

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

SRINAKHARINWIROT ENGINEERING JOURNAL

ปีที่ 13 ฉบับที่ 3 เดือนกันยายน - ธันวาคม พ.ศ. 2561



ISSN 1905 - 4548

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 อำเภอบางบาล

จังหวัดนครนายก 26120

โทร. 0 2649 5000 ต่อ 27073

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

อีเมล journalengswu@gmail.com

พิมพ์ที่ ห้างหุ้นส่วนจำกัดล้านมีเดีย เซอร์วิส

91/2 หมู่ 4 เฟสเบสโต้ หมู่บ้านปิยมณีน

ต.บึงคำพร้อย อ.ลำลูกกา จ.ปทุมธานี 12150

โทร. 084 014 0041 หรือ 086 422 4298

E-mail: new.violet@hotmail.com



วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ที่ปรึกษากองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.เวศิน	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	โสภณแดง	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย	เปรมฤดีปรีชาชาญ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงพรรณ	ศฤงคารินทร์	มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.สีรุ่ง	ปรีชานนท์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รองศาสตราจารย์ ดร.อนันต์	มั่งวัฒนา	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต	ชาลีรักษ์ตระกูล	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.พงศ์ชนัน	เหลือองไพบูลย์	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	ศรีสรณ์ต์	

บรรณาธิการอำนวยการ

รองศาสตราจารย์ ดร.จันจิรา จัปศิลป์

หัวหน้ากองบรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กำพล วรดิษฐ์

กองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล	นาพล	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ ดร.นิลวรรณ	ชุ่มฤทธิ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ ดร.ทิมพันธุ์	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	ทีปักษ์พันธุ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ศาสตราจารย์ ดร.ทงเกียรติ	เกียรติศิริโรจน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศาสตราจารย์ ดร.อภิรัฐ	ศิริธราธิวัตร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์	เดชะอำไพ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ์	อัครเอกผดลีน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร.โกสินทร์	จำนงไทย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.ศราวุธ	ริมดุสิต	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ	โสภาคแดง	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย	เปรมฤดีปรีชาชาญ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงพรรณ	ศฤงคารินทร์	มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.สีรุ่ง	ปรีชานนท์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รองศาสตราจารย์ ดร.อนันต์	มั่งวัฒนา	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต	ชาลิร์กษัตระกูล	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.พงศ์ชนัน	เหลื่องไพบูลย์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.อริคม	ฤกษ์บุตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
รองศาสตราจารย์ ดร.เตือนใจ	สมบูรณ์วิวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.สุรพันธ์	ยิ้มมั่น	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 ซึ่งคาดกันว่าจะส่งผลกระทบมากกว่าหนึ่งด้าน อันได้แก่ รัฐบาลเก็บภาษีได้ไม่เพียงพอกับภาระรายจ่ายที่เกิดขึ้นในการดูแลคนชรา และการลดลงของจำนวนผู้ต้องการศึกษาต่อในระดับอุดมศึกษาส่งผลทำให้หลักสูตรที่มีผู้สมัครเรียนน้อยอาจจะต้องปิดตัวลง แต่อย่างไรก็ตามกรอบมาตรฐานคุณวุฒิระดับอุดมศึกษาแห่งชาติและการประกันคุณภาพการศึกษาของประเทศไทย ได้มีการวางระบบและกลไกให้สถาบันอุดมศึกษามีแนวทางเปิดสอนหลักสูตรที่ตรงกับความต้องการของตลาดแรงงาน โดยจะต้องดำเนินการสำรวจความต้องการของทั้งนายจ้างและผู้เรียน เพื่อใช้ประกอบการทำหลักสูตร ซึ่งสอดคล้องกับรัฐบาลที่ได้มีการเน้นย้ำให้สถาบันอุดมศึกษาเปิดสอนหลักสูตรที่ตรงกับความต้องการของตลาดแรงงาน เพื่อให้บัณฑิตสามารถประกอบวิชาชีพได้

สำหรับการบริหารจัดการทรัพยากรคนอาจารย์ให้เปลี่ยนแปลงทันกับการเปลี่ยนแปลงของหลักสูตรและความต้องการของสังคมเป็นสิ่งที่ทำได้ยาก เพราะคนอาจารย์สำเร็จการศึกษามาด้วยการทำปริญญาโทในหัวข้อที่ต้องมีความลุ่มลึก ทำให้ขาดมิติความกว้างที่จะปรับเปลี่ยนหัวข้อการสอนตามการเปลี่ยนแปลงของหลักสูตรได้ ขณะเดียวกันก็ไม่สามารถแก้ไขปัญหาได้ด้วยการเปิดรับอาจารย์ใหม่ เพราะอายุการทำงานของคนอาจารย์แต่ละคนยาวนานเกินการเปลี่ยนแปลงของความต้องการของหลักสูตร การแก้ปัญหาแนวทางนี้ เมื่อเวลาผ่านไปไม่นาน ปัญหาความไม่สอดคล้องระหว่างคนอาจารย์ที่มีความต้องการของหลักสูตรก็จะวนกลับมาเกิดซ้ำอีก ไม่นับรวมภาระค่าใช้จ่ายที่ต้องแบกรับในการจ้างคนอาจารย์กลุ่มเดิมที่ไม่สามารถสอนในหลักสูตรที่เปลี่ยนแปลงไปได้ ซึ่งจะทำให้ต้นทุนค่าธรรมเนียมการศึกษาสูงโดยไม่จำเป็น เกิดความไม่มีประสิทธิภาพในการใช้งบประมาณที่ได้รับ

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

สุดท้ายนี้ ขอแจ้งว่ากองบรรณาธิการได้ปรับแก้รูปแบบการเขียนเอกสารอ้างอิง ให้เป็นรูปแบบ IEEE ร้อยละร้อย เพื่อให้ผู้เขียนเตรียมต้นฉบับได้สะดวกขึ้น พร้อมให้ตัวอย่างอย่างครอบคลุม ท่านผู้เขียนที่เคยส่งบทความมาก่อน โปรดใช้รูปแบบ IEEE ในการเขียนเอกสารอ้างอิง

บทความวิจัย

การพัฒนาแบบจำลอง Hybrid Choice Models ในการเปลี่ยนรูปแบบการเดินทาง กรณีศึกษา: รถไฟฟ้าสายสีเขียวสถานีมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ Development of Hybrid Choice Models for Modal Shift Study: A Case Study of MRT Green Line Extension Kasetsart University Station ณัฐชนน อัดตาภิบาล เอกชัย ศิริกิจพาณิชย์กุล ชวเลข วณิชเวทินวิโรจน์ รุโจปการ	1
การผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมที่มีการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยใช้ผลจากระบบระบายอากาศของการทำความเย็นแบบระเหยน้ำ Stability Analysis of a Power-switching Converter with an EMI Filter for PV Systems โกศล ชัยเจริญอุดมรุ่ง กองพัน อารีรักษ์ กองพล อารีรักษ์ ธิศิษฐ์ เสรีขจรจารุ วรวิทย์ ศรีมะเรง	18
การขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟสด้วยคอนเวอร์เตอร์กำลังแบบคู่โดยใช้การควบคุมบนแกนสนามแม่เหล็กและการควบคุมบนแกนแรงดันไฟฟ้า Three-Phase Induction Motor Drives with Back-to-Back Converter Using Field-Oriented Control and Voltage-Oriented Control นาวิ รุจิตามพ์ เวคิน ปิยรัตน์	31
การบำบัดน้ำเสียจากการแปรรูปเมล็ดกาแฟแบบเปียก ด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก Treatment of the Wastewater from Wet Coffee Processing Using Microalgae Cultivation รุ่งนภา เขียววิจิตร กลิ่นประทุม ปัญญาปิง สุรสิทธิ์ เทียงจันตา	44
ปัจจัยที่มีผลต่อการเพิกถอนรายวิชาเรียนของนิสิตระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีการศึกษา 2559 Factors Affecting Course Withdrawals of Undergraduate Engineering Students at Srinakharinwirot University in Academic Year 2016 กำพล วรดิษฐ์ สมภพ บุญนาคักดี	58
พฤติกรรมการลอยตัวของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าในฮาร์ดดิสก์แบบ Sub Ambient Pressure ในสภาวะคงตัว Characteristics of Flying Height for Time Independent Sub Ambient Pressure Slider Head ณัฐพรกรณ์ เจริญ เกษฎา พานิชกรณ นิชฐา วงษ์สีดาแก้ว	69
ผลของภาระดัดต่อพฤติกรรมเปลี่ยนรูปแบบคืบของไฟสี่สูก Effect of Bending Load on the Creep Deformation Behavior ธวัชชัย อุ้นใจจม นิพนธ์ อุดมหมอ เมฆินทร์ อินใจ	80
A วงจรทบระดับแรงดันแบบหลายอินพุตที่มีอัตราขยายแรงดันสูงสำหรับระบบพลังงานทดแทน A High Step-Up Multi-Input Boost Converter for Renewable Energy Systems เกื้อกุล กองกาญจนะ สุदारัตน์ ขวัญอ่อน	87

สารบัญ

บทความวิจัย (ต่อ)

- การหาแบบจำลองและการจำลองสถานการณ์ของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัส แบบแม่เหล็กถาวร
เชื่อมต่อกับวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าสามเฟส 102
Modeling and Simulation of Permanent Magnet Synchronous Motor Drives Fed by Three
Phase Rectifier
กิตติวงศ์ สุธรรมโน เทพพนม โสภาคเพิ่ม กองพันธ์ อารีรักษ์
- พฤติกรรมทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชลล์เมื่อใช้ปริมาณวัสดุ ชั้นผิวทางเดิมหมุนเวียนเพื่อ
ใช้งานใหม่ต่างกัน 114
Engineering Performance of Asphalt Concrete by Marshall Test Using Different Reclaimed
Asphalt Pavement Content
นิรชร นกแก้ว ดำรงค์ ปาละกุล
- การประยุกต์ใช้การปรับสภาพผิวโดยการยิงอนุภาคแข็งเพื่อปรับปรุงความต้านทานการสึกหรอบนพื้นผิวยึดติดใน
กระบวนการรีดลดความหนาแน่นด้วยอะลูมิเนียม 127
Application of Surface Modification by Shot Peening for Improving Adhesive Wear Resistance
in Ironing of Aluminum Alloy Cup
วิทยา ดาวดอน สุรัตน์ วรรณศรีสุเชษฐ์ ช้อนกลิ่น รุ่งวสันต์ ไกรกลาง นรารักษ์ บุตรชา
- การกำจัดไนเตรดด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ดัดขึ้นร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา ไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน 138
Nitrate Removal Using Photocatalytic Reduction Process with Ag-TiO₂ Catalyst
สุนีย์ ขวัญยืน ธรรมศักดิ์ ไรจน์วิรุฬห์ อรรวรรณ ไรจน์วิรุฬห์ สันญา สิริวิทยาปกรณ์

การพัฒนาแบบจำลอง Hybrid Choice Models ในการเปลี่ยนรูปแบบการเดินทาง

กรณีศึกษา: รถไฟฟ้าสายสีเขียวสถานีมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์*

Development of Hybrid Choice Models for Modal Shift Study:

A Case Study of MRT Green Line Extension Kasetsart University Station

ณัฐชนน อุตตภิบาล เอกชัย ศิริกิจพานิชกุล* ชวเลข วณิชเวทิน วิโรจน์ รุโจปการ

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร 10900

Natchanon Auttapibarn Ackchai Sirikijpanichkul* Chavalek Vanichavetin Wiroj Rujopakarn

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

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

(Received: October 18, 2018; Accepted: November 8, 2018)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาแบบจำลองทางเลือกที่รวมปัจจัยแฝงของผู้เดินทางมายังมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตบางเขน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาสัดส่วนการเปลี่ยนรูปแบบการเดินทางจากรถยนต์ส่วนบุคคลมาเลือกใช้บริการรถไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อภายในมหาวิทยาลัย 2 รูปแบบ ได้แก่ รถโดยสารประจำทางภายในมหาวิทยาลัย (กรณี 1) และรถจักรยานยนต์รับจ้าง (กรณี 2) ด้วยวิธีการสร้างแบบสอบถามสำรวจความเห็นผ่านสถานการณ์สมมติและสำรวจทัศนคติของผู้เดินทางที่มีต่อปัจจัยแฝงทั้ง 4 ปัจจัย ได้แก่ ปัจจัยด้านความสะดวก ปัจจัยด้านความสบาย ปัจจัยด้านความปลอดภัย และปัจจัยด้านความเชื่อมั่นในการเดินทาง ผลการศึกษาพบว่าแบบจำลองทางเลือกที่รวมปัจจัยแฝง ที่ได้จากการรวมแบบจำลองทางเลือกดั้งเดิมกับแบบจำลองตัวแปรแฝงมีตัวแปรสาเหตุและตัวชี้วัดหลายตัว หรือ แบบจำลองมิมีค (MIMIC Model) สามารถนำไปพยากรณ์การเปลี่ยนรูปแบบการเดินทางจากรถยนต์ส่วนบุคคลมาเลือกใช้บริการด้วยรถไฟฟ้าแล้วมีรูปแบบการเชื่อมต่อภายในดังกรณี 1 และกรณี 2 ได้เหมาะสมและดีกว่าแบบจำลองทางเลือกดั้งเดิม (ที่คำนึงเฉพาะปัจจัยด้านเวลาและค่าใช้จ่าย) โดยเมื่อพิจารณาจากค่าสถิติการตรวจสอบประสิทธิภาพของแบบจำลอง (McFadden's R-Square) พบว่ามีค่าสถิติเพิ่มขึ้นร้อยละ 4.03 และ 3.26 และมีค่าร้อยละความถูกต้องในการทำนายของแบบจำลองเพิ่มขึ้นร้อยละ 0.74 และ 0.68 ตามลำดับ

คำสำคัญ: แบบจำลองทางเลือกที่รวมปัจจัยแฝง แบบจำลองทางเลือกดั้งเดิม ปัจจัยแฝง รถยนต์ส่วนบุคคล รถไฟฟ้าสายสีเขียว

ABSTRACT

This research is aimed at developing a hybrid choice model to forecast the proportion of modal shift from private car to mass rapid transit (MRT) with either campus feeder buses or motorcycle taxis as egress modes of commuting trips to Kasetsart University. A survey of stated preference and factor scoring of

* บทความนี้ได้ถูกนำเสนอบางส่วนในการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 23

four latent factors including convenience, comfort, safety and reliabilities are conducted. The results show that the newly developed hybrid choice model which integrates the traditional modal choice model with the MIMIC model can provide more accurate forecasting results than the traditional one that considering only travel time and cost subject to the increase of McFadden's R-Square statistics by 4.03% and 3.26%, respectively where the precision of model predictions is increased by 0.74% and 0.68%, respectively.

Keywords: Hybrid Choice Model, Traditional Modal Choice Model, Latent Variable, Private Car, MRT Green Line.

1. บทนำ

ปัจจุบันประเทศไทยได้มีการพัฒนาและขยายตัวในทุก ๆ ส่วนของประเทศ โดยมีศูนย์กลางอยู่ที่เมืองหลวง คือ กรุงเทพมหานคร ส่งผลให้เกิดความต้องการในการเดินทางเป็นจำนวนมากไม่ว่าจะเป็นการเดินทางไปทำงาน ไปห้างสรรพสินค้า ไปเรียนหนังสือ กลับที่พักอาศัย จากการเพิ่มขึ้นของประชากรประกอบกับการเจริญเติบโตของเมือง การให้บริการด้านระบบขนส่งสาธารณะจึงเป็นทางเลือกในการเดินทางที่สำคัญ โดยระบบขนส่งสาธารณะต้องสามารถรองรับปริมาณการเดินทางที่จะเกิดขึ้นในแต่ละวันได้อย่างเพียงพอต่อความต้องการและต้องเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ในอดีตกรุงเทพมหานครได้มุ่งเน้นการเพิ่มปริมาณเส้นทางจราจร จำนวนช่องจราจร หรือแม้แต่การเพิ่มระบบขนส่งสาธารณะในรูปแบบรถโดยสารประจำทาง รถตู้สาธารณะ เพื่อรองรับปริมาณการเดินทาง ซึ่งแนวทางเหล่านี้ล้วนส่งผลให้ปริมาณยานพาหนะในท้องถนนเพิ่มมากขึ้น ทำให้กรุงเทพมหานครเป็นเมืองที่มีการจราจรติดขัดเป็นอันดับต้น ๆ ของโลก จนกระทั่งได้มีโครงการจัดทำแผนแม่บทระบบขนส่งมวลชนทางรางในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล (M-Map) เพื่อรองรับปริมาณการเดินทางของประชากรในเมืองหลวง

งานวิจัยนี้ให้ความสนใจในส่วนของการรถไฟฟ้าสายสีเขียว (หมอชิต – สะพานใหม่ – คูคต) ภายใต้การดูแลของการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย โครงการมีระยะทางประมาณ 19 กิโลเมตร ลักษณะเป็นโครงสร้างทางวิ่งยกระดับตลอดแนวเส้นทางพลโยธินและสิ้นสุดที่บริเวณคลองสอง มีสถานียกระดับจำนวน 16 สถานีซึ่งมี

แนวเส้นทางผ่านมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน (พื้นที่กรณีศึกษา) โดยจะทำการศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทางเลือกที่รวมปัจจัยแฝง (Hybrid Choice Models) เพื่อให้ทราบถึงสัดส่วนการเปลี่ยนรูปแบบการเดินทางจากรถยนต์ส่วนบุคคลมาเป็นระบบรถไฟฟ้า ซึ่งเกิดจากอิทธิพลของปัจจัยแฝงด้านทัศนคติ จิตวิทยาที่นอกเหนือไปจากปัจจัยในด้านเวลาและค่าใช้จ่ายในการเดินทาง โดยคาดหวังว่างานวิจัยจะเป็นประโยชน์ต่อผู้บริหารและหน่วยงานที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการปรับปรุงกายภาพภายในมหาวิทยาลัยจากการนำผลที่ได้ของงานวิจัยไปใช้ประโยชน์ในการปรับปรุงแก้ไขระบบขนส่งเพื่อการเชื่อมต่อการเดินทางโดยรถไฟฟ้าในอนาคตต่อไป

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 แบบจำลองทางเลือกรูปแบบการเดินทาง

พฤติกรรมในการเลือกรูปแบบการเดินทางของผู้เดินทางนั้นสามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีแบบจำลองทางเลือกแบบแยกย่อย (Discrete Choice Model) ซึ่งพัฒนาขึ้นโดย Ben-Akiva and Lerman (1985) ในแบบจำลองดังกล่าว ผู้เดินทางจะเลือกรูปแบบการเดินทางซึ่งมีค่าอรรถประโยชน์ (Utility) สูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับข้อจำกัดด้านรายได้ของตนเอง โดยสมมติว่าค่าอรรถประโยชน์ จะมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจทางเลือก ได้แก่ คุณลักษณะส่วนบุคคลเชิงสังคมและเศรษฐศาสตร์ของผู้เดินทาง เช่น อายุ เพศ รายได้ การครอบครองยานพาหนะ เป็นต้น รวมไปถึงคุณลักษณะของรูปแบบทางเลือกในการเดินทาง เช่น

ระยะเวลาและค่าใช้จ่ายในการเดินทาง เป็นต้น และสามารถแสดงให้อยู่ในรูปแบบจำลองอรรถประโยชน์เชิงสุ่ม (Random Utility Model) ดังสมการต่อไปนี้

$$U_{in} = \sum_{k=1}^K \beta_{ik} V_{ikn} + \varepsilon_i \quad (1)$$

โดยที่ U_i แทนค่าอรรถประโยชน์ของกลุ่มตัวอย่างที่ n ที่มีต่อทางเลือก i , β_{ik} แทนค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัย k ที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจเลือกทางเลือก i ($k = 1, 2, 3, \dots, K$) และ V_{ik} แทนค่าปัจจัย k ของกลุ่มตัวอย่างที่ n ที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจเลือกทางเลือก i และ ε_i แทนส่วนของค่าอรรถประโยชน์ของทางเลือก i ที่ไม่สามารถอธิบายได้

โดยค่าอรรถประโยชน์ในเทอม $\sum_{k=1}^K \beta_{ik} V_{ikn}$ เป็นองค์ประกอบที่สามารถอธิบายได้อย่างเป็นระบบ (Systematic or Non-random Component) และ ε_i เป็นองค์ประกอบที่ไม่สามารถอธิบายได้หรือเกิดขึ้นโดยสุ่ม (Random Component) โดยความน่าจะเป็นที่กลุ่มตัวอย่างที่ n จะเลือกทางเลือก i ในกรณีที่มีรูปแบบการเดินทางทางเลือก 2 รูปแบบ สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองโลจิตทวินาม (Binary Logit Model) ซึ่งแสดงด้วยสมการดังต่อไปนี้

$$P_n(i) = \frac{e^{U_{in}}}{e^{U_{in}} + e^{U_{jn}}} \quad (2)$$

โดยที่ $P_n(i)$ แทน ความน่าจะเป็นที่กลุ่มตัวอย่างที่ n จะเลือกเดินทางด้วยรูปแบบการขนส่ง i , โดย U_{in} แทนอรรถประโยชน์ (Utility) ส่วนที่เป็น non-Random ของกลุ่มตัวอย่างที่ n ที่จะเลือกเดินทางด้วยรูปแบบการขนส่ง i และ i, j แทนรูปแบบทางเลือกในการขนส่ง

2.2 การประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองโดยวิธี Maximum Likelihood

วีโรจน์ (2544) กล่าวว่า การประมาณค่าพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองการเลือกรูปแบบการขนส่ง Logit

ระดับย่อย จะอาศัยวิธี Maximum Likelihood วิธีประมาณค่านี้มีประโยชน์มากเมื่อต้องการทราบค่าพารามิเตอร์เป็นค่าเฉพาะ ๆ ไม่ใช่เป็นช่วง เพื่ออธิบายวิธี Maximum Likelihood จะขอยกตัวอย่าง Density Function หนึ่ง ซึ่งพารามิเตอร์ที่ต้องการประมาณค่าจากประชากร คือ β โดย Density Function ของประชากรสามารถเขียนได้เป็น $f(x, \beta)$ เมื่อให้ n เป็นจำนวนค่าที่สังเกตได้จากประชากร คือ $X_1, \dots, X_n$ ดังนั้น Joint Density Function ของประชากรและตัวแปรจากการสังเกตสามารถเขียนได้เป็น

$$I = \sum_{n=1}^n f(X_n, \beta) \quad (3)$$

สมการข้างต้นเรียกว่า Likelihood Function และสามารถเปลี่ยนเป็น Maximum Likelihood โดยการใส่ Natural Logarithms Function “ $\ln$ ” ก่อนเพื่อความสะดวก จากนั้นจะใส่ Partial Derivative เทียบกับพารามิเตอร์ที่ต้องประมาณและให้เท่ากับ 0

$$L = \ln I = \sum_{n=1}^n \ln f(X_n, \beta) \quad (4)$$

และเมื่อทำ Partial Derivative จะได้

$$\frac{\partial L}{\partial \beta} = \frac{\partial}{\partial \beta} \sum_{n=1}^n \ln f(X_n, \beta) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \beta} = \frac{1}{f(X_1, \beta)} \frac{\partial}{\partial \beta} f(X_1, \beta) + \dots + \frac{1}{f(X_n, \beta)} \frac{\partial}{\partial \beta} f(X_n, \beta) \quad (6)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \beta} = 0 \quad (7)$$

2.3 การตรวจสอบประสิทธิภาพแบบจำลอง

Ben-Akiva and Lerman (1985) เสนอการตรวจสอบประสิทธิภาพแบบจำลอง Logit จากดัชนี ρ^2 ดังนี้

$$\rho^2 = 1 - \frac{L(\beta)}{L(0)} \quad (8)$$

โดยที่ ρ^2 คือ Rho-Square (มีค่าระหว่าง 0 และ 1), $L(\beta)$ คือ ค่า Log Likelihood Function สูงสุด และ $L(0)$ คือ ค่า Log Likelihood Function เมื่อพารามิเตอร์ทุกค่าเท่ากับ 0

ค่า ρ^2 ยิ่งเข้าใกล้ 1 หมายถึง แบบจำลองมีประสิทธิภาพสูง กล่าวคือ แบบจำลองสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรได้มาก ค่า ρ^2 ที่อยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้ควรมีค่ามากกว่า 0.20 ขึ้นไป (HFA, 1985) ดังนั้นสำหรับบางกรณีค่า ρ^2 ไม่จำเป็นต้องมีค่าสูงก็ได้ (Ortuzar and Willumsen, 2011)

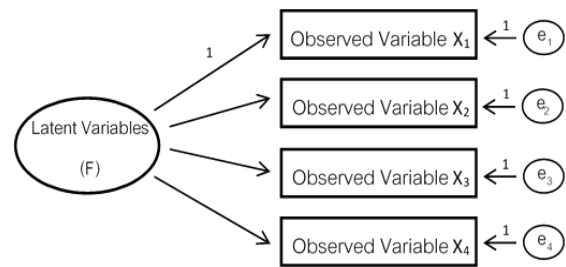
การตรวจสอบภาพรวมประสิทธิภาพของแบบจำลองอีกวิธีหนึ่ง คือ การตรวจสอบระดับความถูกต้อง โดยจะพิจารณาจาก

$$\% \text{ Correct} = \sum_{n=1}^N \frac{W_n}{N} \quad (9)$$

โดยที่ % Correct คือ ร้อยละความถูกต้องของผลการพยากรณ์โดยแบบจำลอง, $w_n = 1$ เมื่อผลการพยากรณ์ของตัวอย่างที่ n เป็นไปตามที่สำรวจได้ คือมีความน่าจะเป็นที่กลุ่มตัวอย่าง n จะเลือกรูปแบบ i ตามที่สำรวจได้มากกว่าร้อยละ 50 กล่าวคือ $P_n(i) > 0.50$ โดยที่ N แทนขนาดกลุ่มตัวอย่างทั้งหมด

2.4 แบบจำลองสมการเชิงโครงสร้าง

แบบจำลองสมการเชิงโครงสร้าง มีวิวัฒนาการมาจากการวิเคราะห์ปัจจัย (Spearman, 1904) การวิเคราะห์เส้นทาง (Wright, 1934) ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นให้เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลหลายตัวแปรซึ่งประกอบไปด้วยตัวแปรอิสระ ตัวแปรตามและตัวแปรแฝงที่สร้างขึ้นจากตัวแปรที่สังเกตได้ซึ่งสมมติให้เป็นตัวแทนของตัวแปรแฝงเหล่านั้นทำให้ผู้วิจัยสามารถทดสอบถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรแฝง (Latent Variables) และตัวแปรที่สังเกต (Observed Variables) ได้ในเชิงทฤษฎี (Bollen, 1989; Kline, 2011; Hair et al, 2013) ตัวอย่างดังแสดงตามรูปที่ 1



รูปที่ 1 ปัจจัยแฝงที่ประกอบด้วยตัวแปรสังเกตได้ 4 ตัว
ที่มา: กัลยา (2556)

ส่วนสัญลักษณ์ $\odot$ หมายถึง ความคลาดเคลื่อนของตัวแปรสังเกตได้เนื่องจากไม่สามารถวัดตัวแปรสังเกตได้ถูกต้อง 100 %

2.5 ประเภทของแบบจำลองสมการโครงสร้าง

แบบจำลองสมการโครงสร้างแบ่งออกเป็นหลายกลุ่ม โดยแต่ละกลุ่มนั้นมีวิธีแยกย่อยอีกหลากหลายวิธีด้วยกัน (สุรเมศวร์ พิริยะวัฒน์, 2553 อ้างถึงในนงลักษณ์ วิรัชชัย, 2542) แต่ในที่นี้ผู้วิจัยจะขออธิบายถึงรายละเอียดเฉพาะวิธีที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้เท่านั้นดังแสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.5.1 การวิเคราะห์ปัจจัยเชิงสำรวจ (Exploratory Factor Analysis: EFA)

เป็นเทคนิคการลดตัวแปรโดยผู้วิจัยไม่ทราบโครงสร้างความสัมพันธ์ของตัวแปรสังเกตได้มาก่อนจึงจำเป็นต้องจัดกลุ่มว่าตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันจึงจัดให้อยู่ในกลุ่มปัจจัยเดียวกัน โดยผู้วิจัยจะไม่ทราบมาก่อนว่าตัวแปรสังเกตได้สามารถลดจำนวนตัวแปรให้เหลือกี่ปัจจัย

2.5.2 การวิเคราะห์ปัจจัยเชิงยืนยัน (Confirmatory Factor Analysis : CFA)

เทคนิคการวิเคราะห์ปัจจัยเชิงยืนยันเป็นเทคนิคที่ผู้วิจัยทราบโครงสร้างของความสัมพันธ์ตัวแปรสังเกตได้มาก่อนแล้ว กล่าวคือ ผู้วิจัยได้ทำการค้นคว้าทางทฤษฎีหรืองานวิจัยที่ได้มีการศึกษาผ่านมา ผู้วิจัยจึงคาดการณ์ความสัมพันธ์ของตัวแปรสังเกตได้ว่าตัวแปรใดบ้างมีความสัมพันธ์กันควรอยู่ในปัจจัยแฝงเดียวกัน จากนั้นจึงสร้างแบบจำลองเพื่อยืนยันความสัมพันธ์ว่าเป็นไปตามที่คาดไว้หรือไม่ โดยการวัดปัจจัยแต่ละด้าน

ด้วยตัวแปรที่สังเกตได้หลาย ๆ ตัวจะช่วยลดความคลาดเคลื่อนหรือความผิดพลาดในการวัดของตัวแปรสังเกตได้

2.5.3 แบบจำลองตัวแปรแฝงมีตัวแปรสาเหตุและตัวชี้วัดหลายตัว หรือแบบจำลองมีมิก (MIMIC Models)

แบบจำลองที่มีปัจจัยแฝงเพียงตัวแปรเดียว โดยที่ปัจจัยแฝงนั้นได้รับอิทธิพลจากตัวแปรภายนอกสังเกตได้หลายตัวแปร และส่งอิทธิพลไปยังตัวแปรภายในสังเกตได้หลายตัวแปร หรือกล่าวอีกอย่างว่าเป็นแบบจำลองของคุณลักษณะแฝงที่มีหลายสาเหตุและวัดได้จากตัวบ่งชี้หลายตัว

2.6 การตรวจสอบความกลมกลืนและสอดคล้องของแบบจำลองสมการเชิงโครงสร้าง

กัลยา (2556) เมื่อผู้วิจัยได้สร้างแบบจำลองและทดสอบความสัมพันธ์ของแบบจำลองแล้วเสร็จ สิ่งที่มีความสำคัญที่ขาดไม่ได้อีกอย่างหนึ่งก็คือ การตรวจสอบแบบจำลองด้วยค่าสถิติต่าง ๆ เพื่อบ่งบอกถึงความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าสถิติตรวจสอบความถูกต้องแบบจำลองสมการเชิงโครงสร้าง

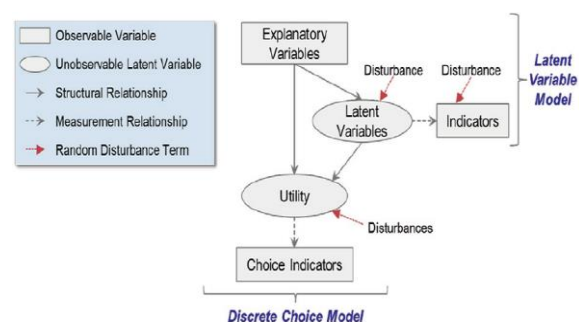
Model Fit	Good Fit	Acceptable Fit
Chi-Square (χ^2)	มีค่าตั้งแต่ 0-∞ (ถ้ามีค่าต่ำจะดี)	มีค่าตั้งแต่ 0-∞ (ถ้ามีค่าต่ำจะดี)
Degree of Freedom (DF)	มีค่าตั้งแต่ 0-∞ (ถ้ามีค่ามากจะดี)	มีค่าตั้งแต่ 0-∞ (ถ้ามีค่ามากจะดี)
GFI	0.95 ≤ GFI ≤ 1.00	0.9 ≤ GFI ≤ 0.95
	GFI : Goodness of Fit	
AGFI	ควรมีค่ามากกว่า 0.9 AGFI : (Adjusted) Goodness of Fit	
CFI	ควรมีค่ามากกว่า 0.9 CFI : Comparative Fit Index	
RMSEA	0 ≤ RMSEA ≤ 0.05	0.05 ≤ RMSEA ≤ 0.08
	RMSEA : Root Mean Square Error of Approximation	
Normed Chi-square (χ^2/df)	0 ≤ χ^2/df ≤ 2	2 ≤ χ^2/df < 3

ที่มา: ดัดแปลงจาก Hair et al. (2006)

2.7 แบบจำลองทางเลือกที่รวมปัจจัยแฝง

ในการศึกษาและวิเคราะห์แบบจำลองทางเลือกรูปแบบการเดินทางของผู้เดินทางในอดีต ผู้วิจัยจะมุ่งเน้นในส่วน of ปัจจัยในด้านเวลาและค่าใช้จ่ายในการเดินทาง ซึ่งในปัจจุบันได้มีรูปแบบการเดินทางที่หลากหลายประกอบกับสภาพแวดล้อมของแต่ละประเทศมีลักษณะแตกต่างกันจึงส่งผลให้เกิดปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจของมนุษย์ในการเลือกรูปแบบการเดินทางหลายประการ (โดยอาจจะไม่สามารถวัดค่าของปัจจัยได้โดยตรง) ซึ่งการวิเคราะห์ในอดีตไม่ได้นำผลของปัจจัยเหล่านี้มาวิเคราะห์ร่วมด้วย ส่งผลให้แบบจำลองทางเลือกที่ผ่านมาในอดีตอาจมีความคลาดเคลื่อนในการวิเคราะห์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้สร้างแบบจำลองทางเลือกในการเดินทาง โดยรวมปัจจัยด้านจิตวิทยาที่มีผลต่อการเลือกรูปแบบการเดินทางเพื่อให้แบบจำลองทางเลือกการเดินทางมีประสิทธิภาพในการพยากรณ์ผลได้ดียิ่งขึ้น

Ben-Akiva (1997) กล่าวว่า ในปัจจุบันการพัฒนาแบบจำลองทางเลือกได้ให้ความสำคัญในการนำปัจจัยด้านจิตวิทยาของบุคคลในด้านต่าง ๆ เข้ามาร่วมด้วยเพื่อวัดความสัมพันธ์ด้านอื่นที่นอกเหนือไปจากปัจจัยด้านเวลาและค่าใช้จ่าย เช่น ทศนคติ เพื่อแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรม การเลือกรูปแบบการเดินทางดังแสดงในรูปที่ 2 โดยแบบจำลองจะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ แบบจำลองทางเลือก (Discrete Choice Model) และแบบจำลองปัจจัยแฝง (Latent Variable Model)



รูปที่ 2 ลักษณะแบบจำลอง Hybrid Choice Model

ที่มา: ดัดแปลงจาก Ben-Akiva et al. (2002) โดย

Kim et al. (2014)

3. วิธีการดำเนินการ

จากการศึกษารวบรวมข้อมูลไว้ในหัวข้อทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง นำไปสู่การออกแบบสอบถามเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล โดยแบ่งแบบสอบถามออกเป็น 2 ชุด แบบสอบถามชุดแรกใช้เพื่อการสำรวจเบื้องต้น (Pilot Survey) เพื่อคัดกรองปัจจัยแฝงและชุดที่สองเป็นแบบสอบถามฉบับสมบูรณ์ที่ใช้ในการสำรวจจริง

3.1 การกำหนดพื้นที่ศึกษาและกลุ่มเป้าหมาย

จากวัตถุประสงค์งานวิจัย ผู้วิจัยได้กำหนดกลุ่มเป้าหมายเป็นผู้นคนที่เดินทางเข้ามาใช้บริการภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ โดยอาศัยรถยนต์ส่วนบุคคลเป็นหลัก ซึ่งได้แก่ นิสิตและบุคลากรของมหาวิทยาลัย แต่เนื่องจากโครงการรถไฟฟ้าสายสีเขียวมีกำหนดเปิดให้บริการตามแผนในปี พ.ศ. 2563 ดังนั้นความเป็นไปได้ที่นิสิตปัจจุบันจะมีโอกาสได้ใช้รถไฟฟ้าสายสีเขียวส่วนต่อขยายจึงมีค่อนข้างน้อย ผู้วิจัยจึงจำกัดกลุ่มเป้าหมายให้ครอบคลุมแต่เพียงกลุ่มตัวอย่างที่เป็นบุคลากรที่ทำงานอยู่ตามคณะต่าง ๆ จำนวน 15 คณะและ 1 วิทยาลัย

3.2 การกำหนดขนาดตัวอย่าง

งานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้คำนวณขนาดของกลุ่มตัวอย่างด้วยวิธีของ Yamane (1967) เพื่อคำนวณขนาดของกลุ่มตัวอย่างโดยกำหนดความเชื่อมั่นที่ 95 % ความผิดพลาดไม่เกิน 5% จากจำนวนบุคลากรภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ทั้งหมด 10,061 คน

$$n = \frac{10,061}{1 + 10,061(0.05)^2} \quad (10)$$

ดังนั้นจะได้ขนาดของกลุ่มตัวอย่างทั้งหมด 385 ตัวอย่าง

3.3 การสำรวจนําร่องด้วยแบบสอบถามเบื้องต้น

มีวัตถุประสงค์เพื่อคัดกรองปัจจัยแฝงที่มีผลต่อการตัดสินใจในการเลือกรูปแบบการเดินทางของกลุ่มตัวอย่างด้วยวิธี Factor Analysis เลือกหมุนแกนด้วยวิธี Varimax ซึ่งเป็นวิธีที่พยายามทำให้สัณฐาน (Column) ของ Factor Matrix มีค่าเพียง 0 หรือ 1 หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าเป็นวิธีที่พยายาม

ทำให้ผลรวมของความแปรปรวนของปัจจัยมีค่ามากที่สุด จากนั้นพิจารณาความสัมพันธ์ที่แสดงความสัมพันธ์แต่ละปัจจัยที่พิจารณา (Factor Loading) เพื่อคัดกรองปัจจัยแฝง 4 อันดับแรกนำไปสร้างข้อคำถามที่ใช้เป็นเกณฑ์วัดคะแนนในแต่ละปัจจัยแฝงในแบบสอบถามฉบับสมบูรณ์ กัลยา (2551) ให้ข้อเสนอแนะว่าก่อนดำเนินการเก็บข้อมูลจริงนั้น เราควรมีการทำการสำรวจนําร่อง (Pilot Survey) เพื่อทดสอบความเข้าใจของผู้ตอบแบบสอบถาม ตรวจสอบความถูกต้องของคำถาม พร้อมทั้งค้นหาข้อบกพร่องเพื่อที่จะได้นำมาแก้ไขก่อนการทำแบบสอบถามจริง

3.4 การสำรวจจริงด้วยแบบสอบถามฉบับสมบูรณ์

ผลการสำรวจนําร่องด้วยแบบสอบถามเบื้องต้นนำมาสู่การสร้างแบบสอบถามฉบับสมบูรณ์ซึ่งจำแนกออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ **ส่วนที่ 1** ข้อมูลคุณลักษณะทางเศรษฐกิจและสังคมของผู้เดินทาง **ส่วนที่ 2** ข้อมูลลักษณะการเดินทางในปัจจุบันของผู้เดินทาง โดยส่วนที่ 1 และ 2 การสร้างแบบสอบถามจะมีลักษณะคล้ายกับแบบสอบถามเบื้องต้นแต่จะปรับปรุงและเพิ่มข้อคำถามที่ผู้ตอบแบบสอบถามไม่เข้าใจและตอบคำถามไม่ชัดเจน **ส่วนที่ 3** ข้อมูลเกี่ยวกับทัศนคติในการเลือกรูปแบบการเดินทางของผู้เดินทาง เป็นการสร้างข้อคำถามตัวแปรสังเกตได้ที่ได้จากการคัดกรองปัจจัยแฝงในแบบสอบถามเบื้องต้น เพื่อใช้เป็นข้อคำถามย่อยวัดคะแนนของแต่ละปัจจัยแฝงที่ไม่สามารถวัดคะแนนได้โดยตรง ดังแสดงในตารางที่ 2 **ส่วนที่ 4** การสมมติสถานการณ์ในการเลือกรูปแบบการเดินทางระหว่างรถยนต์ส่วนบุคคลและรถไฟฟ้า (กรณีศึกษา) ขั้นตอนนี้เป็นสร้างสถานการณ์สมมติขึ้นโดยมีสมมติฐานว่าที่พักอาศัยติดสถานีรถไฟฟ้าสามารถเดินเท้าเพื่อเข้าถึงสถานีได้ และจำแนกระยะทางจากที่พักอาศัยถึงมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ออกเป็น 3 ระยะ ได้แก่ ไม่เกิน 5 กิโลเมตร 5 - 10 กิโลเมตร และ 10 กิโลเมตร ขึ้นไป โดยพิจารณาเฉพาะปัจจัยด้านเวลาและค่าใช้จ่ายเปรียบเทียบระหว่างรูปแบบการเดินทาง 2 รูปแบบ ได้แก่ การเดินทางด้วยรถยนต์ส่วนบุคคลแล้วเปลี่ยนมาเลือกใช้รถไฟฟ้าสายสีเขียวและมีการเชื่อมต่อภายในด้วยรถโดยสารของมหาวิทยาลัย (กรณีที่ 1) และการเดินทางด้วยรถยนต์

ส่วนบุคคลแล้วเปลี่ยนมาเลือกใช้รถไฟฟาสายสีเขียวและมีการเชื่อมต่อภายในด้วยรถจักรยานยนต์รับจ้าง (กรณีที่ 2) โดยมีการสมมติเวลาและค่าใช้จ่ายในการเดินทางโดยเฉลี่ยซึ่งเป็นค่ากลางที่ได้จากการสำรวจ เป็นดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 2 ข้อคำถามที่ใช้วัดคะแนนแทนปัจจัยแฝง

กลุ่มปัจจัย	ข้อคำถาม	ตัวแปร
(F1) ความสะดวก Convenient	การเดินทางที่ต้องมีสัมภาระ/เด็ก ร่วมด้วย	X_Conv1
	สามารถเดินทางได้ทุกสภาพอากาศ (เช่น อากาศร้อน/หนาว ฝนตก)	X_Conv2
	สามารถเข้าถึงตัวรถได้ง่าย	X_Conv3
	สามารถเลือกเวลาในการเดินทาง ช่วงใดก็ได้	X_Conv4
	ไม่ยุ่งยากเมื่อเกิดอุบัติเหตุ/รถเสีย	X_Conv5
(F2) ความสบาย Comfort	ตัวรถสะอาด ไม่มีกลิ่นเหม็น	X_Comf1
	มีความรู้สึกเป็นส่วนตัวขณะเดินทาง	X_Comf2
	มีที่นั่งโดยสารขณะเดินทาง	X_Comf3
	ที่นั่งโดยสารมีความกว้างเหมาะสม	X_Comf4
	มีที่วางสัมภาระภายในรถ	X_Comf5
	สามารถใช้เวลาส่วนตัวในขณะ เดินทาง เช่น พักผ่อน เล่นโทรศัพท์	X_Comf6
(F3) ความ ปลอดภัย Safety	รู้สึกปลอดภัยจากอุบัติเหตุในขณะ เดินทาง	X_Safe1
	รู้สึกปลอดภัยจากอาชญากรรม ในขณะเดินทาง	X_Safe2
	รู้สึกปลอดภัยจากอุบัติเหตุขณะเดิน เท้า/ต่อรถชนิดอื่น เพื่อไปยังที่หมาย	X_Safe3
	รู้สึกปลอดภัยจากอาชญากรรม ขณะเดินเท้า/ต่อรถชนิดอื่น เพื่อ ไปยังที่หมาย	X_Safe4
	อุปกรณ์ป้องกันอุบัติเหตุภายในรถ	X_Safe5
(F4) ความเชื่อมั่น ในการเดินทาง Reliability	ความตรงต่อเวลาในการเดินทาง	X_Rel1
	สภาพ/ความพร้อมของตัวรถ	X_Rel2
	การใช้รถเพื่อเดินทางเวลากลางคืน	X_Rel3
	ความเชื่อมั่นในตัวผู้ขับรถ	X_Rel4

หมายเหตุ: X แทน ประเภทรูปแบบการเดินทางซึ่งขึ้นกับ
แบบจำลอง ถ้าเป็นรถไฟฟ้า X แทนด้วย MRT และถ้าเป็น
รถยนต์ส่วนบุคคล X แทนด้วย Car

ตารางที่ 3 สมมติฐานเวลาและค่าใช้จ่ายในการเดินทางใน
สถานการณ์สมมติ

ระยะทาง (กิโลเมตร)	รถยนต์ส่วนบุคคล		กรณีที่ 1		กรณีที่ 2	
	เวลา	ค่าใช้จ่าย	เวลา	ค่าใช้จ่าย	เวลา	ค่าใช้จ่าย
ไม่เกิน 5	24	25	34	20	22	35
5 – 10	44	36	42	30	29	45
10 ขึ้นไป	64	47	49	41	37	59

หมายเหตุ: เวลาหน่วยเป็นนาที ค่าใช้จ่ายหน่วยเป็นบาท

3.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

3.5.1 การวิเคราะห์ข้อมูลแบบสอบถามเบื้องต้น

ขั้นตอนนี้เป็นกระบวนการวิเคราะห์ค่าสถิติของข้อมูล
คุณลักษณะทางเศรษฐกิจและสังคมของผู้เดินทาง ข้อมูล
ลักษณะการเดินทางในปัจจุบันของผู้เดินทางต่าง ๆ และคัด
กรองปัจจัยแฝงที่มีผลต่อการเลือกรูปแบบการเดินทางโดย
วิธี Factor Analysis เลือกหมุนแกนด้วยวิธี Varimax ซึ่ง
เป็นวิธีที่พยายามทำให้สมมติ (Column) ของ Factor
Matrix มีค่าเพียง 0 หรือ 1 หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าเป็นวิธี
ที่พยายามทำให้ผลรวมของความแปรปรวนของปัจจัยมีค่า
มากที่สุด จากนั้นพิจารณาค่าน้ำหนักปัจจัย (Factor
Loading) เพื่อคัดกรองปัจจัยแฝง 4 อันดับแรก เพื่อนำไป
สร้างข้อคำถามที่ใช้เป็นเกณฑ์วัดคะแนนในแต่ละปัจจัยแฝง

3.5.2 การวิเคราะห์ข้อมูลแบบสอบถามฉบับสมบูรณ์

เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลแบบสอบถามเบื้องต้นเพื่อคัด
กรองปัจจัยแฝง 4 อันดับแรกที่มีผลต่อการตัดสินใจเลือกรูปแบบ
การเดินทางแล้ว ผู้วิจัยได้นำผลการวิเคราะห์ มา
สร้างข้อคำถามเพื่อใช้เป็นตัวชี้วัดแทนปัจจัยเนื่องจาก
ปัจจัยแฝงในแต่ละด้านไม่สามารถพิจารณาให้คะแนน
ความพึงพอใจได้โดยตรง

ขั้นตอนการวิเคราะห์แบบสอบถามฉบับสมบูรณ์ใน
งานวิจัยครั้งนี้ใช้วิธีวิเคราะห์แบบจำลองอรรถประโยชน์
แบบดั้งเดิมที่คำนึงเฉพาะปัจจัยด้านเวลาและค่าใช้จ่าย
และวิเคราะห์แบบจำลองสมการเชิงโครงสร้าง (Structural

Equation Modeling) ด้วยวิธีแบบจำลองตัวแปรแฝงมีตัวแปรสาเหตุและตัวชี้วัดหลายตัวหรือที่เรียกอีกชื่อหนึ่งว่าแบบจำลองมิมิค (MIMIC Model) จากนั้นนำแบบจำลองทั้ง 2 แบบจำลองมาวิเคราะห์ร่วมกันดังที่เรียกกันว่าแบบจำลองทางเลือกที่รวมปัจจัยแฝง (Hybrid Choice Model) โดยอาศัยหลักของอรรถประโยชน์ (Utility) พิจารณาความเหมาะสมของค่าสัมประสิทธิ์ นัยสำคัญทางสถิติ และตรวจสอบประสิทธิภาพของแบบจำลอง เพื่อเปรียบเทียบหาแบบจำลองที่เหมาะสมและดีที่สุดนำไปใช้งานและหรือพยากรณ์ในอนาคตต่อไป

4. ผลการทดลอง

4.1 การสำรวจและวิเคราะห์โดยอาศัยแบบสอบถามเบื้องต้น

ในช่วงที่มีการจัดงานวันเกษตรแห่งชาติหรือเกษตรแฟร์ประจำปี 2560 ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เป็นช่วงที่มีผู้คนเดินทางมาร่วมงานเป็นจำนวนมาก เหมาะแก่การสำรวจแบบสอบถามเบื้องต้นเพื่อสำรวจปัจจัยที่มีผลต่อการเลือกรูปแบบการเดินทางมายังมหาวิทยาลัย โดยมีปัจจัยที่ใช้เป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพเพื่อคาดการณ์คุณภาพการให้บริการประกอบไปด้วย ความพร้อมในการให้บริการ ความน่าเชื่อถือในการให้บริการ ความสะดวกสบาย ความสะอาด ความปลอดภัยและการรักษาความปลอดภัย ข้อมูล/ข่าวสาร การบริการ และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการสำรวจเบื้องต้นด้วยการสัมภาษณ์โดยอาศัยแบบสอบถามพบว่าให้ค่าสถิติ KMO (Kaiser-Meyer-Olkin) ซึ่งใช้วัดความเหมาะสมของข้อมูลในการวิเคราะห์ปัจจัย โดยทั่วไปจะพิจารณาว่าการวิเคราะห์ปัจจัยเหมาะสมกับข้อมูลเมื่อค่า KMO > 0.5 (Field, 2005) แต่ในกรณีงานวิจัยนี้มีค่า KMO เท่ากับ 0.906 แสดงว่าข้อมูลเหล่านี้มีความเหมาะสมเพียงพอที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์

ปัจจัยแฝง 4 อันดับแรกที่มีค่าน้ำหนักสูงสุด โดยเรียงค่าน้ำหนักตามลำดับจากมากที่สุดไปหาน้อยที่สุด ได้แก่ 0.828 0.804 0.783 และ 0.764 ประกอบไปด้วย ความ

สะอาด ความปลอดภัย ความสะดวกสบาย การให้บริการตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าน้ำหนักปัจจัยในการตัดสินใจเลือกรูปแบบการเดินทางมายังมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ของกลุ่มผู้ตอบแบบสอบถามนำร่องในงานเกษตรแฟร์

ปัจจัย	ค่าน้ำหนัก	อันดับที่
ปัจจัยด้านความพร้อมในการให้บริการ	0.701	
ปัจจัยด้านความเชื่อถือในการให้บริการ	0.746	
ปัจจัยด้านความสะดวกสบาย	0.783	3
ปัจจัยด้านความสะอาด	0.828	1
ปัจจัยด้านความปลอดภัยและการรักษาความปลอดภัย	0.804	2
ปัจจัยด้านข้อมูล/ข่าวสาร	0.679	
ปัจจัยด้านการให้บริการ	0.764	4
ปัจจัยด้านผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม	0.522	

แต่จากงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องพบว่างานวิจัยส่วนใหญ่จะแยกปัจจัยด้านความสะดวกและความสบายออกจากกันและใช้ตัวชี้วัด (Indicators) ที่แตกต่างกัน โดยความสะดวกจะหมายถึงความถึงความรู้สึกของผู้โดยสารที่อยู่ระหว่างการเดินทางและหรือการเชื่อมต่อระบบการเดินทางเพื่อเข้าถึงยานพาหนะของรูปแบบการเดินทางหลักที่ใช้ในการเดินทางหรือระหว่างออกจากยานพาหนะของรูปแบบการเดินทางหลักที่ใช้ในการเดินทางไปยังจุดหมายปลายทาง ส่วนความสบายหมายถึงความถึงความรู้สึกขณะอยู่ภายในยานพาหนะของรูปแบบการเดินทางหลักที่ใช้ในการเดินทาง ในส่วนของปัจจัยด้านความสะอาด ในงานวิจัยบางชิ้นพิจารณาให้เป็นตัวแปรที่สังเกตได้ในปัจจัยทางด้านความสบายและสุดท้ายปัจจัยในการให้บริการผู้วิจัยเห็นว่าไม่สามารถใช้เป็นปัจจัยในการชี้วัดรถยนต์ส่วนบุคคลได้ จึงได้เลือกปัจจัยด้านความเชื่อมั่นในการเดินทางมาใช้เป็นตัวชี้วัดแทน

4.2 การสำรวจและวิเคราะห์โดยอาศัยแบบสอบถามฉบับสมบูรณ์

การลงพื้นที่สำรวจแบบสอบถามตามคณะต่าง ๆ ในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในช่วงเดือนตุลาคมถึงเดือน

พฤศจิกายน พ.ศ. 2560 มีจำนวนชุดแบบสอบถามทั้งหมด 485 ชุดข้อมูล โดยผ่านการคัดกรองและเลือกนำมาวิเคราะห์ 400 ชุดข้อมูล การวิเคราะห์ค่าสถิติข้อมูลคุณลักษณะทางเศรษฐกิจและสังคมของผู้เดินทางและข้อมูลลักษณะการเดินทางในปัจจุบันของผู้เดินทาง พบว่ามีวัตถุประสงค์ในการเดินทางเพื่อการศึกษาคิดเป็นร้อยละ 7.8 และมีวัตถุประสงค์ในการเดินทางเพื่อการทำงานคิดเป็นร้อยละ 92.2 ของจำนวนกลุ่มตัวอย่างทั้งหมด ดังนั้นกลุ่มตัวอย่างที่ร่วมตอบแบบสอบถาม มีคุณสมบัติสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยที่คาดหวังไว้

4.3 การวิเคราะห์แบบจำลองทางเลือก (Mode Choice Model)

การพิจารณาอรรถประโยชน์ของการเลือกรูปแบบการเดินทางที่พิจารณาเฉพาะปัจจัยด้านเวลาและค่าใช้จ่าย ระหว่างรถยนต์ส่วนบุคคลและรถไฟฟ้า หรือจะกล่าวถึงในงานวิจัยนี้ว่าเป็น “แบบจำลองทางเลือกแบบดั้งเดิม” เนื่องจากปัจจัยทั้งสองเป็นปัจจัยที่ผู้เดินทางใช้ตัดสินใจในการเลือกรูปแบบการเดินทางตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน

จากการออกแบบสอบถามในส่วนสถานการณ์สมมติ (Stated Preference) มีการสมมติสถานการณ์ในการเลือกรูปแบบการเดินทางระหว่างรถยนต์ส่วนบุคคลและรถไฟฟ้าจำนวน 9 สถานการณ์ ที่มีการเชื่อมต่อภายใน 2 รูปแบบ ต่อแบบสอบถาม 1 ชุด เพื่อการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปร ค่าคงที่ และค่าความถูกต้องของการพยากรณ์ ด้วยวิธี Maximum Likelihood ผลจากการวิเคราะห์แบบจำลอง Binary Logit Model มีรูปแบบสมการเป็นดังต่อไปนี้

กรณีที่ 1 จากการเดินทางด้วยรถยนต์ส่วนบุคคลหาก

เปลี่ยนมาใช้บริการรถไฟฟ้าจะต้องมีการเชื่อมต่อภายในมหาวิทยาลัยด้วยรถโดยสารประจำทางภายในมหาวิทยาลัย จะได้สมการโลจิตดังต่อไปนี้

$$U_{Car} = 1.614 - 0.112Cost_{Car} - 0.0828Time_{Car} \quad (11)$$

$$U_{MRT} = -0.112 Cost_{MRT} - 0.0828Time_{MRT} \quad (12)$$

กรณีที่ 2 จากการเดินทางด้วยรถยนต์ส่วนบุคคลหากเปลี่ยนมาใช้บริการรถไฟฟ้าจะต้องมีการเชื่อมต่อภายในมหาวิทยาลัยด้วยรถจักรยานยนต์รับจ้าง จะได้แสดงสมการโลจิตดังต่อไปนี้

$$U_{Car} = 0.933 - 0.101Cost_{Car} - 0.0664Time_{Car} \quad (13)$$

$$U_{MRT} = -0.101Cost_{MRT} - 0.0664Time_{MRT} \quad (14)$$

โดยที่ U_{Car} แทน อรรถประโยชน์ของรถยนต์ส่วนบุคคล, U_{MRT} แทน อรรถประโยชน์ของรถไฟฟ้าสายสีเขียว, $Cost_{Car}$ และ $Cost_{MRT}$ แทน ค่าใช้จ่ายในการเดินทางโดยรถยนต์ส่วนบุคคลและรถไฟฟ้าสายสีเขียว (บาท) ตามลำดับ และ $Time$ คือ เวลาในการเดินทางโดยรถยนต์ส่วนบุคคลและรถไฟฟ้าสายสีเขียว (นาที) ตามลำดับ

พิจารณาค่าคงที่ ผู้เดินทางจะมีความพึงพอใจในการเดินทางด้วยรถยนต์ส่วนบุคคลมากกว่ารถไฟฟ้า เนื่องจากค่าคงที่ของสมการอรรถประโยชน์กรณีของรถยนต์ส่วนบุคคลแสดงเป็นค่าบวก

พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ ปัจจัยด้านเวลาและค่าใช้จ่ายเป็นไปตามสมมติฐานที่ได้คาดการณ์ไว้ เนื่องจากหากการเดินทางทั้ง 2 กรณีเมื่อเวลาและค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ผู้เดินทางจะเลือกเดินทางด้วยรูปแบบการเดินทางนั้นน้อยลงดังเครื่องหมายลบที่แสดงไว้ในสมการ

การวิเคราะห์มูลค่าเวลาในการเดินทางของตัวแทนกลุ่มตัวอย่างบุคลากรมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ แสดงให้เห็นถึงจำนวนเงินที่กลุ่มตัวอย่างยินดีจ่ายเพิ่มขึ้นเพื่อแลกกับเวลาที่สูญเสียในการเดินทาง กรณีที่ 1 คือ 0.739 บาทต่อนาที หรือ 44.34 บาทต่อชั่วโมง และกรณีที่ 2 คือ 0.657 บาทต่อนาที หรือ 39.3 บาทต่อชั่วโมง

4.4 การวิเคราะห์ปัจจัย (Factor Analysis)

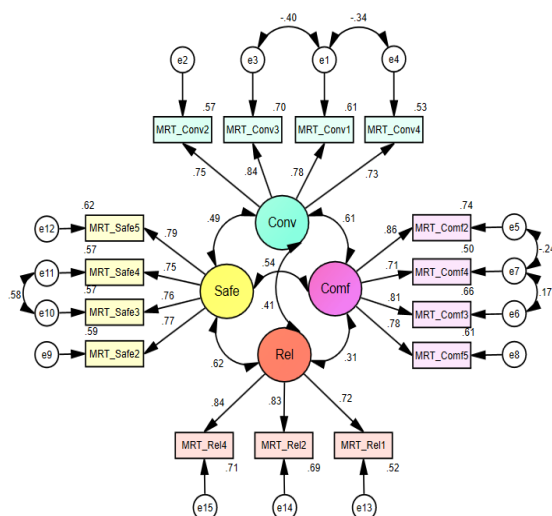
4.4.1 การวิเคราะห์ปัจจัยเชิงสำรวจ (EFA)

ในการสร้างแบบสอบถามถึงแม้ผู้วิจัยจะสร้างปัจจัยหรือข้อคำถามขึ้นมาโดยผ่านการทบทวนจากทฤษฎีที่เกี่ยวข้องแล้วนั้น แต่บางคำถามอาจไม่มีความสำคัญต่อรูปแบบการเดินทางในงานวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยจึงใช้เทคนิคลด

ตัวแปรที่ไม่เกี่ยวข้อง จากตารางที่ 2 ข้อคำถามที่ใช้เป็นตัวแปรชี้วัดรถยนต์ส่วนบุคคลและรถไฟฟ้ามีตัวแปรสังเกตได้ 20 ตัวแปร ซึ่งจากการวิเคราะห์มีเพียง 15 ตัวแปรที่มีน้ำหนักปัจจัยที่มากกว่า 0.5 โดยสามารถจัดกลุ่มปัจจัยแฝงได้ 4 กลุ่มซึ่งตรงตามที่คาดการณ์ไว้และในแต่ละปัจจัยแฝงมีข้อคำถามที่ใช้ชี้วัดคะแนนดังต่อไปนี้ ปัจจัยด้านความสะดวกประกอบด้วย 4 ตัวแปร ได้แก่ Conv1, Conv2, Conv3, Conv4 ปัจจัยด้านความสบายประกอบด้วย 4 ตัวแปร ได้แก่ Comf2, Comf3, Comf4, Comf5 ปัจจัยด้านความปลอดภัยประกอบด้วย 4 ตัวแปร ได้แก่ Safe2, Safe3, Safe4, Safe5 และปัจจัยด้านความเชื่อมั่นในการเดินทางประกอบด้วย 3 ตัวแปร ได้แก่ Rel1, Rel2, Rel4

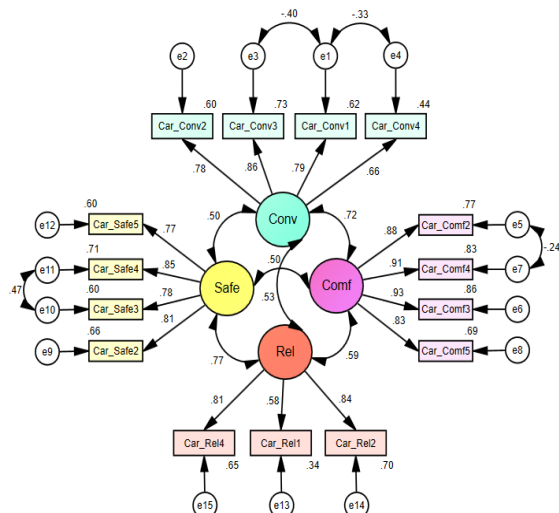
4.4.2 การวิเคราะห์ปัจจัยเชิงยืนยัน (CFA)

จากการวิเคราะห์เชิงสำรวจ (EFA) ตัวแปรอธิบายได้ถูกจัดแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มปัจจัยแฝง จากนั้นนำมาวิเคราะห์ปัจจัยเชิงยืนยันเพื่อยืนยันว่าแบบจำลองจัดอยู่ในกลุ่มมีความเหมาะสมสมบูรณ์มากน้อยเพียงใด โดยวิเคราะห์ในแบบจำลองสมการโครงสร้าง (Structural Equation Modeling) จากโครงสร้างแบบจำลองในรูปที่ 3 และ 4 เห็นได้ว่าปัจจัยแฝงทั้ง 4 ปัจจัยถือว่ามีความสัมพันธ์กันค่อนข้างมากแต่ไม่เกิน 0.8 ดังนั้นจึงไม่เกิดปัญหา Multicollinearity



รูปที่ 3 ปัจจัยเชิงยืนยันของความพึงพอใจในการเดินทางด้วยรถไฟฟ้า

ความเหมาะสมของแบบจำลอง (Model Fit) ของรถไฟฟ้า ได้แก่ Chi-Square เท่ากับ 162.175, Degree of Freedom เท่ากับ 79, Normed Chi-Square เท่ากับ 2.053, RMSEA เท่ากับ 0.51, GFI เท่ากับ 0.949, AGFI เท่ากับ 0.922 และ CFI เท่ากับ 0.974



รูปที่ 4 ปัจจัยเชิงยืนยันของความพึงพอใจในการเดินทางด้วยรถยนต์ส่วนบุคคล

การตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลอง (Model Fit) ของรถยนต์ส่วนบุคคล ได้แก่ Chi-Square เท่ากับ 157.240, Degree of Freedom เท่ากับ 80, Normed Chi-Square เท่ากับ 1.965, RMSEA เท่ากับ 0.49, GFI เท่ากับ 0.951, AGFI เท่ากับ 0.926 และ CFI เท่ากับ 0.981

การวิเคราะห์ปัจจัยเชิงยืนยันของความพึงพอใจในการเลือกรูปแบบการเดินทางทั้ง 2 รูปแบบ สามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองมีความเหมาะสม โดยดูได้จากค่าสถิติตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองดังที่ได้แสดงค่ามาตรฐานไว้ และกล่าวได้ว่าข้อคำถามในตัวแปรอธิบายได้ถูกจัดให้อยู่ในกลุ่มปัจจัยแฝง จากค่าน้ำหนักปัจจัย (Factor Loading) ทั้ง 2 กลุ่มมีค่ามากกว่า 0.5 ขึ้นไป

4.5 แบบจำลองมีมิก (MIMIC Model)

เพื่อให้ง่ายต่อการนำแบบจำลองไปใช้พยากรณ์การเปลี่ยนรูปแบบการเดินทางผู้วิจัยจึงนำเอาแบบจำลองมีมิก

มาเป็นตัวช่วยในการวิเคราะห์เพื่อลดขั้นตอนในการวิเคราะห์หาคำถามของปัจจัยแฝง โดยหากทราบเพียงตัวแปรอิสระ (Independent Variable) ที่ได้จากการสอบถามข้อมูลคุณลักษณะทางเศรษฐกิจและสังคมของผู้เดินทางและข้อมูลลักษณะการเดินทางในปัจจุบันของผู้เดินทาง ก็สามารถคาดการณ์น้ำหนักของปัจจัยแฝงหรือในที่นี้เรียกว่าตัวแปรตาม (Dependent Variable) ทั้ง 4 ตัวที่สนใจ ได้แก่ ปัจจัยด้านความสะดวก ปัจจัยด้านความสบาย ปัจจัยด้านความปลอดภัย และปัจจัยด้านความเชื่อมั่นในการเดินทาง ได้โดยง่าย โดยแบบจำลองมีมิจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ประกอบไปด้วย

ส่วนที่ 1 Formative (หัวลูกศรวิ่งเข้าหาปัจจัยแฝง) เป็นส่วนที่ 1 และ 2 ที่ได้จากการสอบถามข้อมูลทั่วไปของกลุ่มตัวอย่าง โดยตัวแปรแต่ละตัวหัวลูกศรวิ่งออกไปหาปัจจัยแฝงเพื่อร่วมอธิบายปัจจัยแฝง โดยตัวแปรที่ได้จากการสอบถามข้อมูลลักษณะส่วนบุคคลควรมีนัยสำคัญทางสถิติเพื่อเพิ่มความถูกต้องของแบบจำลองให้ดียิ่งขึ้น

ส่วนที่ 2 Reflective (หัวลูกศรวิ่งออกจากปัจจัยแฝง) เป็นส่วนที่ได้จากแบบสอบถามในส่วนที่ 3 (ข้อมูลเกี่ยวกับทัศนคติในการเลือกรูปแบบการเดินทางของผู้เดินทาง) หรือตัวแปรสังเกตซึ่งได้จากการจัดกลุ่มตัวแปรในการวิเคราะห์ปัจจัยในหัวข้อที่ 4 โดยกลุ่มตัวแปรสังเกตแต่ละตัวจะถูกอธิบายด้วยปัจจัยแฝงในกลุ่มนั้นเพียงตัวเดียวดังรูปแบบสมการ

ตัวแปรที่ใช้อธิบายปัจจัยแฝงของแบบจำลองทั้ง 2 แบบจำลองมีตัวแปรที่ใช้วัดตัวเดียวกัน ได้แก่ อายุ ระดับการศึกษา รายได้ต่อเดือน ค่าใช้จ่ายในการเดินทางต่อเที่ยว และผู้ร่วมเดินทาง กล่าวได้ว่าจากข้อมูลส่วนบุคคลทั้ง 5 คำถามนี้มีผลต่อการเลือกรูปแบบการเดินทางที่ใช้ในการเดินทางทั้ง 2 รูปแบบแสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องของแบบจำลองอย่างมีนัยสำคัญ ข้อมูลส่วนบุคคลที่นอกเหนือจากตารางที่ 5 ไม่ใช่ว่าไม่มีความสำคัญ แต่เนื่องด้วยเมื่อนำมาวิเคราะห์ในแบบจำลอง ค่าสัมประสิทธิ์ตัวแปรไม่มีนัยสำคัญทางสถิติจึงไม่นำมาวิเคราะห์ร่วมด้วย

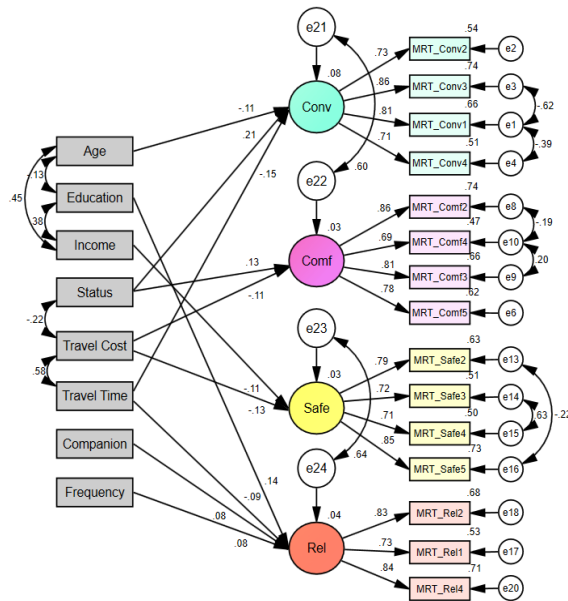
ตารางที่ 5 มาตรฐานและค่าสถิติของตัวแปรลักษณะส่วนบุคคล

ตัวแปร	มาตรฐาน	จำนวน	ร้อยละ(%)
เพศ (Gender)	1. ชาย	131	32.8
	2. หญิง	269	67.3
อายุ (Age)	1. ต่ำกว่า 20 ปี	7	1.8
	2. 20-30 ปี	107	26.8
	3. 31-40 ปี	130	32.5
	4. 41-50 ปี	101	25.3
	5. 51 ปีขึ้นไป	55	13.8
ระดับการศึกษา (Education)	1. ต่ำกว่าปริญญาตรี	53	13.3
	2. ปริญญาตรี	240	60.0
	3. ปริญญาโท	94	23.5
	4. ปริญญาเอก	13	3.3
รายได้ต่อเดือน (Income)	1. ต่ำกว่า 15,000 บาท	82	20.5
	2. 15,000-25,000 บาท	203	50.8
	3. 25,001-35,000 บาท	67	16.8
	4. 35,001-45,000 บาท	20	5.0
	5. 45,001-60,000 บาท	14	3.5
	6. > 60,001 ขึ้นไป	14	3.5
วัตถุประสงค์ (Trip Purpose)	1. ทำงาน	369	92.3
	2. อื่นๆ	31	7.7
สถานภาพ (Status)	1. ผู้ขับขี่	229	57.3
	2. ผู้โดยสาร	171	42.3
ความถี่การเดินทาง (Frequency)	1. 1-2 วัน	3	0.8
	2. 3-4 วัน	17	4.2
	3. 5 วันขึ้นไป	380	95
สัมภาระ (Bag)	1. ไม่มี	14	3.5
	2. มี	386	96.5
ผู้ร่วมเดินทาง (Companion)	1. ไม่เกิน 1 คน	305	76.3
	2. 2 คนขึ้นไป	95	23.7
ค่าใช้จ่าย (Travel Cost)	หน่วยเป็นบาท		
เวลา (Travel Time)	หน่วยเป็นนาที		

4.5.1 แบบจำลองมีมิของรถไฟฟ้า

แบบจำลองมีมิของรถไฟฟ้า มีตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้เป็นตัวชี้วัดของกลุ่มปัจจัยแฝงแต่ละกลุ่ม โดยเป็นตัวแปรที่ได้จากคำถามในแบบสอบถามข้อมูลลักษณะส่วนบุคคล

ทั่วไปส่วนที่ 1 และ 2 ของผู้ตอบแบบสอบถามทั้ง 8 ตัวแปร ได้แก่ อายุ การศึกษา รายได้ต่อเดือน สถานภาพ ค่าใช้จ่ายในการเดินทางต่อเที่ยว เวลาในการเดินทางต่อเที่ยว ผู้ร่วมเดินทาง และความถี่ในการเดินทาง โครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 แบบจำลองมีมิคของรถไฟฟ้า

(Standardized Estimates)

จากการแทนค่าสัมประสิทธิ์ในแบบจำลองหน่วยตัวแปรที่ใช้วัดในแบบสอบถามเป็นคนละหน่วย ดังนั้นเมื่อแทนค่ากลับในสมการจึงต้องนำค่าจากแบบจำลองในรูปแบบที่เป็น Unstandardized มาแทนในสมการและไม่รวมในส่วนของ e (Error) เนื่องจากเป็นความคลาดเคลื่อนของความแปรปรวน (Variance) โดยรูปแบบสมการของแบบจำลองรถไฟฟ้าของแต่ละปัจจัยแปดมีดังต่อไปนี้

$$F1_{MRT} = -0.09Age + 0.35Status - 0.003Travel_Time \quad (15)$$

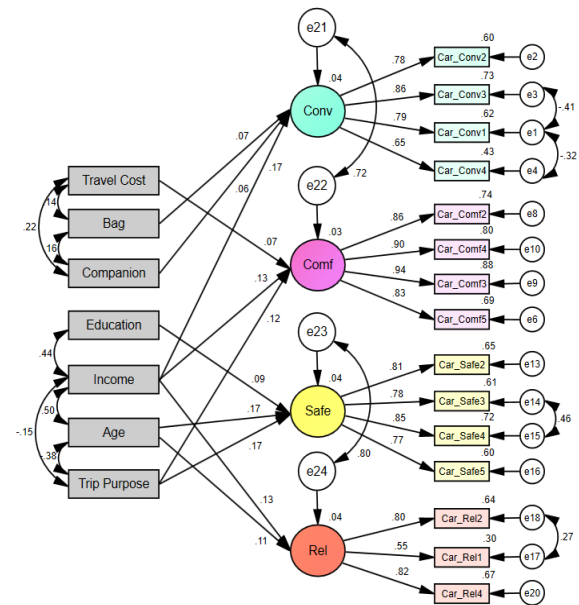
$$F2_{MRT} = 0.152Status - 0.001Travel_Cost \quad (16)$$

$$F3_{MRT} = -0.071Income - 0.001Travel_Cost \quad (17)$$

$$F4_{MRT} = 0.121Education - 0.002Travel_Time + 0.118Companion + 0.190Frequency \quad (18)$$

การตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลอง (Model Fit) ของรถไฟฟ้า พบว่ามีค่า Chi-Square เท่ากับ 490.515, Degree of Freedom เท่ากับ 214, Normed Chi-Square เท่ากับ 2.292, RMSEA เท่ากับ 0.570, GFI เท่ากับ 0.905, AGFI เท่ากับ 0.877 และ CFI เท่ากับ 0.926

4.5.2 แบบจำลองมีมิคของรถยนต์ส่วนบุคคล



รูปที่ 6 แบบจำลองมีมิคของรถยนต์ส่วนบุคคล

(Standardized Estimates)

แบบจำลองมีมิคของรถยนต์ส่วนบุคคล มีตัวแปรที่ใช้เป็นตัวชี้วัดกลุ่มปัจจัยแปด 7 ตัวแปร ได้แก่ อายุ ระดับการศึกษา รายได้ต่อเดือน วัตถุประสงค์ในการเดินทาง ค่าใช้จ่ายในการเดินทางต่อเที่ยว ผู้ร่วมเดินทางและจำนวนสัมภาระ ดังแสดงในรูปที่ 6 โดยรูปแบบสมการของแบบจำลองมีมิคของรถยนต์ส่วนบุคคลของแต่ละปัจจัยแปดมีดังต่อไปนี้

$$F1_{Car} = 0.092Income + 0.047Bag + 0.043Companion \quad (19)$$

$$F2_{Car} = 0.070Income + 0.302Trip_Purpose + 0.001Travel_Cost \quad (20)$$

$$F3_{Car} = 0.110Age + 0.089Education + 0.422Trip_Purpose \quad (21)$$

$$F4_{Car} = 0.056Age + 0.055Income \quad (22)$$

การตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลอง (Model Fit) ของรถยนต์ส่วนบุคคล พบว่ามีค่า Chi-Square เท่ากับ 474.004, Degree of Freedom เท่ากับ 192, Normed Chi-Square เท่ากับ 2.469, RMSEA เท่ากับ 0.61, GFI เท่ากับ 0.912, AGFI เท่ากับ 0.884 และ CFI เท่ากับ 0.936

ตัวแปรทั้งหมดแสดงถึงความสอดคล้องของการตัดสินใจของผู้ตอบแบบสอบถามที่บ่งชี้จากเครื่องหมายในค่าสัมประสิทธิ์ด้านต่าง ๆ และภาพรวมค่าทางสถิติต่าง ๆ ของแบบจำลองถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ดังนั้นจึงถือว่าแบบจำลองมีความกลมกลืนเชิงประจักษ์

4.6 แบบจำลองทางเลือกที่รวมปัจจัยแฝง (Hybrid Choice Model)

เนื้อหาในหัวข้อนี้เกี่ยวข้องกับการผสมผสานแบบจำลองอรรถประโยชน์แบบดั้งเดิมที่แสดงไว้ในหัวข้อที่ 4.3 ร่วมกับแบบมีมิติที่แสดงไว้ในหัวข้อที่ 4.5 ที่เพิ่มปัจจัยแฝงด้านทัศนคติและจิตวิทยาเข้ามา 4 ปัจจัย ได้แก่ ปัจจัยด้านความสะดวก ปัจจัยด้านความสบาย ปัจจัยด้านความปลอดภัยและปัจจัยด้านความเชื่อมั่นในการเดินทาง ซึ่งถือได้ว่าเป็นปัจจัยที่ผู้เดินทางให้ความสำคัญในการตัดสินใจเลือกรูปแบบการเดินทางในปัจจุบัน จากการวิเคราะห์แบบจำลองทางเลือกที่รวมปัจจัยแฝงด้วยโปรแกรม NLogit แสดงรูปแบบสมการบางสมการไม่ตรงตามที่คาดการณ์ไว้และมีค่าสัมประสิทธิ์ในบางตัวแปรไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ เพื่อลดความผิดพลาดของเครื่องหมายหน้าค่าสัมประสิทธิ์และเพิ่มความถูกต้องแบบจำลองผู้วิจัยจึงใช้วิธีการรวมปัจจัย Composite Variable เพื่อรวมปัจจัยแฝงทั้ง 4 ปัจจัยเข้าเป็นปัจจัยเดียวกันโดยเรียกว่า ปัจจัยที่เกิดจากทัศนคติของผู้เดินทาง (Travelers Attitude) ด้วยวิธีหาค่าเฉลี่ยเลขคณิต Arithmetic Mean ดังแสดงรูปแบบสมการที่เหมาะสมและดีที่สุดต่อไปนี้

กรณีที่ 1 การเปลี่ยนรูปแบบการเดินทางจากรถยนต์ส่วนบุคคลมาเลือกใช้รถไฟฟ้าแล้วต่อด้วยรถโดยสารประจำทางภายในมหาวิทยาลัย มีสมการอรรถประโยชน์เป็นดังแสดง

$$U_{Car} = 2.702 - 0.116Cost_{Car} - 0.087Time_{Car} - 0.776Travelers_Att_{Car} \quad (23)$$

$$U_{MRT} = -0.116Cost_{MRT} - 0.087Time_{MRT} + 3.072Travelers_Att_{MRT} \quad (24)$$

เนื่องจากปัจจัยแฝงด้านทัศนคติของผู้เดินทางที่มีผลต่อการเลือกรูปแบบการเดินทางด้วยรถยนต์ส่วนบุคคล $Travelers_Att_{Car}$ มีเครื่องหมายทางคณิตศาสตร์หน้าตัวแปรไม่ตรงตามที่คาดการณ์ไว้แต่เนื่องจากไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ หากนำไปวิเคราะห์และหรือพยากรณ์ไม่จำเป็นต้องนำปัจจัยดังกล่าววิเคราะห์หรือใส่ในสมการรวมด้วย ดังนั้นสมการอรรถประโยชน์ในกรณีที่ 1 สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

$$U_{Car} = 2.702 - 0.116Cost_{Car} - 0.087Time_{Car} \quad (25)$$

$$U_{MRT} = -0.116Cost_{MRT} - 0.087Time_{MRT} + 3.072Travelers_Att_{MRT} \quad (26)$$

เมื่อแทนค่าสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปร $Travelers_Att_{MRT}$ เท่ากับ 3.072 กลับเข้าไปในสมการ โดยที่ $Travelers_Att_{MRT}$ เท่ากับ Average ($F1_{MRT}$, $F2_{MRT}$, $F3_{MRT}$, $F4_{MRT}$) จะได้สมการของปัจจัยแฝงแต่ละปัจจัยที่พิจารณาจากคุณลักษณะส่วนบุคคลของผู้ตอบแบบสอบถาม ดังต่อไปนี้

รถไฟฟ้า ($Travelers_Att_{MRT}$) :

$$F1_{MRT} = -0.069Age + 0.27Status - 0.0023Travel_Time \quad (27)$$

$$F2_{MRT} = 0.117Status - 0.000768Travel_Cost \quad (28)$$

$$F3_{MRT} = -0.0545Income - 0.000768Travel_Cost \quad (29)$$

$$F4_{MRT} = 0.0929Education - 0.00154Travel_Time + 0.0906Companion + 0.146Frequency \quad (30)$$

กรณีที่ 2 การเปลี่ยนรูปแบบการเดินทางจากรถยนต์ส่วนบุคคลมาเลือกใช้รถไฟฟ้าแล้วต่อด้วยรถจักรยานยนต์รับจ้าง

$$U_{Car} = 1.45 - 0.103Cost_{Car} - 0.0717Time_{Car} \quad (31)$$

$$U_{MRT} = -0.103Cost_{MRT} - 0.0717Time_{MRT} + 2.233Travelers_Att_{MRT} \quad (32)$$

เช่นเดียวกันกับกรณีที่ 1 เมื่อแทนค่าสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปร $Travelers_Att_{MRT}$ ที่มีค่าเท่ากับ 2.233 กลับเข้าไปในสมการ $Travelers_Att_{MRT}$ เท่ากับ Average ($F1_{MRT}$, $F2_{MRT}$, $F3_{MRT}$, $F4_{MRT}$) จะได้สมการของปัจจัยแฝงแต่ละปัจจัยที่พิจารณาคุณลักษณะส่วนบุคคลของผู้ตอบแบบสอบถามดังต่อไปนี้

รถไฟฟ้า ($Travelers_Att_{MRT}$) :

$$F1_{MRT} = -0.05Age + 0.2Status - 0.00167Travel_Time \quad (33)$$

$$F2_{MRT} = 0.0848Status - 0.000558Travel_Cost \quad (34)$$

$$F3_{MRT} = -0.0696Income - 0.000558Travel_Cost \quad (35)$$

$$F4_{MRT} = 0.0675Education - 0.00112Travel_Time + 0.0658Companion + 0.106Frequency \quad (36)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองทั้ง 2 กรณี มีค่าเป็นลบที่ปัจจัยด้านเวลาและค่าใช้จ่าย และมีค่าเป็นบวกที่ปัจจัยทัศนคติของผู้เดินทางที่มีผลต่อการเลือกรูปแบบการเดินทางด้วยรถไฟฟ้า $Traveller_Att_{MRT}$ ซึ่งเป็นไปตามคาดการณ์ กล่าวคือ เมื่อเวลาและค่าใช้จ่ายในการเดินทางลดลง ปัจจัยด้านความสะดวก ความสบาย ความปลอดภัย และความเชื่อมั่นในการเดินทางด้วยรถไฟฟ้าเพิ่มขึ้นก็จะส่งผลให้ผู้เดินทางเลือกใช้รูปแบบการเดินทางด้วยรถไฟฟ้ามากขึ้นเช่นกัน

มูลค่าเวลาในการเดินทางของตัวแทนกลุ่มตัวอย่างบุคลากรมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์แสดงให้เห็นถึงจำนวนเงินที่กลุ่มตัวอย่างยินดีจ่ายเพิ่มขึ้นเพื่อแลกกับเวลาที่สูญเสียในการเดินทางกรณีที่ 1 คือ 0.75 บาทต่อนาที หรือ 45 บาทต่อชั่วโมง และกรณีที่ 2 คือ 0.696 บาทต่อนาที หรือ 41.77 บาทต่อชั่วโมง

4.7 การเปรียบเทียบแบบจำลอง

จากแบบจำลองทั้ง 2 รูปแบบ ได้แก่ แบบจำลองแบบทางเลือกดั้งเดิมที่คำนึงเฉพาะปัจจัยด้านเวลาและค่าใช้จ่าย และแบบจำลองทางเลือกที่รวมปัจจัยแฝงด้วยวิธีมิมิก ที่เพิ่มในส่วนของปัจจัยด้านจิตวิทยาและทัศนคติ คือ ปัจจัยด้านความสะดวก ปัจจัยด้านความสบาย ปัจจัยด้านความปลอดภัยและปัจจัยด้านความเชื่อมั่นในการให้บริการ ในหัวข้อนี้จะนำแบบจำลองทั้ง 2 มาเปรียบเทียบในเชิงค่าสถิติหากต้องนำแบบจำลองไปพยากรณ์และหรือใช้ประโยชน์ในอนาคต แบบจำลองใดส่งผลดีและง่ายต่อการนำไปใช้งาน โดยผลการเปรียบเทียบเป็นดังแสดงต่อไปนี้

ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบค่าทางสถิติระหว่างแบบจำลองทางเลือกแบบดั้งเดิมกับแบบจำลองทางเลือกที่รวมปัจจัยแฝง

ประเภทข้อมูล	Mode Choice Model		Hybrid Choice Model	
	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2
ASC_Car	1.614 ***	0.934 ***	2.702 ***	1.450 ***
Time	-0.083 ***	-0.066 ***	-0.087 ***	-0.072 ***
Cost	-0.112 ***	-0.101 ***	-0.116 ***	-0.103 ***
$Traveller_Att_{Car}$			-0.776	
$Traveller_Att_{MRT}$			3.072 ***	2.233 ***
McFadden R-Square	0.248	0.215	0.258	0.222
Log-Likelihood	-1724.6	-1806.3	-1701.5	-1791.2
%Correct	75.83	73.75	76.39	74.25
McFadden R-Square			+4.03%	+3.26%
Log-Likelihood			-1.34%	-0.83%
% Correct			+0.74%	+0.68%

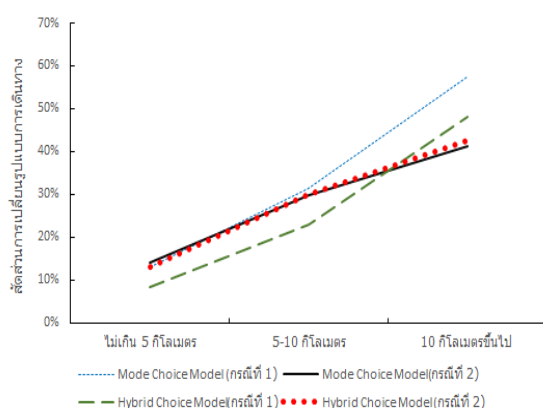
หมายเหตุ: ***, **, * ระดับนัยสำคัญ (Level of significance)

1%, 5%, 10%

เมื่อเปรียบเทียบแบบจำลองทางเลือกแบบดั้งเดิมกับแบบจำลองทางเลือกที่รวมปัจจัยแฝงด้วยวิธีมิมิค เห็นได้ว่าแบบจำลองทางเลือกที่รวมปัจจัยแฝงด้วยวิธีมิมิคนั้นให้ค่าความถูกต้องทางสถิติ ได้แก่ ค่าMcFadden R-Square และ %Correct ที่สูงกว่า จากนั้นจึงนำแบบจำลองทางเลือกที่รวมปัจจัยแฝงด้วยวิธีมิมิคมาหาสัดส่วนการเปลี่ยนรูปแบบการเดินทางเทียบกับแบบจำลองทางเลือกดั้งเดิมที่คำนึงเฉพาะปัจจัยด้านเวลาและค่าใช้จ่าย ได้ผลการเปรียบเทียบเป็นดังแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ค่าสัดส่วนความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนรูปแบบการเดินทางจากรถยนต์ส่วนบุคคลมาเลือกใช้รถไฟฟ้า

แบบจำลอง	ระยะทาง (กิโลเมตร)	กรณี 1 (%)	กรณี 2 (%)
Mode Choice Model	ไม่เกิน 5	13.2	14
	5 - 10	31.5	29.9
	10 ขึ้นไป	57.4	41.2
Hybrid Choice Model	ไม่เกิน 5	8.5	13.1
	5 - 10	22.9	29.9
	10 ขึ้นไป	48	42.5



รูปที่ 7 สัดส่วนความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนรูปแบบการเดินทางทั้ง 2 รูปแบบการเดินทาง

5. สรุป

จากการพัฒนาแบบจำลองทางเลือกทั้ง 2 แบบจำลอง ได้แก่ การวิเคราะห์แบบจำลองทางเลือกแบบดั้งเดิมและการวิเคราะห์แบบจำลองทางเลือกที่รวมปัจจัยแฝงด้าน

ทัศนคติและจิตวิทยา (Hybrid Choice Models) เห็นได้ว่าแบบจำลองทางเลือกที่รวมปัจจัยแฝงมีประสิทธิภาพของแบบจำลองซึ่งพิจารณาจากค่าสถิติ McFadden R-Square มีค่าเพิ่มขึ้นจากแบบจำลองทางเลือกแบบดั้งเดิมร้อยละ 4.03 และ 3.26 ในกรณีของการเปลี่ยนรูปแบบการเดินทางจากรถยนต์ส่วนบุคคลมาเลือกเดินทางด้วยรถไฟฟ้าแล้วเดินทางเชื่อมต่อภายในด้วยรถโดยสารประจำทางของมหาวิทยาลัย (กรณีที่ 1) และกรณีของการเปลี่ยนรูปแบบการเดินทางจากรถยนต์ส่วนบุคคลมาเลือกเดินทางด้วยรถไฟฟ้าแล้วเดินทางเชื่อมต่อภายในโดยรถจักรยานยนต์รับจ้าง (กรณีที่ 2) ตามลำดับ และมีค่าความแม่นยำในการพยากรณ์แบบจำลอง (% Correct) เพิ่มขึ้นร้อยละ 0.74 และ 0.68 ในกรณีที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

หากพิจารณาถึงการเชื่อมต่อภายในจะเห็นว่า กลุ่มตัวอย่างมีแนวโน้มความต้องการในการเปลี่ยนรูปแบบการเดินทางจากรถยนต์ส่วนบุคคลมาเลือกเดินทางด้วยรถไฟฟ้าแล้วเดินทางต่อด้วยรถโดยสารประจำทางของมหาวิทยาลัย (กรณีที่ 1) เพื่อเข้าถึงตัวอาคาร สำนักงาน มากกว่าการเลือกรูปแบบการเชื่อมต่อภายในโดยรถจักรยานยนต์รับจ้าง (กรณีที่ 2) เนื่องจากการเดินทางด้วยรถโดยสารประจำทางของมหาวิทยาลัยไม่มีค่าใช้จ่ายเพิ่มเติม ผู้เดินทางจึงประหยัดค่าใช้จ่ายทั้งในส่วน of รูปแบบการเดินทางหลัก คือ รถไฟฟ้าและรูปแบบการเดินทางรอง คือ การเชื่อมต่อภายในด้วยรถโดยสารประจำทางของมหาวิทยาลัยมากกว่าการเชื่อมต่อภายในโดยรถจักรยานยนต์รับจ้าง

โดยสาเหตุที่การวิเคราะห์แบบจำลองทางเลือกที่รวมปัจจัยแฝงต้องนำเอาปัจจัยแฝงทั้ง 4 ตัวมารวมกันแล้วหาค่าเฉลี่ย Arithmetic Mean มาจาก ประการแรก เมื่อนำปัจจัยทั้ง 6 ตัว ได้แก่ ปัจจัยด้านเวลา ค่าใช้จ่าย ความสะดวก ความสบาย ความปลอดภัยและความเชื่อมั่นในการเดินทางมาทำการวิเคราะห์ร่วมกัน รูปแบบสมการที่ได้ให้ค่าประสมประสิทธิ์ของตัวแปรไม่ตรงตามหลักเหตุและผล ประการที่สอง สังเกตได้ว่าปัจจัยแฝงทั้ง 4 ตัวมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันค่อนข้างสูงแต่ไม่เกินค่า 0.8 จนทำให้เกิดปัญหา Multicollinearity และประการสุดท้าย

มาจากข้อจำกัดในขั้นตอนการสร้างแบบสอบถามเนื่องจากคำถามในส่วนของความพอใจในการเดินทาง (ปัจจัยแฝงทั้ง 4 ปัจจัย) ไม่ได้รวมอยู่ในส่วนของการวิเคราะห์ทางเลือกที่มีเฉพาะปัจจัยด้านเวลาและค่าใช้จ่าย กลุ่มตัวอย่างจึงไม่ได้ นำปัจจัยแฝงเหล่านี้พิจารณาพร้อมกับปัจจัยด้านเวลาและค่าใช้จ่าย ซึ่งหากนำปัจจัยทั้ง 6 ปัจจัยมาสร้างสถานการณ์สมมติให้กลุ่มตัวอย่างพิจารณาร่วมกันในครั้งเดียวก็จะส่งผลให้จำนวนสถานการณ์มีมากจนเกินไป กลุ่มตัวอย่างยากต่อการทำความเข้าใจ การพินิจพิจารณาและตัดสินใจ จนอาจก่อให้เกิดความสับสน ผลที่ได้จากการตอบแบบสอบถามก็จะไม่มีความน่าเชื่อถือ และกลุ่มตัวอย่างอาจใช้เวลาตอบแบบสอบถามเป็นเวลานานจนเกิดความรู้สึกเหนื่อยล้าในการตอบแบบสอบถามได้เช่นกัน

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คณบดีและผู้อำนวยการของทุกคณะและวิทยาลัย ในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเก็บแบบสำรวจข้อมูลเพื่อใช้ประกอบการทำวิจัยนี้ ขอขอบพระคุณ กลุ่มตัวอย่าง ซึ่งเป็นตัวแทนบุคลากรชาวเกษตรศาสตร์ รวมไปถึงผู้ร่วมงานวันเกษตรแห่งชาติ 2560 ทุกท่าน ที่เสียสละเวลาอันมีค่าในการให้ข้อมูลอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัย และขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรเมศวร์ พิริยะวัฒน์ ที่ให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ในการทำวิจัยนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Mass Rapid Transit Authority of Thailand. "MRT Green Line (North) Project, Mo Chit - Saphan Mai - Khu Khot Section," 2015. [Online]. Available: <https://en.mrta-greenlinenorth.com>. [Accessed May. 1, 2018].
- [2] M. E. Ben-Akiva and S. R. Lerman, Discrete Choice Analysis: Theory and Application to Travel Demand. Cambridge: MIT Press, 1985.
- [3] W. Rujopakarn, *Urban Transportation Planning*. Bangkok: Kasetsart University, 2001. [in Thai]
- [4] D. McFadden, "Quantitative methods for analyzing travel behaviour on individuals: some recent developments," in *Behavioural Travel Modelling*, D. A. Hensher and P. R. Stopher, and C. Helm, Eds. London: Croom Helm, 1978, pp. 279-318.
- [5] J. D. D. Ortuzar and L. G. Willumsen, *Modelling Transport*, 4th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2011.
- [6] C. Spearman, "General intelligence, objectively determined and measured," *American Journal of Psychology*, vol. 15, no. 2, pp. 201-293, April 1904. [Online]. Available: JSTOR, <https://www.jstor.org/stable/1412107>. [Accessed May. 1, 2018].
- [7] S. Wright, "The method of path coefficients," *The Annals of Mathematical Statistics*, vol. 5, no. 3, pp. 161-215, September 1934. [Online]. Available: JSTOR, <https://www.jstor.org/stable/2957502>. [Accessed May. 1, 2018].
- [8] K. A. Bollen, *Structural Equations with Latent Variables*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 1989.
- [9] B. E. Kline, *Principles and Practice of Structural Equation Modelling*, 3rd ed. New York: The Guilford Press, 2011.
- [10] J. F. Hair, B. J. Banbin, R. E. Anderson, and W. C. Black, *Multivariate Data Analysis*, 7th ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2013.
- [11] K. Vanichbancha, *Structural Equation Modelling with AMOS*. Bangkok: Samlada Partnership Limited, 2014. [in Thai]
- [12] S. Piriyawat, *Structural Equation Modelling and Travel Behaviour Study*. Chonburi: Burapha University, September 2010. [in Thai]. [Online]. Available: http://www.surames.com/images/column_1227454930/SEMandTransportStudy.pdf. [Accessed May. 1, 2018].

