร้อยละ 8.42

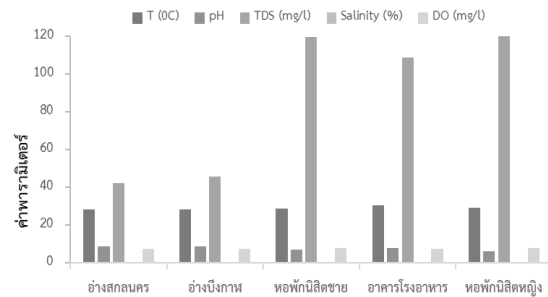


รูปที่ 6 ค่าการผลิตพลังงานจากค่ารังสีอาทิตย์และค่าพลังงานไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์

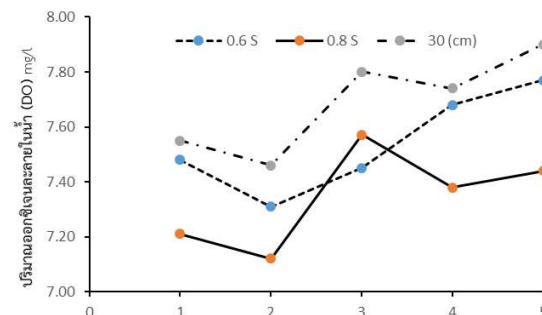
3.3 การทดสอบคุณภาพน้ำ

จากการการเก็บตัวอย่างน้ำและตรวจวัดคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำทั้ง 5 แห่ง (อ่างสกลนคร อ่างบึงกาฬ หอพักนิสิตชาย อาคารโรงอาหาร และหอพักนิสิตหญิง) โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำในแต่ละจุด 5 ครั้ง ในแต่ละพื้นที่ศึกษา ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 7 พบว่าค่าอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 28 - 30 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เฉลี่ย 7.8 ± 1.0 ปริมาณของของแข็งที่แขวนลอย (TDS) เฉลี่ย 118.5 ± 7.7 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำ (DO) เฉลี่ย 7.69 ± 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับมาตรฐานคุณภาพน้ำผิวดินประเภทที่ 3 ตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 8 (พ.ศ.2537) ออกตามความในพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ.2535 เรื่องกำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน พบว่าค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อยู่ในช่วง 5-9 ของมาตรฐานน้ำผิวดิน ค่าปริมาณของของแข็งที่แขวนลอย (TDS) มีค่าไม่เกิน 500 mg/l อยู่ใน

เกณฑ์มาตรฐาน TDS สำหรับค่าปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำ (DO) มีค่าเกินมาตรฐานคุณภาพน้ำผิวดินต้องไม่น้อยกว่า 4 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน



รูปที่ 7 ค่าตรวจสอบคุณภาพน้ำในพื้นที่ศึกษา



รูปที่ 8 ค่าปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำ (DO) ที่ระยะความลึก 0.6(S) 0.8(S) และ 30 เซนติเมตร

การทดสอบได้ทดสอบค่าปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำ (DO) ที่ระดับความลึก 30 เซนติเมตร ผู้ทดสอบจึงทำการทดสอบที่ระยะความลึกที่แตกต่างกัน เป็น 3 ระดับจากผิวน้ำ ได้แก่ 0.6(S) จากความลึก 0.8(S) จากความลึก 30 เซนติเมตร เพื่อในการทดสอบและตรวจสอบคุณภาพน้ำอีกครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 8 จากทดสอบที่ระดับความลึกแตกต่างกันค่าปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำ (DO) ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันค่าเฉลี่ย 7.69 ± 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ดำเนินการกับคะแนนโดยพิจารณาจากตัวอย่าง (ผลคงที่) ทำซ้ำ (ผลสุ่ม) ประเมินผล (ผลสุ่ม) ค่าความคลาดเคลื่อนของเรียดันแบบและการเก็บตัวอย่างน้ำและตรวจวัดคุณภาพน้ำในสนาม

ปีที่ 14 ฉบับที่ 2 เดือน พฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2562

เท่ากับร้อยละ 0.4 ซึ่งถือว่ามีความคลาดเคลื่อนเป็นที่ยอมรับได้ หากการศึกษาในครั้งนี้สามารถพัฒนาให้เป็นระบบอัตโนมัติโดยส่งข้อมูลไปจัดเก็บแบบดิจิทัลและใช้ในรูปแบบแอปพลิเคชันในอนาคตถือว่าสร้างความสะดวกและความถูกต้องได้อย่างมาก

4. สรุปผล

บทความนี้เป็นการพัฒนาเริ่มต้นแบบพลังงานแสงอาทิตย์ สำหรับตรวจวัดคุณภาพน้ำ เป็นการวิจัยเชิงการทดลอง (Experimental Research) เรือพลังงานแสงอาทิตย์นี้มีน้ำหนักทั้งหมดประมาณ 8 กิโลกรัม ความเร็วสูงสุด 10 กิโลเมตรต่อชั่วโมง แผงเซลล์แสงอาทิตย์บนเรือสามารถสร้างกระแสไฟฟ้าได้ประมาณ 54.24 วัตต์ หลักการทำงานสูงสุดที่ 10 ซม.

เรือต้นแบบพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับตรวจสอบคุณภาพน้ำดังกล่าว สามารถตรวจสอบคุณภาพน้ำพื้นฐานได้ 6 พารามิเตอร์ ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อุณหภูมิ (temperature) ค่านำไฟฟ้า (electrical conductivity: EC) ปริมาณของแข็งแขวนลอย (Total dissolved solids: TDS) ความเค็ม (Salinity) ค่าของปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำอยู่ในน้ำ (DO) มีความแม่นยำสูงโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเพียงร้อยละ 0.4 เมื่อเทียบกับการตรวจสอบด้วยวิธีปกติ เป็นอุปกรณ์ที่มีความยืดหยุ่นสูงสามารถนำไปใช้กับการเก็บตัวอย่าง และตรวจสอบคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำต่างๆ เช่น แม่น้ำ เขื่อน ทะเลหรือพื้นที่ที่ยากที่จะเข้าไปเก็บตัวอย่าง สามารถลดความเสี่ยงต่อเจ้าหน้าที่เก็บน้ำระหว่างการปฏิบัติหน้าที่ นอกจากนี้ถือเป็นอุปกรณ์ที่ ใช้พลังงานต่ำ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, วิศวกรรมกำจัดน้ำเสีย เล่ม 3, กรุงเทพฯ: มิตรนภาการพิมพ์, 2537.
- [2] หน่วยงานวิจัยและพัฒนาบูรณาการเกษตรและสิ่งแวดล้อม. คณะเกษตร ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. มหาวิทยาลัยนเรศวร, “รายงานผลการ

ทดสอบ เครื่องเติมอากาศแบบ Self-Aspirating OXYMIX Model OM-200Z ขนาด 20 แรงม้า,” บริษัท อินอค์ อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด, กรุงเทพฯ, 2546.

- [3] ศรีสุวรรณ เกษมสวัสดิ์ และศิวพันธุ์ ชูอินทร์, “คุณภาพน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภคอย่างยั่งยืนในเขตพื้นที่ อำเภอบางคนที จังหวัดสมุทรสงคราม,” กรุงเทพฯ, 2555.
- [4] N. Usali and M.H. Ismail, “Use of remote sensing and GIS in monitoring water quality,” *J. Sustain. Dev.*, vol. 3, pp. 228 - 238, 2010.
- [5] Y. Chen and D. Han, “Water quality monitoring in smart city: A pilot project,” *Automation in Construction*, vol. 89, pp. 307-316, 2018.

การประเมินคุณภาพน้ำคลองส่งน้ำสายใหญ่ฝั่งขวาในจังหวัดนครนายก Water Quality Assessment of Right Main Canal in Nakhon Nayok Province

อรรพพร ประชานุรักษ์¹ ประรธนา ประชานุรักษ์^{2*}

¹กองวิชาคณิตศาสตร์และคอมพิวเตอร์ ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

99 ตำบลพรหมณี อำเภอเมือง จังหวัดนครนายก 26001

²ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

63 หมู่ 7 ตำบลองครักษ์ อำเภอองครักษ์ จังหวัดนครนายก 26120

Akaporn Prachanurak¹ Pradthana Prachanurak^{2*}

¹Department of Mathematics and Computer, Academic Division,

Chulachomklao Royal Military Academy

99, Phrommani, Mueang Nakhon Nayok, Nakhon Nayok, 26001

²Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University

63 Moo 7, Rangsit-Nakhon Nayok Rd., Ongkharak, Nakhon Nayok 26120

*Corresponding author Email : pradthanap@gs.swu.ac.th

(Received May 9, 2019; Accepted: August 20, 2019)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาคุณภาพน้ำในคลองส่งน้ำสายใหญ่ฝั่งขวา จังหวัดนครนายก โดยเก็บตัวอย่างน้ำทั้งหมด 8 จุดเก็บตัวอย่างตามเส้นทางน้ำ ระยะเวลาในการศึกษา 3 เดือน (ม.ค.2562 - มี.ค.2562) ผลการศึกษาพบว่าเป็นคลองที่ใช้ น้ำจากแม่น้ำนครนายกเพื่อใช้ในการเกษตรและการอุปโภคบริโภค โดยเป็นแหล่งน้ำที่ใช้ผลิตน้ำประปาในอำเภอบ้านนา และอำเภอองครักษ์ ในการใช้ประโยชน์ที่ดินบริเวณริมคลองส่งน้ำสายใหญ่ฝั่งขวามีการใช้ที่ดินแบ่งเป็น 3 ส่วน คือ การใช้ ที่ดินเพื่อการทำการเกษตร เพื่อเป็นที่พักอาศัย และเพื่อประกอบกิจกรรมอื่นๆ เช่น ร้านอาหาร ผลการศึกษาคุณภาพน้ำใน คลองส่งน้ำสายใหญ่ฝั่งขวาแต่ละจุดมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดมลพิษจากการใช้ประโยชน์ที่ดินบริเวณริม คลอง โดยในจุดเก็บน้ำที่ 6, 7 และ 8 เป็นจุดที่มีค่าบีโอดี (BOD) ของแข็งแขวนลอย (SS) แอมโมเนียไนโตรเจน ($\text{NH}_3\text{-N}$) ฟอสเฟต (PO_4^{3-}) ปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมด (TCB) และปริมาณฟิคอลโคลิฟอร์มแบคทีเรีย (FCB) สูงกว่าจุดอื่น และสอดคล้องกับค่าออกซิเจนละลาย (DO) ที่มีค่าต่ำ ซึ่งอาจเกิดจากการปล่อยน้ำที่มีการปนเปื้อนสารอินทรีย์จาก บ้านเรือน และการปนเปื้อนของอุจจาระของคนลงในคลอง ผลการประเมินคุณภาพน้ำคลองส่งน้ำสายใหญ่ฝั่งขวา พบว่าค่า ดัชนีคุณภาพน้ำ (WQI) อยู่ในช่วง 55 - 71 ซึ่งผลการประเมินคุณภาพน้ำผิวดินอยู่ในระดับพอใช้ถึงดีในช่วงจุดเก็บน้ำที่ 1 ถึง จุดเก็บน้ำที่ 5 และเทียบได้กับค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำผิวดินประเภทที่ 2 - 3 ส่วนในจุดเก็บน้ำที่ 6 ถึง จุดเก็บน้ำที่ 8 มีผลการประเมินคุณภาพน้ำผิวดินอยู่ในระดับเสื่อมโทรม และเทียบได้กับค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำผิวดินประเภทที่ 4 สรุป ได้ว่าคุณภาพน้ำของคลองส่งน้ำสายใหญ่ฝั่งขวาขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดมลพิษ โดยชุมชนบ้านเรือนเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผล กระทบต่อคุณภาพน้ำมากที่สุด เนื่องจากมีการเจือปนของสารอินทรีย์ในน้ำเสียและการปนเปื้อนของแบคทีเรียที่ก่อให้เกิด โรค ดังนั้นจึงควรหามาตรการในการเฝ้าระวังผลกระทบที่จะเกิดขึ้นต่อไป

คำสำคัญ: การประเมินคุณภาพน้ำ คลองส่งน้ำสายใหญ่ฝั่งขวา จังหวัดนครนายก

ABSTRACT

This research was to investigate the quality of water in the water transmission right main canal in Nakhon Nayok province. There were 8 sampling points along the water route. Samples were taken from January 2019 to March 2019. The results shown that the right main canal is a canal which receives water from the Nakhon Nayok River for agriculture, consumption which used to produce tap water in Ban Na District and Ongkharak District. The land use nearby the right main canal is divided into 3 parts: land use for agriculture, accommodation and other activities, such as, restaurants. The results of measuring the water quality were found different in each points depending on the source of pollution from land use along the canal. In the sampling point No.6, 7 and 8 were found the total water quality including BOD, SS, $\text{NH}_3\text{-N}$, PO_4^{3-} , TCB and FCB were higher than other points. According to DO was low. That caused by the release of contaminated water from household and human feces into the canal. The results of the water quality assessment was found the water quality index (WQI) was in the range of 55 - 71. At the sampling point No.1 to No.5, the surface water quality assessment results were moderate to good which could be compared with the water quality standard class 2-3. At the sampling point No.6 to No.8, the surface water quality assessment results were deteriorated which could be compared with surface water quality standard class 4. It could be concluded that the water quality of right main canal depended on the source of pollution. The household wastewater was the main factor affecting the water quality. Because it was contaminated of organic matter and pathogenic bacteria. Therefore, monitoring the environmental health impact should be set as an important policy for this area.

Keyword: Water Quality Assessment, right main canal, Nakhon Nayok province.

1. บทนำ

คลองส่งน้ำสายใหญ่ฝั่งขวา จังหวัดนครนายก เป็นคลองชลประทานที่อยู่ในโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษานครนายก ได้มีการก่อสร้างตามนโยบายการจัดการน้ำชลประทานเพื่อใช้ในการเกษตร โดยมีการรับน้ำที่ผันน้ำจากแม่น้ำนครนายกไปช่วยพื้นที่เกษตรกรรมฝั่งขวาของแม่น้ำนครนายก โดยในระบบคลองส่งน้ำสายใหญ่ของจังหวัดนครนายก ระบบคลองส่งน้ำสายใหญ่ของจังหวัดนครนายกมีจำนวน 4 สาย ได้แก่ คลองส่งน้ำสายใหญ่ฝั่งขวา คลองเหมือง คลองส่งน้ำฝั่งซ้ายสาย 1 และคลองส่งน้ำฝั่งซ้ายสาย 2 โดยคลองส่งน้ำสายใหญ่ฝั่งขวาเป็นคลองส่งน้ำที่มีขนาดใหญ่ที่สุด มีความยาว 26.170 กิโลเมตร มีประตูละบายน้ำท่าช้างเป็นอาคารบังคับ น้ำปากคลองมี

ขนาดความลึก 2-6.00 เมตร สามารถระบายน้ำได้สูงสุด 60.00 ลูกบาศก์เมตร/วินาที นอกจากคลองส่งน้ำสายใหญ่ฝั่งขวาจะใช้ประโยชน์เพื่อการชลประทานแล้ว ยังใช้ประโยชน์เป็นคลองระบายน้ำที่ช่วยระบายน้ำฝนจากพื้นที่บริเวณใกล้เคียงลงสู่แม่น้ำนครนายกด้วยเช่นกัน [1]

ลักษณะทั่วไปของคลองส่งน้ำสายใหญ่ฝั่งขวา เป็นคลองชลประทานแบบคันดินสลับกับคอนกรีตในบางช่วง โดยน้ำในคลองจะไหลผ่านเขตอำเภอเมือง อำเภอบ้านนา และอำเภอองครักษ์ ตลอดแนวคลองมีชุมชนบ้านเรือนพื้นที่การเกษตร โดยเฉพาะอย่างยิ่งคลองนี้ได้ไหลผ่านเทศบาลตำบลองครักษ์ อีกทั้งคลองนี้ยังมีความสำคัญกล่าวคือเป็นแหล่งน้ำดิบที่นำมาใช้ในการผลิตน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาคอำเภอบ้านนา และการประปา

ส่วนภูมิภาคอำเภอองครักษ์ ซึ่งจากการสำรวจเบื้องต้นพบว่าในการผันน้ำจากแม่น้ำนครนายก ได้มีการเปิดประตูน้ำที่อยู่ในเขตองค์การบริหารส่วนตำบลท่าช้าง เพื่อผันน้ำจากแม่น้ำนครนายกเพียงอาทิตย์ละ 1 ครั้ง ทำให้ในช่วงฤดูแล้ง จะมีปริมาณน้ำที่ผันมาจากแม่น้ำนครนายกน้อย ทำให้ในช่วงช่วงของคลองมีน้ำนิ่งและมีการเกิดสาหร่ายเจริญเติบโตบริเวณผิวน้ำเป็นจำนวนมากผิดปกติหรือที่เรียกว่า ยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) ทำให้น้ำในลำน้ำเป็นสีเขียว ออกซิเจนละลายน้ำจะลดลง ซึ่งพบว่าโดยทั่วไปปัญหาคุณภาพน้ำจะรุนแรงในช่วงฤดูแล้งเนื่องจากขาดปริมาณน้ำมาเจือจางความสกปรก [2] ซึ่งปัญหาเหล่านี้จะมีผลต่อคุณภาพน้ำดิบ ที่จะใช้ในการผลิตน้ำประปา เพราะถ้าน้ำดิบมีคุณสมบัติที่ไม่เหมาะสมหรือคุณภาพไม่ได้มาตรฐานจะส่งผลให้ต้องเพิ่มสารเคมีในกระบวนการทำให้น้ำสะอาดเพิ่มมากขึ้นซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย และในบางครั้งอาจทำให้เกิดการตกค้างของสารเคมีทำให้มีผลต่อสิ่งแวดล้อมสิ่งมีชีวิตและสุขภาพอนามัยของมนุษย์ได้

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการตรวจวัดคุณภาพน้ำในคลองส่งน้ำสายใหญ่ฝั่งขวาเปรียบเทียบกับมาตรฐานคุณภาพน้ำผิวดิน และหาสาเหตุของปัญหาในกรณีที่คุณภาพน้ำในคลองต่ำกว่ามาตรฐานคุณภาพน้ำผิวดิน โดยวิเคราะห์จากกิจกรรมการใช้น้ำตลอดแนวพื้นที่ศึกษาอันจะนำไปสู่การหาแนวทางแก้ไขเพื่อป้องกันการปนเปื้อนที่จะมีผลกระทบต่อคุณภาพน้ำและคุณภาพชีวิตของประชาชนได้

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 พื้นที่ศึกษาและจุดเก็บตัวอย่างน้ำ

คลองส่งน้ำสายใหญ่ฝั่งขวาเป็นคลองสายใหญ่โดยมีบางช่วงเป็นคอนกรีตสลับกับคันดินบางช่วง โดยเป็นคลองรับน้ำที่ผันน้ำจากแม่น้ำนครนายก แล้วไหลผ่านเขตอำเภอเมือง อำเภอบ้านนา และอำเภอองครักษ์ แล้วไปบรรจบกับแม่น้ำนครนายกอีกครั้ง ก่อนไหลไปบรรจบกับแม่น้ำปราจีนบุรีที่อำเภอบ้านสร้าง และลงสู่แม่น้ำบางปะกงต่อไป โดยในการเก็บตัวอย่างน้ำในคลองสายใหญ่ฝั่งขวา

เพื่อนำมาตรวจวัดคุณภาพของน้ำนั้น ได้ทำการกำหนดจุดเก็บตัวอย่างน้ำบนสะพานตลอดแนวคลองสายใหญ่ฝั่งขวากว้างทั้งสิ้น 8 จุด

พื้นที่ที่ทำการศึกษาเริ่มตั้งแต่ช่วงสะพานโรงแรมจันทร์ศรีสอร์ท ตำบลท่าช้าง อำเภอเมืองนครนายก (จุดที่ 1) จนถึงสะพานศาลเจ้าพ่อองครักษ์ ตำบลทรายมูล อำเภอองครักษ์ (จุดที่ 8) ระยะทางรวมประมาณ 26.17 กิโลเมตร ซึ่งมีทิศทางการไหลของน้ำในคลองส่งน้ำเริ่มต้นจากประตูระบายน้ำ อบต.ท่าช้าง (จุด A) ที่ผันน้ำมาจากแม่น้ำนครนายก ไหลผ่านจุดเก็บน้ำที่ 1 ถึง จุดที่ 8 ตามลำดับ โดยมีทิศทางการไหลของน้ำและจุดน้ำทั้ง 8 จุดแสดงในรูปที่ 1

จุด A ประตูระบายน้ำ อบต.ท่าช้าง

จุดที่ 1 สะพานโรงแรมจันทร์ศรีสอร์ท

จุดที่ 2 สะพานแยกโรงเรียนนายร้อย จปร.

