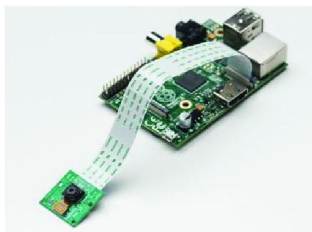
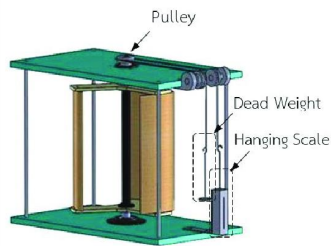




วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

SRINAKHARINWIROT ENGINEERING JOURNAL ปีที่ 13 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม – เมษายน พ.ศ. 2561



คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เป็นวารสารในศูนย์ข้อมูลดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (Thai – Journal Citation Index Centre: TCI) กลุ่มที่ 1 พ.ศ. 2558-2562 เลขที่ ISSN 1905-4548 เพื่อเผยแพร่บทความวิจัยและบทความวิชาการ ด้านวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีวิศวกรรมเคมี วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมอุตสาหการ วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ วิศวกรรมชีวการแพทย์ และสาขาใกล้เคียงอื่นๆ ทั้งในเชิงทฤษฎีและเชิงปฏิบัติ เป็นภาษาอังกฤษหรือภาษาไทยที่มีบทความภาษาอังกฤษ

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

วัตถุประสงค์

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

เจ้าของ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

63 หมู่ 7 ตำบลอรัญญิก อำเภองอกศรีวิชัย

จังหวัดนครนายก 26120

โทร. 0 2649 5000 ต่อ 27073

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

อีเมล journalengswu@gmail.com

พิมพ์ที่ ห้างหุ้นส่วนจำกัดล้านมีเดีย เซอร์วิส

91/2 หมู่ 4 เฟสเบสโต้ หมู่บ้านปิยมณีน

ต.บึงคำพร้อย อ.ลำลูกกา จ.ปทุมธานี 12150

โทร. 084 014 0041 หรือ 086 422 4298

E-mail: new.violet@hotmail.com



วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ที่ปรึกษากองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.เวคิน	ปิยรัตน์	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริพงษ์	ฉายสินธ์	รองคณบดีฝ่ายแผนและพัฒนา

รายนามคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ

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

หัวหน้ากองบรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กำพล วรดิษฐ์

กองบรรณาธิการ

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

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

ผู้ช่วยบรรณาธิการ

นางสาวยุพาพร ประไพย์

เลขานุการ

นางชนิษฐา แก้วล้วน

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

Mechanical Properties of Local Cement-Clay Interlocking Bricks in Central Part of Thailand Panuwat Joyklad, Satit Areecharoen, and Qudeer Hussain	1
การควบคุมเวลาล่าช้าของงานด้วยเทคนิค PERT/CPM บริษัท ทีโอที จำกัด(มหาชน) กรณีศึกษา : การติดตั้งระบบอินเตอร์เน็ตความเร็ว Fiber to the x (FTTx) ที่สถานีก๊าซ NGV ปตท. จ.ปทุมธานี The Time Delay Control of the Technique PERT / CPM TOT Public Company Limited Case Study: The Project to Install Speed Fiber to the x (FTTx) at the NGV Stations PTT Pathum Thani จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร ธนวัฒน์ สว่างงาม	13
สมบัติพื้นฐานและการเกิดคาร์บอนชั่นของคอนกรีตที่แทนที่ด้วยวัสดุประสานต่างชนิดกัน Basic Properties and Carbonation of Concrete Replaced with Different Binders บุญญิตี วารินทร์ไพล ปิติศานต์ กร้ามาตร	27
พฤติกรรมภายใต้แรงแผ่นดินไหวของผนังรับแรงคอนกรีตหล่อสำเร็จรูปด้วยรอยต่อแบบการเชื่อมทาบเหล็กเส้น Seismic Behavior of Precast Concrete Load Bearing Wall with Welded Rebar Connections เอกชัย อยู่ประเสริฐชัย พงษ์ศักดิ์ วิวัฒน์โรจนกุล พิษย สุวรรณสายะ อมร พิมานมาศ	39
การจำลองหุ่นส่วนร่างกายของทรวงอกสำหรับการศึกษาการประมวลผลภาพทางการแพทย์ A Phantom Simulation of Thoracic for Medical Image Processing Study ธนธร สันติธรรม ณัฐพงศ์ จันทรรตา ปวีตรา บัลลังก์นาค ประธาน วงศ์ดาหล้า ชิชณพพงศ์ บุตรดี ปฏิวัติ โชติมถล ธัชชัย ศรีเสน ฐิติพงศ์ แก้วเหล็ก	52
การแก้ปัญหาการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนานที่มาก วัตถุประสงค์ Solving Line Balancing and Allocation Multi-skilled Workers Problem on Parallel Assembly Lines under Many-objective ชินวิชญ์ สินธุเดชกุล ปารเมศ ชูติมา	63
การจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะตัวยูขนานที่มีวัตถุประสงค์จำนวนมากโดยใช้วิธีการเชิง วิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก Mixed-model Parallel U-shaped Assembly Line Balancing under Many-Objectives Using a Multi-Objective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition เพ็ญนภัส จิรัชัย ปารเมศ ชูติมา	82
ผลกระทบต่อการเปลี่ยนขนาดความยาวและการปรับมุมใบกังหันต่อความเร็วรอบการหมุนและโมเมนต์บิดของ กังหันลมแกนตั้ง The Effects of Chord Line Size Changing and Blade Pitch Adjustment on Rotational Speed and Torque of Vertical Axis Wind Turbine สุรัชย์ เหมหิรัญ	98

สารบัญ

บทความวิจัย (ต่อ)

- สมบัติทางกลและทางกายภาพของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกและขี้เลื่อยไม้ยางพารา 107
Mechanical and Physical Properties of Thermoplastic Natural Rubber Composites Reinforced with Rubberwood Sawdust
ชาตรี หอมเขียว สุรสิทธิ์ ระวีวงศ์ วรพงศ์ บุญช่วยแทน วิริยะ ทองเรือง
- การวิเคราะห์แนวโน้มปริมาณน้ำหลากสูงสุดของกลุ่มน้ำหลักในประเทศไทย 123
Flood Peak Trend Analysis of the Major River Basin in Thailand
ไชยาพงษ์ เทพประสิทธิ์ พงศธร โสภำพันธุ์ นิมิตร เติตฉันทพิพัฒน์
- A Unique Grid-flux-oriented Control Algorithm for Synchronization and Power Controls of a 132
Doubly-Fed Induction Generator System
Sutthimat Mueangngoen and Yuttana Kumsuwan
- การพัฒนาเครื่องจักรซีเอ็นซีขนาดเล็กเพื่อตัดแผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิต 143
Aluminum Composite Cutting Machine Development Using CNC
พรเทพ มานิตยวงษ์ สุวรรณิ อัสวกุลชัย
- การพัฒนาเครื่องฟักไข่สำหรับการตรวจหาตัวอ่อนในไข่ไก่โดยใช้เทคนิคการประมวลผลภาพดิจิทัล 151
Development of Egg Incubator for Detecting Embryos in Chicken Eggs Using Digital Image Processing Techniques
วิสิทธิ์ ลุมชะเนาว์ ณัฐวุฒิ พจน์ปริญญา
- การจำลองสถานการณ์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการให้บริการของแผนกผู้ป่วยนอก โรงพยาบาลแหลมฉบัง 166
Simulation to Improve Service Performance of Outpatient Department in Laem Chabang Hospital
เชษฐา ชำนาญหล่อ กุลสัมพันธ์ สุขसानต์ จริสตา สายบุญณะ
- แบบจำลองการอบแห้งพริกไทยด้วยเทคนิคเจ็ตสเปาต์ดีดเบดโดยใช้ระบบอนุมานฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้ 176
Modeling Pepper Drying by Jet Spouted Bed Technique Using ANFIS
กิตติ สถาพรประสารณ โปธิ์ทอง ปราณีตพลกรัง

สารบัญ

บทความวิจัย (ต่อ)

- การลดของเสียในกระบวนการเป่าฟิล์มสำหรับถุงพลาสติกชนิด PP โดยวิธีซิกซ์ ซิกมา 187
Defect Reduction in Film Blowing Process by Six Sigma Approach
นฤมล ไชยโคตร ภารปภากร อธิษฐานันท์ รติรัตน์ กิตติปัญญาพัฒน์ สิริเดช ชาตินิยม

บทความวิชาการ

- Non-Line-Impedance-Synthesized Power Sharing Control in Microgrid Using On-demand Power 202
Feeding
Suchart Janjornmanit, Suttichai Premrudeepreechacharn, and Kohji Higuchi

Mechanical Properties of Local Cement-Clay Interlocking Bricks in Central Part of Thailand

Panuwat Joyklad^{1*}, Satit Areecharoen² and Qudeer Hussain³

^{1*}Assistant Professor, Corresponding Author, Srinakharinwirot University, Thailand

²Graduate Student, Srinakharinwirot University, Thailand

³Research Faculty Member, Construction and Maintenance Technology Research Center (CONTEC),

Sirindhorn International Institute of Technology, Thammasat University, Thailand

Corresponding author: Email: panuwatj@g.swu.ac.th

ABSTRACT

This paper presents the findings of an experimental investigation performed on cement-clay interlocking (CCI) hollow bricks made using cement and clay, by conventional method. In Thailand, these CCI bricks are made in different regions by using locally available clay and there is no standard mix design to prepare bricks. Therefore, CCI brick samples were collected from different three regions of Thailand to study the influence of locally available clay and mix design ratio on the mechanical properties of CCI bricks. Mechanical properties such as compressive strength, splitting tensile strength, modulus of rupture and water absorption were determined. Results show that each region is following different mix design ratio based on availability of local materials and knowledge. It was also observed that locally available materials and mix design ratio has a significant effect on the mechanical properties of CCI bricks. The compressive strength of CCI bricks was observed between 4.22 MPa to 16.40 MPa. A large variation in the values of splitting tensile strength, modulus of rupture and absorption were also observed for different regions. This study indicates that there is an urgent need to establish and enforce standard guidelines for codes for CCI brick manufacturing process in Thailand.

Keyword: Compressive strength, tensile strength, water absorption capacity, interlocking bricks

1. Introduction

In many developing countries especially in the rural, natural compacted soil has good insulation and fire-resistant properties [1]. It is, however, vulnerable to weather especially during rainy season and soil material can expand and loose cohesiveness, particularly with cement plaster. There is an initiative to produce bricks by using

natural soil bricks because they have been identified as low-cost material. The technology uses the available soil on site, which can be stabilized with a small amount of cement or/ and lime depending on the characteristics of the soil so as to improve the engineering properties of the produced bricks. Soil can be improved and used as a building material for various types of structures by adding

substances known as stabilizers, and the product is called stabilized soil [2] . A properly stabilized, consolidated, well-graded soil that is adequately moisturized, mixed, and cured will provide a strong, stable, waterproof and long-lasting building bricks. Regarding soil, Walker [3] assessed the influence of soil characteristics and cement content on the physical properties of stabilized soil blocks. Both saturated strength and durability of cement stabilized soil blocks were improved by increasing cement and impaired by clay content. He concluded that the most ideal soils for cement soil block production should have plasticity index between 5 and 15. Soils with a plasticity index above 20–25 are not suited to cement stabilization using manual presses, due to problems with excessive drying shrinkage, inadequate durability and low compressive strength. Reddy [4] studied the use of steam curing process and showed that it can lead to quick production of stabilized soil blocks. Venkatarama and Gupta [5] studied the various characteristics of soil-cement blocks using highly sandy soils. The results indicate that there is 2.5 times increase in strength for doubling of cement content from 6%. Saturated water content of the blocks is not sensitive to cement content, whereas rate of moisture absorption greatly depends on the cement content. Pore size decreases with increase in cement content of block, whereas surface porosity is independent of the cement content. Stabilized soil cement blocks have been used for load bearing masonry structures in many parts of the world like India. More details on stabilized soil block technology can be found in other studies [6-9]. Mortar is used in normal brick construction in order to create continuous structural

form and to bind together the individual units in brickwork. In normal bricks, mortar and bricks provides the high strength in brickwork system. Many studies have been done in perfecting the performance of the brickwork [10-12]. The higher demand of construction of buildings gives reason to find ways to fulfill and to solve the problems related to the construction. Interlocking bricks is an alternative system which is similar to the “LEGO blocks” that use less or minimum mortar to bind the bricks together. Interlocking bricks was introduced to reduce the use of manpower, hence fulfill the requirement of Industrialized Building System (IBS). Interlocking brick system is a fast and cost- effective construction system which offers good solution in construction.

In Thailand, cement- clay interlocking (CCI) bricks made of locally available clay are widely used to construct low rise residential buildings throughout the country. These interlocking bricks are manufactured locally in small factories located in different regions of Thailand. At present, there are at least 700 brick manufacturing plants in Thailand [13]. These plants are located mostly in rural areas and these plants are owned by successful farmers or entrepreneurs who have gained experience through working in other brick plants. Many of the rural brick owners use clay dug from their own land. According to the geological map of Thailand, the sedimentary and metamorphic rock distribution of Thailand is quite diverse ranging from mudstone to sand stone and shale [14]. Many studies have reported that change in clay contents cause change in mechanical properties of bricks [15- 16]. In addition, there are no standard guidelines or reference codes in practice to prepare CCI bricks.

Therefore, each CCI manufacturing plant is using different mix designs. These mix designs are developed based on the availability of local materials and knowledge. For example, some plants use only cement and clay to produce CCI bricks whereas some plants also add stone dust or sand to along with cement and clay to produce CCI bricks. The change in mix design proportions directly effects the mechanical properties of CCI bricks such as compressive strength, tensile strength and water absorption.

As per author's information there are limited research studies on the mechanical properties of clay- cement interlocking bricks manufactured in different regions of Thailand. Hence there is a need to hasten the effort to determine the effect of locally available materials and mix design ratios on the mechanical properties of clay- cement interlocking bricks. To achieve this goal, an experimental program was planned to determine the mechanical properties such as compressive strength, splitting tensile strength, and modulus of rupture and water absorption. CCI brick samples were collected from different three regions of Thailand to investigate the influence of locally available clay and mix design ratio on the mechanical properties of CCI bricks.

2. Experimental Program

This paper presents an experimental investigation on the mechanical properties of cement-clay interlocking (CCI) bricks manufactured by small factories in different regions of Thailand. The main objective of this study is to investigate the effect of locally available materials and different mix ratios on the mechanical properties

of CCI bricks such as compressive strength, splitting tensile strength, modulus of rupture and water absorption. Further details of experimental program are discussed in the following sections.

2.1. Cement-Clay Interlocking Bricks

In this study, CCI bricks were collected from different provinces or regions i.e., region A, region B and region C of Thailand to investigate the effect of locally available materials and mix design ratio on the mechanical properties of clay brick blocks. According to the geological map of Thailand, the soil stratum of Thailand is comprised of different types of sedimentary and metamorphic rocks as shown in figure 1 [16]. In this study, each region was selected to represent different types of sedimentary and metamorphic rock thus different kinds of locally available materials. The names of regions or provinces are not given in this paper to avoid any conflict. A short description about sedimentary and metamorphic rocks of each region is also provided in Table 1. The mix design ratio followed by each plant is also shown in the table 2. The CCI brick samples were collected from brick manufacturing plants located in each region and nominal size of CCI brick samples are given in Table 3.

Table 1
Soil stratum details [16]

Region type	Soil Stratum type
Region A	Siltstone, sandstone, claystone and conglomerate
Region B	Mudstone, limestone, sandstone, claystone and conglomerate
Region C	Semi-consolidated and consolidated rocks Limestone, dolomitic limestone, chert and dolomite Mudstone, siltstone, sandstone, and limestone

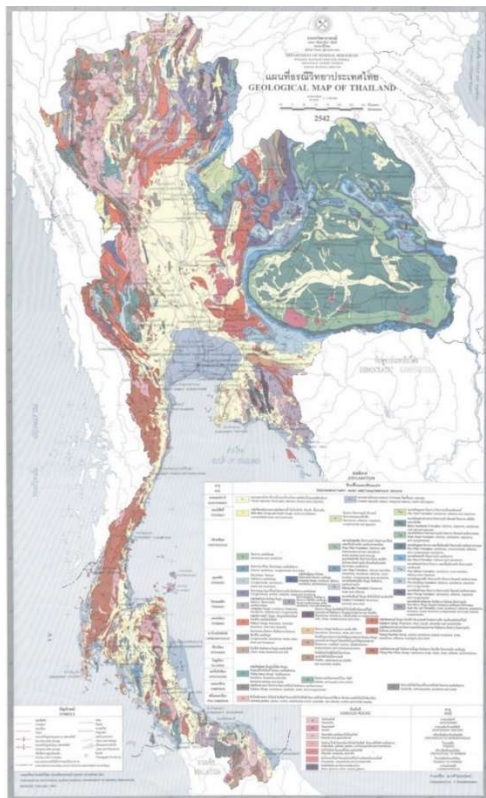


Figure 1 Geological Map of Thailand [16]

Table 2

Mix components of different regions to prepare CCI bricks

Mix components (kg/m ³)	Region A	Region B	Region C
Cement	164.0	660.0	534.0
Sand	-	570.0	380.0
Stone dust	-	380.0	126.0
Red clay	1636.0	190.0	760.0

3. Manufacturing of bricks

In this study, the cement clay interlocking bricks were collected from different region of Thailand. These CCI bricks are usually made using locally available materials such as clay, sand and stone dust along with the cement as a binding agent to enhance the strength and durability of CCI bricks. The manufacturing process of CCI bricks is essentially comprised of three steps. In the first step, the large size clay boulders are broken into fine pieces by using mechanical grinding machine. In the second step, the fine-grained clay is mixed with cement and water using mechanical concrete mixer. In the final step, the cement-clay mix is placed into the aluminum molds and pressed either by hydraulically or manually operated machines. The typical samples of CCI bricks collected from different regions are shown in the figures 2-4. The nominal dimensions of CCI bricks are shown in figure 5 and summarized in table 3.

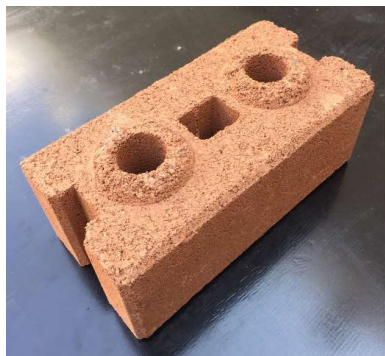


Figure 2 CCI brick sample (Region A)



Figure 3 CCI brick sample (Region B)

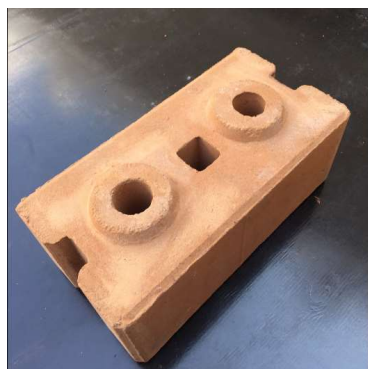


Figure 4 CCI brick sample (Region C)

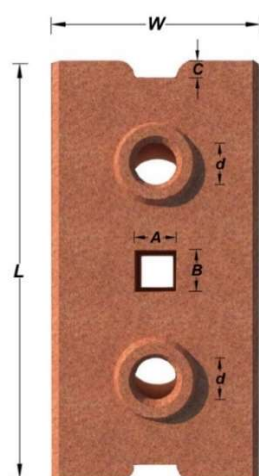


Figure 5 Typical detailing of CCI brick

Table 3

Detailing of CCI bricks

Dimensions (mm)	Region A	Region B	Region C
L	250	200	250
L1	200	150	200
W	125	100	125
H	100	100	100
d	35	20	30
A x B	20 x 20	30 x 25	25 x 25
C x D	10 x 20	10 x 25	10 x 25
Bearing Area (BA) (cm ²)	285	181	287
Weight (kg)	4.95	3.02	5.01

4. Mechanical properties of CCI bricks

The mechanical properties of cement-clay interlocking (CCI) bricks such as compressive strength, modulus of rupture, splitting tensile strength and water absorption were investigated by performing standard tests on CCI bricks. A detailed description about test methods is provided in the following sections.

4.1. Compressive Strength

The compressive strength of CCI bricks was determined following standard test method for compressive strength of masonry prisms (ASTM C1314-14) [17]. As the interlocking bricks contain frogs and projections. The net loaded area is more than 35% of the bed face, the frogs and projections were removed by cutting. The ICC bricks were tested in universal testing machine (UTM). The load was applied at constant speed 0.5 mm/minute. Three samples of bricks were tested for each type and average results were used. The compressive strength was determined

using equation 1. A typical load setup is shown in the figure 6.

$$CS = P/A \quad (1)$$

Where;

CS = Compressive Strength (MPa)

P = Maximum load (N)

A = Net bearing area of CCI bricks (mm^2)

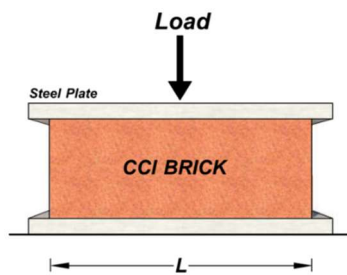


Figure 6 Loading setup for compression test

4.2. Modulus of Rupture

Flexural strength, also known as modulus of rupture, or bend strength, or transverse rupture strength is a material property, defined as the stress in a material just before it yields in a flexure test. In this study the flexural strength of CCI bricks was determined following standard test methods for sampling and testing brick and structural clay tile (ASTM C67-03) [18]. The load was applied at constant speed 0.5 mm/minute. Three samples of bricks were tested for each type and average results were used. The modulus of rupture was calculated using expression 2. A typical loading setup for flexure strength is shown in the figure 7.

$$R = (3P/WH^2)(L_1/2-x) \quad (2)$$

Where, R is modulus of rupture (MPa), L_1 is the distance between the supports (mm), W is the net width (face to face distance minus voids) of the specimen at the plane of failure (mm), H is the depth (bed surface to bed surface distance) of the specimen at the plane of failure (mm), and x is the average distance from the mid-span of the specimen to the plane of failure measured in the direction of the span along the centre-line of the bed surface subjected to tension (mm).

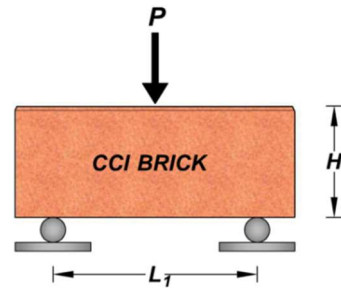


Figure 7 Loading setup for flexural strength test

4.3. Splitting tensile strength

In this study, the splitting tensile strength of CCI bricks was determined by essentially following standard test method for splitting tensile strength of masonry units (ASTM C1006-07) [19]. The load was applied at constant speed 0.5 mm/minute. Three samples of bricks were tested for each type and average results were used. A typical loading setup for flexure strength is shown in the figure 8.

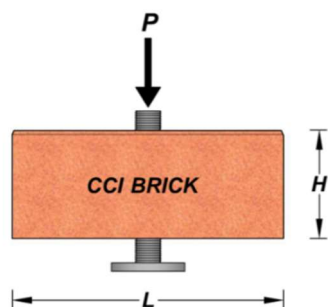


Figure 8 Loading setup for splitting tensile strength test

The splitting tensile strength was calculated using the following expression.

$$T = 2P/(\pi L_2 \cdot H) \quad (3)$$

Where, T is splitting tensile strength (MPa), P is the ultimate force (N), L_2 is the split length, in. (mm), gross length minus the length of any voids along the failure plane of the bearing rods and H is the distance between rods (mm).

4.4. Water absorption capacity

Water absorption capacity (percentage by mass) after 24 hours immersion in water of CCI bricks was essentially determined following the standard test methods for sampling and testing concrete masonry units and related units (ASTM C140-11a) [20]. A typical setup for brick immersion is shown in the figure 9.



Figure 9 Immersion of CCI bricks in water

The absorption capacity of the CCI bricks was calculated by using following expression.

$$A = (100/W_d)(W_s - W_d) \quad (4)$$

Where, A is absorption capacity in percentage (%), W_s is saturated weight of specimen, (kg) and W_d is oven-dry weight of specimen, (kg).

5. Results and Discussion

In this study, CCI bricks were collected from different provinces or regions i.e., region A, region B and region C of Thailand to investigate the effect of locally available materials and mix design ratio the mechanical properties of clay brick blocks. The experimental results are summarized in the tables 4-7 and graphically shown in the figures 10-13. Test results and findings of this study are further discussed in detail in the following sections.

5.1. Compressive Strength of CCI bricks

Compressive strength of CCI bricks were determined by applying axial compressive load under static loading. The experimental test results are summarized in table 4 and compared in figure 10. As it can be seen, the highest compressive strength is recorded for CCI bricks collected from region B due to the highest amount of cement and clay contents compared with others. On the other hand, the lowest values of compressive strength were observed for CCI bricks collected from region A. This is associated with the factor that CCI bricks of region A contains a lowest amount of cement as compared with other regions. The compressive test results of CCI bricks collected from region C shows moderate values compared with regions A and B. According

to the Thai community product standard 602/2547, the lowest compressive strength of clay bricks is 7.0 MPa [21]. By comparing with Thai community product standard, average compressive strength of region A bricks is found lower than standard recommendations, however compressive strength of region B and C is found higher than recommended values.

Table 4

Test results of compressive strength

Bricks	Compressive strength (MPa)
1A	5.23
2A	2.84
3A	4.59
Average	4.22
1B	18.52
2B	14.78
3B	16.08
Average	16.46
1C	7.41
2C	11.60
3C	8.48
Average	9.16

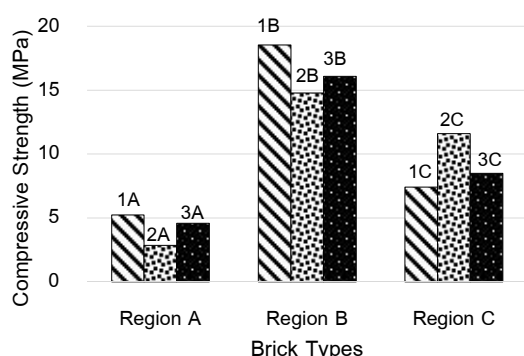


Figure 10 Compressive strength test results

5.2. Modulus of Rupture

Modulus of rupture of CCI bricks were determined by testing three brick samples of

each regions under three-point bending loading scheme. The experimental test results are summarized in table 5 and graphical comparison is shown in the figure 11. In contrast to the compressive strength, highest average modulus of rupture (i.e., 1.94 MPa) is observed for CCI bricks collected from region C. The modulus of rupture of region C bricks is found slightly higher than the region B (only 7%) which may be associated with higher amount of red clay in region C bricks as compared with region B. Modulus of rupture (sometimes referred to as bending strength), is a measure of a brick's strength before rupture. Since red clay is cementitious material and a higher amount of red clay may cause large bending of the bricks prior to the rupture of bricks thus resulted into higher modulus of rupture of brick. The lowest values of modulus of rupture is recorded for CCI bricks of region A. The CCI bricks collected from region B showed a moderate value of modulus of rupture as shown in the figure 11.

Table 5

Modulus of rupture

Bricks	Modulus of Rupture (MPa)
1A	0.77
2A	0.72
3A	1.06
Average	0.85
1B	1.73
2B	1.98
3B	1.67
Average	1.80
1C	2.06
2C	1.56
3C	2.20
Average	1.94

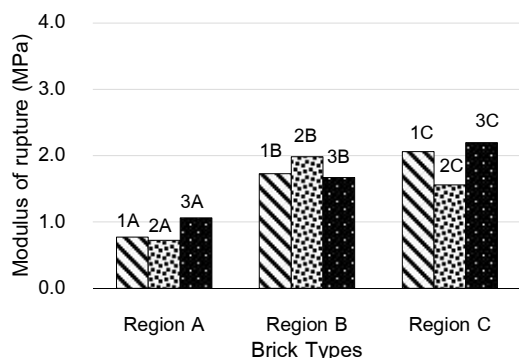


Figure 11 Flexure test results

5.3. Splitting tensile strength

Splitting tensile strength of CCI bricks were determined by testing three brick samples of each regions under single point loading scheme. The experimental test results are summarized in table 6 and graphical comparison is shown in the figure 12. Similar to the compressive strength, highest average splitting tensile strength (i.e., 0.29 MPa) is observed for CCI bricks collected from region B. The lowest values of splitting tensile strength is recorded for CCI bricks of region C. The CCI bricks collected from region A showed a moderate value of modulus of rupture.

Bricks	Splitting tensile strength (MPa)
3C	0.20
Average	0.23

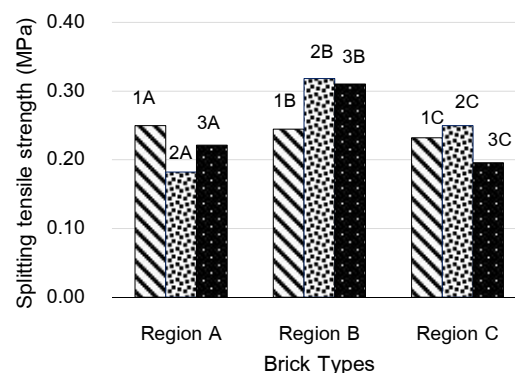


Figure 12 Splitting tensile strength results

5.4. Water absorption capacity

Water absorption capacity of CCI bricks were determined by immersion method. In this method three brick samples of each regions were immersed in water for 24 hours to determine saturated weight. The experimental test results are summarized in table 7 and shown graphically in figure 13. The highest average amount (i.e., 13.0%) of water absorption was observed for CCI bricks of region A. This is indicating that region A bricks are not well compacted (lowest compressive strength is also verifying this assumption) thus having large voids inside due to the absence of sand particles. Large air voids in CCI brick tends to absorb more water. Consequently, CCI bricks collected from region B and C showed quite close values of average absorption capacity of 10.0% and 10.1%, respectively. The lower water absorption can be associated with well compaction due to the presence sand as shown in table 2. According to the Thai community product standard 602/2547 [24], the maximum water absorption capacity of

Table 6
Splitting tensile strength

Bricks	Splitting tensile strength (MPa)
1A	0.25
2A	0.18
3A	0.22
Average	0.22
1B	0.24
2B	0.32
3B	0.31
Average	0.29
1C	0.23
2C	0.25

bricks is 288 kg/m^3 . By comparing with Thai community product standard 602/ 2547, water absorption capacity of all collected bricks is lower than recommended values, however water absorption capacity of region A brick is relatively close to the standard values.

Table 7

Water absorption test results

Bricks	Water absorption (%)	Water absorption (kg/m^3)
1A	15.15	265.0
2A	14.50	253.0
3A	9.340	160.0
Average	13.00	226.0
1B	9.830	167.0
2B	10.39	171.0
3B	9.840	164.0
Average	10.00	167.0
1C	10.02	174.0
2C	10.34	179.0
3C	10.07	178.0
Average	10.10	177.0

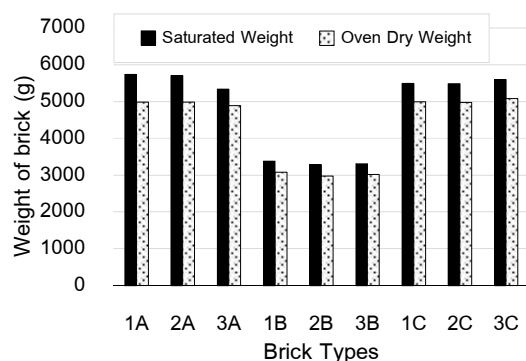


Figure 13 Comparison of absorption test results

5.5. Failure modes

All CCI bricks showed a quite similar failure mode in each type of test such as compression, flexure and splitting. Under the compression test, the bricks were mainly failed due to the crushing of cement and clay as shown in the figure 14. An

inclined crack in the middle region of CCI bricks were observed in the modulus of rupture test as shown in figure 15. This is mainly due to the reason that under three-point bending loading scheme, the brick tends to bend after load application. Minor flexural cracks were observed at the tension face of brick prior to the final inclined rupture of the brick. A straight crack line was observed in the middle region of CCI bricks in the splitting tensile strength test as shown in the figure 16. The strain crack line is indicating the pure compression in the brick during splitting tensile strength test.



Figure 14 Typical failure of brick in compression



Figure 15 Typical failure of brick in flexure



Figure 16 Typical failure of brick in splitting tensile test

6. Conclusions

This study reported an experimental investigation on the mechanical properties of cement-clay interlocking (CCI) bricks collected from different provinces or regions of Thailand located over different geological stratum. Standard tests were performed to determine the water absorption, compressive strength, modulus of rupture and splitting tensile strength. Based on experimental results; following conclusions were drawn;

1. Experimental results indicate that use of locally available materials and mix design ratio has a significant effect on the mechanical properties of CCI bricks.
2. In general, mechanical properties of cement-clay interlocking bricks collected from region B are found superior than cement-clay interlocking bricks collected from A and C provinces. Only modulus of rupture of region B brick is found slightly lower than region C.
3. Further studies should examine more precise mechanical properties of cement-clay interlocking brick blocks considering uniform mix design ratios along with uniform properties of individual mix contents.
4. There is an urgent need to establish and enforce standard guidelines for codes for CCI brick manufacturing process in Thailand.

Acknowledgments

The authors are very grateful to the Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University, Thailand, for providing research grant (Research Grant ID 482/2559) to carry out the research work. Asian Institute of Technology (AIT) for supporting test facilities.

References

- [1] B. V. Reddy, R. Lal, and K. N. Rao., "Influence of joint thickness and mortar-block elastic properties on the strength and stress developed in soil-cement block masonry," *ACSE J. Mat. Civil Eng.*, vol. 21, pp. 535-542, 2009.
- [2] Z. Ahmad, S. Z. Othman, B. Yunus, and A. Mohamed, "Behaviour of Masonry Wall Constructed using Interlocking Soil Cement Bricks." *World Acad. Sci. Eng. Technol.*, pp. 1263-1269, Dec. 2011.
- [3] P. J. Walker, "Strength, durability and shrinkage characteristics of cement stabilised soil blocks," *Cem. Concrete Comp.*, vol. 17, pp. 301-310, 1995.
- [4] B.V. Reddy and S. S. Lokras, "Steam-cured stabilised soil blocks for masonry construction," *Energy Buildings*, vol. 29, no.1, pp. 29- 33, 1998.
- [5] B. V. Reddy and A. Gupta "Characteristics of soil cement blocks using highly sandy soils," *Mater. Struct.*, vol. 38, no. 6, pp. 651-658, 2005.
- [6] H. M. Kwon, A. T. Le and N. T. Nguyen "Influence of soil grading on properties of compressed cement-soil," *KSCE J. Civil Eng.*, vol. 14, no. 6, pp. 845-853, 2010.
- [7] B. V. Reddy and P. P. Kumar "Cement stabilized rammed earth. Part A: compaction characteristics and physical properties of compacted cement stabilised soils," *Mater. Struct.*, vol. 44, no. 3, pp. 681-693, 2011.
- [8] S. Kenai, R. Bahar and M. Benazzoug "Experimental analysis of the effect of some compaction methods on mechanical properties and durability of cement stabilized

- soil,” J. Mater. Sci., vol. 41, no. 21, pp. 6956-6964, 2006.
- [9] P. Walker and T. Stace “Properties of some cement stabilized compressed earth blocks and mortar,” Mate. Struct., vol. 30, no. 9, pp. 545-551, 1997.
- [10] A. W. Henry, B.P. Sinha and S.R. Davies, Design of masonry structures, London: E.& F.N.Spon, 1987.
- [11] D. Lenczner, *Elements of Load Bearing Brickwork*. Oxford, Pergamon Press, 1972.
- [12] R. C. Smith, *Materials of Construction*. New York,” McGraw-Hill Inc, 1973.
- [13] S. Joseph, B. McGarry, B. Sajjakulnukit, and O. Sopchokchai, “A study of brick production in Thailand,” Issues on Women, Energy and the Environment, TDRI Quarterly Review, vol. 5, no. 2, pp.11-15, 1990.
- [14] F. R. Moormann, and S. Rojanasoonthon, “ *General Soil Conditions*,” Land Development Department. The Applied Scientific Research Corporation of Thailand and FAO., Kasetsart Univ., Bangkok, Thailand, 1967.
- [15] I. Demir, “Effect of organic residues addition on the technological properties of clay bricks,” Waste Manage., vol. 28, no. 3, pp. 622-627, 2008.
- [16] V.Loryuenyong, T. Panyachai, K. Kaewsimork, and C. Siritai, “ Effects of recycled glass substitution on the physical and mechanical properties of clay bricks,” Waste Manage, vol. 29, no. 10, pp. 2717-2721, 2009.
- [17] Standard test methods for sampling and testing brick and structural clay tile, ASTM C 67-03, 2003.
- [18] Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Masonry Units, ASTM C1006-07, 2007.
- [19] Standard Test Methods for Sampling and Testing Concrete Masonry Units and Related Units, ASTM C140-11a, 2011.
- [20] Standard Test Method for Compressive Strength of Masonry Prisms, ASTM C1314-14, 2014.
- [21] Specification for Interlocking Block (Load-Bearing Type) (2004) TCPS: 602-2547, Bureau of Thai Industrial Standard, 2004.

การควบคุมเวลาล่าช้าของงานด้วยเทคนิค PERT/CPM บริษัท ทีโอที จำกัด(มหาชน)

กรณีศึกษา : การติดตั้งระบบอินเทอร์เน็ตความเร็ว Fiber to the x (FTTx) ที่สถานี

ก๊าซ NGV ปตท. จ.ปทุมธานี

The Time Delay Control of the Technique PERT/CPM TOT Public Company Limited Case Study: The Project to Install Speed Fiber to the x (FTTx) at the NGV Stations PTT Pathum Thani

จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร* ธนวัฒน์ สว่างงาม

สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Architecture,

Rajamangala University of Technology Isan

*Corresponding author: Email: jittiwat.ni@rmu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นประยุกต์ใช้เทคนิค Program Evaluation and Review Technique (PERT) และ Critical Path Method (CPM) เข้าประยุกต์ใช้ในกลุ่มธุรกิจบริการด้านโทรคมนาคมติดตั้งระบบอินเทอร์เน็ตความเร็วสูง การศึกษาประยุกต์ใช้เทคนิค PERT/CPM เข้ามาช่วยในการบริหารโครงการติดตั้งระบบอินเทอร์เน็ตความเร็ว Fiber to the x (FTTx) ที่สถานีก๊าซ NGV ปตท. จ.ปทุมธานี โดยการใช้เทคนิคดังกล่าวช่วยให้โครงการเป็นไปตามแผน มีประสิทธิภาพ เป็นระบบและยังทำให้ทราบถึงสถานะของโครงการส่งผลให้ผู้บริหารโครงการสามารถควบคุมระยะเวลา ทรัพยากร ในการดำเนินงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและให้โครงการสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี การประยุกต์ใช้เทคนิค PERT/CPM โดยใช้โปรแกรม QM for Windows Version 2.0 เป็นซอฟต์แวร์สำหรับการจัดการการผลิตและการดำเนินงาน วิธีการเชิงปริมาณ วิทยาการจัดการ และการวิจัยการดำเนินงานเข้ามาช่วยในการคำนวณและสร้างโครงข่ายงานทำให้ทราบถึงความสัมพันธ์และระยะเวลาในการดำเนินงานของบริษัทให้บริการด้านโทรคมนาคมและให้บริการด้านโครงข่ายระบบอินเทอร์เน็ต ซึ่งมีส่วนงานที่เกี่ยวข้องกันทำหน้าที่ลักษณะเป็นการประสานงานกัน อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการใช้กิจกรรมบนลูกศรและกิจกรรมบนโหนด ซึ่งการใช้โปรแกรม QM for Windows Version 2.0 มาช่วยในการคำนวณทำให้ผลการคำนวณที่ได้มีความถูกต้องแม่นยำและยังน่าเชื่อถือซึ่งจากการคำนวณใช้เวลาดำเนินการทั้งสิ้นเป็นเวลาประมาณ 3,120 นาทีหรือ 6 วันครึ่งและโอกาสความน่าจะเป็นที่จะทำให้โครงการสามารถดำเนินการเสร็จภายในระยะเวลาที่กำหนด 7 วันนั้นมีค่ามากถึง 98.98% แต่เมื่อใช้วิธีการคิดแบบวิธีพิเศษวันเข้ามาด้วยนั้นทำให้พบว่าในโครงการติดตั้งระบบอินเทอร์เน็ตความเร็ว Fiber to the x (FTTx) ที่สถานีก๊าซ NGV ปตท. จ.ปทุมธานี ใช้เวลาในการดำเนินโครงการ 8 วัน ซึ่งมากกว่าเดิมถึง 1 วันครึ่ง

คำสำคัญ: การติดตั้ง Fiber to the x (FTTx) PERT/CPM เส้นทางวิกฤต โครงการกิจกรรม

ABSTRACT

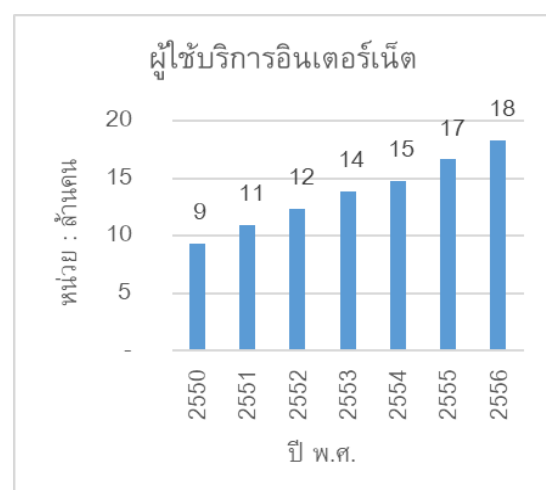
This research focuses on the application Program Evaluation and Review Technique (PERT) and Critical Path Method (CPM) in high-speed Internet installation for telecommunication business. This study applied PERT/CPM to use in the management of the project to install speed Fiber to the x (FTTx) at the NGV stations PTT Pathum Thani. The use of such techniques made the project as planned and effectively and also made note of the status of it resulted. The project manager could control the timing of resources to operate effectively and made the project successfully. The use of techniques PERT/CPM and QM for Windows Version 2.0 to calculate and build networks made note of the relationship and the duration of the operation of the telecommunications network and Internet services. Which is part of the relevant acts characterized and coordinated effectively by using activity on arrow and the main node. The QM for Windows Version 2.0 software could calculate accurately and reliably. It took approximately 3,120 minutes, or six and a half days. The project could probably be completed within a specified period of seven days up to 98.98% . But the use of fractional number of a day was found that the project to install speed fiber to the x (FTTx) at the NGV Station PTT Pathum Thani lasted eight days. It took more time for a day and a half.

Keyword: Construction Fiber to the (FTTx), PERT/CPM, critical path, project management

1. บทนำ

บริษัทผู้ให้บริการสื่อสารโทรคมนาคม ซึ่งทำหน้าที่ให้บริการสื่อสารโทรคมนาคมทุกประเภท ทั้งในและระหว่างประเทศ ผ่านบริการต่างและทางสายโทรศัพท์ อินเทอร์เน็ต โทรศัพท์เคลื่อนที่ ซึ่งการเปลี่ยนมาเป็นรูปแบบบริษัทนั้น เพื่อรองรับการแข่งขันทางธุรกิจที่ได้ดำเนินมาถึงจุดเปลี่ยนในการเผชิญกับคู่แข่งในยุครูปแบบการเปิดเสรีทางการค้า ส่งผลให้มีการแข่งขันเพื่อเป็นการสร้างองค์กรให้สอดคล้องกับความต้องการของธุรกิจ โดยปรับมาเป็นธุรกิจประเภทอุตสาหกรรมบริการ ซึ่งจะเน้นเรื่องคุณภาพของสินค้าที่ให้บริการและการให้บริการกับทางลูกค้า เพื่อให้เกิดความประทับใจ จากพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีสมัยใหม่เข้ามาใช้ในการสื่อสารเพื่อเป็นการอำนวยความสะดวกสบายของผู้ใช้งานซึ่งข้อมูลของสำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (กสทช.) จากรูปที่ 1 แสดงจำนวนผู้บริการโทรศัพท์บ้าน ผู้ใช้บริการอินเทอร์เน็ต ผู้ใช้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2549 – 2556 จะเห็นได้

จำนวนผู้ให้บริการอินเทอร์เน็ตเพิ่มขึ้นจากปี พ.ศ. 2549 จำนวนผู้ใช้อินเทอร์เน็ต 11.4 ล้านคน ในปี พ.ศ. 2556 จำนวนผู้ให้บริการอินเทอร์เน็ตเพิ่มเป็น 26.1 ล้านคน จะเห็นได้ว่าการเพิ่มอย่างต่อเนื่อง [1]



รูปที่ 1 แสดงจำนวน ผู้ใช้บริการอินเทอร์เน็ต ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2550 – 2556 [2]

จากข้อมูลดังกล่าวจะเห็นได้ว่าประเทศไทยมีจำนวนผู้ใช้อินเตอร์เน็ตเพิ่มสูงขึ้นในทุกๆ ปี ทำให้อินเทอร์เน็ตมีบทบาทไม่ว่าจะเป็นในการรับส่งข้อมูลข่าวสาร การทำธุรกรรมทางการเงิน การซื้อสินค้า รวมไปถึงการติดต่อข่าวสารอื่นๆ ซึ่งปัจจุบันผู้ประกอบการที่มีสาขาหรือสำนักงานย่อยที่กระจายตามต่างจังหวัดได้มีการใช้อินเทอร์เน็ตเป็นตัวส่งผ่านข้อมูลต่างๆ มายังสำนักงานใหญ่หรือที่เจ้าของอยู่เพื่อรับข้อมูลตามสาขานั้นๆ โดยไม่ต้องเสียเวลาในการเดินทาง จากการใช้งานระบบอินเทอร์เน็ตในการรับส่งข้อมูลหรือการทำกิจกรรมต่าง ๆ นั้นเลยทำให้ความต้องการส่วนใหญ่ของผู้ใช้อินเทอร์เน็ตในประเทศไทยมุ่งไปที่การใช้งานอินเทอร์เน็ตความเร็วสูงและอุปกรณ์นำสัญญาณที่สามารถนำสัญญาณได้อย่างมีประสิทธิภาพคือ Fiber to the x (FTTx) ใช้เรียกลักษณะโครงสร้างของระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ตความเร็วสูงที่มีการใช้งาน สายใยแก้ว Fiber Optical แทนสายทองแดง ด้วยความเร็วสูงระดับ 100 Mbps บริษัทที่ให้บริการทางด้านโทรคมนาคมแห่งนี้ได้พบว่าการติดตั้งระบบ FTTx ที่ยังไม่สามารถติดตั้งได้ทันตามกำหนดระยะเวลา ซึ่งลักษณะปัญหาที่เกิดขึ้นเนื่องจากการประสานของทั้งสามหน่วยส่วนขายภาคการผลิตเอกชนรายใหญ่ (ผอช) ส่วนเทคนิคบริการเอกชนรายใหญ่ (อบช) และส่วนบริการลูกค้านครหลวง (บบน) ที่ยังไม่เคยนำระบบ PERT/CPM เข้ามาใช้และการเขียนลำดับกิจกรรมย่อยจึงไม่สามารถแสดงความสัมพันธ์ของแต่ละกิจกรรม ส่งผลให้ไม่สามารถหาเวลาล่าช้าของงานได้

การนำ PERT/CPM เข้ามาใช้แก้ปัญหาจะช่วยให้ควบคุมเวลาล่าช้าได้จากงานวิจัย [3] การบริหารโครงการโดยการสร้างข่ายงานกิจกรรมในกระบวนการผลิตเครื่องย่อยกิ่งไม้ โดยเนื้อหาภายในการใช้ข่ายงานของ PERT/CPM โดยใช้กิจกรรมบนลูกศรและบนโหนดช่วยกำหนดระยะเวลาความน่าจะเป็นที่โครงการจะเสร็จภายใน 50 วัน มีค่าเท่ากับ 99.63% และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 1.863 เป็นลักษณะของการสร้างเครื่องจักรอุปกรณ์และ PERT/CPM ยังเหมาะสมกับการบริการโครงการของ [4] การจัดการโครงการห้างสรรพสินค้า กรณี ศึกษาห้างสรรพสินค้าเทสโก้ โลตัส สาขาสระบุรี การวางแผนปรับปรุงห้างสรรพสินค้า

โดยใช้เทคนิค PERT/CPM โดยใช้โปรแกรม Microsoft project มาใช้ในการวางแผนสาขาพระรามสามจากแผน 120 วันทำจริง 150 วันใช้ Microsoft project วางแผนใช้ 139 วัน สาขาบางนาจากแผน 180 วันทำจริง 240 วันใช้ Microsoft project วางแผนใช้ 221 วันสาขานวนครจากแผน 120 วันทำจริง 165 วันใช้ Microsoft project วางแผนใช้ 157 วัน ในลักษณะของงานวิจัยยังใช้งาน PERT/CPM กับการจัดการตารางนัดหมาย [5] ระบบจัดการตารางนัดหมายด้วยเทคนิค PERT/CPM ใช้เทคนิค PERT/CPM จัดการตารางนัดหมายสามารถลดระยะเวลาการทำงานรวมของโครงการได้ถึง 40% รวมไปถึงการประยุกต์ใช้กับขบวนการเกษตร [6] ,Application of Project Scheduling in Agriculture (Case Study: Grape Garden) การใช้เทคนิค PERT/CPM มาใช้กระบวนการเกษตรที่สวนองุ่นในศูนย์วิจัยการเกษตรมหาวิทยาลัย Zabol ซึ่งจากการประมาณวันปกติจะอยู่ที่ 390 วัน วิธี pert จะใช้อยู่ที่ 364.67 วันวิธี CPM จะอยู่ที่ 365 วันซึ่งวิธี PERT ได้วันต่ำสุด ความสำเร็จของโครงการที่ 380 วัน 370 วันและ 365 วันจะอยู่ที่ 99.80%, 84.14% และ 52.49% ซึ่งยังมีการกล่าวเพิ่มเติมเกี่ยวกับการใช้ PERT/CPM [7] ได้ทำวิจัยเรื่อง Application Of Project Scheduling In A Bottling Unit Startup Using PERT And CPM Techniques เป็นการจำลองใช้เทคนิค PERT และ CPM ในการบริหารโครงการซึ่งเป็นเทคนิคที่สำคัญเป็นอย่างมากที่สามารถแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของแต่ละกิจกรรมระยะเวลาในการดำเนินโครงการและสิ้นสุดของโครงการได้และยังสามารถกำหนดเวลาที่คำนวณเนื่องจากความล่าช้าบางอย่างกับโครงการที่เพื่อป้องกันการเกิดปัญหา [8] ได้ใช้เทคนิค PERT และ CPM ด้วยการเขียนโปรแกรมเชิงเส้นโดยได้งานวิจัยคือ การวางแผนโครงการและการจัดตารางเวลาโดยใช้เทคนิค PERT และ CPM ด้วยการเขียนโปรแกรมเชิงเส้น: กรณีศึกษา ในการดำเนินการก่อสร้างอาคาร โดยมี บริษัท Angel Estates and Construction Ltd ได้กำหนดว่าในการดำเนินงานอยู่ประมาณ 79 วันหลังจากได้ใช้วิธีเทคนิค PERT และ CPM มาใช้ในการวางแผนดำเนินงาน วันในการดำเนินงานเหลือ

40 วัน ทำให้ลดเวลาดำเนินการลงไป 39 วัน มีค่าใช้จ่ายในการลดเวลาอยู่ที่ GH¢ 1,887.22 ซึ่งทำให้ค่าใช้จ่ายรวมของโครงการเพิ่มจาก GH¢ 57,156.35 ไปเป็น GH¢ 59,043.57 และยังการใช้ PERT/CPM เข้ามาบริหารโครงการก่อสร้างในต่างประเทศ[9], Network analysis and building construction: Implications for timing and costing of activities เป็นการก่อสร้างอาคารในประเทศไนจีเรียของบริษัทALMEGA, Nig. Ltd., โดยการใช้เทคนิค PERT/CPM เข้ามาช่วยในการบริหารโครงการเข้ามาช่วยในการบริหารโครงการก่อสร้างอาคารจาก 92 วัน ลดลงเหลือ 55 วัน ซึ่งสามารถลดวันดำเนินการไปได้ 37 วัน แต่จะมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานเพิ่มขึ้นจากปกติ 21,226\$ ไปเป็น 26,581\$ ซึ่งเพิ่มขึ้นจากเดิม 5,355\$ จากนั้นยังมีการนำ PERT/CPM มาประยุกต์ใช้กับโครงการระยะสั้นๆ[10] การประยุกต์ใช้ PERT/CPM ในโครงการกิจกรรมติดตั้งระบบอินเทอร์เน็ต กรณีศึกษา ห้างสรรพสินค้า Lotus Express สาขา ซอยลาดพร้าว 130 เป็นการใช้ PERT/CPM เข้ามาดำเนินโครงการสามารถดำเนินการได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการใช้กิจกรรม 40 กิจกรรมบนโหนด ซึ่งพบว่าการติดตั้งระบบอินเทอร์เน็ต ADSL ที่ห้างสรรพสินค้า Lotus Express สาขา ซอยลาดพร้าว 130 จะใช้เวลาแล้วเสร็จภายใน 4.5 วัน และมีโอกาสแล้วเสร็จภายใน 5 วันตามที่ลูกค้ากำหนด มีค่าเท่ากับ 99.92 % และมีค่าเบี่ยงเบนโครงการอยู่ที่ 66.69 นาที ได้การนำ PERT/CPM ได้นำมาใช้กับลักษณะการรื้อถอนโครงการ [11] ใช้กับการรื้อถอนโครงการอีกด้วย ,การควบคุมและบริหารโครงการด้วยเทคนิค PERT/CPM กรณีศึกษา โครงการรื้อถอนระบบอินเทอร์เน็ตที่สถานี Fit Auto ใช้เทคนิค PERT/CPM เข้ามาช่วยในการรื้อถอนระบบอินเทอร์เน็ตที่สถานี Fit Auto ทำให้โครงการมีประสิทธิภาพและเป็นระบบ สามารถทราบถึงขั้นตอนการทำงานและระยะเวลา ช่วยให้ผู้นควบคุมโครงการสามารถดำเนินงานได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยกรณีที่สามารถเก็บอุปกรณ์กลับคืนสู่สำนักงานได้นั้นใช้เวลาทั้งสิ้น ประมาณ 1.96 วัน และมีโอกาสเสร็จภายใน 2 วัน อยู่ที่ 54.78 % มีค่าเบี่ยงเบนโครงการอยู่ที่ 121.07 นาที ในส่วนกรณีที่สองคือไม่เจอ

อุปกรณ์หรืออุปกรณ์มีการสูญหายนั้นใช้เวลาในการดำเนินการทั้งสิ้น 310 นาที หรือประมาณ 0.64 วัน โดยมีโอกาสที่จะเสร็จภายใน 2 วัน มีค่ามากกว่า 99.99 % มีค่าเบี่ยงเบนโครงการอยู่ที่ 86.57 นาที และสุดท้าย PERT/CPM สามารถนำมาประยุกต์กับโครงการต่างๆ ได้อย่างมากมายโดย ฟิรพันธ์ และคณะ ได้ประยุกต์กับการสร้างเครื่อง[12], การบริหารโครงการด้วยการสร้างขายงานกิจกรรมในกระบวนการผลิตชุดกระป๋องลำเลียงข้าว เป็นการใช้เทคนิค PERT/CPM ในการวางแผนโครงการผลิตชุดกระป๋องลำเลียงข้าวซึ่งเป้าหมายโครงการไม่เกิน 38 วันโครงการนี้สามารถงานได้ประมาณ 36 วันความน่าจะเป็นที่โครงการแล้วเสร็จภายใน 38 วันเท่ากับ 99.70% ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานโครงการอยู่ที่ 0.727 แต่งานที่ผ่านมายังไม่มีการคำนึงถึงวันหยุดหรือการปิดเคสวันแต่ละสัปดาห์

งานวิจัยที่ผ่านมายังพบการนำวิธี PERT/CPM เข้ามาช่วยในการบริหารโครงการทำให้การบริหารโครงการมีประสิทธิภาพและยังช่วยให้ผู้บริหารโครงการสามารถประเมินระยะเวลาการทำงานและวันหยุดในการดำเนินโครงการได้ แต่ยังไม่มีการนำ PERT/CPM เข้าไปใช้ในการให้บริการติดตั้งระบบอินเทอร์เน็ต ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้จึงมุ่งเน้นประยุกต์ใช้ PERT/CPM ในบริษัท ทีโอที จำกัด ซึ่งเป็นกลุ่มธุรกิจผู้ให้บริการด้านโทรคมนาคมติดตั้งระบบอินเทอร์เน็ตความเร็วสูง การศึกษาประยุกต์ใช้เทคนิค PERT/CPM เข้ามาช่วยในการบริหารโครงการติดตั้งระบบอินเทอร์เน็ตความเร็วสูง FTTx การใช้เทคนิคดังกล่าวช่วยทำให้โครงการเป็นไปตามแผน มีประสิทธิภาพ เป็นระบบและยังทำให้ทราบถึงสถานะของโครงการว่าดำเนินการถึงขั้นไหนซึ่งจะส่งผลให้ผู้บริหารโครงการสามารถควบคุมระยะเวลาทรัพยากร ในการดำเนินงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและให้โครงการสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

2. ขั้นตอนการวิจัย

2.1 การเก็บรวบรวมข้อมูล

ขั้นตอนของการดำเนินการโครงการติดตั้ง Fiber to the x (FTTx) ที่สถานีก๊าซ NGV ปตท.จังหวัด ปทุมธานี โดยระบุเวลาแล้วเสร็จกิจกรรม ลำดับขั้นตอนการ

ดำเนินงาน และความสัมพันธ์ก่อนหลังของแต่ละกิจกรรม ส่วนวิธีการเก็บรวบรวมข้อมูลในการศึกษาค้างนี้ใช้วิธีการสัมภาษณ์ (Interview) โดยสัมภาษณ์จากเจ้าหน้าที่บริษัท ทีโอที ที่มีความรู้และประสบการณ์ในการดำเนินงานของบริษัทเป็นอย่างดีเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้อง

2.2 ขั้นตอนการเตรียมการ

ผู้วิจัยทำการติดต่อหน่วยที่เกี่ยวข้อง 3 หน่วยงาน ได้แก่ ส่วนขายภาคการผลิตเอกชนรายใหญ่ (ผอช) ส่วนเทคนิคบริการเอกชนรายใหญ่ (อบช) ส่วนบริการลูกค้าตามพื้นที่ ของบริษัท ทีโอที เพื่อศึกษาข้อมูลที่เป็นในการเขียนโครงข่ายกิจกรรมและสร้างแบบจำลองและทำความเข้าใจในขอบเขตของข้อมูลและศึกษาทฤษฎีเทคนิคการใช้ PERT/CPM ในการบริหารโครงการไว้สำหรับการเขียนโครงข่ายของการดำเนินการโครงการติดตั้ง Fiber to the x (FTTx) ที่สถานีก๊าซ NGV ปตท.จังหวัดปทุมธานี

หน่วยงานส่วนขายภาคการผลิตเอกชนรายใหญ่ (ผอช) รับผิดชอบติดต่อลูกค้าออกไปข้อมูลตามความต้องการของลูกค้าและเป็นหน่วยงานเรียกเก็บค่าเช่าโครงข่ายส่วนหน่วยงานส่วนเทคนิคบริการเอกชนรายใหญ่ (อบช) มีหน้าที่สนับสนุนหน่วยงาน ผอช.ด้านเทคนิคต่างๆ ในการติดตั้งรวมถึงการเลือกอุปกรณ์ในการดำเนินโครงการ ส่วนพื้นที่ให้บริการคือ พื้นที่ที่อยู่ในเขตให้บริการกับลูกค้า โดยมีหน้าที่ประสานงานกับหน่วยงาน อบช. ในการดำเนินงานติดตั้งอุปกรณ์กำหนดการตั้งค่าน้ำกระดาด พิมพ์ห่างจากขอบกระดาดด้านซ้าย ให้เว้นไว้ประมาณ 1.25 นิ้ว นอกนั้นขอบกระดาดให้เว้นไว้ประมาณ 1 นิ้ว ส่วนความกว้างของคอลัมน์เว้นไว้ 2.89 นิ้ว ระยะห่างระหว่างคอลัมน์ 0.24 นิ้ว

2.3 ขั้นตอนการรวบรวมข้อมูล

การรวบรวมข้อมูลการดำเนินงานเพื่อใช้ในการสร้างโครงข่ายงาน ได้แก่ ขั้นตอน (Stages) และกิจกรรมต่างๆ (Activities) รวมทั้งแสดงความสัมพันธ์ก่อนหลังของแต่ละกิจกรรม และเวลาดำเนินการแล้วเสร็จเสร็จของแต่ละกิจกรรม (Activities Time) การติดตั้ง Fiber to the x

(FTTx) ที่สถานีก๊าซ NGV ปตท.จังหวัดปทุมธานี ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงรายละเอียดกิจกรรมย่อยของงานการติดตั้ง Fiber to the x (FTTx) ที่สถานีก๊าซ NGV ปตท.จังหวัดปทุมธานี

กิจกรรม	รายการ	กิจกรรม ก่อนหน้า	เวลา ที่ใช้ (นาที)
A	รับเรื่องจากทางลูกค้า	-	180
B	ผอช ออกหนังสือตรวจสอบพื้นที่สำหรับให้บริการกับทางศูนย์บริการโทรศัพท์สาขาที่รับผิดชอบ	A	180
C	ศูนย์บริการโทรศัพท์พื้นที่ที่รับผิดชอบได้รับหนังสือและส่งต่อให้ช่างผู้รับผิดชอบสำรวจ	B	120
D	ช่างในพื้นที่ทำการตรวจสอบ	C	240
E	ช่างรายงานกับพื้นที่ว่าใช้ช่องสัญญาณไหน	D	60
F	ศูนย์บริการโทรศัพท์พื้นที่ที่รับผิดชอบรายงานกับทางผอช	E	30
G	ผอช แจ้งทางลูกค้าว่าสามารถให้บริการได้	F	30
H	ผอช ออกหนังสือขอติดตั้งให้ทางศูนย์บริการโทรศัพท์พื้นที่ที่รับผิดชอบ	G	180
I	ผอช ออกหนังสือขอติดตั้งให้ทางอบช.	G	30
J	ศูนย์บริการโทรศัพท์รับหนังสือขอติดตั้งและส่งต่อให้ช่างผู้รับผิดชอบ	H	180
K	ช่างผู้รับผิดชอบทำหนังสือขอเบิกอุปกรณ์การเดินสาย	J	180

ตารางที่ 1 แสดงรายละเอียดกิจกรรมย่อยของงานการติดตั้ง Fiber to the x (FTTx) ที่สถานีก๊าซ NGV ปตท. จังหวัดปทุมธานี (ต่อ)

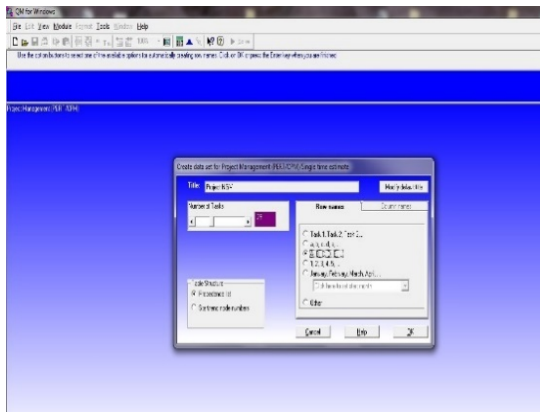
กิจกรรม	รายการ	กิจกรรม ก่อนหน้า	เวลาที่ ใช้ (นาท)
L	ช่างผู้รับผิดชอบทำการเดินสายจากผู้สัญญาณมาบริเวณหน้าสถานีที่ที่กำหนดของลูกค้า	K	360
M	หน่วยงาน อบข ได้รับหนังสือส่งเรื่องต่อให้ผู้รับผิดชอบ	I	30
N	ผู้รับผิดชอบ อบข ติดต่อกับช่างผู้รับผิดชอบว่าเดินสายสัญญาณมาบริเวณหน้าสถานีที่บริเวณพื้นที่ลูกค้าเสร็จแล้วหรือยัง	L, M	30
O	อบข ติดต่อกับทางลูกค้าเพื่อขออนุญาตเข้าติดตั้งบริเวณพื้นที่ลูกค้า	N	30
P	อบข ผู้รับผิดชอบทำการประสานงานกับผู้รับเหมาหาวันเข้าเดินท่อร้อยสาย	O	30
Q	อบข ผู้รับผิดชอบทำการประสานงานกับช่างพื้นที่ผู้รับผิดชอบหาวันเข้าต่อหัวตั้งค่าอุปกรณ์เบื้องต้น	O	30
R	ผู้รับเหมาเข้าเดินท่อร้อยสายในวันที่กำหนด	P	480
S	ช่างผู้รับผิดชอบหาวันเข้าต่อหัวและตั้งค่าอุปกรณ์และทำการทดสอบสัญญาณรายงานกับ อบข	Q, R	240

ตารางที่ 1 แสดงรายละเอียดกิจกรรมย่อยของงานการติดตั้ง Fiber to the x (FTTx) ที่สถานีก๊าซ NGV ปตท. จังหวัดปทุมธานี (ต่อ)

กิจกรรม	รายการ	กิจกรรม ก่อนหน้า	เวลาที่ ใช้ (นาท)
T	ผู้รับเหมาเข้าตั้งค่าอุปกรณ์ในการรับส่งและทดสอบ	S	240
U	ผู้รับเหมาแจ้งทาง อบข ว่าสามารถใช้งานได้	T	30
V	อบข แจ้งให้ลูกค้าทำการทดสอบระบบ	U	30
W	ลูกค้าทำการทดสอบระบบ	V	60
X	ลูกค้าแจ้งกับทาง อบข	W	30
Y	อบข แจ้งช่างผู้รับผิดชอบว่าระบบใช้งานได้ตามปกติ	X	30
Z	ช่างเอาใบปิดงานให้ทางลูกค้าเซ็นต์	Y	30
AA	ช่างส่งใบปิดงานกับมาที่ผอช และ อบข	Z	60
AB	อบข.แจ้งยืนยันกับทางผอช ว่าระบบสามารถให้บริการตามปกติ	A1	30
AC	ทาง ผอช ทำการแจ้งให้ลูกค้าทราบว่าได้ติดตั้งเสร็จแล้วพร้อมเปิดให้บริการเพื่อทำการเรียกเก็บค่าบริการต่อไป	B1	30

2.4 ขั้นตอนการเตรียมโปรแกรม QM for Windows Version 2.0 และทำการกรอกข้อมูลลงในโปรแกรม

เป็นการตั้งค่าและกำหนดค่าตัวแปรต่างที่เราได้จากการเก็บรวบรวมข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 4 จากนั้นทำการกรอกข้อมูลเวลาในการดำเนินกิจกรรมย่อยของงานการติดตั้ง Fiber to the x (FTTx) ที่สถานีก๊าซ NGV ปตท. จังหวัดปทุมธานี และความสัมพันธ์ของแต่ละกิจกรรมลงในโปรแกรมในรูปที่ 5



รูปที่ 4 ตั้งค่าเป็นการตั้งค่าและกำหนดค่าตัวแปรของโปรแกรม QM for Windows Version 2.0

	Activity time	Prec 1	Prec 2	Prec 3	Prec 4	Prec 5	Prec 6	Prec 7
A	180							
B	180	A						
C	120	B						
D	240	C						
E	60	D						
F	30	E						
G	30	F						
H	180	G						
I	30	H						
J	180	I						
K	180	J						
L	360	K						
M	30	L						
N	30	L	M					

รูปที่ 5 (ก) แสดงกิจกรรม A – N

	Activity time	Prec 1	Prec 2	Prec 3	Prec 4	Prec 5	Prec 6	Prec 7
J	180	H						
K	180	J						
L	360	K						
M	30	I						
N	30	L	M					
O	30	N						
P	30	O						
Q	30	O						
R	480	P						
S	240	G	R					
T	240	S						
U	30	T						
V	30	U						
W	60	V						
X	30	W						
Y	30	X						
Z	30	Y						
AA	60	Z						
AB	30	AA						
AC	30	AB						

รูปที่ 5 (ข) แสดงกิจกรรม J – AC

รูปที่ 5 ก และ ข เป็นการกรอกข้อมูลเวลาในการดำเนินกิจกรรมย่อยของงานการติดตั้ง Fiber to the x (FTTx) ที่สถานีก๊าซ NGV ปตท. จังหวัดปทุมธานี ลงในโปรแกรม QM for Windows Version 2.0

2.5 วิเคราะห์สายงานวิฤติและการสร้างโครงข่ายงานจากโปรแกรม QM for Windows Version 2.0

เริ่มจากโปรแกรมจะคำนวณเวลาเริ่มต้นที่เร็วที่สุด (Earliest Start: ES) เวลาแล้วเสร็จเร็วที่สุด (Earliest Finish: EF) เวลาเริ่มต้นที่ช้าที่สุด (Latest Finish: LS) เวลาแล้วเสร็จที่ช้าที่สุด (Latest Finish: LF) เวลายืดหยุ่นอิสระ (Slack Time) และเวลาแล้วเสร็จของการดำเนินโครงการ (Project Completion Time) จากนั้นจะนำมาสร้างโครงข่ายงาน (Network Drawing) และคำนวณเปรียบเทียบวิธีการปิดเศษวันและวิธีไม่ปิดเศษวัน ซึ่งวิธีการปิดเศษวันนั้นจะเป็นการคำนวณว่าในวันนั้นๆสามารถทำกิจกรรมให้ได้มากที่สุดจะทำได้กี่กิจกรรมโดยไม่เกินเวลาการทำงานปกติ 8 ชั่วโมง (ไม่มีการเปิด OT) ส่วนวิธี ไม่ปิดเศษวันนั้นเป็นการคำนวณตามเวลาของกิจกรรม เช่นในการทำงานวันนั้นอาจจะทำได้ 5 กิจกรรม และกิจกรรมที่ 6 เริ่มได้เพียงครึ่งเดียว แล้วครบ 8 ชั่วโมงก่อน ทำให้ในวันถัดไปต้องมาเริ่มกิจกรรมที่ 6 ในส่วนครึ่งหลัง ซึ่งในวิธีคิดแบบปิดเศษวันนั้นจะทำให้เหลือเศษเวลาที่ไม่สามารถทำกิจกรรมให้เสร็จได้ ส่วนวิธีคิดแบบไม่ปิดเสร็จเศษวันนั้นจะมีการต่อ OT เพื่อให้กิจกรรมเสร็จลงตัว ลักษณะบางวันไม่สามารถเปิด OT ได้จึงต้องนำมาสู่วิธีคิดแบบปิดเศษวันเพื่อให้ได้ผลวันดำเนินการที่ถูกต้องครบถ้วนที่สุด

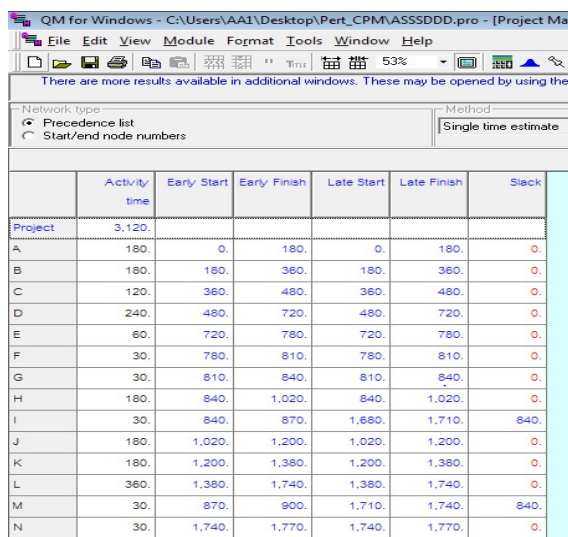
2.6 ขั้นตอนการสรุปผลและจัดทำข้อเสนอแนะ

หลังจากทำการสร้างโครงข่ายและวิเคราะห์สายงานวิฤติโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์แล้วทำการตรวจสอบและสรุปข้อมูลต่างๆ เพื่อจัดทำข้อเสนอแนะและข้อจำกัดในการใช้งานแก่ผู้ที่สนใจนำไปใช้ในการติดตั้งระบบอินเทอร์เน็ตความเร็วสูง และแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้กับโครงการอื่นๆ ของบริษัทต่อไป

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

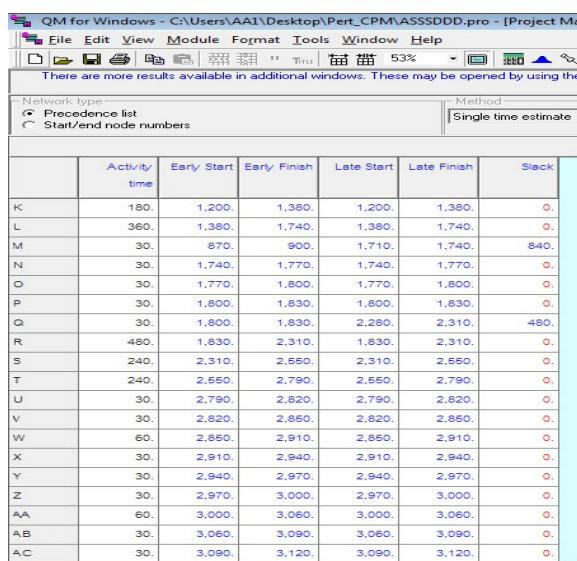
3.1 ผลการวิจัยกรณีไม่ปิดเคสวัน

เมื่อทำการกรอกข้อมูลเวลาในการทำกิจกรรมต่างของการติดตั้ง Fiber to the x (FTTx) ที่สถานีก๊าซ NGV จ.ปทุมธานี และความสัมพันธ์ของแต่ละกิจกรรมลงในโปรแกรมแล้วทำการเริ่มโปรแกรมโปรแกรมจะคำนวณค่าเริ่มต้นที่เร็วที่สุด (Earliest Start: ES) เวลาแล้วเสร็จเร็วที่สุด (Earliest Finish: EF) เวลาเริ่มต้นที่ช้าที่สุด (Latest Start: LS) เวลาแล้วเสร็จที่ช้าที่สุด (Latest Finish: LF) เวลายืดหยุ่นอิสระ (Slack Time: SL) ครบทั้ง 29 กิจกรรม ดังรูปที่ 6 ก และ ข



	Activity time	Early Start	Early Finish	Late Start	Late Finish	Slack
Project	3,120.					
A	180.	0.	180.	0.	180.	0.
B	180.	180.	360.	180.	360.	0.
C	120.	360.	480.	360.	480.	0.
D	240.	480.	720.	480.	720.	0.
E	60.	720.	780.	720.	780.	0.
F	30.	780.	810.	780.	810.	0.
G	30.	810.	840.	810.	840.	0.
H	180.	840.	1,020.	840.	1,020.	0.
I	30.	840.	870.	1,680.	1,710.	840.
J	180.	1,020.	1,200.	1,020.	1,200.	0.
K	180.	1,200.	1,380.	1,200.	1,380.	0.
L	360.	1,380.	1,740.	1,380.	1,740.	0.
M	30.	870.	900.	1,710.	1,740.	840.
N	30.	1,740.	1,770.	1,740.	1,770.	0.

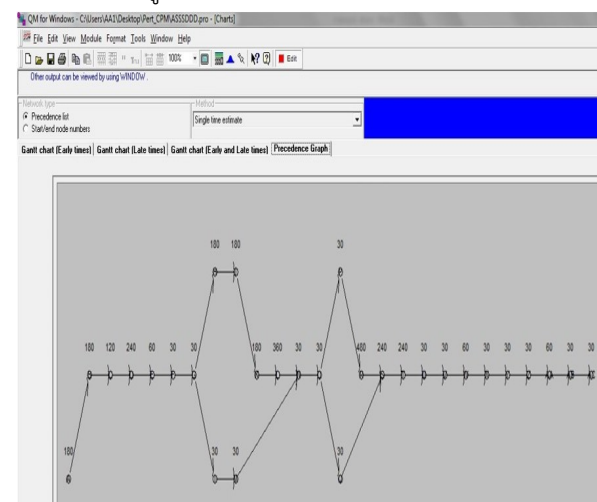
รูปที่ 6 (ก) แสดงกิจกรรม A – N



	Activity time	Early Start	Early Finish	Late Start	Late Finish	Slack
K	180.	1,200.	1,380.	1,200.	1,380.	0.
L	360.	1,380.	1,740.	1,380.	1,740.	0.
M	30.	870.	900.	1,710.	1,740.	840.
N	30.	1,740.	1,770.	1,740.	1,770.	0.
O	30.	1,770.	1,800.	1,770.	1,800.	0.
P	30.	1,800.	1,830.	1,800.	1,830.	0.
Q	30.	1,800.	1,830.	2,280.	2,310.	480.
R	480.	1,830.	2,310.	1,830.	2,310.	0.
S	240.	2,310.	2,550.	2,310.	2,550.	0.
T	240.	2,550.	2,790.	2,550.	2,790.	0.
U	30.	2,790.	2,820.	2,790.	2,820.	0.
V	30.	2,820.	2,850.	2,820.	2,850.	0.
W	60.	2,850.	2,910.	2,850.	2,910.	0.
X	30.	2,910.	2,940.	2,910.	2,940.	0.
Y	30.	2,940.	2,970.	2,940.	2,970.	0.
Z	30.	2,970.	3,000.	2,970.	3,000.	0.
AA	60.	3,000.	3,060.	3,000.	3,060.	0.
AB	30.	3,060.	3,090.	3,060.	3,090.	0.
AC	30.	3,090.	3,120.	3,090.	3,120.	0.

รูปที่ 6 (ข) แสดงกิจกรรม K – AC

จากรูปที่ 6 ก และ ข เป็นการแสดงการคำนวณค่าเริ่มต้นที่เร็วที่สุด (Earliest Start: ES) เวลาแล้วเสร็จเร็วที่สุด (Earliest Finish: EF) เวลาเริ่มต้นที่ช้าที่สุด (Latest Start: LS) เวลาแล้วเสร็จที่ช้าที่สุด (Latest Finish: LF) เวลายืดหยุ่นอิสระ (Slack Time: SL) ทั้ง 29 กิจกรรมทำให้เราสามารถหาเส้นทางวิกฤตของโครงการโดยการดูจากค่า SL ซึ่งโครงการติดตั้ง Fiber to the x ที่สถานีก๊าซ NGV ปตท. จังหวัดปทุมธานี เส้นทางวิกฤตของโครงการได้แก่กิจกรรม A, B, C, D, E, F, G, H, J, K, L, N, O, P, R, S, T, U, V, W, X, Y, Z, AA, AB, AC และเมื่อทราบค่าเวลาในการดำเนินของแต่ละกิจกรรมแล้วยังให้โปรแกรมสร้างโครงข่ายงาน (Network Drawing) เพื่อที่จะดูความสัมพันธ์ของแต่ละกิจกรรมได้ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ภาพแสดงการสร้างโครงข่ายงานการติดตั้ง Fiber to the x (FTTx) ที่สถานีก๊าซ NGV ปตท. จังหวัดปทุมธานี

เมื่อทราบเส้นทางวิกฤตของโครงการแล้วสามารถนำไปคำนวณหา ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการทำกิจกรรม ค่าความแปรปรวนของโครงการ โดยให้ T_e คือ ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการทำกิจกรรม, a คือ เวลาที่คาดว่าจะทำกิจกรรมให้เสร็จได้เร็วที่สุด (Optimistic Time), m คือ เวลาที่เป็นไปได้มากที่สุด (Most Likely Time), b คือ เวลาที่คาดว่าจะทำกิจกรรมให้เสร็จได้ช้าที่สุด (Pessimistic Time) ซึ่งจากข้อมูลตารางที่ 1 เป็นค่าของ

เวลาแต่ละกิจกรรมที่สามารถเป็นไปได้นานที่สุด (m) ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการทำกิจกรรม ค่าความแปรปรวนของเวลาในกิจกรรม

กิจกรรม	a (นาที)	m (นาที)	b (นาที)	te	σ^2
A	120	180	240	180	400
B	120	180	240	180	400
C	60	120	180	120	400
D	180	240	360	250	900
E	30	60	90	60	100
F	15	30	60	32	56
G	15	30	60	32	56
H	120	180	240	180	400
I	15	30	60	32	56
J	120	180	240	180	400
K	120	180	240	180	400
L	240	360	480	360	1600
M	15	30	45	30	25
N	15	30	45	30	25
O	15	30	45	30	25
P	15	30	45	30	25
Q	15	30	45	30	25
R	360	480	720	500	3600
S	180	240	360	250	900
T	180	240	300	240	400
U	15	30	45	30	25
V	15	30	45	30	25
W	15	60	120	62	306
X	15	30	45	30	25
Y	15	30	45	30	25
Z	15	30	45	30	25
AA	45	60	90	62	56
AB	15	30	45	30	25

ตารางที่ 2 แสดงค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการทำกิจกรรม ค่าความแปรปรวนของเวลาในกิจกรรม

กิจกรรม	a (นาที)	m (นาที)	b (นาที)	te	σ^2
AC	15	30	45	30	25

ค่าเวลากิจกรรมหาได้จาก

$$Te = \frac{120 + 4(180) + 240}{6} = 180$$

ค่าความแปรปรวนของเวลาในกิจกรรม

$$\sigma^2 = \left[\frac{240 - 120}{6} \right]^2 = 400$$

การคำนวณค่าความแปรปรวนของโครงการ

$$\sigma_p = \sqrt{400 + 400 + 400 + \dots + 25}$$

$$\sigma_p = 103.0776$$

หมายเหตุ การหาค่า σ_p นำเฉพาะค่าที่อยู่บนเส้นทางวิกฤตมาคำนวณ

ถ้าโครงการถูกกำหนดให้เสร็จภายใน 7 วัน โอกาสที่จะสามารถทำโครงการให้เสร็จตามกำหนดหาได้จากโดย 1 วัน เวลาทำงาน 8 ชั่วโมง หรือ 480 นาทีถ้า 7 วัน เวลาทำงาน 56 ชั่วโมง หรือ 3360 นาที

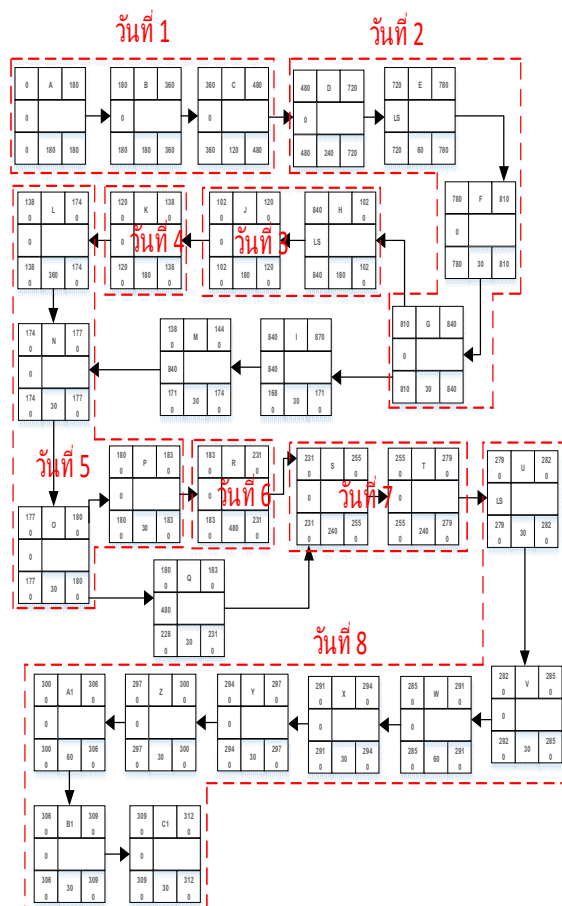
$$z = \frac{3360 - 3120}{103.0776}$$

$$z = 2.328$$

ทำการเปิดตารางค่า Z ที่ได้เท่ากับ 2.328 จากการเปิดตารางได้ค่า Z = 0.9898 จะได้ว่าความน่าจะเป็นที่โครงการจะแล้วเสร็จภายใน 7 วันมีค่าเท่ากับ 98.98 %

3.2 วิจารณ์ผลกรณีคิดการทำงานเป็นวันโดยการปิดเคสโครงการติดตั้ง Fiber to the x (FTTx) ที่สถานีก๊าซ NGV ปตท.ศูนย์ธรรมศาสตร์รังสิต

วิธีการปิดเศรษวันนั้นจะเป็นการคำนวณว่าในวันนั้นๆ สามารถทำกิจกรรมให้ได้มากที่สุดทำได้กี่กิจกรรมโดยไม่เกินเวลาการทำงานปกติ 8 ชั่วโมง 480 นาที (ไม่มีการเปิด OT) ซึ่งจะทำให้เหลือเศษเวลาที่ไม่สามารถทำกิจกรรมต่อไปให้เสร็จได้เนื่องเวลาที่เหลือนั้นไม่เพียงพอกับเวลาที่จะใช้ทำกิจกรรม ตัวอย่างเช่น เรามีกิจกรรม A, B, C แต่ละกิจกรรมใช้เวลาทำกิจกรรมละ 3 ชั่วโมง เพราะฉะนั้นจะใช้เวลาทำเวลาทำกิจกรรม A, B, C ทั้งหมด 9 ชั่วโมง ซึ่งจะทำให้เกินเวลาการทำงานปกติ (8 ชั่วโมง) ไป 1 ชั่วโมง วิธีการคิดแบบปิดเศรษคือ เราจะทำกิจกรรมได้เฉพาะ A, B ส่วนกิจกรรม C จะต้องทำในวันถัดไป ในส่วนของการคิดการทำงานเป็นวันโดยการปิดเศรษของโครงการติดตั้ง Fiber to the x (FTTx) ที่สถานีก๊าซ NGV ปตท.ศูนย์ธรรมศาสตร์รังสิตจะแสดงในรูปที่ 8 โดยกิจกรรมที่นำมาคิดนี้จะเป็กิจกรรมที่อยู่บนเส้นทางวิกฤติเท่านั้น



รูปที่ 8 แสดงการปิดเศรษการทำงานของโครงการติดตั้ง FTTx ที่สถานี ก๊าซ NGV ปตท.ศูนย์ธรรมศาสตร์รังสิต

จากรูปที่ 8 การปิดเศรษของวัน ซึ่งในวันที่ 1 ได้ทำกิจกรรมไปทั้งสิ้น 3 กิจกรรมได้แก่กิจกรรม A, B, C โดยใช้เวลาไปทั้งหมด 480 นาที ทำให้ไม่เหลือเศษเวลาของวัน วันที่ 2 ได้ทำกิจกรรมไปทั้งสิ้น 4 กิจกรรมได้แก่กิจกรรม D, E, F, G โดยใช้เวลาไปทั้งหมด 360 นาที เพราะถ้าหากจะทำกิจกรรม H ด้วยนั้นจะทำให้เวลาเกินจากวันปกติ 480 นาทีไปเป็น 540 นาที ทำให้วันที่ 2 เหลือเศษของเวลาเป็น 120 นาที วันที่ 3 ได้ทำกิจกรรมไปทั้งสิ้น 2 กิจกรรมได้แก่กิจกรรม H, J โดยใช้เวลาไปทั้งหมด 360 นาที ทำให้เหลือเศษของวัน 120 นาที วันที่ 4 ได้ทำกิจกรรมไปทั้งสิ้น 1 กิจกรรมได้แก่กิจกรรม K โดยใช้เวลาไปทั้งหมด 180 นาที ทำให้เหลือเศษของวัน 360 นาที วันที่ 5 ได้ทำกิจกรรมไปทั้งสิ้น 4 กิจกรรมได้แก่กิจกรรม L, N, O, P โดยใช้เวลาไปทั้งหมด 440 นาที ทำให้เหลือเศษของวัน 40 นาที วันที่ 6 ได้ทำกิจกรรมไปทั้งสิ้น 1 กิจกรรมได้แก่กิจกรรม R โดยใช้เวลาไปทั้งหมด 480 นาที ทำให้ไม่เหลือเศษเวลาของวัน วันที่ 7 ได้ทำกิจกรรมไปทั้งสิ้น 2 กิจกรรมได้แก่กิจกรรม S, T โดยใช้เวลาไปทั้งหมด 480 นาที ทำให้ไม่เหลือเศษเวลาของวัน วันที่ 8 ได้ทำกิจกรรมไปทั้งสิ้น 9 กิจกรรมได้แก่กิจกรรม U, V, W, X, Y, Z, A1, A2, B1, C1 โดยใช้เวลาไปทั้งหมด 330 นาที ทำให้เหลือเศษของวัน 150 นาที จะเห็นได้ว่าการทำงานโดยการปิดเศรษของวันกับโครงการติดตั้ง FTTx ที่สถานี NGV ปตท.ศูนย์ธรรมศาสตร์รังสิต ทำให้ใช้เวลาดำเนินโครงการไปถึง 8 วัน และเมื่อนำเวลาเหลือเศษของทั้ง 8 วันมารวมกันจะได้ 730 นาที

4. วิจารณ์ผล

4.1 วิจารณ์ผลการทดลองโครงการติดตั้ง Fiber to the x (FTTx) ที่สถานีก๊าซ NGV ปตท.ศูนย์ธรรมศาสตร์รังสิต

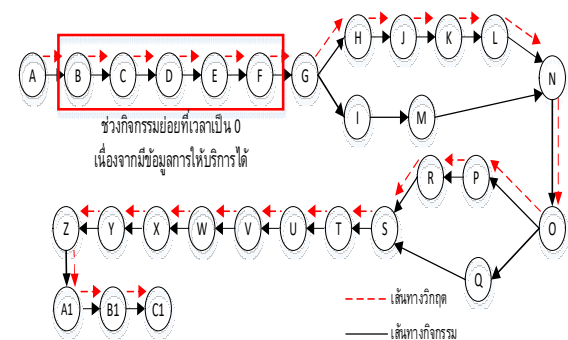
จากการใช้เทคนิค PERT/CPM กับโครงการติดตั้ง Fiber to the x (FTTx) ที่สถานีก๊าซ NGV ปตท.ศูนย์ธรรมศาสตร์รังสิตทำให้สามารถหาเวลาดำเนินโครงการออกมาได้แต่จากการนำมาคิดแบบปิดเศรษวันมีผลทำให้เวลามากกว่า ซึ่งการใช้เทคนิค PERT/CPM แบบ

ยังไม่ปิดเศรษวันนั้น คำนวณทำให้รู้ว่างานโครงการนี้จะแล้วเสร็จภายใน 6.5 วัน แต่เมื่อเราคิดแบบปิดเศรษวันนั้นใช้เวลาถึง 8 วัน เพราะวันแต่ละวันของการทำงานของโครงการในเส้นทางวิกฤตจะมีเศษเวลาที่เหลือของกิจกรรมนั้นอยู่ ซึ่งจากการเปรียบเทียบเวลาพบว่าเวลารวมของกิจกรรมย่อยในการทำงานวันสุดท้ายเหลือมากกว่าเวลาในวันที่ทำ (480 นาที) จึงทำให้ใช้เวลาในการดำเนินงานมากขึ้น และจากงานวิจัยของ (สุรพงษ์ และ พรพันธ์ , การบริหารโครงการโดยการสร้างข่ายงานกิจกรรมในกระบวนการผลิตเครื่องยอยกิ้งไม้) ซึ่งยังไม่เคยมีการคิดแบบปิดเศรษ จากงานวิจัยสรุปไว้ว่าใช้เวลาดำเนินโครงการทั้งบนสายงานวิกฤตทั้งสิ้น 47 วัน โดยยังไม่ได้มีการใช้การคิดแบบปิดเศรษแต่อย่างใด และเมื่อเรานำมาคิดแบบปิดเศรษจะได้ จะเห็นได้ว่าเวลาที่ใช้ดำเนินโครงการจาก 47 วันเพิ่มขึ้นเป็น 54 วัน เมื่อนำการคิดแบบปิดเศรษเข้ามาใช้ซึ่งจะทำให้ได้ผลที่ใกล้เคียงวันที่ดำเนินการมากขึ้นและวันที่เพิ่มขึ้นมานี้จะอยู่ในช่วงวันอาทิตย์และจะมีบางกิจกรรมที่คาบเกี่ยวอยู่ด้วย ซึ่งจากการที่ต้องการให้โครงการแล้วเสร็จภายใน 50 วัน ดังนั้นควรจะต้องมีการเร่งวันดำเนินโครงการต่อไปหรือหาอื่นเพื่อให้โครงการแล้วเสร็จตรงตามลูกค้ากำหนด

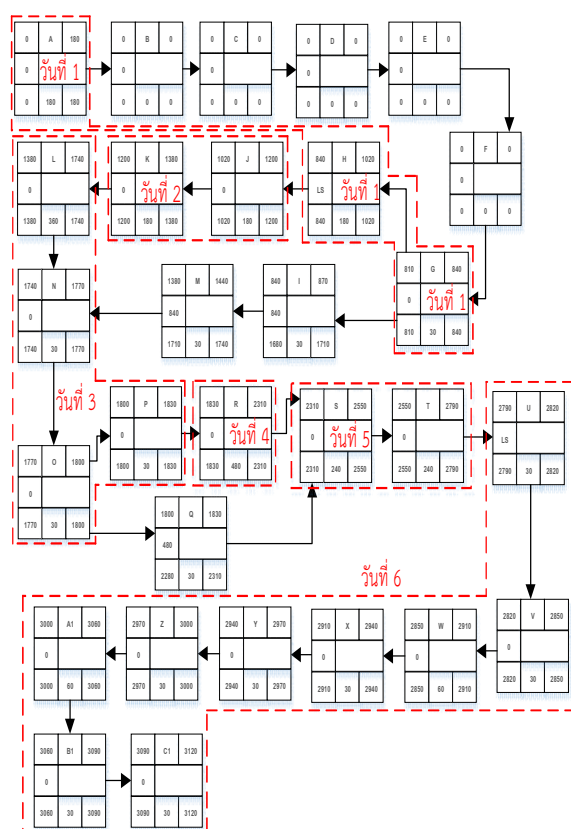
ดังนั้นลักษณะปัญหาที่เกิดขึ้นกับโครงการติดตั้ง Fiber to the x (FTTx) ที่สถานีก๊าซ NGV ปตท.ศูนย์ธรรมศาสตร์รังสิต จากการคิดวิธีการแบบปิดเศรษวันซึ่งจะต้องใช้การดำเนินงานจริงถึง 8 วัน ทำให้ไม่สามารถทำงานให้แล้วเสร็จตามกำหนดวันของลูกค้าได้นั้นคือ 7 วันได้ เพราะฉะนั้นการแก้ไขปัญหาคือ เมื่อลักษณะโครง NGV เติบโตขึ้นสุดลงเมื่อวันที่ 31 มีนาคม 2560 ทำให้เราสามารถแยกโครงการติดตั้ง Fiber to the x (FTTx) ที่สถานีก๊าซ NGV ได้เป็น 2 กรณีดังนี้

กรณีที่ 1 การปรับปรุงกรณีมีข้อมูลสำรวจพื้นที่อยู่แล้ว ซึ่งลักษณะคือศูนย์บริการมีข้อมูลของพื้นที่ที่จะให้บริการอยู่แล้ว ซึ่งจะทำให้กิจกรรมที่เกี่ยวกับการตรวจสอบพื้นที่การให้บริการนั้นที่ได้แก่กิจกรรม B, C, D, E, F มีค่าเท่ากับ 0 และสามารถเขียนเส้นทางวิกฤติใหม่ได้

ดังรูปที่ 9 จากการทราบข้อมูลการให้บริการทำให้สามารถลดเวลาของเส้นทางวิกฤตลงไปได้ถึง 630 นาที และเมื่อนำมาคิดวิธีปิดเศรษวันจากเส้นทางวิกฤตทำให้ทราบว่าใช้เวลาในการทำงานเพียง 6 วันเท่านั้นซึ่งน้อยกว่าที่ลูกค้ากำหนดอยู่ 1 วัน ซึ่งการคิดวิธีปิดเศรษวันได้แสดงในรูปที่ 10

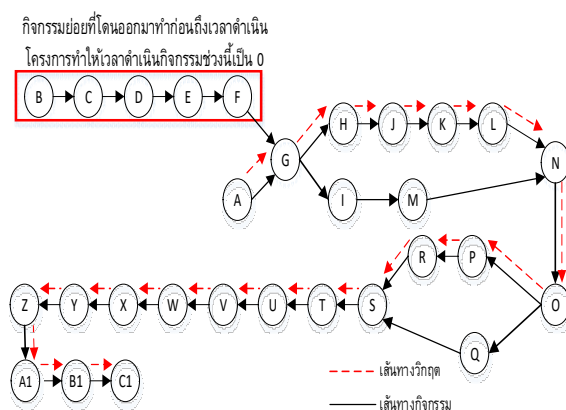


รูปที่ 9 รูปแสดงลักษณะเส้นทางวิกฤตกรณีปรับปรุงข้อมูลที่มีข้อมูลของพื้นที่การให้บริการอยู่แล้ว

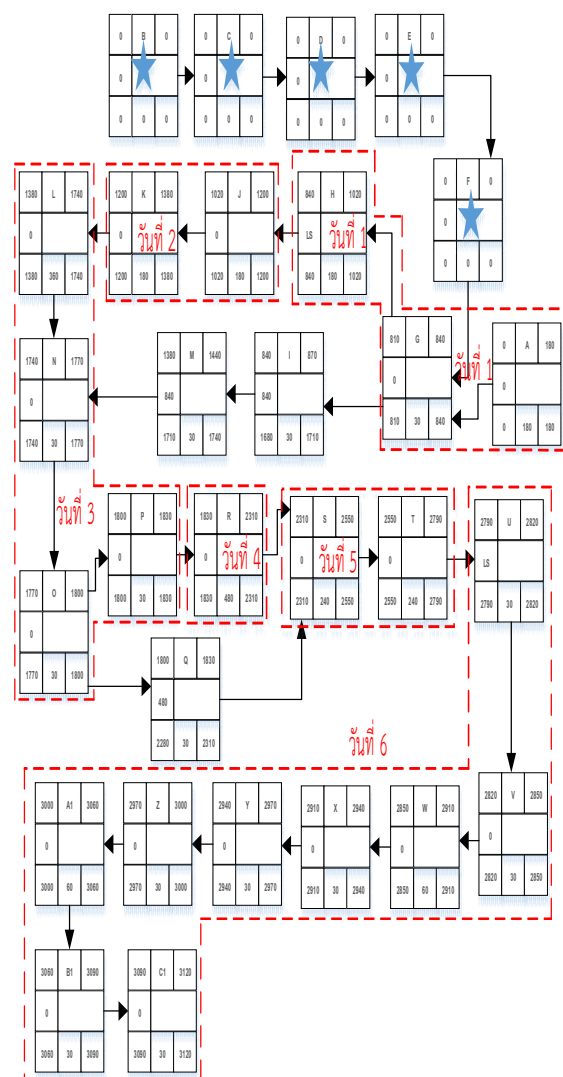


รูปที่ 10 การคิดแบบปิดเศรษวันหลังมีการกรณีปรับปรุงข้อมูลที่มีข้อมูลของพื้นที่การให้บริการอยู่แล้ว

กรณีที่ 2 การปรับปรุงกรณีไม่มีข้อมูลสำรวจพื้นที่แต่ทำการสำรวจก่อนสัญญาจะหมดหรือเริ่มโครงการขึ้นใหม่ ดังกิจกรรมย่อยบางกิจกรรมของโครงการออกมาทำก่อนเนื่องจากยังไม่ถึงวันที่ลูกค้ากำหนดให้ทำงาน (31 มีนาคม 2560) คือ กิจกรรมย่อย B ,C ,D ,E ,F (ผอช. ออกหนังสือตรวจสอบพื้นที่สำหรับให้บริการกับทางศูนย์บริการโทรศัพท์สาขาที่รับผิดชอบ ,ศูนย์บริการโทรศัพท์พื้นที่ที่รับผิดชอบได้รับหนังสือและส่งต่อให้ช่างผู้รับผิดชอบสำรวจ ,ช่างในพื้นที่ทำการตรวจสอบ ,ช่างรายงานกับพื้นที่ว่าใช้ช่องสัญญาณไหน ,ศูนย์บริการโทรศัพท์พื้นที่ที่รับผิดชอบรายงานกับให้ทาง ผอช) ซึ่งลักษณะกิจกรรมเป็นการตรวจสอบพื้นที่การให้บริการซึ่งจะทำให้เวลาของกิจกรรม B ,C ,D ,E ,F มีค่าเท่ากับ 0 ทำให้ได้เส้นทางวิกฤติใหม่ดังรูปที่ 11 และเมื่อนำมาคิดวิธีปิดเศษวันจากเส้นทางวิกฤติทำให้ทราบที่ใช้เวลาในการทำงานเพียง 6 วันเท่านั้นเหมือนกับกรณีแรกที่แสดงในรูปที่ 12 เพราะฉะนั้นลักษณะปัญหาที่จะเกิดสามารถแก้ไขระยะเวลาการดำเนินโครงการได้โดยการดึงกิจกรรมย่อยบางกิจกรรมที่จะเกิดขึ้นซึ่งสามารถมาทำได้ก่อนจึงทำให้ลดเวลาการดำเนินโครงการลงได้



รูปที่ 11 รูปแสดงลักษณะเส้นทางวิกฤติเดิมก่อนมีการดึงกิจกรรมย่อยออกมาทำ



★ กิจกรรมที่ต้องออกไปทำจนถึงวันดำเนินการจริง

รูปที่ 12 การคิดแบบปิดเศษวันหลังมีการดึงกิจกรรมย่อยบางส่วนออกมาทำก่อน

5. สรุปผลการวิจัย

จากการใช้วิธี PERT/CPM เข้าไปใช้ในการให้บริการการติดตั้ง FTTx ที่สถานีก๊าซ NGV ปตท. จ.ปทุมธานี โดยใช้โปรแกรม QM for Windows Version 2.0 ช่วยในการคำนวณค่าเวลา สายงานวิกฤติ และการสร้างโครงข่ายงาน ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของกิจกรรมย่อยของโครงการและยังช่วยให้ผู้บริหารโครงการสามารถควบคุมโครงการติดตั้ง FTTx ที่สถานีก๊าซ NGV ปตท.จ.ปทุมธานี ใช้เวลาดำเนินโครงการทั้งสิ้นเป็นเวลา 3,120

นาที หรือประมาณ 6 วันครึ่ง ซึ่งระยะเวลาตามแผนของโครงการนี้ถูกกำหนดอยู่ที่ 3,360 นาที หรือ 7 วัน ทำให้ดำเนินการเสร็จสิ้นภายใน 7 วันนั้นมีค่ามากถึง 98.98% และค่าความแปรปรวนของโครงการอยู่ที่ 103.0776 แต่เมื่อมีการคิดแบบการปิดเศษวันเข้ามาด้วยนั้นผลปรากฏว่าโครงการติดตั้ง FTTx ที่สถานีก๊าซ NGV ปตท.จ. ปทุมธานี ใช้เวลาในการดำเนินงานติดตั้งถึง 8 วัน ซึ่งมากกว่าวิธี PERT/CPM แบบที่ยังไม่ปิดเศษถึง 1.5 วัน และได้มีการแก้ไขปัญหามาโดยการดัดกิจกรรมย่อยบางกิจกรรมของโครงการออกมาทำก่อนเนื่องจากยังไม่ถึงวันที่ลูกค้ากำหนดให้ทำงาน (31 มีนาคม 2560) คือ กิจกรรมย่อย B ,C ,D ,E ,F ซึ่งจะใช้เวลาของกิจกรรม B ,C ,D ,E ,F มีค่าเท่ากับ 0 ทำให้ได้เส้นทางวิกฤติใหม่ เมื่อนำมาคิดวิธีปิดเศษวันจากเส้นทางวิกฤติทำให้ทราบว่าใช้เวลาในการทำงานเพียง 6 วันเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 12 ซึ่งน้อยกว่าเวลาที่ลูกค้ากำหนด 1 วัน

6. กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ขอขอบพระคุณสาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน และบริษัท ทีโอที จำกัด ที่ให้การสนับสนุน

7.เอกสารอ้างอิง

- [1] Office of The National Broadcasting and Telecommunication of Thailand. 2014, “ *Open the growth statistics and trends using the Internet* ” , 31 January 2014. [Online].Available: http://www.catdatacom.com/th/site/news/news_detail/141
- [2] National Statistical Office. (2014 February 4). Volume of Internet users 2007 – 2013, [Online]. Available: <http://service.nso.go.th/nso/web/statseries/statseries22.html>
- [3] S. Bangphan and P.Bangphan, “ Project management of constructions activity network in production process for rice mill bucket elevator sets, Eng., J Ubon Ratchathani University, vol. 35, Jan.-Jun., 2014
- [4] K. Seeon, S. Rakkarn, and P. Srihomchai. “ Project management for renovating department store case study: Tesco Lotus on Saraburin branch”, Industrial Engineering Network, 16-18 October, Pattaya Chpnburi 2013, paper no. OIE036
- [5] P. Khotsaenlee and K. Yochanang. “ PERT/ CPM appointment scheduling management system using PERT/ CPM technique,” in The Eighth National Conference on Computing and Information Technology (NCCIT)” Chonburee, 2012, pp. 188-194, 2012
- [6] S. M. Fahimifard and A. A. Kehkha, “Application of project scheduling in agriculture (case study: grape garden stabilization),” American-Eurasian J Agric & Environ Sci, vol. 5, no. 3, pp. 313-321, 2009.
- [7] S. Chatwal. Application of project scheduling in a bottling unit startup using PERT and CPM techniques, Inter J Advanced Res Eng Appl Sci., vol.3, no.6, 2014, pp1-9..
- [8] W. Agyei, Project planning and scheduling using PERT and CPM techniques with linear programming: case study, Inte Sci Technol Res, vol. 4, no. 8, 2015, pp. 222-227

- [9] S. Adebawale and E. D. Oluboyede, Network analysis and building construction: Implications for timing and costing of activities, J Civil Eng Construct Technol, vol. 2, pp. 90-100, May 2011.
- [10] T. Sawangngam and J. Nithikarnjanatharn. “Applying PERTCPM project installed internet asymmetric digital subscriber line (ADSL), case study Mall Ladprao 130 Lotus Express Stores,” Industrial Engineering Network, Khon Kaen, 2016, pp. 163-172.
- [11] T. Sawangngam and J. Nithikarnjanatharn, “The project management Pert /Cpm (case study apply in the demolition system at the station on the Internet Fit Auto,” in Engineering, Science, Technology and Architecture, the 7th Annual, Nakhon Ratchasima, 2016, pp. 314-326.
- [12] S. Bangphan and P. Bangphan, “The project management of constructions activity network in production process wood split machine,” Engineering Journal of Chiang Mai 2014. Eng J CMU, vol.3, 2014, pp 47-55

สมบัติพื้นฐานและการเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีตที่แทนที่ด้วยวัสดุประสาน ต่างชนิดกัน

Basic Properties and Carbonation of Concrete Replaced with Different Binders

บัญญัติ วารินทร์ไธ^{1*} ปิติศานต์ กร้ามาตร²

¹อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

²ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Banyut Warinlai^{1*} Pitisan Krammart²

¹Lecturer, Civil Engineering, Faculty of Science and Technology

Nakhon Pathom Rajabhat University, Nakhon Pathom 73000, Thailand

²Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering

Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathum Thani 12110, Thailand

*Corresponding author: Email: nowsurvey@hotmail.com

บทคัดย่อ

การศึกษานี้เป็นการศึกษาสมบัติพื้นฐานและความลึกคาร์บอนชั้นของคอนกรีตที่แทนที่บางส่วนด้วยเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูน ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) ผลการศึกษาพบว่า ความต้องการน้ำของเพสต์ผสมเถ้าลอยมีค่าน้อยกว่าของ OPC ล้วน ในขณะที่ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และของผงหินปูน มีค่ามากกว่าของ OPC ล้วน ส่วนระยะการก่อตัวของเพสต์ผสมเถ้าลอยและของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีค่ามากกว่าของ OPC ล้วน ในขณะที่ผงหินปูนมีค่าน้อยกว่าของ OPC ล้วน และพบว่า ค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่ามากกว่าของ OPC ล้วน ในขณะที่ของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และของผงหินปูน มีค่าน้อยกว่าของ OPC ล้วน ส่วนกำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมเถ้าลอย และของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด มีค่าน้อยกว่าของ OPC ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มาก ในขณะที่กำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมผงหินปูน มีค่าใกล้เคียงกับของ OPC ล้วน นอกจากนี้ พบว่าความลึกคาร์บอนชั้นของคอนกรีตผสมเถ้าลอย และของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีค่ามากกว่าของ OPC ล้วน ในขณะที่ความลึกคาร์บอนชั้นของคอนกรีตผสมผงหินปูนมีค่าใกล้เคียงหรือสูงกว่าไม่มาก เมื่อเทียบกับของ OPC ล้วน โดยความลึกคาร์บอนชั้นของคอนกรีตที่บ่มน้ำมีค่าน้อยกว่าของที่บ่มอากาศ และความลึกคาร์บอนชั้นของคอนกรีตที่เผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ระยะเวลานานกว่ามีค่ามากกว่าของที่เผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่น้อยกว่า สุดท้ายสามารถเปรียบเทียบสมบัติพื้นฐานและการเกิดคาร์บอนชั้นระหว่างของเพสต์/คอนกรีตผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูนกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนได้

คำสำคัญ: สมบัติเบื้องต้น ความลึกคาร์บอนชั้น เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็ก ผงหินปูน

ABSTRACT

This study was aimed to study the basic properties and the carbonation depth of partially replaced concrete with fly ash, granulated blast-furnace slag (GGBS) and limestone powder in ordinary Portland cement (OPC). The results showed that the water requirement of paste with fly ash was lesser than that of OPC paste. While the water requirement of paste made with GGBS and limestone powder was higher when compared to that of OPC paste. Additionally, the setting time of paste with fly ash and paste with GGBS was higher than that of OPC paste, while paste with limestone powder was lesser when compared to that of OPC paste. Moreover, the slump of concrete with fly ash was higher than that of OPC concrete whereas the slump of concrete with GGBS and limestone powder was lesser when compared to that of OPC concrete. The compressive strength of concrete with fly ash and GGBS was less than that of OPC concrete, especially when replaced in large quantity. Also, the compressive strength of concrete with limestone powder was close to that of OPC concrete. The carbonation depth of concrete with fly ash and GGBS was significantly higher than that of OPC concrete. The carbonation depth of concrete mixed with limestone powder was close to or little higher when compared to that of OPC concrete. The carbonation depth of concrete in water curing condition was lesser than that of concrete in air curing condition. The longer carbon dioxide exposure of concrete resulted in a greater carbonation depth than that of concrete with shorter carbon dioxide exposure. Finally, it can be compared the basic properties and the carbonation depth of concrete with fly ash, GGBS and limestone powder with OPC concrete.