- [13] N. Wiratchai, *LISREL Model: Statistical Analysis for Research*, 3rd ed. Bangkok: Chulalongkorn University Printing Office, 1999. [in Thai]
- [14] A. M. Anwar, A. K. Tieu, P. Gibson, M. J. Berryman, K. T. Win, A. McCusker, and P. Perez, "Temporal and parametric study of traveller preference heterogeneity using random parameter logit model," *International Journal for Traffic and Transport Engineering*, vol. 4, no. 4, pp. 437-455, 2014.
- [15] J. F. Hair, W. C. Black, B. J. Babin, R. E. Anderson, and R. L. Tatham, *Multivariate Data Analysis*. 6th ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall. 2006.
- [16] M. E. Ben-Akiva, J. Walker, A. T. Bernardino, D. A. Gopinath, T. Morikawa, and A. Polydoropoulou, "Integration of Choice and Latent Variable Models," October 1999. Available: http://www.joanwalker.com/uploads/3/6/9/5/3695513/benakivawalkeretal_iclv_chapter_2002.pdf. [Accessed May. 1, 2018].
- [17] M. E. Ben-Akiva, D. McFadden, K. Train, J. Walker, C. Bhat, M. Bierlaire, D. Bolduc, A. Boersch-Supan, D. Brownstone, D. S. Bunch, A. Daly, D. Gopinath, A. Karlstrom, and M. A. Munizaga, "Hybrid choice models: progress and challenges," *Marketing Letters*, vol. 13, no. 3, Choice Modeling, pp. 163-175, August 2002. [Online]. Available: Springer, <https://www.jstor.org/stable/40216632>. [Accessed May. 1, 2018].
- [18] J. Kim, S. Rasouli, and H. Timmermans, "Hybrid choice models: Principles and recent progress incorporating social influence and nonlinear utility functions," *Procedia Environmental Sciences*, Vol. 22, pp. 20-34, 2014.
- [19] T. Yamane, *Statistics: An Introductory Analysis*, 2nd ed. New York: Harper and Row, 1967.
- [20] L. Eboli and G. Mazzulla, "Performance indicators for an objective measure of public transport service quality," *European Transport\Trasporti Europri*, vol. 51, pp. 1-4, 2012.
- [21] K. Vanichbancha, *Data Analysis with SPSS for Windows*, 11th ed. Bangkok: Dharmasam Printing Company Limited, 2008. [in Thai]
- [22] A. P. Field, *Discovering Statistics Using SPSS*, 2nd ed. London: Sage, 2005.

การผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมที่มีการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยใช้ลมจากระบบระบายอากาศของการทำความเย็นแบบระเหยน้ำ Wind Turbine Generator with Maximum Power Point Tracking Using Wind form Evaporative Cooling System

โกศล ชัยเจริญอุดมรุ่ง¹ กองพัน อารีรักษ์^{1*} กองพล อารีรักษ์¹ อธิษฐ์ เสรีขจรจารุ² วรวิทย์ ศรีมะเร็ง²

¹กลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 30000

²บริษัท ซีพีเอฟ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) 128 ถ. เจริญจิต แขวงทุ่งวัดดอน เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120

Koson Chaicharoenaudomrung¹ Kongpan Areerak^{1*} Kongpol Areerak¹

Theesit Sereekhajornjaru² Woravit Srimaroeng²

¹Power Electronic, Energy, Machines and Control Research Group, School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology 30000

²CPF (Thailand) Public Company Limited, 128 Yenichit Road, Thungwatdom, Sathorn, Bangkok 10120, Thailand

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

(Received: September 3, 2018; Accepted: October 30, 2018)

บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานลมจากระบบระบายอากาศของโรงเรือนที่มีการทำความเย็นแบบระเหยน้ำ โดยอาศัยระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า พลังงานเอาต์พุตของกังหันลมที่สกัดได้จากพลังงานลมโดยทั่วไปขึ้นอยู่กับความเร็วลมและมีความไม่เป็นเชิงเส้น ในแต่ละความเร็วลมจะมีจุดการทำงานที่มีค่ากำลังสูงสุดเพียงตำแหน่งเดียวเท่านั้น ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องอาศัยระบบควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด ขั้นตอนวิธีการที่นำเสนอจะแสดงให้เห็นว่าสามารถดึงกำลังสูงสุดจากระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าได้ การดำเนินงานวิจัยในเบื้องต้นเป็นการศึกษาและการจำลองสถานการณ์ระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่มีการตามรอยกำลังสูงสุด รวมถึงการพัฒนาและปรับปรุงระบบควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดให้มีประสิทธิภาพ สะดวกต่อการนำไปใช้งาน ผลการทดสอบจากชุดต้นแบบแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าที่ได้นำเสนอโดยใช้ลมจากระบบระบายอากาศของโรงเรือนที่มีการทำความเย็นแบบระเหยน้ำ

คำสำคัญ: ระบบทำความเย็นแบบระเหยน้ำ ระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ การตามรอยจุดกำลังสูงสุด วิธีการรบกวนและการสังเกต ตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก

ABSTRACT

The paper presents a wind power generator from an evaporative cooling system by wind turbine generator system. Generally, the output power of wind turbines extracted from wind energy depends on wind speed in which the characteristic is non-linear. Only one operating point providing

the maximum power is available. Therefore, the maximum power point tracking control is important. The proposed technique will show that the maximum power can be obtained. The simulation and experiment are used to study and develop the maximum power point tracking algorithm. Hardware experimental results from prototype are presented to verify performance of the proposed power generation from evaporative cooling system.

Keyword: Evaporative cooling system, stand-alone wind power generator system, maximum power point tracking, perturbation and observation method, fuzzy logic control.

1. บทนำ

ปัจจุบันความเจริญทางสังคมและอุตสาหกรรมมีการเติบโตเพิ่มขึ้น ทำให้ความต้องการทางพลังงานสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่แหล่งพลังงานส่วนใหญ่ เช่น น้ำมันและก๊าซธรรมชาติ กลับมีแนวโน้มลดลงประกอบกับกระบวนการได้มาซึ่งพลังงาน มักก่อให้เกิดปัญหาทางสิ่งแวดล้อม ด้วยเหตุนี้ จึงทำให้มีการศึกษาและค้นคว้าเกี่ยวกับพลังงานทดแทนในรูปแบบต่าง ๆ พลังงานลมเป็นหนึ่งในพลังงานหมุนเวียนที่ได้รับความนิยมและมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องในการใช้เป็นพลังงานทางเลือกสำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น[1] แหล่งกำเนิดพลังงานลมส่วนใหญ่ได้จากธรรมชาติ แต่ในปัจจุบัน พบว่าตามภาคอุตสาหกรรมที่มีระบบระบายอากาศขนาดใหญ่มีการปลดปล่อยพลังงานลมออกมาตลอดเวลา โดยเฉพาะโรงเรือนที่มีการทำความเย็นแบบระเหยน้ำ (evaporative cooling system) หรือโรงเรือนแบบปิด โรงเรืوندังกล่าวเป็นเทคโนโลยีที่มีการนำเข้ามาใช้สำหรับการปลูกพืชและเลี้ยงสัตว์ในประเทศไทยอย่างแพร่หลาย เทคโนโลยีนี้สามารถควบคุมอุณหภูมิและความชื้นให้เหมาะสมแก่การเจริญเติบโตของพืชและสัตว์ อย่างไรก็ตามโรงเรือนที่มีการทำความเย็นนี้ มีการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบค่อนข้างมาก โดยใน 1 โรงเรือนจำเป็นต้องใช้พัดลมระบายอากาศขนาด 50 นิ้ว จำนวน 5-8 ตัว อยู่ด้านท้ายของโรงเรือน เมื่อระบบควบคุมทำงานจะมีพัดลมระบายอากาศประมาณ 2-3 ตัว ทำงานตลอดเวลา ส่วนพัดลมระบายอากาศที่เหลือจะทำงานเมื่ออุณหภูมิในโรงเรือนสูงขึ้นตามที่ได้ปรับตั้งค่าของระบบควบคุมความเย็นแบบ

อัตโนมัติ ด้วยเหตุนี้จึงมีพลังงานลมที่เกิดขึ้นจากระบบระบายอากาศดังกล่าวตลอดเวลา ซึ่งมีความเร็วลมพอสมควร ทำให้เกิดแนวคิดที่จะนำพลังงานลมดังกล่าวกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ด้วยการนำมาผลิตกระแสไฟฟ้า โดยอาศัยกังหันลมผลิตไฟฟ้า

การใช้งานกังหันลมผลิตไฟฟ้า จำเป็นต้องมีระบบควบคุมการแปลงผันพลังงาน เนื่องจากกังหันลมมีพฤติกรรมพลังงานเอาต์พุตที่ไม่เป็นเชิงเส้นแปรผันตามความเร็วลม[2] กังหันลมผลิตไฟฟ้ามีจุดการทำงานของกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตช่วงกว้าง แต่จุดที่ทำให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดมีเพียงจุดเดียว ปัญหาที่พบคือ จุดการทำงานของกังหันลมผลิตไฟฟ้าอยู่ห่างจากจุดที่ได้กำลังสูงสุด ทำให้สามารถใช้ประโยชน์จากการผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมได้ไม่เต็มที่ ดังนั้น ระบบควบคุมการตามรอยกำลังงานสูงสุด (maximum power point tracking: MPPT) จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการแปลงพลังงานลม ซึ่งไม่เพียงแต่จะทำหน้าที่สกัดกำลังงานให้ได้มากที่สุดแล้ว ยังเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบอีกด้วย โดยงานวิจัยในอดีตถึงปัจจุบัน พบว่า วิธีการตามรอยกำลังงานสูงสุดที่ใช้สำหรับกังหันลมผลิตไฟฟ้าโดยทั่วไปสามารถจำแนกได้ 2 แบบ คือ แบบที่ต้องทราบข้อมูลคุณลักษณะของกังหันลมและแบบที่ไม่ต้องใช้คุณลักษณะของกังหันลม MPPT แบบที่อาศัยคุณลักษณะของกังหันลมจะมีผลตอบสนองที่รวดเร็ว ซึ่งมีอยู่ 3 วิธีด้วยกัน ได้แก่ 1) Tip speed ratio (TRS)[3] และ 2) Power signal feedback (PSF)[4] ทั้งสองวิธีนี้ต้องวัดความเร็วลมและความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและ วิธีที่ 3) Optimal torque control (OTC)[5]

เป็นวิธีที่ไม่ต้องวัดความเร็วลม แต่การควบคุมยังคงต้องใช้พารามิเตอร์เฉพาะตัวของกังหันลม

ขั้นตอนวิธีการค้นหาแบบไต่เขา (hill-climb searching: HCS) หรือวิธีการรบกวนและการสังเกต (perturbation and observation: P&O) เป็นวิธีควบคุม MPPT แบบที่ไม่ต้องใช้คุณลักษณะของกังหันลม[6]-[8] วิธีการนี้อยู่บนพื้นฐานการวนรอบค้นหาจุดการทำงานที่เหมาะสมเป็นวิธีที่เรียบง่ายและมีความยืดหยุ่นสูง นอกจากนี้ยังสามารถดำเนินการควบคุมในแบบไม่มีตัวตรวจวัดความเร็วรอบได้อีกด้วย จึงทำให้มีข้อได้เปรียบมากกว่าวิธีการควบคุมที่อาศัยคุณลักษณะของกังหันลม อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของวิธีการนี้ขึ้นอยู่กับข้อกำหนดขนาดก้าวของการค้นหา (step size) [9]-[11] ดังนั้นในบทความนี้จึงเลือกปรับปรุงวิธีการดังกล่าวโดยนำตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกมาผสมผสานในการกำหนดขนาดก้าวของการค้นหาให้เหมาะสมตามสถานการณ์ต่าง ๆ [12], [13] เพื่อให้การตามรอยจุดกำลังสูงสุดมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น การตรวจสอบความถูกต้องและยืนยันผลศึกษาที่ได้จากวิธีที่พัฒนานี้อาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB และทดสอบชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ รวมถึงการทดสอบจริงจากชุดต้นแบบ กลไกการตามรอยกำลังงานสูงสุด โดยหลักการแล้วเป็นการจัดการให้กำลังเอาต์พุตของกังหันลมผลิตไฟฟ้าอยู่ในระดับที่สูงที่สุดสอดคล้องกับความเร็วลม ซึ่งได้นำมาประยุกต์ใช้เพื่อสกัดพลังงานให้ได้มากที่สุดตามศักยภาพของพลังงานลมที่เกิดจากระบายอากาศของระบบทำความเย็นแบบระเหยน้ำเพื่อเป็นการนำพลังงานที่ทิ้งเปล่ากลับมาใช้ประโยชน์ให้ได้มากที่สุด

บทความนี้ประกอบด้วย 7 ส่วน ดังนี้ โครงสร้างระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ แบบจำลองกังหันลมและพฤติกรรมของระบบแปลงผันพลังงานลมแบบอิสระแสดงในส่วนที่ 2 ส่วนที่ 3 แสดงหลักการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O และวิธีการที่ได้พัฒนา ผลการจำลองสถานการณ์แสดงในส่วนที่ 4 ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการและการทดสอบด้วยชุดต้นแบบแสดงใน

ส่วนที่ 5 และส่วนที่ 6 ตามลำดับ ในส่วนที่ 7 เป็นการสรุปของบทความ

2. การผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด

พลังงานลมที่เกิดจากระบบระบายอากาศของการทำความเย็นแบบระเหยน้ำมีความเร็วลมที่วัดจากระยะห่างพัดลมระบายอากาศ 1.2 m ได้ความเร็วลมประมาณ 3-5 m/s เพียงพอสำหรับการเริ่มหมุนกังหันลม เพราะความเร็วเริ่มหมุนของกังหันลมขนาดเล็กโดยทั่วไปอยู่ที่ 2 m/s จึงมีความเป็นไปได้ที่จะสามารถนำพลังงานลมดังกล่าวมาใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า โดยอาศัยระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดที่เป็นระบบแบบอิสระดังแสดงในรูปที่ 1 ระบบดังกล่าวประกอบด้วย 2 ส่วนที่สำคัญ คือ ระบบทางกลและระบบทางไฟฟ้า โดยมีรายละเอียด ดังนี้

2.1 ระบบทางกล

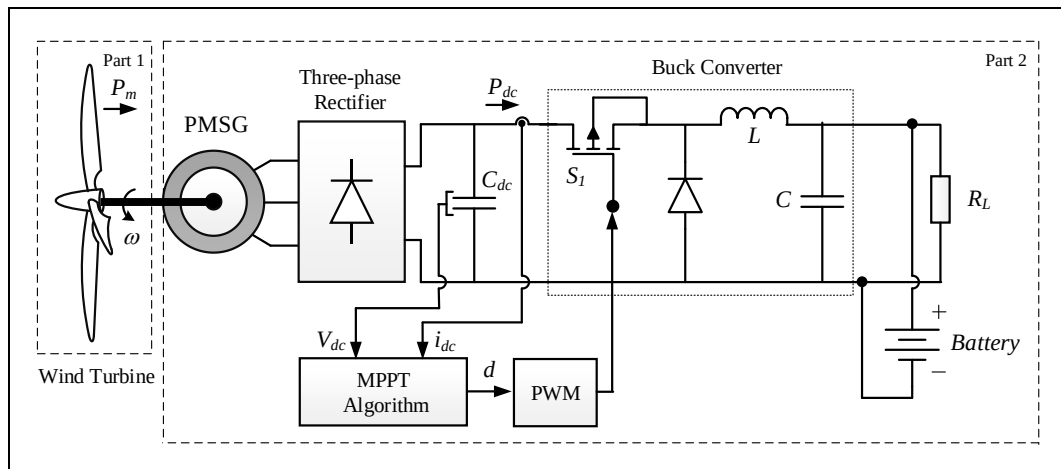
กังหันลมแนวนอนถูกใช้ทำหน้าที่สกัดพลังงานจากลมซึ่งเป็นพลังงานจลน์และเปลี่ยนให้เป็นพลังงานทางกลที่เพลลาของกังหันลม สามารถอธิบายดังสมการที่ (1)

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v_w^3 C_p \quad (1)$$

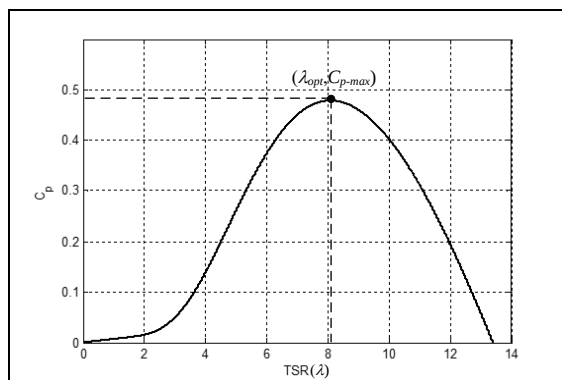
เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ R คือ รัศมีของกังหันลม v_w คือ ความเร็วลม และ C_p คือ ประสิทธิภาพการสกัดพลังงานของกังหันลมเป็นฟังก์ชันแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่ขึ้นอยู่กับ Tip speed ratio (TSR) λ ตามสมการที่ (2) และมุมบิด β ของกังหันลม C_p สามารถอธิบายได้ดังสมการที่ (3)

$$\lambda = \frac{\omega R}{v_w} \quad (2)$$

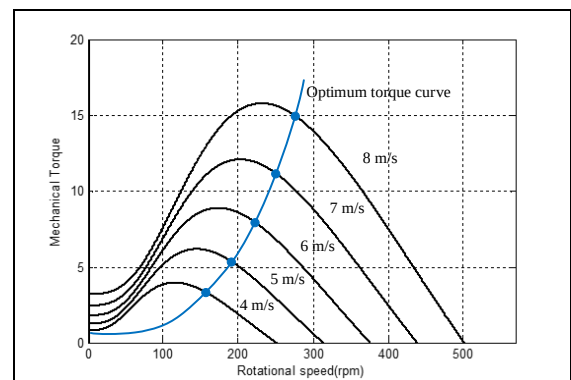
$$\begin{cases} C_p(\lambda, \beta) = 0.5176 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{\frac{-21}{\lambda_i}} + 0.0068\lambda \\ \frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \end{cases} \quad (3)$$



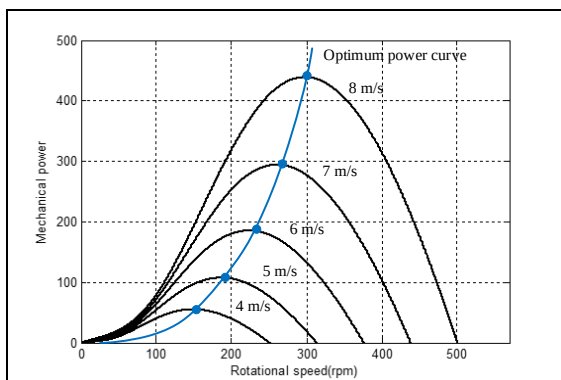
รูปที่ 1 กังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด



รูปที่ 2 ประสิทธิภาพการสกัดพลังงานของกังหันลม



รูปที่ 4 คุณลักษณะแรงบิดเอาต์พุตของกังหันลม
ในสภาวะความเร็วลมต่าง ๆ



รูปที่ 3 คุณลักษณะกำลังเอาต์พุตของกังหันลม
ในสภาวะความเร็วลมต่าง ๆ

เมื่อ ω คือ ความเร็วในการหมุนของกังหันลม ดังนั้น
แรงบิดของกังหันลม สามารถอธิบายได้ตามสมการที่ (4)

$$T_m = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v_w^3 C_p(\lambda, \beta) / \omega \quad (4)$$

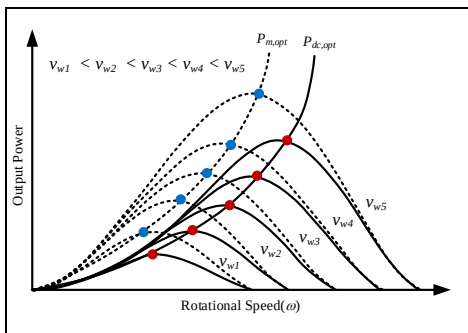
กังหันลมขนาดเล็กโดยทั่วไปจะมีมุมบิด β คงที่ ทำให้ C_p ขึ้นอยู่กับ λ เมื่อกำหนดให้ $\beta = 0$ กราฟ
ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่าง C_p และ λ แสดงได้ดัง
รูปที่ 2 ที่ $\lambda = 8.1$ จะทำให้ได้ค่า $C_{p,max} = 0.48$ ในรูป
ที่ 3 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานและ
ความเร็วรอบของกังหันลม ในสภาวะความเร็วลมต่าง ๆ

ในรูปที่ 4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบของกังหันลม จากกราฟทั้งสองนี้เป็นคุณลักษณะของกังหันลม ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแต่ละความเร็วลมจะมีจุดที่ได้กำลังสูงสุดเพียงตำแหน่งเดียว

2.2 ระบบทางไฟฟ้า

การแปลงพลังงานทางกลจากกังหันลมเป็นพลังงานทางไฟฟ้า อาศัยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวร (permanent magnet synchronous generator: PMSG) ด้วยข้อได้เปรียบที่มีการบำรุงรักษาต่ำ ไม่ต้องใช้กลองเกียร์และไม่จำเป็นต้องมีการกระตุ้นจากภายนอก เหมือนกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จึงทำให้เป็นตัวเลือกที่ดีสำหรับการใช้งานในระบบแบบอิสระ การปรับเปลี่ยนเอาต์พุตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบนี้ใช้วงจรเรียงกระแสสามเฟสร่วมกับวงจรแปลงผันตีสี่เป็นตีสี่ เพราะมีความเรียบง่ายและต้นทุนต่ำ วงจรแปลงผันตีสี่เป็นตีสี่ในที่นี้เลือกใช้วงจรลดทอนระดับแรงดัน เพื่อควบคุมการทำงานของกังหันลม

การสกัดพลังงานสูงสุดของระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าโดยทั่วไปสามารถจำแนกได้ 2 แบบ คือ การควบคุมแบบทางอ้อมและการควบคุมโดยตรง การควบคุมแบบทางอ้อมเป็นการสกัดพลังงานสูงสุดทางกลของกังหันลม (P_m) ซึ่งไม่ใช่พลังงานเอาต์พุตสูงสุดทางไฟฟ้า (P_{dc}) แต่การควบคุมโดยตรงจะทำให้ได้พลังงานเอาต์พุตทางไฟฟ้าสูงสุด ความสัมพันธ์ของ P_m และ P_{dc} อธิบายได้ตามสมการที่ (5)



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์พลังงานเอาต์พุตกับความเร็วรอบของกังหันลมในสถานะความเร็วลมต่าง ๆ

$$P_{dc} = P_m n_g n_c \quad (5)$$

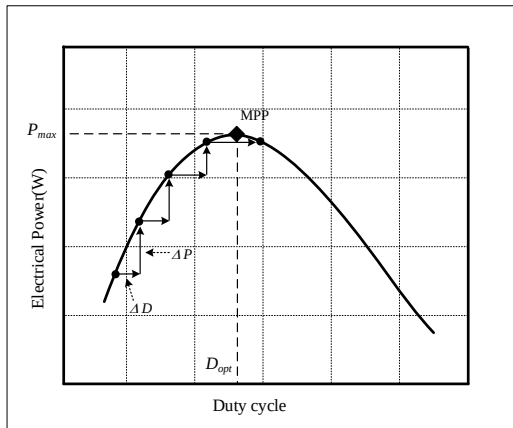
เมื่อ n_g และ n_c คือประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและวงจรเรียงกระแสสามเฟส ดังนั้น แม้ว่าจะควบคุมให้ P_m ได้ค่าสูงสุดแล้วก็ไม่ได้รับประกันว่าจะทำให้ได้ P_{dc} สูงสุด ดังแสดงในรูปที่ 5 การควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดในบทความนี้พิจารณาที่ กำลังไฟฟ้า P_{dc} เป็นสำคัญ โดยรายละเอียดของขั้นตอนวิธีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดจะนำเสนอในส่วนที่ 3

3. การควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ

กำลังสูงสุดของการผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมที่เป็นระบบแบบอิสระ สามารถสกัดได้โดยใช้กลยุทธ์ตามรอยกำลังสูงสุด การควบคุมนี้ทำหน้าที่ปรับตั้งจุดการทำงานของกังหันลมให้เหมาะสมกับสภาวะความเร็วลมต่าง ๆ เพื่อดักศักยภาพสูงสุดของระบบออกมาอัดประจุให้แก่แบตเตอรี่และจ่ายให้กับโหลด

3.1 วิธีการรบกวนและการสังเกต

การควบคุมด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกต (P&O method) เป็นวิธีทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการค้นหาค่าที่เหมาะสมด้วยการพิจารณาผ่านเงื่อนไขที่กำหนดโดยการเปลี่ยนแปลงค่าตอบและตรวจสอบผลลัพธ์ในแต่ละรอบของการคำนวณ การปรับเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่ (Duty cycle: D) ของวงจรลดทอนระดับแรงดัน ส่งผลให้ความเร็วรอบของกังหันลมมีการเปลี่ยนแปลง ด้วยเหตุนี้ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า (P_{dc}) กับ ค่าวัฏจักรหน้าที่ (D) จึงสอดคล้องกับความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า (P_{dc}) กับ ความเร็วรอบของกังหันลม (ω) [13] ดังนั้นในบทความนี้จึงเลือกใช้ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า (P_{dc}) กับค่าวัฏจักรหน้าที่ (D) สำหรับการพิจารณาควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด เพราะข้อได้เปรียบที่ไม่ต้องใช้ตัวตรวจวัดทางกล



รูปที่ 6 การลู่เข้าจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด

ในรูปที่ 6 พิจารณาคุณลักษณะความสัมพันธ์ระหว่าง P_{dc} กับ D พบว่าจุดที่มีกำลังไฟฟ้าสูงสุด (maximum power point: MPP) อยู่บริเวณที่ความชันเป็นศูนย์ ($\frac{\Delta P_{dc}}{\Delta D} = 0$) ดังนั้นจึงได้เงื่อนไขสำหรับการควบคุม MPPT คือ ค่าความชัน ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6)

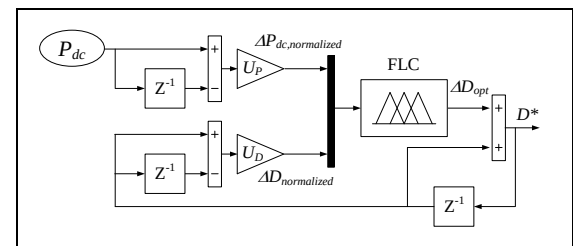
$$\text{Slope} = \frac{\Delta P_{dc}}{\Delta D} \quad (6)$$

หลักการควบคุม คือ หากจุดปฏิบัติการของระบบอยู่ที่ด้านซ้ายของจุด MPP ระบบควบคุมจะบังคับให้จุดปฏิบัติการเคลื่อนที่ไปทางด้านขวา เพื่อให้เข้าสู่ตำแหน่ง MPP ในทำนองเดียวกัน หากจุดปฏิบัติการของระบบอยู่ที่ด้านขวาของจุด MPP ระบบควบคุมจะบังคับให้จุดปฏิบัติการเคลื่อนที่ไปทางด้านซ้าย การควบคุมดำเนินการในลักษณะของการวนรอบ โดยในแต่ละรอบจะทำการปรับเพิ่มและลดสัญญาณควบคุมด้วยขนาดก้าวของการค้นหา (step size) ซึ่งในที่นี้ คือ ΔD ดังรูปที่ 6 แสดงการลู่เข้าสู่จุด MPP จากทางด้านซ้ายของจุด MPP การควบคุมด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกตที่กำหนด ΔD เป็นค่าคงที่ในที่นี้ เรียกว่า Conventional P&O ประสิทธิภาพของวิธีการนี้ขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้ค่าคงที่ ΔD ในกรณีที่ค่าคงที่ ΔD มีขนาดกว้างจะทำให้มี

ผลตอบสนองที่รวดเร็ว แต่จะมีการแกว่งไกวมากบริเวณจุด MPP ในทางตรงกันข้ามถ้าค่าคงที่ ΔD มีขนาดเล็กจะมีการแกว่งไกวบริเวณจุด MPP น้อยแต่ใช้เวลามากในการลู่เข้าสู่จุด MPP ดังนั้นเพื่อให้การตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับกังหันลมผลิตไฟฟ้ามีประสิทธิภาพจึงทำการปรับปรุงให้ค่าคงที่ ΔD มีการปรับตัวได้ โดยในบทความนี้ได้นำตัวควบคุมฟัซซีลอจิก (fuzzy logic control: FLC) เข้ามาประยุกต์ใช้ปรับเปลี่ยนค่า ΔD ให้เหมาะสมตามสถานการณ์ ซึ่งรายละเอียดของการควบคุมจะนำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 3.2

3.2 วิธี FLC-MPPT based on P&O

ตัวควบคุมฟัซซีลอจิกที่ใช้สำหรับควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดของระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าในบทความนี้อยู่บนพื้นฐานการควบคุมด้วยวิธี P&O วิธีการควบคุมที่ได้พัฒนาในที่นี้เรียกว่า FLC-MPPT based on P&O โดยมีแผนภาพการควบคุมดังรูปที่ 7 กฎการควบคุมมี 2 อินพุต และ 1 เอาต์พุต กำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง (ΔP_{dc}) และค่าวัฏจักรหน้าที่ที่เปลี่ยนแปลง (ΔD) ที่ผ่านการนอ้มลโลซ์เป็นตัวแปรอินพุต ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (7) และ (8) ตามลำดับ ส่วนตัวแปรเอาต์พุต คือ ค่าการเปลี่ยนของค่าวัฏจักรหน้าที่ที่เหมาะสม (ΔD_{opt})



รูปที่ 7 แผนภาพการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยตัวควบคุมฟัซซีลอจิกที่อิงวิธี P&O

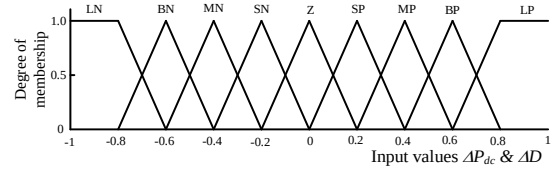
$$\Delta P_{dc,normalized}(k) = U_P (P_{dc}(k) - P_{dc}(k-1)) \quad (7)$$

$$\Delta D_{normalized}(k) = U_D (D(k) - D(k-1)) \quad (8)$$

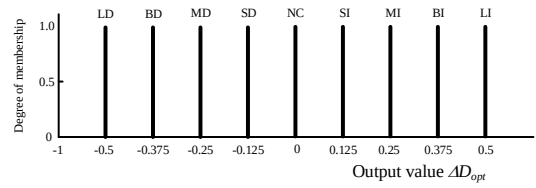
เมื่อ $\Delta P_{dc,normalized}(k)$ คือ ปริมาณกำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงในการสู่มรอบที่ k $\Delta D_{normalized}(k)$ คือ ปริมาณวัฏจักรหน้าที่ที่เปลี่ยนแปลงในการสู่มรอบที่ k $P_{dc}(k)$ คือ กำลังไฟฟ้าที่ถูกสู่มในรอบที่ k $P_{dc}(k-1)$ คือ กำลังไฟฟ้าที่ถูกสู่มในรอบที่ $k-1$ $D(k)$ คือ วัฏจักรหน้าที่ที่ถูกสู่มในรอบที่ k $D(k-1)$ คือ วัฏจักรหน้าที่ที่ถูกสู่มในรอบที่ $k-1$ U_p และ U_D คือ ค่าสเกลเฟคเตอร์สำหรับการทำอนัลไลส์

ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุตในบทความนี้เลือกใช้เป็นรูปสามเหลี่ยมและรูปสี่เหลี่ยมคางหมู เพราะง่ายต่อการคำนวณและการโปรแกรมทางดิจิทัล แสดงดังรูปที่ 8 ประกอบด้วย 9 ฟัซซีเซต คือ LN (large negative), BN (big negative), MN (medium negative), SN (small negative), Z (zero), SP (small positive), MP (medium positive), BP (big positive) และ LP (large positive) โดยฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวแปรเอาต์พุตแสดงดังรูปที่ 9 ซึ่งกำหนดเป็นแบบ Takagi-Sugeno ประกอบด้วย 9 ฟัซซีเซต คือ LD (large decrease), BD (big decrease), MD (medium decrease), SD (small decrease), NC (no change), SI (small increase), MI (medium increase), BI (big increase) และ LI (large increase) จากการวิเคราะห์

พฤติกรรมของระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าและอิงการควบคุมด้วยวิธี P&O สามารถกำหนดกฎฟัซซีได้ดังตารางที่ 1



รูปที่ 8 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของอินพุต



รูปที่ 9 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของเอาต์พุต

การทำดีฟัซซีเพื่อหาค่าเอาต์พุต $\Delta D_{opt}(k)$ โดยใช้วิธีการอนุมานแบบ Takagi-Sugeno เรียกว่า คำนวณน้ำหนักเฉลี่ย (weighted average: WA) [12] ค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่ใช้สำหรับตามรอยกำลังสูงสุดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (9)

$$D^*(k) = D^*(k-1) + \Delta D_{opt}(k) \quad (9)$$

ตารางที่ 1 กฎฟัซซี

ΔD_{opt}		ΔP_{dc}								
		LN	BN	MN	SN	Z	SP	MP	BP	LP
ΔD	LN	LI	LI	BI	BI	NC	BD	BD	LD	LD
	BN	LI	BI	BI	MI	NC	MD	BD	BD	LD
	MN	BI	BI	MI	SI	NC	SD	MD	BD	BD
	SN	BI	MI	SI	SI	NC	SD	SD	MD	BD
	Z	LI	BI	MI	SI	NC	SD	MD	BD	LD
	SP	BD	MD	SD	SD	NC	SI	SI	MI	BI
	MP	BD	BD	MD	SD	NC	SI	MI	BI	BI
	BP	LD	BD	BD	MD	NC	MI	BI	BI	LI
	LP	LD	LD	BD	BD	NC	BI	BI	LI	LI

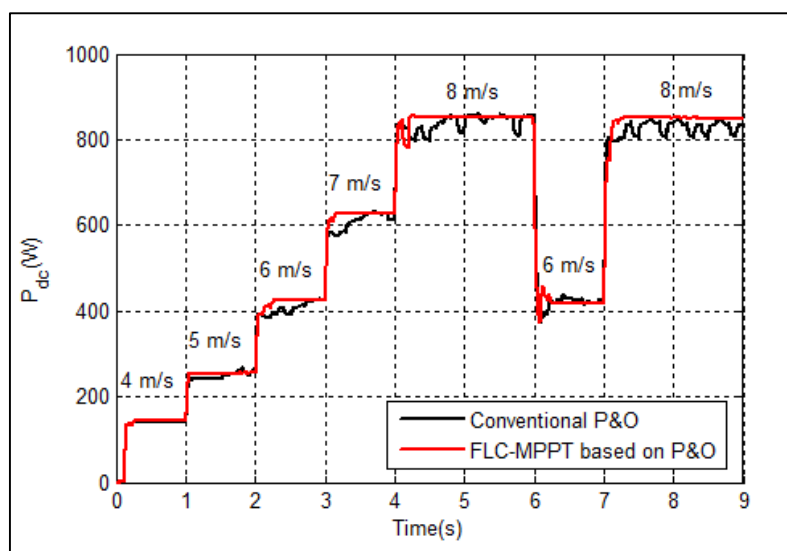
4. การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์

การจำลองสถานการณ์เพื่อยืนยันและทดสอบสมรรถนะของการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดที่ได้พัฒนาไว้ใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ในโปรแกรม MATLAB พารามิเตอร์ในส่วนต่าง ๆ ที่ใช้จำลองสถานการณ์แสดงในตารางที่ 2 รูปที่ 10 แสดงผลการจำลองสถานการณ์วิธี FLC-MPPT based on P&O (เส้นสีแดง) เปรียบเทียบกับ Conventional P&O (เส้นสีดำ) การจำลองสถานการณ์การตามรอยกำลังสูงสุด กำหนดให้สภาพความเร็วลมมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 m/s เป็น 4 m/s ในเวลาที่ $t = 1$ วินาที และที่เวลา $t = 2$ วินาที ความเร็วลมเปลี่ยนจาก 4 m/s เป็น 5 m/s และเพิ่มขึ้นเป็น 6, 7 และ 8 m/s ตามลำดับ และที่เวลา $t = 6$ วินาที ความเร็วลมลดลงจาก 8 m/s เป็น 6 m/s สุดท้ายที่เวลา $t = 7$ วินาที ความเร็วลมเพิ่มจาก 6 m/s เป็น 8 m/s

จากรูปที่ 10 แสดงให้เห็นว่าผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี FLC-MPPT based on P&O สามารถเข้าสู่จุดที่มีกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้เร็วและมีการสั่นไหวบริเวณจุดที่มีกำลังสูงสุดน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธี Conventional P&O ภายใต้การเปลี่ยนแปลงของความเร็วลมเดียวกัน

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์

กัณฑ์	รายละเอียด
R	1.74 m
ρ	1.255 kg/m ³
β	0
เครื่องกำเนิดไฟฟ้า	รายละเอียด
Power rate	850 W
Speed rate	500 rpm
number pole pairs	6
R_s	0.57 Ω
$L_d = L_q$	5.5 mH
J	0.016 kg.m ²
วงจรลดทอนระดับแรงดัน	รายละเอียด
L_{dc}	15 mH
C_{dc}	1000 μ F
C_o	500 μ F
Battery	24 V



รูปที่ 10 ผลการจำลองสถานการณ์การตามรอยกำลังสูงสุดเมื่อความเร็วลมมีการเปลี่ยนแปลง

5. ชุดทดสอบฮาร์ดแวร์และผลการทดสอบ

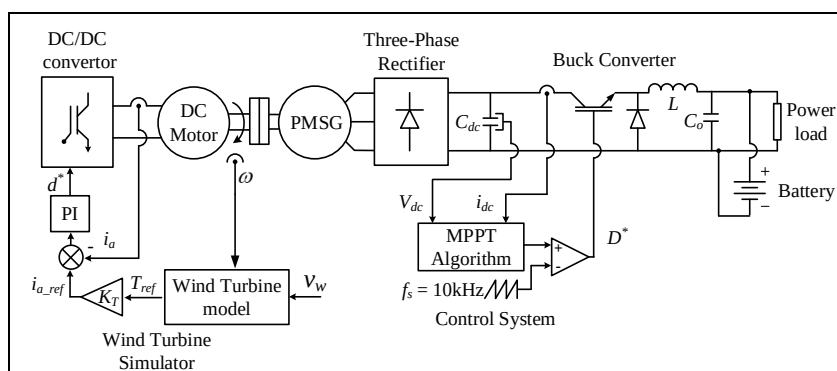
โครงสร้างฮาร์ดแวร์ของระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระที่ใช้ทดสอบแสดงในรูปที่ 11 ภาพรวมของชุดทดสอบในห้องปฏิบัติการแสดงในรูปที่ 12 การทดสอบการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับกังหันลมผลิตไฟฟ้าอาศัยเครื่องจำลองกังหันลมด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีการควบคุมการทำงานให้เลียนแบบคุณลักษณะของกังหันลมโดยควบคุมผ่านกระแสอาร์เมเจอร์ด้วยตัวควบคุมพีไอ ระบบควบคุมดังกล่าวใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ประมวลผล แรงบิดอ้างอิงคำนวณจากแบบจำลองของกังหันลมในสมการที่ (4) โดยมีความเร็วรอบและความเร็วลมที่กำหนดโดยผู้ใช้งานเป็นอินพุต เครื่องจำลองกังหันลมนี้เชื่อมต่อโดยตรงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า PMSG วงจรเรียงกระแสสามเฟสถูกใช้เพื่อเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (V_{dc}) และป้อนเป็นแรงดันอินพุตให้วงจรลดทอนระดับแรงดัน ด้านเอาต์พุตของวงจรลดทอนระดับแรงดันเชื่อมต่อกับแบตเตอรี่และโหลดตัวต้านทาน แรงดัน V_{dc} และกระแส i_{dc} ถูกตรวจจับเป็นอินพุตของระบบควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด การควบคุมนี้ใช้การประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งเป็นตัวกำหนดค่าวัฏจักรหน้าที่ที่เหมาะสมให้แก่วงจรลดทอนระดับแรงดัน รายละเอียดพารามิเตอร์ของชุดทดสอบในส่วนต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 3

การทดสอบระบบควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า ดำเนินการด้วยเครื่องจำลองกังหันลม ซึ่งกำหนดให้ความเร็วลมมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด ในรูปที่ 13 และ 14 แสดงผลการทดสอบการ

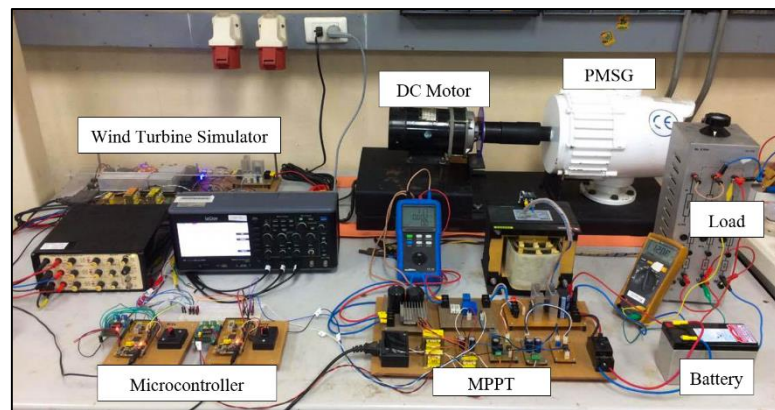
ควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธี FLC-MPPT based on P&O เปรียบเทียบกับการควบคุมด้วยวิธี Conventional P&O ภายใต้สภาพความเร็วเดียวกัน ผลการทดสอบแสดงความเร็วลม กำลังไฟฟ้า (P_{dc}) และแรงดันไฟฟ้า (V_{dc}) ตามลำดับ

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ชุดทดสอบ

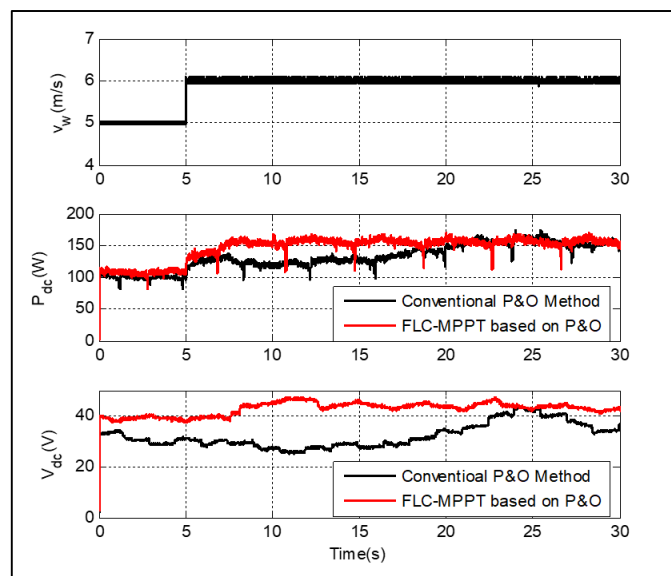
กังหันลม	รายละเอียด
R	1.558 m
ρ	1.255 kg/m ³
β	15
มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	รายละเอียด
Power rate	900 W
Speed rate	500 rpm
Current rate	40 A
เครื่องกำเนิดไฟฟ้า	รายละเอียด
Power rate	500 W
Speed rate	450 rpm
Current rate	21 A
วงจรลดทอนระดับแรงดัน	รายละเอียด
L_{dc}	15 mH
C_{dc}	1000 μ F
C_o	500 μ F
R_L	100 Ω
Battery	12 V



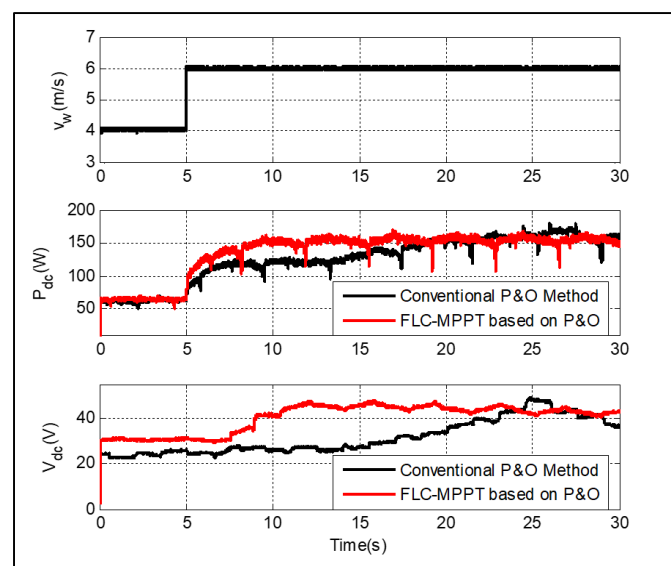
รูปที่ 11 โครงสร้างชุดฮาร์ดแวร์ทดสอบ



รูปที่ 12 ชุดฮาร์ดแวร์ทดสอบระบบควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ



รูปที่ 13 ผลการทดสอบเมื่อความเร็วลมเปลี่ยนจาก 5 m/s เป็น 6 m/s



รูปที่ 14 ผลการทดสอบเมื่อความเร็วลมเปลี่ยนจาก 4 m/s เป็น 6 m/s

ในรูปที่ 13 แสดงการดึงกำลังไฟฟ้า ขณะที่ความเร็วลมมีการเปลี่ยนแปลงจาก 5 m/s เป็น 6 m/s เมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นค่ากำลังไฟฟ้าก็จะเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ทำให้ขั้นตอนวิธีการตรวจพบการเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังไฟฟ้าและปรับตั้งค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรลดทอนระดับแรงดันที่เหมาะสมใหม่ เนื่องจากด้านเอาต์พุตของวงจรลดทอนระดับแรงดันเชื่อมต่อกับแบตเตอรี่ จึงทำให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่เท่ากับแรงดันที่ชาร์จแบตเตอรี่ การปรับตั้งค่าดังกล่าว จึงส่งผลให้แรงดันไฟฟ้า (V_{dc}) มีการเปลี่ยนแปลงแทน ซึ่งทำให้จุดปฏิบัติการของกังหันลมเข้าสู่จุดที่ได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดใหม่ที่สอดคล้องกับความเร็วลม ในทำนองเดียวกันรูปที่ 14 แสดงผลการทดสอบการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดในสภาวะความเร็วลมเปลี่ยนแปลงจาก 4 m/s เป็น 6 m/s จากการเปรียบเทียบ พบว่า การควบคุมด้วยวิธี FLC-MPPT based on P&O สามารถควบคุมการทำงานของกังหันลมให้เข้าสู่จุดที่มีกำลังสูงสุดได้รวดเร็วและมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าการควบคุมด้วยวิธี Conventional P&O

6. ผลการทดสอบการผลิตไฟฟ้าจากระบบระบายอากาศของโรงเรียน

การดำเนินการทดสอบชุดต้นแบบการผลิตไฟฟ้าจากระบบระบายอากาศของโรงเรียนที่มีการทำความเย็นแบบระเหยน้ำด้วยกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด เพื่อทดสอบสมรรถนะของชุดควบคุมกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่สร้างขึ้นหรือชุดชาร์จ MPPT ภายใต้สภาวะการใช้งานจริง โดยในรูปที่ 15 แสดงการติดตั้งชุดทดสอบต้นแบบ ซึ่งประกอบด้วยกังหันลมผลิตไฟฟ้า ชุดชาร์จ MPPT และแบตเตอรี่ การเก็บข้อมูลอาศัยชุดเก็บข้อมูลอัตโนมัติ ข้อมูลที่ทำการเก็บบันทึก คือ แรงดันและกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตของชุดชาร์จก่อนอัดประจุลงแบตเตอรี่ เพื่อนำมาคำนวณเป็นกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตที่สามารถสกัดได้

การทดสอบแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ การทดสอบด้วยชุดชาร์จทั่วไปแบบไม่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด (Without MPPT) และการทดสอบด้วยชุดชาร์จที่มี

การควบคุมตามรอยกำลังสูงสุด (MPPT) ด้วยวิธีที่ได้พัฒนา แสดงในรูปที่ 15 การทดสอบทั้ง 2 กรณี เก็บข้อมูลกรณีละ 30 นาที ผลการทดสอบเปรียบเทียบกันทั้ง 2 กรณี แสดงได้ดังรูปที่ 16

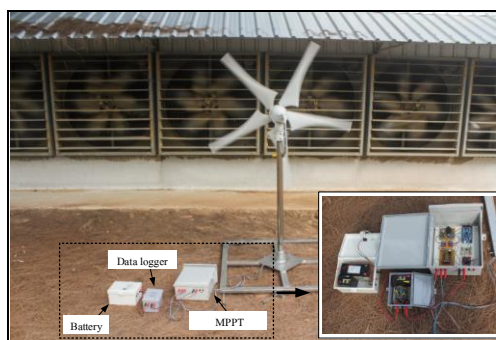
ผลการทดสอบในรูปที่ 16 (ก) แสดงกราฟกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของระบบเทียบกับจุดข้อมูล โดยเก็บข้อมูลเป็นเวลา 30 นาที บันทึกข้อมูลทุก ๆ 1 วินาที ผลการทดสอบพบว่า การสกัดพลังงานลมจากระบบระบายอากาศของโรงเรียนด้วยกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ใช้ชุดชาร์จ MPPT สามารถสกัดกำลังไฟฟ้าจากกังหันลมได้โดยเฉลี่ยประมาณ 7 W ซึ่งมากกว่าชุดชาร์จ Without MPPT ที่สามารถสกัดกำลังไฟฟ้าได้โดยเฉลี่ยประมาณ 2.5 W หรือมากกว่า 180 เปอร์เซ็นต์ ค่าเฉลี่ยของกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต คำนวณได้จากสมการที่ (10) เมื่อ n คือ จำนวนข้อมูล

$$P_{o,av} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n} \quad (10)$$

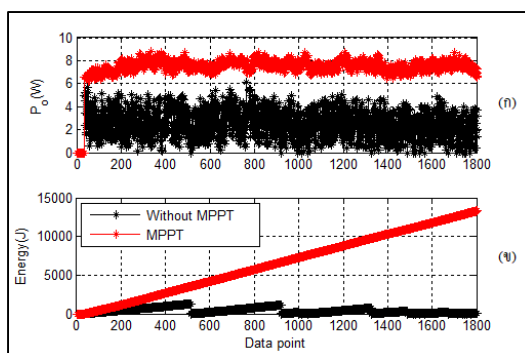
ผลการทดสอบที่แสดงในรูปที่ 16 สามารถวิเคราะห์พลังงานที่กังหันลมสกัดได้เทียบกับเวลาด้วยการคำนวณพื้นที่ใต้กราฟของรูปที่ 16(ก) ตามสมการที่ (11) และสมการที่ (12) แสดงในรูป 16(ข) จะเห็นได้ว่า กำลังไฟฟ้าที่ได้จากชุดชาร์จ Without MPPT มีการอัดประจุลงแบตเตอรี่ไม่ต่อเนื่อง สาเหตุมาจากแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของชุดชาร์จ หากมีค่าน้อยกว่าแรงดันแบตเตอรี่ก็จะไม่สามารถประจุลงแบตเตอรี่ได้แตกต่างจากกำลังไฟฟ้าที่ได้จากชุดชาร์จ MPPT สามารถประจุลงแบตเตอรี่ได้อย่างต่อเนื่องและได้พลังงานสะสมมากกว่าชุดชาร์จ Without MPPT

$$E_i = \frac{P_i + P_{i+1}}{2} \times (t_{i+1} - t_i) \quad (11)$$

$$E = \sum_{i=1}^{n-1} E_i \quad (12)$$



รูปที่ 15 การผลิตไฟฟ้าจากระบบระบายอากาศของโรงเรือนที่มีการทำความเย็นแบบระเหยน้ำด้วยชุดชาร์จ MPPT



รูปที่ 16 ผลการทดสอบ

7. สรุป

บทความนี้นำเสนอการผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดโดยใช้ลมจากระบบระบายอากาศของโรงเรือนที่มีการทำความเย็นแบบระเหยน้ำ แบบจำลองของกังหันลมที่อธิบายถึงคุณลักษณะของกังหันลมได้ถูกนำเสนอเพื่อศึกษาพฤติกรรมการทำงานของระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า รวมถึงหลักการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและการสังเกตแบบลดทอนตัวตรวจวัดทางกลและการนำตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกมาประยุกต์ใช้เพื่อปรับปรุงสมรรถนะการควบคุม ผลจากการจำลองสถานการณ์และผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการควบคุมทั้ง 2 วิธีสามารถควบคุมการทำงานของกังหันลมให้เข้าสู่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้สอดคล้องกับความเร็วลมที่เปลี่ยนแปลง เมื่อเปรียบเทียบกันพบว่า วิธีการควบคุมที่ได้พัฒนามีสมรรถนะการควบคุมที่ดีกว่าการควบคุมด้วยวิธี Conventional P&O รวมถึงผลทดสอบการผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมโดยใช้ลมจากระบบระบายอากาศโดยใช้ชุดชาร์จต้นแบบที่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีที่

พัฒนา พบว่า สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและดึงกำลังไฟฟ้าจากระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าได้มากกว่าชุดชาร์จทั่วไปที่ไม่มีการควบคุมตามรอยกำลังสูงสุดได้ถึง 180 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการควบคุมนี้ทำให้กังหันลมผลิตไฟฟ้ามีการทำงานที่เหมาะสมและทำให้การนำพลังงานลมจากระบบระบายอากาศของการทำความเย็นกลับมาใช้ประโยชน์ได้เพิ่มมากขึ้น

8. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) และความร่วมมือจากบริษัท ซีพีเอฟ (ประเทศไทย) จำกัด มหาชน

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Urtasun, P. Sanchis and L. Marroyo, "Small Wind Turbine Sensorless MPPT: Robustness Analysis and Lossless Approach," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 50, Issue. 6, pp. 4113 – 4121, Nov 2014.

- [2] S. Lalouni, D. Rekioua, K. Idjdarene and A. Tounzi, "Maximum Power Point Tracking Based Hybrid Hill-climb Search Method Applied to Wind Energy Conversion System," *Electric Power Components and Systems*, Vol. 43, Issue. 8, pp. 1028-1038, Nov 2015.
- [3] E. Koutroulis and K. Kalaitzakis, "Design of a maximum power tracking system for wind-energy-conversion applications," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 53, Issue. 2, pp. 486-494, April 2006.
- [4] R. Kot, M. Rolak and M. Malinowski, "Comparison of maximum peak power tracking algorithms for a small wind turbine," *Mathematics and Computers in Simulation*, Vol. 91, pp. 29-40, May 2013.
- [5] K-H. Kim, T. Van, D-C. Lee, S-H. Song and E. Kim, "Maximum Output Power Tracking Control in Variable-Speed Wind Turbine Systems Considering Rotor Inertial Power," *IEEE Transactions on industrial Electronics*, Vol. 60, Issue. 8, pp. 3207-3217, Aug 2013.
- [6] O. Carranza, E. Figueresb, G. Garceráb and L. G. Gonzalezc, "Comparative study of speed estimators with highly noisy measurement signals for Wind Energy Generation Systems," *Applied Energy*, Vol. 88, Issue. 3, pp. 805-813, March 2011.
- [7] S. Muhammad, R. Kazmi, H. Goto, H.-J. Guo and O. Ichinokura, "A Novel Algorithm for Fast and Efficient Speed-Sensorless Maximum Power Point Tracking in Wind Energy Conversion Systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 58, Issue. 1, pp. 29 – 36, Jan 2011.
- [8] L.G. González, E. Figueresb, G. Garceráb and O. Carranzac, "Maximum-power-point tracking with reduced mechanical stress applied to wind-energy-conversion-systems," *Applied Energy*, Vol. 87, Issue. 7, pp. 2304-2312, July 2010.
- [9] Y. Xia, K. H. Ahmed and B. W. Williams, "Wind Turbine Power Coefficient Analysis of a New Maximum Power Point Tracking Technique," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 60, Issue. 3, pp. 1122-1132, March 2013.
- [10] Z. M. Dalala, Z. U. Zahid, W. Yu, Y. Cho and J.-S. (Jason). Lai, "Design and Analysis of an MPPT Technique for Small-Scale Wind Energy Conversion Systems," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 28, Issue. 3, pp. 756-767, Sept 2013.
- [11] Y. Dailia, J.-P. Gaubertb and L. Rahmania, "Implementation of a new maximum power point tracking control strategy for small wind energy conversion systems without mechanical sensors," *Energy Conversion and Management*, Vol. 97, pp. 298-306, June 2015.
- [12] Q.-N. Trinh and H.-H. Lee, "Fuzzy Logic Controller for Maximum Power Tracking in PMSG-Based Wind Power Systems," *Advanced Intelligent Computing Theories and Applications. With Aspects of Artificial Intelligence*, Springer, pp. 543-553, 2010.
- [13] J. Lee and Y.-S. Kim, "Sensorless fuzzy-logic-based maximum power point tracking control for a small-scale wind power generation systems with a switched-mode rectifier," *IET Renewable Power Generation*, 10, Issue 2, pp. 194 –202, Feb 2016.

**การขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟสด้วยคอนเวอร์เตอร์กำลังแบบหลังชนกัน
โดยใช้การควบคุมบนแกนสนามแม่เหล็กและการควบคุมบนแกนแรงดันไฟฟ้า
Three-Phase Induction Motor Drives with Back-to-Back
Converter Using Field-Oriented Control and Voltage-Oriented Control**

นาวี รุจิตามพ์* เวคิน ปิยรัตน์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์

63 หมู่ 7 ถ.รังสิต-นครนายก อ.องครักษ์ จ.นครนายก 26120

Navee Rujidam* Wekin Piyarat

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University,

63 Moo 7 Rangsit – Nakhon Nayok Rd., Ongkharak, Nakhonnayok, 26120

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

(Received: October 19, 2018; Accepted: November 8, 2018)

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟสด้วยคอนเวอร์เตอร์กำลังแบบหลังชนกัน ด้วยการแบ่งคอนเวอร์เตอร์เป็นสองด้าน โดยใช้คอนเวอร์เตอร์ฟูลบริดจ์สามเฟสเชื่อมต่อด้านกริด ที่อาศัยการควบคุมบนแกนแรงดันไฟฟ้า (Voltage-Oriented Control) และใช้คอนเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันสามเฟสสามกึ่งควบคุมด้านมอเตอร์ ด้วยหลักการควบคุมบนแกนสนามแม่เหล็กโรเตอร์ด้วย (Rotor Field-Oriented Control) ในบทความนี้ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟสถูกจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ผลการจำลองพบว่า มอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟสมีสมรรถนะที่ดี และผลตอบสนองที่เร็ว ขณะเดียวกันคอนเวอร์เตอร์ด้านกริดสามารถส่งผ่านกำลังไฟฟ้าได้สองทิศทาง สามารถรักษาระดับแรงดันเชื่อมโยงไฟตรงให้คงที่ที่ 700 โวลต์ และมีค่าตัวประกอบกำลังด้านกริดเท่ากับ 0.992 และค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนของกระแสไฟฟ้านด้านกริดเท่ากับ 2.33 เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ: คอนเวอร์เตอร์กำลังแบบหลังชนกัน คอนเวอร์เตอร์ฟูลบริดจ์สามเฟส คอนเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันสามเฟสสามกึ่ง การควบคุมบนแกนแรงดันไฟฟ้า การควบคุมบนแกนสนามแม่เหล็กโรเตอร์

ABSTRACT

This paper presents the three-phase induction motor drives with back-to-back converter which is divided into two sides. Three-phase full-bridge converter using voltage-oriented control is connected with grid-side, and three-phase three-leg voltage source converter control by means of rotor field-oriented control in motor-side. Three-phase induction motor drive system in the paper is simulated with the help of MATLAB/Simulink. The simulation results revealed that three-phase induction motor had satisfactory performance and fast response. Meanwhile, grid-side converter was

capable of bi-directional power flow, kept dc-link voltage constant at 700 Volt, and had power factor of grid and total harmonic distortion of grid current, which was 0.922 and 2.33 percentage.

Keyword: Back-to-back converter, three-phase full-bridge converter, three-phase three-leg voltage source converter, voltage-oriented control, rotor field-oriented control.

1. บทนำ

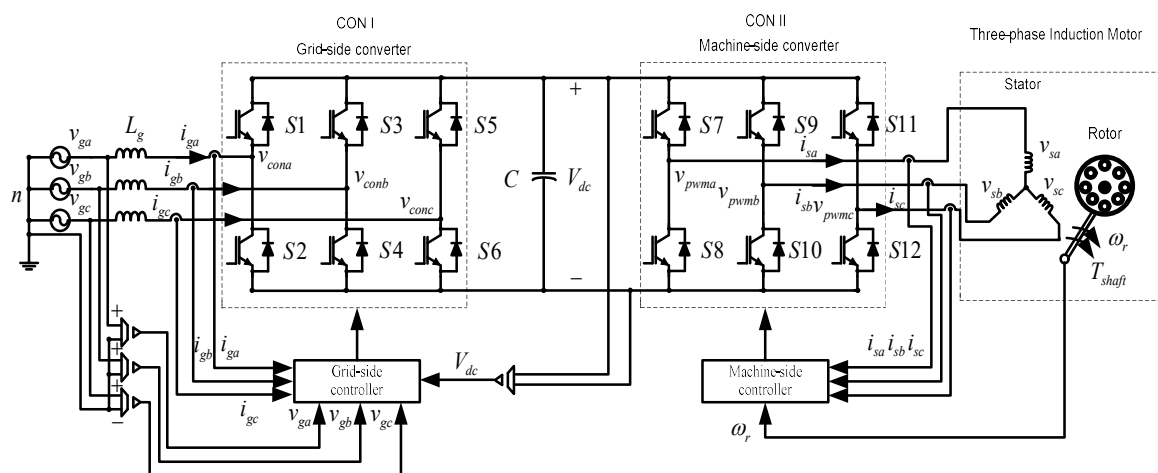
ปัจจุบันมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าชนิดสามเฟสเป็นที่นิยมใช้งานอย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรม และอุตสาหกรรมยานยนต์ โดยการควบคุมมอเตอร์นั้น นอกเหนือจากเทคนิคหรือวิธีการควบคุมแล้วนั้น สิ่งสำคัญคือคอนเวอร์เตอร์ สำหรับคอนเวอร์เตอร์ฟูลบริดจ์สามเฟสชนิดเชื่อมต่อกับกริดที่อาศัยวิธีการควบคุมแบบฮิสเตอร์รีซิส (Hysteresis control) พบว่าเป็นวิธีการที่ง่ายและไม่ซับซ้อน แต่ได้ความถี่สวิตช์ที่ไม่คงที่และมีความถี่การสวิตช์ที่ต่ำ [1] จึงได้มีการพัฒนาการควบคุมบนแกนแรงดันไฟฟ้า (Voltage-oriented control) โดยใช้ตัวควบคุมพีไอ (PI Controller) แทนการควบคุมแบบฮิสเตอร์รีซิส การควบคุมประเภทนี้มีลักษณะที่ซับซ้อน แต่ได้ความถี่สวิตช์ที่คงที่ มีความถี่สวิตช์ที่สูงกว่าวิธีการควบคุมแบบฮิสเตอร์รีซิส [2]-[5] ในส่วนของคอนเวอร์เตอร์สามเฟสสามกึ่งที่ทำหน้าที่ควบคุมมอเตอร์ มีการควบคุมหลายวิธีการ เช่น การควบคุมแบบสเกลาร์ ซึ่งเป็นวิธีการควบคุมที่ง่าย แต่ได้แรงบิดแม่เหล็กที่ไม่ถูกต้องเนื่องจากไม่ได้มีการควบคุมวงรอบปิดเส้นแรงแม่เหล็ก [6] จึงเกิดการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่สเตเตอร์ทั้งสองแกนเพื่อให้แรงบิดแม่เหล็กไม่เกิดความผิดพลาดรวมถึงสามารถรักษาระดับเส้นแรงแม่เหล็กที่โรเตอร์ให้คงที่โดยใช้การควบคุมบนแกนสนามแม่เหล็กโรเตอร์ (Rotor field-oriented control) ด้วยวิธีการสวิตช์แบบการควบคุมฮิสเตอร์รีซิสของกระแสไฟฟ้าที่สเตเตอร์ และวิธีนี้มีการควบคุมที่มีความซับซ้อนน้อยกว่าการควบคุมด้วยการสวิตช์แบบแรงดัน มีผลตอบสนองที่ไวและถูกต้อง แต่มีข้อเสีย คือ ความถี่สวิตช์ที่ไม่คงที่และมีความถี่การสวิตช์ที่ต่ำ [7],[8] จึงจำเป็นต้องใช้การควบคุมพีไอ ด้วยการเปลี่ยน

ค่าจากกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์เป็นแรงดันไฟฟ้าที่สเตเตอร์เพื่อใช้สำหรับสวิตช์แทนการควบคุมแบบฮิสเตอร์รีซิสสำหรับการควบคุมบนแกนสนามแม่เหล็กโรเตอร์ วิธีการดังกล่าวนี้พบว่ามีโครงสร้างที่ซับซ้อนยุ่งยาก แต่ได้ความถี่สวิตช์ที่คงที่และมีความถี่สวิตช์ที่สูงกว่า [9]-[11] จึงเป็นที่มาของการนำเสนองานวิจัยนี้ โดยบทความวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีการควบคุมแบบการควบคุมบนแกนแรงดันไฟฟ้า และการควบคุมบนแกนสนามแม่เหล็กโรเตอร์ ด้วยวิธีการสวิตช์แบบแรงดันโดยใช้การควบคุมพีไอ ซึ่งบทความนี้มีการพัฒนาให้ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์สามารถส่งผ่านกำลังไฟฟ้าได้สองทิศทาง ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังที่ฝั่งกริด และพัฒนาผลตอบสนองของมอเตอร์ให้ถูกต้องและตอบสนองได้เร็ว

2. ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟส

ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟสประกอบด้วยคอนเวอร์เตอร์สองตัว คอนเวอร์เตอร์ตัวแรกที่อยู่ด้านกริดคือคอนเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อกับกริดสามเฟส ทำหน้าที่ส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสองทิศทาง ปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้า และรักษาระดับแรงดันเชื่อมโยงไฟตรงให้คงที่ 700 โวลต์ ซึ่งใช้วิธีการควบคุมบนแกนแรงดันไฟฟ้า ส่วนคอนเวอร์เตอร์ตัวที่สองคืออินเวอร์เตอร์สามเฟสสามกึ่ง ทำหน้าที่จ่ายแรงดันไฟฟ้าป้อนให้มอเตอร์ โดยใช้หลักการควบคุมบนแกนสนามแม่เหล็กโรเตอร์ โดยระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟสแสดงในรูปที่ 1

ปีที่ 13 ฉบับที่ 3 เดือน กันยายน – ธันวาคม พ.ศ. 2561

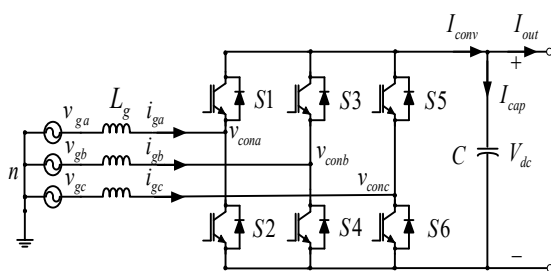


รูปที่ 1 ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟสที่นำเสนอ

3. คอนเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อกิตสามเฟส

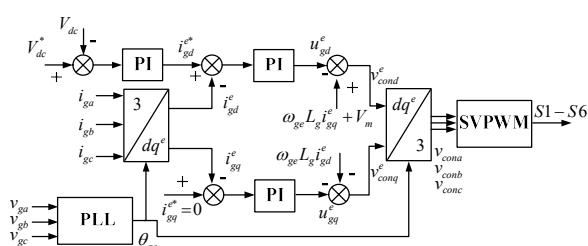
คอนเวอร์เตอร์ชนิดนี้มีลักษณะของวงจรกำลัง และ
อัลกอร์ิทึมการควบคุม ดังรูปที่ 2 และ 3 ตามลำดับ โดย
ใช้หลักการควบคุมบนแกนแรงดันไฟฟ้า [2]-[4]

การควบคุมบนแกนแรงดันไฟฟ้า สามารถเขียนสมการแรงดันไฟฟ้ากริดที่กรออ้างอิงหยุดนิ่ง [2] ได้ในสมการที่ (1)



รูปที่ 2 วงจรกำลังของคอนเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อนี้

กริดสามเฟส



รูปที่ 3 อัลกอริทึมการควบคุมของคอนเวอร์เตอร์ชนิด
เชื่อมต่อกิตสามเฟส

$$\bar{\mathbf{v}}_g = \bar{\mathbf{i}}_g R_g + L_g \frac{d\bar{\mathbf{i}}_g}{dt} + \bar{\mathbf{v}}_{con} \quad (1)$$

แปลงสมการที่ (1) ไปยังกรอบอ้างอิงหมุนทำให้ได้
สมการที่ (2)

$$\bar{v}_g e^{-j\theta_{ge}} = \bar{i}_g e^{-j\theta_{ge}} R_g + L_g e^{-j\theta_{ge}} \frac{d\bar{i}_g}{dt} + \bar{v}_{con} e^{-j\theta_{ge}} \quad (2)$$

หาค่า $e^{-j\theta_{ge}} \frac{d\bar{i}_g}{dt}$ เพื่อนำไปแทนในสมการที่ (2) ได้

ตั้งขึ้น

$$e^{-j\theta_{ge}} \frac{d\bar{i}_g}{dt} = \frac{d(\bar{i}_g e^{-j\theta_{ge}})}{dt} + j\omega_{ge} \bar{i}_g e^{-j\theta_{ge}} \quad (3)$$

นำสมการที่ (3) แทนลงในสมการที่ (2)

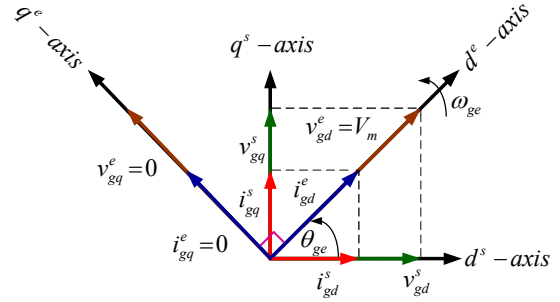
$$\begin{aligned} \bar{v}_g e^{-j\theta_{ge}} &= \bar{i}_g e^{-j\theta_{ge}} R_g + L_g \frac{d(\bar{i}_g e^{-j\theta_{ge}})}{dt} \\ &+ j\omega_{ge} L_g \bar{i}_g e^{-j\theta_{ge}} + \bar{v}_{con} e^{-j\theta_{ge}} \end{aligned} \quad (4)$$

จากสมการที่ (4) แปลงค่าให้อยู่ใน s-domain ได้ดังนี้ เมื่อกำหนดให้ v_{gq}^e มีค่าเท่ากับ 0 และ v_{gd}^e มีค่าเท่ากับ V_m ตามลำดับได้สมการแรงดันไฟฟ้าที่คอนเวอร์เตอร์ [2] ดังสมการที่ (5)

$$\begin{bmatrix} v_{cond}^e \\ v_{conq}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_m \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_g s + R_g & \omega_{ge} L_g \\ -\omega_{ge} L_g & L_g s + R_g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{gd}^e \\ i_{gq}^e \end{bmatrix} \quad (5)$$

โดยที่ $\bar{v}_g$, $\bar{i}_g$ และ $\bar{v}_{con}$ คือ แรงดันไฟฟ้ากริดที่รอบอ้างอิงหยุดนิ่ง กระแสไฟฟ้ากริดที่รอบอ้างอิงหยุดนิ่ง และแรงดันไฟฟ้าคอนเวอร์เตอร์ที่รอบอ้างอิงหยุดนิ่ง ตามลำดับ $e^{-j\theta_{ge}}$ คือ การแปลงค่าจากกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งไปยังกรอบอ้างอิงหมุน v_{cond}^e, v_{conq}^e คือ แรงดันไฟฟ้าคอนเวอร์เตอร์แกนตีควที่กรอบอ้างอิงหมุน i_{gd}^e, i_{gq}^e คือ กระแสไฟฟ้ากริดแกนตีควที่กรอบอ้างอิงหมุน v_{gd}^e, v_{gq}^e คือ แรงดันไฟฟ้ากริดแกนตีควที่กรอบอ้างอิงหมุน V_m คือ ขนาดค่ายอดของแรงดันไฟฟ้ากริด L_g คือ ค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ในคอนเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกกริด R_g คือ ค่าความต้านทานแฝงของตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ในคอนเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกกริด ω_{ge} คือ ความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าของกริด s คือ ตัวดำเนินการอนุพันธ์ใน s-domain

จากการวิเคราะห์สมการที่ (1) - (5) สามารถเขียนเป็นแผนภาพเวกเตอร์ [5] ได้ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แผนภาพเวกเตอร์ของการควบคุมบนแกนแรงดันไฟฟ้ากริด

จากความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าขาเข้า และกำลังไฟฟ้าขาออกของคอนเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อกกริดสามเฟส [2] สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (6)

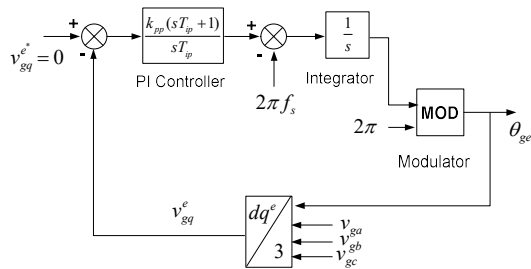
$$\frac{3}{2} v_{gd}^e i_{gd}^e = \frac{V_{dc}^2}{R_{Load}} + C V_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} \quad (6)$$

จากสมการที่ (6) แปลงค่าให้อยู่ใน s-domain จัดรูปสมการให้อยู่ในรูปของ $\frac{V_{dc}(s)}{i_{gd}^e(s)}$ ได้ดังสมการที่ (7) เมื่อ v_{gd}^e มีค่าเท่ากับ V_m

$$\frac{V_{dc}(s)}{i_{gd}^e(s)} = \frac{3}{2} \frac{V_m}{V_{dc} C s} \quad (7)$$

โดยที่ C คือ ค่าความจุของตัวเก็บประจุ R_{Load} คือ ค่าความต้านทานของโหลดที่ต่อตรงด้านออกของคอนเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อกกริด

สำหรับการเขียนอัลกอริทึมของเฟสล็อกกลู [2], [13] สำหรับเชื่อมต่อกกริดสามารถเขียนได้ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 แผนภาพการทำงานของบล็อกเฟสล็อกกลูป

3.1. การออกแบบระบบควบคุมของเฟสล็อกกลูป

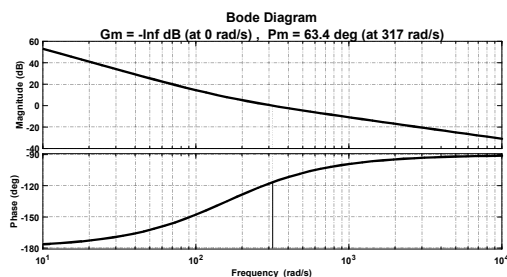
จากแผนภาพการทำงานในรูปที่ 5 สามารถออกแบบระบบควบคุมของเฟสล็อกกลูปเพื่อหาค่าพีไอได้ดังสมการที่ (8) – (10)

$$T_{ip} = \frac{\tan(\phi_{PM})}{\omega_p} \quad (8)$$

$$k_{pp} = \frac{\omega_p^2 T_{ip}}{\sqrt{(\omega_p T_{ip})^2 + 1}} \quad (9)$$

$$k_{ip} = \frac{k_{pp}}{T_{ip}} \quad (10)$$

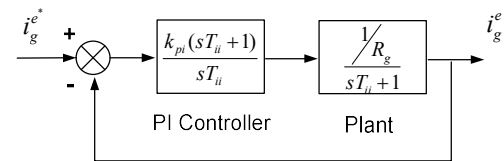
โดยที่ ζ คือ อัตราการหน่วง มีค่าเท่ากับ 0.667 ϕ_{PM} คือ มุมเฟสมาร์จิน มีค่าเท่ากับ 63.34° ω_p คือ แบนวิดท์ของเฟสล็อกกลูป มีค่าเท่ากับ 316.7 rad/s T_{ip} คือ อัตราส่วนระหว่าง k_{pp} กับ k_{ip} มีค่าเท่ากับ 6.3 ms k_{pp} คือ ค่าของตัวชดเชยชนิดพีของเฟสล็อกกลูป มีค่าเท่ากับ 283.1271 k_{ip} คือ ค่าของตัวชดเชยชนิดไอของเฟสล็อกกลูป มีค่าเท่ากับ 44941 โดยสามารถวาดเป็นแผนภาพโบเดได้ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 แผนภาพโบเดของเฟสล็อกกลูปที่รวมผลของตัวชดเชยชนิดพีไอ