จุดที่ 3 สะพานหน้าทางเข้าหมู่บ้านชลพฤกษ์

จุดที่ 4 สะพานสี่แยกบ้านนา

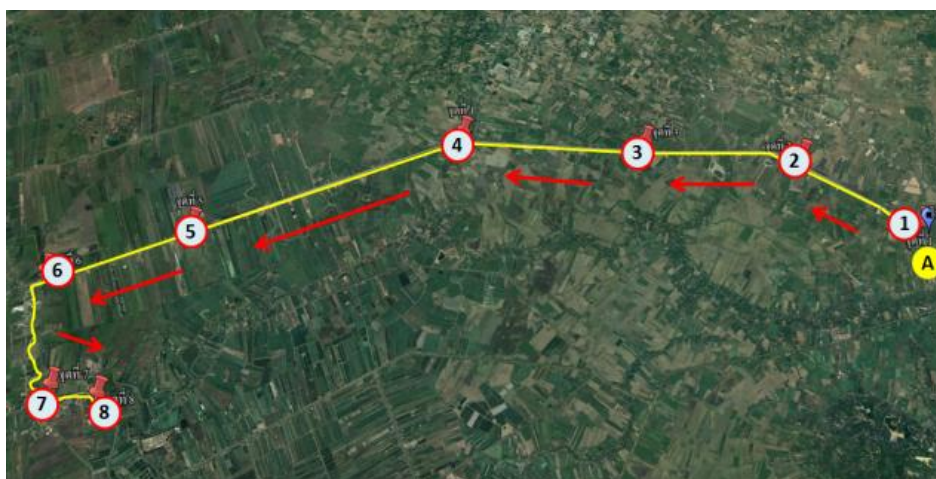
จุดที่ 5 สะพานหมู่บ้านแสนสุข-บาร์มี

จุดที่ 6 สะพานคลอง 31

จุดที่ 7 สะพานหน้าโรงแรมณิคม

จุดที่ 8 สะพานหน้าศาลเจ้าพ่อองครักษ์

การเก็บตัวอย่างน้ำในคลองสายใหญ่ฝั่งขวาเพื่อนำมาตรวจสอบคุณภาพน้ำ จะดำเนินการเก็บตัวอย่างน้ำในช่วงฤดูแล้ง เนื่องจากช่วงฤดูแล้งซึ่งมีปริมาณการผันน้ำจากแม่น้ำนครนายกเข้าสู่คลองส่งน้ำสายใหญ่ต่ำ ทำให้น้ำตลอดช่วงคลองส่งน้ำสายใหญ่มีลักษณะเป็นน้ำนิ่ง ซึ่งต่างจากช่วงฤดูฝนทางสำนักงานชลประทานได้มีการการผันน้ำจากแม่น้ำนครนายกเข้าสู่คลองส่งน้ำสายใหญ่อย่างต่อเนื่อง ทำให้มีการดันน้ำให้ไหลและไม่เกิดน้ำนิ่งในบริเวณคลองส่งน้ำสายใหญ่ โดยการเก็บตัวอย่างน้ำจะเริ่มตั้งแต่เดือนมกราคม 2562 ถึง เดือนมีนาคม 2562 จะทำการเก็บตัวอย่างน้ำเดือนละ 1 ครั้ง



รูปที่ 1 รูปตำแหน่งจุดเก็บตัวอย่างของคลองสายใหญ่ฝั่งขวา จังหวัดนครนายกในการวิจัยครั้งนี้ และทิศทางการไหลของน้ำในคลองส่งน้ำ

2.2 การเก็บตัวอย่างน้ำและการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

ในงานวิจัยนี้เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างน้ำ ประกอบด้วย ขวดเก็บตัวอย่างน้ำ อุปกรณ์เก็บตัวอย่างน้ำ แบบแนวตั้ง (Vertical Type Water Sampler) เชือก กระบอกฉีดยาน้ำกลั่น และอุปกรณ์อื่นๆ ที่ใช้ในการตรวจวัด ภาวการณ์ เช่น pH meter, DO meter, Temperature เป็นต้น วิธีการเก็บตัวอย่างเป็นการเก็บแบบจ้วง (Grab Sampling) โดยใช้อุปกรณ์เก็บตัวอย่างน้ำเก็บน้ำขึ้นมาแล้วเทใส่ขวดเก็บตัวอย่างน้ำจนเต็มขวดแล้วจึงปิดฝา เก็บใส่กล่องรักษาความเย็นสำหรับการเก็บรักษาเพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป

พารามิเตอร์สำหรับวิเคราะห์คุณภาพน้ำตัวอย่าง ได้แก่ อุณหภูมิ (Temp.) ค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ค่าบีโอดี (BOD) ค่าออกซิเจนละลาย (DO) ของแข็งแขวนลอย (SS) แอมโมเนียไนโตรเจน ($\text{NH}_3\text{-N}$) ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส (PO_4^{3-}) ปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมด (TCB) และปริมาณฟิคอลโคลิฟอร์มแบคทีเรีย (FCB) วิเคราะห์โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน APHA, AWWA and WEF (2005) [3]

2.3 การประเมินคุณภาพน้ำ

ในงานวิจัยนี้ได้มีการประเมินคุณภาพน้ำของแหล่งน้ำผิวดินจากดัชนีคุณภาพน้ำทั่วไป (General Water Quality Index : WQI) ตามมาตรฐานของกรมควบคุมมลพิษ [4] ที่ได้จากการนำดัชนีคุณภาพน้ำ 5 พารามิเตอร์มาคำนวณ ได้แก่ ปริมาณออกซิเจนละลาย (DO) ความสกปรกในรูปสารอินทรีย์ (BOD) ปริมาณแบคทีเรียในรูปโคลิฟอร์มทั้งหมด (TCB) ปริมาณแบคทีเรียในรูปฟิคอลโคลิฟอร์ม (FCB) และปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจน ($\text{NH}_3\text{-N}$) โดยค่า WQI ที่คำนวณได้จะนำไปเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานแหล่งน้ำผิวดินแต่ละประเภท ซึ่งมีเกณฑ์แสดงได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เกณฑ์คุณภาพน้ำและการคิดคะแนนรวมของ
คุณภาพน้ำ 5 พารามิเตอร์ ในการประเมินดัชนีคุณภาพน้ำ

เกณฑ์คุณภาพน้ำ	คะแนนรวม	เทียบได้กับค่ามาตรฐานน้ำผิวดินประเภท
ดี	71 - 100	2
พอใช้	61 - 70	3
เสื่อมโทรม	31 - 60	4
เสื่อมโทรมมาก	0 - 30	5

ที่มา : กรมควบคุมมลพิษ (2561) [4]

3. ผลและอภิปรายผล

จากการตรวจสอบคุณภาพน้ำคลองส่งน้ำสายใหญ่ฝั่งขวาในจังหวัดนครนายก ได้ทำการเก็บข้อมูลต่างๆ สามารถวิเคราะห์และวิจารณ์ผลการทดลองดังนี้

3.1 การใช้ประโยชน์ที่ดินบริเวณพื้นที่ริมคลองส่งน้ำสายใหญ่ฝั่งขวา

จากการสำรวจการใช้ประโยชน์ที่ดินบริเวณริมคลองส่งน้ำสายใหญ่ฝั่งขวาในบริเวณแต่ละจุดเก็บตัวอย่างน้ำ ตั้งแต่ประตูระบายน้ำ อบต.ท่าช้าง ก่อนถึงสะพานโรงแรม จันทราวิสัย (จุดเก็บน้ำที่ 1) จนถึงสะพานศาลเจ้าพ่อ อองครักษ์ (จุดเก็บน้ำที่ 8) พบว่าตลอดแนวคลองส่งน้ำสายใหญ่ฝั่งขวา ประกอบด้วยกิจกรรมด้านเกษตรกรรมและชุมชน โดยในช่วงของคลองมีการผันน้ำเข้าสู่พื้นที่ทางการเกษตร มีพืชพืชและผักตบชวาเป็นจำนวนมากทำให้ขัดขวางทางเดินของน้ำ พบว่าการใช้ประโยชน์ที่ดินบริเวณริมคลองส่งน้ำสายใหญ่ฝั่งขวามีการใช้ประโยชน์ที่ดินแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ

1) การใช้ประโยชน์ที่ดินเพื่อทำการเกษตร ซึ่งประกอบด้วย การทำนา การทำบ่อเลี้ยงปลา การทำบ่อเลี้ยงกุ้ง การปลูกพืชผสมผสาน เช่น มะพร้าว มะม่วง และการทำนา

2) การใช้ประโยชน์ที่ดินเพื่อเป็นที่พักอาศัย

3) การใช้ประโยชน์ที่ดินเพื่อประกอบกิจกรรมอื่นๆ เช่น ร้านอาหาร และโรงแรม

โดยมีจำนวนอาคารบ้านเรือนและพื้นที่การเกษตร ในแต่ละช่วงจุดเก็บน้ำแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การใช้ประโยชน์ที่ดินในแต่ละช่วงจุดเก็บน้ำ

ช่วงจุดเก็บน้ำ	ครัวเรือน (หลัง)	พื้นที่เกษตร (ไร่)	การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ (ไร่)	กิจกรรมอื่นๆ
ประตูระบายน้ำ อบต.ท่าช้าง (จุด A) ถึงจุด 1	34	2,475	-	มีโรงแรม 1 แห่ง
จุด 1 ถึง 2	28	2,069	-	-
จุด 2 ถึง 3	47	4,044	-	-

ช่วงจุดเก็บน้ำ	ครัวเรือน (หลัง)	พื้นที่เกษตร (ไร่)	การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ (ไร่)	กิจกรรมอื่นๆ
จุด 3 ถึง 4	110	4,625	-	มีการตั้งน้ำไปใช้ในการผลิตน้ำประปา อ.บ้านนา
จุด 4 ถึง 5	98	5,093	125	-
จุด 5 ถึง 6	120	2,115	150	มีร้านอาหาร 11 ร้าน
จุด 6 ถึง 7	221	1,195	-	มีตลาด อองครักษ์ 1 แห่ง
จุด 7 ถึง 8	168	1,063	-	มีโรงแรม 1 แห่ง และมีการตั้งน้ำไปใช้ในการผลิตน้ำประปา อ.อองครักษ์

จากตารางที่ 2 ได้มีการสำรวจจำนวนบ้านเรือนใกล้เคียงคลองส่งน้ำสายใหญ่ฝั่งขวาตลอดแนวเส้นทางของจุดเก็บน้ำที่นำมาตรวจวัด ตั้งแต่ประตูระบายน้ำ อบต.ท่าช้าง (จุด A) จนถึงจุดที่ 8 พบว่าในช่วงจุดเก็บน้ำที่ 5 ถึง 8 มีจำนวนบ้านเรือนบริเวณริมคลองส่งน้ำค่อนข้างหนาแน่นกว่าช่วงจุดเก็บน้ำอื่น รวมถึงจากการสำรวจพื้นที่ตลอดแนวคลองส่งน้ำสายใหญ่ฝั่งขวาและบริเวณพื้นที่ใกล้เคียง พบว่า ในปัจจุบันในพื้นที่อำเภอเมือง อำเภอบ้านนา อำเภอองครักษ์ จังหวัดนครนายกยังไม่มีระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน ดังนั้นน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากบ้านเรือนและชุมชนจึงถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติหรือคลองส่งน้ำได้โดยตรง โดยในตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่าตั้งแต่จุดเก็บน้ำที่ 5 ถึง 8 มีบ้านเรือนอยู่ริมคลองส่งน้ำค่อนข้างหนาแน่นกว่าช่วงจุดเก็บน้ำที่ 1 ถึง 5 รวมทั้งมีร้านอาหารริมคลองจำนวน 11 ร้าน ตลาดอองครักษ์ 1 แห่ง และโรงแรมที่อยู่ใกล้เคียงคลองส่งน้ำจำนวน 1 โรงแรม โดยเฉพาะในจุดที่ 6 ถึง จุดที่ 8 เป็นพื้นที่ชุมชนอำเภอองครักษ์ที่มีตลาดสดและบ้านเรือนที่อยู่บริเวณริมคลองค่อนข้างหนาแน่น รวมทั้งจากการสำรวจพื้นที่ใน

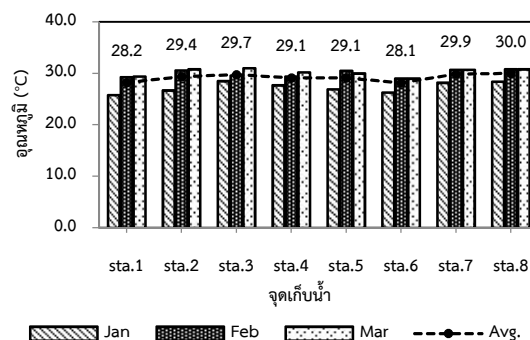
ปัจจุบันไม่พบระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนแต่อย่างใด แต่อย่างไรก็ตามจากการหาข้อมูลของเทศบาลตำบลองค์กรักษ์ จังหวัดนครนายก พบว่าได้กำหนดนโยบายให้มีโครงการก่อสร้างระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนรวมในเขตเทศบาลตำบลองค์กรักษ์ ซึ่งบรรจุอยู่ในยุทธศาสตร์การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐาน ในแผนพัฒนาท้องถิ่นสี่ปี เทศบาลตำบลองค์กรักษ์ (พ.ศ.2561-2564) [5] ซึ่งคาดว่าหากพื้นที่ชุมชนเทศบาลตำบลองค์กรักษ์ได้มีการนำระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนมาบำบัดน้ำทิ้งจากครัวเรือน ก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ก็จะสามารถลดมลสารที่เจือปนในน้ำ ทำให้คุณภาพของน้ำในคลองส่งน้ำดีขึ้น

3.2 ผลการตรวจวัดคุณภาพน้ำคลองส่งน้ำสายใหญ่ฝั่งขวา

จากการเก็บน้ำในแต่ละจุดทั้ง 8 จุดเก็บตัวอย่างในช่วงฤดูแล้ง เพื่อนำมาวิเคราะห์คุณภาพน้ำได้ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำดังนี้

3.2.1 ผลการตรวจวัดอุณหภูมิ (Temp.)

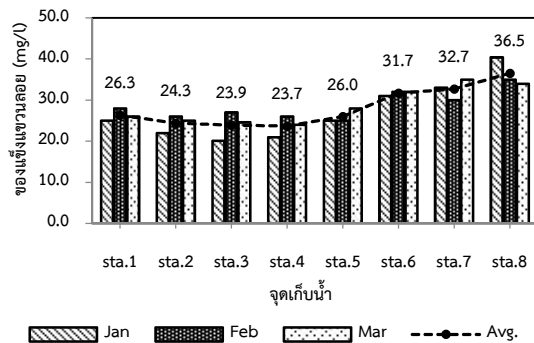
จากการตรวจวัดอุณหภูมิของน้ำในภาคสนาม ณ จุดเก็บน้ำทั้ง 8 จุด พบว่า ส่วนใหญ่มีค่าใกล้เคียงกันมีความแตกต่างกันไม่มากโดยมีค่าอยู่ระหว่าง 26.3°C – 31.0°C (ค่าเฉลี่ย $29.2 \pm 0.72^{\circ}\text{C}$) (รูปที่ 2) เมื่อนำอุณหภูมิของน้ำในคลองส่งน้ำสายใหญ่ฝั่งขวา เทียบกับอุณหภูมิของน้ำในแหล่งน้ำธรรมชาติของประเทศไทย มีค่าอยู่ระหว่าง 20°C – 35°C [6] พบว่าอุณหภูมิของน้ำทั้ง 8 จุดมีค่าอยู่ในเกณฑ์ปกติ ซึ่งสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ รวมถึงเมื่อนำค่าอุณหภูมิที่ตรวจวัดทั้ง 8 จุดเก็บตัวอย่างมาเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินที่ได้กำหนดเกณฑ์ไว้ว่าอุณหภูมิของน้ำจะต้องไม่สูงกว่าอุณหภูมิตามธรรมชาติเกิน 3°C [7] ซึ่งสรุปได้ว่าอุณหภูมิของน้ำทั้ง 8 จุดตัวอย่างมีค่าอยู่ในเกณฑ์ปกติ



รูปที่ 2 อุณหภูมิของน้ำ ณ จุดเก็บตัวอย่างน้ำทั้ง 8 จุดในช่วงเดือนมกราคม – มีนาคม 2562

3.2.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณของแข็งแขวนลอย (SS)

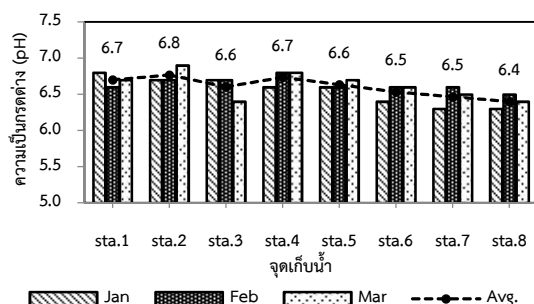
จากการเก็บตัวอย่างน้ำในจุดเก็บตัวอย่างทั้ง 8 จุดในช่วงเดือนมกราคม – มีนาคม 2562 พบว่ามีค่าของแข็งแขวนลอยอยู่ระหว่าง 20.1 – 40.4 mg/l (ค่าเฉลี่ย 28.1 ± 4.82 mg/l) โดยพบว่ามีปริมาณสูงในจุดที่ 5, 6, 7 และ 8 (รูปที่ 3) เนื่องจากทั้ง 4 จุดนี้เป็นจุดที่น้ำจากคลองส่งน้ำสายใหญ่ฝั่งขวาไหลผ่านพื้นที่หมู่บ้านแสนสุข-บาร์มี และชุมชนตลาดองค์กรักษ์ จึงมีความเป็นไปได้ว่ามีการระบายน้ำเสียจากครัวเรือนและแหล่งน้ำซึ่งสอดคล้องกับผลวิเคราะห์ค่าบีโอดีพบว่ามีค่าสูงเช่นกัน โดยเฉพาะในบริเวณจุดที่ 8 ที่มีการดึงน้ำไปใช้เป็นน้ำดิบในการผลิตน้ำประปาของอำเภองครักษ์จะทำให้อาจมีการเปลี่ยนแปลงในการใช้สารเคมีที่ช่วยในการตกตะกอนเพื่อทำให้น้ำสะอาด แต่อย่างไรก็ตามหากเทียบกับมาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินซึ่งไม่ได้มีเกณฑ์กำหนดเกี่ยวกับของแข็งแขวนลอยในน้ำแต่หากมีผู้อาศัยอยู่ริมคลองส่งน้ำจะนำน้ำไปใช้ในการบริโภคก็จะไม่เหมาะแก่การนำไปใช้บริโภคหรือแม้กระทั่งการนำน้ำไปใช้ในการอุปโภคบางประเภท เช่น ล้างจาน ชักผ้าก็จะไม่เหมาะในการนำไปใช้ ในกิจกรรมเหล่านี้เช่นกัน เนื่องจากการที่น้ำมีของแข็งแขวนลอยสูงจะทำให้น้ำมีความขุ่นมากขึ้น



รูปที่ 3 ปริมาณของแข็งแขวนลอยของจุดเก็บตัวอย่างน้ำ
ทั้ง 8 จุด ในช่วงเดือนมกราคม – มีนาคม 2562