Keyword: Basic properties, carbonation depth, fly ash, blast-furnace slag, limestone powder.

1. บทนำ

หลักการออกแบบโครงสร้างที่ดี คือการออกแบบเพื่อให้ได้มาซึ่งโครงสร้างที่สามารถรับน้ำหนักออกแบบตลอดอายุการใช้งานที่ต้องการ โดยปราศจากการซ่อมแซมในระดับที่เกินกว่าการคาดหมายเอาไว้ โดยปกติอายุการใช้งานที่ต้องการของโครงสร้างแต่ละชนิดไม่เท่ากันโดยขึ้นอยู่กับลักษณะของโครงสร้าง เช่น ขนาดสถานที่ที่โครงสร้างนั้นอยู่ และราคาของโครงสร้างนั้นๆ เป็นต้น โดยทั่วไปจะนิยมออกแบบโดยใช้ค่ากำลังอัดของคอนกรีต (f_c') และค่าการยุบตัวของคอนกรีต (slump) แต่ถ้านำคอนกรีตไปใช้ในสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกัน อายุของโครงสร้างจะไม่เท่ากัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาวะแวดล้อมที่รุนแรง คอนกรีตจะมีคุณสมบัติทางกล

โดยเฉพาะคุณสมบัติการรับแรงต่ำลงไปตามกาลเวลา เนื่องจากถูกกระทำจากปัจจัยหลายอย่างในสิ่งแวดล้อมทั้งทางกายภาพ และทางเคมี เช่น การเสื่อมสภาพของคอนกรีตจาก คาร์บอนเนชั่น การกัดกร่อนโดยกรด การกัดกร่อนโดยซัลเฟต และการเสื่อมสภาพคลอไรด์ เป็นต้น อย่างไรก็ตามในส่วนของการคาร์บอนเนชั่นที่เกิดในคอนกรีตจะมีผลเสียต่อความคงทนของคอนกรีต คือกรณีที่ทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตในบริเวณที่เกิดคาร์บอนเนชั่นต่ำลงเนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ถูกใช้ในปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่น ซึ่งจะทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิมได้ ถ้าคาร์บอนเนชั่นเกิดเข้าไปจนถึงตำแหน่งเหล็กเสริมโดยทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตรอบเหล็กเสริมลดต่ำลงจนใกล้จุดวิกฤติ

เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูนจัดเป็นวัสดุผสมเพิ่มในปูนซีเมนต์ที่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางกลและความคงทนของวัสดุเชื่อมประสานในระยะยาวได้ (ปิติศานต์ และคณะ [1]) อย่างไรก็ตามปริมาณที่เหมาะสมในการใช้งานเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูน เพื่อนำมาใช้ร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพนั้น จำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อทราบคุณสมบัติและพฤติกรรมของวัสดุประสานให้แน่ชัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการนำวัสดุดังกล่าวมาใช้ผสมร่วมในส่วนผสมคอนกรีต เพื่อเพิ่มความคงทนให้กับคอนกรีตที่เผชิญตามสภาพแวดล้อมต่างๆ จากผลการวิจัยในอดีตพบว่าอัตราการเกิดคาร์บอนขึ้นในคอนกรีตขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น จากผลงานวิจัยในอดีตของ Roy et al. [2] พบว่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ มีผลต่อการเกิดคาร์บอนขึ้น โดยความชื้นสัมพัทธ์ประมาณร้อยละ 50-75 ทำให้อัตราการเกิดคาร์บอนขึ้นสูง ส่วนในกรณีของ Khunthongkeaw et al. [3] และ Atis et al. [4] พบว่าชนิดของวัสดุประสานมีผลต่อการเกิดคาร์บอนขึ้น โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยทำให้เกิดคาร์บอนขึ้นได้เร็วขึ้น นอกจากนี้ Fattuhi [5] ยังพบอีกว่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ในอัตราที่สูงจะทำให้เกิดคาร์บอนขึ้นได้เร็วขึ้น

จากที่กล่าวมาการวิจัยครั้งนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การนำเอาเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลานร่วมด้วยผงหินปูน มาใช้แทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ซึ่งเป็นส่วนผสมในคอนกรีตที่เสื่อมสภาพจากสาเหตุของคาร์บอนขึ้น เพื่อหาแนวโน้มสัดส่วนที่เหมาะสมของคอนกรีตดังกล่าวให้มีอายุการใช้งานที่นานขึ้น ตลอดจนแนวโน้มที่สามารถพัฒนาหรือปรับปรุงคุณสมบัติในด้านต่างๆ ของคอนกรีตให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งานต่อไป โดยเฉพาะในด้านความคงทนของคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมที่คอนกรีตต้องเผชิญกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ใช้วัสดุประสานซึ่งประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ใช้เถ้าลอย (โรงไฟฟ้าแม่เมาะ) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูน (ขนาดเฉลี่ย 8 ไมโครเมตร) เป็นวัสดุประสานเพิ่มแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยมวลรวมใช้หิน และทรายแม่น้ำ ส่วนน้ำใช้น้ำประปา

2.2 รายละเอียดวิธีการศึกษา

การศึกษาในครั้งนี้ประกอบด้วย 1) สมบัติพื้นฐานของวัสดุประสาน ซึ่งได้แก่ ความละเอียดโดยวิธีเบลน ความถ่วงจำเพาะ ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาค และองค์ประกอบทางเคมี 2) สมบัติของซีเมนต์และคอนกรีต ซึ่งได้แก่ ความต้องการน้ำและระยะการก่อตัวของเพสต์ ค่าการยุบตัวและกำลังอัดประลัยของคอนกรีต และ 3) ความลึกคาร์บอนขึ้นของคอนกรีต โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.2.1 สมบัติพื้นฐานของวัสดุประสาน

สำหรับวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูน โดยความละเอียดโดยวิธีเบลนทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 204 [6] ความถ่วงจำเพาะ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 188 [7] และภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคใช้วิธี scanning electronic microscope (SEM) โดยในส่วนองค์ประกอบทางเคมีนั้น ใช้วิธีวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุองค์ประกอบด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD)

2.2.2 สมบัติด้านซีเมนต์ของวัสดุประสาน

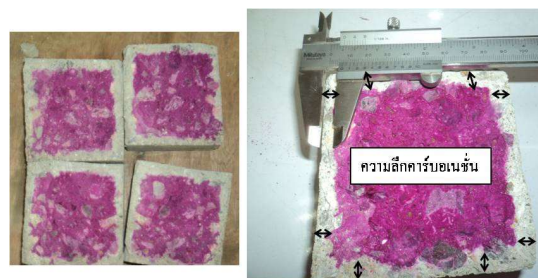
สำหรับสมบัติด้านซีเมนต์ของวัสดุประสานประกอบด้วยความต้องการน้ำและระยะการก่อตัวของเพสต์ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 187 [8] และ ASTM C 191 [9] ตามลำดับ และค่าการยุบตัวและกำลังอัดประลัยของคอนกรีต ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 143 [10] และ BS 1881-116 [11] ตามลำดับ ในส่วนกำลังอัดประลัยของคอนกรีตใช้ตัวอย่างขนาด

100x100x100 มม. จำนวน 3 ตัวอย่างต่อหนึ่งสัดส่วนผสม หลังจากถอดแบบ 1 วัน ทำการบ่มน้ำจนถึงเวลาทำการทดสอบที่อายุ 28 วัน

2.2.3 ความลึกคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีต

ความลึกคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีต ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 109 [12] และ ASTM C 856 [13] ตัวอย่างคอนกรีตหลังจากหล่อลงแบบตัวอย่าง ทำการบ่มตัวอย่างในแบบ โดยถอดแบบที่อายุ 1 วัน แล้วนำตัวอย่างคอนกรีตไปบ่ม 2 แบบ คือบ่มอากาศและบ่มน้ำเป็นเวลา 28 วัน หลังจากบ่มแต่ละแบบครบระยะเวลาที่กำหนด นำตัวอย่างดังกล่าวไปบ่มในตู้เร่งการเกิดคาร์บอนเนชั่น (อุณหภูมิ 30 ± 5 °C) โดยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จะถูกปล่อยออกมาในปริมาณ 40,000 ppm และควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ที่ร้อยละ 50 ถึง 55 ทั้งตัวอย่างให้ระยะเวลาที่เผชิญกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 28 วัน และ 56 วัน เมื่อครบอายุที่กำหนด นำตัวอย่างไปทดสอบหาค่าความลึกของการเกิดคาร์บอนเนชั่น มีขั้นตอนการทดสอบ โดยแบ่งตัวอย่างออกเป็น 2 ซีก โดยใช้เครื่องทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต จากนั้นฉีดสารละลายฟีนอล์ฟทาเลอิน (Phenolphthalein) ที่ตัวอย่างซึ่งจะปรากฏเป็นสีม่วงในกรณีที่ไม่เกิดคาร์บอนเนชั่น แต่ในส่วนที่เกิด

คาร์บอนเนชั่นตัวอย่างคอนกรีตจะไม่มีสี ใช้เวอร์เนียวัดค่าความลึกบริเวณที่ไม่เกิดสีม่วง (บริเวณที่เกิดคาร์บอนเนชั่น) ทั้งหมด 8 ตำแหน่งต่อคอนกรีตแต่ละซีกดังแสดงในรูปที่ 1 แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยค่าความลึกคาร์บอนเนชั่น



รูปที่ 1 การวัดความลึกคาร์บอนเนชั่นของตัวอย่างคอนกรีต

2.3 ส่วนผสมของเฟสและคอนกรีตที่ใช้

ปริมาณของวัสดุประสาน ที่ใช้ในการหาความต้องการน้ำและระยะการก่อตัวของเฟส แสดงดังตารางที่ 1 ส่วนตารางที่ 2 แสดงสัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการหาค่าการยุบตัว กำลังอัดประลัย และความลึกคาร์บอนเนชั่น โดยคอนกรีตใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.55 โดยน้ำหนัก ตลอดการศึกษา

ตารางที่ 1 ปริมาณของวัสดุประสานที่ใช้หาค่าความต้องการน้ำและระยะการก่อตัวของเฟส

ส่วนผสม	ปริมาณของวัสดุประสาน (กรัม)			
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าลอย	ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด	ผงหินปูน
PC	100	-	-	-
PC-20FA	80	20	-	-
PC-40FA	60	40	-	-
PC-30SL	70	-	30	-
PC-50SL	50	-	50	-
PC-5LP	95	-	-	5
PC-10LP	90	-	-	10
PC-15FA-5LP	80	15	-	5
PC-35FA-5LP	60	35	-	5
PC-10FA-10LP	80	10	-	10

ตารางที่ 1 ปริมาณของวัสดุประสานที่ใช้หาค่าความต้องการน้ำและระยะการก่อตัวของเพสต์ (ต่อ)

ส่วนผสม	ปริมาณของวัสดุประสาน (กรัม)			
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	เถ้าลอย	ตะกรันเตาถลุง	ผงหินปูน
	ประเภทที่ 1		เหล็กบดละเอียด	
PC-30FA-10LP	60	30	-	10
PC-25SL-5LP	70	-	25	5
PC-45SL-5LP	50	-	45	5
PC-20SL-10LP	70	-	20	10
PC-40SL-10LP	50	-	40	10

หมายเหตุ PC หมายถึง เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน, PC-20FA หมายถึง เพสต์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 20 และ PC-35FA-5LP หมายถึง เพสต์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 35 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 เป็นต้น

ตารางที่ 2 ส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการหาค่าการยุบตัว กำลังอัดประลัย และความลึกคาร์บอนเนชั่น

สัดส่วนผสม	ส่วนผสมของคอนกรีต (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)						
	ปูนซีเมนต์	เถ้าลอย	ตะกรันเตา	ผง	ทราย	หิน	น้ำ
	ประเภทที่ 1						
CC	332	-	-	-	970	1,080	182
CC-20FA	266	67	-	-	970	1,080	182
CC-40FA	200	133	-	-	970	1,080	182
CC-30SL	233	-	100	-	970	1,080	182
CC-50SL	166	-	166	-	970	1,080	182
CC-5LP	316	-	-	17	970	1,080	182
CC-10LP	299	-	166	34	970	1,080	182
CC-15FA-5LP	266	50	-	17	970	1,080	182
CC-35FA-5LP	200	117	-	17	970	1,080	182
CC-10FA-10LP	266	34	-	34	970	1,080	182
CC-30FA-10LP	200	100	-	34	970	1,080	182
CC-25SL-5LP	233	-	83	17	970	1,080	182
CC-45SL-5LP	166	-	150	17	970	1,080	182
CC-20SL-10LP	233	-	67	34	970	1,080	182
CC-40SL-10LP	166	-	133	34	970	1,080	182

หมายเหตุ CC หมายถึง คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และ CC-20FA หมายถึง คอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 20 เป็นต้น

3. ผลการทดสอบและวิเคราะห์

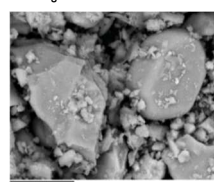
3.1 สมบัติพื้นฐานของวัสดุประสาน

จากการทดสอบสมบัติพื้นฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็ก บดละเอียด และผงหินปูนที่ใช้ในการศึกษา ได้ผลการศึกษาขององค์ประกอบทางเคมี ความละเอียดโดยวิธีเบลน และความถ่วงจำเพาะ ดังแสดงในตารางที่ 3 ส่วนรูปที่ 2 แสดงภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาค โดยวิธี SEM ซึ่งขยาย 3,500 เท่า ซึ่งจะเห็นความแตกต่างอย่างชัดเจนระหว่างลักษณะของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กับเถ้าลอย กล่าวคือ ลักษณะอนุภาคของปูนซีเมนต์มีลักษณะเป็นเหลี่ยม ผิวค่อนข้างขรุขระ

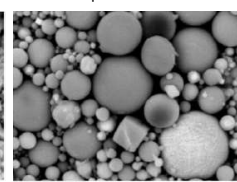
ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมี ความละเอียดโดยวิธีเบลน และความถ่วงจำเพาะของวัสดุประสานที่ใช้

องค์ประกอบทางเคมี (%)	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	ตะกรันเตาถลุงเหล็ก บดละเอียด		
		เถ้าลอย	ผงหินปูน	
SiO ₂	19.50	35.71	34.06	0.45
Al ₂ O ₃	4.97	20.44	16.27	0.05
Fe ₂ O ₃	3.78	15.54	1.70	0.03
CaO	65.38	16.52	36.05	55.20
MgO	1.08	2.00	7.38	0.34
SO ₃	2.16	4.26	2.16	<0.01
Na ₂ O	0.22	1.15	0.21	<0.01
K ₂ O	0.47	2.41	1.09	0.01
LOI	2.27	0.49	1.44	43.12
fCaO	1.00	1.71	-	-
ความละเอียดโดยวิธีเบลน(ชม. ² /ก.)	3,250	2,867	4,600	5,210
ความถ่วงจำเพาะ	3.12	2.21	2.96	2.69

ไม่เรียบ และมีอนุภาคหลายๆ ขนาดปนกันอยู่ ในขณะที่เถ้าลอยมีลักษณะอนุภาคเป็นทรงกลมและผิวค่อนข้างเรียบ แต่มีอนุภาคหลายๆ ขนาดปนกันอยู่เป็นจำนวนมากเช่นกัน ส่วนอนุภาคของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีลักษณะคล้ายๆ กับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 คือลักษณะเป็นเหลี่ยม ผิวค่อนข้างขรุขระไม่เรียบ และมีอนุภาคหลายๆ ขนาดปนกันอยู่ สำหรับผงหินปูนนั้นมีลักษณะของอนุภาคเป็นเหลี่ยม ผิวขรุขระไม่เรียบคล้ายกับกรณีของปูนซีเมนต์แต่มีขนาดของอนุภาคที่เล็กกว่า

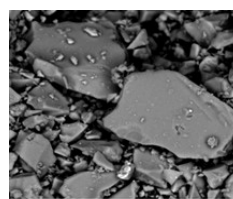


(ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ต

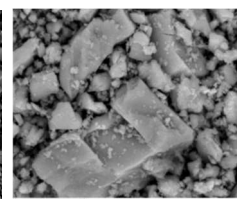


(ข) เถ้าลอย

แลนต์ประเภทที่ 1



(ค) ตะกรันเตาถลุงเหล็ก



(ง) ผงหินปูน

บดละเอียด

รูปที่ 2 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคของวัสดุประสานโดยวิธี SEM กำลังขยาย 3,500 เท่า

3.2 สมบัติของซีเมนต์และคอนกรีต

3.2.1 ความต้องการน้ำของเพสต์

ผลการศึกษาความต้องการน้ำ (water requirement) ของเพสต์ แสดงดังรูปที่ 3 พบว่า ความต้องการน้ำของเพสต์ผสมเถ้าลอย (ทั้งร้อยละ 20 และ 40) มีค่าน้อยกว่าของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะของเถ้าลอยที่มีอนุภาคกลมจะช่วยให้การไหลดีขึ้น จึงทำให้มีความต้องการน้ำน้อย ส่วนความต้องการน้ำที่เหมาะสมทั้งของเพสต์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (ทั้งร้อยละ 30 และ 50) และเพสต์ผสมผงหินปูน (ทั้งร้อยละ 5 และ 10) มีค่ามากกว่าของ เพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ต

แลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน มีขนาดอนุภาคที่ละเอียดกว่า รวมทั้งวัสดุดังกล่าวมีค่าความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งแทนที่โดยน้ำหนัก ทำให้มีความต้องการน้ำเพิ่มขึ้น ในขณะที่การผสมด้วยเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน และตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน มีแนวโน้มที่สอดคล้องกับการผสมด้วยเถ้าลอย หรือตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด หรือผงหินปูนเพียงชนิดเดียว เหตุผลดังที่กล่าวแล้ว

3.2.2 ระยะการก่อตัวของเพสต์

ผลการศึกษาระยะการก่อตัวของเพสต์ แสดงดังรูปที่ 4 พบว่า ระยะการก่อตัวของเพสต์ผสมเถ้าลอยและเพสต์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดช้ากว่าของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากการผสมด้วยเถ้าลอยและ/หรือผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดนั้น ทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง อีกทั้งเถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน ซึ่งการทำให้เกิดปฏิกิริยาเกิดช้า ส่วนระยะการก่อตัวของเพสต์ผสมผงหินปูน กลับพบว่าเร็วกว่าของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะอนุภาคของผงหินปูนที่ค่อนข้างละเอียด สามารถเข้าไปแทรกกระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ ทำให้อนุภาคปูนซีเมนต์สัมผัสกับน้ำได้มากขึ้น ส่งผลให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดมากขึ้น [6] ส่วนเพสต์ผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนและเพสต์ผสมตะกรันเตาถลุงบดละเอียดร่วมกับผงหินปูนมีแนวโน้มที่สอดคล้องกับการผสมด้วยเถ้าลอยและตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดเพียงอย่างเดียว เหตุผลดังที่กล่าวแล้ว

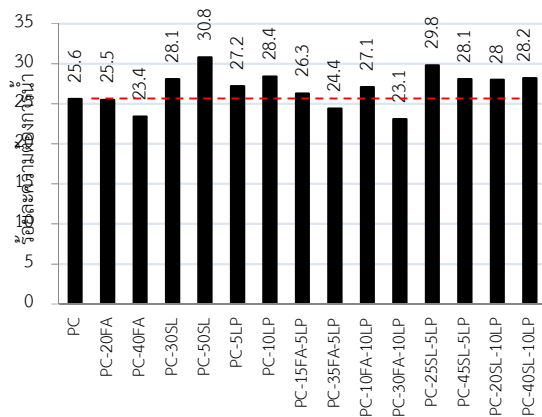
3.2.3 ค่าการยุบตัวของคอนกรีต

ผลการศึกษาค่าการยุบตัวของคอนกรีต แสดงดังรูปที่ 5 พบว่า ค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมากกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มาก ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคที่มีลักษณะกลม ซึ่งช่วยในการไหลเลื่อน ส่งผลให้มีค่าการยุบตัวมากขึ้น ส่วนค่าการยุบตัวของ

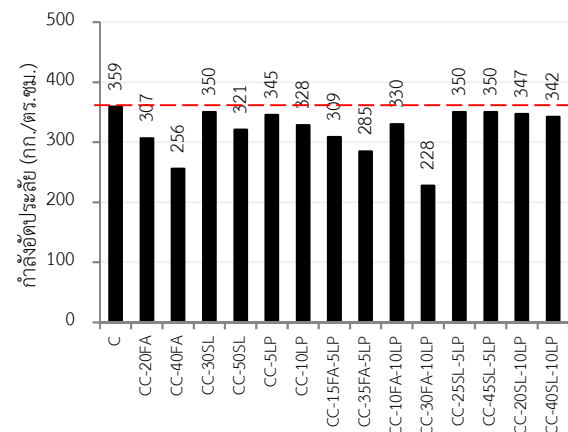
คอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและของคอนกรีตผสมผงหินปูน มีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มาก ทั้งนี้เพราะตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูนต่างก็มีขนาดอนุภาคที่ละเอียดกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 รวมทั้งความถ่วงจำเพาะที่น้อยกว่า ซึ่งเป็นการแทนที่โดยน้ำหนัก ส่วนค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน และของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูนให้ค่ามีแนวโน้มที่สอดคล้องกับการผสมด้วยเถ้าลอยหรือตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดเพียงอย่างเดียว เหตุผลดังที่กล่าวมาแล้ว

3.2.4 กำลังอัดประลัยของคอนกรีต

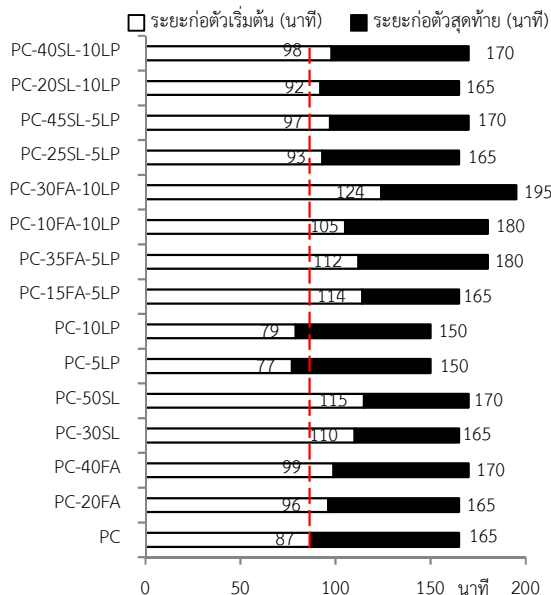
รูปที่ 6 แสดงค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีต (อัตราส่วนน้ำต่อปูนวัสดุประสานเท่ากับ 0.55) โดยตัวอย่างคอนกรีตมีอายุ 28 วัน พบว่า กำลังอัดประลัยของคอนกรีตทั้งที่ผสมเถ้าลอยและผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด มีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มาก ทั้งนี้เนื่องจากการผสมด้วยเถ้าลอยและ/หรือผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง ส่งผลให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดน้อย รวมทั้งการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดช้า ส่วนเมื่อผสมด้วยผงหินปูน ส่งผลให้ค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนที่ไม่มากนัก ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อผสมผงหินปูน (ซึ่งเป็นวัสดุเฉื่อย) ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง แต่จากการที่ผงหินปูนมีอนุภาคที่ค่อนข้างละเอียด จึงเป็นการช่วยในการเติมเต็มในช่องว่างของเพสต์ ส่งผลให้กำลังต่ำลงไม่มากนัก ส่วนการผสมกรณี 3 วัสดุประสาน ก็ให้ผลในแนวโน้มที่สอดคล้องกับการผสมด้วย 2 วัสดุประสาน เหตุผลดังที่กล่าวมาแล้ว



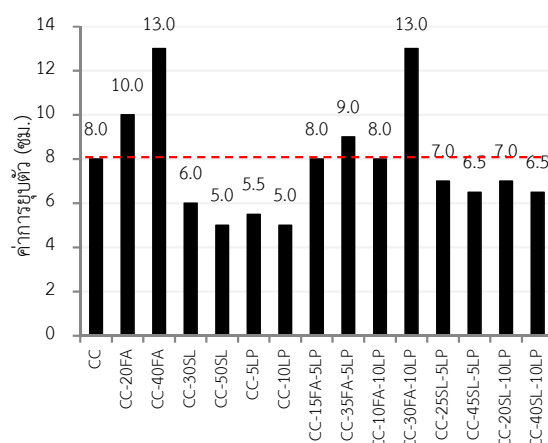
รูปที่ 3 ความต้องการน้ำของเพสต์



รูปที่ 6 กำลังอัดประลัยของคอนกรีต ที่อายุ 28 วัน



รูปที่ 4 ระยะเวลาก่อตัวของเพสต์



รูปที่ 5 ค่าการยุบตัวของคอนกรีต

3.3 ความลึกคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีต

จากการทดสอบความลึกคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตผสมเถ้าลอย ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผสมผงหินปูนในครั้งนี้ ได้พิจารณาถึงผลกระทบต่อความลึกคาร์บอนเนชั่น 3 ประการ คือ 1) ผลกระทบจากชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสาน 2) ผลกระทบจากวิธีการบ่มของตัวอย่างคอนกรีต และ 3) ผลกระทบจากระยะเวลาเผชิญกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.3.1 ผลกระทบของชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุประสาน

รูปที่ 7 แสดงความลึกคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีต ที่ระยะเวลาเผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 28 วัน และ 56 วัน โดยตัวอย่างคอนกรีตบ่มอากาศ 28 วัน และบ่มน้ำ 28 วัน ก่อนเผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากการศึกษาพบว่าทั้งสองวิธีการบ่มคอนกรีตนั้น ความลึกคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตที่ผสมด้วยเถ้าลอยและตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (ทั้งระยะเวลาเผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 28 วัน และ 56 วัน) มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง และปฏิกิริยาปอซโซลานซึ่งต่างก็มีส่วนทำให้ลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) จึงทำให้ความลึกคาร์บอนเนชั่นมากขึ้น ส่วนความลึกคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตผสมผงหินปูนมีค่า

ใกล้เคียงหรือสูงกว่าไม่มากเมื่อเทียบกับของคอนกรีต ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะอุณหภูมิของผงหินปูนที่เล็กเข้าไปอุดโพรงช่องว่างในเพสต์ทำให้คอนกรีตแน่นขึ้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เข้าไปได้ยากขึ้น จึงทำให้ความลึกการบอเนชั่นน้อยลง สำหรับกรณีของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยร่วมด้วยผงหินปูน และผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมด้วยผงหินปูน การเกิดคาร์บอนเนชั่นมีทิศทางเดียวกันกับการผสมด้วยเถ้าลอย ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและ/หรือผสมผงหินปูนเพียงอย่างเดียว ด้วยเหตุผลและสมบัติของวัสดุที่กล่าวมาแล้ว

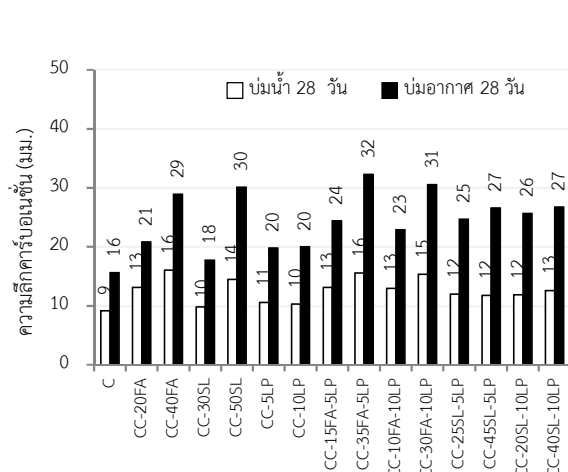
3.3.2 ผลกระทบของวิธีการบ่มของตัวอย่างคอนกรีต

สำหรับผลกระทบจากวิธีการบ่มตัวอย่างคอนกรีต 2 แบบ คือ บ่มอากาศ 28 วันและบ่มน้ำ 28 วัน ที่คอนกรีต เฝียกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ระยะเวลา 28 วัน และ 56 วัน (รูปที่ 7) พบว่า ทุกสัดส่วนผสมคอนกรีต ความลึกคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตที่บ่มน้ำ 28 วัน มีค่าน้อยกว่าของการบ่มอากาศ 28 วัน ทั้งนี้เป็นเพราะตัวอย่าง

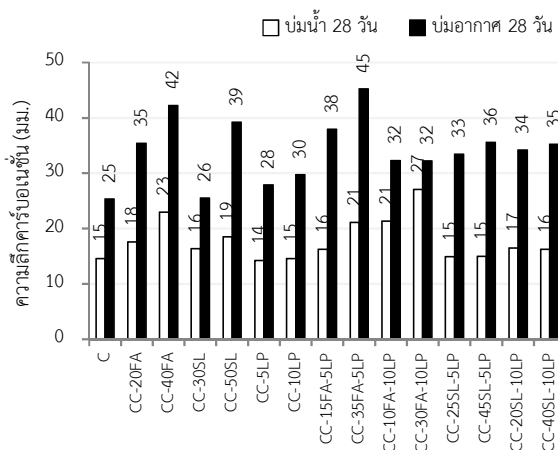
คอนกรีตที่บ่มอากาศ การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันหรือปฏิกิริยา ปอซโซลานไม่สมบูรณ์เท่ากับบ่มน้ำ จึงทำให้การที่บ่มน้ำของตัวอย่างคอนกรีตน้อยกว่าของที่บ่มน้ำ 28 วัน [7,8] ส่งผลทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปทำปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้น

3.3.3 ผลกระทบของระยะเวลาของตัวอย่างคอนกรีตที่เฝียกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ผลการศึกษาผลกระทบจากเวลาที่เฝียกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในสภาวะเร่งของตัวอย่างคอนกรีตผสมเถ้าลอย ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผสมผงหินปูน (รูปที่ 8) จากการศึกษาพบว่า คอนกรีตทั้งที่บ่มน้ำ 28 วัน และบ่มอากาศ 28 วัน ที่เฝียกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในสภาวะเร่งด้วยตู้อบคาร์บอนเนชั่น (28 วันและ 56 วัน) นั้น ระยะเวลาที่ตัวอย่างคอนกรีตเฝียกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นานกว่า ส่งผลให้ความลึกคาร์บอนเนชั่นมากขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้เพราะระยะเวลาในการเฝียกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นานขึ้น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก็สามารถเข้าสู่ตัวอย่างได้มากขึ้น ส่งผลให้ตัวอย่างคอนกรีตมีความลึกคาร์บอนเนชั่นมากขึ้น

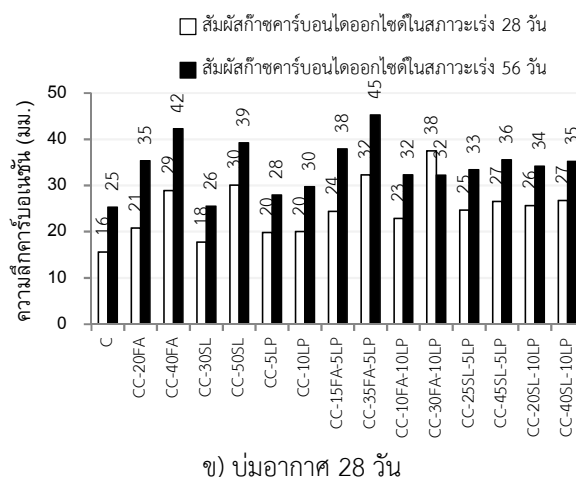
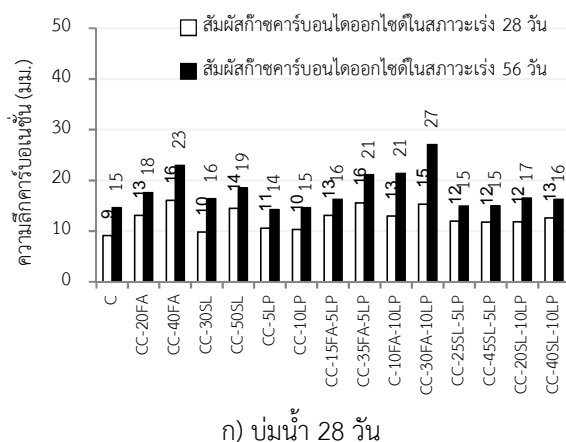


ก) เฝียกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 28 วัน



ข) เฝียกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 56 วัน

รูปที่ 7 ความลึกการเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตที่บ่มน้ำ 28 วัน และบ่มอากาศ 28 วัน



รูปที่ 8 ความลึกคาร์บอนชั้นของคอนกรีตที่ระยะเวลาเผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 28 และ 56 วัน

โดยการศึกษาครั้งนี้สามารถสรุปเปรียบเทียบผลการศึกษาสมบัติพื้นฐานและการเกิดคาร์บอนชั้นระหว่างของเพสต์/คอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยวัสดุประสานต่างชนิดกัน (ปูนซีเมนต์

ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แก่ลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็ก บดละเอียด และผงหินปูน) กับของเพสต์/คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 สรุปเปรียบเทียบสมบัติพื้นฐานและความลึกคาร์บอนชั้นระหว่างของเพสต์/คอนกรีตผสมแก่ลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูน กับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

รายการ	กรณีใช้ 2 วัสดุประสาน			กรณีใช้ 3 วัสดุประสาน	
	FA	SL	LP	FA+LP	SL+LP
ความต้องการน้ำของเพสต์	น้อยกว่า	มากกว่า	มากกว่า	น้อยกว่า	มากกว่า
ระยะเวลาก่อตัวของเพสต์	ช้ากว่า	ช้ากว่า	เร็วกว่า	ช้ากว่า	ช้ากว่า
ค่าการยุบตัวของคอนกรีต	มากกว่า	น้อยกว่า	น้อยกว่า	มากกว่า	น้อยกว่า
กำลังอัดประลัยของคอนกรีต	น้อยกว่า	แนวโน้มน้อยกว่า	แนวโน้มน้อยกว่า	น้อยกว่า	แนวโน้มน้อยกว่า
ความลึกคาร์บอนชั้นของคอนกรีต	มากกว่า	มากกว่า	แนวโน้มน้อยกว่า	มากกว่า	แนวโน้มน้อยกว่า

4. สรุปผล

จากผลการศึกษาครั้งนี้สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1) ความต้องการน้ำของเพสต์ผสมแก่ลอย มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ล้วน ในขณะที่ของเพสต์ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและของเพสต์ผงหินปูนมีค่ามากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

2) ระยะการก่อตัวของเพสต์ผสมเถ้าลอย และของเพสต์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ในขณะที่ของเพสต์ผสมผงหินปูนมีค่าน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

3) ค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ในขณะที่ค่าการยุบตัวของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และของผงหินปูนมีค่าน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

4) กำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมเถ้าลอย และของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มาก ส่วนกำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมผงหินปูน มีค่าใกล้เคียงกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

5) ความลึกคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตผสมเถ้าลอย และของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ในขณะที่ความลึกคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตผสมผงหินปูนมีค่าใกล้เคียงหรือสูงกว่าไม่มากเมื่อเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

6) ความลึกคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตที่บ่มน้ำมีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตที่บ่มอากาศ

7) ความลึกคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตที่เผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ระยะเวลานานกว่ามีความลึกคาร์บอนเนชั่นมากกว่าของคอนกรีตที่ระยะเวลาเผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่น้อยกว่า

8) สามารถสรุปเปรียบเทียบผลการศึกษาสมบัติพื้นฐานและความลึกคาร์บอนเนชั่นระหว่างคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูน กับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม และภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

เอกสารอ้างอิง

- [1] ปิติศานต์ กร้ามาตร และสมนึก ตั้งเดิมสิริกุล, “การต้านทานซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ผงหินปูน,” การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปีครั้งที่ 3, ชลบุรี, pp. MAT89-96, ตุลาคม 2550.
- [2] S. K. Roy, K. B. Poh and D. O. Northwood, “Durability of concrete accelerated carbonation and weathering studies,” Building. Env., vol. 34, pp. 597-606, August 1998.
- [3] J. Khunthongkeaw, S. Tangtermsirikul, and T. Leelawat, “A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete,” Construc. Building Mater., vol. 20, pp. 744-753, January 2006.
- [4] C. D. Atis, “Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash,” Construc. Building Mater., vol. 17, pp. 47-152, October 2003.
- [5] N. I. Fattuhi, “Carbonation of concrete as affected by mix constituents and initial water curing period,” Materiaux et Constructions, vol. 19, no.110, pp. 131-136, 1986.
- [6] กฤษฎา เสือเอี่ยม และณัฐ มากุล, “อิทธิพลของฝุ่นหินปูนต่อสมบัติของซีเมนต์เพสต์ชนิดไหลตัวได้ผสมเถ้ากลบ,” วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา ปีที่ 23, ฉบับที่ 3, หน้า 65-73, 2555.

- [7] ปิยะพงศ์ กี่สวัสดิ์คอน, รัฐศักดิ์ พรหมมาศ และ ทวีศักดิ์ รุ่งศักดิ์ทวีกุล, “อัตราการใช้ปูนซีเมนต์ในคอนกรีตผสมเถ้าทลายปาล์มน้ำมันและหินฝุ่นแทนทรายที่บ่มด้วยคลื่นไมโครเวฟ,” รายงานการวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์, 2558.
- [8] อภิชาติ คำภาหล้า, โกสีย์ เทียมลม และจิระยุทธ สืบสุข, “อิทธิพลของวิธีการบ่มต่อการพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต,”วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก ปีที่ 7, ฉบับที่ 2, หน้า 87-96, 2557.
- [9] Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by Air- Permeability Apparatus, ASTM C 204 – 00, 2000.
- [10] Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement, ASTM C 188 – 95, 1995.
- [11] Standard Test Method for Amount of Water Required for Normal Consistency of Hydraulic Cement Paste, ASTM C 187 – 11, 2011.
- [12] Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle, ASTM C 191 – 13, 2013.
- [13] Standard Test Method for Slump of Hydraulic- Cement Concrete, ASTM C 143/C 143M – 98, 1998.
- [14] Method of Making Test Cube from Fresh Concrete, British Standard Institute, BS 1881: Part 108, 1983.
- [15] Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)1, ASTM C 109 – 07, 2007.
- [16] Standard Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete, ASTM C 856 – 04, 2004.

พฤติกรรมภายใต้แรงแผ่นดินไหวของผนังรับแรงคอนกรีตหล่อสำเร็จรูปด้วยรอยต่อแบบการเชื่อมทาบเหล็กเส้น

Seismic Behavior of Precast Concrete Load Bearing Walls with Welded Rebar Connections

เอกชัย อยู่ประเสริฐชัย^{1*} พงษ์ศักดิ์ วิวัฒน์โรจนกุล² พิชัย สุวรรณสายะ³ อมร พิมานมาศ⁴

¹อาจารย์, สาขาวิศวกรรมโยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

39 หมู่ที่ 1 ถนน รังสิต-นครนายก ตำบล คลองหก อำเภอ ธัญบุรี จังหวัด ปทุมธานี 12110

²นักวิจัย, ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา, ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและเทคโนโลยี

สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

99 หมู่ 18 กม. 41 ถนนพหลโยธิน อำเภอ คลองหลวง จังหวัด ปทุมธานี 12120

³นักศึกษาปริญญาเอก, สาขาวิศวกรรมโครงสร้าง สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย

58 หมู่ 9 กม. 42 ถนนพหลโยธิน อำเภอ คลองหลวง จังหวัด ปทุมธานี 12120

⁴อาจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

50 ถ.งามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กทม 10900

Ekkachai Yooprasertchai^{1*} Pongsak Wiwatrojanagul² Pichaya Suwansaya³ Amorn Pimanmas⁴

¹Lecturer, Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, 12110

²Researcher, School of Civil Engineering and Technology, Sirindhorn International Institute of Technology, Thammasat University, Rangsit Campus, P.O. Box 22, Pathum Thani 12121, 12120

³Doctoral Candidate, School of Engineering and Technology, Asian Institute of Technology, Klong Luang, Pathumthani, 12120

⁴Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok, 10900

*Corresponding author: Email: ekkachai_y@rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างผนังรับแรงคอนกรีตหล่อสำเร็จรูปที่นิยมใช้ในประเทศไทย ต่อแรงแผ่นดินไหวด้วยวิธีการทดสอบแบบแรงสลับทิศทางกลับไปกลับมาซ้ำ ๆ (วัฏจักรแบบกึ่งสถิต) ในห้องปฏิบัติการและวิเคราะห์แบบจำลองชนิดไม่เชิงเส้นในคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม PERFORM3D ผนังและรูปแบบรอยต่อที่ศึกษานั้นมีขนาดที่ถูกลดส่วนลงด้วยอัตราส่วน 1 ต่อ 4 ผนังสำเร็จรูปถูกนำไปประกอบติดตั้งกับฐานรากโดยการเชื่อมระหว่างเหล็กข้ออ้อยที่ยื่นออกมาจากฐานรากกับเหล็กข้ออ้อยที่ฝังไว้ในกำแพง และทำการเปิดบริเวณรอยต่อที่เชื่อมและรอยต่อที่ผิวระหว่างผนังกับฐานรากด้วยปูนทรายชนิดไม่หดตัว ผลการศึกษาพบว่าผนังรูปแบบนี้มีกำลังและความแข็งแรงสูง เกิดความเสียหายอย่างรวดเร็วหลังจากที่พัฒนากำลังได้สูงสุด พฤติกรรมเป็นลักษณะเปราะ ผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองในคอมพิวเตอร์สามารถทำนายพฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบได้ มีความสอดคล้องกัน ผนังรับแรงคอนกรีตหล่อสำเร็จรูปประเภทนี้สามารถออกแบบให้รับแรงแผ่นดินไหวที่ไม่รุนแรง และอยู่ในช่วงยืดหยุ่นได้

คำสำคัญ: ผนังรับแรงคอนกรีตหล่อสำเร็จ, การทดสอบแบบวัฏจักรกึ่งสถิต, แผ่นดินไหว, การวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น

ABSTRACT

This paper presents seismic behavior of precast concrete (PC) load bearing wall panels widely constructed in Thailand through experimental and analytical programs. A quasi-static reversed cyclic loading test was conducted on an ¼ scaled PC load bearing wall panels to investigate and evaluate cyclic responses of the wall. The analytical program was verified with the experimental results using PERFORM3D. The PC wall specimen and the cast-in-situ foundation was connected using welded, short reinforcing steels. The connection was later grouted using nonshrink grout cement to achieve a structural integrity. The experimental results obviously indicated that the specimen could develop large strength and stiffness. However, after reaching its peak, the force-deformation of the wall was dramatically dropped and the specimen was failed. Analytical study also shows a good agreement with test results. The results reveal that the wall could be constructed in low seismic hazard area by considering that the walls behave within elastic range.

Keyword: Precast concrete load bearing wall panels, quasi-static reversed cyclic loading test, earthquake, nonlinear analysis

1. บทนำ

ณ ปัจจุบัน การก่อสร้างอาคารแบบโครงสร้างผนังรับแรงคอนกรีตหล่อสำเร็จรูปเริ่มเป็นที่นิยมในประเทศไทยจากการสำรวจเบื้องต้นโดยคณะผู้ดำเนินการวิจัยบริเวณกรุงเทพมหานคร และปริมณฑล ในช่วงปี พ.ศ. 2559 พบว่าวิศวกรผู้ออกแบบนิยมใช้โครงสร้างนี้สำหรับอาคารเตี้ยถึงสูงปานกลางในอาคารพักอาศัย เช่น บ้านพักอาศัย 2 ชั้น อพาร์ทเมนต์ หรือคอนโดมิเนียม เนื่องจากการแข่งขันที่สูงทางด้านราคาและความรวดเร็ว โครงสร้างประเภทนี้จึงมักเป็นตัวเลือกลำดับต้นๆ เพราะสามารถดำเนินการก่อสร้างได้อย่างรวดเร็ว มีการควบคุมคุณภาพที่ดี ประหยัดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง

ผนังคอนกรีตเป็นโครงสร้างเป็นที่เข้าใจกันดีว่ามีประสิทธิภาพสำหรับการต้านทานแรงกระทำด้านข้างและมักนำมาใช้เป็นระบบหลักในการต้านทานแผ่นดินไหวสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก โครงสร้างผนังคอนกรีตจะมีความทนทานต่อแรงดัดและแรงเฉือนที่สูง และสามารถจำกัดความเสียหายที่เกิดขึ้นโดยมีประสิทธิภาพที่เหนือกว่า

โครงสร้างเสา-คานซึ่งพบเห็นได้จากเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่ผ่านมา [1]

ระบบโครงสร้างผนังคอนกรีตนั้นมีทั้งแบบหล่อในที่และแบบผนังสำเร็จรูปที่หล่อมาจากโรงงาน สำหรับระบบผนังรับแรงคอนกรีตหล่อสำเร็จรูปจะมีประสิทธิภาพในการรับแรงกระทำด้านข้างและรับน้ำหนักบรรทุกทุกในแนวตั้งได้ดีระบบหนึ่ง

อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้ระบบผนังสำเร็จรูปในพื้นที่ที่เกิดแผ่นดินไหวยังมีไม่มากนัก โดยปัจจุบันประเทศไทยได้มีมาตรฐานการออกแบบผนังสำเร็จรูปเพื่อใช้ในการออกแบบแล้วแต่ก็มักเน้นที่การรับแรงในแนวตั้งและแรงลม [2]

จากเหตุการณ์แผ่นดินไหว Northridge ในปี พ.ศ. 2537 ที่ประเทศสหรัฐอเมริกา พบว่าโครงสร้างชิ้นส่วนสำเร็จรูปมีความเสียหายเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นส่วนสำเร็จรูป ทำให้มีการประกาศห้ามใช้โครงสร้างประเภทนี้ ถ้าไม่มีการทดสอบยืนยันว่ารูปแบบของโครงสร้างนี้มีความแข็งแรงและความเหนียวที่เพียงพอต่อความต้องการ [3, 4]

การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับพฤติกรรมของผนังรับแรงคอนกรีตหล่อสำเร็จรูปต่อแรงแผ่นดินไหวทั้งในประเทศและต่างประเทศมักจะเน้นเรื่องการพัฒนาารูปแบบรอยต่อให้มีความแข็งแรงและความเหนียวสำหรับอาคารปานกลางไปถึงอาคารสูง [5, 6] โดยรูปแบบรอยต่อที่พัฒนานี้จะเป็นการผสมผสานระหว่างเหล็กที่ใช้ในการก่อสร้าง 2 รูปแบบ ได้แก่ 1) การใช้เหล็กเสริมข้ออ้อย และ 2) ลวดอัดแรง 7 เส้นตีเกลียวทำงานร่วมกัน ระบบนี้เรียกว่าโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กระบบไฮบริด เหล็กทั้ง 2 ประเภทจะถูกออกแบบให้รับแรงดัดและแรงเฉือนที่จุดต่อ โดยจะมีลักษณะพิเศษเพิ่มเติมคือ เหล็กเสริมข้ออ้อยจะทำหน้าที่เพิ่มความสามารถในการสลายพลังงาน ลดการสั่นเนื่องจากแผ่นดินไหว ในขณะที่ลวดอัดแรงจะทำหน้าที่ดึงโครงสร้างกลับมามีตำแหน่งเดิม ซึ่งระบบใหม่นี้มีพฤติกรรมที่เหนือกว่าระบบการต่อด้วยระบบดั้งเดิมที่ใช้ระบบเปียกหรือระบบแห้ง ไม่ว่าจะเป็นการเชื่อมเหล็ก การใช้ข้อต่อเหล็ก (Coupler) และเทหุ้มปิดด้วยคอนกรีตอย่างเห็นได้ชัด อย่างไรก็ตาม การจะนำความรู้ใหม่ๆ นี้มาใช้ในการก่อสร้างเป็นเรื่องยากที่จะดำเนินการได้อย่างทันทั่วทั้งที่ไม่ใช่เป็นการถ่ายโอนความรู้ใหม่ๆ ให้กับเจ้าของและผู้ออกแบบ รวมไปถึงช่างก่อสร้างที่มีความรู้ความเข้าใจ

นอกจากนี้รูปแบบโครงสร้างระบบดั้งเดิมยังคงถูกออกแบบและนำมาใช้อย่างต่อเนื่องในปัจจุบันโดยที่ไม่มีการปรับปรุงรายละเอียดให้มีกำลังและความเหนียวที่ดี และไม่ได้ตระหนักถึงความเสี่ยงหรือความอ่อนแอของโครงสร้างผนังระบบดั้งเดิมนี้ต่อภัยแผ่นดินไหว

จากเหตุการณ์แผ่นดินไหวครั้งล่าสุดในประเทศไทย ขนาด 6.1 ตามมาตราโมเมนต์แมกนิจูด เมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม พ.ศ. 2557 ที่อำเภอ แม่ลาว จังหวัดเชียงราย ที่ผ่านมามีเป็นเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่ใหญ่ที่สุดที่เคยเกิดขึ้นในประวัติศาสตร์ของประเทศไทยในรอบ 79 ปี หลังจากที่เคยเกิด ขนาด 6.3 ขึ้นที่อำเภอ ปัว จังหวัดน่าน เมื่อวันที่ 13 พฤษภาคม พ.ศ. 2478 [7] เหตุการณ์แผ่นดินไหวเหล่านี้ทำให้วิศวกร นักวิจัยที่เกี่ยวข้อง ตลอดจนถึงประชาชนที่อาศัย

อยู่ในพื้นที่เสี่ยงภัย ได้ตระหนักเพิ่มมากขึ้น ถึงภัยแผ่นดินไหวที่ไม่ใช่เรื่องไกลตัวอีกต่อไป

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแผ่นดินไหวในประเทศไทยที่ผ่านมา นั้น มักจะเน้นที่อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นหลัก จะเห็นได้ว่าองค์ความรู้ ความเข้าใจในพฤติกรรมของรอยต่อระหว่างผนังสำเร็จรูปที่ได้สร้างมาแล้วในอดีตและกำลังจะก่อสร้างตามมาโดยใช้การต่อขึ้นส่วนสำเร็จรูปในรูปแบบเดิมต่อแรงแผ่นดินไหวยังมีน้อย บทความวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาความสามารถในการต้านทานแผ่นดินไหวของระบบผนังสำเร็จรูปที่นิยมสร้างกันในประเทศไทยโดยจำกัดขอบเขตของการศึกษาที่รอยต่อระหว่างผนังและฐานรากซึ่งเป็นรอยต่อที่สำคัญที่สุดในการรับแรงแผ่นดินไหว ตัวอย่างที่นำมาศึกษานี้ ผนังจะถูกหล่อขึ้นก่อนและนำไปประกอบติดตั้งกับฐานรากที่ตำแหน่งทดสอบด้วยการเชื่อมระหว่างเหล็กข้ออ้อยที่ยื่นออกมาจากฐานรากกับเหล็กข้ออ้อยที่ฝังไว้ในกำแพง ซึ่งการก่อสร้างตัวอย่างทดสอบนั้นจำลองการก่อสร้างแบบเดียวกับที่ดำเนินการก่อสร้างจริงในงาน โดยผนังคอนกรีตรับแรงสำเร็จรูปนั้น ถูกทำการย่อส่วนในห้องปฏิบัติการด้วยอัตราส่วนของขนาดระหว่างตัวอย่างทดสอบกับผนังจริงเท่ากับ 1 ต่อ 4 และทำการทดสอบด้วยวิธีวิวิจจักรแบบกึ่งสถิต (Quasi static reversed cyclic loading test) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมกันมาก เนื่องจากสะดวกและสามารถเข้าใจถึงพฤติกรรมของชิ้นส่วนโครงสร้างได้เป็นอย่างดี ผลการทดสอบที่ได้จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองในคอมพิวเตอร์ที่ได้ถูกทำการพัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรม PERFORM3D [8] โดยแบบจำลองที่สร้างขึ้นนั้นสามารถทำนายพฤติกรรมช่วงไม่เชิงเส้นได้ ผลการศึกษาพบว่าผนังรูปแบบนี้สามารถรับแรงได้ในระดับหนึ่งจากนั้นจะเกิดความเสียหายอย่างรวดเร็ว จนไม่สามารถรับแรงทางข้างได้อีกต่อไป พฤติกรรมเป็นลักษณะเปราะ ผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองในคอมพิวเตอร์สามารถทำนายพฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบได้เป็นอย่างดี มีความสอดคล้องกัน

2. รูปแบบของรอยต่อระหว่างผนังรับแรงสำเร็จรูป

ระบบที่ใช้ในการยึดผนังรับแรงสำเร็จรูปให้ต่อเนื่องกันเป็นโครงสร้างกันนั้นเป็นสิ่งที่สำคัญมาก เพื่อให้โครงสร้างทุกชิ้นส่วนทำงานร่วมกัน ถ่ายเทแรงไปให้โครงสร้างใกล้เคียงได้ตามที่ออกแบบไว้ ไม่มีการเสียรูปเกินขีดจำกัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อต้องรับแรงด้านข้างเช่นแรงลม และแรงแผ่นดินไหว จุดต่อระหว่างชิ้นส่วนยังมีความสำคัญเพิ่มขึ้นอย่างมาก จุดต่อจะต้องมีกำลังรับน้ำหนัก และความแกร่ง (Stiffness) เพียงพอ ที่จะยึดให้ชิ้นส่วนทุกชิ้นทำงานร่วมกัน

จากการสำรวจโดยคณะผู้ดำเนินการวิจัยพบว่าการยึดระหว่างชิ้นส่วนผนังสำเร็จรูปที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศไทยนั้นมี 3 วิธีได้แก่ 1) การยึดโดยการเชื่อมระหว่างเหล็กข้ออ้อยที่ยื่นออกมาระหว่างผนังและฐานราก 2) การฝังเหล็กรูปพรรณไว้ที่ผนังและฐานราก จากนั้นยึดโดยการเชื่อมเข้าด้วยกันด้วยเหล็กฉาก และ 3) การใช้ท่อ Corrugated duct ที่ใช้กันมากในงานลวดอัดแรงฝังไว้ที่ผนัง จากนั้นสอดเหล็กที่ยื่นออกมาจากฐานรากเข้าไป แล้วเทกรอกเข้าไปด้วยปูนทรายชนิดไม่หดตัว รูปที่ 1 แสดงรูปแบบรอยต่อที่กล่าวมาข้างต้น บทความนี้จำกัดขอบเขตการศึกษาที่รูปแบบรอยต่อที่ 1 เท่านั้น

3. วิธีการทดสอบ

แบบจำลองย่อส่วนตัวอย่างทดสอบของโครงสร้าง (Physical Model) ได้ถูกสร้างขึ้นเพื่อทำการทดสอบความสามารถในการรับน้ำหนักและกำลังต้านทานแผ่นดินไหวของชิ้นส่วน และรอยต่อของผนังรับแรงสำเร็จรูปกับฐานรากในห้องปฏิบัติการ จากนั้นทำการทดสอบตัวอย่างดังกล่าวภายใต้แรงวัฏจักรแบบกึ่งสถิตตามที่ได้นแนะนำโดย FEMA461 [9] วิธีการทดสอบรูปแบบนี้สามารถตรวจสอบกำลัง ความแกร่ง การเสื่อมถอยของกำลัง และการเสื่อมถอยของความแกร่งของโครงสร้างภายใต้แรงวัฏจักรได้เป็นอย่างดี



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 1 รูปตัวอย่างแบบรอยต่อที่นิยมใช้ในประเทศไทย (ก) การเชื่อมเหล็กเส้น (ข) การเชื่อมด้วยเหล็กฉาก และ (ค)

การใช้ท่อ Corrugated duct

3.1 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

คอนกรีตที่จะถูกออกแบบให้มีกำลังอัดประลัยที่ประมาณ 40 MPa ที่อายุ 28 วัน และอัตราส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 1 โดยทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตเป็นไปตามมาตรฐานของ ASTM C39 [10] และระหว่างทำการทดสอบได้ทำการติดอุปกรณ์วัดความเครียด

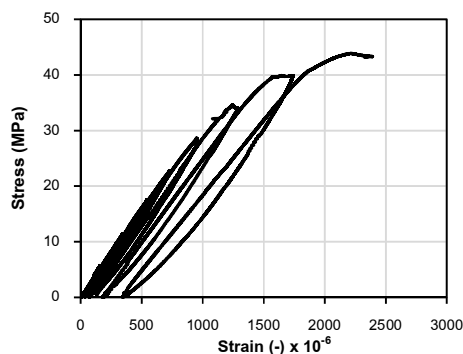
ด้วย Strain gage ที่ตัวอย่างคอนกรีตเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ซึ่งการทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำไปใช้ในการจำลองในคอมพิวเตอร์ต่อไป เพื่อให้สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมของคอนกรีตได้อย่างถูกต้อง การทดสอบหากล้างอัดประลัยของคอนกรีตนั้น เป็นวิธีการแบบวัฏจักรด้านแรงอัดอย่างเดียว ตัวอย่างทดสอบมีกล้างอัดคอนกรีตเฉลี่ยแบบไม่โอบรัด (Unconfined compressive strength) อยู่ที่ 42 MPa ดังแสดงในรูปที่ 2

เหล็กเสริมที่ใช้สำหรับการยึดผนังและฐานรากเข้าด้วยกันเลือกเป็นเหล็กข้ออ้อยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 10 mm (DB10) เกรด SD40 มีกล้างคราก (Yielding strength) ที่ 0.2% offset เท่ากับ 427 MPa และ กล้างประลัย (Tensile strength) เท่ากับ 647 MPa ตามมาตรฐานการทดสอบของ ASTM A370 [11] ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมแสดงดังรูปที่ 3

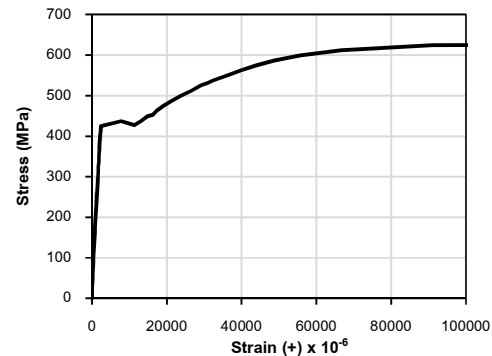
ในส่วนของเหล็กที่เสริมในผนังกำแพงนั้นเป็นลวดเหล็กดิ่งยื่นตะแกรงสำเร็จรูปขนาด 4 mm ระยะห่าง 10 x 10 mm มีกล้างครากระบุไม่น้อยกว่า 550 MPa

ตารางที่ 1 ส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้สำหรับการหล่อตัวอย่าง (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

ปูนซีเมนต์	น้ำ	หิน	ทราย
465	200	1008	725



รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของตัวอย่างคอนกรีต

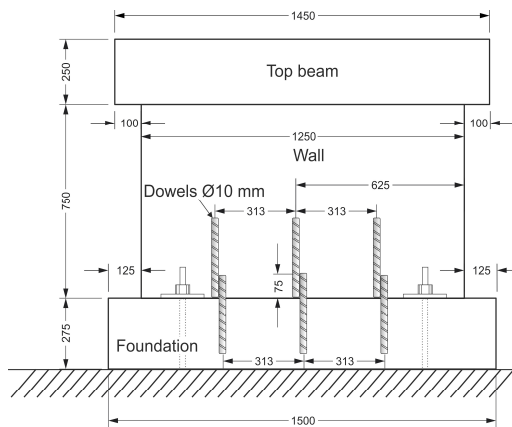


รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กข้ออ้อยขนาด DB10

3.2 ตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างผนังที่นำมาทำการศึกษานั้นพิจารณาจากอาคารพักอาศัยตั้งแต่ 2-8 ชั้น จากการสำรวจโดยคณะผู้วิจัยพบว่า อาคารที่พิจารณานี้มีความยาวช่วงอยู่ระหว่าง 3,000-5,000 mm มีความสูงชั้น 2,500-3,000 mm มีความหนาของผนังระหว่าง 100-150 mm มีอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักรวมของผนังในแนวแกนดิ่งต่อกำลังอัดคอนกรีตคูณด้วยพื้นที่หน้าตัด (Axial load ratio) อยู่ที่ 0.5-5% ซึ่งเมื่อเทียบกับโครงสร้างเสาที่มีอัตราส่วนนี้อยู่ประมาณ 15-40% แล้วถือว่ามีความน้อยมาก

ผนังนี้มีการใช้เหล็กเส้นเชื่อมต่อทาบบนอยู่ที่บริเวณรอยต่อในแนวราบอยู่ที่ 2 ถึง 5 ตำแหน่งต่อหนึ่งรอยต่อ เมื่อนำข้อมูลเหล่านี้มาพิจารณาออกแบบตัวอย่างทดสอบจะได้ว่าผนังทดสอบนี้มีขนาด 1250 mm (ความยาว) x 750 mm (ความสูง) x 100 mm (ความหนา) ดังแสดงในรูปที่ 4 ตัวอย่างผนังคอนกรีตหล่อสำเร็จมีรอยต่อในแนวราบจำนวน 3 ตำแหน่ง มีการเชื่อมต่อทาบบนด้วยเหล็ก DB10 เกรด SD40 ด้วยระยะทาบบน 75 mm ด้วยขนาดรอยเชื่อมประมาณ 6 mm ผนังตัวอย่างสำเร็จรูปนี้วางอยู่บนฐานรากที่มีความหนา 275 mm ซึ่งยึดแน่นกับพื้นห้องปฏิบัติการ ที่ด้านบนของผนังมีคานคอนกรีตถูกออกแบบให้ยึดแน่นกับผนัง เพื่อรับแรงจากกระบอกไฮดรอลิกซึ่งมีตำแหน่งของกระบอกอยู่ที่กึ่งกลางคานนี้ เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกในแนวดิ่งมีค่าน้อย ผนังนี้จึงไม่ได้ทำการใส่แรงในแนวดิ่ง



รูปที่ 4 แสดงรายละเอียดของตัวอย่างทดสอบ (หน่วย: mm)

3.3 ทดสอบและการตรวจวัด

การให้น้ำหนักบรรทุกจะเป็นแบบแรงแนวราบกึ่งสถิต กระทำเป็นวัฏจักร ดังแสดงในรูปที่ 5 (ก) โดยตัวอย่างทดสอบนั้นถูกยึดด้วยกระบอกลไฮดรอลิก (Hydraulic actuator) ที่สามารถให้แรงกับตัวอย่างทดสอบได้ ± 500 kN และมีระยะยึดของกระบอกลอยู่ที่ ± 500 mm โดยกระบอกลไฮดรอลิกนี้สามารถควบคุมการให้น้ำหนักทางข้างได้ทั้งทิศไปและทิศกลับ โดยบทความนี้หากตัวอย่างถูกดึงด้วยกระบอกลไฮดรอลิก (ทิศทางขวา) แรงและระยะการโยกตัวมีค่าเป็นบวก และตัวอย่างถูกดันด้วยกระบอกลไฮดรอลิก (ทิศทางซ้าย) แรงและระยะการโยกตัวมีค่าเป็นลบ กระบอกลไฮดรอลิกนี้มีเซ็นเซอร์อ่านค่าแรงและระยะการเคลื่อนตัวติดตั้งอยู่ในกระบอกล

สำหรับการทดสอบนั้นตัวอย่างทดสอบจะถูกควบคุมโดยระยะการยึด-หดของกระบอกลในทิศทางด้านข้าง (In plane) ของผนังตัวอย่างทดสอบ โครงเหล็กแข็งได้ติดตั้งด้านข้างตัวอย่างทดสอบ เพื่อป้องกันการเคลื่อนตัวนอกแกน (Out of plane) การให้น้ำหนักบรรทุกจะกระทำตามรูปแบบที่เป็นมาตรฐานโดยการปรับเพิ่มค่าการเคลื่อนตัวด้านข้าง (Lateral drift ratio) ทีละน้อยๆ (ประมาณ 0.05%-0.1% ช่วงแรกๆ) ดังแสดงดังรูปที่ 5 (ข) โดย Lateral drift ratio คืออัตราส่วนระหว่างระยะเคลื่อนตัวทางข้างและความสูงของกระบอกลไฮดรอลิก เทียบกับฐานราก คิดออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์ การเคลื่อนตัวของตัวอย่างทดสอบที่ตำแหน่งของกระบอกลไฮดรอลิกนั้นจะเริ่มจากศูนย์

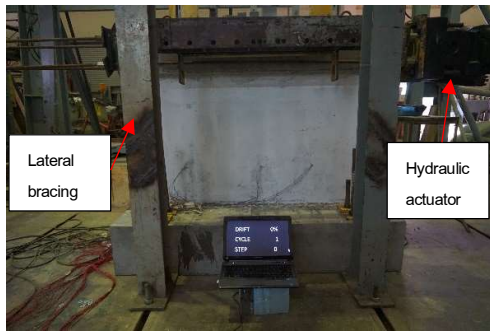
มาทางขวากลับมาศูนย์ มาทางซ้าย และกลับมาที่ศูนย์ ซึ่งมีค่าเท่ากับหนึ่งรอบ โดยแต่ละ Lateral drift ratio นั้นตัวอย่างทดสอบจะถูกทำการทดสอบซ้ำเป็นจำนวน 2 รอบก่อนที่จะเพิ่มระยะในรอบต่อไป ซึ่งจะทำได้สามารถตรวจสอบการเสื่อมถอยของกำลังและความแข็งแรงของผนังได้ อัตราส่วนนี้จะค่อยๆปรับเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งขึ้นทดสอบเกิดการวิบัติ โดยจะทำการวัดค่าแรงและการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้น ข้อมูลที่ได้จากการอ่านค่าเซ็นเซอร์ต่างๆจะถูกส่งเข้าที่อุปกรณ์เก็บข้อมูลและเข้าคอมพิวเตอร์ต่อไป

4. แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ในคอมพิวเตอร์

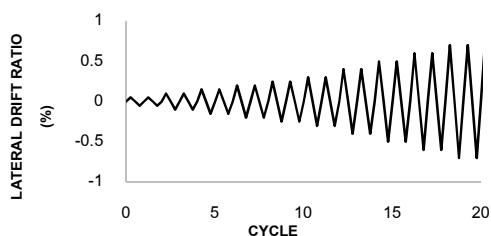
คณะผู้วิจัยได้สร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ด้วยคอมพิวเตอร์ (Numerical Model) ของตัวอย่างผนังหล่อสำเร็จรูป เพื่อทำการเปรียบเทียบกับผลทดสอบจริงและนำมาอธิบายพฤติกรรมโดยรวมของกำแพงหล่อสำเร็จ โดยกำแพงตัวอย่างจะถูกจำลองโดยใช้โปรแกรม CSI PERFROM-3D ซึ่งเป็นโปรแกรม Finite Element ที่มีชื่อเสียงในด้านการวิเคราะห์โครงสร้างองค์อาคารบ้านเรือนเสา คาน ผนังรับแรงเฉือน รวมไปถึง ผนังหล่อสำเร็จ โดยโปรแกรมนี้อาจจะสามารถวิเคราะห์โครงสร้างที่ถูกแรงทางข้างกระทำสลับข้างไปมา (Cyclic Pushover Analysis) ซึ่งเหมือนกับตัวอย่างทดสอบที่ได้ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยผลจากการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์จะถูกเปรียบเทียบกับผลการทดสอบในด้านของ แรงทางข้าง (Lateral Load) ระยะการโก่งตัวด้านข้าง และ ความเสียหายในสถานะต่าง (Damage State)

กำแพงตัวอย่างจะถูกจำลองโดยใช้ MVLEM (Multi Vertical Line Element Model) พัฒนาโดย Orakcal et al., [12] และ Orakcal และ Wallace [13] ใน PERFORM3D ซึ่ง Element นี้จะสามารถจำลองความสามารถในการรับแรงดัดและแรงเฉือนของผนังกำแพงรับแรงได้ ในการจำลองการรับแรงดัดของกำแพงนั้น กำแพงจะถูกแบ่งเป็น Fiber แนวตั้งขนาดเล็กๆ ซึ่งแต่ละ Fiber จะเปรียบเสมือนคอนกรีตและเหล็กเสริมที่อยู่ในกำแพงนั้น และจะมีสปริงแนวนอนสำหรับจำลองแรงเฉือนดังแสดงใน

รูปที่ 6 ซึ่งคุณสมบัติของวัสดุคอนกรีตและเหล็ก (Material Properties) ใน Fiber ต่างๆ จะได้มาจากการสร้างแบบจำลองและเปรียบเทียบกับผลการทดสอบคอนกรีตและเหล็กเสริมในห้องปฏิบัติการ

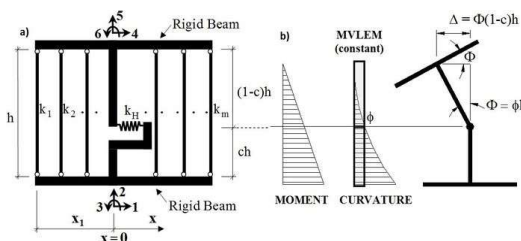


(ก)



(ข)

รูปที่ 5 (ก) แสดงการทดสอบและการให้ระยะการเคลื่อนที่ด้วยกระบอกไฮดรอลิก และ (ข) แสดงการให้ระยะการเคลื่อนที่ของตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 6 แสดงชิ้นส่วนของกำแพงที่ถูกจำลองโดย MVLEM [12, 13]

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตใน Fiber จะถูกจำลองโดยใช้ Inelastic 1D Concrete Material แบบ Trilinear with

Strength Loss ที่อยู่ในโปรแกรม PERFROM3D ดังแสดงในรูปที่ 7 จุดต่างๆบนกราฟแสดงความเสียหายในสถานะต่างๆ

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียดของเหล็กเสริมใน Fiber นั้นถูกจำลองโดยใช้ Inelastic Steel Material Non-Buckling แบบ Trilinear with Strength Loss ดังแสดงในรูปที่ 8 จุดต่างๆบนกราฟแสดงความเสียหายในสถานะต่างๆ และในส่วนของแรงเฉือนในสปริงจะถูกจำลองโดยใช้ Inelastic Shear Material สำหรับกำแพง ดังแสดงในรูปที่ 9 จุดต่างๆ บนกราฟแสดงความเสียหายในสถานะต่างๆ โดยที่กำลังรับแรงเฉือนสูงสุด (V_u) จะคำนวณโดยสมการของ ACI 318-14 [14] ซึ่งจะใช้ค่าน้อยกว่าของสมการที่ 1 และ 2

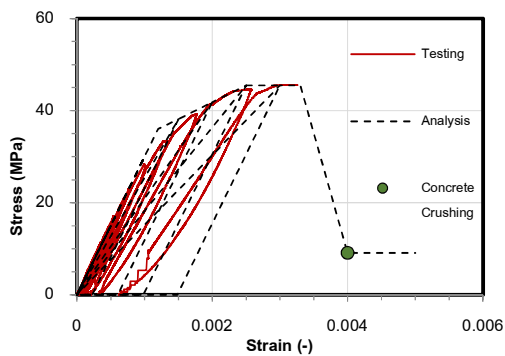
$$V_n = 0.27\sqrt{f_c}hd + \frac{N_u d}{4l_w} \quad (1)$$

$$V_n = \left[0.05\sqrt{f_c} + \frac{l_w (0.10\sqrt{f_c} + 0.20\frac{N_u}{l_w h})}{\frac{M_u}{V_u} - \frac{l_w}{2}} \right] hd \quad (2)$$

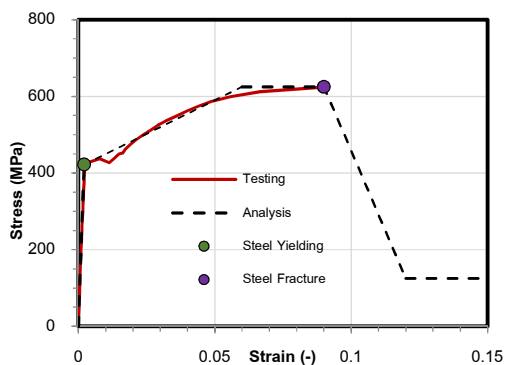
โดยที่ f'_c = กำลังอัดของคอนกรีต (MPa) h = ความหนาของกำแพง (mm) d = ความลึกประสิทธิภาพของกำแพง (mm) l_w = ความกว้างของผนัง (mm) N_u = แรงในแนวแกน (N) M_u และ V_u = แรงดัด (N-mm) และแรงเฉือน (N) ที่หน้าตัดวิกฤตตามลำดับ อย่างไรก็ตามการศึกษานี้ไม่ได้คำนึงถึงผลของแรงตามแนวแกน N_u ในสมการที่ 1 และ 2 มีค่าเป็นศูนย์

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของแรงเฉือนที่จุดต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 9 นั้น สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ของโมดูลัสของแรงเฉือน (Shear Rigidity, G) โดยที่ $G = 0.35E$ (E คือ Modulus of elasticity ของคอนกรีต หาได้จากมาตรฐาน ACI ข้างต้น) จากคำแนะนำของมาตรฐาน ASCE 41-06 [15] ได้กำหนดให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของแรงเฉือนตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงจุดสูงสุด (Peak) เป็นแบบเชิงเส้นตรง 3 เส้น (Trilinear Relationship) แต่เนื่องจากในโปรแกรม PERFORM-3D นั้นจะยอมให้ใส่ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของแรงเฉือนได้เพียง 2 เส้น (Bilinear Relationship) ความสัมพันธ์ดังกล่าวจึงถูก

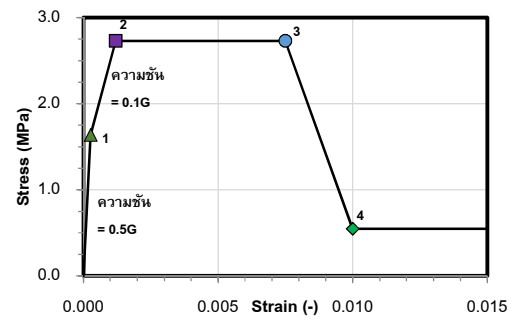
ปรับแก้โดยให้จุดที่เกิดรอยร้าวจากแรงเฉือน (จุดที่ 1, shear crack) มีความเค้นของแรงเฉือนเท่ากับ $0.6v_n$ และมีความชันเท่ากับโมดูลัสของแรงเฉือนประสิทธิผล (Effective Shear Rigidity, G_{eff}) เท่ากับ $0.5G$ ตามที่มาตรฐานทั่วไปแนะนำ ส่วนความชันของเส้นตรงที่ต่อจากจุดที่เกิดรอยร้าวจากแรงเฉือนถึงจุดที่มีความเค้นสูงสุด (จุดที่ 2, peak strength) นั้นใช้ตามคำแนะนำของมาตรฐาน ASCE 41-06 ซึ่งมีความชันเท่ากับ $0.1G$ หลังจากไปถึงจุดที่มีกำลังสูงสุดแล้ว ผนังจะเกิดการวิบัติของแรงเฉือนที่จุด 3 (Shear Failure) และจะลดลงเหลือ 20% ที่จุด 4 ($0.2v_n$) โดยความเค้นของจุดที่เกิดการวิบัติของแรงเฉือน และจุดที่ 4 นั้นมีค่าเท่ากับ 0.75% และ 1.00% ตามลำดับ ซึ่งเป็นคำแนะนำอยู่ในมาตรฐานข้างต้น



รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีต



รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริม



รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของแรงเฉือนในผนัง

หลังจากที่จำลองกำแพงตัวอย่างโดยใช้ MVLEM แล้ว กำแพงจะถูกเชื่อมต่อกับรากฐานโดยสมมติให้กำแพงต่อเชื่อมกับสปริงที่แนวนอนรับแรงเฉือนเลื่อนไถล (Shear slip) และสปริงแนวตั้งที่จำลองการเปิดและปิด (Gap open and close) ของปูนทรายชนิดไม่หดตัว (Grout material) โดยสปริงของปูนทรายเป็นชนิดรับแรงอัดเท่านั้น จะไม่ถ่ายเทแรงหากเกิดแรงดึง แต่สามารถพิจารณาถึงระยะที่เกิดขึ้นจากแรงดึงได้

สปริงแนวตั้งที่จำลองเหล็กเสริมข้ออ้อย (Dowel) ยึดต่อกับฐานรากแบบยึดติด (Fixed Base) ดังแสดงในรูปที่ 10 โดยความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนเลื่อนไถล (V_n) และระยะไถล (Slip) สำหรับสปริงรับแรงเฉือนเลื่อนไถลจะถูกจำลองโดยใช้ Inelastic Bar แบบ E-P-P with Strength Loss ดังแสดงในรูปที่ 11 โดยที่กำลังรับแรงเฉือนเลื่อนไถล (V_n) จะถูกคำนวณโดยสมการที่แสดงใน [16] ดังแสดงในสมการที่ 3 ถึง 5 โดยเมื่อกำลังเกินค่าสูงสุดแล้วจะเริ่มเกิดการไถลมาที่ 20% ของค่าสูงสุดที่ 2.2 mm ซึ่งเป็นค่าที่วัดได้สูงสุดจากการทดลองเมื่อสิ้นสุดการทดสอบ ควรจะระวังไว้ว่าสมมติฐานนี้ถูกกำหนดขึ้นมาเพื่อให้โมเดลมีเสถียรภาพในการคำนวณในคอมพิวเตอร์

$$V_{Rd,s} = V_{dd} + V_{fd} \quad (3)$$

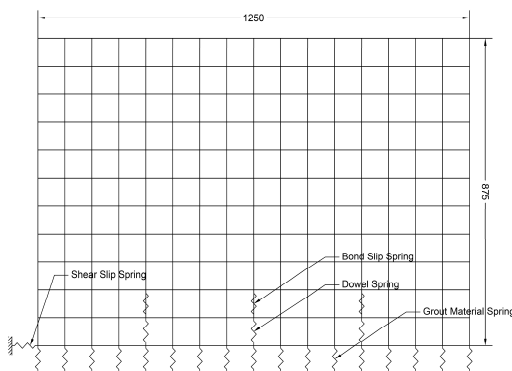
$$V_{dd} = 0.25f_y A_s \quad (4)$$

$$V_{fd} = \mu_f f_y A_s \quad (5)$$

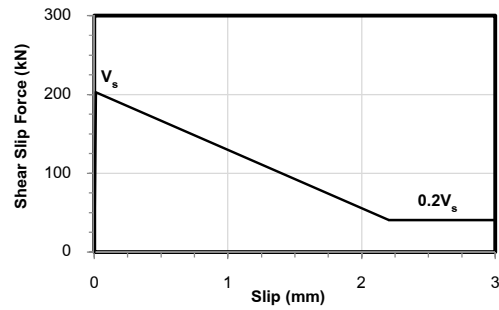
โดยที่ $V_{Rd,s}$ = กำลังรับแรงเฉือนที่บริเวณรอยต่อระหว่าง
ผนังและฐานราก (N) V_{dd} = กำลังรับแรงเฉือนที่จุดต่อเนื่อง
จากเหล็กข้ออ้อย (N) V_{fd} = กำลังรับแรงเฉือนที่จุดต่อเนื่อง
จากแรงเสียดทาน (N) f_y = ความเค้นที่จุดครากของเหล็ก
เสริม (MPa) A_s = พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม (mm^2) μ_f =
สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่รอยต่อมีค่าเท่ากับ 0.6

ความสัมพันธ์ของวัสดุประสานจะถูกจำลองโดยใช้
Inelastic 1D Concrete Material แบบ E-P-P with
Strength Loss ดังแสดงในรูปที่ 12 โดยกำลังรับแรงกด
($f'_c A_g$) มาจากผลการทดสอบวัสดุประสาน สำหรับเหล็ก
Dowel นั้นจะถูกจำลองคล้ายกับเหล็กเสริมในกำแพงแต่
แตกต่างกันที่เพิ่มแบบจำลองของแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง
เหล็กกับคอนกรีตโดยการตอบสนองของแรงยึดเหนี่ยวเป็น
อนุกรมเข้ากับสปริงของเหล็กเสริม (รูปที่ 10) ซึ่งเหล็ก
Dowel จะมีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) และ
ความเครียด (Strain) ดังแสดงในรูปที่ 8 โดยที่แรงยึด
เหนี่ยว (v_b) ของเหล็กข้ออ้อย Dowel (มีหน่วยเป็น MPa)
จะถูกคำนวณโดยวิธีที่นำเสนอโดย [17] ดังแสดงในสมการที่
6 และรูปที่ 13 โดยที่ C_0 คือระยะห่างระหว่างขั้วของเหล็ก
เสริม มีค่าเท่ากับ 6 mm ซึ่งได้มาจากการวัดระยะห่างของ
เหล็กจริงที่ใช้ในการทดสอบ

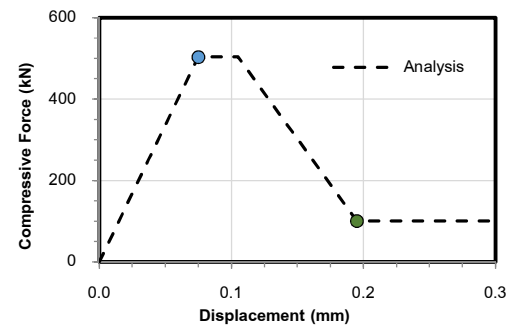
$$v_b = 2.57\sqrt{f'_c} \quad (6)$$



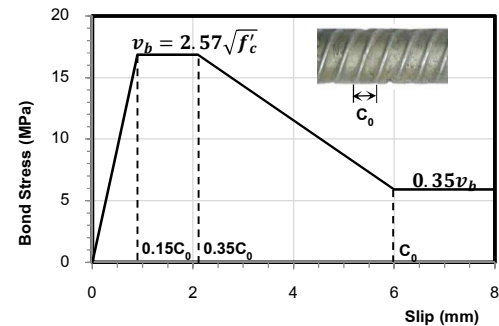
รูปที่ 10 แบบจำลองจุดต่อระหว่างผนังสำเร็จรูป และฐาน
ราก (หน่วย: mm)



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนเลื่อนไถลและระยะ
เลื่อนไถลของผนังสำเร็จรูป



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและระยะยุบตัวของ
วัสดุประสาน



รูปที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและระยะ
เลื่อนไถลของเหล็กเสริม [17]

เมื่อสร้างแบบจำลองกำแพงเสร็จสิ้น กำแพงจะถูกใส่
แรงกระทำทางข้าง ในตำแหน่งเดียวกับที่ทำการทดสอบใน
ห้องปฏิบัติการเพื่อให้เกิดการโยกตัวทางข้างสัมพันธ์
เช่นเดียวกับการทดสอบ

5. ผลการศึกษาและการวิเคราะห์

รูปที่ 14 (ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงทางข้างและ Lateral drift ratio ที่ได้จากการตรวจวัด จะเห็นว่าขึ้นทดสอบมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่น (elastic) ถึงช่วงระยะเคลื่อนตัวทางข้างประมาณ $\pm 0.15\%$ มีกำลังทางข้างสูงสุดเท่ากับ 91.20 kN และ 79.92 kN เมื่อตัวอย่างกำแพงถูกกระบอกไฮดรอลิกดึงและดันตามลำดับ และเมื่อผลักขึ้นทดสอบต่อไปเกินกว่าระยะนี้กำลังรับน้ำหนักเริ่มลดลง และจะลดลงอย่างรวดเร็วที่ระยะเคลื่อนตัวทางข้าง $\pm 0.20\%$ และหลังจากที่ตัวอย่างกำแพงเคลื่อนตัวเกินระยะเคลื่อนตัวทางข้างนี้แรงกระทำด้านข้างในรอบที่ 2 จะตกลงมาจากแรงกระทำด้านข้างในรอบแรกมาก โครงสร้างนี้แสดงถึงการถดถอยของความแข็งแรงอย่างเห็นได้ชัดเป็นผลเนื่องมาจากการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริมในกำแพงและรอยร้าวที่เกิดขึ้นมากขึ้น ทำให้เส้นโค้งของกราฟ (Hysteretic loops) มีลักษณะโค้งแบนเข้าหาจุดศูนย์กลาง (Pinching) ซึ่งเป็นผลให้เกิดการสูญเสียเสถียรภาพทางข้าง (หมายถึงความแกร่งต่ำ หากเกิดแรงเพียงเล็กน้อยจะเกิดการเคลื่อนตัวมาก)

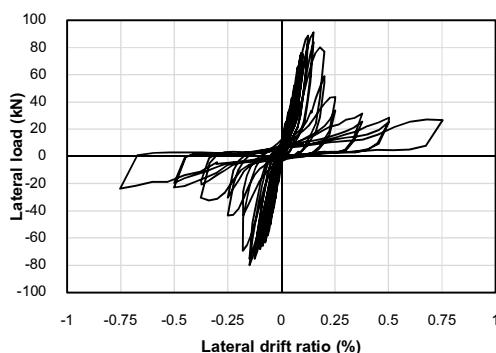
เนื่องจากผนังตัวอย่างทดสอบมีอัตราส่วนระหว่างตำแหน่งของแรงต่อความยาวของกำแพง (Shear span ratio) เท่ากับ 0.7 ซึ่งถือว่าน้อยมาก ทำให้ผนังตัวอย่างทดสอบถูกควบคุมด้วยแรงเฉือนเป็นหลัก เมื่อผนังตัวอย่างทดสอบเคลื่อนที่ไปที่ระยะทางข้าง $\pm 0.10\%$ เกิดรอยร้าวแรกที่บริเวณรอยต่อระหว่างผนังและกำแพง และที่ตำแหน่งเดียวกันนี้ ค่าความเครียดที่วัดได้ของเหล็กเสริมที่ตำแหน่งปลายทั้งสองข้างเริ่มคราก (Dowel yielding) ตามทิศทางการให้ระยะการโยกตัว เช่น เมื่อดึงตัวอย่างทดสอบมาทางขวา เหล็กเส้นริมทางซ้ายสุดเกิดการคราก ซึ่งผลการวิเคราะห์ทางคอมพิวเตอร์พบว่าเหล็กเสริมในรอยต่อเกิดการครากเช่นเดียวกัน

เมื่อผนังมีการโยกตัวทางข้างเท่ากับ $\pm 0.20\%$ การพัฒนารอยร้าวบนผนังตัวอย่างทดสอบมากขึ้นตามลำดับ มีรอยร้าว Splitting crack เกิดขึ้นที่บริเวณปลายของเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในผนังและใช้สำหรับการเชื่อมทาบ เป็นผล

เนื่องจากการถ่ายเทแรงยึดเหนี่ยวจากเหล็กเสริมข้ออ้อยเข้าสู่ผนังที่สูงเกินกว่าแรงดึงที่คอนกรีตสามารถรับได้ ทำให้แรงของผนังตัวอย่างทดสอบลดลงอย่างรวดเร็ว

เมื่อผนังมีการโยกตัวทางข้างเท่ากับ $\pm 0.25\%$ มีรอยร้าวเกิดขึ้นที่บริเวณปูนที่เทปิดรอยต่อหลังจากการเชื่อมเหล็ก เป็นผลทำให้เหล็กเสริมในกำแพงเริ่มเกิดการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยว (Bond slip) ความเครียดที่วัดได้ในเหล็กลดลงต่ำกว่าจุดคราก เกิดความเครียดคงค้าง (Residual strain) เป็นผลทำให้กำแพงสูญเสียกำลังอย่างรวดเร็ว เมื่อโยกผนังไปที่ $\pm 0.75\%$ พบว่าเหล็ก Dowel สูญเสียกำลังจนถึงกำลังต่ำสุด มีรอยร้าวเกิดขึ้นเพิ่มมากขึ้น และรอยร้าวที่เกิดขึ้นตั้งแต่ระยะการโยกตัวน้อยๆ ขยายความกว้างของรอยร้าวมากขึ้น รอยร้าวที่กว้างที่สุดอยู่ที่บริเวณรอยต่อระหว่างผนังและฐานรากมีความกว้างประมาณ 2-5 mm การทดสอบเกินกว่าช่วงนี้อาจทำให้ตัวอย่างทดสอบเกิดการพังถล่มลงมาและทำให้เครื่องมือเสียหายได้ ทางคณะผู้วิจัยจึงได้หยุดการทดสอบ จากนั้นจึงเก็บข้อมูลรอยร้าวตามที่แสดงในรูปที่ 14 (ข)

รูปที่ 15 แสดงผลการวิเคราะห์ที่ได้จากคอมพิวเตอร์ (เส้นทึบ) เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบ (เส้นประ) พบว่าแรงสูงสุดที่วิเคราะห์ได้น้อยกว่าที่ได้จากการทดสอบเล็กน้อยประมาณ 12-13% ซึ่งถือว่ามีความใกล้เคียง อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ นอกจากนี้ระยะการโยกตัวทางข้างที่ทำให้เกิดแรงทางข้างสูงสุดนั้นเท่ากันมีค่าเท่ากับ $\pm 0.15\%$ เมื่อทำการพิจารณาการสูญเสียความแข็งแรง (Stiffness degradation) โดยการนำค่าความแข็งแรงที่ระยะการโยกตัวต่าง ๆ ทั้งทางด้านทิศบวกและทิศลบ มาหารด้วยค่าความแข็งแรงสูงสุด (Normalized stiffness) มาพล็อตเทียบกับระยะการโยกตัวทางข้าง ดังแสดงในรูปที่ 16 โดยเส้นทึบเป็นผลที่ได้จากการวิเคราะห์ และเส้นประเป็นผลที่ได้จากการทดสอบ พบว่าการเสื่อมถอยของกำลังมีการลดลงรวดเร็วอย่างเห็นได้ชัด ผลการทดสอบที่วัดได้มีความใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์เป็นอย่างมาก

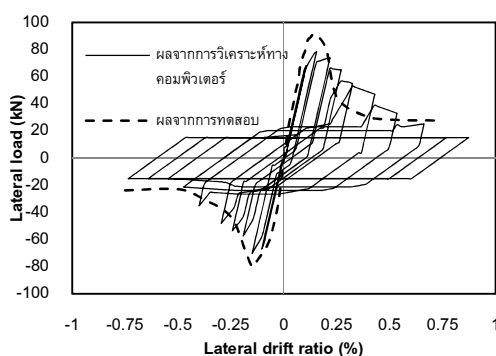


(ก)

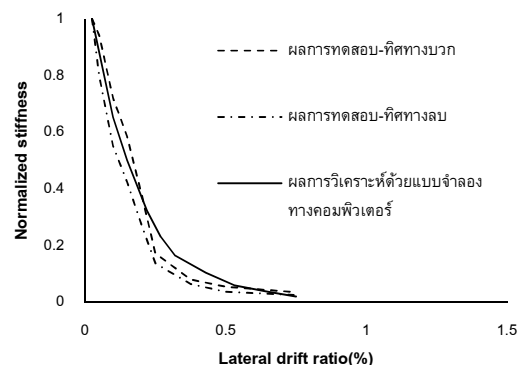


(ข)

รูปที่ 14 ผลการทดสอบ (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนที่ทางข้างของตัวอย่าง (ข) รูปแสดงความเสียหายเมื่อเสร็จสิ้นการทดสอบ



รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนที่ทางข้างของตัวอย่างที่ได้จากวิเคราะห์ทางคอมพิวเตอร์



รูปที่ 16 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized stiffness และการเคลื่อนที่ทางข้างของผนังตัวอย่าง

6. สรุปผลการศึกษา

การศึกษานี้เป็นการศึกษาในระยะเริ่มต้นเกี่ยวกับพฤติกรรมของผนังรับแรงคอนกรีตหล่อสำเร็จรูปโดยมีรูปแบบการต่อโดยใช้การทาบและเชื่อมเหล็กเป็นระยะสั้นๆ ซึ่งเป็นรูปแบบที่ใช้กันรูปแบบหนึ่งในประเทศไทย คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการศึกษาโดยการทดสอบความสามารถการรับแรงและการโยกตัวทางข้างโดยการทดสอบ และทำการพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์ขึ้นด้วยคอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรม PERFORM3D

ผลการศึกษาพบว่า ระบบผนังนี้มีกำลังและความแข็งแรงที่สูง สามารถพัฒนากำลังสูงสุดได้ที่ระยะการโยกตัว $\pm 0.15\%$ หลังจากนั้นผนังตัวอย่างทดสอบเกิดความเสียหายอย่างรวดเร็วทั้งทางด้านกำลัง ความแข็งแรง และรอยร้าวที่เกิดขึ้นที่ตัวผนัง ความเหนียวของผนังอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำมาก

คณะผู้วิจัยได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยการใช้ element ที่เรียกว่า MVLEM ที่ถูกพัฒนาขึ้นที่ต่างประเทศมาจำลองพฤติกรรมของตัวผนัง มาประกอบรวมกับสปริงแกนเดียวที่สามารถประเมินพฤติกรรมช่วงไม่เชิงเส้นได้ มาจำลองพฤติกรรมของเหล็กเสริมบริเวณรอยต่อที่มีการพิจารณาถึงการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยว และมีการใช้สปริงไม่เชิงเส้นมาจำลองพฤติกรรมการเคลื่อนไถลของผนัง ผลการวิเคราะห์พบว่าแบบจำลองมีประสิทธิภาพสูงในการประเมิน

พฤติกรรมของผนัง มีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดสอบ

เมื่อพิจารณาผลการศึกษาในระยะเริ่มต้นนี้ จะเห็นได้ว่าระบบผนังรับแรงคอนกรีตหล่อสำเร็จรูปที่ใช้รูปแบบการประกอบโดยใช้การเชื่อมเหล็กเป็นระยะสั้นๆนี้มีความแข็งแรงและความแข็งแกร่งทางช้างที่สูง มีพฤติกรรมแปรปรวนอย่างไรก็ดีการศึกษาเป็นเพียงการศึกษามันสำเร็จรูปแผ่นเดียว เมื่อพิจารณาถึงโครงสร้างจริง จะพบว่าผนังสำเร็จรูปนั้นจะประกอบกัน 4 ด้านเป็นเหมือนรูปกล่อง ทำให้ความแข็งแรงของระบบโครงสร้างเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก เมื่อเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวกับระบบโครงสร้างรูปแบบนี้ หากแรงที่เกิดขึ้นในผนังแต่ละแผ่น ไม่เกินช่วงยืดหยุ่นของตัวผนังเอง โครงสร้างนี้ก็จะสามารถรับแรงแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นได้อย่างปลอดภัย

อย่างไรก็ดีพฤติกรรมของผนังนี้อาจเปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก หากระบบของโครงสร้างนี้มีน้ำหนักบรรทุกทุกในแนวแกนตั้ง ซึ่งเป็นผลให้กำลังรับแรงของตัวผนังเองสูงขึ้น อีกทั้งทำให้ความสามารถในการป้องกันการไหลบริเวณรอยต่อสูงขึ้น นอกจากนี้ในอาคารจริง ลักษณะการถ่ายเทแรงทางช้างเข้าสู่ผนังต่างๆมีความซับซ้อน เป็นผลให้อัตราส่วนของระยะแรงต่อความยาวของผนังเปลี่ยนแปลงไป ทำให้ผนังอาจมีพฤติกรรมอยู่ในช่วงแรงดัดเป็นหลัก ซึ่งจะต้องทำการศึกษาประเด็นต่างๆนี้เพิ่มเติมต่อไป เพื่อให้เกิดองค์ความรู้ความเข้าใจ สามารถประเมินผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นเนื่องจากแรงแผ่นดินไหว และหาวิธีป้องกันความเสียหายได้อย่างมีประสิทธิภาพ

7. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย สัญญาเลขที่ RDG5830008 ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนสำหรับการดำเนินงานวิจัย และสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชียที่อำนวยความสะดวกทางด้านสถานที่และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] S.K. Ghosh, "Observations on the performance of structures in the Kobe Earthquake of January 17, 1995," PCI journal, vol. 40, no. 2, pp. 14-22, 1995.
- [2] มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง, มาตรฐาน วสท. 1008-38, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, พิมพ์ครั้งที่ 7, 2554.
- [3] NEHRP (National Earthquake Hazard Reduction Program, "Recommendation provisions for seismic regulations for new buildings, Part 1 – Provisions. Building Seismic Safety Council," Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, USA., 1994.
- [4] J. F. Hall, "Northridge Earthquake January 17, 1994 – Preliminary reconnaissance," Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA, USA, 1994.
- [5] E. Yooprasertchai, I. J. Hadiwijaya, and P. Warnitchai, "Seismic performance of precast concrete rocking walls with buckling restrained braces," Magazine of Concrete Research, vol. 68, no. 9, pp. 462-476, 2015.
- [6] E. Yooprasertchai and P. Warnitchai, "An application of precast hybrid moment-resisting frames for seismic improvement," Magazine of Concrete Research, vol. 68, no. 20, pp. 1051-1069, 2016.
- [7] T. Ornthammarath and P. Warnitchai, "5 May 2014 MW 6.1 Mae Lao (Northern Thailand) Earthquake: Interpretations of recorded ground motion and structural damage," Earthquake Spectra, vol. 32, no. 2, pp. 1209-1238, 2016.