3.2. การออกแบบระบบควบคุมของวงปิดกระแสไฟฟ้ากริด

จากสมการที่ (5) สามารถนำมาเขียนระบบควบคุมวงรอบปิดกระแสไฟฟ้ากริดได้ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ระบบควบคุมวงรอบปิดกระแสไฟฟ้ากริดที่มีการรวมตัวชดเชยชนิดพีไอ

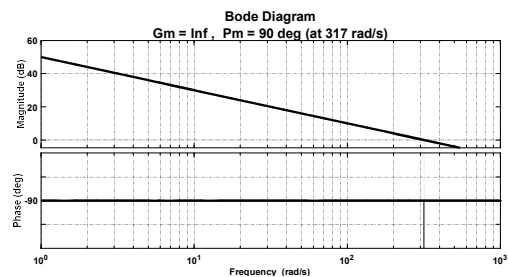
จากรูปที่ 7 สามารถออกแบบระบบควบคุมโดยหาค่าพีไอได้ดังสมการที่ (11) – (13)

$$T_{ii} = \frac{L_g}{R_g} \quad (11)$$

$$k_{pi} = \omega_{gi} L_g \quad (12)$$

$$k_{ii} = \omega_{gi} R_g \quad (13)$$

เมื่อกำหนดให้ ω_{gi} คือ แบนวิดท์ของวงรอบปิดกระแสไฟฟ้ากริดมีค่าเท่ากับ 316.7 rad/s k_{pi} คือ ค่าของตัวชดเชยชนิดพีของวงรอบปิดกระแสไฟฟ้ากริด มีค่าเท่ากับ 6.334 k_{ii} คือ ค่าของตัวชดเชยชนิดไอของวงรอบปิดกระแสไฟฟ้ากริด มีค่าเท่ากับ 31.67 T_{ii} คือ อัตราส่วนระหว่าง k_{pi} กับ k_{ii} โดยสามารถวาดเป็นแผนภาพโบเดได้ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 แผนภาพโบเดของวงรอบปิดกระแสไฟฟ้ากริดแกนดีคิวที่รวมผลของตัวชดเชยชนิดพีไอ

$$\vec{v}_s = \vec{i}_s R_s + L_s \frac{d\vec{i}_s}{dt} + L_m \frac{d(\vec{i}_r e^{j\theta_r})}{dt} \quad (17)$$

$$\vec{v}_r = \vec{i}_r R_r + L_r \frac{d\vec{i}_r}{dt} + L_m \frac{d(\vec{i}_s e^{-j\theta_r})}{dt} \quad (18)$$

เมื่อ $\vec{v}_s$ คือ แรงดันไฟฟ้าขดลวดสเตเตอร์ที่กรอบ
อ้างอิงสเตเตอร์ $\vec{i}_s$ คือ กระแสไฟฟ้าขดลวดสเตเตอร์ที่
กรอบอ้างอิงสเตเตอร์ L_s คือ ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าขดลวด
สเตเตอร์ที่กรอบอ้างอิงสเตเตอร์ R_s คือ ค่าความต้านทาน
ไฟฟ้าขดลวดสเตเตอร์ที่กรอบอ้างอิงสเตเตอร์ L_m คือค่า
ความเหนี่ยวนำไฟฟ้าร่วมที่กรอบอ้างอิงสเตเตอร์ $\frac{d}{dt}$ คือ ตัว
ดำเนินการอนุพันธ์ $\vec{v}_r$ คือ แรงดันไฟฟ้าขดลวดโรเตอร์ที่
กรอบอ้างอิงโรเตอร์ $\vec{i}_r$ คือ กระแสไฟฟ้าขดลวดโรเตอร์ที่
กรอบอ้างอิงโรเตอร์ R_r คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าขดลวด
โรเตอร์ที่กรอบอ้างอิงโรเตอร์ L_r คือ ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า
ขดลวดโรเตอร์ที่กรอบอ้างอิงโรเตอร์ $e^{j\theta_r}$ คือ ตัว
ดำเนินการแปลงกรอบอ้างอิงโรเตอร์ไปยังกรอบอ้างอิงสเต
เตอร์ $e^{-j\theta_r}$ คือ ตัวดำเนินการแปลงกรอบอ้างอิงสเตเตอร์ไป
ยังกรอบอ้างอิงโรเตอร์

จัดรูปสมการที่ (17) ใหม่ทำให้ได้สมการที่ (19)

สมการแรงดันไฟฟ้าสเตเตอร์ [10]-[11] ดังนี้

$$\vec{v}_s = \vec{i}_s R_s + L_s \frac{d\vec{i}_s}{dt} + L_m \frac{d\vec{i}_r'}{dt} \quad (19)$$

เมื่อ $\vec{i}_r'$ คือ กระแสไฟฟ้าขดลวดโรเตอร์ที่กรอบ
อ้างอิงสเตเตอร์

แปลงสมการที่ (18) เข้าสู่กรอบอ้างอิงสเตเตอร์
[10]-[11] ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \vec{v}_r' = \vec{i}_r' R_r + L_r \frac{d\vec{i}_r'}{dt} - j\omega_r L_r \vec{i}_r' \\ + L_m \frac{d\vec{i}_s}{dt} - j\omega_r L_m \vec{i}_s \end{aligned} \quad (20)$$

โดย $\vec{v}_r'$ คือ แรงดันไฟฟ้าขดลวดโรเตอร์ที่กรอบ
อ้างอิงสเตเตอร์ R_r' คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าขดลวด

โรเตอร์ที่กรอบอ้างอิงสเตเตอร์ L_r' คือ ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า
ขดลวดโรเตอร์ที่กรอบอ้างอิงสเตเตอร์ ω_r คือ ความเร็วโร
เตอร์ j คือ หน่วยจินตภาพ

สมการของเส้นแรงแม่เหล็กที่โรเตอร์ [10]-[11]
สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (21)

$$\vec{\lambda}_r' = L_r' \vec{i}_r' + L_m \vec{i}_s \quad (21)$$

เมื่อ $\vec{\lambda}_r'$ คือ เส้นแรงแม่เหล็กขดลวดโรเตอร์ที่กรอบ
อ้างอิงสเตเตอร์

นำสมการที่ (21) แทนลงในสมการที่ (20) ได้สมการ
แรงดันโรเตอร์ [10]-[11] ดังนี้

$$\vec{v}_r' = \vec{i}_r' R_r' + \frac{d\vec{\lambda}_r'}{dt} - j\omega_r \vec{\lambda}_r' \quad (22)$$

กระแสไฟฟ้าที่โรเตอร์ที่อยู่ในกรอบอ้างอิงสเตเตอร์
[10]-[11] สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (23)

$$\vec{i}_r' = \frac{\vec{\lambda}_r' - L_m \vec{i}_s}{L_r'} \quad (23)$$

แทนสมการที่ (23) ลงในสมการที่ (19) และ (22) ได้
สมการแรงดันไฟฟ้าสเตเตอร์และ โรเตอร์ [10]-[11]
ดังนี้

$$\vec{v}_s = \vec{i}_s R_s + \sigma_s L_s \frac{d\vec{i}_s}{dt} + \frac{L_m}{L_r'} \frac{d\vec{\lambda}_r'}{dt} \quad (24)$$

$$\vec{v}_r' = \frac{\vec{\lambda}_r' R_r'}{L_r'} - \frac{L_m R_r' \vec{i}_s}{L_r'} + \frac{d\vec{\lambda}_r'}{dt} - j\omega_r \vec{\lambda}_r' \quad (25)$$

นำสมการที่ (24) และ (25) ไปแปลงเพื่อเข้าสู่กรอบ
อ้างอิงหมุนแบบซิงโครนัส [10]-[11] โดยการคูณ $e^{-j\theta_s}$
ทั้งสองสมการได้ผลลัพธ์เป็นสมการที่ (26) และ (27)

$$\begin{aligned} \bar{v}_s e^{-j\theta_s} = & \bar{i}_s e^{-j\theta_s} R_s \\ & + \sigma_s L_s \frac{d\bar{i}_s e^{-j\theta_s}}{dt} + \frac{L_m}{L_r} \frac{d\bar{\lambda}_r' e^{-j\theta_s}}{dt} \\ & + j\omega_s \left(\sigma_s L_s \bar{i}_s e^{-j\theta_s} + \frac{L_m \bar{\lambda}_r' e^{-j\theta_s}}{L_r} \right) \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \bar{v}_r' e^{-j\theta_s} = & \frac{\bar{\lambda}_r' e^{-j\theta_s} R_r'}{L_r'} - \frac{L_m R_r' \bar{i}_s e^{-j\theta_s}}{L_r'} \\ & + \frac{d\bar{\lambda}_r' e^{-j\theta_s}}{dt} + j\omega_{sl} \bar{\lambda}_r' e^{-j\theta_s} \end{aligned} \quad (27)$$

เมื่อ $e^{-j\theta_s}$ คือ ตัวดำเนินการแปลงกรอบอ้างอิงสเตเตอร์ไปยังกรอบอ้างอิงซิงโครนัส ω_{sl} คือ ความเร็วสลิป ω_s คือ ความเร็วซิงโครนัส

จากสมการที่ (26) และ (27) เขียนสมการใหม่ให้อยู่ในเงื่อนไขการเกิด field orientation [10]-[11] โดยให้ λ_{rd}' มีค่าที่ λ_{rd}' เท่ากับ 0 และแรงดันที่โรเตอร์มีค่าเท่ากับ 0 เนื่องมาจากเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟสชนิดกรงกระรอก และแปลงสมการ (26) และ (27) ไปยัง s-domain ทำให้ได้แรงดันไฟฟ้าขดลวดสเตเตอร์ในสมการเมทริกซ์ (28) สมการเส้นแรงแม่เหล็กโรเตอร์แกนตี (29) สมการความเร็วสลิป (30) สมการมุมซิงโครนัส (31) และสมการแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า (32)

$$\begin{bmatrix} v_{sd}^e \\ v_{sq}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_s L_s s + R_s & \omega_s \sigma_s L_s \\ \omega_s L_s & \sigma_s L_s s + R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd}^e \\ i_{sq}^e \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$\lambda_{rd}' = \frac{L_m i_{sd}^e}{1 + s\tau_r'} \quad (29)$$

$$\omega_{sl} = \frac{L_m i_{sq}^e}{\tau_r' \lambda_{rd}'} \quad (30)$$

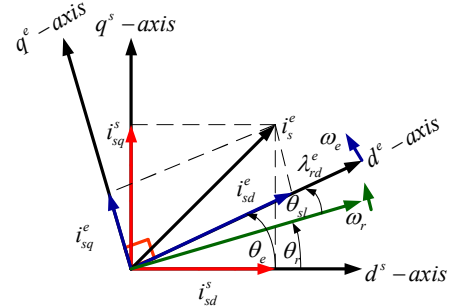
$$\theta_s = \int (\omega_r + \omega_{sl}) dt \quad (31)$$

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r} \lambda_{rd}' i_{sq}^e \quad (32)$$

โดยที่ v_{sd}^e , v_{sq}^e คือ แรงดันไฟฟ้าขดลวดสเตเตอร์ที่กรอบอ้างอิงซิงโครนัส แกนดี และ แกนคว i_{sd}^e , i_{sq}^e คือ กระแสไฟฟ้าขดลวดสเตเตอร์ที่กรอบอ้างอิงซิงโครนัส แกนดี และ แกนคว σ_s คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความรั่วไหล τ_r' คือ

ค่าคงที่ทางเวลาโรเตอร์ เป็นค่าอัตราส่วนระหว่าง ค่าความเหนี่ยวนำโรเตอร์กับค่าความต้านทานโรเตอร์ T_e คือ แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ P คือ จำนวนขั้วแม่เหล็ก

จากการควบคุมบนแกนสนามแม่เหล็กโรเตอร์สามารถเขียนเป็นแผนภาพเวกเตอร์ [12] ได้ดังรูปที่ 13 พบว่ากระแสไฟฟ้าสเตเตอร์แกนตีที่กรอบอ้างอิงซิงโครนัส ทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็กโรเตอร์ ส่วนกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์แกนควที่กรอบอ้างอิงซิงโครนัสทำหน้าที่สร้างแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า

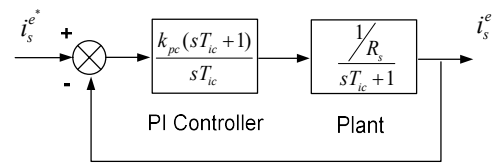


รูปที่ 13 แผนภาพเวกเตอร์ของการควบคุมบนแกนสนามแม่เหล็กโรเตอร์

4.1. การออกแบบระบบควบคุมของวงปิด

กระแสไฟฟ้าขดลวดสเตเตอร์

จากสมการที่ (28) สามารถนำมาเขียนระบบควบคุมวงรอบปิดกระแสไฟฟ้ากริดได้ดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 ระบบควบคุมวงรอบปิดกระแสไฟฟ้าขดลวดสเตเตอร์ที่มีการรวมตัวชดเชยชนิดพีโอ

จากรูปที่ 14 สามารถออกแบบระบบควบคุมโดยหาค่าพีโอได้ดังสมการที่ (33) – (35)

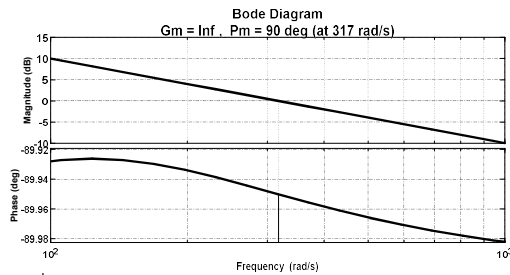
ปีที่ 13 ฉบับที่ 3 เดือน กันยายน – ธันวาคม พ.ศ. 2561

$$T_{ic} = \frac{\sigma_s L_s}{R_s} \quad (33)$$

$$k_{pc} = \omega_{mi} \sigma_s L_s \quad (34)$$

$$k_{ic} = \omega_{mi} R_s \quad (35)$$

เมื่อกำหนดให้ ω_{mi} คือ แบนวิทท์ของวงรอบปิดกระแสไฟฟ้าสเตรเตอร์มีค่าเท่ากับ 316.7 rad/s k_{pc} คือ ค่าของตัวชดเชยชนิดพีของวงรอบปิดกระแสไฟฟ้าสเตรเตอร์ มีค่าเท่ากับ 3.6134 k_{ic} คือ ค่าของตัวชดเชยชนิดไอของวงรอบปิดกระแสไฟฟ้าสเตรเตอร์ มีค่าเท่ากับ 444.9514 T_{ic} คือ อัตราส่วนระหว่าง k_{pc} กับ k_{ic} โดยสามารถวาดเป็นแผนภาพโบเดได้ดังรูปที่ 15



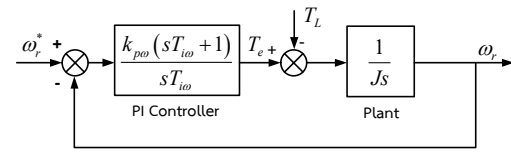
รูปที่ 15 แผนภาพโบเดของวงรอบปิดกระแสไฟฟ้าสเตรเตอร์แแกนตีคิวที่รวมผลของตัวชดเชยชนิดพีไอ

4.2. การออกแบบระบบควบคุมของวงปิดความเร็วมอเตอร์

จากสมการกฎนิวตันข้อที่สองสามารถเขียนสมการระหว่างความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว และแรงบิดของมอเตอร์ได้ดังสมการที่ (36)

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega_r}{dt} \quad (36)$$

เมื่อ T_L คือ แรงบิดโหลด J คือ โมเมนต์ความเฉื่อย จากสมการที่ (36) สามารถนำมาเขียนระบบควบคุมวงรอบปิดความเร็วได้ดังรูปที่ 16



รูปที่ 16 ระบบควบคุมวงรอบปิดความเร็วที่มีการรวมตัวชดเชยชนิดพีไอ

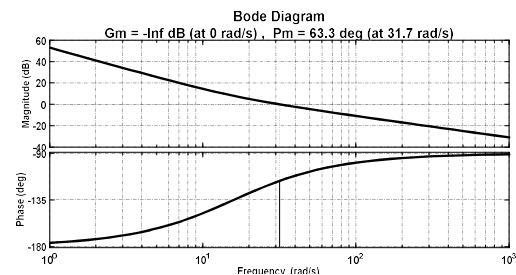
จากรูปที่ 16 สามารถออกแบบระบบควบคุมโดยหาค่าพารามิเตอร์ได้ดังสมการที่ (14) – (16)

$$T_{io} = \frac{\tan(\phi_{PM})}{\omega_{mo}} \quad (37)$$

$$k_{po} = \frac{J\omega_{mo}^2 T_{io}}{\sqrt{(\omega_{mo} T_{io})^2 + 1}} \quad (38)$$

$$k_{io} = \frac{k_{po}}{T_{io}} \quad (39)$$

โดยที่ ζ คือ อัตราการหน่วง มีค่าเท่ากับ 0.667 ϕ_{PM} คือ มุมเฟสมาร์จิน มีค่าเท่ากับ 63.34° ω_{mo} คือ แบนวิทท์ของวงรอบปิดแรงดันเชื่อมโยงไฟตรง มีค่าเท่ากับ 31.67 rad/s T_{io} คือ อัตราส่วนระหว่าง k_{po} กับ k_{io} มีค่าเท่ากับ 62.9 ms k_{po} คือ ค่าของตัวชดเชยชนิดพีของแรงดันเชื่อมโยงไฟตรง มีค่าเท่ากับ 0.3708 k_{io} คือ ค่าของตัวชดเชยชนิดไอของแรงดันเชื่อมโยงไฟตรง มีค่าเท่ากับ 5.8951 โดยสามารถวาดเป็นแผนภาพโบเดได้ดังรูปที่ 17



รูปที่ 17 แผนภาพโบเดของวงรอบปิดความเร็วที่รวมผลของตัวชดเชยชนิดพีไอ

5. ผลการจำลองและวิเคราะห์ผลการจำลอง

การจำลองผลการจำลองของระบบนี้ใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink จำลองสภาวะการทำงานของ

มอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟส ในกรณีต่างๆ เช่น การเริ่มเดินเครื่องของมอเตอร์เหนี่ยวนำ การกลับทิศทางความเร็ว การใส่ภาระทางกลและปลดภาระทางกล โดยอัลกอริทึมที่ใช้ควบคุมคอนเวอร์เตอร์ทั้งสอง ใช้การควบคุมแบบเวกเตอร์ ค่าพารามิเตอร์ต่างๆแสดงในตารางที่ 1 และ 2

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของคอนเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกิริ

พารามิเตอร์	ค่า
V_m	$220\sqrt{2}$ V
$f_{s,source}$	50 Hz
$f_{sw,con}$	5 kHz
L_g	20 mH
R_g	0.1 Ω
C	5,000 μ F
V_{dc}	700 V

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส โดยมีการอ้างอิงจากโมเดลในโปรแกรม MATLAB

พารามิเตอร์	ค่า
V_{l-l}	400 V
$f_{s,motor}$	50 Hz
P	4 kW
$\omega_{r, rated}$	1,430 rpm
p (Pole)	4
R_s	1.405 Ω
L_s, L_r'	178 mH
L_m	172.2 mH
R_r'	1.395 Ω
J	0.0131 kg•m ²
$f_{sw,inv}$	5 kHz

ทำการเดินเครื่องมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสโดยกำหนดให้ความเร็วคำสั่งฟังก์ชันramp มีค่าเท่ากับ 1,430 rpm ดังรูปที่ 18 พบว่า มอเตอร์ใช้แรงบิดออกตัว

สูงสุดประมาณที่พิกัด 26 Nm ความเร็วมอเตอร์มีผลตอบสนองที่เร็วโดยเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ 1,430 rpm ใช้เวลาประมาณ 0.28 s แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ลดตัวลงจนความเร็วเข้าสู่ค่าความเร็วคำสั่ง 1,430 rpm แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 0 โดยที่กระแสมอเตอร์ช่วงออกตัวสูงสุดโดยมีค้ายอดประมาณ 26 A หลังจากนั้นที่สภาวะคงตัวพบว่า กระแสไฟฟ้าขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์มีค้ายอดเท่ากับ 6.5 A

ทำการเดินเครื่องมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสโดยกำหนดให้ความเร็วคำสั่งฟังก์ชันramp มีค่าเท่ากับ 500 rpm ดังรูปที่ 19 พบว่า มอเตอร์ใช้แรงบิดออกตัวสูงสุดประมาณที่พิกัด 26 Nm ความเร็วมอเตอร์มีผลตอบสนองที่เร็วโดยเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ 500 rpm ใช้เวลาประมาณ 0.28 s แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ลดตัวลงจนความเร็วเข้าสู่ค่าความเร็วคำสั่ง 500 rpm แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 0 โดยที่กระแสมอเตอร์ช่วงออกตัวสูงสุดโดยมีค้ายอดประมาณ 25.5 A หลังจากนั้นที่สภาวะคงตัวพบว่า กระแสไฟฟ้าขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์มีค้ายอดเท่ากับ 6 A

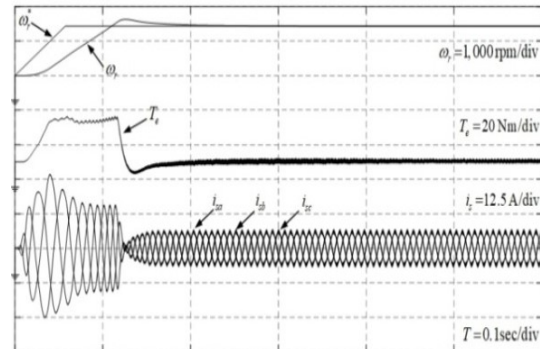
ทำการใส่แบบลำดับขั้นบันได โดยเพิ่มโหลดทีละ 5 Nm ใน 4 ครั้งแรก ส่วนครั้งสุดท้ายใส่ 6 Nm เพื่อให้เท่ากับโหลดที่พิกัดของมอเตอร์ คือ 26 Nm ขณะที่มอเตอร์ถูกขับเคลื่อนที่ความเร็ว 1,430 rpm ดังรูปที่ 20 พบว่ามอเตอร์สามารถควบคุมค่าความเร็วที่พิกัด 1,430 rpm ได้โดยปกติ เมื่อแรงบิดโหลดเพิ่มขึ้นแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะเพิ่มขึ้นโดยมีขนาดเท่ากับแรงบิดโหลด ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าของมอเตอร์สูงขึ้นเมื่อมีการใส่แรงบิดโหลดเพิ่มขึ้น ในด้านที่กริดพบว่ากระแสไฟฟ้าที่กริดพบว่ามีลักษณะรูปคลื่นคล้ายสัญญาณไซน์ และมีค้ายอดที่เพิ่มขึ้นเมื่อมอเตอร์มีการเพิ่มแรงบิดโหลด ในส่วนของแรงดันเชื่อมโยงไฟตรงเมื่อมีการใส่โหลดให้มอเตอร์พบว่ายังคงรักษาระดับแรงดันไว้ได้ที่ 700 V

ทำการใส่โหลดที่พิกัด และปลดโหลด ขณะที่มอเตอร์ถูกขับเคลื่อนที่ความเร็ว 1,430 rpm ดังรูปที่ 21 พบว่ามอเตอร์สามารถควบคุมค่าความเร็วที่พิกัด

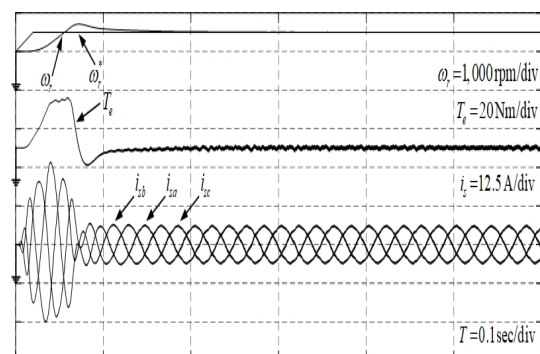
1,430 rpm ได้โดยปกติ เมื่อแรงบิดโหลดเพิ่มขึ้นแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะเพิ่มขึ้นโดยมีขนาดเท่ากันกับแรงบิดโหลด ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าของมอเตอร์สูงขึ้นเมื่อมีการใส่แรงบิดโหลดเพิ่มขึ้น ในด้านกริดพบว่ารูปคลื่นกระแสไฟฟ้าที่กริดพบมีลักษณะเข้าใกล้รูปคลื่นไซน์ และมีค่ายอดที่เพิ่มขึ้นเมื่อมอเตอร์มีการเพิ่มแรงบิดโหลด ในส่วนของแรงดันเชื่อมโยงไฟตรงเมื่อมีการใส่โหลดให้มอเตอร์พบว่ายังคงรักษาระดับแรงดันไว้ได้ที่ 700 V ขณะตอนปลดโหลดออกพบว่า มอเตอร์ยังสามารถควบคุมความเร็วได้ที่ 1,430 rpm แรงดันเชื่อมโยงไฟตรงยังคงรักษาระดับแรงดันได้ที่ 700 V ส่วนกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์และกริดมีค่าลดลง โดยค่ากระแสไฟฟ้ากริดจะลดน้อยลงจนใกล้เคียง 0 ส่วนรูปที่ 22 เป็นรูปสภาวะคงตัวที่ขณะใส่แรงบิดโหลดที่พิกัด ในเงื่อนไขเดียวกันกับรูปที่ 21 พบว่าค่ายอดของกระแสไฟฟ้าสเตเตอร์ของขดลวดมอเตอร์ทั้งสามเฟสมีค่าเท่ากับ 11.4 A และกระแสไฟฟ้ากริดมีค่ายอดเท่ากับ 9.2631 A โดยมีมุมเฟสที่ตรงกันกับแรงดันไฟฟ้ากริด ทำให้ตัวประกอบกำลังฟังก์กริดจะมีค่าใกล้เคียง 1 ซึ่งเมื่อลองวัดดูพบว่ากระแสไฟฟ้ากริดมีมุมต่างเฟสจากแรงดันไฟฟ้ากริดอยู่ 5.04° ค่า RMS กระแสไฟฟ้ากริดที่ความถี่มูลฐานมีค่าเท่ากับ 6.55 A และ RMS กระแสไฟฟ้ากริดเท่ากับ 6.5776 A เมื่อนำค่าเหล่านี้มาหาค่าตัวประกอบกำลังพบว่า มีค่าเท่ากับ 0.992 และค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนของกระแสไฟฟ้ากริดมีค่าเท่ากับ 2.33%

ทำการกลับทิศทางการหมุนของมอเตอร์จาก 1,430 rpm ไปยังความเร็ว -1,430 rpm ดังรูปที่ 24 พบว่า มอเตอร์สร้างแรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า 36 Nm เพื่อกลับทิศทางการหมุน โดยใช้ระยะเวลาประมาณ 0.3 s ลำดับเฟสของกระแสไฟฟ้าขดลวดสเตเตอร์มีการกลับลำดับเฟสเนื่องจากกลับทิศทางการหมุน ส่วนแรงดันเชื่อมโยงไฟตรงมีเสถียรภาพสามารถรักษาระดับแรงดันไว้ได้ที่ 700 V และคอนเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับกริดสามารถส่งผ่านกำลังไฟฟ้าได้สองทิศทางสังเกตจากช่วง

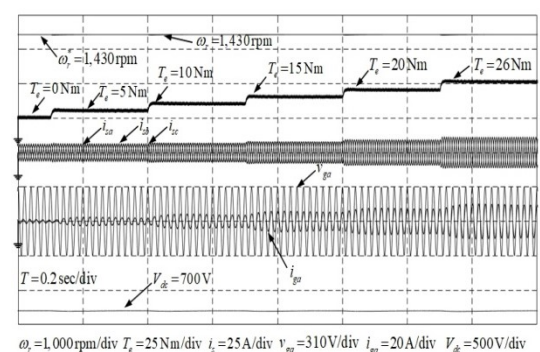
การกลับทิศทางการหมุนกระแสไฟฟ้ากริดมีการกลับเฟสเป็นระยะเวลาสั้นๆ ชั่วขณะ



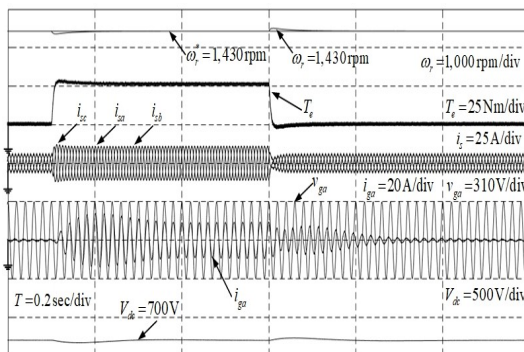
รูปที่ 18 การเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์ด้วยความเร็วคำสั่ง ramp ที่ 1,430 rpm



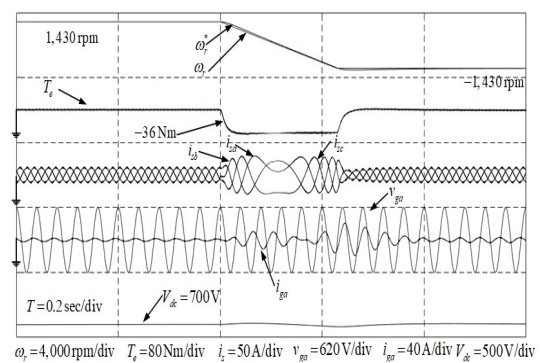
รูปที่ 19 การเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์ด้วยความเร็วคำสั่ง ramp ที่ 500 rpm



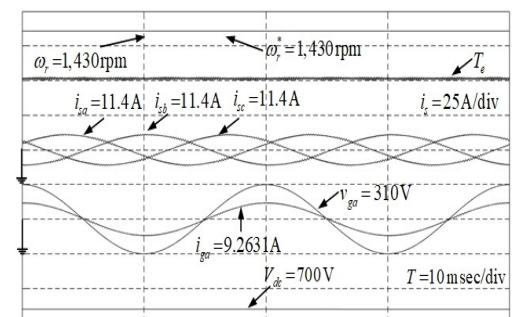
รูปที่ 20 การใส่โหลดแบบขั้นบันได จนถึง ค่าโหลดที่พิกัด ขณะขับเคลื่อนที่ความเร็ว 1,430 rpm



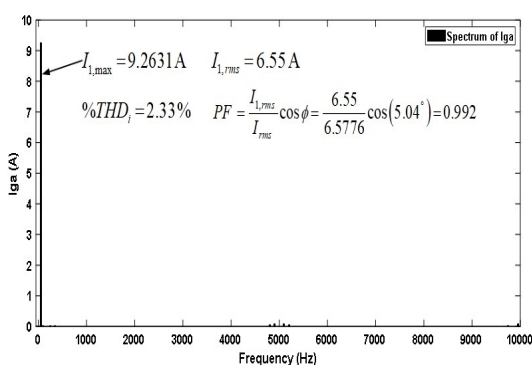
รูปที่ 21 การใส่โหลดที่พิกัดและปลดโหลดออก ขณะขับเคลื่อนที่ความเร็ว 1,430 rpm



รูปที่ 24 การกลับทิศทางการหมุนจากความเร็ว 1,430 rpm ไปยังความเร็ว -1,430 rpm



รูปที่ 22 สภาวะคงตัวขณะใส่โหลด ที่พิกัด โดยขับเคลื่อนที่ความเร็ว 1,430 rpm



รูปที่ 23 สเปกตรัมของกระแสไฟฟ้ากริด

6. สรุป

บทความวิจัยนี้นำเสนอเกี่ยวกับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าชนิดสามเฟสด้วยวิธีการควบคุมแบบเวกเตอร์โดยจำลองด้วยเงื่อนไข การเริ่มต้นเครื่องมอเตอร์ที่ความเร็วสูง และที่ความเร็วต่ำ การใส่โหลดแบบขั้นบันได (step load) การใส่โหลดที่พิกัด ปลดโหลดที่พิกัด และกลับทิศทางการหมุน พบว่าการควบคุมความเร็วมีเสถียรภาพ และผลตอบสนองที่ไว แรงดันเชื่อมโยงไฟตรงของระบบมีเสถียรภาพเนื่องจากสามารถรักษาระดับแรงดันได้คงที่ที่ค่า 700 V และคอนเวอร์เตอร์ด้านกริดสามารถปรับปรุงตัวประกอบกำลังและค่าความผิดเพี้ยนของกระแสไฟฟ้ากริดได้ขณะที่มอเตอร์ที่มีโหลด โดยทำการวัดค่าตัวประกอบกำลังด้านกริดได้เท่ากับ 0.992 และ ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนของกระแสไฟฟ้ากริดได้เท่ากับ 2.33% และระบบนี้ยังสามารถส่งผ่านกำลังไฟฟ้าได้สองทิศทางโดยสังเกตจากการกลับทิศทางการหมุนของมอเตอร์ซึ่งมีช่วงระยะเวลาสั้นๆ ของกระแสไฟฟ้ากริดกลับเฟสเป็นเฟสตรงข้ามกับมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้ากริด

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. W. Green and J. T. Boys, "Hysteresis current-forced three-phase voltage-sourced reversible rectifier," in *IEE Proceedings B – Electric Power*

- Applications*, vol.136, no.3, pp. 113-120, May 1989.
- [2] V. Blasko and V. Kaura, "A new mathematical model and control of a three-phase ac-dc voltage source converter," in *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol.12, no.1, pp.116 – 123, Jan 1997.
- [3] R. Teodorescu, M. Liserre and P. Rodriguez, *Grid converters for photovoltaic and wind power systems*, 1st Ed., UK: John Wiley & Sons, 2011.
- [4] T. Suyuta, S. Po-Ngam and C. Tarasantisuk, "The active power and reactive power control for three- phase grid-connected photovoltaic inverters," in *12th International Conference on ECTI-CON*, Hua Hin , Thailand, June 2015.
- [5] B. K. Bose , *Modern power electronic and ac drives*, New Jersey :Prentice Hall PTR,2002.
- [6] R. Echavarria , S. Horta and M. Oliver , "A three phase motor drive using IGBTs and constant v/f speed control with slip regulation," in *IEEE International Power Electronic Congress* , San Luis Potosi , Mexico, pp.87 – 91, Oct. 1995.
- [7] C. Charumit and S. Tunyasirirut, "Dspace implementation for speed regulation of three-phase induction motor based on indirect vector control technique," in *Pathumwan Academic Journal*, vol.1, no.1, pp.53 – 58, 2011
- [8] A. M. Trzynadlowski, *The field orientation principle in control of induction motors*, New York: Springer Science + Business Media, 1994.
- [9] R. S. Hiware and J. G. Chaudhari , "Indirect field oriented control for induction motor," in *Fourth International Conference on Emerging Trends in Engineering & Technology*, Port Louis, Mauritius, pp.191 – 194, 18-20 Nov. 2011.
- [10] W. Leonhard, *Control of electrical drives*, 3rd edition, New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2001.
- [11] P. Vas, *Sensorless vector and direct torque control*: Oxford University, 1998
- [12] C. Charumit, *Two-phase and three-phase induction motor drive technique* ,Bangkok :Pathumwan Institute of Technology, 2015
- [13] C. Tarasantisuk , "Fundamental of phase-locked loop for grid-connected inverter," in *SWU Engineering Journal*, vol. 9, no. 2, pp.86 – 94, 2014

การบำบัดน้ำเสียจากการแปรรูปเมล็ดกาแฟแบบเปียก ด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก

Treatment of the Wastewater from Wet Coffee Processing Using Microalgae Cultivation

รุ่งนภา เขียววิจิตร^{1*} กลิ่นประทุม ปัญญาปิง¹ สุรสิทธิ์ เทียงจันตา²

¹สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่

128 ถนนห้วยแก้ว ตำบลช้างเผือก อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300

²สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่

128 ถนนห้วยแก้ว ตำบลช้างเผือก อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300

Rungnapha Khiewwijit^{1*} Klinpratoom Panyaping¹ Surasit thiangchanta²

¹Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna, 128 Huay Kaew Road, Chang Phueak, Mueang, Chiang Mai 50300, Thailand

²Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna, 128 Huay Kaew Road, Chang Phueak, Mueang, Chiang Mai 50300, Thailand

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

(Received: June 25, 2018; Accepted: September 17, 2018)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจน ฟอสฟอรัสและสารอินทรีย์ในรูปของทีเคเอ็นในโตรเจน (TKN-N) ฟอสเฟตฟอสฟอรัส ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$) และซีโอดี (COD) ที่ละลายน้ำได้ ตามลำดับ โดยเน้นการบำบัดน้ำเสียจากการแปรรูปเมล็ดกาแฟแบบเปียกด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กในระบบแขวนลอยและระบบตรึงฟิล์ม และเพื่อศึกษาอัตราการผลิตชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กในระบบตรึงฟิล์ม ที่มีระยะเวลาการเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน โดยนำหัวเชื้อสาหร่ายขนาดเล็กชนิดผสมทำการเพาะเลี้ยงในระดับห้องปฏิบัติการ ภายใต้สภาวะแวดล้อมและแสงแดดตามธรรมชาติทางตอนเหนือของประเทศไทยและใช้ระบบเปิดทั้งหมด 3 ระบบ ได้แก่ ระบบแขวนลอย ระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 7 และ 14) และระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 14) ทำการทดลองในแต่ละระบบรวม 3 รอบ รอบละ 14 วัน ผลการศึกษา พบว่าระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 7 และ 14) สามารถกำจัด TKN-N $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ และ COD ที่ละลายน้ำได้ดีที่สุด คือสามารถกำจัดได้ค่าเฉลี่ยร้อยละ 48.44 และ 90 ตามลำดับ ส่วนอีกสองระบบมีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัด TKN-N $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ และ COD ที่ละลายน้ำได้น้อยกว่าเนื่องจากการใช้ระบบตรึงฟิล์ม ช่วยลดข้อจำกัดของปริมาณแสงที่ต้องการใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายขนาดเล็กและเพิ่มปริมาณการถ่ายเทมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในขณะที่การเก็บเกี่ยวชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กในวันที่ 7 ทำให้หัวเชื้อสาหร่ายขนาดเล็กที่เหลืออยู่มีปริมาณน้อย และส่งผลให้ระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 7 และ 14) มีค่าเฉลี่ยอัตราผลผลิตชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กน้อยกว่า (1.02 กรัม/น้ำหนักแห้งต่อวัน) ระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 14) (1.19 กรัม/น้ำหนักแห้งต่อวัน) งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงการพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียจากการแปรรูปเมล็ดกาแฟแบบเปียกด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กที่มีประสิทธิภาพ โดยการใช้ระบบตรึงฟิล์มและเพื่อเพิ่มอัตราผลผลิตชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็ก ควรเก็บเกี่ยวให้เหลือสาหร่ายขนาดเล็กเพียงครึ่งหนึ่งของพื้นที่แผ่นตัวกลางในวันที่ 7 และเก็บเกี่ยวทั้งหมดในวันที่ 14

คำสำคัญ: สาหร่ายขนาดเล็ก น้ำเสียจากการแปรรูปเมล็ดกาแฟ ระบบแขวนลอย ระบบตรึงฟิล์ม

ABSTRACT

The objective of this study was to explore the potential of the removals of nitrogen, phosphorus and organic matter in the forms of dissolved TKN-nitrogen (TKN-N), phosphate-phosphorus ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$), and COD, respectively. This study focused on a treatment of wet coffee processing wastewater using suspended and biofilm microalgae cultivation. Moreover, this study also investigated the microalgal biomass production in biofilm microalgae system at the differences in harvesting frequency. Mixed-microalgae culture was cultivated in the laboratory scale and constructed under outdoor climatic conditions in Northern Thailand. Three different systems were used, which were suspended system, biofilm system (harvesting at day 7 and 14) and biofilm system (harvesting at day 14). These three systems were cultivated for 3 cycles with the period of 14 days for each cycle. The results showed that biofilm system (harvesting at day 7 and 14) gave the highest removals of dissolved TKN-N, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$, and COD, which removed on average 48%, 44%, and 90%, respectively. Another two systems had lower average removal efficiencies of dissolved TKN-N, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$, and COD. These results could be explained by the minimization of light limitation to photosynthesis and enhancement of CO_2 mass transfer when using biofilm system. However, this study showed that microalgal biomass harvesting in biofilm system at day 7 caused less mixed-microalgae seed. Consequently, biofilm system (harvesting at day 7 and 14) had lower average biomass production rate (1.02 g dry weight/day) than biofilm system (harvesting at day 14) (1.19 g dry weight/day). This study provided a development of efficient treatment for the wet coffee processing wastewater using microalgae cultivation in biofilm system. Moreover, only half biomass harvesting of the patterned sheet in day 7 and all biomass harvesting in day 14 should be applied to increase microalgal biomass production.

Keyword: Microalgae, coffee processing wastewater, suspended system, biofilm system.

1. บทนำ

กาแฟจัดเป็นพืชอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจทั่วโลก โดยทั่วไปสายพันธุ์หลักของกาแฟที่นิยมเพาะปลูกและบริโภคกัน ได้แก่ สายพันธุ์อาราบิก้า (Arabica) และโรบัสต้า (Robusta) แต่ส่วนใหญ่กาแฟสายพันธุ์อาราบิก้าจะได้รับความนิยมในการบริโภคมากกว่าโรบัสต้า เนื่องจากกาแฟโรบัสต้ามีรสชาติกาแฟขมกว่าและให้รสชาติน้อยกว่ากาแฟอาราบิก้า หากเปรียบเทียบกับประเทศในเขตภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ในช่วง พ.ศ. 2554-2558 ประเทศไทยเป็นประเทศผู้ส่งออกเมล็ดกาแฟและกาแฟสำเร็จรูปอันดับที่ 4 รองลงมาจากประเทศเวียดนาม อินโดนีเซียและมาเลเซีย และมีแนวโน้มความต้องการ

ใช้เมล็ดกาแฟเพิ่มขึ้นทุกปี [1] สำหรับในประเทศไทยกาแฟสายพันธุ์อาราบิก้าเป็นพืชที่ปลูกกันอย่างกว้างขวางในแถบภาคเหนือ โดยเฉพาะในเขตบริเวณพื้นที่สูง (Northern highland) เพราะมีสภาพแวดล้อมและอากาศที่เหมาะสมสำหรับการปลูกกาแฟ ปัจจุบันมูลนิธิโครงการหลวง (Royal project foundation) ให้การส่งเสริมและพัฒนาทั้งการเพาะปลูก รวมถึงกระบวนการผลิตและแปรรูปเมล็ดกาแฟอาราบิก้าให้ได้คุณภาพสูงมานานกว่า 40 ปี รวมทั้งหมด 24 ศูนย์ และเกษตรกรผู้ปลูกกาแฟมีการจำหน่ายผลผลิตกาแฟผ่านโครงการหลวงปีละประมาณ 400-500 ตันเมล็ดกาแฟแห้ง ซึ่งสามารถสร้างรายได้ให้กับเกษตรกรบนพื้นที่สูงได้เป็นอย่างดี [2] สำหรับกระบวนการผลิตและแปรรูป

เมล็ดกาแฟรามีกำในมูลนิธิโครงการหลวง มุ่งเน้นให้ใช้วิธีแบบเปียก (Wet processing) เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์กาแฟที่มีคุณภาพสูง และยังมีกลิ่นและรสชาติของกาแฟที่ดี ทำให้ความต้องการใช้น้ำและน้ำเสียที่ผลิตในแต่ละวันมีปริมาณสูงเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีแบบแห้ง (Dry processing) โดยระหว่างกระบวนการแปรรูปเมล็ดกาแฟรามีกำแบบเปียก จากการใช้ผลสดกาแฟรามีกำ 1 ตันต่อวัน จะมีน้ำเสียที่ผลิตและต้องการการบำบัดในปริมาณมากถึง 6 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยแบ่งเป็นปริมาณน้ำเสียที่ผลิตจากกระบวนการกะเทาะเปลือกกาแฟ 4 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน และปริมาณน้ำเสียที่ผลิตจากกระบวนการหมักและการล้างเมือกกาแฟอีก 2 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน [3]

น้ำเสียที่ได้จากการแปรรูปเมล็ดกาแฟ มีลักษณะความเป็นกรดและมีสารอินทรีย์สูง นอกจากนั้นยังมีการปนเปื้อนด้วยสารไนโตรเจน (Nitrogen; N) และสารฟอสฟอรัส (Phosphorus; P) ซึ่งหากปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติโดยตรง จะมีผลทำให้แหล่งน้ำเกิดการเน่าเสีย ส่งกลิ่นเหม็นและเกิดผลกระทบต่อระบบนิเวศในบริเวณแหล่งน้ำอย่างรุนแรง อีกทั้งยังมีผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์และสัตว์ที่อาศัยอยู่บริเวณโดยรอบแหล่งน้ำที่เน่าเสีย จากการทบทวนและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าโดยทั่วไประบบบำบัดน้ำเสียที่ได้จากการแปรรูปเมล็ดกาแฟที่นิยมใช้ ได้แก่ การหมักย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยกระบวนการทางชีวภาพในสภาวะไร้ออกซิเจน (Anaerobic process) [4]-[6] เนื่องจากสามารถบำบัดน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังสามารถผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อใช้ในการสร้างความร้อนหรือกระแสไฟฟ้าได้อีกด้วย อย่างไรก็ตาม เนื่องจากน้ำเสียที่ได้จากการแปรรูปเมล็ดกาแฟมีสภาวะความเป็นกรด จึงจำเป็นต้องเพิ่มค่าพีเอชด้วยการใส่สารเคมี เพื่อให้เหมาะสมกับสภาวะการทำงานของจุลินทรีย์ ซึ่งส่งผลต่อค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นและน้ำทิ้งที่ได้จากการหมักย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยกระบวนการทางชีวภาพในสภาวะไร้ออกซิเจนยังปนเปื้อนด้วยสารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสสูง จึงจำเป็นต้องได้รับการบำบัดในขั้นต่อไป [5]-[6] นอกจากนั้น อีกหนึ่งวิธีที่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสีย

จากการแปรรูปเมล็ดกาแฟ คือระบบการบำบัดน้ำเสียโดยอาศัยกระบวนการทางธรรมชาติแบบบึงประดิษฐ์ (Constructed wetland) ทั้งนี้เนื่องจากเป็นระบบที่มีวิธีดำเนินการไม่ซับซ้อน ค่าใช้จ่ายต่ำและไม่ต้องใช้เทคโนโลยีในการบำบัดสูง แต่ต้องหมั่นตัดวัชพืชหรือตัดพืชที่ปลูกออกอย่างสม่ำเสมอ เพื่อให้อากาศและแสงแดดส่องลงไปยังได้ผิวน้ำได้ [7]-[8]

ดังนั้น คณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดและสนใจพัฒนาระบบการบำบัดน้ำเสียที่ได้จากการแปรรูปเมล็ดกาแฟรามีกำด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก (Microalgae) ซึ่งเป็นระบบที่สามารถนำสารอาหารทั้งสารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่มีอยู่ในน้ำเสียที่ได้จากการแปรรูปเมล็ดกาแฟรามีกำกลับมาใช้ประโยชน์ด้วยการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายขนาดเล็ก เพื่อสร้างชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็ก ซึ่งเป็นพืชที่สามารถนำไปย่อยสลายต่อได้และมีศักยภาพสูงสำหรับใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเชื้อเพลิง เช่น ไบโอดีเซลและก๊าซมีเทน อีกทั้งการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กยังเป็นระบบที่สามารถบำบัดน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดำเนินการง่าย ไม่ซับซ้อน ใช้เงินลงทุนต่ำและมีค่าใช้จ่ายในการบำบัดต่ำ นอกจากนั้น การเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กยังมีประโยชน์ในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หนึ่งในก๊าซเรือนกระจกได้อีกด้วย [9]-[12]

โดยทั่วไป การเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กสามารถทำได้ใน 2 ระบบ ได้แก่ ระบบแขวนลอย (Suspended system) และระบบตรึงฟิล์ม (Biofilm system) สำหรับการเพาะเลี้ยงในระบบแขวนลอย เป็นระบบที่สาหร่ายขนาดเล็กเจริญเติบโตปะปนกับน้ำเสีย ซึ่งข้อดีของระบบนี้ คือมีวิธีดำเนินการระบบง่าย แต่มีค่าใช้จ่ายในการเก็บเกี่ยวชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กสูง เนื่องจากต้องทำการแยกชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กออกจากน้ำ ในขณะที่ระบบตรึงฟิล์ม สาหร่ายขนาดเล็กเจริญเติบโตอยู่บนแผ่นตัวกลางที่เตรียมไว้และแผ่นตัวกลางนี้จะอยู่บริเวณผิวน้ำ ซึ่งมีเพียงชั้นน้ำบางๆ ปกคลุม ทำให้เก็บเกี่ยวชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กได้ง่ายและมีค่าใช้จ่ายต่ำ แต่การออกแบบระบบตรึงฟิล์มจะมีความซับซ้อนกว่าระบบแขวนลอย [12] ด้วยเหตุนี้

ทางคณะผู้วิจัยจึงสนใจการออกแบบระยะเวลาของการเก็บเกี่ยวโดยเฉพาะในระบบตรึงฟิล์ม โดยทั่วไปวิธีการเก็บเกี่ยวชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กในระบบแขวนลอยจะดำเนินการเพียงครั้งเดียวหลังจากหยุดระบบ แต่ในระบบตรึงฟิล์ม ควรเก็บเกี่ยวทั้งในระหว่างและหลังจากหยุดระบบ เพื่อเพิ่มอัตราการผลิตชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย ตัวอย่างจากการศึกษาของ Boelee et al. [13] พบว่าระยะเวลาการเก็บเกี่ยวชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กที่เหมาะสมที่สุด คือเก็บเกี่ยวในทุกๆ 7 วัน เนื่องจากทำให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียและความหนาของชั้นสาหร่ายขนาดเล็กคงที่ ดังนั้น คณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียและอัตราการผลิตของชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็ก ที่มีระยะเวลาการเก็บเกี่ยวในวันที่ 7 และหลังจากหยุดระบบ เฉพาะในระบบตรึงฟิล์ม

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการจัดไนโตรเจน ฟอสฟอรัสและสารอินทรีย์ในรูปของที่เคเอ็นไนโตรเจน (TKN-N) ฟอสเฟตฟอสฟอรัส ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$) และซีโอดี (COD) ที่ละลายน้ำได้ ตามลำดับของการบำบัดน้ำเสียที่ได้จากการแปรรูปเมล็ดกาแฟแบบเปียกด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กในระบบแขวนลอยและระบบตรึงฟิล์ม ทั้งนี้เนื่องจากสาหร่ายขนาดเล็กสามารถใช้ไนโตรเจนได้ทั้งในรูปของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ซึ่งที่เคเอ็นไนโตรเจนประกอบด้วยสารไนโตรเจนที่อยู่ในรูปของสารอินทรีย์และในรูปของแอมโมเนียมที่สาหร่ายขนาดเล็กต้องการใช้ในการเจริญเติบโต ในขณะที่สาหร่ายขนาดเล็กต้องการใช้ฟอสฟอรัสในรูปของสารอนินทรีย์ ได้แก่ ฟอสเฟตฟอสฟอรัส [10], [12] โดยทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กในระยะเวลา 14 วันต่อรอบ ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่สาหร่ายขนาดเล็กเข้าสู่ระยะคงที่ (Stationary phase) และมีความจำเป็นที่ต้องทำการเก็บเกี่ยวชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กหลังจากหยุดระบบ [9], [12]

นอกจากนั้น งานวิจัยนี้ยังมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอัตราการผลิตของชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กในระบบตรึงฟิล์ม ในการบำบัดน้ำเสียที่ได้จากการแปรรูปเมล็ดกาแฟแบบเปียก โดยใช้ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวในวันที่ 7 และ 14 และใช้ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวเพียงครั้งเดียวในวันที่ 14 เพื่อนำผลการวิจัยที่ได้ไปใช้พัฒนาระบบการบำบัดน้ำเสียจากการแปรรูปเมล็ดกาแฟแบบเปียกอย่างยั่งยืนต่อไป

3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การเตรียมหัวเชื้อสาหร่ายขนาดเล็กเริ่มต้น

หัวเชื้อสาหร่ายขนาดเล็กเริ่มต้นที่ใช้เป็นหัวเชื้อสาหร่ายขนาดเล็กชนิดผสม (Mixed-microalgae culture) เก็บจากบ่อปรับเสถียร ซึ่งเป็นระบบบำบัดน้ำเสียรวมของศูนย์พัฒนาโครงการหลวงตีนตก จังหวัดเชียงใหม่ ที่ระดับความเข้มข้นน้ำหนักแห้ง (Dry weight; DW) ของเซลล์สาหร่ายขนาดเล็ก เท่ากับ 9.4 ± 0.4 กรัม/น้ำหนักแห้งต่อลิตร เป็นค่าเฉลี่ยที่ได้มาจากการศึกษาที่ผ่านมาของ Khiewwijit et al. [9] ซึ่งพบว่าสาหร่ายขนาดเล็กสามารถเจริญเติบโตและช่วยกำจัดสิ่งปนเปื้อนที่มีอยู่ในน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3.2 ลักษณะสมบัติของน้ำทางเคมี

น้ำเสียที่ได้จากการแปรรูปเมล็ดกาแฟแบบเปียกเป็นน้ำเสียที่ได้มาจากจุดเก็บรวบรวมน้ำเสียหลังจากขั้นตอนการกะเทาะเปลือกกาแฟ การหมักและการล้างเมือกกาแฟ จากศูนย์พัฒนาโครงการหลวงตีนตก จังหวัดเชียงใหม่ ปริมาณเฉลี่ยของน้ำเสียที่ได้จากการแปรรูปเมล็ดกาแฟแบบเปียกที่ผลิตได้ เท่ากับ 10 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยนำน้ำเสียที่เก็บได้ มาผ่านการกรองด้วยตาข่ายผ้ามุ้งไนลอนสีฟ้าขนาด 20 ตาต่อตารางนิ้ว ซึ่งสามารถกรองเมือกและเมล็ดกาแฟที่ตกค้างในน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ ลักษณะสมบัติทางเคมีของน้ำเสียหลังจากผ่านการกรองเมือกและเมล็ดกาแฟที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ มีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ลักษณะสมบัติทางเคมีของน้ำเสียที่ได้จากการแปรรูปเมล็ดกาแฟแบบเปียกที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์	หน่วย	ค่าความเข้มข้นเฉลี่ย*
พีเอช (pH)	-	4.29 ± 0.10
ทีเคเอ็นไนโตรเจนที่ละลายน้ำได้ (Dissolved TKN-N)	มิลลิกรัมต่อลิตร	103.6 ± 4.8
ฟอสเฟตฟอสฟอรัสที่ละลายน้ำได้ (Dissolved PO_4^{3-} -P)	มิลลิกรัมต่อลิตร	71.6 ± 14.9
ซีโอดีทั้งหมด (Total COD)	มิลลิกรัมต่อลิตร	$10,095 \pm 778$
ซีโอดีที่ละลายน้ำได้ (Dissolved COD)	มิลลิกรัมต่อลิตร	$5,036 \pm 529$
ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS)	กรัมต่อลิตร	1.078 ± 0.283
ของแข็งแขวนลอยระเหยง่าย (VSS)	กรัมต่อลิตร	1.044 ± 0.270

หมายเหตุ: *ค่าเฉลี่ยได้จากการตรวจวัดจากทั้ง 3 รอบการทดลอง และตรวจ 3 ซ้ำในแต่ละรอบ

3.3 แผ่นตัวกลางที่ใช้สำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กในระบบตรึงฟิล์ม

การเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กในระบบตรึงฟิล์มใช้แผ่นตัวกลางที่ได้พัฒนามาจากการศึกษาครั้งก่อน [9] ซึ่งพบว่าสาหร่ายขนาดเล็กสามารถยึดเกาะและเจริญเติบโตอยู่บนแผ่นตัวกลางที่ใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยแผ่นตัวกลางที่ใช้มีขนาด 0.4 เมตร x 0.4 เมตร (กว้าง x ยาว) มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 0.16 ตารางเมตร และประกอบด้วยวัสดุ 3 ชั้น ยึดติดกันด้วยเอ็นไคโนลอน โดยชั้นบนและล่างของแผ่นตัวกลางเป็นวัสดุตาข่ายกรองแสง ระดับ 90 เปอร์เซนต์ ชนิดสีดำ (90% Knitted black shade netting) (ดังแสดงในรูปที่ 1) ส่วนชั้นกลางของแผ่นตัวกลางเป็นวัสดุแผ่นใยขัด (Scotch-Brite™ General purpose scouring pad No. 105)



รูปที่ 1 แผ่นตัวกลางที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กในระบบตรึงฟิล์ม

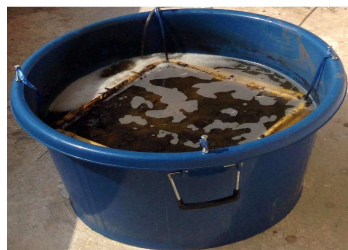
3.4 ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กในระบบแขวนลอยและระบบตรึงฟิล์ม และศึกษาอัตราการผลิตชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กในระบบตรึงฟิล์ม ซึ่งใช้ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน

นำหัวเชื้อสาหร่ายขนาดเล็กชนิดผสม มาทำการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียที่ได้จากการแปรรูปเมล็ดกาแฟแบบเปียก โดยทำการออกแบบการทดลองเป็น 3 ชุดการทดลอง และทำการทดลองเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กในระดับห้องปฏิบัติการและใช้ระบบเปิด ภายใต้สภาวะแวดล้อมและแสงแดดตามธรรมชาติ ในที่โล่งแจ้ง ไม่มีเงาต้นไม้บดบัง ของบริเวณสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา จังหวัดเชียงใหม่ ตั้งแต่เดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนมีนาคม โดยทำการทดลองชุดการทดลองละ 3 รอบ รอบละ 14 วัน การเดินระบบของการทดลองใช้ถังพลาสติกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 เซนติเมตร (ขอบด้านบน) และ 45 เซนติเมตร (ขอบด้านล่าง) มีความสูง 25 เซนติเมตร และมีปริมาตรการใช้งาน 40 ลิตร ในชุดการทดลองที่ 1 ทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กในระบบแขวนลอย (ดังแสดงในรูปที่ 2ก) สำหรับในชุดการทดลองที่ 2 และ 3 ทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กในระบบตรึงฟิล์ม (ดังแสดงในรูปที่ 2ข) โดยในชุดการทดลองที่ 2 ทำการเก็บเกี่ยวชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กทุกๆ 7 และ 14 วัน เรียกว่า ระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 7 และ 14)

ในขณะที่ชุดการทดลองที่ 3 ทำการเก็บเกี่ยวชีวมวลสำหรับขนาดเล็กทุกๆ 14 วัน เรียกว่า ระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 14) ทั้ง 3 ชุดการทดลองใช้หัวเชื้อสำหรับขนาดเล็กชนิดผสมเริ่มต้น ที่มีความเข้มข้น 9.4 ± 0.4 กรัม/น้ำหนักแห้งต่อลิตร ปริมาตร 0.4 ลิตร หรือคิดเป็นร้อยละ 1 ของปริมาตรต่อปริมาตร [9] และเติมน้ำเสียที่ได้จากการแปรรูปเมล็ดกาแฟแบบเปียก ปริมาตร 39.6 ลิตร ลงไปในถังพลาสติก โดยชุดการทดลองที่ 1 ทำการเทหัวเชื้อสำหรับขนาดเล็กชนิดผสมลงไปในถังได้โดยตรง ในขณะที่ชุดการทดลองที่ 2 และ 3 ทำการเทหัวเชื้อสำหรับขนาดเล็กชนิดผสมลงบนแผ่นตัวกลางที่ใช้เพาะเลี้ยงสำหรับขนาดเล็กในระบบตรึงฟิล์ม จากนั้นใช้เครื่องเติมอากาศ (Electromagnetic air pump) และหัวทราย (Aquarium air stone) ช่วยในการกวนตลอดเวลาของการเพาะเลี้ยงสำหรับขนาดเล็กในทุกชุดการทดลอง



(ก) Suspended system



(ข) Biofilm system

รูปที่ 2 การเพาะเลี้ยงสำหรับขนาดเล็กด้วยน้ำเสียที่ได้จากการแปรรูปเมล็ดกาแฟแบบเปียก

3.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

3.5.1 ลักษณะสมบัติของน้ำทางเคมี

ทำการวิเคราะห์คุณภาพของน้ำเสียที่ได้จากการแปรรูปเมล็ดกาแฟแบบเปียก ทั้งก่อนเข้าระบบบำบัด

และในวันที่ 2 4 7 9 11 และ 14 ของการบำบัดด้วยสำหรับขนาดเล็ก โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียในช่วงเวลากลางวัน ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่เหมาะสมกับการเก็บตัวอย่างน้ำเสีย เนื่องจากสำหรับขนาดเล็กมีอัตราการเจริญเติบโตที่ดี การวิเคราะห์พารามิเตอร์อ้างอิงตาม Standard Methods [14] ได้แก่ พีเอช (pH) หรือความเป็นกรด-ด่าง ที่เคเอ็นไนโตรเจนที่ละลายน้ำได้ (Dissolved TKN-N) ฟอสเฟตฟอสฟอรัสที่ละลายน้ำได้ (Dissolved PO_4^{3-} -P) และสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดีที่ละลายน้ำได้ (Dissolved COD) หลังจากเก็บตัวอย่างน้ำเสียแล้ว ทำการตรวจวัดค่าพีเอชทันที สำหรับวิธีการวิเคราะห์สารที่ละลายน้ำได้ ทำได้โดยการนำตัวอย่างน้ำเสียไปปั่นด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) ที่ความเร็ว 2,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที ซึ่งเป็นความเร็วและระยะเวลาที่สามารถแยกตะกอนออกจากสารละลายได้อย่างมีประสิทธิภาพ ที่ได้จากการศึกษาที่ผ่านมา [9] หลังจากนั้นทำการแยกเฉพาะสารละลายออก แล้วจึงวิเคราะห์ปริมาณ TKN-N PO_4^{3-} -P และ COD ที่เหลือในสารละลาย

3.5.2 ประสิทธิภาพการกำจัด TKN-N PO_4^{3-} -P

และ COD

ตรวจวัดความเข้มข้นของ TKN-N PO_4^{3-} -P และ COD ที่ละลายน้ำได้ ทั้งก่อนและหลัง (วันที่ 14) ของการบำบัดด้วยสำหรับขนาดเล็ก แล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาประสิทธิภาพการกำจัด TKN-N PO_4^{3-} -P และ COD ของสำหรับขนาดเล็ก จากสมการ (1) [15]

$$\eta_x = \frac{(C_{x,in} - C_{x,out}) * 100}{C_{x,in}} \quad (1)$$

โดยที่ η_x คือ ประสิทธิภาพการกำจัดของสาร x (ร้อยละ) และในการศึกษารั้งนี้ x ได้แก่ สาร TKN-N PO_4^{3-} -P และ COD ที่ละลายน้ำได้ สำหรับ $C_{x,in}$ คือความเข้มข้นของสาร x ก่อนเข้าสู่ชุดการทดลองหรือก่อนเข้าระบบบำบัด (มิลลิกรัมต่อลิตร) และ $C_{x,out}$ คือความเข้มข้นของสาร x หลังออกจากชุดการทดลองหรือหลังการบำบัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)

3.5.3 อัตราการผลิตชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กในระบบตรึงฟิล์ม

ทำการเก็บเกี่ยวชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กในระบบตรึงฟิล์มด้วยการใช้ข้อช้อนขูดบนแผ่นตัวกลางที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก ในชุดการทดลองที่ 2 ซึ่งเก็บเกี่ยวชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กทุกๆ 7 และ 14 วัน ในขณะที่ชุดการทดลองที่ 3 ซึ่งทำการเก็บเกี่ยวชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กในทุกๆ 14 วัน โดยเก็บเกี่ยวชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กในช่วงเวลากลางวัน หลังจากนั้นนำชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กมาชั่งน้ำหนักหาปริมาณสาหร่ายขนาดเล็กเปียก (Wet weight) แล้วจึงนำไปหาปริมาณน้ำหนักสาหร่ายขนาดเล็กแห้ง โดยการนำชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กเปียกมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง จากนั้นให้นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาอัตราการผลิตชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กแห้ง จากสมการ (2) [9], [13]

$$Production\ rate_{DW} = \frac{Yield_{DW} * V_{total}}{Cultivation\ time} \quad (2)$$

โดยที่ $Production\ rate_{DW}$ คือ อัตราผลผลิตชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กแห้ง (กรัม น้ำหนักแห้งต่อวัน) $Yield_{DW}$ คือ ผลผลิตชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กแห้ง (กรัม น้ำหนักแห้งต่อลิตร) V_{total} คือ ปริมาตรใช้งานทั้งหมดสำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก (ลิตร) และ $Cultivation\ time$ คือ ระยะเวลาการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กในแต่ละรอบ (วัน)

4. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 ประสิทธิภาพการกำจัด TKN-N PO_4^{3-} -P และ COD และลักษณะน้ำทิ้งที่ได้หลังจากการบำบัดด้วยสาหร่ายขนาดเล็ก

ผลการศึกษาความสามารถในการกำจัด TKN-N PO_4^{3-} -P และ COD ที่ละลายน้ำได้ ซึ่งเป็นธาตุอาหารและสารอินทรีย์ที่สาหร่ายขนาดเล็กและแบคทีเรียสามารถนำไปใช้ได้ทันที [12], [15] ดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่าระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 7 และ 14) มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียที่ได้จากการแปรรูปเมล็ดกาแฟแบบเปียกได้สูงสุด โดยมีค่าเฉลี่ยในการ

กำจัด TKN-N PO_4^{3-} -P และ COD ที่ละลายน้ำได้เท่ากับร้อยละ 48.44 และ 90 ตามลำดับ รองลงมาด้วยระบบแขวนลอย ที่สามารถกำจัดได้ทีค่าเฉลี่ยร้อยละ 42.40 และ 81 ตามลำดับ ในขณะที่ระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 14) สามารถกำจัดได้น้อยที่สุด ที่ค่าเฉลี่ยร้อยละ 37.35 และ 78 ตามลำดับ สอดคล้องกับการศึกษาของ Khiewwijit et al. [9] ที่พบว่าระบบตรึงฟิล์ม สามารถกำจัดสาร TKN-N และ PO_4^{3-} -P ที่ละลายน้ำได้ในน้ำทิ้งที่ได้จากการหมักย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยกระบวนการทางชีวภาพในสภาวะไร้ออกซิเจนของน้ำเสียฟาร์มสุกรได้สูงกว่าระบบแขวนลอย เนื่องจากการใช้ระบบตรึงฟิล์มช่วยลดข้อจำกัดปริมาณแสงที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายขนาดเล็กและเพิ่มปริมาณการถ่ายเทมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 mass transfer) [16]-[17] สำหรับประสิทธิภาพในการกำจัด COD ที่ละลายน้ำได้ซึ่งพบระหว่างเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กเพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่ได้จากการแปรรูปเมล็ดกาแฟแบบเปียก เกิดจากการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่ปะปนมากับน้ำเสียที่ได้จากการแปรรูปเมล็ดกาแฟแบบเปียก ซึ่งจะอภิปรายผลเพิ่มเติมในหัวข้อต่อไป

นอกจากนั้น เมื่อพิจารณาความเข้มข้นของ TKN-N PO_4^{3-} -P และ COD ที่ละลายน้ำได้ในน้ำทิ้งที่ได้หลังจากการบำบัดด้วยสาหร่ายขนาดเล็กทั้ง 3 ระบบ ดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่าระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 7 และ 14) สามารถผลิตน้ำทิ้งที่มีคุณภาพดีกว่าระบบแขวนลอยและระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 14) ซึ่งน้ำทิ้งที่ได้จากระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 7 และ 14) มีค่าเฉลี่ยของ TKN-N PO_4^{3-} -P และ COD ที่ละลายน้ำได้ เท่ากับ 54.1 39.8 และ 518 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานการควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรมและเขตประกอบการอุตสาหกรรม [18] พบว่าความเข้มข้นของค่าซีโอดีในน้ำทิ้งที่ได้หลังจากการบำบัดด้วยการใช้สาหร่ายขนาดเล็กยังมีค่าเกินกว่าที่มาตรฐานกำหนด (ค่าซีโอดีรวมทั้งหมด ไม่เกิน 120 มิลลิกรัมต่อลิตร)

ในขณะที่ค่าที่เคเอ็นไนโตรเจนและพีเอชมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานกำหนด (ค่าที่เคเอ็นไนโตรเจน ไม่เกิน 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าพีเอชอยู่ระหว่าง 5.5 ถึง 9.0) ดังนั้น จากคุณภาพของน้ำทิ้งที่ได้หลังจากการบำบัดด้วยการใช้สาหร่ายขนาดเล็ก จึงยังไม่เหมาะที่จะปล่อยน้ำทิ้งลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติหรือสิ่งแวดล้อมโดยตรง และควรบำบัดด้วยวิธีธรรมชาติอีกครั้งหนึ่ง เช่น การใช้บึงประดิษฐ์หรือบ่อปรับเสถียร [7]-[8] เพื่อให้ระบบธรรมชาติย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งต่อไป

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัด TKN-N PO_4^{3-} -P และ COD หลังจากการบำบัดของแต่ละชุดการทดลอง

ระบบ การเพาะเลี้ยง สาหร่ายขนาดเล็ก	ค่าเฉลี่ย ประสิทธิภาพ การกำจัด* (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ย ความเข้มข้น หลังจาก การบำบัด**,**
1. ชุดการทดลองที่ 1: ระบบแขวนลอย		
Dissolved TKN-N	42 ± 2	59.7 ± 4.3
Dissolved PO_4^{3-} -P	40 ± 3	42.8 ± 6.4
Dissolved COD	81 ± 4	968 ± 315
pH	-	8.53 ± 0.27
2. ชุดการทดลองที่ 2: ระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 7 และ 14)		
Dissolved TKN-N	48 ± 3	54.1 ± 3.2
Dissolved PO_4^{3-} -P	44 ± 4	39.8 ± 5.3
Dissolved COD	90 ± 2	518 ± 160
pH	-	8.64 ± 0.31
3. ชุดการทดลองที่ 3: ระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 14)		
Dissolved TKN-N	37 ± 3	65.3 ± 3.2
Dissolved PO_4^{3-} -P	35 ± 4	46.0 ± 6.1
Dissolved COD	78 ± 6	1,095 ± 324
pH	-	7.45 ± 0.35

หมายเหตุ: *ค่าเฉลี่ยได้จากการทดลองเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กในแต่ละระบบรวม 3 รอบ รอบละ 14 วัน, **หน่วย: มิลลิกรัมต่อลิตร ยกเว้นพีเอช ไม่มีหน่วย

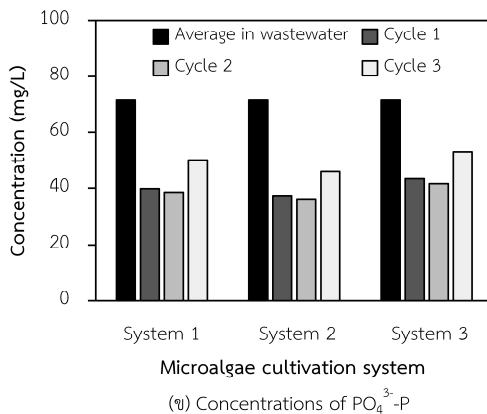
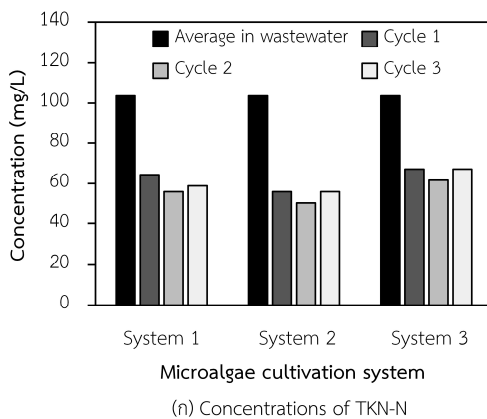
4.2 ผลการตรวจความเข้มข้น TKN-N PO_4^{3-} -P และ COD และค่าพีเอชระหว่างการบำบัดด้วยสาหร่ายขนาดเล็ก

4.2.1 TKN-N และ PO_4^{3-} -P ที่ละลายน้ำได้

ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นในการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนาดเล็ก โดยไนโตรเจนใช้ในกระบวนการเกิดเมตาบอลิซึมภายในเซลล์สาหร่ายขนาดเล็ก ส่วนฟอสฟอรัสมีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการถ่ายเทพลังงานและการสร้างกรดนิวคลีอิก [12] ผลการเปรียบเทียบความเข้มข้นของ TKN-N และ PO_4^{3-} -P ที่ละลายน้ำได้ในน้ำเสียก่อนเข้าบำบัดด้วยสาหร่ายขนาดเล็กและน้ำทิ้งที่ได้หลังจากการบำบัดทั้ง 3 ระบบ ดังแสดงในรูปที่ 3 พบว่าน้ำทิ้งที่ได้หลังจากการบำบัดด้วยสาหร่ายขนาดเล็กในระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 7 และ 14) มีความเข้มข้นของ TKN-N และ PO_4^{3-} -P ที่ละลายน้ำได้ในแต่ละรอบน้อยที่สุด ซึ่งความเข้มข้นของ TKN-N ที่ละลายน้ำได้มีค่าเท่ากับ 56.0 50.4 และ 56.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ในรอบที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ (ดังแสดงในรูปที่ 3ก) และมีความเข้มข้นของ PO_4^{3-} -P ที่ละลายน้ำได้ มีค่าเท่ากับ 37.3 36.1 และ 45.9 มิลลิกรัมต่อลิตร ในรอบที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ (ดังแสดงในรูปที่ 3ข) ในขณะที่ระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 14) มีความเข้มข้นของ TKN-N และ PO_4^{3-} -P ที่ละลายน้ำได้ในน้ำทิ้งที่ได้หลังจากการบำบัดของแต่ละรอบการทดลองมากที่สุด

จากผลการทดลองนี้ แสดงให้เห็นถึงความจำเป็นของการออกแบบระบบและการเลือกระยะเวลาในการเก็บเกี่ยวชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็ก เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงในการกำจัด TKN-N และ PO_4^{3-} -P เนื่องจากในระบบแขวนลอย แสงแดดที่ส่องลงไปในระบบเพื่อใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงอาจจะส่องได้ไม่ทั่วถึงโดยเฉพาะบริเวณด้านล่างสุดของระบบ นอกจากนั้น ยังจำกัดการถ่ายเทมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์บริเวณด้านล่างของระบบอีกด้วย ในขณะที่เมื่อใช้ระบบตรึงฟิล์ม สาหร่ายขนาดเล็กจะเจริญเติบโตบนแผ่นตัวกลางที่อยู่บริเวณผิวน้ำ ทำให้ลดข้อจำกัดของปริมาณแสงแดดและการถ่ายเทมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ส่งผลต่อปริมาณการผลิต

ชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กที่สูงกว่าระบบแขวนลอย [16]-[17], [19] อย่างไรก็ตาม การใช้ระบบตรึงฟิล์มควรทำการเก็บเกี่ยวชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กในวันที่ 7 และ 14 ของการบำบัด เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัด TKN-N และ $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ เนื่องจากการเก็บเกี่ยวชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กเฉพาะในวันที่ 14 ของการบำบัด ส่งผลให้ชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กมีความหนาแน่นเกินไป และทำให้จำกัดอัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนาดเล็กที่อยู่บริเวณชั้นล่าง เพราะแสงแดดส่องลงไปไม่ถึงชั้นล่างของแผ่นตัวกลาง [13]

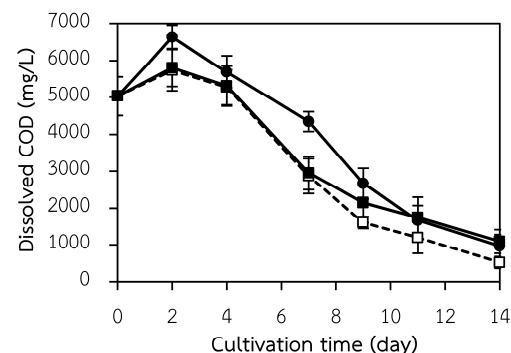


รูปที่ 3 การเปรียบเทียบความเข้มข้นของ TKN-N และ $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ ในน้ำเสียและน้ำทิ้งหลังการบำบัดของแต่ละชุดการทดลอง

โดย System 1 ระบบแขวนลอย System 2 ระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 7 และ 14) และ System 3 ระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 14)

4.2.2 สารอินทรีย์ในรูปของ COD ที่ละลายน้ำได้

ความเข้มข้นเฉลี่ยของสารอินทรีย์ในรูปของ COD ที่ละลายน้ำได้ ระหว่างการบำบัดน้ำเสียที่ได้จากการแปรรูปเมล็ดกาแฟแบบเปียกทั้ง 3 ระบบ ดังแสดงในรูปที่ 4 พบว่าใน 2 วันแรกของการบำบัด ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของ COD ที่ละลายน้ำได้เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในระบบแขวนลอย ซึ่งพบว่ามีค่า COD ที่ละลายน้ำได้ก่อนการบำบัด เท่ากับ 5,036 มิลลิกรัมต่อลิตร และในวันที่ 2 เพิ่มขึ้นเป็น 6,629 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากหัวเชื้อสาหร่ายขนาดเล็กชนิดผสมอยู่ในช่วงการปรับตัวเข้าสู่สภาวะแวดล้อมใหม่ ทำให้หัวเชื้อบางส่วนตายลงและส่งผลต่อการเพิ่มของปริมาณ COD ที่ละลายน้ำได้ในระบบ [20] แต่หลังจากวันที่ 2 ไปจนถึงวันที่ 14 ของการบำบัด พบว่าทั้ง 3 ระบบ ความเข้มข้นเฉลี่ยของ COD ที่ละลายน้ำได้มีค่าลดลง ทั้งนี้เป็นเพราะการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่ปะปนมากับน้ำเสียช่วยย่อยสลายสารอินทรีย์



รูปที่ 4 ความเข้มข้นเฉลี่ยของ COD ที่ละลายน้ำได้ ระหว่างการบำบัดด้วยสาหร่ายขนาดเล็ก โดยใช้ (●) ระบบแขวนลอย (□) ระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 7 และ 14) และ (■) ระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 14)

จากตัวอย่างรายงานของ Mujtaba et al. และจากกรมควบคุมมลพิษ [21]-[22] พบว่าสาหร่ายขนาดเล็กกับแบคทีเรียสามารถทำงานร่วมกันได้ โดยเฉพาะในระบบของการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการทางธรรมชาติที่มักพบสาหร่ายขนาดเล็กเจริญเติบโตอยู่

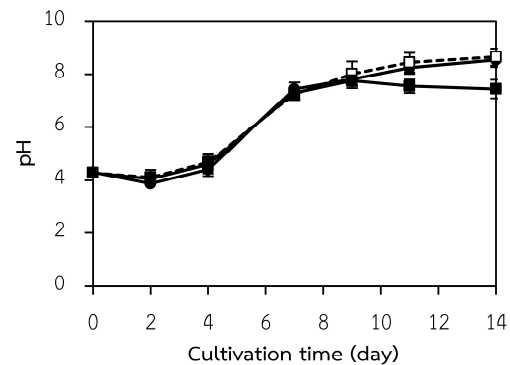
บริเวณผิวน้ำ โดยสาหร่ายขนาดเล็กจะอาศัยสารในโตรเจน ฟอสฟอรัสและคาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการสังเคราะห์แสง ผลจากการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายขนาดเล็กจะได้ออกซิเจนซึ่งสามารถใช้ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ของแบคทีเรียแบบใช้ออกซิเจนได้ โดยเฉพาะสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดีที่ละลายน้ำได้ที่แบคทีเรียสามารถนำไปใช้ได้โดยตรง และผลจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ ทำให้ได้คาร์บอนไดออกไซด์สำหรับใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายขนาดเล็กต่อไป

นอกจากนั้น เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัด COD ที่ละลายน้ำได้ในระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 7 และ 14) และในระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 14) พบว่าในช่วง 7 วันแรกของการบำบัด ความเข้มข้นเฉลี่ยของ COD ที่ละลายน้ำได้มีค่าใกล้เคียงกันในทั้ง 2 ระบบ คือในวันที่ 7 ของการบำบัด ความเข้มข้นเฉลี่ย COD ที่ละลายน้ำได้ มีค่าเท่ากับ 2,865 และ 2,947 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ แต่หลังจากระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 7 และ 14) ทำการเก็บเกี่ยวชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กในวันที่ 7 ของการบำบัด พบว่าปริมาณ COD ที่ละลายน้ำได้มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องและความเข้มข้นเฉลี่ย COD ที่ละลายน้ำได้หลังจากผ่านการบำบัด มีค่าเท่ากับ 518 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่ระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 14) พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัด COD ที่ละลายน้ำได้ลดลงอย่างชัดเจนและความเข้มข้นเฉลี่ย COD ที่ละลายน้ำได้หลังจากผ่านการบำบัด มีค่าเท่ากับ 1,095 มิลลิกรัมต่อลิตร ทั้งนี้เนื่องจากความหนาของชั้นชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กที่เพิ่มขึ้น ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนาดเล็กและการผลิตออกซิเจนที่น้อยลง ทำให้จำกัดอัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่อาศัยออกซิเจนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ [13] สอดคล้องกับผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชในระบบ ซึ่งจะกล่าวต่อไป

4.2.3 ค่าพีเอชหรือความเป็นกรด-ด่าง

ค่าพีเอช (pH) หรือความเป็นกรด-ด่างของทั้ง 3 ระบบที่บำบัดด้วยสาหร่ายขนาดเล็ก มีความสัมพันธ์ต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนาดเล็ก และผลของ

การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชระหว่างการบำบัดน้ำเสียที่ได้จากการแปรรูปเมล็ดกาแฟแบบเปียกด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก มีรายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ค่าเฉลี่ยพีเอช (pH) ระหว่างการบำบัดด้วยสาหร่ายขนาดเล็ก โดยใช้ (●) ระบบแขวนลอย (□) ระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 7 และ 14) และ (■) ระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 14)

จากผลการทดลอง พบว่าสาหร่ายขนาดเล็กสามารถเจริญเติบโตได้ดีในน้ำเสียที่ได้จากการแปรรูปเมล็ดกาแฟแบบเปียก โดยเฉพาะหลังจากวันที่ 4 ของการบำบัดด้วยสาหร่ายขนาดเล็ก เนื่องจากน้ำเสียที่ได้จากการแปรรูปเมล็ดกาแฟแบบเปียก มีค่าเฉลี่ยพีเอชเท่ากับ 4.29 (ดังแสดงในตารางที่ 1) หรือมีสภาวะความเป็นกรด ในขณะที่สาหร่ายขนาดเล็กส่วนใหญ่สามารถเจริญเติบโตได้ดี ที่ช่วงพีเอชมีค่าอยู่ระหว่าง 6-10 [23] อย่างไรก็ตาม มีสาหร่ายขนาดเล็กบางชนิดที่สามารถเจริญเติบโตได้ในสภาวะความเป็นกรด ที่ช่วงพีเอชมีค่าอยู่ระหว่าง 3-5 หรือแม้แต่ในสภาวะที่ค่าพีเอชต่ำกว่า 3 [24]-[25] ดังนั้นในช่วง 4 วันแรกของการบำบัดด้วยสาหร่ายขนาดเล็ก หัวเชื้อเริ่มต้นของสาหร่ายขนาดเล็กชนิดผสมที่ใส่ลงไปจะเข้าสู่ในช่วงการปรับตัวให้เข้ากับอาหารและสิ่งแวดล้อมใหม่ ซึ่งเรียกช่วงนี้ว่า ระยะพักตัว (Lag phase) ส่งผลให้ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของทั้ง 3 ระบบ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงมาก แต่หลังจากวันที่ 4 ถึง 7 ของการบำบัด พบว่าค่าเฉลี่ยพีเอชเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในทั้ง 3

ระบบ ทั้งนี้เนื่องจากสารอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ร่วมกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถูกใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายขนาดเล็ก จึงทำให้ปริมาณสารละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำซึ่งอยู่ในรูปของกรดคาร์บอนิกมีปริมาณลดลง และส่งผลทำให้ค่าเฉลี่ยพีเอชเพิ่มขึ้น [25]

นอกจากนั้น ผลของค่าพีเอช ดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่าพีเอชจากวันที่ 9 ถึง 14 ของการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบแวนลอยและระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 7 และ 14) มีค่าเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเล็กน้อย จาก 7.82 เป็น 8.53 ในระบบแวนลอยและจาก 8.01 เป็น 8.64 ในระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 7 และ 14) เนื่องจากสาหร่ายขนาดเล็กอยู่ในช่วงระยะคงที่ (Stationary phase) ซึ่งเป็นช่วงที่มีอัตราการเจริญเติบโตและอัตราการตายเท่ากัน ในขณะที่ระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 14) มีค่าเฉลี่ยพีเอชลดลงจากพีเอช 7.77 เป็น 7.45 ในวันที่ 9 และ 14 ตามลำดับ ทั้งนี้เป็นผลมาจากการที่ระบบบำบัดไม่มีการเก็บเกี่ยวชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กในวันที่ 7 ซึ่งความหนาของชั้นชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กที่เพิ่มขึ้น ทำให้แสงแดดส่องลงไปไม่ถึงชั้นล่างของแผ่นตัวกลางและจำกัดการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนาดเล็ก สอดคล้องกับ Khiewwijit et al. [9] ที่ศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งที่ได้จากการหมักย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยกระบวนการทางชีวภาพในสภาวะไร้ออกซิเจนของน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยสาหร่ายขนาดเล็กและทำการเก็บเกี่ยวชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กทุกๆ 14 วัน พบว่าพีเอชในวันที่ 14 ของการบำบัดด้วยระบบตรึงฟิล์ม มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.03 ในขณะที่ระบบแวนลอย มีค่าเฉลี่ยพีเอชสูงถึง 8.95 เมื่อทำการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชกับระยะเวลาของการบำบัดน้ำเสียด้วยสาหร่ายขนาดเล็ก พบว่าจำเป็นต้องเก็บเกี่ยวชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กในระบบตรึงฟิล์มทั้งในระหว่างบำบัดและหลังจากหยุดระบบ เพื่อช่วยลดความหนาของชั้นชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็ก ซึ่งจะทำให้มีประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสูงขึ้น