3.2.3 ผลการตรวจวัดค่าความเป็นกรดต่าง (pH)

ค่าความเป็นกรดต่างที่วัดได้ในภาคสนามของทั้ง 8 จุดเก็บตัวอย่างในช่วงเดือน มกราคม-มีนาคม 2562 พบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 6.3 - 6.9 (ค่าเฉลี่ย 6.6 ± 0.13) (รูปที่ 4) จากการตรวจวัดค่าความเป็นกรดต่างพบว่าน้ำในคลองมีค่าเป็นกรดเล็กน้อย ซึ่งอาจเนื่องมาจากเมื่อมีการย่อยสลายของสารอินทรีย์ในน้ำจะได้คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึ่งละลายในน้ำ โดยส่วนหนึ่งจะรวมตัวกับน้ำได้กรดคาร์บอนิก (H_2CO_3) จึงทำให้ค่า pH ลดลง [8] แต่อย่างไรก็ตามพบว่าค่าความเป็นกรดต่าง ของทั้ง 8 จุดเก็บตัวอย่างแตกต่างกันไม่มากนักและเมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำผิวดิน [7] ที่กำหนดให้ค่าความเป็นกรดต่างของน้ำผิวดินทุกประเภทต้องอยู่ในช่วง 5 - 9 ซึ่งทั้ง 8 จุดเก็บตัวอย่างมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

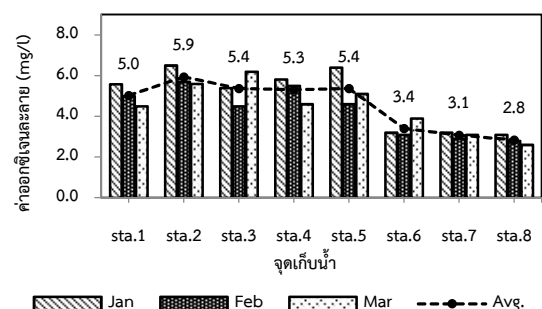


รูปที่ 4 ค่าความเป็นกรดต่างของจุดเก็บตัวอย่างน้ำ
ทั้ง 8 จุด ในช่วงเดือนมกราคม – มีนาคม 2562

3.2.4 ผลการตรวจวัดค่าออกซิเจนละลาย (DO)

ค่าออกซิเจนละลายที่ตรวจวัดได้ในภาคสนาม ของน้ำในจุดเก็บตัวอย่างทั้ง 8 จุด พบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 2.60 - 6.50 mg/L (ค่าเฉลี่ย 4.54 ± 1.23 mg/L) (รูปที่ 5) จากเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน [7] ที่กำหนดให้ค่าออกซิเจนละลายต้องไม่น้อยกว่า 6.0 mg/L สำหรับแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 2 ส่วนค่าออกซิเจนละลายต้องไม่น้อยกว่า 4.0 และ 2.0 mg/L สำหรับแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 3 และ 4 ตามลำดับ โดยเมื่อนำผลการตรวจวัดเฉพาะค่าออกซิเจนละลายที่ได้ในแต่ละจุดมาเทียบเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำ จะเห็นได้ว่าในจุดที่ 6, 7 และ 8 มีค่าออกซิเจนละลายน้อยกว่าจุดอื่น และจัดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 3 ที่ต้องมีการปรับปรุงคุณภาพน้ำก่อน และสามารถใช้ทำการเกษตรได้เป็นต้น

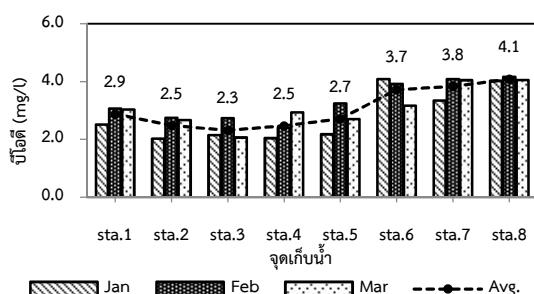
สอดคล้องกับค่า ของแข็งแขวนลอย (SS) และค่าบีโอดี (BOD) ที่มีค่าสูงกว่าจุดอื่นเช่นกัน เนื่องจากจุดที่ 6, 7 และ 8 เป็นจุดที่น้ำในคลองไหลผ่านพื้นที่ชุมชนทำให้มีการปล่อยทิ้งน้ำเสียจากครัวเรือนที่มีค่าสารอินทรีย์และสารอินทรีย์สูงเกิดการย่อยสลายของสารอินทรีย์และสารอินทรีย์ในน้ำทำให้จุลินทรีย์ต้องการใช้ออกซิเจนในการย่อยสลายมากขึ้นส่งผลให้ค่าออกซิเจนละลายที่ตรวจสอบได้มีค่าต่ำกว่าจุดอื่น



รูปที่ 5 ค่าออกซิเจนละลายของจุดเก็บตัวอย่างน้ำ
ทั้ง 8 จุด ในช่วงเดือนมกราคม – มีนาคม 2562

3.2.5 ผลการวิเคราะห์ค่าบีโอดี (BOD)

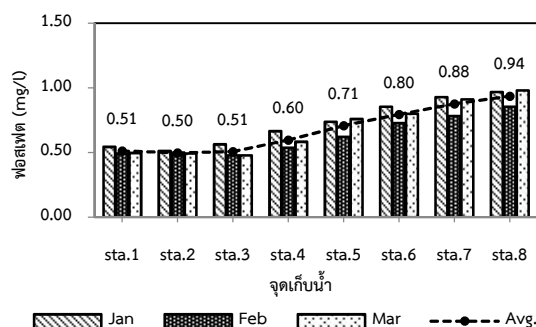
ค่าบีโอดีของน้ำในจุดเก็บตัวอย่างทั้ง 8 จุดที่ตรวจวัดได้ พบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 2.03 - 4.16 mg/l (ค่าเฉลี่ย 3.06 ± 0.70 mg/l) (รูปที่ 6) จากเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน [7] ที่กำหนดให้ค่าบีโอดีต้องไม่เกิน 1.5 mg/l สำหรับแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 2 ส่วนค่าบีโอดีต้องไม่เกิน 2.0 และ 4.0 mg/l สำหรับแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 3 และ 4 ตามลำดับ โดยเมื่อนำผลการตรวจวัดที่ได้ในแต่ละจุดมาเทียบเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำ จะเห็นว่าทุกจุดมีค่าบีโอดีเกินมาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 3 โดยเฉพาะในจุดที่ 6, 7 และ 8 มีค่าบีโอดีค่อนข้างสูงกว่าจุดอื่น เนื่องจากน้ำได้ไหลผ่านพื้นที่ชุมชนและมีการเจ็บป่วยของสารอินทรีย์ในน้ำเสียจากบ้านเรือนซึ่งแนวโน้มค่าบีโอดีที่วิเคราะห์ได้มีความสอดคล้องกับค่าออกซิเจนละลาย (DO) ที่พบว่าทั้ง 3 จุดนี้มีค่าต่ำกว่าจุดอื่นๆ เพราะน้ำในจุดนี้มีความสกปรกมากกว่า เนื่องจากค่าบีโอดี (BOD) เป็นความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมีของน้ำ โดยแบคทีเรียที่ทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำจะใช้ออกซิเจนในน้ำไปช่วยในกระบวนการย่อยสลาย ดังนั้นถ้ามีค่าบีโอดีสูง ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำก็จะถูกใช้ไปในกระบวนการย่อยสลายมากขึ้นส่งผลให้ค่าออกซิเจนละลายที่วัดได้ในจุดนี้มีค่าต่ำ โดยเมื่อพิจารณาเฉพาะค่าบีโอดีในจุดที่ 6, 7 และ 8 จัดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 4 ที่ต้องมีการปรับปรุงคุณภาพน้ำเป็นพิเศษก่อน และสามารถใช้ในการอุตสาหกรรมได้



รูปที่ 6 ค่าบีโอดีของจุดเก็บตัวอย่างน้ำทั้ง 8 จุด
ในช่วงเดือนมกราคม – มีนาคม 2562

3.2.6 ผลการวิเคราะห์ค่าฟอสเฟตฟอสฟอรัส (Phosphate)

จากการตรวจวัดปริมาณฟอสเฟตที่เจือปนในแหล่งน้ำของทั้ง 8 จุดเก็บตัวอย่าง พบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 0.48 - 0.98 mg/l (ค่าเฉลี่ย 0.68 ± 0.18 mg/l) (รูปที่ 7) จากการตรวจวัดปริมาณฟอสเฟตดังกล่าว พบว่าในเขตพื้นที่ชุมชนปริมาณฟอสเฟตมีค่าสูงกว่าจุดอื่นๆ ซึ่งอาจเกิดมาจากการปนเปื้อนของฟอสเฟตในน้ำที่มีสารซักล้าง จากบ้านเรือนลงในคลอง ส่งผลให้สามารถตรวจวัดค่าฟอสเฟตในจุดที่เป็นพื้นที่ชุมชนสูงกว่าจุดอื่น ส่วนในจุดอื่นๆที่พบว่าปริมาณฟอสเฟตอยู่น้อยกว่าจะเป็นพื้นที่ที่มีการทำเกษตรกรรม โดยคาดว่าน่าจะเกิดจากการปนเปื้อนของน้ำจากการใช้ปุ๋ยที่มีธาตุฟอสฟอรัสในพื้นที่เกษตร ถึงแม้ว่าปริมาณฟอสเฟตในน้ำ ไม่ได้กำหนดในมาตรฐานคุณภาพน้ำ อย่างไรก็ตามการที่ตรวจวัดค่าฟอสเฟตได้ แสดงให้เห็นว่าน้ำในคลองส่งน้ำ มีการปนเปื้อนของฟอสเฟต ที่อาจมาจากการซักล้าง หรือมาจากการใช้ปุ๋ยในการเกษตรในพื้นที่เกษตรกรรมบริเวณริมคลองส่งน้ำ

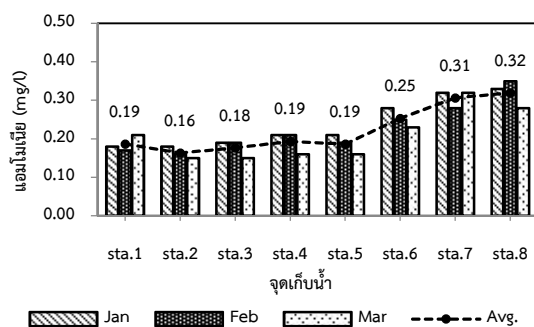


รูปที่ 7 ค่าฟอสเฟตของจุดเก็บตัวอย่างน้ำทั้ง 8 จุด
ในช่วงเดือนมกราคม – มีนาคม 2562

3.2.7 ผลการวิเคราะห์ค่าแอมโมเนียไนโตรเจน (Ammonia nitrogen)

จากการตรวจวัดปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนที่เจือปนในแหล่งน้ำของทั้ง 8 จุดเก็บตัวอย่าง พบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 0.12 - 0.35 mg/l (ค่าเฉลี่ย 0.22 ± 0.06 mg/l) (รูปที่ 8) จากการตรวจวัดปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนที่

เจือปนในแหล่งน้ำดังกล่าว ยังไม่พบว่ามีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน [7] ที่กำหนดให้ค่าแอมโมเนียไนโตรเจนต้องไม่เกิน 0.5 mg/l สำหรับแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 2, 3 และ 4 แต่จากการที่พบปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนเจือปนในแหล่งน้ำ เนื่องจากบริเวณใกล้เคียงคลองส่งน้ำเป็นพื้นที่เกษตรกรรมและการทำนาข้าว มีการใช้ปุ๋ยเคมีในการเกษตร เช่น ปุ๋ยยูเรีย เป็นต้น นอกจากนี้บริเวณใกล้เคียงเป็นพื้นที่ชุมชนซึ่งอาจมีการปนเปื้อนน้ำเสียจากการขับถ่ายของมนุษย์และสัตว์ลงในน้ำ จึงทำให้มีการปนเปื้อนของแอมโมเนียไนโตรเจนลงสู่ น้ำในคลองส่งน้ำ สอดคล้องกับผลการตรวจวัดค่าโคลิฟอร์มแบคทีเรีย ซึ่งพบว่าการปนเปื้อนในแหล่งน้ำเช่นกัน

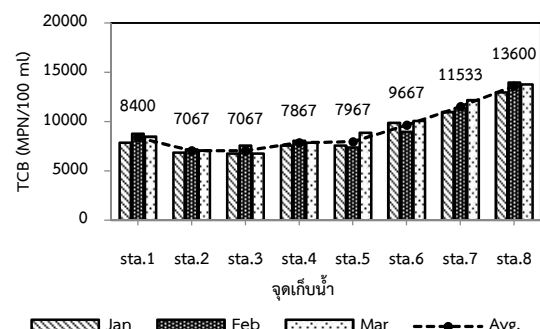


รูปที่ 8 ค่าแอมโมเนียไนโตรเจนของจุดเก็บตัวอย่างน้ำทั้ง 8 จุด ในช่วงเดือนมกราคม – มีนาคม 2562

3.2.8 ผลการตรวจปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมด (TCB)

ปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมด ใช้เป็นดัชนีบ่งชี้ความสะอาดและการปนเปื้อนของของเสียจากมนุษย์และสัตว์ เนื่องจากเป็นแบคทีเรียที่มักพบในระบบทางเดินอาหารและสิ่งขับถ่ายของมนุษย์และสัตว์ นอกจากนี้ยังสามารถพบได้ในดินและพืช [9] โดยปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำของทั้ง 8 จุดเก็บตัวอย่าง พบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 6,800 - 14,000 MPN/100 ml (ค่าเฉลี่ย $9,146 \pm 2,332$ MPN/100 ml) (รูปที่ 9) จากการตรวจวัดปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรีย

ทั้งหมดที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำ ยังไม่พบว่ามีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 3 [7] ที่กำหนดให้ปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดต้องไม่เกิน 20,000 MPN/100 ml แต่พบว่าปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดมีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 2 ที่กำหนดให้ปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดต้องไม่เกิน 5,000 MPN/100 ml โดยปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดตรวจวัดได้ แสดงให้เห็นว่าน้ำในคลองส่งน้ำมีการปนเปื้อนของอุจจาระของคนและสัตว์เลื้อยคลาน รวมถึงการปนเปื้อนของอินทรีย์วัตถุและจุลินทรีย์ตามผิวดินที่ถูกชะลงสู่แหล่งน้ำ [10] ซึ่งคุณภาพน้ำที่ตรวจพบการปนเปื้อนของโคลิฟอร์มแบคทีเรียในน้ำ จึงไม่สามารถนำมาใช้ในการบริโภคโดยตรงจำเป็นต้องมีการทำให้น้ำสะอาดก่อน เช่น การต้มเพื่อฆ่าเชื้อโรค เป็นต้น

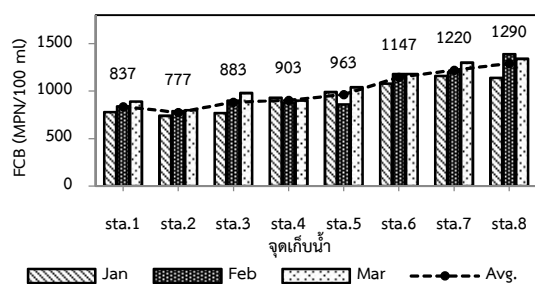


รูปที่ 9 ปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดของจุดเก็บตัวอย่างน้ำ 8 จุด ในช่วงเดือนมกราคม – มีนาคม 2562

3.2.9 ผลการตรวจปริมาณฟิคอลโคลิฟอร์มแบคทีเรีย (FCB)

ปริมาณฟิคอลโคลิฟอร์มแบคทีเรียเป็นตัวบ่งชี้ให้เห็นว่ามีการปนเปื้อนมาจากอุจจาระ โดยฟิคอลโคลิฟอร์มแบคทีเรียมักพบอยู่ในทางเดินอาหารของมนุษย์และสัตว์เลื้อยคลาน และถูกขับถ่ายออกมากับอุจจาระซึ่งอาจทำให้เกิดโรคได้ โดยส่วนใหญ่เป็นแบคทีเรียสกุล Escherichia [11] ปริมาณฟิคอลโคลิฟอร์มแบคทีเรียที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำของทั้ง 8 จุดเก็บตัวอย่าง พบว่ามีค่า

อยู่ระหว่าง 740 - 1,390 MPN/100 ml (ค่าเฉลี่ย $1,003 \pm 190$ MPN/100 ml) (รูปที่ 10) จากการตรวจวัดปริมาณฟีคอลโคลิฟอร์มแบคทีเรียที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำยังไม่พบว่ามีความเกินเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 3 [7] ที่กำหนดให้ปริมาณฟีคอลโคลิฟอร์มแบคทีเรียต้องไม่เกิน 4,000 MPN/100 ml แต่พบว่าปริมาณฟีคอลโคลิฟอร์มแบคทีเรียในบางจุดเก็บตัวอย่าง (จุดที่ 6, 7 และ 8) มีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 2 ที่กำหนดให้ปริมาณฟีคอลโคลิฟอร์มแบคทีเรียต้องไม่เกิน 1,000 MPN/100 ml โดยปริมาณฟีคอลโคลิฟอร์มแบคทีเรียที่ตรวจวัดได้ แสดงให้เห็นว่าน้ำในคลองส่งน้ำมีการปนเปื้อนของอุจจาระของคนและสัตว์เลื้อยคลาน ซึ่งเสี่ยงต่อการทำให้เกิดโรคเกี่ยวกับทางเดินอาหาร โดยเฉพาะในจุดเก็บน้ำที่ 6, 7 และ 8 ที่ไหลผ่านบริเวณพื้นที่ชุมชนของครึกษ์ ดังนั้นน้ำในคลองส่งน้ำจึงไม่เหมาะที่จะนำมาบริโภคโดยไม่ผ่านกระบวนการฆ่าเชื้อโรคก่อน เพราะอาจเสี่ยงต่อการเกิดโรคต่อเด็กและผู้ใหญ่ได้ สอดคล้องกับงานวิจัยของ พรปวิณและคณะ [12] ที่พบว่าคลองบริเวณที่รองรับน้ำเสียชุมชนจะมีปริมาณแบคทีเรียสูงสุดเมื่อเทียบกับจุดเก็บตัวอย่างในจุดอื่น



รูปที่ 10 ปริมาณฟีคอลโคลิฟอร์มแบคทีเรียของจุดเก็บตัวอย่างน้ำ 8 จุด ในช่วงเดือนมกราคม – มีนาคม 2562

3.3 ผลการประเมินคุณภาพน้ำคลองส่งน้ำสายใหญ่ฝั่งขวา

เมื่อนำค่าดัชนีคุณภาพน้ำ 5 พารามิเตอร์ ได้แก่ ปริมาณออกซิเจนละลาย (DO) ความสกปรกในรูป