- [8] G.H. Powell, "Perform-3D CSI. User Manual and User Guide," Powell Inc., 2000.
- [9] Federal Emergency Management Agency (FEMA), "Interim protocols for determining seismic performance characteristics of structural and nonstructural components through laboratory testing," FEMA 461, 2007.
- [10] Standard test methods for compressive strength of cylindrical concrete specimens, ASTM C39, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2005.
- [11] Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products, ASTM A370, American Society For Testing And Materials, West Conshohocken, PA, 2005.
- [12] K. Orakcal, J. P. Conte, and J. W. Wallace, "Flexural modeling of reinforced concrete structural walls- model attributes," ACI Structural Journal, vol. 101, no. 5, pp. 688-698, 2004.
- [13] K. Orakcal and J. W. Wallace, "Flexural modeling of reinforced concrete structural walls – experimental verification," ACI Structural Journal, vol. 103, no. 2, pp. 196-206, 2006.
- [14] Building code requirements for structural concrete (ACI 318-14) and commentary, ACI Committee, American Concrete Institute, Farmington Hills, United States, 2014.
- [15] Seismic rehabilitation of existing buildings (ASCE/SEI 41-06). Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers, 2007.
- [16] T. Salonikios, I. Tegos, A. Kappos, and G. Penelis, "Squat R/C walls under inelastic shear reversals," In Proceedings of 11th World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, Mexico, 1996, paper no. 749.
- [17] M. Suthasit and P. Warnitchai, "Modeling of gravity load designed RC frame buildings for nonlinear dynamic analysis," In The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, 2008, paper no. 05-01-492.

การจำลองหุ่นส่วนร่างกายของทรวงอกสำหรับการศึกษาการประมวลผลภาพ ทางการแพทย์

A Phantom Simulation of Thoracic for Medical Image Processing Study

ธนาธร สันติธรรม¹ ณัฐพงศ์ จันทร์ตา¹ ปวีตรา บัลลังก์นาค¹ ประธาน วงศ์ตาหล้า² ชิชณุพงศ์ บุตรดี² ปฎิวัติ
โชติมล³ ธัชชัย ศรีเสน⁴ ฐิติพงศ์ แก้วเหล็ก^{2*}

¹ นักศึกษาปริญญาตรี ภาควิชารังสีเทคนิค คณะสหเวชศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

² อาจารย์ภาควิชารังสีเทคนิค คณะสหเวชศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

³ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ภาควิชาเทคโนโลยีหัวใจและทรวงอก คณะสหเวชศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

⁴ อาจารย์ภาควิชากายวิภาคศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์การแพทย์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

99 หมู่ 9 ต.ท่าโพธิ์ อ.เมือง จ.พิษณุโลก 65000

Thanathon Sunthitharm¹, Natthaphong Chanta¹, Pawittra Banlangnak¹, Prathan Wongtala²
Chitsanupong Butdee², Phatiwat Chotimol³, Thuchchai Srisen⁴ and Titipong Kaewlek^{2*}

¹Student, Department of Radiological Technology, Faculty of Allied Health Sciences
Naresuan University, 65000, Thailand

²Lecturer, Department of Radiological Technology, Faculty of Allied Health Sciences
Naresuan University, 65000, Thailand

³Assistant, Department of Cardio-Thoracic Technology, Faculty of Allied Health Sciences
Naresuan University, 65000, Thailand

⁴Lecturer, Department of Anatomy, Faculty of Medical Science, Naresuan University, 65000
Thailand

*Corresponding author: Email: titipongk@nu.ac.th

บทคัดย่อ

หุ่นส่วนร่างกายทางคณิตศาสตร์ เป็นการจำลองอวัยวะในร่างกายของมนุษย์อย่างง่าย หุ่นส่วนร่างกายสามารถจำลองอวัยวะ เช่น ทรวงอก ปอด กระดูก และกล้ามเนื้อ ค่าข้อมูลของหุ่นส่วนร่างกายสามารถใช้แทนอวัยวะในภาพของเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์(ซีที)ได้ จุดประสงค์ในการศึกษาครั้งนี้เพื่อสร้างหุ่นส่วนร่างกายส่วนทรวงอกของมนุษย์ ข้อมูลภาพจำลองจะถูกเปรียบเทียบกับภาพซีทีจากฐานข้อมูล : เรดิโอฟิเดีย โดยใช้ภาพอ้างอิงสามสไลซ์ภาพ อวัยวะจากการจำลองมีลักษณะคล้ายคลึงกับอวัยวะในภาพซีที การวัดค่าโปรไฟล์เชิงเส้น และวัดค่าความเข้มในภาพจำลองเปรียบเทียบกับภาพจากฐานข้อมูล การประเมินเชิงปริมาณของค่าโปรไฟล์และค่าความเข้ม ค่าความเข้มของ ปอด หัวใจ และกระดูก ไม่มีความแตกต่างกัน($P < 0.05$) ส่วนความเข้มของหลอดเลือดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) การประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญด้านกายวิภาคศาสตร์ สามท่าน ภาพจำลองมีความคล้ายคลึงกับภาพจากฐานข้อมูลในระดับปานกลาง สรุปได้ว่า ภาพหุ่นส่วนร่างกายมีความคล้ายคลึงกับภาพซีทีจากฐานข้อมูลและสามารถนำไปทดสอบอัลกอริทึมอื่นๆได้

คำสำคัญ: การจำลองหุ่นส่วนร่างกาย หุ่นส่วนร่างกาย ทรวงอก ภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์

ABSTRACT

A mathematical phantom is a simple method to simulate the organs of the human body. A phantom can simulate organs such as the chest, lung, bone, and muscle. The information for this phantom was gained from real organs captured by computed tomography (CT) images. The purpose of this study was to create a human thoracic phantom. The image data of the simulation phantom images was compared to CT images from the database: Radiopedia. Thirty-four slices of CT images were referenced. The simulated organs were similar to the organs in the CT images. The line profiles and the intensity value of the simulated images and the reference images were compared. The qualitative evaluation of profile and intensity value and intensity value of lungs, heart and bone were not significantly different ($P < 0.050$). The intensity of blood vessels was significantly different ($P > 0.05$). The assessment of three experts in human anatomy on the simulated image and the database image were moderately similar. In conclusion, the phantom simulation images were similar to CT images from the database. Therefore, the phantom may be used to test algorithms in medical image processing.

Keyword: Phantom simulation, phantom, chest, computed tomography image.

1. บทนำ

การสร้างภาพเพื่อวินิจฉัยโรคทางด้านรังสีวิทยามีบทบาทในการช่วยวินิจฉัยของแพทย์ให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น [1],[2] เครื่องมือที่ใช้สร้างภาพได้แก่ เครื่องเอกซเรย์แบบดิจิทัล (Digital X-ray), การสร้างภาพด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic resonance imaging; MRI), การใช้คลื่นเสียงกำลังสูงสะท้อนให้เกิดภาพ (Ultrasound) และการสร้างภาพด้วยเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ (Computed tomography; CT) [1],[2] ในปัจจุบันการตรวจวินิจฉัยด้วยเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์เป็นที่นิยม และมีจำนวนเพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์อาศัยหลักการทำงานของลำรังสีเอกซ์และตัวรับภาพในการเก็บข้อมูล แล้วข้อมูลทั้งหมดจะถูกคอมพิวเตอร์ประมวลผลและสร้างเป็นภาพขึ้นมา โดยสามารถแสดงรายละเอียดเป็นได้หลายแนวร่างกาย เช่น ในแนวตัดขวาง แนวระนาบและแนวกึ่งกลาง

ลำตัว [3] และเพื่อให้ได้ภาพที่มีคุณภาพดีและสามารถตรวจพบรอยโรคได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น จึงมีการประยุกต์วิธีการทางคณิตศาสตร์ หรือเรียกว่า อัลกอริทึมแบบต่างๆ เช่น การกรองภาพ (Image Filtering) การแบ่งส่วนภาพ (Image Segmentation) การซ้อนทับภาพ (Image Registration) และการสร้างภาพใหม่ (Image Reconstruction) [4]-[6] เป็นต้น การประมวลผลภาพเหล่านี้ นับว่ามีบทบาทอย่างมากในการทำงานของแพทย์ในปัจจุบัน ทำให้การตรวจวินิจฉัยทำได้ถูกต้อง แม่นยำมากขึ้น ในการทดสอบวิธีการต่างๆ จำเป็นที่จะต้องมีการหาข้อมูลที่สามารถบ่งบอกถึงข้อมูลที่ทราบค่าในภาพที่แน่นอน จำเป็นจะต้องสร้างภาพวัตถุที่มีเนื้อเยื่อที่มีความสม่ำเสมอ (Uniformity tissue) ซึ่งต้องใช้อุปกรณ์หุ่นส่วนร่างกาย (Phantom) เช่น Rando phantom ซึ่งมีราคาแพง [7] และจะต้องนำหุ่นส่วนร่างกายไปถ่ายภาพด้วยเครื่องมือ เช่น เครื่องเอกซเรย์ เครื่องสแกนแม่เหล็กไฟฟ้า

หรือเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์เพื่อให้เกิดภาพที่จะนำมาประมวลผลด้วยวิธีการต่างๆได้จากเหตุผลดังกล่าว จึงได้นักวิจัยชื่อ Shepp และ Logan [8] เสนอแนวคิดในการจำลองหุ่นส่วนร่างกาย ส่วนศีรษะ ที่มีรูปทรงเรขาคณิตเป็นทรงวงรีหลายๆชิ้นซ้อนกัน เกิดเป็นลักษณะตัวแทนของเนื้อเยื่อสมองและศีรษะมนุษย์ สามารถใช้ทดสอบอัลกอริทึมทางคณิตศาสตร์ทดแทนการใช้หุ่นส่วนร่างกาย แต่ในบางครั้งหากนักวิจัยต้องการศึกษาในเนื้อเยื่ออวัยวะส่วนอื่น หุ่นส่วนร่างกายของ Shepp และ Logan [8] ไม่สามารถแสดงรายละเอียดของอวัยวะในร่างกายมนุษย์บริเวณที่ต้องการศึกษาได้ จึงทำให้คณะผู้วิจัยต้องการศึกษาการจำลองเนื้อเยื่อส่วนทรวงอกของมนุษย์ในลักษณะภาพตัดขวางสีขาว-ดำ โดยใช้โปรแกรมเมทแล็บที่มีค่าความเข้มของภาพคล้ายกับภาพที่ได้จากเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ เพื่อนำไปใช้ในการศึกษาการประมวลผลและการทำวิจัยในอนาคต โดยหุ่นส่วนร่างกายจะสามารถนำไปทดสอบอัลกอริทึมของการสร้างภาพในเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์หรือการใช้งานในด้านอื่นๆต่อไปได้

2. การจำลองหุ่นส่วนร่างกายของทรวงอก

การจำลองลักษณะทางกายวิภาคศาสตร์ส่วนทรวงอกของมนุษย์ ลักษณะภายในภาพหุ่นส่วนร่างกายจะประกอบด้วย อวัยวะในช่องอก ในระดับของกระดูกสันหลังต่างๆ ได้แก่ ปอด หัวใจ เส้นเลือด หลอดลม หลอดอาหาร กระดูกหน้าอก และกระดูกสันหลังโดยศึกษาลักษณะทางกายวิภาคศาสตร์ภาพจากฐานข้อมูล Radiopaedia [9] ซึ่งเป็นภาพตัดขวางของเพศหญิง อายุ 34 ปี ไฟล์ภาพประเภท 8 บิต ขนาดเมทริกซ์ 512x512 พิกเซล (Pixels) นามสกุลไฟล์ .JPG จำนวน 34 ภาพ ลักษณะของภาพหุ่นส่วนร่างกายเป็นรูปแบบสองมิติในระนาบตัดขวาง ตั้งแต่ส่วนทรวงอกจากระดับกระดูกสันหลังส่วนคอที่ 6 ถึงระดับกระดูกสันหลังส่วนเอวที่ 3 ตัวอย่างภาพดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ตัวอย่างข้อมูลภาพจากฐานข้อมูลสำหรับการจำลองหุ่นส่วนร่างกาย

2.1 กำหนดค่า (ตัวเลข) ในโปรแกรมเชิงตัวเลข

การกำหนดค่าตัวเลขสำหรับการจำลองจะใช้ข้อมูลตัวเลข 6 แถว โดยแต่ละแถว มีการกำหนดค่าต่างๆ [8] ดังนี้

แถวที่ 1 (A) กำหนดความเข้ม (Intensity)

แถวที่ 2 (a) กำหนดความกว้าง

แถวที่ 3 (b) กำหนดความยาว

แถวที่ 4 (x0) กำหนดตำแหน่งแกน X

แถวที่ 5 (y0) กำหนดตำแหน่งแกน Y

แถวที่ 6 (phi) กำหนดการเอียงของรูปทรงเรขาคณิต

โดยค่า A เป็นการกำหนดค่าความเข้มของข้อมูลภาพภายในวัตถุ

ค่า a และ b เป็นการกำหนดความกว้างและความยาวของวัตถุ ตามลำดับ

ค่า x0 และ y0 เป็นการกำหนดจุดกึ่งกลางของวัตถุในแนวแกน x และแกน y ตามลำดับ

ค่า phi เป็นการกำหนดมุมของวัตถุ

การจำลองที่แสดงค่าในตารางที่ 1 คือค่าที่จำลองหุ่นส่วนร่างกายจากข้อมูลภาพของรูปที่ 1 การจำลองภาพทั้งหมด 34 ภาพ โดยจำลองอวัยวะตามลักษณะอวัยวะของภาพฐานข้อมูลโดยการจำลองจะสร้างอวัยวะซึ่งเกิดจากวัตถุรูปทรงรี หรือทรงกลม รายละเอียดการจำลองสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จาก [8]

ตารางที่ 1 ตัวอย่างการกำหนดค่าในการจำลองหุ่นส่วนร่างกาย

A	a	b	x0	y0	phi
0.4	0.72	0.99	0	-0.04	90
-0.2	0.7	0.97	0	-0.04	90
1	0.11	0.08	0	-0.25	90
1	0.06	0.11	0	-0.32	90
1	0.025	0.07	-0.18	-0.45	110
1	0.02	0.09	-0.08	-0.46	49
1	0.02	0.09	0.08	-0.46	129
1	0.02	0.068	0	-0.555	0
1	0.025	0.07	-0.109	-0.4	190
1	0.025	0.07	0.109	-0.4	20
0.4	0.041	0.041	0	-0.415	0
-0.1	0.073	0.073	0	-0.415	0
1	0.02	0.075	-0.075	-0.35	45
1	0.02	0.075	0.7	-0.42	130
0.2	0.27	0.21	0.075	0.23	60
0.1	0.085	0.13	0.18	0.35	40
0.1	0.09	0.08	0.07	0.23	140
0.1	0.06	0.13	0.04	0.07	90
0.1	0.12	0.05	-0.07	0.22	80
-0.4	0.02	0.1	0.315	0.24	-10
A	a	b	x0	y0	phi
-0.4	0.045	0.07	0.2	0.52	90
-0.4	0.035	0.09	0.26	0.47	60
-0.4	0.025	0.1	0.33	0.3	15
-0.4	0.25	0.27	0.33	-0.18	15
-0.4	0.25	0.4	0.53	0	0
-0.4	0.25	0.15	0.5	-0.27	30
-0.4	0.03	0.1	0.275	0.1	-30
-0.4	0.1	0.15	0.41	0.4	60
-0.4	0.1	0.15	0.44	0.3	10
-0.4	0.08	0.2	0.44	0.4	60

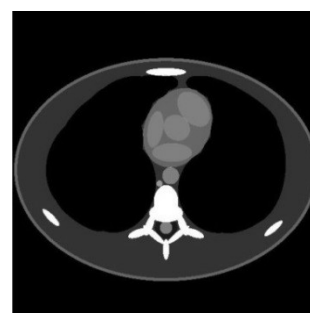
ตารางที่ 1 (ต่อ) ตัวอย่างการกำหนดค่าในการจำลองหุ่น
ส่วนร่างกาย

-0.4	0.08	0.3	0.46	0.4	60
-0.4	0.03	0.12	-0.18	0.15	0
-0.4	0.03	0.15	-0.16	0.3	-30
-0.4	0.05	0.12	-0.13	0.42	-60
-0.4	0.08	0.12	-0.1	0.49	90
-0.4	0.05	0.08	0	0.52	90
-0.4	0.25	0.3	-0.32	-0.15	-15
-0.4	0.3	0.35	-0.47	0	150
-0.4	0.17	0.24	-0.35	0.32	130
-0.4	0.19	0.1	-0.27	0.45	20
-0.4	0.19	0.06	-0.53	0.31	45
-0.4	0.19	0.06	-0.56	-0.32	145
0.3	0.055	0.055	0.03	-0.08	90
0.4	0.02	0.02	-0.043	-0.13	90

2.2 แปลงข้อมูลภาพหุ่นส่วนร่างกาย

เมื่อได้ค่าที่จำลองลักษณะของอวัยวะต่างๆเรียบร้อยแล้ว กำหนดการสร้างขนาดภาพหุ่นส่วนร่างกายส่วนทรวงอกโดยกำหนดให้มีลักษณะชนิด 8 บิต และมีขนาด 512x512 พิกเซล เท่ากันทุกภาพ [10] ดังนี้

ลักษณะภาพที่เกิดจากข้อมูลเชิงตัวเลขในข้อ 2.2 เมื่อผ่านการแปลงให้มีลักษณะแสดงผลเป็นภาพสองมิติ ลักษณะของภาพหุ่นส่วนร่างกาย ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ภาพจำลองหุ่นส่วนร่างกายจากข้อมูลในตารางที่ 1

3. การวิเคราะห์ข้อมูลภาพจำลอง

3.1 การวิเคราะห์ภาพเชิงปริมาณ

การวิเคราะห์เชิงปริมาณเป็นการทดสอบความคล้ายของข้อมูลภาพด้วยการเปรียบเทียบค่าโปรไฟล์เชิงเส้น (Line Profile) และค่าความเข้มของภาพ (Image Intensity) ระหว่างภาพหุ่นส่วนร่างกายส่วนทรวงอกกับภาพจากฐานข้อมูล ดังนี้

3.1.1 การวัดค่าโปรไฟล์เชิงเส้น

นำภาพที่ได้จากฐานข้อมูลออนไลน์ Radiopeadia.org [9] และภาพจากการจำลองด้วยโปรแกรมแมทแล็บ ในระดับเดียวกัน (อวัยวะภายในส่วนช่องอกมีลักษณะเหมือนกัน) มาวัดค่าโปรไฟล์โดยใช้โปรแกรม Image J เวอร์ชัน 1.46r [11]

3.1.2 การวัดค่าความเข้มของภาพ

นำภาพที่ได้จากฐานข้อมูลออนไลน์ Radiopeadia.org [9] และภาพจากการจำลองด้วยโปรแกรมแมทแล็บ ในระดับเดียวกัน อวัยวะภายในส่วนช่องอกมีลักษณะคล้ายกัน มาวัดค่าความเข้มของภาพด้วยโปรแกรม Image J เวอร์ชัน 1.46r [11] กำหนดขนาดพื้นที่ที่สนใจในการวัดค่า ขนาดความกว้าง 14 พิกเซล ความสูง 14 พิกเซล และมีลักษณะทรงกลม วัดค่าเฉลี่ย (Mean) และ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation:SD) ในอวัยวะ ได้แก่ ปอด, หัวใจ, หลอดเลือด และกระดูกสันหลัง แล้วหาความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ยของข้อมูลภาพหุ่นส่วนร่างกายเทียบกับภาพจากฐานข้อมูล โดยใช้สถิติ T-test

3.2 การทดสอบการประมวลผลภาพ (Image Processing Test)

หลังการแปลงข้อมูลภาพเป็นภาพสองมิติแล้ว นำภาพมาทดสอบการประมวลผลภาพ ด้วย 3 วิธีการ ได้แก่ การกรองภาพ (Image Filters) การแบ่งข้อมูลภาพ (Image Segmentation) และการสร้างภาพใหม่ (Image Reconstruction) โดยมีรายละเอียดการทดสอบ ดังนี้

3.2.1 การทดสอบการกรองภาพ

ก่อนการทดสอบ ทำการใส่สิ่งรบกวน (Add noise) ในภาพหุ่นส่วนร่างกาย โดยเพิ่มสิ่งรบกวนบนภาพหุ่นส่วนร่างกาย ชนิดเป็น salt & pepper [12] กำหนดค่าความถี่ของสิ่งรบกวนเท่ากับ 0.02 ซึ่งเป็นค่าที่กำหนดความถี่สัญญาณรบกวนแบบจุดสีขาวกระจายทั่วทั้งภาพ

แล้วทดสอบการกรองภาพ ด้วยวิธีการทำให้ภาพคมชัด (Unsharpened mask) [13] เพื่อทดสอบว่าภาพหุ่นส่วนร่างกายสามารถทำให้เกิดความคมชัดของภาพได้ ภาพที่ได้จะมีลักษณะ 2 มิติ ขนาดเดียวกับภาพหุ่นส่วนร่างกาย

3.2.2 การทดสอบการแบ่งข้อมูลภาพ

นำภาพหุ่นส่วนร่างกาย มาประมวลผล โดยการทดสอบครั้งนี้เลือกการแบ่งข้อมูลภาพที่จะใช้ในการทดสอบ 2 วิธีการ ดังนี้

3.2.2.1 การแบ่งข้อมูลภาพโดยใช้วิธีการ Thresholding [14] โดยแบ่งข้อมูลภาพเป็น 2 กลุ่ม ด้วยวิธีการของ Otsu ค่าดังกล่าวจะแบ่งข้อมูลภาพหุ่นส่วนร่างกาย เป็นข้อมูลลักษณะเป็นภาพสีขาวและดำ

3.2.2.2 การแบ่งข้อมูลภาพโดยใช้ Multilevel Thresholding [15] โดยกำหนดค่าจำนวนกลุ่มข้อมูลภาพมีค่า $n = 20$ โดยค่า n คือ ค่าระดับ Threshold แล้วกำหนดให้แปลงจากภาพระดับความเข้มเทา (Grayscale image) ให้เป็นภาพที่เก็บค่าสีเป็น indexed (Indexed image)

3.2.3 การทดสอบการสร้างภาพใหม่

นำภาพหุ่นส่วนร่างกาย มาประมวลผลโดยใช้โปรแกรมแมทแล็บ ในการทดสอบครั้งนี้เลือกการสร้างภาพใหม่ ดังนี้

3.2.3.1 ทดสอบการสร้างภาพใหม่ โดยการสร้างภาพในแนวแบ่งซ้ายขวา (Sagittal) และแนวแบ่งหน้าหลัง (Coronal) โดยการนำข้อมูลภาพแนวตามแกน (Axial) ทั้ง 34 ภาพ มาจัดเรียงแล้วสร้างภาพใหม่ ลักษณะเป็นข้อมูลภาพสามมิติ [16]

3.3 การวิเคราะห์ภาพเชิงคุณภาพ

นำข้อมูลภาพหุ่นส่วนร่างกายกับข้อมูลของภาพจากฐานข้อมูลทั้ง 34 ภาพ มาประเมินความคล้ายของตำแหน่งอวัยวะของภาพหุ่นส่วนร่างกาย ส่วนทรวงอกเปรียบเทียบกับภาพจากฐานข้อมูลออนไลน์ด้วยสายตาโดยผู้เชี่ยวชาญที่มีความเชี่ยวชาญด้านกายวิภาคศาสตร์ 3 ท่าน โดยมีเกณฑ์การประเมิน ดังต่อไปนี้

เกณฑ์การประเมิน

ระดับ 2 = ตำแหน่งอวัยวะในหุ่นส่วนร่างกายมีความคล้ายกับภาพจากฐานข้อมูลมากที่สุด

ระดับ 1 = ตำแหน่งอวัยวะในหุ่นส่วนร่างกายมีความคล้ายกับภาพจากฐานข้อมูลแบบปานกลาง

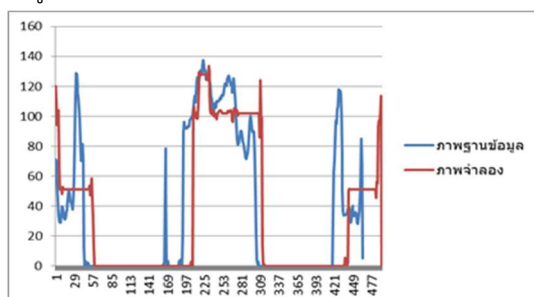
ระดับ 0 = ตำแหน่งอวัยวะในหุ่นส่วนร่างกายไม่มีความคล้ายกันกับภาพจากฐานข้อมูล

4. ผลการทดสอบ

4.1 ผลการวิเคราะห์ภาพเชิงปริมาณ

4.1.1 การวัดค่าโปรไฟล์เชิงเส้น

จากตัวอย่างข้อมูลการวัดค่าโปรไฟล์เชิงเส้นของรูปที่ 1 เทียบกับรูปที่ 2 ได้ผลค่าข้อมูลแสดงเป็นกราฟที่บอกถึงค่าความเข้มของแต่ละพิกเซลที่เส้นตรงลากผ่าน ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 กราฟแสดงค่าโปรไฟล์เชิงเส้นเทียบกันระหว่างข้อมูลรูปที่ 1 และ 2

4.1.2 การวัดค่าความเข้มของภาพ

ผลการวัดค่าความเข้มของภาพเทียบกันระหว่างภาพจำลองกับภาพฐานข้อมูลทั้ง 34 สามารถแสดงค่าเฉลี่ยดังแสดงในตารางที่ 2

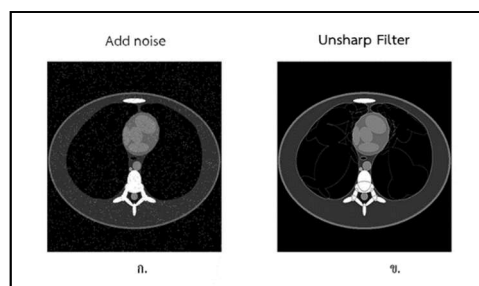
ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยค่าความเข้มของภาพทั้ง 34 ภาพ ที่บริเวณ ปอด หัวใจ หลอดเลือด และกระดูกสันหลัง

ภาพฐานข้อมูล	ภาพหุ่นส่วนร่างกาย
ปอด (t-test=0.000)	
0.00±0.00	0.00±0.00
หัวใจ (t-test=0.029)	
126.51±2.25	128.00±0.00
หลอดเลือด (t-test=0.078)	
125.95±4.62	130.37±13.47
กระดูกสันหลัง (t-test=0.000)	
231.54±10.00	254.91±0.39

4.2 ผลการทดสอบการประมวลผลภาพ

4.2.1 ผลการทดสอบการกรองภาพ

การทดสอบการเพิ่มสิ่งรบกวนเข้าไปในภาพจำลองของหุ่นส่วนร่างกาย ทำให้เกิดจุดขาว-ดำบนภาพ ลักษณะของสิ่งรบกวนที่เกิดขึ้นคล้ายกับการถ่ายภาพด้วยเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ และเมื่อดำเนินการลดสิ่งรบกวนด้วยวิธีการ Unshaped mask ผลลัพธ์ที่ได้สามารถลดสิ่งรบกวนบนภาพแล้วทำให้เห็นขอบวัตถุในภาพได้ชัดเจนมากขึ้น

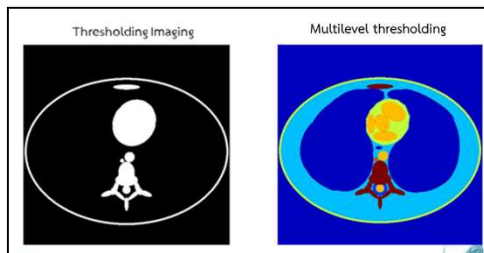


รูปที่ 4 ก. แสดงผลการเพิ่มสิ่งรบกวนในภาพ และ ข. แสดงผลการใช้การกรองชนิด Unshaped mask

การทดสอบการเพิ่มสิ่งรบกวนเข้าไปในภาพจำลองของหุ่นส่วนร่างกาย ทำให้เกิดจุดขาว-ดำบนภาพ ลักษณะของสิ่งรบกวนที่เกิดขึ้นคล้ายกับการถ่ายภาพด้วยเอกซเรย์

คอมพิวเตอร์ และเมื่อดำเนินการลดสิ่งรบกวนด้วยวิธีการ Unshaped mask ผลลัพธ์ที่ได้สามารถลดสิ่งรบกวนบนภาพแล้วทำให้เห็นขอบวัตถุในภาพได้ชัดเจนมากขึ้น

4.2.2 ผลการทดสอบการแบ่งข้อมูลภาพ



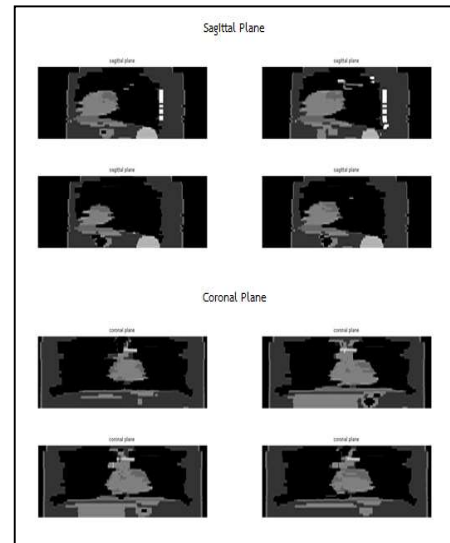
รูปที่ 5 แสดงผลการทดสอบภาพหุ่นส่วนร่างกายด้วยการแบ่งข้อมูลภาพตามระดับความเข้ม

ผลการทดสอบการแบ่งข้อมูลภาพด้วยสองวิธีการ วิธีการแรก การแบ่งด้วยค่าข้อมูลเพียงค่าเดียว ด้วยวิธีการของ Otsu ผลที่ได้แสดงให้เห็นข้อมูลภาพที่มีสองเฉดสีคือ สีขาว และสีดำ บริเวณที่เป็นสีขาวคือส่วนที่มีค่ามากกว่าค่าที่อัลกอริทึมคำนวณได้ และในทางกลับกัน สีดำคือบริเวณที่มีค่าข้อมูลต่ำกว่าค่าที่อัลกอริทึมคำนวณได้

ส่วนการแบ่งข้อมูลภาพแบบที่สอง คือการแบ่งข้อมูลภาพแบบหลายระดับ ผลที่ได้มีการแบ่งค่าข้อมูลของภาพทั้งหมด 20 กลุ่มเฉดสี แล้วระบุสีในอวัยวะต่างๆ ต่างกันตามระดับสีที่กำหนด เช่น บริเวณปอด เป็นสีฟ้า บริเวณกระดูกสันหลัง เป็นสีน้ำตาล เป็นต้น

4.2.3 ผลการทดสอบการสร้างภาพใหม่

ผลการสร้างภาพใหม่โดยการนำภาพจำลองหุ่นส่วนร่างกายทั้ง 34 ภาพ มาเรียงต่อกัน แล้วแปลงให้เป็นภาพตามแนว ซ้าย-ขวา และหน้า-หลัง สามารถเห็นรายละเอียดของอวัยวะภายในได้ใกล้เคียงกับการจัดเรียงของอวัยวะของมนุษย์ บางส่วนอาจไม่ต่อเนื่องเกิดจากความหนาของสไลด์ของภาพหนา หากความหนาของแต่ละสไลด์ลดลงจะทำให้เห็นรายละเอียดของอวัยวะเสมือนจริงมากขึ้น



รูปที่ 6 ภาพหุ่นส่วนร่างกายทรวงอก ของการสร้างภาพใหม่ในแนวแบ่งซ้ายขวา (ด้านบน) และ แนวแบ่งหน้าหลัง (ด้านล่าง)

4.3 ผลการวิเคราะห์ภาพเชิงคุณภาพ

จากการเปรียบเทียบผลความคล้ายของอวัยวะของภาพหุ่นส่วนร่างกายกับภาพจากฐานข้อมูลโดยผู้เชี่ยวชาญทั้ง 3 ท่าน พบว่าค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับปานกลาง (ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2) และผลประเมินของอาจารย์ในแต่ละท่านได้ผลดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการประเมินความคล้ายของอวัยวะของภาพหุ่นส่วนร่างกายเทียบกับภาพจากฐานข้อมูล

ผู้ประเมิน	ค่าเฉลี่ยรายคน
1	1.50
2	0.94
3	1.32
ค่าเฉลี่ยรวม	1.25

ผลประเมินของผู้เชี่ยวชาญคนที่ 1 ให้คะแนนประเมินหุ่นจำลองมีความคล้ายกับภาพจากฐานข้อมูลอยู่ระหว่างในระดับมากที่สุดกับปานกลาง ผู้เชี่ยวชาญคนที่ 2 ให้ผลประเมินว่าอยู่ระหว่างระดับปานกลางกับระดับไม่มีความคล้ายกับภาพจากฐานข้อมูล ผู้เชี่ยวชาญคนที่ 3

ให้ผลประเมินว่าหุ่นจำลองมีความคล้ายกับภาพจากฐานข้อมูลอยู่ในระดับปานกลาง

5. วิจัยผลการวิจัย

งานวิจัยของ Shepp [8] ในปี 1974 ได้ทำวิจัยเกี่ยวกับเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ซึ่งเป็นแนวทางใหม่ของเทคโนโลยีเอกซเรย์ทางการแพทย์ในขณะนั้น ได้ศึกษาและเปรียบเทียบอัลกอริทึมที่สนใจโดยใช้หุ่นส่วนร่างกายจำลอง ส่วนศีรษะ หรือที่เรียกว่า Shepp-logan phantom เพื่อหาอัลกอริทึมที่เหมาะสม ในการใช้งานหุ่นส่วนร่างกายซึ่งมีประโยชน์ในการทำให้ทราบวัตถุที่อยู่ในหุ่นส่วนร่างกาย มีความผิดพลาดเกิดขึ้นในกระบวนการสร้างภาพหรือไม่ หุ่นส่วนร่างกายจำลองที่ใช้ เป็นการสร้างจากข้อมูลทางคณิตศาสตร์ (Mathematical phantom) ซึ่งเป็นการจำลองส่วนของร่างกาย โดยใช้ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ หุ่นส่วนร่างกายดังกล่าวจึงไม่มีความผิดพลาดในการวัดค่าข้อมูลจากหุ่นจำลอง ความผิดพลาดต่างๆที่เกิดขึ้นในกระบวนการสร้างภาพนั้นจะเป็นเหตุอันเนื่องมาจากอัลกอริทึมเท่านั้น

นอกจากนี้ในปัจจุบันหุ่นส่วนร่างกายของ Shepp-logan ยังเป็นที่นิยมใช้ในการประมวลผล [17]-[19] และมีการประยุกต์ปรับเปลี่ยนไปใช้งานให้เหมาะสมกับงานวิจัยในแต่ละรูปแบบ [20],[21] อีกทั้งมีการสร้างหุ่นส่วนร่างกายแบบใหม่ๆ มาใช้งานมากยิ่งขึ้น เพื่อให้มีความสามารถในการศึกษาการประมวลผลภาพทางการแพทย์มากยิ่งขึ้น [22],[23]

ในการศึกษาครั้งนี้คณะผู้วิจัยทำการจำลองหุ่นส่วนร่างกายส่วนทรวงอก โดยใช้โปรแกรมแมทแล็บ ซึ่งได้แนวคิดในการจำลอง และการทดสอบอัลกอริทึมทางคณิตศาสตร์ โดยประยุกต์ข้อมูลของหุ่นส่วนร่างกายจากงานวิจัยของ Shepp [8] สำหรับการจำลองภาพหุ่นจำลองส่วนทรวงอกในครั้งนี้ จะมีความคล้ายคลึงทางกายวิภาคศาสตร์ในภาพแนวตัดจากเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ ในภาพจำลองมีความเข้มของข้อมูลภาพ และค่าโปรไฟล์เชิงเส้นที่ใกล้เคียงกับภาพจากฐานข้อมูล ซึ่งแตกต่างจาก

หุ่นส่วนร่างกายจำลองของ Shepp ที่ลักษณะทางกายวิภาคศาสตร์ของหุ่นส่วนร่างกายเป็นเพียงรูปทรงเรขาคณิตเท่านั้น และไม่มีความคล้ายคลึงกับภาพที่ได้จากเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์

ด้านประสิทธิภาพของภาพหุ่นส่วนร่างกาย

ภาพที่ได้จากการจำลองเมื่อเปรียบเทียบกับภาพที่ได้จากฐานข้อมูล จะมีค่าความเข้มใกล้เคียงกัน ยกเว้นค่าความเข้มของเส้นเลือดที่มีค่าความเข้มแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งอาจเป็นเพราะค่าความเข้มในภาพที่ได้จากฐานข้อมูลอาจมีเนื้อเยื่ออื่นๆซ้อนทับบริเวณหลอดเลือด คณะผู้วิจัยจึงไม่สามารถปรับค่าความเข้มของภาพหุ่นส่วนร่างกายให้เท่ากับภาพจากฐานข้อมูล และเมื่อเปรียบเทียบค่าโปรไฟล์ในตำแหน่งของอวัยวะแต่ละพิกลเซลที่เส้นลากผ่าน พบว่ามีค่าความเข้มที่วัดได้ใกล้เคียงกับภาพจากฐานข้อมูล แต่ตำแหน่งของอวัยวะในแต่ละภาพนั้น จะมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง เนื่องจากไม่ได้ทำการจำลองอวัยวะบางอย่างในบริเวณนั้นๆ

ผลการประเมินภาพทั้ง 34 ภาพโดยของผู้เชี่ยวชาญทั้ง 3 ท่าน ซึ่งคิดเป็น 102 ภาพ พบว่า 33 ภาพมีความคล้ายกับภาพฐานข้อมูลในระดับมากที่สุด 62 ภาพมีความคล้ายกับภาพฐานข้อมูลในระดับปานกลาง และ 7 ภาพภาพหุ่นส่วนร่างกายไม่มีความคล้ายกับภาพจากฐานข้อมูล

ข้อเสนอแนะ

1. ภาพการจำลองหุ่นส่วนร่างกายที่จำลองขึ้นสามารถนำไปใช้ในงานวิจัยหรือการศึกษาในการประมวลผลภาพทางการแพทย์ ได้หลายด้าน เช่น การลดสิ่งรบกวน การสร้างภาพใหม่ เป็นต้น

2. ในอนาคตหากผู้ที่สนใจจะนำค่าข้อมูลการจำลองภาพหุ่นส่วนร่างกายไปพัฒนาต่อ ควรจะมีการกำหนดค่าข้อมูลให้อยู่ในช่วงที่ทำให้ได้ค่าความเข้มของข้อมูลภาพที่มีความใกล้เคียงกับข้อมูลภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ที่มีขนาด 8 บิต หรือ ค่าข้อมูลความเข้ม 0-254 ระดับสี ดังนี้ อวัยวะปอด ต้องกำหนดค่า A เท่ากับ -0.4 จึงจะมีค่าความเข้มเท่ากับ 0 หัวใจต้องกำหนดค่า A เท่ากับ 0.1 และ 0.2 จึงจะมีค่าความเข้มเท่ากับ 128 หลอดเลือด ต้อง

กำหนดค่า A เท่ากับ 0.3 จึงจะมีค่าความเข้มเท่ากับ 127-204 และ ส่วนกระดูกสันหลัง ต้องกำหนดค่า A เท่ากับ 1 จึงจะมีค่าความเข้มเท่ากับ 254

6. สรุปผลการวิจัย

การศึกษาครั้งนี้จำลองภาพหุ่นส่วนร่างกาย ส่วนทรวงอกโดยใช้โปรแกรมแมทแล็บ เปรียบเทียบกับภาพจากฐานข้อมูลออนไลน์ในตำแหน่งของอวัยวะเดียวกัน จำนวน 34 ภาพ ซึ่งมีอวัยวะที่ประกอบด้วย ปอด หัวใจ หลอดเลือด กระดูกสันหลัง หลอดลม หลอดอาหาร กระดูกสะกัก กระดูกอก ตับ และไต เมื่อเปรียบเทียบภาพจำลองหุ่นส่วนร่างกายกับภาพจากฐานข้อมูลส่วนทรวงอก ด้วยการวัดค่าความเข้มของข้อมูลภาพ และการวัดโปรไฟล์เชิงเส้นโดยใช้โปรแกรม Image J ค่าความเข้มของข้อมูลภาพ และค่าโปรไฟล์ของภาพจำลองหุ่นส่วนร่างกาย มีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลภาพจากฐานข้อมูล และจากการประเมินของผู้เชี่ยวชาญด้านกายวิภาคศาสตร์ 3 ท่าน ภาพจำลองหุ่นส่วนร่างกายมีความคล้ายคลึงกับภาพฐานข้อมูลอยู่ในระดับปานกลาง ภาพจำลองหุ่นส่วนร่างกาย ส่วนทรวงอกที่สร้างขึ้นสามารถนำไปใช้ในการประมวลผลภาพแบบต่างๆ เช่น การกรองภาพ การแบ่งข้อมูลภาพ และการสร้างใหม่ของภาพได้ จากการทดสอบค่าความเข้มของภาพจำลองหุ่นส่วนร่างกาย ความเข้มของภาพจำลองใกล้เคียงกับความเข้มของภาพจากฐานข้อมูลในทุกอวัยวะ(ปอด หัวใจ และหลอดเลือด) ยกเว้นค่าความเข้มของกระดูกสันหลัง

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] D. L. Miglioretti, E. Johnson, A. Williams, R. T. Greenlee, S. Weinmann, L. I. Solberg, H. S. Feigelson, D. Roblin, M. J. Flynn, N. Vanneman, and R. Smith-Bindman, "The use of computed tomography in pediatrics and the associated radiation exposure and estimated cancer risk," *JAMA Pediatrics*, vol. 167, no.8, pp. 700–707, 2013.
- [2] J. Panés, R. Bouzas, M. Chaparro, V. García-Sánchez, J. P. Gisbert, B. Martínez de Guereñu, J. L. Mendoza, J. M. Paredes, S. Quiroga, T. Ripollés, and J. Rimola, "Systematic review: the use of ultrasonography, computed tomography and magnetic resonance imaging for the diagnosis, assessment of activity and abdominal complications of Crohn's disease," *Aliment Pharmacol. Ther.*, vol. 34, no.2, pp. 125–145, 2011.
- [3] M. Karçaaltincaba and A. Aykut, "Dual-energy CT revisited with multidetector CT: review of principles and clinical applications," *Diagn. Interv. Radiol.*, vol. 17, no.3, pp. 181–194, 2011.
- [4] Z. Ma, J. R. S. Tavares, R. N. Jorge, and T. Mascarenhas, "A review of algorithms for medical image segmentation and their applications to the female pelvic cavity," *CMBBE*, vol. 13, pp. 235–246, August 2010.
- [5] F. P. M. Oliveira and J. R. S. Tavares, "Medical image registration: a review," *CMBBE*, vol. 17, pp. 73–93, March 2014.
- [6] I. Sechopoulos, "A review of breast tomosynthesis. Part II. Image reconstruction, processing and analysis, and advanced applications," *Med Phys*, vol. 40, no.1, pp. 1–17, 2013.
- [7] Radiology Support Devices, The Alderson Radiation Therapy phantom. (2016, Jan 20). [Online]. Available: http://www.rsdphantoms.com/rt_art.htm

- [8] L. A. Shepp and B. F. Logan, “The fourier reconstruction of a head section,” IEEE Trans Nucl Sci, vol. 21, pp. 21–43, June 1974.
- [9] B.D. Muzio. (2016, Jan 29). Normal chest CT, [Online]. Available: <http://www.radiopaedia.org/cases/normal-chest-ct-1>
- [10] Matlab. (2016, Feb 29). Create head phantom image, [Online]. Available: <http://www.mathworks.com/help/images/ref/phantom.html>
- [11] ImageJ. (2016, May 2). ImageJ program, [Online]. Available: <https://imagej.nih.gov/ij/>
- [12] Matlab. (2016, Feb 29). Add noise to image, [Online]. Available: <http://www.mathworks.com/help/images/ref/imnoise.html>
- [13] Matlab. (2016, Feb 29). Image filter [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/images/ref/imfilter.html>
- [14] Matlab. (2016, Feb 29). Global image threshold using Otsu's method [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/images/ref/graythresh.html>
- [15] Matlab. (2016, Feb 29). Multilevel thresholding [Online]. Available: <http://www.mathworks.com/help/images/ref/grayslice.html>
- [16] Matlab. (2016, Feb 29). Concatenate arrays along specified dimension [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/cat.html>
- [17] X. Liang, Z. Zhang, T. Niu, S. Yu, S. Wu, Z. Li, H. Zhang, and Y. Xie, “Iterative image-domain ring artifact removal in cone-beam CT,” Phys Med Biol, vol. 62, pp. 5276-5292, June 2017.
- [18] S. Li, E. T. Quinto, W. Shiqiang, and J. Ming, “ Simultaneous reconstruction and segmentation with the mumford- shah functional for electron tomography,” in IEEE Engineering in Medicine and Biology Society Annual Conference, Florida, 2016, pp.5909-5912.
- [19] A. Singer and H.T. Wu, “Two-dimensional tomography from noisy projections taken at unknown random directions,” SIAM J Imaging Sci, vol. 6, no.1, pp. 136-175, 2013.
- [20] T. Kaewlek, D.Koolpiruck, S. Thongvigitmanee, M. Mongkolsuk, S.Thammakittiphan, S.O. Tritrakarn, and P. Chiewwit, “Metal artifact reduction and image quality evaluation of lumbar spine CT images using metal sinogram segmentation,” J XRay Sci Technol, vol. 23, pp. 649-666, no.6 2015.
- [21] Z. Messali, N. Chetih, A. Serir, and A. Boudjelal, “A quantitative comparative study of back projection, filtered back projection, gradient and bayesian reconstruction algorithms in computed tomography (CT),” IJPS, vol. 4, no.1, pp. 12-31, 2015.
- [22] P. H. Pretorius, M. A. King, B. M. Tsui, K. J. LaCroix, and W. Xia, “A mathematical model of motion of the heart for use in generating source and attenuation maps for simulating emission imaging,” Med Phys, vol. 26, no.11, pp. 2323-2332, 1999.

- [23] Division of Medical Imaging Physics, Johns Hopkins Medical Institutions, USA. (2016, June 3) . Medical Imaging Simulation Techniques and Computer Phantoms [Online]. Available: <http://dmip1.rad.jhmi.edu/xcat/>

การแก้ปัญหการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบ ผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนานที่มากวัตถุประสงค์

Solving Line Balancing and Allocation Multi-Skilled Workers Problem on Parallel Assembly Line under Many-Objective

ชินวิชญ์ สินธุเดชากุล¹ ปารเมศ ชูติมา^{2*}

¹นิสิตปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
254 ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10310

²ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
254 ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10310

Chinnawich Sintudachakul¹ Parames Chutima^{2*}

¹ Master's Degree, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,
Chulalongkorn University, 254 Phayathai Road, Patumwan, Bangkok 10330

² Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,
Chulalongkorn University, 254 Phayathai Road, Patumwan, Bangkok 10330

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

บทคัดย่อ

วิธีการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (A Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition : MOEA/D) เป็นฮิวริสติกที่มีแนวคิดในการแก้ปัญหาที่มากวัตถุประสงค์ไปพร้อมกันโดยจะจำแนกปัญหาออกเป็นปัญหาย่อยๆ บทความนี้จะนำเสนออัลกอริทึม MOEA/D ร่วมกับวิธี Bisection เพื่อใช้แก้ปัญหการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน ซึ่งทักษะที่หลากหลายเกิดจากความหลากหลาย โดยมีวัตถุประสงค์ที่พิจารณา 4 วัตถุประสงค์ ได้แก่ รอบเวลาดำเนินการน้อยที่สุด จำนวนสถานีน้อยที่สุด ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงานน้อยที่สุด และความไม่เกี่ยวข้องกันของชิ้นงานน้อยที่สุด ผลที่ได้จากการทดลองคือ MOEA/D มีสมรรถนะในการแก้ปัญหาที่ดีกว่าอัลกอริทึมการบรรจบ (Combinatorial Optimization with Coincidence : COIN) ในด้านการใช้เวลาหาคำตอบที่แท้จริง ซึ่งเป็นตัวชี้วัดที่สำคัญที่สุดในการเปรียบเทียบอัลกอริทึม และสามารถค้นหาคำตอบได้ดีกว่าทุกวัตถุประสงค์ ถึงแม้การกระจายตัวของกลุ่มคำตอบจะไม่ดีเท่า และใช้เวลานานกว่า COIN

คำสำคัญ: สายการประกอบผสมแบบขนาน คนทุพพลภาพ การจัดสมดุลและจัดสรรพนักงาน วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก

ABSTRACT

A multi-objective evolutionary algorithm based on decomposition (MOEA/D) is an evolutionary meta-heuristic which uses the concept of solving problems with many objectives simultaneously by classification problem into various subproblems. This paper applies MOEA/D algorithm in conjunction

with the bisection method for solving line balancing and allocation problems of multi-skilled workers whom some are disable on parallel assembly lines under four objectives, i.e. minimize cycle time, minimize the number of stations, minimize different workload between workstations, and minimize index of task-unrelated. The experiment results show that MOEA/D obtains better performance than the Combinatorial Optimization with Coincidence (COIN) algorithm in terms of convergence which is the main concern of algorithm comparison. Although, its spread and CPU time are inferior to COIN.

Keyword: Mixed-Model Parallel Assembly line, Disable Worker, Line Balancing and Worker Allocation, MOEA/D

1. บทนำ

สายการประกอบคือ กระบวนการผลิตประเภทหนึ่ง ที่ชิ้นงานในแต่ละชิ้นงานถูกนำมาประกอบเข้าไปกับ ชิ้นงานก่อนหน้าตามลำดับของขั้นตอนการประกอบ (Task Sequence) โดยต้องไม่ผิดเงื่อนไขของลำดับ ก่อนหลังของชิ้นงาน (Precedence Constraint) และ หลังจากทำการประกอบชิ้นงานทั้งหมดที่ได้รับมอบหมาย บนแต่ละสถานีงานเสร็จตามรอบเวลาดำเนินการ (Cycle Time) ชิ้นงานประกอบนี้จะถูกเคลื่อนย้ายไปยังสถานี งานที่อยู่ในลำดับถัดไปด้วยอุปกรณ์ขนถ่ายวัสดุอัตโนมัติ เช่น สายพานลำเลียง หุ่นยนต์ เป็นต้น การทำงานเช่นนี้ จะเกิดขึ้นจนกระทั่งการประกอบในขั้นตอนสุดท้ายเสร็จ สิ้น ก็จะกลายเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปในที่สุด ทั้งนี้เราจะ เรียกการจัดสรรชิ้นงานต่างๆ ให้กับแต่ละสถานีงานในสาย การประกอบ โดยต้องไม่ละเมิดต่อข้อจำกัดต่างๆ ซึ่งจะ เรียกกระบวนการทั้งหมดนี้ว่า การจัดสมดุลสายการผลิต (Line Balancing)

ความแปรผันของเวลาการดำเนินการที่เกิดขึ้นกับ ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบ สามารถแบ่งออกได้ เป็น 3 ประเภท [1] ดังนี้ เวลาดำเนินงานเชิงกำหนด (Deterministic Task Time) คือเวลาดำเนินงานของแต่ละ ชิ้นงานจะมีค่าคงที่, เวลาดำเนินงานเชิงพลวัต (Dynamic Task Time) คือเวลาดำเนินงานของแต่ละ ชิ้นงานมีค่าลดลงอย่างเป็นระบบอันเกิดจากเส้นโค้งการ เรียนรู้ (Learning Curve) และ เวลาดำเนินงานเชิงสุ่ม (Stochastic Task Time Problem) คือเวลา

ดำเนินงานของแต่ละชิ้นงานไม่คงที่โดยเกิดจากความผัน แปรของเวลาดำเนินงาน ซึ่งมีผลมาจากหลายสาเหตุ เช่น เครื่องจักรเสีย สูญเสียแรงจูงใจ สิ่งแวดล้อมในการทำงาน และทักษะของพนักงาน [2] ซึ่งประเภทที่ผู้วิจัยจะนำมา ศึกษาในบทความนี้ คือการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการ ประกอบแบบเวลาดำเนินงานเชิงสุ่ม (Balancing Stochastic Assembly Lines) ที่เกิดจากทักษะของ พนักงานที่เกิดความทุพพลภาพและความเชี่ยวชาญของ พนักงาน โดยทั่วไปแล้วจะสามารถจำแนกปัญหาดังกล่าว ได้ 2 รูปแบบ คือ ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบ แบบเวลาดำเนินงานเชิงสุ่ม และ ปัญหาการจัดสมดุล และการจัดสรรพนักงานที่มีหลายทักษะ

ในบทความนี้จะศึกษาในรูปแบบที่ 2 ซึ่งจะมองว่า คนทุพพลภาพนั้นเป็นคนที่มีทักษะต่ำ (Low-Skill Worker) ซึ่งสามารถทำงานบางงานได้ช้ากว่าคนปกติและ ไม่สามารถทำงานบางงานได้เลย ดังนั้นจะทำให้เกิด ข้อจำกัดและความซับซ้อนในการจัดสมดุลสายการ ประกอบที่มากขึ้น รวมถึงเวลาที่ใช้ในการจัดสมดุลสาย การประกอบ แต่ถ้าสามารถแก้ปัญหาการจัดสมดุลสาย การประกอบที่มีพนักงานทุพพลภาพให้เกิดประสิทธิภาพที่ ดีขึ้นได้ จะสามารถลดต้นทุนและเพิ่มโอกาสที่ผู้ทุพพล ภาพจะมีงานทำ ซึ่งถือว่าเป็นการช่วยสังคมได้อีกทางหนึ่ง ด้วย เพราะในปัจจุบันมีจำนวนผู้ทุพพลภาพเพิ่มขึ้นเท่ากับ 10% ของประชากรโลก ซึ่งบุคคลประเภทนี้จะมี ความลำบากมากในการหางานทำ และส่วนใหญ่ผู้ทุพพลภาพมี แนวโน้มที่จะถูกจ้างให้ทำงานเพียงชั่วคราวเท่านั้น

ในประเทศไทยมีจำนวนผู้ทุพพลภาพประมาณ 2.2% ของประชากรทั้งประเทศ และปัจจุบันได้มี พ.ร.บ. ส่งเสริมพัฒนาคุณภาพชีวิตคนทุพพลภาพ พ.ศ.2550 โดยได้เพิ่มสภาพบังคับให้กับระบบสัดส่วนการจ้างงานคนทุพพลภาพด้วยการกำหนดให้มีการจ่ายเงินเข้ากองทุนส่งเสริมและพัฒนาคุณภาพชีวิตคนทุพพลภาพล่าช้าต้องเสียดอกเบี้ยร้อยละ 7.5 ต่อปี โดยกำหนดสัดส่วนการจ้างงานบุคคลปกติต่อคนทุพพลภาพ 100 : 1

ปัญหาการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานที่มีหลายทักษะบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนานที่มากวัตถุประสงคฺภายใต้ปัญหาประเภทที่ 2 หมายถึง การหาเวลาดำเนินการที่น้อยที่สุดโดยจะกำหนดจำนวนสถานีงาน (Workstation) หรือกำหนดจำนวนพนักงานมาให้ ซึ่งถือเป็นปัญหาที่เป็นไปได้ยากที่จะได้คำตอบที่ดีที่สุดในระยะเวลาอันสั้น (NP-Hard) จากการสำรวจงานวิจัยที่ผ่านมาวิธีที่นำมาใช้ในการแก้ไขประเภทนั้นสายการประกอบประเภทต่างๆ คือวิธีการทางฮิวริสติก ซึ่งคำตอบที่ได้ถือว่าเป็นคำตอบที่ดี (Best Solution) ที่ยอมรับได้ในการแก้ปัญหาเหล่านี้ เช่น Kilincci [3] ได้นำเสนอ Petri Net-Based (PN) Heuristic Chaves และคณะ [4] ได้นำเสนอวิธีการหาคำตอบโดย Clustering Search (CS) และ Zhang และคณะ [5] ได้นำเสนอ Random Key-Based Genetic Algorithm (rkGA) ร่วมกับ Fuzzy Logic Controller (FLC) ซึ่งงานวิจัยที่กล่าวมาเป็นเพียงสายการประกอบเส้นตรง Araújo และคณะ [6] ได้นำเสนอ Tabu Search และ Biased Random-Key Genetic Algorithm (BRKGA) ในการแก้ปัญหาบนสายการประกอบขนานที่ไม่มีความเกี่ยวเนื่องกัน

ในงานวิจัยนี้จึงจะทำการศึกษการจัดสมดุลและการจัดสรรพนักงานที่มีหลายทักษะบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมบนสายการประกอบแบบเส้นตรงขนานกัน เพราะด้วยลักษณะเฉพาะตัวของสายการประกอบเส้นตรงแบบขนาน จะทำให้เราสามารถลดจำนวนสถานีงาน ลดพนักงาน และลดเวลาสูญเสียได้ [7] รวมถึงอาจจะเพิ่มประสิทธิภาพและผลผลิตภาพของสายการประกอบที่มี

พนักงานเป็นผู้ทุพพลภาพ

จากที่มาข้างต้น บทความนี้จะนำเสนอวิธีการแก้ปัญหาด้วยวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (Multi-Objective Evolutionary Algorithm Based On Decomposition: MOEA/D) ที่เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาแบบมากวัตถุประสงคฺและเหมาะกับปัญหาที่เป็น Scalar Optimization ซึ่งถูกพัฒนาโดย Zhang และ Li [8] พบว่าสามารถแก้ปัญหา 0-1 Knapsack ได้อย่างมีประสิทธิภาพเหนือกว่าอัลกอริทึมอื่นๆที่เป็นที่นิยมร่วมกับวิธี Bisection มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนานที่มากวัตถุประสงคฺภายใต้ปัญหาประเภทที่ 2 โดยมีจำนวนวัตถุประสงคฺทั้งสิ้น 4 วัตถุประสงคฺ ซึ่งจะพิจารณาค่าที่เหมาะสมที่สุดไปพร้อมๆกัน ได้แก่ รอบเวลาดำเนินการน้อยที่สุด จำนวนสถานีงานน้อยที่สุด ความแตกต่างของปริมาณภาระงานระหว่างสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด และความไม่เกี่ยวเนื่องกันของงานในแต่ละสถานีงานมีค่าน้อย

2. การจัดสมดุลและการจัดสรรพนักงานหลายทักษะให้กับสถานีงานบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนานภายใต้ปัญหาประเภทที่ 2

ปัญหาประเภทนี้จะมีลักษณะคล้ายคลึงกับปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนานในด้านของลักษณะของสายการประกอบ โดยสายการประกอบประเภทนี้จะมีลักษณะการจัดวางในรูปของสถานี (Station) ที่จัดเรียงกันอย่างต่อเนื่อง [9] โดยในแต่ละสถานีอาจประกอบด้วยสถานีงานแยก (Separate Workstation) ที่ถูกจัดสรรชิ้นงานจากเพียงสายการประกอบเดียว อย่างมาก 2 สถานีงาน แต่ต้องเป็นสถานีแยกที่อยู่คนละสายการประกอบ หรือสถานีงานร่วม (Common Workstation) ที่ถูกจัดสรรชิ้นงานจากทั้งสองสายการประกอบ และส่วนที่ต่างออกไป คือลักษณะของ

โจทย์ปัญหา สดริงคำตอบ การถอดรหัสสดริงคำตอบ ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

2.1 ลักษณะของโจทย์ปัญหา

ในบทความนี้จะเน้นปัญหาการจัดสมดุลและการจัดสรรพนักงานหลายทักษะให้กับสถานงานบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน ดังนั้นต้องมีการปรับแต่งโจทย์ปัญหาเพื่อประยุกต์ให้เข้ากับปัญหาที่กำลังวิจัย โดยหนึ่งชิ้นงานจะประกอบด้วยเวลาของพนักงาน 3 ระดับ คือ ทักษะสูง ทักษะปกติ และทักษะต่ำ ซึ่งเวลาของชิ้นงานที่ได้มาจากโจทย์ปัญหาดังกล่าวผู้วิจัยจะกำหนดให้เป็นเวลาของพนักงานทักษะปกติ ส่วนพนักงานทักษะสูงนั้นจะมีบางชิ้นงานที่สามารถทำได้เร็วกว่าพนักงานทักษะปกติ ส่วนพนักงานทักษะต่ำนั้นจะมีบางชิ้นงานที่สามารถทำได้ช้ากว่าพนักงานทักษะปกติและบางชิ้นงานไม่สามารถทำได้เลย ดังแสดงตัวอย่างในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เวลาในแต่ละชิ้นงานของพนักงานที่ปรับแต่ง

Task	Task Time Problem	Modified Task Time		
		High	Medium	Low
1	6	5	6	8
2	2	2	2	3
3	5	4	5	-
4	7	6	7	-
5	1	1	1	3
6	2	2	2	4
7	3	3	3	5
8	6	4	6	7
9	5	5	5	7
10	5	4	5	6
11	4	3	4	5

2.2 ลักษณะของสดริงคำตอบ

สดริงคำตอบ ที่ปรากฏในบทความนี้จะอยู่ในรูปของลำดับความสำคัญในการจัดสรรซึ่งจะแบ่งออกเป็น 2 สดริงคำตอบย่อย คือ สดริงคำตอบของชิ้นงาน และสดริงคำตอบของพนักงาน ดังตารางที่ 2 และ 3 โดยแต่ละสดริงคำตอบของชิ้นงานและพนักงานนั้นจะมีลำดับความสำคัญที่ไม่ซ้ำกัน ซึ่งค่าน้อยจะมีโอกาสจัดสรรก่อน

2.3 การถอดรหัสสดริงคำตอบ

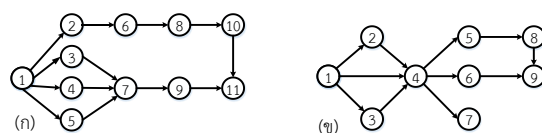
ขั้นตอนในการถอดรหัสสดริงคำตอบของการจัดสมดุลและการจัดสรรพนักงานหลายทักษะให้กับสถานงานบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนานภายใต้ปัญหาประเภทที่ 2 [5] มี 4 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

ในที่นี้จะยกตัวอย่างกรณีสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสม A และ B ที่ขนานกันอยู่ที่มีพนักงานอยู่ 3 ระดับ โดยใช้ปัญหาของ Jackson [10] และ Jaeschke [10] ซึ่งมีจำนวนชิ้นงานทั้งหมด 11 ชิ้นงาน และ 9 ชิ้นงานตามลำดับ โดยสายการประกอบ A และ สายการประกอบ B มีการผลิตสินค้าจำนวน 2 รุ่น ซึ่งมีสัดส่วนการผลิตเป็น 1:1 และ 2:1 ตามลำดับ

ขั้นที่ 1 ทำการรวมรุ่นของผลิตภัณฑ์ในแต่ละสายการประกอบ โดยสามารถแบ่งออกเป็นขั้นตอนย่อยๆ ได้ 2 ขั้นตอนคือ

1. การสร้างแผนภาพความสัมพันธ์ก่อนหลังรวม (Combined Precedence Diagram) ตามรูปที่ 1

2. การคำนวณหาเวลาชิ้นงานรวม (Combined Task Time) ในแต่ละชิ้นงานมีค่าดังตารางที่ 4 โดยคำนวณจากสัดส่วนการผลิตของผลิตภัณฑ์ในแต่ละรุ่น ซึ่งบทความนี้จะมีพนักงานอยู่ 3 ระดับ ทำให้วิธีการคำนวณจะต่างจากวิธีของ Sparling และ Miltenburg [11] ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก $t_{iw} = \sum_{m=1}^M q_{ml} t_{iwm}$ โดยที่ t_{iwm} คือ เวลาชิ้นงาน i ที่มีพนักงานทักษะ w ($w = 1, 2, 3$) เป็นผู้ปฏิบัติของผลิตภัณฑ์รุ่น m และ $q_{ml} = \frac{D_m}{\sum_{m=1}^M D_m}$ คือ สัดส่วนจำนวนผลิตภัณฑ์รุ่น m ในสายการประกอบที่ l ($l = 1, 2$)



รูปที่ 1 แผนภาพความสัมพันธ์ก่อนหลังรวม (ก) สายการประกอบผลิตภัณฑ์ A (ข) สายการประกอบผลิตภัณฑ์ B

ปีที่ 13 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม – เมษายน พ.ศ. 2561

ตารางที่ 2 ตัวอย่างสตรึงคำตอบของชิ้นงาน

Task id	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9
Task priority	3	10	13	9	20	16	12	18	5	17	4	8	19	7	11	1	15	14	2	6

ตารางที่ 3 ตัวอย่างสตรึงคำตอบของพนักงาน

Worker id	H	H	M	M	M	L
Worker priority	6	3	2	1	4	5

ตารางที่ 4 เวลาชิ้นงานร่วมในแต่ละชิ้นงานของพนักงานในแต่ละทักษะ

skill	Task time for each skill worker																			
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9
H	4	3	4	4.5	2	2	3.5	2.5	4	3.5	2.5	4.33	3	2.67	3	2	3.67	1.33	3	4.33
M	5	3	5	6	2	2	4	4	4	5	3	5.33	3	4	4.33	3.33	5	1.67	4.33	5.33
L	7	4.5	-	-	3.5	4.5	5.5	5.5	6	6.5	4.5	7	3	-	4.67	4.67	5.67	2.67	5	5.67

ขั้นที่ 2 กำหนดลำดับของชิ้นงานและพนักงาน ซึ่งมี 2 ขั้นตอนย่อยๆ คือ

1. สร้างลำดับความสำคัญของชิ้นงานและของพนักงานโดยอัลกอริทึมที่ทำการวิจัย
2. กำหนดลำดับของชิ้นงาน โดยพิจารณาจากความสำคัญของชิ้นงานและความสัมพันธ์ก่อนหลังร่วมของผลิตภัณฑ์ และกำหนดลำดับของพนักงานโดยพิจารณาจากลำดับความสำคัญของพนักงาน

ขั้นที่ 3 มอบหมายชิ้นงานและพนักงานให้กับสถานีนงาน ซึ่งมี 2 ขั้นตอนย่อยๆ คือ

1. คำนวณหาค่าขอบเขตล่าง และขอบเขตบนของรอบเวลาดำเนินการจากสมการที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

$$C_{LB} = \frac{1}{N_w} \sum_{i=1}^n \min_{1 \leq w \leq 3} \{t_{iw}\} \quad (1)$$

$$C_{UB} = \left(\frac{1}{N_w} \sum_{i=1}^n \max_{1 \leq w \leq 3} \{t_{iw}\} \right) + \max_{1 \leq i \leq n} \{t_{iw}\} \quad (2)$$

2. หารอบเวลาดำเนินการที่เหมาะสม ด้วยวิธีแบ่งครึ่งช่วง (Bisection Searching) คือการหาเวลาดำเนินการโดยการคำนวณหาจุดกึ่งกลางของค่าขอบเขตบนและขอบเขตล่างของรอบเวลาดำเนินการ และทำการจัดสรรชิ้นงานและพนักงานให้กับสถานีนงานด้วยรอบเวลาดำเนินการที่คำนวณได้ ซึ่งมีข้อมูลนำเข้า (Input) อยู่ 8 ตัวแปร คือ 1. จำนวนของสถานีนงานทั้งหมด (N_w)

2. จำนวนชิ้นงานทั้งหมดของทั้ง 2 สายการประกอบ (n)
3. ลำดับของชิ้นงานที่จัดสรรลงสถานีนงาน (Task Sequence : V_2)

4. ลำดับของพนักงานที่จัดสรรลงสถานีนงาน (Worker Allocation : V_3)
5. ขอบเขตล่างของรอบเวลาดำเนินการ (C_{LB})
6. ขอบเขตบนของรอบเวลาดำเนินการ (C_{UB})
7. เวลาของชิ้นงาน i ที่ทำโดยพนักงานทักษะ w (t_{iw})
8. ความต่างระหว่างขอบเขตล่างและขอบเขตบนของรอบเวลาดำเนินการที่กำหนด (Dif_C) ซึ่งเป็นตัวกำหนดจำนวนรอบการทำงานของวิธีแบ่งครึ่งช่วง โดยถ้าค่าต่ำกว่าค่าที่กำหนดจะหยุดการทำงาน และมีขั้นตอนดังนี้

- 1) ให้คำนวณ $C_{UB} - C_{LB}$ ถ้ามากกว่าค่า Dif_C ให้ทำขั้นที่ 2-5 ต่อ แต่ถ้าน้อยกว่าให้หยุดการทำงานทันที

$$2) \text{ คำนวณค่า } C_T \text{ จาก } \frac{C_{LB} + C_{UB}}{2}$$

- 3) เริ่มจัดสรรชิ้นงานและพนักงานตามลำดับที่กำหนด ซึ่งใช้รอบเวลาดำเนินการที่เหมาะสม (C_T) โดยจัดสรรทีละสถานีนงาน และจะขึ้นสถานีนงานใหม่เมื่อเวลาของชิ้นงานรวมเกินรอบเวลาดำเนินการที่เหมาะสม

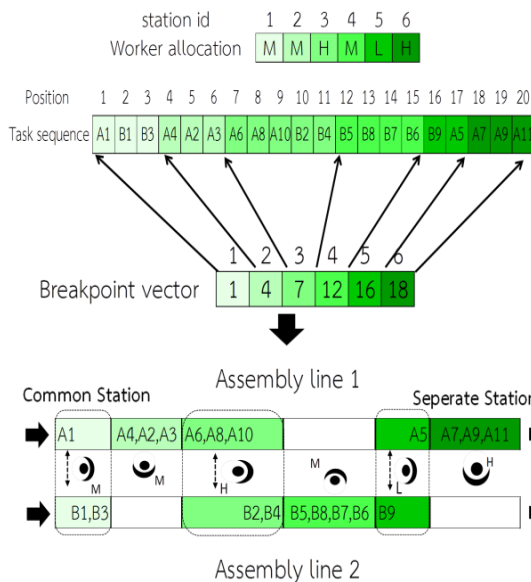
- 4) ปรับค่าขอบเขตบนและขอบเขตล่างของรอบเวลาดำเนินการและเก็บคำตอบตามเงื่อนไขที่กำหนดซึ่งจะไม่เหมือนกับของ Zhang และคณะ [5] ตามตารางที่ 5

- 5) ทำวนข้อที่ 1 -4 จนหยุดการทำงาน

ตารางที่ 5 เงื่อนไขการปรับปรุงขอบเขตล่างและขอบเขตบนของรอบเวลาดำเนินการและการเก็บคำตอบ

เงื่อนไข	สถานีงานหรือพนักงาน ถูกจัดสรรอย่างน้อย 1 ชิ้นงาน	รอบเวลาดำเนินการ พอหรือไม่	การปรับปรุง รอบเวลาดำเนินการ	การเก็บคำตอบ
1	☒	☒	C_{UB}	☒
2	☒	☒	C_{LB}	☒
3	☒	☒	C_{UB}	☒
4	☒	☒	C_{LB}	☒

ขั้นที่ 4 กำหนดผู้ปฏิบัติงานในแต่ละสถานีงานตามลำดับของพนักงานและกำหนดชิ้นงานในแต่ละสถานีงานโดยการถอดรหัสเวกเตอร์จุดแบ่งชิ้นงาน (Breakpoint Vector) ตามรูปที่ 2



รูปที่ 2 การกำหนดชิ้นงานลงในแต่ละสถานีงาน

3. ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ในบทความนี้จะนำเสนอการแก้ปัญหาการจัดสมดุลและการจัดสรรพนักงานหลายทักษะให้กับสถานีงานบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน ที่มีวัตถุประสงค์จำนวนทั้งสิ้น 4 วัตถุประสงค์ และจะพิจารณาค่าที่เหมาะสมที่สุดไปพร้อมๆ กัน โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1. รอบเวลาดำเนินการที่น้อยที่สุด

เพื่อให้สามารถประกอบผลิตภัณฑ์ต่อชิ้นได้เร็วที่สุดโดยมีค่าเท่ากับเวลารวมของชิ้นงานในแต่ละสถานีงาน

(Total Time of Each Workstation : TT_k) ที่มากที่สุด ดังสมการที่ 3 ซึ่งเป็นวัตถุประสงค์ด้านประสิทธิภาพของสายการประกอบที่สำคัญที่สุดในการจัดสมดุลสายการประกอบภายใต้ปัญหาประเภทที่ 2

$$\text{Minimum } C_T = \max_{1 \leq k \leq N_w} \{TT_k\} \quad (3)$$

เมื่อ N_w คือ จำนวนสถานีงานทั้งหมด

k คือ สัญลักษณ์กำหนดสถานีงาน

3.2. จำนวนสถานีงานน้อยที่สุด

เพื่อให้การจัดสมดุลสายการประกอบนั้นมีขนาดเส้นที่สุด หรือทำให้การสูญเสียพื้นที่ใช้สอยน้อยที่สุด [9] แต่ในงานวิจัยนี้ในบางคำตอบที่ได้นั้นอาจใช้พนักงานที่น้อยกว่ากำหนด ทำให้ต้องมีการปรับการคำนวณจำนวนสถานี โดยคิดจากจำนวนสถานีที่จัดได้จริง (Number of Station: N_s) รวมกับจำนวนสถานีงานที่ไม่ได้ใช้ (Number of Unused Stations : N_{un}) ตามสมการที่ 4

$$\text{Minimum Station} = N_s + N_{un} \quad (4)$$

3.3. ความแตกต่างของปริมาณภาระงานระหว่างสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด

การพยายามทำให้ผลต่างของรอบเวลาดำเนินการกับเวลารวมของชิ้นงานในแต่ละสถานีงานให้มีการกระจายตัวแบบยูนิฟอร์ม [12] ซึ่งชี้วัดโดยค่าความแตกต่างของปริมาณภาระงานระหว่างสถานีงาน (Balancing Workload Between Workstations: B_b) ซึ่ง B_b จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 โดยค่ายิ่งต่ำจะยิ่งแสดงให้เห็นว่า

ปีที่ 13 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม – เมษายน พ.ศ. 2561

การกระจายภาระงานระหว่างสถานีงานมีความสมดุลกันมาก ซึ่งทำให้เกิดความเท่าเทียมกันระหว่างพนักงาน แต่ในงานวิจัยนี้บางคำตอบที่ได้นั้นอาจใช้พนักงานน้อยกว่าที่กำหนดไว้ ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 5

$$\text{Minimise } B_b = \frac{N_w}{N_u - 1} \sum_{k=1}^{N_u} \sum_{b=1}^2 \left(\frac{S_{kb}}{TAD} - \frac{1}{N_u} \right)^2 \quad (5)$$

$$TAD = \sum_{k=1}^{N_u} \sum_{b=1}^2 S_{kb} \quad (6)$$

เมื่อ N_w คือ จำนวนสถานีงานทั้งหมด

N_u คือ จำนวนสถานีงานที่ถูกจัดสรรงาน

k คือ สัญลักษณ์กำหนดสถานีงาน

b คือ สัญลักษณ์กำหนดประเภทของสถานี

เมื่อ $b = 1, 2$ โดย 1 = สถานีงานร่วม

2 = สถานีงานแยก

S_{kb} คือ ค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์เฉลี่ยระหว่างรอบเวลา

การดำเนินการ (C_T) กับเวลาขึ้นงานรวมที่

สถานีงานที่ k ซึ่งเป็นสถานีงานประเภท b

TAD คือ ผลรวมค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์ของทุกสถานีงาน

ซึ่งการคำนวณ S_{kb} ขึ้นอยู่กับค่า b ถ้า $b=1$ คือ สถานีงานแยก สามารถคำนวณจากสมการที่ 7

$$\begin{aligned} S_{k,1} &= \sum_{m_l=1}^{M_l} q_{m_l} S_{k,1,m_l,l,w} \\ &= \sum_{m_l=1}^{M_l} q_{m_l} |C_T - TT_{k,1,m_l,l,w}| \quad \forall l \in \{1, 2\} \quad (7) \end{aligned}$$

โดยที่ q_{m_l} คือ สัดส่วนจำนวนผลิตภัณฑ์รุ่น m ที่ จะทำการผลิตเทียบกับจำนวนผลิตภัณฑ์ที่จะผลิตทั้งหมดบนสายการประกอบ $l = \{1, 2\}$ และ $TT_{k,b,m_l,l,w}$ คือ เวลาขึ้นงานรวมที่สถานีงานที่ k ซึ่งเป็นสถานีงานประเภท b ของผลิตภัณฑ์รุ่น m บนสายการประกอบ l ที่มีพนักงานทักษะ w

และ ถ้า $b = 2$ คือ สถานีงานร่วมที่มีการทำงานบนทั้ง 2 สายการประกอบที่อยู่ติดกัน สามารถคำนวณตามสมการที่ 8 เมื่อ m_l และ m_{l+1} เป็นรุ่นของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตบนสายการประกอบ l และ $l + 1$ ที่ขนานกันตามลำดับ

$$\begin{aligned} S_{k,2} &= \sum_{m_l=1}^{M_l} \sum_{m_{l+1}=1}^{M_{l+1}} q_{m_l} q_{m_{l+1}} S_{k,2,m_{(l,l+1)},(l,l+1),w} \\ &= \sum_{m_l=1}^{M_l} q_{m_l} q_{m_{l+1}} |C_T - TT_{k,2,m_l,l,w} - \\ &\quad TT_{k,2,m_{l+1},l+1,w}| \quad \forall l \in \{1\} \quad (8) \end{aligned}$$

3.4. ความไม่เกี่ยวข้องกันของงานในแต่ละสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด

การทำให้ชิ้นงานภายในสถานีงานมีความเกี่ยวเนื่องกันมากที่สุด จะทำให้การปฏิบัติงานมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นเพราะคิดว่าชิ้นงานที่เกี่ยวข้องกันนั้นจะเป็นงานประเภทเดียวกันซึ่งจะทำให้เกิดเชี่ยวชาญในด้านใดด้านหนึ่ง โดยชิ้นงานสองชิ้นงานใดๆจะถือว่ามีความเกี่ยวข้องกันก็ต่อเมื่อมีการเชื่อมโยงกันโดยตรงในแผนภาพความสัมพันธ์ก่อนหลัง [13] แต่เพื่อให้การพิจารณาวัตถุประสงคนี้เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับวัตถุประสงค์อื่นๆ ดังนั้น วัตถุประสงคนี้จึงเป็นการทำค่าความไม่เกี่ยวข้องกันภายในสถานีงาน (Index of Task Unrelated :ITUR) มีค่าน้อยที่สุด สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 9 โดยจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ซึ่งยิ่งน้อยจะแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานภายในสถานีงานมีความเกี่ยวข้องกันมาก

เมื่อ SN_k คือจำนวนเครือข่ายของชิ้นงานที่มีความสัมพันธ์ก่อนหลังกันโดยตรงในสถานีงาน แต่ในบทความนี้บางคำตอบที่ออกมานั้นอาจใช้พนักงานที่น้อยกว่าจำนวนที่กำหนด ทำให้ต้องมีดัดแปลงการคำนวณ SN_k โดยสถานีงานที่ไม่ถูกใช้งานจะให้ค่าเท่ากับจำนวนชิ้นงานเฉลี่ยในแต่ละสถานีงาน (Measures the Average Number of Activities per Station : WEST) โดยสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 10 ดังนี้

$$\text{Minimise ITUR} = 1 - \frac{N_u}{\sum_{k=1}^{N_u} SN_k} \quad (9)$$

$$\text{WEST} = \frac{n}{N_w} \quad (10)$$

ซึ่งหลักในการเลือกวัตถุประสงค์ของการจัดสมดุลและการจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบ

ผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน (ประเภทที่ 2) สำหรับบทความนี้ จะเลือกจากวัตถุประสงค์ที่มีความสัมพันธ์เชิงลบ คือมีคำตอบที่เป็นไปในทิศทางตรงกันข้าม และจะต้องมีทั้งวัตถุประสงค์ด้านประสิทธิภาพของสายการประกอบ (วัตถุประสงค์ที่ 1 2 และ 4) และวัตถุประสงค์ด้านสมดุลของภาระงาน (วัตถุประสงค์ที่ 3)

4. วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (MOEA/D)

บทความนี้นำเอาวิธี MOEA/D ที่พัฒนาโดย Zhang และ Li [8] มาประยุกต์ใช้กับการแก้ปัญหาการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบ ผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนานที่มากวัตถุประสงค์ ภายใต้ปัญหาประเภทที่ 2 ซึ่งมีแนวคิดในการแก้ปัญหาโดยการพัฒนาสตริงคำตอบแบบมาววัตถุประสงค์ไปพร้อมๆกัน โดยกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักบนจุด p ของแต่ละวัตถุประสงค์ i (λ_{pi}) ให้กับแต่ละจุดของค่าถ่วงน้ำหนัก (Point of Weight : λ_p) พร้อมกับกำหนดจุดข้างเคียง (Neighborhood Point) เพื่อใช้ในการระบุหรือจำแนกปัญหาย่อย

การพัฒนาสตริงคำตอบของปัญหาย่อยในแต่ละเจเนอเรชันจะใช้การสลับสายพันธุ์ (Crossover) ซึ่งเป็นวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) และใช้วิธีเทบิเชฟฟ์ (Tchebycheff Approach) ในการคัดเลือกสตริงคำตอบแบบมาววัตถุประสงค์ และเมื่อครบตามเจเนอเรชันที่กำหนดจะนำสตริงคำตอบจากเจเนอเรชันสุดท้าย มาคัดเลือกหากลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (1^{st} Frontier) โดยใช้การกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness Assignment) ด้วยการจัดลำดับแบบไม่ถูกครอบงำ (Non-dominated sorting)

4.1. ขั้นตอนการทำงานของ MOEA/D

การแก้ปัญหาการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนานที่มากวัตถุประสงค์ ภายใต้ปัญหาประเภทที่ 2 ด้วยอัลกอริทึม MOEA/D ซึ่งมีแผนภูมิการไหลตามรูปที่ 3

ในที่นี้จะยกตัวอย่างการแก้ปัญหาการจัดสมดุลและการจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบ ผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน ที่มี 4 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และมีชิ้นงานของทั้ง 2 สายการประกอบเท่ากับ 20 ชิ้นงาน โดยมีพนักงาน 6 คน (สถานีงาน 6 สถานีงาน) ซึ่งมีพารามิเตอร์และขั้นตอนการทำงานดังนี้

พารามิเตอร์ของ MOEA/D ที่เลือกใช้ คือ

- จำนวนส่วนในการแบ่งค่าถ่วงน้ำหนักในแต่ละฟังก์ชันค่าวัตถุประสงค์ (H) เท่ากับ 2
 - จำนวนของจุดข้างเคียง (T) เท่ากับ 4
 - ร้อยละของจำนวนในการสุ่มเลือกจุดข้างเคียงในประชากรย่อยที่ทำการพิจารณาเท่ากับ 40
 - จำนวนวัตถุประสงค์ทั้งหมด (O) เท่ากับ 4
- ดังนั้นจำนวนจุดของค่าถ่วงน้ำหนักทั้งหมดหรือประชากร (P) คำนวณได้เท่ากับ 10 ดังสมการที่ 12

$$\lambda Set = C_{O-1}^{H+O-1} = C_{4-1}^{2+4-1} = 10 \quad (12)$$

ขั้นที่ 1 สร้างค่าถ่วงน้ำหนัก λ_{pi} ด้วยซิมเพล็กซ์แลตทิซดีไซน์ โดยใช้พารามิเตอร์ที่กำหนด จะได้ค่าตามตารางที่ 6 ซึ่ง $\sum_{i=1}^O \lambda_{pi} = 1 \forall p \in P$ และ $\lambda_{pi} \geq 0$ จะเห็นได้ว่าค่าถ่วงน้ำหนักในตารางนั้นจะมีเพียง 3 ค่า เนื่องจากค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละวัตถุประสงค์จะมีวิธีคิดจาก $\{0/H, \dots, H/H\}$ โดยจะมีค่าเท่ากับ 0 0.5 และ 1