4.3 อัตราการผลิตชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กในระบบตรึงฟิล์ม

เมื่อพิจารณาผลผลิตสาหร่ายขนาดเล็กเปียกและแห้งที่เก็บเกี่ยวได้ในระบบตรึงฟิล์ม พบว่ามีปริมาณน้ำและอัตราผลผลิตชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กของทั้ง 2 ระบบ ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำและอัตราผลผลิตชีวมวลของสาหร่ายขนาดเล็กเปียกและแห้งในระบบตรึงฟิล์ม

พารามิเตอร์	ระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 7 และ 14)*	ระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 14)*
ผลผลิตของสาหร่ายขนาดเล็กเปียกที่ได้ต่อพื้นที่เพาะปลูก (กรัมน้ำหนักเปียกต่อตารางเมตรต่อวัน)	17.81	18.56
ผลผลิตของสาหร่ายขนาดเล็กแห้งที่ได้ต่อพื้นที่เพาะปลูก (กรัมน้ำหนักแห้งต่อตารางเมตรต่อวัน)	6.39	7.43
ปริมาณน้ำ (ร้อยละ)	63.39	60.49
อัตราผลผลิตชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็ก (กรัมน้ำหนักแห้งต่อวัน)	1.02	1.19

หมายเหตุ: *ค่าเฉลี่ยได้จากการทดลองเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กในแต่ละระบบรวม 3 รอบ รอบละ 14 วัน

จากตารางที่ 3 พบว่าอัตราผลผลิตชีวมวลของสาหร่ายขนาดเล็กในระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 7 และ 14) มีค่าน้อยกว่าในระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 14) ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.02 กรัมน้ำหนักแห้ง

ต่อวัน และ 1.19 กรัม/น้ำหนักแห้งต่อวัน ตามลำดับ ทั้งนี้เป็นเพราะหัวเชื้อสาหร่ายขนาดเล็กที่เหลืออยู่ หลังจากเก็บเกี่ยวชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กในวันที่ 7 มีปริมาณน้อย ส่งผลให้ชีวมวลของสาหร่ายขนาดเล็ก ที่เก็บเกี่ยวได้ในวันที่ 14 มีปริมาณน้อยกว่าในระบบ ตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 14) อย่างไรก็ตาม จากผล การกำจัด TKN-N PO_4^{3-} -P และ COD ที่ละลายน้ำได้ (ดังแสดงในตารางที่ 2) แสดงให้เห็นชัดเจนว่าระบบ ตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 7 และ 14) มีประสิทธิภาพ ในการบำบัดน้ำเสียได้สูงกว่าระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยว ในวันที่ 14)

ดังนั้น คณะผู้วิจัยจึงมีข้อเสนอแนะให้ดำเนินการ เก็บเกี่ยวชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กให้เหลือเพียง ครั้งหนึ่งของพื้นที่แผ่นตัวกลางในวันที่ 7 และเก็บเกี่ยว ทั้งหมดในวันที่ 14 ของการบำบัด เพื่อเพิ่มอัตรา ผลผลิตชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กในระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 7 และ 14) นอกจากนั้น จากผลของ การทดลอง พบว่าปริมาณน้ำของผลผลิตชีวมวล สาหร่ายขนาดเล็กในระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 7 และ 14) มีค่าเฉลี่ยคิดเป็นร้อยละ 63.39 ซึ่งมีค่า ใกล้เคียงกับระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 14) ที่มี ค่าเฉลี่ยคิดเป็นร้อยละ 60.49 เมื่อทำการเปรียบเทียบกับระบบแขวนลอยที่ผลผลิตชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็ก มีปริมาณน้ำสูงได้มากถึงร้อยละ 99 [17], [26] พบว่า ชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กที่ได้จากระบบตรึงฟิล์มมี ปริมาณน้ำต่ำกว่าระบบแขวนลอย เนื่องจากในระบบ ตรึงฟิล์ม สาหร่ายขนาดเล็กเจริญเติบโตอยู่บนแผ่น ตัวกลางที่ใช้และมีเพียงชั้นน้ำบางๆ ปกคลุม ซึ่ง ปริมาณน้ำที่มีค่าต่ำในระบบตรึงฟิล์ม มีผลต่อการนำ ชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กไปใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการ ผลิตเป็นเชื้อเพลิง เช่น ไบโอดีเซล เพราะชีวมวล สาหร่ายขนาดเล็กสามารถย่อยสลายได้ง่าย [27]

5. สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษา สามารถกล่าวโดยสรุปได้ว่า การเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กด้วยระยะเวลา 14 วัน สามารถใช้บำบัดน้ำเสียที่ได้จากการแปรรูปเมล็ดกาแฟ แบบเปียกได้อย่างมีประสิทธิภาพและระบบตรึงฟิล์ม

(เก็บเกี่ยวในวันที่ 7 และ 14) มีประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัด TKN-N PO_4^{3-} -P และ COD ที่ละลายน้ำได้ ซึ่งสามารถกำจัดได้ร้อยละ 48.44 และ 90 ตามลำดับ ในขณะที่การเก็บเกี่ยวชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็กในวันที่ 7 ทำให้หัวเชื้อสาหร่ายขนาดเล็กที่เหลืออยู่มี ปริมาณน้อยและส่งผลทำให้อัตราผลผลิตชีวมวล สาหร่ายขนาดเล็กในระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวในวันที่ 7 และ 14) มีค่าน้อยกว่าระบบตรึงฟิล์ม (เก็บเกี่ยวใน วันที่ 14) ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.02 และ 1.19 กรัม น้ำหนักแห้งต่อวัน ตามลำดับ ดังนั้น เพื่อให้เกิดการ พัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียที่ได้จากการแปรรูปเมล็ด กาแฟแบบเปียกให้มีประสิทธิภาพและยั่งยืนต่อไปใน อนาคต จึงควรใช้การเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กใน ระบบตรึงฟิล์ม โดยเก็บเกี่ยวชีวมวลสาหร่ายขนาดเล็ก ให้เหลือสาหร่ายขนาดเล็กเพียงครั้งหนึ่งของพื้นที่แผ่น ตัวกลางในวันที่ 7 และเก็บเกี่ยวทั้งหมดในวันที่ 14 ของการบำบัด

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณทางมหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่ ที่สนับสนุน เงินทุนจากการดำเนินงานของมูลนิธิโครงการหลวง อีกทั้งคณะผู้วิจัยขอขอบคุณ นางสาวบงกช แก้วเมือง และนางสาวพิไลวรรณ ก่องคำ ที่ให้การช่วยเหลือเก็บ ผลการทดลองในการศึกษาค้นคว้า

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Horticulture Research Institute, "Situation in Asian countries", in *Strategic coffee Year 2560-2564*, (in Thai), Department of Agriculture, Bangkok, Thailand, 2017, pp. 13-18.
- [2] S. Roygrong and C. Chumpan. (2018, March 5). The process of quality arabica coffee production of the royal project (in Thai) [Online]. Available: <http://www.royalprojectthailand.com>

- [3] M. Tuiprae, "The development of the process of parchment coffee production in the royal project: Learning center of community enterprise for the process of parchment coffee production," (in Thai), Rajamangala Univ. of Technology Lanna, Chiang Mai, Progress Rep., 2017.
- [4] S. Rattan, A. K. Parande, V. D. Nagaraju, and G. K. Ghiwari, "A comprehensive review on utilization of wastewater from coffee processing," *Environ. Sci. Pollut. R.*, vol. 22, no. 9, pp. 6461-6472, 2015.
- [5] G. Schutgens, "Anaerobic treatment of coffee wastewater: A study on monitoring and implementation of biogas at Finca el Socorro, Matagalpa, Nicaragua," M.S. thesis, Dept. Civil Eng. and Geo Sci., Delft Univ. of Technology, The Netherlands, 2011.
- [6] J. C. von Enden and K. C. Calvert, "Review of coffee waste water characteristics and approaches to treatment," German Technical Cooperation Agency. Rep., 2002.
- [7] M. Rossmann, A. T. Matos, E. C. Abreu, F. F. Silva, and A. C. Borges, "Effect of influent aeration on removal of organic matter from coffee processing wastewater in constructed wetlands," *J. Environ. Manage.*, vol. 128, pp. 912-919, 2013.
- [8] M. Rossmann, A. T. de Matos, E. C. Abreu, F. F. e Silva, and A. C. Borges, "Performance of constructed wetlands in the treatment of aerated coffee processing wastewater: Removal of nutrients and phenolic compounds," *Ecol. Eng.*, vol. 49, pp. 264-269, 2012.
- [9] R. Khiewwijit, K. Panyaping, and P. Wongpankamol, "Nutrient removal by suspended and biofilm microalgae for treating the wastewater of agro-industrial pig farm," *Walailak J. Sci. & Tech.*, to be published. Abstract online, Jan. 5, 2018.
- [10] S. Abinandan and S. Shanthakumar, "Challenges and opportunities in application of microalgae (*Chlorophyta*) for wastewater treatment: A review," *Renew. Sust. Energ. Rev.*, vol. 52, pp. 123-132, 2015.
- [11] M. E. Montingelli, S. Tedesco, and A. G. Olabi, "Biogas production from algal biomass: A review," *Renew. Sust. Energ. Rev.*, vol. 43, pp. 961-972, 2015.
- [12] R. Whitton, F. Ometto, M. Pidou, P. Jarvis, R. Villa, and B. Jefferson, "Microalgae for municipal wastewater nutrient remediation: Mechanisms, reactors and outlook for tertiary treatment," *Environ. Technol. Rev.*, vol. 4, no. 1, pp. 133-148, 2015.
- [13] N. C. Boelee, M. Janssen, H. Temmink, L. Taparaviciute, R. Khiewwijit, A. Janoska, C. J. N. Buisman, and R. H. Wijffels, "The effect of harvesting on biomass production and nutrient removal in phototrophic biofilm reactors for effluent polishing," *J. Appl. Phycol.*, vol. 26, no. 3, pp. 1439-1452, 2014.
- [14] Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 22nd ed., APHA, American Water Works Association, Water Environment Federation, USA, 2012.
- [15] S. K. Prajapati, P. Kumar, A. Malik, and V. K. Vijay, "Bioconversion of algae to methane and subsequent utilization of digestate for algae cultivation: A closed loop bioenergy generation process," *Bioresour. Technol.*, vol. 158, pp. 174-180, 2014.
- [16] M. Gross, D. Jarboe, and Z. Wen, "Biofilm-based algal cultivation systems," *Appl.*

- Microbiol. Biotechnol.*, vol. 99, no. 14, pp. 5781-5789, 2015.
- [17] Y. Huang, W. Xiong, Q. Liao, Q. Fu, A. Xia, X. Zhu, and Y. Sun, "Comparison of *Chlorella vulgaris* biomass productivity cultivated in biofilm and suspension from the aspect of light transmission and microalgae affinity to carbon dioxide," *Bioresour. Technol.*, vol. 222, pp. 367-373, 2016.
- [18] Industrial Effluent Standard for Industry, Industrial Estate, and Industrial Zone, the Notification of the Ministry of Natural Resources and Environment, Royal Thai Government Gazette, No. 133, Special Section 129 Ngor-Ngoo, Date on June 6, B.E. 2559 (2016), (in Thai), 2016.
- [19] J. Wang, J. Liu, and T. Liu, "The difference in effective light penetration may explain the superiority in photosynthetic efficiency of attached cultivation over the conventional open pond for microalgae," *Biotechnol. Biofuels*, vol. 8, no. 49, pp. 1-12, 2015.
- [20] R. Gough, P. J. Holliman, G. M. Cooke, and C. Freeman, "Characterisation of algogenic organic matter during an algal bloom and its implications for trihalomethane formation," *Sustainability Water Qual. Ecol.*, vol. 6, pp. 11-19, 2015.
- [21] G. Mujtaba and K. Lee, "Treatment of real wastewater using co-culture of immobilized *Chlorella vulgaris* and suspended activated sludge," *Water Res.*, vol. 120, pp. 174-184, 2017.
- [22] Pollution control department, "Chapter 4: Stabilization ponds for wastewater treatment," in *Manual for wastewater treatment system*, (in Thai), Ministry of Science Technology and Environment, Bangkok, 2000, pp. 1-24.
- [23] J. S. Chang, P. L. Show, T. C. Ling, C. Y. Chen, S. H. Ho, C. H. Tan, D. Nagarajan, and W. N. Phong, "11. Photobioreactors," in *Current developments in biotechnology and bioengineering: Bioprocesses, bioreactors and controls*, C. Larroche, M. A. Sanroman, G. Du, and A. Pandey, Eds. Elsevier, 2017, pp. 313-352.
- [24] H. Gimpler, "Chapter 9: Acidophilic and acidotolerant algae," in *Algal adaptation to environmental stresses*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2001, pp. 259-290.
- [25] B. Zhao and Y. Su, "Process effect of microalgal-carbon dioxide fixation and biomass production: A review," *Renew. Sust. Energ. Rev.*, vol. 31, pp. 121-132, 2014.
- [26] C. F. Murphy and D. T. Allen, "Energy-water nexus for mass cultivation of algae," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 45, no. 13, pp. 5861-5868, 2011.
- [27] H. Cao, Z. Zhang, X. Wu, and X. Miao, "Direct biodiesel production from wet microalgae biomass of *Chlorella pyrenoidosa* through *in situ* transesterification," *Biomed Res. Int.*, vol. 2013, pp. 1-6, 2013.

ปัจจัยที่มีผลต่อการเพิกถอนรายวิชาเรียนของนิสิตระดับปริญญาตรี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ปีการศึกษา 2559

Factors Affecting Course Withdrawals of Undergraduate Engineering

Students at Srinakharinwirot University in Academic Year 2016

กำพล วรดิษฐ์^{1*} สมภพ บุญนาศักดิ์²

¹สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

²สำนักงานคณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

63 หมู่ 7 ถ.รังสิต-นครนายก อ.องครักษ์ จ.นครนายก 26120

Kampol Woradit^{1*} Sompop Boonnasak²

¹Electrical Engineering Faculty of Engineering Srinakharinwirot University

²Dean's Office Engineering Srinakharinwirot University

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

*Corresponding author E-mail: kampol@swu.ac.th

(Received: October 14, 2018; Accepted: November 29, 2018)

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มุ่งศึกษา 1) ปัจจัยที่มีผลต่อการเพิกถอนรายวิชาเรียนของนิสิตระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีการศึกษา 2559 และ 2) แนวทางการลดจำนวนการเพิกถอนรายวิชาเรียนของนิสิตระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒในอนาคต เก็บรวบรวมข้อมูลโดยใช้แบบสอบถาม ถ้ามานิสิตระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีการศึกษา 2559 ทุกสาขาวิชา จำนวน 335 คน สถิติที่ใช้วิเคราะห์ข้อมูล คือ สถิติพรรณนา t-test และ F-test พบว่า 1) ปัจจัยที่มีผลต่อการเพิกถอนรายวิชาเรียนของนิสิตมากที่สุด คือ ปัจจัยด้านหลักสูตร/การจัดการเรียนการสอน รองลงมาเป็นปัจจัยด้านอื่น ๆ ปัจจัยด้านผู้สอนและปัจจัยด้านผู้เรียน ตามลำดับ 2) ปัจจัยด้านผู้เรียน พบว่า ปัจจัยด้านผู้เรียนในเรื่องการได้คะแนนสอบกลางภาคน้อยเกินไป จนเกรงว่าจะไม่ผ่านรายวิชาเมื่อรวมคะแนนสอบปลายภาคนั้น มีผลต่อการเพิกถอนรายวิชาเรียนของนิสิตสูง ปัจจัยด้านผู้สอนในเรื่องผู้สอนไม่ประเมินว่าผู้เรียนเข้าใจมากน้อยเพียงใด ปัจจัยด้านหลักสูตร/การจัดการเรียนการสอนในเรื่องการจัดสอบทุกวิชากายในสัปดาห์เดียวทำให้เตรียมตัวสอบไม่ทัน และปัจจัยด้านอื่น ๆ ในเรื่องเพิกถอนเพื่อไม่ให้เกรดวิชาอื่น ๆ หรือถูกคัดชื่อออก และเรื่องไม่มีการเปิดสอนรายวิชาในภาคฤดูร้อน มีผลต่อการเพิกถอนรายวิชาเรียนของนิสิตสูงที่สุด 3) นิสิตที่เรียนในสาขาวิชาต่างกัน มีปัจจัยที่มีผลต่อการเพิกถอนรายวิชาแตกต่างกัน ทั้งภาพรวม (Sig. = .000) และ รายปัจจัย ได้แก่ ปัจจัยด้านผู้เรียน และปัจจัยด้านหลักสูตร/การจัดการเรียนการสอน (Sig. = .000) ปัจจัยด้านผู้สอน (Sig. = .009) และปัจจัยด้านอื่น ๆ (Sig. = .021) และ 4) นิสิตที่เรียนในชั้นปีต่างกัน มีปัจจัยที่มีผลต่อการเพิกถอนรายวิชาไม่แตกต่างกัน

สำหรับแนวทางการลดจำนวนการเพิกถอนรายวิชาเรียนของนิสิตคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ในอนาคต พบว่า ในด้านผู้เรียน เสนอว่า ควรบริหารเวลาและแบ่งเวลาในการอ่านหนังสือ ใช้วิธีการเพื่อนช่วยเพื่อนเรียน

กำหนดเป้าหมาย วางแผนในการเรียนอย่างเป็นรูปธรรมชัดเจน และสร้างแรงจูงใจในการเรียน ในด้านผู้สอน เสนอว่า ควรเอาใจใส่ในสิ่งที่รายบุคคลและรายกลุ่ม ปรับปรุงและพัฒนาการเรียนการสอนให้น่าสนใจและทำความเข้าใจได้ง่าย ต่อทั้งตัวผู้สอนและผู้เรียน ทำการประเมินผลหรือสอบให้เหมาะสมสอดคล้องกับเนื้อหา ใช้การสอนแบบยกตัวอย่าง ฝึกปฏิบัติให้มากกว่าการบรรยาย สร้างบรรยากาศการเรียนการสอนให้ดึงดูดใจผู้เรียน และประเมินผู้เรียนตลอดเวลา และในด้านหลักสูตร/การจัดการเรียนการสอน เสนอว่า ควรมีการปรับปรุงเนื้อหาของหลักสูตรให้ทันสมัยเสมอ กำหนดแนวทาง การประเมินให้เหมาะสมกับเนื้อหา ปรับปรุงการจัดเนื้อหาในลักษณะกระจายหรือไม่อัดแน่น เพื่อลดภาระการรับข้อมูล มากเกินไปของผู้เรียน เพิ่มวิชาปฏิบัติให้มากขึ้น ปรับปรุงเนื้อหาให้สามารถนำไปใช้จริงได้ ปรับลดวิชาที่ไม่จำเป็นต้องเรียนออก เปิดสอนภาคฤดูร้อน ปรับปรุงและพัฒนาเอกสารประกอบการเรียนให้มีความทันสมัย และควรมีห้องสมุดภายในคณะ

คำสำคัญ: การเพิกถอนรายวิชาเรียน นิสิตคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ABSTRACT

This research aims to study 1) factors affecting course withdrawals of undergraduate Engineering students at Srinakharinwirot University in academic year 2016 and 2) the ways to reduce the number of course withdrawals of undergraduate Engineering students at Srinakharinwirot University in the future. The sample group, used in this research, was composed of 335 undergraduate Engineering students at Srinakharinwirot University from all departments. A questionnaire was used as a tool to collect the data, and the data analysis was done by descriptive statistics, t-test and F-test. This study showed several results as follows. First, the most important factor, affecting students' course withdrawals, is the curriculum/teaching management. Second, other important factors are other factors, lecturers, and students, respectively. In terms of students, the top factor is that the students concern about their mid-term test scores. They are not sure whether they will pass the subject after taking the final examination. In terms of lecturers, the top factor is that the lecturers do not assess the student's understanding. In terms of curriculum/ instructional management, the one-week examination schedule is so dense that the students cannot take time to prepare themselves for all subjects. Three top factors among other factors are 1) concern about lowering GPAX, 2) retirement and 3) no offered course during summer school. Third, the students, who study in different fields, have different factors that affect the course withdrawals by overall factors (Sig. = .000), by student factor and by curriculum/instructional management factor (Sig. = .000), by lecturer factor (Sig. = .009), and by other factors (Sig. = .021). Forth, the students, who study in different years, have no significant difference in the factors affecting the course withdrawals.

The ways to reduce the number of course withdrawals of undergraduate Engineering students at Srinakharinwirot University in the future are as follows. First, students should do the time management and time allocation for reading, and should have helps among friends, set goals, practical

study plan, and self-motivations. Second, lecturers should pay attention to both individual student and student group, and should create the improvement and development in teaching, so that it is interesting and easy to understand. Moreover, the lectures should arrange the examination that is appropriate and correspond with the contents, the teaching by examples, practice hours more than lecture hours, attractive study atmosphere, and frequent student assessment. Third, curriculum/instructional management should be up-to-date, and should associate with the assessment that is appropriate and correspond with the contents. Moreover, the contents should not be scheduled too dense to reduce the students' burden to learn materials, and should emphasize more on practice courses. The materials should be improved so that they can be used in real life. Some courses are unnecessary, and should be dismissed. Courses should be offered during summer school. The handouts should be improved so that they are up-to-date. Last, the Faculty of Engineering should have its own library.

Keywords: Withdrawal of course, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University

1. บทนำ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ได้รับการจัดตั้งขึ้นเมื่อปี พ.ศ. 2535 เพื่อตอบสนองความต้องการอันเนื่องมาจากภาวะขาดแคลนวิศวกรที่มีคุณภาพในสาขาต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตโดยตรง เพื่อเป็นรากฐานในการพัฒนาเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมของประเทศ และได้ทำการจัดการเรียนการสอนและปรับปรุงพัฒนาหลักสูตรในสาขาต่าง ๆ ให้มีความทันสมัยอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน แต่อย่างไรก็ดี ในการศึกษาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์นั้นถือได้ว่าเป็นสาขาวิชาที่มีความเฉพาะทางสูง ผู้เรียนต้องมีความเข้าใจทางทฤษฎีอย่างมากและสามารถนำไปปฏิบัติได้ในเวลาปฏิบัติจริง เนื่องจากการปฏิบัติงานจริงนั้นงานด้านวิศวกรรมต้องการความละเอียด ถูกต้อง และแม่นยำสูง ดังนั้น ในการศึกษาตามหลักสูตรจึงมีรายวิชาที่จำเป็นและมีความยากง่ายตามลำดับ เพื่อสร้างทักษะและความเข้าใจต่าง ๆ แก่นิสิต โดยมีการส่งเสริม สนับสนุน และช่วยเหลือให้นิสิตทุกคนได้สำเร็จการศึกษาตามเกณฑ์ แต่อย่างไรก็ดี เนื่องจากการขยายตัวของหลักสูตรและสาขาวิชา รวมทั้งจำนวนนิสิตที่เพิ่มจำนวนมากขึ้นจึงทำให้การลงทะเบียนเรียนในแต่ละ

ภาคการศึกษานั้นมีปัญหาเกิดขึ้นหลายประการ ซึ่งปัญหาที่สำคัญประการหนึ่ง คือ การยกเลิกหรือเพิกถอน รายวิชาเรียนของนิสิต สำหรับการยกเลิกหรือเพิกถอน รายวิชาเรียนเป็นกระบวนการที่มีระบบแบบแผนและ มีความสำคัญกับผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนตามเกณฑ์ ที่กำหนดไว้ โดยจะมีการประเมินในทุก ๆ ภาคเรียน ตลอดจนเป็นเครื่องชี้วัดคุณภาพของนิสิตว่าได้ผ่านกระบวนการศึกษาในแต่ละวิชาตามโครงสร้างและหลักสูตรที่มีคุณภาพ เพื่อให้การบริหารงานด้านวิชาการดำเนินไปตามประกาศกระทรวงศึกษาธิการ เรื่องเกณฑ์มาตรฐานหลักสูตรระดับปริญญาตรี พ.ศ.2548 และประกาศกระทรวงศึกษาธิการ เรื่องแนวทางการบริหารเกณฑ์มาตรฐานหลักสูตรระดับอุดมศึกษา พ.ศ.2548 มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ได้มีการกำหนดข้อบังคับ การศึกษาระดับปริญญาตรี มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปี 2548 ว่าด้วยการของดวิชาเรียนอย่างน้อย 2 สัปดาห์ ก่อนสอบปลายภาคเรียน โดยการอนุมัติจากคณบดี ซึ่งจากสถิติจำนวนนิสิตของคณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่เพิกถอนวิชาเรียนในปีการศึกษา 2558 พบว่า ใน ภาคเรียนที่ 1 มีนิสิตที่ยื่นขอเพิกถอนวิชา จำนวน 270 คน และในภาค

เรียนที่ 2 จำนวน 278 คน ส่วนมากเป็นนิสิตชั้นปีที่ 1 เหตุผลสำคัญ คือ คะแนนสอบกลางภาคต่ำ แสดงให้เห็นว่าจำนวนนิสิตที่ยื่นขอเพิกถอนรายวิชายังคงมีจำนวนสูงคงที่และเนื่องมาจากเหตุผลเดิม ๆ เป็นหลัก ซึ่งการเพิกถอนรายวิชานั้นส่งผลทั้งต่อนิสิต เช่น ทำให้ เสียโอกาสที่จะสำเร็จการศึกษาช้ากว่าเกณฑ์ และส่งผล ต่อคณะ เช่น การสูญเสียทั้งงบประมาณ ทรัพยากรบุคคล และการประกันคุณภาพการศึกษา ซึ่งปัญหาการเพิกถอนวิชาเรียนปรากฏให้เห็นในการศึกษาวิจัย เช่น กัญญาภักดิ์ เมธีวัฒนา กุล และราชันย์ จันทร์เที่ยง (2552) ที่ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการยกเลิกรายวิชาเรียนของนักศึกษามหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ ปีการศึกษา 2552 พบว่า ปัจจัยที่มีผลมากที่สุด คือ ครอบครัวไม่มีความรักใคร่กัน ไม่สามารถช่วยเหลือเมื่อมีปัญหาได้ ผู้สอนเข้าสอนไม่สม่ำเสมอ ลงทะเบียนเรียนไม่ตรงแผนการเรียน เป็นต้น แสดงให้เห็นว่าสาเหตุที่ทำให้เกิดปัญหาการเพิกถอนวิชาเรียนนั้นมีหลายประการ และส่งผลกระทบต่อการบริหารจัดการของคณะ ดังนั้น เพื่อเป็นการลดและป้องกันปัญหาดังกล่าว คณะฯ จึงควรมีมาตรการแนวทางแก้ไขเพื่อให้การยกเลิกรายวิชาเรียนลดน้อยลง และมีแนวทางการพัฒนาที่เป็นรูปธรรมเพื่อประโยชน์ทั้งต่อนิสิตและคณะ คณะผู้วิจัยจึงเห็นสมควรศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการยกเลิกวิชาเรียนของนิสิตระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีการศึกษา 2559 เพื่อค้นหาข้อมูลและหาสาเหตุแห่งปัจจัยที่เกี่ยวกับการยกเลิกรายวิชาเรียนของนิสิต เพื่อที่จะประกันคุณภาพและเสนอแก่ผู้บริหารหาแนวทางในการแก้ไขการยกเลิกรายวิชา ให้น้อยลงและเป็นข้อมูลพื้นฐานและแนวทางในการวัดผลการประเมินการศึกษาต่อไป

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเพิกถอนรายวิชาเรียนของนิสิตระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีการศึกษา 2559

2.2 เพื่อศึกษาแนวทางการลดจำนวนการเพิกถอนรายวิชาเรียนของนิสิตระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ในอนาคต

3. สมมติฐานของการวิจัย

นิสิตที่มีลักษณะต่างกัน ได้แก่ สาขาและชั้นปี มีปัจจัยที่มีผลต่อการเพิกถอนรายวิชาเรียนแตกต่างกัน

4. วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยในครั้งนี้ใช้รูปแบบของการวิจัยเชิงปริมาณ ประชากร คือ นิสิตระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีการศึกษา 2559 ทุกสาขาวิชา จำนวน 1,423 คน สุ่มตัวอย่างแบบตามสะดวก จำนวน 335 คน กลุ่มตัวอย่างคำนวณจากสูตร ในกรณีที่ประชากรมีจำนวนแน่นอนของยามานะ (Yamane, 1973) ที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เครื่องมือ ที่ใช้ในการวิจัย ใช้แบบสอบถามปลายปิดและปลายเปิด และสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล คือ ค่าร้อยละ ค่าเฉลี่ยเลขคณิตค่า ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน t-test และ F-test ทดสอบสมมติฐาน กำหนดนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

5. ขอบเขตของการวิจัย

ขอบเขตสำหรับการวิจัยกำหนดไว้ 2 ด้าน คือ 1) ด้านเนื้อหา เป็นปัจจัยที่มีผลต่อการเพิกถอนราย วิชาเรียน ได้แก่ ปัจจัยด้านผู้เรียน ปัจจัยด้านผู้สอน ปัจจัยด้านหลักสูตร/การจัดการเรียนการสอน และปัจจัยด้านอื่นๆ และ 2) ด้านประชากร ศึกษาเฉพาะนิสิตระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีการศึกษา 2559 ทุกสาขาวิชา เท่านั้น

6. ผลการวิจัย

6.1 กลุ่มตัวอย่าง เป็นเพศชาย จำนวน 168 คน (ร้อยละ 50.1) และเป็นเพศหญิง จำนวน 167 คน (ร้อยละ 49.9) ส่วนใหญ่กำลังศึกษาในชั้นปีที่ 4 จำนวน 96 คน

(ร้อยละ 28.7) รองลงมา เป็นชั้นปีที่ 1 และ 2 จำนวน 81 คน เท่า ๆ กัน (ร้อยละ 24.2) และชั้นปีที่ 3 จำนวน 77 คน (ร้อยละ 23.0) ศึกษาในสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ จำนวน 49 คน (ร้อยละ 14.6) รองลงมาเป็นสาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ เคมี และโยธา จำนวน 48 คน เท่า ๆ กัน (ร้อยละ 14.3) เครื่องกล จำนวน 47 คน (ร้อยละ 14.0) ชีวการแพทย์ จำนวน 46 คน (ร้อยละ 13.7) โลจิสติกส์ จำนวน 30 คน (ร้อยละ 9.0) และไฟฟ้า จำนวน 19 คน (ร้อยละ 5.7) ซึ่งได้เกรดเฉลี่ยสะสมระหว่าง 2.00-2.99 จำนวน 242 คน (ร้อยละ 72.2) รองลงมา ได้เกรดเฉลี่ยสะสมระหว่าง 3.00-4.00 จำนวน 82 คน (ร้อยละ 24.5) และ 1.00-1.99 จำนวน 11 คน (ร้อยละ 3.3) และส่วนใหญ่เคยฝึกสอนรายวิชาตั้งแต่เข้ามาศึกษา ระหว่าง 1-3 ครั้ง จำนวน 199 คน (ร้อยละ 59.1) รองลงมาเป็นไม่เคยฝึกสอนรายวิชา จำนวน 115 คน (ร้อยละ 34.3) ระหว่าง 4-6 ครั้ง จำนวน 16 คน (ร้อยละ 4.8) และ 7 ครั้งขึ้นไป จำนวน 5 คน (ร้อยละ 1.5) และรายวิชาที่ฝึกสอนมากที่สุด คือ PY101 จำนวน 25 คน (ร้อยละ 7.5) รองลงมาเป็น PY102 จำนวน 23 คน (ร้อยละ 6.9)

6.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการฝึกสอนรายวิชาเรียนของนิสิตระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีการศึกษา 2559 ทุกสาขาวิชา พบว่า ปัจจัยที่มีผลมากที่สุด คือ ปัจจัยด้านหลักสูตร/การจัดการเรียนการสอน และปัจจัยด้านอื่น ๆ มีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับปานกลาง (เท่ากับ 3.23 และ 2.86) และปัจจัยที่มีผลน้อยที่สุด คือ ปัจจัยด้านผู้สอน และปัจจัยด้านผู้เรียน มีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับน้อย (เท่ากับ 2.72 และ 2.58)

6.3 เมื่อพิจารณาแต่ละปัจจัยโดยพิจารณา จากค่าเฉลี่ย พบว่า

6.3.1 ปัจจัยด้านผู้เรียน ในเรื่องที่ได้คะแนนสอบกลางภาคน้อยเกินไปจนเกรงว่าจะไม่ผ่านรายวิชานั้นเมื่อรวมคะแนนสอบปลายภาค มีผลต่อการฝึกสอนรายวิชาเรียนของนิสิตสูงสุด มีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับมาก (เท่ากับ 3.93) รองลงมา เป็นเรื่องนิสิต มีความ

กังวลเวลาสอบ และการที่ต้องอ่านหนังสือและทบทวนวิชาหลายวิชามากเกินไป จนเรียนไม่ไหว มีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับปานกลาง (เท่ากับ 3.14 และ 3.11) และปัจจัยด้านผู้เรียนที่มีผลต่อการฝึกสอนรายวิชาเรียนของนิสิตต่ำที่สุด คือ เรื่องการทุจริตในการสอบ/ลอกข้อสอบเพื่อน มีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับน้อยที่สุด (เท่ากับ 1.56) นอกจากนี้ กลุ่มตัวอย่างยังเสนอปัจจัยด้าน ผู้เรียนอื่น ๆ ได้แก่ อ่านหนังสือน้อย อ่านไม่ตรงกับข้อสอบ และมีปัญหาส่วนตัว

6.3.2 ปัจจัยด้านผู้สอน ในเรื่องผู้สอนไม่ประเมินว่าผู้เรียนเข้าใจมากน้อยเพียงใด มีผลต่อการฝึกสอนรายวิชาเรียนของนิสิตสูงที่สุด มีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับปานกลาง (เท่ากับ 2.98) รองลงมา เป็นเรื่องผู้สอนขาดประสบการณ์การสอน สอนน่าเบื่อ ทำให้เข้าใจเนื้อหายาก และผู้สอนใช้เทคนิคการสอนที่ไม่เหมาะสมกับเนื้อหา มีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับปานกลาง (เท่ากับ 2.95 และ 2.89) และปัจจัยด้านผู้สอนที่มีผลต่อการฝึกสอนรายวิชาเรียนของนิสิตต่ำที่สุด คือ เรื่องการขาดจิตวิญญาณความเป็นครู ไม่เอาใจใส่ผู้เรียน มีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับน้อยที่สุด (เท่ากับ 2.41) นอกจากนี้ กลุ่มตัวอย่างยังเสนอปัจจัยด้านผู้สอนอื่น ๆ ได้แก่ ผู้สอนสอนไม่รู้เรื่อง ให้งานมากเกินไป และเอกสารการสอนไม่ชัดเจน ลำสมัย

6.3.3 ปัจจัยด้านหลักสูตร/การจัดการเรียนการสอน ในเรื่องการจัดสอบทุกวิชาภายในสัปดาห์เดียว ทำให้เตรียมตัวสอบไม่ทัน มีผลต่อการฝึกสอนรายวิชาเรียนของนิสิตสูงที่สุด มีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับมาก (เท่ากับ 3.71) รองลงมา เป็นเรื่องการจัดวิชายาก ๆ หลาย ๆ วิชาให้เรียนในเทอมเดียวกัน มีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับมาก (เท่ากับ 3.43) และเนื้อหาในการสอนมากเกินไป มีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับปานกลาง (เท่ากับ 3.40) และปัจจัยด้านหลักสูตร/การจัดการเรียนการสอน ที่มีผลต่อการฝึกสอนรายวิชาเรียนของนิสิตต่ำที่สุด คือ เรื่องเนื้อหา ที่สอนไม่ตรงกับเนื้อหาที่ออกสอบ มีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับน้อยที่สุด (เท่ากับ 2.84) นอกจากนี้ กลุ่มตัวอย่างยังเสนอปัจจัยด้านหลักสูตร/การจัดการเรียนการสอนอื่น ๆ ได้แก่ มีวิชาที่จำเป็นในการเรียนตัวต่อมากเกินไป เกณฑ์การให้

คะแนนสูงเกินไป เป็นรายวิชาที่ไม่จำเป็นต้องเรียน แต่บังคับให้เรียน และการจัดวิชาเรียนเป็นสำหรับ ไม่เหมาะสมกับนิสิตทุกคน

6.3.4 ปัจจัยด้านอื่น ๆ ในเรื่องการเพิกถอนเพื่อไม่ให้หลุดเกรดวิชาอื่น ๆ หรือโดนรีไทร์ และเรื่องไม่มีเรียนภาคฤดูร้อน มีผลต่อการเพิกถอนรายวิชาเรียนของนิสิตสูงที่สุด มีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับปานกลาง (เท่ากับ 3.22 เท่า ๆ กัน) รองลงมา เป็นเรื่องเอกสารประกอบการสอนไม่ดีพอ เช่น มี Solution ตัวอย่างน้อยเกินไป มีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับมาก (เท่ากับ 3.05) และอุปกรณ์การเรียน การ

สอนไม่เอื้อต่อการเรียนรู้ มีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับ ปานกลาง (เท่ากับ 2.77) และปัจจัยด้านอื่น ๆ ที่มีผลต่อการเพิกถอนรายวิชาเรียนของนิสิตต่ำที่สุด คือ เรื่องระบบให้คะแนนของผู้สอนไม่โปร่งใสและไม่ยุติธรรม มีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับปานกลาง (เท่ากับ 2.45) นอกจากนี้ กลุ่มตัวอย่าง ยังเสนอปัจจัยอื่น ๆ ได้แก่ จำนวนผู้เรียนมากเกินไป ในแต่ละวิชา และกิจกรรมบางอย่างมากเกินไปกระทบต่อการเรียน (ตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ย ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และการแปลความหมายของปัจจัยที่มีผลต่อการเพิกถอนรายวิชาเรียนของนิสิตระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีการศึกษา 2559

ปัจจัย	n = 335		ระดับความคิดเห็น
	$\bar{x}$	SD	
ปัจจัยด้านผู้เรียน			
1. ได้คะแนนสอบกลางภาคน้อยเกินไปจนเกรงว่าจะไม่ผ่านรายวิชานั้นเมื่อรวมคะแนนสอบปลายภาค	3.97	1.08	มาก
2. กังวลเวลาสอบ	3.14	1.22	ปานกลาง
3. ต้องอ่านหนังสือและทบทวนวิชาหลายวิชามากเกินไปจนเรียนไม่ไหว	3.11	1.12	ปานกลาง
4. ซ้ำเกียจ ไม่อ่านหนังสือหรือไม่ทบทวนวิชาเรียนทำให้ได้คะแนนน้อย	2.97	1.16	ปานกลาง
5. ไม่ตั้งใจเรียน	2.73	1.16	ปานกลาง
6. สภาพร่างกายและจิตใจไม่พร้อม เช่น ป่วยบ่อย ออกหัก	2.18	1.08	ปานกลาง
7. ติดเกมส์	2.	1.21	ปานกลาง
8. มีปัญหาส่วนตัว เช่น ปัญหาครอบครัว ปัญหาการเงิน ถูกครอบครัวบังคับให้เรียน หาทักไม่ได้	2.06	1.07	ปานกลาง
9. ติดเพื่อน เพื่อนเพิกถอนก็เพิกถอนตามไปด้วย	1.96	1.04	ปานกลาง
10. ทุจริตในการสอบ/ลอกข้อสอบเพื่อน	1.56	.95	น้อยที่สุด
รวม	2.58	.69	ปานกลาง

*ความหมายของค่าเฉลี่ย 1.00-1.79 หมายถึง น้อยที่สุด, 1.80-2.59 หมายถึง น้อย, 2.60-3.39 หมายถึง ปานกลาง, 3.40-4.19 หมายถึง มาก, 4.20-5.00 หมายถึง มากที่สุด

ตารางที่ 1(ต่อ) ค่าเฉลี่ย ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และการแปลความหมายของปัจจัยที่มีผลต่อการเพิกถอนรายวิชาเรียน
ของนิสิตระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีการศึกษา 2559

ปัจจัย	n = 335		ระดับความคิดเห็น
	$\bar{x}$	SD	
ปัจจัยด้านผู้สอน			
1. ผู้สอนไม่ประเมินว่าผู้เรียนเข้าใจมากน้อยเพียงใด	2.98	1.02	ปานกลาง
2. ผู้สอนขาดประสบการณ์การสอน สอนน่าเบื่อ ทำให้เข้าใจเนื้อหายาก	2.95	1.02	ปานกลาง
3. ผู้สอนใช้เทคนิคการสอนที่ไม่เหมาะสมกับเนื้อหา	2.89	.95	ปานกลาง
4. เนื้อหาที่สอนไม่ตรงกับเนื้อหาที่ออกสอบ	2.70	1.05	ปานกลาง
5. บุคลิกภาพของผู้สอน เช่น ดึงเครียดเกินไป เฮฮาเกินไป	2.70	1.02	ปานกลาง
6. ผู้สอนติดภารกิจ หยุตสอนบ่อย ทำให้อัดเนื้อหามากเกินไปในคาบเรียนต่อ ๆ ไป	2.69	1.05	ปานกลาง
7. ระบบให้คะแนนของผู้สอนไม่โปร่งใสและไม่ยุติธรรม	2.43	1.18	ปานกลาง
8. ขาดจิตวิญญาณความเป็นครู ไม่เอาใจใส่ผู้เรียน	2.41	1.06	ปานกลาง
รวม	2.72	.79	ปานกลาง
ปัจจัยด้านหลักสูตร/การจัดการเรียนการสอน			
1. การจัดสอบทุกวิชากายในสัปดาห์เดียวทำให้เตรียมตัวสอบไม่ทัน	3.71	1.191	มาก
2. จัดวิชายาก ๆ หลาย ๆ วิชา ให้เรียนในเทอมเดียวกัน	3.43	1.148	มาก
3. เนื้อหาในการสอนมากเกินไป	3.40	1.081	ปานกลาง
4. จัดตารางเรียนในแต่ละเทอมแน่นเกินไปทำให้มีเวลาอ่านหนังสือน้อย	3.35	1.084	ปานกลาง
5. การมอบหมายงานมาก เนื่องจากมีรายวิชาที่ต้องเรียนมากเกินไป ทำให้ไม่มีเวลาพักผ่อนและทำได้ไม่เต็มที่	3.31	1.159	ปานกลาง
6. ระบบบูรพวิชาที่ต้องเรียนแบบตัวต่อ ทำให้เรียนต่อไปไม่ได้	2.93	1.204	ปานกลาง
7. จัดลำดับการเรียนบางวิชาไม่เรียงตามลำดับเนื้อหา จึงขาดพื้นฐานในการเรียนต่อบางเรื่อง	2.89	1.056	ปานกลาง
8. เนื้อหาที่สอนไม่ตรงกับเนื้อหาที่ออกสอบ	2.84	1.116	ปานกลาง
รวม	3.23	.843	ปานกลาง

*ความหมายของค่าเฉลี่ย 1.00-1.79 หมายถึง น้อยที่สุด, 1.80-2.59 หมายถึง น้อย, 2.60-3.39 หมายถึง ปานกลาง, 3.40-4.19 หมายถึง มาก, 4.20-5.00 หมายถึง มากที่สุด

ตารางที่ 1(ต่อ) ค่าเฉลี่ย ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และการแปลความหมายของปัจจัยที่มีผลต่อการเพิกถอนรายวิชาเรียน
ของนิสิตระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีการศึกษา 2559

ปัจจัย	n = 335		ระดับความคิดเห็น
ปัจจัยด้านอื่น ๆ			
1. เพิกถอนเพื่อไม่ให้ผิดเกรดวิชาอื่น ๆ หรือโดนรีไทร์	3.22	1.258	ปานกลาง
2. ไม่มีเรียนภาคฤดูร้อน	3.22	1.305	ปานกลาง
3. เอกสารประกอบการสอนไม่ดีพอ เช่น มี Solution ตัวอย่างน้อยเกินไป	3.05	1.047	ปานกลาง
4. อุปกรณ์การเรียนการสอนไม่เอื้อต่อการเรียนรู้	2.77	1.087	ปานกลาง
5. การลงทะเบียนรายวิชาของมหาวิทยาลัยลงให้แบบอัตโนมัติซึ่งบางวิชาไม่ได้เรียนจึงต้องเพิกถอน	2.74	1.195	ปานกลาง
6. เนื้อหาที่สอนไม่ตรงกับเนื้อหาที่ออกสอบ	2.73	1.106	ปานกลาง
7. ขาดแหล่งข้อมูลเสริมความรู้	2.71	1.040	ปานกลาง
8. ระบบให้คะแนนของผู้สอนไม่โปร่งใสและไม่ยุติธรรม	2.45	1.136	ปานกลาง
รวม	2.86	.767	ปานกลาง

*ความหมายของค่าเฉลี่ย 1.00-1.79 หมายถึง น้อยที่สุด, 1.80-2.59 หมายถึง น้อย, 2.60-3.39 หมายถึง ปานกลาง, 3.40-4.19 หมายถึง มาก, 4.20-5.00 หมายถึง มากที่สุด

6.4 ผลการทดสอบสมมติฐาน

6.4.1 สมมติฐานที่ 1 นิสิตที่เรียนในสาขาวิชาต่างกัน มีปัจจัยที่มีผลต่อการเพิกถอนรายวิชาแตกต่างกัน ทั้งภาพรวม (Sig. = .000) และรายปัจจัย พบว่า 1) ในปัจจัยด้านผู้เรียน (Sig. = .000) พบว่า 1.1) ในสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ปัจจัยมีผลมากกว่าในสาขาวิชาวิศวกรรมชีวการแพทย์ และคอมพิวเตอร์ 1.2) ในสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ปัจจัยมีผลมากกว่าในสาขาวิชาวิศวกรรมชีวการแพทย์ 1.3) ในสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ปัจจัยมีผลมากกว่าในสาขาวิชาวิศวกรรมชีวการแพทย์ และคอมพิวเตอร์ 1.4) ในสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ปัจจัยมีผลมากกว่าในสาขาวิชาวิศวกรรมชีวการแพทย์ 1.5) ในสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ปัจจัยมีผลมากกว่าในสาขาวิชาวิศวกรรมชีวการแพทย์ และ 1.6) ในสาขาวิชาวิศวกรรมโลจิสติกส์ ปัจจัยมีผลมากกว่าในสาขาวิชาวิศวกรรมชีวการแพทย์ 2) ปัจจัยด้านผู้สอน (Sig. = .009) พบว่า 2.1) ในสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ปัจจัยมีผลมากกว่า

ในสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา และคอมพิวเตอร์ 2.2) ในสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ปัจจัยมีผลมากกว่าในสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ชีวการแพทย์ และคอมพิวเตอร์ 2.3) ในสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ปัจจัยมีผลน้อยกว่าในสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ และโลจิสติกส์ 2.4) ในสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ปัจจัยมีผลมากกว่าในสาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ และ 2.5) ในสาขาวิชาวิศวกรรมโลจิสติกส์ ปัจจัยมีผลมากกว่าในสาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ 3) ปัจจัยด้านหลักสูตร/การจัดการเรียนการสอน (Sig. = .000) พบว่า 3.1) ในสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ปัจจัยมีผลมากกว่าในสาขาวิชาวิศวกรรมชีวการแพทย์ และคอมพิวเตอร์ 3.2) ในสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ปัจจัยมีผลมากกว่าในสาขาวิชาวิศวกรรมชีวการแพทย์ และคอมพิวเตอร์ 3.3) ในสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ปัจจัยมีผลน้อยกว่าในสาขาวิชาวิศวกรรมโลจิสติกส์ 3.4) ในสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ปัจจัยมีผลน้อยกว่าในสาขาวิชาวิศวกรรมโลจิสติกส์ 3.5)

ในสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ปัจจัยมีผลมากกว่าในสาขาวิชาวิศวกรรมชีวการแพทย์ คอมพิวเตอร์ และน้อยกว่าในสาขาวิชาวิศวกรรมโลจิสติกส์ 3.6) ในสาขาวิชาวิศวกรรมชีวการแพทย์ ปัจจัยมีผลน้อยกว่าในสาขาวิชาวิศวกรรมโลจิสติกส์ และ 3.7) ในสาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ปัจจัยมีผลน้อยกว่าในสาขาวิชาวิศวกรรม โลจิสติกส์ และ 4) ปัจจัยด้านอื่น ๆ (Sig. = .021) พบว่า 4.1)

ใน สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ปัจจัยมีผลมากกว่า ในสาขาวิชาวิศวกรรมชีวการแพทย์ และคอมพิวเตอร์ 4.2) ในสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ปัจจัยมีผลมากกว่าในสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ชีวการแพทย์ และคอมพิวเตอร์ และ 4.3) ในสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ปัจจัยมีผลมากกว่าในสาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ (ตารางที่ 2)

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยที่มีผลต่อการเพิกถอนรายวิชา กับเหตุผลของนิสิตคณะวิศวกรรมศาสตร์ เมื่อพิจารณาตามสาขาวิชา (n = 335)

แหล่งความแปรปรวน	df	SS	MS	F
ปัจจัยด้านผู้เรียน				
ระหว่างกลุ่ม	7	16.12	2.30	5.24*
ภายในกลุ่ม	327	144.19	.44	
	334	160.31		
ปัจจัยด้านผู้สอน				
ระหว่างกลุ่ม	7	11.57	1.65	2.72*
ภายในกลุ่ม	327	198.48	.60	
	334	210.05		
ปัจจัยด้านหลักสูตร/การจัดการเรียนการสอน				
ระหว่างกลุ่ม	7	26.34	3.76	5.82*
ภายในกลุ่ม	327	211.28	.64	
	334	237.62		
ปัจจัยด้านอื่น ๆ				
ระหว่างกลุ่ม	7	11.42	1.63	4.00*
ภายในกลุ่ม	327	133.34	.40	
	334	144.76		

*มีนัยสำคัญที่ระดับ .05

6.4.2 สมมติฐานที่ 2 นิสิตที่เรียนในชั้นปีต่างกัน มีปัจจัยที่มีผลต่อการเพิกถอนรายวิชาแตกต่างกัน ทั้งภาพรวม (Sig. = .224) และรายปัจจัย พบว่า 1) ปัจจัยด้านผู้เรียน (Sig. = .166) พบว่า นิสิตที่เรียนในชั้นปีต่างกัน ปัจจัยด้านผู้เรียนมีผลต่อการเพิกถอนรายวิชา ไม่แตกต่างกัน 2) ปัจจัยด้านผู้สอน (Sig. = .058) พบว่า นิสิตที่เรียนในชั้นปีต่างกัน ปัจจัยด้านผู้สอนมีผลต่อการเพิก

ถอนรายวิชาไม่แตกต่างกัน 3) ปัจจัยด้านหลักสูตร/การจัดการเรียนการสอน (Sig. = .150) พบว่า นิสิตที่เรียนในชั้นปีต่างกัน ปัจจัยด้านหลักสูตร/การจัดการเรียนการสอนมีผลต่อการเพิกถอนรายวิชา ไม่แตกต่างกัน และ 4) ปัจจัยด้านอื่น ๆ (Sig. = .237) พบว่า นิสิตที่เรียนในชั้นปีต่างกัน ปัจจัยด้านอื่น ๆ มีผลต่อการเพิกถอนรายวิชาไม่แตกต่างกัน

6.4.3 สมมติฐานที่ 3 นิสิตที่มีเพศต่างกัน มีปัจจัยที่มีผลต่อการเพิกถอนรายวิชาแตกต่างกัน พบว่า นิสิตที่มีเพศต่างกัน มีปัจจัยด้านผู้เรียนที่มีผลต่อการ เพิก

ถอนรายวิชาแตกต่างกัน (Sig. = .009) โดยนิสิต เพศชาย มีผลต่อการเพิกถอนรายวิชามากกว่าเพศหญิง (ตารางที่ 3)

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบความแตกต่างของคะแนนเฉลี่ยปัจจัยด้านผู้เรียนที่มีผลต่อการเพิกถอนรายวิชาเมื่อพิจารณาตามเพศ (n = 335)

เพศ	n	$\bar{X}$	SD	t
ปัจจัยด้านผู้เรียน				
ชาย	168	2.68	0.641	2.610*
หญิง	167	2.48	0.729	

6.5 แนวทางการลดจำนวนการเพิกถอนรายวิชาเรียนของนิสิตคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒในอนาคต จากการศึกษาพบว่า 1) สำหรับด้านผู้เรียน เสนอว่า บริหารเวลาและแบ่งเวลา ให้การอ่านหนังสือให้มากขึ้น ฝึกทำโจทย์สม่ำเสมอ ใช้ลักษณะเพื่อนช่วยเพื่อนเรียน คำนวณเพิ่มเติม กำหนดเป้าหมาย วางแผนในการเรียนอย่างเป็นรูปธรรมชัดเจน และสร้างแรงจูงใจในการเรียน สร้างความอดทน ความสำเร็จและความขยันให้กับตนเอง และปรับปรุงพฤติกรรมการเรียนการศึกษารองตนเองให้สอดคล้องกับหลักสูตร 2) ด้านผู้สอน เสนอว่า เอาใจใส่ในนิสิตทั้งรายบุคคล และรายกลุ่ม ปรับปรุงและพัฒนาการเรียนการสอน ให้น่าสนใจ และทำความเข้าใจได้ง่ายต่อทั้งตัวผู้สอนและผู้เรียน ประเมินผลหรือสอบให้เหมาะสมกับเนื้อหา ใช้การสอนแบบยกตัวอย่าง ฝึกปฏิบัติให้มากกว่าการบรรยาย สร้างบรรยากาศการเรียนการสอนให้ดึงดูดใจผู้เรียน และประเมินผู้เรียนตลอดเวลา สอดคล้องกับ กฎเกณฑ์ เมธี วัฒนากุล และราชันย์ จันทร์เที่ยง (2555) ที่ได้เสนอแนวทางการลดจำนวนการยกเลิกรายวิชาเอาไว้ว่า ทางมหาวิทยาลัยควรให้ความสำคัญกับการจัดการเรียนการสอน โดยเฉพาะอาจารย์ประจำวิชา ควรอธิบายและชี้แจงเนื้อหาวิชาอย่างละเอียด ตลอดจนอาจารย์ ที่ปรึกษาควรให้คำแนะนำแก่นักศึกษาเป็นรายบุคคล 3) ด้าน

หลักสูตร/การจัดการเรียนการสอน เสนอว่า ควรมีการปรับปรุงเนื้อหาของหลักสูตรให้ทันสมัยเสมอ กำหนดแนวทางการประเมินให้เหมาะสมกับเนื้อหา ปรับปรุงการจัดเนื้อหาในลักษณะกระจายหรือไม่อัดแน่นเพื่อลดภาระการรับข้อมูลมากเกินไปของผู้เรียน เพิ่มวิชาปฏิบัติให้มากขึ้น ปรับปรุงเนื้อหาที่สามารถนำไปใช้จริงได้ ปรับลดวิชาที่ไม่จำเป็นต้องเรียนออก เปิดสอนภาคฤดูร้อน ปรับปรุงและพัฒนาเอกสารประกอบการเรียนให้มีความทันสมัย และมีห้องสมุดภายในคณะ

7. อภิปรายผลการวิจัย

จากการวิจัยพบว่า ข้อค้นพบที่สำคัญคือ ปัจจัยที่มีผลต่อการเพิกถอนรายวิชาเรียนของนิสิตมากที่สุด คือ ปัจจัยด้านหลักสูตร/การจัดการเรียนการสอน โดยเฉพาะการจัดสอบทุกวิชาภายในสัปดาห์เดียวทำให้เตรียมตัวสอบไม่ทัน และจัดวิชายาก ๆ หลาย ๆ วิชา ให้เรียน ในเทอมเดียวกัน ซึ่งการจัดการเรียนการสอนในลักษณะดังกล่าวนี้ อาจทำให้เกิดภาวะข้อมูลล้น (Cognitive Load) (Sweller, Merrienboer & Pass, 1998) จนร่างกายและสมองไม่สามารถรับข้อมูลจำนวนมากได้ เกิดความเบื่อหน่ายเหนื่อยล้า และส่งผลต่อแรงจูงใจในการเรียนให้ประสบความสำเร็จ ตามที่โลเวลล์ (Lovell, 1980: 109) ได้ให้ความหมายของแรงจูงใจว่าเป็นกระบวนการที่ชักนำ โน้ม

น่าให้บุคคลเกิดความมานะพยายามเพื่อที่จะสนองตอบความต้องการบางประการให้บรรลุผลสำเร็จ หากกระบวนการเรียนการสอนไม่สามารถชักจูงให้ผู้เรียนสนใจและลดความมานะพยายามในการเรียนให้สำเร็จและนำไปสู่การเพิกถอนรายวิชานั้น ๆ ได้ นอกจากนี้ ยังพบว่าปัจจัยด้านผู้เรียนส่งผลต่อการเพิกถอนรายวิชาเรียนของนิสิตน้อยที่สุด แสดงให้เห็นว่าโดยพื้นฐานผู้เรียนไม่มีความตั้งใจจะเพิกถอนวิชา แต่อาจเนื่องมาจากปัจจัย ด้านอื่น ๆ ที่เข้ามาส่งผลต่อการตัดสินใจของตัวผู้เรียน และในขณะเดียวกันยังพบว่า ปัจจัยด้านผู้สอน คือ ผู้สอนไม่ประเมินว่าผู้เรียนเข้าใจมากน้อยเพียงใด อาจทำให้เกิดกระบวนการเรียนการสอนที่ไม่เหมาะสมกับผู้เรียน กลุ่มนั้น ๆ ส่งผลให้การเรียนการสอนไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอ เช่น ไม่สามารถสอนเรื่องยาก ๆ ให้นิสิตเข้าใจได้ง่าย ๆ เป็นต้น เช่นเดียวกัน ผู้สอนที่มีวิธีการสอนที่ไม่น่าสนใจหรือยากเกินไป ไม่เป็นไปตามที่นิสิตคาดหวัง (Expectancy) (Vroom, 1964) อาจไม่สามารถจูงใจให้นิสิตให้สนใจเรียนหรือเรียนได้อย่างไม่มีประสิทธิผลได้เพียงพอและนำไปสู่การเพิกถอนรายวิชานั้นได้

8. ข้อเสนอแนะจากการวิจัย

จากการวิจัยที่พบว่า การจัดการเรียนการสอนเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเพิกถอนรายวิชาของนิสิต โดยเฉพาะรายวิชาในคณะวิศวกรรมศาสตร์ ซึ่งเนื้อหาในการเรียนเป็นเนื้อหาการเรียนที่มีความยากและซับซ้อน ดังนั้น ผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการจัดการเรียนการสอนของคณะควรพิจารณาแนวทางการจัดการเรียนการสอนที่เหมาะสมให้กับนิสิตทั้งในรายบุคคล กลุ่มย่อย และ กลุ่มรวม ที่มีลักษณะหรือบริบทแตกต่างกัน รวมทั้งการค้นคว้าวิธีการสอนใหม่ ๆ การจัดการเรียนการสอน เช่น หลักสูตรที่คำนึงถึงผู้เรียนเป็นสำคัญทั้งในด้านความซับซ้อน ความยากง่ายของเนื้อหา และบุคลิกภาพของผู้เรียน รวมทั้งสร้างแรงจูงใจในการเรียนทั้งในคาบเรียน และผลลัพธ์ของการเรียนที่เป็นรูปธรรมมากขึ้น นอกจากนี้

อาจจัดการประเมินรายวิชาในลักษณะของการแลกเปลี่ยนกันระหว่างผู้สอนและผู้เรียนเป็นระยะ เพื่อให้ผู้สอนปรับปรุง เพิ่มเติม การจัดการเรียนการสอนที่เอื้อต่อผู้เรียน และนำไปเป็นแนวทางในการปรับปรุงหลักสูตร และการจัดการเรียนการสอนในภาพรวมของคณะต่อไป นอกจากนี้ สถาบันการศึกษาอื่นยังสามารถนำผลการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ไปใช้เป็นแนวทางในการจัดการเรียนการสอนให้เหมาะสม เช่น การจัดสำหรับรายวิชาที่ไม่ก่อให้เกิดภาวะแน่นเกินไปสำหรับผู้เรียน การพัฒนาและประเมินผลวิธีการสอนที่ส่งผลต่อผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนต่อเนื่อง โดยเฉพาะในคณะหรือสาขาวิชาที่มีเนื้อหา การเรียนที่ยากและมีลำดับขั้นของวิชาที่ต้องการเรียนต่อเนื่องกัน เพื่อลดจำนวนการเพิกถอนรายวิชาเรียนที่อาจส่งผลต่อการสำเร็จการศึกษาตามกำหนดเวลาของนิสิตนักศึกษา

9. บรรณานุกรม

- [1] K. Meteewattanukul and R. Junthiang, "The Factors Which Affect Students Cancelling Courses of Chiang Mai Rajabhat University in Academic Year 2552," *Rajabhat Chiang Mai Research Journal*, vol. 13, no. 2, pp. 89-104, 2555.
- [2] R. B. Lovell, *Adult Learning*. New York: Halsted Press Wiley & Son, 1980.
- [3] J. Sweller, J. J. Merrienboer, and F. G. Paas, "Cognitive Architecture and Instructional Design," *Educational Psychology Review*, vol. 10, no. 3, pp. 251-296, 1998.
- [4] T. Yamane, *Statistics: An Introductory Analysis*. 3rd Ed. New York: Harper, 1973.
- [5] V. H. Vroom, (1964). *Work and motivation*. New York: John Wiley & Sons, 1964

พฤติกรรมการณ์การลอยตัวของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

แบบ Sub Ambient Pressure ในสถานะคงตัว

Characteristics of Flying Height for Time Independent

Sub Ambient Pressure Slider Head

ณัฐกรณัฏฐ์ เจริญ* เจษฎา พานิชกรณัฏฐ์ และนิษฐา วงษ์สีดาแก้ว

ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพมหานคร 10800

Nattapakorn Charoen* Jesda Panichakorn Khanittha Wongseedakaew

Department of Mechanical Engineering Technology, College of Industrial Technology

King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, 10800

*Corresponding author Email: nattapakorn_charoen@hotmail.com

(Received: October 19, 2018; Accepted: December 19, 2018)

บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาพฤติกรรมการณ์การลอยตัวของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์แบบ Sub Ambient Pressure ในสถานะคงตัว โดยใช้ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่องร่วมกับระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสัน และระเบียบวิธีมัลติกริดแก้สมการโมดิฟายด์เรย์โนลด์ เมื่อสารหล่อลื่นเป็นอากาศ โดยคิดผลกระทบจากการสั่นไหวของชั้นโมเลกุลอากาศ เพื่อหาการกระจายตัวของความดันของฟิล์มอากาศและระยะการลอยตัวของหัวอ่าน จากการจำลองพบว่าความดันฟิล์มอากาศเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่บริเวณท้ายขอบรางหัวอ่าน ระยะการลอยตัวของหัวอ่านมีค่าลดลงแต่ความดันฟิล์มอากาศเพิ่มขึ้นเมื่อภาระของหัวอ่านมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วของแผ่นดิสก์เพิ่มขึ้นส่งผลให้ระยะการลอยตัวของหัวอ่านมีค่าเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของอากาศที่เข้าหัวอ่านทำให้ระยะการลอยตัวของหัวอ่านมีค่าเพิ่มขึ้น และความลึกของร่องหัวอ่านที่เหมาะสมคือ 2 ไมโครเมตร

คำสำคัญ: หัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้า การหล่อลื่นด้วยอากาศ สมการโมดิฟายด์เรย์โนลด์ ระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสัน ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

ABSTRACT

This paper describes the characteristics of flying height time independent sub ambient pressure slider head. The modified Reynold equation was formulated for air lubrication with the effect of molecular slip. Finite difference method, Newton-Raphson method and multigrid technique was implemented to obtain air pressure distribution and flying height of the slider. The simulation results show that the film pressure rapidly increases at the trailing edge region. The flying height decreases with increasing air pressure when increasing load. The flying height increases when

increasing velocity of disk. For increasing of air inlet temperature, the flying height increases. The appropriate of slider head groove depth is 2 μm .

Keyword: Sub ambient pressure alider, Air lubrication, Modified reynold, Newton-Raphson method.

1. บทนำ

เทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลผ่านแผ่นแม่เหล็กถูกพัฒนาตั้งแต่มีการคิดค้นฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ตัวแรก ในปี ค.ศ. 1956 ซึ่งในปัจจุบันฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ถูกพัฒนาให้มีความจุเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง พื้นที่ในการบันทึกข้อมูลถูกปรับปรุงให้มีขนาดเล็กลงในขณะที่ความจุของข้อมูลเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้การสร้างฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีความจุสูงนั้นมีความท้าทายเป็นอย่างมาก เนื่องจากต้องหาเทคโนโลยีใหม่ๆ เพื่อใช้สร้างฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีความจุสูงมากขึ้น

วิธีการหนึ่งของการสร้างฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีความจุสูงคือการลดระยะห่างของช่องว่างระหว่างหัวอ่านกับแผ่นดิสก์ให้น้อยลง โดยหัวอ่านจะลอยตัวอยู่เหนือแผ่นดิสก์ด้วยฟิล์มอากาศที่มีลักษณะการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกส์ เพื่อที่จะสามารถสร้างแม่เหล็กต่อพื้นที่หนึ่งหน่วยได้มากขึ้นและเพิ่มสัญญาณการส่งถ่ายข้อมูลให้มากขึ้น โดยจะต้องควบคุมระยะห่างของช่องว่างระหว่างหัวอ่านกับแผ่นดิสก์ให้เหมาะสม เนื่องจากระยะห่างของช่องว่างระหว่างหัวอ่านกับแผ่นดิสก์ใกล้เกินไปจะทำให้เกิดการขัดขวางระหว่างหัวอ่านกับแผ่นดิสก์ได้ ส่งผลให้เกิดข้อผิดพลาดจากการอ่านหรือทำให้แผ่นดิสก์และหัวอ่านเกิดความเสียหายได้ [1]

งานวิจัยจำนวนมากได้มีการศึกษาถึงพฤติกรรมการลอยตัวของหัวอ่านเพื่อเป็นแนวทางการลดระยะการลอยตัวของหัวอ่านเพื่อให้ฮาร์ดดิสก์มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น มีการออกแบบและเลื่อนความคุมการลอยตัวของหัวอ่านด้วยความร้อน [2], [3] การศึกษาพฤติกรรมการลอยตัวของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดเทเปอร์แฟลทในสถานะคงตัวที่หล่อลื่นด้วยอากาศ [4] การศึกษาผลกระทบจากความหนาแน่นที่มีต่อพฤติกรรมการลอยตัวของหัวอ่านในสถานะคงตัวที่หล่อลื่นด้วยอากาศ [5] การออกแบบ

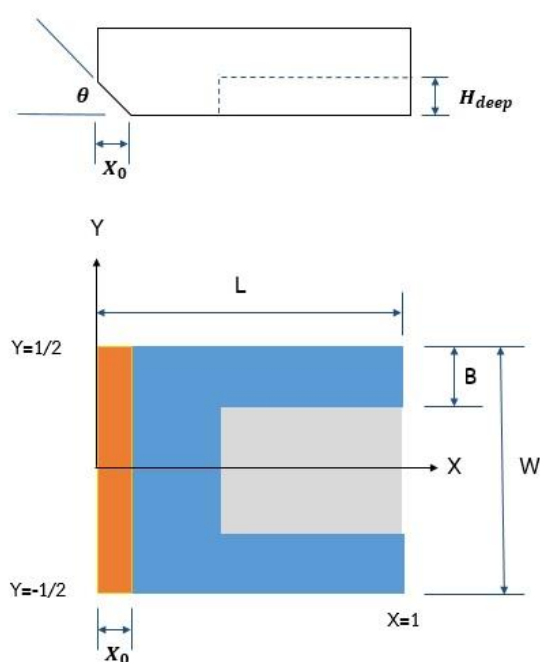
หัวอ่านให้มีรูปทรงที่เหมาะสมเพื่อช่วยลดระยะการลอยตัวของหัวอ่าน [6], [7]

งานวิจัยนี้จึงได้มีการศึกษาพฤติกรรมการลอยตัวของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์แบบ Sub Ambient Pressure ที่ทำงานด้วยอากาศเป็นสารหล่อลื่น โดยการแก้สมการโมดิฟายด์เรย์โนลด์ [1], [4] โดยใช้ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่องร่วมกับระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสัน [8], [9] และใช้ระเบียบวิธีมัลติกริด [10], [11] เพื่อหาการกระจายของความดันฟิล์มของอากาศและระยะการลอยตัวของหัวอ่านเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราความเร็วของจานดิสก์ที่ตำแหน่งต่างๆ แรงกดที่กระทำบนหัวอ่าน อุณหภูมิอากาศ และความลึกของร่องหัวอ่าน

2. ทฤษฎี

พฤติกรรมการลอยตัวของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าในฮาร์ดดิสก์ในสถานะคงตัวตามรูปที่ 1 สามารถอธิบายด้วยสมการโมดิฟายด์เรย์โนลด์โดยมีอากาศเป็นสารหล่อลื่นแบบอัดตัวได้ เมื่อสมมติให้อากาศเป็นแก๊สอุดมคติ และไม่คิดผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของฟิล์มอากาศ

ปีที่ 13 ฉบับที่ 3 เดือน กันยายน - ธันวาคม พ.ศ. 2561



รูปที่ 1 ลักษณะและพิกัดของหัวอ่านที่ใช้ในการจำลอง

2.1. สมการโมดิฟายด์เรย์โนลด์แบบไร้มิติ

เมื่อคิดผลของการเลื่อนไหลของชั้นโมเลกุลอากาศ จะได้สมการโมดิฟายด์เรย์โนลด์ในรูปแบบไร้มิติ สำหรับหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าในสภาวะคงตัว เมื่อสารหล่อลื่นเป็นอากาศ

$$\frac{\partial}{\partial X} \left(Q \frac{\partial P}{\partial X} \right) + k^2 \frac{\partial}{\partial Y} \left(Q \frac{\partial P}{\partial Y} \right) = \Lambda \frac{\partial}{\partial X} (PH) \quad (1)$$

โดย

$$Q(P,H) = \phi(P,H) PH^3 \quad (2)$$

เมื่อ $\phi(P,H)$ คือตัวประกอบการไหล

$$\phi(P,H) = a_0 + a_1 \left(\frac{K_n}{PH} \right) + a_2 \left(\frac{K_n}{PH} \right)^2 + a_3 \left(\frac{K_n}{PH} \right)^3 \quad (3)$$

$$\Lambda = \frac{6\mu UL}{p_a h_m^2} \quad (4)$$

$$k = \frac{L}{W} \quad (5)$$

โดยมีเงื่อนไขขอบเขตสมการเรย์โนลด์

$$P(0,Y) = P(1,Y) = P\left(X, \frac{1}{2}\right) = P\left(X, -\frac{1}{2}\right) = 1$$

ความหนืดของอากาศจะแปรผันกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศตามความสัมพันธ์ของสมการ Sutherland [12]

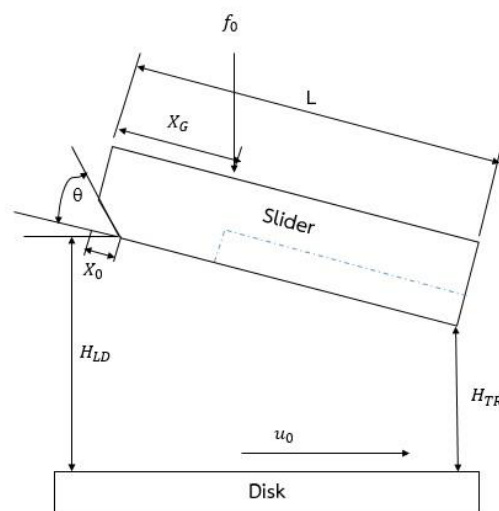
$$\mu = \frac{bT^{3/2}}{S+T} \quad (6)$$

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

$$S = 110.4K$$

2.2. สมการความหนาฟิล์มอากาศ

ระยะการลอยตัวของหัวอ่าน (Flying height of slider) ที่ตำแหน่งต่างๆของหัวอ่าน จะขึ้นกับมุมเงยของหัวอ่าน θ (rad) และลักษณะการทำงานของหัวอ่านแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ลักษณะการลอยตัวของหัวอ่านขณะทำงาน

ดังนั้นสมการความหนาฟิล์มอากาศในรูปแบบไร้มิติแสดงดังสมการที่ (7)-(9)

เมื่อ $0 \leq X \leq X_0$

$$H(X,Y) = H_{TR} + (1-X)(H_{LD} - H_{TR}) + \left(\frac{L}{h_d}\right)(X_0 - X) \tan \theta \quad (7)$$

เมื่อ $X_0 < X \leq 1.0$ ในส่วนพื้นที่สีฟ้าที่แสดงในรูปที่ 1

$$H(X,Y) = H_{TR} + (1-X)(H_{LD} - H_{TR}) \quad (8)$$

เมื่อ $X_0 < X \leq 1.0$ ในส่วนพื้นที่สีเทาที่แสดงในรูปที่ 1

$$H(X,Y) = H_{TR} + (1-X)(H_{LD} - H_{TR}) + H_{Deep} \quad (9)$$

2.3 สมการสมดุลแรงและโมเมนต์

ในบทความนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมการลอยตัวของหัวอ่าน ในสภาวะคงตัว ดังนั้นสมการสมดุลแรงของหัวอ่านในรูปไร้มิติ แสดงดังสมการ

$$\int_{-1/2}^{1/2} \int_0^1 (P-1) dXdY = \frac{f_0}{p_a LW} \quad (10)$$

สมการสมดุลของโมเมนต์ของหัวอ่านในรูปไร้มิติ แสดงดังสมการ

$$\int_{-1/2}^{1/2} \int_0^1 X(P-1) dXdY = X_G \left[\frac{f_0}{p_a LW} \right] \quad (11)$$

โดยที่ X_G คือตำแหน่งที่หัวอ่านยึดติดกับ Suspension

3. ผลการจำลองและวิจารณ์ผล

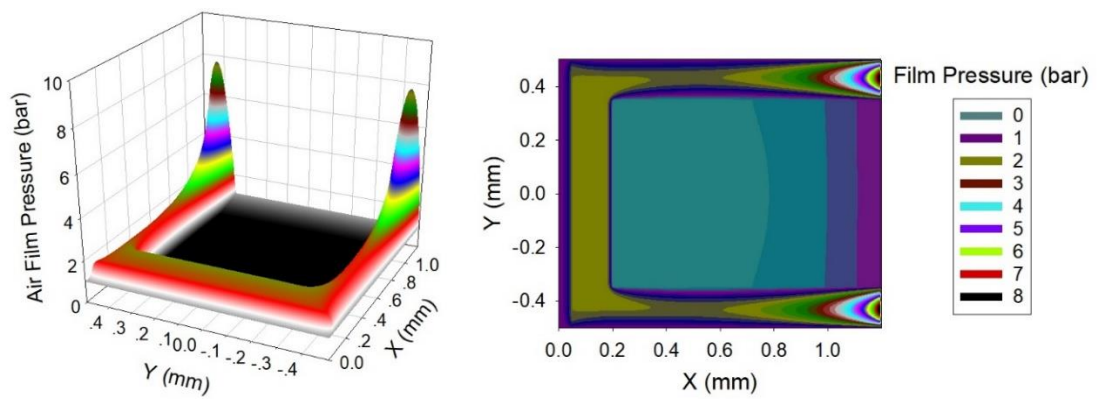
จากการจำลองการทำงานของหัวอ่านที่มีลักษณะทางกายภาพตามรูปที่ 1 และมีเงื่อนไขการทำงานตามตารางที่ 1

การกระจายของความดันฟิล์มอากาศที่เกิดขึ้นบน air bearing surface ที่ความเร็ว 20 เมตรต่อวินาที ภาระที่กระทำ 10 มิลลินิวตัน แสดงดังรูปที่ 3 พบว่า ความดันของฟิล์มอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่ออยู่ในช่วงขอบหน้า (Leading Edge) และมีระยะการลอยตัวอยู่ที่ 229.13 นาโนเมตร จากนั้นความดันจะลดลงอย่างฉับพลันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความลึกในบริเวณร่องหัวอ่าน ทำให้เกิดการขยายตัวของอากาศและมีการไหลวนของอากาศเกิดขึ้น ส่งผลให้ความดันลดลงในบริเวณนั้น และเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่บริเวณขอบท้าย (Trailing Edge) โดยมีระยะการลอยตัวอยู่ที่ 20.35 นาโนเมตร ความดันสูงสุดที่กระทำบนหัวอ่านเกิดขึ้นที่บริเวณขอบท้าย มีค่าเท่ากับ 7.81 บาร์

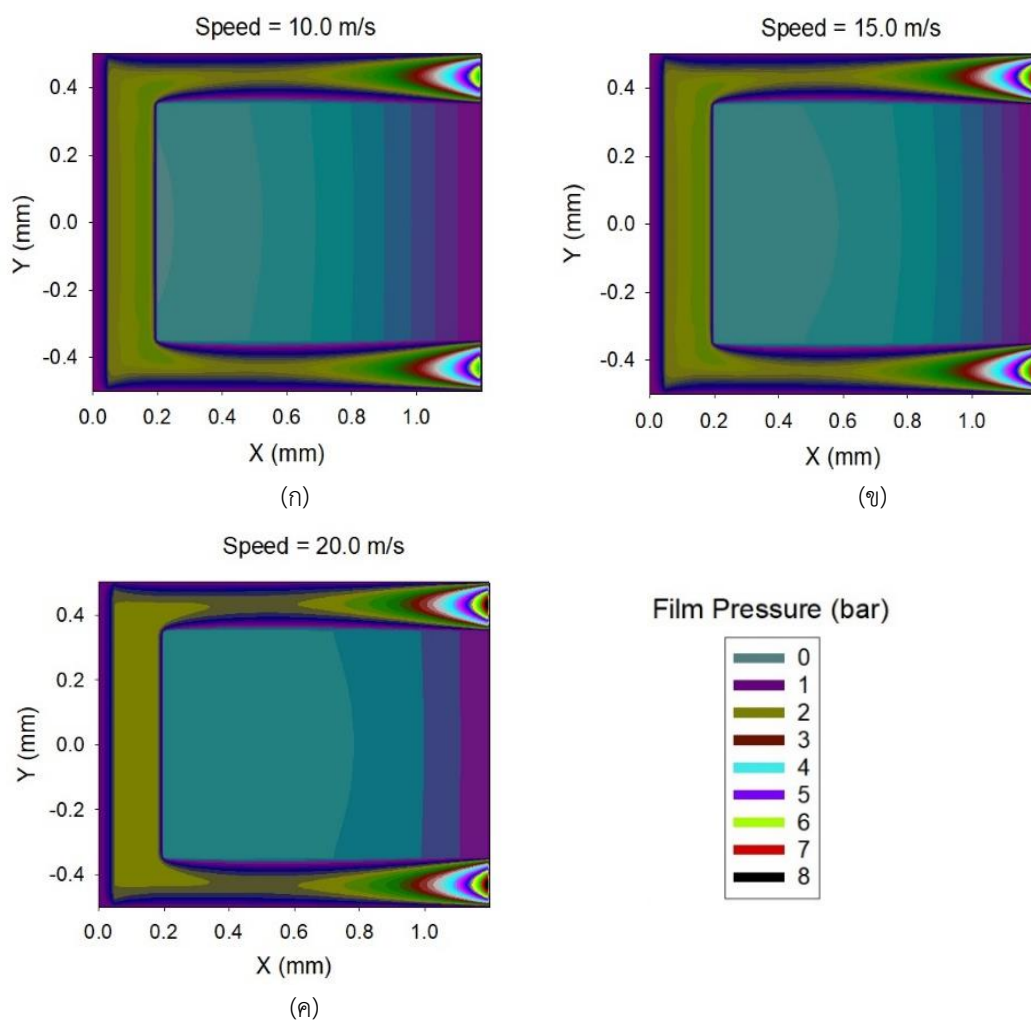
ตารางที่ 1 เงื่อนไขในการทำงานของหัวอ่าน

สัญลักษณ์	ขนาด
L	1.2 mm
W	1.0 mm
B	0.2 mm
x_0	0.025 mm
θ	20 mrad
h_{deep}	2 μ m
U	20 m/s
f_0	10 mN
T	15 $^{\circ}$ C

ปีที่ 13 ฉบับที่ 3 เดือน กันยายน – ธันวาคม พ.ศ. 2561



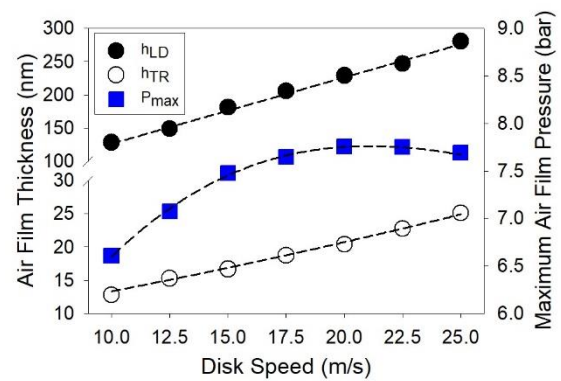
รูปที่ 3 การกระจายความดันฟิล์มอากาศที่อยู่ใต้ Air Bearing Surface ที่ความเร็วของแผ่นจาน (Disk) 20 เมตรต่อวินาที
ภาระที่กระทำ 10 มิลลินิวตัน



รูปที่ 4 การกระจายความดันของฟิล์มอากาศที่อยู่ใต้ Air Bearing Surface ภาระที่กระทำ 10 มิลลินิวตัน
(ก) ความเร็ว 10 เมตรต่อวินาที (ข) ความเร็ว 15 เมตรต่อวินาที (ค) ความเร็ว 20 เมตรต่อวินาที

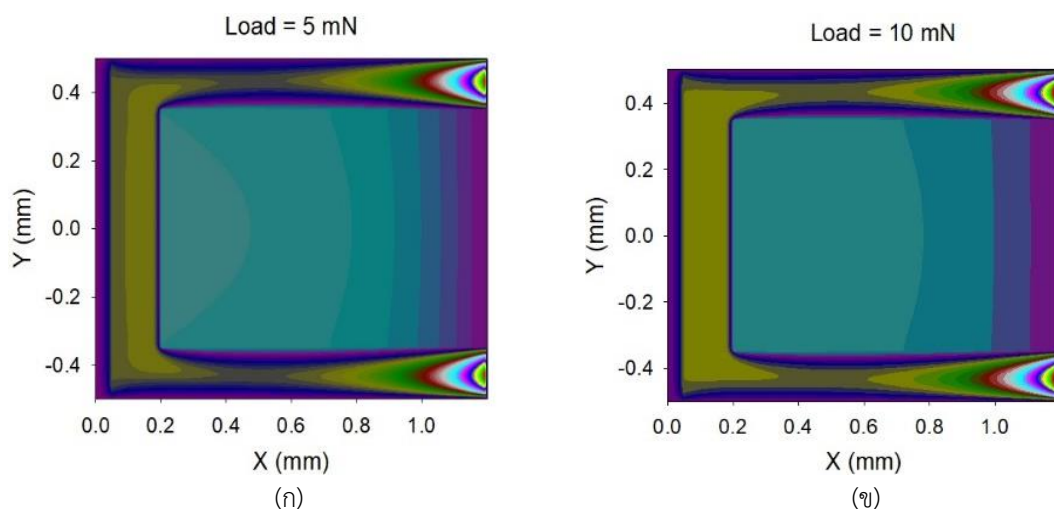
รูปที่ 4 แสดงการกระจายความดันของฟิล์มอากาศที่อยู่ภายใต้ Air Bearing Surface ที่มีภาระกระทำบนหัวอ่าน 10 มิลลิวัตต์ที่มีความเร็วแผ่นดิสก์ 10 เมตรต่อวินาที 15 เมตรต่อวินาที และ 20 เมตรต่อวินาทีตามลำดับ พบว่า ความดันของฟิล์มสูงสุดที่เกิดขึ้นบริเวณขอบท้ายมีค่าเพิ่มขึ้น รวมทั้งระยะการลอยตัวของหัวอ่านที่ขอบหน้าและขอบท้ายมีค่าเพิ่มขึ้น โดยความดันฟิล์มสูงสุดมีค่าเท่ากับ 6.61 บาร์ 7.48 บาร์ และ 7.76 บาร์ ระยะการลอยตัวของขอบหน้า (Leading Edge) มีค่าเท่ากับ 128.18 นาโนเมตร 181.43 นาโนเมตร และ 229.13 นาโนเมตร และระยะการลอยตัวของขอบท้าย (Trailing Edge) มีค่าเท่ากับ 12.75 นาโนเมตร 16.66 นาโนเมตร และ 20.35 นาโนเมตร เมื่อความเร็วของแผ่นดิสก์เท่ากับ 10 เมตรต่อวินาที 15 เมตรต่อวินาที และ 20 เมตรต่อวินาทีตามลำดับ อันเป็นผลมาจากความเร็วของแผ่นดิสก์ที่เพิ่มขึ้นทำให้อัตราการไหลของอากาศที่ไหลผ่านสูงขึ้น ทำให้แผ่นหัวอ่านยกตัวสูงขึ้นทั้งบริเวณขอบหน้าและขอบท้ายของหัวอ่าน

การเปลี่ยนแปลงของการลอยตัวของหัวอ่านและความดันของฟิล์มอากาศสูงสุดที่เกิดขึ้นเมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วของแผ่นดิสก์พบว่า เมื่อความเร็วของแผ่นดิสก์เพิ่มขึ้น ระยะการลอยตัวของหัวอ่านบริเวณขอบหน้า ขอบตามและความดันของฟิล์มอากาศสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 5