สารอินทรีย์ (BOD) ปริมาณแบคทีเรียในรูปโคลิฟอร์มทั้งหมด (TCB) ปริมาณแบคทีเรียในรูปฟีคอลโคลิฟอร์ม (FCB) และปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจน ($\text{NH}_3\text{-N}$) มาหาค่าเฉลี่ย เพื่อประเมินคุณภาพน้ำของแหล่งน้ำผิวดินจากดัชนีคุณภาพน้ำทั่วไป (WQI) เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานแหล่งน้ำผิวดินแต่ละประเภท โดยค่าดัชนีคุณภาพน้ำทั่วไป (WQI) ที่ได้อยู่ในช่วง 55-71 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ สามารถและคณะ [13] ที่พบว่าคุณภาพน้ำในแม่น้ำลำในช่วงฤดูแล้งจะมีค่าคุณภาพน้ำอยู่ในเกณฑ์พอใช้ โดยมีค่า WQI อยู่ระหว่าง 58-68 จากผลการเปรียบเทียบคุณภาพน้ำที่แสดงได้ดังตารางที่ 3 จะเห็นว่าคุณภาพน้ำในคลองส่งน้ำสายใหญ่ฝั่งขวาตอนต้นและตอนกลาง (ระหว่างจุดเก็บน้ำที่ 1 ถึง จุดเก็บน้ำที่ 5) มีคุณภาพน้ำอยู่ในเกณฑ์พอใช้ เทียบได้กับค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำผิวดินประเภทที่ 3 สามารถนำมาใช้เพื่อการอุปโภคและบริโภคได้ โดยต้องผ่านการฆ่าเชื้อโรคและปรับปรุงคุณภาพน้ำก่อน ยกเว้นในจุดเก็บน้ำที่ 2 มีคุณภาพน้ำอยู่ในเกณฑ์ดี เทียบได้กับค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำผิวดินประเภทที่ 2 ซึ่งพบว่าในจุดนี้มีบ้านเรือนอยู่ไม่มากนัก (ช่วงจุดเก็บน้ำที่ 1 ถึงจุดเก็บน้ำที่ 2) จึงทำให้คุณภาพน้ำในจุดนี้ดีกว่าจุดอื่น แต่อย่างไรก็ตามพบว่าค่าคะแนนรวมในจุดที่ 2 นี้ไม่แตกต่างจากจุดที่ 1 ถึง 5 มากนัก ส่วนในช่วงตอนปลายของคลองส่งน้ำสายใหญ่ฝั่งขวา (ระหว่างจุดเก็บน้ำที่ 6 ถึง จุดเก็บน้ำที่ 8) พบว่ามีคุณภาพน้ำอยู่ในเกณฑ์เสื่อมโทรม เทียบได้กับค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำผิวดินประเภทที่ 4 สามารถนำมาใช้เพื่อการอุปโภคและบริโภคได้ โดยต้องผ่านการฆ่าเชื้อโรคและปรับปรุงคุณภาพน้ำเป็นพิเศษก่อน

ตารางที่ 3 คุณภาพน้ำของคลองส่งน้ำสายใหญ่ฝั่งขวาจากการตรวจวัดระหว่างเดือนมกราคม 2562 ถึงเดือนมีนาคม 2562

จุดตรวจวัด	ค่าคะแนนรวม	เทียบได้กับค่ามาตรฐานน้ำผิวดินประเภท	เกณฑ์คุณภาพน้ำ
จุดที่ 1	67	3	พอใช้
จุดที่ 2	71	2	ดี

จุดตรวจวัด	ค่าคะแนนรวม	เทียบได้กับค่ามาตรฐานน้ำผิวดินประเภท	เกณฑ์คุณภาพน้ำ
จุดที่ 3	69	3	พอใช้
จุดที่ 4	68	3	พอใช้
จุดที่ 5	68	3	พอใช้
จุดที่ 6	58	4	เสื่อมโทรม
จุดที่ 7	57	4	เสื่อมโทรม
จุดที่ 8	55	4	เสื่อมโทรม

จากผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำและค่าดัชนีคุณภาพน้ำของคลองส่งน้ำสายใหญ่ฝั่งขวา แสดงให้เห็นถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นกับแหล่งน้ำเนื่องจากกิจกรรมของมนุษย์ โดยกิจกรรมที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำ ได้แก่ น้ำทิ้งจากชุมชนบ้านเรือน ร้านอาหาร การทำเกษตรกรรม เป็นต้น ซึ่งไม่ควรมีการปล่อยน้ำทิ้งที่ไม่ได้ผ่านการบำบัดลงสู่แหล่งน้ำ เนื่องจากคลองส่งน้ำสายใหญ่ฝั่งขวานอกจากจะใช้ประโยชน์เป็นคลองส่งน้ำให้แก่พื้นที่การเกษตรแล้ว ยังมีหน้าที่เป็นคลองระบายน้ำที่ช่วยระบายน้ำจากพื้นที่บริเวณใกล้เคียงลงสู่แม่น้ำนครนายก ดังนั้นในจุดที่ 6 ถึง 8 ที่มีชุมชนบ้านเรือนอาศัยอยู่หนาแน่น และยังไม่มียระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน น้ำเสียที่เกิดขึ้นจากบ้านเรือนและชุมชนจึงถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติหรือคลองส่งน้ำได้โดยตรง ทำให้น้ำในคลองส่งน้ำในจุดที่ 6 ถึง 8 มีความสกปรกสูงและมีคุณภาพน้ำเสื่อมโทรม

สอดคล้องกับงานวิจัยของ สายธารและคณะ [14] ที่พบว่าจุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ไหลผ่านแหล่งชุมชน และสถานประกอบการต่างๆ ซึ่งมีการปล่อยน้ำทิ้งลงสู่คลองบางใหญ่ โดยไม่มีการบำบัด เป็นสาเหตุหลักทำให้คุณภาพน้ำเสื่อมโทรมมาก โดยแนวทางในการแก้ปัญหาเบื้องต้นสามารถจัดการคุณภาพน้ำด้วยวิธีการทำให้น้ำเสียในคลองส่งน้ำเจือจางลง ด้วยการเปิดประตูน้ำที่อยู่ในเขตองค์การบริหารส่วนตำบลท่าช้าง เพื่อผันน้ำจากแม่น้ำนครนายกจากเดิมที่มีการเปิดประตูระบายน้ำอาทิตย์ละ 1 ครั้งเป็นเปิดประตูระบายน้ำในช่วงเวลาเดียวกันในทุกๆ วัน เพื่อให้มีการคั่นน้ำเก่าที่อยู่ในคลองส่งน้ำ และระบายออกสู่แม่น้ำบางปะกงต่อไปซึ่งมีผลทำให้น้ำในคลองส่งน้ำฝั่งขวามี

โอกาสไหลถ่ายเทกันเพิ่มมากขึ้นกว่าเดิม เกิดการหมุนเวียนของน้ำที่มีการเจือปนของมลสาร กลายเป็นน้ำที่มีคุณภาพที่ขึ้น

4. สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัยการตรวจสอบคุณภาพน้ำคลองส่งน้ำสายใหญ่ฝั่งขวาในจังหวัดนครนายก จากผลการวิเคราะห์พบว่าการใช้ประโยชน์ที่ดินบริเวณริมคลองส่งน้ำสายใหญ่ฝั่งขวามีการใช้ที่ดินแบ่งเป็น 3 ส่วน คือ การใช้ที่ดินเพื่อการทำการเกษตรกรรม การใช้ประโยชน์ดินเพื่อเป็นที่พักอาศัย และการใช้ประโยชน์ที่ดินเพื่อประกอบกิจการอื่นๆ เช่น ร้านอาหาร ผลการประเมินคุณภาพน้ำคลองส่งน้ำสายใหญ่ฝั่งขวา มีคุณภาพน้ำอยู่ในเกณฑ์พอใช้และเสื่อมโทรม โดยแหล่งที่มาของความสกปรกและสารอินทรีย์ในน้ำเสียรวมถึงการปนเปื้อนของเชื้อโรคและแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดโรค ส่วนใหญ่มาจากน้ำทิ้งในครัวเรือนบริเวณริมคลอง สรุปได้ว่าคุณภาพน้ำของคลองส่งน้ำสายใหญ่ฝั่งขวา ขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดมลพิษ โดยชุมชนบ้านเรือนเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำมากที่สุด

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณนิสิตสาขาวิศวกรรมโยธาที่ช่วยเก็บข้อมูลในการทำวิจัย และภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่เอื้อเฟื้อวัสดุอุปกรณ์ให้กับคณะผู้วิจัยเพื่อใช้ในการเก็บตัวอย่างงานวิจัยครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Nakhon Nayok Regional Irrigation Office 9, 2019, (10 August 2019), History of Nakhon Nayok Operation and Maintenance Project, (in Thai), [online], Available: <http://province.rid.go.th/nkyok/nknayok/web/si-2.html>.

- [2] Pollution Control Department Ministry of Natural Resources and Environment, 2019, (10 August 2019), Water quality and management, (in Thai), [online], Available: http://www.pcd.go.th/info_serv/water_save_water.html.
- [3] APHA AWWA WEF, 2005, Standard Method for the Examination of Water and Wastewater, 21st ed, *American Public Health Association*, Washington DC, USA.
- [4] Pollution Control Department Ministry of Natural Resources and Environment, 2013, (15 July 2019), Total score of water quality 5 parameters, (in Thai), [online], Available: http://iwis.pcd.go.th/module/wqi_calculate/wqi.pdf.
- [5] Ongkharak Subdistrict Municipality. 2561. (10 August 2019), Four years local development plan (2019 - 2022) Ongkharak Subdistrict Municipality, (in Thai), [online]. Available: <https://www.ongkarak.go.th/FourYearsLocal.html>.
- [6] K. Chankaew, "Environmental science," (in Thai), Aksornsiam printing, Bangkok, 363p. 1988.
- [7] Pollution Control Department Ministry of Natural Resources and Environment, 1995, (2 August 2019), Water quality standard, (in Thai), [online]. Available: http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_water05.html#s3.
- [8] N. Niphonkit, "Effects of Land Use Patterns on Surface Water Quality of Middle-Lower Tha-Chin River," (in Thai), Master of Science thesis, Environmental science, Kasetsart University, Bangkok, 2004.
- [9] T. Thongsri, S. Petchkasem, and K. Muangkaew, "An assessment of coliform and fecal coliform bacteria levels in surface water resources of Bangkok and vicinity area," (in Thai), *Bulletin of Applied Sciences*, vol 3, No.3, pp.59-67, 2014.
- [10] A. Sangiamjai, "Surface Water Quality around the Rojana Industrial Park, Phra Nakhon Si Ayutthaya Province," (in Thai), *The Journal of Industrial Technology*, vol 15, No.1, pp.1-11, 2019.
- [11] N.J. ASHBOLT, O.K. Willie, W. GRABO, and M. SNOZZI. Indicators of microbial water quality. In: *Water Quality: Guidelines, Standards and Health*. Lorna FEWTRELL and Jamie BARTRAM, eds. London: IWA Publishing, pp. 289-316, 2001.
- [12] P. Srisung, N. Moongjomklang, W. Yoochat-chaval, K. Syutsubo, and N. Tomioka, "Central Bangkok canal water quality assessment by molecular technique," (in Thai), *The 23rd National Convention on Civil Engineering*, pp. 1-10, 2018.
- [13] S. Jaitae, C. Warodomrungsimun, T. Maton, and P. Aungudornpukdee, "Water Quality and Li River Utility, Lumphun Province," (in Thai), *RMUTP Research Journal*, vol 9, No.1, pp.112-124, 2015.
- [14] S. Thongphrom, and C. Lenthas, "Water Quality Monitoring of Bang Yai Canal in Phuket Province," (in Thai), *Thaksin University Journal*, vol 16, No.3, pp.111-119, 2013.

การเปรียบเทียบวิธีการควบคุมวงจรเอสวีซีสำหรับใช้ชดเชยแรงดันไฟฟ้า และปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส

The Comparison of SVC Control Methods for Voltage Compensation and Power Factor Improvement in Single-Phase Power Systems

ภูษิต ภูคาเพชร ทศพร ณรงค์ฤทธิ์* และ กองพล อารีรักษ์

กลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Poosit Phukaphet Tosaporn Narongrit* 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: tosaporn@sut.ac.th

(Received: May 19, 2019; Accepted: August 20, 2019)

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการชดเชยแรงดันไฟฟ้าและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังด้วยวงจรสร้างความยืดหยุ่นให้ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ (Flexible AC Transmission Systems: FACTS) ชนิดวงจรเอสวีซี (Static VAR Compensator: SVC) สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส โดยการนำเสนอจะเปรียบเทียบสมรรถนะการชดเชยของวงจรเอสวีซีที่ใช้วิธีควบคุมการทำงาน 3 วิธี คือ วิธีควบคุมผ่านค่าแรงดัน (Voltage Control: VC) วิธีควบคุมผ่านค่ากำลังรีแอกทีฟ (VAR Compensation Control: VCC) และวิธีควบคุมผ่านค่าแรงดันร่วมกับกำลังรีแอกทีฟ (Voltage and VAR Compensation Control: WVCC) การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรเอสวีซีจะอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเอสวีซีซึ่งจะได้นำเสนอในบทความนี้เช่นกัน การตรวจสอบสมรรถนะการชดเชยแรงดันไฟฟ้าและการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังด้วยวงจรเอสวีซีจะใช้เทคนิคการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป (hardware in the loop simulation) ที่ใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ร่วมกับบอร์ด DSP รุ่น TMS320C2000™ Experimenter Kit ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์ พบว่า วงจรเอสวีซีที่ใช้การควบคุมด้วยวิธีควบคุมผ่านค่ากำลังรีแอกทีฟและวิธีควบคุมผ่านค่าแรงดันร่วมกับกำลังรีแอกทีฟสามารถให้ประสิทธิผลการชดเชยที่ดีใกล้เคียงกัน และดีกว่าวิธีควบคุมผ่านค่าแรงดัน โดยค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อร่วม (Point of Common Coupling: PCC) และค่าตัวประกอบกำลังของระบบภายหลังการชดเชยเป็นไปตามระเบียบการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคด้วยข้อกำหนดการเชื่อมต่อนับระบบโครงข่ายไฟฟ้า พ.ศ. 2559

คำสำคัญ: การชดเชยแรงดันไฟฟ้า การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง วงจรเอสวีซี วิธีการควบคุมวงจรเอสวีซี วงจรสร้างความยืดหยุ่นให้ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ

ABSTRACT

This paper presents the voltage compensation and power factor improvement using Flexible AC Transmission Systems (FACTS), Static VAR Compensation (SVC) for single-phase power systems. The performance comparison of SVC with three control methods such as Voltage Control (VC) method, VAR

Compensation Control (VCC) method, and Voltage and VAR Compensation Control (VVCC) method are proposed. The design of SVC parameters depend on the mathematical model which is also presented in this paper. For performance testing, the hardware in the loop simulation technique using MATLAB/Simulink program and TMS320C2000TMExperimenter Kit DSP board are applied to Simulate voltage compensation and power factor improvement via the SVC. The simulation results show that the SVC controlled by VVC and VVCC methods can provide similarly a good performance and better than VC method. However, the voltages at point of common coupling (PCC) and power factor values after compensation by three control methods. are satisfied under Provincial Electricity Authority's Regulation on the Power Network System Interconnection Code B.E.2559 (2016).

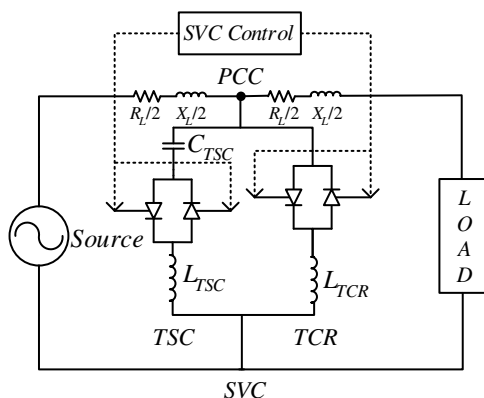
Keyword: Voltage Compensation, Power Factor Improvement, SVC, SVC Control, FACTS.

1. บทนำ

ปัจจุบันมีความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งภาคครัวเรือนและภาคอุตสาหกรรมเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะในภาคอุตสาหกรรมที่มีการต่อใช้งานโหลดอุปกรณ์ไฟฟ้าหลากหลายประเภท ซึ่งโหลดแต่ละประเภทมีความต้องการทั้งปริมาณกำลังแอกทีฟ (active power: P) และปริมาณกำลังรีแอกทีฟ (reactive power: Q) ที่แตกต่างกันไป อย่างไรก็ตาม ถ้าระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการต่อใช้งานโหลดประเภทกำลังรีแอกทีฟในปริมาณสูงมาก ๆ จะก่อให้เกิดปัญหาด้านคุณภาพทางไฟฟ้าได้ เช่น ปัญหาแรงดันตก (voltage drop/under voltage) ปัญหาแรงดันเกิน (over voltage) และปัญหาด้านค่าตัวประกอบกำลัง (Power Factor: PF) ที่ต่ำลง เป็นต้น ซึ่งในสภาวะปกติระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจะต้องมีค่าแรงดันไฟฟ้าตามพิกัดมาตรฐานของแต่ละประเทศ (ประเทศไทยใช้ระดับแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานที่ 220 V_{rms}) และควรมีค่าตัวประกอบกำลังไม่น้อยกว่า 0.85 [1] สำหรับในกรณีปัญหาด้านค่าแรงดันไฟฟ้าที่ผิดปกติทั้งแรงดันตกและแรงดันเกินดังกล่าวนอกจากจะส่งผลเสียต่อคุณภาพทางไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังโดยตรงแล้ว ในบางครั้งสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้เครื่องจักรกลในการผลิตอาจจะต้องหยุดชะงักเนื่องจากกระแสไฟฟ้าถูกตัดโดยการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันที่ติดตั้งไว้ และนำไปสู่ความเสียหายทางธุรกิจตามมา ด้วยเหตุนี้ จึงมีความจำเป็นอย่าง

ยิ่งที่จะต้องมีการป้องกันและแก้ไขปัญหาดังกล่าวเพื่อให้ระบบไฟฟ้ามีคุณภาพมากยิ่งขึ้นและลดความเสี่ยงความเสียหายทางด้านธุรกิจ การแก้ไขปัญหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่ผิดปกติและการปรับปรุงค่า PF สามารถทำได้หลายวิธีทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของระบบไฟฟ้า เช่น พิกัดแรงดันไฟฟ้าของระบบ ปริมาณโหลดกำลังไฟฟ้าสูงสุด พื้นที่ในการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชย ประสิทธิภาพการชดเชยที่ยอมรับได้ และการลงทุน เป็นต้น วิธีหนึ่งที่นิยมนำมาใช้แก้ปัญหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่ผิดปกติและการปรับปรุง PF ของระบบไฟฟ้ากำลัง คือ การติดตั้งวงจรสร้างความยืดหยุ่นให้ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ (Flexible AC Transmission Systems: FACTS) [2] เนื่องจากวงจรดังกล่าวสามารถจ่ายกำลังรีแอกทีฟเพื่อชดเชยค่าแรงดันไฟฟ้ารวมถึงปรับปรุง PF ได้พร้อมกัน วงจร FACTS สามารถแยกออกได้หลายชนิดวงจร ได้แก่ วงจรเอสวีซี (SVC) วงจรยูนิไฟฟลีว คอนโทรลเลอร์: UPFC) วงจรเอสเอสเอสซี (Static Synchronous Series Compensator: SSSC) และวงจรสแตทคอม (STATCOM) [3-5] อย่างไรก็ตามในบทความนี้ จะนำเสนอการชดเชยแรงดันไฟฟ้าและปรับปรุงค่า PF ด้วยวงจรเอสวีซี ทั้งนี้เนื่องจากวงจรดังกล่าวสามารถจ่ายกำลังรีแอกทีฟสำหรับการชดเชยด้วยอุปกรณ์ประเภทพาสซีฟ (Passive Elements) ซึ่งจะง่ายต่อการออกแบบและการติดตั้งใช้งาน อีกทั้งยังให้ประสิทธิภาพในการชดเชย