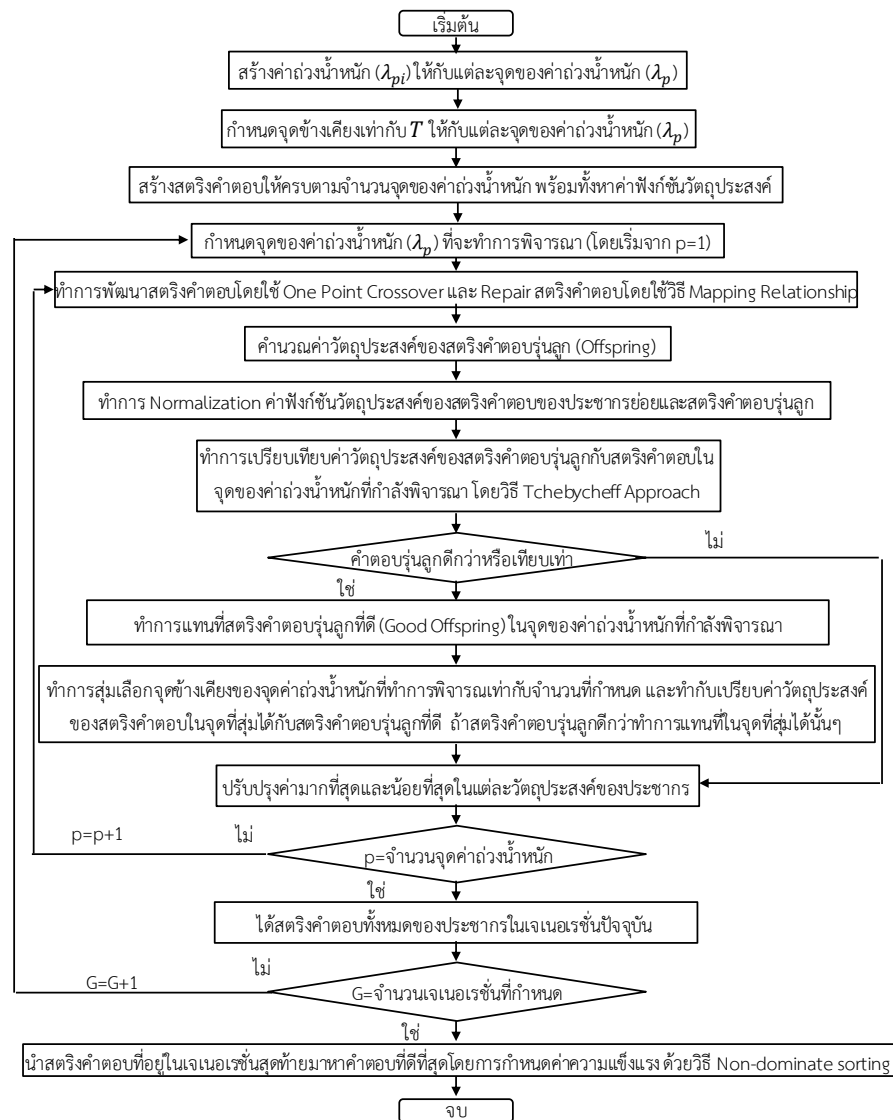
ขั้นที่ 2 เลือกจุดข้างเคียงให้กับแต่ละจุดค่าถ่วงน้ำหนัก โดยพิจารณาจากระยะห่างระหว่างจุดของค่าถ่วงน้ำหนักที่สนใจ (λ_p) กับจุดของค่าถ่วงน้ำหนักอื่นๆ (λ_j) ที่คำนวณจากสมการที่ 13

$$d_{pj} = \sqrt{\sum_{i=1}^O (\lambda_{pi} - \lambda_{ji})^2} \quad (13)$$

$$\forall p \in P, \forall j \in P, p \neq j$$

และเลือกจุดข้างเคียงจากค่าระยะห่างที่น้อยที่สุดจนครบตามจำนวนที่กำหนด ตามตารางที่ 7 ถ้าระยะห่างมีค่าเท่ากันและไม่สามารถเลือกได้หมดทุกจุด ให้สุ่มเลือกแบบอิสระ

ปีที่ 13 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม – เมษายน พ.ศ. 2561



รูปที่ 3 ขั้นตอนการทำงาน MOEA/D

ตารางที่ 6 ค่าถ่วงน้ำหนัก λ_{pi} ในแต่ละจุดค่าถ่วงน้ำหนัก

λ_p	λ_{p1}	λ_{p2}	λ_{p3}	λ_{p4}
1	0.5	0	0	0.5
2	0	0	0	1
3	0	0	0.5	0.5
4	0	0.5	0.5	0
5	0	1	0	0
6	0	0	1	0
7	0.5	0.5	0	0
8	1	0	0	0
9	0.5	0	0.5	0
10	0	0.5	0	0.5

ขั้นที่ 3 สร้างสตริงคำตอบเริ่มต้นของชิ้นงานและพนักงานให้กับทุกจุดค่าถ่วงน้ำหนักโดยการสุ่มอย่างอิสระ พร้อมทั้งหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ตามตารางที่ 8 และหาค่าน้อยที่สุดและมากที่สุดในแต่ละค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ตารางที่ 7 ค่าถ่วงน้ำหนักข้างเคียงของแต่ละจุดค่าถ่วงน้ำหนัก λ_p (ค่า T เท่ากับ 4)

T	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7	λ_8	λ_9	λ_{10}
1	λ_2	λ_1	λ_2	λ_3	λ_3	λ_3	λ_1	λ_1	λ_1	λ_1
2	λ_3	λ_3	λ_4	λ_5	λ_4	λ_4	λ_4	λ_4	λ_6	λ_2
3	λ_7	λ_7	λ_6	λ_6	λ_7	λ_7	λ_5	λ_7	λ_7	λ_5
4	λ_9	λ_{10}	λ_9	λ_{10}	λ_9	λ_{10}	λ_8	λ_9	λ_8	λ_7

ขั้นที่ 4 กำหนดจุดของค่าถ่วงน้ำหนักที่ทำการพิจารณา ด้วยการกำหนดค่า p โดยค่า $p = \{1, \dots, 10\}$ เพื่อสร้างกลุ่มประชากรย่อย ตามตารางที่ 9

ขั้นที่ 5 ทำการสุ่มเลือก 2 สตริงคำตอบจากสตริงคำตอบที่อยู่ในประชากรย่อย โดยสตริงคำตอบนั้นต้องไม่ซ้ำกัน ซึ่งงานวิจัยนี้ต้องสุ่มทั้งสิ้น 4 สตริงคำตอบโดยแบ่งออกเป็นสตริงคำตอบของชิ้นงาน 2 สตริง และสตริงคำตอบของพนักงาน 2 สตริง

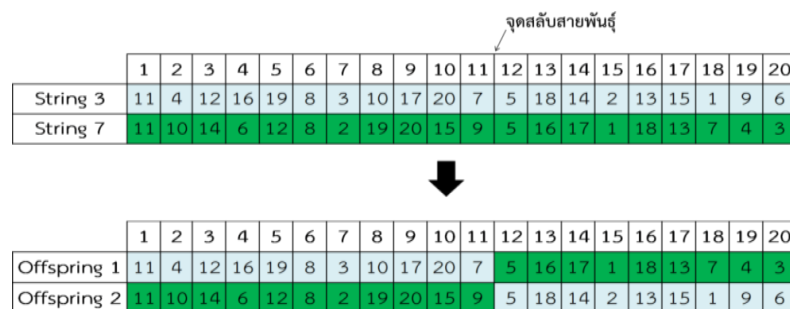
ขั้นที่ 6 ทำการพัฒนาสตริงคำตอบที่สุ่มได้โดยการการสลับสายพันธุระหว่าง 2 สตริงคำตอบแบบ 1 ตำแหน่ง (One-point Crossover) ซึ่งจะได้สตริงคำตอบรุ่นลูก (Offspring) 2 สตริง ตามรูปที่ 4 และทำการซ่อมแซมสตริงคำตอบรุ่นลูก ด้วยวิธี Mapping Relationship ของ Goldberg และ Lingel [14] ตามรูปที่ 5 เพื่อไม่ให้ลำดับความสำคัญในสตริงคำตอบมีค่าซ้ำกัน โดยจะต้องทำทั้งสตริงคำตอบของชิ้นงานและพนักงาน

ตารางที่ 8 สตริงคำตอบเริ่มต้นของชิ้นงานและพนักงานของจุดค่าถ่วงน้ำหนักทั้งหมดพร้อมทั้งค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์

λ_p	String	ชิ้นงาน 20 ชิ้นงาน	พนักงาน 6 คน	f_1	f_2	f_3	f_4
λ_1	1	[3 10 13 9 20 16 12 18 5 17 4 8 19 7 11 1 15 14 2 6]	[6 3 2 1 4 5]	14.333	6	0.146	0.538
λ_2	2	[2 3 18 11 20 19 8 14 13 15 4 12 9 5 16 17 7 1 6 10]	[1 6 2 4 3 5]	15.833	6	0.067	0.538
λ_3	3	[11 4 12 16 19 8 3 10 17 20 7 5 18 14 2 13 15 1 9 6]	[5 6 3 1 4 2]	15.333	6	0.208	0.538
λ_4	4	[4 8 6 1 2 20 5 14 15 3 12 18 20 13 7 11 16 9 17 19]	[3 4 5 6 2 1]	14.833	5	0.165	0.571
λ_5	5	[5 11 1 17 14 12 9 3 18 8 7 15 4 20 10 2 19 16 6 13]	[3 6 1 4 2 5]	15.333	6	0.121	0.455
λ_6	6	[3 15 17 9 8 11 2 14 1 4 19 7 13 5 10 6 16 12 20 18]	[3 6 2 1 4 5]	15.333	5	0.164	0.500
λ_7	7	[11 10 14 6 12 8 2 19 20 15 9 5 16 17 1 18 13 7 4 3]	[2 3 1 5 4 6]	15.500	6	0.062	0.571
λ_8	8	[5 18 15 11 20 13 3 4 10 19 9 7 1 17 8 12 16 14 6 2]	[6 4 2 1 3 5]	15.000	6	0.030	0.455
λ_9	9	[14 8 7 15 2 13 6 10 17 12 5 3 9 18 16 19 20 11 1 4]	[3 2 5 6 4 1]	15.333	5	0.145	0.500
λ_{10}	10	[2 15 9 12 10 13 8 6 7 3 18 5 4 17 1 20 19 16 11 14]	[3 1 5 2 4 6]	15.333	6	0.132	0.500

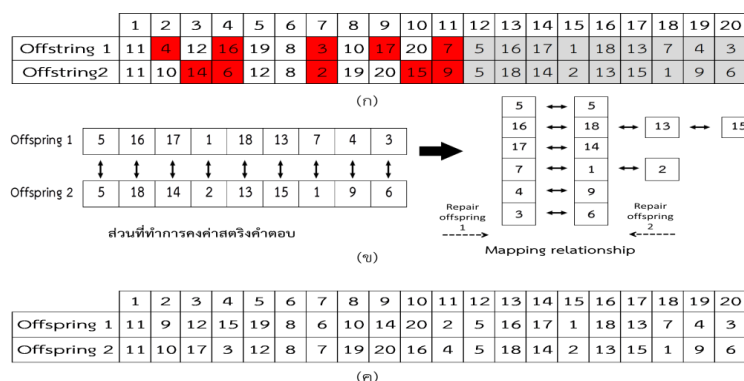
ตารางที่ 9 กลุ่มประชากรย่อยที่จะทำการพัฒนาคำตอบ เมื่อ p เท่ากับ 1

λ_p	$\{\lambda_{p1}, \lambda_{p2}, \lambda_{p3}, \lambda_{p4}\}$	String	ชิ้นงาน 20 ชิ้นงาน	พนักงาน 6 คน
λ_1	[0.5 0 0 0.5]	1	[3 10 13 9 20 16 12 18 5 17 4 8 19 7 11 1 15 14 2 6]	[6 3 2 1 4 5]
λ_2	[0 0 0 1]	2	[11 4 12 16 19 8 3 10 17 20 7 5 18 14 2 13 15 1 9 6]	[5 6 3 1 4 2]
λ_3	[0 0 0.5 0.5]	3	[4 8 6 1 2 20 5 14 15 3 12 18 20 13 7 11 16 9 17 19]	[3 4 5 6 2 1]
λ_7	[0.5 0.5 0 0]	7	[3 15 17 9 8 11 2 14 1 4 19 7 13 5 10 6 16 12 20 18]	[3 6 2 1 4 5]
λ_9	[0 0.5 0 0.5]	9	[11 10 14 6 12 8 2 19 20 15 9 5 16 17 1 18 13 7 4 3]	[2 3 1 5 4 6]



รูปที่ 4 ขั้นตอนพัฒนาสตริงคำตอบโดยวิธี One-point Cross Over

ปีที่ 13 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม – เมษายน พ.ศ. 2561



รูปที่ 5 ขั้นตอนการซ่อมแซมสตริงคำตอบ (ก) การสุ่มช่วงที่จะทำการซ่อมแซม
(ข) วิธีสร้าง Mapping relationship (ค) สตริงคำตอบหลังซ่อมแซม

ขั้นที่ 7 คำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูก (Offspring) ทั้ง 2 สตริงคำตอบที่ทำการซ่อมแซมเป็นที่เรียบร้อยแล้ว และทำการปรับปรุงค่ามากที่สุดและน้อยที่สุดในแต่ละวัตถุประสงค์ของประชากรโดยเทียบค่าในแต่ละวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูก (Offspring) กับค่ามากที่สุดและน้อยที่สุดในแต่ละวัตถุประสงค์เดิมว่ามีการเปลี่ยนแปลงหรือไม่

ขั้นที่ 8 ทำการนอร์มัลไล (Normalization) ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบของกลุ่มประชากรย่อยและสตริงคำตอบรุ่นลูก (Offspring) ด้วยสมการที่ 14

$$\bar{f}_i = \frac{f_i - z_i^*}{z_i^{nad} - z_i^*} \quad (14)$$

เมื่อ z_i^* คือ $\min\{f_i(x) | x \in P\}$

z_i^{nad} คือ $\max\{f_i(x) | x \in P\}$

โดยที่ $z_i^* = (z_1^*, \dots, z_O^*), z_i^{nad} = (z_1^{nad}, \dots, z_O^{nad})$

O คือ จำนวนวัตถุประสงค์ทั้งหมด

ขั้นที่ 9 ทำการเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูก (Offspring) กับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่อยู่ในจุดค่าถ่วงน้ำหนัก λ_p ที่กำลังพิจารณาโดยการกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness Assignment) ด้วยวิธีเทบิเชฟฟ์ (Tchebycheff Approach) ที่สามารถคำนวณจากสมการที่ 15 เมื่อ z_i^* คือ ค่าเป้าหมายของวัตถุประสงค์ i โดย $i = 1, \dots, O$

$$g(x|\lambda_p, z^*) = \max_{1 \leq i \leq O} \{\lambda_{pi} | f_i(x) - z_i^* | \} \quad (15)$$

โดยที่ $(x|\lambda_p, z^*)$ คือ ผลต่างที่มีค่ามากที่สุดของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ i กับค่าเป้าหมายของวัตถุประสงค์ i ที่ทำการคูณค่าถ่วงน้ำหนักบนจุด p ของวัตถุประสงค์

โดยมีขั้นตอนการเปรียบเทียบและแทนที่ดังต่อไปนี้

1. นำค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูก (Offspring) กับสตริงคำตอบที่อยู่ในจุดค่าถ่วงน้ำหนัก λ_p ที่กำลังพิจารณาและผ่านการนอร์มัลไลแล้วในแต่ละวัตถุประสงค์ไปคูณกับค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละวัตถุประสงค์ในจุดค่าถ่วงน้ำหนัก λ_p ที่กำลังพิจารณา

2. หาค่าฟังก์ชันเทบิเชฟฟ์ $g(x|\lambda_p, z^*)$ โดยที่ $g(x|\lambda_p, z^*) = \max_{1 \leq i \leq 4} \{\lambda_{pi} \times \bar{f}_i\}$ ของสตริงคำตอบรุ่นลูก (offspring) ทั้ง 2 สตริง และสตริงคำตอบที่อยู่ในจุดค่าถ่วงน้ำหนัก λ_p ที่กำลังพิจารณา

3. พิจารณาค่าฟังก์ชันเทบิเชฟฟ์ $g(x|\lambda_p, z^*)$ ในข้อที่ 2 ของสตริงคำตอบรุ่นลูก (Offspring) ทั้ง 2 สตริง กับสตริงคำตอบที่อยู่ในจุดค่าถ่วงน้ำหนัก λ_p ที่กำลังพิจารณาว่าดีกว่าหรือไม่ ในบทความนี้คำว่าดีกว่าคือคำตอบนั้นต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเทียบเท่า ถ้าดีกว่าทุกสตริงคำตอบให้เลือกสตริงคำตอบที่ดีที่สุด แต่ถ้ามีค่าเท่ากันให้สุ่มเลือกแบบอิสระ ตามตารางที่ 10

ตารางที่ 10 การพิจารณาคำตอบที่ดีที่สุด

λ_p	String	$g(x \lambda_p, z^*)$	Selection
λ_1	1	1	
λ_1	Offspring 1	1 (เท่ากับ)	Good
λ_1	Offspring 2	0 (น้อยกว่า)	Best

4. ทำการแทนที่สตริงคำตอบและค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูกที่ดีที่สุด (Best Offspring) ลงในจุดค่าถ่วงน้ำหนัก (λ_p) ที่กำลังพิจารณาตามตารางที่ 11 และทำขั้นที่ 10 แต่ถ้าไม่ดีกว่า จะไม่เกิดการแทนที่สตริงคำตอบและให้ข้ามไปขั้นที่ 11 เลย

ขั้นที่ 10 จะทำการคำนวณจำนวนจุดข้างเคียงที่ต้องสุ่ม จากพารามิเตอร์ร้อยละของจำนวนในการสุ่มเลือกจุดข้างเคียงในกลุ่มประชากรย่อย จากนั้นสุ่มเลือกจุดข้างเคียงในกลุ่มประชากรย่อยที่กำลังพิจารณาเท่ากับจำนวนที่คำนวณได้ หลังจากนั้นทำการเปรียบเทียบเหมือนกับขั้นที่ 9 แต่จะทำการเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบในจุดที่สุ่มได้กับค่าวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูกที่ดี ถ้าสตริงคำตอบรุ่นลูกดีกว่าตามตารางที่ 12 จะทำการแทนที่สตริงคำตอบและค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูก (Offspring) ที่ดีในจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่สุ่มได้นั้นๆ ทำการปรับปรุงค่ามากที่สุดและน้อยสุดในแต่ละวัตถุประสงค์ของประชากรทั้งหมด

ขั้นที่ 11 พิจารณาว่า $p = P$ หรือไม่ ถ้าไม่เท่า ให้กำหนด $p = p + 1$ เพื่อเปลี่ยนไปพัฒนาสตริงคำตอบในปัญหาย่อยถัดไป โดยกลับไปทำซ้ำในขั้นที่ 4 แต่ถ้าเท่ากัน ให้ไปทำในขั้นที่ 12 ต่อ

ขั้นที่ 12 เมื่อทำการพัฒนาสตริงคำตอบครบตามจำนวนปัญหาย่อยจะได้รับสตริงคำตอบทั้งหมดของประชากรในเจเนอเรชันปัจจุบัน ต่อจากนั้นพิจารณาว่า $G = Genaretion$ หรือไม่ ถ้าไม่ให้กำหนด $G = G + 1, p = 1$ และกลับไปทำซ้ำในขั้นที่ 4 แต่ถ้า $G = Genaretion$ ให้ข้ามไปทำในขั้นที่ 13 ต่อ

ขั้นที่ 13 นำสตริงคำตอบทั้งหมดในเจเนอเรชันสุดท้ายมาหาคำตอบที่ดีที่สุดโดยการกำหนดค่าค่าแข็งแรง ด้วยการการจัดลำดับแบบไม่ถูกครอบงำ ซึ่งจะถือว่าเป็นค่าแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness Value) หรือการเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันในแต่ละวัตถุประสงค์ว่าถูกครอบงำหรือไม่ คำว่าถูกครอบงำคือทุกค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นคำตอบที่แย่กว่าหรือเทียบเท่า ไม่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ไหนเลยที่ดีกว่า โดยสตริงคำตอบนั้นจะถือว่าเป็นสตริงคำตอบที่ถูกครอบงำและอยู่ลำดับที่สูงกว่า โดยคำตอบที่ดีที่สุดจะอยู่ลำดับที่ 1 (1st Frontier) เสมอ แต่ถ้าคำตอบนั้นไม่ถูกครอบงำจะถูกจัดอยู่ในลำดับเดียวกันตามตารางที่ 13

ตารางที่ 11 การแทนที่สตริงคำตอบและฟังก์ชันวัตถุประสงค์รุ่นลูกสตริงที่ 1 (Offspring 2) ในจุดค่าถ่วงน้ำหนัก λ_1

λ_p	String	ชิ้นงาน 20 ชิ้นงาน	พนักงาน 6 คน	f_1	f_2	f_3	f_4
λ_1	Off 2	[11 10 17 3 12 8 7 19 20 16 4 5 18 14 2 13 15 1 9 6]	[3 4 5 1 6 2]	16.83	5	0.092	0.68
λ_2	2	[11 4 12 16 19 8 3 10 17 20 7 5 18 14 2 13 15 1 9 6]	[5 6 3 1 4 2]	15.33	6	0.208	0.53
λ_3	3	[4 8 6 1 2 20 5 14 15 3 12 18 20 13 7 11 16 9 17 19]	[3 4 5 6 2 1]	14.83	5	0.165	0.57
λ_7	7	[3 15 17 9 8 11 2 14 1 4 19 7 13 5 10 6 16 12 20 18]	[3 6 2 1 4 5]	15.33	5	0.164	0.50
λ_9	9	[11 10 14 6 12 8 2 19 20 15 9 5 16 17 1 18 13 7 4 3]	[2 3 1 5 4 6]	15.50	6	0.062	0.57

ปีที่ 13 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม – เมษายน พ.ศ. 2561

ตารางที่ 12 การเปรียบเทียบโดยใช้จุดค่าถ่วงน้ำหนักที่สุ่มได้ (สมมติว่าสุ่มได้ λ_3)

λ_p	String	$g(x \lambda_p, z^*)$	Selection
λ_3	3	1	
λ_3	Offspring 2	1 (เทียบเท่า)	Good

ตารางที่ 13 ตัวอย่างการคิดค่าแข็งแรง ด้วยการการจัดลำดับแบบไม่ถูกครอบงำ

String	Objective				Dummy Fitness
	f_1	f_2	f_3	f_4	
Offspring(1.1)	14.333	6	0.066	0.538	2
Offspring(2.1)	14.333	6	0.085	0.538	3
String 3	14.000	5	0.084	0.538	1
Offspring(4.1)	14.333	5	0.057	0.500	1

ตารางที่ 14 ปัญหาตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

No.	% Unavailable	Line1			Line2			Total Worker	Worker ratio (High : Medium : Low)
		Problem	Model	MPS	Problem	Model	MPS		
P1	5-15	Buxey 29	2	1:3	Sawyer 30	2	2:3	13	(4:8:1) , (2:8:3)
								18	(5:11:2) , (3:11:4)
P2	5-15	Tonge 70	3	2:3:1	Warnecke 58	3	2:1:1	20	(6:13:1) , (5:13:2)
								29	(9:19:1) , (6:19:4)
P3	5-15	Arcus 83	3	2:1:2	Arcus 111	3	1:1:3	33	(10:21:2) , (7:21:5)
								48	(14:31:3) , (12:31:5)
P4	20-30	Scholl 297	2	1:1	Arcus 83	3	1:1:3	30	(9:20:1) , (7:20:3)
								43	(13:28:2) , (11:28:4)

5. การทดลองทางคอมพิวเตอร์

5.1. การออกแบบการทดลอง

เพื่อเป็นการประเมินสมรรถนะของ MOEA/D ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลที่นำเสนอ ผู้วิจัยได้ทดลองใช้ MOEA/D ในการแก้ปัญหาตัวอย่างจำนวนทั้งสิ้น 4 ปัญหา โดย P1 จะเป็นปัญหขนาดเล็ก P2 จะเป็นปัญหขนาดกลาง ส่วน P3 และ P4 จะเป็นปัญหขนาดใหญ่ แต่มีความแตกต่างที่ร้อยละจำนวนของชิ้นงานที่พนักงานทักษะต่ำไม่สามารถทำงานได้ ซึ่งในแต่ละปัญหาแบ่งออกเป็น 4 ปัญหาย่อยตามจำนวนสถานีนงาน และอัตราส่วนของพนักงานในแต่ละทักษะ ดังตารางที่ 14 (รวมทั้งสิ้น มี 16 ปัญหาย่อย) ซึ่งจะทำการเปรียบเทียบกับ อัลกอริทึมการบรรจบ (Combinatorial Optimization with Coincidence : COIN) พัฒนาโดย ปารเมศ ชูติมา และคณะ [15] ซึ่งเป็นอีกอัลกอริทึมหนึ่ง

ที่นิยมใช้และมีประสิทธิภาพในการหาคำตอบที่แท้จริงสำหรับการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแบบหลายวัตถุประสงค์ที่ดีกว่าอัลกอริทึมหลายอัลกอริทึม [15],[16]ซึ่งเป็นอัลกอริทึมที่ได้รับความนิยม และมีการนำไปใช้การแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตรถยนต์แบบหลายวัตถุประสงค์อีกด้วย [17]

เพื่อให้แน่ใจว่าอัลกอริทึมทั้งหมดที่ทำการศึกษาคำตอบได้ทำงานตามสมรรถนะที่ดีที่สุด ดังนั้นพารามิเตอร์ต่างๆของแต่ละอัลกอริทึมจะถูกกำหนดอย่างมีหลักการโดยอ้างอิงจากงานวิจัยที่ผ่านมา เช่น จำนวนประชากรที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 100 ประชากร [18] แต่ในอัลกอริทึม MOEA/D จำนวนของประชากรจะขึ้นอยู่กับจำนวนของวัตถุประสงค์และสัดส่วนในการแบ่งค่าถ่วงน้ำหนัก จึงไม่สามารถกำหนดให้ค่าเท่ากับ 100 ได้ ดังนั้นจึงใช้ $120 (C_{O-1}^{H+O-1}, O = 4, H = 7)$ ทั้ง 2 อัลกอริทึม

ส่วนพารามิเตอร์อื่น เช่น 1. จำนวนของจุดข้างเคียง (MOEA/D) 2. ร้อยละของจำนวนในการสุ่มเลือกจุดอื่นในประชากรย่อยที่ทำการพิจารณา (MOEA/D) 3. ค่าความน่าจะเป็นในการให้รางวัลและลงโทษ (COIN) 4. ร้อยละในการกำหนดจำนวนสตริงคำตอบที่จะนำมาปรับปรุงตารางความน่าจะเป็น (COIN) 5. จำนวนเจเนอเรชัน (MOEA/D และ COIN) จะผ่านการวิเคราะห์ผลทางสถิติเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมตามตารางที่ 15

ตารางที่ 15 พารามิเตอร์ของอัลกอริทึม

Population size		120
Generation		P1 = 500 , P2 P3 = 1500, P4 = 2000
MOEA/D	Neighborhood	P1 P3 P4 : 4 , P2 : 9
	%Replace neighbor	P1 P3 P4 : 0.3 , P2 : 0.5
COIN	Reward/Punish	P1- P3 : 0.2 , P4 : 0.3
	Selection rate	P1 -P4 : 0.5

5.2. ตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึม

การเปรียบเทียบสมรรถนะในการหาคำตอบระหว่าง MOEA/D กับ COIN นั้นจะพิจารณาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ไปพร้อมกันๆ ซึ่งแต่ละอัลกอริทึมอาจค้นพบคำตอบที่ดีที่สุดหลายคำตอบ การจะเปรียบเทียบว่ากลุ่มคำตอบของอัลกอริทึมใดดีกว่าจึงต้องอาศัยตัวชี้วัดตามรูปแบบของปัญหาแบบมัลติวัตถุประสงค์ โดยตัวชี้วัดสมรรถนะที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะอ้างอิงมาจาก [19],[20] รวมทั้งหมด 6 ตัวชี้วัด โดยจะเรียงตามลำดับความสำคัญจากมากไปหาน้อย คือ

1. การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (Convergence) เป็นตัวชี้วัดที่ประเมินว่ากลุ่มคำตอบในแต่ละอัลกอริทึมที่ได้มีความใกล้เคียงกับกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (True Pareto) มากน้อยเพียงใด ซึ่งถือว่าเป็นตัวชี้วัดที่สำคัญที่สุดในบทความนี้

2. การกระจายตัว (Spread) เป็นตัวชี้วัดในการประเมินกลุ่มคำตอบที่ได้มีการกระจายที่สม่ำเสมอเพียงใด

3. อัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอรับเทียบกับกลุ่มคำตอบที่อัลกอริทึมหาค่าได้ (R_{NDS1}) ซึ่งใช้แสดงว่าในคำตอบที่ค้นพบทั้งหมดเป็นคำตอบที่อยู่ในคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงคิดเป็นอัตราส่วนเท่าใดเมื่อเทียบกับคำตอบที่หามาได้

4. อัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอรับเทียบกับกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (R_{NDS2}) ซึ่งใช้แสดงว่าในคำตอบที่ค้นพบทั้งหมดเป็นคำตอบที่อยู่ในคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงคิดเป็นอัตราส่วนเท่าใดเมื่อเทียบกับคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง

5. จำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอรับ (N_{NDS}) คือจำนวนคำตอบที่ดีที่สุด (1st Frontier) ในแต่ละอัลกอริทึม

6. เวลาในการค้นหาคำตอบ (CPU Time)

5.3. ผลการทดลอง

ในการทดลองแก้ปัญหาการจัดสมมูลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะขนานแบบมัลติวัตถุประสงค์ภายใต้ปัญหาประเภทที่ 2 โดยการทำให้โจทย์ละ 3 รอบนั้น เมื่อได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตของแต่ละอัลกอริทึมแล้ว จะนำคำตอบทั้งหมดของทั้ง 2 อัลกอริทึมในโจทย์ตัวอย่างนั้นมาทำการเปรียบเทียบตัวชี้วัดสมรรถนะด้านต่างๆ โดยกำหนดค่าความแข็งแกร่งร่วมกันด้วยวิธี Non-Dominated Sorting โดยจะถือว่ากลุ่มคำตอบที่มีค่าความแข็งแกร่งเท่ากับ 1 (1st Frontier) เป็นกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงและทำการประเมินอัลกอริทึมด้วยตัวชี้วัดที่กำหนดไว้เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมนั้นๆ

การทดลองแก้ปัญหาตัวอย่างเป็นการทดลองผ่านโปรแกรมที่เขียนภาษา C# ประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์ Intel® Core™ i7-4710HQ CPU@2.50GHz RAM 8.00 GB โดยผลการทดลองที่ได้อยู่ในตารางที่ 16 พบว่า MOEA/D สามารถค้นพบกลุ่มคำตอบที่มีค่าต่ำที่สุดที่ต่ำกว่า (ดีกว่า) หรือเทียบเท่าของทุกฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ในเกือบทุกปัญหา ยกเว้น ปัญหา P4 กรณีคำนวณทั้งหมดเท่ากับ 43 ซึ่งค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 (C_7) ที่สูงกว่า

ปีที่ 13 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม – เมษายน พ.ศ. 2561

(แย่กว่า) และ ปัญหา P2 กรณีคนงานทั้งหมดเท่ากับ 20 ซึ่งค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 3 (B_b) ที่สูงกว่า

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการหาคำตอบเบื้องต้นของ MOEA/D นั้นดีกว่า COIN ซึ่งจะสอดคล้องกับตัวชี้วัด Convergence ของ MOEA/D มีค่าน้อยกว่า (ยิ่งเข้าใกล้ 0 ยิ่งดี) ซึ่งหมายความว่ากลุ่มคำตอบที่ได้จาก MOEA/D มีความใกล้เคียงกับกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงมากกว่า และไปทิศทางเดียวกับตัวชี้วัด R_{NDS1} และ R_{NDS2} ของ MOEA/D ที่มีค่ามากกว่า (ยิ่งเข้าใกล้ 1 ยิ่งดี) ซึ่งหมายความว่ากลุ่มคำตอบที่ได้จาก MOEA/D มีสัดส่วนคำตอบที่อยู่ในคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงเมื่อเทียบกับจำนวนคำตอบที่หามาได้ (R_{NDS1}) และเทียบกับจำนวนคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (R_{NDS2}) ที่มากกว่า เมื่อเทียบกับ COIN

ถึงแม้ตัวชี้วัด Spread ของ MOEA/D มีค่ามากกว่า ซึ่งหมายความว่ากลุ่มคำตอบที่ได้จาก MOEA/D มีความกระจายตัวกันที่น้อยกว่า COIN ซึ่งอาจส่งผลมาจากจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบจำ (N_{NDS}) ที่มีค่าน้อยกว่ามาก และในด้านระยะเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบ พบว่า MOEA/D จะใช้เวลาที่นานกว่า COIN ประมาณ 2 เท่าในทุกปัญหา

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองข้างต้นจึงสามารถสรุปได้ว่า MOEA/D นั้นมีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาที่นำเสนอได้ดีกว่า COIN เพราะตัวชี้วัดในการหาคำตอบที่แท้จริง (Convergence, R_{NDS1} , R_{NDS2}) มีค่าที่ดีกว่า ซึ่งจะถือว่าอัลกอริทึมนี้สามารถค้นหาคำตอบได้ดีกว่า แม้ว่าตัวชี้วัดในการกระจายตัวของคำตอบและจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบจำจะมีค่าแย่กว่าก็ตาม เพราะเป็นตัวชี้วัดที่แสดงให้เห็นว่า มีจำนวนและการกระจายตัวของคำตอบให้ผู้แก้ปัญหาได้เลือกนำไปใช้ แต่ถ้ามีจำนวนของคำตอบให้เลือกเยอะแต่เป็นคำตอบที่ไม่ดีก็จะถือว่าเป็นอัลกอริทึมที่ไม่มีประสิทธิภาพเช่นกัน และรวมไปถึงเวลาที่ใช้จะนานกว่า แต่ผู้แก้ปัญหาย่อมพึงพอใจกับอัลกอริทึมที่สามารถค้นหาคำตอบที่ดีได้ภายในระยะเวลาที่ไม่นานจนเกินไป

6. บทสรุป

บทความนี้นำเสนอวิธีการแก้ปัญหาด้วยวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (Multi-Objective Evolutionary Algorithm Based On Decomposition: MOEA/D) ร่วมกับวิธี Bisection มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์แบบขนานที่มากวัตถุประสงค์ภายใต้ปัญหาประเภทที่ 2 ซึ่งทักษะที่หลากหลายเกิดจากความหลากหลายและความสามารถของพนักงาน โดยมีจำนวนวัตถุประสงค์ทั้งสิ้น 4 วัตถุประสงค์ ซึ่งจะพิจารณาค่าที่เหมาะสมที่สุดไปพร้อมๆ กัน ได้แก่ รอบเวลาดำเนินการน้อยที่สุด จำนวนสถานีน้อยที่สุด ความแตกต่างของปริมาณภาระงานระหว่างสถานีนงานมีค่าน้อยที่สุด และความไม่เกี่ยวเนื่องกันของงานในแต่ละสถานีนงานมีค่าน้อยที่สุด

ผลการทดลองใช้ MOEA/D ในการแก้ปัญหาตัวอย่างเพื่อทำการเปรียบเทียบกับอัลกอริทึมการบรรจบ (COIN) ซึ่งเป็นอีกอัลกอริทึมหนึ่งที่นิยม และมีประสิทธิภาพที่ดีในการแก้ปัญหาลักษณะนี้ พบว่า MOEA/D สามารถค้นพบกลุ่มคำตอบที่มีค่าต่ำที่สุดที่ต่ำกว่า (ดีกว่า) หรือเทียบเท่าของทุกฟังก์ชันวัตถุประสงค์ส่วนในด้านของตัวชี้วัดนั้น MOEA/D มีสมรรถนะที่เหนือกว่าในด้านการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด อัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบจำเทียบกับกลุ่มคำตอบที่อัลกอริทึมหาคำตอบได้ และอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบจำเทียบกับกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่แท้จริง แต่ในด้านการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบ จำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบจำ และเวลาในการค้นหาคำตอบนั้นมีสมรรถนะที่ดีไม่เท่า

แต่เมื่อพิจารณาตามลำดับความสำคัญของตัวชี้วัดนั้นจะเห็นว่า MOEA/D สามารถค้นพบกลุ่มคำตอบที่ดี เพราะมีการหาคำตอบที่แท้จริงมากกว่าซึ่งเป็นสิ่งสำคัญที่สุดในการค้นหาคำตอบโดยอัลกอริทึม เพราะผู้แก้ปัญหาส่วนใหญ่น่าจะอยากได้กลุ่มคำตอบที่ดีกว่าถึงแม้จะมีคำตอบให้เลือกน้อยและการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบ

ไม่ดีก็ตาม รวมถึงเวลาในการค้นหาคำตอบนั้นผู้แก้ปัญหา ย่อมพึงพอใจกับอัลกอริทึมที่สามารถค้นหาคำตอบที่ดี ถึงแม้ว่าจะใช้เวลาานานกว่า ซึ่งในบทความนี้เวลาของ MOEA/D อาจจะนานกว่า COIN ถึง 2 เท่า แต่เมื่อพิจารณาถึงเวลาที่ผู้ใช้นั้นเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ ที่นานที่สุดของ MOEA/D คือ 594 วินาที หรือประมาณ 10 นาทีจึงเป็นเวลาสำหรับผู้แก้ปัญหายอมรับได้: ดังนั้นจึงสรุป ได้ว่า MOEA/D เป็นอัลกอริทึมหนึ่งที่ใช้ในการแก้ปัญห การจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการ ประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนานที่มากวัตถุประสงค์ ภายได้ปัญหาประเภทที่ 2 (Type II) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากการนำเสนอวิธีการแก้ปัญหการจัดสมดุลและ จัดสรรพนักงานในบทความนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับ การแก้ปัญหจริงในสถานประกอบการที่ต้องการปรับปรุง สายการประกอบที่มีเวลาดำเนินการไม่คงที่ขึ้นอยู่กับ พนักงาน ถึงแม้จะไม่มีพนักงานทุพพลภาพร่วมอยู่ด้วย เพราะการแก้ปัญหาแบบประเภทที่ 2 นั้นจะเหมาะกับการ ที่มีกำหนดจำนวนสถานงานหรือพนักงานไว้แล้ว แต่ ต้องการทำให้รอบเวลาดำเนินการน้อยที่สุด (วัตถุประสงค์ ที่ 1) รวมถึงวัตถุประสงค์อื่นๆของบทความนี้อาจจะช่วย เพิ่มประสิทธิภาพของสายการประกอบได้อีกด้วย

ปีที่ 13 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม – เมษายน พ.ศ. 2561

ตารางที่ 16 ผลการทดลองแก้ปัญหาตัวอย่าง

Problem	P1				P2				P3				P4																																																			
Total worker	13		18		20		29		33		48		30		43																																																	
Worker ratio	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2																																																
Min Objective																																																																
Cycle time (C_T)	MOEA/D	48.6	50.3	36.2	38.2	243	249	175.2	179	6873	7202	5663	5663	4708	4884	3417	3528																																															
	COIN	48.55	51	36.4	38.25	245.5	249.9	175.2	182	7000	7275	5663	5663	4770	4886	3413	3517																																															
Number of station (N_s)	MOEA/D	8	8	12	11	15	14	22	21	27	26	40	38	23	24	35	36																																															
	COIN	9	8	12	12	16	16	22	23	27	27	41	41	25	25	36	37																																															
Balancing Workload Between Workstations (B_w)	MOEA/D	0.003	0.006	0.004	0.005	0.005	0.004	0.004	0.004	0.005	0.004	0.005	0.004	0.004	0.005	0.005	0.005																																															
	COIN	0.005	0.007	0.005	0.008	0.004	0.006	0.005	0.006	0.006	0.005	0.006	0.006	0.006	0.008	0.007	0.008																																															
Index of Task Unrelated (ITUR)	MOEA/D	0.350	0.409	0.217	0.250	0.630	0.623	0.532	0.540	0.588	0.548	0.448	0.415	0.773	0.779	0.713	0.705																																															
	COIN	0.458	0.435	0.280	0.308	0.652	0.667	0.574	0.567	0.607	0.607	0.495	0.500	0.797	0.796	0.726	0.724																																															
Convergence																																																																
MOEA/D	0.050				0.053				0.018				0.010				0.024				0.032				0.024				0.074				0.001				0.056				0.042																							
COIN	1.425				1.165				1.006				0.386				0.334				0.566				0.963				1.117				1.424				2.940				2.074				2.324				2.060				1.500				3.865				1.586			
Spread																																																																
MOEA/D	0.851				0.602				0.628				0.706				0.845				0.820				0.794				0.660				0.664				0.770				0.683				0.717				0.850				0.832				0.770				0.814			
COIN	0.526				0.541				0.483				0.443				0.621				0.726				0.528				0.456				0.584				0.465				0.534				1.123				0.679				0.710				0.585				0.445			
R_{ND51}																																																																
MOEA/D	0.738				0.747				0.857				0.831				0.964				0.702				0.792				0.771				0.710				0.516				0.851				0.727				0.761				0.970				0.640				0.741			
COIN	0.035				0.039				0.019				0.083				0.100				0.008				0.043				0.004				0				0.012				0				0				0				0.004				0.008							
R_{ND52}																																																																
MOEA/D	0.385				0.409				0.450				0.349				0.391				0.491				0.405				0.488				0.500				0.444				0.500				0.500				0.500				0.500				0.486				0.485			
COIN	0.115				0.091				0.050				0.151				0.109				0.009				0.095				0.012				0				0.056				0				0				0				0.014				0.015							
N_{ND5}																																																																
MOEA/D	21				27				21				28				31				62				24				29				42				36				26				44				38				31				37							
COIN	89				102				101				75				108				81				107				79				108				85				99				66				102				74				98				79			
CPU Time (s)																																																																
MOEA/D	41.21				43.18				41.58				44.32				134.3				132.2				167.9				190.3				314.2				315.5				320.7				331.6				540.7				543.5				593.8				578.6			
COIN	19.82				20.25				20.97				23.99				70.55				63.59				78.21				75.24				158.1				156.4				168.8				167.9				330.3				360.3				396.7				392.8			

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Ghosh and R. J. Gagnon, "A comprehensive literature review and analysis of the design, balancing and scheduling of assembly systems," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 27, no. 4, pp. 637-670, 1989.
- [2] U. Özcan, "Balancing stochastic two-sided assembly lines: A chance-constrained, piecewise-linear, mixed integer program and a simulated annealing algorithm," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 205, no. 1, pp. 81-97, 2010.
- [3] O. Kilinci, "A Petri net-based heuristic for simple assembly line balancing problem of type 2," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 46, no. 1-4, pp. 329-338, 2009.
- [4] A. A. Chaves, L. A. N. Lorena, and C. Miralles, "Hybrid Metaheuristic for the Assembly Line Worker Assignment and Balancing Problem," in *Hybrid Metaheuristics: 6th International Workshop, HM 2009, Udine, Italy, October 16-17, 2009. Proceedings*, M. J. Blesa, C. Blum, L. Di Gaspero, A. Roli, M. Sampels, and A. Schaerf, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009, pp. 1-14.
- [5] W. Zhang, M. Gen, and L. Lin, "A multiobjective genetic algorithm for Assembly Line Balancing problem with worker allocation," *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, pp. 3026-3033, 2008.
- [6] F. F. B. Araújo, A. M. Costa, and C. Miralles, "Balancing parallel assembly lines with disabled workers," *Eur. J. Ind. Eng.*, vol. 9, no. 3, p. 344, 2015.
- [7] H. Gökçen, K. Ağpak, and R. Benzer, "Balancing of parallel assembly lines," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 103, no. 2, pp. 600-609, 2006.
- [8] Q. Zhang and H. Li, "MOEA/D: A Multiobjective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition," *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 11, no. 6, pp. 712-731, 2007.
- [9] A. Scholl and N. Boysen, "Designing parallel assembly lines with split workplaces: Model and optimization procedure," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 119, no. 1, pp. 90-100, 2009.
- [10] A. Scholl, "Data of assembly line balancing problems," Darmstadt Technical University, Department of Business Administration, Economics and Law, Institute for Business Studies (BWL) 1995.
- [11] D. Sparling and J. Miltenburg, "The mixed-model u-line balancing problem," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 36, no. 2, pp. 485-501, 1998.
- [12] Y. K. Kim, Y. Kim, and Y. J. Kim, "Two-sided assembly line balancing: A genetic algorithm approach," *Prod. Plann. Contr.*, vol. 11, no. 1, pp. 44-53, 2000.
- [13] T. O. Lee, Y. Kim, and Y. K. Kim, "Two-sided assembly line balancing to maximize work relatedness and

ปีที่ 13 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม – เมษายน พ.ศ. 2561

- slackness," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 40, no. 3, pp. 273-292, 2001.
- [14] D. E. Goldberg and R. Lingle, "Alleles, loci, and the traveling salesman problem," in *Proceedings of an international conference on genetic algorithms and their applications*, 1985, vol. 154, pp. 154-159: Lawrence Erlbaum, Hillsdale, NJ.
- [15] ปารเมศ ชูติมา, ภาณุวัฒน์ โอฬารวิวัฒน์ชัย, วรินทร์ วัฒนพรพรหม, และ ประภาส จงสฤษดิ์วัฒนา, "การประยุกต์ใช้อัลกอริทึมการบรรจบสำหรับปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแบบลักษณะตัวยูที่ทำการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีหลายวัตถุประสงค์ในระบบผลิตแบบทันเวลาพอดี," การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 47, 2552.
- [16] P. Chutima and P. Olanviwatchai, "Mixed-Model U-Shaped Assembly Line Balancing Problems with Coincidence Memetic Algorithm," *JSEA*, vol. 3, no. 4, pp. 347-363, 2010.
- [17] สถาพร โอฬารวิวัฒน์ชัย และ ปารเมศ ชูติมา, "การจัดลำดับการผลิตแบบหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, vol. 24, no. 1, pp. 87-102, 2557.
- [18] R. K. Hwang, H. Katayama, and M. Gen, "U-shaped assembly line balancing problem with genetic algorithm," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 46, no. 16, pp. 4637-4649, 2008.
- [19] R. Kumar and P. K. Singh, "Pareto Evolutionary Algorithm Hybridized with Local Search for Biobjective TSP," in *Hybrid Evolutionary Algorithms*, A. Abraham, C. Grosan, and H. Ishibuchi, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007, pp. 361-398.
- [20] วัชรวิทย์ ถนันทอง, "การจัดลำดับผลิตรถยนต์แบบหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านด้วยอัลกอริทึมการบรรจบร่วมกับฟิชชี," วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2558.

การจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะตัวยูนานที่มีวัตถุประสงค์
จำนวนมากโดยใช้วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก
Mixed-Model Parallel U-Shaped Assembly Line Balancing under
Many-Objectives Using a Multi-Objective Evolutionary Algorithm Based on
Decomposition

เพ็ญนภัส จิรัชัย¹ ปารเมศ ชุตินา^{2*}

¹นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

²ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Pennapat Jirachai¹ Parames Chutima^{2*}

^{1,2}Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University

Payathai, Bangkok 10330

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

บทคัดย่อ

การจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวยูนานที่มีวัตถุประสงค์จำนวนมากเป็นปัญหาแบบเอ็นพีฮาร์ด (NP-hard) ดังนั้นจำเป็นต้องใช้วิธีการทางฮิวริสติก (Heuristic) มาช่วยเพื่อให้ได้คำตอบที่มีความเหมาะสมที่สุด บทความนี้นำเสนอวิธีการถอดรหัสสตริงคำตอบและการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (Multi-Objective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition: MOEA/D) เพื่อใช้สำหรับการแก้ปัญหาดังกล่าว โดยมีวัตถุประสงค์จำนวน 4 วัตถุประสงค์ที่จะทำการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดไปพร้อมๆกัน ได้แก่ จำนวนสถานีงานน้อยที่สุด จำนวนสถานีน้อยที่สุด ความไม่สมดุลของภาระงานระหว่างสถานีงานน้อยที่สุด และความไม่สัมพันธ์ของชิ้นงานน้อยที่สุด ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า MOEA/D มีสมรรถนะในการแก้ปัญหาที่สูงกว่าการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (BBO) ในด้านการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดอย่างชัดเจน แม้ว่าการกระจายตัวของคำตอบจะไม่มาก และเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบนานกว่า BBO

คำสำคัญ: สายการประกอบยูนาน การจัดสมดุลสายการประกอบ การหาค่าที่เหมาะสมของปัญหาที่มีวัตถุประสงค์จำนวนมาก วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก

ABSTRACT

Mixed-Model Parallel U-shaped assembly line balancing problem under many-Objectives is known as NP-hard problems. Hence, to optimize this problem, heuristic approaches need to be developed. This research proposes a decode method and a Multi-Objective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition (MOEA/D) for solving the problem by optimizing four objectives simultaneously, i.e. minimize the number of workstations, minimize the number of stations, minimize different workload

between workstations, and minimize work unrelatedness. The experiment results show that MOEA/D has better performance than BBO in terms of convergence. However, its spread and CPU time indicators are not better than BBO.

Keyword: Parallel U-shaped assembly line, line balancing, many objective optimization problem, multi-objective evolutionary algorithm based on decomposition.

1. บทนำ

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมต่างๆ มีการแข่งขันสูง ภาคอุตสาหกรรมจึงต้องจัดการการผลิตสินค้าให้ทันตามความต้องการของลูกค้า ดังนั้นการจัดสายการประกอบแบบทันเวลาพอที่จะทำให้ผลิตสินค้าได้หลากหลาย และมีต้นทุนการผลิตต่ำ [1] เนื่องจากระบบมีความยืดหยุ่นสูง (Flexibility) พร้อมทั้งปรับตัวให้เข้ากับการเปลี่ยนแปลงตามความต้องการของลูกค้าที่หลากหลายมากขึ้น จึงต้องมีการปรับเปลี่ยนสายการผลิต จากการผลิตสินค้าประเภทเดียว (Single Production) มาเป็นการผลิตแบบผสม (Mixed-Model Production) และอีกสิ่งหนึ่งที่เป็นการปรับตัวให้เข้ากับสถานการณ์ในปัจจุบันของอุตสาหกรรมต่างๆ สำหรับการจัดการต้นทุนและการผลิตให้ตอบสนองทันความต้องการของลูกค้า คือการออกแบบสายการประกอบ และการวางแผนเครื่องจักร ให้เหมาะสม [2] โดยสายการประกอบ (Assembly Line) นั้นจะหมายถึงระบบการผลิตแบบไหลเลื่อนที่ประกอบด้วย กลุ่มของสถานีงานที่จัดวางต่อเนื่องกัน และมีการเชื่อมโยงกันด้วยสายพานลำเลียงหรือระบบขนย้ายวัสดุอื่นๆ ที่คอยทำหน้าที่ลำเลียงชิ้นงานระหว่างสถานีงาน โดยชิ้นงานแต่ละชิ้นจะเริ่มประกอบขึ้น ที่สถานีงานแรกและถูกส่งไปประกอบต่อในสถานีงานถัดๆ ไปในทุกรอบเวลาการผลิต (Cycle Time) พร้อมกับเริ่มประกอบชิ้นงานใหม่อย่างต่อเนื่องในทุกๆ รอบเวลาการผลิตนี้เช่นกัน การวางแผนเครื่องจักรให้เหมาะสมกับอุตสาหกรรมต่างๆ จะต้องมีการจัดสรรชิ้นงานให้กับสถานีงานต่างๆ ในปริมาณที่เท่าๆ กันเพื่อตอบสนองต่อวัตถุประสงค์ที่กำหนดโดยที่ไม่ละเมิดต่อข้อจำกัดต่างๆ เช่น รอบเวลาการผลิต ลำดับก่อนหลังของ

ชิ้นงาน เป็นต้น เรียกว่า การจัดสมดุลสายการประกอบ (Line Balancing) [3]

รูปแบบสายการประกอบได้ถูกพัฒนามาเรื่อยๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ และความยืดหยุ่นในการผลิต [4] จนมาเป็นสายการประกอบลักษณะตัวยูขนาน (Balancing of Parallel U-Shaped Assembly Lines) คิดค้นโดย Kucukkoc และ Zhang [2] โดยนำแนวคิดสายการประกอบแบบขนานมาประยุกต์ใช้กับสายการประกอบรูปตัวยูจึงเกิดสายการประกอบรูปตัวยู 2 สายวางขนานกัน ซึ่งการจัดวางสายการประกอบเช่นนี้ ทำให้เกิดประโยชน์ในการมอบหมายงานไปยังสถานีงานระหว่างสายการประกอบด้านนอกและด้านใน หรือระหว่างคู่สายที่อยู่ติดกัน เรียกว่า สถานีงานร่วม (Multi-Line Workstation) ทำให้ลดความจำเป็นในการใช้แรงงาน ลดการจัดตั้งสถานีงาน และ ใช้สอยพื้นที่การผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าสายการประกอบรูปตัวยูขนานมีประสิทธิภาพดีกว่าในด้านการจัดสรรพนักงาน การเพิ่มทักษะการทำงานของพนักงาน และจำนวนสถานีงานน้อยกว่าสายการประกอบรูปตัวยูเพียงสายเดียว แต่การแก้ปัญหาของสายการประกอบรูปตัวยูขนานของ Kucukkoc และ Zhang [2] นั้น มีวัตถุประสงค์ในการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเพียง 2 วัตถุประสงค์ มีผลิตภัณฑ์ที่เข้าสู่สายการประกอบเพียงรูปแบบเดียว (Single Model) วิธีการถอดรหัสตรงคำตอบหรือวิธีการจัดสมดุลสายการประกอบนั้นเป็นแบบแผนที่ตายตัว ในการจัดชิ้นงานลงสถานีงานยังไม่อิสระ และใช้วิธี Parallel U-Line Heuristic: PUH ในการแก้ปัญหา ซึ่งวิธีที่ใช้ในการหาคำตอบอาจไม่ได้คำตอบที่ดีที่สุด เนื่องจากเป็นงานวิจัย

แรกสำหรับการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบรูปตัวยูขนาน

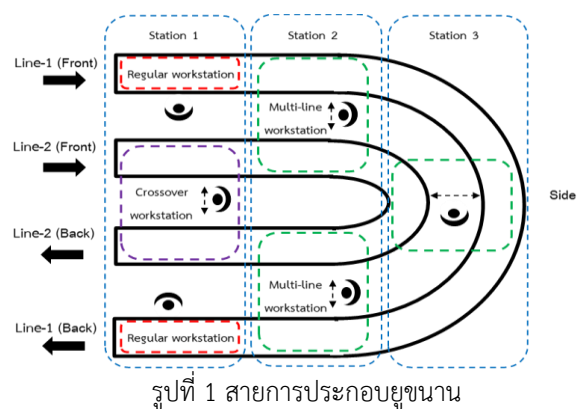
บทความนี้จึงนำเสนอวิธีการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวยูขนานที่มีวัตถุประสงค์จำนวนมาก รวมถึงวิธีการถอดรหัสสตริงคำตอบที่เพิ่มความอิสระในการจัดชั้นงานลงสายการประกอบ โดยกำหนดวัตถุประสงค์ทั้งหมด 4 วัตถุประสงค์ ได้แก่ จำนวนสถานีงานที่น้อยที่สุด จำนวนสถานีงานน้อยที่สุด ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด และความสัมพันธ์ของงานที่ไม่เกี่ยวเนื่องกันภายในสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งปัญหาดังกล่าวเป็นปัญหาแบบเอ็นพีฮาร์ด (NP-Hard) จึงต้องนำอัลกอริทึมมาช่วยในการแก้ปัญหา โดยงานวิจัยนี้ใช้อัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (Multi-Objective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition: MOEA/D) ที่พัฒนาโดย Zhang and Li [5] เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาที่มีวัตถุประสงค์มากกว่า 3 วัตถุประสงค์ขึ้นไปได้พร้อมๆ กัน ซึ่งปัญหาดังกล่าวนี้นี้จะเรียกว่า การเพิ่มประสิทธิภาพของปัญหาที่มีวัตถุประสงค์จำนวนมาก (Many-Objective Optimization Problems: MaOPs) [6] และทำการเปรียบเทียบกับอัลกอริทึมการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (Biogeography-based Optimization: BBO) [7] ซึ่งเป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบ

2. สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวยูขนาน

สายการประกอบรูปตัวยูขนานที่นำเสนอนี้ แต่ละสายการประกอบจะมีผลิตภัณฑ์เข้าสู่สายการประกอบแบบผสม เพื่อผลิตสินค้าประเภทเดียวกันได้จำนวนหลายรุ่น โดยสามารถผลิตสินค้าสลับรุ่นไปมาได้อย่างอิสระไม่ต้องปรับตั้งเครื่องจักรใหม่ และด้วยความยืดหยุ่นของสายการประกอบลักษณะยูขนานนี้ ทำให้ผลิตสินค้าได้ทันตาม

ความต้องการอย่างรวดเร็ว ลดการใช้แรงงาน และมีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลมากขึ้น

โดยแบ่งสถานีงานในสายการประกอบลักษณะตัวยูขนานได้เป็น 3 ประเภท คือ 1. สถานีงานปกติ (Regular Workstation) คือ สถานีงานที่ขึ้นงานภายในสถานีงานมีทิศทางการทำงานไปในทิศทางเดียวกันตามลำดับความสัมพันธ์ของชั้นงานบนสายการประกอบใดสายการประกอบหนึ่ง 2. สถานีงานร่วม (Multi-line Workstations) คือ สถานีงานที่มีชั้นงานภายในสถานีงานอยู่บนสายการประกอบทั้งด้านในและด้านนอก (พนักงานสามารถทำงานได้ทั้งด้านหน้าและด้านหลังของตนเอง) 3. สถานีงานจุดข้าม (Crossover Workstations) คือ สถานีงานที่มีชั้นงานที่ต้องทำอยู่บนด้านหน้าและด้านหลังของสายการประกอบด้านในของรูปตัวยูขนาน โดยพนักงานสามารถปฏิบัติงานที่ด้านหน้าและหมุนตัวกลับมาทำงานที่ด้านหลังได้ ดังรูปที่ 1



สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวยูขนานจะมีการดำเนินงานภายใต้รอบเวลาการผลิตเดียวกันหรือที่เรียกว่ารอบเวลาการผลิตร่วม (Common Cycle Time) แผนภาพลำดับก่อนหลังของแต่ละสายการประกอบที่ใช้ในการจัดสมดุลจะอยู่ในรูปของแผนภาพลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังร่วม (Combined Precedence Diagram: CPD) [8] ไว้แสดงข้อมูลว่าชั้นงาน (Task) ต่างๆ ในการประกอบสินค้าทุกรุ่นต้องทำก่อนหรือหลังชั้นงานใดบ้าง (ลูกศรในแผนภาพจะโยงจากโหนด

x ไปไหนต่อ y หมายถึงชิ้นงาน x ต้องทำก่อนหน้าชิ้นงาน y โดยตรง)

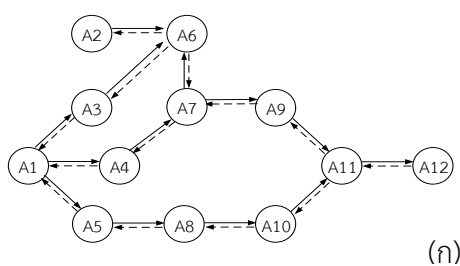
แต่สำหรับสายการประกอบลักษณะยูนิขานนี้ การพิจารณาแผนภาพลำดับความสำคัญก่อนหลัง เพื่อจัดชิ้นงานลงสถานีงาน จะมองย้อนกลับได้ (ลูกศรเส้นปะในแผนภาพจะโยงจากโหนด y ไปไหนต่อ x) และเนื่องจากเวลาที่ใช้ในแต่ละชิ้นงาน (Task Time) อาจแตกต่างกันไปตามรุ่นของสินค้า ในการจัดสมดุลจึงอาศัยเวลาชิ้นงานรวม (Combined Task Time) ที่เฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักจากเวลาชิ้นงานของสินค้าทุกรุ่นประกอบการพิจารณา ซึ่งมีวิธีการคำนวณดังนี้ [9]

กำหนดให้ M เป็นจำนวนรุ่นของสินค้าที่ผลิตบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสม, D_m เป็นปริมาณการผลิตสินค้ารุ่น m โดย $m = \{1, \dots, M\}$, t_{im} คือเวลาชิ้นงาน i

ของ สินค้ารุ่น m เมื่อ $i = \{1, \dots, N\}$ และ $q_m = \frac{D_m}{\sum_{m=1}^M D_m}$ คือ สัดส่วนของปริมาณการผลิตสินค้ารุ่น m เทียบกับปริมาณการผลิตรวมทุกรุ่น เวลาชิ้นงานรวม i คำนวณได้จากสมการ

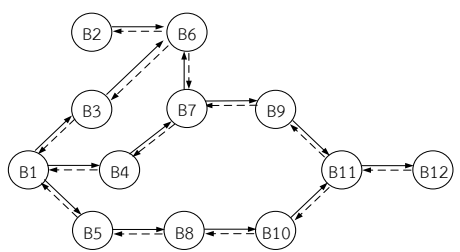
$$t_i = \sum_{m=1}^M q_m t_{im} \quad (1)$$

โดย สายการประกอบที่ 1 ผลิตสินค้า A จำนวน 2 รุ่น ได้แก่ รุ่น A_I และ A_{II} สัดส่วนการผลิต $q_{A_I} = q_{A_{II}} = \frac{1}{2}$ ขณะที่สายการประกอบที่ 2 ผลิตสินค้า B จำนวน 2 รุ่นเช่นกัน ได้แก่ รุ่น B_I และ B_{II} สัดส่วนการผลิตสินค้ารุ่น $q_{B_I} = \frac{2}{3}$ และ $q_{B_{II}} = \frac{1}{3}$ พร้อมทั้งปรับแผนภาพลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังรวม ของผลิตภัณฑ์ A และ B ได้ดังรูปที่ 2 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



เวลา ชิ้นงาน	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12
รุ่น A _I	7	2	2	4	2	3	3	7	4	2	2	4
รุ่น A _{II}	3	2	2	6	2	3	5	7	4	6	2	2
รวม	5	2	2	5	2	3	4	7	4	4	2	3

(ก)



เวลา ชิ้นงาน	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12
รุ่น B _I	5	2.5	1	6	1	3	7	4.5	2	4	2.5	3.5
รุ่น B _{II}	5	1	1	3	4	3	7	3	2	4	4	2
รวม	5	2	1	5	2	3	7	4	2	4	3	3

(ข)

รูปที่ 2 ลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังรวมและเวลาชิ้นงานสำหรับการปฏิบัติงาน (ก) ผลิตภัณฑ์ A บนสายการประกอบ 1 และ (ข) ผลิตภัณฑ์ B บนสายการประกอบ 2 [2]

2.1 สตรีงคำตอบ

สตรีงคำตอบ คือ สตรีงที่ระบุค่าลำดับความสำคัญของชิ้นงานต่างๆ บนสายการประกอบรูปตัวยูนิขาน (Priority String) โดยค่าลำดับความสำคัญเป็นตัวบ่งชี้ว่า ถ้าขณะกำลังจัดสมดุลนั้นมีชิ้นงานหลายชิ้นงานที่พร้อมถูกนำไปจัดสรรลงสถานีงานได้ ชิ้นงานใดจะถูกนำไปจัดลง

สถานีงานก่อน จะพิจารณาจากค่าลำดับความสำคัญแต่ละชิ้นงาน โดยค่าลำดับความสำคัญเป็นเลขจำนวนเต็มบวกที่ไม่ซ้ำกันตั้งแต่ 1, 2, ..., จนถึง N เมื่อ N คือ จำนวนชิ้นงานทั้งหมดบนสายการประกอบตัวยูนิขาน ตัวอย่างสตรีงคำตอบของปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวยูนิขาน แสดงดังตารางที่ 1

สตริงคำตอบของปัญหานี้มีจำนวนบิตทั้งสิ้น 24 บิตตามจำนวนชั้นงาน ซึ่งแต่ละชั้นงานจะมีค่าลำดับความสำคัญแตกต่างกันไปตั้งแต่ 1 ถึง 24

เงื่อนไขในการจัดสรรชั้นงานลงสถานีงานของสายการประกอบแบบลักษณะยูขนาน จะต้องพิจารณาความเป็นไปได้ของสถานีงานในการเลือกชั้นงานลงสถานีงาน ซึ่งอธิบายหลักการ ไว้ดังนี้

1. ถ้าชั้นงานก่อนหน้า ที่ถูกจัดลงสถานีงาน คือชั้นงานที่อยู่บนสายการประกอบที่ 1 ด้านหน้า ชั้นงานต่อไปที่สามารถเลือกลงสถานีงานได้ คือ ชั้นงานที่อยู่บนสายการประกอบที่ 1 และ 2 ด้านหน้า

2. ถ้าชั้นงานก่อนหน้าที่ถูกจัดลงสถานีงาน คือ ชั้นงานที่อยู่บนสายการประกอบที่ 2 ด้านหน้า ชั้นงานต่อไปที่สามารถเลือกลงสถานีงานได้ คือ ชั้นงานที่อยู่บนสายการประกอบที่ 1 และ 2 ด้านหน้า และสายการประกอบที่ 2 ด้านหลัง

3. ถ้าชั้นงานก่อนหน้าที่ถูกจัดลงสถานีงาน คือชั้นงานที่อยู่บนสายการประกอบที่ 2 ด้านหลัง ชั้นงานต่อไปที่สามารถเลือกลงสถานีงานได้ คือ ชั้นงานบนสายการประกอบที่ 2 ด้านหน้า และด้านหลัง และสายการประกอบที่ 1 ด้านหลัง

4. ถ้าชั้นงานก่อนหน้าที่ถูกจัดลงสถานีงาน คือชั้นงานที่อยู่บนสายการประกอบที่ 1 ด้านหลัง ชั้นงานต่อไปที่สามารถเลือกลงสถานีงานได้ คือ ชั้นงานที่อยู่บนสายการประกอบที่ 2 และ 1 ด้านหลัง

5. การเกิดสถานีงานจุดข้ามหรือสถานีงานร่วม จะมีการเอียงสถานีได้ไม่เกิน 1 สถานี ถ้าชั้นงานที่เลือก ณ ขณะนั้นทำให้เกิดการเอียงสถานีเกิน 1 สถานี จะทำการตัดชั้นงานนั้นออกแล้วทำการเลือกชั้นงานใหม่ตามค่าลำดับความสำคัญ

2.2 การถอดรหัสสตริงคำตอบ

กระบวนการถอดรหัสสตริงคำตอบมีวิธีการคือ นำสตริงที่ได้พิจารณาพร้อมกับแผนภาพลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังของชั้นงาน ซึ่งจะต้องพิจารณาสองด้านพร้อมๆ

กันคือ พิจารณาจากด้านหน้าไปด้านหลัง และด้านหลังมาด้านหน้า (รูปที่ 2) จากนั้นทำตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. จัดทำรายการชั้นงานที่สามารถจัดลงสายการประกอบได้ก่อน แล้วเลือกชั้นงานแรกจัดลงสถานีงานจากค่าลำดับความสำคัญ (Priority) โดยชั้นงานที่มีค่าลำดับความสำคัญน้อยถูกเลือกก่อน

2. ปรับปรุงชั้นงานที่ยังไม่ถูกเลือก แผนภาพลำดับความสัมพันธ์ของชั้นงาน เวลาที่เหลือให้ปฏิบัติงานในรอบเวลาการผลิต ความเป็นไปได้ของสถานีงาน

3. จัดชั้นงานถัดไปลงสถานีงาน โดยพิจารณาค่าลำดับความสำคัญน้อยจัดลงก่อน และเงื่อนไขความเป็นไปได้ของสถานีงาน

4. จัดชั้นงานลงสถานีงานจนเต็มรอบเวลาการผลิต หรือไม่มีชั้นงานที่สามารถจัดลงได้แล้ว จึงปิดสถานีงาน

5. จัดชั้นงานลงสายการประกอบจนครบทุกชั้นงาน

6. ประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function)

3. ฟังก์ชันหลายวัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ในการจัดสมดุลสายการประกอบนี้มีจำนวนทั้งสิ้น 4 วัตถุประสงค์ โดยการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของวัตถุประสงค์ทั้งหมด จะถูกหาคำตอบไปพร้อมๆ กัน ดังนี้

3.1 จำนวนสถานีงานน้อยที่สุด

เพื่อลดจำนวนพนักงาน ที่ใช้ในระบบการผลิตให้น้อยที่สุด หรือคือการทำให้มีจำนวนสถานีงานน้อยที่สุด

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

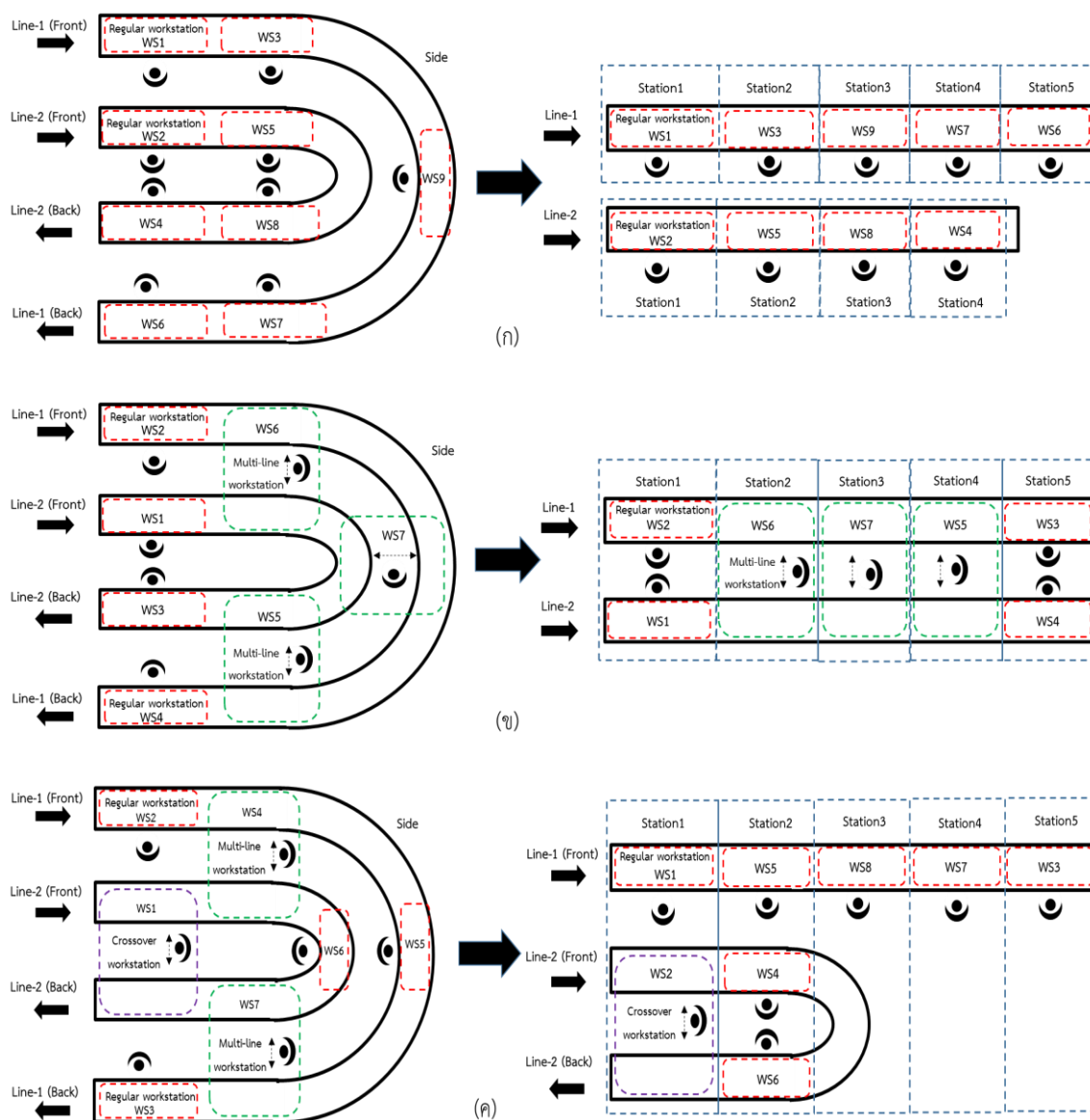
3.2 จำนวนสถานีน้อยที่สุด

เพื่อให้การจัดสมดุลสายการประกอบนั้นมีขนาดสั้นที่สุด หรือทำให้มีการสูญเสียพื้นที่ใช้สอยน้อยที่สุด

$$\text{Minimize : } N_s \quad (3)$$

ตารางที่ 1 สตริงคำตอบของปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวยูขนาบ

Task	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12
String	15	8	9	5	24	18	14	20	7	6	4	11	1	13	16	17	23	21	10	12	2	3	22	19



รูปที่ 3 การนับจำนวนสถานีตามประเภทสถานีงานบนสายการประกอบ (ก) สถานีงานปกติทั้งหมด (ข) สถานีงานปกติและสถานีงานร่วม (ค) สถานีงานปกติและสถานีจุดข้าม

เนื่องจากการถอดรหัสสตริงคำตอบของบทความนี้ คำตอบที่ได้มีหลากหลายซึ่งสายการประกอบนั้นอาจจะไม่ใช่สายการประกอบลักษณะยูขนาบอย่างแท้จริง ดังต่อไปนี้ 1. สถานีงานบนสายการประกอบเป็นสถานีงานปกติทั้งหมด 2. สถานีงานบนสายการประกอบเป็นสถานี

งานปกติและสถานีงานร่วม 3. สถานีงานบนสายการประกอบมีเฉพาะสถานีงานปกติและสถานีจุดข้าม

ดังนั้นการหาจำนวนสถานีงานที่น้อยที่สุดจะมีการนับแตกต่างกันตามลักษณะประเภทสถานีงานบนสายการประกอบ ดังรูปที่ 3 เพื่อมุ่งเน้นให้คำตอบของการจัด

สมดุลสายการประกอบลักษณะยูนิตานี้ เป็นจริงมากที่สุด โดยสายการประกอบยูนิตานี้ที่แท้จริง และการนับจำนวนสถานี แสดงดังรูปที่ 1

3.3 ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด

คือการทำให้ผลรวมเวลาชิ้นงานรวมของสถานีงานต่างๆ มีการกระจายตัวแบบยูนิฟอร์ม ซึ่งช่วยเพิ่มอัตราการผลิต ลดความแออัดบนสายการประกอบ และทำให้เกิดความเท่าเทียมกันระหว่างสถานีงาน [10] หรือคือการทำให้เกิดความสมดุลของภาระงานระหว่างสถานีงานมากที่สุด โดยมีขั้นตอนการคำนวณดังต่อไปนี้

กำหนดให้ m_l และ m_{l+1} เป็นรุ่นของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะยูนิตาน l และ $l+1$ ตามลำดับ เมื่อ $m_l = \{1, \dots, m_l\}$ และ $m_{l+1} = \{1, \dots, m_{l+1}\}$

$S_{k,b}$ คือค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์ระหว่างรอบเวลาการผลิตรวม (CCT) เวลาชิ้นงานรวมที่สถานีงานที่ k ประเภทสถานีงาน b ซึ่งแบ่งเป็นสถานีงานแยก (RW) สถานีงานจุดข้าม (CW) และสถานีงานรวม (MW) โดยสถานีงานแต่ละประเภทมีสมการการคำนวณดังนี้

สถานีงานปกติ

$$S_{k,RW} = \sum_{m_l=1}^{M_l} q_{ml} |CC_T - TT_{k,1,m_l,l}| \quad \forall l \in \{1,2\} \quad (4)$$

สถานีงานจุดข้าม

$$S_{k,CW} = \sum_{m_{F2}=1}^{M_2} \sum_{m_{B2}=1}^{M_2} q_{m_{F2}} q_{m_{B2}} |CC_T - TT_{k,CW,m_{F2},F2} - TT_{k,CW,m_{B2},B2}| \quad (5)$$

สถานีงานรวม

$$S_{k,MW} = \sum_{m_1=1}^{M_1} \sum_{m_2=1}^{M_2} q_{m_1} q_{m_2} |CC_T - TT_{k,MW,m_1,1} - TT_{k,MW,m_2,2}| \quad (6)$$

เมื่อ $TT_{k,b,m,L}$ คือ เวลาในการปฏิบัติงานทั้งหมดของแต่ละสถานีงาน

และหาค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์รวม (TAD) ของทุกสถานีงานจากสมการ

$$TAD = \sum_{k=1}^{N_w} \sum_{b=RW}^{MW} S_{k,b} \quad (7)$$

ดังนั้นสามารถคำนวณค่าความสมดุลของภาระงานระหว่างสถานีงาน (B_b) ตามสมการที่ 8 ซึ่งดัดแปลงมาจาก สมการของ Vilarinho และ Simaria [11] ทั้งนี้ B_b จะมีค่าอยู่ ระหว่าง 0 ถึง 1 โดยค่า B_b ที่ต่ำจะแสดงถึงความสมดุลที่สูง

$$\text{Minimize } B_b = \frac{N_w}{N_w - 1} \sum_{k=1}^{N_w} \sum_{b=RW}^{MW} \left(\frac{S_{k,b}}{TAD} - \frac{1}{N_w} \right)^2 \quad (8)$$

เมื่อ N_w คือ จำนวนสถานีงานทั้งหมด

3.4 ความสัมพันธ์ของงานที่ไม่เกี่ยวเนื่องกันภายในสถานีงานน้อยที่สุด

เป็นการทำให้งานในสถานีงานมีความสัมพันธ์กันมากขึ้น เพื่อให้การปฏิบัติงานมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นโดยชิ้นงานสองชิ้นงานใดๆ จะถือว่ามีความสัมพันธ์กันก็ต่อเมื่อในแผนภาพลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังนั้นชิ้นงานมีการเชื่อมโยงกันโดยตรง [12] เพื่อให้การพิจารณาวัตถุประสงค์นี้เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับวัตถุประสงค์อื่นๆ ดังนั้นวัตถุประสงค์นี้จึงเป็นการทำให้ MITR (Modified Index of Task Relatedness) มีค่าต่ำที่สุด เพื่อให้ความสัมพันธ์ของงานที่ไม่เกี่ยวเนื่องกันภายในสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 9

$$\text{Minimize } MITR = 1 - \frac{N_w}{\sum_{k=1}^{N_w} SN_k} \quad (9)$$

เมื่อ SN_k คือ จำนวนเครือข่ายของชิ้นงานที่มี ความสัมพันธ์ก่อนหลังโดยตรงในสถานีงานที่ k

4. วิธีเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบขั้นตอนวิธีวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์ โดยยึดหลักการจำแนก (MOEA/D) เป็นวิธีการที่ใช้ในการพิจารณาวัตถุประสงค์มากกว่า 3 วัตถุประสงค์ไปพร้อมๆกัน โดยจะมีการกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักบนเซต p ของแต่ละวัตถุประสงค์ i (λ_{pi}) ซึ่งจำนวนค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และจำนวนส่วนในการแบ่งค่าถ่วงน้ำหนักในแต่ละวัตถุประสงค์ จะส่งผลต่อจำนวนเซตของค่าถ่วงน้ำหนัก (Lambda Set) หรือจำนวนของสตริงคำตอบ (Population Size) จากนั้นทำการหาสตริงข้างเคียง (Neighborhood) จากระยะห่างระหว่างจุด (Euclidian Distance) ของค่าถ่วงน้ำหนัก (λ_{pi}) และทำการพัฒนาคำตอบของประชากร โดยใช้การสลับสายพันธุ์ (Crossover) ซึ่งเป็นวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) เพื่อให้ได้คำตอบรุ่นใหม่ที่มีความคล้ายคลึงกับคำตอบรุ่นเดิมที่เป็นค่าที่ดี ซึ่งหลักการในการหาคำตอบที่มีหลายวัตถุประสงค์โดยใช้หลักการจำแนกของอัลกอริทึมนี้คือวิธีเทบีเชฟฟ์ (Tchebycheff Approach) [5] มีดังนี้

4.1 ขั้นตอนการทำงานของ MOEA/D

ขั้นตอนการทำงานของ MOEA/D สำหรับการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวยูนานที่มีวัตถุประสงค์จำนวนมากมีขั้นตอนดังนี้ (ดูรูปที่ 4 ประกอบ)

ตัวอย่างการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวยูนานที่มีวัตถุประสงค์จำนวนมากนั้น จะนำข้อมูลต่างๆของชิ้นงานของผลิตภัณฑ์ A และ B ที่เข้าสู่สองสายการประกอบดังรูปที่ 2 มาใช้ในการแก้ปัญหาและรอบเวลาการผลิตรวมเท่ากับ 10 หน่วยเวลา

พารามิเตอร์ที่ต้องกำหนดค่าของ MOEA/D คือ

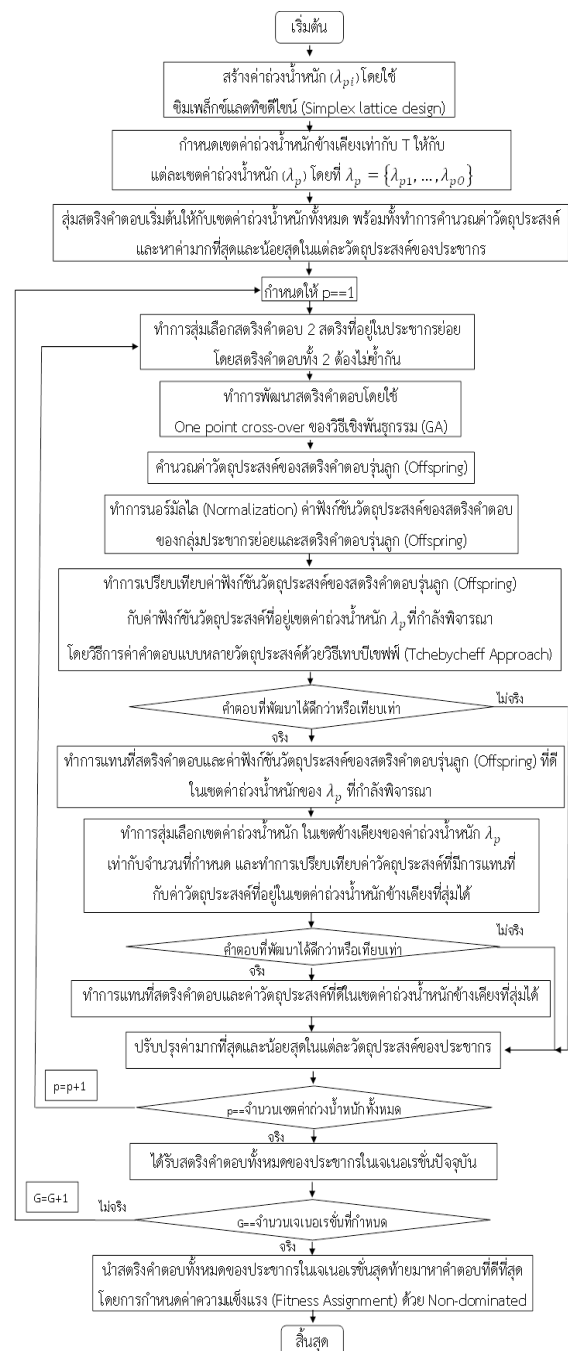
- จำนวนส่วนในการแบ่งค่าถ่วงน้ำหนักในแต่ละวัตถุประสงค์ (H) คือ 2
- จำนวนของเซตข้างเคียง (T) คือ 4

- ร้อยละในการกำหนดจำนวนครั้งในการสุ่มเซตข้างเคียง คือ ร้อยละ 30

- จำนวนวัตถุประสงค์ทั้งหมด (O) เท่ากับ 4

ดังนั้นจำนวนเซตของค่าถ่วงน้ำหนักทั้งหมดหรือจำนวนประชากร (P) เท่ากับ 10 คำนวณได้ดังนี้

$$\text{lambda set} = C_{O-1}^{H+O-1} = C_{4-1}^{2+4-1} = C_3^5 = 10$$



รูปที่ 4 แผนภาพการทำงานของ MOEA/D

ขั้นที่ 1 สร้างค่าถ่วงน้ำหนัก λ_{pi} โดยใช้ฟังก์ชัน ซิมเพล็กซ์แลตทิซดีไซน์ (Simplex Lattice Design) ซึ่งจะเป็นตารางเมทริกซ์ขนาดเท่ากับ จำนวนของเซตค่าถ่วงน้ำหนัก (P) $\times$ จำนวนวัตถุประสงค์ทั้งหมด (O) ดังตารางที่ 2 โดย $\sum_{i=1}^O \lambda_{pi} = 1 \forall p \in P$ และ $\lambda_{pi} \geq 0$ หรือคิดจาก $\{0/H, \dots, H/H/H\}$ จะได้ $\{0/2, 1/2, 2/2\}$ ดังนั้น ค่าถ่วงน้ำหนักที่จะเป็นได้ คือ 0, 0.5 และ 1

ตารางที่ 2 ค่าถ่วงน้ำหนัก λ_{pi} ในแต่ละเซตค่าถ่วงน้ำหนัก

λ_p	λ_{p1}	λ_{p2}	λ_{p3}	λ_{p4}
1	0	1	0	0
2	1	0	0	0
3	0	0.5	0.5	0
4	0.5	0	0.5	0
5	0	0	0.5	0.5
6	0.5	0.5	0	0
7	0	0.5	0	0.5
8	0.5	0	0	0.5
9	0	0	0	1
10	0	0	1	0

ขั้นที่ 2 กำหนดเซตข้างเคียง (T) ให้กับแต่ละเซตค่าถ่วงน้ำหนัก โดยเลือกจากระยะห่างระหว่างจุด (Euclidean Distances) ของเซตค่าถ่วงน้ำหนักที่สนใจ (λ_p) กับเซตค่าถ่วงน้ำหนักเซตอื่น (λ_j) โดยคำนวณจากสมการที่ 10

$$d_{pj} = \sqrt{\sum_{i=1}^O (\lambda_{pi} - \lambda_{ji})^2} \quad \forall p \in P, \forall j \in P, p \neq j \quad (10)$$

เมื่อ d_{pj} คือ ระยะห่างระหว่างจุดของเซตถ่วงน้ำหนัก p กับ j

O คือ จำนวนวัตถุประสงค์ทั้งหมด แล้วเลือกค่าน้อยที่สุดตามจำนวน T ซึ่ง T=4

ขั้นที่ 3 สร้างสตริงคำตอบเริ่มต้นให้กับเซตค่าถ่วงน้ำหนักทั้งหมด โดยการสุ่ม พร้อมทั้งหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ตามตารางที่ 3 และหาค่าน้อยที่สุดและมากที่สุดของแต่ละค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ขั้นที่ 4 กำหนดเซตค่าถ่วงน้ำหนักที่ทำการพิจารณา (Initial Point) ด้วยการกำหนดค่า P โดยค่า $p = \{1, 2, \dots, P\}$ เพื่อกำหนดกลุ่มประชากรย่อยที่จะทำการพัฒนาคำตอบ ดังตารางที่ 4

ขั้นที่ 5 สุ่มเลือก 2 สตริงคำตอบจากกลุ่มประชากรย่อยในตารางที่ 4 โดย 2 สตริงคำตอบนั้นต้องไม่ซ้ำกัน

ขั้นที่ 6 ทำการพัฒนาสตริงคำตอบที่สุ่มได้โดยการสลับสายพันธุ์แบบ One Point Cross-over โดยสลับสายพันธุ์ระหว่าง 2 สตริงคำตอบแบบ 1 ตำแหน่ง และทำการซ่อมแซมสตริงคำตอบรุ่นลูก (Offspring) โดยใช้ Mapping Relationship ของ Goldberg และ Lingle [13]

ขั้นที่ 7 คำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูกที่มีการซ่อมแซมแล้ว

ขั้นที่ 8 ทำการนอร์มัลไล (Normalization) ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบของกลุ่มประชากรย่อยและสตริงคำตอบรุ่นลูก คำนวณได้จากสมการที่ 11

$$\bar{f}_i = \frac{f_i - z_i^*}{z_i^{nad} - z_i^*} \quad (11)$$

เมื่อ z_i^* คือ $\min\{f_i(x) | x \in P\}$

z_i^{nad} คือ $\max\{f_i(x) | x \in P\}$

โดยที่ $z_i^* = (z_1^*, \dots, z_O^*)$, $z_i^{nad} = (z_1^{nad}, \dots, z_O^{nad})$

โดยก่อนการนอร์มัลไลซ์ ต้องทำการปรับปรุงค่ามากที่สุดและน้อยที่สุดในแต่ละวัตถุประสงค์ของประชากรเพื่อเปรียบเทียบค่าระหว่างค่าวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูกกับค่ามากที่สุดและน้อยที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์เดิม

ขั้นที่ 9 เปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูก กับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่อยู่ในเซตค่าถ่วงน้ำหนัก λ_p ที่กำลังพิจารณา โดยวิธีการหาค่าคำตอบแบบหลายวัตถุประสงค์ด้วยวิธีเทบปีเซฟฟ์ คำนวณได้จากสมการที่ 12

$$g(x | \lambda_p, z^*) = \max_{1 \leq i \leq O} \{\lambda_{pi} | f_i(X) - z_i^* | \} \quad (12)$$

เมื่อ z_i^* คือ ค่าเป้าหมายของวัตถุประสงค์ i โดย
 $i = 1, \dots, O$ กรณีหาค่าของคำตอบที่น้อย
 ที่สุด $z_i^* = \min\{f_i(X)\}$
 $(x|\lambda_p, z^*)$ คือ ผลต่างที่มีค่ามากที่สุดของค่า
 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ i กับค่า เป้าหมาย
 ของวัตถุประสงค์ i ที่ทำการหาค่าต่าง
 น้ำหนักบนเซต p ของวัตถุประสงค์
 โดยมีขั้นตอนการเปรียบเทียบและแทนที่สตริงตอบ
 ดังต่อไปนี้

1. นำค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ผ่านการนอร์มัลไลแล้ว
 ของทั้งสตริงคำตอบรุ่นลูก และสตริงคำตอบที่อยู่ในเซต
 ค่าถ่วงน้ำหนัก λ_p ที่กำลังพิจารณาคูณกับค่าถ่วงน้ำหนัก
 ของแต่ละวัตถุประสงค์ในเซตค่าถ่วงน้ำหนัก λ_p ที่กำลัง
 พิจารณา

2. หาค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ $g(x|\lambda_p, z^*)$ ของสตริง
 คำตอบรุ่นลูก ทั้ง 2 สตริง และสตริงคำตอบที่อยู่ในเซตค่า
 ถ่วงน้ำหนัก λ_p ที่กำลังพิจารณา

ตารางที่ 3 สตริงคำตอบเริ่มต้นของเซตค่าถ่วงน้ำหนักทั้งหมดพร้อมทั้งค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์

λ_p	String	Task priority 24 Tasks	f_1	f_2	f_3	f_4
λ_1	1	[15 8 9 5 24 18 14 20 7 6 4 11 1 13 16 17 23 21 10 12 2 3 22 19]	9	6	0.042	0.357
λ_2	2	[23 22 24 18 9 8 15 1 19 16 12 4 17 3 5 7 10 14 21 2 13 20 11 6]	10	4	0.047	0.412
λ_3	3	[19 14 4 22 21 20 15 10 3 13 1 24 5 6 9 23 7 2 12 18 11 17 8 16]	9	7	0.016	0.5
λ_4	4	[19 18 22 12 24 15 1 14 7 11 2 21 16 9 13 8 17 10 6 3 20 5 4 23]	10	6	0.094	0.412
λ_5	5	[18 10 1 6 20 11 2 7 22 17 12 4 13 5 21 23 3 8 24 14 19 9 15 16]	10	4	0.056	0.474
λ_6	6	[8 9 5 10 2 22 20 13 21 18 24 15 6 14 17 1 19 16 12 7 23 3 11 4]	10	5	0.061	0.545
λ_7	7	[9 1 18 24 7 21 15 4 3 5 8 22 2 20 23 11 16 14 12 19 6 10 17 13]	10	7	0.082	0.375
λ_8	8	[22 10 9 3 19 15 8 21 14 2 20 7 4 12 13 17 18 6 23 1 11 16 5 24]	10	6	0.079	0.375
λ_9	9	[15 21 2 23 16 9 22 11 4 12 24 5 20 17 7 13 18 8 1 10 19 14 3 6]	10	5	0.059	0.444
λ_{10}	10	[11 17 4 3 21 12 20 13 15 9 19 23 5 24 22 2 7 6 1 16 10 8 18 14]	9	7	0.029	0.400

ตารางที่ 4 สตริงคำตอบกลุ่มประชากรย่อยที่กำลังพิจารณาสำหรับการพัฒนาคำตอบ

λ_p	string	Task priority																							
		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12
1	1	15	8	9	5	24	18	14	20	7	6	4	11	1	13	16	17	23	21	10	12	2	3	22	19
3	3	19	14	4	22	21	20	15	10	3	13	1	24	5	6	9	23	7	2	12	18	11	17	8	16
4	4	19	18	22	12	24	15	1	14	7	11	2	21	16	9	13	8	17	10	6	3	20	5	4	23
6	6	8	9	5	10	2	22	20	13	21	18	24	15	6	14	17	1	19	16	12	7	23	3	11	4
7	7	9	1	18	24	7	21	15	4	3	5	8	22	2	20	23	11	16	14	12	19	6	10	17	13

3. พิจารณาค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ในข้อที่ 2 ของ
 สตริงคำตอบรุ่นลูกทั้ง 2 สตริง กับสตริงคำตอบที่อยู่ในเซต
 ค่าถ่วงน้ำหนัก λ_p ที่กำลังพิจารณาว่าดีกว่าหรือไม่ ใน
 บทความนี้ทำการหาวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุด ดังนั้นคำว่า

ดีกว่าคือคำตอบนั้นต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเทียบเท่า ตาม
 ตารางที่ 5

4. ถ้าสตริงคำตอบรุ่นลูกดีกว่า แล้วดีกว่าทุกสตริง
 คำตอบให้เลือกสตริงคำตอบที่ดีที่สุด แต่ถ้ามีค่าเท่ากันให้

สุ่มเลือกแบบอิสระ แล้วนำสตริงคำตอบรุ่นลูกที่ดีพร้อมทั้งค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ แทนที่สตริงคำตอบที่อยู่ในเซตค่าถ่วงน้ำหนัก λ_p ที่กำลังพิจารณา ตามตารางที่ 6 และทำขั้นที่ 10 แต่ถ้าไม่ดีกว่า จะไม่เกิดการแทนที่สตริงคำตอบให้ข้ามไปขั้นที่ 11

ตารางที่ 5 การพิจารณาคำตอบที่ดีที่สุด

P	String	$g(x \lambda_p, z^*)$	Selection
1	1	0.667	
1	Offspring 1	0 (น้อยกว่า)	Good
1	Offspring 2	1 (มากกว่า)	Bad

ตารางที่ 6 การแทนที่สตริงคำตอบรุ่นลูก ลงในเซตค่าถ่วงน้ำหนัก (λ_p)

λ_p	String	λ_{pi}	Task priority 24 Tasks	$\{f_1, f_2, f_3, f_4\}$
λ_1	Offsp. 1	[0 1 0 0]	[19 14 4 22 21 20 10 13 2 18 24 15 6 9 17 1 8 16 12 7 23 3 11 5]	{9, 4, 0.06, 0.55}
λ_3	3	[0 0.5 0.5 0]	[19 14 4 22 21 20 15 10 3 13 1 24 5 6 9 23 7 2 12 18 11 17 8 16]	{9, 7, 0.016, 0.5}
λ_4	4	[0.5 0 0.5 0]	[19 18 22 12 24 15 1 14 7 11 2 21 16 9 13 8 17 10 6 3 20 5 4 23]	{10, 6, 0.094, 0.412}
λ_6	6	[0.5 0.5 0 0]	[8 9 5 10 2 22 20 13 21 18 24 15 6 14 17 1 19 16 12 7 23 3 11 4]	{10, 5, 0.061, 0.545}
λ_7	7	[0 0.5 0 0.5]	[9 1 18 24 7 21 15 4 3 5 8 22 2 20 23 11 16 14 12 19 6 10 17 13]	{10, 7, 0.082, 0.375}