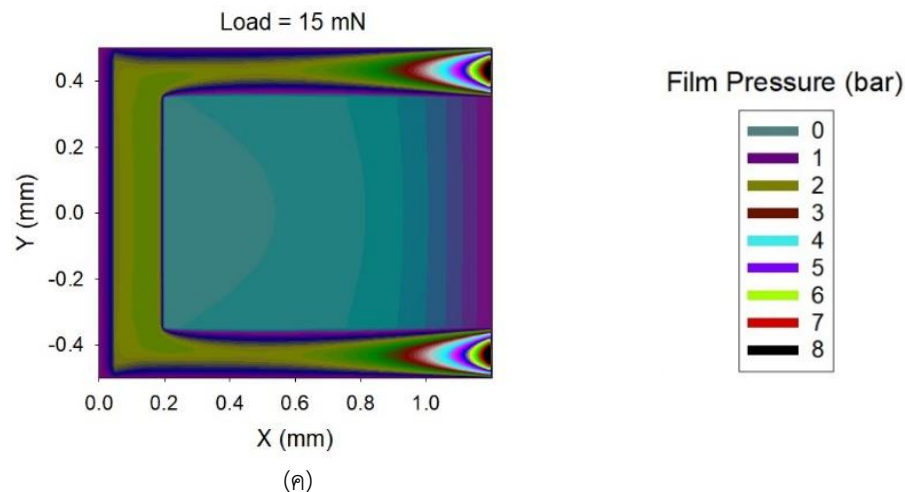


รูปที่ 5 ความดันของฟิล์มอากาศสูงสุดที่อยู่ภายใต้ Air Bearing Surface ระยะการลอยตัวของขอบหน้าและขอบท้ายเมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็ว

รูปที่ 6 แสดงการกระจายความดันของฟิล์มอากาศที่อยู่ภายใต้ Air Bearing Surface เมื่อความเร็วแผ่นดิสก์ 10 เมตรต่อวินาที และภาระที่กระทำกับหัวอ่านมีค่าเท่ากับ 10 มิลลิวัตต์ 15 มิลลิวัตต์ และ 20 มิลลิวัตต์ตามลำดับ พบว่าความดันของฟิล์มอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ระยะการลอยตัวของหัวอ่านที่ขอบหน้าและขอบท้ายลดลง โดยที่ความดันของฟิล์มอากาศสูงสุดที่เกิดขึ้นบริเวณขอบท้าย มีค่าเท่ากับ 7.00 บาร์ 7.75 บาร์ และ 8.44 บาร์ เมื่อภาระที่หัวอ่านได้รับเท่ากับ 5 มิลลิวัตต์ 10 มิลลิวัตต์ และ 15 มิลลิวัตต์ ตามลำดับ และระยะการลอยตัวของขอบหน้ามีค่าเท่ากับ 242.12 นาโนเมตร 236.02 นาโนเมตร และ 219.16 นาโนเมตร

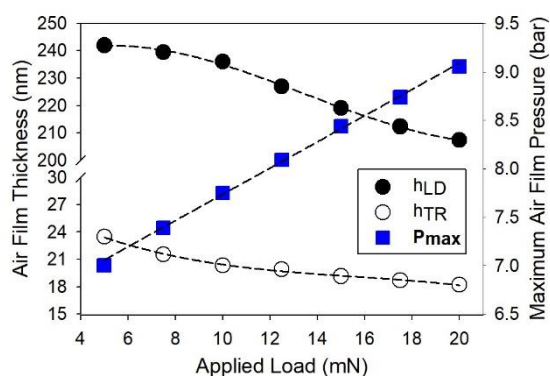


ปีที่ 13 ฉบับที่ 3 เดือน กันยายน – ธันวาคม พ.ศ. 2561



รูปที่ 6 การกระจายความดันของฟิล์มอากาศที่อยู่ใต้ Air Bearing Surface ที่ความเร็ว 20 เมตรต่อวินาที
(ก) ภาระที่กระทำ 5 มิลลินิวตัน (ข) ภาระที่กระทำ 10 มิลลินิวตัน (ค) ภาระที่กระทำ 15 มิลลินิวตัน

ระยะการลอยตัวของข้อเท้ามีค่าเท่ากับ 23.46 นาโนเมตร 20.35 นาโนเมตร และ 19.16 นาโนเมตร เมื่อภาระที่หัวอ่านได้รับเท่ากับ 5 มิลลินิวตัน 10 มิลลินิวตัน และ 15 มิลลินิวตัน ตามลำดับ เนื่องจากการเพิ่มภาระกระทำบนหัวอ่านจะทำให้พื้นที่ใต้หัวอ่านลดลงส่งผลให้ความดันอากาศใต้หัวอ่านเพิ่มขึ้นทำให้ระยะการลอยตัวของหัวอ่านทั้งบริเวณขอบหน้าและขอบท้ายของหัวอ่านลดลง



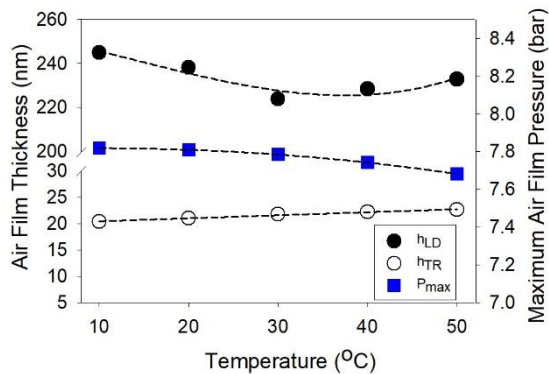
รูปที่ 7 ความดันของฟิล์มอากาศสูงสุดที่อยู่ภายใต้ Air Bearing Surface ระยะการลอยตัวของหน้าและขอบท้ายเมื่อเปลี่ยนแปลงภาระที่กระทำบนหัวอ่าน

การเปลี่ยนแปลงการลอยตัวของหัวอ่านและความดันของฟิล์มอากาศสูงสุดที่เกิดขึ้นเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงภาระที่กระทำบนหัวอ่านพบว่า เมื่อภาระที่หัวอ่านได้รับ

เพิ่มขึ้น ระยะการลอยตัวของหัวอ่านบริเวณขอบหน้าและขอบตามจะมีค่าลดลง แต่การที่ความดันสูงสุดของฟิล์มอากาศเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้เสถียรภาพในการทำงานของหัวอ่านลดลงอย่างรวดเร็วตามไปด้วย ดังที่แสดงดังรูปที่ 7

การเปลี่ยนแปลงของการลอยตัวของหัวอ่านและความดันสูงสุดของฟิล์มอากาศเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าของหัวอ่านเมื่อความเร็วแผ่นดิสก์ 20 เมตรต่อวินาที ภาระกระทำบนหัวอ่าน 10 มิลลินิวตัน ที่อุณหภูมิอากาศ 10, 20, 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียสตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 8 พบว่า ความดันฟิล์มอากาศมีค่าลดลง แต่ระยะการลอยตัวของหัวอ่านที่ขอบท้ายมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่ความดันสูงสุดของฟิล์มอากาศที่เกิดขึ้นบริเวณขอบท้ายมีค่าเท่ากับ 7.818, 7.811, 7.709, 7.703 และ 7.688 บาร์ เมื่ออุณหภูมิของอากาศที่เข้าหัวอ่านเท่ากับ 10, 20, 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียสตามลำดับ และระยะการลอยตัวของข้อเท้ามีค่าเท่ากับ 20.35, 20.97, 21.74, 22.15 และ 22.60 นาโนเมตรเมื่ออุณหภูมิของอากาศที่เข้าหัวอ่านเท่ากับ 10, 20, 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียสตามลำดับ เนื่องมาจากอุณหภูมิของอากาศที่ถ่ายเทเข้าหัวอ่านสูงขึ้นความหนาแน่นของอากาศมีค่าเพิ่มสูงขึ้นด้วย ทำให้ความหนาฟิล์มอากาศ

เพิ่มขึ้นหรือการลอยตัวของหัวอ่านมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อากาศไหลผ่านได้สะดวกขึ้น การเปลี่ยนความเร็วไปเป็นความดันของอากาศที่อยู่ภายใต้ Air Bearing Surface ลดลงเล็กน้อย ทำให้ความดันฟิล์มอากาศมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิของอากาศที่ถ่ายเทเข้าหัวอ่านเพิ่มขึ้น

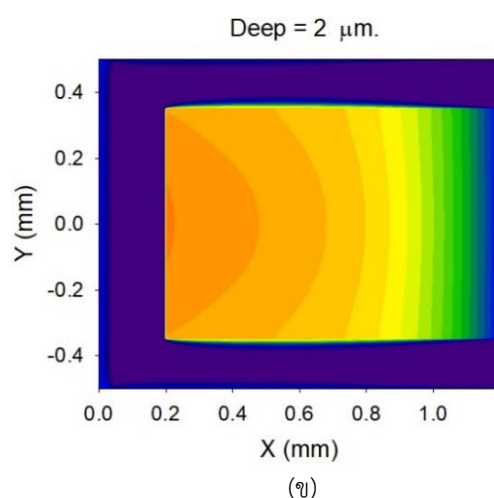
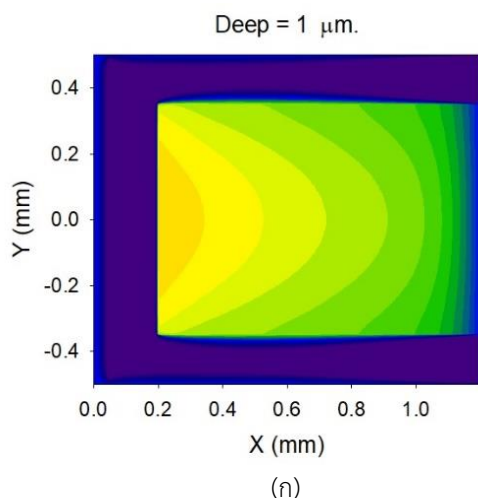


รูปที่ 8 ความดันของฟิล์มอากาศสูงสุดที่อยู่ภายใต้ Air Bearing Surface ระยะการลอยตัวขอบหน้าและ ขอบท้ายเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศ

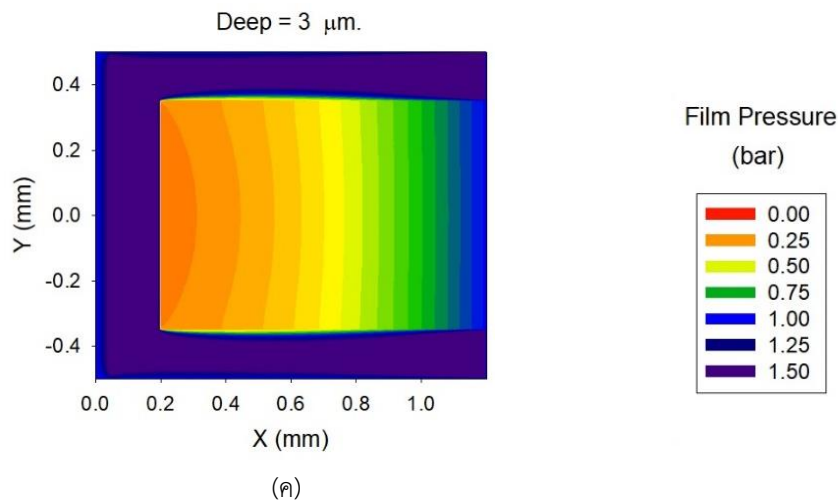
การกระจายความดันฟิล์มอากาศที่เกิดขึ้นในร่องหัวอ่าน ที่ความลึก 1.0 ไมโครเมตร, 2.0 ไมโครเมตร และ 3.0 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 9 ที่ความลึกของร่อง

หัวอ่าน 1.0 ไมโครเมตร การเกิด negative pressure ที่บริเวณร่องหัวอ่านจะมีค่าน้อย ทำให้เกิดการรับแรงที่บริเวณ negative zone ส่งผลให้การลอยตัวขอบหน้าและขอบท้ายสูงขึ้นเท่ากับ 283.78 นาโนเมตร และ 23.56 นาโนเมตร ตามลำดับ ความดันสูงสุดของฟิล์มอากาศที่เกิดขึ้นบริเวณขอบท้ายมีค่าลดลงเท่ากับ 6.74 บาร์

เมื่อเพิ่มความลึกของร่องหัวอ่านที่ 2.0 ไมโครเมตร การเกิด negative pressure ที่บริเวณร่องหัวอ่านจะมากขึ้น ทำให้เกิดการรับแรงที่บริเวณ negative zone น้อยลง ส่งผลให้การลอยตัวขอบหน้าและขอบท้ายลดลงเท่ากับ 238.12 นาโนเมตร และ 20.35 นาโนเมตร ตามลำดับ ความดันสูงสุดของฟิล์มอากาศที่เกิดขึ้นบริเวณขอบท้ายเพิ่มขึ้นเท่ากับ 7.81 บาร์ และเมื่อเพิ่มความลึกของร่องหัวอ่านที่ 3.0 ไมโครเมตร การเกิด negative pressure ที่บริเวณร่องหัวอ่านมีค่าลดลง ทำให้เกิดการรับแรงที่บริเวณ negative zone มากขึ้น ส่งผลให้การลอยตัวขอบท้ายเพิ่มขึ้นเท่ากับ 26.22 นาโนเมตร ความดันสูงสุดของฟิล์มอากาศที่เกิดขึ้นบริเวณขอบท้ายลดลงที่ 6.13 บาร์

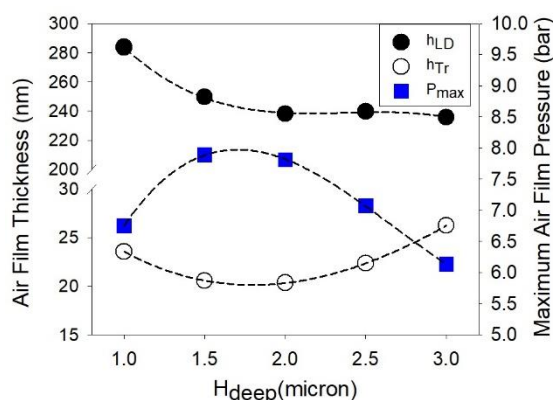


ปีที่ 13 ฉบับที่ 3 เดือน กันยายน – ธันวาคม พ.ศ. 2561



รูปที่ 9 การกระจายความดันของฟิล์มอากาศที่บริเวณ Negative Zone ที่ความเร็ว 20 เมตรต่อวินาที
 ภาระที่กระทำ 10 มิลลินิวตัน (ก) ความลึกของร่องหัวอ่าน 1 ไมโครเมตร (ข) ความลึกของร่องหัวอ่าน 2 ไมโครเมตร
 (ค) ความลึกของร่องหัวอ่าน 3 ไมโครเมตร

การเปลี่ยนแปลงของการลอยตัวของหัวอ่านและความดันฟิล์มอากาศสูงสุดที่เกิดขึ้นเมื่อเปลี่ยนแปลงความลึกของร่องหัวอ่าน เมื่อความเร็วแผ่นดิสก์เท่ากับ 20 เมตรต่อวินาที ภาระกระทำบนหัวอ่าน 10 มิลลินิวตัน ที่ความลึกของร่องหัวอ่าน 1.0 1.5 2.0 2.5 และ 3 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 ความดันของฟิล์มอากาศสูงสุดที่อยู่ภายใต้ Air Bearing Surface ระยะการลอยตัวขอบหน้าและขอบท้ายเมื่อเปลี่ยนแปลงความลึกของร่องหัวอ่าน

4. สรุป

การจำลองพฤติกรรมการลอยตัวของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าในฮาร์ดดิสก์แบบ Sub Ambient Pressure ในสภาวะคงตัวสามารถสรุปได้ ดังนี้

1. เมื่อความเร็วของแผ่นดิสก์เพิ่มขึ้นระยะการลอยตัวของหัวอ่านและความดันฟิล์มอากาศสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น
2. เมื่อภาระที่กระทำบนหัวอ่านเพิ่มขึ้น ระยะการลอยตัวของหัวอ่านมีค่าลดลง ผลต่างการลอยตัวที่ขอบหน้าและขอบท้ายมีค่าลดลง แต่ความดันฟิล์มอากาศสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น
3. เมื่ออุณหภูมิของอากาศที่เข้าหัวอ่านเพิ่มขึ้น ระยะการลอยตัวของหัวอ่านมีค่าเพิ่มขึ้น ผลต่างการลอยตัวที่ขอบหน้าและขอบท้ายและความดันฟิล์มอากาศสูงสุดมีค่าลดลง
4. เมื่อเพิ่มความลึกของร่องหัวอ่าน พบว่าที่ความลึกของร่องหัวอ่าน 2 ไมโครเมตร ระยะการลอยตัวของหัวอ่านลอยตัวต่ำสุด ดังนั้นความลึกของร่องหัวอ่านที่เหมาะสมในฮาร์ดดิสก์แบบ Sub Ambient Pressure คือ 2 ไมโครเมตร

5. สัญลักษณ์

- L = ความยาวของหัวอ่าน, m
 W = ความกว้างของหัวอ่าน, m
 B = ความกว้างของรางหัวอ่าน, m
 U = ความเร็วแผ่นดิสก์, m/s
 y = ระยะทางตามความกว้างของหัวอ่าน, m
 Y = ระยะทางตามความกว้างของหัวอ่านแบบไร้มิติ
 h = ระยะการลอยตัวของหัวอ่าน, m
 h_a = ระยะการลอยตัวของหัวอ่านน้อยที่สุด, m
 h_{TR} = ระยะการลอยตัวที่ขอบท้าย, m
 h_{LD} = ระยะการลอยตัวที่ขอบนำแบบไร้มิติ, m
 h_{deep} = ความลึกของร่องหัวอ่าน, m
 H = ระยะการลอยตัวแบบไร้มิติ
 H_{TR} = ระยะการลอยตัวของขอบท้ายแบบไร้มิติ
 H_{LD} = ระยะการลอยตัวของขอบนำแบบไร้มิติ
 H_{deep} = ความลึกของร่องหัวอ่านแบบไร้มิติ
 f_0 = แรงที่กระทำที่ suspension, N
 x = ระยะทางตามความยาวของหัวอ่าน, m
 x_G = ระยะทางที่ suspension, m
 x_0 = ระยะทางที่ตำแหน่งมุมเทเปอร์, m
 X = ระยะทางความยาวของหัวอ่านแบบไร้มิติ
 X_0 = ระยะที่ตำแหน่งมุมเทเปอร์แบบไร้มิติ
 X_G = ระยะทางที่ suspension แบบไร้มิติ
 p = ความดันของฟิล์มอากาศ, bar
 P = ความดันของฟิล์มอากาศแบบไร้มิติ
 P_a = ความดันบรรยากาศ, bar
 K_n = Knudsen number
 θ = มุมเทเปอร์, mrad
 T = อุณหภูมิอากาศ, °C

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล
วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าพระนครเหนือที่เอื้อเฟื้อคอมพิวเตอร์เพื่อ
จำลองผลงานวิจัยนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Boonsawat and J. Srisertpol, "Study in Head/Disk contact process with Readback Signal under thermal control on variable temperature," in *The 5th International data storage technology conference DST*, Bangkok, Thailand, 2013.
- [2] J. Song and C.D. Yeo, "Finite element analysis simulations of thermomechanical head-disk interface contact in thermal flying-height control slider design," *Tribol. Inter.*, vol. 98, pp. 299-305, June. 2016.
- [3] J. L. Zheng and D. B. Bogy, "Investigation of flying-height stability of thermal fly-height control sliders in lubricant or solid contact with roughness," *Tribol. Lett.*, vol. 38, pp. 283-289, June. 2010.
- [4] G. Waleephan, P. Jesda and A. Chatchai, "Effect of Groove on Slider Rail to Flying Characteristics of the Taper Flat Slider in a Magnetic Storage system," in *The 23st Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand*, Chiangmai, Thailand, 2009, TSF-018291.
- [5] G. Waleephan, "The Effect of surface roughness to flying characteristics of the slider in HDD," in *The 24st Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand*, Ubonratchathani, Thailand, 2010, TSF 006.
- [6] B. Liu, J. Liu and T.C. Chong, "Slider design for sub-3-nm flying height head-disk systems," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 287, pp. 339-345, February. 2005.
- [7] J.Y. Juang, D.B. Bogy and C.S. Bhatia, "Design and Dynamics of Flying Height Control

ปีที่ 13 ฉบับที่ 3 เดือน กันยายน – ธันวาคม พ.ศ. 2561

- Slider With Piezoelectric Nanoactuator in Hard Disk Drives,” *J. Tribol.*, vol. 129, pp 161-170, January. 2007.
- [8] T. Hayashi, H. Yoshida and Y. Mitsuya, 2009. “A Numerical Simulation Method to Evaluate the Static and Dynamic Characteristics of Flying Head Sliders on Patterned Disk Surface,” *J. Tribol.*, vol. 131, pp 155-200, April. 2009.
- [9] S.C. Chapra and R.P. Canale, “*Numerical Methods for Engineers*”, 6th Ed. New York: McGraw-Hill Inc., 2010.
- [10] L. Li and D.B. Bogy, “Local adaptive multi-grid control volume method for the air bearing problem in hard disk drives”, in *International Joint Tribology Conference*, Colorado, USA, 2012, pp. 185-187.
- [11] Q. Meng , J. Wang, P. Yang, Z. Jina and J. Fisher, “The lubrication performance of the ceramic-on-ceramic hip implant under starved conditions”, *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, vol. 50, pp. 70–76, October. 2015.
- [12] PHILIP J. PRITCHARD, “*Introduction to Fluid Mechanics*, 8th Edition, John Wiley & Sons, Inc. USA, 2011.

ผลของภาระดัดต่อพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปแบบคืบของไผ่สีสุก

Effect of Bending Load on the Creep Deformation Behavior

ธวัชชัย อุ่นใจจอม* นิพนธ์ อุดมหมอ เมฆินทร์ อินใจ

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่
128 ถนนห้วยแก้ว ตำบลช้างเผือก อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50230

Thawatchai Ounjaijom* Nipon Udmor Mekin Inchai

Department of Mechanical Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna, Chiang Mai
128 Huay Kaew Road, Muang, Chiang Mai, 50300

*Corresponding author Email: tounjaijom@gmail.com

(Received: March 8, 2018; Accepted: September 7, 2018)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปแบบคืบเมื่อได้รับภาระดัดของไผ่สีสุก การทดสอบหาพฤติกรรมคืบของไผ่สีสุกโดยลักษณะวิธีการแบบคานปลายยื่น ภายใต้สภาวะความชื้นและอุณหภูมิคงที่ โดยให้ภาระกระทำกับชิ้นทดสอบไผ่สีสุก แตกต่างกัน 3 ขนาด ได้แก่ ภาระขนาด 10% 20% และ 30% ของภาระสูงสุดที่ชิ้นทดสอบสามารถรับได้ โดยมีการให้ภาระในแต่ละขนาดแก่ชิ้นทดสอบ 4 ชั่วโมง ผลการทดสอบพบว่าเมื่อเริ่มให้ภาระแก่ชิ้นทดสอบ ชิ้นทดสอบจะเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างฉับพลัน และจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น จนมีค่าสูงสุดเมื่อสิ้นสุดช่วงเวลาให้ภาระ นอกจากนี้ผลจากการเปรียบเทียบการเปลี่ยนรูปร่างระหว่างผลการทดลองและแบบจำลองพฤติกรรมการคืบของไบเลย์-นอร์ตัน มีความสอดคล้องกับผลการทดสอบเป็นอย่างดีโดยมีค่า R^2 มากกว่า 0.994

คำสำคัญ: ไผ่สีสุก ภาระดัด พฤติกรรมการเปลี่ยนรูปแบบคืบ สมการเลขยกกำลังของไบเลย์-นอร์ตัน

ABSTRACT

The purpose of this research is to study the creep deformation behavior of the *Bambusa blumeana*. The study was carried out by restraining the bamboo beam under moisture condition and constant temperature. Three level of loads were applied to the specimens respectively i.e.,— 10%, 20% and 30%—of the maximum load. Each level of load was applied for 4 hours. It was found that when the testing objects were loaded, their shape suddenly changed and continued changing slowly as time increased. The maximum value at the end of the testing time. Moreover, the Bailey-Norton Creep Law successfully describes the main feature for the investigated material and shows good agreement with experimental creep data with R^2 more than 0.994.

Keyword: *Bambusa blumeana*, bending load, creep deformation behavior, Bailey-Norton creep law.

1. บทนำ

ไผ่หรือไม้ไผ่ (Bamboo) เป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยว (Monocotyledon) จัดอยู่ในวงศ์หญ้า *Poaceae* วงศ์ย่อย *Bambusoideae* มีระบบเหง้าที่ชัดเจน ใบค่อนข้างกว้างและมีก้านใบเทียม มีระบบการเจริญเติบโตเป็นกิ่งที่ซับซ้อนและแข็งแรง ลักษณะของข้อดอกและส่วนประกอบต่างๆ ของดอกที่ซับซ้อน รวมทั้งลักษณะที่

คล้ายกับมีเนื้อไม้ (Woody Bamboo) จึงทำให้ไผ่ส่วนมากมีลำต้นที่สูงใหญ่และมีอายุยืนนานหลายปี [1] สำหรับประเทศไทยสามารถพบไผ่ได้ทั่วประเทศ โดยพบมากในภาคกลาง ภาคตะวันออกเฉียกเหนือ ภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคใต้ ตามลำดับ [2] ปัจจุบันมีการนำไผ่มาใช้ประโยชน์ในชีวิตประจำวันได้อย่างหลากหลาย เช่น

อาหาร ภาชนะบรรจุภัณฑ์ เครื่องมือใช้สอย ที่อยู่อาศัย หรือนั่งร้าน

ไผ่สีสุก (*Bambusa blumeana*) เป็นไม้ไผ่ชนิดหนึ่งที่สามารถพบได้ทั่วไปของประเทศไทย โดยเฉพาะบริเวณภาคเหนือและภาคกลางของประเทศ เป็นไม้ชนิดที่มีลำต้นสูงใหญ่ ลำต้นสีเขียวสด หน่อสีเขียวปนเขียว ปล้องมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 7-10 เซนติเมตร ยาว 10-30 เซนติเมตร บริเวณข้อมีกิ่งคล้ายหนามหน่อมีขนาดใหญ่ ไผ่สีสุกมีเนื้อหนา แข็งแรง ทนทานและเหนียว จึงนิยมนำไปใช้ประโยชน์มากกว่าไม้ชนิดอื่นๆ ไม่ว่าจะทำเครื่องจักรสาน เฟอร์นิเจอร์ นั่งร้านในการก่อสร้าง และนอกจากนี้ส่วนโคนของลำต้นยังนิยมนำมาทำคานสำหรับหาบได้ดี [1]

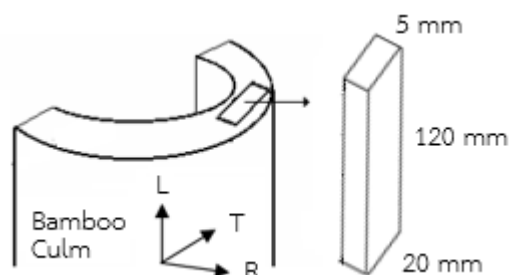
การนำไม้ไผ่มาใช้งานโครงสร้างหรือทำนั่งร้านสร้างบ้านนั้น จะเห็นได้ว่าเมื่อไม้ไผ่ได้รับภาระเป็นเวลานานจะส่งผลให้ไม้ไผ่เกิดการเปลี่ยนรูปร่างแบบชั่วคราวหรือถาวรได้ ซึ่งเหตุการณ์ลักษณะนี้อาจส่งผลให้โครงสร้างเกิดความเสียหายหรือมีรูปร่างที่ผิดเพี้ยนไปจนอาจเป็นสาเหตุให้โครงสร้างนั้นได้รับความเสียหายจนไม่สามารถใช้งานได้ พฤติกรรมในลักษณะนี้เป็นการตอบสนองต่อแรงกระทำของไม้ไผ่ จะประกอบไปด้วย การตอบสนองแบบฉับพลันและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไป เรียกว่าการคืบตัวของวัสดุ (Creep) [3] ทำให้เสี่ยงต่อการแตกหักของลำไม้ไผ่ จนนำไปสู่การเสียหายและอันตรายในขณะที่ใช้งาน

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าในประเทศไทย ยังไม่ได้มีการศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของไม้ไผ่มากนัก จนได้มีการนำไม้ไผ่มาทดลองหาพฤติกรรมการคืบ [4] นอกจากนี้ยังได้มีการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปแบบคืบของไม้ไผ่เมื่อได้รับภาระกด [5] [6] หรือการนำมาใช้ทำนายพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของเนื้อไม้ชนิดอื่น เช่นการศึกษาพฤติกรรมการคืบในระยะยาวของไม้สนเหลือง [7] และพฤติกรรมการคืบของคานไม้จริงที่เสริมแรงด้วยแผ่นไฟเบอร์ [8] โดยพบว่าสามารถทำนายพฤติกรรมการคืบได้สอดคล้องกันกับการทดลองจากชิ้นตัวอย่าง นอกจากนี้ยังได้ศึกษาการคืบของวัสดุเชิงประกอบโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงผสมเส้นใยไม้ไผ่โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ให้ผลการทำนายที่สอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง [9] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาผลของภาระดัดที่มีต่อพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปแบบคืบของไผ่สีสุก ที่นิยมนำมาสร้างโครงสร้างของที่อยู่อาศัย และใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายพฤติกรรมการคืบของไม้ไผ่

เพื่อใช้เป็นแนวทางในการศึกษาหาแบบจำลองพฤติกรรม การเปลี่ยนรูปแบบคืบของลำไม้ไผ่ และตรวจสอบรวมกับการทดลองจากชิ้นตัวอย่าง เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการพิจารณาผลของภาระดัดที่มีต่อการเปลี่ยนรูปของไม้ไผ่ในงานโครงสร้างต่างๆ

2. อุปกรณ์และวิธีการ

ในการศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปแบบคืบของไผ่สีสุกในครั้งนี้ เลือกใช้ไผ่สีสุกที่ได้จากอำเภอยางตลาด จังหวัดเชียงใหม่ ที่มีอายุประมาณ 3-5 ปี นำไม้ไผ่มาตัดออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนโคนลำต้น ส่วนกลางลำต้น และส่วนปลายลำต้น จากนั้นทำการผ่าซีกๆ ตามแนวเส้นยาวเพื่อปลอกผิวด้านในและผิวด้านนอกออกด้านละประมาณไม่เกิน 1 มิลลิเมตร จากนั้นนำซีกไม้ไผ่ที่ผ่านการปลอกผิวแล้วทั้งส่วนโคน ส่วนกลาง และส่วนปลายลำต้นทั้งหมดไปอบแห้งเพื่อกำจัดความชื้นออกจากเนื้อไม้ด้วยตู้อบแห้งยี่ห้อ Binder ที่อุณหภูมิ $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการอบชื้นไม้ไผ่และชั่งมวลชื้นไม้ไผ่ทุกๆ 1 ชั่วโมง จนกระทั่งมวลชื้นไม้ไผ่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 0.01 กรัม ตามมาตรฐานของ ISO/DIS 22157 [10] ไม้ไผ่ที่ผ่านการอบแห้งแล้วจะถูกนำมาปรับขนาดเพื่อนำมาใช้เป็นชิ้นทดสอบจำนวนทั้งหมด 36 ชิ้น แต่ละชิ้นมีขนาดกว้าง 20 mm ทิศทางตามแนวเส้นสัมผัส (Transverse Direction, T) หนา 5 mm ทิศทางตามแนวรัศมี (Radial Direction, R) และยาว 120 mm ทิศทางตามแนวเส้นใย (Longitudinal Direction, L) ดังแสดงในรูปที่ 1 และ 2



รูปที่ 1 ขนาดของชิ้นทดสอบ



รูปที่ 2 ชิ้นทดสอบไม้ไผ่ที่ผ่านการอบแห้ง

ชิ้นทดสอบไม้ไผ่จากส่วนโคน ส่วนกลาง และส่วนปลายลำต้นส่วนละ 3 ชิ้น จะถูกนำไปทดสอบเพื่อหาค่าภาระดัดสูงสุดของชิ้นทดสอบที่สามารถรับได้ ด้วยวิธีการทดสอบแบบภาระดัดแบบ 3 จุด ด้วยเครื่องทดสอบสากล (Universal Testing Machine) ยี่ห้อ Hounsfield รุ่น H50KS ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยใช้อัตราการกดขึ้นทดสอบ 2.5 mm/min [10] ระยะห่างระหว่างจุดรองรับมีขนาด 100 mm ให้ภาระกระทำกับชิ้นทดสอบบริเวณกึ่งกลางคาน



รูปที่ 3 เครื่องทดสอบสากลยี่ห้อ Hounsfield

ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบถูกนำมาหาค่าความต้านแรงดัดสูงสุดจากสมการที่ (1)

$$\sigma_b = \frac{3P_u L}{2bh^2} \quad (1)$$

โดยที่ σ_b คือ ความต้านแรงดัดสูงสุด (หน่วย N/mm²), P_u คือ ภาระสูงสุดที่ชิ้นทดสอบสามารถรับได้

(หน่วย N), L คือ ความยาวระหว่างจุดรองรับของชิ้นทดสอบ (หน่วย mm), b คือ ความกว้างของหน้าตัดของชิ้นทดสอบ (หน่วย mm) และ h คือ ความสูงของหน้าตัดของชิ้นทดสอบ (หน่วย mm) [11]

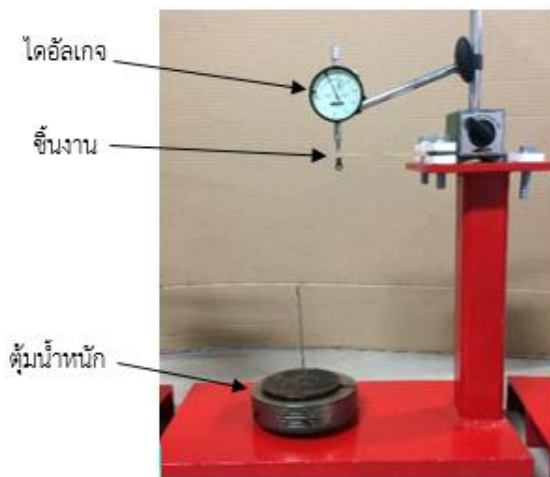
นำค่าความต้านแรงดัดสูงสุดที่ได้จากการทดลองด้วยวิธีการดัดแบบ 3 จุด จากสมการที่ (1) มาหาค่าภาระสูงสุดที่ชิ้นทดสอบสามารถจะรับได้ด้วยวิธีการคานปลายยื่น จากสมการที่ (2)

$$\sigma_b = \frac{6P_c L}{bh^2} \quad (2)$$

โดยที่ P_c คือ ภาระสูงสุดที่ชิ้นทดสอบสามารถรับได้ด้วยวิธีการแบบคานปลายยื่น (หน่วย N)

ซึ่งค่าภาระ P_c นี้ถูกนำไปใช้ในการออกแบบภาระที่จะใช้ในการทดสอบหาพฤติกรรมของการเปลี่ยนรูปแบบคืบ (P_0) โดยในการวิจัยครั้งนี้ได้ทำการพิจารณาภาระที่นำไปใช้ในการทดสอบคือ 10% 20% และ 30% ของภาระสูงสุดที่ชิ้นทดสอบสามารถรับได้ด้วยวิธีการแบบคานปลายยื่น (P_c)

นำชิ้นทดสอบที่เหลือมาทำการทดสอบหาพฤติกรรมคืบด้วยวิธีการคานปลายยื่น โดยแบ่งชิ้นทดสอบออกเป็น 3 กลุ่ม กลุ่มละ 9 ชิ้น แต่ละกลุ่มทำการทดสอบโดยใช้ภาระที่มีขนาดเป็น 10% 20% และ 30% ของภาระสูงสุดที่ชิ้นทดสอบสามารถรับได้ ตามลำดับ การทดสอบถูกทำในห้องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นที่ 25 °C ± 2 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 60-70 %RH [10] โดยไม่พิจารณาผลของความชื้นในเนื้อไม้ไผ่ที่อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงในขณะทดสอบ ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วย แท่นจับยึดชิ้นทดสอบ ไดอัลเกจ และตุ้มภาระ ดังรูปที่ 4 โดยกำหนดให้ระยะห่างระหว่างจุดยึดถึงปลายอิสระของชิ้นทดสอบมีความยาว 100 mm ตำแหน่งที่ใช้ในการแขวนตุ้มภาระและตำแหน่งติดตั้งไดอัลเกจอยู่ห่างจากจุดยึด 90 mm เริ่มต้นด้วยการให้ภาระกระทำกับชิ้นทดสอบ 4 ชั่วโมง ข้อมูลการโก่งของชิ้นทดสอบถูกบันทึกไว้ทุกๆ 1 นาที และทำการทดสอบซ้ำจำนวน 3 ครั้งในแต่ละกลุ่ม



รูปที่ 4 ชุดทดสอบการคืบ

ข้อมูลระยะการเปลี่ยนรูปที่ได้จะถูกนำมาใช้เพื่อหา ค่าความเครียดคืบที่เวลาใดๆ (Creep Strain) ของไม้ไผ่ โดยสามารถหาได้จากสมการที่ (3) นั่นคือ

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E(t)} \quad (3)$$

โดยที่ $\varepsilon(t)$ คือ ความเครียดคืบที่เวลาใดๆ ของไม้ไผ่ σ_0 คือ ความเค้นดัดคงที่ที่ให้แก่วัสดุทดสอบ (หน่วย N/mm^2) และ $E(t)$ คือ โมดูลัสการยืดหยุ่นที่เป็น ฟังก์ชันของเวลา (หน่วย N/mm^2) ซึ่งค่า σ_0 และ $E(t)$ สามารถหาได้จากสมการที่ (4) และ (5)

$$\sigma_0 = \frac{6P_0L}{bh^2} \quad (4)$$

$$E(t) = \frac{P_0L^3}{3I\delta(t)} \quad (5)$$

โดยที่ I คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัด (หน่วย mm^4) และ $\delta(t)$ คือ ระยะโก่งของคานาปลายยื่น ที่เป็นฟังก์ชันของเวลา (หน่วย mm)

ระยะโก่งของคานาปลายยื่นที่ได้จากการทดสอบยัง ถูกนำไปหาค่าความเครียดคืบในแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์ ซึ่งในการวิจัยในครั้งนี้ได้ใช้แบบจำลอง

พฤติกรรมการคืบของไบเลย์-นอร์ตัน (Bailey-Norton Creep Law) [12] ดังแสดงในสมการที่ (6)

$$\varepsilon(t) = A\sigma_0^m t^n \quad (6)$$

โดยที่ A , m และ n คือ ค่าพารามิเตอร์ของ แบบจำลองพฤติกรรมการคืบของ Bailey-Norton Creep Law และสามารถหาได้จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลข และ t คือ เวลาใดๆ

ความเครียดคืบที่ได้จากสมการที่ (3) และสมการที่ (6) จะนำมาเปรียบเทียบกับกัน เพื่อเป็นแนวทางในการ พิจารณาผลของการใช้แบบจำลองพฤติกรรมการคืบของ ไบเลย์-นอร์ตัน ที่มีต่อพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของไม้ไผ่ เมื่อได้รับการกระตุ้นการกระทำ

3. ผลและวิจารณ์

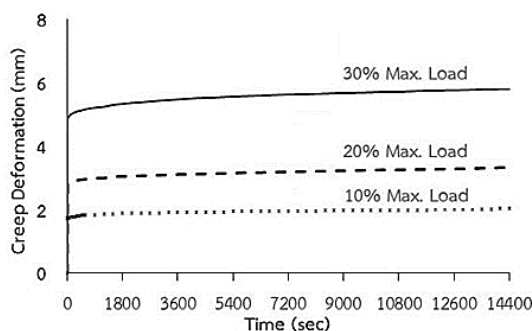
จากการทดสอบการดัดแบบ 3 จุด ด้วยเครื่องทดสอบสากล พบว่าไม้ไผ่ที่ถูกผ่านการอบแห้งสามารถรับภาระดัด ได้สูงสุด (P_u) 523 N ค่าความต้านแรงดัดสูงสุดที่ได้จาก สมการที่ (1) มีค่า 156.900 N/mm^2 เมื่อนำมาหาค่าภาระ สูงสุดที่ขึ้นทดสอบสามารถรับได้ด้วยวิธีการแบบคานาปลาย ยื่น (P_c) จากสมการที่ (2) จะได้ 145.278 N จากนั้นนำ ค่าภาระสูงสุดที่ขึ้นทดสอบสามารถรับได้นี้ไปหาภาระที่จะ ใช้ในการทดสอบหาพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปแบบคืบที่ 10% 20% และ 30% ของภาระสูงสุดที่ขึ้นทดสอบ สามารถรับได้ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ขนาดของภาระดัดที่ใช้ในการทดสอบหา พฤติกรรมการเปลี่ยนรูปแบบคืบของไม้ไผ่

P_c (N)	P_0 (N)		
	10%	20%	30%
145.278	14.528	29.056	43.583

ผลการศึกษาพฤติกรรมการคืบของไม้ไผ่ที่ถูกกระตุ้น ได้ รับภาระดัดขนาด 10% 20% และ 30% ของภาระสูงสุด ที่ขึ้นทดสอบสามารถรับ ด้วยวิธีการคานาปลายยื่น เป็น เวลา 4 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 5 โดยมีการกระจายตัวของ ข้อมูลในการหาระยะเปลี่ยนรูปแบบคืบ มีค่าส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐานที่ภาระ 10% เท่ากับ 0.41 mm ที่ภาระ 20% เท่ากับ 0.20 mm และที่ภาระ 30% เท่ากับ 0.41 mm ตามลำดับ

จากรูปที่ 5 พบว่าขึ้นทดสอบไฟสีกที่ผ่านการอบแห้ง เมื่อได้รับการกระตุ้นจะเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างฉับพลันในช่วงแรก จากนั้นเมื่อเวลาผ่านไปการเปลี่ยนรูปร่างจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ พฤติกรรมการเปลี่ยนรูปร่างที่เกิดขึ้นนี้มีผลมาจากลักษณะโครงสร้างของเนื้อไม้ไฟที่มีสมบัติเชิงกลแบบวิสโคอิลาสติก (Viscoelastic) [12] ที่มีพฤติกรรมยืดหยุ่น (Elastic) และหนืด (Viscous) เป็นพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของวัสดุที่ขึ้นอยู่กับเวลาเมื่อวัสดุนั้นอยู่ภายใต้สภาวะที่รับภาระคงที่ ซึ่งเรียกพฤติกรรมลักษณะนี้ว่าพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปแบบคืบ



รูปที่ 5 การเปลี่ยนรูปแบบคืบของไฟสีกเมื่อรับภาระตัด

นอกจากนี้ยังพบว่าขนาดของภาระตัดที่มากกระทำกับขึ้นทดสอบมีผลต่อระยะการเปลี่ยนรูป ถ้าขนาดของภาระตัดที่มากกระทำมีค่ามากจะส่งผลให้ขึ้นทดสอบเกิดการเปลี่ยนรูปมากขึ้น แต่ถ้าภาระตัดที่มากกระทำมีค่าน้อย จะส่งผลให้การเปลี่ยนรูปที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยตามไปด้วย และแนวโน้มที่การเปลี่ยนรูปนั้นจะมีค่าคงที่ไม่ว่าเวลาจะผ่านไปเท่าใด

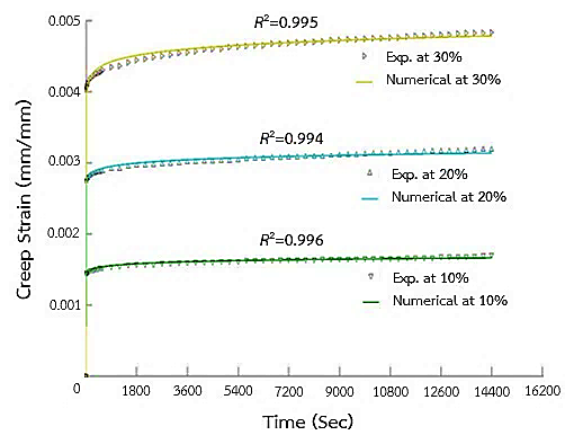
ข้อมูลการเปลี่ยนรูปที่ได้จากการทดสอบถูกนำมาหาค่าความเครียดคืบที่เวลาใดๆ ตามสมการที่ (3) เพื่อนำไปใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในแบบจำลองพฤติกรรมการคืบของไบเลย์-นอร์ตัน ในสมการที่ (6) โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขด้วยโปรแกรม Scilab [13] โดยใช้การพิจารณาสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R^2) [14] มากกว่า 0.9 ขึ้นไป

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในแบบจำลองพฤติกรรมการคืบของไบเลย์-นอร์ตัน แสดงได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในแบบจำลองพฤติกรรมการคืบของไบเลย์-นอร์ตัน $\varepsilon(t) = A\sigma_0^m t^n$

% Load	Parameters		
	A	m	n
10%	0.00030	0.40130	0.02228
20%	0.00031	0.51280	0.02476
30%	0.00065	0.65840	0.02843

จากนั้นนำข้อมูลของความเครียดคืบที่ได้จากแบบจำลองพฤติกรรมการคืบของไบเลย์-นอร์ตัน ไปเปรียบเทียบกับค่าความเครียดคืบที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีการคานปลายยื่น ตามสมการที่ (3) พบว่าเมื่อให้ภาระกระทำกับขึ้นทดสอบที่แตกต่างกันจะเกิดความเครียดคืบแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 ความเครียดคืบของไฟสีกเมื่อรับภาระตัด

จากรูปที่ 6 พบว่าที่ภาระ 30% จะเกิดความเครียดคืบมากที่สุด และน้อยสุดที่ภาระ 10% นอกจากนี้ยังพบว่าแบบจำลองพฤติกรรมการคืบของไบเลย์-นอร์ตัน มีความสอดคล้องกับผลการทดสอบเป็นอย่างดีโดยมีค่า R^2 มากกว่า 0.9 ขึ้นไป โดยที่ค่าพารามิเตอร์ A จะส่งผลต่อการเปลี่ยนรูปในช่วงของการเริ่มให้ภาระในระยะแรกตามพฤติกรรมการเชิงกลในช่วงยืดหยุ่น เมื่อวัสดุมีภาระมากกระทำเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้พารามิเตอร์ A มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เช่นเดียวกับพารามิเตอร์ m ส่วนค่าพารามิเตอร์ n จะส่งผลต่อการเปลี่ยนรูปในช่วงที่สองที่วัสดุมีพฤติกรรมเชิงกลในช่วงหนืด เมื่อเวลาที่ขึ้นทดสอบไม้ไฟสีกได้รับภาระเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ขึ้นทดสอบไม้ไฟสีกเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างช้าๆ จนการเปลี่ยนรูปนั้นอาจนำไปสู่การเสียหายของขึ้นทดสอบได้ ในทางตรงกันข้ามถ้าภาระที่มาก

กระทำกับชิ้นทดสอบมีค่าน้อย ผลของพารามิเตอร์ A , m และ n มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนรูปแบบคืบของชิ้นทดสอบน้อยมาก จนเมื่อเวลาที่รับภาระเพิ่มมากขึ้น การเปลี่ยนรูปของชิ้นทดสอบเกือบจะมีค่าคงที่

4. สรุป

ผลของภาระดัดที่มากกระทำกับไผ่สีสุกนั้นทำให้ไผ่สีสุกเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างฉับพลันในช่วงแรก และการเปลี่ยนรูปจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อระยะเวลาในการรับภาระเพิ่มขึ้น โดยที่ภาระดัดที่มากกระทำมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้การเปลี่ยนรูปของไผ่มีค่าเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ผลของการเปลี่ยนรูปนี้ถ้าปล่อยให้ไผ่สีสุกรับภาระไปเรื่อยๆ อาจนำไปสู่การเสียหายได้ ดังนั้นผู้ที่นำไผ่ไปใช้งานในลักษณะที่รับภาระดัดเป็นระยะเวลานาน ต้องคำนึงถึงการเปลี่ยนรูปแบบคืบนี้ด้วย เพื่อป้องกันการเสียหายของโครงสร้างที่อาจเกิดขึ้นได้

แบบจำลองพฤติกรรมการคืบของไบเล่ย์-นอร์ตัน มีความสอดคล้องกับผลการทดสอบเป็นอย่างดีโดยมีค่า R^2 น้อยที่สุดที่ 0.994 ซึ่งแบบจำลองนี้มีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการทำนายพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปแบบคืบของไผ่สีสุกหรือไผ่ชนิดอื่น เมื่อได้รับภาระดัดเป็นระยะเวลานานๆ นอกจากนั้นแบบจำลองพฤติกรรมการคืบของไบเล่ย์-นอร์ตัน ยังอาจนำไปใช้ในการทำนายพฤติกรรม การคืบของไม้ไผ่ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งเป็นโจทย์ที่ทางคณะผู้วิจัยมีความสนใจที่จะดำเนินการศึกษาต่อไปในอนาคต เพื่อใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์ปัญหาการเปลี่ยนรูปแบบคืบของไม้ไผ่ต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณห้องวิจัยและปฏิบัติการสมบัติทางกลของวัสดุทางการเกษตร สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ และโรงฝึกฝีมือสาขาวิชาออกแบบเครื่องเรือน คณะศิลปกรรมและสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ที่จำเป็นต่อการศึกษาวิจัยในครั้งนี้เป็นอย่างสูง

6. เอกสารอ้างอิง

[1] P. Yangpattana and R. Thawon, "Diversity and utilization of bamboo in Thailand," in *Proceeding of the 1st Bamboo and*

Livelihoods in Thailand: Local Knowledge and Management. Bangkok, 2014, pp. 10-18.

[2] S. Phumiphamon, "Bamboo with the Local Community Way in Thailand," in *Proceeding of the 1st Bamboo and Livelihoods in Thailand: Local Knowledge and Management*. Bangkok, 2014, pp. 19-27.

[3] J. Bodig and B.A. Jayne, "Mechanics of Wood and Wood Composites," Krieger Publishing Company. Malabar, Florida, 1993.

[4] T. Ounjaijom and W. Rangsi, "Creep behavior of the bamboo (*Dendrocalamus Hamiltonil*)," in *Proceeding of the 26th ME-NETT Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand*, Dusit Thani Resort, Chiang Rai, Thailand, 2012, pp.72.

[5] T. Ounjaijom and W. Rangsi, "Burgers model parameter identification of bamboo creep behavior," in *Proceeding of the 4th TSME International Conference on Mechanical Engineering*, Chonburi, Thailand, 2013, pp. 86.

[6] T. Ounjaijom and W. Rangsi, "Numerical and experimental study of the transverse creep-recovery behavior of bamboo culm (*Dendrocalamus hamiltonii*)," *Walailak J. Sci. Technol.*, vol. 13, no. 8, pp. 615-629, 2016.

[7] J. Tissaoui, "Effects of long-term creep on the integrity of modern wood structures," Ph.D. dissertation, Civil Engineering, Virginia Polytechnic Institute & State University, 1996.

[8] M. Yahyaei-Moayyed and F. Taheri, "Experimental and computational investigations into creep response of AFRP reinforced timber beams," *Compos. Struct.*, vol. 93, no. 2, pp. 616-628, 2011.

[9] Y. Xu, S.-Y. Lee and Q. Wu, "Creep analysis of bamboo high- density polyethylene composites: effect of interfacial treatment and fiber loading level," *Polym. Compos.*, vol. 32, no. 5, pp. 692-699, 2011.

- [10] International Standard, Determination of Physical and Mechanical Properties of Bamboo, ISO/DIS 22157, 2004.
- [11] M. Nakagima, K. Kojiro, H. Sugimoto, T. Miki and K. Kanayama, “Studies on bamboo for sustainable and advanced utilization,” *energy*, vol. 36, no.4, pp. 2049-2054, 2011.
- [12] R. S. Lakes, “*Viscoelastic Materials*,” CRC Press, Boca Raton, Florida, 2009.
- [13] S. L. Campbell, J. P. Chancelier and R. Nikoukhah, “Modeling and Simulation in Scilab/Scicos,” Springer, New York, p. 113-117. 2006.
- [14] Pramote Dechaumphai, “*Numerical Methods in Engineering*,” 9th ed. , Chulalongkorn University Press, Bangkok, 2014.

วงจรทบทระดับแรงดันแบบหลายอินพุตที่มีอัตราขยายแรงดันสูงสำหรับระบบพลังงานทดแทน A High Step-Up Multi-Input Boost Converter for Renewable Energy Systems

เกื้อกูล กองกาญจนะ สุดารัตน์ ขวัญอ่อน*

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Kuagoon Kongkanjana Sudarat Khwan-on

School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand

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

(Received: October 19, 2018; Accepted: August 24, 2018)

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอโครงสร้างวงจรทบทระดับแรงดันแบบหลายอินพุตที่มีอัตราขยายแรงดันสูงสำหรับระบบพลังงานทดแทน โดยมีอัตราขยายแรงดันสูงประมาณ 20 เท่า ทั้งนี้วงจรทบทระดับแรงดันแบบหลายอินพุตที่พัฒนาขึ้น สามารถเพิ่มระดับแรงดันอินพุต ที่ได้จากแหล่งจ่ายพลังงานทดแทนซึ่งมีแรงดันค่อนข้างต่ำประมาณ 20V ถึง 40V ให้มีระดับแรงดันเอาต์พุตสูงขึ้นถึง 400V รวมทั้งสามารถใช้กับแหล่งจ่ายพลังงานทดแทนได้มากกว่าหนึ่งแหล่งจ่าย เพื่อเพิ่มกำลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้โหลด บทความนี้อธิบายโครงสร้างวงจรทบทระดับแรงดันแบบหลายอินพุตที่มีอัตราขยายแรงดันสูง และหลักการทำงานของวงจร การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจร ได้แก่ ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ เพื่อลดการกระเพื่อมของกระแสและแรงดัน การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ตามต้องการ ซึ่งประกอบด้วยลู่วควบคุมแรงดันหนึ่งลู่ว และลู่วควบคุมกระแสหลายลู่ว โดยอาศัยเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส เพื่อสร้างกระแสอ้างอิงที่เหมาะสมสำหรับลู่วควบคุมกระแสแต่ละลู่ว ผลการจำลองสถานการณ์และผลการทดสอบวงจร แสดงให้เห็นว่าวงจรทบทระดับแรงดันแบบหลายอินพุตที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น มีอัตราขยายแรงดันประมาณ 20 เท่า และตัวควบคุมพีไอที่อาศัยเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส สามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ได้ตามต้องการภายใต้เงื่อนไขการทำงานต่าง ๆ ที่แตกต่างกันได้อย่างน่าพอใจ

คำสำคัญ: วงจรทบทระดับแรงดันที่มีอัตราขยายแรงดันสูง วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าหลายอินพุต แหล่งจ่ายพลังงานทดแทน ตัวควบคุมชนิดพีไอ

ABSTRACT

This paper proposes a multi-input high step-up boost converter topology for renewable energy system. The proposed converter provides a high voltage conversion ratio, approximately 20 times, in order to boost up the low input voltage generated from renewable energy sources about 20V – 40V to the high output voltage level of 400V. In addition, this proposed multi-input converter can employ with the multi-input sources to increase power to the load. In this paper, the configuration of the proposed converter and its principle of operation will be described. The converter parameters such as inductors and capacitors are designed to reduce the current and voltage ripples. The PI controller with one voltage control loop and multi current control loops is also designed to regulate the output voltage at the desired constant levels. The current control is based on the current weighting

technique in order to provide the proper reference current for each current control loop. Simulation and experimental results show that the proposed high step-up multi-input boost converter can increase the voltage conversion ratio of 20. The PI controller based on the current weighting technique can satisfactorily regulate the output voltage at the desired constant levels under different operating conditions.

Keyword: High step-up boost converter, multi-input boost converter, renewable energy, PI controller.

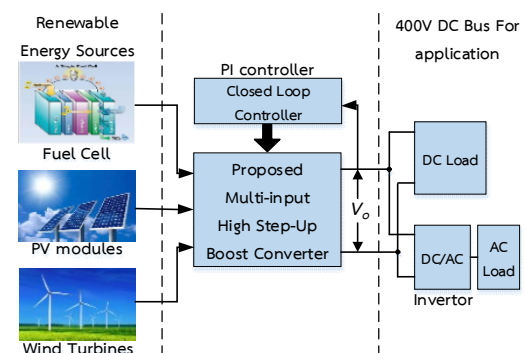
1. บทนำ

ปัจจุบันการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรโลก ส่งผลให้ความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาแหล่งพลังงานที่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้อย่างยั่งยืนและไม่ก่อให้เกิดมลพิษ ด้วยเหตุนี้พลังงานทดแทน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม และ เซลล์พลังงาน จึงเข้ามามีบทบาทสำคัญในการผลิตพลังงานไฟฟ้า เพื่อตอบสนองความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้น นำไปสู่การวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีต่าง ๆ เพื่อช่วยให้สามารถนำพลังงานทดแทนที่มีขนาดกำลังไฟฟ้าค่อนข้างต่ำและมีระดับแรงดันต่ำประมาณ 20V ถึง 40V มาใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น แผงเซลล์แสงอาทิตย์ 24V ขนาด 100W ถึง 200W โดยในอดีตมีการวิจัยเกี่ยวกับวงจรระดับแรงดันสวิตช์เดียวที่มีอัตราขยายแรงดันสูง (High Step-Up Single-Switch Boost Converter) [1]–[3] ซึ่งมีอัตราขยายแรงดันประมาณ 20 เท่า ใช้สำหรับระดับแรงดันจากแหล่งจ่ายแรงดันต่ำประมาณ 20V ให้มีค่าสูงถึงประมาณ 400V เนื่องจากวงจรดังกล่าวมีระดับแรงดันอินพุตต่ำ ทำให้จำเป็นต้องมีกระแสอินพุตค่อนข้างสูง สำหรับจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังโหลดได้อย่างเพียงพอ ดังนั้นการใช้แหล่งจ่ายอินพุตเดียวอาจไม่เพียงพอสำหรับจ่ายโหลดที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูง ๆ ด้วยเหตุนี้วงจรระดับแรงดันแบบหลายอินพุต (Multi-input Boost Converter) [4]–[6] สามารถช่วยเพิ่มกำลังไฟฟ้าให้เพียงพอต่อความต้องการของโหลด อย่างไรก็ตามวงจรดังกล่าวมีอัตราขยายแรงดันต่ำ จึงไม่สามารถนำไปใช้งานกับโหลดที่ต้องการแรงดันสูงได้

บทความนี้เสนอโครงสร้างวงจรระดับแรงดันแบบหลายอินพุตที่มีอัตราขยายแรงดันสูงสำหรับระบบพลังงานทดแทน วงจรดังกล่าวพัฒนาขึ้นเพื่อระดับแรงดันอินพุตที่ได้จาก

แหล่งจ่ายพลังงานทดแทนซึ่งมีแรงดันต่ำประมาณ 20V–40V ให้มีระดับแรงดันเอาต์พุตที่สูงถึงประมาณ 400V โดยอาศัยโครงสร้างวงจรระดับแรงดันแบบหลายอินพุตที่มีอัตราขยายแรงดันสูง ซึ่งมีอัตราขยายแรงดันประมาณ 20 เท่า และสามารถเพิ่มกำลังไฟฟ้าให้กับระบบได้ โดยอาศัยการเชื่อมต่อแหล่งจ่ายหลายแหล่งจ่ายแบบขนานเพื่อสามารถนำแรงดันเอาต์พุตที่ได้ไปใช้กับโหลดไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง หรืออาจใช้สำหรับโหลดไฟฟ้ากระแสสลับโดยอาศัยวงจรอินเวอร์เตอร์ เพื่อแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับต่อไป

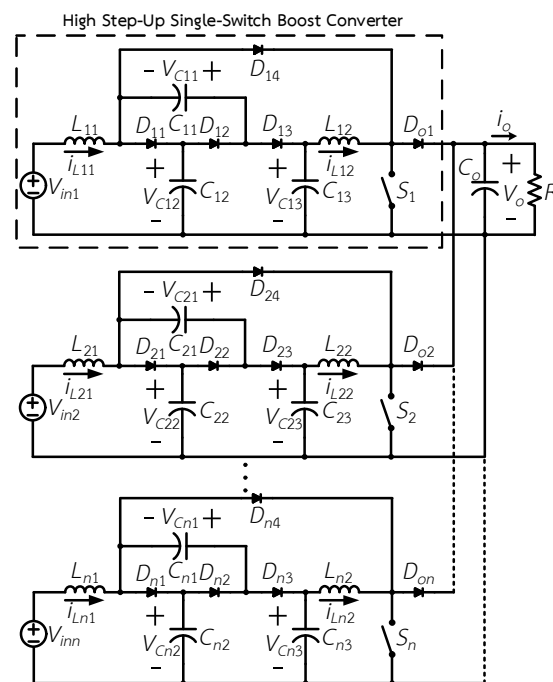
บทความนี้ยังได้นำเสนอการออกแบบค่าพารามิเตอร์ ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ ที่ปรากฏในโครงสร้างวงจรที่พัฒนาขึ้น เพื่อช่วยลดการกระเพื่อมของกระแสอินพุต และแรงดันเอาต์พุต รวมทั้งได้กล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมพีไอที่มีการเพิ่มลูบควบคุมกระแสตามจำนวนของแหล่งจ่ายอินพุตที่เชื่อมต่อเข้ากับวงจร โดยได้นำเสนอเทคนิคการถ่วงน้ำหนักค่ากระแสสำหรับลูบกระแสในแต่ละลูบ เพื่อให้สามารถควบคุมการทำงานของวงจรได้อย่างมีประสิทธิภาพ รูปที่ 1 แสดงโครงสร้างระบบแรงดันอินพุตต่ำแรงดันเอาต์พุตสูงซึ่งมีพลังงานทดแทนหลายแหล่งจ่ายโดยอาศัยวงจรระดับแรงดันแบบหลายอินพุตที่มีอัตราขยายแรงดันสูง



รูปที่ 1 โครงสร้างระบบแรงดันอินพุตต่ำแรงดันเอาต์พุตสูง

2. วงจรทบทระดับแรงดันแบบหลายอินพุตที่มีอัตราขยายแรงดันสูง

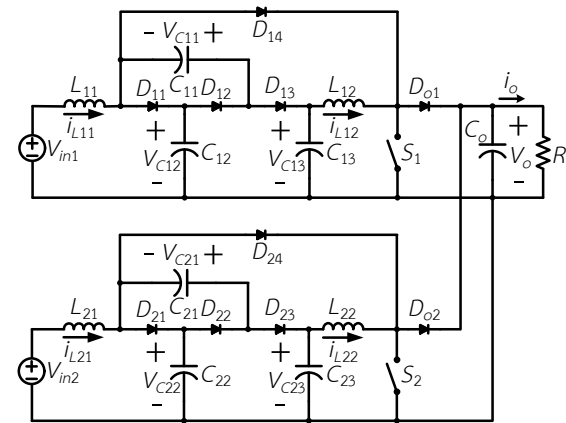
วงจรทบทระดับแรงดันแบบหลายอินพุตที่มีอัตราขยายแรงดันสูงพัฒนาขึ้นจากวงจรทบทระดับแรงดันแบบสวิตช์เดียวที่มีอัตราขยายแรงดันสูง ร่วมกับวงจรทบทระดับแรงดันแบบหลายอินพุต เพื่อให้สามารถเชื่อมต่อแหล่งจ่ายอินพุตได้มากกว่าหนึ่งแหล่งจ่าย โครงสร้างวงจรที่พัฒนาขึ้นแสดงได้ดังรูปที่ 2 ซึ่งประกอบด้วยวงจรทบทระดับแรงดันแบบสวิตช์เดียวที่มีอัตราขยายแรงดันสูงหรือวงจรย่อย ที่มีจำนวนวงจรย่อยเท่ากับจำนวนแหล่งจ่าย โดยภายในหนึ่งวงจรย่อย เช่น วงจรย่อยที่หนึ่งประกอบด้วย ตัวเหนี่ยวนำ L_{11} , L_{12} ตัวเก็บประจุ C_{11} , C_{12} , C_{13} ไดโอดกำลัง D_{11} , D_{12} , D_{13} , D_{14} , D_{o1} และสวิตช์กำลัง S_1 โดยวงจรที่พัฒนาขึ้นรวมทั้งทุกวงจรย่อยที่ต่อขนานกัน ทำงานในโหมดนำกระแสต่อเนื่อง



รูปที่ 2 วงจรทบทระดับแรงดันแบบหลายอินพุตที่มีอัตราขยายแรงดันสูง

ในบทความนี้จะอธิบายหลักการทำงานของวงจรทบทระดับแรงดันแบบหลายอินพุตที่มีอัตราขยายแรงดันสูงกรณีเชื่อมต่อแหล่งจ่ายแรงดันอินพุตสองแหล่งจ่าย คือ V_{in1} และ V_{in2} ซึ่งจ่ายแรงดันอินพุตกับวงจรทบทระดับแรงดันแบบสวิตช์เดียวที่มีอัตราขยายแรงดันสูง จากนั้นจึงนำทั้งสองวงจรมาเชื่อมต่อกัน

ในลักษณะขนาน ร่วมกับตัวเก็บประจุเอาต์พุต (C_o) และโหลดตัวต้านทาน (R) โครงสร้างวงจรทบทระดับแรงดันแบบสองอินพุตที่มีอัตราขยายแรงดันสูงแสดงได้ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 วงจรทบทระดับแรงดันแบบสองอินพุตที่มีอัตราขยายแรงดันสูง

การทำงานของวงจรทบทระดับแรงดันแบบสองอินพุตที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น พบว่าแรงดันเอาต์พุตจากทั้งสองวงจรย่อยจำเป็นต้องมีค่าเท่ากัน แม้ว่าแหล่งจ่ายแรงดันอินพุต V_{in1} และ V_{in2} มีค่าแตกต่างกันก็ตาม ดังนั้นการทำงานของสวิตช์ S_1 และ S_2 อาจมีค่าวัฏจักรหน้าที่ที่แตกต่างกันได้ โดยจำนวนโหมดการทำงานของวงจรจะขึ้นกับจำนวนสวิตช์ที่ปรากฏอยู่ในวงจร ซึ่งมีความสัมพันธ์แสดงดังสมการที่ (1)

$$N_m = 2^n \quad (1)$$

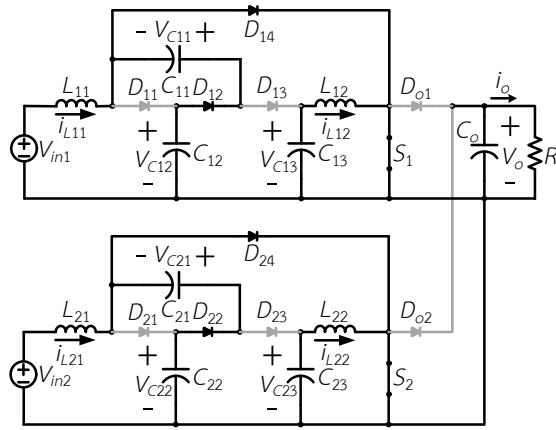
เมื่อ N_m คือ จำนวนของโหมดการทำงาน

n คือ จำนวนสวิตช์ที่ปรากฏอยู่ในวงจร

กรณีนี้มีสวิตช์ปรากฏอยู่ในวงจรที่พัฒนาขึ้นจำนวนสองตัว คือ S_1 และ S_2 จึงสามารถพิจารณาได้ 4 โหมด ดังต่อไปนี้

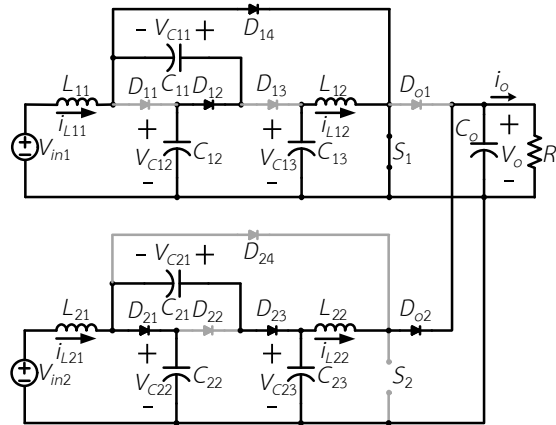
โหมดที่ 1 เมื่อสวิตช์ S_1 และ S_2 นำกระแส

เมื่อสวิตช์ S_1 และ S_2 นำกระแส ส่งผลให้ไดโอด D_{11} , D_{13} , D_{o1} , D_{21} , D_{23} และ D_{o2} หยุดนำกระแสเนื่องจากเกิดการไบอัสย้อนกลับ ตัวเก็บประจุ C_{11} และ C_{21} จะอัดประจุเพื่อเก็บสะสมพลังงาน ส่วนตัวเก็บประจุ C_{12} , C_{13} , C_{22} , C_{23} และ C_o จะคายประจุทำหน้าที่เสมือนแหล่งจ่ายแรงดัน โดยโหลดตัวต้านทานจะได้รับพลังงานจากการคายประจุของตัวเก็บประจุเอาต์พุต C_o ซึ่งลักษณะการทำงานของวงจรในโหมดนี้แสดงได้ดังรูปที่ 4

รูปที่ 4 โหมดที่ 1 S_1 และ S_2 นำกระแส

โหมดที่ 2 เมื่อสวิตช์ S_1 นำกระแส และ S_2 หยุดนำกระแส

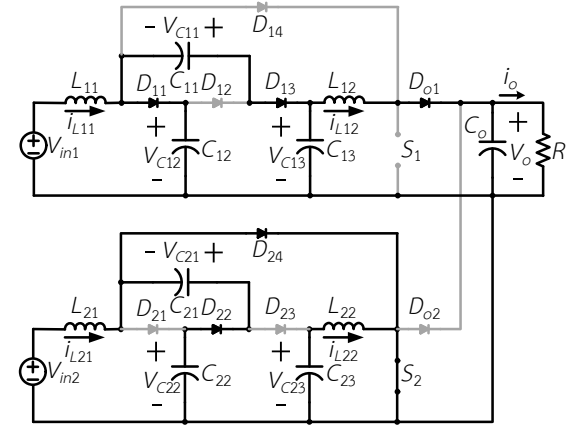
เมื่อสวิตช์ S_1 นำกระแส และ S_2 หยุดนำกระแส ส่งผลให้ไดโอด D_{11} , D_{13} , D_{o1} , D_{22} และ D_{24} หยุดนำกระแสเนื่องจากเกิดการไบอัสย้อนกลับ ตัวเก็บประจุ C_{11} , C_{22} , C_{23} และ C_o จะอัดประจุเพื่อเก็บสะสมพลังงาน ส่วนตัวเก็บประจุ C_{12} , C_{13} และ C_{21} จะคายประจุทำหน้าที่เสมือนแหล่งจ่ายแรงดัน ในโหมดนี้ โหลดตัวต้านทานจะได้รับแรงดันจากแหล่งจ่าย V_{in2} และจากการคายประจุของตัวเก็บประจุ C_{21} ซึ่งมีลักษณะการทำงานของวงจรแสดงได้ดังรูปที่ 5

รูปที่ 5 โหมดที่ 2 S_1 นำกระแส และ S_2 หยุดนำกระแส

โหมดที่ 3 เมื่อสวิตช์ S_1 หยุดนำกระแส และ S_2 นำกระแส

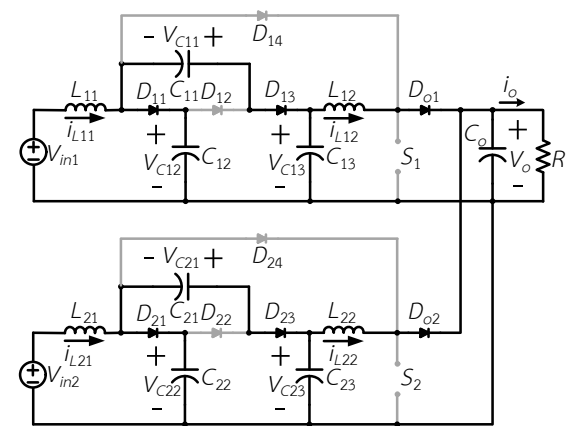
เมื่อสวิตช์ S_1 หยุดนำกระแส และสวิตช์ S_2 นำกระแส ส่งผลให้ไดโอด D_{12} , D_{14} , D_{21} , D_{23} และ D_{o2} หยุดนำกระแสเนื่องจากเกิดการไบอัสย้อนกลับ ตัวเก็บ

ประจุ C_{12} , C_{13} , C_{21} และ C_o จะอัดประจุเพื่อเก็บสะสมพลังงาน ส่วนตัวเก็บประจุ C_{11} , C_{21} และ C_{23} จะคายประจุ โหลดตัวต้านทานจะได้รับแรงดันจากแหล่งจ่าย V_{in1} และจากการคายประจุของตัวเก็บประจุ C_{11} ซึ่งโครงสร้างการทำงานของวงจรในโหมดนี้แสดงได้ดังรูปที่ 6

รูปที่ 6 โหมดที่ 3 S_1 หยุดนำกระแส และ S_2 นำกระแส

โหมดที่ 4 เมื่อสวิตช์ S_1 และ S_2 หยุดนำกระแส

เมื่อสวิตช์ S_1 และ S_2 หยุดนำกระแส ส่งผลให้ไดโอด D_{12} , D_{14} , D_{22} และ D_{24} หยุดนำกระแสเนื่องจากเกิดการไบอัสย้อนกลับ ตัวเก็บประจุ C_{12} , C_{13} , C_{22} , C_{23} และ C_o จะอัดประจุเพื่อเก็บสะสมพลังงาน ส่วนตัวเก็บประจุ C_{11} และ C_{21} จะคายประจุทำหน้าที่เสมือนแหล่งจ่ายแรงดัน โดยโหลดตัวต้านทานจะได้รับแรงดันจากทั้งสองแหล่งจ่าย คือ V_{in1} และ V_{in2} และจากการคายประจุของตัวเก็บประจุ C_{11} และ C_{21} การทำงานของวงจรแสดงได้ดังรูปที่ 7

รูปที่ 7 โหมดที่ 4 S_1 และ S_2 หยุดนำกระแส

จากการพิจารณาโหมดการทำงานของวงจรทั้ง 4 โหมด สามารถหาอัตราขยายแรงดันของวงจรที่ระดับแรงดันแบบ สวิตช์เดียวที่มีอัตราขยายแรงดันสูงแต่ละวงจรย่อยได้ โดยอาศัยการวิเคราะห์วงจรด้วยทฤษฎีกฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) และทฤษฎีกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ (KCL) ซึ่งจะได้ สมการอัตราขยายของวงจรที่ระดับแรงดันแบบสวิตช์เดียวที่มี อัตราขยายแรงดันสูงดังสมการที่ (2) โดยเป็นความสัมพันธ์ ระหว่างแรงดันเอาต์พุต (V_o) และแรงดันอินพุตของแหล่งจ่ายที่ กำลังพิจารณา (V_{in}) โดยมี D_n บ่งบอกถึงค่าวัฏจักรหน้าที่ของ สวิตช์ในวงจรย่อยนั้น จะเห็นได้ว่าสามารถขยายแรงดันได้สูงถึง ประมาณ 20 เท่า เมื่อมีค่าวัฏจักรหน้าที่ประมาณ 70% ซึ่งไม่ สูงมากนักในทางปฏิบัติ

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{2}{(1-D_n)^2} \quad (2)$$

นอกจากนี้ได้วิเคราะห์โหมดการทำงานของวงจรที่ระดับ แรงดันที่พัฒนาขึ้น สำหรับออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำ และค่าตัว เก็บประจุ ที่ปรากฏในวงจร เพื่อช่วยลดกระแสพุ่มของกระแส และกระแสพุ่มของแรงดันให้อยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้ ทั้งนี้สมการที่ใช้ในการออกแบบค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวแสดง ดังตารางที่ 1 โดยที่ n คือลำดับของวงจรย่อยที่กำลังพิจารณา

ตารางที่ 1 สมการการออกแบบค่าพารามิเตอร์

พารามิเตอร์	สมการการออกแบบ
L_{n1}	$L_{n1} \geq \frac{V_{in} D_n}{f_{sw} \Delta i_{Ln1}}$
L_{n2}	$L_{n2} \geq \frac{V_{Cn3} D_n}{f_{sw} \Delta i_{Ln2}}$
C_{n1}, C_{n2}	$C_{n1}, C_{n2} \geq \frac{P_{o,max}}{V_{Cn1}^2 f_{sw}}$
C_{n3}	$C_{n3} \geq \frac{i_{Ln2} D_n}{f_{sw} \Delta V_{Cn3}}$
C_o	$C_o \geq \frac{i_o D}{f_{sw} \Delta V_o}$

โดยได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการออกแบบตัว เหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ ดังตารางที่ 2 ดังนั้นค่าตัว เหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุที่ปรากฏอยู่ในวงจรที่พัฒนาขึ้น สามารถแสดงดังตารางที่ 3 ในการออกแบบตัวควบคุม การ จำลองสถานการณ์ และการสร้างชุดทดสอบ จะเลือกใช้ค่าตัว เหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ ที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการ โดยค่า

ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่เลือกใช้แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์สำหรับการออกแบบ

V_o	444V	V_{in1}, V_{in2}	20V
R	500Ω	i_o	0.8A
f_{ws}	20kHz	D_n	0.7
$P_{o,max}$		400W	
i_{Ln1}	19.71A	i_{Ln2}	2.96A
V_{Cn1}, V_{Cn2}	66.7V	V_{Cn3}	133.3V
ΔV_{Cn3}	1V (0.75% V_{Cn3})	ΔV_o	1V (0.23% V_o)
Δi_{Ln1}	0.2A (1% i_{Ln1})	Δi_{Ln2}	0.5A (15% i_{Ln2})

ตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์ภายในวงจร

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์
L_{11}, L_{21}	$\geq 4\text{mH}$
L_{12}, L_{22}	$\geq 11\text{mH}$
$C_{11}, C_{12}, C_{21}, C_{22}$	$\geq 100\mu\text{F}$
C_{13}, C_{23}	$\geq 150\mu\text{F}$
C_o	$\geq 40\mu\text{F}$

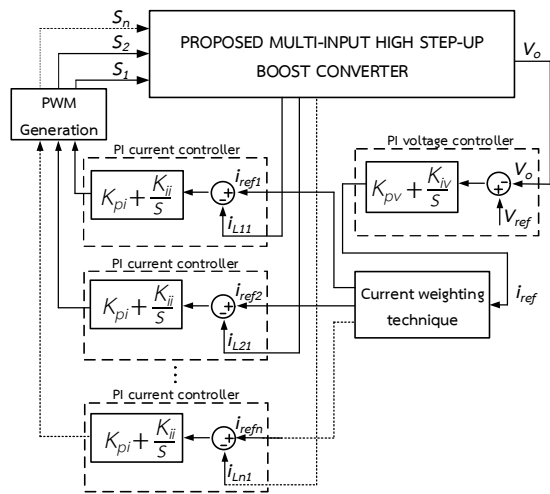
ตารางที่ 4 ค่าพารามิเตอร์ภายในวงจร

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์
$L_{11}, L_{12}, L_{21}, L_{22}$	15mH
$C_{11}, C_{12}, C_{21}, C_{22}, C_o$	100μF
C_{13}, C_{23}	150μF

3. การออกแบบตัวควบคุมสำหรับวงจรที่ระดับแรงดัน แบบหลายอินพุตที่มีอัตราขยายแรงดันสูง

โครงสร้างของการควบคุมวงจรที่ระดับแรงดันแบบ หลายอินพุตที่มีอัตราขยายแรงดันสูงจะใช้ตัวควบคุมพีไอ แสดงดังรูปที่ 8 ซึ่งประกอบด้วยลูปควบคุมแรงดัน เอาต์พุตหนึ่งลูป และลูปควบคุมกระแสอินพุตหลายลูป โดยมีเพิ่มลูปควบคุมกระแส ตามจำนวนของแหล่งจ่าย

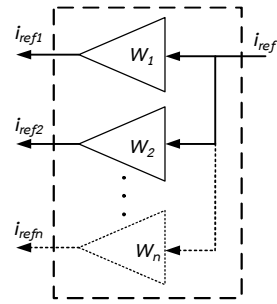
ที่จ่ายแรงดันอินพุตให้กับวงจร เพื่อควบคุมการทำงานของสวิตช์แต่ละตัวให้เป็นอิสระต่อกัน โดยในบทความนี้พิจารณาวงจรกรณีเมื่อเชื่อมต่อแหล่งจ่ายแรงดันอินพุตจำนวนสองแหล่งจ่าย ดังนั้นจึงใช้รูปควบคุมกระแสสองลูป เพื่อควบคุมกระแสอินพุตที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในแต่ละวงจรย่อย รวมทั้งอาศัยเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส (Current Weighting Technique) เข้าช่วยสำหรับสร้างกระแสอ้างอิงที่เหมาะสมในการควบคุมกระแสอินพุตในแต่ละลูป โดยกระแสอ้างอิงนี้จะใช้ในการเปรียบเทียบกับค่ากระแสอินพุตที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำที่วัดได้จากแต่ละวงจรย่อย ทั้งนี้เพื่อให้วงจรที่พัฒนาขึ้นสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ โดยที่แหล่งจ่ายแรงดันอินพุตแต่ละแหล่งจ่ายยังคงสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังโหลดได้อย่างเหมาะสม เมื่อแหล่งจ่ายอินพุตแต่ละแหล่งจ่ายมีกำลังไฟฟ้าที่แตกต่างกัน



รูปที่ 8 การควบคุมวงจรพหุระดับแรงดันแบบหลายอินพุตที่มีอัตราขยายแรงดันสูง

จากรูปที่ 8 ค่าแรงดันเอาต์พุต (V_o) ที่วัดได้จะถูกเปรียบเทียบกับค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง (V_{ref}) เพื่อเข้าสู่รูปควบคุมแรงดัน โดยรูปควบคุมแรงดันจะสร้างสัญญาณกระแสอ้างอิง (i_{ref}) จากนั้นจะอาศัยเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส เพื่อสร้างค่ากระแสอ้างอิงที่เหมาะสมสำหรับรูปการควบคุมกระแสของแต่ละแหล่งจ่าย โดยโครงสร้างเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส แสดงดังรูปที่ 9

Current weighting technique



รูปที่ 9 กระบวนการถ่วงน้ำหนักกระแสอ้างอิง

ทั้งนี้เทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสอธิบายได้ดังสมการที่ (3)

$$i_{refn} = W_n i_{ref} \quad (3)$$

เมื่อ i_{ref} คือ ค่ากระแสอ้างอิงที่ได้จากรูปควบคุมแรงดัน

i_{refn} คือ ค่ากระแสอ้างอิงสำหรับรูปควบคุมกระแสที่กำลังพิจารณา

โดยค่าปรับคูณการถ่วงน้ำหนัก W_1 และ W_2 พิจารณาได้จากสมการที่ (4)

$$W_n = \frac{P_n}{\sum_{i=1}^j P_i} \quad (4)$$

เมื่อ W_n คือ ค่าปรับคูณการถ่วงน้ำหนักที่กำลังพิจารณา

P_n คือ กำลังของแหล่งจ่ายที่กำลังพิจารณา

n คือ ลำดับของวงจรย่อยที่กำลังพิจารณา

j คือ จำนวนแหล่งจ่ายทั้งหมด

เนื่องจากบทความนี้พิจารณากรณีที่มีแรงดันอินพุตสองแหล่งจ่ายเชื่อมต่อเข้ากับวงจร จึงกำหนดให้พิกัดกำลังของแหล่งจ่ายแต่ละแหล่งจ่ายเป็นดังนี้ โดยแหล่งจ่ายที่หนึ่งมีพิกัดกำลังอยู่ที่ $P_1=60W$ และแหล่งจ่ายที่สองมีพิกัดกำลังอยู่ที่ $P_2=40W$ ฉะนั้นค่าปรับคูณการถ่วงน้ำหนัก สำหรับแหล่งจ่ายที่หนึ่ง และแหล่งจ่ายที่สอง คือ

$$W_1 = 60/100 = 0.6 \text{ และ } W_2 = 40/100 = 0.4$$

ดังนั้น ค่ากระแสอ้างอิง i_{ref1} และ i_{ref2} สำหรับรูปควบคุมกระแสแต่ละลูป แสดงได้ดังนี้

$$i_{ref1} = 0.6 i_{ref} \text{ และ } i_{ref2} = 0.4 i_{ref}$$

จากนั้นค่ากระแสอ้างอิงสำหรับรูปควบคุมกระแสแต่
ละรูป จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่ากระแสอินพุตที่วัดได้
จากวงจร (i_{L11} และ i_{L21}) จากนั้นสัญญาณความผิดพลาด
กระแสที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณรูปคลื่น
สามเหลี่ยมที่มีความถี่เท่ากับความถี่การสวิตช์ เพื่อสร้าง
สัญญาณในการควบคุมการทำงานของสวิตช์ S_1 และ S_2
ด้วยตัวจักรหน้าที่ D_1 และ D_2 ตามลำดับ

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอ สำหรับ
วงจรระดับแรงดันแบบหลายอินพุตที่มีอัตราขยาย
แรงดันสูง อาศัยหลักการเดียวกับการออกแบบ
ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรระดับ
แรงดันแบบดั้งเดิม ด้วยวิธีเทียบสัมประสิทธิ์ โดยกำหนด
ค่าพารามิเตอร์ของวงจрдังตารางที่ 5 สมการการ
ออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอ และ
ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอที่ได้ออกแบบ แสดงดัง
ตารางที่ 6

ตารางที่ 5 ค่าพารามิเตอร์ภายในวงจร

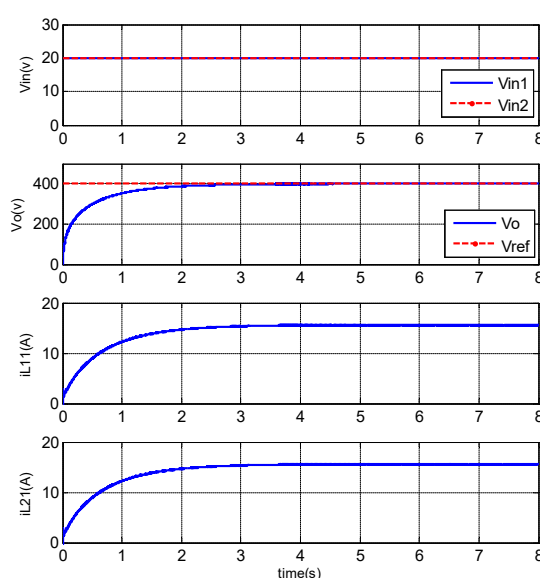
พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์
V_{in}	20V
L	15mH
C	100 μ F
R	320 Ω

ตารางที่ 6 ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอ

สัญลักษณ์	สมการ	ค่าพารามิเตอร์
ζ	-	0.9
ω_n	$\omega_n = \frac{1}{RC}$	31.25
K_{pv}	$K_{pv} = 2\zeta\omega_n C - \frac{1}{R}$	0.0025
K_{iv}	$K_{iv} = \omega_n^2 C$	0.09765625
ω_{ni}	$\omega_{ni} = 100\omega_n$	3125
K_{pi1}, K_{pi2}	$K_{pi} = \frac{2\zeta\omega_{ni}L}{V_{in}}$	4.21875
K_{ii1}, K_{ii2}	$K_{ii} = \frac{\omega_{ni}^2 L}{V_{in}}$	7324.21875