ที่ดีอีกด้วย [6] โดยปกติการติดตั้งวงจรเอสวีซีในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสจะทำการติดตั้งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของสายส่ง (ณ จุด PCC) ทำให้โหม่งพีแวนซ์สายส่งแบ่งออกเป็นสองส่วน [2] ดังแสดงได้ดังรูปที่ 1 จากรูปดังกล่าว วงจรเอสวีซีประกอบด้วย 2 วงจรย่อย คือ วงจรทีเอสซี (Thyristor Switched Capacitor: TSC) และวงจรทีซีอาร์ (Thyristor Controlled Reactor: TCR) โดยวงจรทีเอสซีจะทำหน้าที่จ่ายกำลังรีแอกทีฟแบบคาปาซิทีฟ หรือกำลังรีแอกทีฟที่เป็นค่าลบ ($-Q$) ส่วนวงจรทีซีอาร์จะทำหน้าที่จ่ายกำลังรีแอกทีฟแบบอินดักทีฟ หรือกำลังรีแอกทีฟที่เป็นค่าบวก ($+Q$) ให้กับระบบไฟฟ้า การออกแบบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงจรเอสวีซีในบทความนี้จะอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจร ซึ่งสามารถดูรายละเอียดการวิเคราะห์หาแบบจำลองและการนำไปใช้ออกแบบวงจรเอสวีซีได้จากหัวข้อที่ 2 และ 3 ตามลำดับ นอกจากนี้ในส่วนของการควบคุมการทำงานของวงจรเอสวีซี (SVC control) ในปัจจุบันพบว่า มีอยู่ 3 วิธีที่นิยมใช้ คือ วิธีการควบคุมผ่านค่าแรงดัน (Voltage Control: VC) [7] วิธีการควบคุมผ่านค่ากำลังรีแอกทีฟ (VAR Compensation Control: VCC) [8] และวิธีการควบคุมผ่านค่าแรงดันร่วมกับกำลังรีแอกทีฟ (Voltage and VAR Compensation Control: WVCC) [9] ซึ่งในบทความนี้จะนำเสนอเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมทั้ง 3 วิธีดังกล่าว โดยใช้ประสิทธิภาพการชดเชยแรงดันไฟฟ้าและการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง

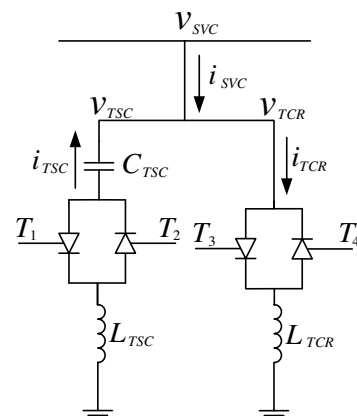


รูปที่ 1 ระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการติดตั้งวงจรเอสวีซีเป็นตัวชี้วัดสมรรถนะ

การนำเสนอเนื้อหาสาระของบทความนี้จะประกอบด้วยในหัวข้อที่ 2 จะอธิบายการวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเอสวีซี หัวข้อที่ 3 จะนำเสนอการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรเอสวีซี หัวข้อที่ 4 จะอธิบายวิธีการควบคุมการทำงานของวงจรเอสวีซี 3 วิธี ได้แก่ วิธี VC วิธี VCC และวิธี WVCC ในหัวข้อที่ 5 จะนำเสนอผลการจำลองสถานการณ์ และเปรียบเทียบสมรรถนะวิธีการควบคุมวงจรเอสวีซี 3 วิธี และในหัวข้อที่ 6 คือ สรุปผลของบทความ

2. การวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเอสวีซี

การวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเอสวีซีมีจุดประสงค์เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรที่สามารถให้ประสิทธิภาพในการชดเชยแรงดันไฟฟ้าและปรับปรุง PF ให้กับระบบไฟฟ้าที่พิจารณา จากรูปที่ 2 โครงสร้างของวงจรเอสวีซีประกอบด้วยวงจรย่อย 2 วงจร คือ วงจรทีเอสซี (ทำหน้าที่จ่ายปริมาณ $-Q$) และวงจรทีซีอาร์ (ทำหน้าที่จ่ายปริมาณ $+Q$) โดยโครงสร้างของวงจรทีเอสซีประกอบด้วยตัวเก็บประจุ (C_{TSC}) ต่ออนุกรมกับชุดอุปกรณ์สวิตช์แบบไทรสเตอร์ (T_1, T_2) และเหนี่ยวนำ (L_{TSC}) ส่วนโครงสร้างของวงจรทีซีอาร์ประกอบด้วยอุปกรณ์ตัวเหนี่ยวนำ (L_{TCR}) ต่ออนุกรมกับชุดอุปกรณ์สวิตช์แบบไทรสเตอร์ (T_3, T_4) ดังปรากฏในรูป



รูปที่ 2 โครงสร้างของวงจรเอสวีซี

จากโครงสร้างของวงจรเอสซีซีดังกล่าวข้างต้น การวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเอสซีซีในรูปของสมการค่ากำลังรีแอกทีฟ จะสามารถทำได้โดยการแยกวิเคราะห์หาแบบจำลองที่ละวงจรย่อย คือ การวิเคราะห์หาแบบจำลองของวงจรทีเอสซี และการวิเคราะห์หาแบบจำลองของวงจรทีซีอาร์ จากนั้นเมื่อได้แบบจำลองทั้งสองวงจรแล้วจะถูกนำมารวมกัน เพื่อแสดงเป็นแบบจำลองของวงจรเอสซีซี ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1. การวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรทีเอสซี

การวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรทีเอสซีจะเริ่มต้นจากการพิจารณาค่ากระแสที่ไหลผ่านวงจรทีเอสซี (i_{TSC}) ดังสมการที่ (1) โดย α_{TSC} คือ ค่ามุมจุดชนวนไทรสเตอร์ T_1 และ T_2 ของวงจรทีเอสซี และ V_{CO} คือ ค่าแรงดันเงื่อนไขในการทำงานของวงจรทีเอสซี

$$i_{TSC}(t) = \left(\frac{n^2}{n^2 - 1} \right) \omega C_{TSC} V_{TSC} \cos(\omega t + \alpha_{TSC}) - \omega C_{TSC} V_{TSC} \cos(\omega_n t) \cos(\alpha_{TSC}) - n \omega C_{TSC} \left(V_{CO} - V_{TSC} \left(\frac{n^2}{n^2 - 1} \right) \right) \sin(\alpha_{TSC}) \sin(\omega_n t) \quad (1)$$

$$\text{โดยที่ } n = \frac{I}{\sqrt{\omega^2 L_{TSC} C_{TSC}}} \text{ และ } \omega_n = \frac{I}{\sqrt{L_{TSC} C_{TSC}}}$$

จากสมการที่ (1) เนื่องจากวงจรทีเอสซีจะทำงานเพียง 2 สถานะ คือ สถานะเปิดวงจร (TSC: off) ซึ่งจะทำให้ i_{TSC} มีค่าเท่ากับศูนย์ และสถานะปิดวงจร (TSC: on) ที่จะทำให้ i_{TSC} มีค่าสูงสุด ซึ่งจะสามารถลดรูปสมการที่ (1) ได้โดยกำหนดตาม 2 เงื่อนไข [2] ดังนี้

เงื่อนไขที่ 1 กำหนดให้

$$\cos(\alpha_{TSC}) = 0 \text{ หรือ } \sin(\alpha_{TSC}) = 1$$

เงื่อนไขที่ 2 กำหนดให้

$$V_{CO} = \pm V_{TSC} \left(\frac{n^2}{n^2 - 1} \right) \omega C_{TSC} \sin(\omega t)$$

จากการดำเนินการตาม 2 เงื่อนไขในข้างต้น จะได้สมการ i_{TSC} ในสถานะปิดวงจรใหม่ ดังสมการที่ (2)

$$i_{TSC}(t) = V_{TSC} \left(\frac{n^2}{n^2 - 1} \right) \omega C_{TSC} \sin(\omega t) \quad (2)$$

พิจารณาแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมวงจรทีเอสซีสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3)

$$v_{TSC} = V_{TSC} \sin(\theta) \quad (3)$$

โดยที่ θ คือ มุมเฟสแรงดันของวงจรทีเอสซี

จากค่า i_{TSC} ดังสมการที่ (2) และค่า v_{TSC} ตามสมการที่ (3) จะสามารถคำนวณหาค่ากำลังรีแอกทีฟของวงจรทีเอสซี (Q_{TSC}) ที่สามารถจ่ายชดเชยให้กับระบบได้ แสดงดังสมการที่ (4)

$$Q_{TSC} = \frac{V_{TSC}^2}{2} \left(\frac{n^2}{n^2 - 1} \right) \omega C_{TSC} \quad (4)$$

2.2. การวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรทีซีอาร์

การวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรทีซีอาร์จะพิจารณาค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านวงจรทีซีอาร์ (i_{TCR}) และแรงดันที่ตกคร่อมวงจรทีซีอาร์ (v_{TCR}) ดังสมการที่ (5) และ (6) ตามลำดับ

$$i_{TCR} = \left(\frac{V_{TCR}}{\omega L_{TCR}} \right) (\sin(\omega t) - \sin(\alpha_{TCR})) \quad (5)$$

$$v_{TCR} = V_{TCR} \sin(\theta) \quad (6)$$

โดยที่ α_{TCR} คือ ค่ามุมจุดชนวนไทรสเตอร์ของวงจรทีซีอาร์ (T_3 และ T_4) ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง $\pi/2$

rad ส่วน θ คือ มุมเฟสแรงดันของวงจรที่ช็อร์ (เท่ากับมุมเฟสของ v_{TSC})

จากสมการที่ (5) และ (6) เมื่อพิจารณา คำนวณค่ากำลังรีแอกทีฟของวงจรที่ช็อร์ (Q_{TCR}) ที่สามารถจ่ายชดเชยได้ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (7)

$$Q_{TCR} = \left(\frac{V_{TCR}^2}{2\omega L_{TCR}} \right) (1 - \sin(\alpha_{TCR})) \quad (7)$$

จากสมการที่ (7) ถ้ากำหนดให้ $\alpha = 0$ rad จะได้ ค่ากำลังรีแอกทีฟสูงสุด แต่ถ้ากำหนดให้มุม $\alpha = \pi/2$ rad จะทำให้ได้ค่ากำลังรีแอกทีฟต่ำสุดเท่ากับศูนย์

2.3. การวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเอสวีซี

จากผลการวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรที่ช็อร์และวงจรทีเอสซีในสองหัวข้อที่ผ่านมา เมื่อนำมาเขียนรวมจะสามารถแสดงเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเอสวีซีได้ดังนี้

พิจารณาค่ากระแสรวมที่ไหลผ่านวงจรเอสวีซี (i_{SVC}) ซึ่งหาได้จากผลต่างระหว่างค่า i_{TCR} และค่า i_{TSC} แสดงได้ดังสมการที่ (8)

$$i_{SVC} = i_{TCR} - i_{TSC} \quad (8)$$

จากสมการที่ (8) จะสามารถคำนวณค่ากำลังรีแอกทีฟของวงจรเอสวีซี (Q_{SVC}) ที่สามารถจ่ายชดเชยได้ดังสมการที่ (9) โดยแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมวงจรเอสวีซี (v_{SVC}) จะมีขนาดและมุมเฟสเท่ากับ v_{TSC} และ v_{TCR} ซึ่งกำหนดใหม่ คือ $v_{SVC} = V_{SVC} \sin(\theta)$

$$Q_{SVC} = \left(\frac{V_{SVC}^2}{2\omega L_{TCR}} \right) (1 - \sin(\alpha_{TCR})) - \frac{V_{SVC}^2}{2} \left(\frac{n^2}{n^2 - 1} \right) \omega C_{TSC} \quad (9)$$

นอกจากนี้ เนื่องจากวงจรเอสวีซีถูกออกแบบให้จ่ายเฉพาะค่ากำลังรีแอกทีฟเท่านั้น ดังนั้น

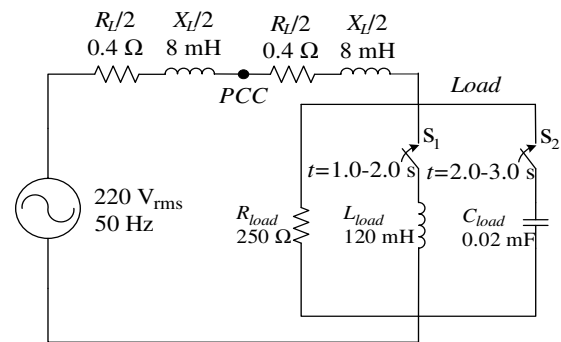
ค่ากำลังแอกทีฟ (P_{SVC}) ที่ได้จากวงจรจะมีค่าเท่ากับ ศูนย์แสดงดังสมการที่ (10)

$$P_{SVC} = \left(\left(\frac{V_{SVC}^2}{2\omega L_{TCR}} \right) (1 - \sin(\alpha_{TCR})) - \frac{V_{SVC}^2}{2} \left(\frac{n^2}{n^2 - 1} \right) \omega C_{TSC} \right) \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) = 0 \quad (10)$$

จากการวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเอสวีซีในข้างต้น แบบจำลองดังกล่าวจะถูกนำไปใช้ออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรเอสวีซี ซึ่งสามารถดูได้ในหัวข้อต่อไป

3. การออกแบบค่าพารามิเตอร์วงจรเอสวีซี

3.1. ระบบที่พิจารณา



รูปที่ 3 ระบบที่พิจารณาชดเชยแรงดันไฟฟ้า

และปรับปรุงค่า PF

ระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสที่พิจารณาชดเชยแรงดันไฟฟ้าและปรับปรุงค่า PF สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3 จากรูปดังกล่าว ระบบไฟฟ้ามีพิกัดแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 220 Vrms ความถี่มูลฐานเท่ากับ 50 Hz และมีค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่ง คือ ความต้านทาน (R_L) เท่ากับ 0.8 Ω อนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ (X_L) เท่ากับ 16 mH ระบบไฟฟ้าง่ายต่อเข้ากับโหลดตัวความต้านทาน (R_{load}) เท่ากับ 250 Ω ขนานกับตัวเหนี่ยวนำ (L_{load}) เท่ากับ 120 mH และตัวเก็บประจุ (C_{load}) เท่ากับ 0.02 mF จากระบบที่พิจารณาดังกล่าว สามารถให้ค่ากำลังแอกทีฟสูงที่ 220 W ค่ากำลังรีแอกทีฟต่ำสุดที่ -360 Var และค่ากำลังรีแอกทีฟสูงสุด คือ 780 Var เมื่อทำการจำลองสถานการณ์สามารถแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าในหน่วยอาร์เอ็มเอส (rms) ของระบบก่อนมีการชดเชย (แรงดันที่

จุด V_{pcc}) ค่ากำลังรีแอกทีฟที่โหลด (Q_L) และค่ากำลังแอกทีฟที่โหลด (P_L) ได้ดังรูปที่ 4 และ 6 ตามลำดับ จากรูปดังกล่าวในช่วงเวลาเริ่มต้นตั้งแต่ 0 ถึง 1 วินาที คือช่วงเวลาที่มีการต่อโหลดเฉพาะ R_{load} ซึ่งสังเกตได้ว่าระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบอยู่ในสภาวะปกติที่ค่าประมาณ 220 V_{rms} โดยมีปริมาณ Q_L เท่ากับ 0 Var และปริมาณ P_L เท่ากับ 197 W จากผลดังกล่าวสามารถคำนวณค่าตัวประกอบกำลัง (PF) โดยใช้สมการที่ (11) ได้ค่าเท่ากับ 1

ต่อมาในช่วงเวลาตั้งแต่ 1 ถึง 2 วินาที เป็นช่วงเวลาของการต่อโหลด R_{load} ขนานกับ L_{load} สังเกตได้ว่า โหลดดังกล่าวทำให้เกิดแรงดันตกที่ประมาณ 170 V_{rms} ซึ่งมีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของแรงดันในสถานะอยู่ตัว (percent of steady state voltage error: $\%E_V$) เท่ากับ 22.7% โดยโหลดมีการใช้ปริมาณ Q_L เท่ากับ 780 Var และปริมาณ P_L เท่ากับ 120 W ซึ่งในช่วงเวลานี้มีค่า PF เท่ากับ 0.13 Lagging

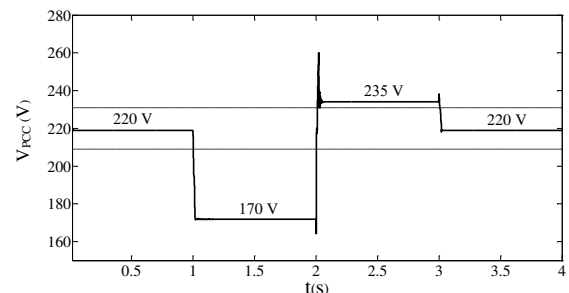
สำหรับในช่วงเวลาตั้งแต่ 2 ถึง 3 วินาที คือ ช่วงเวลาการต่อโหลด R_{load} ขนานกับ C_{load} (ปลด L_{load}) สังเกตได้ว่า ระบบไฟฟ้าเกิดแรงดันเกินที่ประมาณ 235 V_{rms} (ค่า $\%E_V$ เท่ากับ 6.82%) โดยมีปริมาณ Q_L เท่ากับ -360 Var และปริมาณ P_L เท่ากับ 220 W สามารถคำนวณค่า PF ในช่วงเวลานี้ได้เท่ากับ 0.37 Leading

และในช่วงเวลาตั้งแต่ 3 ถึง 4 วินาที ได้ทำการปลดโหลด C_{load} ออก เหลือเพียง R_{load} เท่านั้น จึงส่งผลให้ระดับแรงดันไฟฟ้ากลับสู่สภาวะปกติที่ค่าประมาณ 220 V_{rms} โดยมีปริมาณ Q_L เท่ากับ 0 Var ปริมาณ P_L เท่ากับ 197 W และค่า PF กลับมามีค่าเท่ากับ 1

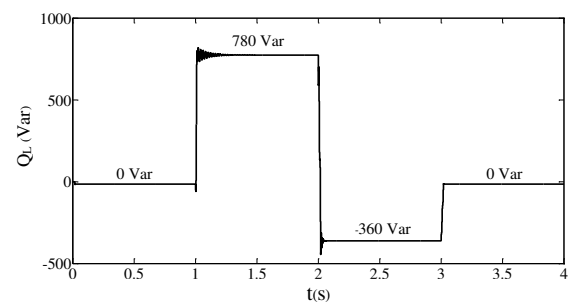
จากผลการสถานการณ์ดังกล่าวข้างต้น พบว่า โหลดของระบบที่พิจารณาสามารถส่งผลให้เกิดความผิดปกติของระดับแรงดันไฟฟ้าได้ทั้งกรณีแรงดันตกและแรงดันเกิน ซึ่งค่าแรงดันตกและแรงดันเกินดังกล่าวมีค่าเกิน 5% ของแรงดันปกติ และในช่วงเวลาที่เกิดความผิดปกติของแรงดันดังกล่าว พบว่า ค่า PF ของระบบมีค่าต่ำกว่า 0.85

ซึ่งไม่เป็นไปตามระเบียบการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคฯ ด้วยข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า พ.ศ. 2559 [1]

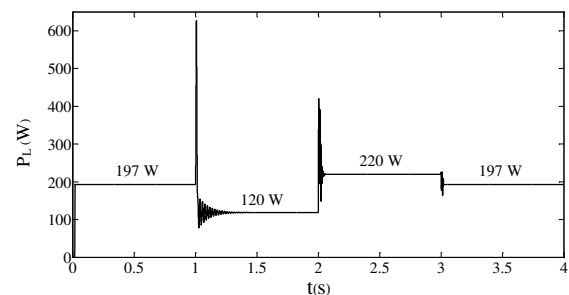
$$PF = \frac{P}{P+Q} \quad (11)$$



รูปที่ 4 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC ของระบบก่อนการชดเชย



รูปที่ 5 ค่ากำลังรีแอกทีฟที่โหลดของระบบ



รูปที่ 6 ค่ากำลังแอกทีฟที่โหลดของระบบ

3.2. การออกแบบพารามิเตอร์ของวงจรเอสวีซี

จากระบบที่พิจารณาที่มีความผิดปกติของระดับแรงดันไฟฟ้าและมีค่า PF ดังกล่าวในหัวข้อที่ผ่านมา มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องดำเนินการชดเชยปรับแก้ไขเพื่อให้ระบบมีคุณภาพทางไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น โดยการออกแบบวงจรเอสวีซีเพื่อใช้ชดเชยแรงดันไฟฟ้าและปรับปรุงค่า PF สำหรับระบบที่พิจารณาดังกล่าวจะอธิบายดังต่อไปนี้