ขั้นที่ 10 ทำการสุ่มเลือกเซตข้างเคียงของเซตค่าถ่วงน้ำหนัก λ_p ที่กำลังพิจารณาเท่ากับจำนวนที่กำหนด และทำการเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของคำตอบรุ่นลูกที่ดีกับเซตข้างเคียงที่สุ่มมาโดยการหาค่าฟังก์ชันเทบิเชฟฟ์ เหมือนกับขั้นตอนที่ 9 แต่จะทำการเปรียบเทียบค่าโดยใช้เซตค่าถ่วงน้ำหนักของเซตข้างเคียงที่สุ่มได้ ถ้าดีกว่าเซตข้างเคียงนั้น ให้ทำการแทนที่สตริงคำตอบและค่าวัตถุประสงค์ในเซตข้างเคียงที่สุ่มได้

ขั้นที่ 11 ทำการปรับปรุงค่ามากที่สุดและน้อยที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากร ถ้า $p < P$ ให้กำหนด $p = p + 1$ แล้วให้กลับไปทำซ้ำในขั้นตอนที่ 4 แต่ถ้า $p = P$ ให้ไปทำในขั้นตอนที่ 12 ต่อ

ขั้นที่ 12 นำสตริงคำตอบทั้งหมดของประชากรในเจเนอเรชันปัจจุบัน ไปเป็นประชากรเริ่มต้นในเจเนอเรชันถัดไป ถ้า $G < Genaretion$ ให้กำหนด $G = G + 1, p = 1$ และกลับไปทำซ้ำในขั้นตอนที่ 4 แต่ถ้า $G = Genaretion$ ให้ไปทำในขั้นที่ 13 ต่อ

ขั้นที่ 13 นำสตริงคำตอบทั้งหมดของประชากรในเจเนอเรชันสุดท้ายมาหาคำตอบที่ดีที่สุดโดยการกำหนดค่า

ความแข็งแรง (Fitness Assignment) ด้วยวิธี Non-dominated Sorting ตามตารางที่ 7

ตารางที่ 7 การกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness Assignment) ด้วยวิธี Non-Dominated Sorting

String	Objective				Dummy Fitness
	f_1	f_2	f_3	f_4	
Offsp. 1.1	9	4	0.060	0.550	3
Offsp. 2.2	9	5	0.040	0.250	1
Offsp. 3.1	9	4	0.015	0.438	1
Offsp. 4.1	9	4	0.056	0.400	2
Offsp. 5.1	9	4	0.061	0.400	3
Offsp. 6.1	9	4	0.035	0.400	1
Offsp. 3.1	9	4	0.015	0.438	1
Offsp. 2.2	9	5	0.040	0.250	1
Offsp. 9.1	10	4	0.072	0.286	1
Offsp. 10.2	10	4	0.062	0.333	1

ตารางที่ 8 ปัญหาที่ใช้ในการทดลอง

No.	Line1			Line2			รอบเวลาการผลิต (วินาที)	Generation
	ปัญหา	จำนวน รุ่น	อัตราส่วน การผลิต	ปัญหา	จำนวน รุ่น	อัตราส่วน การผลิต		
P1	Michell_21	3	2:1:2	Jackson_11	2	3:1	30, 36, 42	500
P2	Warnecke_58	2	2:1	Wee-mag_75	3	1:1:1	100, 120, 144	1,500
P3	Scholl_297	3	3:1:2	Arcus2_111	2	1:1	5400, 6480, 7776	2,000
P4	Arcus1_83	3	2:2:1	Arcus2_111	2	1:1	9200, 11040, 13248	2,000

5. การทดลองทางคอมพิวเตอร์

5.1 การออกแบบการทดลอง

การแก้ปัญหาการจัดสมดุที่นำเสนอนี้ ผู้วิจัยใช้ตัวอย่างปัญหาในการทดลองจำนวน 4 ปัญหา โดยมีจำนวนชิ้นงานอยู่ในช่วง 11 ถึง 297 ชิ้นงาน และแต่ละปัญหาแบ่งปัญหาย่อยๆ ออกเป็น 3 ปัญหาย่อยตามรอบเวลาการผลิต ดังตารางที่ 8 (รวมทั้งสิ้น 12 ปัญหาย่อย) โดยนำอัลกอริทึม MOEA/D มาใช้ในการแก้ปัญหา และเปรียบเทียบกับอัลกอริทึมการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (BBO) ซึ่งเป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาลักษณะนี้ เพื่อเป็นการประเมินสมรรถนะในการแก้ปัญหาการจัดสมดุของ MOEA/D

โดยพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมที่ใช้ในการแก้ปัญหาแสดงดังตารางที่ 9 ซึ่งในงานวิจัยทั่วไปจะกำหนดจำนวนประชากรที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 100 ประชากร [14] แต่อัลกอริทึม MOEA/D จำนวนของประชากรจะขึ้นอยู่กับจำนวนของวัตถุประสงค์และสัดส่วนในการแบ่งค่าถ่วงน้ำหนัก ดังนั้นจำนวนของประชากรที่คำนวณได้และใกล้เคียงกับ 100 คือ 120 ดังนั้นจำนวนของประชากรในงานวิจัยนี้จะใช้ 120 ทั้ง 2 อัลกอริทึม โดยในส่วนของ BBO จะอาศัยการอพยพ และมิวเตชันแบบ Sinusoidal [15] และ Reciprocal Exchange [16] ตามลำดับ ซึ่งจากงานวิจัยของ Ma [15] และ Jitmetta [17] แสดงให้เห็นว่าสามารถใช้แก้ปัญหาที่มีลักษณะใกล้เคียงกันนี้ได้ อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้พารามิเตอร์อื่นๆ ของ MOEA/D เช่น จำนวนของเซตข้างเคียงและร้อยละในการกำหนด

จำนวนครั้งในการสุ่มเซตข้างเคียง รวมถึงค่าความน่าจะเป็นในการมิวเตชันของ BBO นั้นได้มาจากการทดลองแบบ Full Factorial Design จำนวน 2 Replicate เพื่อให้แน่ใจว่าเป็นค่าที่ทำให้อัลกอริทึมสามารถค้นหาคำตอบในแต่ละปัญหาได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 9 พารามิเตอร์ของอัลกอริทึม

MOEA/D	
Population size	120
Neighborhood	P1-P4: 9
%Replace neighbor	P1-P4: 0.3
BBO	
Population size	120
Migration method:	Sinusoidal
Mutation method:	Reciprocal exchange
Mutation probability:	P1-P4: 0.1

5.2 ตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึม

ตัวชี้วัดสมรรถนะในด้านต่างๆของอัลกอริทึม จะบอก ว่าอัลกอริทึมใดๆที่หากกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดได้นั้น มีประสิทธิภาพดีกว่ากัน โดยตัวชี้วัดตามรูปแบบของปัญหาหลายวัตถุประสงค์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีทั้งหมด 5 ตัวชี้วัด ซึ่ง Kumar and Singh [18] ได้นำเสนอไว้ 3 ตัวชี้วัด คือ 1) การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (Convergence) ใช้ประเมินว่ากลุ่มคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้มีความใกล้เคียงกับกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่

แท้จริงมากน้อยเท่าใด (ค่าเข้าใกล้ 0 ยิ่งดี) 2) การกระจายตัว (Spread) เป็นการบ่งชี้ว่ากลุ่มคำตอบมีการกระจายตัวกว้างและสม่ำเสมอเพียงใด ถ้าค่าที่ได้ยิ่งเข้าใกล้ 0 แสดงว่ากลุ่มคำตอบนั้นมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และ 3) อัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอครอบงำเทียบกับกลุ่มคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ (Ratio of Non-Dominated Solution 1: R_{NDS1}) เป็นตัวบอกว่าในคำตอบที่หาได้ทั้งหมดเป็นคำตอบที่อยู่ในคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงคิดเป็นอัตราส่วนเท่าใดเมื่อเทียบกับคำตอบที่หามาได้ และในงานวิจัยนี้ ได้เพิ่มอีก 2 ตัวชี้วัด คือ 1) อัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอครอบงำเทียบกับกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด ที่สุด (Ratio of Non-Dominated Solution 2: R_{NDS2}) ซึ่งใช้แสดงว่าในคำตอบที่หามาได้ทั้งหมดเป็นคำตอบที่อยู่ในคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงคิดเป็นอัตราส่วนเท่าใดเมื่อเทียบกับคำตอบที่ดีที่สุด (ค่าของ R_{NDS1} และ R_{NDS2} ยิ่งเข้าใกล้ 1 ยิ่งดี) และ 2) เวลาในการค้นหาคำตอบ [19]

5.3 ผลการทดลอง

บทความวิจัยนี้เป็นการทดลองแก้ปัญหาตัวอย่างด้วยโปรแกรม C++ ประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์ Intel® Core™ i7-6500U CPU@2.50GHz RAM 8.00 GB โดยผลการทดลองที่ได้แสดงในตารางที่ 10

จำนวนสถานงาน (N_w) ที่ MOEA/D หาคำตอบมาได้นั้น มีจำนวนเทียบเท่าและดีกว่า BBO ทุกปัญหา เห็นได้จากปัญหาขนาดเล็ก P1 รอบเวลาการผลิต 30 และปัญหาขนาดใหญ่ P4 รอบเวลาการผลิต 11040 ที่ค่า N_w ของ MOEA/D น้อยกว่า BBO และเท่ากับค่า Optimal

จำนวนสถานี (N_s) MOEA/D สามารถค้นหาคำตอบได้ดีเทียบเท่า BBO เช่นเดียวกันและดีกว่าในปัญหาขนาดกลาง P2 รอบเวลาการผลิต 144 และปัญหาขนาดใหญ่ P4 รอบเวลาการผลิต 9200 คือมีจำนวนสถานีน้อยกว่า BBO ซึ่งแสดงให้เห็นเบื้องต้นว่า MOEA/D มีสมรรถนะที่ค่อนข้างดีกว่า BBO ในการแก้ปัญหาขนาดใหญ่ ทั้งนี้เป็นที่ชัดเจนว่าไม่มีปัญหาใดเลยที่ BBO สามารถค้นพบคำตอบที่มี N_w และ N_s ดีกว่า MOEA/D

ในด้านตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมเพื่อเป็นการเปรียบเทียบสมรรถนะในการหาคำตอบระหว่าง MOEA/D กับ BBO ให้แน่ชัดยิ่งขึ้นนั้น ค่า Convergence ของ MOEA/D มีค่าน้อยกว่า และเข้าใกล้ 0 หมายความว่ากลุ่มคำตอบที่ได้จาก MOEA/D ใกล้เคียงกับกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงมากกว่า BBO

ค่า Spread ของทั้ง MOEA/D และ BBO ไม่มีความแตกต่างกันมาก และค่ายังไม่เข้าใกล้ 0 ซึ่งบ่งชี้ว่ากลุ่มคำตอบยังมีการกระจายตัวไม่กว้างและไม่สม่ำเสมอมากพอ

ส่วน R_{NDS1} นั้น MOEA/D มีค่ามากกว่า BBO ซึ่งในปัญหาขนาดใหญ่ P3 และ P4 มีค่าเท่ากับ 1 แสดงว่าในคำตอบที่หามาได้ทั้งหมดของ MOEA/D เป็นคำตอบที่อยู่ในคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง

แต่ค่า R_{NDS2} ของ MOEA/D ส่วนใหญ่นั้น มีค่าน้อยกว่า BBO และไม่เข้าใกล้ 1 แสดงว่าคำตอบที่หามาได้ทั้งหมดของ MOEA/D เป็นคำตอบที่อยู่ในคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงคิดเป็นอัตราส่วนเมื่อเทียบกับคำตอบที่ดีที่สุด น้อยกว่าอัตราส่วนของ BBO

สำหรับด้านระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณหาคำตอบ (CPU Times) พบว่าแต่ละอัลกอริทึมใช้เวลาแปรผันไปตามขนาดของปัญหา แต่ MOEA/D ใช้ระยะเวลาในการค้นหาคำตอบนานกว่า ประมาณสองเท่าของ BBO ในทุกขนาดปัญหา

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า MOEA/D นั้นมีสมรรถนะในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวยูนิตที่มีวัตถุดิบประสมจำนวนมาก ดีกว่า BBO ในทุกขนาดปัญหา แม้ว่าจะใช้เวลาแก้ปัญหา นานกว่าและการกระจายตัวยังไม่กว้างมากพอ แต่คำตอบที่หาได้นั้นเป็นคำตอบที่อยู่ในคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงเกือบทั้งหมด

6. สรุป

บทความนี้นำเสนอการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวยูนิตที่มีวัตถุดิบประสมจำนวนมากซึ่งเป็นระบบการผลิต ที่สามารถ

ตอบสนองลูกค้าได้อย่างรวดเร็วตามแนวทางการผลิตแบบ
ทันเวลาพอดี โดยมีวัตถุประสงค์ในการจัดสมดุลทั้งหมด 4
วัตถุประสงค์ ได้แก่ ทำให้มีจำนวนสถานีงานที่น้อยที่สุด
จำนวนสถานีงานน้อยที่สุด ความแตกต่างของภาระงาน
ระหว่างสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด และทำให้ความสัมพันธ์
ของงานที่ไม่เกี่ยวเนื่องกันภายในสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด
พร้อมทั้งนำเสนออัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด
แบบวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึด
หลักการจำแนก (MOEA/D) เพื่อใช้ในการแก้ปัญหา
ดังกล่าว ซึ่งกระบวนการค้นหาคำตอบนั้นจะพิจารณา
วัตถุประสงค์ทั้ง 4 ไปพร้อมๆ กันและทำการเปรียบเทียบกับ
อัลกอริทึมการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์

(Biogeography-based Optimization: BBO) ซึ่งเป็น
อัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาการจัดสมดุล
สายการประกอบ พบว่า MOEA/D มีสมรรถนะในการ
แก้ปัญหาคือ BBO ในทุกขนาดปัญหา ทั้งในด้านจำนวน
สถานีงาน จำนวนสถานี การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่
เหมาะสมที่สุดแบบพาเรโต และคำตอบที่หาได้เป็นคำตอบ
ที่อยู่ในคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงเกือบทั้งหมด
แม้ว่าจะใช้เวลาแก้ปัญหามากกว่า จึงสรุปได้ว่า MOEA/D
เป็นอัลกอริทึมหนึ่งที่สามารถใช้แก้ปัญหาการจัดสมดุล
สายการประกอบประเภทนี้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 10 ผลการทดลองในการแก้ปัญหาตัวอย่าง

Problem	P1			P2			P3			P4		
No. of Tasks (Line1-Line2)	32 (21-11)			133 (58-75)			408 (297-111)			194 (83-111)		
Cycle Time	30	36	42	100	120	144	5400	6480	7776	9200	11040	13248
Number of workstation (N_w)												
Optimal	11	9	8	26	21	18	48	40	33	30	25	21
MOEA/D	11	10	8	26	22	18	49	40	34	31	25	21
BBO	12	10	8	26	22	18	49	40	34	31	26	21
Number of station (N_s)												
MOEA/D	4	4	3	9	8	6	14	12	10	9	8	7
BBO	4	4	3	9	8	7	14	12	10	10	8	7
Convergence												
MOEA/D	0.081	0.145	0.205	0.026	0.019	0.014	0.000	0.024	0.073	0.000	0.028	0.000
BBO	0.131	0.969	0.265	0.116	0.045	0.050	0.844	0.105	0.101	0.065	0.217	0.024
Spread												
MOEA/D	0.534	0.879	0.802	0.869	0.802	0.924	0.990	0.973	0.936	1.018	0.797	0.893
BBO	0.582	0.778	0.832	0.754	0.643	0.792	1.065	0.755	0.981	1.155	0.946	0.894
R_{NDS1}												
MOEA/D	0.639	0.333	0.583	0.483	0.376	0.531	1.000	0.637	0.100	1.000	0.773	1.000
BBO	0.250	0.208	0.100	0.345	0.440	0.464	0.382	0.376	0.619	0.438	0.063	0.882
R_{NDS2}												
MOEA/D	0.923	0.400	0.857	0.286	0.211	0.299	0.160	0.221	0.061	0.533	0.944	0.211
BBO	0.077	0.600	0.143	0.714	0.789	0.701	0.840	0.779	0.939	0.467	0.056	0.789
CPU time (s)												
MOEA/D	37.90	36.25	31.73	524.47	533.78	485.12	1340.59	1354.20	1293.84	628.23	619.02	593.93
BBO	16.87	16.96	17.26	242.02	232.81	233.46	743.24	721.63	677.63	287.58	268.61	263.93

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Y. Monden, Toyota production system: An integrated approach to just-in-time, 4th ed. Norcross, GA: Industrial Engg. and Mgmt. CRC Press, 2011.
- [2] I. Kucukkoc and D. Z. Zhang, "Balancing of parallel U-shaped assembly lines," Computers & OR, vol. 64, pp. 233-244, 2015.
- [3] ณัฐชัย โยธาภิบาล, "การจัดสมดุลที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน ด้วยอัลกอริทึมแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์," วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2556.
- [4] C. Becker and A. Scholl, "A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing," Eur. J. Oper. Res., vol. 168, no. 3, pp. 694-715, 2006.
- [5] Q. Zhang and H. Li, "MOEA/D: A multiobjective evolutionary algorithm based on decomposition," IEEE Trans. Evol. Comput., vol. 11, no. 6, pp. 712-731, 2007.
- [6] R. Cheng et al., "A benchmark test suite for evolutionary many-objective optimization," Complex Intell. Syst., vol. 3, no. 1, pp. 67-81, March 01 2017.
- [7] D. Simon, "Biogeography-based optimization," IEEE Trans. Evol. Comput., vol. 12, no. 6, pp. 702-713, 2008.
- [8] J. L. C. Macaskill, "Production-Line balances for mixed-Model Lines," Manage. Sci., vol. 19, no. 4-part-1, pp. 423-434, 1972.
- [9] D. Sparling and J. Miltenburg, "The mixed-model u-line balancing problem," Int. J. Prod. Res., vol. 36, no. 2, pp. 485-501, 1998.
- [10] Y. K. Kim, Y. Kim, and Y. J. Kim, "Two-sided assembly line balancing: A genetic algorithm approach," Prod. Plann. Contr., vol. 11, no. 1, pp. 44-53, 2000.
- [11] P. M. Vilarinho and A. S. Simaria, "A two-stage heuristic method for balancing mixed-model assembly lines with parallel workstations," Int. J. Prod. Res., vol. 40, no. 6, pp. 1405-1420, 2002.
- [12] T. O. Lee, Y. Kim, and Y. K. Kim, "Two-sided assembly line balancing to maximize work relatedness and slackness," Comput. Ind. Eng., vol. 40, no. 3, pp. 273-292, 2001.
- [13] D. E. Goldberg and R. Lingle, "Alleles, loci, and the traveling salesman problem," An international conference on genetic algorithms and their applications, 1985, vol. 154, pp. 154-159: Lawrence Erlbaum, Hillsdale, NJ.
- [14] R. K. Hwang, H. Katayama, and M. Gen, "U-shaped assembly line balancing problem with genetic algorithm," Int. J. of Prod. Res., vol. 46, no. 16, pp. 4637-4649, 2008.
- [15] H. Ma, "An analysis of the equilibrium of migration models for biogeography-based optimization," Inform. Sci., vol. 180, no. 18, pp. 3444-3464, 2010.
- [16] Y. K. Kim, C. J. Hyun, and Y. Kim, "Sequencing in mixed model assembly lines: a genetic algorithm approach," Computers & OR, vol. 23, no. 12, pp. 1131-1145, 1996.
- [17] K. Jitmettal, "Application of particle swarm optimization for multi-objective sequencing problems on mixed-model two-sided

assembly lines," M.S. thesis, Dept. Ind. Eng.,
Chulalongkorn University, 2011.

- [18] R. Kumar and P. K. Singh, "Pareto Evolutionary Algorithm Hybridized with Local Search for Biobjective TSP," in Hybrid Evolutionary Algorithms, A. Abraham, C. Grosan, and H. Ishibuchi, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007, pp. 361-398.
- [19] วิชระวิทย์ ถนนวนทอง, "การจัดลำดับผลิตรถยนต์แบบหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านด้วยอัลกอริทึมการบรรจบร่วมกับฟิชชี," วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2558.

**ผลกระทบต่อการเปลี่ยนขนาดความยาวและการปรับมุมใบกังหัน
ต่อความเร็วรอบการหมุนและโมเมนต์บิดของกังหันลมแกนตั้ง**

**The Effects of Chord Line Size Changing and Blade Pitch Adjustment
on Rotational Speed and Torque of Vertical Axis Wind Turbine**

สุรัชชัย เหมศิริญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ เลขที่ 2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ

เขตสาทร กรุงเทพมหานคร 10120

Surachai Hemhirun

Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Krungthep, 2 Nanlinji Road

Tungmahamek, Sathorn, Bangkok, 10120

Corresponding author: Email surachai.h@mail.rmutk.ac.th

บทคัดย่อ

จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลกระทบต่อการเปลี่ยนขนาดความยาวและการปรับมุมใบกังหันต่อความเร็วรอบการหมุนและโมเมนต์บิดของกังหันลมแกนตั้ง โดยใบกังหันที่ใช้เป็นแผนอากาศ NACA 2412 ติดตั้งเข้ากับชุดกังหันลมแกนตั้งแบบ 3 ใบกังหันที่มีรัศมีการหมุนและความสูง 160 และ 190 mm ตามลำดับ ทดสอบชุดกังหันลมภายในอุโมงค์ลมแบบเปิดด้วยความเร็วลม 1, 2 และ 3 m/s จากนั้นเปลี่ยนขนาดความยาว 3 ขนาด คือ 80, 100 และ 120 mm และทำการปรับมุมใบกังหันเป็น 0° , 1° , 2° , 3° , 4° และ 5° ผลการทดสอบพบว่าความเร็วรอบการหมุนและโมเมนต์บิดมีค่าเพิ่มมากขึ้น เมื่อปรับมุมใบกังหันเป็น 0° , 1° และ 2° และมีค่าลดน้อยลง เมื่อปรับมุมใบกังหันเป็น 3° , 4° และ 5° ในทุกขนาดความยาวใบกังหันและทุกความเร็วลม ทั้งนี้ที่ความเร็วลม 3 m/s ขนาดความยาวของใบกังหัน 80 mm มีความเร็วรอบการหมุนสูงสุด 759 rpm และขนาดความยาวของใบกังหัน 120 mm มีโมเมนต์บิดสูงสุด 0.13 N-m

คำสำคัญ: กังหันลมแกนตั้ง ขนาดความยาว มุมใบกังหัน ความเร็วรอบการหมุน โมเมนต์บิด

ABSTRACT

This research aimed to study the effects of chord line size changing and angle blade pitch adjustment on rotational speed and torque of vertical axis wind turbine (VAWT). The turbine blades used in this study were airfoil type and were in accordance with the NACA 2412. They were installed on three-blade VAWT set with radius rotation and height of 160 and 190 mm, respectively. The three-blade VAWT set was tested inside the open-type wind tunnel with the wind speeds of 1, 2 and 3 m/s. Then, the chord line size changing to 80, 100 and 120 mm and the angle blade were adjusted to 0° , 1° , 2° , 3° , 4° and 5° . The results showed that the rotational speed and torque were increased when the angle blade pitch was adjusted to 0° , 1° , and 2° , and they were decreased when the angle blade pitch was adjusted to 3° , 4° , and 5° of all chord line sizes and wind speeds. In addition, 3 m / s wind

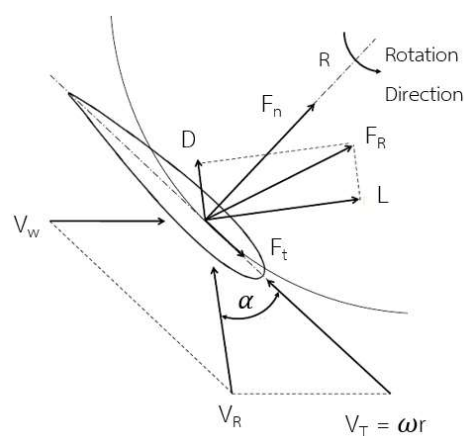
speed in 80 mm chord line size has a maximum speed rotation of 759 rpm, while 120 mm chord line size has a maximum torque of 0.13 N-m.

Keyword: Vertical axis wind turbine, chord line size, angle blade pitch, rotational speed, torque.

1. บทนำ

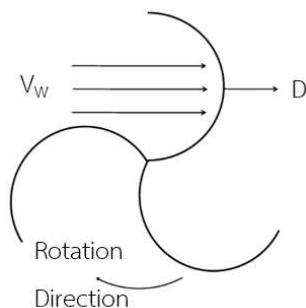
พลังงานลม (Wind Energy) เป็นปรากฏการณ์เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิอากาศทำให้ความหนาแน่นของอากาศที่มีอุณหภูมิสูงมีความหนาแน่นน้อยเกิดการขยายตัวและลอยตัวสูงขึ้น ขณะเดียวกันอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำกว่ามีความหนาแน่นสูงกว่าจะเคลื่อนที่เข้ามาแทนที่ให้เกิดการไหลของอากาศ เรียกว่า “กระแสลม” ซึ่งเป็นพลังงานจากการไหลของอากาศ (Kinetic Energy) สามารถที่จะนำไปใช้ประโยชน์ได้ เช่น การผลิตกระแสไฟฟ้า หรือการสูบน้ำ เป็นต้น อุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานจากการไหลของอากาศนี้เป็นพลังงานกล คือ กังหันลม (Wind Turbine) สามารถแบ่งตามลักษณะของแกนได้ 2 ชนิด คือ กังหันลมแกนนอน (Horizontal Axis Wind Turbines, HAWT) และกังหันลมแกนตั้ง (Vertical Axis Wind Turbines, VAWT) [1]-[3] ในส่วนของกังหันลมแกนตั้งมีข้อได้เปรียบกว่ากังหันลมแกนนอน คือไม่จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ช่วยในการหันเข้าหาทิศทางลม การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและชุดเฟืองทดสามารถติดตั้งที่พื้นได้และใช้พื้นที่น้อยทำให้มีแนวโน้มที่จะนำกังหันลมมาผลิตกระแสไฟฟ้าให้กับอาคารเพื่อลดการใช้พลังงาน (Zero Energy Building, ZEB) [4] แต่กังหันลมแกนตั้งมีข้อเสียเปรียบบางประการ เช่น กังหันลมแกนตั้งส่วนใหญ่มีประสิทธิภาพที่ต่ำกว่ากังหันลมแกนนอน [5], [6] ทำให้มีผู้วิจัยศึกษากังหันลมแกนตั้งเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับกังหันลม ซึ่งสามารถแบ่งตามลักษณะของใบกังหันที่ทำให้เกิดการขับเคลื่อนได้ 2 ชนิด คือ 1) ใบกังหันชนิดสร้างแรงยก (Lift Type) หรือกังหันลมแดร์เรียส (Darrieus VAWT, D-VAWT) ใบกังหันจะออกแบบในลักษณะแพนอากาศ (Airfoil) ดังรูปที่ 1 โดยในปี 2555 Travis J. และคณะ [7] ได้ศึกษารูปทรงของแพนอากาศเพื่อเพิ่ม

ประสิทธิภาพแรงบิดของกังหันแกนตั้ง ด้วยการออกแบบรูปทรงของแพนอากาศที่เหมาะสมและทดสอบด้วยโปรแกรมจำลอง (Computational Fluid Dynamics, CFD) และในปี 2556 P. Deshpande and X. Li [4] ได้ศึกษาระเบียบวิธีเชิงตัวเลขของกังหันลม แกนตั้งที่ใช้ใบกังหันแบบสมมาตรและแบบไม่สมมาตร เพื่อทำนายและวิเคราะห์การไหลของอากาศผ่านใบกังหันต่อมาในปี 2556-2557 ชนะชาติ คำวิระ และคณะ [8] และศุภอัฐ เกียรติโสภณ และคณะ [9] ได้พัฒนาแบบจำลองเพื่อทำนายสมรรถนะของกังหันลมแกนตั้งแบบ 3 ใบกังหัน โดยใบกังหันลักษณะแพนอากาศ NACA (National Advisory Committee for Aeronautics) แบบต่าง ๆ ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อทำนายสมรรถนะของกังหันลม ต่อมาในปี 2558 สุรเทพ ผลหินลาด [3] ได้สร้างและทดสอบกังหันลมแกนตั้งแบบโจโรมิลล์ 4 ใบพัดที่ใช้ NACA0015 และ NACA4412 โดยทำการศึกษาการปรับมุมใบกังหันเพื่อศึกษาถึงการหมุน แรงบิด และกำลังที่ได้ ซึ่งเป็นแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับกังหันลมรูปใบกังหันสร้างแรงยก



รูปที่ 1 ใบกังหันสร้างแรงยก (Lift Type) [10]

2) ใบกังหันชนิดสร้างแรงต้านอากาศ (Drag Type) หรือ กังหันลมชาโวเนียส (Savoni VAWT, S-VAWT) ใบกังหันจะออกแบบในลักษณะทรงโค้งรับอากาศ ดังรูปที่ 2 โดยในปี 2554 ธเนศ ไชยชนะ และสัมพันธ์ ไชยเทพ [1] ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของตำแหน่งของสันใบพัดแบบโค้งต่อประสิทธิภาพของกังหันลม พบว่าเมื่อปรับตำแหน่งสันใบพัดให้เหมาะสมจะสามารถเพิ่มสัมประสิทธิ์กำลังและแรงบิดได้และในปี 2558 วีรชัย ชัยวรพฤกษ์ และศุภโชค แสงสว่าง [11] ได้ศึกษาการทำนายค่าสมรรถนะเชิงสถิติของกังหันลมแบบชาโวเนียสภายใต้การเปลี่ยนแปลงความเร็วทำให้เป็นที่มั่นใจว่าการออกแบบกังหันลมแกนตั้งในรูปแบบใบกังหันสร้างแรงยกสามารถพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ตัวอย่างเช่นในปี 2557 ศักดา ใจสมัคร, หัสตินทร์ ศิริรัตน์ และเศกสรร กิตติคุณ [2] ได้ทำการออกแบบและสร้างกังหันลมแกนตั้งใบพัดแบบชาโวเนียส เพื่อประยุกต์ใช้ในการสูบน้ำ และต่อมาในปี 2558 ธเนศ ไชยชนะ และคณะ [12] ได้วิจัยเรื่องกังหันลมแกนตั้งแบบชาโวเนียสหลายใบที่มีส่วนบังคับลมสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก ซึ่งเป็นการพัฒนาและเพิ่มประสิทธิภาพให้กับกังหันลมแกนตั้ง



รูปที่ 2 ใบกังหันสร้างแรงต้านอากาศ (Drag Type)[10]

จากงานวิจัยที่ศึกษาถึงการเพิ่มประสิทธิภาพของกังหันลมที่ใช้ใบกังหันชนิดสร้างแรงต้านอากาศ [1], [2], [11], [12] และงานวิจัยการทำนายสมรรถนะของกังหันลมที่ใช้ใบกังหันชนิดสร้างแรงยก [3], [4], [7]-[9] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะศึกษาถึงผลกระทบของการเปลี่ยนความยาวและการปรับมุมใบกังหันต่อความเร็วรอบและ

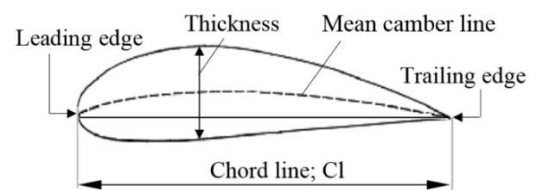
โมเมนต์บิด เพื่อเป็นแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพของกังหันลมแกนตั้งที่ใช้ใบกังหันชนิดสร้างแรงยกอีกแนวทางหนึ่ง

2. ทฤษฎี

กังหันลมแบบแกนตั้งแบบ 3 ใบกังหัน ที่ใช้ใบกังหันชนิดสร้างแรงยกด้วยแพนอากาศ NACA เริ่มจากการระบุส่วนประกอบของแพนอากาศ จากนั้นพิจารณาถึงแรงที่อากาศกระทำกับแพนอากาศ และแรงที่เป็นผลให้เกิดโมเมนต์บิด ดังมีรายละเอียดดังนี้

2.1 รูปทรงของแพนอากาศ (Airfoil Section

Geometry) มีสัดส่วนขนาดความยาวมากกว่าความกว้าง ดังแสดงในรูปที่ 3 จะแสดงส่วนประกอบของแพนอากาศดังนี้



รูปที่ 3 ส่วนประกอบของแพนอากาศ

โดยมีส่วนประกอบ 5 ส่วนคือ 1) ขาหน้า (Leading edge) เป็นจุดหน้าสุดของแพนอากาศ 2) ขาหลัง (Trailing edge) เป็นจุดหลังสุดของแพนอากาศ 3) เส้นแสดงขนาดความกว้างของแพนอากาศหรือเส้นคอร์ด (Chord line; Cl) เป็นเส้นตรงที่ลากจากขาหน้าถึงขาหลัง 4) เส้นแคมเบอร์ (Mean camber line) เป็นเส้นแบ่งครึ่งผิวปีกบนและล่างออกเป็นสองส่วนเท่าๆ กัน และ 5) ความหนา (Thickness) เป็นขนาดความกว้างของแพนอากาศ ทั้งนี้ในการสร้างแพนอากาศตามมาตรฐาน NACA สามารถเรียกเป็นรหัสประกอบด้วย 4 หลัก ที่ระบุออกเป็นเปอร์เซ็นต์ตามสัดส่วน เช่น NACA 2412 หลักที่ 1 คือแพนอากาศมีค่าพิกัดเส้นแคมเบอร์ในสัดส่วนเปอร์เซ็นต์ของความยาวเส้นคอร์ด (2 %) หลักที่ 2 คือ ตำแหน่งของพิกัดแคมเบอร์สูงสุดในสัดส่วน 1 ใน 10 ของความยาว

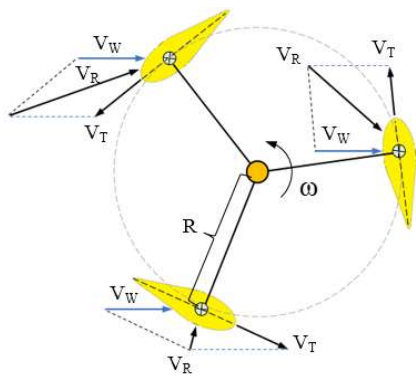
ปีที่ 13 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม - เมษายน พ.ศ. 2561

คอร์ด (4 %) หลักที่ 3 และ 4 คือ ความหนาสูงสุดในสัดส่วนเปอร์เซ็นต์ของเส้นความยาวคอร์ด (12 %)

2.2 แรงที่อากาศกระทำกับแพนอากาศ

การหมุนของกังหันลมเป็นผลจากแรงที่อากาศกระทำกับใบกังหัน จากรูปที่ 4 ขณะกังหันลมที่มีรัศมีการหมุน R หมุนด้วยความเร็วเชิงมุม ω ทำให้ความเร็วของใบกังหันมีค่าเท่ากับ V_T ดังสมการที่ (1) และจากทิศทางการไหลของความเร็วลม V_W (เคลื่อนที่จากซ้ายไปขวา) ทำให้เกิดความเร็วสัมพัทธ์ V_R ระหว่างความเร็วของใบกังหันกับความเร็วลม

$$V_T = \omega \times R \quad (1)$$



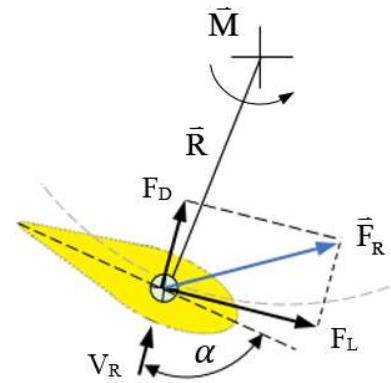
รูปที่ 4 ความเร็วสัมพัทธ์ขณะกังหันลมหมุน

จากความเร็วสัมพัทธ์ดังกล่าวข้างต้น ทำให้เกิดแรงยก F_L และแรงต้าน F_D โดยแรงที่อากาศกระทำกับใบกังหันสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2) และ (3)

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho V_R^2 A_{\text{airfoil}} \quad (2)$$

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho V_R^2 A_{\text{airfoil}} \quad (3)$$

โดยค่า C_L และ C_D คือ สัมประสิทธิ์แรงยกและสัมประสิทธิ์แรงต้านทานอากาศซึ่งจะแปรตามมุมระหว่างความเร็วสัมพัทธ์กับทิศทางการหมุนของกังหันหรือเรียกว่ามุม AOA (Angle of attack, α)



รูปที่ 5 แรงที่อากาศกระทำกับใบกังหัน

เมื่อพิจารณาโมเมนต์บิดที่เกิดขึ้นจากแรงลัพธ์ (Resultant Force, $\vec{F}_R$) และระยะรัศมีการหมุน (Radius of Rotation, $\vec{R}$) ของ 1 ใบกังหันในรูปแบบเวกเตอร์ ดังสมการที่ 4

$$\vec{M} = \vec{R} \times \vec{F}_R \quad (4)$$

3. การดำเนินงานวิจัย

การศึกษาของงานวิจัยนี้ใช้การสร้างชุดกังหันลมแกนตั้งแบบ 3 ใบกังหันที่ใช้ใบกังหันแต่ละใบเป็นแพนอากาศรูปทรงตามมาตรฐาน NACA 2412 ที่ได้จากการศึกษา งานวิจัยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำนายถึงความเหมาะสมของแพนอากาศที่ให้กำลังสูงสุดในช่วงความเร็วรอบและความเร็วลมที่เหมาะสมสอดคล้อง [7] จากนั้นทำการติดตั้งแพนอากาศเข้ากับชุดกังหันลมที่สร้างและทดสอบภายในอุโมงค์ลมตามวิธีการทดลอง โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1. ชุดกังหันลมแกนตั้งแบบ 3 ใบกังหัน

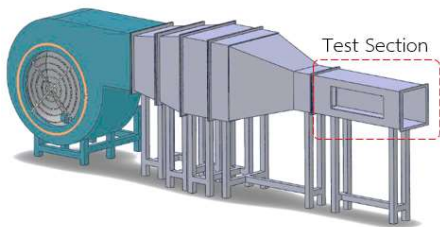
(Three Blade Vertical Axis Wind Turbine Set)
ชุดกังหันลมที่สร้างขึ้นสามารถถอดใบกังหันออกได้และในชิ้นส่วนหมายเลข 4 เป็นฐานยึดและปรับมุมของใบกังหัน โดยมีส่วนประกอบแสดงตามหมายเลขดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ชุดกังหันลมแกนตั้งแบบ 3 ใบกังหัน

3.2. ชุดอุโมงค์ลม (Wind Tunnel Set)

การจำลองความเร็วลมในงานวิจัยนี้ใช้อุโมงค์ลมที่มีขนาดมอเตอร์ 11 กิโลวัตต์ และมีพื้นที่ในการทดสอบ (Test Section) เป็น 320 mm x 320 mm และยาว 1,000 mm

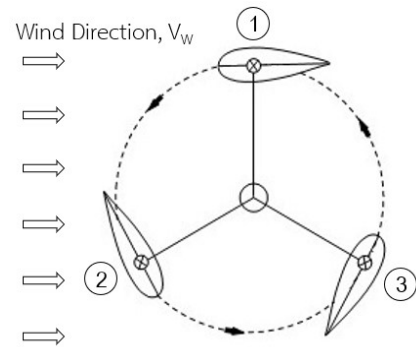


รูปที่ 7 ชุดอุโมงค์ลมและพื้นที่ในการทดสอบ

3.3. วิธีการทดลอง (Experimental Method)

การศึกษาถึงผลกระทบของการเปลี่ยนขนาดความยาวและการปรับมุมใบกังหันที่มีต่อความเร็วรอบการหมุนโมเมนต์บิดที่เกิดขึ้น การทดลองจะมีการปรับเปลี่ยนความกว้างของใบกังหัน (Chord Line Size, CL) จากขนาด 80, 100 และ 120 mm และปรับมุมใบกังหัน (Angel Blade Pitch, θ) จาก 0° , 1° , 2° , 3° , 4° และ 5° ตามลำดับ การทดสอบจะดำเนินการภายในอุโมงค์ลมที่จำลองความเร็วลม 1, 2, และ 3 เมตรต่อวินาที ดังรูปที่ 8 การระบุ

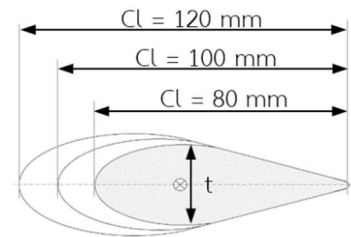
ตำแหน่งใบกังหัน รวมถึงการเปลี่ยนขนาดและการปรับมุมใบกังหัน ดังรูปที่ 5 และ 6 ตามลำดับ



รูปที่ 8 การตำแหน่งใบกังหัน

1) ความยาวใบกังหัน (Chord Line Size, CL)

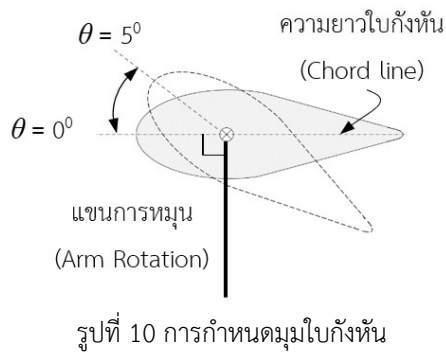
จาก 80, 100 และ 120 mm จากการเปลี่ยนขนาดความยาวและความหนา (t) ของใบกังหันจะเป็นไปตามสัดส่วน NACA 2412 ดังที่ได้กล่าวข้างต้น



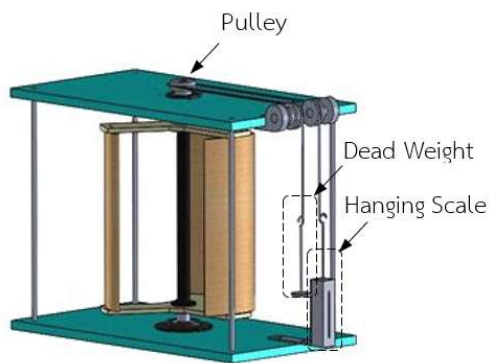
รูปที่ 9 ขนาดความยาวใบกังหัน

2) การปรับมุมใบกังหัน (Angel Blade Pitch, θ)

จาก 0° , 1° , 2° , 3° , 4° และ 5° ดังรูปที่ 10 เป็นส่วนขยายของใบกังหันตำแหน่ง 1 จากรูปที่ 8 เพื่อกำหนดจุดเริ่มในการปรับมุมใบกังหัน โดยเริ่มจากมุมระหว่างเส้นความยาวใบกังหัน (Chord Line) กับแกนการหมุน (Arm Rotation) ของชุดกังหันลมที่ทำมุมกัน 90 องศา ตำแหน่งนี้เป็นมุม θ เป็น 0 องศา และเพิ่มขึ้นครั้งละ 1 องศา



จากนั้นบันทึกผลของความเร็วรอบการหมุนด้วยอุปกรณ์วัดรอบแบบแสง (Laser Photo Tachometer, DT-2234C) และวัดโมเมนต์บิดที่เกิดขึ้นด้วยการสร้างภาระให้การหมุนด้วยการแขวนน้ำหนัก (Dead Weight) ดังรูปที่ 11

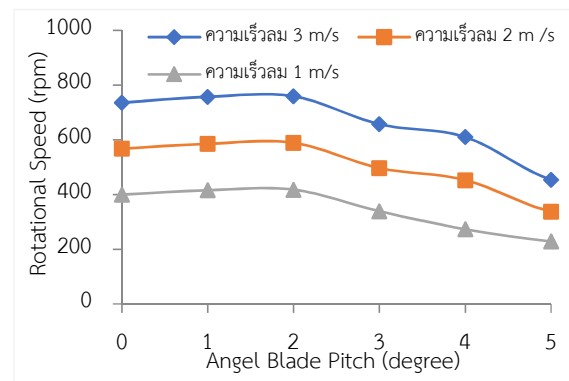


รูปที่ 11 การวัดค่าโมเมนต์บิด

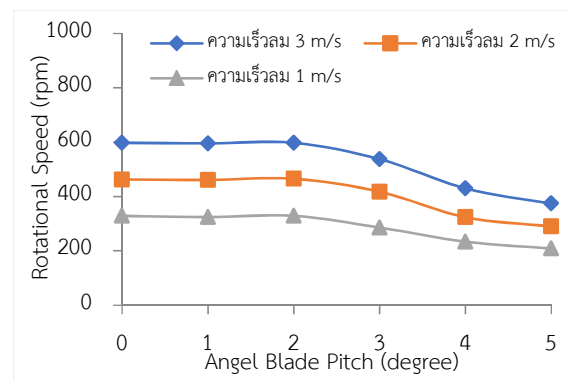
4. ผลและอภิปรายผล

การทดสอบผลกระทบต่อการเปลี่ยนขนาดความยาวและการปรับมุมใบกังหันของกังหันลมแกนตั้งแบบ 3 ใบกังหัน ซึ่งผลการทดสอบสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ความเร็วรอบการหมุน และโมเมนต์บิดของกังหันลม ดังมีผลการทดสอบดังนี้

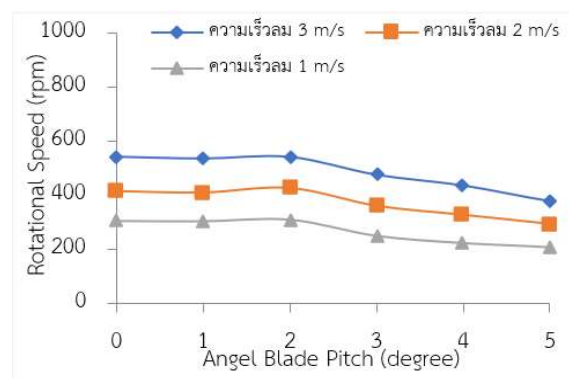
4.1. ความเร็วรอบของกังหัน (Speed Rotation)



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับมุมของใบกังหัน (กรณี CL = 80 mm)



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับมุมของใบกังหัน (กรณี CL = 100 mm)

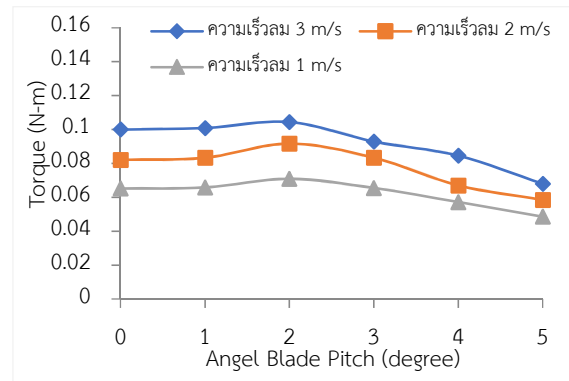


รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับมุมของใบกังหัน (กรณี CL = 120 mm)

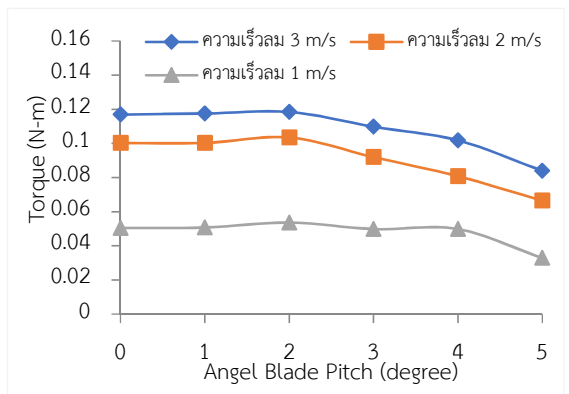
จากรูปที่ 12-14 ความเร็วรอบการหมุนของกังหันในสภาวะความเร็วลม 3 m/s ให้ความเร็วรอบสูงสุดที่มุมของใบกังหัน, θ เป็น 2° ซึ่งแปรผันตามขนาดความกว้างใบกังหัน, CL ดังนั้นคือ CL เป็น 80, 100 และ 120 mm มีความเร็วรอบสูงสุด 759, 597 และ 541 rpm ตามลำดับและมุมของใบกังหัน, θ เป็น 0° , 1° และ 2° ทำให้ความเร็วรอบการหมุนของใบกังหันเพิ่มขึ้น ส่วนมุมของใบกังหัน θ เป็น 3° , 4° และ 5° ทำให้ความเร็วรอบการหมุนของใบกังหันมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้ การเพิ่มขึ้นและลดลงของความเร็วรอบการหมุนของกังหันลมเนื่องมาจากผลกระทบของการเปลี่ยนขนาดความยาวของใบกังหัน, CL และมุมของใบกังหัน, θ กล่าวคือเมื่อใบกังหันมี CL เพิ่มขึ้นทำให้มีพื้นที่ A_{airfoil} เพิ่มขึ้นในขณะมุมของใบกังหัน, θ เป็น 0° , 1° และ 2° ใบกังหันลมที่หมุนเข้าหาลมมีค่าสัมประสิทธิ์แรงยก, C_L จะมีค่ามากกว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านทานอากาศ, C_D เมื่อพิจารณาตามสมการที่ (2) และ (3) ทำให้ได้แรงที่ผลักดันส่งผลให้ความเร็วรอบของใบกังหันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและในทางกลับกันในขณะมุมของใบกังหัน, θ เป็น 3° , 4° และ 5° ใบกังหันลมที่หมุนเข้าหาลมเกิดแรงต้านทานอากาศเนื่องจากค่า C_D มีค่ามากกว่าค่า C_L ส่งผลให้ความเร็วรอบของใบกังหันมีแนวโน้มลดลงในทุกสภาวะความเร็วลม

4.2 โมเมนต์บิดของกังหัน (Torsional Moment)

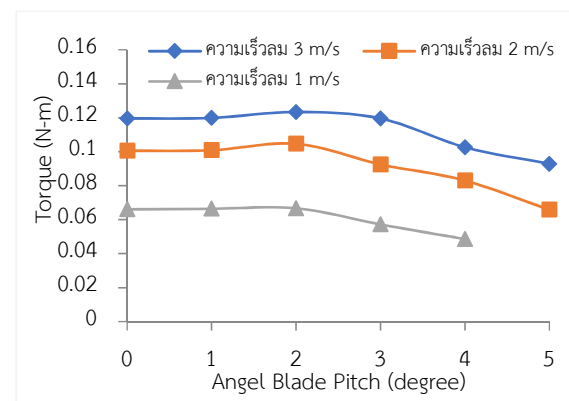
การสร้างภาระให้กับการหมุนของกังหันลมหมุนด้วยความเร็วคงที่ 250 rpm จากนั้นบันทึกผลการทดลองและแสดงผลทดสอบดังนี้



รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์บิดกับมุมของใบกังหัน (กรณี CL = 80 mm)



รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์บิดกับมุมของใบกังหัน (กรณี CL = 100 mm)



รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์บิดกับมุมของใบกังหัน (กรณี CL = 120 mm)

5. สรุป

ผลกระทบต่อการเปลี่ยนขนาดความยาวและการปรับมุมของใบกังหันของกังหันลมแกนตั้งแบบ 3 ใบกังหันที่ทดสอบในอุโมงค์ลมความเร็วต่ำแบบเปิดที่สภาวะความเร็วลม 1, 2 และ 3 m/s ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าที่ขนาดความยาวขนาดความกว้างใบกังหัน, Cl เป็น 80, 100 และ 120 mm ขณะมุมของใบกังหัน, θ เป็น 2° ส่งผลกระทบบ้างดังนี้

1. ความเร็วรอบการหมุนสูงสุดเป็น 759, 597 และ 541 rpm ตามลำดับความกว้างใบกังหัน

2. โมเมนต์บิดสูงสุดเป็น 0.10, 0.12 และ 0.13 N-m ตามลำดับความกว้างใบกังหัน

อีกทั้งยังทราบว่าที่ขนาดความยาวของใบกังหันที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความเร็วรอบการหมุนลดลง และในทางกลับกันจะทำให้โมเมนต์บิดเพิ่มมากขึ้นด้วย

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ และห้องทดลองการประลองทางวิศวกรรม ทำให้งานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จได้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] ธเนศ ไชยชนะ และสัมพันธ์ ไชยเทพ, “อิทธิพลของตำแหน่งของสันใบพัดแบบโค้งต่อประสิทธิภาพของกังหันลมแกนตั้งเพลาร่วมหมุนสวนทางกัน,” วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ, ปีที่ 14, ฉบับที่ 3, หน้า 107-115, 2554.
- [2] ศักดา ใจสมัคร, หัสตินทร์ ศิริรัตน์, และเศกสรร กิตติคุณ, “การออกแบบและสร้างกังหันลมแกนตั้งใบพัดแบบชาโวเนียสเพื่อประยุกต์ใช้ในการสูบน้ำ,” โครงการงานวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาควิชาฯ, เชียงใหม่, ประเทศไทย, 2557.

- [3] สุรเทพ ผลหินลาด, “กังหันลมแกนตั้งแบบโรโมลล์ 4 ใบพัดที่ใช้ NACA0015 และ NACA4412,” โครงการงานวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, มหาวิทยาลัยบูรพา, ชลบุรี, ประเทศไทย, 2558.
- [4] P. Deshpande and X. Li, “Numerical study of Giromill-type wind turbines with symmetrical and non-symmetrical airfoils,” EIJST., vol. 2 no. 8, pp. 195-208, 2013.
- [5] J. Castillo, “Small-scale vertical axis wind turbine design,” Bachelor’s Thesis, Aeronautical Engineering, Tampere University of Applied Sciences, Tampere, Finland, 2011.
- [6] M. Casini, “Small vertical axis wind turbines for energy efficiency of buildings,” JOCT., vol. 4 no. 1, pp. 56-65, 2016.
- [7] T. J. Carrigan, B. H. Dennis, Z. X. Han and B. P. Wang “Aerodynamic shape optimization of a vertical-axis wind turbine using differential evolution,” ISRN Renewable Energy., vol. 2012, pp. 1-16, Oct. 2012.
- [8] ชนชาติ คำวิระ และคณะ, “การศึกษาเชิงทฤษฎีเกี่ยวกับสมรรถนะของกังหันลมแบบโรโมลล์ที่ใช้แพนอากาศชนิดสมมาตร,” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 27, ชลบุรี, ประเทศไทย, 2556, หน้า TSF-2039.
- [9] ศุภอัฐ เกรียดิโสภณ และคณะ, “แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับสมรรถนะของกังหันลมแบบโรโมลล์ที่ใช้แพนอากาศชนิดสมมาตรและชนิดไม่สมมาตร,” การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28, ขอนแก่น, ประเทศไทย, 2557, หน้า 1402-1408.
- [10] T. J. Carrigan, “Aerodynamic shape optimization of a vertical axis wind turbine,” M.S. thesis, Dept. Aero. Eng., UTA., Texas, America, 2010.

- [11] วีรชัย ชัยวรพฤกษ์ และศุภโชค แสงสว่าง, “การทำนายค่าสมรรถนะเชิงสถิติของกังหันลมแบบชาโวเนียสภายใต้การเปลี่ยนแปลงความเร็ว,” วิศวกรรมสารมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, ปีที่ 94, ฉบับที่ 4, หน้า 1-10, 2558.
- [12] ธเนศ ไชยชนะ และคณะ, “โครงการวิจัยเรื่องกังหันลมแกนตั้งแบบ Savonius หลายใบที่มีส่วนบังคับ

ลมสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก,” รายงานฉบับสมบูรณ์ ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินแผ่นดินประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557, มหาวิทยาลัยทักษิณ, พัทลุง, ประเทศไทย หน้า 1-68, 2558.

สมบัติทางกลและทางกายภาพของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกและ ขี้เลื่อยไม้ยางพารา

Mechanical and Physical Properties of Thermoplastic Natural Rubber Composites Reinforced with Rubberwood Sawdust

ชาตรี หอมเขียว^{1,2*} สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์^{1,2} วรพงศ์ บุญช่วยแทน^{1,2} วิริยะ ทองเรือง³

¹ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ต.บ่อयाง อ.เมือง จ.สงขลา 90000

²หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการแปรรูปวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ต.บ่อयाง

อ.เมือง จ.สงขลา 90000

³รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ต.คอหงส์

อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

¹Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering

Rajamangala University of Technology Srivijaya, Muang District, Songkhla 90000

²Materials Processing Technology Research Unit, Department of Industrial Engineering

Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Muang District

Songkhla 90000

³Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering

Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112

*Corresponding author: Email: chatree.h@rmutsv.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติทางกลและทางกายภาพของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกและขี้เลื่อยไม้ยางพาราที่มีผลกระทบมาจากชนิดพลาสติก ปริมาณขี้เลื่อยไม้ และปริมาณสารคู่ควบ ในการผลิตวัสดุเชิงประกอบดำเนินการโดยใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่เพื่อผสมส่วนผสมต่างๆ และใช้เครื่องอัดรีดเพื่อขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบเป็นแผ่นขึ้นงานตัวอย่าง ผลการทดสอบความแปรปรวนสองทางในผลกระทบของปริมาณขี้เลื่อยไม้และปริมาณสารคู่ควบพบว่า ปริมาณขี้เลื่อยไม้และสารคู่ควบมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ ($P\text{-value} < 0.05$) ต่อค่าความแข็งแรงดึง ค่าความแข็งแรงดัด ค่ามอดูลัสการดัด ค่าความแข็งแรงอัด ค่ามอดูลัสการอัด ค่าความแข็ง ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ และค่าเปอร์เซ็นต์การพองตัว โดยการเติมขี้เลื่อยไม้เป็นส่วนผสมในวัสดุเชิงประกอบเพิ่มขึ้นจาก 30 wt% เป็น 50 wt% ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึง ค่าความเครียดการดึง และค่าความแข็งแรงดัดลดลง แต่ค่ามอดูลัสการดึง ค่ามอดูลัสการดัด ค่ามอดูลัสการอัด ค่าความแข็ง ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ และค่าเปอร์เซ็นต์การพองตัวเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกันพบว่า การเติมสารคู่ควบทั้งชนิดมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟฟอลิเอทิลีน และมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟฟอลิโพรพิลีนในวัสดุเชิงประกอบสามารถปรับปรุงให้สมบัติทางกลและทางกายภาพดีขึ้น อย่างไรก็ตามการเติมสารคู่ควบในปริมาณมากเกินไปกลับส่งผลให้สมบัติทางกลมีค่าลดลง และปริมาณสารคู่ควบที่เหมาะสมคือ 4 wt% สำหรับค่าความแข็งแรงดึง ค่าความแข็งแรงอัด ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ และค่าเปอร์เซ็นต์การพองตัว นอกจากนี้วัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิโพรพิลีนและ

ซีลียไม่มีสมบัติการดึง การดัด การอัด และความแข็งสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและซีลียไม่ชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนผสมเท่ากัน

คำสำคัญ: วัสดุเชิงประกอบ เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ ยางธรรมชาติ การวิเคราะห์ความแปรปรวน

ABSTRACT

This research aimed to investigate mechanical and physical properties of thermoplastic natural rubber composites reinforced with rubberwood sawdust, affecting from plastic types, wood sawdust contents and coupling agent contents. In manufacturing the composites, a twin-screw extruder was applied to blend mixture components. The composite pellets were then molded in a compression molding machine as composite panels. From results of experiment, two-way analysis of variance (ANOVA) indicated that the wood sawdust contents and coupling agent contents significantly ($P\text{-value} < 0.05$) affected tensile strength, modulus of rupture, modulus of elasticity, compressive strength and modulus, hardness, water absorption and thickness swelling. Increasing additions of wood sawdust from 30 wt% to 50 wt% into the composites resulting in the tensile strength, tensile strain and modulus of rupture decreased, but tensile modulus, modulus of elasticity, compressive modulus, hardness, water absorption and thickness swelling increased. Likewise, additions of coupling agent both maleic anhydride- grafted polyethylene and maleic anhydride- grafted polypropylene positively improved the mechanical and physical properties of the composites. However, the addition of too much coupling agent reduced the mechanical properties. The optimal coupling agent found was 4 wt% for the tensile strength, compressive strength, water absorption and thickness swelling. Furthermore, the composites with polypropylene and wood sawdust showed clearly higher tensile, flexural, compressive and hardness properties than the composites with high-density polyethylene and wood sawdust, when compared to the same composition rate.

Keyword: Composites, thermoplastic elastomer, natural rubber, analysis of variance.

1. บทนำ

ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกคือ วัสดุที่มีการผสมกันระหว่างยางธรรมชาติและพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติก [1, 2] เช่น พอลิสไตรีน เอทิลีนไวนิลอะซิเตทโคพอลิเมอร์ พอลิเมทิลเมทาไครเลต พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และพอลิโพรพิลีน ซึ่งเหตุผลหลักของการผสมกันระหว่างพอลิเมอร์คือ เพื่อปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ดั้งเดิม เพื่อให้ง่ายต่อกระบวนการผลิต และเพื่อลดต้นทุนของวัสดุ [2, 3] นอกจากนี้ยางธรรมชาติเทอร์โม

พลาสติกมีสมบัติพิเศษคือ ที่อุณหภูมิห้องมีสมบัติยืดหยุ่นอ่อนนุ่มคล้ายยาง และที่อุณหภูมิสูงสามารถอ่อนตัวและหลอมไหลได้เหมือนเทอร์โมพลาสติก [4, 5] ทำให้วัสดุชนิดนี้สามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้โดยใช้กระบวนการที่เหมือนกับการขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกทั่วไป เช่น กระบวนการอัดรีด กระบวนการอัดร้อน และกระบวนการฉีดเข้าแบบ เป็นต้น และที่สำคัญวัสดุชนิดนี้สามารถนำมารีไซเคิลขึ้นรูปใหม่ได้ หลังจากผ่านการแปรรูปมาแล้ว [5]

ลักษณะเด่นของวัสดุยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก คือ มีความสามารถยืดหยุ่นสูง ส่งผลให้สมบัติความแข็งแรงและความแข็งแรงลดลง [6] และเพื่อปรับปรุงสมบัติด้อยเหล่านี้ จึงได้มีการนำสารตัวเติมหรือวัสดุเสริมแรงมาใช้เป็นส่วนผสมในยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก ยกตัวอย่างการนำผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก ส่งผลให้ค่ามอดูลัสการดึงและค่าความแข็งแรงของวัสดุเชิงประกอบเพิ่มขึ้นตามปริมาณของผงแคลเซียมที่เติมเป็นส่วนผสม [2] การใช้เส้นใยปอแก้วและเส้นใยแก้วผสมในยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก สามารถเพิ่มค่ามอดูลัสการดึงและค่าความแข็งแรงของการกระแทกได้เกือบ 100% เมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก [7] เช่นเดียวกันเมื่อเติมเส้นใยปอแก้วและสารมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟฟอพลิโพรพิลีนลงในยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก สามารถเพิ่มความแข็งแรงถึงขั้น 55% เมื่อเทียบกับยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก [8] ในขณะที่การเติมเส้นใยมะพร้าวในยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกสามารถปรับปรุงค่ามอดูลัสและความแข็งแรงดึงได้เช่นกัน [9] และการผสมเส้นใยกระจุกในยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก สามารถปรับปรุงความแข็งแรงดึง มอดูลัสการดึง และความแข็งแรงของการกระแทก โดยค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นถึง 10.7% เมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก [10] ดังนั้นสามารถกล่าวได้ว่าการนำวัสดุเสริมแรงที่มีความแข็งแรงและแข็งแรงมากกว่ามาผสมในยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก จะสามารถปรับปรุงให้สมบัติทางกลบางสมบัติดีขึ้น และสามารถลดต้นทุนให้แก่วัสดุชนิดนี้ [6] ตลอดจนลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

วัสดุเสริมแรงจากเส้นใยธรรมชาติถือได้ว่า เป็นวัสดุที่กำลังได้รับความนิยมสำหรับการนำมาเป็นส่วนผสมในวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ เนื่องจากมีข้อได้เปรียบกว่าเส้นใยสังเคราะห์ในด้านการกัดกร่อนเครื่องจักรต่ำ สามารถรีไซเคิลได้ อันตรายต่อสุขภาพน้อย น้ำหนักเบา และราคาถูก [11] ซึ่งสำหรับประเทศไทย ชี้อย่อยไม้ยางพาราถือได้ว่าเป็นวัสดุที่มีความเหมาะสมอย่างยิ่งต่อการนำมาใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในยางธรรมชาติเทอร์โม

พลาสติก เนื่องจากเป็นที่ทราบกันว่าประเทศไทยเป็นผู้นำของการปลูกและแปรรูปไม้ยางพารา ซึ่งจากกระบวนการแปรรูปของขั้นตอนต่างๆ ชี้อย่อยไม้ยางพาราจะถูกผลิตขึ้นเป็นจำนวนมาก ถึงแม้ในปัจจุบันได้มีการนำชี้อย่อยไม้ยางพาราไปใช้ประโยชน์มากขึ้น เช่น นำไปใช้ผลิตเป็นเชื้อเพลิงชีวมวล ผลิตเป็นแผ่นใยไม้อัด และผลิตเป็นของเล่นเด็ก เป็นต้น แต่ก็ยังคงมีเหลือในปริมาณมากสำหรับการนำไปใช้ผลิตเป็นผลิตภัณฑ์อื่นๆ อย่างไรก็ตามการนำชี้อย่อยไม้ยางพารามาใช้เป็นส่วนผสมในยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก จำเป็นที่ต้องทราบผลกระทบและปริมาณที่เหมาะสม เพื่อประสิทธิภาพในการถ่ายทอดแรงระหว่างชี้อย่อยไม้และเมทริกซ์พอลิเมอร์ [11]

การเติมเส้นใยธรรมชาติเป็นวัสดุเสริมแรงในพอลิเมอร์มีข้อด้อยหนึ่งคือ การยึดเกาะที่ไม่ดีกับเมทริกซ์พอลิเมอร์ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายทอดแรงภายในโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบลดลง ทำให้สมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบมีค่าต่ำ [12, 13] ดังนั้นการยึดเกาะระหว่างเส้นใยธรรมชาติและเมทริกซ์พอลิเมอร์มักใช้สารคู่ควบปรับปรุงสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ อย่างไรก็ตามเพื่อประสิทธิภาพสูงสุดของการใช้สารคู่ควบ จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องเข้าใจผลกระทบของสารคู่ควบที่มีต่อสมบัติทางกลและทางกายภาพของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกและชี้อย่อยไม้ยางพารา

การพัฒนาวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกและชี้อย่อยไม้ยางพารา จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องเข้าใจในผลกระทบของส่วนผสมต่างๆ ที่เติมเข้าไปเป็นส่วนผสม เพื่อให้วัสดุชนิดใหม่ที่ได้มีความสามารถต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานทางวิศวกรรมได้ประโยชน์สูงสุด ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ เพื่อศึกษาสมบัติทางกลและทางกายภาพของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกและชี้อย่อยไม้ยางพารา ที่มีผลกระทบมาจากชนิดของพลาสติก ปริมาณชี้อย่อยไม้ยางพารา และปริมาณสารคู่ควบทั้งชนิดมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟฟอพลิเอทิลีน และมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟฟอพลิโพรพิลีน ซึ่งผลจากงานวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์อย่างมากต่อวงการ

วิชาการวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ และอุตสาหกรรมผลิตวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์และเส้นใยธรรมชาติ

2. วัสดุและวิธีการทดลอง

2.1 วัสดุและการผลิตวัสดุเชิงประกอบ

พลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง เกรด V1160 ที่มีค่าความแข็งแรงดึงที่จุดคราก 29 MPa และพลาสติกพอลิโพรพิลีน เกรด 1100NK ที่มีค่าความแข็งแรงดึงที่จุดคราก 36 MPa ผลิตโดยบริษัท ไออาร์พีซี จำกัด (มหาชน) ยางพาราแท่ง เกรด STR 5L จัดซื้อมาจากองค์การสวนยาง อ.ช้างกลาง จ.นครศรีธรรมราช และซีลี้อยไม้ยางพาราได้รับมาจากโรงเลื่อยไม้ยางพาราใน อ.สะเดา จ.สงขลา นอกจากนี้สารคู่ควบ (Coupling agent) ที่ใช้เพิ่มประสิทธิภาพการยึดเกาะระหว่างซีลี้อยไม้และเมทริกซ์พอลิเมอร์ในงานวิจัยนี้มี 2 ชนิด คือ 1) มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟพอลิเอทิลีน (Maleic Anhydride-Grafted Polyethylene; MAPE) ที่มีส่วนผสมของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ประมาณ 0.5 wt% และ 2) มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟพอลิโพรพิลีน (Maleic Anhydride-Grafted Polypropylene; MAPP) ที่มีส่วนผสมของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ประมาณ 8–10 wt% ซึ่งจัดซื้อจากบริษัท Sigma-Aldrich จำกัด (Missouri, USA)

การเตรียมยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่มีอัตราส่วน 30 : 70 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก (wt%) ระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (R30H70) และระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิโพรพิลีน (R30P70) กระทำโดยการนำวัสดุตั้งกล่าวผสมในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ (รุ่น CTE-D25L40 บริษัท เจริญทัศน์ จำกัด สมุทรปราการ ประเทศไทย) ซึ่งมีการควบคุมอุณหภูมิการผสมอยู่ในช่วง 155-185 °C สำหรับวัสดุที่มีส่วนผสมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง หรือในช่วง 160-190 °C สำหรับวัสดุที่มีส่วนผสมของพอลิโพรพิลีน และความเร็วหมุนของ

เกลียวในการผสม 60 rpm จากนั้นนำเส้นวัสดุยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่อัดรีดออกจากเครื่องไประบายความร้อนในน้ำ และนำไปตัดให้เป็นเม็ดวัสดุยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก

นอกจากนี้ในการผลิตแผ่นชิ้นงานตัวอย่างจากเม็ดวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกและซีลี้อยไม้ยางพารา กระทำโดยนำซีลี้อยไม้ที่ได้รับจากโรงเลื่อยไม้ยางพารามาตัดแยกขนาดโดยใช้ตะแกรงร่อนเบอร์ 40 เมช จากนั้นนำซีลี้อยไม้ที่ผ่านตะแกรงไปอบ เพื่อลดความชื้นที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกผสมกับซีลี้อยไม้ยางพารา และสาร MAPE หรือสาร MAPP ตามสูตรที่กำหนด ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ และควบคุมอุณหภูมิกับความเร็วหมุนของเกลียวในสภาวะเดียวกับการเตรียมยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก ต่อจากนั้นนำเส้นวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกและซีลี้อยไม้ยางพาราที่อัดรีดออกจากเครื่องไประบายความร้อนในอากาศและตัดให้เป็นเม็ดวัสดุเชิงประกอบ

ในขั้นตอนต่อไปทำการอุ่นแม่พิมพ์จนมีอุณหภูมิ 180 °C สำหรับผลิตวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และอุณหภูมิ 190 °C สำหรับผลิตวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิโพรพิลีน จากนั้นนำเม็ดวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกและซีลี้อยไม้ใส่ในแม่พิมพ์ และอัดร้อนด้วยแรงดัน 1.379 MPa (200 psi) เป็นเวลา 3 นาที เมื่อครบเวลาอัดซ้ำด้วยแรงดัน 6.894 MPa (1000 psi) เป็นเวลา 10 นาที และเมื่อครบเวลาที่กำหนด นำแม่พิมพ์และแผ่นชิ้นงานตัวอย่างใส่ในเครื่องอัดเย็นที่มีน้ำหมุนเวียน และอัดด้วยแรงดัน 6.894 MPa เช่นกัน เป็นเวลา 8 นาที เพื่อระบายความร้อนออกจากแผ่นชิ้นงานตัวอย่าง หลังจากนั้นถอดแผ่นชิ้นงานตัวอย่างออกจากแม่พิมพ์และตัดเตรียมเป็นชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบต่าง ๆ

ตารางที่ 1 สูตรส่วนผสมของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกและซีลี้อยู่ไม่ยางพารา

Sample code	Thermoplastic natural rubber		Rubberwood	MAPE (wt%)	MAPP (wt%)
	R30H70 (wt%)	R30P70 (wt%)	sawdust (wt%)		
R30H70W30	70	-	30	-	-
R30H70W30M2	68	-	30	2	-
R30H70W30M4	66	-	30	4	-
R30H70W30M6	64	-	30	6	-
R30H70W50	50	-	50	-	-
R30H70W50M2	48	-	50	2	-
R30H70W50M4	46	-	50	4	-
R30H70W50M6	44	-	50	6	-
R30P70W30	-	70	30	-	-
R30P70W30M2	-	68	30	-	2
R30P70W30M4	-	66	30	-	4
R30P70W30M6	-	64	30	-	6
R30P70W50	-	50	50	-	-
R30P70W50M2	-	48	50	-	2
R30P70W50M4	-	46	50	-	4
R30P70W50M6	-	44	50	-	6

2.2 การวิเคราะห์โครงสร้างพื้นฐานวิทยา

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy; SEM, รุ่น Quanta 400, FEI company, Oregon, USA) ได้นำมาใช้ถ่ายภาพโครงสร้างภายในของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกและซีลี้อยู่ไม่ เพื่อวิเคราะห์การยึดเกาะระหว่างซีลี้อยู่ไม่และเมทริกซ์พอลิเมอร์ และรูพรุนภายในโครงสร้าง อย่างไรก็ตามก่อนการส่องด้วย SEM บริเวณผิวหน้าที่แตกหักต้องเคลือบด้วยทองคำ

2.3 การวิเคราะห์ทางสถิติ

การวิเคราะห์ผลกระทบของปริมาณสารคู่ควบปริมาณซีลี้อยู่ไม่ และการเกิดอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างสารคู่ควบกับซีลี้อยู่ไม่ต่อสมบัติทางกลและทางกายภาพของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกและซีลี้อยู่ไม่ยางพารา ดำเนินการโดยใช้การ

ทดสอบความแปรปรวนสองทาง (Two-Way ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($\alpha=0.05$)

2.4 การทดสอบสมบัติทางกลและทางกายภาพ

การทดสอบการดึง เพื่อหาค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ค่ามอดูลัสการดึง (Tensile modulus) และค่าความเครียดการดึง (Tensile strain) เป็นการทดสอบที่ปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM D638-99 โดยใช้ชิ้นงานทดสอบประเภทที่ 4 ซึ่งมีขนาด 19 mm x 115 mm x 4 mm และความเร็วกว่าที่ใช้ทดสอบการดึง คือ 5 mm/min ในขณะที่การทดสอบการดัด เพื่อหาค่าความแข็งแรงดัด (Modulus of rupture) และค่ามอดูลัสการดัด (Modulus of elasticity) เป็นการทดสอบที่ปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM D790-92 โดยเป็นการทดสอบดัดแบบ 3 จุด ซึ่งชิ้นงานทดสอบมีขนาด 13 mm x 100 mm x 4.8 mm บารองรับชิ้นงาน (Span distance) มี

ระยะห่าง 80 mm และความเร็วที่ใช้ทดสอบการตัด คือ 2 mm/min เช่นเดียวกับการทดสอบการอัด เพื่อหาค่าความแข็งแรงอัด (Compressive strength) และค่ามอดูลัสการอัด (Compressive modulus) เป็นการทดสอบที่ปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM D6108-97 ซึ่งชิ้นงานทดสอบมีขนาด 6 mm x 6 mm x 12 mm และความเร็วที่ใช้ทดสอบการอัด คือ 0.5 mm/min นอกจากนี้ในการทดสอบการดึง การตัด และการอัดดำเนินการโดยใช้เครื่องทดสอบสมบัติทางกลอเนกประสงค์ (รุ่น NRI-TS500-50 ของ บริษัท นรินทร์ อินสทรูเมนต์ จำกัด สมุทรปราการ ประเทศไทย) และดำเนินการในห้องที่มีการควบคุมอุณหภูมิ 25 °C

การทดสอบความแข็งดำเนินการโดยใช้อุปกรณ์วัดความแข็ง Durometer แบบ Shore D (รุ่น GS-702G ของบริษัท Teclock corporation จำกัด Nagano, Japan) ในการทดสอบปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM D2240-91 ซึ่งชิ้นงานทดสอบมีขนาด 30 mm x 30 mm x 6 mm และกระทำที่อุณหภูมิห้อง 25 °C

การทดสอบสมบัติการดูดซับน้ำและการพองตัว เพื่อหาเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ (Water absorption) และเปอร์เซ็นต์การพองตัว (Thickness swelling) เป็นการปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM D570-88 ซึ่งชิ้นงานทดสอบมีขนาด 10 mm x 20 mm x 6 mm ก่อนการทดสอบนำชิ้นงานตัวอย่างไปอบที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นงานตัวอย่างไปแช่น้ำหนักด้วยเครื่องชั่งดิจิทัลที่มีความละเอียด 0.001 g และวัดขนาดความหนาด้วยเวอร์เนียร์ดิจิทัลที่มีความละเอียด 0.01 mm หลังจากนั้นนำชิ้นงานตัวอย่างไปแช่น้ำที่อุณหภูมิห้อง 25 °C เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาที่กำหนดนำชิ้นงานตัวอย่างชั่งน้ำหนักและวัดขนาดความหนาอีกครั้ง เพื่อคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำและเปอร์เซ็นต์การพองตัว ดังสมการที่ (1) และ (2)

$$\text{การดูดซับน้ำ (\%)} = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ W_1 และ W_2 คือ น้ำหนักก่อนการแช่น้ำ (g) และ น้ำหนักหลังการแช่น้ำ (g) ตามลำดับ

$$\text{การพองตัว (\%)} = \frac{t_2 - t_1}{t_1} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ t_1 และ t_2 คือ ความหนาก่อนการแช่น้ำ (mm) และความหนาหลังการแช่น้ำ (mm) ตามลำดับ

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1. การวิเคราะห์โครงสร้างสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบ

โครงสร้างสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกและซีลี้อยู่อย่างพารา แสดงดังรูปที่ 1 โครงสร้างภายในของวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเสริมแรงด้วยซีลี้อยู่ 30 wt% (รูปที่ 1ก) และ 50 wt% (รูปที่ 1ข) มีรูพรุนเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก และดูเหมือนว่าวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยซีลี้อยู่ 50 wt% มีขนาดของรูพรุนและช่องว่างระหว่างเมทริกซ์พอลิเมอร์และซีลี้อยู่ที่ใหญ่กว่าวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยซีลี้อยู่ 30 wt%

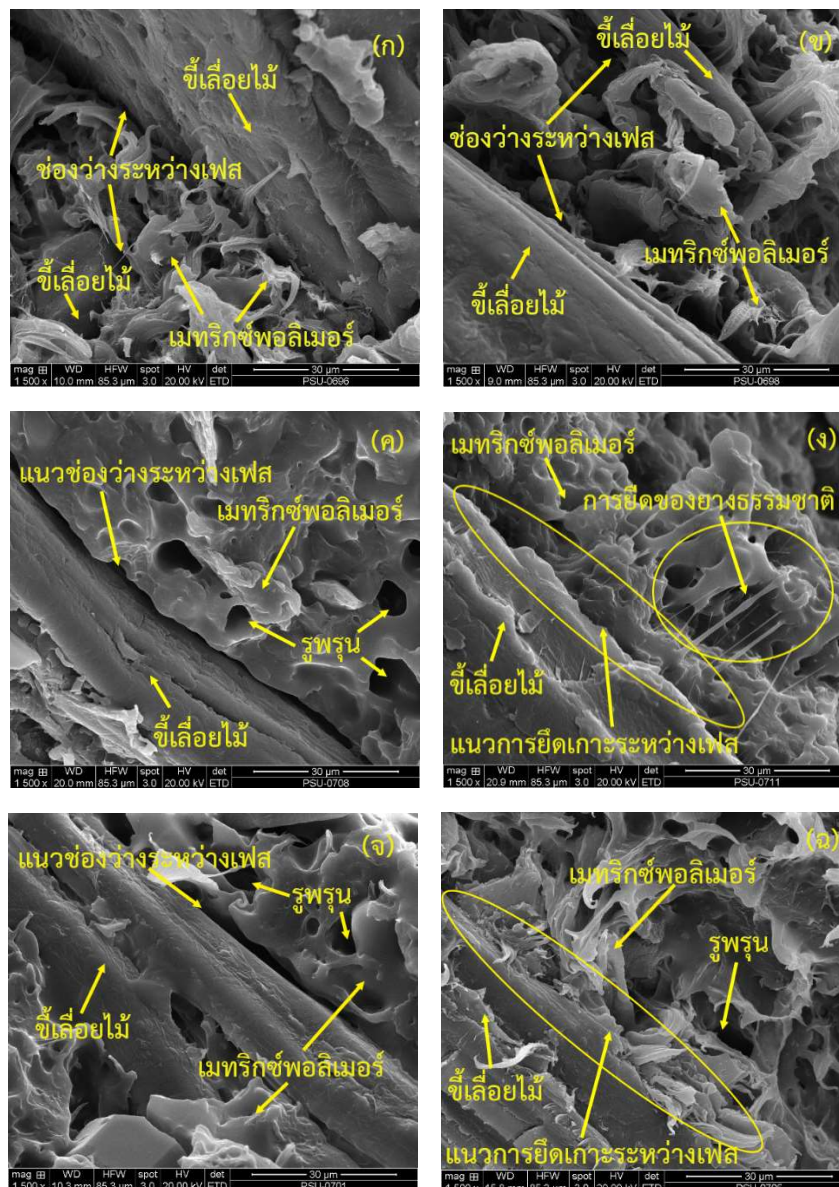
โครงสร้างสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิโพรพิลีนเสริมแรงด้วยซีลี้อยู่ 30 wt% (รูปที่ 1ค) และ 50 wt% (รูปที่ 1ด) ชี้ให้เห็นว่า ความถี่ในการเกิดรูพรุนและช่องว่างระหว่างเฟสภายในโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยซีลี้อยู่ 50 wt% มีมากกว่าวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยซีลี้อยู่ 30 wt% เนื่องจากซีลี้อยู่ไม่มีความสามารถในการยึดเกาะที่ไม่ดีกับเมทริกซ์พอลิเมอร์ ทำให้เมื่อเติมซีลี้อยู่เป็นส่วนผสมในวัสดุเชิงประกอบเพิ่มขึ้น ส่งผลให้รูพรุนและช่องว่างระหว่างเฟสเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เช่นเดียวกัน Ashori [12] กล่าวว่า พลาสติกและไม้เปรียบเสมือนน้ำกับน้ำมัน ซึ่งไม่สามารถผสมกันได้เป็นอย่างดี [13] ดังนั้นการเพิ่มประสิทธิภาพการยึดเกาะและความเข้ากันได้ระหว่างซีลี้อยู่และเมทริกซ์พอลิเมอร์มักต้องปรับปรุงด้วยการเติมสารคู่ควบ [13, 14] และเมื่อเติมสารคู่ควบชนิด MAPP ปริมาณ 4 wt% ในวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิโพรพิลีนเสริมแรงด้วยซีลี้อยู่ 30 wt% (รูปที่ 1ง) และ 50 wt% (รูปที่ 1ด) แสดงให้เห็นว่า ประสิทธิภาพการยึดเกาะระหว่างซีลี้อยู่และ

ปีที่ 13 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม – เมษายน พ.ศ. 2561

เมทริกซ์พอลิเมอร์มีมากขึ้น โดยช่องว่างระหว่างเมทริกซ์และวัสดุเสริมแรงเกิดขึ้นน้อยลง

เมื่อเปรียบเทียบโครงสร้างสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเสริมแรงด้วยซีล้อยไม้ 30 wt% (รูปที่ 1ก) และ 50 wt% (รูปที่ 1ข) กับวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิโพรพิลีน

เสริมแรงด้วยซีล้อยไม้ 30 wt% (รูปที่ 1ค) และ 50 wt% (รูปที่ 1ง) พบว่าที่ปริมาณซีล้อยไม้เท่ากัน โครงสร้างภายในของวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงมีรูพรุนเกิดขึ้นมากกว่าและช่องว่างระหว่างเมทริกซ์พอลิเมอร์และซีล้อยไม้ใหญ่กว่าวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิโพรพิลีน



รูปที่ 1 โครงสร้างสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 1500 เท่า ของวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเสริมแรงด้วยซีล้อยไม้ (ก) ปริมาณ 30 wt% (R30H70W30) (ข) ปริมาณ 50 wt% (R30H70W50) และที่มีส่วนผสมของพอลิโพรพิลีนเสริมแรงด้วยซีล้อยไม้ (ค) ปริมาณ 30 wt% (R30P70W30) (ง) ปริมาณ 30 wt% และเติม MAPP 4 wt% (R30P70W30M4) (จ) ปริมาณ 50 wt% (R30P70W50) และฉ) ปริมาณ 50 wt% และเติม MAPP 4 wt% (R30P70W50M4)

3.2. การวิเคราะห์ผลทางสถิติในสมบัติทางกลและทางกายภาพของวัสดุเชิงประกอบ

ผลการทดสอบความแปรปรวนสองทางในผลกระทบของปริมาณสารคู่ควบและปริมาณซีลี้อยู่ไม่ต่อสมบัติทางกลและทางกายภาพของวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเสริมแรงด้วยซีลี้อยู่ไม่แสดงดังรูปที่ 2 ผลการทดสอบทางสถิติแสดงให้เห็นว่าปริมาณสารคู่ควบมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ ($P\text{-value} < 0.05$) ต่อค่าความแข็งแรงดึง ค่าความแข็งแรงดัด ค่ามอดูลัสการดัด ค่าความแข็งแรงอัด ค่ามอดูลัสการอัด ค่าความแข็งแรง ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ และค่าเปอร์เซ็นต์การพองตัว เช่นเดียวกันปริมาณซีลี้อยู่ไม่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ ($P\text{-value} < 0.05$) ต่อทุกสมบัติทางกลและทางกายภาพ ในขณะที่การเกิดอันตรกิริยาระหว่างสารคู่ควบและซีลี้อยู่ไม่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ ($P\text{-value} < 0.05$) เฉพาะค่ามอดูลัสการดัด ค่า

มอดูลัสการอัด ค่าความแข็งแรง ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ และค่าเปอร์เซ็นต์การพองตัว

รูปที่ 3 แสดงผลการทดสอบความแปรปรวนสองทางในผลกระทบของปริมาณสารคู่ควบและปริมาณซีลี้อยู่ไม่ต่อสมบัติทางกลและทางกายภาพของวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิโพรพิลีนเสริมแรงด้วยซีลี้อยู่ไม่ ซึ่งชี้ให้เห็นว่า ทั้งปริมาณสารคู่ควบและปริมาณซีลี้อยู่ไม่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ ($P\text{-value} < 0.05$) ต่อสมบัติทางกลและทางกายภาพ ยกเว้นค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำที่ปริมาณซีลี้อยู่ไม่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ ($P\text{-value} > 0.05$) นอกจากนี้พบว่า การเกิดอันตรกิริยาระหว่างสารคู่ควบและซีลี้อยู่ไม่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ ($P\text{-value} < 0.05$) ต่อค่าความแข็งแรงดึง ค่าความเค้นการดึง ค่าความแข็งแรงอัด ค่ามอดูลัสการอัด ค่าความแข็งแรง และค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ

Two-way ANOVA: Tensile Strength						
Source	DF	SS	MS	F	P	
MAPE content	3	4.0526	1.35086	16.02	0.000	
Sawdust content	1	5.2136	5.21365	61.82	0.000	
Interaction	3	0.2146	0.07152	0.85	0.478	
Error	32	2.6987	0.08434			
Total	39	12.1795				
Two-way ANOVA: Tensile Modulus						
Source	DF	SS	MS	F	P	
MAPE content	3	2713.2	904.41	1.36	0.272	
Sawdust content	1	3818.7	3818.69	5.75	0.023	
Interaction	3	698.0	232.66	0.35	0.789	
Error	32	21255.3	664.23			
Total	39	28485.1				
Two-way ANOVA: Tensile Strain						
Source	DF	SS	MS	F	P	
MAPE content	3	2.7484	0.9161	2.49	0.078	
Sawdust content	1	17.5300	17.5300	47.65	0.000	
Interaction	3	0.7786	0.2595	0.71	0.556	
Error	32	11.7722	0.3679			
Total	39	32.8293				
Two-way ANOVA: Modulus of Rupture						
Source	DF	SS	MS	F	P	
MAPE content	3	10.3122	3.4374	3.63	0.023	
Sawdust content	1	31.0735	31.0735	32.78	0.000	
Interaction	3	0.2555	0.0852	0.09	0.965	
Error	32	30.3342	0.9479			
Total	39	71.9755				
Two-way ANOVA: Modulus of Elasticity						
Source	DF	SS	MS	F	P	
MAPE content	3	162352	54117	38.07	0.000	
Sawdust content	1	171819	171819	120.86	0.000	
Interaction	3	45421	15140	10.65	0.000	
Error	32	45494	1422			
Total	39	425085				

Two-way ANOVA: Compressive Strength						
Source	DF	SS	MS	F	P	
MAPE content	3	5.6784	1.89278	3.42	0.029	
Sawdust content	1	5.4317	5.43169	9.81	0.004	
Interaction	3	1.7214	0.57380	1.04	0.390	
Error	32	17.7152	0.55360			
Total	39	30.5466				
Two-way ANOVA: Compressive Modulus						
Source	DF	SS	MS	F	P	
MAPE content	3	133273	44424.4	65.83	0.000	
Sawdust content	1	64658	64658.5	95.82	0.000	
Interaction	3	40257	13419.0	19.89	0.000	
Error	32	21593	674.8			
Total	39	259782				
Two-way ANOVA: Hardness						
Source	DF	SS	MS	F	P	
MAPE content	3	69.159	23.053	38.79	0.000	
Sawdust content	1	133.627	133.627	224.85	0.000	
Interaction	3	19.550	6.517	10.97	0.000	
Error	32	19.018	0.594			
Total	39	241.353				
Two-way ANOVA: Water Absorption						
Source	DF	SS	MS	F	P	
MAPE content	3	20.1346	6.71153	33.75	0.000	
Sawdust content	1	9.7895	9.78952	49.23	0.000	
Interaction	3	5.8637	1.95458	9.83	0.000	
Error	32	6.3634	0.19885			
Total	39	42.1512				
Two-way ANOVA: Thickness Swelling						
Source	DF	SS	MS	F	P	
MAPE content	3	9.2599	3.08665	38.70	0.000	
Sawdust content	1	9.3339	9.33390	117.03	0.000	
Interaction	3	5.4954	1.83180	22.97	0.000	
Error	32	2.5522	0.07976			
Total	39	26.6414				

รูปที่ 2 ผลการทดสอบความแปรปรวนสองทางในผลกระทบของปริมาณสารคู่ควบและปริมาณซีลี้อยู่ไม่ต่อสมบัติทางกลและทางกายภาพของวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเสริมแรงด้วยซีลี้อยู่ไม่

3.3. สมบัติการดึงของวัสดุเชิงประกอบ

สมบัติการดึงของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกและซีลี้อย่างพารา ซึ่งประกอบด้วย ค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดูลัสการดึง และค่าความเครียดการดึงแสดงดังรูปที่ 4ก 4ข และ 4ค ตามลำดับ โดยซีให้เห็นว่า วัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิโพรพิลีนและซีลี้อยู่มีค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดูลัสการดึง และค่าความเครียดการดึงสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและซีลี้อยู่อย่างชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบที่อัตราส่วนผสมเท่ากัน เนื่องจากพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีนมีความแข็งแรงมากกว่าชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ดังแสดงข้อมูลในหัวข้อที่ 2.1 ทำให้เมื่อผสมกับยางธรรมชาติ พอลิโพรพิลีนสามารถยังคงรักษาความแข็งแรงได้สูงกว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง

การเติมซีลี้อยู่ไม่เป็นส่วนผสมในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกและซีลี้อยู่ไม่เพิ่มขึ้นจาก 30 wt% เป็น 50 wt% ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงและค่าความเครียดการดึงลดลง เพราะความสามารถการเสียรูประหว่างผิวหน้าของซีลี้อยู่และเมทริกซ์พอลิเมอร์ลดลง ตลอดจนการเติมซีลี้อยู่ที่เปราะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การยืดตัว ณ จุดขาดลดลง [9] อย่างไรก็ตามกลับพบว่า ค่ามอดูลัสการดึงมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเติมซีลี้อยู่ไม่เป็นส่วนผสมในวัสดุเชิงประกอบมากขึ้น เนื่องจากซีลี้อยู่ไม่มีค่ามอดูลัสสูงกว่ายางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก ดังนั้นการเติมซีลี้อยู่ไม่เป็นส่วนผสมในเมทริกซ์พอลิเมอร์เพิ่มขึ้นเป็นการปรับปรุงความแข็งแรงของวัสดุเชิงประกอบอย่างมีนัยสำคัญ [9]

Two-way ANOVA: Tensile Strength					
Source	DF	SS	MS	F	P
MAPP content	3	298.140	99.3800	234.87	0.000
Sawdust content	1	88.031	88.0309	208.05	0.000
Interaction	3	6.671	2.2236	5.26	0.005
Error	32	13.540	0.4231		
Total	39	406.382			
Two-way ANOVA: Tensile Modulus					
Source	DF	SS	MS	F	P
MAPP content	3	13980.0	4660.0	6.90	0.001
Sawdust content	1	33987.2	33987.2	50.35	0.000
Interaction	3	3033.5	1011.2	1.50	0.234
Error	32	21599.4	675.0		
Total	39	72600.0			
Two-way ANOVA: Tensile Strain					
Source	DF	SS	MS	F	P
MAPP content	3	31.074	10.3581	26.60	0.000
Sawdust content	1	83.781	83.7813	215.14	0.000
Interaction	3	17.448	5.8161	14.94	0.000
Error	32	12.461	0.3894		
Total	39	144.765			
Two-way ANOVA: Modulus of Rupture					
Source	DF	SS	MS	F	P
MAPP content	3	559.494	186.498	126.00	0.000
Sawdust content	1	68.727	68.727	46.43	0.000
Interaction	3	2.183	0.728	0.49	0.691
Error	32	47.366	1.480		
Total	39	677.769			
Two-way ANOVA: Modulus of Elasticity					
Source	DF	SS	MS	F	P
MAPP content	3	2424455	808152	305.08	0.000
Sawdust content	1	89592	89592	33.82	0.000
Interaction	3	4625	1542	0.58	0.631
Error	32	84768	2649		
Total	39	2603440			

Two-way ANOVA: Compressive Strength					
Source	DF	SS	MS	F	P
MAPP content	3	240.324	80.1079	39.85	0.000
Sawdust content	1	59.952	59.9515	29.82	0.000
Interaction	3	45.797	15.2655	7.59	0.001
Error	32	64.325	2.0102		
Total	39	410.397			
Two-way ANOVA: Compressive Modulus					
Source	DF	SS	MS	F	P
MAPP content	3	210420	70140	133.01	0.000
Sawdust content	1	439125	439125	832.71	0.000
Interaction	3	91507	30502	57.84	0.000
Error	32	16875	527		
Total	39	757927			
Two-way ANOVA: Hardness					
Source	DF	SS	MS	F	P
MAPP content	3	238.672	79.557	69.63	0.000
Sawdust content	1	128.128	128.128	112.15	0.000
Interaction	3	18.862	6.287	5.50	0.004
Error	32	36.560	1.143		
Total	39	422.222			
Two-way ANOVA: Water Absorption					
Source	DF	SS	MS	F	P
MAPP content	3	3.93736	1.31245	11.46	0.000
Sawdust content	1	0.45281	0.45281	3.95	0.055
Interaction	3	1.81581	0.60527	5.28	0.004
Error	32	3.66637	0.11457		
Total	39	9.87235			
Two-way ANOVA: Thickness Swelling					
Source	DF	SS	MS	F	P
MAPP content	3	1.44609	0.48203	4.54	0.009
Sawdust content	1	2.57742	2.57742	24.28	0.000
Interaction	3	0.49387	0.16462	1.55	0.220
Error	32	3.39682	0.10615		
Total	39	7.91419			

รูปที่ 3 ผลการทดสอบความแปรปรวนสองทางในผลกระทบของปริมาณสารคู่ควบและปริมาณซีลี้อยู่ต่อสมบัติทางกลและทางกายภาพของวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิโพรพิลีนเสริมแรงด้วยซีลี้อยู่