4. ผลการจำลองสถานการณ์

การจำลองสถานการณ์วงจรระดับแรงดันแบบหลาย
อินพุตที่มีอัตราขยายแรงดันสูงสำหรับระบบพลังงานทดแทน
อาศัยโปรแกรม MATLAB SIMULINK ช่วยในการจำลอง
สถานการณ์ โดยพิจารณาวงจรกรณี เมื่อมีแหล่งจ่ายแรงดัน
อินพุตสองแหล่งจ่าย ดังแสดงโครงสร้างวงจรในรูปที่ 3 โดยมี
ค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ภายในวงจรแสดงดังตารางที่ 4
ในการควบคุมการทำงานของวงจรที่พัฒนาขึ้นอาศัย
โครงสร้างของตัวควบคุมดังรูปที่ 8 โดยมีค่าพารามิเตอร์ของ
ตัวควบคุมดังตารางที่ 6 เพื่อพิจารณาประสิทธิภาพการทำงานของ
วงจรระดับแรงดันแบบหลายอินพุตที่มีอัตราขยาย
แรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น ได้ดำเนินการการจำลองสถานการณ์
ทั้งหมด 6 กรณีดังนี้

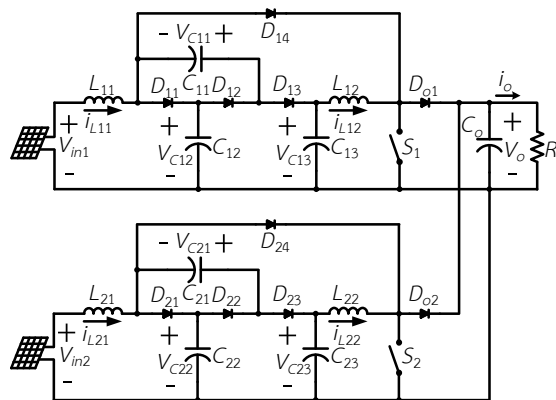


รูปที่ 10 ผลการจำลองสถานการณ์เพื่อทดสอบตัวควบคุม

กรณีที่ 1 เมื่อแหล่งจ่ายแรงดันอินพุตทั้งสองแหล่งจ่าย
 V_{in1} และ V_{in2} เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งไม่มีข้อจำกัด
ด้านกระแสอินพุต สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังโหลดได้ตาม
ต้องการ และระดับแรงดันอินพุตคงที่ 20V ทั้งสองแหล่งจ่าย
และโหลดตัวต้านทาน R มีค่าเป็น 320 Ω โดยกำหนดให้
แรงดันเอาต์พุตอ้างอิงมีค่าคงที่ 400V และไม่มีกระบวนการ
ปรับแก้ค่ากระแสอ้างอิงด้วยเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส
ผลการจำลองสถานการณ์กรณีที่ 1 แสดงดังรูปที่ 10 จะเห็น
ได้ว่าจากช่วงเวลา 0 ถึง 8 วินาที ระดับแรงดันเอาต์พุตมีค่า

เพิ่มสูงขึ้น และเข้าสู่แรงดันเอาต์พุตอ้างอิงในสภาวะอยู่ตัวที่ 400V ส่วนค่ากระแสอินพุตของทั้งสองแหล่งจ่าย i_{L11} และ i_{L21} มีค่าเพิ่มสูงขึ้นเป็นไปในทิศทางเดียวกับแรงดันเอาต์พุต และเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 15A เท่ากันทั้งสองแหล่งจ่าย จากผลการจำลองสถานการณ์ในกรณีที่ 1 แสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมชนิดพีไอและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ได้ออกแบบไว้ในตารางที่ 6 นั้นสามารถควบคุมการทำงานของวงจรให้ได้ค่าแรงดันเอาต์พุตตามที่ต้องการได้ โดยมีอัตราขยายแรงดันสูงถึง 20 เท่า

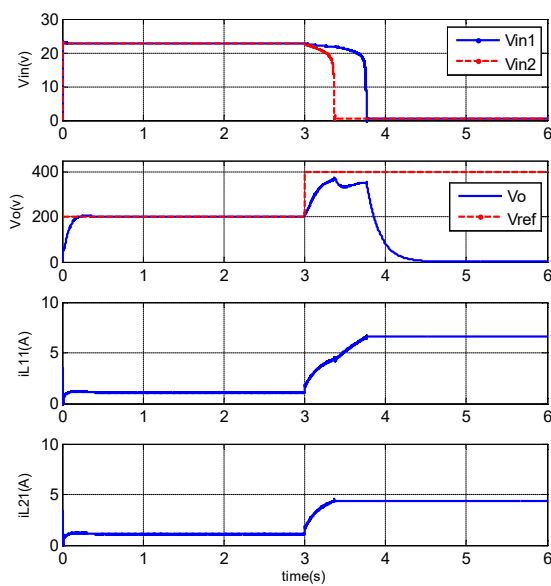
สำหรับกรณีที่ 2 ถึง กรณีที่ 6 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงทั้งสองแหล่งจ่าย V_{in1} และ V_{in2} จะถูกแทนที่ด้วยแหล่งจ่ายแรงเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นจากสมการทางคณิตศาสตร์ [7] โดยมีพิกัดกระแสแสงประมาณ 1.1A และอาศัยการต่อขนานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อเพิ่มพิกัดกระแส โดยแหล่งจ่าย V_{in1} และ V_{in2} จะใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 6 แผง และ 4 แผง ตามลำดับ ดังนั้นแหล่งจ่าย V_{in1} และ V_{in2} สามารถจ่ายกระแสอินพุตให้กับวงจรด้วยพิกัดกระแสประมาณ 6.6A และ 4.4A ตามลำดับ ด้วยเหตุนี้จึงเปลี่ยนค่าโหลดตัวต้านทาน 320Ω เป็น 1600Ω เพื่อให้กำลังไฟฟ้าที่ส่งไปยังโหลดมีค่าลดลง ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าอินพุตที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าไม่สูงมากนัก อีกทั้งช่วยลดพิกัดกำลังของชุดทดสอบในห้องปฏิบัติการ โครงสร้างของวงจรที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์เมื่อแหล่งจ่ายอินพุตทั้งสองแหล่งจ่ายเป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์ แสดงได้ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 โครงสร้างวงจรสำหรับการจำลองสถานการณ์

กรณีที่ 2 เมื่อระบบควบคุมไม่มีกระบวนการปรับแก้ค่ากระแสอ้างอิงด้วยเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส โดยกำหนดให้แหล่งจ่ายเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสองแหล่งจ่าย V_{in1} และ V_{in2} เป็นค่าแรงดันอินพุตคงที่เท่ากับ 20V โดยกำหนดค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงในช่วงแรกมีค่าเป็น 200V และเปลี่ยนระดับเป็น 400V ที่เวลา 3 วินาที เพื่อสังเกตผลการตอบสนองที่เกิดขึ้นเมื่อระบบควบคุมไม่มีกระบวนการปรับแก้ค่ากระแสอ้างอิง ผลการจำลองสถานการณ์กรณีที่ 2 แสดงดังรูปที่ 12 เห็นได้ว่า ในช่วงเวลาที่ 0 ถึง 3 วินาที เมื่อแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงมีค่าคงที่เท่ากับ 200V พบว่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากวงจรมีค่าเพิ่มสูงขึ้นและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ 200V ค่ากระแสอินพุตจากทั้งสองแหล่งจ่าย i_{L11} และ i_{L21} มีค่าเท่ากัน โดยจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 1A ต่อมาที่เวลา 3 วินาที แรงดันเอาต์พุตอ้างอิงมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเป็น 400V จะสังเกตได้ว่าตัวควบคุมพีไอพยายามควบคุมให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง เมื่อพิจารณากระแสอินพุต i_{L11} และ i_{L21} พบว่ามีค่าเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตามที่เวลาประมาณ 3.4 วินาที แหล่งจ่าย V_{in2} ไม่สามารถจ่ายกระแสเกินพิกัดได้จะเห็นว่าค่ากระแสอินพุตของแหล่งจ่ายนี้มีค่าคงที่ประมาณ 4.4A จึงทำให้แรงดันจากแหล่งจ่าย V_{in2} มีค่าลดลงเป็น 0V และต่อมาที่เวลาประมาณ 3.8 วินาที แหล่งจ่าย V_{in1} ไม่สามารถจ่ายกระแสเกินพิกัดได้ ซึ่งค่ากระแสอินพุตของแหล่งจ่ายนี้คงที่ประมาณ 6.6A จึงทำให้แรงดันจากแหล่งจ่าย V_{in1} ลดลงจนเป็น 0V เช่นเดียวกัน ด้วยเหตุนี้ทำให้วงจรทบระดับแรงดันแบบหลายอินพุตที่พัฒนาขึ้นไม่สามารถรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตได้ตามต้องการ โดยแรงดันเอาต์พุตมีค่าลดลงจนเหลือ 0V จากผลการจำลองสถานการณ์ในกรณีที่ 2 แสดงให้เห็นว่า เมื่อระบบควบคุมไม่ใช้เทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส จะส่งผลให้ตัวควบคุมกระแสมีค่ากระแสอ้างอิงที่ไม่เหมาะสมกับขนาดพิกัดกระแสของแหล่งจ่ายแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อในขณะนั้น กล่าวคือแหล่งจ่ายแรงดันอินพุตแต่ละแหล่งจ่ายไม่สามารถส่งกำลังไฟฟ้าไปยังโหลดได้อย่างเหมาะสม จึงส่งผลให้ไม่สามารถควบคุมระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ตามต้องการได้

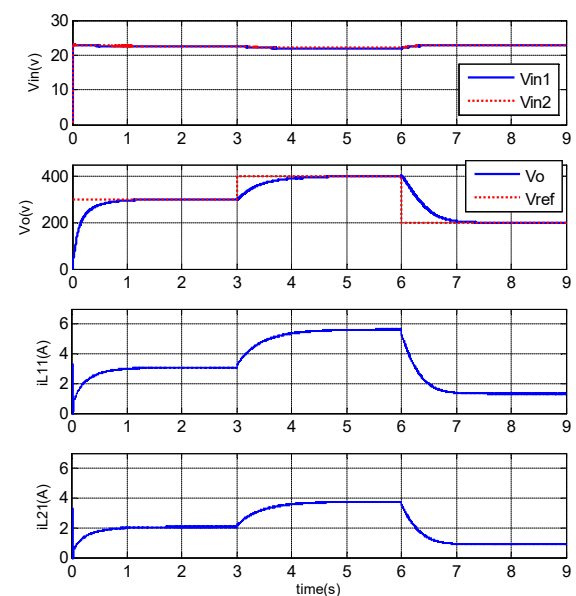
ปีที่ 13 ฉบับที่ 3 เดือน กันยายน - ธันวาคม พ.ศ. 2561



รูปที่ 12 ผลการตอบสนองเมื่อไม่มีกระบวนการปรับแก้
ค่ากระแสอ้างอิงด้วยเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส

กรณีที่ 3 เมื่อกำหนดให้แหล่งจ่ายเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสองแหล่งจ่าย V_{in1} และ V_{in2} มีค่าคงที่อยู่ที่ 20V โดยอาศัยเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส เพื่อให้ได้กระแสอ้างอิงที่เหมาะสมสำหรับรูปกระแสทั้งสอง และทำการปรับเปลี่ยนค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง (V_{ref}) เป็น 300V 400V และ 200V ตามลำดับ เพื่อสังเกตผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุต (V_o) รวมถึงกระแสอินพุตจากทั้งสองแหล่งจ่าย ผลการจำลองสถานการณ์กรณีนี้ที่ 3 แสดงดังรูปที่ 13 เห็นได้ว่า ในช่วงแรงที่เวลา 0 ถึง 3 วินาที ค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงเท่ากับ 300V แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเข้าสู่ระดับอ้างอิงที่ 300V กระแสอินพุตของแหล่งจ่ายที่ 1 (i_{L11}) จะมีค่าเพิ่มขึ้นเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 3A และ กระแสอินพุตของแหล่งจ่ายที่ 2 (i_{L21}) จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 2A จะสังเกตเห็นได้ว่า กระแสอินพุต i_{L11} และ i_{L21} มีค่าไม่เท่ากันตามอัตราส่วนค่าปรับคูณที่ใช้ในการปรับแก้ค่ากระแสอ้างอิงภายในโครงสร้างของตัวควบคุม เพื่อช่วยให้แหล่งจ่ายแรงดันอินพุตทั้งสองแหล่งทำงานภายใต้พิกัดกำลังของตัวเอง ต่อมาในช่วงเวลา 3 ถึง 6 วินาที มีการปรับเพิ่มค่าแรงดันอ้างอิงจาก 300V เป็น 400V จะสังเกตเห็นได้ว่า แรงดันเอาต์พุตมีการปรับค่าเพิ่มตามค่าแรงดันอ้างอิงและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ 400V ค่ากระแสอินพุต i_{L11} และ i_{L21} มี

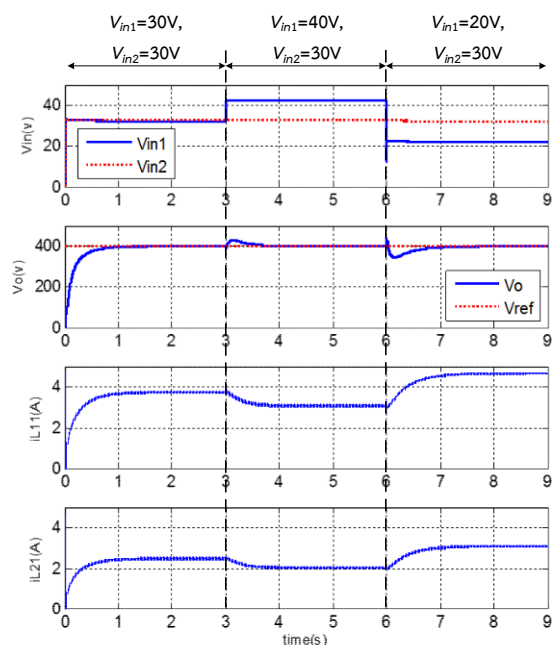
การปรับตัวเพิ่มขึ้นตามแรงดันเอาต์พุตและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 5.5A และ 4A ตามลำดับ และในช่วงสุดท้ายที่เวลา 6 ถึง 9 วินาที มีการปรับลดค่าแรงดันอ้างอิงจาก 400V เป็น 200V จะสังเกตเห็นได้ว่า แรงดันเอาต์พุตมีการปรับค่าลดลงตามและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ 200V ค่ากระแสอินพุต i_{L11} และ i_{L21} มีการปรับตัวลดลงตาม และเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 1.5A และ 0.75A ตามลำดับ จากผลการจำลองสถานการณ์ในกรณีนี้ที่ 3 แสดงให้เห็นได้ว่า สามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรทบระดับแรงดันแบบหลายอินพุตที่มีอัตราขยายแรงดันสูงสำหรับระบบพลังงานทดแทนให้มีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามระดับแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงได้ตามต้องการได้อย่างน่าพอใจ



รูปที่ 13 ผลการตอบสนองเมื่อเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง

กรณีที่ 4 เมื่อแหล่งจ่ายเซลล์แสงอาทิตย์ V_{in1} มีการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันจาก 30V เป็น 40V และ 20V ตามลำดับ โดยกำหนดให้แหล่งจ่ายเซลล์แสงอาทิตย์ V_{in2} มีระดับแรงดันคงที่อยู่ที่ 30V และค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงคงที่อยู่ที่ 400V ผลการจำลองสถานการณ์กรณีนี้ที่ 4 แสดงดังรูปที่ 14 เห็นได้ว่าในช่วงแรกที่เวลา 0 ถึง 3 วินาที ระดับแรงดันของแหล่งจ่ายแรงดันอินพุตทั้งสองแหล่งมีค่าเท่ากันที่ 30V แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ 400V ค่ากระแสอินพุต i_{L11} และ i_{L21} จะมีค่าเริ่มต้นที่ 0A และ

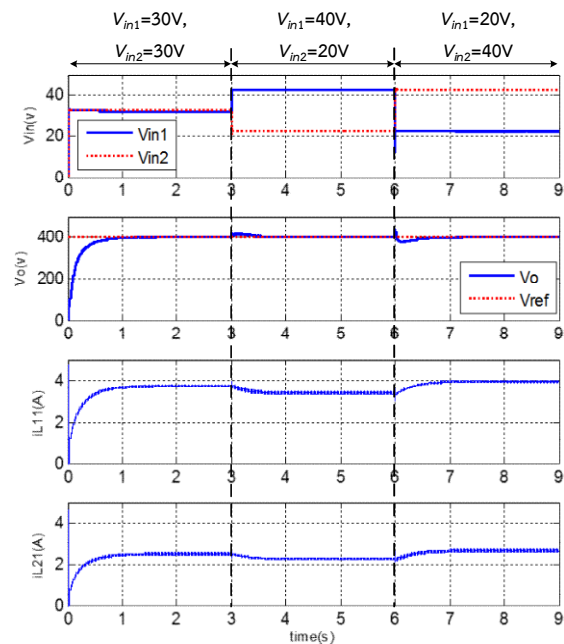
ปรับตัวเพิ่มสูงขึ้นเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 3.5A และ 2.5A ตามลำดับ ต่อมาในช่วงที่ 2 ที่เวลา 3 ถึง 6 วินาที แรงดันอินพุต V_{in1} มีการปรับค่าเพิ่มสูงขึ้นจาก 30V เป็น 40V สังเกตเห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อยก่อนปรับลดลงเข้าสู่สภาวะอยู่ที่ 400V ค่ากระแสอินพุต i_{L11} และ i_{L21} มีการปรับลดลงจาก 3.5A เป็น 3A และจาก 2.5A เป็น 2A ตามลำดับ เนื่องจากเมื่อแหล่งจ่ายแรงดันอินพุต V_{in1} มีค่าเพิ่มขึ้น แต่โหลดยังต้องการกำลังเท่าเดิม ตัวควบคุมจึงควบคุมให้แหล่งจ่ายอินพุตทั้งสองจ่ายกระแสให้น้อยลงกว่าเดิม เพื่อสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ตามความต้องการของโหลด และในช่วงสุดท้ายที่เวลา 6 ถึง 9 วินาที ระดับแรงดันแหล่งจ่าย V_{in1} มีการปรับค่าลดลงจาก 40V เป็น 20V แรงดันเอาต์พุต สังเกตเห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าลดลงเล็กน้อย ก่อนจะปรับเพิ่มขึ้นเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ 400V ค่ากระแสอินพุต i_{L11} และ i_{L21} มีการปรับเพิ่มสูงขึ้นจาก 3A เป็น 4.5A และจาก 2A เป็น 3A ตามลำดับ จากผลการจำลองสถานการณ์ในกรณีนี้ 4 แสดงให้เห็นได้ว่า สามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้มีค่าคงที่ตามที่ต้องการได้ แม้มีการเปลี่ยนแปลงแหล่งจ่ายแรงดันอินพุต V_{in1}



รูปที่ 14 ผลการตอบสนองเมื่อปรับเปลี่ยนแรงดัน V_{in1} โดยที่

V_{in2} คงที่ที่ 30V

กรณีที่ 5 ได้ดำเนินการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันอินพุตที่ได้จากแหล่งจ่ายเซลล์แสงอาทิตย์ V_{in1} และ V_{in2} โดยกำหนดให้แหล่งจ่ายแรงดันอินพุต V_{in1} มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันจาก 30V เป็น 40V และ 20V ตามลำดับ และแหล่งจ่ายแรงดันอินพุต V_{in2} มีการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันจาก 30V เป็น 20V และ 40V ตามลำดับ โดยให้แรงดันเอาต์พุตอ้างอิงมีค่าคงที่เท่ากับ 400V ผลการจำลองสถานการณ์ในกรณีนี้ 5 แสดงดังรูปที่ 15 จะเห็นได้ว่าในช่วงแรกใช้เวลา 0 ถึง 3 วินาที แรงดันอินพุต V_{in1} และ V_{in2} มีระดับแรงดันอยู่ที่ 30V แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ 400V กระแสอินพุต i_{L11} และ i_{L21} จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 3.5A และ 2.5A ตามลำดับ ต่อมาที่เวลา 3 ถึง 6 วินาที แหล่งจ่ายแรงดันอินพุต V_{in1} มีค่าเพิ่มสูงขึ้นจาก 30V เป็น 40V และแหล่งจ่ายแรงดันอินพุต V_{in2} มีค่าลดลงจาก 30V เป็น 20V จะสังเกตเห็นได้ว่าค่าแรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากแหล่งจ่ายแรงดันอินพุต V_{in1} มีพิกัดกำลังที่สูงกว่าแหล่งจ่ายแรงดันอินพุต V_{in2} จึงทำให้แหล่งจ่าย V_{in1} มีผลต่อแรงดันเอาต์พุตมากกว่าแหล่งจ่าย V_{in2} ฉะนั้นเมื่อแหล่งจ่าย V_{in1} มีระดับแรงดันเพิ่มสูงขึ้น จึงส่งผลให้แรงดันเอาต์พุตมีแรงดันเพิ่มสูงขึ้น ก่อนที่จะปรับเข้าสู่ค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงและรักษาระดับแรงดันคงที่เท่ากับ 400V ได้ ในขณะที่กระแสอินพุต i_{L11} และ i_{L21} มีค่าลดลงจาก 3.5A เป็น 3A และจาก 2.5A เป็น 2.25A ตามลำดับ และในช่วงสุดท้ายที่เวลา 6 ถึง 9 วินาที แหล่งจ่ายแรงดันอินพุต V_{in1} มีค่าลดลงจาก 40V เป็น 20V แหล่งจ่ายแรงดันอินพุต V_{in2} มีค่าเพิ่มสูงขึ้นจาก 20V เป็น 40V จะสังเกตเห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าลดลงเล็กน้อยก่อนจะปรับค่าเพิ่มสูงขึ้นเข้าสู่สภาวะอยู่ที่ 400V ค่ากระแสอินพุต i_{L11} และ i_{L21} มีการปรับค่าเพิ่มสูงขึ้นจาก 3A เป็น 4A และจาก 2.25A เป็น 2.75A จากผลการจำลองสถานการณ์ในกรณีนี้ 5 พบว่า ตัวควบคุมที่ได้ออกแบบไว้นั้นสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้มีค่าคงที่ตามต้องการได้ แม้ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันของแหล่งจ่ายแรงดันอินพุตทั้งสองแหล่งจ่าย

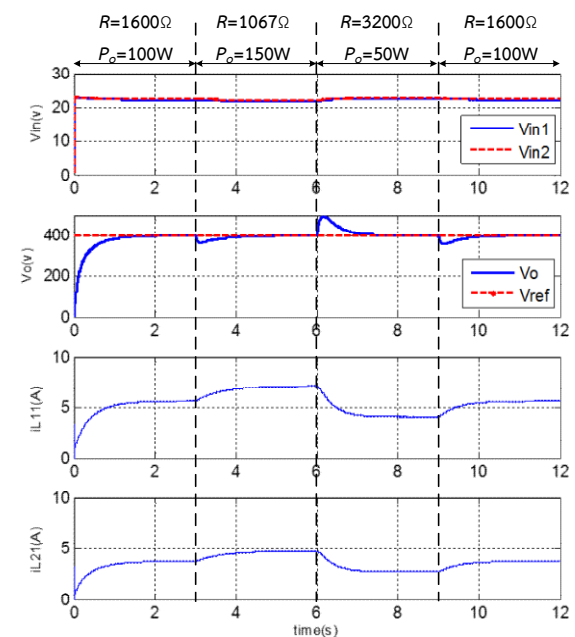


รูปที่ 15 ผลการตอบสนองเมื่อปรับเปลี่ยนแรงดัน V_{in1} และ V_{in2}

กรณีที่ 6 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดตัวต้านทาน จาก 1600Ω เป็น 1067Ω 3200Ω และ 1600Ω ตามลำดับ เพื่อสังเกตผลการตอบสนองของวงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง กำลังเอาต์พุต (P_o) จาก 100W เป็น 150W 50W และ 100W ตามลำดับ โดยกำหนดให้แหล่งจ่ายแรงดันเซลล์แสงอาทิตย์ V_{in1} และ V_{in2} มีค่าคงที่อยู่ที่ 20V ทั้งนี้ได้มีการเพิ่มพิกัดกำลังของแหล่งจ่าย V_{in1} และ V_{in2} เป็น 100V และ 80V ตามลำดับ เพื่อให้มีกำลังไฟฟ้าเพียงพอที่จะสามารถจ่ายโหลดที่ 150W ทั้งนี้ค่าปรับจูน W_1 และ W_2 ยังคงเป็นเช่นเดิม ส่วนค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงคงที่ที่ 400V ผลการจำลองสถานการณ์ในกรณีที่ 6 แสดงดังรูปที่ 16 เห็นได้ว่า ที่เวลา 0 ถึง 3 วินาที แรงดันเอาต์พุตมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ 400V กระแสอินพุต i_{L11} และ i_{L21} มีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกับแรงดันเอาต์พุต และเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 6A และ 4A ตามลำดับ ต่อมาที่เวลา 3 วินาที โหลดตัวต้านทานมีค่าลดลงจาก 1600Ω เป็น 1067Ω ซึ่งส่งผลให้โหลดต้องการกำลังเพิ่มขึ้นจาก 100W เป็น 150W จะสังเกตได้ว่า แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าลดลงก่อนที่จะปรับเพิ่มขึ้นเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ 400V เช่นเดิม กระแสอินพุต i_{L11} และ i_{L21} มีค่าเพิ่มสูงขึ้นและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ ประมาณ 8A

และ 5A ตามลำดับ ต่อมาที่เวลา 6 วินาที โหลดตัวต้านทานมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจาก 1067Ω เป็น 3200Ω ซึ่งส่งผลให้โหลดตัวต้านทานต้องการกำลังน้อยลง จะได้ว่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าเพิ่มสูงขึ้น และปรับลดลงเข้าสู่สภาวะอยู่ที่ 400V ในขณะที่ กระแสอินพุต i_{L11} และ i_{L21} มีการปรับลดลงและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 4A และ 3A ตามลำดับ จากผลการจำลองสถานการณ์ในกรณีที่ 6 แสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมที่ได้ออกแบบไว้สามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้มีค่าคงที่ตามต้องการได้ แม้จะมีการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่โหลดต้องการก็ตาม ซึ่งจะเห็นได้ว่าวงจรที่พัฒนาขึ้นยังคงทำงานในโหมดนำกระแสต่อเนื่อง อัตราขยายแรงดันของวงจรยังคงสอดคล้องกับสมการที่ (2) กล่าวคือสามารถขยายแรงดันได้สูงถึง 20 เท่า ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่โหลดจะส่งผลให้กระแสอินพุต i_{L11} และ i_{L21} มีการเปลี่ยนแปลงตามกำลังไฟฟ้าที่โหลดต้องการ

จากผลการจำลองสถานการณ์ แสดงให้เห็นว่าวงจรทบระดับแรงดันแบบหลายอินพุตที่มีอัตราขยายแรงดันสูง สำหรับระบบพลังงานทดแทนที่พัฒนาขึ้น และตัวควบคุมพีไอที่อาศัยเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส สามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ตามต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพภายใต้สภาวะการทำงานต่าง ๆ ที่แตกต่างกัน



รูปที่ 16 ผลการตอบสนองเมื่อปรับค่าโหลดตัวต้านทาน

5. การสร้างชุดทดสอบ

โครงสร้างชุดทดสอบวงจรระดับแรงดันแบบหลายอินพุตที่มีอัตราขยายแรงดันสูง แสดงดังรูปที่ 17 โดยมีส่วนประกอบต่างๆ ดังนี้

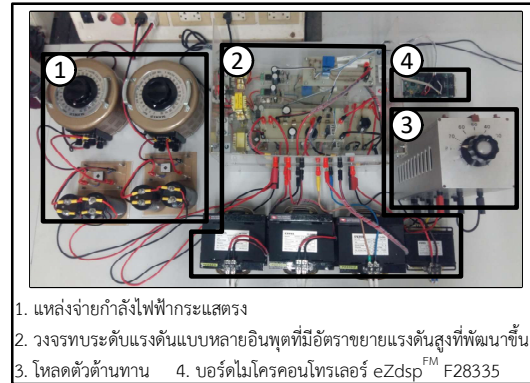
1. แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงจำนวนสองชุด สำหรับทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดันอินพุตให้กับวงจรที่พัฒนาขึ้น โดยแหล่งจ่ายทั้งสองมีพิกัดกำลังไฟฟ้าเป็น 60W และ 40W ตามลำดับ ทั้งนี้จะอาศัยหม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส (variac) ที่สามารถจ่ายแรงดันในช่วง 0 ถึง 250Vrms และมีพิกัดกระแส 10A ร่วมกับวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์หนึ่งเฟส GBPC35 ซึ่งมีพิกัดแรงดัน 1000V และพิกัดกระแส 35A โดยที่ตัวเก็บประจุขนาด 5500 μ F ช่วยกรองสัญญาณแรงดันให้เรียบขึ้น เพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับชุดทดสอบวงจรที่พัฒนาขึ้นต่อไป

2. วงจรทบทระดับแรงดันแบบหลายอินพุตที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้น ประกอบด้วย ตัวเก็บประจุตัวเหนี่ยวนำ ไดโอดกำลัง RURP3060 มีพิกัดแรงดัน 600V พิกัดกระแส 30A และสวิตช์มอสเฟตกำลัง IXFX80N60P3 มีพิกัดแรงดัน 600V โดยมีโครงสร้างวงจรดังได้แสดงไว้แล้วในรูปที่ 3 และมีค่าพารามิเตอร์ภายในวงจรแสดงดังตารางที่ 4 ซึ่งจะอาศัยเซ็นเซอร์กระแส HX 15-P ซึ่งมีพิกัดกระแส 15A และเซ็นเซอร์แรงดันเบอร์ LV 25-P ที่สามารถตรวจจับแรงดันได้ในช่วง 0V ถึง 500V ในการตรวจจับกระแสอินพุตและแรงดันเอาต์พุต ตามลำดับ เพื่อใช้ในการกระบวนการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรทบทระดับแรงดันที่พัฒนาขึ้น

3. โหลดตัวต้านทานปรับค่าได้ ในช่วง 140 Ω ถึง 5400 Ω โดยรับกระแสโหลดสูงสุดอยู่ได้ประมาณ 3A

4. บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ eZdspTM F28335 สำหรับใช้ในการประมวลผลและควบคุมการทำงานของวงจร โดยอาศัยการเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานด้วยภาษาซี ภายในโปรแกรมควบคุมประกอบไปด้วย สมการเปรียบเทียบค่ากระแสอินพุตและแรงดันเอาต์พุตที่จากเซ็นเซอร์ เพื่อใช้ในการกระบวนการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรที่พัฒนาขึ้น ซึ่งอาศัยตัวควบคุมพีไอ โดยค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมพีไอแสดงดังตารางที่ 6

รวมถึงกระบวนการถ่วงน้ำหนักกระแส การสร้างสัญญาณ PWM สำหรับควบคุมการทำงานของสวิตช์มอสเฟตกำลังในแต่ละวงจรร้อยภายใต้ค่าวัฏจักรหน้าที่ที่เหมาะสมเพื่อให้ได้แรงดันเอาต์พุตคงที่ตามต้องการ



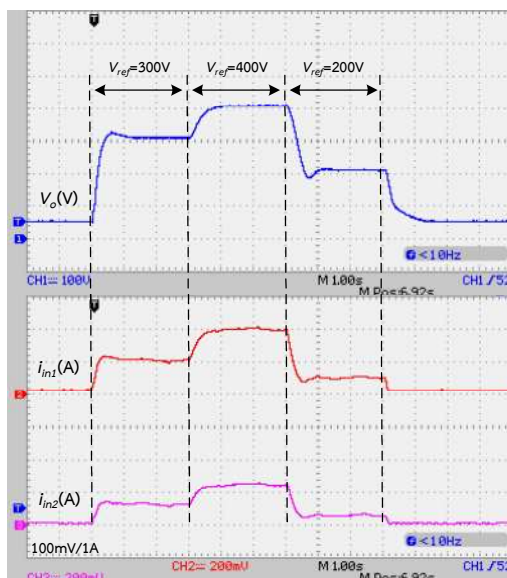
รูปที่ 17 ชุดทดสอบวงจรที่พัฒนาขึ้น

6. ผลการทดสอบวงจร

การทดสอบวงจรทบทระดับแรงดันแบบหลายอินพุตที่มีอัตราขยายแรงดันสูง จะอาศัยชุดทดสอบที่สร้างขึ้นดังกล่าวไว้แล้วข้างต้น โดยจะพิจารณาการทดสอบการทำงานของวงจรได้เป็น 4 กรณี ดังต่อไปนี้

กรณีที่ 1 เมื่อแหล่งจ่ายแรงดันอินพุต V_{in1} และ V_{in2} มีค่าคงที่อยู่ที่ 20V และทำการปรับแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงเป็น 300V, 400V และ 200V ตามลำดับ ผลการทดสอบวงจรแสดงดังรูปที่ 18 จะเห็นได้ว่า เมื่อเริ่มการทำงานในช่วงเวลาที่ 0 ถึง 3 วินาที ค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงมีค่าอยู่ที่ 300V แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเข้าสู่แรงดันอ้างอิงที่ 300V กระแสอินพุตของแหล่งจ่ายแรก (i_{L11}) จะมีค่าเพิ่มขึ้นเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ประมาณ 2A และ กระแสอินพุตของแหล่งจ่ายที่สอง (i_{L21}) จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ประมาณ 1.5A ต่อมาที่เวลา 3 ถึง 6 วินาที ค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงปรับเพิ่มจาก 300V เป็น 400V พบว่าแรงดันเอาต์พุตปรับเพิ่มตามค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ 400V ซึ่งมีอัตราขยายแรงดันประมาณ 20 เท่า ในขณะที่ค่ากระแสอินพุต i_{L11} และ i_{L21} มีการปรับเพิ่มขึ้นตามแรงดันเอาต์พุตและเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ประมาณ 4A และ 3A ตามลำดับ และ

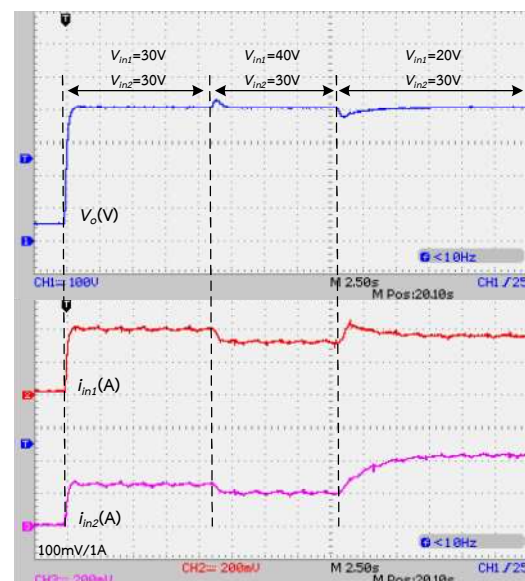
ในช่วงสุดท้ายที่เวลา 6 ถึง 9 วินาที ค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงปรับลดจาก 400V เป็น 200V จะเห็นได้ว่า แรงดันเอาต์พุตมีการปรับลดลงและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ 200V ค่ากระแสอินพุต i_{L11} และ i_{L21} มีการปรับลดลงและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 1A และ 0.75A ตามลำดับ จากผลการทดสอบวงจรกรณีที่ 1 จะเห็นได้ว่า มีความคล้ายคลึงกับผลการจำลองสถานการณ์ในกรณีที่ 3 แสดงให้เห็นได้ว่า ตัวควบคุมที่ได้ออกแบบสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรทดสอบให้คงที่ตามต้องการ รวมทั้งสามารถขยายแรงดันเอาต์พุตได้สูงถึง 20 เท่า



รูปที่ 18 ผลการทดสอบวงจรเมื่อเปลี่ยนแรงดันอ้างอิง

กรณีที่ 2 พิจารณาแหล่งจ่ายแรงดันอินพุต V_{in1} มีการเปลี่ยนแปลงจาก 30V เป็น 40V และ 20V ตามลำดับ โดยกำหนดให้แหล่งจ่ายแรงดันอินพุต V_{in2} มีค่าคงที่อยู่ที่ 30V และค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงเป็น 400V ผลการทดสอบวงจรแสดงดังรูปที่ 19 จะเห็นได้ว่า เมื่อเริ่มการทำงานที่เวลาประมาณ 0 ถึง 10 วินาที ระดับแรงดันอินพุตของทั้งสองแหล่งจ่ายมีค่าคงที่ประมาณ 30V แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเข้าสู่ระดับอ้างอิงที่ 400V ค่ากระแสอินพุต i_{L11} และ i_{L21} จะมีค่าเริ่มต้องที่ 0A และเพิ่มสูงขึ้นเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 4A และ 2.5A ตามลำดับ ต่อมาที่เวลาประมาณ 10 ถึง 20 วินาที แรงดันอินพุต V_{in1} มีการปรับค่าเพิ่มสูงขึ้นจาก 30V เป็น 40V สังเกตเห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเพิ่ม

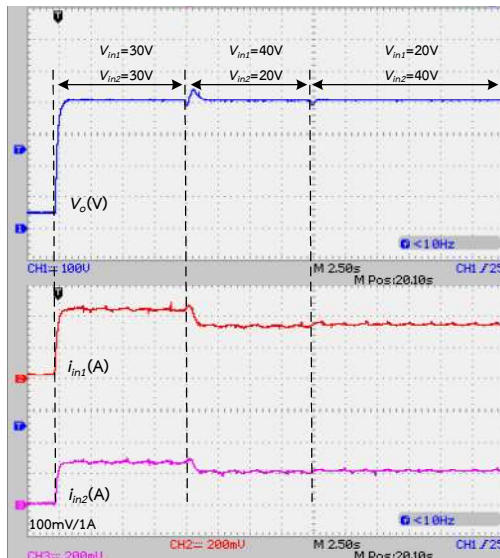
สูงขึ้นเล็กน้อยก่อนปรับลดลงเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวเท่ากับ 400V โดยค่ากระแสอินพุต i_{L11} และ i_{L21} มีการปรับลดลงที่ประมาณ 3A และ 2A ตามลำดับ และในช่วงท้ายตั้งแต่เวลาประมาณ 20 วินาที เป็นต้นไป แรงดันอินพุตจากแหล่งจ่าย V_{in1} มีการปรับค่าลดลงจาก 40V เป็น 20V สังเกตเห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าลดลงเล็กน้อย ก่อนจะปรับเพิ่มขึ้นเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ 400V ค่ากระแสอินพุต i_{L11} และ i_{L21} มีการปรับเพิ่มสูงขึ้นและคงที่ประมาณ 3.5A และ 4A ตามลำดับ จากผลการทดสอบวงจรจะเห็นได้ว่ามีความคล้ายคลึงกับผลการจำลองสถานการณ์ในกรณีที่ 4 ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่า ตัวควบคุมสามารถควบคุมการทำงานของวงจรทดสอบให้มีแรงดันเอาต์พุตค่าคงที่ตามที่ต้องการได้ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแหล่งจ่ายแรงดันอินพุต V_{in1}



รูปที่ 19 ผลการทดสอบวงจรเมื่อปรับแรงดันแหล่งจ่าย V_{in1} โดยที่ V_{in2} คงที่ที่ 30V

กรณีที่ 3 พิจารณาแหล่งจ่ายแรงดันอินพุต V_{in1} มีค่าเป็น 30V, 40V และ 20V ตามลำดับ และแหล่งจ่าย V_{in2} มีค่าเป็น 30V, 20V และ 40V ตามลำดับ โดยกำหนดให้ค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงเท่ากับ 400V ผลการทดสอบวงจรแสดงดังรูปที่ 20 จะเห็นได้ เมื่อเริ่มการทำงานที่เวลาประมาณ 0 ถึง 10 วินาที แรงดันอินพุต V_{in1} และ V_{in2} มีค่าประมาณ 30V แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ 400V ในขณะที่กระแสอินพุต i_{L11} และ i_{L21}

จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 4.5A และ 3A ตามลำดับ ต่อมาที่เวลาประมาณ 10 ถึง 20 วินาที แหล่งจ่ายแรงดันอินพุต V_{in1} มีค่าเพิ่มสูงขึ้นจาก 30V เป็น 40V และแหล่งจ่ายแรงดันอินพุต V_{in2} มีค่าลดลงจาก 30V เป็น 20V จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย ก่อนที่จะเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวและคงที่ 400V โดยที่กระแสอินพุต i_{L11} และ i_{L21} มีค่าลดลงจาก 4.5A เป็น 3A และจาก 3A เป็น 2A ตามลำดับ และในช่วงท้ายตั้งแต่เวลา 20 วินาที เป็นต้นไป แหล่งจ่ายแรงดันอินพุต V_{in1} มีค่าลดลงจาก 40V เป็น 20V โดยที่แหล่งจ่ายแรงดันอินพุต V_{in2} มีค่าเพิ่มสูงขึ้นจาก 20V เป็น 40V จะสังเกตเห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าลดลงเล็กน้อยก่อนจะปรับค่าเพิ่มสูงขึ้นเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ 400V ค่ากระแสอินพุต i_{L11} และ i_{L21} มีการปรับค่าเพิ่มสูงขึ้นจาก 3A เป็น 3.5A และจาก 2A เป็น 2.5A



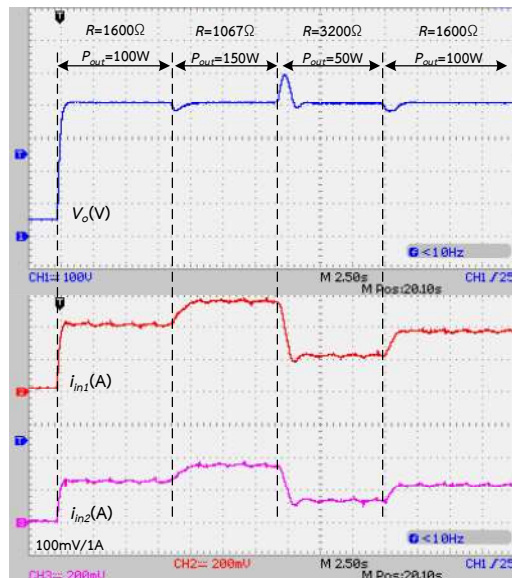
รูปที่ 20 ผลการทดสอบวงจรเมื่อปรับแรงดันแหล่งจ่าย

$$V_{in1} \text{ และ } V_{in2}$$

จากผลการทดสอบวงจรจะเห็นได้ว่ามีความคล้ายคลึงกับผลการจำลองสถานการณ์ในกรณีที่ 5 อาจกล่าวได้ว่า ตัวควบคุมที่ได้ออกแบบไว้นั้นสามารถควบคุมวงจรทดสอบให้มีแรงดันเอาต์พุตค่าคงที่ตามต้องการได้ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันของแหล่งจ่ายแรงดันอินพุตทั้งสองแหล่งจ่าย ทั้งนี้จะสังเกตได้ว่าตัวควบคุมพีโอที่อาศัยเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส ช่วยให้ได้กระแสอ้างอิงที่เหมาะสมสำหรับ

ควบคุมกระแสแต่ละคู่ ส่งผลให้แหล่งจ่ายแรงดันอินพุตแต่ละแหล่งจ่ายที่ได้ยังคงจ่ายกระแสอินพุตที่ไม่เกินพิกัด

กรณีที่ 4 เมื่อเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทานจาก 1600Ω เป็น 1067Ω, 3200Ω และ 1600Ω ตามลำดับ เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต (P_o) ที่โหลดต้องการจาก 100W เป็น 150W, 50W และ 100W ตามลำดับ ทั้งนี้พิกัดกำลังไฟฟ้าของแหล่งจ่ายแรงดันอินพุต V_{in1} และ V_{in2} เป็น 100W และ 80W ตามลำดับ เพื่อให้มีกำลังเพียงพอสำหรับที่โหลด 150W โดยกำหนดให้แหล่งจ่ายแรงดันอินพุต V_{in1} และ V_{in2} มีค่าคงที่อยู่ที่ประมาณ 20V และค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงคงที่เท่ากับ 400V ผลการทดสอบวงจรแสดงดังรูปที่ 21 จะเห็นได้ว่า เมื่อเริ่มต้นการทำงานที่เวลาประมาณ 0 ถึง 15 วินาที แรงดันเอาต์พุตมีค่าเพิ่มสูงขึ้นและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ 400V โดยที่กระแสอินพุต i_{L11} และ i_{L21} มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นไปในทิศทางเดียวกับแรงดันเอาต์พุต และเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 4A และ 3A ตามลำดับ ต่อมาที่เวลาประมาณ 15 วินาที โหลดตัวต้านทานมีค่าลดลงจาก 1600Ω เป็น 1067Ω ซึ่งส่งผลให้โหลดต้องการกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก 100W เป็น 150W จะสังเกตเห็นได้ว่า ตัวควบคุมพีโอที่อาศัยเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสยังสามารถควบคุมการทำงานของวงจรที่ระดับแรงดันแบบหลายอินพุตที่มีอัตราขยายแรงดันสูงที่พัฒนาขึ้นได้ เนื่องจากกำลังไฟฟ้าที่โหลดต้องการไม่เกินกำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายแรงดันอินพุตทั้งสองสามารถจ่ายได้ โดยแรงดันเอาต์พุตคงที่ 400V ในขณะที่กระแสอินพุต i_{L11} และ i_{L21} มีค่าประมาณ 6A และ 3.5A ตามลำดับ ต่อมาที่เวลาประมาณ 30 วินาที โหลดตัวต้านทานมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจาก 1067Ω เป็น 3200Ω ซึ่งส่งผลให้โหลดตัวต้านทานต้องการกำลังไฟฟ้าน้อยลงจากเดิม นั่นคือกำลังไฟฟ้า 150W เปลี่ยนเป็น 50W สังเกตเห็นได้ว่า แรงดันเอาต์พุตถูกควบคุมอยู่ที่ 400V กระแสอินพุต i_{L11} และ i_{L21} เข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ประมาณ 2A และ 1.5A ตามลำดับ จากผลการทดสอบวงจรจะเห็นได้ว่ามีความคล้ายคลึงกับผลการจำลองสถานการณ์ในกรณีที่ 6 แสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมที่ได้ออกแบบไว้นั้นสามารถควบคุมให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่ได้ตามต้องการ แม้จะมีการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่โหลดต้องการก็ตาม



รูปที่ 21 ผลการทดสอบวงจรเมื่อปรับค่าโหลดตัวต้านทาน

7. สรุป

บทความนี้นำเสนอโครงสร้างวงจรทระดับแรงดันแบบหลายอินพุตที่มีอัตราขยายแรงดันสูงสำหรับระบบพลังงานทดแทนซึ่งมีอัตราขยายแรงดันสูงถึง 20 เท่า รวมทั้งการควบคุมการทำงานของวงจรเพื่อให้ได้แรงดันเอาต์พุตคงที่ตามต้องการ โดยอาศัยตัวควบคุมชนิดพีโอที่มีการเพิ่มลูบควบคุมกระแสตามจำนวนของแหล่งจ่ายแรงดันอินพุต และอาศัยเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแสเข้าช่วย เพื่อให้ได้กระแสอ้างอิงที่เหมาะสม ซึ่งจะช่วยให้แหล่งจ่ายทำงานภายใต้พิกัดกำลังที่เหมาะสม ทั้งนี้จำเป็นต้องทราบถึงขนาดพิกัดกำลังของแต่ละแหล่งจ่ายแรงดันอินพุต เพื่อสามารถใช้เป็นแนวทางในการถ่วงน้ำหนักกระแสได้อย่างเหมาะสม จากผลการจำลองสถานการณ์และผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า วงจรที่ได้พัฒนาขึ้นและตัวควบคุมที่ได้ออกแบบไว้นั้น สามารถควบคุมการทำงานของวงจรเพื่อรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ตามต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพภายใต้สภาวะการทำงานของวงจรที่แตกต่างกัน

8. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัย สถานที่และเครื่องมือต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัย

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Nakpin and S. Khwan-on, "A Novel High Step-Up DC-DC Converter for Photovoltaic Applications," *Procedia Computer Science* 86, 2016, pp. 409-412.
- [2] W. Li and X. He, "Review of Nonisolated High-Step-Up DC/DC Converters in Photovoltaic Grid-Connected Applications," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 4, pp. 1239-1250, April 2011.
- [3] Y. Zhao, W. Li, Y. Deng, X. He, S. Lambert and V. Pickert, "High step-up boost converter with coupled inductor and switched capacitor," 5th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2010), Brighton, UK, 2010, pp. 1-6.
- [4] S. Khwan-on and K. Kongkanjana, "The control of a multi-input boost converter for renewable energy system applications," 2017 International Electrical Engineering Congress (iEECON), Pattaya, 2017, pp. 1-4.
- [5] N. Smith and R. McCann, "Analysis and simulation of a multiple input interleaved boost converter for renewable energy applications," *IEEE 36th International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*, Vancouver, BC, 2014, pp. 1-7.
- [6] A. Lavanya, J. D. Navamani, K. Vijayakumar and R. Rakesh, "Multi-input DC-DC converter topologies-a review," *International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT)*, Chennai, 2016, pp. 2230-2233.
- [7] M. F. Nayan and S. M. S. Ullah, "Modelling of solar cell characteristics considering the effect of electrical and environmental parameters," 2015 3rd International Conference on Green Energy and Technology (ICGET), Dhaka, 2015, pp. 1-6.

การหาแบบจำลองและการจำลองสถานการณ์ของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัส แบบแม่เหล็กถาวรเชื่อมต่อกับวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าสามเฟส

Modeling and Simulation of Permanent Magnet Synchronous Motor Drives Fed by Three Phase Rectifier

กิตติวงศ์ สุธรรมโน¹ เทพพนม โสภะเพิ่ม² กองพัน อารีรักษ์^{1*}

¹สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

²ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

Kittiwong Suthamno¹ Theppanom Sopaprim² Kongpan Areerak^{1*}

¹School of electrical engineering, Suranaree university of technology

111 University Avenue Muang, Nakhon Rachasima, Thailand, 30000

²Department of electrical power engineering, Mahanakorn university of technology

140 Cheumsampan Rd, Nongchok, Bangkok, Thailand, 10530

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

(Received: October 19, 2018; Accepted: November 26, 2018)

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการนำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ได้แก่ ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวรที่มีการควบคุมความเร็วรอบ และวงจรแปรผันแบบบัคก์ที่มีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต โดยโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่พิจารณาดังกล่าวจะเชื่อมต่อกับวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าสามเฟส ผ่านวงจรกรองที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง วิธีตีความและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะจะนำมาใช้ในการหาลำดับของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา ซึ่งแบบจำลองที่ได้เหมาะสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ อันเนื่องมาจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว การจำลองสถานการณ์ของแบบจำลองเสมือนจริงด้วยโปรแกรม MATLAB จะนำมาใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องแบบจำลองที่ได้จากบทความนี้ โดยผลการตอบสนองที่ได้แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองที่นำเสนอและแบบจำลองเสมือนจริงมีความสอดคล้องกัน

คำสำคัญ: ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวร วงจรแปรผันแบบบัคก์ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว
การก่อรูปแบบจำลอง การจำลองสถานการณ์

ABSTRACT

This paper presents a mathematical model of system with constant power loads. These are speed controlled permanent magnet synchronous motor drive and output voltage controlled buck converter. The considered CPLs are fed by a three phase rectifier via the DC-link filters. The DQ

method and the generalized state-space averaging method (GSSA) are used to derive the dynamic model to achieve the time invariant model. The proposed model is suitable for the stability analysis due to CPL. The simulation via the exact topological model of MATLAB is used to validate the proposed model. The results show that a good agreement between the derived model and the exact topological model can be achieved.

Keyword: PMSM drives, buck converter, constant power load, modeling, simulation.

รายการสัญลักษณ์

V_{ind}, V_{inq}	แรงดันไฟฟ้าบัสแหล่งจ่ายไฟฟ้าบนแกนดีคิว
V_{busd}, V_{busq}	แรงดันไฟฟ้าบัสอินพุตไดโอดบนแกนดีคิว
R_{eq}, L_{eq}, C_{eq}	ค่าพารามิเตอร์ของสายส่งกำลังไฟฟ้า
R_f, L_f	ค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง
R_{cf}, C_f	ค่าพารามิเตอร์ตัวเก็บประจุของวงจรกรอง
V_{dc}, I_{CPL}	แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง
I_{dc}	กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง
R_s, R_c	ค่าความต้านทานขดลวดและแกนเหล็ก
L_{ls}, L_{md}, L_{mq}	ค่าความเหนี่ยวนำรั่วและร่วมบนแกนดีคิว
B, J	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและค่าโมเมนต์แรงเฉื่อยของโรเตอร์
V_{sd}, V_{sq}	แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วทางสเตเตอร์บนแกนดีคิว
I_{sd}, I_{sq}	กระแสไฟฟ้าที่ขั้วของมอเตอร์บนแกนดีคิว
I_{od}, I_{oq}	กระแสไฟฟ้าสร้างแรงบิดบนแกนดีคิว
λ_{PM}	เส้นแรงแม่เหล็กถาวรที่โรเตอร์
ω_r, τ_{load}	ความเร็วรอบที่เพลาลูกและแรงบิดที่เพลาลูก
m_d, m_q	ค่าดัชนีการมอดูเลตบนแกนดีคิว
K_{pi}, K_{ii}	ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอลูกระแส
K_{pw}, K_{iw}	ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอลูประเร็ว
X_{sd}, X_{sd}	อัตราการผลิตเปลี่ยนแปลงของลูกระแส
X_w	อัตราการผลิตเปลี่ยนแปลงของลูประเร็ว
I_{CPL-P}	กระแสไฟฟ้าที่จ่ายวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์
I_{CPL-B}	กระแสไฟฟ้าที่จ่ายวงจรแปรผันแบบบัคค์
I_{lb}, V_o	กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปรผันแบบบัคค์
R_{Lb}, L_b, C_b	ค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปรผันแบบบัคค์
R_{load}	ค่าความต้านทานของโหลด
X_i, X_v	อัตราการผลิตเปลี่ยนแปลงลูกระแสและแรงดัน

K_{pib}, K_{iib}	ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอลูกระแส
K_{pv}, K_{iv}	ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอลูประเร็ว
d	ค่าดัชนีการสวิตช์ของวงจรแปรผันแบบบัคค์

1. บทนำ

ณ ปัจจุบันได้มีการนำวงจรแปลงผันกำลังมาใช้ควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้ากันอย่างกว้างขวาง ทั้งแปลงจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง เป็นกระแสตรงปรับค่าได้ กระแสตรงเป็นกระแสสลับ และกระแสสลับเป็นกระแสตรง ซึ่งโหลดวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมแบบป้อนกลับ ได้แก่ วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า วงจรควบคุมความสว่างและวงจรควบคุมอุณหภูมิ เป็นต้น วงจรแปรผันกำลังที่มีการควบคุมจะมีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (Constant power loads ย่อ CPLs) [1] ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่ป้อนมีลักษณะทิศทางผกผัน คือแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นกระแสไฟฟ้าที่ไหลลดลง ในทางตรงข้ามแรงดันไฟฟ้าลดลง ผลกระแสไฟฟ้าที่ใช้จะเพิ่มขึ้น ดังนั้นจากความสัมพันธ์ดังกล่าว จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า กับแรงดันไฟฟ้า ที่มีอัตราความชันเหมือนค่าความต้านทานเป็นลบ ณ จุดทำงานนั้น ๆ จากงานวิจัยในอดีต [2],[3] พบว่าโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว จะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพ ของการจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ ดังนั้นเมื่อมีโหลดดังกล่าวต่อในระบบเพิ่มขึ้น อาจจะทำให้ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าขาดเสถียรภาพได้ หรือเรียกปรากฏการดังกล่าวว่า การขาดเสถียรภาพเนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์เป็นลบ (Negative impedance instability)

สำหรับระบบที่พิจารณาในบทความนี้ เป็นระบบส่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสสมดุล ต่อผ่านวงจรเรียงกระแสเพื่อจ่ายไปยังบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และเชื่อมต่อโหลดกำลังไฟฟ้าแบบคงตัว ซึ่งอาจทำให้ระบบดังกล่าวเกิดการขาดเสถียรภาพได้ เมื่อระดับกำลังไฟฟ้าของโหลดเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นในการป้องกันการเกิดเหตุการณ์ดังกล่าว จึงจำเป็นต้องหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานสำหรับการวิเคราะห์หาจุดขาดเสถียรภาพ โดยทั่วไปการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปรผันกำลัง จะเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา (time-varying model) เมื่อการนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพ จะทำให้เกิดความยุ่งยากและซับซ้อน ดังนั้นจึงมีงานวิจัย [2],[3] ที่มีการนำเสนอวิธีการหาแบบจำลองที่ไม่ขึ้นกับเวลา (time-invariant model) กับวงจรแปลงผันกำลัง ได้แก่วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะแบบทั่วไป (Generalized state-space averaging method :GSSA) [4] นิยมนำมาพิสูจน์แบบจำลองของวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซี และในส่วนวิธีดีคิว (DQ method) [5] นิยมนำมาวิเคราะห์วงจรเรียงกระแสสามเฟส วงจรอินเวอร์เตอร์ และมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวร ซึ่งได้มีการนำเสนอในงานวิจัย [6]-[7] แบบจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวร เพื่อใช้ในการควบคุม แต่ยังไม่ปรากฏค่าการสูญเสียในแกนเหล็ก ดังนั้นในการพิจารณากำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้า จึงพิจารณาการสูญเสียทั้งในขดลวดและแกนเหล็ก จึงเลือกแบบจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้า

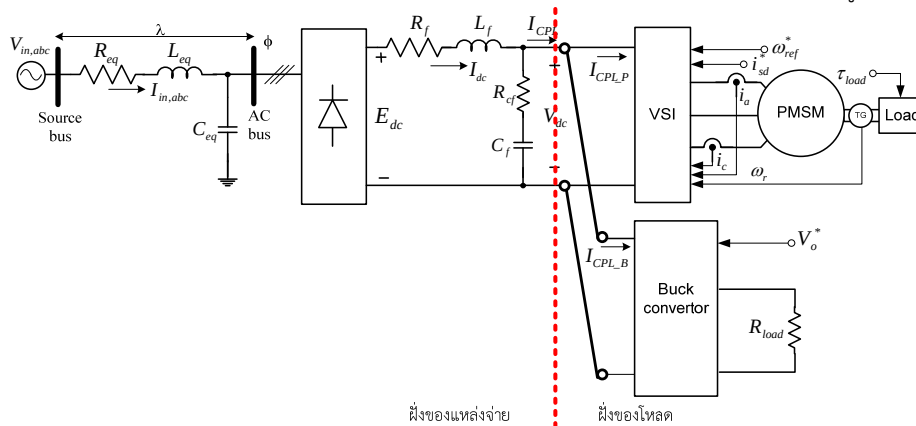
ซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวร ที่ปรากฏค่าการสูญเสียในแกนเหล็ก ที่มีการนำเสนอไว้ใน [8] เพื่อการออกแบบการควบคุมให้เกิดสถานะค่าการสูญเสียต่ำสุด

ในบทความนี้แบ่งการนำเสนอออกเป็นสี่ส่วน คือ ในส่วนแรกเป็นการนำเสนอระบบที่พิจารณา ถึงความสำคัญในการหาแบบจำลอง ส่วนที่สองเป็นการหาแบบจำลองที่ไม่ขึ้นกับเวลา มีการแยกออกเป็นสองส่วน คือแบบจำลองทางฝั่งแหล่งจ่ายที่เป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟส และแบบจำลองทางฝั่งโหลด ที่เป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวสองเฟส ได้แก่ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวร กับวงจรแปลงผันแบบบักค์ ส่วนที่สามเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง และส่วนสุดท้ายเป็นการสรุปผล

2. ระบบที่พิจารณา

ระบบที่พิจารณาในบทความนี้แสดงดังรูปที่ 1 เป็นการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ บนบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้าสามเฟสสมดุล สายส่งกำลังไฟฟ้า วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ วงจรกรองแบบตัวเหนี่ยวนำกับตัวเก็บประจุ และมีการต่อขนานโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวสองชุดร่วมกัน ได้แก่ วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวร ที่มีการควบคุมความเร็วรอบ และวงจรแปรผันแบบบักค์ที่มีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต

โหลดดังกล่าวจะทำให้ระบบมีโอกาสดูขาดเสถียรภาพได้ เมื่อระดับกำลังไฟฟ้ามีค่าเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งจะทำให้แรงดัน

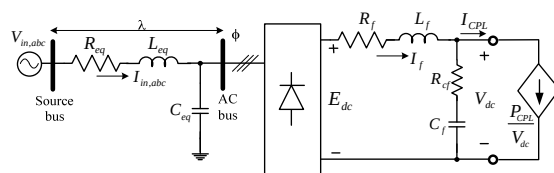


รูปที่ 1 ระบบที่พิจารณา

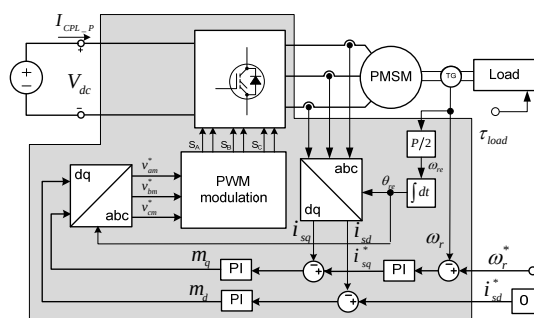
ที่บัสไฟตรง(V_{dc})มีการกระเพื่อม จนกระทั่งไม่สามารถควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ รวมทั้งไม่สามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุต ของวงจรแปลงผันแบบบักคี่ได้ ดังนั้นในบทความนี้จึงนำเสนอสมการของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พร้อมทั้งการยืนยันความถูกต้อง โดยอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพต่อไป

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่พิจารณา

การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ จะแยกออกเป็น 2 ฝั่ง คือฝั่งของแหล่งจ่าย และฝั่งของโหลด โดยฝั่งของแหล่งจ่ายแสดงดังรูปที่ 2 ดังนั้นในการหาความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ต่อเข้ากับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ในฝั่งของแหล่งจ่ายไฟฟ้า ในการตรวจสอบความถูกต้อง จำเป็นต้องจ่ายโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว(P_{CPL}) ที่กระแสไฟฟ้าที่บัส(I_{CPL}) สัมพันธ์กับกำลังไฟฟ้าคงตัวหารด้วยขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัส(P_{CPL}/V_{dc}) โดยมีการนำเสนอในส่วนข้อที่ 3.1



รูปที่ 2 วงจรในฝั่งของแหล่งจ่าย

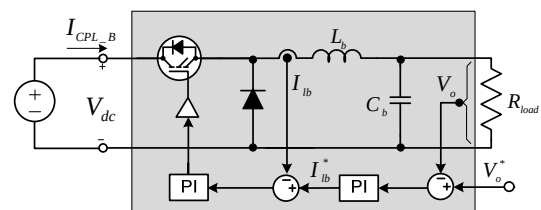


รูปที่ 3 วงจรในฝั่งของโหลดที่เป็นชุดขับเคลื่อนมอเตอร์

การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในฝั่งของโหลด แบ่งออกเป็น 2 ส่วนได้แก่ วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า ซึ่งโครนัสแบบแม่เหล็กถาวร ที่มีการควบคุมความเร็วรอบ (ω_{ref}) และมีการขับโหลดที่เพลา (τ_{load}) พร้อมทั้งควบคุม

กระแสไฟฟ้าบนแกนดี(I_{sd}^*) แสดงดังรูปที่ 3 โดยต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อดำเนินการตรวจสอบความถูกต้อง ซึ่งจะนำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 3.2

สำหรับวงจรแปรผันแบบบักคี่ ที่มีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต(V_o^*) ตกคร่อมโหลดตัวต้านทาน (R_{load}) ในการจำลองสถานการณ์ เพื่อดำเนินการตรวจสอบความถูกต้อง จึงต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเข้ากับวงจรแปรผันแบบบักคี่ แสดงดังรูปที่ 4 โดยจะนำเสนอรายละเอียดในหัวข้อที่ 3.3



รูปที่ 4 วงจรในฝั่งของโหลดที่เป็นวงจรแปลงผันแบบบักคี่

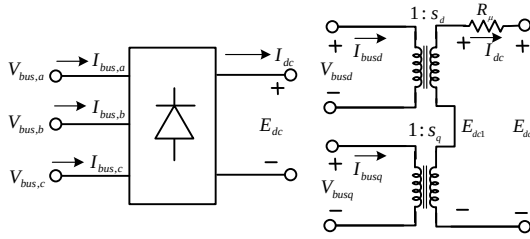
3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าสามเฟส

จากรูปที่ 2 ในส่วนของแหล่งจ่ายไฟฟ้า ซึ่งเป็นวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าสามเฟส ผ่านไดโอดบริดจ์เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงโดยมีวงจรกรองที่ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ(L_f) พร้อมพิจารณาความต้านทานภายใน (R_f) แล้วต่อขนานกับตัวเก็บประจุ(C_f) ที่พิจารณาค่าความต้านทานภายใน(R_f) เช่นกัน และมีการพิจารณาค่าพารามิเตอร์ของสายส่ง(R_{eq}, L_{eq}, C_{eq}) จะทำให้เกิดมุมต่างเฟสระหว่างบัสแหล่งจ่ายไฟฟ้า(Source bus) กับบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ(AC bus) เท่ากับ (λ) จะใช้วิธีการตีคิว ส่งผลจากการพิจารณาแสดงได้ดังวงจรสมมูลบนแกนดีคิว [2],[5] แสดงได้ดังรูปที่ 5 ซึ่งผลของการนำกระแสไฟฟ้าผ่านไดโอดของวงจรเรียงกระแสสามเฟส ที่มีผลของตัวเหนี่ยวนำในสายส่งกำลังไฟฟ้า (L_{eq}) ทำให้เกิดมุมเหลื่อม(Overlap angle) ส่งผลทำให้แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตตก ผลกระทบนี้สามารถพิจารณาแทนด้วยความต้านทาน ต่ออนุกรมในวงจรเรียงกระแส ที่มีความสัมพันธ์กับค่าความเหนี่ยวนำในสายส่ง($R_\mu = 3\omega L_{eq}/\pi$) ส่วนการแปลงฟังก์ชันการสวิตช์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสให้

อยู่บนแกนตีควจะอาศัยวิธีการใน [2] แสดงดังสมการที่ (1) โดยมีความสัมพันธ์กับมุมหมุนของแกนตีคว (θ) กับมุมอ้างอิงที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (ϕ_1)

$$S_{dq} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \begin{bmatrix} \cos(\phi_1 - \theta) \\ \sin(\phi_1 - \theta) \end{bmatrix} \quad (1)$$

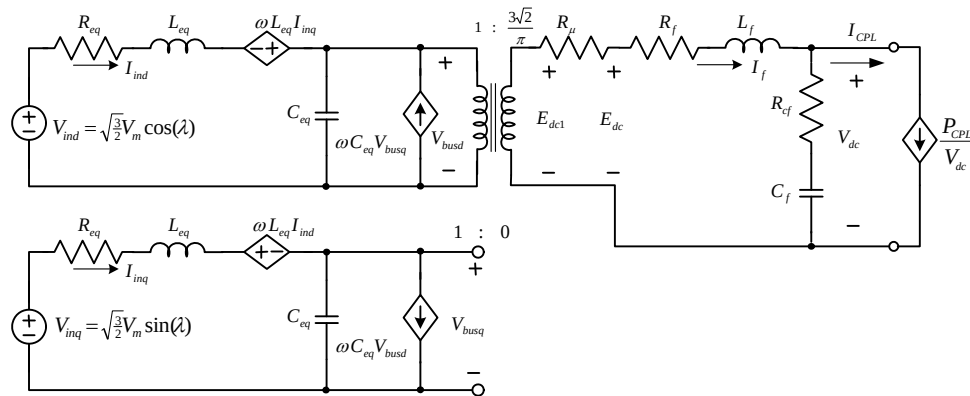
ดังนั้นสมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า และ กระแสไฟฟ้า ที่กำหนดให้มุมหมุนอ้างอิงแกนตีควเท่ากับ มุมที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ($\theta = \phi_1$) ดังนั้นฟังก์ชัน การสวิตช์บนแกนตีคว $s_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi}$ และ $s_q = 0$ สามารถ เขียนแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (2)



รูปที่ 5 วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าสามเฟส

$$\begin{cases} E_{dc1} = s_d V_{busd} + s_q V_{busq} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{busd} \\ I_{busd} = s_d I_{dc} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} I_{dc} \\ I_{busq} = s_q I_{dc} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า และ กระแสไฟฟ้าในสมการที่(2) สามารถเขียนวงจรสมมูลของ



รูปที่ 6 วงจรสมมูลของวงจรเรียงกระแสสามเฟสในส่วนของแหล่งจ่ายไฟฟ้า

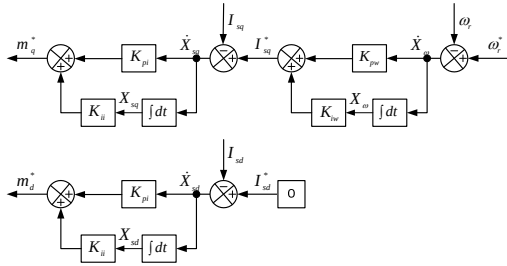
วงจรเรียงกระแสในส่วนของแหล่งจ่ายไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 6 โดยผลของมุมที่บัสของแหล่งจ่ายไฟฟ้าสามเฟสมุมที่มีมุม นำหน้าด้วย λ สามารถคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าอินพุตบน แกนตีควมีความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของแรงดันไฟฟ้า สาม สม ดุล กับ มุม λ ($V_{ind} = \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \cos(\lambda)$ กับ $V_{inq} = \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \sin(\lambda)$) ดังนั้นนำกฎ KVL และ KCL วิเคราะห์วงจรในรูปที่ 6 จะได้สมการอนุพันธ์ของระบบที่ พิจารณา แสดงดังสมการที่ (3)

$$\begin{cases} \dot{I}_{ind} = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{ind} + \omega I_{inq} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} V_{busd} + \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\cos(\lambda)}{L_{eq}} V_m \\ \dot{I}_{inq} = -\omega I_{ind} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{inq} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} V_{busq} + \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\sin(\lambda)}{L_{eq}} V_m \\ \dot{V}_{busd} = \frac{1}{C_{eq}} I_{ind} + \omega V_{busq} - \frac{1}{C_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_{dc} \\ \dot{V}_{busq} = \frac{1}{C_{eq}} I_{inq} - \omega V_{busd} \\ \dot{I}_{dc} = \frac{1}{L_f} \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi} V_{busd} - \frac{R_\mu + R_f + R_{cf}}{L_f} I_{dc} - \frac{1}{L_f} V_{dc} \\ \quad + \frac{R_{cf}}{L_f} I_{CPL} \\ \dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_f} I_{dc} - \frac{1}{C_f} I_{CPL} \end{cases} \quad (3)$$

จากสมการที่ (3) จะเห็นว่ามีความเป็นตัวแทนของอินพุต สองตัวคือ $\mathbf{U} = [V_m \ I_{CPL}]^T$ ตัวแปรสถานะของระบบหกตัว คือ $\mathbf{X} = [I_{ind} \ I_{inq} \ V_{busd} \ V_{busq} \ I_{dc} \ V_{dc}]^T$ ซึ่งในการตรวจสอบ ความถูกต้องของแบบจำลอง จะกำหนดตัวแปรเอาต์พุต สองตัวคือ $\mathbf{Y} = [I_{dc} \ V_{dc}]^T$ โดยมีการเปลี่ยนโหลดกำลังไฟฟ้า

ความสัมพันธ์ของการควบคุมแบบพีไอ ที่มีกระแสอ้างอิงแกนคิว ค่าดัชนีการมอดูเลตบนแกนดีคิวได้ดังสมการที่ (7)

$$\begin{cases} I_{sq} = \frac{2}{3L_{ls}} m_q V_{dc} - \left(\frac{R_s + R_c}{L_{ls}} \right) I_{sq} + \frac{R_c}{L_{ls}} I_{oq} - \frac{P}{2} \omega_r I_{sd} \\ \dot{I}_{sd} = \frac{2}{3L_{ls}} m_d V_{dc} - \left(\frac{R_s + R_c}{L_{ls}} \right) I_{sd} + \frac{R_c}{L_{ls}} I_{od} + \frac{P}{2} \omega_r I_{sq} \\ \dot{I}_{oq} = \frac{R_c}{L_{mq}} I_{sq} - \frac{R_c}{L_{mq}} I_{oq} - \frac{P}{2} \frac{L_{md}}{L_{mq}} \omega_r I_{od} - \frac{1}{L_{mq}} \frac{P}{2} \omega_r \lambda_{PM} \\ \dot{I}_{od} = \frac{R_c}{L_{md}} I_{sd} - \frac{R_c}{L_{md}} I_{od} + \frac{P}{2} \frac{L_{mq}}{L_{md}} \omega_r I_{oq} \\ \dot{\omega}_r = \frac{3P}{4J} (\lambda_{PM} I_{oq} + (L_{md} - L_{mq}) I_{oq} I_{od}) - \frac{B}{J} \omega_r \\ - \frac{1}{J} \tau_{load} \end{cases} \quad (6)$$



รูปที่ 8 วงจรควบคุมแบบพีไอของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์

$$\begin{cases} m_q^* = K_{pi} K_{pw} \omega_r^* - K_{pi} K_{pw} \omega_r + K_{pi} K_{iw} X_w \\ - K_{pi} I_{sq} + K_{ii} X_{sq} \\ m_d^* = K_{pi} (I_{sd}^* - I_{sd}) + K_{ii} X_{sd} \end{cases} \quad (7)$$

ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่ป้อน (I_{CPL_P}) หาได้จากการแทนค่าในสมการที่ (7) ในสมการที่ (5) จะได้ดังสมการที่ (8)

$$\begin{aligned} I_{CPL_P} &= K_{pi} I_{sd}^* I_{sd} - K_{pi} I_{sd}^2 + K_{ii} X_{sd} I_{sd} + K_{pi} K_{pw} \omega_r^* I_{sq} \\ &\quad - K_{pi} K_{pw} \omega_r I_{sq} + K_{pi} K_{iw} X_w I_{sq} - K_{pi} I_{sq}^2 \\ &\quad + K_{ii} X_{sq} I_{sq} \end{aligned} \quad (8)$$

จากสมการที่ (6) ดำเนินการพิจารณาสมการอนุพันธ์ของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเชิงโครนัส แบบแม่เหล็กถาวรแบบวงปิด ที่มีตัวควบคุมแบบพีไอ โดยการแทนค่าดัชนีการมอดูเลตบนแกนดีคิว ($m_q = m_q^*$ และ $m_d = m_d^*$) จากสมการที่(7) สามารถเขียนสมการอนุพันธ์แบบวงปิดแสดงดังสมการที่ (9)

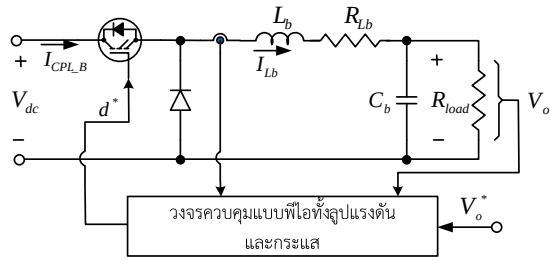
$$\begin{cases} \dot{I}_{sq} = -\frac{2}{3L_{ls}} K_{pi} K_{pw} \omega_r V_{dc} + \frac{2}{3L_{ls}} K_{pi} K_{iw} X_w V_{dc} \\ - \frac{2}{3L_{ls}} K_{pi} I_{sq} V_{dc} + \frac{2}{3L_{ls}} K_{ii} X_{sq} V_{dc} - \left(\frac{R_s + R_c}{L_{ls}} \right) I_{sq} \\ + \frac{R_c}{L_{ls}} I_{oq} - \frac{P}{2} \omega_r I_{sd} + \frac{2}{3L_{ls}} K_{pi} K_{pw} \omega_r^* V_{dc} \\ \dot{I}_{sd} = \frac{2}{3L_{ls}} K_{pi} I_{sd}^* V_{dc} - \frac{2}{3L_{ls}} K_{pi} I_{sd} V_{dc} + \frac{2}{3L_{ls}} K_{ii} X_{sd} V_{dc} \\ - \left(\frac{R_s + R_c}{L_{ls}} \right) I_{sd} + \frac{R_c}{L_{ls}} I_{od} + \frac{P}{2} \omega_r I_{sq} \\ \dot{I}_{oq} = \frac{R_c}{L_{mq}} I_{sq} - \frac{R_c}{L_{mq}} I_{oq} - \frac{P}{2} \frac{L_{md}}{L_{mq}} \omega_r I_{od} - \frac{1}{L_{mq}} \frac{P}{2} \omega_r \lambda_{PM} \\ \dot{I}_{od} = \frac{R_c}{L_{md}} I_{sd} - \frac{R_c}{L_{md}} I_{od} + \frac{P}{2} \frac{L_{mq}}{L_{md}} \omega_r I_{oq} \\ \dot{\omega}_r = \frac{3P}{4J} (\lambda_{PM} I_{oq} + (L_{md} - L_{mq}) I_{oq} I_{od}) - \frac{B}{J} \omega_r - \frac{1}{J} \tau_{load} \\ \dot{X}_w = \omega_r^* - \omega_r \\ \dot{X}_{sq} = K_{pw} \omega_r^* - K_{pw} \omega_r + K_{iw} X_w - I_{sq} \\ \dot{X}_{sd} = I_{sd}^* - I_{sd} \end{cases} \quad (9)$$

จากแบบจำลองในสมการที่ (8) และ (9) ดำเนินควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่บัส (V_{dc}) ควบคุมกระแสไฟฟ้าแกนดีอ้างอิงเท่ากับศูนย์ (I_{sd}^*) ควบคุมความเร็วรอบอ้างอิง (ω_r^*) และแรงบิดที่เพลาลูก (τ_{load}) เพื่อหาผลตอบสนองของกระแสไฟฟ้าที่ชั่ว ($I_{sd} I_{sq}$) ความเร็วรอบ (ω_r) และกระแสไฟฟ้าที่ป้อน (I_{CPL_P}) โดยแบบจำลองที่ได้เป็นแบบจำลองไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นในการค่าอิมพีแดนซ์ของโหลด ต้องทำแบบจำลองดังกล่าวให้เป็นแบบเชิงเส้น โดยอาศัยวิธีการของอนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่ง โดยกำหนดให้ตัวแปรสถานะอินพุตเป็นแรงดันไฟฟ้าที่บัส (V_{dc}) และตัวแปรสถานะเอาต์พุตเป็นกระแสไฟฟ้าที่บัส (I_{CPL_P}) ณ จุดทำงาน และกำหนดให้ ความเร็วรอบ แรงบิดและกระแสไฟฟ้าแกนดีเป็นค่าคงที่

3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปรผันแบบบัทช์

วงจรแปรผันแบบบัทช์ ที่มีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 9 โดยตัวเหนี่ยวนำในวงจรจะมีการพิจารณา

ค่าความต้านทานขดลวด (L_b, R_{Lb}) ที่ต่ออนุกรม และตัวเก็บประจุ (C_b) ต่อขนานกับโหลดความต้านทาน (R_{load}) จากการศึกษาใน [4],[5] มีฟังก์ชันการสวิตช์ของวงจรแปรผันแบบบัคค์ ($u(t)$) ดังสมการที่ (10) โดยกำหนดให้ d คือ ดัชนีของการสวิตช์และ T_s คือคาบเวลาในการสวิตช์



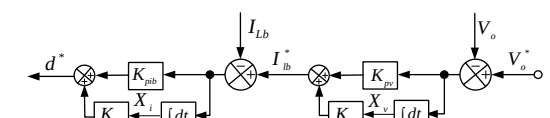
รูปที่ 9 วงจรแปรผันแบบบัคค์ ที่มีการควบคุม

$$u(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t < dT_s \\ 0, & dT_s < t < T_s \end{cases} \quad (10)$$

ดังนั้นการประยุกต์ใช้วิธีการปริภูมิสถานะเฉลี่ยทั่วไปสามารถเปลี่ยนเป็นค่าดัชนีของการสวิตช์ (d) เป็นค่าสัมประสิทธิ์เลขเชิงซ้อนของอนุกรมฟูเรียร์ ($\langle u(t) \rangle_0 = d$) ดังนั้นจากรูปที่ 9 พิจารณาในส่วนของวงจรแปรผันแบบบัคค์ ที่มีการควบคุมแบบวงเปิด พิจารณากฎ KVL และ KCL สามารถเขียนสมการอนุพันธ์วงจรแปรผันแบบบัคค์แบบวงเปิดได้ดังสมการที่ (11)

$$\begin{cases} \dot{I}_{Lb} = \frac{d}{L_b} V_{dc} - \frac{R_{Lb}}{L_b} I_{Lb} - \frac{1}{L_b} V_o \\ \dot{V}_o = \frac{1}{C_b} I_{Lb} - \frac{1}{R_{load} C_b} V_o \end{cases} \quad (11)$$

พิจารณาการควบคุมแบบวงปิด ที่มีวงจรควบคุมแบบฟีดแบ็กทั้งรูปแรงดัน (K_{pv}, K_{iv}) และกระแส (K_{pib}, K_{iib}) ดังรูปที่ 10 สามารถหาค่าดัชนีของการสวิตช์ (d^*) ของวงจรควบคุมแบบฟีดแบ็กได้ดังสมการที่ (12)



รูปที่ 10 วงจรควบคุมแบบฟีดแบ็กของวงจรแปรผันแบบบัคค์

$$d^* = -K_{pv} K_{pib} V_o - K_{pib} I_{Lb} + K_{iv} K_{pib} X_v + K_{iib} X_i + K_{pv} K_{pib} V_o^* \quad (12)$$

ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ผ่านวงจรสวิตช์จะมีความสัมพันธ์กับค่าของดัชนีของการสวิตช์ แสดงดังสมการที่ (13)

$$\begin{cases} V_b = -K_{pv} K_{pib} V_o V_{dc} - K_{pib} I_{Lb} V_{dc} + K_{iv} K_{pib} X_v V_{dc} + K_{iib} X_i V_{dc} + K_{pv} K_{pib} V_o^* V_{dc} \\ I_{CPL_B} = -K_{pv} K_{pib} V_o I_{Lb} - K_{pib} I_{Lb}^2 + K_{iv} K_{pib} X_v I_{Lb} + K_{iib} X_i I_{Lb} + K_{pv} K_{pib} V_o^* I_{Lb} \end{cases} \quad (13)$$

ดังนั้นพิจารณาการควบคุมแบบวงปิดของวงจรแปรผันแบบบัคค์ ที่มีตัวควบคุมแบบฟีดแบ็กในรูปที่ 9 สามารถแทนค่า $d = d^*$ และเขียนสมการอนุพันธ์ได้ดังสมการที่ (14)

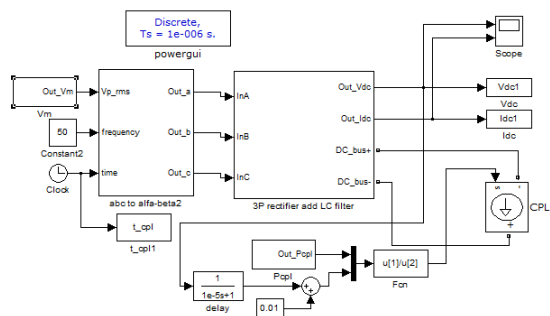
$$\begin{cases} \dot{I}_{Lb} = -\frac{R_{Lb}}{L_b} I_{Lb} - \frac{K_{pib}}{L_b} V_{dc} I_{Lb} - \frac{1}{L_b} V_o - \frac{K_{pv} K_{pib}}{L_b} V_{dc} V_o + \frac{K_{iv} K_{pib}}{L_b} V_{dc} X_v + \frac{K_{iib}}{L_b} V_{dc} X_i + \frac{K_{pv} K_{pib}}{L_b} V_{dc} V_o^* \\ \dot{V}_o = \frac{1}{C_b} I_{Lb} - \frac{1}{R_{load} C_b} V_o \\ \dot{X}_v = -V_o + V_o^* \\ \dot{X}_i = -K_{pv} V_o - I_{Lb} + K_{iv} X_v + K_{pv} V_o^* \end{cases} \quad (14)$$

จากสมการที่ (13) และ (14) ดำเนินควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่บัคส์ (V_{dc}) ควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตอ้างอิง (V_o^*) เพื่อหาผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต (V_o) กระแสไฟฟ้าในวงจร (I_{Lb}) และกระแสไฟฟ้าที่ป้อน (I_{CPL_B}) โดยแบบจำลองเป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นการหาค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดนี้ ต้องทำเช่นเดียวกับในหัวข้อที่ 3.2 โดยกำหนดให้แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเป็นค่าคงที่ ณ จุดทำงาน

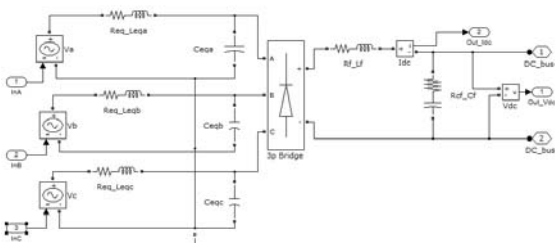
4. การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

4.1 การจำลองสถานการณ์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟส ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

ดำเนินการกำหนดให้ $I_{CPL} = P_{CPL} / V_{dc}$ เป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติของวงจร และกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์สายส่ง $L_{eq} = 2.51 \text{ mH}$ $C_{eq} = 906.35 \text{ nF}$ และ $R_{eq} = 1.00 \Omega$ ในส่วนของวงจรกรอง $R_f = 0.40 \Omega$ $L_f = 55.00 \text{ mH}$ $R_f = 0.91 \Omega$ และ $C_f = 195.47 \mu\text{F}$ โดยการต่อวงจรแสดงดังในรูปที่ 11 เป็นการต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้าสามเฟสที่สามารถควบคุมขนาดแรงดันไฟฟ้าได้ ซึ่งรายละเอียดการต่อวงจรแสดงดังรูปที่ 12 ในส่วนของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวในบล็อกขวาสุดที่มีการควบคุมกำลังไฟฟ้า เป็นแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบควบคุม ตามสมการกระแสไฟฟ้าที่กล่าวไว้ข้างต้น