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรเอสซีซี ได้แก่ ค่าตัวเก็บประจุ C_{TSC} และค่าตัวเหนี่ยวนำ L_{TSC} ของวงจรทีเอสซี และค่าตัวเหนี่ยวนำ L_{TCR} ของวงจรทีซีอาร์ จะต้องทำการออกแบบให้มีค่าเหมาะสมกับระบบที่พิจารณา ทั้งนี้เพื่อให้วงจรเอสซีซีสามารถจ่ายกำลังรีแอกทีฟสำหรับการชดเชยแรงดันไฟฟ้าและปรับปรุงค่า PF ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการออกแบบวงจรดังกล่าวในบทความนี้จะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเอสซีซีที่ได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 2 ซึ่งมีรายละเอียดขั้นตอนการออกแบบดังนี้

ขั้นที่ 1 คำนวณค่ากำลังรีแอกทีฟที่ระดับแรงดันไฟฟ้าปกติ ($220 V_{rms}$) โดยใช้ข้อมูลค่าแรงดันไฟฟ้าและค่ากำลังรีแอกทีฟที่โหลดที่ได้จากการวัดในระบบก่อนมีการชดเชยดังนี้

การคำนวณปริมาณกำลังรีแอกทีฟค่าบวกที่ระดับแรงดันไฟฟ้าปกติ

ปริมาณกำลังรีแอกทีฟค่าบวกของโหลดที่ระดับแรงดันไฟฟ้าปกติ ($+Q_{L,Vnormal}$) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (12) โดยอาศัยข้อมูลของระบบที่พิจารณาในช่วงที่เกิดแรงดันตก คือ ค่าแรงดันตก (v_{under}) เท่ากับ $170 V_{rms}$ และมีปริมาณ $+Q_L$ เท่ากับ 780 Var ซึ่งจากค่าดังกล่าว จะสามารถคำนวณค่า $+Q_{L,Vnormal}$ ได้เท่ากับ 1306 Var

$$+Q_{L,Vnormal} = \frac{V_{normal}^2}{V_{under}} (+Q_L) \quad (12)$$

การคำนวณปริมาณกำลังรีแอกทีฟค่าลบที่ระดับแรงดันไฟฟ้าปกติ

ปริมาณกำลังรีแอกทีฟค่าลบของโหลดที่ระดับแรงดันไฟฟ้าปกติ ($-Q_{L,Vnormal}$) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (13) โดยอาศัยข้อมูลของระบบในช่วงที่เกิดแรงดันเกิน คือ ค่าแรงดันเกิน (v_{over}) เท่ากับ $235 V_{rms}$ และปริมาณ $-Q_L$ เท่ากับ -360 Var ซึ่งจากค่าดังกล่าว จะสามารถคำนวณค่า $-Q_{L,Vnormal}$ ได้เท่ากับ -316 Var

$$-Q_{L,Vnormal} = \frac{V_{normal}^2}{V_{over}} (-Q_L) \quad (13)$$

ขั้นที่ 2 ตรวจสอบค่า Q_L ของระบบที่พิจารณาโดยถ้าเป็นปริมาณ $+Q_L$ ให้ออกแบบค่าพารามิเตอร์ที่วงจรทีเอสซี แต่ถ้าเป็นปริมาณ $-Q_L$ ให้ออกแบบค่าพารามิเตอร์ที่วงจรทีซีอาร์ อย่างไรก็ตาม ถ้าโหลดมีทั้งปริมาณ $+Q_L$ และ $-Q_L$ ให้เริ่มทำการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรทีเอสซีก่อน จากนั้นจึงออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรทีซีอาร์ สำหรับในบทความนี้ โหลดของระบบที่พิจารณามีทั้งปริมาณ $+Q_L$ และ $-Q_L$ ดังนั้น จึงต้องดำเนินการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรทีเอสซีก่อน ดังนี้

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรทีเอสซี

วงจรทีเอสซีจะต้องออกแบบให้สามารถจ่าย Q_{TSC} ค่าลบ ที่มีขนาดมากกว่าหรือเท่ากับปริมาณ $+Q_{L,Vnormal}$ ของระบบที่พิจารณา ซึ่งในกรณีนี้ปริมาณ $+Q_{L,Vnormal}$ มีค่าเท่ากับ 1306 Var ดังนั้น การออกแบบจึงกำหนดให้ Q_{TSC} มีค่าเท่ากับ -1500 Var จากค่าดังกล่าว จะสามารถคำนวณหาตัวเก็บประจุ C_{TSC} ของวงจรทีเอสซีได้โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สมการที่ (4) ซึ่งผลการคำนวณจะได้ค่า C_{TSC} เท่ากับ 0.1 mF โดยการออกแบบกำหนดให้ตัวเหนี่ยวนำ L_{TSC} เท่ากับ $1 \mu H$ (ค่า L_{TSC} ควรออกแบบให้มีค่าน้อย ๆ เนื่องจากทำหน้าที่ในการลดการกระเพื่อมของกระแสเท่านั้น [2]) การคำนวณค่าตัวเก็บประจุ C_{TSC} ดังกล่าว สามารถแสดงได้ดังนี้

$$1500 = \frac{(220\sqrt{2})^2}{2} \left[\left(\frac{1}{\sqrt{100\pi \times 0.1 \times 10^{-6} \times C_{TSC}}} \right)^2 - \left(\frac{1}{\sqrt{100\pi \times 0.1 \times 10^{-6} \times C_{TSC}}} \right)^2 - 1 \right] 100\pi C_{TSC}$$

$$C_{TSC} = 0.1 \text{ mF}$$

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรทีซีอาร์

วงจรทีซีอาร์จะต้องออกแบบเพื่อให้สามารถจ่าย Q_{TCR} ค่าบวก ที่มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับขนาดของ

ปีที่ 14 ฉบับที่ 2 เดือนพฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2562

$-Q_{L,Vnormal}$ ของระบบที่พิจารณาซึ่งในกรณีนี้มีค่าเท่ากับ -316 Var ดังนั้น การออกแบบจึงกำหนดให้ Q_{TCR} มีค่าเท่ากับ 600 Var ซึ่งจะสามารถคำนวณค่าตัวเหนี่ยวนำ L_{TCR} ของวงจรที่ชื้อารโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สมการที่ (7) ได้ค่าเท่ากับ 0.25 H แสดงได้ดังนี้ (ที่ค่า Q_{TCR} สูงสุดเท่ากับ 600 Var จะเกิดขึ้นเมื่อมุมจุดชนวน (α_{TCR}) เท่ากับ 0 rad)

$$600 = \left[\frac{(220\sqrt{2})^2}{2 \times 100\pi L_{TCR}} \right] (1 - \sin(0))$$

$$L_{TCR} = 0.25 \text{ H}$$

สรุปผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรเอสวีซีข้างต้น คือ $C_{TSC} = 0.1 \text{ mF}$ $L_{TSC} = 1 \text{ }\mu\text{H}$ และ $L_{TCR} = 0.25 \text{ H}$ โดยวงจรดังกล่าว จะสามารถจ่ายค่ากำลังรีแอกทีฟ Q_{SVC} ได้ต่ำสุดเท่ากับ -1500 Var (จาก Q_{TSC}) และสูงสุดเท่ากับ 600 Var (จาก Q_{TCR}) การจำลองสถานการณ์การชดเชยแรงดันไฟฟ้าและการ

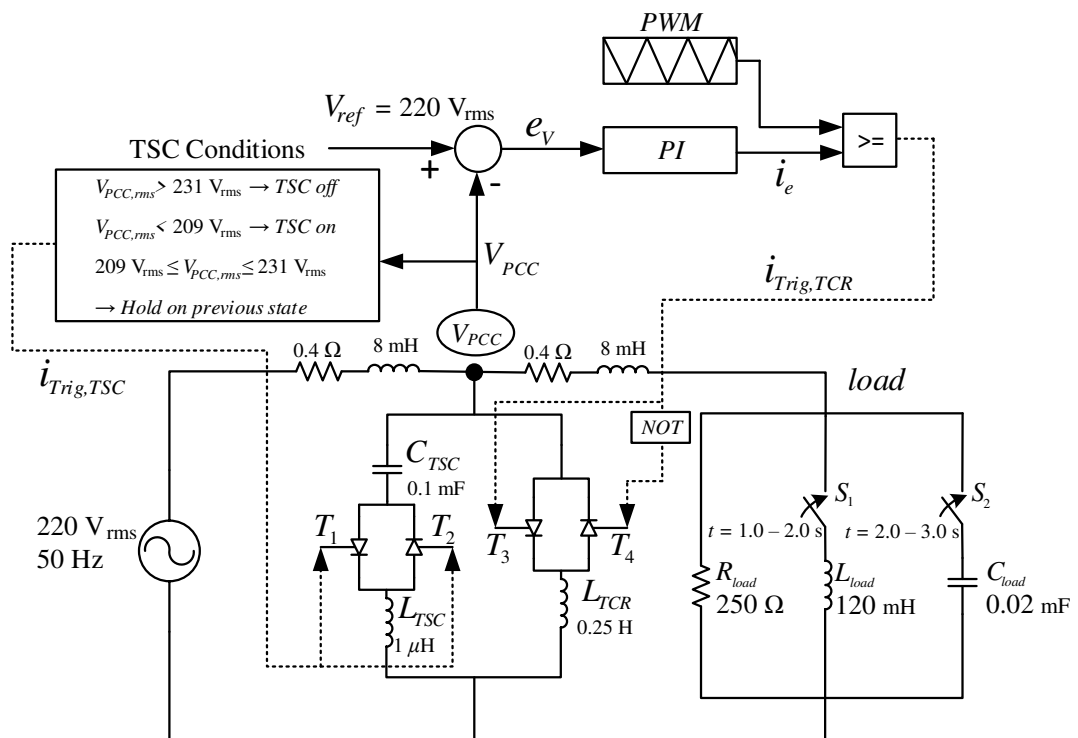
ปรับปรุงค่า PF ด้วยวงจรเอสวีซีที่ได้ออกแบบนี้สามารถดูได้จากหัวข้อที่ 5

4. การควบคุมวงจรเอสวีซี

การควบคุมการทำงานของวงจรเอสวีซีเพื่อให้สามารถชดเชยค่าแรงดันไฟฟ้าและปรับปรุงค่า PF มีอยู่หลายวิธี ดังนั้นในบทความนี้จึงนำเสนอเปรียบเทียบวิธีการควบคุมที่นิยมใช้ในปัจจุบัน 3 วิธี คือ วิธีการควบคุมผ่านค่าแรงดัน (วิธี VC) วิธีการควบคุมผ่านค่ากำลังรีแอกทีฟ (วิธี VCC) และวิธีการควบคุมผ่านค่าแรงดันร่วมกับกำลังรีแอกทีฟ (วิธี VVCC) ซึ่งแต่ละวิธีมีรายละเอียดดังนี้

4.1. การควบคุมวงจรเอสวีซีด้วยวิธี VC

การควบคุมวงจรเอสวีซีด้วยวิธี VC [7] มีจุดเด่น คือ การควบคุมผ่านค่าแรงดันที่ต้องการชดเชยโดยตรง และมีการใช้อินพุตจากการตรวจวัดเพียงค่าเดียว คือ ค่า V_{PCC} จึงทำให้มีจำนวนอุปกรณ์ในการติดตั้งน้อยและไม่มีส่วนของการคำนวณที่ซับซ้อน



รูปที่ 7 การควบคุมวงจรเอสวีซีด้วยวิธี VC

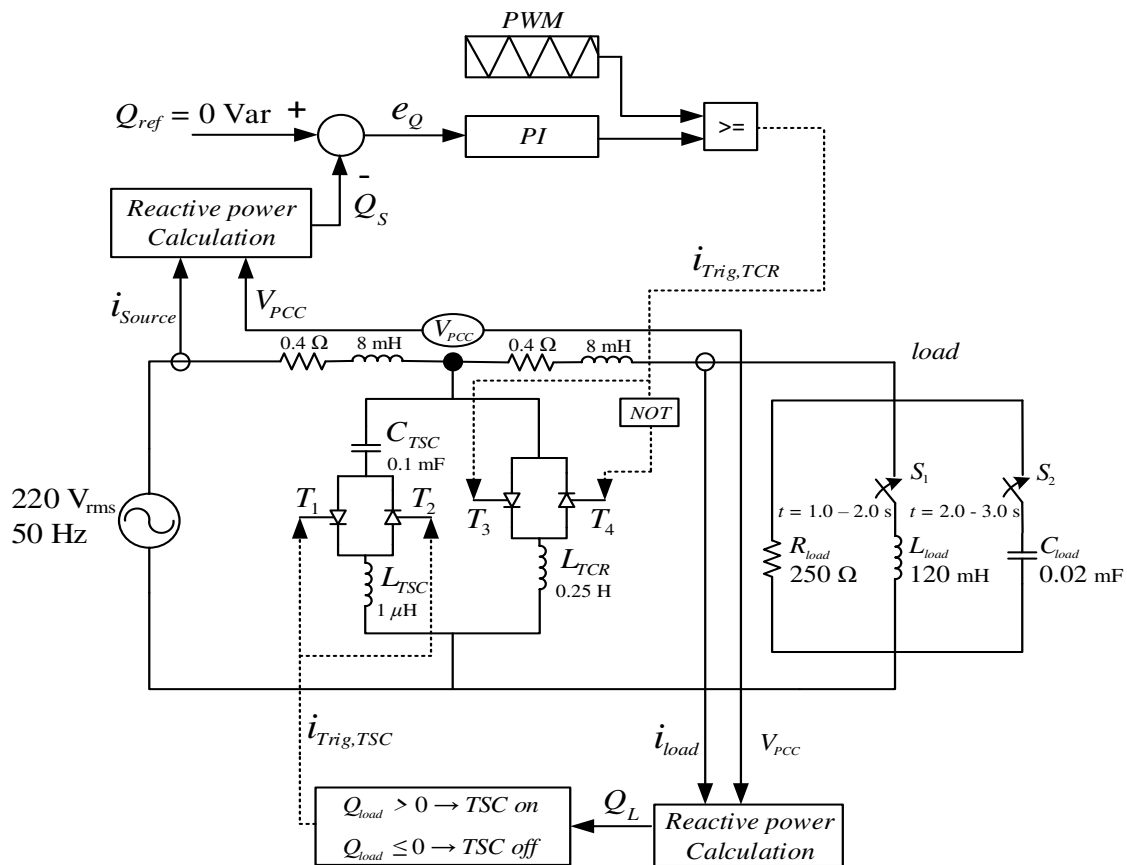
การควบคุมวงจรเอสซีวีด้วยวิธี VC จะให้ค่าเอาต์พุต คือ สัญญาณกระแสจุดชนวนไทรสเตอร์ T_1 และ T_2 ของวงจรที่เอสซี ($i_{Trig,TSC}$) และสัญญาณกระแสจุดชนวนไทรสเตอร์ T_3 และ T_4 ของวงจรที่ซีอาร์ ($i_{Trig,TCR}$) ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งจากรูปดังกล่าว หลักการควบคุมของวิธี VC จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

ส่วนที่ 1 การควบคุมการทำงานของวงจรที่เอสซี จะเริ่มต้นจากการรับค่า V_{PCC} เพื่อตรวจสอบเงื่อนไขการทำงานของวงจรที่เอสซี (TSC Conditions) จากนั้นจะส่งค่าเอาต์พุตเป็นค่าสัญญาณกระแส $i_{Trig,TSC}$ สำหรับจุดชนวนอุปกรณ์ไทรสเตอร์ T_1 และ T_2 โดยเงื่อนไขการควบคุมดังกล่าว คือ เมื่อ V_{PCC} มีค่าแรงดันไฟฟ้ามากกว่า $231 V_{rms}$ (+5% ของแรงดัน $220 V_{rms}$) จะกำหนดให้วงจรที่เอสซีเปิดวงจร (TSC: off) แต่ถ้า V_{PCC} มีค่าแรงดันไฟฟ้าน้อยกว่า $209 V_{rms}$ (-5% ของแรงดัน $220 V_{rms}$) กำหนดให้วงจรที่เอสซีปิดวงจร (TSC: on) และถ้า V_{PCC}

มีค่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ในช่วง $209 V_{rms}$ ถึง $231 V_{rms}$ จะคงค่าสัญญาณเอาต์พุตตามการทำงานก่อนหน้านี้

หมายเหตุ: การเปิดวงจรที่เอสซีทำได้โดยส่งสัญญาณ $i_{Trig,TSC} = 0$ ส่วนการปิดวงจรที่เอสซีทำได้โดยการส่งสัญญาณ $i_{Trig,TSC} = 1$ เพื่อจุดชนวนไทรสเตอร์

ส่วนที่ 2 การควบคุมการทำงานของวงจรที่ซีอาร์ โดยจะใช้อินพุตค่าความคลาดเคลื่อน (e_v) ระหว่างค่า V_{PCC} กับค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง (V_{ref}) ที่มีค่าเท่ากับ $220 V_{rms}$ ผ่านเข้าตัวควบคุมพีไอ (PI controller) จากนั้นจะนำเอาต์พุตที่ได้ไปเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยมเพื่อสร้างพัลส์ (pulse) ด้วยเทคนิค PWM (Pulse Width Modulation: PWM) โดยสัญญาณพัลส์ดังกล่าว คือสัญญาณ $i_{Trig,TCR}$ เพื่อจุดชนวนอุปกรณ์ไทรสเตอร์ T_3 และ T_4 ของวงจรที่ซีอาร์สำหรับการออกแบบค่าพารามิเตอร์ K_p และ K_i ของตัวควบคุมแบบพีไอสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (14) และ (15) ตามลำดับ [10]



รูปที่ 8 การควบคุมวงจรเอสซีด้วยวิธี VCC

$$K_p = \frac{1}{L_{TCR}} \quad (14)$$

$$K_I = \frac{2\zeta\omega_n - 1}{L_{TCR}} \quad (15)$$

การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับบทความนี้ กำหนดให้ค่าอัตราส่วนความหน่วง (damping ratio: ζ) เท่ากับ $\sqrt{2}/2$ และค่าความถี่ธรรมชาติ (ω_n) เท่ากับ 100π ซึ่งจากการกำหนดค่าดังกล่าว จะสามารถคำนวณค่า K_p ได้เท่ากับ 4 และ K_I เท่ากับ 1773

4.2. การควบคุมวงจรเอสวีซีด้วยวิธี VCC

การควบคุมวงจรเอสวีซีด้วยวิธี VCC [8] มีจุดเด่น คือ ระบบควบคุมมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังรีแอกทีฟ ทำให้วงจรเอสวีซีใช้เวลาน้อยในการจ่ายค่ากำลังรีแอกทีฟเข้าระบบไฟฟ้ากำลัง และส่งผลให้ระดับแรงดันไฟฟ้ากลับเข้าสู่สภาวะปกติได้รวดเร็วยิ่งขึ้น โครงสร้างการควบคุมวงจรเอสวีซีด้วยวิธี VCC สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8 ซึ่งมีการรับค่าอินพุต 2 ค่า คือ ค่ากำลังรีแอกทีฟที่แหล่งจ่าย (Q_s) และกำลังรีแอกทีฟที่โหลด (Q_L) ส่วนค่าเอาต์พุตของการควบคุม คือ สัญญาณ $i_{Trig.TSC}$ ของวงจรทีเอสซี และสัญญาณ $i_{Trig.TCR}$ ของวงจรทีซีอาร์ สำหรับหลักการควบคุมด้วยวิธี VCC จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนเช่นกัน ดังนี้

ส่วนที่ 1 การควบคุมการทำงานของวงจรทีเอสซี โดยจะเริ่มต้นจากการรับค่าอินพุต Q_L เพื่อหาเงื่อนไขการจุดชนวนของอุปกรณ์ไทรสเตอร์ โดยถ้าค่า Q_L มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับศูนย์ ($Q_L \leq 0$) จะกำหนดให้วงจรทีเอสซีเปิดวงจร (TSC: off) แต่ถ้าค่า Q_L มีค่ามากกว่าศูนย์ ($Q_L > 0$) จะกำหนดให้วงจรทีเอสซีปิดวงจร (TSC: on) โดยการส่งสัญญาณ $i_{Trig.TSC} = 1$ ไปควบคุมไทรสเตอร์ T_1 และ T_2