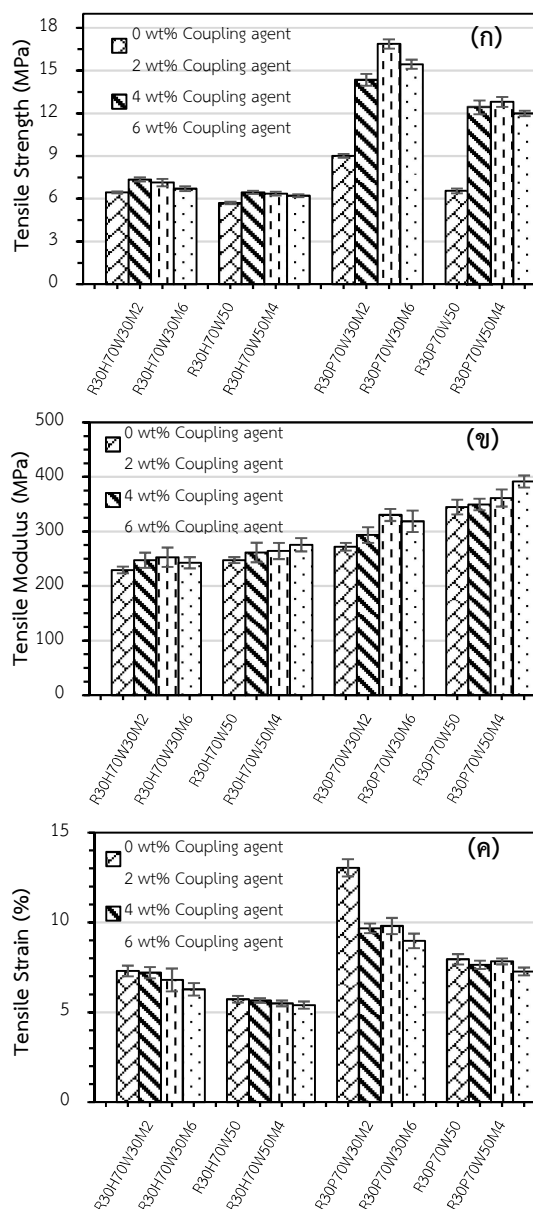
การเติมสารคู่ควบทั้งชนิด MAPE และ MAPP ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกและซีลียอไม้สามารถปรับปรุงค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดูลัสการดึงให้มีค่าสูงขึ้น โดยเฉพาะเมื่อเติมสาร MAPP ปริมาณ 2 wt% ในวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิโพรพิลีนพบว่า ค่าความแข็งแรงดึงมีค่าเพิ่มประมาณ 59% และ 89% สำหรับวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของซีลียอไม้ 30 wt% และ 50 wt% ตามลำดับ และเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 87% และ 95% ตามลำดับ เมื่อเติมสาร MAPP เป็นส่วนผสม 4 wt% พฤติกรรมนี้สามารถพิสูจน์ได้จากโครงสร้างสัญญาณวิทยาในรูปที่ 1 ซึ่งชี้ให้เห็นว่า วัสดุเชิงประกอบที่เติมสารคู่ควบเป็นส่วนผสม 4 wt% มีการยืดเกาะระหว่างซีลียอไม้และเมทริกซ์พอลิเมอร์แข็งแรงมากขึ้น โดยช่องว่างระหว่างวัสดุเสริมแรงและเมทริกซ์เกิดขึ้นน้อยลง เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเชิงประกอบที่ไม่เติมสารคู่ควบ ดังนั้นวัสดุเชิงประกอบที่เติมสารคู่ควบจึงมีการถ่ายทอดแรงเค้นภายในโครงสร้างจากพอลิเมอร์ไปยังซีลียอไม้มีประสิทธิภาพมากขึ้น [15, 16] อย่างไรก็ตามค่าความแข็งแรงดึงลดลงเล็กน้อยเมื่อเติมสาร MAPP เป็นส่วนผสม 6 wt% ในขณะเดียวกันพบด้วยว่า การเติมสาร MAPE ปริมาณมากกว่า 2 wt% ในวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงลดลงตามปริมาณของสาร MAPE ที่เติมเป็นส่วนผสมเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกันในวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของซีลียอไม้ 30 wt% พบว่าค่ามอดูลัสการดึงลดลงเช่นกัน เมื่อเติมสารคู่ควบเป็นส่วนผสม 6 wt% อย่างไรก็ตามสำหรับวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของซีลียอไม้ 50 wt% กลับพบว่า การเติมสารคู่ควบเพิ่มขึ้นในช่วง 2-6 wt% ส่งผลให้ค่ามอดูลัสการดึงเพิ่มขึ้นตามปริมาณของสารคู่ควบที่เติมเป็นส่วนผสม

นอกจากนี้ค่าความเครียดการดึงของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกและซีลียอไม้ยางพารามีค่าลดลง เมื่อเติมสารคู่ควบเป็นส่วนผสมเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะ

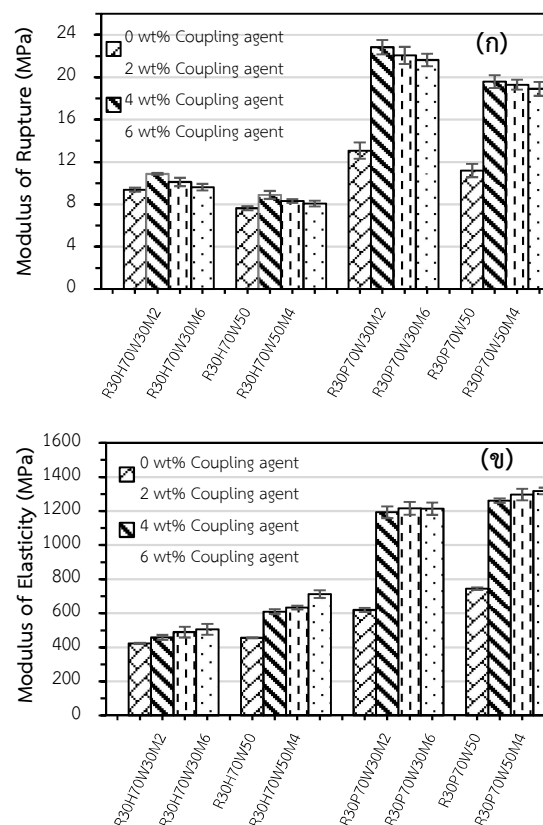
วัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิโพรพิลีนและซีลียอไม้ 30 wt% พบว่ามีค่าความเครียดการดึงลดลงประมาณ 34% เมื่อเติมสารคู่ควบชนิด MAPP ปริมาณ 2 wt% เป็นส่วนผสม สิ่งนี้เป็นไปได้ว่า สัดส่วนยางพาราที่เติมเป็นส่วนผสมมีปริมาณลดลง เนื่องจากการเติมสารคู่ควบทดแทน ทำให้ความสามารถการยึดตัวของวัสดุเชิงประกอบลดลง

3.4. สมบัติการดัดของวัสดุเชิงประกอบ

จากการวิเคราะห์ทางสถิติก่อนหน้า ผลปรากฏว่า ปริมาณสารคู่ควบและปริมาณซีลียอไม้มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความแข็งแรงดัด และค่ามอดูลัสการดัด และในรูปที่ 5ก และ 5ข แสดงให้เห็นด้วยว่า ค่าความแข็งแรงดัด และค่ามอดูลัสการดัด ตามลำดับ มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เมื่อเติมสารคู่ควบเป็นส่วนผสม โดยการเติมสารคู่ควบชนิด MAPP ปริมาณ 2 wt% เป็นส่วนผสมในวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิโพรพิลีนพบว่า ค่าความแข็งแรงดัดเพิ่มขึ้น 74% และ 75% ในขณะที่ค่ามอดูลัสการดัดเพิ่มขึ้น 92% และ 69% สำหรับวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยซีลียอไม้ 30 wt% และ 50 wt% ตามลำดับ เนื่องจากเกิดการสร้างพันธะโควาเลนต์ระหว่างกลุ่มไฮดรอกซิลของเซลลูโลสและกลุ่มแอนไฮไดรด์ของ MAPP ซึ่งเป็นหนึ่งในสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดความแข็งแรงของระบบวัสดุเชิงประกอบ [7] เช่นเดียวกันการสร้างพันธะระหว่าง MAPP กับห่วงโซ่ของพอลิโพรพิลีนเกิดขึ้นมาจากการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ ดังนั้นการถ่ายทอดความเค้นที่เกิดขึ้นในเมทริกซ์พอลิเมอร์ไปยังซีลียอไม้ เกิดขึ้นโดยผ่านการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ [7] อย่างไรก็ตามการเติมสารคู่ควบเพิ่มขึ้นมากกว่า 2 wt% (ปริมาณ 4-6 wt%) พบว่า ค่าความแข็งแรงดัดลดลงบ้าง ตามปริมาณของสารคู่ควบที่เติมเป็นส่วนผสม ซึ่งการเติมสารคู่ควบปริมาณมากเกินไปเมื่อเทียบกับปริมาณซีลียอไม้ สารคู่ควบที่เป็นส่วนเกินจะส่งผลให้โมเลกุลของพลาสติกเกิดการเลื่อนหลุด [15]



รูปที่ 4 ผลกระทบของชนิดพลาสติก ปริมาณซีลี้อยไม้ และปริมาณสารคู่ควต่อ (ก) ความแข็งแรงดึง (ข) มอดุลัสการดึง และ (ค) ความเครียดการดึงของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกและซีลี้อยไม้ ยางพารา



รูปที่ 5 ผลกระทบของชนิดพลาสติก ปริมาณซีลี้อยไม้ และปริมาณสารคู่ควต่อ (ก) ความแข็งแรงดัด และ (ข) มอดุลัสการดัดของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกและซีลี้อยไม้ยางพารา

รูปที่ 5 แสดงให้เห็นด้วยว่า การเติมซีลี้อยไม้ ยางพาราเป็นส่วนผสมในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ เทอร์โมพลาสติกและซีลี้อยไม้เพิ่มขึ้นจาก 30 wt% เป็น 50 wt% ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดัดลดลง สิ่งนี้เป็น เพราะเมทริกซ์พอลิเมอร์ไม่สามารถห่อหุ้มผิวซีลี้อยไม้ได้ อย่างทั่วถึง และเกิดช่องว่างภายในโครงสร้างมากขึ้น ซึ่ง นำไปสู่การยึดเกาะที่ไม่แข็งแรงระหว่างผิวหน้าของซีลี้อย ไม้และเมทริกซ์ ทำให้การแยกตัวระหว่างวัสดุทั้งสอง เกิดขึ้นได้อย่างง่าย [17, 18] ดังนั้นความแข็งแรงทางกล ของวัสดุเชิงประกอบจึงลดลง [18] ในทางตรงกันข้ามการ เติมซีลี้อยไม้เป็นส่วนผสมเพิ่มขึ้นกลับทำให้ค่ามอดุลัสการ ดัดเพิ่มขึ้น เพราะในความเป็นจริงซีลี้อยไม้ยางพารามี ความแข็งแรงมากกว่าพอลิเมอร์ [16] ดังนั้นวัสดุเชิง ประกอบที่มีซีลี้อยไม้เป็นส่วนผสมมากกว่า จำเป็นต้องใช้

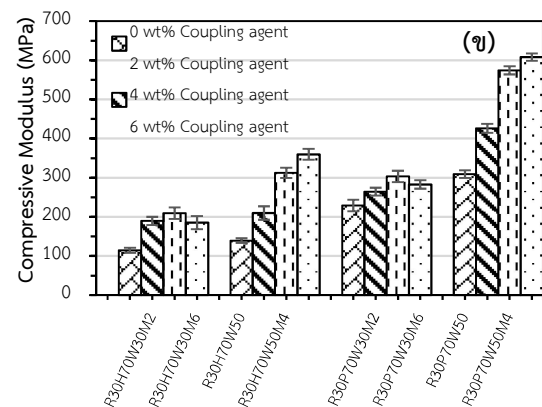
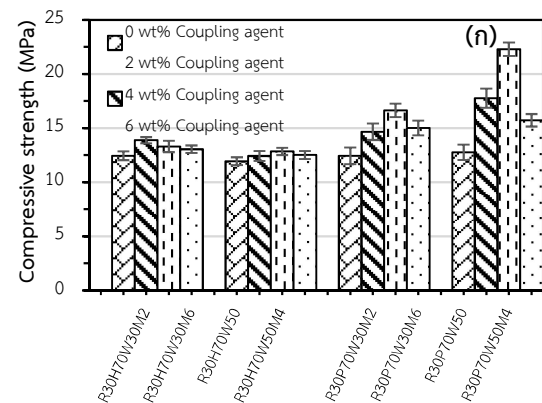
ความเค้นที่สูงกว่า เพื่อให้เกิดการเสียรูปเท่ากัน [16, 19] นอกจากนี้พบว่า ที่อัตราส่วนผสมเท่ากัน วัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิโพรพิลีนมีค่าความแข็งแรงดัดและค่ามอดูลัสการดัดสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบที่อัตราส่วนผสมเท่ากัน

3.5. สมบัติการอัดของวัสดุเชิงประกอบ

ความผันแปรของค่าความแข็งแรงอัดและค่ามอดูลัสการอัด แสดงในรูปที่ 6ก และ 6ข ตามลำดับ โดยมีผลกระทบมาจากชนิดพลาสติก ปริมาณซีลี้อยไม้ และปริมาณสารคู่ควบ โดยพบว่าวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงมีค่าความแข็งแรงอัดและค่ามอดูลัสการอัดต่ำกว่าวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิโพรพิลีน เมื่อเปรียบเทียบที่อัตราส่วนผสมเท่ากัน พฤติกรรมนี้สามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับสมบัติการดึง โดยปกติพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงมีความแข็งแรงต่ำกว่าพอลิโพรพิลีน นอกจากนี้พบว่า วัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิโพรพิลีนและเสริมแรงด้วยซีลี้อยไม้ปริมาณ 50 wt% มีค่าความแข็งแรงอัดและค่ามอดูลัสการอัดสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยซีลี้อยไม้ปริมาณ 30 wt% แต่วัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและเสริมแรงด้วยซีลี้อยไม้ปริมาณ 50 wt% กลับมีค่าความแข็งแรงอัดต่ำกว่าวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยซีลี้อยไม้ปริมาณ 30 wt% เล็กน้อย

การเติมสารคู่ควบทั้งชนิด MAPE และชนิด MAPP สามารถปรับปรุงค่าความแข็งแรงอัดและค่ามอดูลัสการอัด โดยวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและซีลี้อยไม้ 50 wt% และวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิโพรพิลีนและซีลี้อยไม้ 30 wt% และ 50 wt% มีค่าความแข็งแรงอัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณของสารคู่ควบ เมื่อเติมสารคู่ควบเป็นส่วนผสมในช่วง 2-4 wt% แต่เมื่อเติมสารคู่ควบ 6 wt% กลับส่งผลให้ค่าความแข็งแรงอัดลดลง นอกเหนือจากนี้พบว่าวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่มีส่วนผสมของซีลี้อยไม้ยางพารา 50 wt% มีค่ามอดูลัสการ

อัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณของสารคู่ควบที่เติมเป็นส่วนผสมเมื่อเติมสารคู่ควบเป็นส่วนผสมในช่วง 2-6 wt% แต่สำหรับวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของซีลี้อยไม้ยางพารา 30 wt% มอดูลัสการอัดมีค่าลดลงเมื่อเติมสารคู่ควบเป็นส่วนผสม 6 wt%



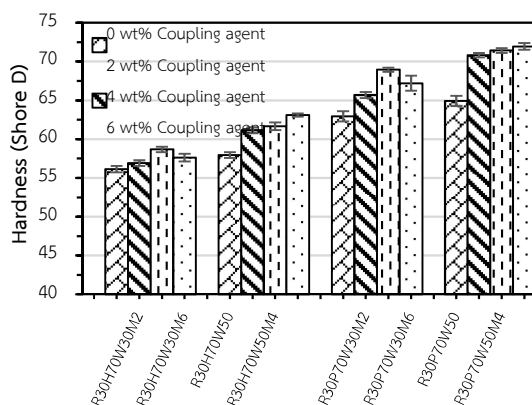
รูปที่ 6 ผลกระทบของชนิดพลาสติก ปริมาณซีลี้อยไม้ และปริมาณสารคู่ควบต่อ (ก) ความแข็งแรงอัด และ (ข) มอดูลัสการอัดของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกและซีลี้อยไม้ยางพารา

3.6. สมบัติความแข็งของวัสดุเชิงประกอบ

รูปที่ 7 แสดงการเติมสารคู่ควบเป็นส่วนผสมเพิ่มขึ้นในช่วง 2-6 wt% สามารถปรับปรุงความแข็งของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกและซีลี้อยไม้ยางพาราให้มีความแข็งเพิ่มขึ้นตามปริมาณของสารคู่ควบที่เติมเป็นส่วนผสม เนื่องจากสารคู่ควบปรับปรุงการปฏิสัมพันธ์ระหว่างลิกโนเซลลูโลสและเมทริกซ์พอลิเมอร์ ส่งผลให้การยึดเกาะระหว่างผิวหน้าของซีลี้อยไม้และพอลิ

เมอร์แข็งแรงขึ้น [7] อย่างไรก็ตามวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่เสริมแรงด้วยซีลี้อยู่ไม่ ยางพารา 30 wt% แสดงการลดลงของค่าความแข็งเมื่อเติมสารคู่ควบเป็นส่วนผสม 6 wt% โดย Kuo และคณะ [20] กล่าวว่า ปริมาณที่เหมาะสมของสารคู่ควบอยู่ในช่วง 3–4.5 wt% เพราะการยึดเกาะระหว่างผิวหน้าของซีลี้อยู่ไม่และเมทริกซ์พอลิเมอร์จะอ่อนแอลง เมื่อมีการเติมสารคู่ควบในปริมาณที่มากกว่านี้

นอกจากนี้พบว่า ค่าความแข็งของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกและซีลี้อยู่ไม่ค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของซีลี้อยู่ไม่ที่เติมเป็นส่วนผสมมากขึ้น สิ่งนี้เป็นเพราะในความเป็นจริงไม่มีความแข็งมากกว่าพอลิเมอร์ [21] ทำให้เมื่อเติมซีลี้อยู่ไม่เป็นส่วนผสมเพิ่มขึ้น ทดแทนเนื้อยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก ค่าความแข็งของวัสดุเชิงประกอบจึงเพิ่มขึ้นตามปริมาณของซีลี้อยู่ไม่ เช่นเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนผสมเท่ากัน พบด้วยว่าวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิโพรพิลีนมีค่าความแข็งสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงอย่างชัดเจน เนื่องจากพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีนมีความแข็งมากกว่าชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง โดยพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีนมีความแข็ง 91.5 Shore D และชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงมีความแข็ง 65.25 Shore D



รูปที่ 7 ผลกระทบของชนิดพลาสติก ปริมาณซีลี้อยู่ไม่ และปริมาณสารคู่ควบต่อความแข็งของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกและซีลี้อยู่ไม่ยางพารา

3.7. สมบัติการดูดซับน้ำและการพองตัวของวัสดุเชิงประกอบ

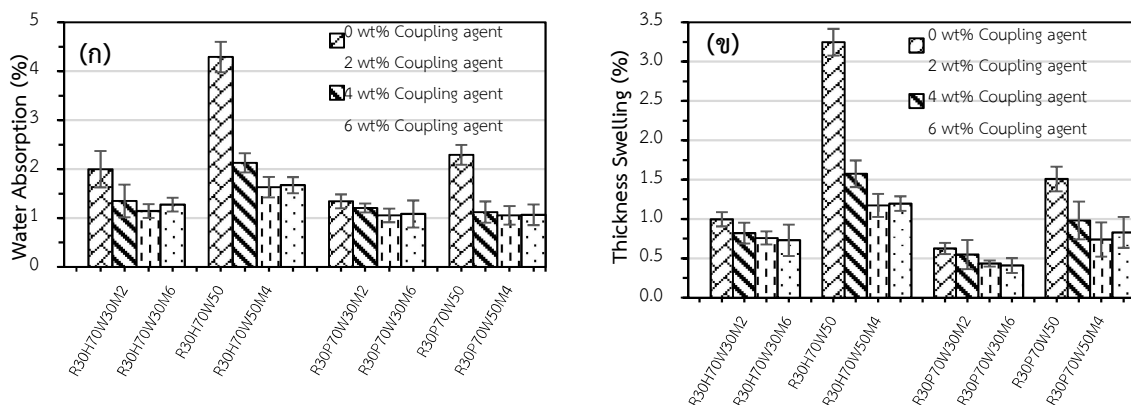
ผลกระทบของชนิดพลาสติก ปริมาณซีลี้อยู่ไม่ และปริมาณสารคู่ควบต่อค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำและค่าเปอร์เซ็นต์การพองตัวของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกและซีลี้อยู่ไม่ยางพาราแสดงในรูปที่ 8ก และ 8ข ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนผสมเท่ากัน พบว่าวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิโพรพิลีนมีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำและค่าเปอร์เซ็นต์การพองตัวต่ำกว่าวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงอย่างชัดเจน สิ่งนี้เป็นไปได้ว่า การแทรกตัวของซีลี้อยู่ไม่เข้าสู่เมทริกซ์พอลิเมอร์ที่มีส่วนผสมของพอลิโพรพิลีนเกิดขึ้นได้ดีกว่า ทำให้การกระจายตัวของซีลี้อยู่ไม่และการยึดเกาะระหว่างซีลี้อยู่ไม่และเมทริกซ์พอลิเมอร์มีประสิทธิภาพมากกว่า ซึ่งสามารถพิสูจน์ได้จากโครงสร้างสัณฐานวิทยาในรูปที่ 1 โดยเห็นได้ว่า วัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิโพรพิลีน (รูปที่ 1ค และ 1ง) มีรูพรุนเกิดขึ้นภายในโครงสร้างน้อยกว่า และมีการยึดเกาะระหว่างซีลี้อยู่ไม่และเมทริกซ์ที่แน่นหนาแน่นกว่า วัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (รูปที่ 1ก และ 1ข) อย่างชัดเจน ดังนั้นการดูดซับน้ำของวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิโพรพิลีนจึงมีค่าน้อยกว่า

วัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและที่มีส่วนผสมของพอลิโพรพิลีนแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำและค่าเปอร์เซ็นต์การพองตัวมากขึ้นอย่างชัดเจน เมื่อเติมซีลี้อยู่ไม่เป็นส่วนผสมเพิ่มขึ้นจาก 30 wt% เป็น 50 wt% เนื่องจากธรรมชาติของพอลิเมอร์เป็นวัสดุที่ไม่ชอบดูดซับน้ำ ในขณะที่ซีลี้อยู่ไม่เป็วัสดุที่ชอบดูดซับน้ำ เพราะหมู่ไฮดรอกซิล (OH group) ที่อยู่ในผนังเซลล์เซลลูโลสเกิดการจับตัวกับพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) ของโมเลกุลน้ำ [22, 23] ทำให้เมื่อเติมซีลี้อยู่ไม่เป็นส่วนผสมมากขึ้น การดูดซับน้ำของวัสดุเชิงประกอบจึงเพิ่มขึ้นตามปริมาณของซีลี้อยู่ไม่ที่เติมเป็นส่วนผสม นอกจากนี้ Klyosov [24] กล่าวว่า การเติมซีลี้อยู่ไม่เป็นส่วนผสมในวัสดุเชิงประกอบมากกว่า 40

เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้เมทริกซ์พอลิเมอร์ห่อหุ้มซีลี้อยู่ไม่ได้ไม่ทั่วถึง [25] ซึ่งเป็นอีกหนึ่งสาเหตุที่ทำให้วัสดุเชิงประกอบมีการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้น

การเติมสารคู่ควบทั้งชนิด MAPE และ MAPP เป็นส่วนผสมในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกและซีลี้อย่างพารา พบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำและค่าเปอร์เซ็นต์การพองตัวลดลงอย่างชัดเจน โดยเฉพาะวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเสริมแรงด้วยซีลี้อยู่ 50 wt% เมื่อเติมสาร MAPE เป็นส่วนผสม 2 wt% ส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำและค่าเปอร์เซ็นต์การพองตัวลดลงประมาณ 101% และ 105% ตามลำดับ พฤติกรรมนี้ชี้ให้เห็นว่า สารคู่ควบสามารถปรับปรุงการยึดเกาะระหว่างซีลี้อยู่และเมทริกซ์พอลิเมอร์ได้อย่างมี

ประสิทธิภาพ โดยส่งผลให้ช่องว่างระหว่างเฟสและรูพรุนภายในโครงสร้างลดลง [7] ซึ่งเป็นการลดที่อยู่ของน้ำภายในโครงสร้าง และลดความสามารถการแทรกตัวของน้ำเข้าสู่โครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบ เช่นเดียวกันการเติมสารคู่ควบเพิ่มขึ้นจาก 2 wt% เป็น 4 wt% พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำและค่าเปอร์เซ็นต์การพองตัวมีการลดลงอีกเล็กน้อย และเมื่อเติมสารคู่ควบเพิ่มขึ้นเป็น 6 wt% แทบไม่ส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำและค่าเปอร์เซ็นต์การพองตัวของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกและซีลี้อย่างพาราลดลง สิ่งนี้สามารถกล่าวได้ว่า การเติมสารคู่ควบปริมาณ 6 wt% นั้นเกินความจำเป็นในการปรับปรุงสมบัติการดูดซับน้ำและการพองตัวของวัสดุเชิงประกอบ



รูปที่ 8 ผลกระทบของชนิดพลาสติก ปริมาณซีลี้อยู่ และปริมาณสารคู่ควบต่อ (ก) เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ และ (ข) เปอร์เซ็นต์การพองตัวของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกและซีลี้อย่างพารา

4. สรุป

ผลจากการศึกษาสมบัติของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกและซีลี้อย่างพารา พบว่า ปริมาณซีลี้อย่างพาราและปริมาณสารคู่ควบมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อสมบัติทางกลและทางกายภาพ ซึ่งสาเหตุของความผันแปรในสมบัติทางกลและทางกายภาพมีผลมาจากความสามารถการยึดเกาะระหว่างซีลี้อยู่และเมทริกซ์พอลิเมอร์ โดยวัสดุเชิงประกอบที่มีการยึดเกาะระหว่างซีลี้อยู่และเมทริกซ์ที่

แน่นกว่า หรือมีรูพรุนเกิดขึ้นน้อยกว่า จะมีสมบัติทางกลและทางกายภาพที่ดีกว่า ดังนั้นการเติมซีลี้อยู่เป็นส่วนผสมในวัสดุเชิงประกอบเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึง ค่าความเค้นการดึง และค่าความแข็งแรงดัดลดลง เนื่องจากเมทริกซ์พอลิเมอร์ไม่สามารถห่อหุ้มผิวซีลี้อยู่ได้อย่างทั่วถึง ทำให้เกิดการยึดเกาะที่ไม่แข็งแรงระหว่างผิวหน้าของซีลี้อยู่และเมทริกซ์ เช่นเดียวกันการเติมสารคู่ควบในวัสดุเชิงประกอบสามารถปรับปรุงให้สมบัติทางกลและทางกายภาพดีขึ้น เนื่องจากสารคู่ควบ

ปรับปรุงความสามารถการยึดเกาะระหว่างซีลีย้อยไม้และเมทริกซ์ให้มีความแข็งแรงมากขึ้น อย่างไรก็ตามการเติมสารคู่ควบในปริมาณมากเกินไปกลับส่งผลในทางลบต่อสมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบ นอกจากนี้การใช้พลาสติกพอลิโพรพิลีนเป็นส่วนผสมในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกและซีลีย้อยไม้ยางพาราแสดงอย่างชัดเจนว่าให้สมบัติการดึง การดัด การอัด ความแข็งแรง และการดูดซับน้ำดีกว่าวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สัญญาเลขที่ RDG5950008 ที่ให้ทุนอุดหนุนในการวิจัย และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่สนับสนุนการดำเนินงานวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

[1] D. J. Elliot, "Developments with thermoplastic natural rubber blends," NR Technol., vol. 12, no. 3, pp. 59-68, 1981.

[2] M. S. Jamil, I. Ahmad, and I. Abdullah, "Effects of rice husk filler on the mechanical and thermal properties of liquid natural rubber compatibilized high-density polyethylene/natural rubber blends," J. Polym. Res., vol. 13, no. 4, pp. 315-321, 2006.

[3] D. S. Campbell, D. J. Elliott, and M. A. Wheelans, "Thermoplastic natural rubber blends," NR Technol., vol. 9, no. 21, pp. 29-37, 1978.

[4] N. R. Legge, G. Holden, and H. E. Schroeder, *Thermoplastic elastomers: a comprehensive review*. Hanser Publishers: New York, 1987.

[5] K. Kosonmetee, "Preparation and mechanical properties of rubber composites made from

thermoplastic natural rubber blended with jute fiber," M.S. thesis, Dept. Mater. Sci. Technol., Prince of Songkla Univ., Songkhla, Thailand, 2009.

- [6] M. A. López-Manchado and M. Arroyo, "Effect of the incorporation of pet fibers on the properties of thermoplastic elastomer based on PP/elastomer blends," Polym., vol. 42, no. 15, pp. 6557-6563, 2001.
- [7] W. N. W. Busu, H. Anuar, S. H. Ahmad, R. Rasid, and N. A. Jamal, "The mechanical and physical properties of thermoplastic natural rubber hybrid composites reinforced with *Hibiscus cannabinus*, L and short glass fiber," Polym. Plas. Technol. Eng., vol. 49, no. 13, pp. 1315-1322, 2010.
- [8] H. Anuar and A. Zuraida, "Improvement in mechanical properties of reinforced thermoplastic elastomer composite with kenaf bast fibre," Compos. B: Eng., vol. 42, no. 3, pp. 462-465, 2011.
- [9] Z. H. Xu and Z. N. Kong, "Mechanical and thermal properties of short-coir-fiber-reinforced natural rubber/polyethylene composites," Mec. Compos. Mater., vol. 50, no. 3, pp. 353-358, 2014.
- [10] M. R. M. Piah, A. Baharum, and I. Abdullah, "Mechanical properties of bio-composite natural rubber/high density polyethylene/mengkuang fiber," Polym. Polym. Compos., vol. 24, no. 9, pp. 767-774, 2016.
- [11] Y. A. El-Shekeil, S. M. Sapuan, K. Abdan, and E. S. Zainudin, "Influence of fiber content on the mechanical and thermal properties of Kenaf fiber reinforced thermoplastic

- polyurethane composites,” *Mater. Des.*, vol. 40, pp. 299-303, Sep. 2012.
- [12] A. Ashori, “Wood-plastic composites as promising green-composites for automotive industries!,” *Biores. Technol.*, vol. 99, no. 11, pp. 4661-4667, 2008.
- [13] C. Homkhiew, “Development and applications of natural fiber/thermoplastic composites for industrial,” *J. Indus. Technol.*, vol. 10, no. 2, pp. 97-110, 2014.
- [14] M. A. S. Spinace, K. K. G. Fermoseli, and M. A. D. Paoli, “Recycled polypropylene reinforced with curaua fibers by extrusion,” *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 112, no. 6, pp. 3686-3694, 2009.
- [15] S. Mohanty, S. K. Verma, S. K. Nayak, and S. S. Tripathy, “Influence of fiber treatment on the performance of sisal-polypropylene composites,” *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 94, no. 3, pp. 1336-1345, 2004.
- [16] C. Homkhiew, T. Ratanawilai, and W. Thongruang, “Composites from recycled polypropylene and rubberwood flour: Effects of composition on mechanical properties,” *J. Thermoplas. Compos. Mater.*, vol. 28, no. 2, pp. 179-194, 2015.
- [17] D. Ndiaye, L. M. Matuana, S. M. Therias, L. Vidal, A. Tidjani, and J. L. Gardette, “Thermal and mechanical properties of polypropylene/wood-flour composites,” *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 119, no. 6, pp. 3321-3328, 2011.
- [18] T. Ratanawilai, N. Thanawattanasirikul, and C. Homkhiew, “Mechanical and thermal properties of oil palm wood sawdust reinforced post-consumer polyethylene composites,” *ScienceAsia*, vol. 38, no. 3, pp. 289-294, 2012.
- [19] M. R. Rahman, M. M. Huque, M. N. Islam, and M. Hasan, “Improvement of physico-mechanical properties of jute fiber reinforced polypropylene composites by post-treatment,” *Compos. A: Appl. Sci. Manufac.*, vol. 39, no. 11, pp. 1739-1747, 2008.
- [20] P. Y. Kuo, S. Y. Wang, J. H. Chen, H. C. Hsueh, and M. J. Tsai, “Effects of material compositions on the mechanical properties of wood-plastic composites manufactured by injection molding,” *Mater. Des.*, vol. 30, no. 9, pp. 3489-3496, 2009.
- [21] B. Kord, “Effect of wood flour content on the hardness and water uptake of thermoplastic polymer composites,” *World Appl. Sci. J.*, vol. 12, no. 9, pp. 1632-1634, 2011.
- [22] A. Ashori and S. Sheshmani, “Hybrid composites made from recycled materials: Moisture absorption and thickness swelling behavior,” *Biores. Technol.*, vol. 101, no. 12, pp. 4717-4720, 2010.
- [23] C. Homkhiew, “Factors affecting water absorption behavior of wood-plastic composites,” *J. Indus. Technol.*, vol. 11, no. 2, pp. 94-111, 2015.
- [24] A. A. Klyosov, *Wood-Plastic Composites*. New Jersey, John Wiley & Son Inc., 2007.
- [25] S. Tamrakar and R. A. Lopez-Anido, “Water absorption of wood polypropylene composite sheet piles and its influence on mechanical properties,” *Construc. Build. Mater.*, vol. 25, no. 10, pp. 3977-3988, 2011.

การวิเคราะห์แนวโน้มปริมาณน้ำหลากสูงสุดของกลุ่มน้ำหลักในประเทศไทย Flood Peak Trend Analysis of the Major River Basin in Thailand

ไชยาพงษ์ เทพประสิทธิ์^{1*} พงศธร โสภพันธุ์² นิมิตร เชิดฉันทพิพัฒน์²

¹อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

²ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Chaiyapong Thepprasit^{1*} Pongsatorn Sopaphun² Nimit Cherdchanpipat²

¹ Lecturer, ² Assistant Professor, Department of Irrigation Engineering, Faculty of Engineering

Kamphaeng Saen Kasetsart University, Kamphaeng Saen, Nakorn Pathom, 73140

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

บทคัดย่อ

การวิเคราะห์แนวโน้มปริมาณน้ำหลากสูงสุดของกลุ่มน้ำหลักในประเทศไทย มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแนวโน้มของปริมาณน้ำหลากสูงสุดใน 25 กลุ่มน้ำหลักของประเทศไทย โดยใช้ข้อมูลปริมาณน้ำหลากสูงสุดรายปี จากสถานีวัดน้ำท่าของกรมชลประทาน ที่มีการบันทึกข้อมูลต่อเนื่องไม่น้อยกว่า 10 ปี จำนวน 447 สถานี โดยใช้แบบจำลอง TREND ในการวิเคราะห์ และใช้การทดสอบแนวโน้ม จำนวน 3 วิธี ประกอบด้วยวิธี Linear Regression วิธี Spearman's Rho และวิธี Mann-Kendall โดยพิจารณาใช้ระดับนัยสำคัญที่ $p < 0.01$ $p < 0.05$ และ $p < 0.10$ ผลการทดสอบแนวโน้มโดยวิธี Mann-Kendall ใน 25 กลุ่มน้ำหลักของประเทศไทย พบว่า ไม่มีนัยสำคัญ จำนวน 305 สถานี และมีนัยสำคัญ จำนวน 142 สถานี แบ่งออกเป็น มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น จำนวน 61 สถานี และมีแนวโน้มที่ลดลง จำนวน 81 สถานี ผลการทดสอบแนวโน้มโดยวิธี Spearman's Rho พบว่า ไม่มีนัยสำคัญ จำนวน 302 สถานี และมีนัยสำคัญ จำนวน 145 สถานี แบ่งออกเป็น มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น จำนวน 65 สถานี และมีแนวโน้มที่ลดลง จำนวน 80 สถานี ผลการทดสอบแนวโน้มโดยวิธี Linear Regression พบว่า ไม่มีนัยสำคัญ จำนวน 360 สถานี และมีนัยสำคัญ จำนวน 87 สถานี แบ่งออกเป็น มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น จำนวน 39 สถานี และมีแนวโน้มที่ลดลง จำนวน 48 สถานี นอกจากนี้ งานวิจัยแสดงให้เห็นว่า กลุ่มน้ำหลักในประเทศไทยที่พบแนวโน้มปริมาณน้ำหลากสูงสุดที่เพิ่มขึ้น มีจำนวน 8 กลุ่มน้ำ กลุ่มน้ำที่พบแนวโน้มปริมาณน้ำหลากสูงสุดที่ลดลง มีจำนวน 11 กลุ่มน้ำ และกลุ่มน้ำที่พบสถานีวัดน้ำท่าที่แสดงแนวโน้มปริมาณน้ำหลากสูงสุดเพิ่มขึ้นและลดลงมีจำนวนที่เท่ากัน มีจำนวน 3 กลุ่มน้ำ ในขณะที่มีกลุ่มน้ำ ที่สถานีวัดน้ำท่าทั้งหมดในกลุ่มน้ำไม่แสดงค่าแนวโน้มที่ชัดเจนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ มีจำนวน 3 กลุ่มน้ำ

คำสำคัญ: การวิเคราะห์แนวโน้ม แบบจำลอง TREND ปริมาณน้ำหลากสูงสุด

ABSTRACT

The purposes of this study were to determine the trends of flood peak discharge for 25 major river basins in Thailand. The annual maximum momentary discharge data from 447 gauging stations with more than 10 years of continuous records were collected from Royal Irrigation Department. The trends of discharge data were analyzed using the TREND model comprising of three methods; linear regression test, Spearman's Rho test and Mann-Kendal test with a significance level of $p < 0.01$, $p < 0.05$ and $p < 0.10$. Results revealed that using Mann-Kendal test showed no significant trend in 305

stations and significant trends in 142 stations divided into increasing and decreasing trends in 61 and 81 stations, respectively. The results of trend analysis using Spearman's Rho test presented no significant trend in 302 stations and significant trends in 145 stations divided into increasing and decreasing trends in 65 and 80 stations, respectively. Finally, the use of linear regression test showed no significant trend in 360 stations and significant trends in 87 stations divided into increasing and decreasing trends in 39 and 48 stations, respectively. In conclusion, from all 25 river basins in Thailand, the increasing trends were found in eight major river basins, while the decreasing trends were shown in eleven basins. Three river basins indicated a similar number of stations showing same results of increasing and decreasing trends, and three major river basins did not show statistically significant trend.

Keyword: Trend analysis, TREND model, flood peak.

1. บทนำ

ในอดีตที่ผ่านมาประเทศไทยประสบปัญหาอุทกภัยเกิดขึ้นเป็นจำนวนมากในหลายพื้นที่ โดยเฉพาะอุทกภัยในประเทศไทย พ.ศ. 2554 เป็นอุทกภัยรุนแรงที่เกิดขึ้นระหว่างฤดูมรสุมในประเทศไทย เกิดผลกระทบต่อบริเวณลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาและสาขา รวมทั้งลุ่มน้ำอื่นๆ ทั่วทุกภาคของประเทศ เริ่มตั้งแต่ปลายเดือนกรกฎาคม 2554 และสิ้นสุดเมื่อวันที่ 16 มกราคม พ.ศ. 2555 สร้างความเสียหายให้กับพื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศ เพื่อเป็นการลดผลกระทบจากปัญหาดังกล่าวข้างต้น การศึกษาพฤติกรรมและแนวโน้มของการเกิดปริมาณน้ำหลากจากข้อมูลปริมาณน้ำหลากสูงสุดที่ได้มีการบันทึกข้อมูลไว้ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน จะสามารถใช้เป็นข้อมูลประกอบการวางแผนบริหารจัดการด้านอุทกภัยของกลุ่มน้ำหลักทั้ง 25 กลุ่มน้ำของประเทศไทย ทั้งในด้านการวางแผนรับมือก่อนการเกิดอุทกภัย เช่น การคาดการณ์และการเตือนภัยน้ำท่วม และการวางแผนพัฒนาโครงการเพื่อการป้องกันและบรรเทาอุทกภัยของกลุ่มน้ำได้อย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

ดังนั้นการวิจัยนี้ จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษาปริมาณน้ำหลากของ 25 กลุ่มน้ำหลักในประเทศไทย และทำการวิเคราะห์แนวโน้มปริมาณน้ำหลากสูงสุดของกลุ่มน้ำหลักโดยใช้วิธี Linear Regression วิธี Spearman's Rho และวิธี Mann-Kendall พร้อมทั้งการศึกษาเปรียบเทียบ

ผลการวิเคราะห์จากวิธีการดังกล่าว ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาพัฒนาความรู้ความเข้าใจในพฤติกรรมและแนวโน้มของการเกิดปริมาณน้ำหลาก และเพื่อที่จะนำไปใช้ในการวางแผนการบริหารจัดการอุทกภัยใน 25 กลุ่มน้ำหลักของประเทศไทยทั้งในปัจจุบันและในอนาคต

2. วิธีดำเนินการ

2.1 การรวบรวมข้อมูล

ในการวิจัยนี้ได้พิจารณาเลือกใช้ข้อมูลปริมาณน้ำหลากสูงสุดรายปี ของสถานีวัดน้ำท่าที่มีข้อมูลย้อนหลังนับตั้งแต่เริ่มตรวจวัดจนถึงปัจจุบันไม่น้อยกว่า 10 ปี จากกรมชลประทาน ใน 25 กลุ่มน้ำหลัก จำนวน 447 สถานี แสดงรายละเอียดดังในตารางที่ 1

2.2 การวิเคราะห์แนวโน้มของปริมาณน้ำหลากสูงสุด

2.2.1 วิธี Linear Regression

วิธี Linear Regression [1] เป็นการทดสอบทางสถิติแบบมีพารามิเตอร์ ซึ่งมีสมมติฐานว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ และเป็นการทดสอบแนวโน้มแบบเส้นตรงโดยตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างเวลา (x) และตัวแปรที่สนใจ (y)

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

$$\text{เมื่อ } a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (2)$$

ค่าสถิติทดสอบ S คือ

$$S = \frac{b}{\sigma} \quad (3)$$

เมื่อ

$$\sigma = \sqrt{\frac{12 \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i)^2}{n(n-2)(n^2-1)}} \quad (4)$$

ค่าสถิติทดสอบ S ตามการแจกแจง Student-t ที่มีองศาอิสระ n-2 อยู่ภายใต้ สมมติฐานหลัก (Null Hypothesis)

ตารางที่ 1 จำนวนสถานีวัดน้ำท่าที่ได้ทำการรวบรวมข้อมูลแยกตามลุ่มน้ำหลักของประเทศไทย

ชื่อลุ่มน้ำ	จำนวนสถานี	ชื่อลุ่มน้ำ	จำนวนสถานี
ลุ่มน้ำสาละวิน	2	ลุ่มน้ำแม่กลอง	26
ลุ่มน้ำโขง	29	ลุ่มน้ำปราจีนบุรี	13
ลุ่มน้ำกก	5	ลุ่มน้ำบางปะกง	3
ลุ่มน้ำชี	36	โดนเลสาบ	3
ลุ่มน้ำมูล	62	ลุ่มน้ำชายฝั่งทะเลตะวันออก	21
ลุ่มน้ำปิง	50	ลุ่มน้ำเพชรบุรี	12
ลุ่มน้ำวัง	18	ชายฝั่งทะเลประจวบคีรีขันธ์	14
ลุ่มน้ำยม	27	ลุ่มน้ำภาคใต้ฝั่งตะวันออก	17
ลุ่มน้ำน่าน	54	ลุ่มน้ำตาปี	8
ลุ่มน้ำเจ้าพระยา	4	ลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา	12
ลุ่มน้ำสะแกกรัง	5	ลุ่มน้ำปัตตานี	2
ลุ่มน้ำป่าสัก	15	ลุ่มน้ำภาคใต้ฝั่งตะวันตก	6
ลุ่มน้ำท่าจีน	3	รวม 447 สถานี	

2.2.2 วิธี Spearman's Rho

วิธี Spearman's Rho [1] เป็นการทดสอบทางสถิติแบบไม่มีพารามิเตอร์ โดยใช้การจัดกลุ่มแนวโน้มและความสัมพันธ์ของตัวแปรและเวลาที่มีนัยสำคัญของแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นและแนวโน้มที่ลดลง ซึ่งคล้ายกับวิธี Mann-Kendall แต่มีค่าสถิติทดสอบที่ต่างกัน โดยวิธี Spearman's Rho ค่าสถิติทดสอบ ρ_s เป็นค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ซึ่งได้มาในลักษณะเดียวกับแบบปกติ แต่ใช้ค่าลำดับในการพิจารณา ดังสมการ

$$\rho_s = \frac{S_{xy}}{(S_x S_y)^{0.5}} \quad (5)$$

เมื่อ

$$S_x = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2 \quad (6)$$

$$S_y = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{Y})^2 \quad (7)$$

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})(y_i - \bar{Y}) \quad (8)$$

โดยที่ x_i คือ เวลา y_i คือตัวแปรที่ทดสอบ สำหรับ $\bar{X}$ และ $\bar{Y}$ คือค่าลำดับของข้อมูล

2.2.3 วิธี Mann-Kendall

วิธี Mann-Kendall [2] และ [3] เป็นการทดสอบทางสถิติแบบไม่มีพารามิเตอร์ ซึ่งเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายสำหรับการใช้วิเคราะห์หาแนวโน้มของอนุกรมเวลาของข้อมูลทางด้านอุทกวิทยา [4] ในการจัดกลุ่มแนวโน้มที่มีนัยสำคัญของแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นและแนวโน้มที่ลดลง และสำหรับอนุกรมเวลา $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ สมมติฐานหลัก (Null Hypothesis, H_0) คือตัวอย่างของ n เป็นตัวแปรสุ่มที่ไม่ต้องการเงื่อนไขความเป็นอิสระและการแจกแจงเดียวกัน สมมติฐานทางเลือก (Alternative Hypothesis, H_1) สำหรับการทดสอบแบบสองทิศทางจะมีการแจกแจงของ x_k และ x_j ซึ่งจะมีค่าไม่เหมือนกันกับทุกค่าของ k โดย $j \leq n$ ด้วย $k \neq j$ สถิติทดสอบ S คำนวณโดยสมการดังนี้ [5]

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sign}(x_j - x_k) \quad (9)$$

เมื่อ

$$\text{sign}(x_j - x_k) = \begin{cases} +1 & \text{for } (x_j - x_k) > 0 \\ 0 & \text{for } (x_j - x_k) = 0 \\ -1 & \text{for } (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad (10)$$

ค่าเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนของสถิติทดสอบ S ดังนี้ [6]

$$E(S) = 0 \quad (11)$$

ปีที่ 13 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม – เมษายน พ.ศ. 2561

$$V_0(S) = \frac{[n(n-1)(2n+5) - \sum_{j=1}^m t_j(t_j-1)(2t_j+5)]}{18} \quad (12)$$

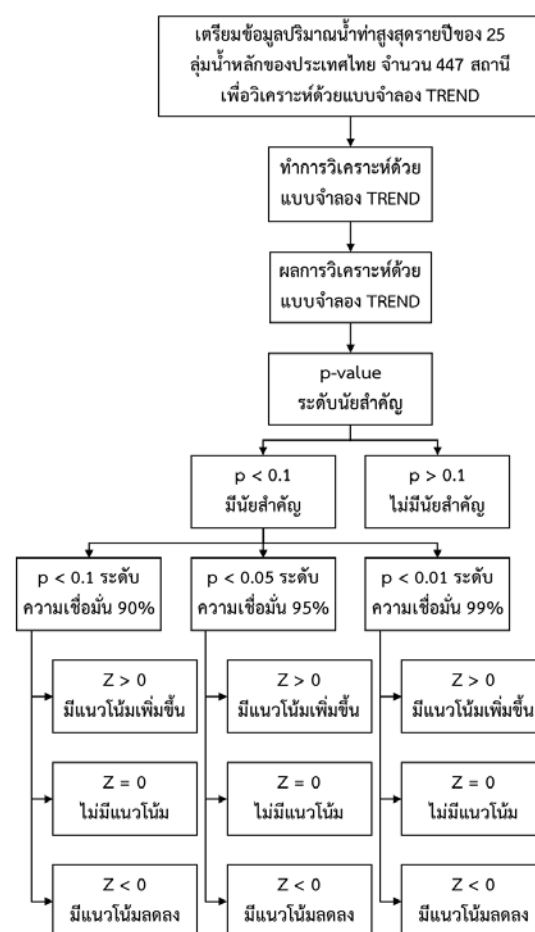
การแจกแจงความโน้มเอียงของ S และแนวโน้มที่มีนัยสำคัญสามารถทดสอบได้ โดยการเปรียบเทียบค่าตัวแปรมาตรฐาน z ในสมการที่ (13) ด้วยการแจกแจงปกติของตัวแปรสุ่มที่ระดับนัยสำคัญที่ต้องการด้วยการเพิ่มขึ้นและลดลงหนึ่งหน่วย [3]

$$z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (13)$$

ค่าบวกของ z ในสมการที่ (13) เป็นการแสดงถึงแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าลบของ z แสดงถึงแนวโน้มที่ลดลง เมื่อทำการทดสอบแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงที่ระดับ α นัยสำคัญ (p -value) ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้การวิเคราะห์แนวโน้มอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 90 ($p < 0.10$) ร้อยละ 95 ($p < 0.05$) และร้อยละ 99 ($p < 0.01$) ดังแสดงขั้นตอนการวิเคราะห์ที่ได้ในรูปที่ 1

2.2.4 แบบจำลอง TREND

ในการวิจัยนี้ได้เลือกใช้แบบจำลอง TREND เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ทดสอบแนวโน้มตามวิธีการทดสอบ Linear Regression วิธี Spearman's Rho และวิธี Mann-Kendall แบบจำลอง TREND [7] เริ่มต้นพัฒนาขึ้นครั้งแรกในปี 2547 โดย CRC สำหรับ Catchment Hydrology's (CRCCH) Climate Variability Program ประเทศออสเตรเลีย เพื่อเป็นเครื่องมือในการทดสอบทางสถิติสำหรับแนวโน้ม การเปลี่ยนแปลง และแบบแผนในข้อมูลอนุกรมเวลาอุทกวิทยาและอื่น ๆ โดยแบบจำลองมีความสามารถในการทดสอบทางสถิติ ตามวิธีการที่ได้รับการยอมรับจาก WMO และ UNESCO ปัจจุบันแบบจำลอง TREND เป็นเวอร์ชันที่ 1.0.2



รูปที่ 1 ขั้นตอนการวิเคราะห์แนวโน้มปริมาณน้ำท่าหลัก

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

จากการวิเคราะห์แนวโน้มปริมาณน้ำท่าหลักสูงสุดของประเทศไทย ด้วยวิธี Linear Regression วิธี Spearman's Rho และวิธี Mann-Kendall ด้วยแบบจำลอง TREND รายสถานีในกลุ่มน้ำหลักทั้ง 25 ลุ่มน้ำของประเทศไทย ดังแสดงตัวอย่างผลการวิเคราะห์แนวโน้มปริมาณน้ำท่าหลักสูงสุดของสถานีวัดน้ำท่าในกลุ่มน้ำป่าสักด้วยแบบจำลองในตารางที่ 2 และสรุปผลการวิเคราะห์แนวโน้มปริมาณน้ำท่าหลักสูงสุดและจำนวนสถานีที่ทำการวิเคราะห์แยกตาม 25 ลุ่มน้ำหลักของประเทศไทย และแยกตามวิธีการวิเคราะห์ที่ได้ดังตารางที่ 3 และรูปที่ 2 ถึงรูปที่ 4

3.1 ผลการวิเคราะห์แนวโน้มปริมาณน้ำท่าหลักสูงสุดโดยวิธี Linear Regression

จากผลการวิเคราะห์สถานีทั้งหมดจำนวน 447 สถานี ในตารางที่ 3 และรูปที่ 2 แสดงให้เห็นว่า พบแนวโน้มของ ปริมาณน้ำหลากสูงสุดที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จำนวน 39 สถานี คิดเป็นร้อยละ 8.72 และพบแนวโน้มของ ปริมาณน้ำหลากสูงสุดที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จำนวน 48 สถานี คิดเป็นร้อยละ 10.74 และไม่พบแนวโน้ม ของปริมาณน้ำหลากสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จำนวน 360 สถานี คิดเป็นร้อยละ 80.54 ของจำนวนสถานีทั้งหมด

ตารางที่ 2 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์แนวโน้มปริมาณน้ำ หลากสูงสุดด้วยแบบจำลอง TREND ของลุ่มน้ำป่าสัก

ลำดับ	รหัส สถานี	Linear Regression		Spearman's Rho		Mann-Kendall	
		ค่าทดสอบ z	ความ เชื่อมัน	ค่าทดสอบ z	ความ เชื่อมัน	ค่าทดสอบ z	ความ เชื่อมัน
1.	S.2	0.325	(a)	-0.453	(a)	-0.511	(a)
2.	S.3	-0.012	(a)	0.198	(a)	0.000	(a)
3.	S.7	-0.985	(a)	-0.057	(a)	-0.077	(a)
4.	S.9	-0.283	(a)	-0.090	(a)	-0.093	(a)
5.	S.10	1.568	(a)	2.249	(c)	2.199	(c)
6.	S.12	0.553	(a)	0.311	(a)	0.170	(a)
7.	S.13	-1.527	(a)	-2.142	(c)	-2.105	(c)
8.	S.14	-0.460	(a)	-0.155	(a)	0.102	(a)
9.	S.16	0.665	(a)	0.928	(d)	0.891	(a)
10.	S.17	0.673	(a)	0.472	(a)	0.487	(a)
11.	S.26	0.128	(a)	0.007	(a)	0.140	(a)
12.	S.31	-0.463	(a)	-0.040	(a)	0.328	(a)
13.	S.33	-0.662	(a)	-0.200	(a)	0.000	(a)
14.	S.36	-1.677	(a)	-1.894	(b)	-1.752	(b)
15.	S.4B	2.812	(b)	2.586	(b)	2.588	(b)

หมายเหตุ : (a) ไม่มีแนวโน้มอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

(b) มีแนวโน้มอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความ เชื่อมันร้อยละ 99 ($p < 0.01$)

(c) มีแนวโน้มอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความ เชื่อมันร้อยละ 95 ($p < 0.05$)

(d) มีแนวโน้มอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความ เชื่อมันร้อยละ 90 ($p < 0.10$)

เมื่อพิจารณาเชิงพื้นที่ลุ่มน้ำ พบว่า มีเพียง 1 ลุ่มน้ำ คือ ลุ่มน้ำชายฝั่งทะเลประจวบคีรีขันธ์ ซึ่งมีจำนวนสถานีวัด น้ำท่าที่พบแนวโน้มมีจำนวนสถานีมากกว่าหรือเท่ากับ

จำนวนสถานีที่ไม่พบแนวโน้ม โดยสถานีในกลุ่มน้ำชายฝั่ง ทะเลประจวบคีรีขันธ์แสดงแนวโน้มของปริมาณน้ำหลาก สูงสุดที่ลดลง และมีจำนวน 24 ลุ่มน้ำ ซึ่งมีจำนวนสถานีวัด น้ำท่าที่ไม่พบแนวโน้มมีจำนวนสถานีมากกว่า จำนวนสถานีที่ พบแนวโน้มภายในลุ่มน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 5

3.2 ผลการวิเคราะห์แนวโน้มปริมาณน้ำหลากสูงสุด โดยวิธี Spearman's Rho

จากผลการวิเคราะห์สถานีทั้งหมดจำนวน 447 สถานี ในตารางที่ 3 และรูปที่ 2 แสดงให้เห็นว่า พบแนวโน้มของ ปริมาณน้ำหลากสูงสุดที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จำนวน 65 สถานี คิดเป็นร้อยละ 14.54 และพบแนวโน้ม ของปริมาณน้ำหลากสูงสุดที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จำนวน 80 สถานี คิดเป็นร้อยละ 17.90 และไม่พบแนวโน้ม ของปริมาณน้ำหลากสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จำนวน 302 สถานี คิดเป็นร้อยละ 67.56 ของจำนวนสถานีทั้งหมด

เมื่อพิจารณาเชิงพื้นที่ลุ่มน้ำ พบว่า มีจำนวน 3 ลุ่มน้ำ คือ ลุ่มน้ำปัตตานี ลุ่มน้ำเพชรบุรี และลุ่มน้ำชายฝั่งทะเล ประจวบคีรีขันธ์ ซึ่งมีจำนวนสถานีวัดน้ำท่าที่พบแนวโน้มมี จำนวนสถานีมากกว่าหรือเท่ากับ จำนวนสถานีที่ไม่พบ แนวโน้ม โดยสถานีในกลุ่มน้ำปัตตานีแสดงแนวโน้มของ ปริมาณน้ำหลากสูงสุดที่เพิ่มขึ้น และสถานีในกลุ่มน้ำเพชรบุรี และลุ่มน้ำชายฝั่งทะเลประจวบคีรีขันธ์แสดงแนวโน้มของ ปริมาณน้ำหลากสูงสุดที่ลดลง และมีจำนวน 22 ลุ่มน้ำ ซึ่งมี จำนวนสถานีวัดน้ำท่าที่ไม่พบแนวโน้มมีจำนวนสถานีมากกว่า จำนวนสถานีที่พบแนวโน้มภายในลุ่มน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 5

3.3 ผลการวิเคราะห์แนวโน้มปริมาณน้ำหลากสูงสุด โดยวิธี Mann-Kendall

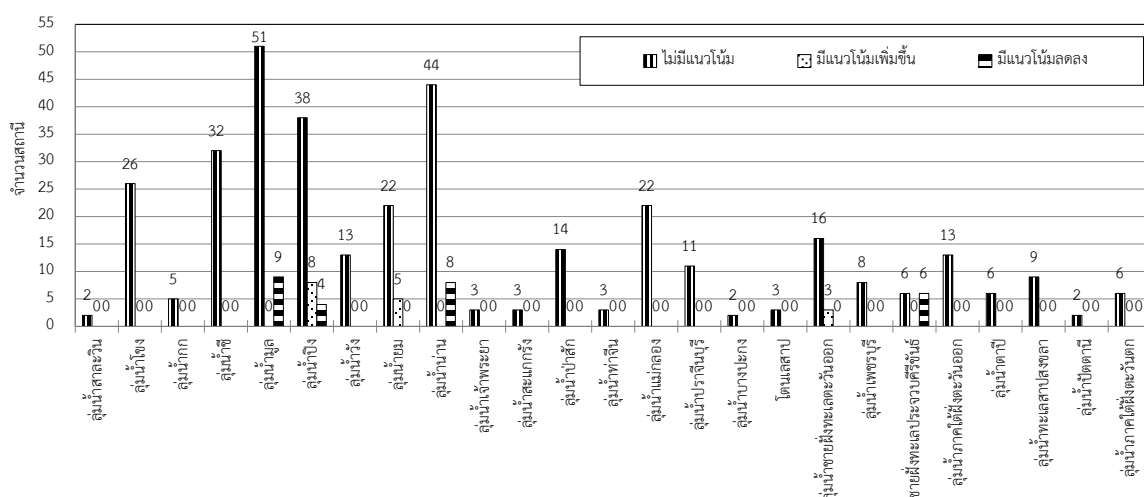
จากผลการวิเคราะห์สถานีทั้งหมดจำนวน 447 สถานี ในตารางที่ 3 และรูปที่ 2 แสดงให้เห็นว่า พบแนวโน้มของ ปริมาณน้ำหลากสูงสุดที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จำนวน 61 สถานี คิดเป็นร้อยละ 13.65 และพบแนวโน้ม ของปริมาณน้ำหลากสูงสุดที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จำนวน 81 สถานี คิดเป็นร้อยละ 18.12 และไม่พบแนวโน้ม ของปริมาณน้ำหลากสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จำนวน 305 สถานี คิดเป็นร้อยละ 68.23 ของจำนวนสถานีทั้งหมด

ปีที่ 13 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม – เมษายน พ.ศ. 2561

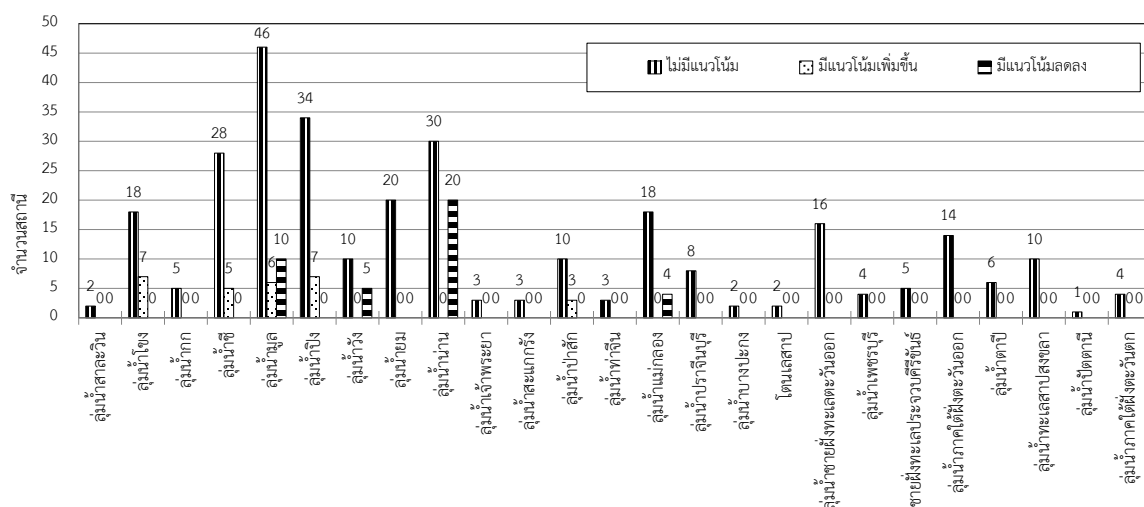
ตารางที่ 3 ตารางสรุปจำนวนสถานีและร้อยละของผลการวิเคราะห์แนวโน้มแต่ละลุ่มน้ำด้วยวิธี Mann-Kendall วิธี Spearman's Rho และวิธี Linear Regression

ลุ่มน้ำ	ค่าทดสอบ Linear Regression			ค่าทดสอบ Spearman's Rho			ค่าทดสอบ Mann-Kendall		
	ไม่มีนัยสำคัญ	มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น	มีแนวโน้มลดลง	ไม่มีนัยสำคัญ	มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น	มีแนวโน้มลดลง	ไม่มีนัยสำคัญ	มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น	มีแนวโน้มลดลง
สาละวิน	2	0	0	2	0	0	2	0	0
	(100.00)	(0.00)	(0.00)	(100.00)	(0.00)	(0.00)	(100.00)	(0.00)	(0.00)
โขง	26	2	1	18	7	4	19	6	4
	(89.66)	(6.90)	(3.45)	(62.07)	(24.14)	(13.79)	(65.52)	(20.69)	(13.79)
กก	5	0	0	5	0	0	5	0	0
	(100.00)	(0.00)	(0.00)	(100.00)	(0.00)	(0.00)	(100.00)	(0.00)	(0.00)
ชี	32	1	3	28	5	3	30	4	2
	(88.89)	(2.78)	(8.33)	(77.78)	(13.89)	(8.33)	(83.33)	(11.11)	(5.56)
มูล	51	2	9	46	6	10	46	6	10
	(82.26)	(3.23)	(14.52)	(74.19)	(9.68)	(16.13)	(74.19)	(9.68)	(16.13)
ปิง	38	8	4	34	7	9	32	6	12
	(76.00)	(16.00)	(8.00)	(68.00)	(14.00)	(18.00)	(64.00)	(12.00)	(24.00)
วัง	13	3	2	10	3	5	11	3	4
	(72.22)	(16.67)	(11.11)	(55.56)	(16.67)	(27.78)	(61.11)	(16.67)	(22.22)
ยม	22	5	0	20	6	1	21	6	0
	(81.48)	(18.52)	(0.00)	(74.07)	(22.22)	(3.70)	(77.78)	(22.22)	(0.00)
น่าน	44	2	8	30	4	20	31	4	19
	(81.48)	(3.70)	(14.81)	(55.56)	(7.41)	(37.04)	(57.41)	(7.41)	(35.19)
เจ้าพระยา	3	0	1	3	0	1	2	0	2
	(75.00)	(0.00)	(25.00)	(75.00)	(0.00)	(25.00)	(50.00)	(0.00)	(50.00)
สะแกกรัง	3	2	0	3	2	0	3	2	0
	(60.00)	(40.00)	(0.00)	(60.00)	(40.00)	(0.00)	(60.00)	(40.00)	(0.00)
ป่าสัก	14	1	0	10	3	2	11	2	2
	(93.33)	(6.67)	(0.00)	(66.67)	(20.00)	(13.33)	(73.33)	(13.33)	(13.33)
ท่าจีน	3	0	0	3	0	0	3	0	0
	(100.00)	(0.00)	(0.00)	(100.00)	(0.00)	(0.00)	(100.00)	(0.00)	(0.00)
แม่กลอง	22	1	3	18	4	4	18	4	4
	(84.62)	(3.85)	(11.54)	(69.23)	(15.38)	(15.38)	(69.23)	(15.38)	(15.38)
ปราจีนบุรี	11	1	1	8	2	3	8	2	3
	(84.62)	(7.69)	(7.69)	(61.54)	(15.38)	(23.08)	(61.54)	(15.38)	(23.08)
บางปะกง	2	0	1	2	0	1	2	0	1
	(66.67)	(0.00)	(33.33)	(66.67)	(0.00)	(33.33)	(66.67)	(0.00)	(33.33)
โตนเลสาป	3	0	0	2	0	1	2	0	1
	(100.00)	(0.00)	(0.00)	(66.67)	(0.00)	(33.33)	(66.67)	(0.00)	(33.33)
ชายฝั่งทะเลตะวันออก	16	3	2	16	3	2	16	3	2
	(76.19)	(14.29)	(9.52)	(76.19)	(14.29)	(9.52)	(76.19)	(14.29)	(9.52)
เพชรบุรี	8	1	3	4	2	6	4	2	6
	(66.67)	(8.33)	(25.00)	(33.33)	(16.67)	(50.00)	(33.33)	(16.67)	(50.00)
ชายฝั่งทะเลประจวบคีรีขันธ์	6	2	6	5	3	6	5	3	6
	(42.86)	(14.29)	(42.86)	(35.71)	(21.43)	(42.86)	(35.71)	(21.43)	(42.86)
ภาคใต้ฝั่งตะวันออก	13	2	2	14	2	1	14	2	1
	(76.47)	(11.76)	(11.76)	(82.35)	(11.76)	(5.88)	(82.35)	(11.76)	(5.88)
ตาปี	6	1	1	6	1	1	6	1	1
	(75.00)	(12.50)	(12.50)	(75.00)	(12.50)	(12.50)	(75.00)	(12.50)	(12.50)
ทะเลสาบสงขลา	9	2	1	10	2	0	9	2	1
	(75.00)	(16.67)	(8.33)	(83.33)	(16.67)	(0.00)	(75.00)	(16.67)	(8.33)
ปัตตานี	2	0	0	1	1	0	1	1	0
	(100.00)	(0.00)	(0.00)	(50.00)	(50.00)	(0.00)	(50.00)	(50.00)	(0.00)
ภาคใต้ฝั่งตะวันตก	6	0	0	4	2	0	4	2	0
	(100.00)	(0.00)	(0.00)	(66.67)	(33.33)	(0.00)	(66.67)	(33.33)	(0.00)

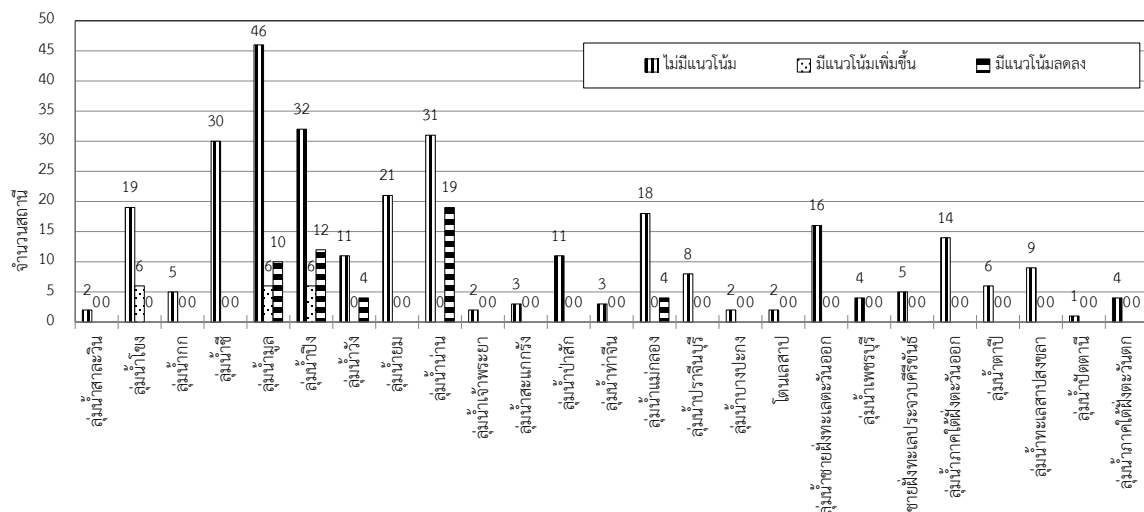
หมายเหตุ : () ร้อยละของจำนวนสถานีต่อจำนวนสถานีวัดน้ำทำทั้งลุ่มน้ำ



รูปที่ 2 ผลการวิเคราะห์แนวโน้มปริมาณน้ำหลากสูงสุดโดยวิธี Linear Regression



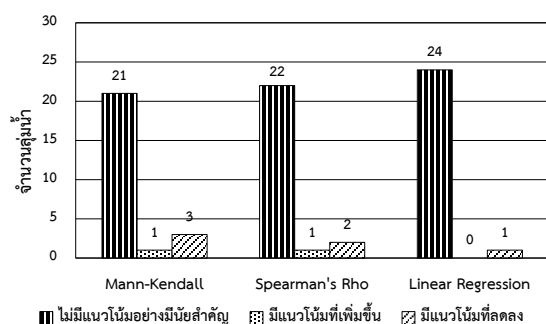
รูปที่ 3 ผลการวิเคราะห์แนวโน้มปริมาณน้ำหลากสูงสุดโดยวิธี Spearman's Rho



รูปที่ 4 ผลการวิเคราะห์แนวโน้มปริมาณน้ำหลากสูงสุดโดยวิธี Mann-Kendall

ปีที่ 13 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม – เมษายน พ.ศ. 2561

เมื่อพิจารณาเชิงพื้นที่กลุ่มน้ำ พบว่า มีจำนวน 4 กลุ่มน้ำ คือ กลุ่มน้ำปัตตานี กลุ่มน้ำเจ้าพระยา กลุ่มน้ำเพชรบุรี และกลุ่มน้ำชายฝั่งทะเลประจวบคีรีขันธ์ ซึ่งมีจำนวนสถานีวัดน้ำท่าที่พบแนวโน้มมีจำนวนสถานีมากกว่าหรือเท่ากับ จำนวนสถานีที่ไม่พบแนวโน้ม โดยสถานีในกลุ่มน้ำปัตตานีแสดงแนวโน้มของปริมาณน้ำหลากสูงสุดที่เพิ่มขึ้น และสถานีในกลุ่มน้ำเจ้าพระยา กลุ่มน้ำเพชรบุรี และกลุ่มน้ำชายฝั่งทะเลประจวบคีรีขันธ์แสดงแนวโน้มของปริมาณน้ำหลากสูงสุดที่ลดลง และมีจำนวน 21 กลุ่มน้ำ ซึ่งมีจำนวนสถานีวัดน้ำท่าที่ไม่พบแนวโน้มมีจำนวนสถานีมากกว่า จำนวนสถานีที่พบแนวโน้มภายในกลุ่มน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 เปรียบเทียบจำนวนกลุ่มน้ำและแนวโน้มที่พบจากการวิเคราะห์โดยวิธีการต่าง ๆ

อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาเฉพาะสถานีวัดน้ำท่าที่มีนัยสำคัญในกลุ่มน้ำ พบว่า มีจำนวน 22 กลุ่มน้ำที่พบสถานีวัดน้ำท่าที่มีนัยสำคัญ ดังแสดงได้ดังตารางที่ 4 และสรุปได้ดังนี้ กลุ่มน้ำที่มีแนวโน้มปริมาณน้ำหลากสูงสุดที่เพิ่มขึ้น มีจำนวน 8 กลุ่มน้ำ ที่พบจำนวนสถานีวัดน้ำท่าที่แสดงแนวโน้มปริมาณน้ำหลากสูงสุดที่เพิ่มขึ้นมีจำนวนสถานีมากกว่า สถานีที่แสดงแนวโน้มที่ลดลง โดยกลุ่มน้ำที่สถานีวัดน้ำท่าทั้งหมดแสดงแนวโน้มของปริมาณน้ำหลากสูงสุดที่เพิ่มขึ้น ได้แก่ กลุ่มน้ำยม กลุ่มน้ำสะแกกรัง กลุ่มน้ำปัตตานี และกลุ่มน้ำภาคใต้ฝั่งตะวันออก

กลุ่มน้ำที่มีแนวโน้มปริมาณน้ำหลากสูงสุดที่ลดลง มีจำนวน 11 กลุ่มน้ำ ที่พบจำนวนสถานีวัดน้ำท่าที่แสดงแนวโน้มปริมาณน้ำหลากสูงสุดที่ลดลงมีจำนวนสถานี

มากกว่าสถานีที่แสดงแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น โดยกลุ่มน้ำที่สถานีวัดน้ำท่าทั้งหมดแสดงแนวโน้มของปริมาณน้ำหลากสูงสุดที่ลดลง ได้แก่ กลุ่มน้ำเจ้าพระยา กลุ่มน้ำบางปะกง และกลุ่มน้ำโดนเลสาป

กลุ่มน้ำที่มีแนวโน้มปริมาณน้ำหลากสูงสุดที่เท่ากัน มีจำนวน 3 กลุ่มน้ำ ที่พบจำนวนสถานีวัดน้ำท่าที่แสดงแนวโน้มปริมาณน้ำหลากสูงสุดที่เพิ่มขึ้นและลดลงมีจำนวนเท่ากัน ได้แก่ กลุ่มน้ำป่าสัก กลุ่มน้ำแม่กลอง และกลุ่มน้ำตาปี

ตารางที่ 4 ตารางสรุปผลการวิเคราะห์แนวโน้มของกลุ่มน้ำเมื่อพิจารณาเฉพาะสถานีวัดน้ำท่าที่มีนัยสำคัญ

กลุ่มน้ำ	แนวโน้มของปริมาณน้ำหลากสูงสุด		
	มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น	มีแนวโน้มลดลง	มีแนวโน้มที่เท่ากัน
1. สาละวิน	-	-	-
2. โขง	✓	-	-
3. กก	-	-	-
4. ซี	✓	-	-
5. มูล	-	✓	-
6. ปิง	-	✓	-
7. วัง	-	✓	-
8. ยม	✓	-	-
9. น่าน	-	✓	-
10. เจ้าพระยา	-	✓	-
11. สะแกกรัง	✓	-	-
12. ป่าสัก	-	-	✓
13. ท่าจีน	-	-	-
14. แม่กลอง	-	-	✓
15. ปราจีนบุรี	-	✓	-
16. บางปะกง	-	✓	-
17. โดนเลสาป	-	✓	-
18. ชายฝั่งทะเลตะวันออก	✓	-	-
19. เพชรบุรี	-	✓	-
20. ชายฝั่งทะเลประจวบคีรีขันธ์	-	✓	-
21. ภาคใต้ฝั่งตะวันออก	-	✓	-
22. ตาปี	-	-	✓
23. ทะเลสาบสงขลา	✓	-	-
24. ปัตตานี	✓	-	-
25. ภาคใต้ฝั่งตะวันตก	✓	-	-
รวม	8	11	3

4. สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการวิเคราะห์แนวโน้มปริมาณน้ำหลากสูงสุดของประเทศไทย โดยการเปรียบเทียบการวิเคราะห์ทดสอบแนวโน้มทั้ง 3 วิธี พบว่า การวิเคราะห์แนวโน้มปริมาณน้ำหลากสูงสุดด้วยวิธี Mann-Kendall และวิธี Spearman's Rho แสดงค่าแนวโน้มปริมาณน้ำหลาก

สูงสุดที่เกิดขึ้นใกล้เคียงกัน ซึ่งเป็นเพราะทั้ง 2 วิธี เป็นการทดสอบแนวโน้มทางสถิติแบบไม่มีพารามิเตอร์ ซึ่งวิธีการทดสอบแนวโน้มทางสถิติแบบไม่มีพารามิเตอร์นั้น จะเหมาะสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลที่มีการแจกแจงแบบไม่ปกติหรือการทดสอบแนวโน้มที่มีข้อมูลที่บิดเบือนหรือขาดหายไปในช่วงเวลา ดังเช่นข้อมูลปริมาณน้ำหลากสูงสุดรายปีของสถานีวัดน้ำท่าในประเทศไทย สำหรับวิธี Linear Regression เป็นวิธีการทดสอบแนวโน้มทางสถิติแบบมีพารามิเตอร์ ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมในการใช้ทดสอบแนวโน้มทางสถิติ นั้น จะเหมาะสำหรับการทดสอบข้อมูลที่มีการแจกแจงข้อมูลแบบปกติ จึงให้ผลการวิเคราะห์ที่แตกต่างจากวิธี Mann-Kendall และวิธี Spearman's Rho

นอกจากนั้น ผลการวิจัยนี้ยังแสดงให้เห็นว่า ในหลาย ๆ ลุ่มน้ำ ยังไม่สามารถสรุปผลของแนวโน้มปริมาณน้ำหลากสูงสุดได้อย่างชัดเจน เนื่องจากผลการวิเคราะห์แนวโน้มปริมาณน้ำหลากสูงสุดของสถานีวัดน้ำท่าส่วนใหญ่ในกลุ่มน้ำไม่แสดงค่าแนวโน้มที่ชัดเจนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

5. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Trend/ Change Detection Software, User Guide, CRC for Catchment Hydrology, Australia, 2005.
- [2] H. B. Mann, "Nonparametric tests against trend," *Econometrical*, vol. 13, no.3 pp. 245-259, Jul. 1945.
- [3] M. G. Kendall, "Rank Correlation Methods," 4th ed. London: Charles Griffin, 1975.
- [4] S. Yue and C. Wang, "The Mann-Kendall Test Modified by Effective Sample Size to Detect Trend in Serially Correlated Hydrological Series," *WARM Journal*, vol. 18(3), pp. 201-218, Jun. 2004.
- [5] E. Kahya and S. Kalayci, "Trend analysis of streamflow in Turkey," *J. Hydrology*, vol. 289, pp. 128-144, Apr. 2004.
- [6] K. H. Hamed, "Trend detection in hydrologic data: The Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis," *J. Hydrology*, vol. 349, pp. 350-363, Feb. 2008.
- [7] C. Theprasit, K. Kitparnitchrun, and K. Boonmee, "Trend Analysis of Extreme Rainfall for Bangkok," *The 20th National Convention on Civil Engineering (NCCE20)*, Pattaya, Chonburi, Thailand, Jul. 8-10, 2015. NNCE-417, pp. 1-6.

A Unique Grid-flux-oriented Control Algorithm for Synchronization and Power Controls of a Doubly-Fed Induction Generator System

Sutthimat Mueangngoen and Yuttana Kumsuwan*

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University

Chiang Mai, Thailand, 50200

* Corresponding author: E-mail: yt@eng.cmu.ac.th

ABSTRACT

This paper presents a synchronization method and the power control by using a grid-flux-oriented control (GFOC) algorithm for a two-level back-to-back converter fed doubly-fed induction generator (DFIG) system. Here, the synchronization process and power control with torque/speed modes of the generator are controlled by a unique rotor current control. Based on the GFOC algorithm for the regulation of the stator magnetizing current, the exciting component of the rotor current is fully controlled, and the variation of the subsynchronous, synchronous, and supersynchronous speed is controlled by the torque component of the rotor current for the stator power control. The excellent performance of the proposed GFOC algorithm with DFIG drive is verified through the simulation results considering the DFIG as connected/disconnected to ac mains, and torque/speed-control modes.

Keyword: Doubly-fed induction generator (DFIG), grid-flux-oriented control (GFOC), synchronization process.

1. Introduction

Doubly-fed induction generator (DFIG) systems are extensively applied in wind power conversion due to the desirable synchronous generator operation at a lower cost [1]-[6]. Moreover, the four-quadrant power control is able to operate with the 25-30 % back-to-back converter installation of the rated generator power. The flexible operation with the variable speed and constant frequency under the subsynchronous, synchronous, and supersynchronous modes has been attractive in this system.

Regarding the synchronization process and the power control for the DFIG systems, there are three main groups of vector current controls for the rotor-side converter [1], [6] - [10], [11] as follows: 1) The stator-flux-oriented control (SFOC), 2) The stator voltage oriented control (SVOC), and 3) The grid-flux-oriented power control (GFOC). In [1], this scheme uses the stator-flux vector reference frame to independently control the active and reactive powers. However, this proposed control requires a low-pass filter to estimate the stator-flux position which leads to small offsets/dc drift and saturation problems. The SVOC is used for the DFIG in [6].

This method needs to calculate only the stator voltage position, which is easy to be directly estimated by measuring the stator voltage. Because the stator flux position is not respected, the SVOC may not support the synchronization process. In [11], this algorithm employs the grid voltage to form the virtual grid-flux position for the control of the stator-flux vector without the stator-flux estimation. Among these literatures, they are still unclear about the synchronization process, which is very important for the starting operation in order to further control the overall system.

A few literatures have been reported and analyzed the comprehensive synchronization process with the power controls. In [1], the synchronization with the SFOC method is carried out by a direct on line starting operation. The extraction of the reactive power leads to the inrush stator current and the poor power factor at the utility grid. To discard such the drawbacks, the synchronization before the grid-connected process based on the SFOC method is proposed in [6]-[10]. However, the PI controller is consumed in this process. It affects a slack dynamic response and adds a complicated controller design. In [11], the GFOC algorithm based on the mathematical synthesis of the stator- flux position is firstly presented for the synchronization process, whereas the SFOC algorithm is separately applied for the power control operation. Based on two control algorithms, it does not involve a simple software implementation approach.

In this paper, a unique one-stage model for the synchronization and power control in a DFIG system based on a GFOC algorithm is proposed. The

different characteristics of the proposed GFOC algorithm are summarized as follows:

- 1) One- stage GFOC algorithm for the synchronization process and the power controls simplifies the procedure of the implementation and the controller design from [11].
- 2) Unlike [6]-[10], the estimation of the stator-flux position using the low- pass filter is not necessary. The problems of the filter saturation and the dc drift can be accordingly overcome.
- 3) The better dynamic performance is achieved without delay of the achievable stator-flux position when compared to [6]. Additionally, it can be ensured that the inrush current stator current does not appear compared to [1].

According to the salient features, the dynamic and steady- state simulation results are demonstrated to verify the performance of the proposed control algorithm for the DFIG system.

2. Dynamic Model of Doubly-Fed Induction Generator

The configuration of the DFIG system is shown in Fig. 1. The stator of the generator can be directly connected to the grid whereas the rotor circuit is connected to the grid through a back-to-back converter, which consisted of rotor-side converter and grid-side converter. Thus, in order to analyze the performance of the proposed GFOC algorithm in the next section, the space vector voltage and flux equations of the DFIG in synchronous rotating frame can be expressed as [1].

$$\vec{v}_s = R_s \vec{i}_s + \frac{d\vec{\lambda}_s}{dt} + j\omega_s \vec{\lambda}_s \quad (1)$$

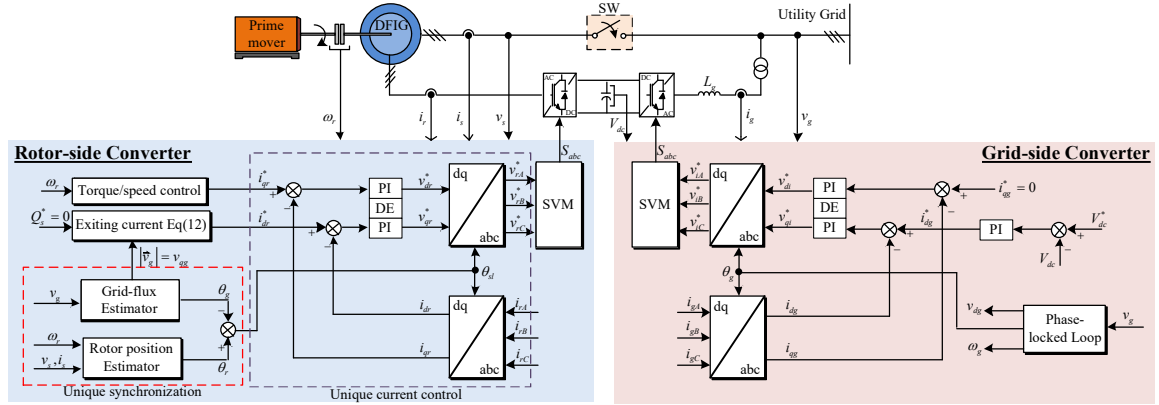


Fig. 1 Synchronization and control diagram of rotor-side converter with GFOC algorithm.

$$\bar{v}_r = R_r \bar{i}_r + \frac{d\bar{\lambda}_r}{dt} + j\omega_{sl} \bar{\lambda}_r \quad (2)$$

$$\bar{\lambda}_s = L_s \bar{i}_s + L_m \bar{i}_r \quad (3)$$

$$\bar{\lambda}_r = L_r \bar{i}_r + L_m \bar{i}_s \quad (4)$$

where R_s, R_r are the stator and rotor resistances, L_s, L_r are the self-stator and -rotor inductances, L_m is the magnetizing inductance, and $\omega_s, \omega_r, \omega_{sl}$ are the synchronous, rotor and slip angular speeds, respectively.

The electromagnetic torque of the DFIG is given by

$$T_e = \frac{3}{2} P_p (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \quad (5)$$

where T_e is the electromagnetic torque and P_p is the pole pairs.

The active power and reactive power of the DFIG, where the power loss in stator side can be neglected, are calculated by

$$P_s = \frac{3}{2} (v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs}), \quad (6)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} (v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs}) \quad (7)$$

where P_s, Q_s are the active power and the reactive powers, respectively.

3. Proposed GFOC Algorithm

In this section, the proposed GFOC algorithm is applied for the rotor-side converter to achieve the synchronization and power control processes. It can be shown in the

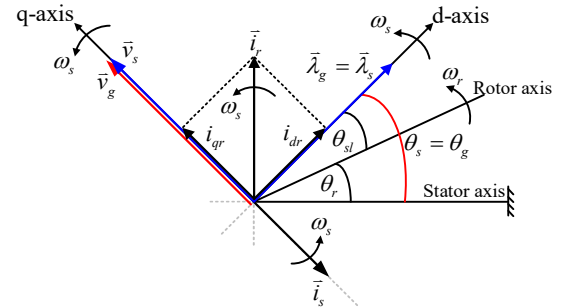


Fig. 2 Space vector phasor of the DFIG with GFOC.

block diagram of the GFOC algorithm (see the rotor-side converter control), as shown in Fig. 1. With the unique synchronization for beginning, as shown in the red dash line border, one of two block diagrams is to estimate the magnitude of grid voltage $|v_g|$ and grid-flux position θ_g , called “Grid flux Estimator”, and another block diagram is to calculate the correct rotor position (θ_r), called “Rotor position Estimator”. Using grid-flux

and rotor positions, the correct slip position (θ_{sl}) is then achieved to further use for the reference frame transition in “the unique current control (UCC)”. In the UCC, as shown in black dash line border, it is to control the rotor current for synchronization and power control process corresponding to unique synchronization process. Besides, the grid-side converter has the conventional control scheme [12] to regulate the dc-link and exchange the power between the grid and generator.

A. Unique Synchronization Process

In order to always be synchronized with the grid all of the operations, a unique synchronization with GFOC is realized in this paper. Fig. 2 shows the space vector phasor of the DFIG with the proposed control. The grid voltage vector is aligned to of the rotating reference frame and perpendicular to the virtual grid flux vector, which is located on the with the grid flux position. For the synchronization process, the stator flux vector controlled through the magnetizing stator current can be obtained by

$$|\bar{\lambda}_g| = \lambda_{dg} = \lambda_{ds} = L_m i_{ms}, \quad \lambda_{qg} = \lambda_{qs} = 0. \quad (8)$$

Therefore, the induced stator voltage vector $\bar{v}_s$ can be synchronized with the grid voltage vector $\bar{v}_g$ as follows

$$|\bar{v}_g| = v_{qg} = v_{qs}, \quad v_{dg} = v_{ds} = 0. \quad (9)$$

$$\theta_g = \theta_s = \theta_r + \theta_{sl} \quad (10)$$

where $\theta_s, \theta_r, \theta_{sl}$ are the stator flux, the rotor position and the slip angle, respectively. The correct slip angle for a unique synchronization is

calculated by the virtual grid flux position θ_g as follow

$$\theta_{sl} = \theta_g - \theta_r. \quad (11)$$

From (8)-(11), the correct slip angle θ_{sl} is directly provided by the virtual grid- flux position θ_g that leads to the one- stage algorithm for synchronization process, grid connected/ disconnected and stator power controls. Thus, the stator voltage vector $\bar{v}_s$ is completely synchronized with the grid voltage vector $\bar{v}_g$, and it can be shown the control block at the red dashed line in Fig. 1. In addition, the rotor current components i_{dr}, i_{qr} , which produce the induced stator voltage and electromagnetic torque, respectively, will be described in the next section.

B. Unique Rotor Current Control

Initially, the system is not connected to the grid, the stator current is still zero $i_s = 0$. Based on steady-state conditions, from (1)-(4) and (7), the *d*-axis rotor current can be written by

$$i_{dr} = -\frac{2}{3} \frac{L_s}{v_{qs} L_m} Q_s + |\bar{i}_{ms}|. \quad (12)$$

From (12), for the unity power factor operation, the reference stator reactive power Q_s^* is set to zero. Thus, the *d*-axis reference rotor current or the reference exciting rotor current i_{dr}^* , which is proportional to the induced stator voltage, can be determined by the *q*-axis grid voltage v_{qg} as the following

$$i_{dr}^* = |\bar{i}_{ms}| = \frac{v_{qg}}{\omega_s L_m}. \quad (13)$$

From the above equation, it can be seen that the exciting rotor current i_{dr}^* is constantly equal to the stator magnetizing current vector $\bar{i}_{ms}$, which produces the stator flux and aligns with the virtual grid flux. For this reason, the value of stator voltage is directly controlled by the q -axis grid voltage v_{qg} .

After the system is synchronized and connected to the grid, the stator power can be delivered to the grid by the command torque rotor current i_{qr}^* , which is determined from (5) and (6), as the following

$$i_{qr}^* = \frac{2}{3} \frac{\omega_s L_s}{P L_m v_{qg}} T_e^* \quad (14)$$

From (14), it can be observed that the reference electromagnetic torque T_e^* , which is commanded by the torque control or the speed control algorithm [12], is proportional to the reference torque rotor current i_{qr}^* . In Fig. 2, when the torque rotor current i_{qr} is activated, the stator current vector $\vec{i}_s$ appears at q -axis of the reference frame causes the DFIG to supply active power to the grid. Overall, a unique current control is shown by the purple dashed line in Fig. 1. That means the proposed GFOC algorithm is controlling for the synchronization and the power control process in one-stage, based on only the grid-side.

4. Simulation Results

The simulated dynamic and steady-state performance of the proposed GFOC algorithm for the two-level back-to-back converter fed DFIG drive is carried out using MATLAB/Simulink software. The testing procedure of the proposed system consisted

of the grid-connected/disconnected synchronization along with torque control and speed control modes under the condition of a rotor speed variation of 1200 to 1800 rpm. For the test system, PI controller for the current controls of rotor-side and grid-side converters are designed following [1]. The convenient parameters of the DFIG can be shown in Table 1.

TABLE I

DFIG Parameters, which is produced by
Lucas Nulle, Germany

Variable	Parameters	Value
v_s, v_r	Rated stator and rotor voltage	380,127 V
$i_{s,peak}$	Rated peak stator current	2.1 A
$P_{s,rated}$	Rated stator power	1.0 kW
$T_{e,rated}$	Rated electromagnetic torque	6.3 Nm
R_s	Stator resistance per phase	7.9 Ω
R_r	Rotor resistance per phase	8.8 Ω
L_s, L_r	Stator and rotor inductance	0.78 H
L_m	Magnetizing inductance	0.70 H
P_p	Number of Pole pairs	2
$N_s : N_r$	Stator and rotor Ratio	1.732
Back-to-back converter and utility grid parameters		
v_g, f_g	Utility grid voltage and frequency	380/50 V/Hz
V_{dc}	Nominal dc-link voltage	180 V
C_{dc}	Dc-link capacitor	1625 μ F
f_{sw}	Switching frequency	4 kHz

A. Operation of Doubly-Fed Induction Generator System with torque control mode

Fig. 3 shows the simulation results for the proposed GFOC in the torque control mode. The dynamic and steady-state performances of the synchronization process, grid-connected/disconnected, and stator power control are reported in Fig. 3(a)-(d), in terms of the reference rotor current along with the

actual rotor currents , the three-phase rotor current along with the rotor speed, the stator and grid voltage, and the stator current, respectively.

It can be described in four scenarios as follows:

1) In period $\square$ ($t = 0.02 - 0.10$ s): The speed of the generator is initially in the subsynchronous speed at 1200 rpm. At $t = 0.02$ s, the reference exciting rotor current is changed by a step

command from the lacking induction to the rated value according to (13), whereas both the reference torque rotor current and the actual torque rotor current are equal to zero. Therefore, the actual exciting rotor current is linearly conducted until its rated value at

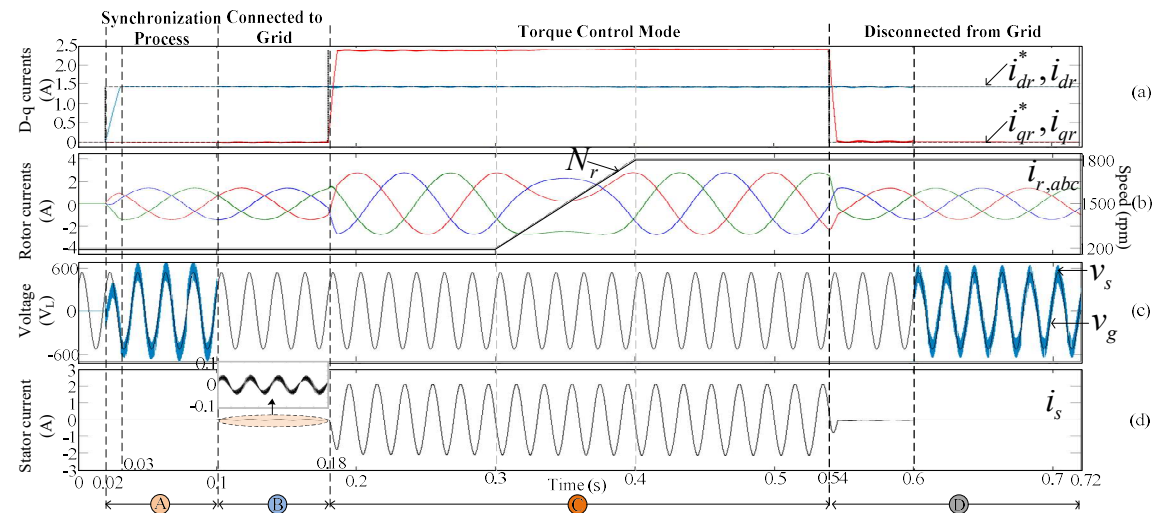


Fig. 3 Simulation results for the proposed GFOC algorithm with torque control mode. (a) Rotor currents. (b) Three-phase rotor currents and speed. (c) Stator and grid line-to-line voltages. (d) Phase stator current.

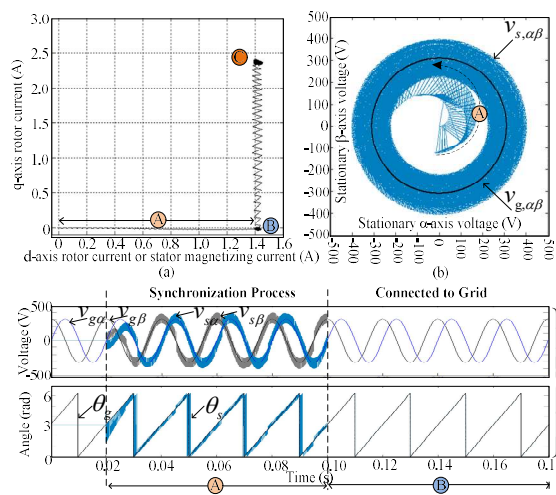


Fig. 4 Synchronization and power control operation of Fig. 3. (a) XY plot of the rotor currents. (b) Trajectory of the stator and grid voltages. (c) Phase stator and grid voltages and its position angles.