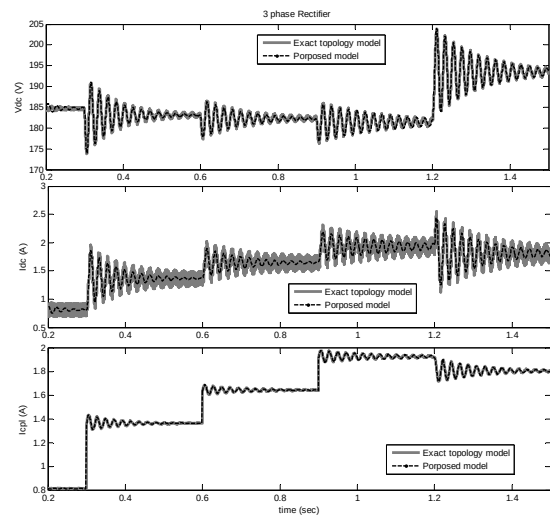
รูปที่ 11 การต่อวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลด



รูปที่ 12 รายละเอียดของบล็อก 3P rectifier add LC

ดำเนินการจำลองสถานการณ์กำหนดให้แรงดันไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 80 Vrms โดยจ่ายโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าคงที่ที่ 150 วัตต์ หลังจากนั้นที่เวลา 0.3 0.6 และ 0.9 วินาที ได้เพิ่มโหลดเป็น 250 300 และ 350 วัตต์ตามลำดับ และในลำดับสุดท้ายได้เพิ่มแรงดันไฟฟ้าอินพุตเป็น 85 Vrms ที่เวลา 1.2 วินาที โดยผลการจำลองสถานการณ์แสดงแรงดันไฟฟ้าที่บัส (V_{dc}) กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (I_{dc}) และกระแสไฟฟ้าที่บัส (I_{CPL}) ดังรูปที่ 13 โดยเส้นสีเทาเป็นของการจำลองผ่านวงจรในรูปที่ 11 ส่วนเส้นสีดำประ

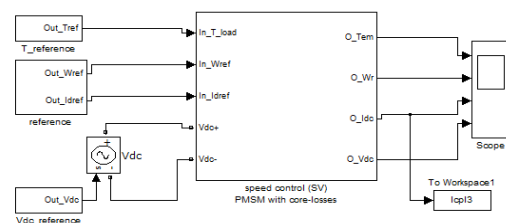
ได้จากแบบจำลองดังสมการที่ (3) จากผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าผลตอบสนองมีความสอดคล้องกัน ตลอดย่านการทำงานที่กำหนด อีกทั้งผลของแรงดันไฟฟ้าที่บัสมีผลกระทบต่อกระแสที่โหลด เช่นที่เวลา 1.2 วินาที ทำให้ขนาดกระแสไฟฟ้าที่บัสลดลง เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่บัสเพิ่มขึ้น



รูปที่ 13 ผลการจำลองสถานการณ์วงจรเรียงกระแส

4.2 การจำลองสถานการณ์ของวงจรขับเคลื่อน

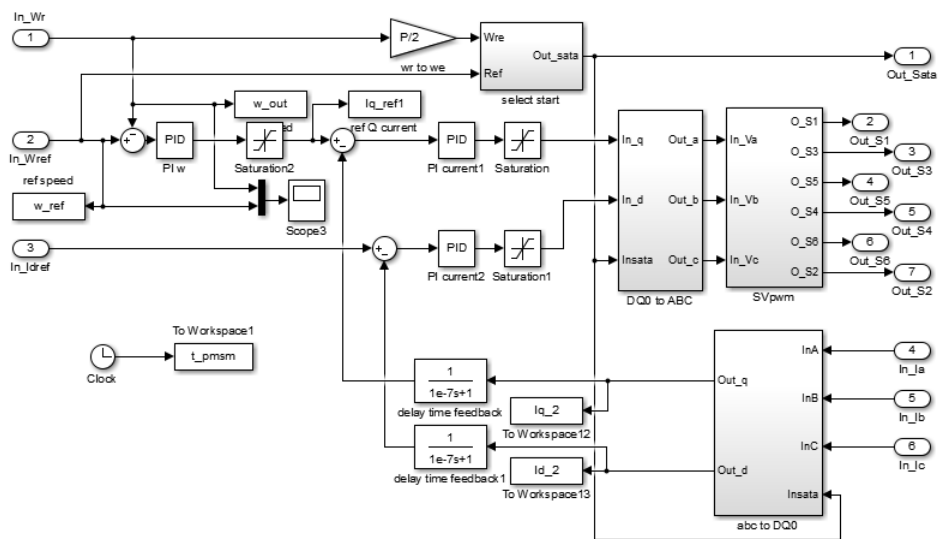
มอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวร



รูปที่ 14 การต่อวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า

ดำเนินการต่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ที่เป็นวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า โดยสัญญาณควบคุมสามส่วนคือความเร็วรอบ แรงบิด และกระแสไฟฟ้าอ้างอิงที่แกนดีมีค่าเท่ากับศูนย์ตลอด แหล่งจ่ายไฟฟ้าที่มีการควบคุมเป็นแรงดันไฟฟ้าที่บัส แสดงดังรูปที่ 14 ซึ่งมีส่วนประกอบภายในสองส่วน คือ ส่วนแรกคือบล็อกควบคุมแบบพีโอทั้งลูปความเร็วรอบและลูปกระแสไฟฟ้า เป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงสามเฟส ผ่านแปลงสัญญาณสามเฟสเป็นการผสมสัญญาณแบบสเปซเวกเตอร์ ที่ส่งสัญญาณควบคุม

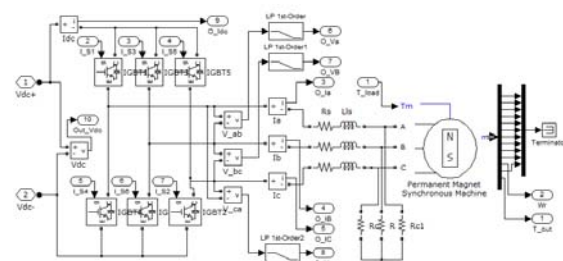
ปีที่ 13 ฉบับที่ 3 เดือนกันยายน - ธันวาคม พ.ศ. 2561



รูปที่ 15 การต่อบล็อกควบคุมแบบฟีด

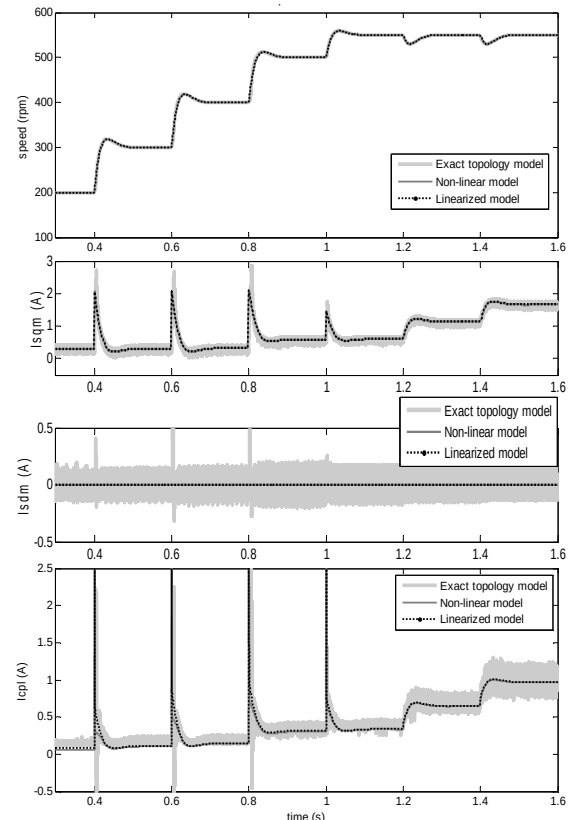
การสวิตช์ทั้งหกตัว แสดงรายละเอียดดังรูปที่ 15 และส่วนที่สองเป็นบล็อกการต่ออินเวอร์เตอร์ เพื่อขับมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวร แสดงรายละเอียดดังรูปที่ 16

ในรูปที่ 15 มีค่าพารามิเตอร์ของบล็อกควบคุมแบบฟีดไทม์ลูปความเร็วรอบและกระแสไฟฟ้า มีค่าดังนี้ $K_{pw}=0.17$ $K_{iw}=6.67$ $K_{pi}=115.48$ และ $K_{ii}=47,892.05$ ส่วนในรูปที่ 16 การต่อวงจรอินเวอร์เตอร์ จ่ายโหลดให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวร โดยพิจารณาค่าการสูญเสียที่แกนเหล็กเพิ่ม โดยต่อวงจรตัวต้านทาน และตัวเหนี่ยวนำเพิ่ม ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์มีดังนี้ $L_s=3.25\text{mH}$ $L_{md}=69.37\text{mH}$ $L_{mq}=166.74\text{mH}$ $R_c=1,999.8\Omega$ $R_{eq}=6.46\Omega$ $J=3.37\text{mKg}\cdot\text{m}^2$ $B=10.15\mu\text{Nm}\cdot\text{s}/\text{rad}$ และ $\lambda_{PM}=0.634\text{V}\cdot\text{s}$



รูปที่ 16 การต่อวงจรอินเวอร์เตอร์ขับมอเตอร์ไฟฟ้า

ดำเนินการจำลองสถานการณ์ โดยควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายให้แรงดันไฟฟ้าที่บัสเท่ากับ 200 V และเริ่มหมุนความเร็วรอบที่ 200 rpm ที่แรงบิด 0.5 Nm แล้วเพิ่ม

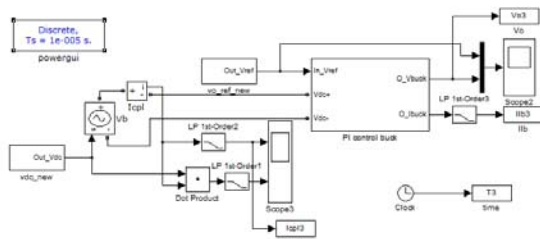


รูปที่ 17 ผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า ที่แรงดันไฟฟ้าที่บัส 200 V

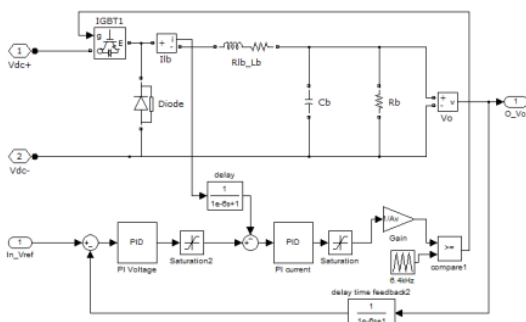
ความเร็วรอบทุกๆ เวลา 0.2 วินาที ครั้งละ 100 rpm ที่แรงบิด 1 Nm จนความเร็วรอบถึง 500 rpm และที่เวลา 1.0 วินาที เพิ่มความเร็วรอบเท่ากับ 550 rpm แล้วเพิ่มแรงบิดเป็น 2 และ 3 Nm ที่เวลา 1.2 และ 1.4 วินาที

ตามลำดับ ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์แสดงดังรูปที่ 17 ประกอบไปด้วย ผลตอบสนองของความเร็วรอบ (ω) กระแสไฟฟ้าบนแกนดักคิว (I_{sd} I_{sq}) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าวงจรอินเวอร์เตอร์ (I_{CPL_P}) โดยเส้นสีเทาอ่อนหนา เป็นการจำลองสถานการณ์ดังรูปที่ 14 ในส่วนเส้นสีเทาเข้มจากแบบจำลองดังสมการที่ (8) และ (9) ส่วนเส้นสีดำประเป็นแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้น ที่มีค่าเริ่มต้นในแต่ละจุดการทำงาน จากสมการดังกล่าว การเปรียบเทียบผลที่ได้มีความสอดคล้องกัน ทั้งการเปลี่ยนแปลงแรงบิด ส่วนการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบและกระแสไฟฟ้าที่บัส (I_{CPL_P}) ปรากฏความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อย

4.3 การจำลองสถานการณ์ของวงจรแปรผันแบบบัก



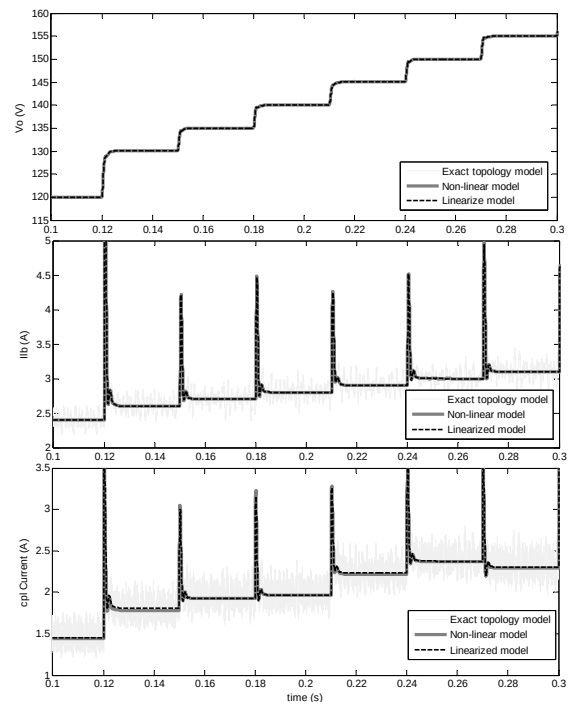
รูปที่ 18 การต่อวงจรแปรผันแบบบัก



รูปที่ 19 รายละเอียดของวงจรแปรผันแบบบัก

ดำเนินการต่อวงจรดังรูปที่ 18 เป็นการต่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบวงจรแปรผันแบบบัก ที่มีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต โดยต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่มีการควบคุมเป็นแรงดันไฟฟ้าที่บัส และต่อสัญญาณควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตอ้างอิงกับวงจรแปรผันแบบบัก ที่มีโหลดความต้านทาน พร้อมวัดสัญญาณต่างๆ สำหรับรูปที่ 19 เป็นการต่อวงจรภายใน โดยมีวัดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต บ้อนเข้าวงจรการ

ควบคุมแบบพีไอทั้งอุปแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า เพื่อไปควบคุมการสวิตช์ที่ไอจีบีที โดยมีค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมดังนี้ $K_{pv}=0.24$ $K_{iv}=21.71$ $K_{pib}=0.53$ $K_{iib}=3,789.92$ และค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปรผันแบบบัก $L_b=5.0$ mH $R_{Lb}=0.1$ Ω $R_{load}=50$ Ω และ $C_b=270.0$ μ F



รูปที่ 20 ผลการจำลองของวงจรแปรผันแบบบัก

ดำเนินการจำลองสถานการณ์ โดยเริ่มจากการป้อนที่แหล่งจ่ายให้แรงดันไฟฟ้าที่บัสเท่ากับ 200 V และควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเริ่มต้นเท่ากับ 120 V จนถึงเวลา 0.12 วินาทีได้ทำการเพิ่มแรงดันเป็น 130 V หลังจากนั้นเพิ่มขึ้นทีละ 5 V จนถึง 155 V จะทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (I_b) เพิ่มขึ้น ส่วนกระแสไฟฟ้าที่บ้อนวงจรแปรผันแบบบัก (I_{CPL_B}) มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ถ้าแรงดันไฟฟ้าที่บัสเพิ่มขึ้นกระแสไฟฟ้าจะลดลง ซึ่งในช่วงเวลาที่มากกว่า 0.27 วินาทีที่เพิ่มแรงดันไฟฟ้าที่บัสเป็น 210 V กระแสไฟฟ้าจึงลดลง ซึ่งในทางกลับกันในช่วงเวลา 0.21 ถึง 0.27 วินาที มีการลดแรงดันไฟฟ้าที่บัสลงเหลือ 190 V ทำให้กระแสไฟฟ้าที่บ้อนวงจรมีค่ามากขึ้น ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรแปรผันแบบบัก แสดงดังรูปที่ 20 โดยเส้นสีเทาอ่อนหนา เป็นผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 18 ส่วนเส้นสีเทาเข้มได้จากแบบจำลองดังสมการที่ (13) และ (14) ส่วนเส้นสีดำประเป็นแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้น ที่มีค่าเริ่มต้นใน

แต่ละจุดการทำงาน จากผลการตอบสนองในรูปที่ 20 แสดงให้เห็นว่า ผลการเปรียบเทียบของรูปสัญญาณมีความสอดคล้องกัน ทั้งการเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าที่บัส และแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต

5. สรุป

ณ ปัจจุบันโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว เชื่อมต่อกับวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าสามเฟส ที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมีผลกระทบต่อเสถียรภาพ ดังนั้นในบทความนี้ได้ดำเนินการพิสูจน์แบบจำลองของระบบ โดยวิธีที่ดีกับวิธีการปริภูมิสถานะเฉลี่ยทั่วไป สามารถหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่แปลงตามเวลา ทั้งของวงจรเรียงกระแส ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเชิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวร และวงจรแปรผันแบบบัคค์ พร้อมกับการนำเสนอวิธีการจำลองสถานการณ์ของวงจรเสมือนจริงด้วยโปรแกรม MATLAB ผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้เปรียบเทียบ จะเห็นได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ มีผลตอบสนองระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมีผลสอดคล้อง ดังนั้นการนำแบบจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้าเชิงโครนัส ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ฯ และใช้ในการออกแบบตัวควบคุมต่อไป ส่วนแบบจำลองของระบบที่ได้ เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าทั้งสองฝั่ง สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการหาค่าอิมพีแดนซ์ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพกับระบบ ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว เชื่อมต่อกับวงจรเรียงกระแสสามเฟส ที่มีบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนวิจัย จากทุนการศึกษาต่อภายในประเทศ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ทุนการศึกษาจากกลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ผลงานเครื่องจักรกลไฟฟ้าและควบคุม (PEMC) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Emadi, A. Khaligh, C.H. Rivetta, and G.A. Williamson, "Constant power loads and negative impedance instability in automotive system: definition, modeling, stability, and control of power electronics converter and motor drives", *IEEE Trans. on Vehicular Tech.*, vol. 55, no. 4, pp. 1112-1125, July 2006.
- [2] K-N. Areerak, S.V. Bozhko, G.M. Asher, and D.W.P. Thomas, "Stability analysis and modeling of AC-DC system with mixed load using DQ-transformation method", *IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE08)*, Cambridge, UK, 29 June – 2 July 2008, pp. 19-24,
- [3] Y. A-R. I. Mohamed, A.A.A. Radwan, and T.K. Lee, "Decoupled reference-voltage-based active dc-link stabilization for PMSM drives with tight-speed regulation", *IEEE Trans. on Indus. Elect.*, vol. 59, no. 12, pp. 4523-4536, December 2012.
- [4] J. Mahdavi, A. Emadi, M.D. Bellar, and M. Ehsani, "Analysis of power electronic converter using the generalized state-space averaging approach", *IEEE Trans. on Circuit and System.*, vol. 44, pp. 767-770, August 1997.
- [5] T. Sopapirm, K-N. Areerak, and K-L. Areerak, "Mathematical of a three-phase diode rectifier feeding a controlled buck converter", *International Review on Modeling and Simulations*, pp. 1426-1439, August 2011.
- [6] R. Monajemy and R. Krishnan, "Control and dynamics of constant-power-loss-based operation of permanent magnet synchronous motor drive system". *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 48, no. 4, pp. 839-844, August 2001.
- [7] R. Krishnan, "Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives.", CRC Press, 2010, pp. 226-276.
- [8] K. Suthamno and S. Sujitjorn, "Modelling of permanent magnet synchronous motor incorporating core-loss", *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology.*, vol. 4, no. 17, pp. 2846-2853, September 2012.

**พฤติกรรมทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชลล์เมื่อใช้ปริมาณวัสดุ
ชั้นผิวทางเดิมหมุนเวียนเพื่อใช้งานใหม่ต่างกัน**
**Engineering Performance of Asphalt Concrete by Marshall Test Using
Different Reclaimed Asphalt Pavement Content**

นิรชร นกแก้ว^{1*} ดำรงค์ ปาละกุล²

¹ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

39 หมู่ที่ 1 ถ.รังสิต-นครนายก คลองหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

²สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง 2/486 ถ.ศรีอยุธยา เขตราชเทวี กรุงเทพฯ 10400

Nirachorn Nokkaew^{1*} Damrong Parakul²

¹Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology
Thanyaburi, 39 Moo 1, Rangsit - Nakhonnayok Road, Khlong 6, Thanyaburi, Pathum Thani 12110

²Bureau of Materials, Analysis and Inspection, Department of Highways,
2/486 Ayutthaya Road, Ratchathewi, Bangkok, 10400

*Corresponding author Email: nirachorn.n@en.rmutt.ac.th

(Received: December 4, 2017; Accepted: October 4, 2018)

บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาพฤติกรรมทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชลล์เมื่อใช้ปริมาณวัสดุชั้นผิวทางเดิมหมุนเวียนเพื่อใช้งานใหม่ (Reclaimed Asphalt Pavement, RAP) ต่างกัน โดยใช้วัสดุรวมรวมหินปูนจำนวน 1 แหล่ง ปริมาณ RAP ไม่คัดแยกขนาดร้อยละ 10, 20, 30, 40, 50, 60 และ 70 ของมวลรวม ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 60-70 เท่ากับ ร้อยละ 5 ของมวลรวม โดยใช้วิธีมาร์แชลล์และเกณฑ์ชั้น Binder Course ขนาด 19.0 มิลลิเมตร ผลการศึกษาพบว่า เมื่อใช้ปริมาณ RAP ไม่คัดแยกขนาดอยู่ในช่วงร้อยละ 10 ถึง 40 ของมวลรวมทำให้ได้คุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีตเป็นไปตามข้อกำหนดของสูตรส่วนผสมงานของการนำวัสดุผิวทางเดิมกลับมาปรับปรุงคุณภาพใหม่ด้วยวิธีผสมร้อน แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ RAP ไม่คัดแยกขนาด มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมอยู่ในช่วง 579.4 ถึง 953.7 กิโลปาสกาล ค่าโมดูลัสคืนตัวอยู่ในช่วง 1,242.0 ถึง 1,504.1 กิโลปาสกาล ความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรแบบคงที่ มีค่าความเครียดอยู่ในช่วงร้อยละ 0.4935 ถึง 0.9938 และความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรแบบพลวัต มีค่าความเครียดอยู่ในช่วง 3,870 ถึง 4,774 ไมโครสเตรน

คำสำคัญ: วัสดุชั้นผิวทางเดิมหมุนเวียนเพื่อใช้งานใหม่ แอสฟัลต์คอนกรีต อัตราส่วนผสม ความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม โมดูลัสคืนตัว ความต้านทานการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร

ABSTRACT

This article aims to study the performance of asphalt concrete by Marshall Test using different reclaimed asphalt pavement (RAP) content. The experimental design detailed in this study included the use of one limestone aggregate source, no separation of RAP such as 10, 20, 30, 40, 50, 60 and 70 percent by mass of aggregate, asphalt cement (AC 60-70) at 5 percent by mass of aggregate. The research methodology used Marshall Test and binder course 19.0 mm in laboratory conditions. The study found that when using the amount of no separation of RAP in the range of 10 to 40 percent by mass of aggregate had job mix formula properties to meet the requirements of Asphalt Hot-Mix Recycling. The study found that RAP had a indirect tensile strength of 579.4 to 953.7 kPa, a resilient modulus of 1,242.0 to 1,504.1 kPa, static creep of 0.4935 to 0.9938 percent and dynamic creep of 3,870 to 4,774 microstrain.

Keywords: Reclaimed asphalt pavement, asphalt concrete, mix proportion, Indirect Tensile Strength, Resilient Modulus, Creep

1. บทนำ

ปัจจุบันการก่อสร้างถนนได้มีการนำเอาวัสดุชั้นผิวทางเดิมหมุนเวียนเพื่อใช้งานใหม่ (Reclaimed Asphalt Pavement, RAP) ซึ่งเป็นวัสดุที่ได้จากการขุดหรือผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเดิม โดยใช้หัวกัด (Milling Drum) ซึ่งขนาดคละของวัสดุชั้นผิวทางเดิมที่ได้ จะขึ้นอยู่กับความเร็วในการเดินชุดเครื่องจักรและสภาพของหัวกัดโดยการขุดไส้ (Mill) ผิวทางเดิมออก การหมุนเวียนวัสดุชั้นผิวทางเดิมมาใช้งานใหม่สามารถทำได้ 2 วิธีคือ วิธีแรกเป็นการนำเอาวัสดุไปผสมใหม่ที่โรงงานผลิต (In-Plant Recycling) และวิธีที่สองเป็นวิธีการหมุนเวียนวัสดุแบบในที่ (In-Place Recycling) [1] ซึ่งวิธีนี้มีข้อดีอันสำคัญคือสามารถรีไซเคิลวัสดุชั้นผิวทางและทำการปรับปรุงหรือผสมใหม่ในที่ก่อสร้างได้ทันที ทำให้ลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการขนส่งวัสดุ ในทางปฏิบัติการนำวัสดุชั้นผิวทางเดิมหมุนเวียนเพื่อใช้งานใหม่นั้นจำเป็นต้องมีการออกแบบอัตราส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต เพื่อหาปริมาณของวัสดุชั้นผิวทางเดิมที่มากที่สุดให้อัตราส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่เหมาะสม เพื่อเป็นการใช้ประโยชน์จากวัสดุชั้นผิวทางเดิมเป็นส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตอย่างคุ้มค่า

ก่อนที่จะนำไปดำเนินการก่อสร้างชั้นทางให้มีประสิทธิภาพต่อไป ในงานวิจัยของ Kai Su และคณะ [2] ได้ศึกษาสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตที่นำกลับมาใช้ใหม่ ที่ปริมาณของ RAP เท่ากับร้อยละ 0, 40 และ 70 พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปริมาณ RAP ร้อยละ 40 เมื่อออกแบบเป็นชั้นผิวทางในห้องปฏิบัติการและการทดลองของสนามบิน มีสมบัติใกล้เคียงกันกับส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปราศจาก RAP ในทางตรงกันข้ามวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตเดิมหมุนเวียนเพื่อใช้งานใหม่ปริมาณร้อยละ 70 ไม่สามารถเสนอรับรองสมบัติด้านความล้าของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตได้เมื่อเปรียบเทียบกับแอสฟัลต์คอนกรีตปกติ Feipeng Xiao และคณะ [3] ได้ศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมของขนาดของเศษยาง (Crump Rubber Size) และอิทธิพลของส่วนผสมของ RAP ประเภทต่าง ๆ การออกแบบการทดลองประกอบด้วย การใช้ขนาดของเศษยางจำนวน 3 ขนาด และประเภทของยาง 2 ชนิดคือ ambient หรือ cryogenic ในส่วนผสมที่มี RAP เท่ากับร้อยละ 25 งานวิจัยนี้พบว่า การเพิ่มของเศษยางทำให้ค่าช่องว่างระหว่างวัสดุรวมรวมในการออกแบบส่วนผสมซูเปอร์เพพมีความต้านทานต่อการเกิดร่องล้อเพิ่มขึ้นโดย

ไม่คำนึงถึงขนาดและชนิดของเศษยาง ในทางตรงกันข้าม ค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength) ไม่แสดงค่าที่สำคัญต่อส่วนผสมของการใช้ขนาดของเศษยางทั้ง 3 ขนาด อย่างไรก็ตามการเพิ่มขนาดของยาง การไม่คำนึงถึงชนิดของยางเป็นการลดค่าโมดูลัสคีนตัว แต่จะเป็นการยืดเวลาของการเกิดของส่วนผสมที่ได้รับการปรับปรุง Gonzalo Valde's และคณะ [4] ได้รายงานผลของพฤติกรรมทางกลของส่วนผสมแอสฟัลต์ที่มีอัตราส่วนของ RAP ที่สูง ส่วนผสมมีความหนาแน่นเป็นครึ่งหนึ่งตามขนาดโตสุดของวัสดุรวมรวมมี 2 ขนาดคือ 12 และ 20 มิลลิเมตร และบรรจุ RAP เท่ากับร้อยละ 40 และ 60 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องตามข้อกำหนดของสเปน สมบัติทางกลจากการศึกษาเป็นการหาค่า Stiffness Modulus และความต้านทานแรงดึงทางอ้อมและพฤติกรรมการแตกร้าวและความต้านทานต่อความล้า สรุปได้ว่า อัตราของ RAP ที่สูงทำให้การรวมเข้ากันได้ดีในส่วนผสมแอสฟัลต์โดยมีสมบัติที่เหมาะสม นิชร นกแก้ว และ ดำรงค์ ปาละกุล [5] ศึกษาสมบัติทางกายภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชลล์เมื่อใช้ปริมาณวัสดุชั้นผิวทางเดิมหมุนเวียนเพื่อใช้งานใหม่ต่างกัน โดยใช้วัสดุรวมรวมหินปูนปริมาณ RAP ไม่คัดแยกขนาดร้อยละ 10, 20, 30, 40, 50, 60 และ 70 ของมวลรวม ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 60-70 เท่ากับร้อยละ 5 ของมวลรวม โดยใช้วิธีมาร์แชลล์และเกณฑ์ชั้น Binder Course ขนาด 19.0 มิลลิเมตร ผลการศึกษาพบว่า เมื่อใช้ปริมาณ RAP ไม่คัดแยกขนาดอยู่ในช่วงร้อยละ 10 ถึง 40 ของมวลรวมทำให้ได้คุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีตเป็นไปตามข้อกำหนดของสูตรส่วนผสมเฉพาะงาน การนำวัสดุผิวทางเดิมกลับมาปรับปรุงคุณภาพใหม่ด้วยวิธีผสมร้อน (Asphalt Hot-Mix Recycling)

ปัจจุบันกรมทางหลวงยังใช้ข้อกำหนดการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชลล์สำหรับควบคุมวัสดุรวมรวมผสมให้อยู่ในช่วงค่าขีดจำกัดต่ำสุดและสูงสุด ซึ่งเป็นค่าร้อยละของวัสดุรวมรวมที่ผ่านแต่ละขนาดตะแกรงที่กำหนดตามลักษณะของชั้นทาง เช่น

ผิวทาง (Wearing Course และ Binder Course) พื้นทาง (Base Course) และไหล่ทาง (Shoulder Course) ในทางปฏิบัติการออกแบบส่วนผสมเฉพาะงาน (Job Mix Formula) จะต้องอาศัยประสบการณ์ของผู้ออกแบบในการกำหนดอัตราส่วนผสม (Mix Proportion) เพื่อให้มวลรวมผสมอยู่ในข้อกำหนด [6]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาพฤติกรรมทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีตเมื่อใช้ปริมาณวัสดุชั้นผิวทางเดิมหมุนเวียนเพื่อใช้งานใหม่ต่างกัน โดยมีค่าช่องว่างอากาศใกล้เคียงหรือเท่ากับร้อยละ 4 ตามมาตรฐานของกรมทางหลวงที่ ทล.-ม. 410/2542 [6] ที่มีผลต่อคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีต เพื่อให้สามารถกำหนดอัตราส่วนผสมไว้เป็นแนวทางแนะนำต่อผู้ออกแบบในการพิจารณาเลือกขนาดคละของวัสดุรวมรวมผสมที่มีปริมาณของ RAP ที่เหมาะสมที่สุดและดำเนินการก่อสร้างชั้นทางในการใช้ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต เพื่อให้ได้งานผิวทางที่มีคุณภาพดียิ่งขึ้นและทำให้มีการนำวัสดุชั้นผิวทางเดิมหมุนเวียนเพื่อใช้งานใหม่มาใช้ในการก่อสร้างผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเพิ่มมากขึ้น หากพิจารณาประโยชน์จากการใช้วัสดุชั้นผิวทางเดิมหมุนเวียนเพื่อใช้งานใหม่ (RAP) ย่อมส่งผลโดยตรงต่อการลดลงของปริมาณการใช้วัสดุรวมรวมจากธรรมชาติ นอกจากนี้ยังสามารถลดต้นทุนในการผลิตรวมทั้งสามารถแก้ปัญหาการกำจัดของเสียและช่วยประหยัดพลังงานโดยรวมของประเทศ อาทิเช่น พลังงานที่ใช้ในการขนส่งวัสดุรวมรวมจากแหล่งผลิตตามธรรมชาติ พลังงานที่ใช้ลำเลียงวัสดุผิวทางที่ใช้งานแล้ว พลังงานที่ใช้ในการระเบิดภูเขาหินปูนและพลังงานที่ใช้ในการย่อยหินเพื่อผลิตวัสดุรวมรวม เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถยืดระยะเวลาในการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดได้ยาวนานยิ่งขึ้นอีกด้วย

2. วิธีดำเนินการ

2.1. วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

RAP ไม่ผ่านกระบวนการคัดแยกขนาด จำนวน 1 แหล่ง ในสายทางหลวงหมายเลข 106 ตอน อ.เถิน - อ.ลี้

RAP ผิวทางเดิมของโครงการก่อสร้าง ตาก-ลำปาง ตอน 1 (ส่วนที่ 1) เป็นวัสดุที่ปราศจากมวลรวมของชั้นทางด้านล่างที่ไม่ใช่แอสฟัลต์คอนกรีต [6] และไม่ได้นำ RAP ไปใช้ในงานลักษณะอื่นนอกจากการนำวัสดุผิวทางเดิมกลับมาปรับปรุงคุณภาพใหม่ด้วยวิธีผสมร้อน ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 RAP ไม่ผ่านกระบวนกรคัดแยกขนาด

วัสดุมวลรวมใช้หินปูน จากโรงโม่หินลำปางบุญชัย ตั้งอยู่ที่ กม.3+000 ด้าน RT. offset 50 ม.

แอสฟัลต์ซีเมนต์ใช้เกรด 60-70 ตามมาตรฐานวิธีการทดลอง [6]

2.2. ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างและตัวอย่างในการ

ทดสอบ

เก็บตัวอย่างวัสดุมวลรวมหินปูนจากยูนิตหินร้อนที่ได้จากการทำงานของโรงงานผสมทั้ง 4 ยูนิต (4 Bins) และ RAP กำหนดอัตราส่วนผสมเพื่อให้วัสดุมวลรวมผสมอยู่ในเกณฑ์กำหนดสำหรับชั้น Binder Course ขนาด 19.0 มิลลิเมตร [6] และกำหนดใช้ปริมาณของ RAP เท่ากับร้อยละ 10, 20, 30, 40, 50, 60 และ 70 โดยมวลของวัสดุมวลรวม สัญลักษณ์ของขนาดผลของมวลรวมภายหลังการผสมคือ RAP 10, RAP 20, RAP 30, RAP 40, RAP 50, RAP 60 และ RAP 70

2.3. ขั้นตอนการทดสอบ

หาขนาดผลของวัสดุมวลรวมและ RAP [7] ดังตารางที่ 1 [5] และให้มวลรวมผสมระหว่างขนาดผลของวัสดุมวลรวมและ RAP พยายามให้อยู่ในเกณฑ์กำหนด

ขนาดผลของมวลรวมภายหลังการผสม ดังตารางที่ 2 และ 3 [6]

ตารางที่ 1 ขนาดผลของวัสดุมวลรวมหินปูนและ RAP

Sieve Size	% Passing				
	RAP	Bin 1	Bin 2	Bin 3	Bin 4
1"					100
3/4"	100			100	89.5
1/2"	98.8			70.6	5.4
3/8"	95.6		100	16.3	0.5
#4	71.7	100	17.3	1.7	
#8	48.4	65.8	1.1		
#16	33.6	41.1	0.8		
#30	25.0	27.9			
#50	19.8	20.8			
#100	16.3	15.8			
#200	14.0	11.1			

ตารางที่ 2 ขนาดผลของมวลรวมภายหลังการผสม

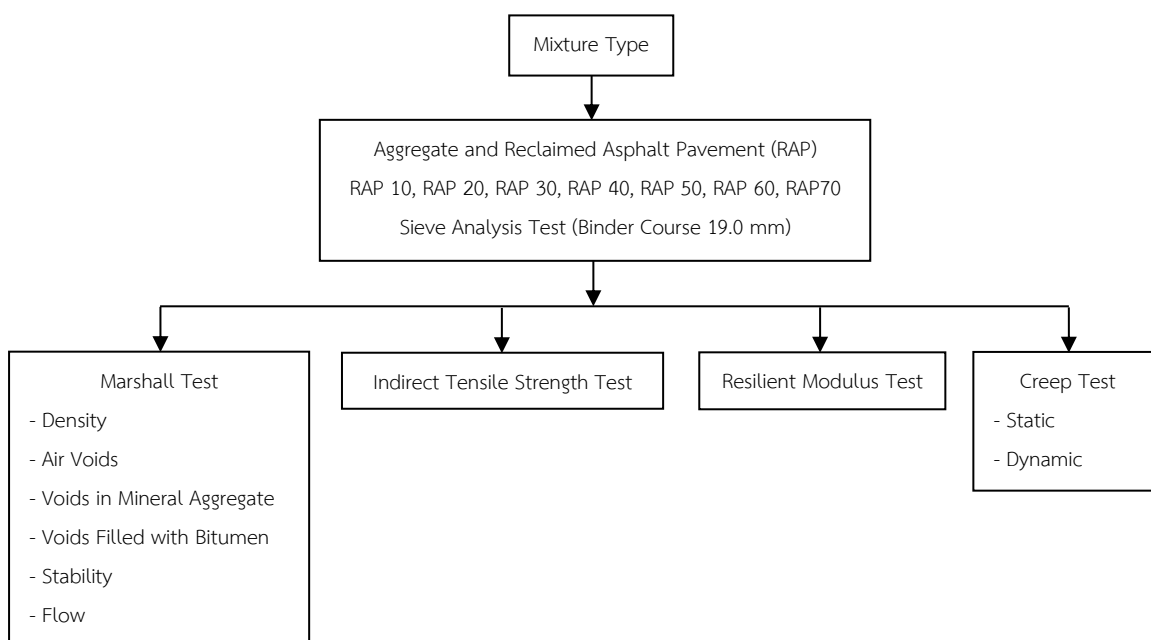
ขนาดที่ใช้เรียก มิลลิเมตร	19.0
(นิ้ว)	(3/4)
สำหรับชั้นทาง	Binder Course
ความหนา มิลลิเมตร	40 - 80
ขนาดตะแกรง	ปริมาณผ่านตะแกรง ร้อยละโดยมวล
1"	100
3/4"	90 - 100
1/2"	-
3/8"	56 - 80
#4	35 - 65
#8	23 - 49
#16	-
#30	-
#50	5 - 19
#100	-
#200	2 - 8

ทดสอบสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชลล์ (Marshall Test) [8] และใช้เกณฑ์กำหนดสำหรับชั้น Binder Course ขนาด 19.0 มิลลิเมตร [6]

การเตรียมก้อนตัวอย่างตามวิธีมาร์แชลล์ เพื่อให้หาขนาดผลที่เหมาะสมทั้ง 7 อัตราส่วนผสม เพื่อให้ได้ช่องว่างอากาศเท่ากับร้อยละ 4 ดังตารางที่ 3 โดยใช้ปริมาณแอสฟัลต์เท่ากับร้อยละ 5 โดยมวลของวัสดุรวม [8] และเตรียมตัวอย่างของอัตราส่วนผสมอย่างน้อย 3 ตัวอย่าง บดทับก้อนตัวอย่างที่ได้จากการผสมส่วนผสม โดยบดทับด้านละ 75 ครั้ง ที่อุณหภูมิส่วนผสม 150 องศาเซลเซียส เมื่อก้อนตัวอย่างเย็นลงแล้ว จึงดันก้อนตัวอย่างออกจากแบบ (Mold) ทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength Test) ทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus Test) และ ความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร (Creep) โดยใช้การทดสอบแบบ Dynamic Creep Test ตามแผนภาพดังรูปที่ 2

ตารางที่ 3 ข้อกำหนดในการออกแบบ Recycled Asphalt Concrete

ชั้นทาง		
รายการ		Binder Course
Blows		75
Stability Min	N	6672
	lb	(1500)
Flow 0.25 mm (0.01 in.)		8 - 16
Percent Air Voids		3 - 6
Percent Voids in Mineral Aggregate (VMA) Min.		13
Stability/Flow Min.		
	N/0.25 mm	556
	(lb/0.01 in.)	(125)
Percent Strength Index (Min.)		75



รูปที่ 2 แผนภาพขั้นตอนการทดสอบ

ทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength Test) อ้างอิงตามมาตรฐานวิธีทดสอบ AASHTO T 283 Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage

[9] และวิธีการทดสอบ ASTM D 4867 Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures [10] ใช้อัตราการป้อนน้ำหนักเพื่อให้เกิดการยุบตัวคงที่เท่ากับ 50 มิลลิเมตรต่อ

นาที่ จนกระทั่งตัวอย่างพังทลาย บันทึกค่าน้ำหนักสูงสุด โดยการทดสอบจะทำอุณหภูมิของก้อนตัวอย่างให้ได้ 35 องศาเซลเซียส ก่อนที่จะนำก้อนตัวอย่างติดตั้งในชุดทดสอบแรงดึงทางอ้อม ดังรูปที่ 3 แล้วทำการคำนวณค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม ดังสมการที่ 1

$$ITS = \frac{2P}{\pi DT} \quad (1)$$

เมื่อ ITS = ความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม,
กิโลปาสกาล (kPa)

P = ค่าน้ำหนักกดสูงสุด, นิวตัน (N)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของ
ตัวอย่าง, มิลลิเมตร (mm)

T = ความหนาเฉลี่ยของตัวอย่าง,
มิลลิเมตร (mm)



รูปที่ 3 การทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม

ทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus Test) อ้างอิงตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D 4123 Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures [11] และ AASHTO TP31-94 Standard Test Method for Determining the Resilient Modulus of Bituminous Mixtures by Indirect Tension [12] โดยก้อนตัวอย่างจะถูกจัดวางในเครื่องทดสอบในลักษณะเดียวกับการ

ทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม ค่าน้ำหนักกดที่ใช้ในการทดสอบจะมีค่าเท่ากับแรงที่ทำให้เกิดความต้านทานแรงดึงทางอ้อมร้อยละ 15 ของค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของก้อนตัวอย่าง

การติดตั้งก้อนตัวอย่างจะกระทำในลักษณะเดียวกันกับการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม แต่จะทำการติดตั้งอุปกรณ์ LVDTs (Linear Variable Differential Transducers) เพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างด้านข้างเพิ่มเข้าไปด้วย เพื่อให้สามารถนำมาใช้ประกอบการคำนวณค่าโมดูลัสคืนตัว ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 การทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว

การทดสอบจะให้น้ำหนักกดในลักษณะกระทำซ้ำ (Repeated Load) โดยใช้ความถี่ 1 Hz สัดส่วนช่วงเวลาน้ำหนัก (Load) ต่อช่วงเวลาลดน้ำหนัก (Unload) เท่ากับ 1 ต่อ 9 หรือก็คือในแต่ละครั้งใช้เวลา 1 วินาที โดยมีช่วงเวลาที่ทำการกดน้ำหนักเท่ากับ 0.1 วินาที รูปร่างของการกดน้ำหนักจะกำหนดให้เป็นรูป Haversine ซึ่งในมาตรฐานวิธีการทดสอบ ASTM D 4123 [11] ให้กระทำในช่วง 50-200 ครั้งของค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม สำหรับในการศึกษานี้ทดสอบจนกระทั่งถึงจำนวนครั้งของการกดน้ำหนักถึงรอบที่ 160

การเก็บรวบรวมข้อมูลและการคำนวณค่าโมดูลัสคืนตัวจะใช้โปรแกรมสำเร็จรูปควบคุมการทำงานของเครื่อง

CRT-NU14 ทำการคำนวณให้ โดยค่าโมดูลัสคืนตัวที่ต้องการจะเป็นค่าเฉลี่ย 4 ค่าสุดท้ายที่มีค่าการคืนตัวคงที่ (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ไม่เกินร้อยละ 2) ในแต่ละก้อนตัวอย่างที่แต่ละอุณหภูมิจะทำการทดสอบ 2 ทิศทางตามแนวของเส้นผ่านศูนย์กลางที่ตั้งฉากกัน แล้วนำมาเฉลี่ยจะทำให้ได้ค่าเฉลี่ยของโมดูลัสคืนตัวที่อุณหภูมินั้น ๆ

ในการคำนวณค่าโมดูลัสคืนตัวนั้นจำเป็นต้องใช้ค่าสัดส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio) ในการคำนวณ แต่เนื่องจากข้อจำกัดจากการวัดการเปลี่ยนแปลงรูปได้เพียงด้านข้างของเครื่องมือทดสอบ นอกจากนั้นค่าสัดส่วน ปัวซองจากการทดสอบโดยปกติจะมีค่าไม่แตกต่างกันนัก ค่าสัดส่วนปัวซอง 2 ค่า ที่มักได้รับการยอมรับใช้กันคือ 0.35 เมื่อทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 15 และ 25 องศาเซลเซียส และ 0.40 เมื่อทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 35 และ 45 องศาเซลเซียส ในการศึกษาครั้งนี้จึงกำหนดเลือกใช้ค่าสัดส่วนปัวซองที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสเท่ากับ 0.40

ความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร (Creep) เป็นการทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตเพื่อศึกษาสมรรถนะในการต้านทานต่อการเกิดความเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร โดยทำการทดสอบแบบ Dynamic Creep Test ซึ่งเป็นการทดสอบโดยการป้อนน้ำหนักตามแนวแกน (Axial Load) ในลักษณะกระทำซ้ำต่อกันตัวอย่าง สำหรับการศึกษานี้จะอ้างอิงและดัดแปลงวิธีการทดสอบจากมาตรฐานการทดสอบของประเทศไทย AS 2891.12.1-1995 “Determination of the permanent compressive strain characteristics of asphalt – Dynamic creep test” [13] การทดสอบจะทำการป้อนน้ำหนักแบบกระทำซ้ำขนาด 100 kPa ด้วยความถี่ 0.5 Hz แบ่งเป็นช่วงเวลาในการป้อนน้ำหนัก 0.5 วินาที และช่วงเวลาพัก 1.5 วินาทีที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 5

วิเคราะห์ผลพฤติกรรมทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีต ได้แก่ ความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม ค่าโมดูลัสคืนตัว ความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างถาวร (กรณี Static Creep และ Dynamic Creep) ตามขนาดคละที่แตกต่างกันของวัสดุผสมรวม [5] และใช้ RAP ผิวทางเดิม



รูปที่ 5 ความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างถาวร

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

3.1. ผลการออกแบบอัตราส่วนผสมของแอสฟัลต์คอนกรีตทั้ง 7 อัตราส่วนผสม โดยออกแบบอัตราส่วนผสมให้มีช่องว่างอากาศเท่ากับ ร้อยละ 4 และใช้ปริมาณแอสฟัลต์เท่ากับร้อยละ 5 โดยมวลของวัสดุผสมรวม [5] ดังตารางที่ 4

พฤติกรรมแอสฟัลต์คอนกรีตระหว่างที่ คลุกเคล้าส่วนผสมร้อนให้เข้ากันโดยควบคุมอุณหภูมิมีลักษณะเดียวกันกับการผสมร้อนของมวลรวม ผลการทดสอบสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ได้ทั้ง 6 ค่า ได้แก่ ความหนาแน่น ช่องว่างอากาศ ช่องว่างระหว่างวัสดุผสมรวม ช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ เสถียรภาพและค่าการไหล ตามขนาดคละที่แตกต่างกันของวัสดุผสมรวมและใช้ RAP ผิวทางเดิมอยู่ในข้อกำหนดของการออกแบบ Recycled Asphalt Concrete พิจารณาจากตารางที่ 3 พบว่า ปริมาณของ RAP ใดๆ ทำให้ค่าความหนาแน่นมีค่าใกล้เคียงกัน ถึงแม้ว่าค่ามวลรวมผสมของ RAP 50, RAP 60 และ RAP 70 ที่ขนาดตะแกรง 3/8” และวัสดุผสมรวมผสมที่ RAP 60 และ RAP 70 ที่ขนาดตะแกรงเบอร์ 200 จะมีค่าเกินกว่าเกณฑ์ข้อกำหนด ปริมาณ RAP

เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าเสถียรภาพมีค่าเพิ่มขึ้น ในทางกลับกัน ค่าการไหลจะมีค่าลดลง เนื่องมาจากวัสดุมวลรวมผสมที่มีปริมาณ RAP มาก จะมีระยะห่างระหว่างอนุภาคของวัสดุมวลรวมน้อย เพราะ RAP ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ไม่ผ่านกระบวนการคัดแยกขนาดและเป็นวัสดุที่มีขนาดเม็ดเล็กมีปริมาณผ่านตะแกรงมาก โดยปกติแล้ววัสดุมวลรวมที่มีลักษณะเม็ดเป็นเหลี่ยม ผิวหยาบขรุขระ จะให้ค่าเสถียรภาพที่สูง แต่มีข้อควรคำนึงถึงคือ ค่าเสถียรภาพที่สูงมากเกินไปจะทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตแข็งเกินไป ขาดความยืดหยุ่นซึ่งอาจทำให้ผิวทางเสียหายได้ [14]

พิจารณาขนาดคละของวัสดุมวลรวมที่มีมวลรวมผสมอยู่ภายในขีดจำกัดที่กำหนด โดยพิจารณาที่ตะแกรงขนาด 3/8" และเบอร์ 200 พบว่า ปริมาณ RAP 10 ถึง RAP 40 มีค่ามวลรวมผสมอยู่ในเกณฑ์ข้อกำหนดและผลการศึกษาสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตซึ่งมีค่าทั้ง 6 ค่าคือ ความ

หนาแน่น ช่องว่างอากาศ ช่องว่างระหว่างวัสดุมวลรวม ช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ เสถียรภาพ และค่าการไหล มีสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตสอดคล้องกับทฤษฎีคือ ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความหนาแน่นมากพอจะทำให้อายุการใช้งานยืนยาวและมีคุณภาพดี ผิวทางแอสฟัลต์ที่บดทับแล้วจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีความหนาแน่นช่องว่างอากาศที่เพียงพอ ปริมาตรช่องว่างทั้งหมดที่มีอยู่ระหว่างเม็ดของวัสดุมวลรวมในแอสฟัลต์คอนกรีตที่บดทับแล้ว ซึ่งรวมช่องว่างอากาศส่วนที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์มีปริมาณเพียงพอทำให้ฟิล์มแอสฟัลต์ที่ห่อหุ้มผิววัสดุมวลรวมหนาจะทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตมีความคงทนต่ออายุการใช้งานได้ยืนยาวและเสถียรภาพแสดงถึงความสามารถในการรับน้ำหนักการจราจร [14] ซึ่งสมบัติที่กล่าวถึงนี้อยู่ในเกณฑ์กำหนดตามขนาดคละของมวลรวมภายหลังการผสมและข้อกำหนดในการออกแบบ Recycled Asphalt Concrete [6]

ตารางที่ 4 ผลการออกแบบส่วนผสมของแอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP จำนวน 7 อัตราส่วนผสม

Sieve Sizes	Combined (% Passing)							
	RAP 10	RAP 20	RAP 30	RAP 40	RAP 50	RAP 60	RAP 70	Desired [6]
1"	100	100	100	100	100.0	100	100	100
3/4"	98.7	98.7	98.5	99.0	99.0	99.7		90 - 100
1/2"	85.6	85.5	82.9	87.1	88.2	95.9	96.7	-
3/8"	79.3	78.8	74.7	79.9	82.8	92.7	93.3	56 - 80
#4	42.3	41.1	40.9	42.4	43.5	49.1	54.7	35 - 65
#8	23.7	23.3	24.1	25.0	25.9	29.4	34.2	23 - 49
#16	15.2	15.2	16.1	17.0	17.9	20.4	23.7	-
#30	10.3	10.6	11.4	12.2	13.1	15.0	17.5	-
#50	7.8	8.1	8.9	9.6	10.3	11.9	13.9	5 - 19
#100	6.1	6.4	7.1	7.8	8.5	9.8	11.4	-
#200	4.5	5.0	5.8	6.5	7.2	8.4	9.8	2 - 8
MIX PROPORTION	RAP	10	20	30	40	50	60	70
	BIN 1	28	20	14	8	2	0	0
	BIN 2	40	38	30	32	32	35	26
	BIN 3	10	10	12	10	6	2	2
	BIN 4	12	12	14	10	10	3	2
Marshall Test	RAP 10	RAP 20	RAP 30	RAP 40	RAP 50	RAP 60	RAP 70	Specification
Density	2.402	2.402	2.401	2.397	2.400	2.398	2.397	2.391-2.409

ตารางที่ 4 ผลการออกแบบส่วนผสมของแอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP จำนวน 7 อัตราส่วนผสม (ต่อ)

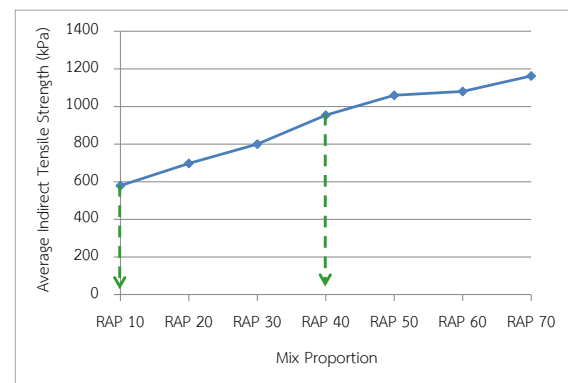
Marshall Test	RAP 10	RAP 20	RAP 30	RAP 40	RAP 50	RAP 60	RAP 70	Specification
Air Voids	3.9	3.9	3.9	4.0	3.9	3.9	3.9	3.3-4.7
VMA	14.6	14.6	14.6	14.7	14.6	14.6	14.6	>13
VFB	73.3	73.3	73.3	72.8	73.3	73.3	73.3	68-78
Stability	2,260	2,290	2,320	2,310	2,290	2,370	2,520	>1900
Flow	15	13	12	12	10	9	11	10-12

3.2. ผลของความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของแอสฟัลต์คอนกรีตทั้ง 7 อัตราส่วนผสม เมื่อใช้ปริมาณ RAP เท่ากับร้อยละ 10, 20, 30, 40, 50, 60 และ 70 โดยมวลของวัสดุรวม

พิจารณาจากรูปที่ 6 ความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของแอสฟัลต์คอนกรีตทั้ง 7 อัตราส่วนผสมนั้นพบว่า เมื่อใช้ปริมาณ RAP เพิ่มมากขึ้นเป็นการเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดวัสดุรวมในส่วนผสมในลักษณะที่คละกัณฑ์ กระบวนการรีไซเคิลโดยวิธีตัดแบบเย็น [6] มีผลต่อขนาดคละของ RAP ทำให้ความละเอียดมากขึ้นกว่าเดิม โดยเฉพาะปริมาณฝุ่นที่ตะแกรงเบอร์ 200 มากขึ้น ทั้งนี้ปริมาณส่วนละเอียดที่มากขึ้นจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสของมวลรวมมากขึ้น ที่ปริมาณแอสฟัลต์คงเดิมจะส่งผลให้การยึดเกาะระหว่างอนุภาคของเม็ดลดลง ทำให้ค่าความหนาแน่นมีแนวโน้มลดลง จึงไม่สามารถใช้ปริมาณร้อยละของ RAP ในปริมาณที่มากขึ้นได้ เพราะทำให้มวลรวมผสมไม่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน [5] และค่ามวลรวมผสมของ RAP 50, RAP 60 และ RAP 70 ที่ขนาดตะแกรง 3/8" และวัสดุรวมผสมที่ RAP 60 และ RAP 70 ที่ขนาดตะแกรงเบอร์ 200 จะมีค่าเกินกว่าเกณฑ์ข้อกำหนด ดังนั้นควรพิจารณาขนาดคละของวัสดุรวมที่มีมวลรวมผสมอยู่ภายในขีดจำกัดที่กำหนด โดยพิจารณาที่ตะแกรงขนาด 3/8" พบว่า ปริมาณที่ RAP 10 ถึง RAP 40 อยู่ในเกณฑ์ข้อกำหนด [5] ถึงแม้ว่าค่าเสถียรภาพจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและการต้านทานการไหลมีแนวโน้มลดลงก็ตาม

ผลการเปรียบเทียบค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมเมื่อมีปริมาณ RAP ต่างกัน ปรากฏว่า ปริมาณที่

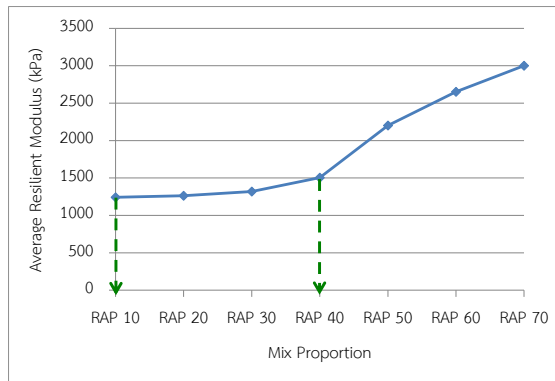
RAP 10 ถึง RAP 40 มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมอยู่ในช่วง 579.4 ถึง 953.7 kPa ดังรูปที่ 6



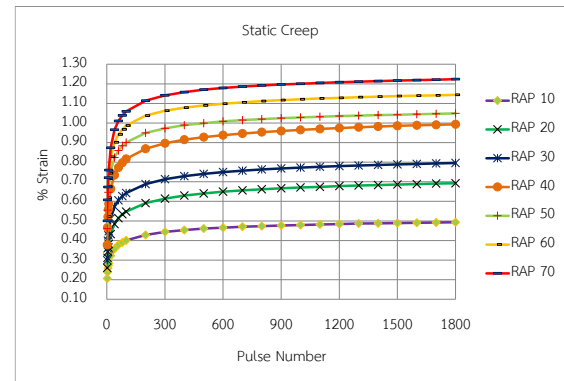
รูปที่ 6 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมอัตราส่วนผสมที่ปริมาณ RAP ต่างกัน

3.3. ผลค่าโมดูลัสคั้นตัวของแอสฟัลต์คอนกรีตทั้ง 7 อัตราส่วนผสม และปริมาณ RAP ที่ต่างกัน

พิจารณาจากรูปที่ 7 ค่าโมดูลัสคั้นตัวของแอสฟัลต์คอนกรีตทั้ง 7 อัตราส่วนผสมนั้นพบว่า เมื่อใช้ปริมาณของ RAP เพิ่มขึ้นเป็นการเพิ่มความต้านทานแรงเฉือนให้กับแอสฟัลต์ซีเมนต์และเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุเม็ดรวมในส่วนผสมสามารถให้ค่าโมดูลัสคั้นตัวเพิ่มขึ้น ผลการเปรียบเทียบค่าโมดูลัสคั้นตัวของแอสฟัลต์คอนกรีตเมื่อมีปริมาณ RAP ต่างกัน ปรากฏว่า ปริมาณที่ RAP 10 ถึง RAP 40 [5] มีค่าโมดูลัสคั้นตัวอยู่ในช่วง 1,242.0 ถึง 1,504.1 kPa ดังรูปที่ 7



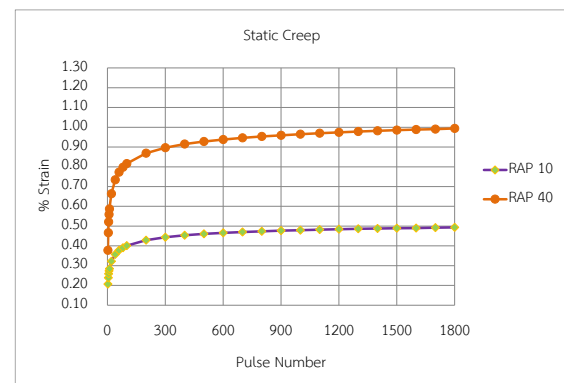
รูปที่ 7 ค่าโมดูลัสคืนตัวอัตราส่วนผสมที่ปริมาณ RAP ต่างกัน



รูปที่ 8 ความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร กรณี Static Creep อัตราส่วนผสมที่ปริมาณ RAP ต่างกัน

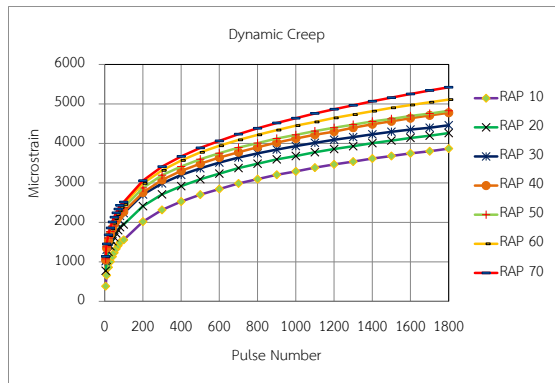
3.4. ผลความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร

พิจารณาจากรูปที่ 8 ความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร กรณี Static Creep ของแอสฟัลต์คอนกรีตทั้ง 7 อัตราส่วนผสมนั้น พบว่า เมื่อใช้ปริมาณของ RAP เพิ่มขึ้น จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรเพิ่มขึ้น เช่น RAP 70 แสดงถึงส่วนผสมที่มีโอกาสที่จะเกิดความเสียหายได้มากที่สุด และเมื่อใช้ปริมาณของ RAP ลดลง จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรลดลงเช่นกัน เช่น RAP 60, RAP 50, RAP 40, RAP 30, RAP 20 และ RAP 10 ตามลำดับ ดังนั้น แอสฟัลต์คอนกรีตที่มีอัตราส่วนของ RAP ผสมอยู่น้อยจะมีค่าความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรที่มากกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีอัตราส่วนผสมของ RAP ในปริมาณที่มาก ซึ่งแอสฟัลต์คอนกรีตที่ RAP 10 มีค่าความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรมากที่สุด และค่าความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรจะมีค่าลดลงตามอัตราส่วนผสมที่มี RAP มากขึ้น ตามลำดับ กรณี Static Creep มีค่า Strain อยู่ในช่วงร้อยละ 0.4935 ถึง 0.9938 ดังรูปที่ 9

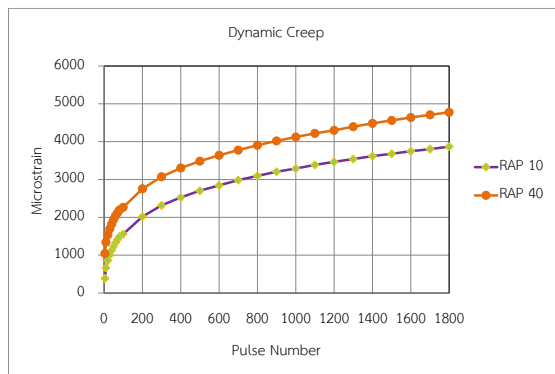


รูปที่ 9 ความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร กรณี Static Creep อัตราส่วนผสมที่ปริมาณ RAP 10 ถึง RAP 40

พิจารณาจากรูปที่ 10 ความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร กรณี Dynamic Creep ของแอสฟัลต์คอนกรีตทั้ง 7 อัตราส่วนผสมนั้นจะเป็นไปตามลักษณะเดียวกันกับกรณี Static Creep พบว่า เมื่อใช้ปริมาณของ RAP เพิ่มขึ้น จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรเพิ่มขึ้น ความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร กรณี Dynamic Creep มีค่า Strain อยู่ในช่วง 3,870 ถึง 4,774 ไมโครสเตรน ดังรูปที่ 11



รูปที่ 10 ความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างถาวร กรณี Dynamic Creep อัตราส่วนผสมที่ปริมาณ RAP ต่างกัน



รูปที่ 11 ความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างถาวร กรณี Dynamic Creep อัตราส่วนผสมที่ปริมาณ RAP 10 ถึง RAP 40

4. สรุป

จากการออกแบบอัตราส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปริมาณ RAP ต่างกัน โดยการกำหนดอัตราส่วนผสมให้ขนาดผลของวัสดุผสมอยู่ในขีดจำกัดที่กำหนดตามมาตรฐานที่ ทล.-ม. 408/2532 [15] ของกรมทางหลวง และ RAP ตามมาตรฐานของกรมทางหลวงที่ ทล.ม.-410/2542 และทำการเปรียบเทียบอัตราส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตโดยการศึกษาเกี่ยวกับวัสดุผสม 1 แหล่งคือ โครงการฯ ตาก-ลำปาง ตอน 1 (ส่วนที่ 1) สามารถสรุปผลการศึกษาดังนี้

การเลือกปริมาณ RAP ที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วงร้อยละ 10 ถึง 40 ของอัตราส่วนผสม [5] พบว่า ค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมมีแนวโน้มสอดคล้องกับค่าโมดูลัสคืนตัวที่ทดสอบได้ในลักษณะเดียวกัน ค่าความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างถาวร กรณี Static Creep และกรณี Dynamic Creep ที่ปริมาณ RAP ต่างกัน สรุปได้ว่า มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเพิ่มขึ้น

การนำวัสดุชั้นผิวทางเดิมหมุนเวียนเพื่อใช้งานใหม่ (RAP) ไม่คัดแยกขนาดในงานผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตนี้สามารถกำหนดปริมาณ RAP อยู่ในช่วงร้อยละ 10 ถึง 40 ของมวลรวม ซึ่งเป็นปริมาณ RAP และมีสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตได้ตามเกณฑ์มาตรฐานของชั้น Binder Course ซึ่งสามารถยอมรับได้ และปริมาณของวัสดุชั้นผิวทางเดิมหมุนเวียนที่เหมาะสมที่สุดต่อการนำไปใช้งานเท่ากับร้อยละ 40 ของมวลรวม ทั้งนี้เพื่อให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ และข้อมูลนี้ใช้เฉพาะกรณีของทางหลวงหมายเลข 106 ตอนอ.เถิน - อ.ลี้ เท่านั้น เนื่องจากเป็น

การใช้ RAP ที่ไม่คัดแยกขนาด หากผู้ออกแบบจะศึกษาในสายทางอื่นๆ ควรทำการทดสอบและเปรียบเทียบผลว่ามีลักษณะที่เหมือนหรือแตกต่างกันอย่างไร ข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการศึกษาเพื่อเป็นแนวทางต่อผู้ออกแบบในการพิจารณาเลือกขนาดผลของวัสดุผสม [5]

ในกรณีที่ RAP มีมวลรวมผสมเกินขีดจำกัดที่กำหนด ควรทำการคัดแยกขนาดของวัสดุผสมส่วนที่ค้างตะแกรงที่มีช่องผ่านเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 22.225 มิลลิเมตร (7/8 นิ้ว) ทั้ง และใช้ตะแกรงที่มีช่องเปิดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 9.525 มิลลิเมตร (3/8 นิ้ว) เพื่อแยกขนาดผลของวัสดุผสมส่วนที่ผ่านตะแกรงทิ้งแล้ว ศึกษาคุณสมบัติของแอสฟัลต์เป็นไปตามข้อกำหนดของสูตรส่วนผสมเฉพาะงาน Asphalt Hot-Mix Recycling [5]

นอกจากนั้นควรศึกษาพฤติกรรมทางด้านความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม ค่าโมดูลัสการคืนตัว และความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร ในกรณีที่ใช้ RAP แบบคัดแยกขนาด ประกอบการพิจารณาเลือกใช้ปริมาณ RAP ให้สามารถใช้วัสดุชั้นผิวทางเดิมหมุนเวียนเพื่อใช้งานใหม่ได้อย่างคุ้มค่าและเหมาะสมต่อไป

5. ข้อเสนอแนะ

การให้ความร้อนของวัสดุทั้ง 3 ชนิด ควรแยกส่วนให้ความร้อนก่อนทั้ง RAP วัสดุมวลรวม และแอสฟัลต์ซีเมนต์ แล้วจึงผสมกันในภาชนะผสม

6. กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้เป็นส่วนหนึ่งในการวิจัยเรื่องการศึกษาเชิงทดลองของแอสฟัลต์คอนกรีตที่เปลี่ยนแปลงปริมาณวัสดุชั้นผิวทางเดิมหมุนเวียนเพื่อใช้งานใหม่ ซึ่งได้รับทุนสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชมงคลธัญบุรี เงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2558 ผ่านการพิจารณาโดยสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Office of Highways 8 (Nakhon Ratchasima), Department of Highways, (2016, March 26). Rehabilitation of Pavement In-Place Recycling by Foam Asphalt for Additive Materials [Online]. Available: <http://www.doh.go.th/web/hwyorg61000/In-Place%20Recycling.htm>
- [2] K. Su, Y. Hachiya and R. Maekawa, "Study on recycled asphalt concrete for use in surface course in airport pavement," *Resources*

Conservation and Recycling, vol. 54, pp. 37-44, 2009.

- [3] F. Xiao, S. N. Amirkhanian, J. Shen and B. Pytman, "Influences of crumb rubber size and type on reclaimed asphalt pavement (RAP) mixtures," *Construction and Building Materials*, vol. 23, pp. 1028-1034, 2009.
- [4] G. Valde's, F. Perez-Jimenez, R. Miro, A. Martinez and R. Botella, "Experimental study of recycled asphalt mixtures with high percentages of reclaimed asphalt pavement (RAP)," *Construction and Building Materials*, vol. 25, pp. 1289-1297, 2011.
- [5] N. Nokkaew and D. Parakul, "Physical Properties of Asphalt Concrete by Marshall Test Using Different Reclaimed Asphalt Pavement Content," *Srinakharinwirot Engineering Journal*, vol. 11, no. 1, pp. 28-37, January-June, 2016.
- [6] Asphalt Hot-Mix Recycling, Standard No. DH-S 410/1995.
- [7] Test for Gradation of Aggregate by Dry Sieve Analysis, Test Number DH-T 204/1973.
- [8] Test for Asphaltic Concrete by Marshall, Test Number DH-T 604/1974.
- [9] AASHTO T 283, Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage, 2014.
- [10] ASTM D 4867, Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.

- [11] ASTM D4123-82, Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures, West Conshohocken, PA, American Society for Testing and Materials, 1995.
- [12] AASHTO-TP31, Standard Test Method for Determining the Resilient Modulus of Bituminous Mixtures by Indirect Tension, 1996.
- [13] AS 2891.12.1-1995, Methods of sampling and testing asphalt-Determination of the permanent compressive strain characteristics of asphalt-Dynamic creep test, Australian Standards, 1995.
- [14] N. Nokkaew, *Highway Materials Testing*. 4th ed. Bangkok: Technology Promotion Association (Thailand-Japan), 2016.
- [15] Asphalt Concrete or Hot-Mix Asphalt, Standard No. DH-S 408/1989.

การประยุกต์ใช้การปรับสภาพผิวโดยการยิงอนุภาคแข็งเพื่อปรับปรุง
ความต้านทานการสึกหรอบนเบ็ดตัดในกระบวนการรีดความหนา
ผนังถ้วยอะลูมิเนียม

Application of Surface Modification by Shot Peening for Improving
Adhesive Wear Resistance in Ironing of Aluminum Alloy Cup

วิทยา ดาวดอน* สุรัตน์ วรรณศรี สุเชษฐ์ ช้อนกลิ่น รุ่งวสันต์ ไกรกลาง นรารักษ์ บุตรชา

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

Witthaya Daodon* Surat Wannasri Surachade Sonklin Rungwasun Kraiklang Nararak Budchar

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala

University of Technology Isan, 744 Suranarai Rd., Muang, Nakhon Ratchasima, 30000

*Corresponding author Email: witthaya.da@rmuti.ac.th

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

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงความต้านทานการสึกหรอบนเบ็ดตัดในกระบวนการรีดความหนาผนังถ้วยอะลูมิเนียมโดยใช้การปรับสภาพผิวแม่พิมพ์ด้วยการยิงอนุภาคแข็ง และการขัดผิวตามหลัง แม่พิมพ์รีดความหนาผนังถูกสร้างจากวัสดุไททาเนียมคาร์ไบด์เรซินเคลือบและมีการปรับสภาพผิวที่ต่างกัน 3 สภาวะ คือ ผิวขัดมัน ผิวยิงอนุภาคแข็งแล้วขัดมันให้มี $R_a = 0.08 \sim 0.10 \mu m$ และผิวยิงอนุภาคแข็งแล้วขัดมันให้มี $R_a = 0.14 \sim 0.18 \mu m$ วัสดุชิ้นงาน คือ แผ่นอะลูมิเนียมผสมเกรด A3003-O แผ่นอะลูมิเนียมถูกเตรียมเป็นชิ้นงานถ้วยด้วยกระบวนการลากขึ้นรูปลึกก่อนการรีดความหนาผนัง น้ำมันหล่อลื่นถูกทาไปบนผิวของแม่พิมพ์และผิวของถ้วย อัตราการรีดความหนาผนังถูกเปลี่ยนเพื่อเร่งการเกิดการสึกหรอบนเบ็ดตัด จากการทดลองพบว่า เมื่อเปรียบเทียบกับแม่พิมพ์ผิวขัดมัน แม่พิมพ์ผิวยิงอนุภาคแข็งแล้วขัดมันที่มี $R_a = 0.08 \sim 0.10 \mu m$ ประสบความสำเร็จในการรีดความหนาผนังถ้วยที่อัตราการรีดความหนาผนังสูงโดยปราศจากการยึดติดของเนื้ออะลูมิเนียมบนผิวของแม่พิมพ์ ความต้านทานการสึกหรอบนเบ็ดตัดถูกปรับปรุงเนื่องจากหลุมขนาดเล็กที่กระจายบนผิวขรุขระที่ถูกสร้างจากการยิงอนุภาคแข็งช่วยกักเก็บและจ่ายน้ำมันหล่อลื่นไปยังผิวแม่พิมพ์และถ้วยระหว่างการขึ้นรูป

คำสำคัญ: การรีดความหนาผนังถ้วย ถ้วยอะลูมิเนียม การต้านทานการสึกหรอบนเบ็ดตัด การยิงอนุภาคแข็ง
ไททาเนียมคาร์ไบด์เรซินเคลือบ

ABSTRACT

The aim of this research is to improve adhesive wear resistance in ironing of aluminum alloy cups by utilizing modification of the die surface with shot peening and post-polishing. The dies were

made of TiCN-based cermet with three different surface conditions, polished, shot-peened ($R_a = 0.08 \sim 0.10 \mu\text{m}$) and shot-peened ($R_a = 0.14 \sim 0.18 \mu\text{m}$) surfaces. Workpiece material was aluminum alloy A3003-O sheets. The aluminum alloy sheets were formed into cups by a deep drawing process. Before ironing, liquid lubricant was applied onto the die and cup surfaces. The ironing ratio was changed to accelerate occurrence of adhesive wear. The results showed that comparing to the smooth polished die, the shot-peened die ($R_a = 0.08 \sim 0.10 \mu\text{m}$) succeeded in ironing cups at a high ironing ratio without adhesion of the cup material on the die. The adhesive wear resistance was improved because dimples on the surface structured by shot peening helped retaining and supplying the lubricant into the die-cup interface during the ironing.

Keyword: Cup ironing, aluminum alloy cup, adhesive wear resistance, shot peening, TiCN-based cermet.