ส่วนที่ 2 การควบคุมการทำงานของวงจรทีซีอาร์จะใช้อินพุตค่าความคลาดเคลื่อน (e_Q) ระหว่างค่า Q_s กับค่ากำลังรีแอกทีฟอ้างอิง (Q_{ref}) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0 Var ผ่านเข้าตัวควบคุมพีไอ จากนั้นจะนำเอาต์พุตที่ได้ผ่านเทคนิค PWM เพื่อสร้างพัลส์สัญญาณ $i_{Trig.TCR}$ สำหรับจุดชนวนอุปกรณ์ไทรสเตอร์ T_3 และ T_4 ของวงจรทีซีอาร์ โดยการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอ สามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์ K_p และ K_I ได้จากสมการที่ (16) และ (17) ตามลำดับ [10]

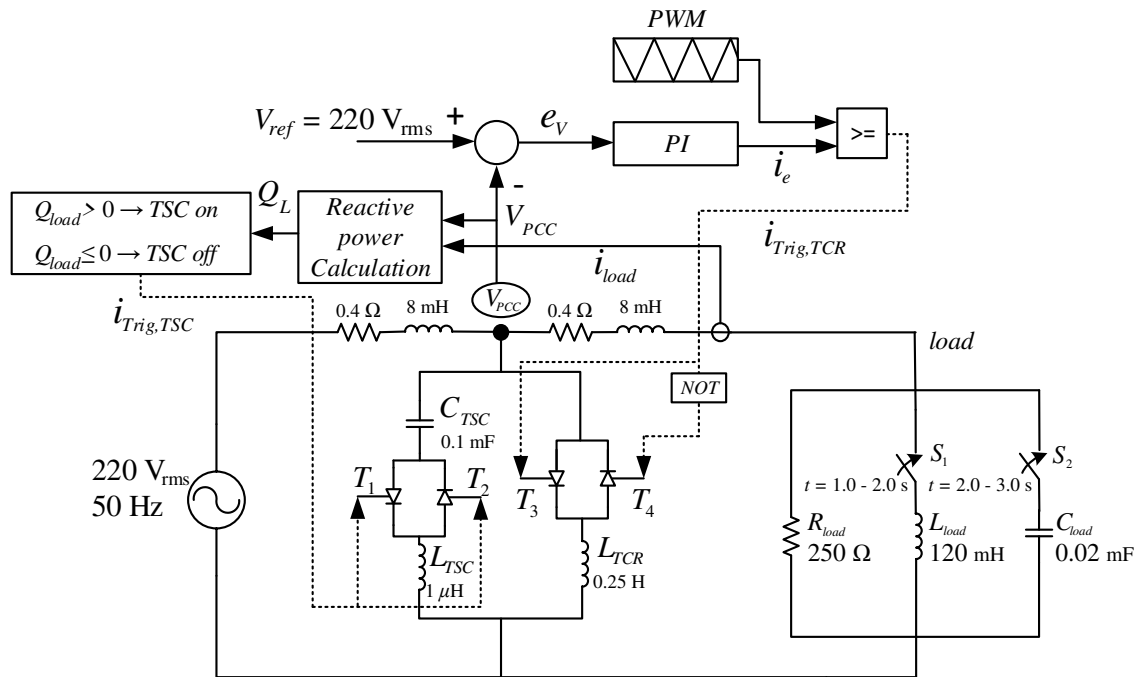
$$K_p = \frac{1}{L_{TCR}} - 1 \quad (16)$$

$$K_I = \frac{2\zeta\omega}{L_{TCR}} \quad (17)$$

โดยการออกแบบกำหนดให้ค่า ζ เท่ากับ $\sqrt{2}/2$ และค่า ω_n เท่ากับ 100π ซึ่งจากการกำหนดค่าดังกล่าว จะสามารถคำนวณค่า K_p ได้เท่ากับ 3 และค่า K_I เท่ากับ 1777

4.3. การควบคุมวงจรเอสวีซีด้วยวิธี VVCC

การควบคุมวงจรเอสวีซีด้วยวิธี VVCC คือ การรวมข้อดีและจุดเด่นของวิธี VC กับวิธี VVC เข้าไว้ด้วยกัน [9] ซึ่งจะทำให้ระบบมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังรีแอกทีฟ จึงสามารถชดเชยให้แรงดันไฟฟ้ากลับเข้าสู่สภาวะปกติได้รวดเร็วเหมือนกับวิธี VCC แต่จำนวนอุปกรณ์ที่ใช้และการคำนวณจะน้อยกว่าวิธี VVC โครงสร้างการควบคุมวงจรเอสวีซีด้วย VVCC สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 9 จากรูปดังกล่าว ระบบการควบคุมจะรับค่าอินพุต 2 ค่า คือ ค่า Q_L และค่า V_{PCC} โดยค่าเอาต์พุต คือ สัญญาณ $i_{Trig.TSC}$ และ $i_{Trig.TCR}$ ของวงจรทีเอสซี และวงจรทีซีอาร์ตามลำดับ โดยส่วนของการควบคุมวงจรทีเอสซีจะมีหลักการเหมือนกับวิธี VCC ในขณะที่ส่วนของการควบคุมการทำงานของวงจรทีซีอาร์จะเหมือนกับวิธี VC ตามที่ได้นำเสนอไว้แล้วในหัวข้อที่ 4.2 และ 4.1 ตามลำดับ



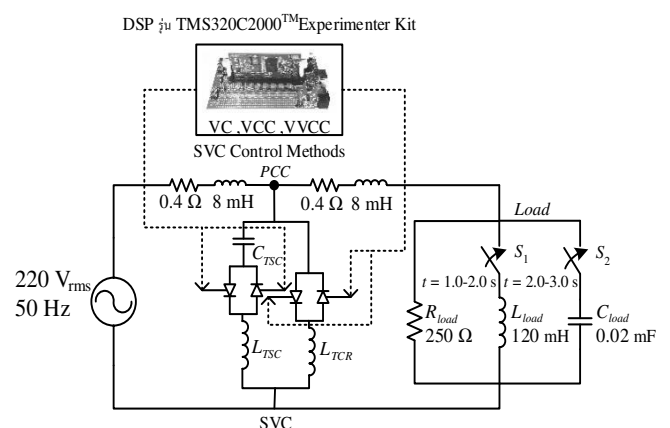
รูปที่ 9 การควบคุมวงจรเอสวีซีด้วยวิธี VVCC

จากการอธิบายหลักการควบคุมวงจรเอสวีซีทั้ง 3 วิธี ในข้างต้น การจำลองสถานการณ์เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะการชดเชยแรงดันไฟฟ้าและการปรับปรุงค่า PF ด้วยวงจรเอสวีซีร่วมกับ 3 วิธีควบคุมดังกล่าว สามารถดูได้จากหัวข้อต่อไป

5. ผลการจำลองสถานการณ์

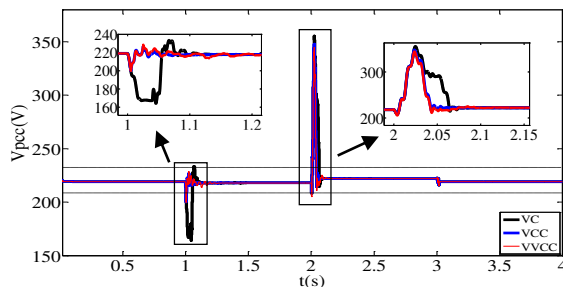
จากระบบที่พิจารณาชดเชยแรงดันไฟฟ้าและปรับปรุงค่า PF ด้วยวงจรเอสวีซีร่วมกับวิธีการควบคุมด้วยวิธี VC วิธี VCC และวิธี VVCC ดังรูปที่ 7 8 และ 9 ตามลำดับ ในหัวข้อนี้จะทำการจำลองสถานการณ์ระบบดังกล่าวเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะการชดเชยของวงจรเอสวีซีที่ใช้วิธีการควบคุมแตกต่างกัน โดยการเปรียบเทียบจะใช้ประสิทธิภาพการชดเชยในสถานะอยู่ตัว คือ ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของแรงดันในสถานะอยู่ตัว หรือค่า $\%E_v$ ค่าช่วงเวลาเข้าสู่สถานะแรงดันปกติ (steady state time of voltage: T_{sv}) และประสิทธิภาพการชดเชยในสถานะชั่วคราว คือ ค่าแรงดันพุ่งเกินชั่วขณะ (instantaneous over voltage: io_v) ค่าแรงดันตกต่ำสุดชั่วขณะ (instantaneous under voltage: iu_v)

ส่วนการเปรียบเทียบผลการปรับปรุงค่า PF จะใช้ค่า PF ที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยเป็นตัวชี้วัดสมรรถนะ การจำลองสถานการณ์ในบทความนี้ จะใช้เทคนิคการจำลองแบบฮาร์ดแวร์ในรูป [11] ที่ใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ร่วมกับบอร์ด DSP TMS320C2000™ Experimenter Kit ซึ่งในส่วนของระบบไฟฟ้ากำลังที่พิจารณาจะถูกสร้างขึ้นบนโปรแกรม Simulink ในขณะที่ส่วนของการควบคุมวงจรเอสวีซีด้วยวิธี VC วิธี VCC และวิธี VVCC จะถูกสร้างขึ้นที่ฮาร์ดแวร์บอร์ด DSP ดังแสดงในรูปที่ 10

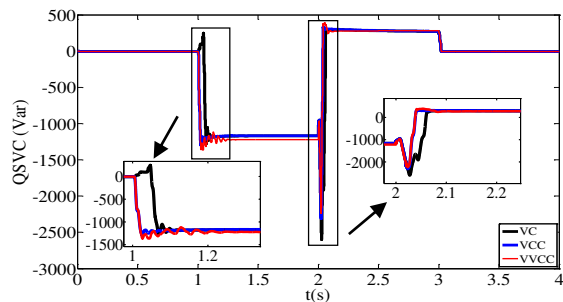


รูปที่ 10 การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป

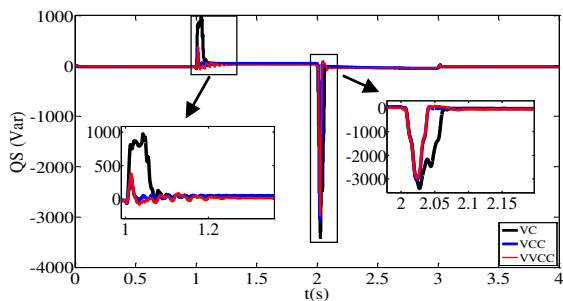
ปีที่ 14 ฉบับที่ 2 เดือนพฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2562



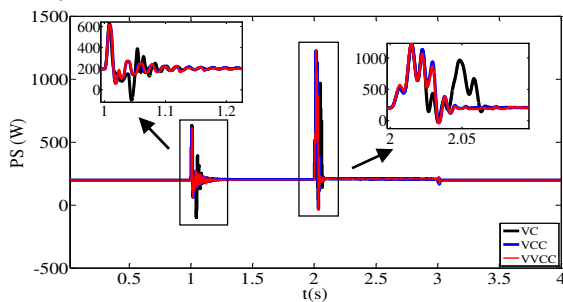
รูปที่ 11 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC ภายหลังการชดเชย



รูปที่ 12 ค่ากำลังรีแอกทีฟที่จ่ายโดยวงจรเอสวีซี



รูปที่ 13 ค่ากำลังรีแอกทีฟที่แหล่งจ่ายของระบบ



รูปที่ 14 ค่ากำลังแอกทีฟที่แหล่งจ่ายของระบบ

ผลการจำลองสถานการณ์ค่าแรงดันไฟฟ้าอาร์เอ็มเอสของระบบ (V_{pcc}) ค่ากำลังรีแอกทีฟที่แหล่งจ่าย (Q_s) และค่ากำลังแอกทีฟที่แหล่งจ่าย (P_s) ภายหลังการชดเชย สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 11 ถึง 14 ตามลำดับ โดยกรณีที่วงจรเอสวีซีใช้การควบคุมด้วยวิธี VC ได้แสดงเป็นเส้นกราฟสีดำ กรณีใช้วิธี VCC แสดงเป็นเส้นกราฟสีแดง และกรณีที่ใช้วิธี VVCC แสดงเป็นเส้นกราฟสีน้ำเงิน ดังปรากฏในรูป

จากผลการชดเชยค่าแรงดันไฟฟ้าของระบบที่พิจารณาในรูปที่ 11 ในช่วงเวลาตั้งแต่ 0 ถึง 1 วินาที คือ ช่วงเวลาที่ระบบมีการต่อโหลดเฉพาะ R_{load} และค่าแรงดันไฟฟ้าก่อนมีการติดตั้งวงจรเอสวีซีมีค่าปกติเท่ากับ $220 V_{rms}$ (ดูได้จากรูปที่ 4) จะเห็นได้ว่า ถึงแม้จะมีการติดตั้งวงจรเอสวีซีเพิ่มเข้าไปในระบบ แต่ค่าแรงดันไฟฟ้าในช่วงเวลานี้ยังคงมีค่าปกติเท่ากับ $220 V_{rms}$ เช่นเดิม โดยวงจรเอสวีซีไม่ได้รับการจ่ายกำลังรีแอกทีฟ (Q_{svc}) ซึ่งจากรูปที่ 12 จะเห็นได้ว่า Q_{svc} มีค่าเท่ากับศูนย์ ต่อมาในช่วงเวลาตั้งแต่ 1 ถึง 2 วินาที คือ ช่วงเวลาที่ระบบมีการต่อโหลด R_{load} ขนานกับ L_{load} ซึ่งก่อนมีการชดเชย พบว่า ระบบไฟฟ้าเกิดแรงดันตกที่ค่าเท่ากับ $170 V_{rms}$ (ดังรูปที่ 4) อย่างไรก็ตาม เมื่อวงจรเอสวีซีทำการจ่ายปริมาณ $Q_{svc} = -1250 \text{ Var}$ ดังรูปที่ 12 เข้าไปในระบบ จะสังเกตได้ว่าค่าแรงดันไฟฟ้าภายหลังการชดเชยสามารถกลับมามีค่าปกติได้เช่นเดิม ที่ค่าประมาณเท่ากับ $220 V_{rms}$ โดยในกรณีที่วงจรเอสวีซีใช้การควบคุมด้วยวิธี VC ให้ผลการชดเชยที่ค่า $\%E_v$ เท่ากับ 0.1% ค่า T_{sv} เท่ากับ 0.08 s ค่า i_{ov} เท่ากับ $236 V_{rms}$ ค่า i_{uv} เท่ากับ $165 V_{rms}$ และค่า $\%THD_v$ เท่ากับ 0.145% กรณีที่ใช้วิธี VCC ให้ผลค่า $\%E_v$ เท่ากับ 0.3% ค่า T_{sv} เท่ากับ 0.03 s ค่า i_{ov} เท่ากับ $232 V_{rms}$ ค่า i_{uv} เท่ากับ $200 V_{rms}$ และค่า $\%THD_v$ เท่ากับ 0.15% และในกรณีที่การควบคุมที่ใช้วิธี VVCC ให้ผลที่ค่า $\%E_v$ เท่ากับ 0.1% ค่า T_{sv} เท่ากับ 0.03 s ค่า i_{ov} เท่ากับ $229 V_{rms}$ ค่า i_{uv} เท่ากับ $205 V_{rms}$ และค่า $\%THD_v$ เท่ากับ 0.140% ซึ่งสามารถดูได้จากตารางที่ 1 ลำดับต่อมาในช่วงเวลาตั้งแต่ 2 ถึง 3 วินาทีที่ระบบมีการต่อโหลด R_{load} ขนานกับ C_{load} ซึ่งก่อนการชดเชย พบว่า ระบบเกิดแรงดันเกินที่ $235 V_{rms}$ (ดังรูปที่ 4) แต่เมื่อมีการชดเชยโดยการจ่ายปริมาณ $Q_{svc} = 250 \text{ Var}$ ดังรูปที่ 12 สังเกตได้ว่า ค่าแรงดันของระบบหลังการชดเชยสามารถกลับมามีค่าอยู่ในระดับปกติได้ ($220 V_{rms}$) โดยกรณีที่วงจรเอสวีซีใช้การควบคุมด้วยวิธี VC ให้ผลการชดเชยค่า $\%E_v$ เท่ากับ 1.5% ค่า T_{sv} เท่ากับ 0.065 s ค่า i_{ov} เท่ากับ $365 V_{rms}$ ค่า i_{uv} เท่ากับ $209 V_{rms}$ และค่า $\%THD_v$ เท่ากับ 0.12% ส่วนกรณีที่ใช้วิธี VCC ให้ค่า $\%E_v$ เท่ากับ 1.3% ค่า T_{sv} เท่ากับ 0.04 s ค่า i_{ov} เท่ากับ $352 V_{rms}$ ค่า i_{uv} เท่ากับ $205 V_{rms}$ และค่า $\%THD_v$ เท่ากับ 0.12%

ส่วนในกรณีที่วิธี WCC ให้ค่า $\%E_v$ เท่ากับ 1.5% ค่า T_{sv} เท่ากับ 0.04 s ค่า iov เท่ากับ 355 V_{rms} ค่า i_{lv} เท่ากับ 209 V_{rms} และค่า $\%THD_v$ เท่ากับ 0.13% ซึ่งสามารถดูได้จากตารางที่ 2 สำหรับในช่วงเวลาสุดท้ายตั้งแต่ 3 ถึง 4 วินาทีกรณีที่ระบบมีการปลดโหลดเหลือเพียง R_{load} จะสังเกตได้ว่าระดับแรงดันไฟฟ้ายังคงมีค่าปกติเท่ากับ 220 V_{rms} คงที่ตลอดทั้งช่วงเวลา โดยในช่วงเวลานี้วงจรเอสวีซีไม่มีการจ่าย Q_{svc}

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลค่ากำลังรีแอกทีฟที่แหล่งจ่าย (Q_s) และค่ากำลังแอกทีฟที่แหล่งจ่าย (P_s) หลังการชดเชย ดังรูปที่ 13 และ 14 ตามลำดับ จะสังเกตได้ว่า ค่า Q_s หลังการชดเชยมีค่าประมาณศูนย์ในสถานะอยู่ตัวเกือบตลอดทุกช่วงเวลา โดยในช่วงเวลาที่ 2 ถึง 3 วินาที พบว่า ยังคงมีปริมาณกำลังรีแอกทีฟหลงเหลือเล็กน้อยเท่ากับ -70 Var -90 Var และ -65 Var สำหรับกรณีที่วงจรเอสวีซีใช้การควบคุมด้วยวิธี VC วิธี WC และวิธี WCC ตามลำดับ ส่วนค่า P_s หลังการชดเชย พบว่า มีค่าประมาณ 200 W ในสถานะอยู่ตัวตลอดทุกช่วงเวลา ซึ่งจากค่ากำลังแอกทีฟและกำลังรีแอกทีฟภายหลังการชดเชยดังกล่าว สามารถคำนวณหาค่า PF ในช่วงเวลาตั้งแต่ 0 ถึง 2 วินาที และช่วงเวลาที่ 3 ถึง 4 วินาทีได้ค่า PF ได้เท่ากับ 1 เท่ากันทั้งสามกรณีวิธีควบคุม ในขณะที่ในช่วงเวลาตั้งแต่ 2 ถึง 3 วินาที พบว่า กรณีวิธี VC และวิธี WCC ให้ค่า PF เท่ากันเท่ากับ 0.98 ส่วนกรณีวิธี VCC ให้ค่า PF เท่ากับ 0.99