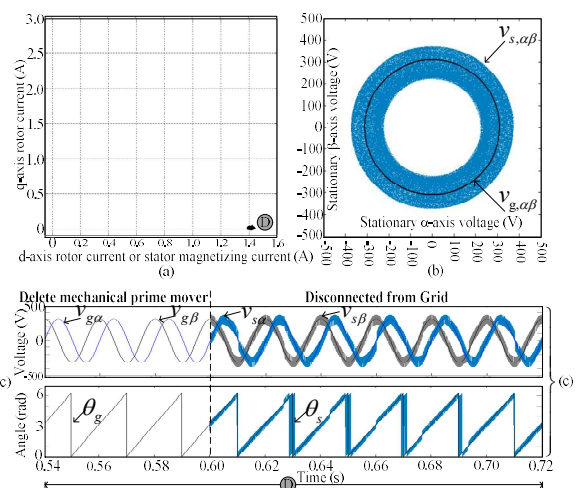


Fig. 5 Disconnection operation of Fig. 3. (a) XY plot of the rotor currents. (b) Trajectory of the stator and grid voltages. (c) Phase stator and grid voltages and its position angles.

$t = 0.03$ s. This leads to the corresponding increment of the three-phase rotor current. The stator line-to-line voltage is then induced and completely synchronized into the grid voltage, whereas the stator current is still zero.

2) In period $\square$ ($t = 0.10 - 0.18$ s): The stator terminal is directly connected to the grid at $t = 0.10$ s. It can be seen that the actual exciting

rotor current and the three-phase rotor current can be regulated at the rated value. Hence, the stator voltage fully becomes the grid voltage with the negligible stator current at 2% of its rated value, without the effect of the inrush current. This can confirm the smooth grid-connected of the proposed system.

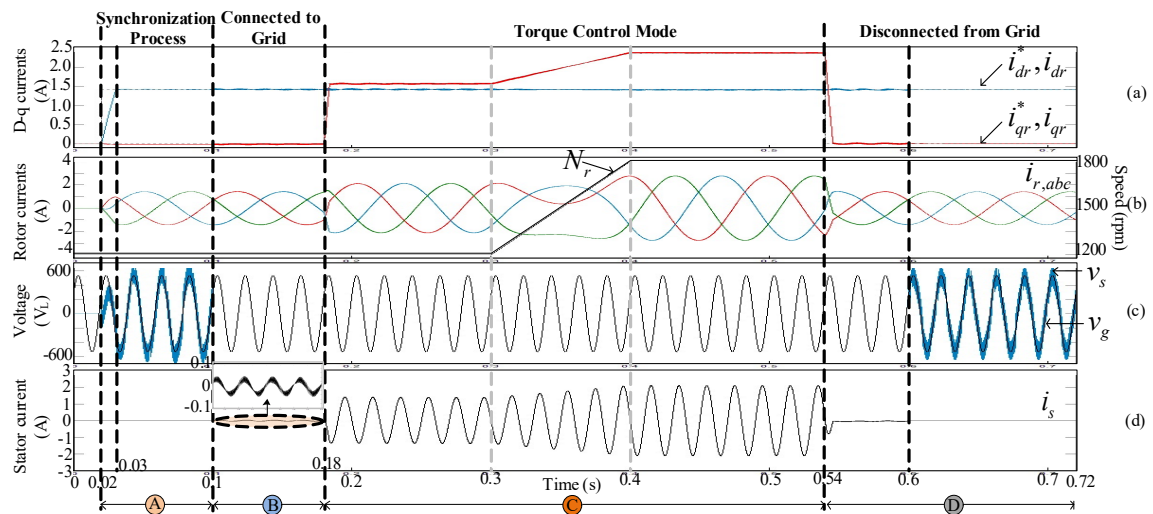


Fig. 6 Simulation results for the proposed GFOC algorithm with speed control mode. (a) Rotor currents. (b) Three-phase rotor currents and speed. (c) Stator and grid line-to-line voltages. (d) Phase stator current.

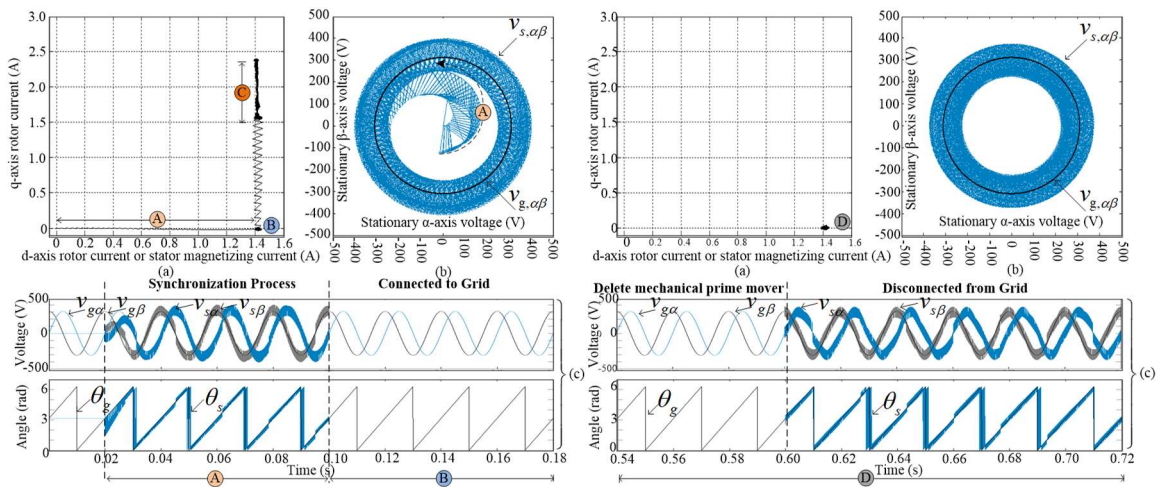


Fig. 7 Synchronization and power control operation of Fig. 6. (a) XY plot of the rotor currents. (b) Trajectory of the stator and grid voltages. (c) Phase stator and grid voltages and its position angles.

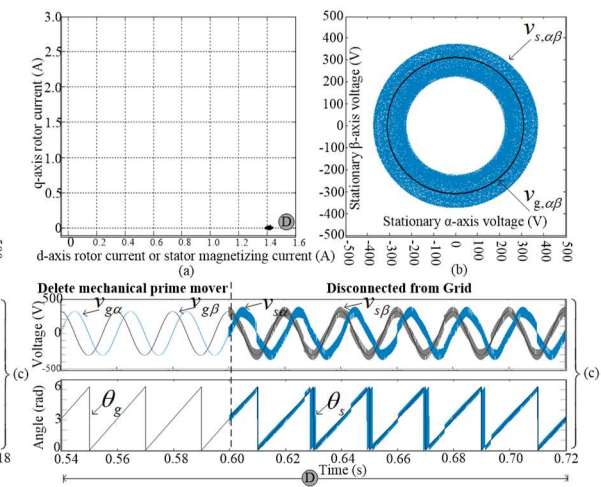


Fig. 8 Disconnection operation of Fig. 6. (a) XY plot of the rotor currents. (b) Trajectory of the stator and grid voltages. (c) Phase stator and grid voltages and its position angles.

3) In period $\square$ ($t = 0.18 - 0.54$ s): The electromagnetic torque control begins by the sudden step up of the reference torque rotor current to the rated value, which leads to a constant electromagnetic torque according to (14). Meanwhile, although the rotor speed is changed from subsynchronous speed (1200 rpm)

to supersynchronous speed (1800 rpm), the actual torque rotor current is still kept constant, as expected, unless the phase sequence of the three-phase rotor current is inverse. In addition, the desired stator voltage and current are maintained by the torque control mode. This is pointed out to the

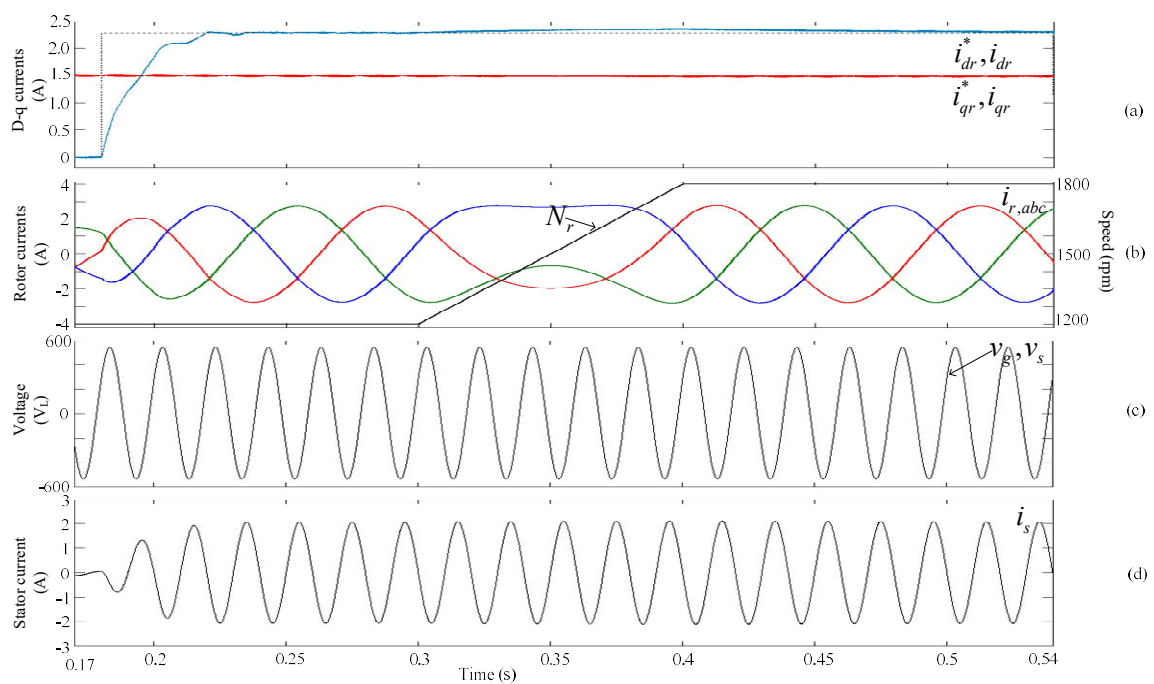


Fig. 9 Simulation results of power control for DFIG using SVOC [6]. (a) Rotor currents. (b) Three-phase rotor currents and speed. (c) Stator and grid line-to-line voltages. (d) Phase stator current.

stable performance of the proposed control algorithm.

4) In period $\square$ ($t = 0.54 - 0.72$ s): Finally, in order to disconnect the system in the decrease the electromagnetic torque to zero. For this reason, the stator current is immediately reduced to zero. Meanwhile, the three-phase rotor current is decreased from the rated value to its excited value, but it does not impact on the stator

voltage due to the actual exciting rotor current is kept constant. The utility grid disconnection is carefully succeeded at $t = 0.60$ s without the inrush current, in spite of the remaining induced stator voltage and with the existing synchronization.

Fig. 4 shows the dynamic operation of the synchronization process. The xy plot of the actual rotor excitation current is changed from the origin

point to its excited value point corresponding to its waveforms of Fig. 3(a) in period $\square$, as shown in Fig. 4(a). Simultaneously, it can be observed that the phase stator voltage is induced and swirly in order to reach the trajectory of the phase grid voltage, as shown in Fig 4(b), according to their time domain along with the waveforms of the induced stator-flux position aligning the grid-flux position shown in Fig. 4(c). For the grid-parallel connection in period $\square$ (see Fig. 3), the phase components of stator voltage are identical to those of the grid voltage for both magnitude and position views (see the black line in Fig. 4(b)), in accordance with the waveforms of Fig. 4(c). Then, the torque control operation corresponding to period $\square$ of Fig. 3 is pointed out by the actual torque current component that perpendicularly racks into its rated value, as shown in Fig 4(a).

Fig. 5 shows the dynamic operation of the disconnection process. The xy plot of the actual torque current component is changed to zero, whereas the actual rotor excitation current still stands at its excited value, as shown in Fig. 5(a) and corresponding to Fig. 3 in period $\square$. In Fig. 5(b), the phase stator voltage returns to be enclosed by the ripple while its trajectory is still synchronized, which is also visible from its component and position waveforms, as shown in Fig. 5(c).

B. Operation of Doubly- Fed Induction Generator System with speed control mode

Fig. 6 shows the simulation results for the proposed GFOC with the speed control mode.

The response and performance resemble the previous results of the torque control mode (see in Fig. 3). However, after the system is synchronized and connected to the grid, the speed control leads to inconstant electromagnetic torque according to the rotor speed variation, as shown in Figs. 6(a) and 6(b) for period $\square$. Moreover, the stator current is accordingly increased and proportional to torque rotor current, as shown in Fig. 6(d). In the same way, the dynamic operation results from the synchronization process in Fig. 7 are similar to Fig. 4, except that the electromagnetic torque is changeable in the speed control process. The xy plot of the actual torque rotor current gradually raise from the subsynchronous to supersynchronous speed with a lower error due to the linear change of the rotor speed, as shown in Fig. 7(a) for period $\square$. Besides, the dynamic operation of the disconnection process of Fig. 8 has the same results as Fig. 5. As the results in section IV- A and – B, the proposed algorithm works as expected and proves its performance in both power control modes.

Compared with the existing SVOC method in [6], Fig. 9 shows the simulation results of power control for DFIG using SVOC method. In term of the results of Figs. 9(b)-(d), they are well in line with the proposed GFOC algorithm (see Figs. 3(b)-(d)). Unless, the dq -axis rotor currents in Fig. 9(a) are different from the dq -axis rotor currents in Fig. 3(a) due to its SVOC algorithm. This can guarantee that the power control performance of the proposed GFOC algorithm for

DFIG system is equivalent to the conventional SVOC method [6].

5. Conclusion

In this paper, the grid-flux-oriented control (GFOC) algorithm has been applied and confirmed for the synchronization process and power control process of the DFIG system. A unique synchronization and current rotor control process have been explained with equations in order to directly regulate the stator magnetizing current, or the exciting rotor current, for the induction of stator voltage and to fully control the electromagnetic torque for the power control process. With this algorithm, all of operation is controlled by the grid-side information based on one-stage synchronization. The dynamic simulation results can verify the performance operation of the DFIG under GFOC in the details as follows: 1) the DFIG is smoothly connected to the grid without the inrush current, 2) The power process can effectively operate with torque control and speed control under the variation of the subsynchronous, synchronous and supersynchronous speed mode, 3) All operations are controlled only by the GFOC algorithm.

6. References

- [1] R. Pena, J. C. Clare, and G. M. Asher, "Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable speed wind-energy generation", IEE Proc. Elec. Power Appl., vol. 143, no. 3, pp. 231-241, 1996.
- [2] P. Vas, *Vector Control of AC Machines*. New York, Oxford Univ. Press, 1990.
- [3] W. Leonhard, *Control of Electrical Drives*. Berlin, Springer Verlag 2001.
- [4] S. Muller, M. Deicke, and R. W. De Doncker, "Doubly fed induction generator systems for wind turbines," IEEE Ind. Appl. Mag., vol. 3, pp. 26-33, May/Jun. 2002.
- [5] S. Z. Chen, N. C. Cheung, Y. Z., M. Zhang, and X. M. Tang, "Improved grid synchronization control of doubly fed induction generator under unbalanced grid voltage," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 26, no. 3, pp. 799-810, 2011.
- [6] B. Wu, Y. Lang, N. Zargari, and S. Kouro, "Doubly fed induction generator based WECS," in *Power Conversion and Control of Wind Energy Systems*, New Jersey: Wiley-IEEE Press, 2011, pp.480-485.
- [7] J. W. Park, K. W. Lee, D. W. Kim, K. S. Lee, and J. S. Park, "Control method of a doubly-fed induction generator with a grid synchronization against parameter variation and encoder position", in *Industry Applications Annual Meeting*, New Orleans, LA., 2007, pp. 931-935.
- [8] A. G. A. Khalil, D. C. Lee, and S. H. Lee, "Grid connection of doubly-fed induction generators in wind energy conversion system," in *International Power Electronics and Motion Control Conference*, Shanghai, 2006, pp. 1-5.
- [9] D. Yazdani, M. Pahlevaninezhad, and A. Bakhshai, "Three-phase grid synchronization techniques for grid connected converters in distributed generation systems," in IEEE

International Symposium on Industrial Electronics, Seoul, 2009, pp. 1105- 1110.

- [10]K. M. Muttaqi and M. T. Hagh, " A synchronization control technique for soft connection of doubly-fed induction generator based wind turbines to the power grid," in IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Cincinnati, OH, 2017, pp. 1-7.
- [11]G. Tapia, G. Santamara, M. Telleria, and A. Susperregui. " Methodology for smooth connection of doubly fed induction generators to the grid", IEEE Trans. Energy Convers., vol.24, no.4, pp. 959-971, 2009.
- [12] R. Pena, R. Cardenas, and G. Asher, "Overview of Control Systems for the Operation of DFIGs in Wind Energy Applications," in Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Vienna, 2013, pp. 88–95.

การพัฒนาเครื่องจักรซีเอ็นซีขนาดเล็กเพื่อตัดแผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิต Aluminum Composite Cutting Machine Development Using CNC

พรเทพ มานิตยวงศ์¹ สุวรรณี อัสวกุลชัย^{2*}

¹นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย

²รองศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย

Pornthep Manichwong¹ Suwannee Adsavakulchai^{2*}

¹Master Student, School of Engineering, University of the Thai Chamber of Commerce

²Associate Professor, School of Engineering, University of the Thai Chamber of Commerce

126/1 Vibhavadee Road, Dindiang Bangkok, 10400

*Corresponding author: Email: suwannee_ads@utcc.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลัก เพื่อออกแบบและพัฒนาเครื่องจักรซีเอ็นซีขนาดเล็ก สำหรับใช้ตัดแผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิตที่มีประสิทธิภาพดีกว่าการใช้เลื่อยวงเดือน เนื่องจากส่วนใหญ่อุตสาหกรรมขนาดเล็ก (SMEs) ในประเทศไทยมีการใช้เลื่อยวงเดือนกันอย่างกว้างขวาง ในการศึกษาครั้งนี้ ออกแบบเครื่องจักรซีเอ็นซีเครื่องขนาด 1.10 x 1.45 x 0.78 เมตร และพื้นที่ตัด 0.89 x 1.23 เมตร นวัตกรรมของเครื่องตัดแผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิต คือ การประยุกต์ใช้หัวส่วนคาร์ไบด์ตัดแผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิต การทำงานของเครื่องควบคุมด้วยระบบซีเอ็นซี โดยใช้โปรแกรม Mach 3 ควบคุม microprocessor 5 axis breakout board ทำงานผ่าน parallel port ที่เชื่อมกับคอมพิวเตอร์ควบคุม spindle ทำงาน 3 แกน และเลื่อนได้ทุกทิศทาง ส่วนรูปแบบในการตัดแผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิตใช้โปรแกรม JDPaint และ Artcam เป็นเครื่องมือ ในการตัดเป็นเส้นตรงทั้งสามแกน เป็นเส้นโค้ง การเจาะรู หรือแกะสลักเป็นรูปร่างต่างๆ ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องตัดแผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิตด้วยซีเอ็นซี กับเครื่องตัดแผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิตด้วยเครื่องเลื่อยวงเดือน พบว่า เครื่องตัดแผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิตด้วยซีเอ็นซี สามารถช่วยลดเวลาที่ใช้ในการตัดต่อแผ่น ร้อยละ 50.66 ทำให้ความเที่ยงตรงและความสม่ำเสมอในรอยตัดแผ่นดีกว่า คิดเป็นร้อยละ 2.08 ปริมาณของเสียลดลง ร้อยละ 26.75 การกระจายของเศษอลูมิเนียมลดลง ร้อยละ 72.72 ความปลอดภัยจากการใช้เครื่อง ทำให้อุบัติเหตุลดลง ร้อยละ 62.50 และมลพิษทางเสียงลดลง ร้อยละ 17.53 กล่าวโดยสรุป เครื่องตัดแผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิตด้วยระบบซีเอ็นซี เหมาะสำหรับ SME ในประเทศไทย เนื่องจากเครื่องขนาดเล็ก และราคาต่ำกว่าการนำเข้าเครื่องแบบเดียวกัน ร้อยละ 60.48 รวมถึงสะดวกในการบำรุงรักษาและบริการหลังการขาย เนื่องจากผลิตภายในประเทศ ทั้งนี้ เครื่องตัดแผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิตระบบซีเอ็นซี อยู่ในระหว่างการตรวจสอบความถูกต้องก่อนประกาศรับจดทะเบียนอนุสิทธิบัตร ตามคำขอรับอนุสิทธิบัตร เลขที่ 1703000038 เมื่อวันที่ 10 มกราคม พ.ศ. 2560

คำสำคัญ: ออกแบบเครื่องจักร เครื่องตัดซีเอ็นซี แผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิต หัวส่วนคาร์ไบด์ อนุสิทธิบัตร

ABSTRACT

The main objective of this study is to design and develop an Aluminum Composite (AC) cutting machine using computer numerical control (CNC) that is more efficient than the circle saw. Since most of the small manufacturing enterprises (SMEs) in Thailand still use circle saws in general. In this study, the machine is 1.10 x 1.45 x 0.78 meter and the working space is 0.89 x 1.23 meter. The innovation of this AC cutting machine is the trimming router bit. The machine is automatically controlled using Program Mach 3 as a tool to run microprocessor 5 axis breakout board via parallel port. In addition, the cutting AC pattern is designed by using JDPaint and Artcam. Therefore, this study is to compare the efficiency of the AC cutting machine between the machine and the circular saw. The results from this study demonstrates that the machine works more efficiently as follows: less time consuming 50.66%,

more accuracy 2.08%, less waste during production 26.75%, less aluminium distribution 72.72%, more safety that the accident less than 65.58% and less noise pollution 17.53%. It can be concluded that the Aluminum Composite (AC) cutting machine using computer numerical control is good for Thai SMEs and the cost is less than the import 60.48%. Moreover, the machine is made in Thailand that is easy for after sale service and maintenance. The machine is still in the examine process before announcement for patent in Thailand with number 1703000038 on January 10, 2017.

Keyword : Machine design, CNC cutting machine, aluminum composite, trimming router bit, patent.

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปัจจุบันการตัดแผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิตในอุตสาหกรรมขนาดเล็กในประเทศไทย ยังใช้เลื่อยวงเดือน โดยทำการทาบกับไม้แบบที่ทำหน้าที่เป็นฉาก หรือใช้งานรางอลูมิเนียมทำการวัดระยะตัด จากนั้นทำการบรรจุแผ่น วัสดุให้ตรงกับแนวตัดยึด เพื่อทำการตัดแผ่นตามแนว จนกระทั่งจบสิ้นกระบวนการ [1,2,3] ทั้งนี้ ปัญหาของการ ใช้เลื่อยวงเดือน คือ เสียงที่เกิดขึ้นระหว่างการตัด และ เสียงดังต่อเนื่องแบบไม่คงที่ ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของ ใบเลื่อยวงเดือน ก่อให้เกิดมลภาวะทางเสียง เนื่องจากค่า ปริมาณเสียงสูงมากกว่าระดับเสียงปลอดภัย (85 เดซิเบล) ส่งผลเสียต่อการได้ยินของผู้ใช้งาน หากได้รับการได้ยิน เป็นระยะเวลานาน [4] ปัญหาของของเสียที่เกิดขึ้นจาก การตัดแผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิต ซึ่งกระเด็นและถูกพัด โดยใบเลื่อยที่กำลังหมุนอยู่พัดกระจายออกไป และถูก ผู้ใช้งาน [5] รวมถึงระยะเวลาในการตัดแผ่นอลูมิเนียม คอมโพสิต ซึ่งการตัดแผ่นแต่ละแผ่นนั้น จะต้องทำการวัด แนวตัดและทำเครื่องหมายในการตัดทุกครั้ง ใช้เวลาใน การตัดนานกว่า เมื่อต้องทำเป็นจำนวนมากๆ รวมถึงความ แม่นยำและความสม่ำเสมอของรอยตัด การตัดด้วยใบ เลื่อยวงเดือน จะมีแรงกดที่ไม่สม่ำเสมอ ทำให้เกิดความ คลาดเคลื่อน [6] รวมถึงความเสี่ยงอันตรายที่จะเกิดขึ้นทั้ง จากการสัมผัสกับใบเลื่อยโดยไม่ได้ตั้งใจ หรือเศษที่จะถูก พัดกระเด็นออกมาโดนผู้ใช้งาน นอกจากนั้น การตัดแผ่น อลูมิเนียมคอมโพสิตด้วยเลื่อยวงเดือน จำเป็นต้องใช้มือใน การกดอุปกรณ์เลื่อยวงเดือนให้ตัดไปตามรางที่กดไว้ ถ้ามี ใบมีดยื่นออกมาเพื่อตัดวัสดุ ซึ่งความเสี่ยงอันตรายที่จะ เกิดขึ้นกับผู้ใช้งานมีแรงตีกลับมา หากไม่ได้มีการกด ตัวเครื่อง ทำให้การตัดผ่านอย่างสม่ำเสมอจะเกิดการตี กลับของเครื่อง โดยอาการตีกลับนั้นจะเกิดขึ้นจากการที่ ใบเลื่อยตัดเจาะลงไปยังวัสดุแข็งที่ทำการตัด โดยการ ทำการเหวี่ยงบนวัสดุแข็งนั้นจะเกิดแรงตีกลับขึ้นมาในแนวตั้ง หากไม่มีการควบคุมให้เครื่องอยู่ในแกนตั้ง [7] จะทำให้

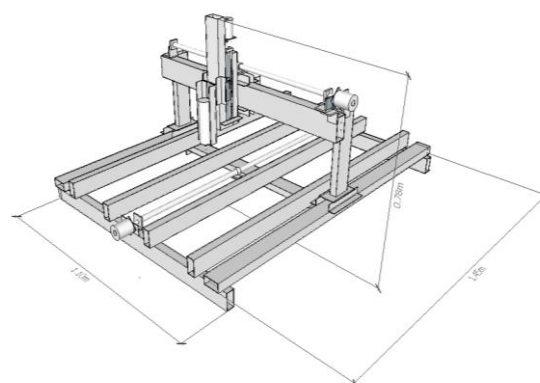
ตัวเครื่องดีดขึ้นมาโดนมือผู้ใช้งานได้ รวมถึงหากมีสิ่ง แปลกปลอมเข้าไปขวางทางเดินของใบเลื่อย ทำให้มี โอกาสที่จะถูกใบเลื่อยพัดมากระแทกกับผู้ใช้งานได้ และ ความเสี่ยงที่จะสัมผัสกับใบตัดโดยตรงในขณะที่ตัด จากสถิติ อุบัติเหตุ โดย OSHA ของ United State Department of Labor พบว่าช่วงปี 2546-2554 มีรายงานการเกิด อุบัติเหตุจากการใช้งานเลื่อยวงเดือนที่ทำให้เกิดการ บาดเจ็บจนถึงเสียชีวิตจำนวน 308 ครั้ง ในงานวิจัยนี้ได้ ประเมินการไว้ว่าจะลดความเสี่ยงที่จะเกิดอุบัติเหตุนี้ [8,9]

ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้ จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อ ออกแบบและพัฒนาเครื่องตัดแผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิต ระบบซีเอ็นซีขนาดเล็ก ในราคาถูกกว่าการนำเข้าจาก ต่างประเทศ และเปรียบเทียบประสิทธิภาพเครื่องกับการ ตัดแผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิตด้วยเลื่อยวงเดือน

2. วิธีการดำเนินงาน

2.1 การพัฒนาเครื่องตัดแผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิต ด้วยระบบซีเอ็นซี

ในการศึกษาครั้งนี้ การออกแบบเครื่อง มีขนาด $1.10 \times 1.45 \times 0.78$ เมตร และมีพื้นที่ตัดประมาณ 0.89×1.23 เมตร แสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 เครื่องตัดแผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิตด้วยระบบซีเอ็นซี

จากรูปที่ 1 เครื่องตัดแผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิตด้วยระบบซีเอ็นซี สามารถตัดชิ้นงานอลูมิเนียมคอมโพสิตขนาด 50 x 50 เซนติเมตร มีหัวเจาะสว่าน Trimmer ติดตั้งอยู่บนโครงหลัก แล้วทำการเลื่อนที่พิดสกรูในการควบคุมตัวตัดให้เคลื่อนที่ไปในแกน X Y โดยให้พิดสกรูอยู่ตรงกลางของแกน เพื่อควบคุมให้เคลื่อนที่เท่าๆกัน และลดความคลาดเคลื่อนจากการไม่นิ่งของเครื่องที่จะเกิดขึ้น หากทำการติดตั้งพิดสกรูที่ขอบเครื่อง และมีโครงหลักส่วนล่างรองรับเป็นฐานของเครื่อง พิดสกรูแต่ละตัวมีสแต็ปเปอร์มอเตอร์ช่วยในการหมุน ซึ่งสแต็ปเปอร์มอเตอร์รับคำสั่งจากไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อที่ใช้ในการควบคุมการตัด

2.2 การควบคุมเครื่องด้วยระบบซีเอ็นซี

ในการควบคุมเครื่องตัดแผ่นด้วยระบบซีเอ็นซี เริ่มจากการรับคำสั่งเพื่อแปลงรูป vector ที่วาดขึ้นในโปรแกรม JDPAINT [10] แล้วทำการแปลงรูป Vector ให้เป็นชุดคำสั่งภาษา G-Code ในโปรแกรม ARTCAM เพื่อทำการส่งชุดคำสั่งต่อไปยังโปรแกรม Mach 3 ที่ใช้ควบคุมสั่งส่งคำสั่งไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านสายเชื่อมต่อพอร์ทพาราเรล เมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์รับคำสั่งทำการแปลงชุดคำสั่งเป็นกระแสไฟไปยังสแต็ปเปอร์มอเตอร์ โดยสแต็ปเปอร์มอเตอร์จะทำการรับกระแสไฟแล้วจ่ายไฟฟ้าให้แก่สแต็ปเปอร์มอเตอร์ เพื่อใช้ในการควบคุมการตัด แสดงในรูปที่ 2

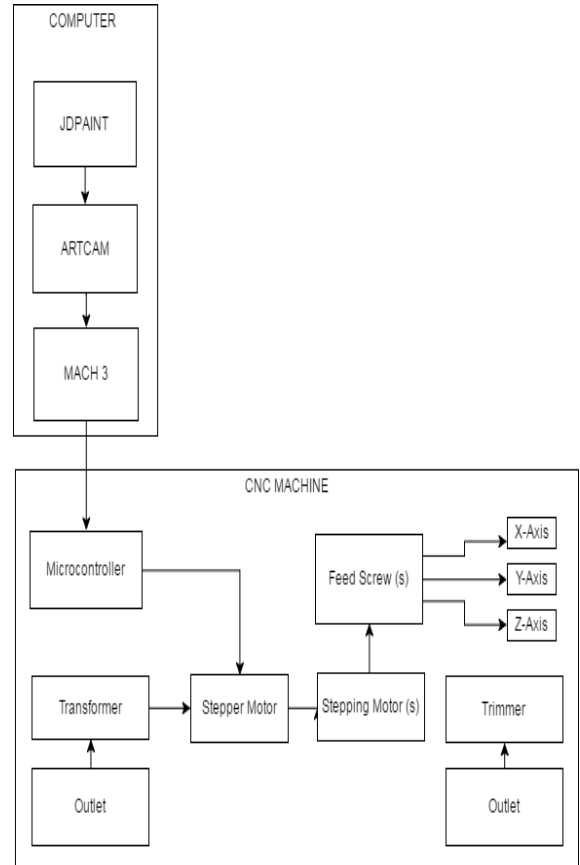
2.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพ

กระบวนการตัดแผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิตด้วยเลื่อยวงเดือน แสดงในรูปที่ 3 ส่วนกระบวนการตัดแผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิตด้วยระบบซีเอ็นซี แสดงในรูปที่ 4 ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ 5 ด้าน ในการตัดแผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิตขนาด 50 x 50 ซม. ทั้งหมด 25 ครั้ง รายละเอียดต่อไปนี้

2.3.1 การจับเวลาในการตัด: เริ่มจับเวลาในการตัด

แต่ละครั้ง ตั้งแต่เวลาการวัดและติดตั้งแผ่น การเดินเครื่องจักร การลงมือตัดแผ่น และเวลาในการนำแผ่นออกเพื่อทำการวัดตำแหน่งติดตั้ง จนกระทั่งนำผ่านแผ่นที่เสร็จสิ้นแล้วออกจากเครื่องตัด

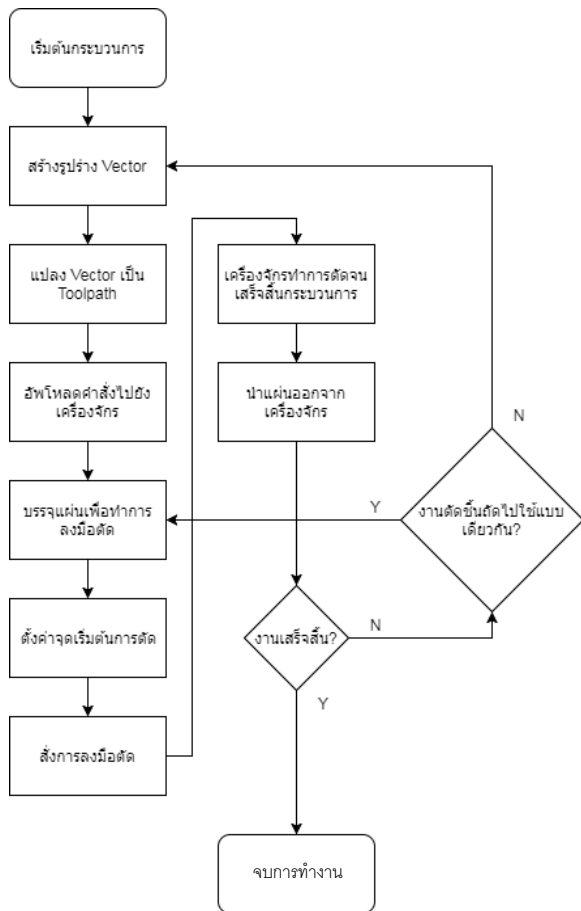
2.3.2 การวัดความเที่ยงตรง และความเรียบของแนวตัด: เพื่อหาความขรุขระและความสม่ำเสมอของร่องตัด โดยทำการวัดด้วยเวอร์เนียจำนวน 3 จุด ตามแนวตัด จุดเริ่มต้น จุดกึ่งกลาง และจุดสิ้นสุดรอยตัด



รูปที่ 2 การควบคุมเครื่องด้วยระบบซีเอ็นซี



รูปที่ 3 กระบวนการตัดแผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิตด้วยเลื่อยวงเดือน



รูปที่ 4 กระบวนการตัดแผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิตด้วยซีเอ็นซี

2.3.3 การชั่งน้ำหนักของเสีย และลักษณะของของเสียที่เกิดขึ้นจากการตัด: ประกอบด้วยเศษอลูมิเนียมและยางใส่ประกบ หนักชั่งน้ำหนักเป็นกรัม รวมถึงวัดระยะการกระจายของของเสียที่เกิดขึ้น

2.3.4 การเปรียบเทียบความปลอดภัยในการใช้งาน : อ้างอิงจากข้อมูลสถิติและการใช้งานเครื่องจักร

2.3.5 การวัดระดับเสียงที่เกิดขึ้น: วัดระดับเสียงที่เกิดขึ้นจากการตัด โดยใช้แอปพลิเคชัน SPLnFFT ผ่านโทรศัพท์เคลื่อนที่ [11] โดยวัดระดับเสียงห่างจากแหล่งกำเนิดเสียงที่ระยะห่าง 50 ซม. แล้วทำการแปลงข้อมูลเป็นกราฟเพื่อนำมาเปรียบเทียบผลลัพธ์

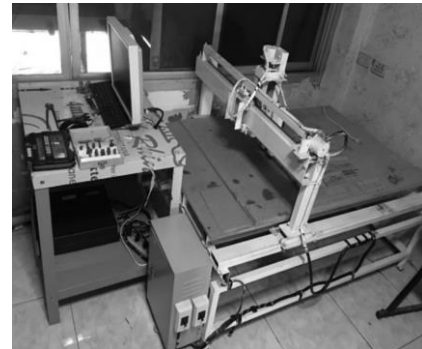


รูปที่ 5 วัดระดับเสียงที่เกิดขึ้นจากการตัด โดยใช้แอปพลิเคชัน SPLnFFT ผ่านโทรศัพท์เคลื่อนที่

3. ผลการศึกษา

3.1 ผลการพัฒนาเครื่องตัดแผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิตด้วยระบบซีเอ็นซี

รูปเครื่องตัดแผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิตด้วยระบบซีเอ็นซีที่พัฒนา แสดงในรูปที่ 6 รายละเอียดเครื่องตัดแผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิตระบบซีเอ็นซี แสดงตารางที่ 1



รูปที่ 6 เครื่องตัดแผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิตระบบซีเอ็นซี

จากรูปที่ 6 การประกอบเครื่องตัดแผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิตระบบซีเอ็นซีพร้อมใช้งาน

ตารางที่ 1 รายละเอียดเครื่องตัดแผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิตระบบซีเอ็นซี

ขนาดตัวเครื่อง	1.10 x 1.45 x 0.78 เมตร
พื้นที่ในการตัด	0.89 x 1.23 เมตร
น้ำหนักเครื่อง	30 กิโลกรัม
อุปกรณ์เจาะตัด	สว่าน Trimmer หัวเจาะ 5 มม. กำลังไฟ 350 วัตต์ ความเร็วหมุน 35000 รอบ/นาที
Micro controller	5 AXIS Breakout board เชื่อมต่อสาย Parallel รองรับการทำงานโปรแกรม Mach 3 / EMC2 รองรับการควบคุม AXIS ได้ 5 แกน [X/Y/Z/A/B] ภาษาที่รองรับ : G-Code
การเคลื่อนที่	ฟีดสกรู/สเต็ปมอเตอร์ควบคุม โดยสเต็ปเปอร์มอเตอร์แต่ละแกน [1.10 เมตร/1 นาที ที่การเคลื่อนที่ Feed 100%] [1.32 เมตร/1 นาที ที่การเคลื่อนที่ Feed 200%]

3.2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพ

3.2.1 ผลการจับเวลาในการตัดแผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิต ขนาด 50 x 50 ซม. จำนวน 25 ครั้ง แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เวลาที่ใช้ในการตัดแผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิต

ประเภทของเครื่อง	เวลาที่ใช้ตัดทั้งหมด
เลื่อยวงเดือน	63 นาที
ซีเอ็นซี	43 นาที

จากตารางที่ 2 พบว่า เวลาที่ใช้ตัดแผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิตด้วยเครื่องตัดแผ่นระบบซีเอ็นซี ใช้เวลาตัดน้อยกว่าการตัดด้วยเลื่อยวงเดือน 20 นาที คิดเป็นร้อยละ 50.66 เนื่องจากกระบวนการในการตัดด้วยเลื่อยวงเดือน ต้องนำแผ่นออกมา เพื่อทำการตัดใหม่ทุกครั้ง ในขณะที่การตัดด้วยเครื่องซีเอ็นซี ทำการตัดตั้งแต่เริ่มต้นจนจบกระบวนการ โดยไม่ต้องนำแผ่นออกมาเป็นการทำงานจนซ้ำจนตัดเสร็จ จึงค่อนข้างนำแผ่นออกจากเครื่อง แสดงรายละเอียดกระบวนการในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบเวลาในการตัดแผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิต

เลื่อยวงเดือน		ซีเอ็นซี	
กระบวนการ	เวลา (วินาที)	กระบวนการ	เวลา (วินาที)
วัด/ทำเครื่องหมาย	90	ใช้โปรแกรมตัด	300
บรรจุแผ่น	30	บรรจุแผ่น	30
ตัดแผ่น	10	ตัดแผ่น	30
นำแผ่นออก	20	-	-
วัด/ทำเครื่องหมายเพื่อตัดแนวใหม่	90	ไปยังตำแหน่งถัดไป	30
บรรจุแผ่น	30	-	-
ทำซ้ำจนตัดเสร็จ	-	ทำซ้ำจนตัดเสร็จ	-
นำแผ่นออกจากเครื่อง	20	จบโปรแกรมนำแผ่นออกจากเครื่อง	30

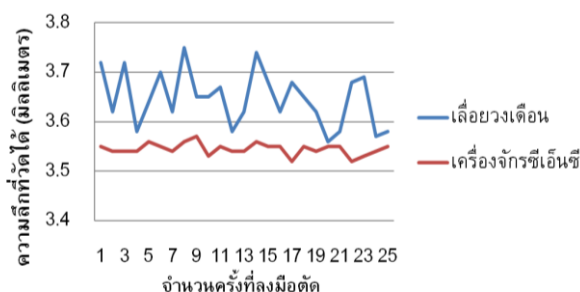
จากตารางที่ 3 ถ้าเปรียบเทียบการตัดเพียงแผ่นเดียว พบว่า การตัดด้วยเครื่องซีเอ็นซีใช้เวลามากกว่าในวัด/ทำเครื่องหมาย เฉพาะครั้งแรกเท่านั้น แต่ถ้าตัดหลายๆ แผ่นแล้ว เวลาในส่วนนี้จะไม่เกิดขึ้นจนการจะเสร็จสิ้นการตัด ในขณะที่การตัดด้วยเลื่อยวงเดือนต้องมีการวัด/ทำเครื่องหมายทุกครั้งที่ยัด

3.2.2 ผลวัดความเที่ยงตรงและความเรียบของแนวตัด ใช้เวอร์เนียวัดตามแนวตัดจำนวน 3 จุด แสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลความเที่ยงตรงและความเรียบของแนวตัด

ประเภทเครื่อง	ความลึกฝังซ้ายโดยเฉลี่ย	ความลึกที่จุดกึ่งกลางโดยเฉลี่ย	ความลึกที่ฝังขวาโดยเฉลี่ย
เลื่อยวงเดือน	3.5756	3.6468	3.6216
ซีเอ็นซี	3.5364	3.5448	3.5368

จากตารางที่ 4 พบว่า ค่าความลึกของแผ่น ทำการวัด 3 จุด คือ ความลึกฝังซ้ายโดยเฉลี่ย ความลึกที่จุดกึ่งกลางโดยเฉลี่ย และ ความลึกที่ฝังขวาโดยเฉลี่ย เพื่อพิจารณาความสม่ำเสมอของรอยตัดแผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิต ซึ่งการตัดด้วยเลื่อยวงเดือนมีความแตกต่างของรอยตัดที่สูงกว่า เนื่องจากในการตัดแผ่นด้วยใช้แรงกดที่ไม่สม่ำเสมอ เกิดจากการเคลื่อนที่ของผู้ใช้งานในการตัดแผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิต ในขณะที่เครื่องระบบซีเอ็นซี มีการเปลี่ยนแปลงของความลึกน้อยกว่า 0.3 มม. เนื่องจากการเคลื่อนที่ของฟีดสกรู มีความสม่ำเสมอ แสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 กราฟแสดงความลึกในการตัดแผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิตด้วยเครื่องทั้งสองประเภท

จากรูปที่ 7 จากกราฟแสดงให้เห็นถึงความสม่ำเสมอของการตัดด้วยเครื่องตัดซีเอ็นซี ดีกว่าเลื่อยวงเดือน เนื่องจากเครื่องจักรทำงานได้สม่ำเสมอว่าการที่คนใช้แรงกดเพื่อตัดในแต่ละครั้ง สำหรับกราฟแสดงการตัดแต่ละครั้ง กราฟของการตัดด้วยเครื่องเลื่อยวงเดือน แต่ละครั้งแตกต่างกันชัดเจน ในขณะที่ถ้าพิจารณาจากค่าเฉลี่ยแล้วไม่แตกต่างกันจากการตัดด้วยเครื่องตัดซีเอ็นซี

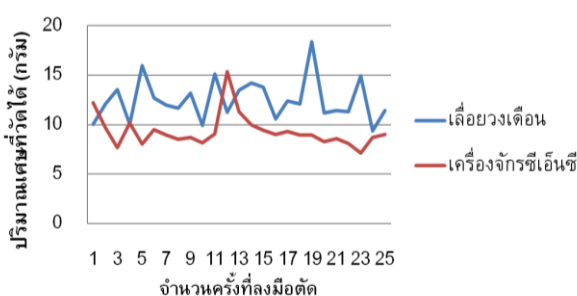
3.2.3 ผลการวัดปริมาณ และการกระจายของเศษ

จากการตัดแผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิต แสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ปริมาณและการกระจายของเศษจากการตัดแผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิต

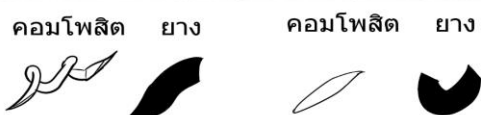
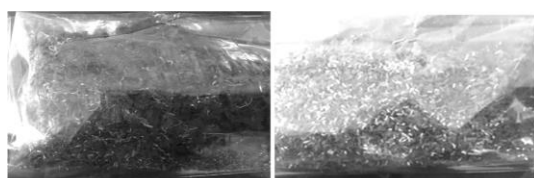
ประเภทของเครื่อง	ค่าเฉลี่ยของปริมาณเศษจากการตัด (กรัม)	ระยะทางการกระจายของเศษ (เมตร)
เลื่อยวงเดือน	12.48	5.50
ซีเอ็นซี	9.31	1.50

จากตารางที่ 5 ปริมาณของเสียจากการตัดด้วยเครื่องซีเอ็นซี มีปริมาณโดยเฉลี่ยน้อยกว่าการตัดด้วยเลื่อยวงเดือน 3.17 กรัม คิดเป็นร้อยละ 2.08 แสดงในรูปที่ 8 ส่วนระยะทางการกระจายของเศษที่เกิดจากเครื่องซีเอ็นซี น้อยกว่าการตัดด้วยเลื่อยวงเดือน 4.0 กรัม คิดเป็นร้อยละ 72.72 รายละเอียดแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 8 กราฟแสดงปริมาณของเสียที่ทำการเก็บได้

จากรูปที่ 8 ปริมาณของเสียที่ทำการเก็บได้ จากการตัดในแต่ละครั้งแตกต่างกัน แต่เมื่อนำมาคำนวณค่าเฉลี่ยแล้ว การตัดด้วยระบบซีเอ็นซี ก่อให้เกิดของเสีย น้อยกว่า



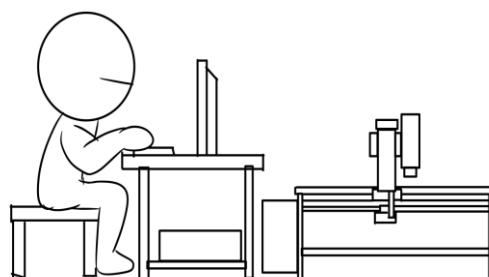
รูปที่ 9 การกระจายที่เกิดจากการตัด

จากรูปที่ 9 ระยะทางการกระจายของเศษพบว่า การตัดด้วยเครื่องซีเอ็นซีมีการกระจายของเสีย 1.50 เมตร. ลักษณะของเศษหลักมีขนาด 0.3-0.5 ซม.

และมีความละเอียด และความคมของเศษลดลง ในขณะที่เลื่อยวงเดือนกระจายที่ 5.50 เมตร ลักษณะของเศษมีรูปร่างเป็นเส้นยาวขนาดประมาณ 0.5-1.5 ซม. และเศษหลักมีความยาว 1-2 ซม. และแหลมคม

3.2.4 ผลการเปรียบเทียบความปลอดภัยและความเสี่ยงจากการใช้งานเครื่องตัดแผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิตระบบซีเอ็นซี กับเลื่อยวงเดือน

จากการใช้งานเครื่องตัดแผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิตด้วยระบบซีเอ็นซี สามารถลดความเสี่ยงจากการเกิดอุบัติเหตุจากการตัดแผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิต เนื่องจากผู้ใช้งานควบคุมการตัดจากคอมพิวเตอร์ที่อยู่ห่างจากโต๊ะที่ใช้ตัดแผ่น ทำให้ผู้ใช้งานไม่ได้สัมผัสอุปกรณ์ตัดโดยตรง (รูปที่ 10) ดังนั้นไม่มีความเสี่ยงจากการเกิดอุบัติเหตุจากการสัมผัสกับชิ้นส่วนตัดที่มีเคลื่อนที่ และไม่มีความเสี่ยงจากการที่ถูกของเสียหรือสิ่งแปลกปลอมที่กระเด็นมาจากใบเลื่อยวงเดือน มากระทบกับผู้ใช้งานได้



รูปที่ 10 ตำแหน่งผู้ใช้งานในการตัดแผ่นด้วยเครื่องซีเอ็นซี

จากรูปที่ 10 ผู้ใช้งานในการตัดแผ่นด้วยเครื่องซีเอ็นซีนั้นอยู่หน้าเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อควบคุมการตัดแผ่น ซึ่งอยู่ห่างจากเครื่องตัด ในขณะที่การตัดด้วยเลื่อยวงเดือน ผู้ใช้งานต้อง จับอุปกรณ์ตลอดเวลาในกระบวนการตัด (รูปที่ 11) มีความเสี่ยงสูงกว่ามาก



รูปที่ 11 ตำแหน่งผู้ใช้งานตัดแผ่นด้วยเลื่อยวงเดือน

จากรูปที่ 11 ผู้ใช้งานตัดแผ่นด้วยเลื่อยวงเดือน ใช้มีดจับเลื่อยวงเดือนโดยตรง ถ้าผู้ใช้งานไม่มีความชำนาญในการใช้เครื่อง อาจทำให้แรงกด แรงต้าน อันตรายต่อผู้ใช้งานเป็นอย่างมาก

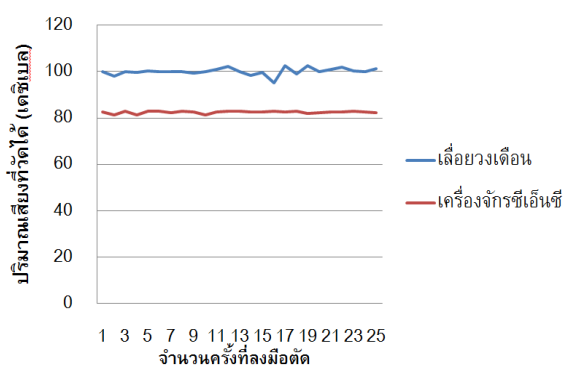
ทั้งนี้ จากสถิติการเกิดอุบัติเหตุที่เกิดจากการตัดแผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิต บันทึกโดย OSHA ของ United State Department of Labor ข้อมูลในช่วงปี 2546 – 2554 พบว่า มีการเกิดอุบัติเหตุจากการใช้งานเลื่อยวงเดือนจำนวน 367 ครั้ง ส่วนเครื่องจักรระบบซีเอ็นซีนั้น เกิดอุบัติเหตุ 105 ครั้ง อุบัติเหตุลดลงร้อยละ 71.38 [10,11]

3.2.5 ผลการเปรียบเทียบระดับเสียง ที่เกิดจากการตัดแผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิต ใช้แอปพลิเคชัน SPLnFFT ผ่านโทรศัพท์เคลื่อนที่ โดยวัดจากการตัดจำนวน 25 ครั้งต่อเครื่อง แสดงผลในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ระดับเสียงจากการตัดแผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิต

ประเภทของเครื่อง	ค่าเฉลี่ยของเสียง	ค่าสูงสุดของเสียงโดยเฉลี่ย	ค่าต่ำสุดของเสียงโดยเฉลี่ย
เลื่อยวงเดือน	100.0803	106.1423	83.4072
ซีเอ็นซี	93.4942	97.6346	88.8546

จากตารางที่ 6 ระดับเสียงจากการตัดแผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิต โดยใช้แอปพลิเคชัน SPLnFFT ผ่านโทรศัพท์เคลื่อนที่ โดยวัดระดับเสียงห่างจากแหล่งกำเนิดเสียงที่ระยะห่าง 50 ซม. พบว่าเครื่องตัดแผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิตด้วยระบบซีเอ็นซีมีปริมาณเสียงน้อยกว่าการตัดด้วยเลื่อยวงเดือนโดยเฉลี่ยที่ 17.536 เดซิเบล หรือคิดเป็นร้อยละ 17.53 จากนั้นทำการแปลงข้อมูลเป็นกราฟเพื่อนำมาเปรียบเทียบผลลัพธ์ แสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 12 กราฟแสดงค่าปริมาณเสียงที่เกิดขึ้น

จากรูปที่ 12 แสดงให้เห็นว่าปริมาณเสียงที่เกิดขึ้นจากการตัดแผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิตด้วยระบบซีเอ็นซียังมีปริมาณเสียงสูงกว่าระดับมาตรฐานเสียงที่ปลอดภัย จึงได้มีการลดปริมาณเสียง ซึ่งแสดงผลการทดลองในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ปริมาณเสียงที่เกิดขึ้นในขณะการตัดด้วยเครื่องจักรซีเอ็นซี (ครอบฝา)

ปริมาณเสียงการตัดด้วยเครื่องซีเอ็นซี (ครอบฝา)	ปริมาณเสียงโดยเฉลี่ย (เดซิเบล)
1. ปริมาณเสียงโดยเฉลี่ย	82.49
2. ค่าสูงสุดโดยเฉลี่ย	84.215
3. ค่าต่ำสุดโดยเฉลี่ย	78.651

จากตารางที่ 7 แสดงให้เห็นว่าปริมาณเสียงโดยเฉลี่ย มีค่า 82.49 เดซิเบล ถือว่าเป็นระดับปริมาณเสียงที่ปลอดภัยต่อการได้ยิน (สูงสุดที่ 85 เดซิเบล) สรุปปริมาณเสียงการลงมือตัดด้วยเครื่องซีเอ็นซีแบบครอบฟ้านี้มีค่าปริมาณเสียงลดลงจากเดิมอยู่ร้อยละ 17.53

4. สรุปผลการศึกษา

เครื่องตัดแผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิตด้วยระบบซีเอ็นซีมีประสิทธิภาพดีกว่าการตัดด้วยเลื่อยวงเดือน ดังนี้

4.1 เวลาที่ใช้ในการตัดแผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิตต่อเส้น ด้วยเครื่องตัดแผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิตด้วยระบบซีเอ็นซี ใช้เวลานานกว่าการตัดด้วยเลื่อยวงเดือน แต่ถ้าตัดแผ่นจำนวนมาก เวลาในกระบวนการโดยรวมการใช้เครื่องตัดแผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิตด้วยระบบซีเอ็นซี ใช้เวลาน้อยกว่า เพราะไม่ต้องทำการย้ายแผ่นวัสดุตัด เพื่อทำการตัดใหม่แต่ละเส้น รวมทั้งการทำงานจำนวนหลายๆชิ้นนั้นสามารถที่จะทำต่อเนื่องเวลาที่ใช้ในการตัดต่อแผ่นลดลงร้อยละ 50.66

4.2 การเปรียบเทียบความเที่ยงตรงและความสม่ำเสมอของเครื่องตัดแผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิตด้วยระบบซีเอ็นซีมีความเที่ยงตรงและความสม่ำเสมอในรอยตัดแผ่นดีกว่าการตัดด้วยเลื่อยวงเดือนคิดเป็นร้อยละ 2.08 เนื่องจากเครื่องตัดแผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิตด้วยระบบซีเอ็นซีรอยตัดสม่ำเสมอขึ้น ในขณะที่การการตัดด้วยเลื่อยวงเดือนขึ้นอยู่กับแรงกดของผู้ใช้งาน [12,13]

4.3 ปริมาณเสียงที่เกิดขึ้นจากการตัดด้วยเครื่องตัดแผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิตด้วยระบบซีเอ็นซี มีปริมาณเสียงน้อยกว่ามลพิษทางเสียงลดลง ร้อยละ 17.53 ทำให้ลดปริมาณเสียงที่ผู้ใช้งานในระดับเสียงที่ปลอดภัย

4.4 ปริมาณของเศษจากการเครื่องตัดแผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิตด้วยระบบซีเอ็นซีมีปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตน้อยกว่า ร้อยละ 26.75 การกระจายของเศษอลูมิเนียมลดลง ร้อยละ 72.72 และรูปร่างของเศษนั้นมีขนาดเล็กและคมน้อยกว่า ประกอบกับการที่ชุดควบคุมนั้นสามารถที่จะเคลื่อนที่ออกไปให้ห่างจากเครื่องตัดหรือทำการปิดพื้นที่ของเครื่องตัด ลดโอกาสที่ของเสียจากกระตัดจะถูกพัฒนากระทบกับผู้ใช้งาน

4.5 ความปลอดภัยในการตัด สรุปว่าการตัดด้วยเครื่องระบบซีเอ็นซีมีความเสี่ยงต่อการบาดเจ็บจากการใช้งานน้อยกว่า การตัดด้วยเลื่อยวงเดือน เนื่องจากการที่ผู้ใช้งานมิได้สัมผัสกับเครื่องโดยตรง สามารถลดอุบัติเหตุได้ ร้อยละ 71.38

กล่าวโดยสรุป เครื่องตัดแผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิตด้วยระบบซีเอ็นซีสามารถนำมาใช้งานอุตสาหกรรมขนาดย่อมได้ เนื่องจากเป็นเครื่องขนาดเล็ก และต้นทุนที่ต่ำกว่าการนำเข้าจากต่างประเทศซึ่งมีต้นทุนประมาณ 250,000 บาทในขณะที่เครื่องที่พัฒนามีต้นทุนประมาณ 70,000 บาท คิดเป็นร้อยละ 60.48

เอกสารอ้างอิง

- [1] เสรีย์ อินทรีย์. (10 กุมภาพันธ์ 2558) วิธีการตัดแผ่นอลูมิเนียมด้วยเลื่อยวงเดือน [Online]. Available: <https://sites.google.com/site/aluminium9999/cutting-aluminium-with-a-circular-wood-saw>
- [2] บริษัท เอ.เอ็ม.เอ็กซ์เพิร์ท จำกัด (11 กุมภาพันธ์ 2558). ขั้นตอนการผลิตแผ่นอลูมิเนียมด้วยเลื่อยวงเดือน [Online]. Available: <http://www.amexpert.co.th>
- [3] หจก.ว่านทอง (15 กุมภาพันธ์ 2558). เลื่อยเขาระ่องอลูมิเนียม. [Online]. Available: <http://www.waantong.com/CA5000.html>
- [4] สมพิศ พันธุเจริญศรี ทอง (25 มีนาคม 2558). ถาม-ตอบ ปัญหาเสียงดัง และ หูตึงจากการทำงาน [Online]. Available: http://www.si.mahidol.ac.th/th/division/ophs/admin/knownledges_files/14_34_1.pdf
- [5] เกรียงไกร ไวกาญจน์, ทศพิธ วิสมิตนันท์ และ พิเชฐ ตระการชัยศิริ, “การพัฒนาเครื่องกัดอัตโนมัติแบบ 5 แกนจากเครื่องกัดแบบ 3 แกนขนาดเล็ก” การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศรีปทุม, เพชรบุรี, 2555, หน้า 1776-1780
- [6] อัครวัฒน์ ตรีจริพงค์ (25 มีนาคม 2558). การเพิ่มประสิทธิภาพของการก่อสร้างอาคารด้วยระบบผนังภายนอกอาคารสำเร็จรูป [Online]. Available: http://www.thapra.lib.su.ac.th/objects/thesis/fulltext/thapra/Akarawat_Trijirapong/fulltext.pdf
- [7] ทศพิธ วิสมิตนันท์, พิเชฐ ตระการชัยศิริ, เกรียงไกร ไวกาญจน์, “การสร้างเครื่องจักร CNC ขนาดเล็กสำหรับการผลิตแบบหล่อโพลีเมอร์แบบแยกชิ้น,” การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศรีปทุม, เพชรบุรี, 2555, หน้า 1175-1182.
- [8] Occupational Safety and Health Administration (25 มีนาคม 2558). สถิติการเกิดอุบัติเหตุที่บันทึกโดย OSHA ของ United State Department of Labor [Online]. Available: https://www.osha.gov/plsimisAccidentSearchsearch?p_logger=1&acc_description=&acc_Abstract=&acc_keyword=circular+saw&sic=&naics=&Office=All&officetype=All&endmonth=01&endday=01&endyear=2000&startmonth=11&startday=28&startyear=2017&InspNr=
- [9] สำนักงานความปลอดภัยแรงงาน กรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน (25 มีนาคม 2558) สถิติอุบัติเหตุ โดยสำนักงานความปลอดภัยแรงงาน กรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน ในปี 2546-2554 [Online]. Available: <http://www.labour.go.th/th/attachments/article/13745/safety2012>.
- [10] A. Golenko (25 March 2015). Fundamentals of Machine Design [Online]. Available: <http://www.dbc.wroc.pl/Content/7154/Golenko.Fundamentals%20of%20Machine%20Design.pdf>
- [11] R. G. Budynas and J. K. Nisbett, *Shigley's Mechanical Engineering Design*, New York, McGraw Hill, 2014.
- [12] Cad cam Engineering WorldWide (5 May 2015) Jdpaint software Portable [Online]. Available: <http://www.cadcamengineering.net/jdpaint-software-portable/>
- [13] C. A. Kardous and P. B. Shaw, “Evaluation of smartphone sound measurement applications”, J. Acoust Soc Am., vol. 135, no. 4, pp. 186-192, 2014.
- [14] K. Waiyagan and E. L. J. Bohez, “Intelligent feature based process planning for five-axis mill-turn parts”, Comput. Indus., vol. 60, no. 5, pp. 296-316, 2009.

**การพัฒนาเครื่องฟักไข่สำหรับการตรวจหาตัวอ่อนในไข่ไก่
โดยใช้เทคนิคการประมวลผลภาพดิจิทัล**
**Development of Egg Incubator for Detecting Embryos in Chicken Eggs
Using Digital Image Processing Techniques**

วิสิทธิ์ ลุ่มชนะนาว^{1*} ณัฐวุฒิ พจนปริญญ²

¹สาขาวิชาเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์

²สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์

Wisit Lumchanao^{1*} Nuttawut Potprarinaya²

¹Department of Electronics Technology, Faculty of Industrial Technology,
Buriram Rajabhat University

²Department of Electrical Engineering Technology, Faculty of Industrial Technology,
Buriram Rajabhat University

*Corresponding author: E-mail: wisit.lc@bru.ac.th

บทคัดย่อ

การพัฒนานวัตกรรมเครื่องฟักไข่ในปัจจุบันยังขาดประสิทธิภาพในการตรวจหาตัวอ่อนภายในไข่ไก่ เพื่อคัดแยกไข่ที่ไม่มีเชื้อตัวอ่อนในไข่ออกจากตัวเครื่องฟักไข่หลังจากการฟักไข่นานมาแล้วในช่วง 1-9 วัน เพื่อลดปัญหาการเกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H₂S) ของไข่ฟองอื่น ๆ ที่อยู่ในเครื่องฟักไข่ในช่วงระยะเวลาการฟักไข่ จำนวน 18 วัน การวิจัยในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ 1) เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องฟักไข่สำหรับการตรวจหาตัวอ่อนในไข่ไก่โดยใช้เทคนิคการประมวลผลภาพดิจิทัล และ 2) เพื่อหาประสิทธิภาพการฟักไข่จากเครื่องมือที่สร้างขึ้น เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ ชุดเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นระบบควบคุมการกลับไข่โดยใช้มอเตอร์เกียร์และชุดกล้องจับภาพนิ่ง ผลการวิจัย พบว่า การประมวลผลภาพดิจิทัลข้อมูลภาพระดับสีเทาจะแสดงผลในกรณีที่มีเชื้อตัวอ่อนภายในไข่ และข้อมูลภาพระดับสีดำนจะแสดงผลในกรณีไม่มีเชื้อตัวอ่อนภายในไข่อยู่ในช่วงระยะเวลาการฟักไข่ 9-18 วัน ผลการทดลองระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้น พบว่า ระบบสามารถปรับค่าอุณหภูมิด้วยระบบอัตโนมัติ ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 34-37.8 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์มีค่าอยู่ในช่วง 65-69 เปอร์เซ็นต์ และผลการทดลองหาประสิทธิภาพการฟักไข่จำนวน 48 ฟอง พบว่า มีค่าเฉลี่ยไข่ที่อุดมสมบูรณ์ 45 ฟอง ไข่ที่ไม่อุดมสมบูรณ์ 3 ฟอง ไข่ที่มีรอยแตกร้าว 0 ฟอง ไข่เน่าเสีย 0 ฟอง และอัตราการฟัก 93.75 เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ: เครื่องฟักไข่ ระบบควบคุมอัตโนมัติ ระบบการประมวลผลภาพดิจิทัล

ABSTRACT

The development of the innovation of egg incubator at the present still lacks effectiveness in detecting embryos inside eggs for separating the eggs without embryos from the incubator after the incubation period of 1 to 9 days and for reducing the problem of hydrogen sulfide (H₂S) from the other eggs inside the incubator in their incubation period of 18 days. The objectives of this research were: 1) to design and construct the egg incubator for detecting embryos in chicken eggs by using digital image processing techniques and 2) to find the effectiveness of the constructed incubator. The research tools were: a temperature and humidity sensor set, an egg turning control system using an electric gear motor, and a still image camera set. The research results showed that the digital image processing system displayed in white color when detecting the eggs without embryos and it displayed in black color when detecting the eggs with embryos during the incubation period of 9 to 18 days. The results

from the experiment on the temperature and humidity control system revealed that the temperature value of the system could be adjusted by its automatic system with a value in the range of 34°C-37.8°C and the humidity value with the range 65 to 69%. And the results gained from the experiment on the effectiveness of egg hatching of 48 eggs showed that on average, 45 fertile eggs, 3 infertile eggs, 0 cracked egg, 0 rotten egg, and 93.75% of hatchability rate were found.

Keyword: Egg incubator, automatic control system, digital image processing system.

1. บทนำ

ในปัจจุบันการเพาะเลี้ยงไก่เป็นอีกอาชีพหนึ่งของคนไทยที่นิยมเพาะเลี้ยงกันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ ไก่ประดู่หางดำเชียงใหม่ ไก่เหลืองหางขาวบินทร์ ไก่แดงสุราษฎร์ ไก่ชน และไก่ชิวาพระ ล้วนแล้วแต่เป็นสัตว์เศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทยในการสร้างมูลค่าของการส่งออกในแต่ละปี [1-2] ซึ่งลักษณะการเพาะเลี้ยงไก่โดยทั่วไปแล้วเป็นวิธีการเพาะเลี้ยงในรูปแบบภูมิปัญญาชาวบ้านโดยการปล่อยให้มีการฟักไข่ตามธรรมชาติ หรือการใส่ภาชนะห่อหุ้มไข่ไก่ในการฟักจากการศึกษาประสิทธิภาพการฟักไข่ตามธรรมชาติ พบว่า มีผลกระทบต่อผลการเพาะพันธุ์ไก่ของกลุ่มเกษตรกรผู้เลี้ยงไก่เนื่องจากสภาพแวดล้อม อุณหภูมิ หรือในกรณีแม่ไก่เหยียบลูกตาย ซึ่งจะมีผลกระทบต่อผลการเพาะพันธุ์ไก่โดยตามธรรมชาติของการฟักไข่นั้นอัตราการรอดตายของลูกไก่ คิดเป็นร้อยละ 80 เปอร์เซนต์ [3] กระบวนการเพิ่มประสิทธิภาพการเพาะพันธุ์ไก่และการเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันทางด้านเศรษฐกิจ ซึ่งในปัจจุบันได้มีผลงานวิจัยหรือผู้พัฒนาคิดค้นเครื่องฟักไข่แบบไม่ต้องอาศัยแม่ไก่ในการฟัก โดยอาศัยเทคโนโลยีมาใช้ในการควบคุมการทำงานภายในเครื่องฟักไข่ให้มีประสิทธิภาพ ซึ่งจะประกอบไปด้วยระบบถ่ายเทอุณหภูมิความร้อนโดยใช้แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric) [4], หลอดไฟ (Light bulb) และฮีตเตอร์ (Heater) [1] ในการสร้างอุณหภูมิความร้อนภายในเครื่องฟักไข่ ระบบความชื้นโดยใช้ชุดหัวพ่นหมอกมาใช้ในการรักษาระดับความชื้นหรือใช้ถาดรองน้ำเพื่อทำหน้าที่ระเหยน้ำทิ้งด้วยอัตโนมัติ ระบบควบคุมการกลับไข่ ถ้าหากไม่มีระบบกลับไข่จะทำให้ไข่ฟักไม่ออก และระบบระบายอากาศภายในเครื่องฟักไข่ให้มีค่าที่เหมาะสม

จากการศึกษาข้อมูลผลงานวิจัยดังกล่าว พบว่า กระบวนการเพาะพันธุ์ไก่ในการนำเทคโนโลยีต่าง ๆ มาพัฒนานวัตกรรมเครื่องฟักไข่ยังขาดประสิทธิภาพในการวิเคราะห์หรือการตรวจหาตัวอ่อนภายในไข่ไก่ ซึ่งกระบวนการฟักไข่นั้น จะประกอบไปด้วยกระบวนการตรวจหาตัวอ่อนภายในไข่ไก่ หลังจากการฟักไข่ผ่าน

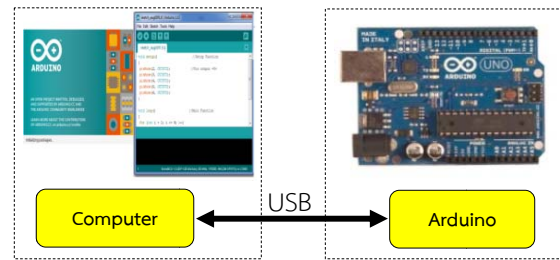
มาแล้วในช่วง 1-9 วัน ของจำนวนการฟักไข่ทั้งหมด 18 วันเพื่อทำการคัดแยกไข่ไก่ที่ไม่มีเชื้อตัวอ่อนออกจากตัวเครื่องฟักไข่เพื่อลดปัญหาของการเกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์หรือเรียกว่าก๊าซไข่เน่าซึ่งเกิดจากไข่ที่ไม่มีน้ำเชื้อทำให้ไม่มีการเจริญเติบโตของตัวอ่อน โดยทั่วไปกลุ่มเกษตรกรผู้เพาะเลี้ยงไก่ใช้วิธีการตรวจหาตัวอ่อนโดยการนำไข่ไก่แต่ละฟองออกจากตัวเครื่องฟักไข่ เพื่อทำการส่องหาเชื้อตัวอ่อนผ่านแสงไฟ ซึ่งจะทำให้ใช้ระยะเวลาในการตรวจหาตัวอ่อน โดยทั่วไปเครื่องฟักไข่ที่มีการจัดจำหน่ายตามท้องตลาดในปัจจุบันยังขาดประสิทธิภาพในการตรวจหาตัวอ่อน

จากผลการสำรวจและปัญหาที่ได้กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยได้มีแนวความคิดและมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องฟักไข่สำหรับการตรวจหาตัวอ่อนในไข่ไก่ โดยใช้เทคนิคการประมวลผลภาพดิจิทัลและเพื่อหาประสิทธิภาพการฟักไข่จากเครื่องมือที่สร้างขึ้น โดยเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยจะประกอบไปด้วยระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้น ระบบควบคุมการกลับไข่ระบบควบคุมการขับเคลื่อนชุดกลิ้งจับภาพนิ่ง และชุดแสดงผลข้อมูล ซึ่งผลประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับในบทความวิจัยนี้จะสามารถคัดแยกไข่ที่ไม่มีเชื้อตัวอ่อนในไข่ออกจากเครื่องฟักไข่ได้สะดวกรวดเร็วมากยิ่งขึ้น ลดปัญหาการเกิดรอยแตกร้าวของไข่ ลดการเกิดก๊าซไข่เน่า

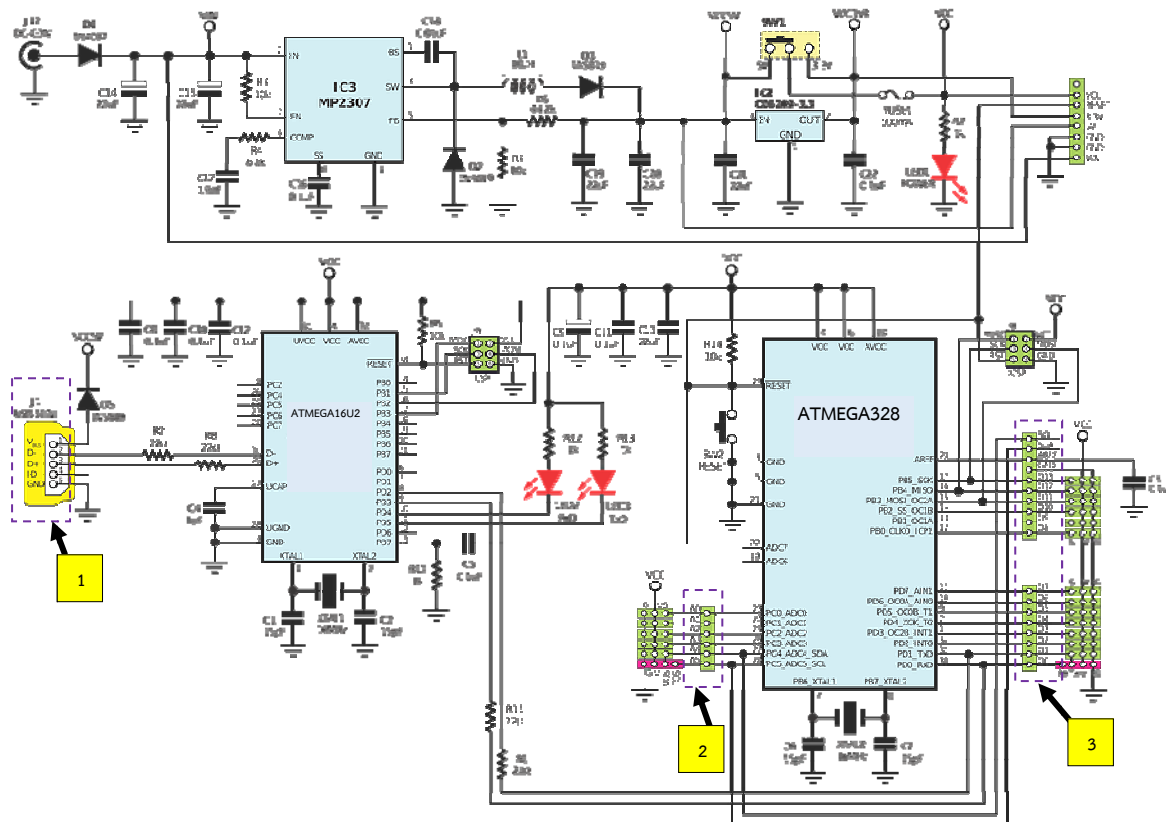
2. วัสดุอุปกรณ์ในการวิจัยและวิธีการ

2.1 ระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) เป็นอุปกรณ์สำหรับการประมวลผลข้อมูลในระบบควบคุมขนาดเล็กซึ่งบรรจุความสามารถที่คล้ายคลึงกับระบบคอมพิวเตอร์ โครงสร้างภายในจะประกอบไปด้วยซีพียู CPU [5] หน่วยความจำ พอร์ตสำหรับการเชื่อมต่อใช้งาน ดังนั้น ไมโครคอนโทรลเลอร์จึงเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบควบคุม ซึ่งสามารถเขียนโปรแกรมเพื่อกำหนดรูปแบบการควบคุมได้อย่างเป็นอิสระ ในบทความวิจัยนี้ได้เลือกใช้ระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR บอร์ด“อาดูโน” (Arduino Uno) [6] เป็นระบบ Open Source ที่เหมาะสม

สำหรับการนำมาใช้งานในระบบควบคุมอุณหภูมิ ของการถ่ายเทความร้อน การควบคุมความชื้น เป็นต้น สามารถแสดงวิธีการเชื่อมต่อระหว่างบอร์ด Arduino Uno กับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Computer Program) ดังรูปที่ 1 และสามารถแสดงลักษณะการเชื่อมต่อวงจรอิเล็กทรอนิกส์บนบอร์ด Arduino Uno ในการนำไปเชื่อมต่อใช้งานผ่านพอร์ตอินพุต (Input) และเอาต์พุต (Output) ดังรูปที่ 2



รูปที่ 1 การเชื่อมต่อ Arduino Uno กับ Computer



รูปที่ 2 Arduino Uno Board [7], (1) USB connector, (2) Analog Inputs, (3) Digital I/O port

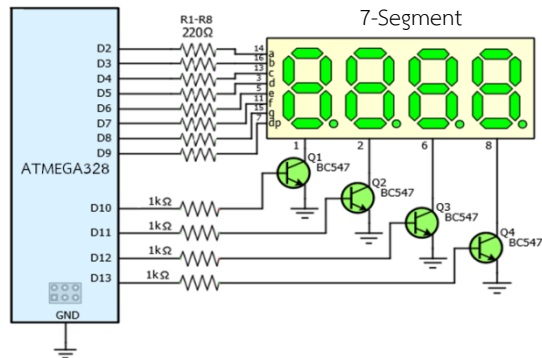
จากรูปที่ 2 เป็นระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งจะประกอบไปด้วย 1) ATmega328 เป็น MCU ที่ใช้บนบอร์ด Arduino Uno 2) ATmega16U2 ทำหน้าที่เชื่อมต่อ ATmega328 กับ Computer ผ่าน USB to Serial 3) I/O Port ได้แก่ Digital I/O ตั้งแต่ขา D0-D13 และช่องรับสัญญาณ Analog ตั้งแต่ขา A0-A5 และ 4) Power Port ใช้สำหรับเป็นไฟเลี้ยงของบอร์ดวงจรภายนอกมีค่าแรงดันไฟฟ้า 3.3 โวลต์ และ 5 โวลต์

2.2 ฮีตเตอร์เป็นอุปกรณ์เปลี่ยนจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน ซึ่งผู้วิจัยได้นำอุปกรณ์ฮีตเตอร์มาใช้ใน

การวิจัยเพื่อให้ความร้อนหรือการสร้างอุณหภูมิความร้อนภายในเครื่องฟักไข่ โดยมีหลักการทำงานเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดตัวนำที่มีค่าความต้านทานจะทำให้ลวดตัวนำร้อนและถ่ายเทความร้อนให้กับโหลด ซึ่งจะกล่าวได้ว่าลวดตัวนำความร้อนจะต้องมีคุณสมบัติที่ทนความร้อนได้ดีแต่จะมีค่าความนำทางไฟฟ้าต่ำ [1]

2.3 เซนเซอร์วัดอุณหภูมิความร้อนและความชื้น เป็นอุปกรณ์ทำหน้าที่ตรวจจับอุณหภูมิและความชื้นภายในตัวเครื่องฟักไข่ในบทความวิจัยนี้ได้นำมาควบคุมอุณหภูมิความร้อนให้มีค่าที่เหมาะสมเพื่อทำให้เชื้อตัวอ่อนภายใน

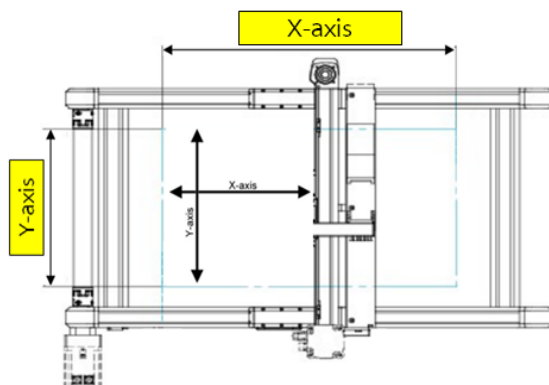
ใช้ก็สามารถเจริญเติบโตเป็นลูกไก่ได้ โดยจะแสดงผลค่าอุณหภูมิและค่าความชื้นผ่านจอ (7-Segment Display) ด้วยตัวเลขดิจิทัล (Digital) และจะแสดงวิธีการต่อวงจรใช้งาน 7-Segment (4-digit) ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 การเชื่อมต่อ Arduino Uno กับ 7-Segment [8]

จากรูปที่ 3 เป็นการเชื่อมต่ออุปกรณ์ในการควบคุมการแสดงผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยใช้ทรานซิสเตอร์ Q1, Q2, Q3 และ Q4 ทำหน้าที่ขยายกระแสไฟฟ้าให้กับ 7-Segment ในแต่ละตัวซึ่งจะเห็นได้ว่า 7-Segment แต่ละตัวจะต่อลงกราวด์ผ่านทรานซิสเตอร์โดยถ้าหากต้องการให้แต่ละ Digit ทำงานจะทำการส่งสัญญาณเพื่อมาควบคุม Digit ที่ต้องการให้แสดงผลข้อมูลเป็น “ON”

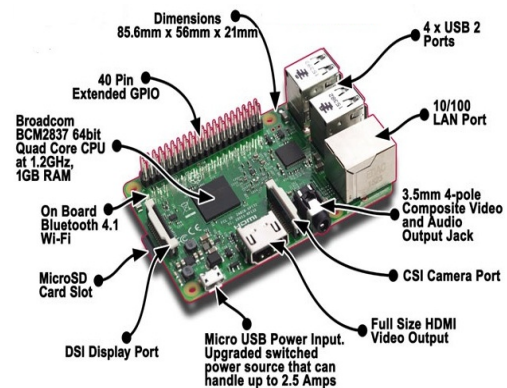
2.4 ระบบการเคลื่อนที่เชิงเส้นตรงสำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวแกน X และแกน Y [9] เพื่อทำการขับเคลื่อนที่กล้องถ่ายภาพในการเก็บข้อมูลภาพไข้ไก่เพื่อนำไปวิเคราะห์ตรวจหาเชื้อตัวอ่อนดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 โครงสร้างการขับเคลื่อน XY-axis [10]

2.5 ระบบการประมวลผลภาพดิจิทัล ผู้วิจัยได้เลือกใช้อุปกรณ์บอร์ด Raspberry Pi 3B เนื่องจากมีขนาดความเร็วที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานการประมวลผลภาพ

ดิจิทัล โดยมีขนาดของซีพียู (CPU) Broadcom BCM2837 64bit, Quad-Core ความเร็วขนาด 1.2GHz, หน่วยความจำ RAM ขนาด 1GB พร้อมด้วย Wi-Fi 802.11b/g/n, Bluetooth4.1, USB, Ethernet RJ-45 10/100Mbps, HDMI, CSI Camera, DSI Display และ Micro SD Card Slot [11-13] ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 Raspberry Pi board [13-14]

2.6 การเชื่อมต่อโมดูลกล้อง (Raspberry Pi Camera Module) เข้ากับบอร์ด Raspberry Pi โดยมีคุณสมบัติหรือขนาดความละเอียด 5 ล้านพิกเซล ถ่ายวิดีโอระดับ HD ที่ความละเอียด 1080p, 720p และอัตราแสดงผล 30 (1080p), 60 (720p) และ 90 (640x480) เฟรมต่อวินาที แสดงลักษณะการเชื่อมต่อดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 Raspberry Pi camera board [13]

2.7 จอแสดงผล Touch Screen LCD Display ใช้สำหรับแสดงผลภาพการตรวจหาเชื้อตัวอ่อนภายในไข่ไก่ โดยเชื่อมต่อเข้ากับบอร์ด Raspberry Pi ผ่านพอร์ต HDMI และ USB ซึ่งมีขนาดหน้าจอ 7 นิ้วความละเอียดของหน้าจอ 1024x600

2.8 วิธีการออกแบบทางวิศวกรรม (Engineering Design) เป็นกระบวนการที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานด้วยการใช้หลักการทางวิทยาศาสตร์และการปฏิบัติงานด้านวิศวกรรมศาสตร์ เพื่อพัฒนานวัตกรรมใหม่ ๆ ที่สามารถแก้ไขปัญหาทางด้านการผลิตให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น [15],[16] โดยกระบวนการออกแบบทางวิศวกรรมที่มีระบบหรือขั้นตอนการออกแบบสามารถแบ่งออกเป็น 4 แบบ [15],[17] ซึ่งในบทความวิจัยนี้ได้นำวิธีการออกแบบทางวิศวกรรมมาเป็นแนวปฏิบัติงานด้านวิศวกรรมศาสตร์ตามขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 วิเคราะห์ความต้องการ (Task clarification) เป็นการศึกษาความเข้าใจเกี่ยวกับปัญหาเพื่อนำไปวิเคราะห์ออกแบบและสร้างเครื่องมือให้สอดคล้องและเพิ่มประสิทธิภาพการเพาะพันธุ์ไก่มากขึ้น

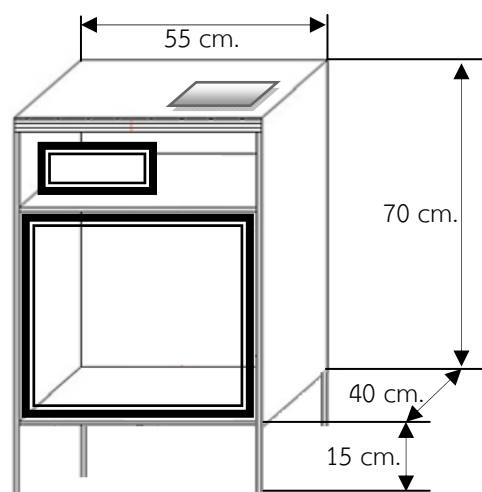
ขั้นตอนที่ 2 แนวความคิดในการออกแบบ (Conceptual design) เป็นการวิเคราะห์โครงสร้างของเครื่องมือตามที่ต้องการออกแบบ เช่น ระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นเทคนิคการประมวลผลภาพดิจิทัลระบบโครงสร้างหรือโมเดลด้วยการร่างแบบ เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 3 กระบวนการขึ้นรูปทรงหรือรูปร่าง (Embodiment design) เป็นการดำเนินการลงรายละเอียดในการออกแบบในแต่ละส่วนของเครื่องมือ

ขั้นตอนที่ 4 การออกแบบตามรายละเอียด (Detail design) เป็นขั้นตอนการสร้างเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยเพื่อนำไปสู่กระบวนการผลิตหรือนำไปสู่กระบวนการวิจัยในการฟักไข่

จากวิธีการออกแบบทางวิศวกรรมซึ่งเป็นลำดับขั้นตอนการดำเนินการวิจัย ในบทความนี้ได้นำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบและสร้างเครื่องฟักไข่ สามารถอธิบายหลักการออกแบบระบบควบคุมการหมุนเวียนของอากาศภายในตัวเครื่องได้ว่าปริมาณของอากาศที่เปลี่ยนแปลงภายในเครื่องจะถูกควบคุมด้วยระบบการถ่ายเทความร้อนและขนาดของพัดลมระบายอากาศภายในเครื่อง ซึ่งในระยะแรกของการฟักไข่การเปลี่ยนแปลงก๊าซเกิดขึ้นน้อยเมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงระยะที่มีการเจริญเติบโตของลูกไก่จะมีค่ามากขึ้น สามารถสรุปได้ว่าในจำนวนไข่ 100 ฟอง ต้องการออกซิเจนประมาณ 4.5 ลูกบาศก์ฟุต/วันและปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาประมาณ 2.5 ลูกบาศก์ฟุต/วัน [18] และด้านวัสดุโดยใช้แผ่นอะคริลิก (Acrylic) มาเป็นส่วนประกอบในการสร้างเครื่องมือ ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นพลาสติกที่มีความทนทานง่ายต่อการเคลื่อนที่ และได้รับความนิยมในการนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลายซึ่งเหมาะสำหรับการนำมาประยุกต์ใช้

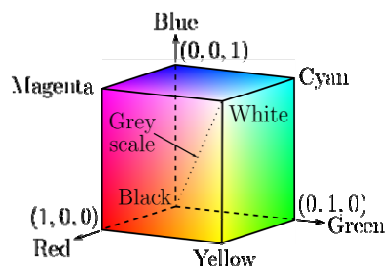
งานในการวิจัยครั้งนี้ สามารถแสดงโครงสร้างของเครื่องมือ ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 โครงสร้างเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

2.9 เทคนิควิธีการประมวลผลภาพดิจิทัล (Digital Image Processing techniques) เป็นเทคนิคที่ใช้การประมวลผลภาพที่อยู่ในรูปแบบสัญญาณภาพดิจิทัลซึ่งจะครอบคลุมถึงสัญญาณวิดีโอ (video) หรือภาพเคลื่อนไหว โดยจะอยู่ในรูปแบบชุดภาพนิ่ง เรียกว่า เฟรม (frame) หลายๆภาพต่อกันไปในแต่ละช่วงเวลาโดยจะเก็บอยู่ในรูปเมทริกซ์ (Matrix) 3 มิติ เช่น ภาพ 3 มิติ ด้านการแพทย์ ด้านการจราจร ด้านหุ่นยนต์กู้ภัย ด้านการเกษตร และภาพหลายชนิด (multimodal image) ในบทความวิจัยนี้ใช้เทคนิควิธีการประมวลผลภาพสำหรับการตรวจหาตัวอ่อนภายในไข่ไก่ โดยมีทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

1) การแปลงภาพสีให้เป็นภาพระดับสีเทา (RGB to Gray) เป็นฟังก์ชันที่ใช้สำหรับแปลงค่าภาพสีของตัวอ่อนภายในไข่ไก่ ซึ่งในขั้นตอนแรกจะอยู่ในระบบปริภูมิสีแบบ RGB ในแต่ละพิกเซล (Pixel) ของภาพสีและจะแสดงถึงค่า RGB โดยใช้ฟังก์ชันการแปลงให้เป็นภาพระดับสีเทา (Grayscale) เพื่อจะทำให้ระบบสามารถวิเคราะห์ภาพสีได้ง่ายมากยิ่งขึ้น เนื่องจากภาพระดับสีเทาสถาปัตยกรรมวิเคราะห์ค่าความเข้มของสีที่มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 255 โดยภาพระดับสีเทาทั้งหมดจะขึ้นอยู่กับจำนวนบิต เช่น ภาพระดับสีเทามีจำนวน 8 บิต จะมีระดับสีทั้งหมดจำนวน 256 ระดับ ในระบบการประมวลผลภาพจะระบุค่าอยู่ในช่วง [0, 1] หรือ 0-255 [19] จะแสดงพื้นฐานของสีตามลักษณะของลูกบาศก์ ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 โมเดลสีแบบ RGB [19]

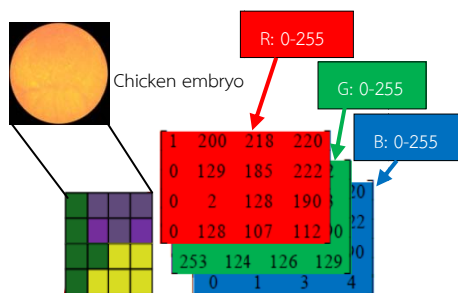
จากรูปที่ 8 กระบวนการแปลงภาพสีให้เป็นภาพระดับสีเทาสามารถพิจารณาขั้นตอนแรกจากการวิเคราะห์ในปริภูมิสีแบบ RGB [20] ได้จากสมการดังนี้

$$I_1(x, y) = \begin{pmatrix} I_R(x, y) \\ I_G(x, y) \\ I_B(x, y) \end{pmatrix} \quad (1)$$

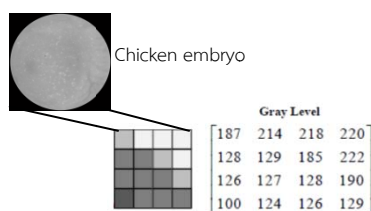
จากสมการที่ (1) $I_1(x, y)$ เป็นการประมวลผลภาพแบบเวกเตอร์ (Vector) ในการอ่านค่าสีแต่ละพิกเซลที่ตำแหน่ง (x, y) ในภาพสี I_1 และสามารถรวมสามเวกเตอร์เข้ากับเมทริกซ์ m [20] ได้จากสมการดังนี้

$$M = (I_1(X_R, Y_R), I_1(X_G, Y_G), I_1(X_B, Y_B)) \quad (2)$$

ในกระบวนการแปลงภาพสีให้เป็นภาพระดับสีเทาสามารถแสดงลักษณะแปลงค่าภาพสีและภาพระดับสีเทาดังรูปที่ 9



(ก) ภาพสี (RGB)



(ข) ภาพระดับสีเทา (Grayscale)



(ค) การไล่ระดับความเข้มของภาพระดับสีเทา

รูปที่ 9 ลักษณะแปลงค่าภาพสีและภาพระดับสีเทา [21]

จากรูปที่ 9 (ก) แสดงถึงค่า R แทนระดับสีแดงของจุดพิกเซลที่ต้องการหา G แทนระดับสีเขียวของจุดพิกเซลที่ต้องการหาและ B แทนระดับสีน้ำเงินของจุดพิกเซลที่ต้องการหา (ข) เป็นภาพระดับสีเทา จำนวน 8 บิต อยู่ในช่วง 0-255 และ (ค) แสดงการไล่ระดับความเข้มของภาพระดับสีเทาซึ่งอยู่ระหว่างสีขาวและสีดำอย่างต่อเนื่องกัน ของการแปลงภาพสี (RGB) ให้เป็นภาพระดับสีเทา (Grayscale) [19] สามารถวิเคราะห์ตามสมการดังนี้

$$Y = 0.299 * R + 0.587 * G + 0.114 * B \quad (3)$$

เมื่อ Y คือ ค่าระดับสีเทาของจุดพิกเซลที่ต้องการหา

จากสมการที่ (1) - (3) เป็นฟังก์ชันที่ใช้สำหรับแปลงค่าจากข้อมูลภาพสีของตัวอ่อนภายในไข่ไก่เป็นภาพระดับสีเทา จากกระบวนการดังกล่าวสามารถนำมาวิเคราะห์ในการตรวจหาตัวอ่อนในไข่โดยการปรับภาพให้เหลือเฉพาะสีขาวและสีดำด้วยฟังก์ชันเทรชโฮลด์ (Threshold)

2) ฟังก์ชันเทรชโฮลด์ (Threshold) เป็นฟังก์ชันที่ใช้สำหรับแยกบริเวณของข้อมูลภาพซึ่งจะใช้ข้อมูลภาพในระดับสีเทา (Grayscale) เพื่อทำการแปลงให้อยู่ในรูปแบบไบนารี (Binary) โดยเลือกใช้วิธีการของ Otsu's algorithm [22] ในการแปลงความเข้มของภาพระดับสีเทาเป็นภาพไบนารีโดยใช้เกณฑ์ระดับค่าเทรชโฮลด์ [23],[24] สามารถวิเคราะห์ได้จากสมการดังนี้

$$g(x, y) = 1 \text{ if } f(x, y) \geq \text{Threshold value} \quad (4)$$

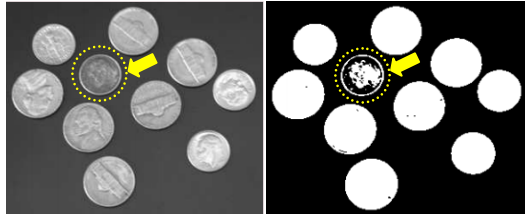
$$g(x, y) = 0 \text{ otherwise}$$

เมื่อ $f(x, y)$ คือ ตำแหน่งพิกเซลของภาพต้นฉบับ

$g(x, y)$ คือ ตำแหน่งพิกเซลของภาพผลลัพธ์

จากสมการที่ (4) ถ้าหากจุดพิกเซลใดมีค่าความเข้มระดับสีเทาดำกว่าค่าเทรชโฮลด์จะมีค่าเป็น 0 ในภาพ

Binary และจุดพิกเซลใดที่มีค่าความเข้มสีเทามากกว่าค่า
เทรชโฮลด์จะมีค่าเป็น 1 ในภาพ Binary สามารถทดลอง
ค่าเทรชโฮลด์ดังรูปที่ 10

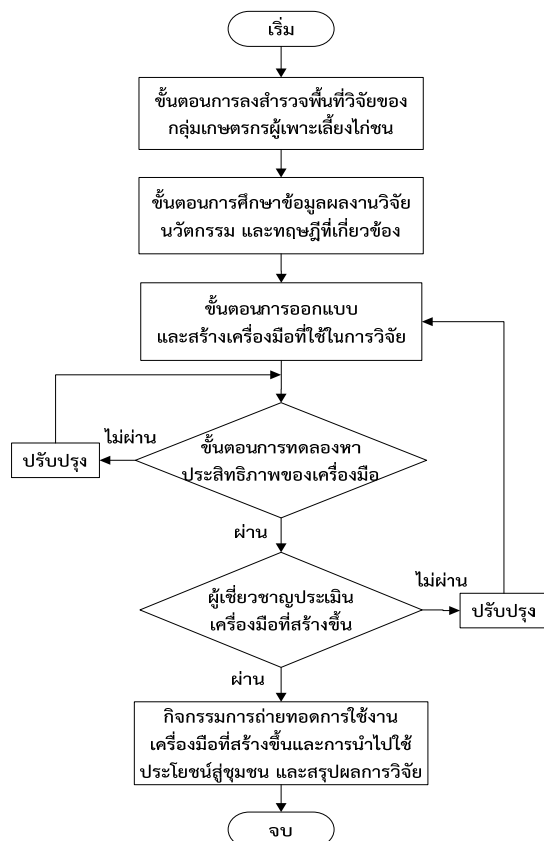


รูปที่ 10 การทดลองค่าเทรชโฮลด์ [23]