1. บทนำ

อลูมิเนียมเป็นวัสดุน้ำหนักเบาที่ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ อุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ และ อุตสาหกรรมการผลิตบรรจุภัณฑ์อาหารและเครื่องดื่ม เป็นต้น [1] อย่างไรก็ตาม การผลิตชิ้นส่วนจากอลูมิเนียมยังคงประสบปัญหาการสึกหรอแบบยึดติด (Adhesive Wear) ของเนื้อวัสดุชิ้นงานไปบนผิวของแม่พิมพ์ซึ่งนำไปสู่การเกิดรอยขีดข่วน (Galling) เป็นร่องลึกบนผิวของผลิตภัณฑ์ [2] เพื่อเป็นการป้องกันปัญหาดังกล่าว สารหล่อลื่นจึงถูกใช้กันโดยทั่วไปในกระบวนการขึ้นรูปโลหะ [3]

ระบบการหล่อลื่นแบบใช้น้ำมัน ลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานมีอิทธิพลต่อความสามารถในการหล่อลื่น โดยลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานที่หยาบจะมีหลุมขนาดเล็กที่สามารถช่วยกักเก็บและจ่ายน้ำมันหล่อลื่น ซึ่งก่อให้เกิดฟิล์มบางของสารหล่อลื่นคั่นระหว่างผิวสัมผัสส่งผลให้ความสามารถในการหล่อลื่นดีขึ้น กลไกการหล่อลื่นดังกล่าวถูกเสนอและกำหนดชื่อว่า การหล่อลื่นแบบไมโคร-พลาสโตไฮโดรไดนามิกส์ (Micro-plasto-hydrodynamic Lubrication) [4] เวลาต่อมา กลไกการหล่อลื่นแบบไมโคร-พลาสโตไฮโดรไดนามิกส์ถูกพิสูจน์ในการทดสอบลากขึ้นรูปเย็น โดยใช้กล้องจุลทรรศน์สังเกต

โดยตรงไปที่ผิวสัมผัสระหว่างเครื่องมือและชิ้นงานผ่านแม่พิมพ์โปร่งใส [5, 6] อัตราการลดความหนา ความเร็วการลากขึ้นรูป และความหนืดของสารหล่อลื่นมีอิทธิพลต่อการกระจายของสารหล่อลื่นออกจากหลุมขนาดเล็กบนพื้นผิวของชิ้นงาน [7]

เนื่องจากหลุมขนาดเล็กบนพื้นผิวสามารถกักเก็บน้ำมันและเพิ่มการหล่อลื่น จึงมีการพัฒนาการสร้างหลุมขนาดเล็กบนแผ่นชิ้นงานเพื่อปรับปรุงเงื่อนไขทางไดรบบอลยี (Tribology) ของกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น [8] Electron Beam Texturing ถูกใช้สร้างหลุมขนาดเล็กบนผิวของลูกรีด (Roller) ระหว่างกระบวนการรีด (Rolling) ลักษณะพื้นผิวของลูกรีดจะถูกส่งถ่ายไปบนพื้นผิวของโลหะแผ่น จากการนำโลหะแผ่นดังกล่าวไปใช้ในกระบวนการลากขึ้นรูปลึก พบว่า ความเสียหายลดลงเมื่อความเร็วการลากขึ้นรูปเพิ่มขึ้น [9] สมรรถนะการหล่อลื่นในกระบวนการรีดลดความหนาผนัง และในกระบวนการลากขึ้นรูปลึกแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมถูกปรับปรุงโดยการสร้างหลุมขนาดเล็กบนแผ่นชิ้นงาน [10] อย่างไรก็ตาม ในกระบวนการขึ้นรูปที่ชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนรูปมาก หลุมขนาดเล็กบนผิวชิ้นงานจะเสียรูปจนไม่สามารถทำหน้าที่กักเก็บน้ำมันเพื่อเพิ่มการหล่อลื่นได้

ตรงกันข้าม ผิวของเครื่องมือหรือแม่พิมพ์มีความแข็งแรง และความแข็งแรงสูง ไม่ค่อยเปลี่ยนรูปมากนัก ดังนั้น

ปีที่ 13 ฉบับที่ 3 เดือน กันยายน – ธันวาคม พ.ศ. 2561

การสร้างหลุมขนาดเล็กบนผิวของแม่พิมพ์ สามารถช่วยการหล่อลื่นได้แม้จะมีการใช้งานที่ยาวนาน ในกระบวนการชุบขึ้นรูปเย็น (Cold Forging) หลุมขนาดเล็กถูกสร้างขึ้นบนผิวของพunch (Punch) หลุมขนาดเล็กดังกล่าวทำหน้าที่กักเก็บ และป้อนน้ำมันเข้าสู่ผิวสัมผัสของพunch และชิ้นงานทำให้การสึกหรอของพunch ลดลง และอายุการใช้งานของพunch ยาวนานขึ้น [11, 12] ปัจจุบันเพื่อลดการสึกหรอของเครื่องมือหรือแม่พิมพ์ ผิวเคลือบแข็ง (Hard Coating) ถูกนำมาประยุกต์ใช้ ในการจำลองการสึกหรอบนเครื่อง Tribometer ด้วยวิธี Ball-on-disc พบว่า เหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น SKD11 ที่เคลือบด้วยไททาเนียมคาร์ไบด์ (TiCN) ซึ่งมีค่าความแข็งสูงสุด มีอัตราการสึกหรอน้อยกว่าเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นที่เคลือบด้วยไททาเนียมอลูมิเนียมไนไตรด์ (TiAlN) และไททาเนียมไนไตรด์ (TiN) [13] ผิวเคลือบแข็งชนิดต่างๆ ถูกนำไปใช้เคลือบพunch SKD11 ในงานปั๊มตัดเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ JIS-SPCC จากการทดสอบการสึกหรอด้วยแม่พิมพ์ตัด พบว่า การใช้ผิวเคลือบแข็งที่มีความแข็งสูงส่งผลให้ระยะการสึกหรอที่ด้านข้างของพunch ลดลง [14] Basnyat และคณะ [15] สร้างหลุมขนาดเล็กบนพื้นผิวของผิวเคลือบไททาเนียมอลูมิเนียมคาร์ไบด์ (TiAlCN) โดยภายในหลุมขนาดเล็กมีสารหล่อลื่นชนิดของแข็ง (Solid Lubricants) กักเก็บอยู่ จากการศึกษากฎธรรมชาติทางด้านไดรฟ์ไฮดรอลิก พบว่า ความเสียดทานลดลงอย่างมากเนื่องจากหลุมขนาดเล็กทำหน้าที่เป็นแหล่งกักเก็บ และจ่ายสารหล่อลื่นชนิดของแข็งไปยังผิวหน้าของวัสดุคู่สัมผัส

การสร้างหลุมขนาดเล็กบนผิวของชิ้นงานสามารถทำได้โดยกระบวนการเหล่านี้ เช่น Shot Peening, Electro Discharge Machining (EDM), Laser Texturing, Electron Beam Texturing และ Electro-Chemical Etching เป็นต้น [3] การยิงอนุภาคแข็ง (Shot Peening) คือ กระบวนการขึ้นรูปเย็น (Cold Working) ชนิดหนึ่ง ซึ่งอนุภาคแข็งรูปร่างทรงกลมขนาดเล็กถูกยิงไปที่ผิวของโลหะด้วยความเร็วสูง ซึ่งส่งผลให้เกิดหลุมขนาดเล็กบริเวณผิวชิ้นงาน และช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุ

การยิงอนุภาคแข็งถูกนำไปใช้สำหรับการปรับสภาพผิววัสดุฝังในทางการแพทย์ เช่น เหล็กตามกระดูก การยิงอนุภาคแข็งส่งผลให้ความเสียดทานลดลง วัสดุมีความแข็งแรงทนทานต่อการเปลี่ยนรูปมากขึ้น ทำให้สามารถผลิตเหล็กตามกระดูกที่มีขนาดบางลง และมีน้ำหนักเบา [16] สำหรับกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น ในการทดสอบลากขึ้นรูปเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง การปรับสภาพผิวแม่พิมพ์โดยใช้การยิงอนุภาคแข็ง (Shot Peening) และไนไตรดิง (Nitriding) ปรับปรุงการต้านทานการเกิดรอยขีดข่วน (Galling Resistance) เนื่องจากความสามารถของการหล่อลื่นเพิ่มขึ้น [17] ซึ่งจะเห็นได้ว่า การปรับปรุงผิวแม่พิมพ์โดยใช้การยิงอนุภาคแข็งสร้างหลุมกักเก็บน้ำมันขนาดเล็กช่วยเพิ่มความสามารถการหล่อลื่นในงานขึ้นรูปโลหะ

ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงสนใจประยุกต์ใช้การปรับสภาพผิวแม่พิมพ์โดยการยิงอนุภาคแข็งเพื่อปรับปรุงความต้านทานการสึกหรอแบบยึดติดในกระบวนการรีดลดความหนาผนังถ้วยอะลูมิเนียม

2. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1. วัสดุแม่พิมพ์และวัสดุชิ้นงาน

การศึกษานี้ประกอบด้วยสองกระบวนการขึ้นรูป คือ กระบวนการลากขึ้นรูปลึกสำหรับเตรียมชิ้นงานถ้วย และกระบวนการรีดลดความหนาผนังสำหรับประเมินความสามารถการต้านทานการสึกหรอแบบยึดติด แม่พิมพ์ลากขึ้นรูปลึก (Deep Drawing Die) และพunch (Punch) ที่ผลิตจากเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น JIS SKD11 ผ่านการอบชุบให้มีความแข็ง 60 ± 1 HRC และผ่านการขัดมันให้มีค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Arithmetic Mean Roughness; R_a) $0.02 \mu\text{m}$ วัสดุชิ้นงานคือ แผ่นอลูมิเนียมผสมเกรด A3003-O เส้นผ่านศูนย์กลาง 66 มิลลิเมตร หนา 0.6 มิลลิเมตร ที่มีสมบัติทางกลดังแสดงในตารางที่ 1 แม่พิมพ์รีดลดความหนาผนังทำจากวัสดุไททาเนียมคาร์ไบด์เบสเซอร์เมท (TiCN-based Cermets) มีความแข็ง 1150 HV น้ำมันแร่ปราศจากสารเติมแต่งซึ่งมีความหนืด (Kinematic

Viscosity) $562 \text{ mm}^2/\text{s}$ ถูกใช้สำหรับหล่อขึ้นรูป

ตารางที่ 1 สมบัติทางกลของแผ่นอะลูมิเนียมผสมเกรด A3003-O

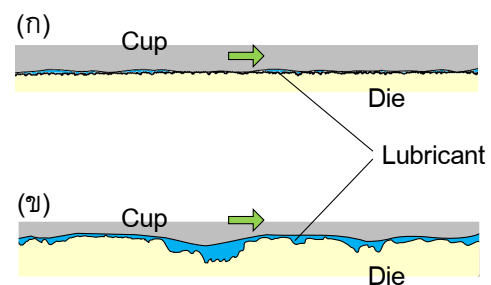
Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (HV)	Surface roughness, R_a (μm)
106	26.8	31	0.22

2.2. การปรับสภาพผิวแม่พิมพ์

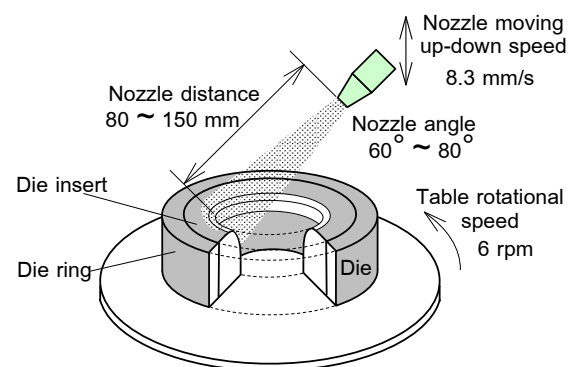
กลไกการหล่อขึ้นรูประหว่างผิวถ้วยและผิวแม่พิมพ์มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 1 ในการรีดลดความหนาผนัง ความหนาผนังด้านข้างของถ้วยถูกรีดให้บางลงด้วยช่องว่างระหว่างแม่พิมพ์ (Die Clearance) ที่เล็กกว่าความหนาเริ่มต้นของแผ่นชิ้นงาน ดังนั้นแรงดันสัมผัส (Contact Pressure) ระหว่างผิวถ้วยและผิวแม่พิมพ์มีค่าสูง เมื่อผิวทั้งสองสัมผัสกันโดยตรง การสึกหรอแบบยึดติดจะเกิดขึ้น โดยทั่วไปการป้องกันการสึกหรอแบบยึดติด ผิวแม่พิมพ์จะถูกขัดมันให้เรียบและถูกหล่อลื่นด้วยน้ำมัน แต่อย่างไรก็ตาม บนแม่พิมพ์ผิวขัดมันน้ำมันหล่อลื่นจะถูกกวาดออกจากผิวสัมผัสได้ง่าย ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 1 (ก) บนแม่พิมพ์ผิวยิงอนุภาคแข็งแล้วตามด้วยการขัดมัน น้ำมันหล่อลื่นถูกกักเก็บในหลุมบนผิวขรุขระและถูกป้อนเข้าสู่ผิวสัมผัสซึ่งส่งผลให้ความสามารถการหล่อขึ้นเพิ่มขึ้น (รูปที่ 1 ข) ด้วยกลไกการหล่อขึ้นดังที่กล่าวมาในงานวิจัยนี้ หลุมขนาดเล็กจึงถูกสร้างบนพื้นผิวแม่พิมพ์ด้วยกระบวนการยิงอนุภาคแข็ง

แม่พิมพ์รีดลดความหนาผนังประกอบด้วยตัวเรือน (Die Ring) และดาวยินเสริท (Die Insert) ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 2 ดาวยินเสริทนี้ทำจากวัสดุไททาเนียมคาร์ไบด์ ไบโนไตรเบสเซอร์เมท และถูกปรับสภาพผิวด้วยการยิงอนุภาคแข็ง แล้วตามด้วยการขัดมันให้มีค่าความหยาบผิวเฉลี่ย R_a ค่าต่างๆ ผิวขัดมันซึ่งมีความหยาบผิวต่ำ $R_a = 0.02 \mu\text{m}$ ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 3 (ก) ถูกใช้เป็นผิว

อ้างอิงสำหรับการเปรียบเทียบ เบื้องต้น การปรับสภาพผิวด้วยการยิงอนุภาคแข็งถูกเตรียมจากภาคอุตสาหกรรม ซึ่งประกอบด้วย 3 ขั้นตอนของการเตรียม คือ ขั้นแรกการยิงสร้างผิวหยาบด้วยอนุภาคอะลูมินา (Alumina Particle) ขั้นที่สองและสาม การยิงลบปลายแหลมของผิวหยาบด้วยอนุภาคแก้ว (Glass Bead) และอนุภาคคาร์ไบด์ (Hard Carbide Particle) ตามลำดับ กระบวนการยิงอนุภาคแข็งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2 อนุภาคแข็งขนาดเล็กถูกยิงออกจากหัวยิงอนุภาค (Nozzle) โดยแรงดันลม ระยะระหว่างหัวยิงอนุภาคและแม่พิมพ์ คือ $80 \sim 150 \text{ mm}$ เพื่อยิงอนุภาคไปยังผิวด้านในของแม่พิมพ์ หัวยิงอนุภาคเคลื่อนที่ขึ้น-ลง ด้วยความเร็ว 8.3 mm/s พร้อมกับปรับมุมระหว่าง $60^\circ \sim 80^\circ$ กับแนวระดับ ในขณะเดียวกันแม่พิมพ์หมุนด้วยความเร็วรอบ 6 rpm



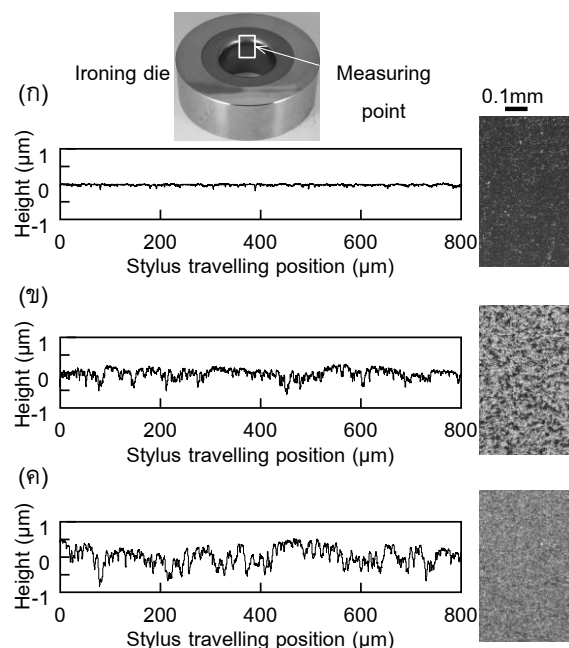
รูปที่ 1 กลไกการหล่อขึ้นรูประหว่างผิวถ้วยและผิวแม่พิมพ์ (ก) แม่พิมพ์ผิวขัดมัน และ (ข) แม่พิมพ์ผิวยิงอนุภาคแข็งแล้วตามด้วยการขัดมัน



รูปที่ 2 กระบวนการยิงอนุภาคแข็ง

ผิวของแม่พิมพ์หลังจากการปรับสภาพผิวด้วยการยิงอนุภาคแข็งมีค่าความหยาบผิวเฉลี่ย $R_a = 0.21 \mu\text{m}$ ผิวดังกล่าวถูกนำมาขัดมันต่อโดยใช้ฝีมือนักด้วย Diamond Paste ขนาด $3 \mu\text{m}$ และ $1 \mu\text{m}$ ตามลำดับ เพื่อที่จะควบคุมค่าความหยาบผิว ระหว่างขัดมันจึงมีการวัดความหยาบผิวของแม่พิมพ์เป็นระยะๆ ค่าความหยาบผิวของผิวยิงอนุภาคแข็งและขัดมันถูกกำหนดเป็นช่วงเพื่อให้สะดวกต่อการทำงาน เนื่องจากไม่ต้องการให้ผิวยิงอนุภาคแข็งและขัดมันเรียบจนกระทั่งใกล้เคียงกับผิวขัดมันมากจนเกินไป ช่วงแรกกำหนด $R_a = 0.08 \sim 0.10 \mu\text{m}$ ช่วงที่สอง เพื่อที่จะลดความหยาบผิวจาก $R_a = 0.21 \mu\text{m}$ ดังนั้นกำหนด $R_a = 0.14 \sim 0.18 \mu\text{m}$ สำหรับผิวยิงอนุภาคแข็งและขัดมันที่มี $R_a = 0.08 \sim 0.10 \mu\text{m}$ ซึ่งต่อไปจะเรียกว่า “ผิวยิงอนุภาคแข็งความหยาบผิวต่ำ” ปลายยอดแหลม (Asperities) ของพื้นผิวหยาบถูกขัดออก พื้นผิวประกอบด้วยหลุมขนาดเล็ก ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 3 (ข) สำหรับผิวยิงอนุภาคแข็งและขัดมันที่มี $R_a = 0.14 \sim 0.18 \mu\text{m}$ ซึ่งต่อไปจะเรียกว่า “ผิวยิงอนุภาคแข็งความหยาบผิวสูง” ถึงแม้ว่าผิวแม่พิมพ์จะถูกขัดมัน แต่ปลายยอดแหลมยังคงอยู่ และพื้นผิวมีลักษณะหลุมขนาดเล็กและมีปลายยอดแหลม ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 3 (ค)

สมบัติของผิวแม่พิมพ์ที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยเงื่อนไขที่แตกต่างกันมีค่าความหยาบผิวดังแสดงไว้ในตารางที่ 2



รูปที่ 3 รูปร่างโปรไฟล์ความหยาบผิวของแม่พิมพ์ (ก) ผิวขัดมัน (ข) ผิวยิงอนุภาคแข็งความหยาบผิวต่ำ และ (ค) ผิวยิงอนุภาคแข็งความหยาบผิวสูง

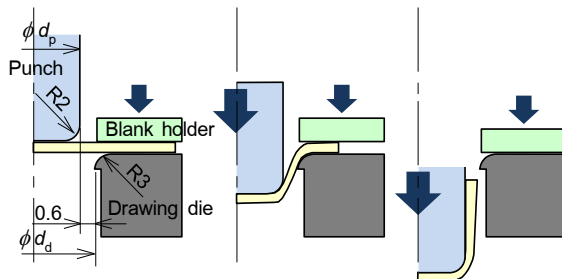
ตารางที่ 2 สมบัติของผิวแม่พิมพ์ที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยเงื่อนไขต่างๆ

Die	Surface modifying method	Surface roughness, R_a (μm)
ผิวขัดมัน	Polishing	0.02
ผิวยิงอนุภาคแข็งความหยาบผิวต่ำ	Shot peening & Post-polishing	0.08 ~ 0.10
ผิวยิงอนุภาคแข็งความหยาบผิวสูง	Shot peening & Post-polishing	0.14 ~ 0.18

2.3. การลากขึ้นรูปสีกและการรีดลดความหนาผนัง

ก่อนการรีดลดความหนาผนัง แผ่นอลูมิเนียมกลมถูกขึ้นรูปเป็นชิ้นงานถ้วยทรงกระบอกด้วยกระบวนการลากขึ้นรูปสีกดังแสดงในรูปที่ 4 แรงจับยึดแผ่นเปล่า (Blank

Holder Force) ที่ใช้กดแผ่นอลูมิเนียมระหว่างการลากขึ้นรูปมีค่าเท่ากับ 1 kN



รูปที่ 4 การลากขึ้นรูปด้วยแสดงในมุมมองภาพตัดครึ่ง
(หน่วย: มิลลิเมตร)

ชิ้นงานด้วยถูกขึ้นรูปเตรียมไว้ที่ขนาดต่าง ๆ เพื่อสร้างอัตราการรีดลดความหนาผนังที่แตกต่างกันโดยใช้แม่พิมพ์ลากขึ้นรูปเล็ก และพันซ์ที่มีขนาดดังแสดงในตารางที่ 3 ช่องว่างระหว่างแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปและพันซ์มีขนาดเท่ากับความหนาของแผ่นอลูมิเนียม คือ 0.6 มิลลิเมตร สำหรับทุกอัตราการรีดลดความหนาผนัง

ตารางที่ 3 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแม่พิมพ์ และพันซ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปด้วยสำหรับอัตราการรีดลดความหนาผนังต่าง ๆ

Nominal ironing ratio r (%)	Drawing die diameter d_d (mm)	Punch diameter d_p (mm)
10	34.12	32.92
20	34.24	33.04
30	34.36	33.16
35	34.42	33.22
40	34.48	33.28
50	34.60	33.40

การเปลี่ยนอัตราการรีดลดความหนาผนังสามารถอธิบายได้ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 5 เมื่อขนาดเส้นผ่าน

ศูนย์กลางของพันซ์และด้วยถูกปรับเปลี่ยน ในขณะที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของแม่พิมพ์รีดลดความหนาผนังคงเดิม คือ 34 มิลลิเมตร ทำให้ช่องว่างระหว่างแม่พิมพ์รีดลดความหนาผนังและพันซ์เปลี่ยนไป ส่งผลให้อัตราการรีดลดความหนาผนังเปลี่ยนแปลง อัตราการรีดลดความหนาผนังสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1) ดังนี้

$$r = \frac{t_0 - c}{t_0} \quad (1)$$

เมื่อ r = อัตราการรีดลดความหนาผนัง (Nominal Ironing Ratio) หน่วย %

t_0 = ความหนาเริ่มต้นของแผ่นอลูมิเนียมเปล่า (Initial Blank Thickness) หน่วย มิลลิเมตร

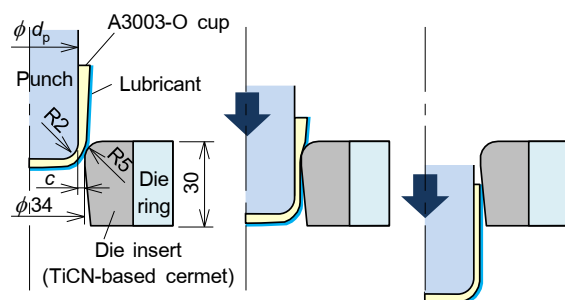
c = ช่องว่าง (Clearance) ระหว่างแม่พิมพ์รีดลดความหนาผนังและพันซ์ หน่วย มิลลิเมตร

ในการรีดลดความหนาผนัง พันซ์ที่ใช้เป็นชุดเดียวกันกับที่ใช้ในการลากขึ้นรูปเล็ก พันซ์แต่ละขนาดใช้สำหรับด้วยที่เตรียมมาที่อัตราการรีดลดความหนาผนังหนึ่งเท่านั้น เช่น พันซ์ขนาด 33.04 มิลลิเมตร ใช้สำหรับด้วยที่เตรียมมาที่อัตราการรีดลดความหนาผนัง $r = 20\%$ เป็นต้น ชิ้นงานด้วยถูกติดตั้งไปที่ปลายพันซ์ ผิวของด้วยและผิวของแม่พิมพ์ถูกทาดด้วยน้ำมันหล่อลื่น หลังจากนั้นด้วยถูกกดโดยพันซ์ผ่านแม่พิมพ์ ด้วยช่องว่างระหว่างแม่พิมพ์ที่เล็กกว่าความหนาเริ่มต้นของแผ่นชิ้นงาน ดังนั้นความหนาผนังด้านข้างของด้วยจึงถูกรีดให้บางลงและความสูงของด้วยเพิ่มขึ้น ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 5

ขีดจำกัดการรีดลดความหนาผนัง คือ อัตราการรีดลดความหนาผนังสูงสุดที่สามารถขึ้นรูปได้สำเร็จโดยปราศจากการสีกหรือแบบยึดติด หรือข้อบกพร่อง ขีดจำกัดการรีดลดความหนาผนังถูกใช้เพื่อประเมินความสามารถด้านทานการสีกหรือแบบยึดติดของแต่ละเงื่อนไขสภาพผิว แต่ละเงื่อนไขสภาพผิวอัตราการรีดลดความหนาผนังจะถูกเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่ออัตราการรีดลดความหนาผนังเพิ่มขึ้นจนถึงระดับหนึ่งจะเกิดการสีกหรือ

ปีที่ 13 ฉบับที่ 3 เดือน กันยายน – ธันวาคม พ.ศ. 2561

แบบยึดติดบนผิวแม่พิมพ์ และ/หรือจะเกิดข้อบกพร่องบนผนังถ้วย เช่น การฉีกขาด หรือรอยขีดข่วน ข้อบกพร่องดังกล่าวถูกสังเกตเบื้องต้นด้วยตาเปล่า การศึกษาหรือแบบยึดติดบนผิวแม่พิมพ์ถูกสังเกตด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope)



รูปที่ 5 การรีดลดความหนาผนังถ้วยแสดงในมุมมองภาพตัดครึ่ง (หน่วย: มิลลิเมตร)

การทดลองรีดลดความหนาผนังแม่พิมพ์ที่มีสภาพผิวต่างกัน 3 แบบ คือ แม่พิมพ์ผิวขัดมัน แม่พิมพ์ผิวยิงอนุภาคแข็งความหยาบผิวต่ำ และแม่พิมพ์ผิวยิงอนุภาคแข็งความหยาบผิวสูง แต่ละสภาพผิวแม่พิมพ์ทดลองที่อัตราการรีดลดความหนาผนัง 20% 30% 35% และ 40% ตามลำดับ กรณีที่อัตราการรีดลดความหนาผนังหนึ่งๆ เกิดการสึกหรอแบบยึดติดบนผิวแม่พิมพ์ หรือเกิดข้อบกพร่องบนผนังถ้วย การทดลองจะหยุดไว้ที่อัตราการรีดลดความหนาผนังนั้นๆ เบื้องต้น ออกแบบการทดลองไว้ทั้งหมด 12 แบบ ซึ่งแต่ละแบบดำเนินการทดลองแบบละ 3 ครั้ง

2.4. การศึกษาอิทธิพลของปริมาณน้ำมันหล่อลื่น

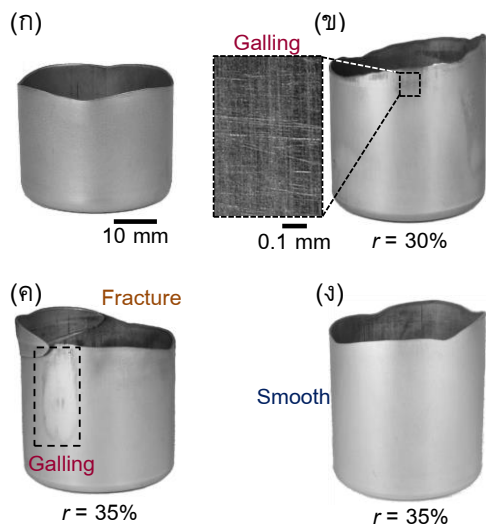
ตามสมมติฐานดังแสดงในรูปที่ 1 (ข) แม่พิมพ์ผิวยิงอนุภาคแข็งแล้วตามด้วยการขัดมัน สามารถช่วยเพิ่มการหล่อลื่นได้ เป็นผลมาจากการที่หลุมบนผิวขรุขระกักเก็บและป้อนน้ำมันหล่อลื่นเข้าสู่ผิวสัมผัส เมื่อความสามารถการหล่อลื่นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความสามารถต้านทานการสึกหรอแบบยึดติดเพิ่มขึ้น เห็นได้ว่า ทั้งสภาพผิวแม่พิมพ์และน้ำมันหล่อลื่นมีอิทธิพลต่อการต้านทานการสึกหรอ

แบบยึดติด ดังนั้นอิทธิพลของปริมาณน้ำมันหล่อลื่นจึงถูกศึกษา ปริมาณน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้หาได้จากผลต่างของน้ำหนักก่อน และน้ำหนักหลังทาน้ำมันหล่อลื่น ทารด้วยพื้นที่ผิวด้านข้างของถ้วยที่ถูกทาด้วยน้ำมันหล่อลื่นนั้น ในการศึกษาครั้งนี้ ใช้สภาพผิวแม่พิมพ์ 2 แบบ คือ ผิวขัดมัน และอีกผิวเลือกใช้ผิวยิงอนุภาคแข็งที่มีขีดจำกัดการรีดลดความหนาผนังสูงสุด ทดลองรีดลดความหนาผนังที่ $r = 30\%$ เริ่มต้นการทดลอง หล่อลื่นโดยใช้ปริมาณน้ำมันหล่อลื่นปกติ หลังจากนั้น ปริมาณน้ำมันหล่อลื่นจะถูกลดลงเรื่อยๆ เมื่อปริมาณน้ำมันหล่อลื่นลดลงถึงระดับหนึ่ง จะเกิดการสึกหรอแบบยึดติดบนผิวแม่พิมพ์ การศึกษาครั้งนี้ จะทำให้ทราบถึงปริมาณน้ำมันหล่อลื่นต่ำสุดที่จะเกิดการสึกหรอแบบยึดติด

3. ผลการศึกษาและการอภิปรายผล

3.1. การปรับปรุงขีดจำกัดการรีดลดความหนาผนัง

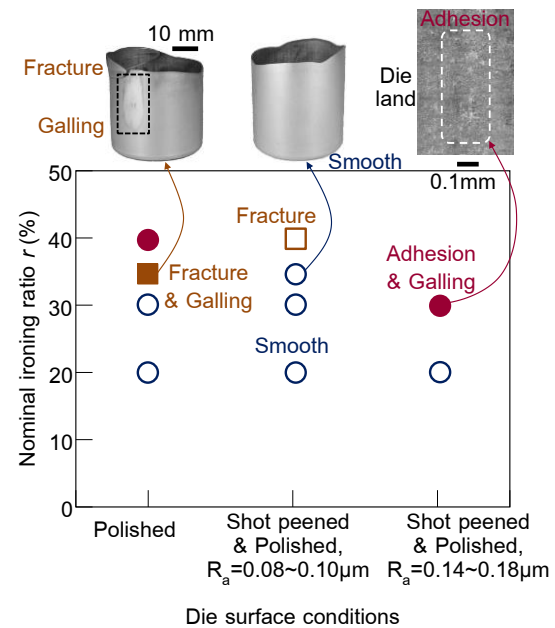
ลักษณะผิวถ้วยที่ผ่านการรีดลดความหนาผนังถูกแสดงในรูปที่ 6 สำหรับแม่พิมพ์ผิวยิงอนุภาคแข็งความหยาบผิวสูง (รูปที่ 6 (ข)) เกิดรอยขีดข่วนขึ้นบนผิวถ้วย แม้ที่อัตราการรีดลดความหนาผนังที่ต่ำ ถึงแม้ว่าบนพื้นผิวนี้จะมีหลุมขนาดเล็กสำหรับกักเก็บน้ำมันหล่อลื่น แต่ก็ยังมีปลายยอดแหลมอยู่ด้วย ทำให้เกิดการไถครูดไปบนผิวถ้วยได้ง่าย สำหรับแม่พิมพ์ผิวขัดมัน (รูปที่ 6 (ค)) เกิดรอยขีดข่วน และการฉีกขาดบนถ้วย พื้นผิวนี้มีความราบเรียบสูง น้ำมันหล่อลื่นถูกกวาดออกจากผิวสัมผัสได้ง่าย ทำให้เกิดการสัมผัสกันโดยตรงระหว่างผิวถ้วยและผิวแม่พิมพ์ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดรอยขีดข่วน สำหรับแม่พิมพ์ผิวยิงอนุภาคแข็งความหยาบผิวต่ำ สามารถขึ้นรูปถ้วยสำเร็จโดยได้ผิวถ้วยที่เรียบปราศจากข้อบกพร่อง ดังแสดงในรูปที่ 6 (ง)



รูปที่ 6 ลักษณะผิวถ้วยที่ผ่านการรีดลดความหนาผนัง (ก) ก่อนการรีดลดความหนาผนัง (ข) ใช้แม่พิมพ์ผิวยิงอนุภาคแข็งความหยาบผิวสูง (ค) ใช้แม่พิมพ์ผิวขัดมัน และ (ง) ใช้แม่พิมพ์ผิวยิงอนุภาคแข็งความหยาบผิวต่ำ

ขีดจำกัดการรีดลดความหนาผนังของเงื่อนไขสภาพผิวแม่พิมพ์แบบต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 7 แม่พิมพ์ผิวขัดมันมีขีดจำกัดการรีดลดความหนาผนัง 30% แม่พิมพ์ผิวยิงอนุภาคแข็งความหยาบผิวต่ำ ซึ่งปลายยอดแหลมบนพื้นผิวถูกขัดออก และมีหลุมขนาดเล็ก มีความสามารถในการรีดลดความหนาผนังที่ดีขึ้น โดยมีขีดจำกัดการรีดลดความหนาผนังที่ 35% ผลจากการศึกษาวิจัยนี้สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Popp and Engel [12] ที่ว่า หลุมขนาดเล็กบนพื้นผิวแม่พิมพ์ทำหน้าที่กักเก็บน้ำมันหล่อลื่นด้วยแรงดันบนผิวสัมผัสที่เกิดขึ้นระหว่างการขึ้นรูปทำให้น้ำมันหล่อลื่นถูกบีบตัว และถูกป้อนเข้าสู่ผิวสัมผัสของชิ้นงานและแม่พิมพ์ส่งผลให้ความสามารถในการหล่อลื่นเพิ่มขึ้นการสึกหรอของแม่พิมพ์ลดลง เมื่อเพิ่ม $r = 40\%$ พบว่า ไม่มีการสึกหรอแบบยึดติด แต่มีเพียงการฉีกขาดของผนังถ้วยเท่านั้น ดังนั้นความสามารถในการต้านทานการสึกหรอแบบยึดติดถูกปรับปรุงด้วยแม่พิมพ์ผิวยิงอนุภาคแข็งความหยาบผิวต่ำ แต่ในทางตรงกันข้ามแม่พิมพ์ผิวยิงอนุภาคแข็งความหยาบผิวสูง ถึงแม้จะทำการขึ้นรูปที่ $r = 30\%$ ปลายยอดแหลมของผิวแม่พิมพ์ก็

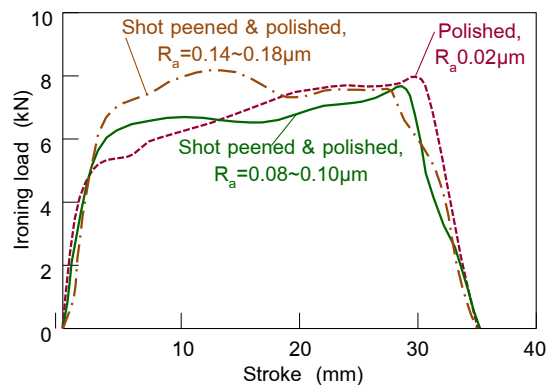
ครูดไปบนผิวถ้วยระหว่างการขึ้นรูป และเกิดการยึดติดของวัสดุถ้วยไปบนผิวแม่พิมพ์ ขีดจำกัดการรีดลดความหนาผนังของแม่พิมพ์ผิวยิงอนุภาคแข็งความหยาบผิวสูงคือ 20%



รูปที่ 7 ขีดจำกัดการรีดลดความหนาผนังถ้วยของเงื่อนไขสภาพผิวแม่พิมพ์แบบต่าง ๆ

เมื่อเปรียบเทียบจุดที่สูงที่สุด (Maximum Ironing Load) ของเส้นโค้งโหลด - ระยะทางแต่ละเส้นสำหรับ $r = 30\%$ ในรูปที่ 8 พบว่า ผิวยิงอนุภาคแข็งความหยาบผิวสูง มีค่าโหลดสูงสุดที่สุด คือ 8.3 kN รองลงมาคือ ผิวขัดมันมีค่าโหลด 8.0 kN และสุดท้ายผิวยิงอนุภาคแข็งความหยาบผิวต่ำ มีค่าโหลด 7.7 kN ตามลำดับ ซึ่งผลของการลดลงของค่าโหลดสามารถอธิบายโดยการศึกษาของ Bech และคณะ [18] ที่ว่า การกระจายตัวของน้ำมันหล่อลื่นที่ถูกกักเก็บจากหลุมขนาดเล็กบนพื้นผิวมีอิทธิพลต่อแรงในการขึ้นรูป ดังนั้นการใช้ผิวยิงอนุภาคแข็งความหยาบผิวต่ำที่มีหลุมขนาดเล็กซึ่งสามารถปรับปรุงการหล่อลื่นจึงส่งผลให้โหลดในการขึ้นรูปต่ำกว่าเงื่อนไขสภาพผิวแม่พิมพ์แบบอื่นๆ

ปีที่ 13 ฉบับที่ 3 เดือน กันยายน - ธันวาคม พ.ศ. 2561



รูปที่ 8 เส้นโค้งโหลด - ระยะทางการรีดลดความหนาผนังสำหรับ $r = 30\%$ ของเงื่อนไขสภาพผิวแม่พิมพ์แบบต่าง ๆ

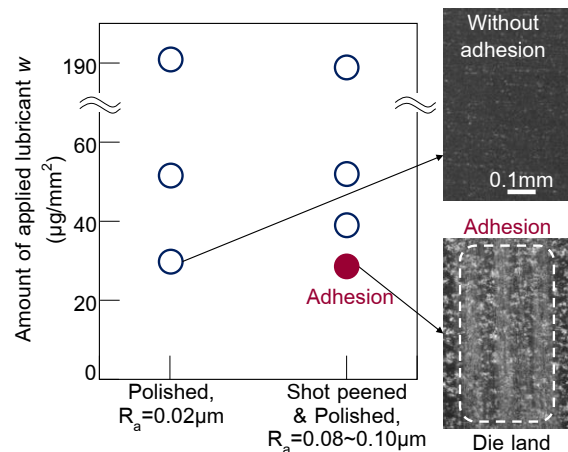
3.2. อิทธิพลของปริมาณน้ำมันหล่อลื่น

อิทธิพลของปริมาณน้ำมันหล่อลื่นที่ส่งผลต่อการเกิดการยึดติดบนผิวแม่พิมพ์แสดงในรูปที่ 9 ปริมาณน้ำมันหล่อลื่นที่สภาวะการขึ้นรูปปกติคือ $190 \mu\text{g}/\text{mm}^2$ ปริมาณสารหล่อลื่นสำหรับแต่ละสภาพผิวแม่พิมพ์ถูกลดลงเรื่อยๆ สำหรับผิวยิงอนุภาคแข็งความหยาบผิวต่ำ เมื่อมีการลดปริมาณน้ำมันหล่อลื่นลงเหลือ $30 \mu\text{g}/\text{mm}^2$ เกิดการยึดติดของวัสดุด้วยไปบนผิวแม่พิมพ์ ในขณะที่ผิวขัดมันยังคงสามารถขึ้นรูปได้ปกติ การใช้แม่พิมพ์ผิวยิงอนุภาคแข็งจำเป็นต้องมีการหล่อลื่นที่ดี ใช้ปริมาณน้ำมันหล่อลื่นที่เพียงพอ

4. สรุป

การยิงอนุภาคแข็งสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการปรับสภาพผิวแม่พิมพ์รีดลดความหนาผนังได้ดี เมื่อเปรียบเทียบกับแม่พิมพ์ผิวขัดมันซึ่งพื้นผิวมีความราบเรียบสูง โดยพบว่า การใช้แม่พิมพ์ผิวยิงอนุภาคแข็งความหยาบผิวต่ำ $R_a = 0.08 \sim 0.10 \mu\text{m}$ ซึ่งบนพื้นผิวมีหลุมขนาดเล็ก ประสบความสำเร็จในการรีดลดความหนาผนังด้วยที่อัตราการรีดลดความหนาผนังสูงโดยปราศจากการยึดติดของเนื้อด้วยไปบนผิวของแม่พิมพ์ ได้ด้วยที่ผิวเรียบปราศจากข้อบกพร่อง และใช้โหลดในการขึ้นรูปต่ำกว่าเงื่อนไขสภาพผิวแม่พิมพ์แบบอื่นๆ ความต้านทานการสึกหรอแบบยึดติดถูกปรับปรุงเนื่องจากหลุมขนาดเล็กบน

ผิวขรุขระที่ถูกสร้างจากการยิงอนุภาคแข็งช่วยกักเก็บและจ่ายน้ำมันหล่อลื่นไปยังผิวแม่พิมพ์และถั่วระหว่างการขึ้นรูป แต่อย่างไรก็ตาม การใช้แม่พิมพ์ผิวยิงอนุภาคแข็งความหยาบผิวต่ำยังมีข้อจำกัดคือ ในการใช้งานจำเป็นต้องมีการหล่อลื่นที่ดี และใช้ปริมาณน้ำมันหล่อลื่นที่เพียงพอ



รูปที่ 9 อิทธิพลของปริมาณน้ำมันหล่อลื่นที่ส่งผลต่อการเกิดการยึดติดบนผิวแม่พิมพ์สำหรับ $r = 30\%$

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Kleiner, M. Geiger and A. Klaus, "Manufacturing of lightweight components by metal forming," *CIRP Ann. Manuf. Technol.*, vol. 52, pp. 521–542, Jun. 2003.
- [2] P. Groche, G. Nitzsche and A. Elsen, "Adhesive wear in deep drawing of aluminum sheets," *CIRP Ann. Manuf. Technol.*, vol. 57, pp. 295–298, May 2008.
- [3] N. Bay, A. Azushima, P. Groche, I. Ishibashi, M. Merklein, M. Morishita, T. Nakamura, S. Schmid and M. Yoshida, "Environmentally benign tribo- systems for metal forming," *CIRP Ann. Manuf. Technol.*, vol. 59, pp. 760–780, Jul. 2010.
- [4] T. Mizuno and M. Okamoto, "Effects of lubricant viscosity at pressure and sliding

- velocity on lubricating conditions in the compression-friction test on sheet metals,” *Trans. ASME J. Lubr. Technol.*, vol. 104, pp. 53–59, Jan. 1982.
- [5] H. Kudo, M. Tsubouchi, H. Takada and K. Okamura, “An investigation into plasto-hydrodynamic lubrication with a cold sheet drawing test,” *CIRP Ann. Manuf. Technol.*, vol. 31, pp. 175–180, Jan. 1982.
- [6] A. Azushima, M. Uda and H. Kudo, “An interpretation of the speed dependence of the coefficient of friction under the micro-PHL condition in sheet drawing,” *CIRP Ann. Manuf. Technol.*, vol. 40, pp. 227–230, Jan. 1991.
- [7] A. Azushima, “Direct observation of contact behaviour to interpret the pressure dependence of the coefficient of friction in sheet metal forming,” *CIRP Ann. Manuf. Technol.*, vol. 44, pp. 209–212, Jan. 1995.
- [8] K. Steinhoff, W. Rasp and O. Pawelski, “Development of deterministic- stochastic surface structures to improve the tribological conditions of sheet forming processes,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 60, pp. 355–361, Jun. 1996.
- [9] M. Vermeulen and J. Scheers, “Micro-hydrodynamic effects in EBT textured steel sheet,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 41, pp. 1941–1951, Oct. 2001.
- [10] M. S. Nilsson, D. D. Olsson, I. Petrushina, J. L. Andreasen, N. Bay, E. Christensen and N. J. Bjerrum, “Strategic surface topographies for enhanced lubrication in sheet forming of stainless steel,” *Int. J. Surf. Sci. Eng.*, vol. 4, pp. 68–79, Jan. 2010.
- [11] M. Geiger, U. Popp and U. Engel, “Excimer laser micro texturing of cold forging tool surfaces - influence on tool life,” *CIRP Ann. Manuf. Technol.*, vol. 51, pp. 231–234, Jul. 2002.
- [12] U. Popp and U. Engel, “Microtexturing of cold-forging tools- influence on tool life,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 220, pp. 27–33, Jan. 2006.
- [13] K. Lawanwong, B. Sresomroeng and V. Premanond, “The study type of hard film coating and strength of materials to wear volume by ball-on-disk technique,” *R&D J. Eng. Inst. Tha.*, vol. 20, No. 4, pp. 84–91, Aug. 2009. [in Thai]
- [14] P. Chumrum, V. Premanond and K. Lawanwong, “Application of surface modification for extension tool life in blanking process,” *J. Indus. Tech.*, vol. 12, no. 1, pp. 13–27, 2016. [in Thai]
- [15] P. Basnyat, B. Luster, C. Muratore, A. A. Voevodin, R. Haasch, R. Zakeri, P. Kohli and S.M. Aouadi, “Surface texturing for adaptive solid lubrication,” *Surf. Coat. Technol.*, vol. 203, pp. 73–39, Oct. 2008.
- [16] A. Khantachawana. (2018, July 6). Smart orthopedic fixation - NSTDA investors’ day 2018 [in Thai] . [Online] . Available: <https://www.nstda.or.th/investorsday/2018/projects/detail/13/index.html>.
- [17] M. Aramaki, N. Yamada and O. Furukimi, “Effect of combined shot treatment and nitriding on galling property of die used for

ปีที่ 13 ฉบับที่ 3 เดือน กันยายน – ธันวาคม พ.ศ. 2561

high strength steels,” *ISIJ Int.*, vol. 51, pp. 1137-1141, Jul. 2011.

- [18] J. Bech, N. Bay and M. Eriksen, “Entrapment and escape of liquid lubricant in metal forming,” *Wear*, vol. 232, pp. 134-139, Oct. 1999.

การกำจัดไนเตรดด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชันร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา

ซิลเวอร์ไทเทเนียมไดออกไซด์*

Nitrate Removal Using Photocatalytic Reduction Process with Ag-TiO₂ Catalyst

สุนัย ขวัญยืน¹ ธรรมศักดิ์ ไรจน์วิรุฬห์^{1*} อรรธรณ ไรจน์วิรุฬห์¹ และ สัญญา สิริวิทยาปกรณ์²

¹ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

39 ม.1 ถ.รังสิต-นครนายก ต.คลองหก อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120

²ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

50 ถ.พหลโยธิน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร จ.กรุงเทพฯ 10900

*Corresponding author Email: thammak.s.r.@en.rmutt.ac.th

(Received: September 14, 2018; Accepted: December 20, 2018)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรดในโตรเจน (NO₃⁻-N) ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชันร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน (Ag-TiO₂) ที่เตรียมขึ้นด้วยวิธีการ Composite colloid deposition ภายใต้สภาวะกรดและอุณหภูมิต่ำ โดยการใช้การเจือเงินในปริมาณที่แตกต่างกัน 3 ค่า ได้แก่ 0.1%, 0.5% และ 1.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร รวมทั้งศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นด้วยอุปกรณ์ X-ray fluorescence spectrometer (XRF) และ Brunauer, Emmett and Teller analyser (BET) ซึ่งสามารถระบุองค์ประกอบของธาตุในตัวเร่งปฏิกิริยาและพื้นที่ผิวเฉพาะ โดยผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาผง Ag-TiO₂ ที่เตรียมขึ้นทั้งหมดมีองค์ประกอบของ TiO₂ และ Ag เป็นไปตามที่ต้องการ สำหรับการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรดในโตรเจนที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 100 mg.L⁻¹ as N ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกรีดักชันร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวข้างต้นร่วมกับแหล่งกำเนิดแสง UVA ที่มีความเข้มแสง 1,000 μW.cm⁻² พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมและดีที่สุดคือ 1.0%Ag-TiO₂ โดยสามารถกำจัดไนเตรดในโตรเจนโดยมีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 97.55% ที่เวลา 180 min และมีอัตราการกำจัดไนเตรดสูงสุดเท่ากับ 1.08 mg.L⁻¹ as N โดยพิจารณาค่า selectivity (S) ของการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนที่เวลา 90 min ในกระบวนการดังกล่าว พบว่าค่า selectivity ของไนโตรเจนรูปอื่นๆ มีค่าเท่ากับ 7.17%, 2.30% และ 90.53% สำหรับไนเตรด (S_{NO₃⁻}) แอมโมเนีย (S_{NH₄⁺}) และไนโตรเจน (S_{N₂})

คำสำคัญ: โฟโตรีดักชัน ไนเตรดรีดักชัน การเปลี่ยนรูปของไนโตรเจน สารโด้ป

* บทความนี้ได้ถูกนำเสนอบางส่วนในการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 23

ABSTRACT

This research aims to study the efficiency of nitrate (NO_3^- -N) removal by photocatalytic reduction process using Ag doped TiO_2 (Ag- TiO_2) nanopowder catalyst. The Ag- TiO_2 was prepared by composite colloid deposition under low temperature with acid condition. Ag was doped into TiO_2 film by 3 different amounts, i.e. 0.1%, 0.5% and 1.0% weight to volume. The physical characteristics of the catalyst prepared were investigated by X-ray fluorescence spectrometer (XRF) and Brunauer, Emmett and Teller analyser (BET) that can identified elements and specific surface area of the catalyst prepared. The results showed that all of Ag- TiO_2 nanopowder catalyst has the required components. The efficiency of photocatalytic reduction process of nitrate removal was evaluated from nitrate removal with initial nitrate concentration of 100 mg.L^{-1} as N under UVA light source of $1,000 \mu\text{W.cm}^{-2}$. The highest efficiency of photocatalytic reduction process for nitrate removal was 97.55% within 180 min and the highest reaction rate for NO_3^- 1.08 mg.L^{-1} as N. In addition, the selectivity (S) of nitrogen conversion in photocatalytic reduction process 90 min were 7.17%, 2.30% and 90.53%, for nitrite ($S_{\text{NO}_2^-}$), ammonia ($S_{\text{NH}_4^+}$) and nitrogen (S_{N_2}) respectively.

Keyword: Photo reduction, Nitrate reduction, Nitrogen conversion, Dopant

1. บทนำ

แหล่งกำเนิดของน้ำเสียที่มีผลกระทบต่อระบบนิเวศน์ทางน้ำ โดยทั่วไปแล้วแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ น้ำทิ้งจากชุมชน น้ำทิ้งจากภาคอุตสาหกรรม และน้ำทิ้งจากภาคเกษตรกรรม ทั้งนี้ปัญหาหลักของการบำบัดน้ำทิ้งอย่างหนึ่ง คือ น้ำทิ้งที่มีองค์ประกอบของสารอาหารกลุ่มไนโตรเจนและฟอสฟอรัสซึ่งบำบัดได้ยาก และยังเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดสภาวะยูโทรฟิเคชันทำให้สาหร่ายในแหล่งน้ำเกิดการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว [1]-[5]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นในการกำจัดไนโตรเจนไนโตรเจน โดยใช้กระบวนการโฟโตคะตะลิติกกรีดักชันซึ่งเป็นกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาและแสงอัลตราไวโอเล็ต ทั้งนี้วัตถุประสงค์หลักในงานวิจัยนี้ได้แก่ การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาผงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน (Ag- TiO_2) ในปริมาณที่แตกต่างกัน ด้วยวิธี composite colloid deposition รวมทั้งนำตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวมา

ทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรตไนโตรเจนร่วมกับกระบวนการโฟโตคะตะลิติกกรีดักชัน

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาผง Ag- TiO_2

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาผง Ag- TiO_2 โดยใช้สารตั้งต้นผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ผสมกับตัวทำละลายกรดฟอร์มิก (HCOOH) ในอัตราส่วน 1:6.7 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ปรับ pH ให้เท่ากับ 2 ด้วยกรดไนตริก (HNO_3) สำหรับการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาผง 0.1%Ag- TiO_2 , 0.5%Ag- TiO_2 และ 1.0%Ag- TiO_2 เตรียมโดยการเติมซิลเวอร์ไนเตรต (AgNO_3) ในอัตราส่วน 0.1%, 0.5% และ 1.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร กวนและผสมและไล่อากาศด้วยแก๊สไนโตรเจนเป็นเวลา 1 hr จากนั้นนำไปล้างปรับ pH ให้เป็นกลาง และทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 24 hr ซึ่งจะได้ตัวเร่งปฏิกิริยาผง Ag- TiO_2

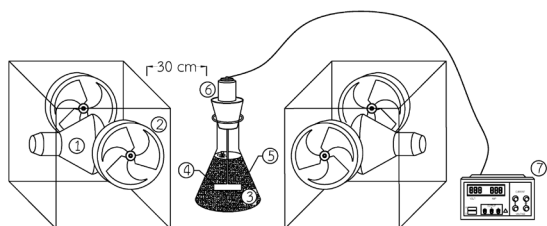
2.2 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา Ag-TiO₂

สำหรับวิธีวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา Ag-TiO₂ ที่เตรียมขึ้น แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อุปกรณ์และวิธีการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา Ag-TiO₂

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์	อุปกรณ์
องค์ประกอบ	X-ray Fluorescence Spectroscopy	Bruker model S8 Tiger
พื้นที่ผิว และ ปริมาตรรูพรุน	Brunauer Emmett and Teller (BET)	Autosorb IQC (BET)

2.3 ชุดทดลอง Photoreactor สำหรับศึกษาการกำจัดไนโตรเจนด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก



รูปที่ 1 Photoreactor สำหรับกระบวนการโฟโตคะตะลิติก

1. แหล่งจ่ายไฟ
2. พัดลมระบายความร้อน
3. ผง Ag-TiO₂
4. ไบโกล
5. ขวดรูปชมพู่ขนาด 100 mL
6. มอเตอร์
7. แหล่งจ่ายกระแสไฟ

2.4 การหาประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรต

สำหรับการหาประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรต โดยทำการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 100 mg.L⁻¹ as N จากนั้นทำการชั่งผง Ag-TiO₂ ปริมาณ 1

g ในขวดรูปชมพู่ปริมาตร 100 mL และทำการเติมน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาณ 100 mL ใช้แผ่นพาราฟิล์มปิดปากครอบขวด หลังจากนั้นนำขวดรูปชมพู่ไปวางระหว่างแหล่งกำเนิดแสงที่มีความเข้มแสง 1,000 $\mu\text{W.cm}^{-2}$ ทำการเก็บตัวอย่างที่เวลา 0, 15, 30, 45, 60, 90, 120 และ 180 min

2.5 การหาประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรต

สำหรับการศึกษาการเปลี่ยนรูปของไนเตรตทำได้โดยการติดตามความเข้มข้นของไนเตรตที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นไนโตรเจนรูปต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการโฟโตคะตะลิติกได้แก่ ไนไตรต์ แอมโมเนียและแอมโมเนียมไนโตรเจนสามารถคำนวณได้ดังสมการ (1)-(3) [6]-[7]

$$S_{NO_2} = \frac{[NO_2^-]_t}{[NO_3^-]_0 - [NO_3^-]_t} \times 100 \quad (1)$$

$$S_{NH_4^+} = \frac{[NH_4^+]_t}{[NO_3^-]_0 - [NO_3^-]_t} \times 100 \quad (2)$$

$$S_{N_2} = \frac{[NO_3^-]_0 - [NO_3^-]_t - [NO_2^-]_t - [NH_4^+]_t}{[NO_3^-]_0 - [NO_3^-]_t} \times 100 \quad (3)$$

โดยที่

S_{NO_2} = การเปลี่ยนรูปของ NO_3^- ไปเป็น NO_2^- (%)

$S_{NH_4^+}$ = การเปลี่ยนรูปของ NO_3^- ไปเป็น NH_4^+ (%)

S_{N_2} = การเปลี่ยนรูปของ NO_3^- ไปเป็น N_2 (%)

$[NO_3^-]_t$ = ความเข้มข้นของ NO_3^- ที่เวลาใดๆ
(mg.L⁻¹ as N)

$[NO_2^-]_t$ = ความเข้มข้นของ NO_2^- ที่เวลาใดๆ
(mg.L⁻¹ as N)

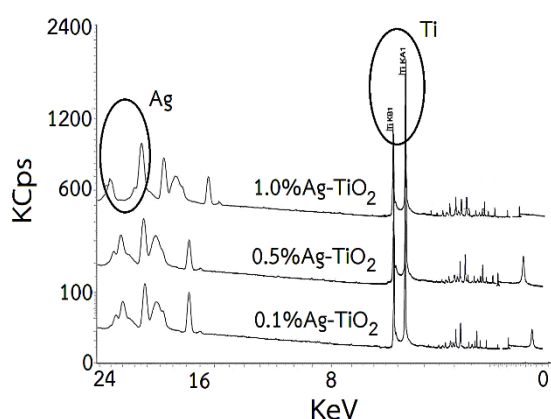
$[NH_4^+]_t$ = ความเข้มข้นของ NH_4^+ ที่เวลาใดๆ
(mg.L⁻¹ as N)

3. ผลการทดลองและวิจารณ์

3.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา Ag-TiO₂

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา Ag-TiO₂ ชนิดต่างๆ ที่เตรียมขึ้นโดยอุปกรณ์ Bruker model

S8 Tiger แสดงดังรูปที่ 2 นอกจากนี้ปริมาณองค์ประกอบสารประกอบต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2



รูปที่ 2 ผลวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาผง Ag-TiO₂ อุปกรณ์ Bruker model S8 Tiger

โดยน้ำหนักเท่ากับ 0.09%, 0.48% และ 0.99% สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาผง 0.1%Ag-TiO₂, 0.5%Ag-TiO₂ และ 1.0%Ag-TiO₂ ตามลำดับ

ในส่วนของการวิเคราะห์พื้นที่ผิวเฉพาะ และปริมาตรรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาผง Ag-TiO₂ ที่เตรียมขึ้นโดยอุปกรณ์ Autosorb IQC (BET) สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3 โดยแสดงให้เห็นถึงพื้นที่ผิวเฉพาะ และปริมาตรรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาผง Ag-TiO₂ ที่เตรียมขึ้นดังกล่าวโดยอาศัยเทคนิคการแทนที่พื้นที่ผิวของรูพรุนด้วยแก๊สไนโตรเจนในการวิเคราะห์

ตารางที่ 3 ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาผง Ag-TiO₂

ตัวเร่งปฏิกิริยาผง	พื้นที่ผิวเฉพาะ (m ² .g ⁻¹)	ปริมาตรรูพรุน (m ³ .g ⁻¹)
0.1%Ag-TiO ₂	2.176×10 ²	5.079×10 ⁻⁷
0.5%Ag-TiO ₂	1.276×10 ²	3.572×10 ⁻⁷
1.0%Ag-TiO ₂	1.120×10 ²	2.745×10 ⁻⁷

ตารางที่ 2 ปริมาณองค์ประกอบของสารประกอบต่างๆ

ตัวเร่งปฏิกิริยา	ปริมาณโดยน้ำหนัก (%) ของสารประกอบ					
	TiO ₂	Ag	Na ₂ O	P ₂ O ₅	Nb ₂ O ₅	อื่นๆ
0.1%	98.70	0.09	0.85	0.15	0.11	0.08
0.5%	97.00	0.48	2.07	0.16	0.18	0.12
1.0%	95.30	0.99	3.33	0.16	0.11	0.11

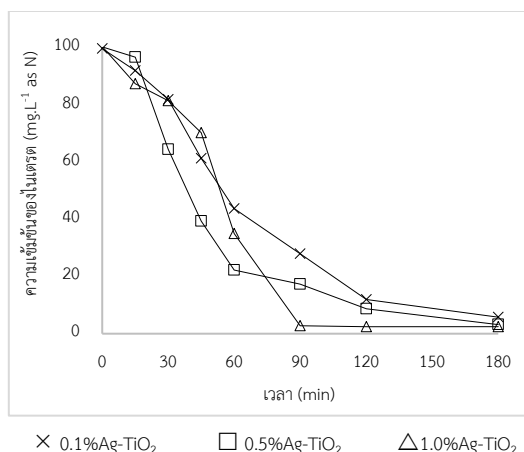
เมื่อพิจารณาผลวิเคราะห์ในรูปที่ 2 และตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบของสารประกอบและธาตุในตัวเร่งปฏิกิริยาผง 0.1%Ag-TiO₂, 0.5%Ag-TiO₂ และ 1.0%Ag-TiO₂ พบสารประกอบ TiO₂ เป็นองค์ประกอบหลักในปริมาณโดยน้ำหนักเท่ากับ 98.70%, 97.00% และ 95.30% ตามลำดับ ทั้งนี้เมื่อพิจารณาธาตุ Ag ที่มีการเจือลงไปในตัวเร่งปฏิกิริยาผง TiO₂ ในปริมาณโดยน้ำหนักด้วยอุปกรณ์ Bruker model S8 Tiger แสดงให้เห็นว่าผลการเจือ Ag ลงไปในตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าว พบว่าปริมาณ Ag มีปริมาณใกล้เคียงกับปริมาณ Ag ที่มีการเจือลงไปในตัวเร่ง

ผลจากการวิเคราะห์พื้นที่ผิวเฉพาะ และปริมาตรรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาผง Ag-TiO₂ ที่เตรียมขึ้นด้วยอุปกรณ์ Autosorb IQC (BET) โดยมีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาผง 0.1%Ag-TiO₂, 0.5%Ag-TiO₂ และ 1.0%Ag-TiO₂ พบว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณ Ag ที่มีการเจือลงไปในตัวเร่งปฏิกิริยาผง TiO₂ ทำให้พื้นที่ผิวเฉพาะและปริมาตรรูพรุนมีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยที่ผ่านมา [8]-[9] ที่มีการเติม Ag เป็นสารเจือปนเพิ่มขึ้นทำให้พื้นที่ผิวเฉพาะและปริมาตรรูพรุนลดลง นอกจากนี้งานวิจัยที่ผ่านมายังพบว่าการเติมสารเจือปนตัวอื่นๆ ส่งผลให้พื้นที่ผิวเฉพาะลดลงเช่นเดียวกัน [10]-[11]

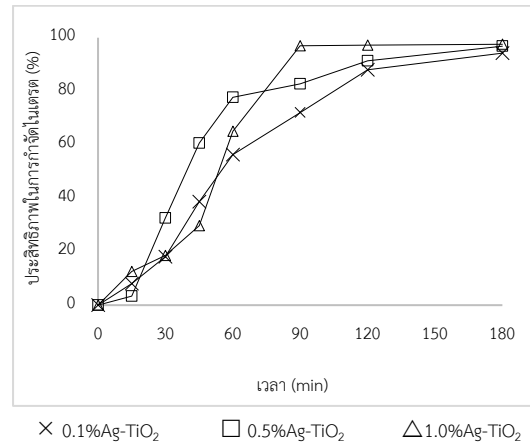
3.2 การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนในโตรเจนด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิสต์กรีดักชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผง Ag-TiO₂

3.2.1 การติดตามการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไนเตรตในโตรเจนด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่กระตุ้นโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผง Ag-TiO_2

สำหรับการศึกษาการกำจัดไนเตรตด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่กระตุ้นโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผง Ag-TiO_2 ในอัตราส่วน 0.1%, 0.5% และ 1.0% ในการทดลอง พบว่ากระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่กระตุ้นโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผงทั้ง 3 ชนิดส่งผลให้ไนเตรตที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ $100 \text{ mg.L}^{-1} \text{ as N}$ (ตามรูปที่ 3) เมื่อพิจารณาปริมาณสามารถเปลี่ยนรูปการเกิดไนโตรเจนในรูปต่างๆ โดยผลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผง Ag-TiO_2 ที่มีการเติม Ag ในปริมาณที่สูงส่งผลให้สามารถกำจัดไนเตรตได้โดยใช้เวลาน้อยกว่าแต่อย่างไรก็ตามเมื่อเวลาดำเนินไปถึงเวลา 180 min พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 3 ชนิดส่งผลต่อการกำจัดไนเตรตได้ไม่แตกต่างกัน โดยมีความเข้มข้นไนเตรตลดลงที่เวลาดังกล่าวเท่ากับ 5.77, 3.17 และ $2.45 \text{ mg.L}^{-1} \text{ as N}$ สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาผง 0.1% Ag-TiO_2 , 0.5% Ag-TiO_2 และ 1.0% Ag-TiO_2 ตามลำดับ



รูปที่ 3 ความเข้มข้นของไนเตรตที่เวลาต่างๆ โดยใช้กระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่กระตุ้น



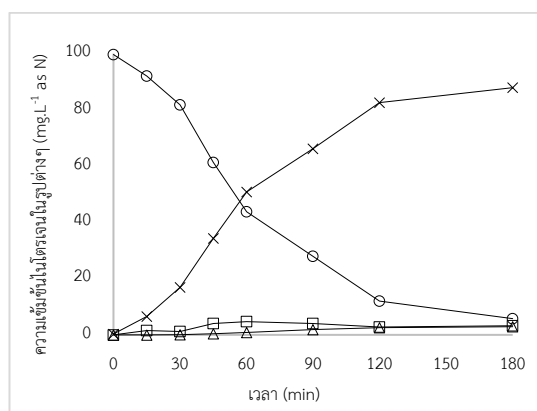
รูปที่ 4 ประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรตด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่กระตุ้น

ทั้งนี้ประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดไนเตรตด้วยกระบวนการดังกล่าวที่เวลา 180 min มีค่าเท่ากับ 94.23%, 96.83% และ 97.55% สำหรับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผง 0.1% Ag-TiO_2 , 0.5% Ag-TiO_2 และ 1.0% Ag-TiO_2 ตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณาเมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานคุณภาพน้ำดื่มในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท พ.ศ. 2534 กำหนดให้น้ำดื่มดังกล่าวต้องมีปริมาณไนเตรตไม่เกิน $4 \text{ mg.L}^{-1} \text{ as N}$ [12] ซึ่งจากผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผง Ag-TiO_2 ที่มีการเติม Ag เท่ากับ 1.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตรสามารถกำจัดไนเตรตที่มีความเข้มข้น $100 \text{ mg.L}^{-1} \text{ as N}$ ให้ลดลงเหลือ $2.77 \text{ mg.L}^{-1} \text{ as N}$ ได้ในเวลาเพียง 90 min

3.2.2 การเปลี่ยนแปลงรูปของไนเตรตด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่กระตุ้น

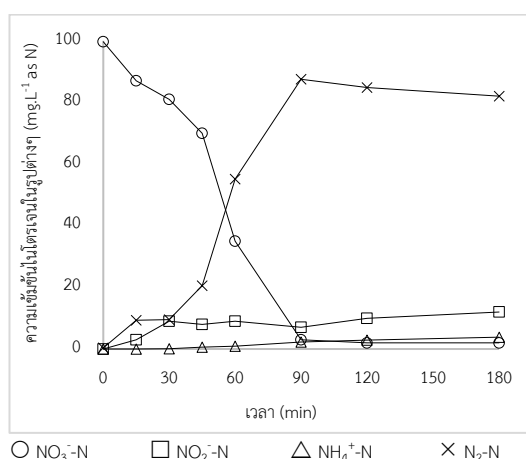
จากสมการที่ (1)-(3) ซึ่งใช้อธิบายการเปลี่ยนรูปของไนเตรตที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นไนโตรเจนรูปต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่กระตุ้น ทั้งนี้ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าไนเตรตสามารถเปลี่ยนแปลงไปเป็นไนโตรเจนรูปต่างๆ ได้โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่กระตุ้น โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 3 ชนิด ตลอดระยะเวลาในการทดลองดังแสดงดังรูปที่ (5)-(7) และเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนรูปของไนเตรตไปเป็นไนโตรเจนรูปอื่นๆ ที่เวลา 90 min ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4

ปีที่ 13 ฉบับที่ 3 เดือน กันยายน – ธันวาคม พ.ศ. 2561



○ NO₃⁻-N □ NO₂⁻-N △ NH₄⁺-N × N₂-N

รูปที่ 5 การเปลี่ยนรูปของไนเตรตที่เวลาต่างๆ ด้วย
กระบวนการโฟโตคะตะลิติกิริตักชัน (0.1%Ag-TiO₂)



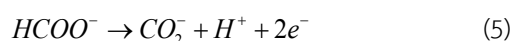
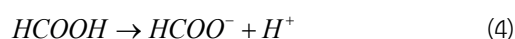
○ NO₃⁻-N □ NO₂⁻-N △ NH₄⁺-N × N₂-N

รูปที่ 7 การเปลี่ยนรูปของไนเตรตที่เวลาต่างๆ ด้วย
กระบวนการโฟโตคะตะลิติกิริตักชัน (1.0%Ag-TiO₂)

ตารางที่ 4 การเปลี่ยนรูปของไนเตรตไปเป็นไนโตรเจนใน
รูปต่างๆ ที่เวลา 90 min

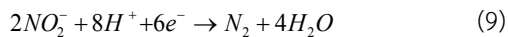
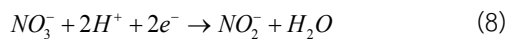
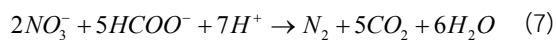
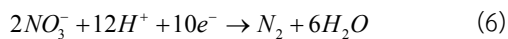
ตัวเร่งปฏิกิริยา	การเปลี่ยนรูปของไนเตรตไปเป็น ไนโตรเจนในรูปต่างๆ (%)		
	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺	N ₂
0.1%Ag-TiO ₂	9.66	2.38	87.52
0.5%Ag-TiO ₂	7.60	4.27	88.14
1.0%Ag-TiO ₂	7.17	2.30	90.53

จากผลการทดลองเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนรูปของ
ไนเตรตไปเป็นไนโตรเจนรูปต่างๆ แสดงให้เห็นว่าตัวเร่ง
ปฏิกิริยา 0.1%Ag-TiO₂, 0.5%Ag-TiO₂ และ 1.0%Ag-TiO₂
มีการเปลี่ยนรูปไนเตรตเป็นแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 87.52%,
88.14% และ 90.53% แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยา 1.0%Ag-TiO₂
ไนเตรตเปลี่ยนไปเป็นแก๊สไนโตรเจนมากที่สุดที่ระยะเวลา 90 min เมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1%Ag-TiO₂, 0.5%Ag-TiO₂



ทั้งนี้เมื่อพิจารณาการใช้กระบวนการโฟโตคะตะลิติกิริตักชัน
ในการกำจัดไนเตรต โดยกลไกการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น
เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยา Ag-TiO₂ ได้รับการกระตุ้นจาก
แสงที่มีระดับพลังงานมากกว่าขนาดช่องว่างแถบพลังงาน
ส่งผลให้อิเล็กตรอนที่แถบวาเลนซ์แบนด์ถูกกระตุ้นไปที่
แถบการนำเกิดสภาวะขาดอิเล็กตรอนและเกิดช่องว่างที่
เรียกว่า โฮล (hole) จึงจำเป็นต้องมีสารให้อิเล็กตรอนเพื่อ
ทดแทนอิเล็กตรอนที่หายไป ในงานวิจัยนี้ใช้กรดฟอร์มิก
เป็น (hole scavenger) เนื่องจากเป็นสารให้อิเล็กตรอนที่
ดีเมื่อเทียบกับสารอินทรีย์ตัวอื่น เมื่อกรดฟอร์มิกแตกตัวไป
เป็นฟอร์เมตจะทำหน้าที่ให้อิเล็กตรอนปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น
ในส่วนนี้เรียกว่า ปฏิกิริยาออกซิเดชัน ดังสมการที่ (4)-(5)

สำหรับอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาโฟโต
คะตะลิติกิริตักชันดังสมการที่ (5) อิเล็กตรอนดังกล่าวจะ
เคลื่อนที่จากแถบวาเลนซ์ ทั้งนี้ในการกำจัดไนเตรตด้วย
กระบวนการโฟโตคะตะลิติกิริตักชัน ไนเตรตจะทำหน้าที่
เป็นตัวรับอิเล็กตรอนส่งผลให้ไนเตรตเปลี่ยนรูปไปเป็น
แก๊สไนโตรเจนดังสมการที่ (6)-(9) นอกจากนี้ยังเกิดไปเป็น
ผลิตภัณฑ์ไปเป็นไนโตรเจนรูปอื่นๆ อีก ได้แก่ ไนไตรต์ และ
แอมโมเนีย ส่งผลให้ความเข้มข้นของไนเตรตลดลงอย่าง
ต่อเนื่องและแปรผันตรงตามเวลา [13]-[20]



ภาพรวมของการทดลองเป็นไปตามกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ดักจับแสดงให้เห็นว่า กระบวนการดังกล่าวมีศักยภาพในการกำจัดไนเตรตได้ปริมาณสูง โดยพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา 1.0%Ag-TiO₂ ในเตรตเปลี่ยนไปเป็นแก๊สไนโตรเจนมากที่สุดเท่ากับ 90.53% เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนรูปของ ไนเตรตที่เปลี่ยนแปลงเป็นแก๊สไนโตรเจนรูปต่างๆ ได้แก่ ไนไตรต์ และแอมโมเนียซึ่งเป็นสารไม่พึงประสงค์ในกระบวนการดังกล่าวเนื่องจากไนไตรต์เป็นสารมัธยันต์ (intermediate product) เป็นสารกลางที่เกิดขึ้นระหว่างการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกที่ดักจับซึ่งยังไม่สามารถเปลี่ยนแปลงไปเป็นแก๊สไนโตรเจนได้อย่างสมบูรณ์ ทั้งนี้ในส่วนของแอมโมเนียซึ่งเป็นผลของการเปลี่ยนรูปของไนเตรตโดยปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกที่ดักจับอาจต้องมีการนำสู่กระบวนการบำบัดต่อไป เนื่องจากแอมโมเนียที่เกิดขึ้นในกระบวนการดังกล่าวหากปล่อยทิ้งลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติสามารถส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากไนโตรเจนดังกล่าวมีความคงตัวและหากมีความเข้มข้นสูงจะส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตที่อยู่ในแหล่งน้ำ รวมทั้งส่งผลกระทบต่อปริมาณออกซิเจนละลายน้ำเนื่องจากกระบวนการย่อยสลายไนโตรเจนในรูปดังกล่าวต้องใช้ออกซิเจนในกระบวนการ ส่งผลให้เกิดภาวะขาดออกซิเจนในแหล่งน้ำ โดยกรมควบคุมมลพิษได้กำหนดความเข้มข้นของแอมโมเนียในมาตรฐานคุณภาพน้ำผิวดิน ประเภทที่ 2 (ใช้ประโยชน์เพื่อการประมง การอนุรักษ์สัตว์น้ำ) สูงสุดไม่เกิน 0.5 mg.L⁻¹ as N [21]

4. สรุป

งานวิจัยดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าสามารถเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Ag-TiO₂ ด้วยวิธีการ Composite colloid

deposition โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นมีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ดักจับโดยพิจารณาจากผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นด้วยอุปกรณ์ BET และ XRF รวมทั้งนำตัวเร่งปฏิกิริยา Ag-TiO₂ ที่เตรียมขึ้นไปทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรต ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมและดีที่สุดคือ 1.0%Ag-TiO₂ โดยสามารถกำจัดไนเตรตได้เท่ากับ 97.23% และเปลี่ยนไปเป็นแก๊สไนโตรเจนได้สูงสุดเท่ากับ 90.53% ที่เวลา 90 min

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณแหล่งทุนงบประมาณสำหรับการทำงานวิจัยในครั้งนี้ ได้แก่ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และสำนักงานคณะกรรมการการงานวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย ประจำปี 2561 ส่งผลให้งานวิจัยดังกล่าวเป็นไปด้วยความเรียบร้อยและสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] T. Yang, K. Doudrick, and P. Westerhoff, "Photocatalytic reduction of nitrate using titanium dioxide for regeneration of ion exchange brine," *Water Research*, vol. 47, pp. 1299-1307, December 2013.
- [2] H. O. Tugaoen, S. Gercia-Segura, K. Hristovski, and P. Westerhoff, "Challenges in photocatalytic reduction of nitrate as a water treatment technology," *Science of the Total Environment*, vol. 599-600, pp. 1524-1551, May 2017.
- [3] D. Bamba, M. Coulibaly, and D. Robert, "Nitrogen-containing organic compounds: origins, toxicity and conditions of their

- photocatalytic mineralization over TiO_2 ,” *Science of the Total Environment*, vol. 580, pp. 1489-1504, December 2016.
- [4] M. Hou, Y. Tang, J. Xu, Y. Pu, A. Lin, L. Zhang, J. Xiong, J. Yang, and P. Wan, “Nitrate reduction in water by aluminum-iron alloy particles catalyzed by copper,” *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 3, pp. 2401-2407, August 2015.
- [5] P. Thongchai, “Biological removal of nitrogen and phosphorus,” *Environmental Engineering Association of Thailand*, Bangkok, 2001, pp. 50-120.
- [6] K. Doudrick, T. Yang, K. Hristovski, and P. Westerhoff, “Photocatalytic nitrate reduction in water: managing the hole scavenger and reaction by-product selectivity,” *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 136-137, pp. 40-47, February 2013.
- [7] K. Kobwittaya, and S. Sirivithayapakorn, “Photocatalytic reduction of nitrate over TiO_2 and Ag-modified TiO_2 ,” *Journal of Saudi Chemical Society*, vol. 18, pp. 291-298, February 2014.
- [8] S. Nasser, M. Fazlzadehdavilb, A. Mahvi, and M. Gholami, “Application of Ag-doped TiO_2 nanoparticle prepared by photodeposition method for nitrate photocatalytic removal from aqueous,” *Desalination and Water Treatment*, vol. 37-39, pp. 7137-7144, November 2013.
- [9] B. Naik, C. H. Manoratne, A. Chandrashekhar, A. Iyer, V. H. Prasad, and N. N. Ghosh, “Preparation of TiO_2 , Ag- TiO_2 nanoparticle and TiO_2 -SBA-15 nanocomposites using simple aqueous solution-based chemical method and study of their photocatalytic activity,” *Journal of Experimental Nanoscience*, Vol. 8, pp. 462-479, April 2013.
- [10] J. V. Hernández, S. Coste, A. G. Murillo, F. C. Romo, and A. Kassiba, “Effect of metal doping (Cu, Ag, Eu) on the electronic and optical behavior of nanostructured TiO_2 ,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 710, pp. 355-363, March 2017.
- [11] J. Nadolna, D. Arenas-Esteban, M. Gazda, and A. Zaleska-Medynska, “Pr-doped TiO_2 . The effect of metal content on photocatalytic activity,” *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, vol. 50, pp. 515-525, January 2014.
- [12] Notification of the ministry of public health No. 61. (1981). Drinking water in sealed container. 24 September 1981.
- [13] A. V. Lozovskii, I. V. Stolyarova, R. V. Prikhod'ko, and V. V. Goncharuk, “Research of photocatalytic activity of the Ag/ TiO_2 catalysts in the reduction reaction of nitrate-ions in aqueous media,” *Physical Chemical of Water Treatment process*, Vol. 31, pp. 360-366, May 2009.
- [14] Y. A. Shaban, A. A. El Maradny, and R. K. Al Farawati, “Photocatalytic reduction of nitrate in seawater using C/ TiO_2 nanoparticles,” *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, vol. 328, pp. 114-121, May 2016.
- [15] D. B. Luiz, S. Floriani Andersen, C. Berger, and H. J. José. “Photocatalytic reduction of nitrate ions in water over metal-modified TiO_2 ,” *Journal of*

- Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, vol. 246, pp. 36-44, August 2012.
- [16] W. Gao, R. Jin, J. Chen, X. Guan, H. Zeng, F. Zhang, and N. Guan, "Titania-supported bimetallic catalysts for photocatalytic reduction of nitrate," *Catalysis Today*, vol. 90, pp. 331-336, 2004
- [17] O. Soares, M. Pereira, J. Órfão, L. Faria, and C. G. Silva, "Photocatalytic nitrate reduction over Pd-Cu/TiO₂," *Chemical Engineering Journal*, vol. 251, pp. 123-130, April 2014.
- [18] E. Choi, K. Park, H. Lee, M. Cho, and S. Ahn, "Formic acid as an alternative reducing agent for the catalytic nitrate reduction in aqueous media," *Journal of Environmental Sciences*, vol. 25, pp. 1696-1702, January 2013
- [19] J. Sá, C. A. Agüera, S. Gross, and J. A. Anderson, "Photocatalytic nitrate reduction over metal modified TiO₂," *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 85, pp. 192-200, July 2009.
- [20] H. T. Ren, S. Y. Jia, J. J. Zou, S. H. Wu, and X. Han, "A facile preparation of Ag₂O/P25 photocatalyst for selectivity reduction of nitrate," *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 176-177, pp. 53-61, March 2015.
- [21] Notification of the national environmental board No. 27. Sea water quality standard. 2006.

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิ (Reader)

ต้นฉบับบทความวิจัยที่ตีพิมพ์วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีที่ 13 ฉบับที่ 3 (เดือนกันยายน - ธันวาคม พ.ศ. 2561) ได้รับการตรวจสอบแก้ไขจากผู้ทรงคุณวุฒิดังรายนามต่อไปนี้

- | | |
|--|---|
| 1. รองศาสตราจารย์ ดร.เกษม ชูจารุกุล | ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 2. อาจารย์ ดร.อรรถวิทย์ อุบโยคิน | ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ |
| 3. รองศาสตราจารย์ ดร. เดชา พวงดาวเรือง | สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ |
| 4. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันจักรี เล่นวาริ | ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุมและเครื่องมือวัด
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| 5. อาจารย์ชาญฤทธิ์ ธาราสันติสุข | สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ |
| 6. อาจารย์ ดร.วีระ ันยาภิรักษ์ | คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร |
| 7. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธัญลักษณ์ ราษฎร์ภักดี | ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น |
| 8. รองศาสตราจารย์ ดร.ขจรศักดิ์ โสภจรรย์ | ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ |
| 9. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรากร ศรีเชวงทรัพย์ | สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น |
| 10. รองศาสตราจารย์ ดร.พิชิต กิตติสุวรรณ | สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ |
| 11. อาจารย์ ดร.สงกรานต์ วิริยะศาสตร์ | ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 12. อาจารย์ ดร.ธนาพล สุขชนะ | สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ (ศูนย์หันตรา) |
| 13. รองศาสตราจารย์ ดร.กัณวรัช พลุปราชญ์ | ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 14. รองศาสตราจารย์ ดร.นิรันดร์ มาแทน | สาขาวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมวัสดุ
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และทรัพยากร
มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ |
| 15. รองศาสตราจารย์ ดร.วุฒิพล ธาราธิเรศรชัย | ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 16. รองศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนา ขำสุวรรณ | ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ |

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิ (Reader)

ต้นฉบับบทความวิจัยที่ตีพิมพ์วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีที่ 13 ฉบับที่ 3 (เดือนกันยายน - ธันวาคม พ.ศ. 2561) ได้รับการตรวจสอบแก้ไขจากผู้ทรงคุณวุฒิดังรายนามต่อไปนี้

- | | |
|---|--|
| 17. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกษม อุทัยไขฟ้า | สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย |
| 18. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุคนิรินทร์ เพชรรัตน์ | ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 19. อาจารย์ ดร.ปิยนุช ใจแก้ว | ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม
คณะวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 20. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงษ์ คงประเสริฐ | ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 21. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.แสนสด พานิช | ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 22. อาจารย์ ดร.ปรารธนา ประชานุรักษ์ | ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 23. รองศาสตราจารย์พัชร หอวิจิตร | บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น |

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)

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

2. วิธีการส่งบทความ

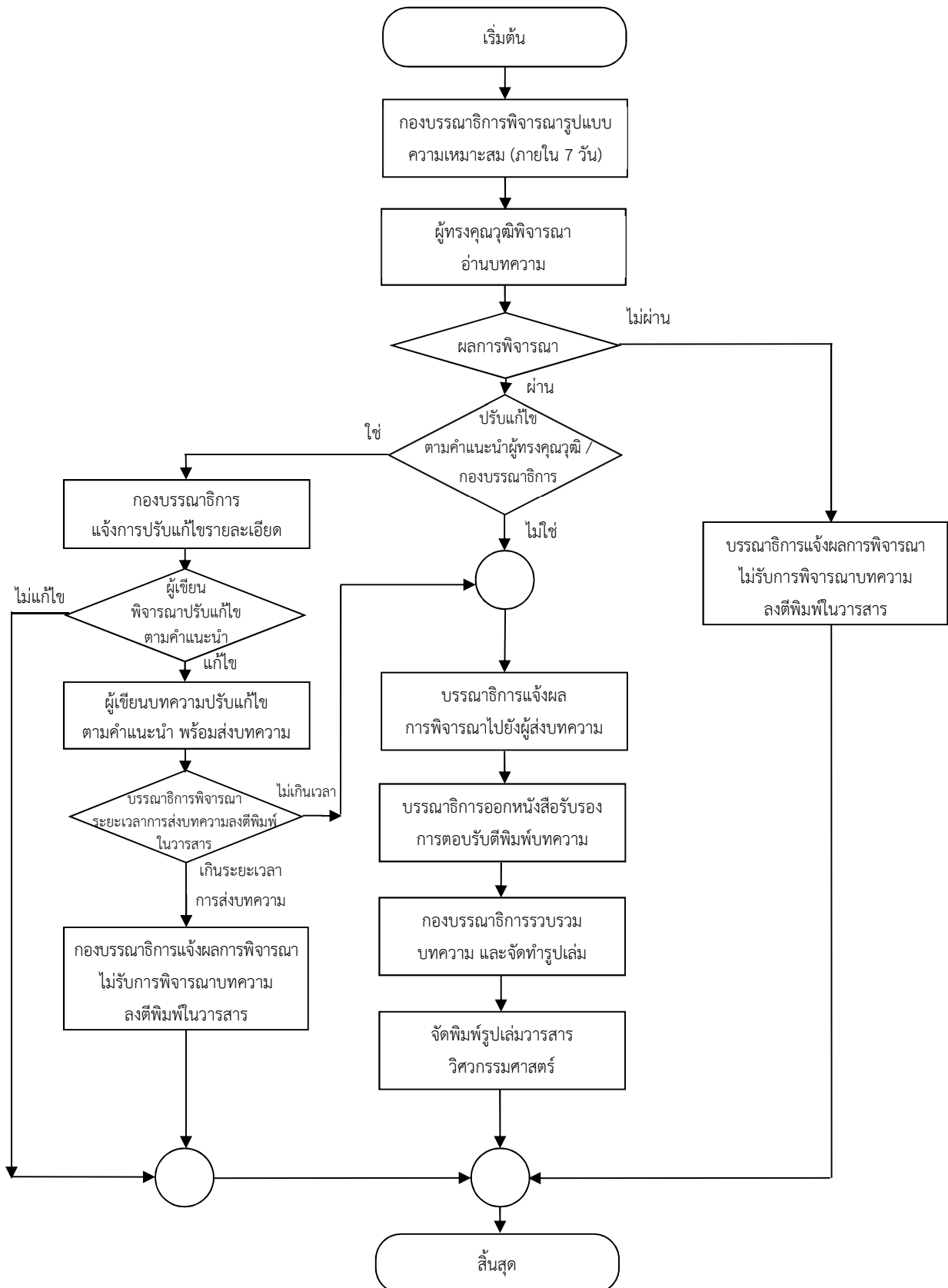
- 1) ส่งต้นฉบับบทความ ไฟล์ Microsoft Word และ pdf พร้อมแนบไฟล์สแกนแบบเสนอผลงานวิชาการเพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
- 2) ส่งไฟล์ต้นฉบับทางออนไลน์ที่
<https://www.tci-thaijo.org/index.php/sej/login>
หรือทางอีเมล JournalEngSWU@gmail.com
- 3) ดูข้อมูลวารสารวิศวกรรมศาสตร์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

3. ขั้นตอนการประเมินบทความ

การประเมินบทความวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ มีขั้นตอนดังนี้

- 1) การทบทวนโดยผู้รู้เสมอกัน (peer review) โดยผู้ทรงคุณวุฒิตั้งน้อยสองคนในสาขาที่เกี่ยวข้องแบบอำพรางฝ่ายเดียว (single-blind)
- 2) การเขียนตอบข้อซักถามและการแก้ไขปรับปรุงต้นฉบับตามข้อคิดเห็น (comments) ของผู้ทรงคุณวุฒิ โดยผู้เขียน และการพิจารณาอีกครั้งโดยผู้ทรงคุณวุฒิคนเดิม หากผู้ทรงคุณวุฒิได้แจ้งความประสงค์ขอพิจารณาอีกครั้งไว้
- 3) การประชุมกองบรรณาธิการเพื่อพิจารณาผลการทบทวนโดยผู้รู้เสมอกันจากผู้ทรงคุณวุฒิ และการแก้ไขปรับปรุงต้นฉบับ เพื่อตัดสินใจว่าจะตอบรับหรือไม่ในขั้นสุดท้าย
- 4) สำหรับบทความที่ได้รับการตอบรับ กองบรรณาธิการจะพิจารณาความถูกต้องของรูปแบบเพื่อแจ้งผู้เขียนแก้ไข
- 5) บรรณาธิการออกหนังสือรับรองการเผยแพร่ให้ผู้เขียน และมอบวารสารให้ผู้เขียนทุกคนคนละ 1 เล่ม เมื่อตีพิมพ์เผยแพร่เป็นรูปเล่มแล้ว โดยมอบไว้กับผู้เขียนหลัก

ขั้นตอนการพิจารณาผลงานเพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารคณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ





**แบบเสนอผลงานวิชาการเพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ**

เรียน บรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ข้าพเจ้า ☐ นาย ☐ นาง ☐ นางสาว ☐ อื่น ๆ (โปรดระบุ)

ชื่อ - สกุล

(ภาษาอังกฤษ).....

ตำแหน่งทางวิชาการ (โปรดระบุ) ☐ ศาสตราจารย์ ☐ รองศาสตราจารย์ ☐ ผู้ช่วยศาสตราจารย์

☐ อื่น ๆ (โปรดระบุ).....

ที่อยู่และหมายเลขโทรศัพท์ (ที่ติดต่อได้).....

โทรศัพท์ที่ทำงาน..... โทรศัพท์มือถือ.....

โทรสาร..... อีเมล.....

มีความประสงค์ขอส่งบทความ เรื่อง :

ชื่อผลงาน (ภาษาไทย)

ชื่อผลงาน (ภาษาอังกฤษ)

ประเภทของผลงานวิชาการ

☐ บทความรับเชิญ ☐ บทความวิจัย ☐ บทความวิชาการ

พร้อมกันนี้ ได้แนบเอกสาร ☐ ต้นฉบับบทความเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ในวารสาร จำนวน 3 ชุด
☐ แบบเสนอผลงานวิชาการ (JournalEngSWU-03) จำนวน 1 แผ่น
☐ ซีดีบันทึกข้อมูลการพิมพ์บทความในรูปแบบไฟล์ Microsoft Word จำนวน 1 แผ่น

ในกรณีที่ไม่สามารถติดต่อข้าพเจ้าได้ กองบรรณาธิการสามารถติดต่อบุคคลดังต่อไปนี้

ชื่อ - สกุล.....

โทรศัพท์..... โทรสาร

อีเมล..... มีความเกี่ยวข้องเป็น.....

ข้าพเจ้าขอรับรองว่าผลงานนี้ ☐ เป็นผลงานของข้าพเจ้าเพียงผู้เดียว
☐ เป็นผลงานของข้าพเจ้าและผู้ที่เกี่ยวข้องในผลงาน

ผลงานนี้ยังไม่เคยลงตีพิมพ์ในวารสารใดมาก่อน และจะไม่นำไปเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารอื่นๆ อีก นับจากวันที่ข้าพเจ้าได้ส่งผลงานต้นฉบับนี้มายังกองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ลายมือชื่อ.....

(.....)

เจ้าของผลงาน



คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

เลขที่ 63 หมู่ 7 ถนนรังสิต - นครนายก

อำเภอองครักษ์ จังหวัดนครนายก 26120

โทร 0 2649 5000 ต่อ 27560 27070

โทรสาร 0 3739 5527

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

บทความวิจัย

- การพัฒนาแบบจำลอง Hybrid Choice Models ในการเปลี่ยนรูปแบบการเดินทาง กรณีศึกษา: รถไฟฟ้าสายสีเขียวสถานีมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ Development of Hybrid Choice Models for Modal Shift Study: A Case Study of MRT Green Line Extension Kasetsart University Station โดย ณัฐชนน อุตตาทิบาล เอกชัย ศิริกิจพาณิชย์กุล ชวเลข วณิชเวทินวิโรจน์ รุโจปการ
- การผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมที่มีการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยใช้สมการระบบระบายอากาศของการทำความเย็นแบบระเหยน้ำ Stability Analysis of a Power-switching Converter with an EMI Filter for PV Systems โดย โกศล ชัยเจริญอุดมรุ่ง กองพัน อารีรักษ์ กองพล อารีรักษ์ อธิษฐ์ เสรีขจรจารุ วรวิทย์ ศรีมะเร็ง
- การขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟสด้วยคอนเวอร์เตอร์กำลังแบบคู่โดยใช้การควบคุมบนแกนสนามแม่เหล็กและการควบคุมบนแกนแรงดันไฟฟ้า Three-Phase Induction Motor Drives with Back-to-Back Converter Using Field-Oriented Control and Voltage-Oriented Control โดย นาวิ รุจิตามพ์ เวคิน ปิยรัตน์
- การบำบัดน้ำเสียจากการแปรรูปเมล็ดกาแฟแบบเปียก ด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก Treatment of the Wastewater from Wet Coffee Processing Using Microalgae Cultivation โดย รุ่งนภา เขียววิจิตร กลิ่นประทุม ปัญญาปิง สุรสิทธิ์ เทียงจันทา
- ปัจจัยที่มีผลต่อการเพิกถอนรายวิชาเรียนของนิสิตระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีการศึกษา 2559 Factors Affecting Course Withdrawals of Undergraduate Engineering Students at Srinakharinwirot University in Academic Year 2016 โดย กำพล วรดิษฐ์ สมภาพ บุญนาคักดิ์
- พฤติกรรมการลอยตัวของหัวอ่านแม่เหล็กไฟฟ้าในฮาร์ดดิสก์แบบ Sub Ambient Pressure ในสภาวะคงตัว Characteristics of Flying Height for Time Independent Sub Ambient Pressure Slider Head โดย ณัฐพรกรณ์ เจริญ เจษฎา พานิชกรณ์ นิษฐา วงษ์สีดาแก้ว
- ผลของภาระดัดต่อพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปแบบคืบของไฟสีก Effect of Bending Load on the Creep Deformation Behavior โดย ธวัชชัย อุ้นใจม นินนธ์ อุดมหมอ เมฆินทร์ อินใจ
- A วงจรทบระดับแรงดันแบบหลายอินพุตที่มีอัตราขยายแรงดันสูงสำหรับระบบพลังงานทดแทน A High Step-Up Multi-Input Boost Converter for Renewable Energy Systems โดย เกื้อกูล กองกาญจนะ สุตารัตน์ ขวัญอ่อน
- การหาแบบจำลองและการจำลองสถานการณ์ของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเชิงโครนัส แบบแม่เหล็กถาวร เชื่อมต่อกับวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าสามเฟส Modeling and Simulation of Permanent Magnet Synchronous Motor Drives Fed by Three Phase Rectifier โดย กิตติวงศ์ สุธรรมโน เทพพนม โสภาคเพิ่ม กองพัน อารีรักษ์
- พฤติกรรมทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชลล์เมื่อใช้ปริมาณวัสดุ ขันผิวทางเดิมหมุนเวียนเพื่อใช้งานใหม่ต่างกัน Engineering Performance of Asphalt Concrete by Marshall Test Using Different Reclaimed Asphalt Pavement Content โดย นิรชร นกแก้ว ดำรงค์ ปาละกุล
- การประยุกต์ใช้การปรับสภาพผิวโดยการยิงอนุภาคแข็งเพื่อปรับปรุงความต้านทานการสึกหรอแบบยึดติดในกระบวนการรีดความหนาผนังถ้วยอะลูมิเนียม Application of Surface Modification by Shot Peening for Improving Adhesive Wear Resistance in Ironing of Aluminum Alloy Cup โดย วิทยา ดาวดอน สุรัตน์ วรรณศรีสุเชษฐ์ ช่อนกลิน รุ่งสันต์ ไกรกลาง นรารักษ์ บุตรชา
- การกำจัดไนเตรตด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ขึ้นร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา ไทเทเนียมไดออกไซด์เจือเงิน Nitrate Removal Using Photocatalytic Reduction Process with Ag-TiO₂ Catalyst โดย สุนัย ขวัญยืน ธรรมศักดิ์ ไรจน์วิรุฬห์ อรรถวรรณ ไรจน์วิรุฬห์ สันญา สิริวิทยาภรณ์