จากผลการจำลองสถานการณ์ดังกล่าวข้างต้น สามารถสรุปเปรียบเทียบสมรรถนะการชดเชยแรงดันไฟฟ้าและการปรับปรุงค่า PF ของวงจรเอสวีซีที่ใช้วิธีการควบคุมด้วยวิธี VC วิธี VCC และวิธี WVCC ในช่วงเวลาที่มีการชดเชยแรงดันตกและแรงดันเกินได้ดังตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ จากตารางดังกล่าว ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการชดเชยค่าแรงดันไฟฟ้า พบว่า วงจรเอสวีซีใช้การควบคุมด้วยวิธี WVCC ให้ประสิทธิภาพในการชดเชยดีที่สุดทั้งในช่วงแรงดันตกที่ค่า $\%E_v$ เท่ากับ 0.1% ค่า T_{sv} เท่ากับ 0.03 s ค่า iov เท่ากับ 229 V_{rms} และค่า i_{lv} เท่ากับ 205 V_{rms} ส่วนในช่วงแรงดันเกินพบว่า วงจรเอสวีซีใช้การควบคุมด้วยวิธี VCC ให้ประสิทธิภาพการชดเชยดีที่สุด ที่ค่า $\%E_v$ เท่ากับ 1.3% ค่า T_{sv}

เท่ากับ 0.04 s ค่า iov เท่ากับ 352 V_{rms} และค่า i_{lv} เท่ากับ 205 V_{rms} นอกจากนี้ สำหรับผลการเปรียบเทียบการปรับปรุงค่า PF ของระบบในช่วงที่แรงดันตกและแรงดันเกิน พบว่า ทั้งสามวิธีการควบคุมสามารถปรับปรุงค่า PF ได้ดีใกล้เคียงกัน โดยค่า PF หลังการชดเชยมีค่าประมาณเท่ากับ 1 นอกจากนี้จากผลการชดเชยแรงดันไฟฟ้าและการปรับปรุง PF ในตารางที่ 1 และ 2 ยังพบว่า ค่าแรงดันไฟฟ้าและค่า PF ของระบบที่พิจารณา ภายหลังการชดเชยด้วยวงจรเอสวีซีที่ใช้การควบคุมทั้งสามวิธี เป็นไปตามระเบียบการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคด้วยข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า พ.ศ. 2559

ตารางที่ 1 ผลการชดเชยแรงดันไฟฟ้าและการปรับปรุงค่า PF ในช่วงที่เกิดแรงดันตก

วิธีการควบคุมวงจร SVC	ค่าประสิทธิภาพ					
	$\%E_v$	T_{sv}	iov	i_{lv}	PF	% THD _v
ก่อนการชดเชย						
-	22.7%	-	-	-	0.13	0
หลังการชดเชย						
วิธี VC	0.1%	0.08 s	236 V_{rms}	165 V_{rms}	1	0.145
วิธี VCC	0.3%	0.03 s	232 V_{rms}	200 V_{rms}	1	0.150
วิธี WVCC	0.1%	0.03 s	229 V_{rms}	205 V_{rms}	1	0.140

ตารางที่ 2 ผลการชดเชยแรงดันไฟฟ้าและการปรับปรุงค่า PF ในช่วงที่เกิดแรงดันเกิน

วิธีการควบคุมวงจร SVC	ค่าประสิทธิภาพ					
	$\%E_v$	T_{sv}	iov	i_{lv}	PF	% THD _v
ก่อนการชดเชย						
-	6.82 %	-	-	-	0.37	0
หลังการชดเชย						
วิธี VC	1.5%	0.065 s	365 V_{rms}	209 V_{rms}	0.98	0.12
วิธี VCC	1.3%	0.04 s	352 V_{rms}	205 V_{rms}	0.99	0.12
วิธี WVCC	1.5%	0.04 s	355 V_{rms}	209 V_{rms}	0.98	0.13

6. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการชดเชยแรงดันไฟฟ้าและการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังด้วยวงจรสร้างความยืดหยุ่นให้ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับชนิดวงจรเอสวีซีสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส โดยการนำเสนอได้เปรียบเทียบสมรรถนะการชดเชยของวงจรเอสวีซีที่ใช้การควบคุม 3 วิธี คือ VC VCC และ WVCC ซึ่งจากผลการจำลองสถานการณ์

พบว่า วิธี WCC และวิธี VCC สามารถให้ประสิทธิผลในการชดเชยแรงดันไฟฟ้าดีใกล้เคียงกันและดีกว่าวิธี VC นอกจากนี้ ทั้งสามวิธีการควบคุมสามารถให้ประสิทธิผลการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังที่ดีเหมือนกันที่ค่าประมาณเท่ากับ 1 โดยผลการชดเชยแรงดันไฟฟ้าและการปรับปรุงตัวประกอบกำลังด้วยวงจรเอสวีซีที่ใช้การควบคุมทั้งสามวิธีดังกล่าวเป็นไปตามระเบียบการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคด้วยข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า พ.ศ. 2559 ทั้งนี้ การเลือกใช้งานวิธีการควบคุมต่าง ๆ ดังกล่าว จะขึ้นอยู่กับประสิทธิผลที่ยอมรับได้รวมถึงความซับซ้อนของแต่่วิธีการควบคุม กล่าวคือ หากเลือกใช้วิธีการควบคุมแบบ VC จะใช้อุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันเพียงตำแหน่งเดียว จึงง่ายต่อการออกแบบและการใช้งาน อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวจะให้ประสิทธิผลการชดเชยที่ต่ำกว่า วิธีการควบคุมแบบ VCC และ WCC ที่ต้องใช้อุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันและกระแสหลายจุด จึงมีความซับซ้อนทั้งการออกแบบและการใช้งานมากกว่าวิธีการ VC

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณกลุ่มวิจัย อิเล็กทรอนิกส์กำลังพลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุมที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัยรวมถึงขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้สถานที่และเครื่องมือต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. (2561, พฤษภาคม 7). ระเบียบการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคด้วยข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า พ.ศ. 2559 [Online]. แหล่งที่มา: [//www.pea.co.th/เกี่ยวกับเรา/การดำเนินการตามนโยบายรัฐบาล/โครงการเชื่อมโยงโครงการต่าง ๆ กับระบบงาน-กฟภ-VSPP/PID/1070/evl/0/CategoryID/42/CategoryName/ระเบียบอื่นๆที่เกี่ยวข้อง](http://www.pea.co.th/เกี่ยวกับเรา/การดำเนินการตามนโยบายรัฐบาล/โครงการเชื่อมโยงโครงการต่าง ๆ กับระบบงาน-กฟภ-VSPP/PID/1070/evl/0/CategoryID/42/CategoryName/ระเบียบอื่นๆที่เกี่ยวข้อง)
- [2] N. G. Hingorani and L. Gyugyi, *Understanding FACTS Concepts and Technology of Flexible*

AC Transmission Systems, 1st Indian Edition, IEEE Press, New York and Standard Publishers Distributors, Delhi, 2000.

- [3] Y. Zhou et al., “An Improved Topology of Unified Power Flow Controller Based on MMC with Fault Current Limiting,” *8th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2016)*, Glasgow, 2016, pp. 1-6.
- [4] Shagufta Khan and Suman Bhowmick, “A Novel Power Flow Model of a Static Synchronous Series Compensator (SSSC),” *6th IEEE Power India International Conference (PIICON)*, Delhi, 2014, pp. 1-6.
- [5] Youjie Ma et al., “The Discussion on Static Synchronous Compensator Technology,” *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, Harbin, 2016, pp. 106-111.
- [6] Esther Barrios-Martinez and Cesar Angeles-Camacho, “Technical comparison of FACTS controllers in parallel connection,” *Journal of Applied Research and Technology*, vol. 15, pp. 36-44, Feb. 2017.
- [7] Nedzmija Demirovic, “Impact of statcom and SVC to voltage control in systems with wind farms using induction generators (IG),” *Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion*, Belgrade, 2016, pp.1-6.
- [8] R. You and M.H. Nehrir, “A Systematic Approach to Controller Design for SVC to Enhance Damping of Power System Oscillations,” *IEEE PES Power Systems Conference and Exposition*, New York, 2004,

- pp. 1134-1139.
- [9] Mehrdad Ahmadi et al., “Comparison of SVC and STATCOM in Static Voltage Stability Margin Enhancement,” *International Journal of Electrical and Electronics Engineering*, vol. 38, pp. 324-328, Feb. 2010.
- [10] N. A. M. Kamari et al., “ Optimal Design of SVC-PI Controller for Damping Improvement Using New Computational Intelligence Approach,” *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, Vol. 42, pp. 184-189, Aug. 2012.
- [11] Hardware in the Loop from the MATLAB/Simulink Environment, Altera Corporation, 2013, pp. 1-9.

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิ (Reader)

ต้นฉบับบทความวิจัยที่ตีพิมพ์วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีที่ 14 ฉบับที่ 2 (เดือนพฤษภาคม - สิงหาคม พ.ศ. 2562) ได้รับการตรวจสอบแก้ไขจากผู้ทรงคุณวุฒิดังรายนามต่อไปนี้

- | | |
|---|---|
| 1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คณิศร์ มาตรา | ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 2. รองศาสตราจารย์ ดร.นิลวรรณ ชุ่มฤทธิ์ | ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 3. อาจารย์นาวิ รุจิตามพ์ | ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 4. รองศาสตราจารย์ ดร.วุฒิพล ธาราธิ์เศรษฐ์ | ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 5. รองศาสตราจารย์ ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์ | ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 6. รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชัย ฤตวิรุฬห์ | ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยนเรศวร |
| 7. รองศาสตราจารย์ ดร.ยุพธนา ขำสุวรรณ | ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ |
| 8. รองศาสตราจารย์ ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง | ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 9. รองศาสตราจารย์ ดร.พิสิษฐ์ ลิ่วธนกุล | ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 10. รองศาสตราจารย์ศุภชัย นาทะพันธ์ | ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
มหาวิทยาลัยมหิดล วิทยาเขตศาลายา |
| 11. อาจารย์ ดร.วีระ ธัญยาภิรักษ์ | คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน |
| 12. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรอนพ วงศ์เรือง | ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ |
| 13. อาจารย์ ดร.วรินทร์ บุญยะโรจน์ | สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร |
| 14. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงษ์ โปธิ | คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยพะเยา |
| 15. อาจารย์สมบัติ ทำนา | คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น |
| 16. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรพัฒน์ ชมภูคำ | สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม |
| 17. รองศาสตราจารย์ ดร.อรพิน เกิดชูชื่น | สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวเคมี
คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิ (Reader)

ต้นฉบับบทความวิจัยที่ตีพิมพ์วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีที่ 14 ฉบับที่ 2 (เดือนพฤษภาคม - สิงหาคม พ.ศ. 2562) ได้รับการตรวจสอบแก้ไขจากผู้ทรงคุณวุฒิดังรายนามต่อไปนี้

- | | |
|---|---|
| 18. อาจารย์ ดร.วทีญญ มีศรีสุข | สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม |
| 19. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธรรมศักดิ์ โรจน์วิรุฬห์ | ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 20. อาจารย์ ดร.นราวัชต์พร นวลสวรรค์ | ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม
วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |

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

2. วิธีการส่งบทความ

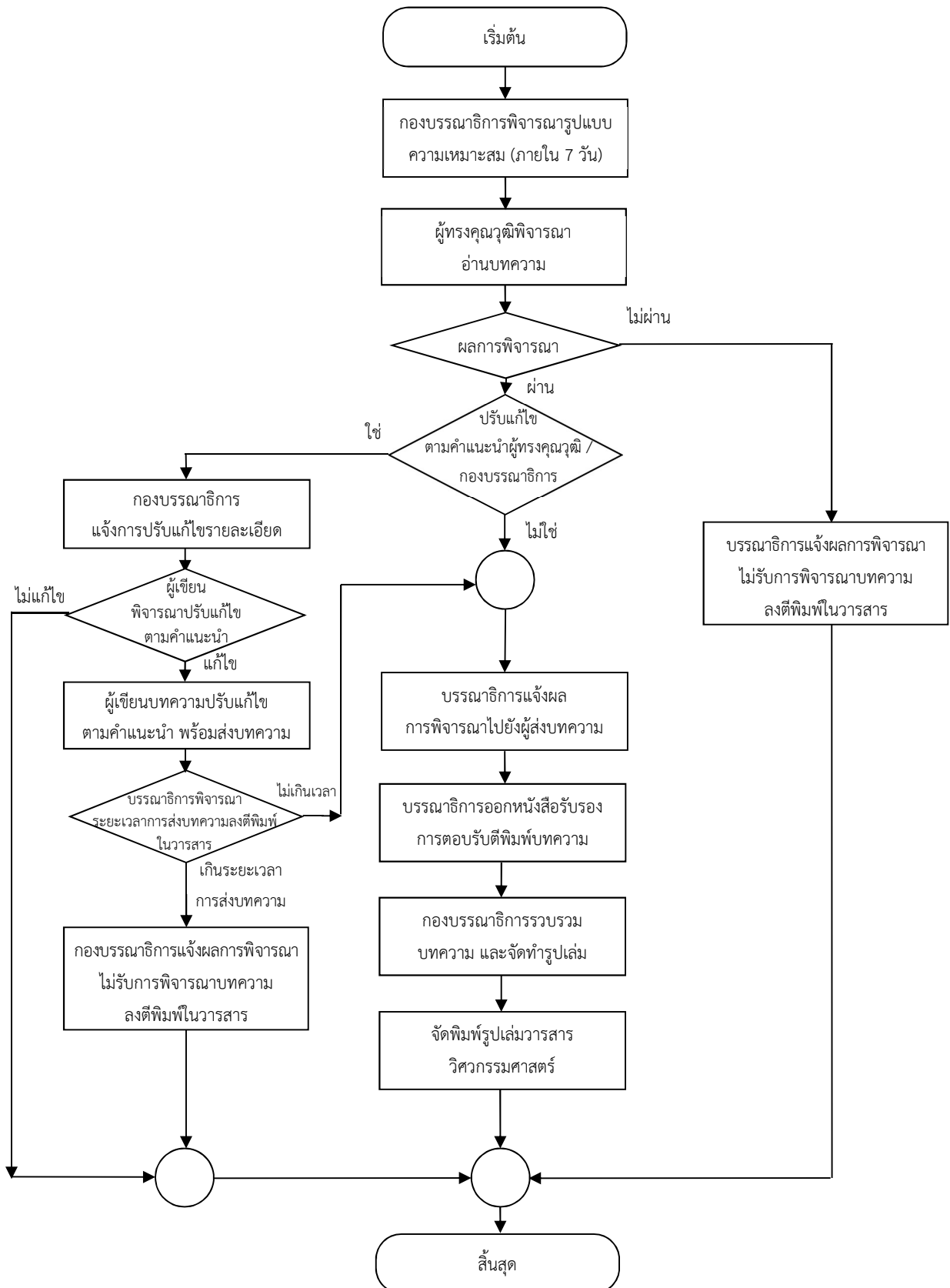
- 1) ส่งต้นฉบับบทความ ไฟล์ Microsoft Word และ pdf พร้อมแนบไฟล์สแกนแบบเสนอผลงานวิชาการเพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
- 2) ส่งไฟล์ต้นฉบับทางออนไลน์ที่
<https://www.tci-thaijo.org/index.php/sej/login>
หรือทางอีเมล JournalEngSWU@gmail.com
- 3) ดูข้อมูลวารสารวิศวกรรมศาสตร์ 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



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 ควรมีหัวข้อเรียงตามลำดับดังต่อไปนี้

ชื่อเรื่อง ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ โดยมีข้อความที่กระชับ ได้ใจความ และบ่งบอกบทความได้อย่างชัดเจน

ชื่อผู้เขียน ให้ระบุชื่อ นามสกุล ตำแหน่ง หน่วยงานและที่อยู่ของผู้เขียนทุกคน โดยหากบทความเป็นภาษาไทยให้ระบุชื่อผู้เขียนเฉพาะภาษาไทยเท่านั้น

บทคัดย่อ บทคัดย่อต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ

คำสำคัญ (Keyword) คำสืบค้นที่เกี่ยวข้องกับบทความ ต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ

บทนำ กล่าวถึงความสำคัญของปัญหาและภูมิหลังของการวิจัย รวมไปถึงวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ตัวเนื้อหา อธิบายถึงอุปกรณ์ หรือวิธีการที่ใช้ในการวิจัย บรรยายผล และวิจารณ์ผล สามารถแตกออกเป็นหลายหัวข้อได้

สรุป บรรยายถึงบทสรุปของงานวิจัย

กิตติกรรมประกาศ ขอขอบคุณสนับสนุน หรือบุคคล (ถ้ามี)



คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

เลขที่ 63 หมู่ 7 ถนนรังสิต - นครนายก
อำเภอองครักษ์ จังหวัดนครนายก 26120

โทร 0 2649 5000 ต่อ 27560 27070

โทรสาร 0 3739 5527

<http://eng.swu.ac.th>

บทความวิจัย

- ศึกษาพฤติกรรมการงอกของงอกข้าวกล้องสำหรับพัฒนาระบบเพาะงอกแบบอัตโนมัติประสิทธิภาพสูง
Studies on Germination of Brown Rice Germ for the Development of High-Efficiency Automatic Germinating System
โดย ฤทธิญา พวงสุวรรณ สหพงศ์ สมวงศ์ สันติ ขำตรี
- การปรับปรุงกระบวนการผลิตลวดแกนกลางของผลิตภัณฑ์สายสวนหลอดเลือดหัวใจด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง
Process Improvement of PTCA Guide Wire by Using Design of Experiment
โดย อธิวัฒน์ สันธรรม เปรมพร เขมาวุฒม์
- การประมาณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ไหลออกจากแหล่งจ่ายกำลังดีซี
Estimation of Average Current Flowing out from DC Power Supply
โดย ณรงค์เดช ดิงกระโทก วิโรจน์ แสงธงทอง
- การประหยัดพลังงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้นด้วยวิธีการหาค่าเหมาะที่สุด
Energy Saving for Separately Excited DC Motor via Optimization Method
โดย จีรวัฒน์ หอมจันทร์ กองพล อารีรักษ์ อิศราทัศน์ อารีรักษ์ กองพัน อารีรักษ์
- การศึกษาถึงพฤติกรรมการไหลและการถ่ายเทความร้อนในฮีตซิงค์สำหรับชุดโมดูลการทำความเย็นด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกด้วยระเบียบวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ
Study on Heat and Flow Behaviors in Heat Sinks for Thermoelectric Cooling Module by CFD
โดย ชุตติชัย หอมมาลี สงกรานต์ วิริยะศาสตร์ ไพศาล นามผล
- การเลือกสัญญาณลำดับศูนย์ที่เหมาะสมสำหรับการมอดูเลทความกว้างพัลส์แบบสเปซเวกเตอร์สองเฟสที่ขยายการมอดูเลทเชิงเส้นสำหรับอินเวอร์เตอร์ห้าขาจ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสคู่
Optimal Zero-Sequence Selection for Two-Phase SVPWM with Extended Linear Modulation Range for Five-Leg Inverter supplying Dual Two-Phase Induction Motors
โดย วิชรินทร์ พรมคุณ วิจิตร กิณเรศ Kazuhiro Ohyaama นาวิ รุจิตามพ์ ประหยัด กองสุข
- การกำจัดฮาร์โมนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอคทีฟสำหรับระบบไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายแรงดันบิดเบี้ยว
Harmonic Elimination using Active Power Filter for Non-Sinusoidal Voltage Source System
โดย ชาศรีต ปานแป้น กองพล อารีรักษ์ กองพัน อารีรักษ์
- การพัฒนาเรือพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อตรวจวัดคุณภาพน้ำ
Development of solar powered boats for water quality monitoring
โดย ปิยนุช ใจแก้ว สุธิดา ที่ปรีกษ์พันธุ์
- การประเมินคุณภาพน้ำคลองส่งน้ำสายใหญ่ฝั่งขวาในจังหวัดนครนายก
Water Quality Assessment of Right Main Canal in Nakhon Nayok Province
โดย อรรถพร ประชาบุรุษย์ ปารณนา ประชาบุรุษย์
- การเปรียบเทียบวิธีการควบคุมจอร์เอสซีสำหรับใช้ชดเชยแรงดันไฟฟ้าและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส
The Comparison of SVC Control Methods for Voltage Compensation and Power Factor Improvement in Single-Phase Power Systems
โดย ภูษิต โคาเพ็ชรทศพร ณรงค์ฤทธิ กองพล อารีรักษ์