จากรูปที่ 10 เป็นการทดลองค่าเทรชโฮลด์โดยใช้ภาพ
เหรียญที่มีจุดดำและเหรียญปกติ จะเห็นได้ว่าการปรับ
ค่าเทรชโฮลด์ของภาพให้เหลือเฉพาะสีขาวและสีดำ ซึ่งจะ
สามารถนำไปใช้งานในการตรวจหาตัวอ่อนในไข่ได้อย่างมี
ประสิทธิภาพ

3. ระเบียบวิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย ผู้วิจัยได้ดำเนินการ
ตามวัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย โดยมีระเบียบวิธีการ
วิจัยตามแผนการวิจัยดังรูปที่ 11

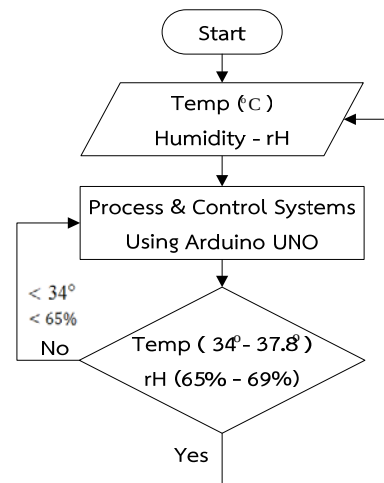


รูปที่ 11 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

จากรูปที่ 11 แสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย โดย
สามารถแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนหลัก ดังนี้ 1) ขั้นตอนการ
ลงสำรวจพื้นที่วิจัยโดยการจัดชุมชนหรือเกี่ยวกับปัญหา
ของการเพาะพันธุ์ไก่ชน ณ บ้านโคกยาง ตำบลโคกยาง
อำเภอประโคนชัย จังหวัดบุรีรัมย์ และ 2) ขั้นตอนการวาง
แผนการดำเนินงานวิจัยในการออกแบบและสร้าง
เครื่องมือ กระบวนการทดลองหาประสิทธิภาพของ
เครื่องมือที่สร้างขึ้น กระบวนการตรวจประเมินเครื่องมือ
โดยผู้เชี่ยวชาญกระบวนการถ่ายทอดการใช้งานเครื่องมือ
ที่สร้างขึ้นและการนำไปใช้ประโยชน์

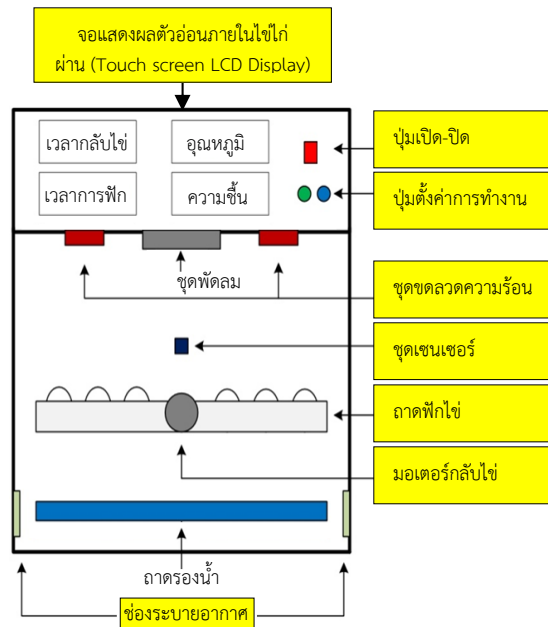
3.2 ระเบียบวิธีการออกแบบและสร้างทางวิศวกรรม
(Engineering Design) ด้านเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยครั้ง
นี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research)
ผู้วิจัยได้ดำเนินการศึกษาข้อมูล ทฤษฎี ผลงานวิจัยที่
เกี่ยวข้อง เพื่อนำมาพัฒนานวัตกรรมสร้างเครื่องฟักไข่
สำหรับการตรวจหาตัวอ่อนในไข่โดยใช้เทคนิคการ
ประมวลผลภาพดิจิทัลดังนี้

1) การออกแบบและสร้างเครื่องมือจะประกอบไป
ด้วย ระบบการถ่ายเทอุณหภูมิความร้อนโดยใช้ขดลวด ชุด
พัดลมไหลเวียนอากาศเพื่อรักษาความชื้นสัมพัทธ์ภายใน
เครื่องฟักไข่ ถาดฟักไข่มีขนาดบรรจุไข่สำหรับ 48 ฟอง
ระบบการกลับไข่แบบอัตโนมัติโดยใช้มอเตอร์เกียร์ดีซี
(DC) ลักษณะการกลับไข่ที่เหมาะสม มีค่ามุมเท่ากับ 45
องศาจากแนวดิ่งกลับไปมาการใช้มุมกลับไข่ในระดับอื่นจะ
มีผลทำให้การฟักตัวอ่อนนั้นออกลดลง [18] และชุด
เซนเซอร์วัดค่าอุณหภูมิและค่าความชื้นสัมพัทธ์เพื่อ
ควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 34-37.8 องศาเซลเซียส (°C)
และความชื้นสัมพัทธ์สำหรับการฟักไข่ อยู่ในช่วง 65-69%
สามารถพิจารณาขั้นตอนการทำงานของระบบควบคุม
อุณหภูมิและความชื้น ดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 ขั้นตอนการควบคุมอุณหภูมิและความชื้น

จากรูปที่ 12 ขั้นตอนการทำงานของระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้น รวมถึงการแสดงผลค่าอุณหภูมิและค่าความชื้นและแสดงระยะเวลาในการฟักไข่ โดยใช้บอร์ด Arduino Uno ในการควบคุมการทำงานของระบบ ซึ่งสามารถแสดงโครงสร้างเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย ดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 โครงสร้างเครื่องฟักไข่

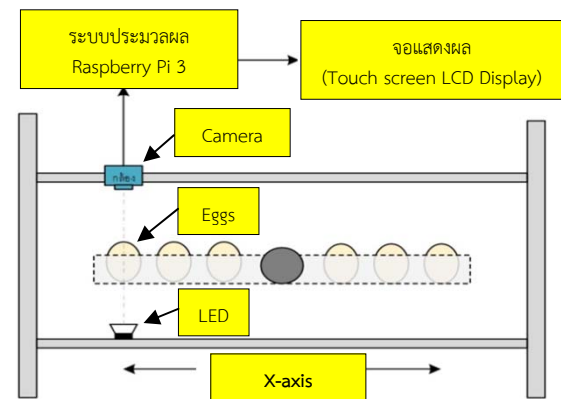
จากรูปที่ 13 ลักษณะโครงสร้างของเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยโดยมีหลักการการทำงานของระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ให้เหมาะสมต่อการฟักไข่ ในการตรวจวัดค่าความชื้น (Humidity) เป็นการตรวจวัดค่าปริมาณไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาซึ่งจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของเครื่องมือที่สร้างขึ้น ซึ่งสามารถวิเคราะห์ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity) ได้จากอัตราส่วนของปริมาณไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศกับปริมาณไอน้ำที่จะทำให้อากาศอิ่มตัวหรืออัตราส่วนของความดันไอน้ำกับความดันไอน้ำอิ่มตัวซึ่งค่าความชื้นสัมพัทธ์คิดเป็นร้อยละ (%) [26-27] สามารถวิเคราะห์ได้จากสมการดังนี้

$$RH = \frac{V_a}{V_f} \times 100 \quad (5)$$

$$RH = \frac{P_a}{P_f} \times 100 \quad (6)$$

เมื่อ RH คือ ความชื้นสัมพัทธ์
 V_a คือ ปริมาณไอน้ำที่อยู่ในอากาศ
 V_f คือ ปริมาณไอน้ำที่ทำให้อากาศอิ่มตัว
 P_a คือ ความดันไอน้ำที่อยู่ในอากาศ
 P_f คือ ความดันไอน้ำที่ทำให้อากาศอิ่มตัว

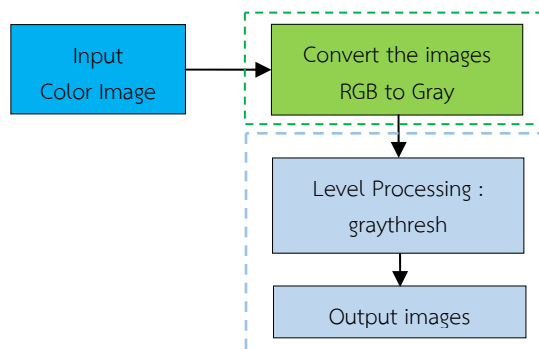
2) การออกแบบระบบการขับเคลื่อนในแนวแกน X และแกน Y ด้วย stepper motors โดยเคลื่อนที่ตามพิกัดที่กำหนดไว้ในแต่ละตำแหน่ง ซึ่งกระบวนการขับเคลื่อนจะถูกควบคุมการทำงานด้วยบอร์ด Arduino Uno โดยทำการเคลื่อนที่เพื่อถ่ายภาพหรือการเก็บข้อมูลภาพนิ่งจนครบตามจำนวนไข่ไก่ทั้งหมด 48 ฟอง ที่บรรจุอยู่ภายในตัวเครื่องฟักไข่ และในกระบวนการเก็บข้อมูลภาพนิ่งสำหรับตรวจหาตัวอ่อนภายในไข่โดยใช้หลักการส่องไข่ด้วยการใช้หลอดแอลอีดี (LED) เพื่อทำการส่องแสงผ่านไข่ไก่ที่ต้องการเก็บข้อมูลภาพนิ่งเพื่อนำไปตรวจหาตัวอ่อนภายในไข่ด้วยกระบวนการประมวลผลภาพดิจิทัลด้วยระบบอัตโนมัติ ซึ่งจะถูกควบคุมการทำงานผ่านบอร์ด Raspberry Pi 3 [28] จะแสดงโครงสร้างการขับเคลื่อนดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 การออกแบบระบบการขับเคลื่อน XY-axis

3) เทคนิควิธีการประมวลผลสัญญาณภาพดิจิทัล (Image Processing) ในบทความวิจัยนี้ใช้ภาพนิ่งที่ได้จากกระบวนการถ่ายภาพนิ่งดังรูปที่ 14 ซึ่งจะอยู่ในรูปแบบภาพสี RGB [29] โดยใช้หลักการการแปลงภาพสีให้เป็นภาพระดับสีเทา (RGB to Gray) เป็นการแปลงค่าระดับสีเทา (Grayscale) ซึ่งในการทดลองจะหาค่า 0 หรือ 1 นั้นต้องมีการกำหนดค่าที่เรียกว่าเทรชโฮลด์ (Threshold) โดยค่าในระดับสีเทาจะแสดงถึงจำนวนบิตที่มีค่าของจำนวนพิกเซล (Pixel) มีค่าระดับความสว่างแบ่งออกเป็น 256 ระดับ ที่ใช้เลขฐานสองจำนวน 8 บิต [30]

ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 0-255 ข้อมูลภาพดิจิทัลระดับสีเทาเมื่อระดับสีเทามีค่าต่ำจะมีความสว่างน้อยจะมองเห็นเป็นสีดำ และค่าระดับสีเทามากจะมีค่าความสว่างมากจะมองเห็นเป็นสีขาว จากกระบวนการดังกล่าวในบทความวิจัยนี้ได้พัฒนาผ่านโปรแกรม Python กับ Opencv โดยใช้งานร่วมกับ Raspberry Pi3 ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ขั้นตอนการประมวลผลสัญญาณภาพดิจิทัลที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ดังรูปที่ 15

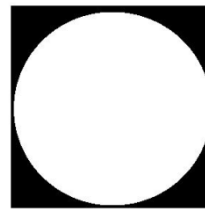


รูปที่ 15 ขั้นตอนการประมวลผลสัญญาณภาพดิจิทัล

ลักษณะของการหาจำนวนพิกเซล (Pixel) ของภาพในบริเวณเฟรมภาพถ่าย หากกำหนดให้ภาพดิจิทัลที่มีขนาดของภาพ 256x256 สามารถกำหนดเป็นฟังก์ชัน $f(x,y)$ โดยมีจุดภาพแสดงด้วยเมตริกซ์ของภาพ [30] จากสมการดังนี้

$$f(x,y) = \begin{bmatrix} f(1,1) & f(1,2) & f(1,3) & \dots & f(1,256) \\ f(2,1) & f(2,2) & f(2,3) & \dots & f(2,256) \\ f(3,1) & f(3,2) & f(3,3) & \dots & f(3,256) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ f(256,1) & f(256,2) & f(256,3) & \dots & f(256,256) \end{bmatrix} \quad (7)$$

จากสมการดังกล่าวสมาชิกของฟังก์ชัน $f(x,y)$ เป็นการกำหนดค่าความเข้ม (Intensity) ของจุดภาพตามตำแหน่ง (x,y) ของจุดต่าง ๆ [30] โดยจะแทนค่าระดับ 0 เป็นสีดำ (Binary Image = 0) และระดับ 255 เป็นสีขาว (Binary Image = 1) สามารถวิเคราะห์การนับจำนวนพิกเซลดังรูปที่ 16 (ก) เมื่อคำนวณตามรูปแบบเมตริกซ์จะได้ไบนารี “1” จำนวน 24 pixel ดังรูปที่ 16 (ข)



(ก) ข้อมูลภาพดิจิทัล

0	0	1	1	0	0
0	1	1	1	1	0
1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1
0	1	1	1	1	0
0	0	1	1	0	0

(ข) รูปแบบเมตริกซ์

รูปที่ 16 ตัวอย่างการวิเคราะห์รูปแบบเมตริกซ์

4) หลักการหาประสิทธิภาพการปักไข่จากเครื่องมือที่สร้างขึ้นในครั้งนี้ [25] ได้จากสมการดังนี้

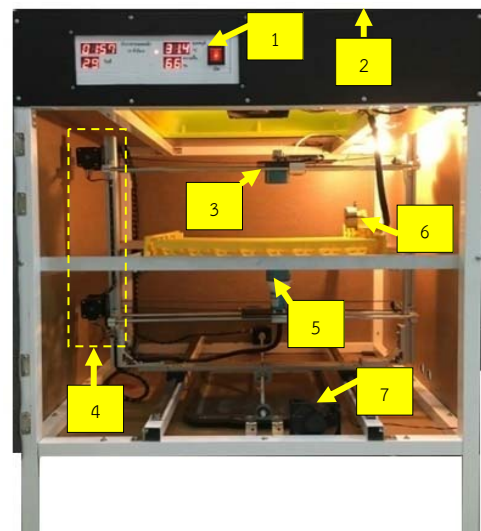
$$(\text{Hatchability : } H) = \left[\frac{N_{fe}}{N_{he}} \right] \times 100 \quad (8)$$

เมื่อ H คือ อัตราการปักไข่ (ร้อยละ)
 N_{fe} คือ จำนวนไข่ที่อุดมสมบูรณ์
 N_{he} คือ จำนวนไข่ที่ปักทั้งหมด

4. ผลการวิจัย

การทดลองและการวิเคราะห์ผลจากเครื่องมือที่สร้างขึ้นสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

4.1 ผลการออกแบบและสร้างเครื่องปักไข่สำหรับการตรวจหาตัวอ่อนในไข่ไก่จะแสดงดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 17 ผลการออกแบบและสร้างเครื่องปักไข่

(1) 7-Segment Display, (2) Touch screen LCD Display, (3) Camera board, (4) ชุดมอเตอร์การขับเคลื่อนแกน x-y, (5) LED, (6) ชุดมอเตอร์กลับไข่ และ (7) ถาดรองน้ำ

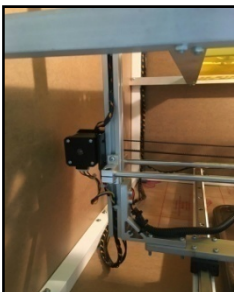


(ก) ลักษณะของตัวเครื่อง (ข) การเปิดใช้งานตัวเครื่อง

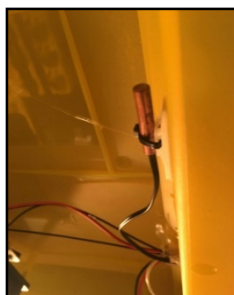
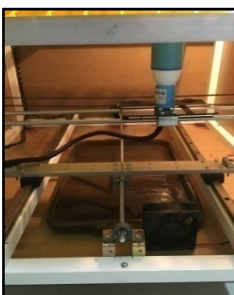
รูปที่ 18 ผลการออกแบบโครงสร้างภายนอกของเครื่อง



(ก) ชุดหลอดไฟในการส่องไข่ (ข) ชุดการประมวลผลภาพ



(ค) ชุดขับเคลื่อนแกน X-Y (ง) ชุดโมดูลกล้อง

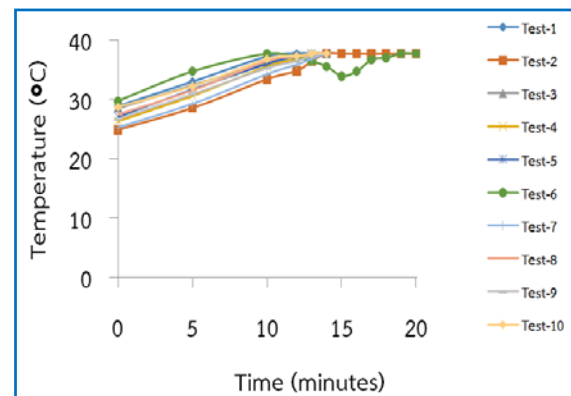


(จ) ชุดถาดรองน้ำ (ฉ) ชุดเซนเซอร์วัดความชื้น

รูปที่ 19 ผลการออกแบบโครงสร้างภายในเครื่องฟักไข่

4.2 ผลการหาประสิทธิภาพของเครื่องฟักไข่จากผลการดำเนินงานวิจัยการออกแบบและสร้างเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย ผู้วิจัยได้ทำการทดลองระบบอุณหภูมิและความชื้น การทดลองระบบควบคุมการกลับไข่ การทดลองระบบการขับเคลื่อนที่ในแนວแกน X-Y และการทดลองระบบการประมวลผลภาพดิจิทัลสำหรับการตรวจหาเชื้อตัวอ่อนในไข่สามารถวิเคราะห์ผลการทดลองได้ดังนี้

1) การวิเคราะห์ระบบควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องฟักไข่กับอุณหภูมิภายนอกตัวเครื่อง จากผลการทดลองการทำงานระบบควบคุมอุณหภูมิความร้อนโดยใช้ชุดฮีตเตอร์ เป็นอุปกรณ์กำเนิดความร้อนหรือการถ่ายเทความร้อนภายในตัวเครื่องเพื่อปรับค่าอุณหภูมิให้มีค่าเหมาะสมในการฟักไข่ ซึ่งมีค่าอุณหภูมิที่เหมาะสม อยู่ที่ระดับ 34-37.8 องศาเซลเซียส โดยสามารถวิเคราะห์ผลการทดลองจากการฟักไข่ จำนวนทั้งหมด 48 ฟอง โดยใช้ระยะเวลาในการฟักไข่ จำนวน 18 วัน จะแสดงผลการทดลองดังรูปที่ 20

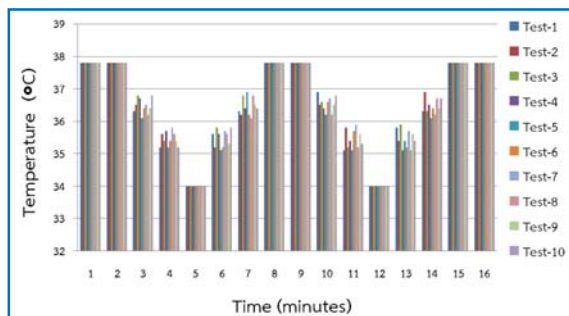


รูปที่ 20 แผนภาพการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิภายในตัวเครื่องฟักไข่

จากรูปที่ 20 ผลจากการทดลองระบบควบคุมอุณหภูมิโดยผู้วิจัยได้ทำการทดลองเริ่มต้นจากขั้นตอนการเปิดเครื่องฟักไข่ใช้งานโดยทำการทดลองจำนวนทั้งหมด 10 ครั้ง เพื่อหาประสิทธิภาพของระบบควบคุมอุณหภูมิภายในตัวเครื่อง ผลการวิจัย พบว่า อุณหภูมิภายนอกตัวเครื่องฟักไข่ในแต่ละครั้งของการทดลองจะมีค่าอุณหภูมิภายนอกที่แตกต่างกัน ซึ่งจะอยู่ในช่วง 24.9 - 29.8 องศาเซลเซียสจากการทดลองจำนวน 10 ครั้ง ซึ่งจากกราฟจะแสดงให้เห็นถึงค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปตามช่วงระยะเวลา การวิเคราะห์ผลทดลองได้จากการเก็บข้อมูลในแต่ละช่วงระยะเวลาตั้งแต่ 0-20 นาที ผู้วิจัยได้วิเคราะห์ผลการทดลองระบบปรับค่าอุณหภูมิให้มีค่าที่

เหมาะสมภายในตัวเครื่องฟักไข่ในช่วง 37.8°C จะสรุปผลได้ว่า ครั้งที่ 1 (ค่าอุณหภูมิภายนอกเท่ากับ 29.1°C, ใช้ระยะเวลา t=11min), ผลครั้งที่ 2 (24.9°C, t=15min), ผลครั้งที่ 3 (28.6°C, t=13min), ผลครั้งที่ 4 (26.4°C, t=13min), ผลครั้งที่ 5 (27.2°C, t=13min), ผลครั้งที่ 6 (29.8°C, t=10min), ผลครั้งที่ 7 (25.3°C, t=14min), ผลครั้งที่ 8 (27.5°C, t=13min), ผลครั้งที่ 9 (26.7°C, t=14min) และผลครั้งที่ 10 (28.2°C, t=13min) ซึ่งจะสรุปผลได้ว่า กรณีในช่วงการใช้งานของเครื่องฟักไข่ มีค่าอุณหภูมิภายนอกต่ำจะทำให้ใช้ระยะเวลามากในการปรับค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมภายในตัวเครื่อง และกรณีในช่วงการใช้งานมีค่าอุณหภูมิภายนอกสูงจะทำให้ใช้ระยะเวลาน้อยในการปรับค่าอุณหภูมิที่เหมาะสม

2) การวิเคราะห์ระบบควบคุมอุณหภูมิภายในตัวเครื่องของการฟักไข่ จำนวนทั้งหมด 18 วัน โดยผู้วิจัยได้ทำการเก็บผลการทดลอง จำนวน 10 ครั้ง ของระบบการทำงานการปรับค่าอุณหภูมิให้มีค่าที่เหมาะสม ซึ่งจะอยู่ในช่วง 34-37.8 องศาเซลเซียส ของแต่ละช่วงระยะเวลาในการฟักไข่แสดงผลการทดลองดังรูปที่ 21

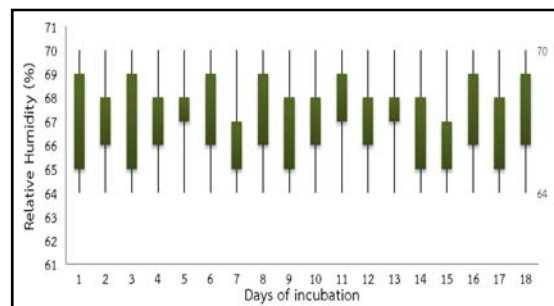


รูปที่ 21 แผนภาพการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิ
ในแต่ละช่วงระยะเวลา

จากรูปที่ 21 สามารถสรุปได้ว่าผลการวิเคราะห์การทำงานของระบบการปรับค่าอุณหภูมิให้มีค่าที่เหมาะสมภายในตัวเครื่อง พบว่า ในช่วงระยะเวลาการทำงานชุดฮีตเตอร์เพื่อถ่ายเทความร้อน โดยใช้ระยะเวลาเฉลี่ย 1:23 นาที และช่วงระยะเวลาการหยุดทำงานของชุดฮีตเตอร์ มีค่าระยะเวลาเฉลี่ย 4:53 นาที

3) ผลการทดลองค่าความชื้นสัมพัทธ์ได้จากการวัดค่าความชื้นภายในตัวเครื่อง ซึ่งชุดถ่ายเทความร้อนจะประกอบไปด้วย ชุดถาดรองน้ำและชุดพ่นหมอกที่ทำงานด้วยระบบอัตโนมัติโดยจะรักษาระดับความชื้นภายในตัวเครื่องจะมีค่าไม่ต่ำกว่า 65 เปอร์เซ็นต์ โดยค่าความชื้น

สัมพัทธ์ที่เหมาะสมในการฟักไข่ที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 65-69 เปอร์เซ็นต์แสดงผลการทดลอง ดังรูปที่ 22



รูปที่ 22 แผนภาพการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นสัมพัทธ์
ในแต่ละวันของการฟักไข่

จากรูปที่ 22 สามารถสรุปได้ว่าผลการวิเคราะห์ระบบการทำงานในการปรับเปลี่ยนค่าความชื้นสัมพัทธ์พบว่า ระบบควบคุมความชื้นสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยมีค่าความชื้นสัมพัทธ์อยู่ในช่วง 65-69 เปอร์เซ็นต์ และมีบางช่วงระยะเวลาของการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นเพียงเล็กน้อยที่เกิดจากปริมาณน้ำบนถาดรองน้ำภายในตัวเครื่อง

4) ผลการทดลองระบบควบคุมการกลับไข่ด้วยระบบอัตโนมัติจะทำการกลับไข่ภายในตัวเครื่องในทุก 2 ชั่วโมง โดยกลับไข่จากด้านซ้ายไปด้านขวาและจากด้านขวาไปด้านซ้ายสลับกันไปมา ซึ่งจะทำมุมด้านละ 45 องศา รวมเป็น 90 องศา เพื่อเป็นวิธีการเลียนแบบตามธรรมชาติของแม่พันธุ์ไก่ในการเขี่ยไข่เพื่อไม่ให้ตัวอ่อนหรือไข่แดงติดกับเปลือกไข่ จึงมีระบบควบคุมการกลับไข่มาช่วยในการเคลื่อนไหวซึ่งถ้าหากในกรณีตัวอ่อนติดเปลือกไข่อาจจะทำให้ลูกพันธุ์ไก่มีสภาพพิการเป็นแผลหรืออาจตายได้ โดยปกติมีการกลับไข่ 9-10 ครั้งต่อวัน จะแสดงช่วงระยะเวลาในการทดลองระบบควบคุมตลอดระยะเวลา 24 ชั่วโมง ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการกลับไข่ในแต่ละช่วงระยะเวลา

ครั้งที่	การกลับไข่ จากขวาไปซ้าย	การกลับไข่ จากซ้ายไปขวา	การกลับไข่ ณ จุดกึ่งกลาง
1	08.00 น.	10.00 น.	12.00 น.
2	14.00 น.	16.00 น.	-
3	18.00 น.	20.00 น.	-
4	22.00 น.	24.00 น.	-
5	02.00 น.	04.00 น.	-
6	06.00 น.	-	-

5) ผลการทดลองหาประสิทธิภาพการฟักไข่จากเครื่องมือที่สร้างขึ้น โดยผู้วิจัยได้ทำการทดลองการฟักไข่จำนวนทั้งหมด 18 วัน ได้ทำการทดลองทั้งหมด 10 ครั้ง เพื่อวิเคราะห์ผลของการฟักไข่ ซึ่งในกระบวนการ

วิเคราะห์ได้จากการเก็บผลข้อมูลของจำนวนไข่ที่มีเชื้อตัวอ่อน จำนวนไข่ที่ไม่มีเชื้อตัวอ่อนจำนวนไข่ที่มีรอยแตกร้าวจากการฟักไข่และจำนวนไข่ที่เน่าเสียจากการฟักไข่ แสดงผลการทดลองดังตารางที่ 2

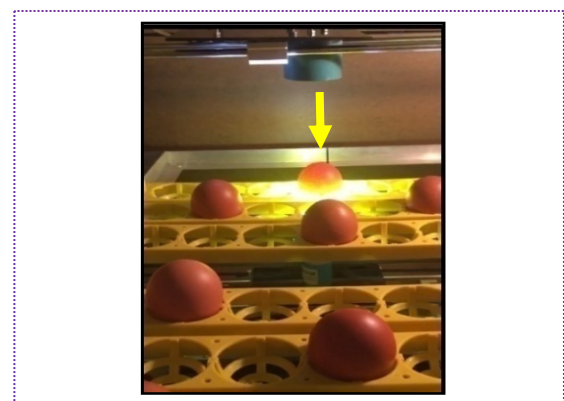
ตารางที่ 2 ผลการหาประสิทธิภาพการฟักไข่จากเครื่องมือที่สร้างขึ้น

ครั้งที่	จำนวนไข่ไก่ ในการฟัก(ฟอง)	มีเชื้อตัวอ่อน (ฟอง)	ไม่มีเชื้อ ตัวอ่อน (ฟอง)	ไข่ที่มีรอย แตกร้าว (ฟอง)	การเน่าเสีย (ฟอง)	ประสิทธิภาพ การฟักไข่ (ร้อยละ)
1	48	41	7	0	0	85.41
2	48	44	4	0	0	91.66
3	48	39	9	0	0	81.25
4	48	43	5	0	0	89.58
5	48	41	7	0	0	85.41
6	48	45	3	0	0	93.75
7	48	42	6	0	0	87.50
8	48	41	7	0	0	85.41
9	48	39	9	0	0	81.25
10	48	40	8	0	0	83.33

จากตารางที่ 2 สามารถสรุปผลการทดลองการหาประสิทธิภาพการฟักไข่จากการทดลองจำนวน 10 ครั้ง โดยวิธีการทดลองในแต่ละครั้งใช้ระยะเวลาในการทดลองจำนวน 18 วัน ผู้วิจัยจึงได้ดำเนินการเก็บผลการวิจัยจำนวน 10 ครั้ง ซึ่งจะได้ผลการทดลองเพียงพอต่อการนำไปวิเคราะห์ข้อมูล และจากผลการทดลองเครื่องมือที่สร้างขึ้น พบว่า มีค่าประสิทธิภาพการฟักไข่คิดเป็นร้อยละ 93.75 และ 91.66 ตามลำดับผลการทดลองจะเห็นได้ว่ามีจำนวนไข่ที่ไม่มีเชื้อตัวอ่อนภายในไข่ อาจเนื่องจากการเกิดไข่ฝ่อหรือไข่ที่ไม่มีเชื้อ สามารถสรุปผลได้ว่าเครื่องมือที่สร้างขึ้นสามารถคัดแยกไข่ที่ไม่มีเชื้อออกจากเครื่องฟักไข่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ลดปัญหาการเกิดรอยแตกร้าว การเกิดก๊าซไข่เน่า และมีประสิทธิภาพการฟักไข่ดีกว่าการฟักไข่ตามธรรมชาติเนื่องจากไม่มีปัญหาเรื่องไข่เกิดรอยแตกร้าว และอัตราการตายของลูกไก่

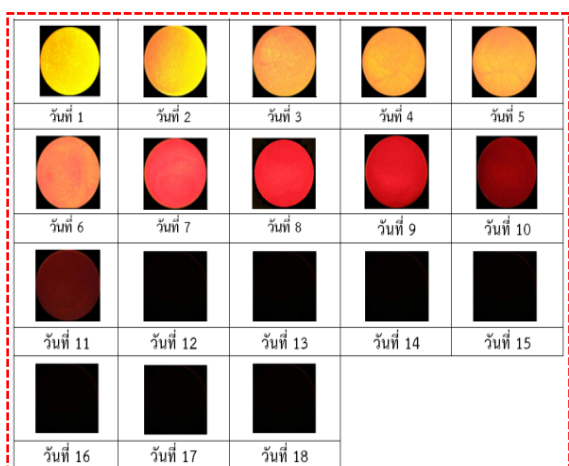
6) ผลการทดลองระบบการประมวลผลภาพดิจิทัล ผู้วิจัยได้ทำการทดลองระบบการขับเคลื่อน XY-axis พบว่า ระบบการขับเคลื่อนสามารถขับเคลื่อนตามตำแหน่งที่กำหนดไว้ได้อย่างถูกต้องและแม่นยำสูง โดยใช้ระยะเวลาในการเคลื่อนที่ไปตามตำแหน่งของไข่แต่ละจุดมีค่าเวลาเฉลี่ย 2 วินาที ตามลักษณะการเก็บข้อมูลภาพดังรูปที่ 23 และระยะเวลาในการเก็บข้อมูลภาพไข่ไก่ภายในตัวเครื่องฟักไข่พร้อมกับกระบวนการประมวลผล

ภาพดิจิทัลใช้เวลาเฉลี่ย 10 วินาทีซึ่งสรุปได้ว่าระบบการประมวลผลภาพไข่ไก่ จำนวน 48 ฟอง ใช้ระยะเวลาในการประมวลผลภาพ 9.6 นาที

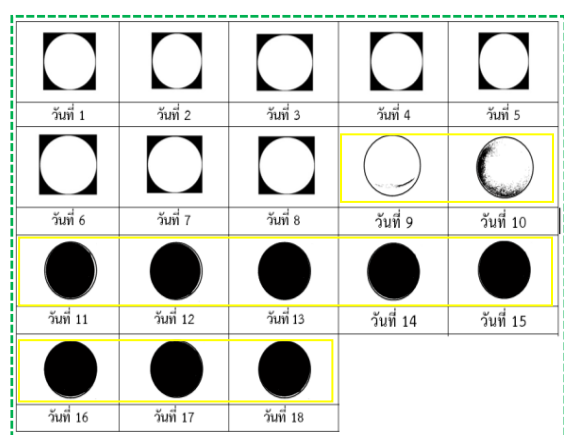


รูปที่ 23 ลักษณะการเก็บข้อมูลภาพ

ผลการประมวลผลภาพดิจิทัลด้วยฟังก์ชันเทรชโฮลด์ (Threshold) ในการตรวจหาเชื้อตัวอ่อนภายในไข่ไก่ จากการเก็บผลข้อมูลภาพของการฟักไข่จำนวนทั้งหมด 18 วัน แสดงผลการทดลองดังรูปที่ 24



(ก) ข้อมูลภาพสีต้นฉบับ



(ข) ผลการประมวลผลภาพดิจิทัล

รูปที่ 24 ผลการประมวลผลภาพด้วยฟังก์ชันเทรซโฮลด์
จากการฟักไข่จำนวนทั้งหมด 18 วัน

จากรูปที่ 24 (ก) เป็นกระบวนการวิเคราะห์ข้อมูลภาพสีที่ได้จากการเก็บข้อมูลในช่วงระยะเวลาการฟักไข่จำนวน 18 วันและรูปที่ 24 (ข) แสดงผลการประมวลผลภาพดิจิทัลโดยใช้หลักการแปลงค่าข้อมูลภาพดิจิทัลระดับสีเทา หรือ Gray Level พบว่า ในช่วงที่ไม่มีเชื้อตัวอ่อนภายในไข่จะแสดงผลระดับสีขาตั้งแต่ช่วงระยะเวลาการฟักไข่ 1-8 วัน และจะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงค่าระดับสีดำขึ้นไปเรื่อย ๆ ตั้งแต่ช่วงระยะเวลาการฟักไข่ 9-18 วัน เนื่องจากมีการเจริญเติบโตของเชื้อตัวอ่อนภายในไข่ และผลจากการวิจัยในกรณีข้อมูลภาพที่ไม่มีเชื้อตัวอ่อนในไข่พบว่า การประมวลผลภาพจะแสดงผลระดับสีขาตั้งแต่ช่วงระยะเวลาการฟักไข่ 1-18 วัน ซึ่งจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าระดับสีของข้อมูลภาพ เพราะเนื่องจากไม่มีเชื้อตัวอ่อนภายในไข่

5. สรุปผลการวิจัย

บทความวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบและสร้างเครื่องฟักไข่สำหรับการตรวจหาตัวอ่อนในไข่ไก่โดยใช้เทคนิคการประมวลผลภาพดิจิทัล ผลการทดลองระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ พบว่า ระบบสามารถควบคุมค่าอุณหภูมิและค่าความชื้นสัมพัทธ์ให้มีค่าที่เหมาะสมภายในตัวเครื่องฟักไข่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งค่าอุณหภูมิอยู่ในช่วง 34-37.8 องศาเซลเซียส และค่าความชื้นสัมพัทธ์มีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 65-69 เปอร์เซ็นต์ ผลการทดลองระบบควบคุมการกลับไข่พบว่า ระบบสามารถควบคุมการกลับไข่ภายในเครื่องฟักไข่ด้วยระบบอัตโนมัติในทุก ๆ 2 ชั่วโมงผลการหาประสิทธิภาพการฟักไข่จากเครื่องมือที่สร้างขึ้น พบว่า มีค่าประสิทธิภาพการฟักไข่ คิดเป็นร้อยละ 93.75 จากผลการวิจัยจะเห็นได้ว่ามีจำนวนไข่ที่ไม่มีเชื้อตัวอ่อนภายในไข่ อาจเนื่องจากไข่ฟ่อหรือไข่ไม่มีเชื้อ ผลการวิจัยสามารถลดปัญหาการเกิดรอยแตกร้าวและการเน่าเสียของไข่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และผลการทดลองการตรวจหาเชื้อตัวอ่อนในไข่ไก่โดยใช้เทคนิคการประมวลผลภาพดิจิทัล พบว่าผลการวิเคราะห์ข้อมูลภาพระดับสีขาวจะแสดงผลในกรณีที่ไม่มีเชื้อตัวอ่อนภายในไข่และข้อมูลภาพระดับสีดำจะแสดงผลในกรณีมีเชื้อตัวอ่อนภายในไข่

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยในครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ประจำปีงบประมาณ 2560 เลขที่สัญญา 30/2560 คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคณะกรรมการประเมินผลงานวิจัย สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์ขอขอบคุณคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์ ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย และขอขอบคุณกลุ่มเกษตรกรผู้เพาะเลี้ยงไก่ชนชุมชนบ้านโคกยาง ตำบลโคกยาง อำเภอบรบือ จังหวัดบุรีรัมย์ที่ได้ให้ความร่วมมือในการดำเนินการวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] เอกชัย สิงห์เดช, ธวัช สุวิงษ์, สมชาย เจริญจิตต์สวัสดิ์ และประพิพัธ์ ธนารักษ์, “การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของตู้ฟักไข่แบบขดลวดความร้อนและแบบเทอร์โมอิเล็กทริก,” วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา, ปีที่ 19, ฉบับพิเศษ, หน้า 272-276, 2557.

- [2] วิโรจน์ เอกวงค์มั่นคง และตุลย์ มณีวัฒนา, “การออกแบบระบบปรับอากาศที่เหมาะสมสำหรับตู้ฟักไข่ที่ใช้ในอุตสาหกรรม,” วารสารบทความวิชาการสมาคมวิศวกรรมปรับอากาศแห่งประเทศไทย, ปีที่ 12, เล่มที่ 6, หน้า 32-34, 2551.
- [3] สัญญา ผาสุข. (2552, สิงหาคม 13). สร้างตู้ฟักไข่อัตโนมัติ [online]. Available : <http://www.phtnet.org/news52/viewnews.asp?nID=445>.
- [4] พงศ์สวัสดิ์ สวัสดิภาพ, “การพัฒนาเครื่องฟักไข่โดยใช้เทอร์โมอิเล็กทริกในการควบคุมอุณหภูมิและความชื้น,” วิทยานิพนธ์การศึกษามหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมเทคโนโลยีพลังงาน., มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย, 2545.
- [5] G. Gridling and B. Weiss, “Introduction to Microcontrollers,” Institute of Computer Engineering., Vienna University of Technology. Feb. 26, 2007.
- [6] ศรีญญู นิลล่อ และอริวัฒน์ แ่งใจ, “การพัฒนาเครื่องวัดพลังงานไฟฟ้าโดยส่งสัญญาณไร้สาย,” ปริญญานิพนธ์, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า., มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา, เชียงใหม่, ประเทศไทย, 2556.
- [7] K. Jaiyen. (2015, September 21). Atmega328 [Online]. Available: <https://pixabay.com/en/circuits-electronics-atmel-950546/>.
- [8] ประภาส สุวรรณเพชร. (2556, เมษายน 27). เขียนโปรแกรมแสดงผลค่า 7-Segment 4digit [online]. Available: <http://www.praphas.com/forum/index.php?action=profile;u=1;area=showposts;sa=topics;start=75>.
- [9] สมฤกษ์ ปุณณาการ, นิพัทธ์ ยืนยาว, สุพัฒน์ พรศิริณพคุณ และสายันต์ พรายมี, “การพัฒนาเครื่องกีด 3 แกน โดยใช้กลไกไต่แกน X-Y แบบอินเวอร์ชันไฮดรอลิก,” การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2555. อำเภอชะอำ จังหวัดเพชรบุรี, 2555, หน้า 1243-1244.
- [10] HIWIN GmbH. (2017, June 5). Two-axis system HS2 [Online]. Available: https://www.hiwin.de/en/Products/Multi_axis_systems/Zwo_axis_system_with_linear_module/24415.
- [11] C. Atha, K. Baranwal, V. Desai, and S. Wankhade, “Review Paper on Home Automation System using Raspberry Pi,” International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication, vol. 4, no. 10, pp. 169-170, 2016.
- [12] C. Kaundanya, O. Pathak, A. Nalawade, and S. Parode, “Smart Surveillance System using Raspberry Pi and Face Recognition,” International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering, vol. 6, no. 4, pp. 622-623, 2017.
- [13] K. S. Shilpashree, H. Loksha, and H. Shivkumar, “Implementation of Image Processing on Raspberry Pi,” International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering, vol. 4, no. 5, pp. 199-200, 2015.
- [14] U. Lokhande. (2017, January 11). Raspberry Pi 3 Model B [Online]. Available: <http://binaryupdates.com/introduction-of-raspberry-pi-3-model-b/>.
- [15] ทศพร อัครรังสี และณัฐภูมิ จันทร์ทอง, “ระเบียบวิธีการเพื่อการออกแบบชุดอุปกรณ์เสริมสำหรับเครื่องจักรอัตโนมัติ: กรณีศึกษาโมดูลหยิบจับชิ้นงานของเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์,” วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, ปีที่ 11, ฉบับที่ 2, หน้า 1-13, 2559.
- [16] T. Tomiyama, P. Gu, Y. Jin, D. Lutters, C. Kind, and F. Kimura, “Design methodologies: Industrial and education applications,” CIRP Annals-Manufacturing Technology, vol. 58, no. 2, pp. 543-565, 2009.
- [17] G. Pahl, W. Beitz, J. Feldhusen, and K. H. Grote, “Engineering Design,” A Systematic Approach., 3rd ed. London: Springer-Verlag London, 2007, pp. 145-436.
- [18] ประภากร ธาราฉาย. (12 มิถุนายน 2560). การผลิตสัตว์ปีก เรื่องการฟักไข่ [Online]. Available: http://www.as.mju.ac.th/EBook/t_prapakorn

- /สศ241/บทที่%205%20การปักไข่%20ปรับปรุง%202560-2.pdf.
- [19] G. Prashanth and M. Shashidhara, "Skin Color Segmentation for Detecting Human Face Region in Image," International Conference on Communication and Signal Processing., Melmaruvathur., India, 2014, pp. 1-5.
- [20] G. Vimtha, S. N. Sekhar, L. fred and S. Varghese, "An Improved Color Segmentation Algorithm for the Analysis of Liver Anomalies in CT/PET Images," 2nd IEEE International Conference on Engineering and Technology., Coimbatore, India, 2016, pp. 1151-1154.
- [21] ชีรเดช ศรีธิมาสถาพร และวริศรา รุณนิมพลี. (22 ธันวาคม 2560). การเขียนโปรแกรมเบื้องต้น Arduino กับ image processing [Online]. Available: www.myarduino.net/article/31/ การเขียนโปรแกรมเบื้องต้น-arduino-กับ-image-processing-การลงโปรแกรม-python-กับ-opencv.
- [22] R. K. Chatterjee and Avijit Kar, (2017, March 15). Global Image Thresholding Based on Change-point Detection [Online]. Available: http://www.iaeng.org/publication/IMECS2017/IMECS2017_pp434-438.pdf.
- [23] David Marshall. (2016, January 26). Basic Image Processing [Online]. Available: http://users.cs.cf.ac.uk/Dave.Marshall/CM2208/LECTURES/CM2208_IP_02_IP_Egs.pdf.
- [24] K. Bhargavi and S. Jyothi, "A Survey on Threshold Based Segmentation Technique in Image Processing," International journal of innovative research & development, vol. 3, no. 12, pp. 234-239, 2014.
- [25] T. A. Adegbulugbe, A. O. Atere and O. G. Fasanmi, "Development of an Automatic Electric Egg Incubator," International Journal of Scientific & Engineering Research, vol 4, no. 9, pp. 914-918, 2013.
- [26] ชีระชัย ห่อวงศ์สกุล, ปุริมพัฒน์ สุจันงค์โตกุล, สมนึก ชีระกุลพิศุทธิ์ และพัทยากร ปาลสาร, "อิทธิพลของความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขาเข้าต่อการถ่ายโอนความร้อนของระบบปรับอากาศ," วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม : มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา, ปีที่ 5, ฉบับที่ 1, หน้า 28-30, 2560.
- [27] มารีนามะหนิ, นิตามณิ ถิ่นย่อง, ประชิต คงรัตน์ และนิคม ชูศิริ, "ความชื้นสมดุลของฟักข้าว," วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ, ปีที่ 17, (ฉบับที่ 3 ฉบับพิเศษ), หน้า 233-236, 2557.
- [28] L. Liu and M. O. Ngadi, "Detecting Fertility and Early Embryo Development of Chicken Eggs Using Near-Infrared Hyperspectral Imaging," Food and Bioprocess Technology, vol. 6, no. 9, pp. 2503-2513, 2013.
- [29] ชานูชัย นามพล, "การตรวจสอบเมล็ดพันธุ์ข้าวแดงปนในข้าวขาวโดยวิธีการประมวลผลภาพดิจิทัล," วารสารเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี, ปีที่ 5, ฉบับที่ 1, หน้า 62-67, 2558.
- [30] ทวีศักดิ์ ตรงศิริกุล และณัฐพงศ์ พันธุ์นะ, "การปรับปรุงคุณภาพภาพโดยวิธีการปรับเท่าฮิสโตแกรมออกเป็นสองส่วนผ่านทางเวฟเล็ต," รายงานผลการวิจัย., มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร. กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย, 2557.

**การจำลองสถานการณ์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการให้บริการของแผนกผู้ป่วยนอก
โรงพยาบาลแหลมฉบัง**
**Simulation to Improve Service Performance of Outpatient Department
in Laem Chabang Hospital**

เชษฐา ชำนาญหล่อ^{1*} กุลสัมพันธ์ สุขสานต์² จริสตา สายบุญณะ²

¹ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
199 หมู่ 6 ต.ทุ่งสุขลา อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20230

²นักศึกษาปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
199 หมู่ 6 ต.ทุ่งสุขลา อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20230

Chettha Chamnanlor^{1*} Koolsampan Suksan² Jarista Saibunna²

²Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering at Sriracha, Kasetsart University
199 Moo 6, Tungsukla, Si Racha, Chonburi, 20230

¹Student, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering at Sriracha, Kasetsart University
199 Moo 6, Tungsukla, Si Racha, Chonburi, 20230

*Corresponding author: Email: chettha@eng.src.ku.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้มุ่งเน้นการศึกษาระบบแถวคอยของการให้บริการของแผนกผู้ป่วยนอก โรงพยาบาลแหลมฉบัง จังหวัดชลบุรี เนื่องจากจำนวนผู้ป่วยที่เพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้ทางโรงพยาบาลประสบปัญหาการรอรับบริการของผู้ป่วยเป็นเวลานาน ซึ่งการรับบริการต้องผ่านขั้นตอน ดังนี้ (1) ลงทะเบียน (2) ชั่งน้ำหนัก/วัดส่วนสูง/วัดความดัน (3) ชักประวัติ (4) ตรวจโรค (5) เจาะเลือด (6) รอหลังพบแพทย์ และ (7) รับยา ซึ่งเป็นการเสีจจากระบบ ดังนั้น แนวคิดการปรับปรุงการทำงานจึงได้ถูกพัฒนาขึ้น และประยุกต์ใช้ทฤษฎีการจำลองแบบปัญหาแทนระบบจริง โดย 10 แผนการที่นำเสนอมาจาก 3 แนวทาง ได้แก่ (1) การรวมจุดให้บริการเข้าด้วยกัน (2) การปรับตารางเวลาการทำงานของแพทย์ และ (3) การนัดผู้ป่วยประเภทที่ 2 ให้เริ่มรับบริการตั้งแต่เที่ยง ผลการทดลอง แสดงให้เห็นว่า แผนการที่ดีที่สุดช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการให้บริการได้ ดังนี้ จำนวนผู้ป่วยที่ได้รับบริการเพิ่มขึ้น 10 คนต่อวัน ระยะเวลาทั้งหมดที่ผู้ป่วยประเภทที่ 1 อยู่ในระบบลดลง 45.48 นาที ระยะเวลาทั้งหมดที่ผู้ป่วยประเภทที่ 2 อยู่ในระบบลดลง 23.53 นาที และระยะเวลาทั้งหมดที่ผู้ป่วยประเภทที่ 3 อยู่ในระบบลดลง 49.13 นาที

คำสำคัญ: การจำลองสถานการณ์ ผู้ป่วยนอก ประสิทธิภาพการบริการ ตารางทำงานแพทย์

ABSTRACT

This article focuses on the queuing system study in outpatient services, Laem Chabang hospital, Chonburi. Due to increasing number of patients continuously, the hospital has met a long waiting time problem for patients. The service procedures are as follow (1) enrollment (2) weighing/measuring

height/pressure measurement (3) history review (4) examination (5) Bloodshed (6) wait after the doctor (7) get medication, then service completion. Thus work improvement concepts have been developed and the simulation theory is applied instead of real system. Ten scenarios come from 3 approaches: (1) combining service points; (2) doctor's schedule adjustment; and (3) Type 2 patient appointment with service starting at noon. Experimental results show that the best plan improves efficiencies as follow: the number of patients receiving the service increases with 10 persons per day; the total duration of the first patient type is reduced as 45.48 minutes; the total duration of the second patient type is reduced as 23:53 minutes, and the total duration of the third patient type is reduced as 49.13 minutes.

Keyword: Simulation, outpatient, service performance, Doctor's schedule.

1. บทนำ

ปัญหาโรคภัยไข้เจ็บเป็นสิ่งที่สามารถเกิดขึ้นได้กับทุกคนไม่ว่าจะเป็นเพศใดหรือวัยใดก็ตาม ซึ่งโรงพยาบาลถือเป็นสถานที่ที่ให้บริการตรวจสุขภาพ รักษาโรคภัยไข้เจ็บที่เกิดจากความผิดปกติทั้งทางร่างกายหรือจิตใจ รวมทั้งการให้ความรู้ทางด้านการรักษาสุขภาพแก่ประชาชน ดังนั้นโรงพยาบาลจึงกลายเป็นสถานที่ที่มีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของคนในทุกชุมชนนับตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน

อย่างไรก็ดี โรงพยาบาลแหลมฉบัง (อ่าวอุดม) จังหวัดชลบุรี ซึ่งเป็นกรณีศึกษาในงานวิจัยนี้ มีลักษณะเป็นโรงพยาบาลชุมชนขนาดกลางที่มีผู้มารับบริการรักษาจำนวนมากในแต่ละวัน ในขณะที่ยังมีจำนวนห้องตรวจและความสามารถในการให้บริการตรวจรักษาอยู่อย่างจำกัดในปัจจุบัน ทำให้เกิดปัญหาการรอคอยการรับบริการของแผนกผู้ป่วยนอก (Outpatient department) ดังนั้นทางโรงพยาบาลกรณีศึกษาจึงควรมุ่งเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพการให้บริการ (Service performance) โดยการศึกษาหาแนวทางในการปรับปรุงการทำงาน (Work improvement) และจำลองสถานการณ์แนวทางการดำเนินงานต่างๆ ผ่านทางคอมพิวเตอร์ (Computer simulation) โดยเฉพาะอย่างยิ่งแนวทางที่ไม่สามารถทำการทดลองในสถานที่ปฏิบัติการจริงได้ ดังนั้น แผนการดำเนินงานที่มีประสิทธิภาพ จะได้รับการศึกษาและออกแบบอย่างเหมาะสม โดยมีการเปรียบเทียบผลการทดลองในแบบจำลองเสมือนจริงที่สร้างขึ้น

บทความนี้มุ่งเน้นศึกษาการจำลองสถานการณ์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการให้บริการของแผนกผู้ป่วยนอกในโรงพยาบาลกรณีศึกษา โดยบทนำได้มีการอธิบายถึงความสำคัญของปัญหาในงานวิจัยนี้ หัวข้อถัดไปจะกล่าวถึงวรรณกรรมหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ในขณะที่วิธีการดำเนินงานวิจัยและขั้นตอนในการจำลองสถานการณ์จะแสดงไว้ในหัวข้อที่ 3 ผลการทดลองและการสรุปเชิงวิเคราะห์จะแสดงไว้ในหัวข้อที่ 4 และข้อเสนอแนะรวมทั้งงานวิจัยที่น่าสนใจในอนาคตจะกล่าวไว้ในหัวข้อสุดท้าย

2. ทบทวนวรรณกรรม

งานวิจัยที่มุ่งเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพในการให้บริการแก่ผู้ป่วยของโรงพยาบาลได้รับความสนใจและมุ่งเน้นศึกษาจากหลายงานวิจัย โดยส่วนใหญ่ใช้การจำลองสถานการณ์แสดงพฤติกรรมของระบบทั้งการทำงานปัจจุบัน และการทำงานตามแนวทางที่ปรับปรุง อาทิเช่น การจำลองสถานการณ์การให้บริการผู้ป่วยแผนกโรคหัวใจ สถาบันสุขภาพเด็กแห่งชาติมหาราชินี [1] การจำลองสถานการณ์การให้บริการผู้ป่วยแผนกอายุรกรรม โรงพยาบาลเวชการุณย์รัศมี [2] การลดระยะเวลาการให้บริการสำหรับโรงพยาบาลทางจิตเวชด้วยแบบการจำลอง [3] การจำลองสถานการณ์การให้บริการของคลินิกกุมารเวชและอายุรกรรม ตึกผู้ป่วยนอก โรงพยาบาลพัทลุง [4] การจำลองสถานการณ์การให้บริการของแผนกอายุร

กรรม ตึกผู้ป่วยนอก โรงพยาบาลพุทธโสธร [5] การจำลองระบบแถวคอยของการให้บริการผู้ป่วยนอก โรงพยาบาลลำลูกกา [6] การสร้างแบบจำลองกำลังพยาบาลในแผนกฉุกเฉิน โรงพยาบาลธรรมศาสตร์เฉลิมพระเกียรติ [7] การจำลองสถานการณ์การให้บริการของแผนกศัลยกรรมผู้ป่วยนอกของศูนย์สุขภาพ มหาวิทยาลัยบูรพา [8] และการสร้างแบบจำลองการไหลของผู้ป่วยในศูนย์การแพทย์ฟลินเดอร์ (Flinders Medical Centre: FMC) ของโรงพยาบาลแห่งรัฐในออสเตรเลีย (Australian public hospital) [9] เป็นต้น ซึ่งการเพิ่มประสิทธิภาพการให้บริการในโรงพยาบาลในงานวิจัยที่กล่าวมาเบื้องต้นอาศัยแนวทางในการจัดอัตรากำลังแพทย์และพยาบาล การจัดทำตารางเวรทำงานใหม่ หรือการกำหนดแผนการทำงานใหม่ที่ประกอบด้วยหลายแนวทางในการปรับปรุงการให้บริการ

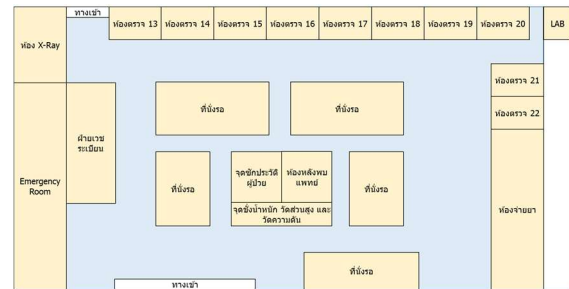
3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

วิธีการดำเนินงานวิจัยประกอบด้วย 7 ขั้นตอน ได้แก่ (1) การศึกษาสภาพการดำเนินงานในปัจจุบัน (2) การรวบรวมข้อมูล (3) การวิเคราะห์การแจกแจง (4) แนวคิดในการสร้างแบบจำลอง (5) การทดสอบแบบจำลอง (6) การหาจำนวนรอบที่เหมาะสมในการรันโปรแกรม และ (7) การเสนอแนวทางการปรับปรุง โดยมีการอธิบายรายละเอียดในแต่ละหัวข้อ ดังนี้

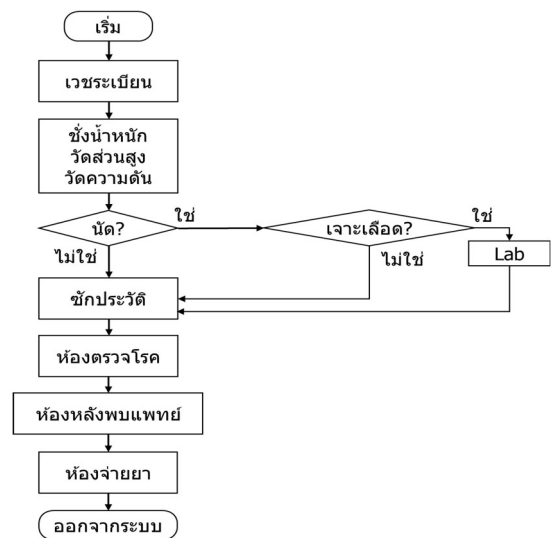
3.1. การศึกษาสภาพการดำเนินงานในปัจจุบัน

ในปัจจุบัน แผนกผู้ป่วยนอกของโรงพยาบาลกรณีศึกษา ได้ดำเนินการให้บริการตรวจรักษาภายในพื้นที่ของแผนกตามแผนผังที่แสดงในรูปที่ 1

โดยเปิดให้บริการในเวลาราชการ ทุกวันจันทร์ถึงวันศุกร์ เวลา 08.00 น. ถึง 16.00 น. ประกอบด้วยห้องตรวจทั้งหมด 10 ห้องตรวจ แต่จะมีการเปิดให้บริการในช่วงเช้าเพียง 8 ห้องตรวจต่อวัน และเปิดให้บริการในช่วงบ่ายเพียง 4 ห้องตรวจต่อวันเท่านั้น โดยมีแพทย์ประจำแผนกผู้ป่วยนอกจำนวนทั้งสิ้น 23 คน ซึ่งมีขั้นตอนการให้บริการดังรูปที่ 2



รูปที่ 1 แผนผังแผนกผู้ป่วยนอก โรงพยาบาลกรณีศึกษา



รูปที่ 2 ขั้นตอนการรับการรักษาของแผนกผู้ป่วยนอก
โรงพยาบาลกรณีศึกษา

3.2. การรวบรวมข้อมูล

งานวิจัยนี้ ได้รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องในช่วงเดือนพฤษภาคม – กรกฎาคม ปี พ.ศ. 2558 ทุกวันทำการ (วันจันทร์ถึงวันศุกร์) ตั้งแต่เวลา 8.00 น. ถึง 16.00 น. ซึ่งมีการรวบรวมข้อมูลจำนวนการเข้าใช้บริการในแต่ละช่วงเวลาของผู้ป่วยแต่ละประเภท โดยแยกเก็บข้อมูลทุกๆ 1 ชั่วโมง ตั้งแต่เวลา 5.00 น. ถึง 16.00 น. เนื่องจากอัตราการเข้ามาใช้บริการของผู้ป่วยมีความไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับแต่ละช่วงเวลา ดังแสดงในตารางที่ 1

ปีที่ 13 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม – เมษายน พ.ศ. 2561

ตารางที่ 1 จำนวนการเข้าใช้บริการในแต่ละช่วงเวลา

เวลา	จำนวนผู้ป่วย (คน)		
	ทั่วไป	นัดไม่เจาะเลือด	นัดเจาะเลือด
05.00-06.00	4	1	4
06.00-07.00	10	4	11
07.00-08.00	31	10	16
08.00-09.00	41	9	13
09.00-10.00	33	3	4
10.00-11.00	18	1	2
11.00-12.00	15	0	0
12.00-13.00	16	0	0
13.00-14.00	16	0	0
14.00-15.00	9	0	1
15.00-16.00	7	0	0

ตารางที่ 2 จำนวนและเวลาทำงานในแต่ละวัน

จุดให้บริการ	ประเภทบุคคล	จำนวนผู้ให้บริการ	เวลาทำงาน	เวลาพัก
ฝ่ายเวชระเบียน	เจ้าหน้าที่	2	05.00-16.00	12.00-13.00
จุดซัชน้ำหนัก/ วัดส่วนสูง/วัด ความดัน	เจ้าหน้าที่	2	07.00-16.00	12.00-13.00
จุดซักประวัติ	พยาบาล	1	07.00-08.00	12.00-13.00
		4	08.00-09.00	
		3	09.00-16.00	
ห้องตรวจ	แพทย์	1	08.30-09.00	12.00-13.30
		8	09.00-12.00	
		4	13.30-16.00	
ห้อง LAB	เจ้าหน้าที่	1	07.00-16.00	12.00-13.00
ห้องหลังพบ แพทย์	พยาบาล	2	08.00-09.00	12.00-13.00
		3	09.00-16.00	
ห้องการเงิน	เจ้าหน้าที่	1	05.00-08.00	12.00-13.00
		2	08.00-16.00	
ห้องจ่ายยา	เภสัชกร	1	05.00-08.00	12.00-13.00
		3	08.00-16.00	

มีการรวบรวมข้อมูลจำนวนเจ้าหน้าที่ แพทย์ และพยาบาลในแต่ละจุดบริการ ที่ให้บริการในแต่ละวัน พร้อมทั้งเวลาทำงาน ดังแสดงในตารางที่ 2 ในขณะที่ข้อมูลระยะเวลาที่ให้บริการ (Service time) ของผู้ให้บริการในแต่ละจุดบริการของแผนกผู้ป่วยนอก ได้แก่ ฝ่ายเวชระเบียน จุดซัชน้ำหนัก/วัดส่วนสูง/วัดความดัน จุดซักประวัติ ห้องตรวจ ห้อง LAB ห้องหลังพบแพทย์ ห้องการเงิน และห้องจ่ายยา จะถูกรวบรวมและนำไปวิเคราะห์

การแจกแจงความน่าจะเป็นของเวลาในแต่ละจุดบริการ ซึ่งจะถูกนำไปใช้ในการสร้างแบบจำลองเสมือนจริงต่อไป

3.3. การวิเคราะห์การแจกแจง

การวิเคราะห์หาการแจกแจงที่เหมาะสมจากรูปแบบการกระจายของข้อมูลระยะเวลาที่ให้บริการของเจ้าหน้าที่ พยาบาล และแพทย์ ในแต่ละจุดบริการของแผนกผู้ป่วยนอก โดยใช้เครื่องมือ Input analyzer ของโปรแกรมสร้างแบบจำลองสถานการณ์สำเร็จรูป

ตารางที่ 3 ค่าการแจกแจงการเข้ารับการรักษา

ข้อมูล	สูตรค่าการแจกแจง	%CI	P-Value	Goodness of Fit Test
ฝ่ายเวชระเบียน (ผู้ป่วยทั่วไป)	NORM(0.413, 0.0616)	95%	> 0.15	ยอมรับ
ฝ่ายเวชระเบียน (ผู้ป่วยนัดไม่เจาะเลือด)	NORM(0.336, 0.0697)	95%	> 0.15	ยอมรับ
ฝ่ายเวชระเบียน (ผู้ป่วยนัดเจาะเลือด)	0.15 + ERLA(0.0381, 5)	95%	> 0.15	ยอมรับ
จุดซัชน้ำหนัก วัด ส่วนสูง วัดความดัน	TRIA(0.23, 0.538, 1.6)	95%	0.0595	ยอมรับ
จุดซักประวัติ	LOGN(2.8, 1.55)	95%	0.355	ยอมรับ
ห้องตรวจ	$1 + 9 * \text{BETA}(0.844, 1.01)$	95%	0.448	ยอมรับ
ห้อง LAB	$0.68 + 2.81 * \text{BETA}(1.77, 1.49)$	95%	0.148	ยอมรับ
ห้องหลังพบแพทย์	GAMM(0.589, 2.73)	95%	0.114	ยอมรับ
ห้องการเงิน	$1 + 2 * \text{BETA}(0.768, 1.01)$	95%	0.264	ยอมรับ
ห้องจ่ายยา	$1 + 4 * \text{BETA}(0.984, 0.852)$	95%	0.317	ยอมรับ

โดยการทดสอบสมมติฐานการแจกแจงความน่าจะเป็น 2 วิธี คือ การทดสอบโคโมโกรอฟ-สเมียร์นอฟ (Kolmogorov-Smirnov test) และการทดสอบไคสแควร์ (Chi-square test) โดยตั้งสมมติฐานการทดสอบ ดังนี้

H_0 : ชุดข้อมูลมีการกระจายการแจกแจงความน่าจะเป็นตามที่ทดสอบ

H_1 : ชุดข้อมูลไม่มีการกระจายการแจกแจงความน่าจะเป็นตามที่ทดสอบ

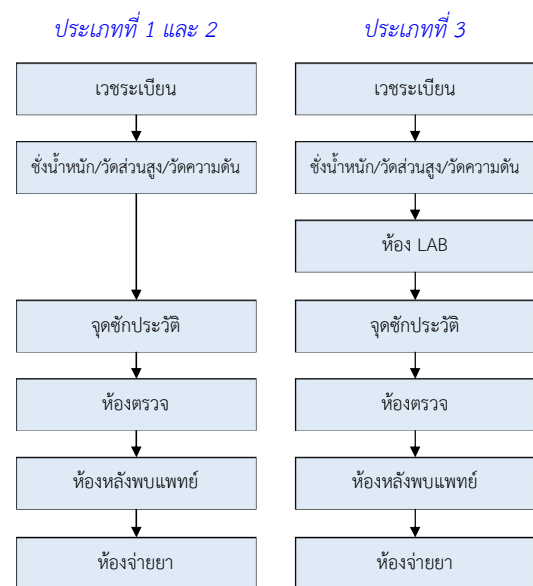
ผลจากการทดสอบภายใต้ค่าความเชื่อมั่น 95% ($\alpha = 0.05$) ได้ค่า P-Value > 0.05 ดังนั้นจึงยอมรับสมมติฐานหลัก (H_0) คือ ชุดข้อมูลมีการแจกแจงตามที่ทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 3

3.4. แนวคิดในการสร้างแบบจำลอง

จากการศึกษาข้อมูลเบื้องต้นในแผนกผู้ป่วยนอก โรงพยาบาลกรณีศึกษา พบว่า ผู้ป่วยที่มารับการบริการสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ (1) ผู้ป่วยประเภททั่วไปที่มาเอง (2) ผู้ป่วยประเภทที่มีการนัดไม่เจาะเลือด และ (3) ผู้ป่วยประเภทที่มีการนัดเจาะเลือด ซึ่งส่วนใหญ่จะได้รับบริการด้วยกระบวนการที่คล้ายกัน โดยเริ่มต้นจากการลงทะเบียนที่ฝ่ายเวชระเบียนก่อน แล้วไปยังจุดชั่งน้ำหนัก/วัดส่วนสูง/วัดความดัน ถ้าหากเป็นผู้ป่วยประเภทที่มีการนัดเจาะเลือด จะไปทำการเจาะเลือดที่ห้อง LAB และไปยังจุดซักประวัติเป็นลำดับถัดไป แต่ถ้าหากเป็นผู้ป่วยประเภทที่ไม่มีการนัดหรือเป็นผู้ป่วยประเภทที่มีการนัดแต่ไม่ต้องเจาะเลือด จะไปยังจุดซักประวัติเป็นลำดับถัดไปทันทีโดยไม่ผ่านห้อง LAB ซึ่งในจุดซักประวัตินี้พยาบาลจะเป็นผู้ซักประวัติ สอบถามอาการ เพื่อคัดกรองผู้ป่วยไปตามห้องตรวจที่เหมาะสม หลังจากนั้นผู้ป่วยจะต้องรอเข้ารับการตรวจจากแพทย์ เมื่อแพทย์ตรวจเสร็จ ผู้ป่วยจะไปยังห้องหลังพบแพทย์เพื่อรับใบนัดและคำแนะนำจากพยาบาล สุดท้ายผู้ป่วยไปยังห้องจ่ายยา และออกจากระบบของการให้บริการ โดยมีลำดับขั้นตอนการเข้ารับบริการรักษา ดังแสดงในรูปที่ 3

แบบจำลองสถานการณ์การให้บริการจริงได้ถูกสร้างขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4 มีจำนวนทั้งหมด 35 โมดูล (Modules) โดยกำหนดให้มีผู้ป่วย (Entity) จำนวน 3 ประเภท (Types) ได้แก่ ผู้ป่วยทั่วไป (Type 1) ผู้ป่วยนัดไม่เจาะเลือด (Type 2) และผู้ป่วยนัดเจาะเลือด (Type 3) ซึ่งในแต่ละวันจะมีจำนวนผู้ที่เข้ามาใช้บริการที่แตกต่างกันในแต่ละช่วงเวลา คิดเป็นร้อยละ 72 ร้อยละ 10 และร้อยละ 18 ตามลำดับสำหรับผู้ป่วยแต่ละประเภท ดังข้อมูลที่แสดงรายละเอียดในตารางที่ 1 ดังนั้นการเข้ามา

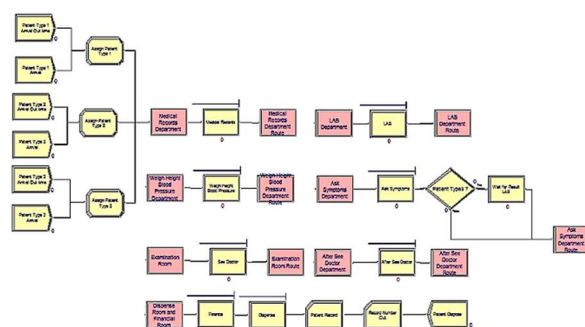
ของวัตถุในแบบจำลองจึงเป็นแบบมีตารางการมาถึงของผู้ป่วยแต่ละประเภท ในขณะที่มีจุดให้บริการมีทั้งหมด 8 จุด ประกอบด้วย (1) ฝ่ายเวชระเบียน (2) จุดชั่งน้ำหนัก/วัดส่วนสูง/วัดความดัน (3) ห้อง LAB (4) จุดซักประวัติ (5) ห้องตรวจโรค (6) ห้องหลังพบแพทย์ (7) ห้องการเงิน และ (8) ห้องจ่ายยา โดยแต่ละจุดให้บริการ จะมีเส้นทาง การเดิน และระยะเวลาการเดินจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งแตกต่างกัน ในขณะที่ เจ้าหน้าที่ พยาบาล เภสัชกร และแพทย์ให้บริการผู้ป่วยตามตารางเวลาทำงานที่กำหนด



รูปที่ 3 กระบวนการรับบริการของผู้ป่วย

จากผลการดำเนินงานทั้ง 8 จุดที่ให้บริการในปัจจุบัน พบว่า ผู้ป่วยต่อวันที่มาเข้ารับบริการเป็นจำนวนมากดังกล่าว ต้องใช้เวลาทั้งหมดที่อยู่ในระบบโดยเฉลี่ยไม่ต่ำกว่า 3 ชั่วโมงต่อคน ซึ่งส่วนใหญ่เป็นเวลาในการรอคอยในแต่ละจุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งการรอคอยก่อนการเข้ารับ การตรวจ เนื่องจากผู้ป่วยจำนวนมากมักจะนิยมมารอเพื่อเข้ารับบริการในช่วงเริ่มต้นของแต่ละวัน ประกอบกับข้อจำกัดของจำนวนแพทย์ที่มี ดังนั้น กระบวนการคัดแยกประเภทผู้ป่วยจนกระทั่งกระบวนการก่อนการตรวจ จึงต้องได้รับการศึกษาและปรับปรุงการทำงานให้มีความเหมาะสม ในขณะที่ การตรวจรักษาอยู่ภายใต้ข้อจำกัด

ว่าค่าจริงและค่าจากแบบจำลองมีความใกล้เคียงกัน
สามารถใช้ข้อมูลจากแบบจำลองในการออกแบบการ
ทดลองแทนสถานการณ์จริงได้



รูปที่ 4 แบบจำลองการให้บริการผู้ป่วยนอก

แบบจำลองสถานการณ์ในงานวิจัยนี้ ได้ผ่าน

กระบวนการทดสอบ (Verification and validation) เพื่อให้มั่นใจได้ว่าสามารถใช้แบบจำลองที่สร้างขึ้นแทนสถานการณ์การให้บริการของโรงพยาบาลกรณีศึกษาจริงได้ โดยมีการตรวจสอบความถูกต้องของการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ให้เป็นไปตามกรอบความคิด (Conceptual Model) ด้วยการตรวจเช็คค่านำเข้า (Input Values) ตรรกะ (Logics) และความสัมพันธ์ของโมดูลต่างๆ (Modules Configuration) เทียบกับขั้นตอนการรับบริการของผู้ป่วยแต่ละประเภท พร้อมทั้งตรวจสอบผลการประมวลของโปรแกรมว่ามีค่าผิดพลาด (Error) เกิดขึ้นหรือไม่ จากนั้นจะทำการทดสอบความเหมือนจริงของแบบจำลองโดยทำการรันโปรแกรมเป็นจำนวน 20 ครั้ง เป็นเวลา 11 ชั่วโมง เพื่อนำค่าที่ได้จากการรันแบบจำลอง ไปทดสอบสมมติฐาน ด้วยวิธี 2 Sample t-test ในโปรแกรมทางสถิติ (Minitab) โดยนำค่าของ “Number Out” ที่ได้จากแบบจำลองไปเปรียบเทียบกับข้อมูลจริง เพื่อทดสอบว่าข้อมูลต่างๆ ในแบบจำลองนั้นมีความถูกต้อง ซึ่งได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 5

จากการทดสอบแบบจำลองด้วยความเชื่อมั่นที่ 95% ผลลัพธ์ที่ได้พบว่า ค่า P-Value เท่ากับ 0.102 ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.05 ดังนั้น จึงยอมรับสมมติฐานหลักที่แสดง

Two-sample T for Simu Number Out vs Real
Number Out

		N	Mean	StDev	SE Mean
Simu	Number Out	20	337.95	6.43	1.4
Real	Number Out	20	341.00	4.94	1.1

```
Difference =mu (Simu Number Out)-mu (Real
Number Out)
```

Estimate for difference: -3.05

95%CI for difference: (-6.73, 0.63)

T-Test of difference = 0 (vs not =):

T-Value = -1.68 P-Value = 0.102 DF = 35

รูปที่ 5 ผลการทดสอบแบบ 2 Sample t-test

3.6. การหาจำนวนรอบที่เหมาะสม

การหาจำนวนรอบทำซ้ำที่เหมาะสม ขึ้นอยู่กับระดับความแม่นยำที่ต้องการ ในงานวิจัยนี้ กำหนดระดับความแม่นยำ (ε) ไว้ที่ 0.05 ซึ่งจำนวนรอบทำซ้ำที่ควรใช้คือ จำนวนรอบทำซ้ำที่ทำให้ครึ่งช่วงความเชื่อมั่นของจำนวนรอบทำซ้ำที่เหมาะสมไม่เกินกว่าระดับความแม่นยำ

โดยที่ครึ่งช่วงความเชื่อมั่น (h_0) ของแต่ละตัวชี้วัดเป็นดังนี้ $Number\ Out = 0.98$ ในขณะที่ $Total\ Time$ ของผู้ป่วยประเภทที่ 1 คือ 1.18 ผู้ป่วยประเภทที่ 2 คือ 1.02 และผู้ป่วยประเภทที่ 3 คือ 1.34 ซึ่งครึ่งช่วงความเชื่อมั่นที่นำมาใช้ในการคำนวณรอบทำซ้ำที่เหมาะสม คือ ค่าครึ่งช่วงความเชื่อมั่นของ $Total\ Time$ ของผู้ป่วยประเภทที่ 3 เพราะว่าเป็นค่าครึ่งช่วงความเชื่อมั่นที่ครอบคลุมทุกตัวชี้วัด โดยกำหนดจำนวนรอบทำซ้ำเริ่มต้น (R_0) ที่ 20 รอบ

กำหนดให้ $h_0 = 1.34$ $R_0 = 20$ $\varepsilon = 0.05$

จากสูตร
$$R \cong \frac{h_0^2}{\varepsilon^2} R_0$$

จะได้
$$R \cong \frac{1.34^2}{(0.05)^2} \times 20$$

$$R \cong 14,365$$

เพราะฉะนั้น จำนวนรอบทำซ้ำที่เหมาะสม (R) คือ 14,365 รอบ ความยาวในการรัน 11 ชั่วโมง โดยที่ ชั่วโมงการทำงาน คือ 11 ชั่วโมงต่อวัน

3.7. การเสนอแนวทางการปรับปรุง

ในแต่ละวันนั้น มีผู้ป่วยได้รับการทั้งหมด 341 คน โดยที่ผู้ป่วยประเภทที่ 1 ใช้เวลาในระบบทั้งหมด 199.26 นาทีต่อคน ผู้ป่วยประเภทที่ 2 ใช้เวลาในระบบทั้งหมด 191.55 นาทีต่อคน และผู้ป่วยประเภทที่ 3 ใช้เวลาในระบบทั้งหมด 226.57 นาทีต่อคน ดังแสดงในตารางที่ 4 ซึ่งเห็นได้ว่า ผู้ป่วยแต่ละประเภทอยู่ในระบบนานเกินไป ส่งผลให้ในแต่ละวันมีผู้ได้รับการไม่มากนัก

ตารางที่ 4 ผลลัพธ์ที่ได้จากรันแบบจำลองปัจจุบัน

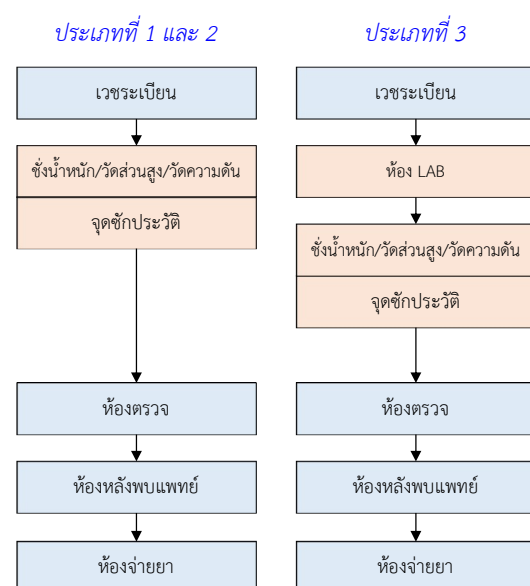
ดัชนีชี้วัด	ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลอง	
	ค่าเฉลี่ย	Half-Width
Number Out	341 คน	<0.02
Total Time Patient Type 1	199.26 นาที	<0.04
Total Time Patient Type 2	191.55 นาที	<0.04
Total Time Patient Type 3	226.57 นาที	<0.04

ดังนั้น แนวทางในการแก้ปัญหาจึงได้ทำการศึกษาและพิจารณาอย่างเหมาะสมโดยมุ่งเน้นการปรับปรุงแบบจำลองภายใต้ข้อจำกัดในปัจจุบัน ดังต่อไปนี้

(1) แนวทางการรวมจุดให้บริการเข้าด้วยกัน คือ จุดซัชน้ำหนัก/วัดส่วนสูง/วัดความดัน และจุดซักประวัติ สำหรับขั้นตอนการให้บริการของผู้ป่วยประเภทที่ 1 และประเภทที่ 2 ในขณะที่ผู้ป่วยประเภทที่ 3 สามารถทำขั้นตอนห้อง LAB ก่อนได้ ดังแสดงในรูปที่ 6

(2) แนวทางการปรับตารางเวลาการทำงานของแพทย์ ภายใต้ข้อจำกัดจำนวนชั่วโมงแรงงานของแพทย์ทั้งหมด 34.5 ชั่วโมง โดยการจัดจำนวนแพทย์ในแต่ละเวลานั้น

ขึ้นอยู่กับจำนวนผู้ป่วยที่เข้ามาใช้บริการ ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ช่วงเวลา ดังนี้ 1) ช่วง 08.30 น. - 09.00 น. จัดแพทย์เพื่อรองรับผู้ป่วยที่มาใช้บริการในช่วงก่อนระบบจะเปิดให้บริการ โดยมุ่งเน้นการระบายจำนวนผู้ป่วยที่จุดให้บริการก่อนเข้าห้องตรวจ 2) ช่วง 09.00 น. - 12.00 น. จัดแพทย์จำนวนมากเพื่อรองรับผู้ป่วยที่มาใช้บริการเต็มเนื่องจากเป็นช่วงเวลาที่ผู้ป่วยเข้ามาใช้บริการมากที่สุดในแต่ละวัน และ 3) ช่วง 13.30 น. - 16.00 น. ช่วงเวลานี้มีจำนวนผู้ป่วยที่เข้ามาใช้บริการลดลงจากเมื่อช่วงเช้า ซึ่งจะต้องจัดแพทย์เพื่อรองรับผู้ป่วยที่เข้ามาใช้บริการในช่วงเวลานี้ และผู้ป่วยที่ยังตกค้างอยู่ในระบบ นอกจากนี้จากการศึกษาข้อมูลในงานวิจัย ทำให้สามารถกำหนดแนวทางในการปรับตารางเวลาการทำงานของแพทย์ได้ทั้งหมด 4 แนวทางย่อย ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 5 โดยจะเน้นการทดลองปรับจำนวนแพทย์ในช่วงเวลาที่ผู้ป่วยมาใช้บริการมากที่สุดเป็นหลัก (ช่วงเช้า) ได้แก่ แนวทาง 2a และ 2b ได้ทำการปรับเฉพาะจำนวนแพทย์ระหว่าง 6-7 คน ในขณะที่ แนวทาง 2c และ 2d ได้ทำการเพิ่มช่วงเวลากลางวันสำหรับการให้บริการอีกด้วย โดยแพทย์ 1 คนอาจให้บริการมากกว่าหนึ่งช่วงเวลา แต่เมื่อรวมเวลาการทำงานของแพทย์ทั้งหมดจะต้องไม่เกิน ชั่วโมงการทำงานสูงสุดต่อวัน ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น



รูปที่ 6 ขั้นตอนการให้บริการของผู้ป่วย

ตารางที่ 5 การปรับตารางเวลาการทำงานของแพทย์

แนวทาง	เวลาทำงาน	จำนวนแพทย์ในเวลา ขณะนั้น (คน)
(2a)	08.30 – 09.00	3
	09.00 – 12.00	6
	13.30 – 16.00	6
(2b)	08.30 – 09.00	2
	09.00 – 12.00	7
	13.30 – 16.00	5
(2c)	08.30 – 09.00	3
	09.00 – 12.00	7
	12.00 – 12.30	3
	13.30 – 16.00	4
(2d)	08.30 – 09.00	3
	09.00 – 11.30	7
	11.30 – 12.00	4
	12.00 – 12.30	2
	12.30 – 13.30	1
	13.30 – 16.00	4

(3) แนวทางการจัดเวลาการนัดของผู้ป่วยประเภทที่ 2 ให้มารับบริการในช่วงเวลา 12.00 น. เป็นต้นไป

จากทั้ง 3 แนวทางการปรับปรุงการทำงานในเบื้องต้น ทำให้สามารถกำหนดแผนการตามสถานการณ์ (Scenario planning) ได้ทั้งหมด 7 แผน ซึ่งประกอบด้วยแผนเชิงเดี่ยวที่มีการใช้แนวทางการปรับปรุงเพียง 1 แนวทาง และแผนเชิงผสมที่มีการใช้แนวทางการปรับมากกว่า 1 แนวทาง โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 การกำหนดแผนการปรับปรุงการทำงาน

แผนการที่	รายละเอียดแนวทางที่ใช้	ประเภท
1	แนวทางที่ (1)	เชิงเดี่ยว
2	แนวทางที่ (2a)	เชิงเดี่ยว
3	แนวทางที่ (2b)	เชิงเดี่ยว
4	แนวทางที่ (2c)	เชิงเดี่ยว
5	แนวทางที่ (2d)	เชิงเดี่ยว
6	แนวทางที่ (3)	เชิงเดี่ยว
7	แนวทางที่ (1), แนวทางที่ (2a), แนวทางที่ (3)	เชิงผสม
8	แนวทางที่ (1), แนวทางที่ (2b), แนวทางที่ (3)	เชิงผสม
9	แนวทางที่ (1), แนวทางที่ (2c), แนวทางที่ (3)	เชิงผสม
10	แนวทางที่ (1), แนวทางที่ (2d), แนวทางที่ (3)	เชิงผสม

4. ผลการทดลอง

งานวิจัยทางการศึกษานี้ได้ทำการทดลองการจำลองสถานการณ์ตามแนวทางการแก้ปัญหาทั้งเชิงเดี่ยวและเชิงผสม รวมทั้งหมด 10 แผนการ ด้วยคอมพิวเตอร์ที่มีขนาด 3.30 GHz สำหรับ CPU และ 4.0 GB สำหรับ RAM โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปอาร์รินา (Arena) ซึ่งได้แสดงผลลัพธ์แต่ละแผนการในตารางที่ 7 และได้แสดงความแตกต่างของผลลัพธ์จากแต่ละแผนการ (Scenario) เปรียบเทียบกับผลลัพธ์ในปัจจุบันดังตารางที่ 8 โดยทั้งสองตารางให้ความสำคัญต่อ 2 ค่าตัวชี้วัด ได้แก่ 1) จำนวนผู้ป่วยที่ได้รับบริการเสร็จสิ้นออกจากระบบ (Number Out) และ 2) เวลาที่ผู้ป่วยแต่ละประเภทได้รับบริการอยู่ในระบบจนเสร็จสิ้น (Total Time Patient) ซึ่งค่าตัวชี้วัดทั้งสองสามารถบ่งบอกประสิทธิภาพของระบบการให้บริการนี้ได้ โดยเมื่อผู้ป่วยแต่ละรายได้รับบริการด้วยเวลาที่รวดเร็ว ก็จะสามารถทำให้ผู้ป่วยรายอื่นๆ มีโอกาสได้รับบริการได้มากขึ้น จำนวนผู้ได้รับบริการออกจากระบบมากขึ้น

ตารางที่ 7 ผลลัพธ์จากแบบจำลองตามแผนการต่างๆ

Scenario	Number Out (คน)	Total Time Patient (นาที)		
		Type 1	Type 2	Type 3
ปัจจุบัน	341	199.26	191.55	226.57
1	340	199.97	190.63	219.28
2	349	185.91	177.34	211.82
3	346	192.78	185.03	218.75
4	<u>351</u>	185.16	176.59	211.22
5	<u>351</u>	185.13	176.55	211.39
6	341	167.78	180.67	195.78
7	350	154.86	169.26	177.73
8	346	162.94	176.61	185.59
9	<u>351</u>	<u>153.78</u>	<u>168.02</u>	<u>177.44</u>
10	<u>351</u>	154.31	168.31	177.94

หมายเหตุ “ ” คือ ค่าผลลัพธ์ที่ดีที่สุดในแต่ละตัวชี้วัด

ถึงแม้ว่า ผลที่ได้จากการทดลองตามแผนการที่ 1 ยังไม่สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพการให้บริการได้ เนื่องจากมีจำนวนผู้ป่วยที่ได้รับบริการในแต่ละวัน คือ 340 คนต่อวัน ซึ่งลดลงจากแนวทางปัจจุบัน 1 คน ผู้ป่วยประเภทที่ 1 ใช้

เวลาในระบบทั้งหมด 199.97 นาทีต่อคน ซึ่งเพิ่มขึ้นจากแนวทางปัจจุบัน 0.71 นาที ผู้ป่วยประเภทที่ 2 ใช้เวลาในระบบทั้งหมด 190.63 นาทีต่อคน ซึ่งลดลงจากแนวทางปัจจุบัน 0.92 นาที ผู้ป่วยประเภทที่ 3 ใช้เวลาในระบบทั้งหมด 219.28 นาทีต่อคน ซึ่งลดลงจากแนวทางปัจจุบัน 7.29 นาที

ตารางที่ 8 ความแตกต่างของผลลัพธ์จากแผนการปัจจุบัน

Scenario	Number Out เพิ่มขึ้น (คน)	Total Time Patient ลดลง (นาที)		
		Type 1	Type 2	Type 3
1	-1	-0.71	0.92	7.29
2	8	13.35	14.21	14.75
3	5	6.48	6.52	7.82
4	10	14.10	14.96	15.35
5	10	14.13	15.00	15.18
6	0	31.48	10.88	30.79
7	9	44.40	22.29	48.84
8	5	36.32	14.94	40.98
9	10	45.48	23.53	49.13
10	10	44.95	23.24	48.63

อย่างไรก็ตาม สำหรับกลุ่มของแผนเชิงเดียว ได้แก่ แผนการที่ 4 และแผนการที่ 5 และในกลุ่มของแผนเชิงผสม ได้แก่ แผนการที่ 9 และแผนการที่ 10 สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพการให้บริการได้อย่างเหมาะสม เนื่องจากสามารถเพิ่มจำนวนผู้ป่วยที่ได้รับการจนเสร็จสิ้นได้ถึง 10 คน และทั้ง 4 แผนการนี้ยังสามารถทำให้ผู้ป่วยทุกประเภทที่เข้ารับบริการ ใช้เวลาในระบบน้อยกว่าผลลัพธ์ที่ได้จากแผนการปัจจุบันทั้งสิ้น

โดยเฉพาะอย่างยิ่ง แผนการที่ 9 ซึ่งถือเป็นแผนการที่มีประสิทธิภาพสูงสุด เนื่องจากมีจำนวนผู้ป่วยที่ได้รับการบริการในแต่ละวัน คือ 351 คนต่อวัน ซึ่งเพิ่มขึ้นจากแนวทางปัจจุบัน 10 คน ผู้ป่วยประเภทที่ 1 ใช้เวลาในระบบทั้งหมด 153.78 นาทีต่อคน ซึ่งลดลงจากแนวทางปัจจุบัน 45.48 นาที ผู้ป่วยประเภทที่ 2 ใช้เวลาในระบบทั้งหมด 168.02 นาทีต่อคน ซึ่งลดลงจากแนวทางปัจจุบัน 23.53 นาที ผู้ป่วยประเภทที่ 3 ใช้เวลาในระบบทั้งหมด 177.44 นาทีต่อคน ซึ่งลดลงจากแนวทางปัจจุบัน 49.13

นาที นอกจากนี้ แผนการที่ 9 ยังมีทุกค่าตัวชี้วัดที่ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับทุกแผนการอีกด้วย

5. สรุปและเสนอแนะ

ระบบแถวคอยการให้บริการของแผนกผู้ป่วยนอก โรงพยาบาลภุมวิศศึกษา โดยมุ่งเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพของการให้บริการ ได้รับการศึกษาในงานวิจัยนี้ เนื่องจากปัญหาการรอรับบริการของผู้ป่วยเป็นเวลานานจากจำนวนผู้ป่วยที่เพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง บทความนี้จึงเสนอแนวทางการปรับปรุงประสิทธิภาพการให้บริการผ่านการแสดงผลจากแบบจำลองสถานการณ์เสมือนจริงที่สร้างขึ้น

โดยงานวิจัยนี้ได้นำเสนอแนวทางหลัก 3 แนวทาง ซึ่งสามารถใช้ในการแก้ปัญหาตามสถานการณ์ต่างๆ ทั้งหมด 10 แผนการ และจากการทดลองจะเห็นได้ว่า แผนการที่ให้ผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด คือ แผนการที่ 9 ด้วยแนวทางที่ (1) การรวมจุดให้บริการเข้าด้วยกัน ร่วมกับแนวทางที่ (2c) การปรับตารางเวลาการทำงานของแพทย์ ภายใต้ข้อจำกัดจำนวนชั่วโมงแรงงาน คือ 34.5 ชั่วโมง ร่วมกับแนวทางที่ (3) การจัดเวลานัดของผู้ป่วยประเภทที่ 2 ให้มารับบริการในช่วงเวลา 12.00 น. เป็นต้นไป อย่างไรก็ตาม แผนการที่ 9 นี้ถือเป็นแผนเชิงผสมที่ต้องทำการปรับปรุงเปลี่ยนแปลงหลายส่วนงาน ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อพิจารณางบประมาณที่เกี่ยวข้องได้ ดังนั้น แผนการเชิงเดียว เช่น แผนการที่ 4 และแผนการที่ 5 จึงเป็นอีกแผนการที่สามารถถูกพิจารณาในการนำไปปฏิบัติได้ เนื่องจากให้ผลลัพธ์ที่ดีสำหรับจำนวนผู้ป่วยที่ได้รับการ

นอกจากนี้ การสรุปผลข้างต้นเป็นเพียงการนำเสนอแนวทางการปรับปรุงที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ในคอมพิวเตอร์เท่านั้น ซึ่งผู้ที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงประสิทธิภาพการให้บริการของโรงพยาบาลภุมวิศศึกษาสามารถนำไปใช้ประกอบการตัดสินใจโดยการพิจารณาเรื่องอื่นๆ ร่วมด้วย เช่น การวิเคราะห์ต้นทุน ผลสำรวจความพึงพอใจ และการวิเคราะห์สภาพทางสังคม เป็นต้น ซึ่งจะนำไปสู่แผนการปฏิบัติที่มีความเหมาะสม ชัดเจน และสมเหตุสมผลมากขึ้น มากกว่านั้น แผนที่น่าสนใจในบทความนี้ประกอบด้วย การปรับปรุงทั้งในระดับสถานงาน

และระดับนโยบาย ดังนั้น การนำแผนไปสู่การปฏิบัติจริง ต้องได้รับความเห็นชอบจากผู้บริหารด้วย

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณโรงพยาบาลการศึกษา และเจ้าหน้าที่ที่ให้ข้อมูลอันเป็นประโยชน์ ซึ่งทำให้การศึกษานี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] ญัฐพล ขวະศิริ, “การปรับปรุงประสิทธิภาพการให้บริการของผู้ป่วยแผนกโรคหัวใจโดยใช้การจำลองสถานการณ์ กรณีศึกษาสถาบันสุขภาพเด็กแห่งชาติมหาราชินี,” โครงการวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย, 2554.
- [2] ดวงใจ ทาแก้ว และพัฒน์พงษ์ แสงหัตถวัฒน์, “การปรับปรุงประสิทธิภาพการให้บริการผู้ป่วยกรณีศึกษา : แผนกอายุรกรรม,” การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ ประจำปี 2555, เพชรบุรี, 2555, หน้า 73-82.
- [3] ประชาสันต์ แว่นไธสง, “การลดระยะเวลาการให้บริการสำหรับโรงพยาบาลทางจิตเวชด้วยเทคนิคการจำลอง,” วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา, ประเทศไทย, 2555.
- [4] ศศิวรรณ รัตนอุบล และชานินทร์ ศรีสุวรรณ, “การจำลองสถานการณ์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการให้บริการของคลินิกกุมารเวชและอายุรกรรม ตึกผู้ป่วยนอก โรงพยาบาลพัทลุง,” วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง, ปีที่ 22, ฉบับที่ 1, หน้า 107-116, 2556.
- [5] ยลดา โฉมยา และอุดม จันทร์จรัสสุข, “การปรับปรุงประสิทธิภาพแถวคอยโดยใช้การจำลองสถานการณ์ กรณีศึกษา : ระบบการให้บริการผู้ป่วยนอกโรงพยาบาลลำลูกกา,” วารสารลาดกระบัง ปีที่ 30, ฉบับที่ 1, หน้า 43-48, 2556.
- [6] ชานินทร์ ศรีสุวรรณ, พัชรกัญญา บำรุง พัฒน์ โตสินธ์ รักชนก อุทศรี และอัญจิรา วรยศ, “การจำลองสถานการณ์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการให้บริการของแผนกอายุรกรรม ตึกผู้ป่วยนอกโรงพยาบาลพุทธโสธร,” การประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 53, กรุงเทพมหานคร, 2558, หน้า 259-266.
- [7] พีรธัช ศักดิ์อุดมไชย วิชญ์พล อังคนาวัฒน์ วีรภัทร ตั้งจักรวรานนท์ กลมวัฒน์ สุขสุเมธ และสิริง ปริชา นนท์, “การจัดอัตรากำลังพยาบาลในแผนกฉุกเฉิน กรณีศึกษาแผนกฉุกเฉิน โรงพยาบาลธรรมศาสตร์เฉลิมพระเกียรติ,” วารสารไทยการวิจัยดำเนินงาน ปีที่ 3, เล่มที่ 1, 2558, หน้า 1-12.
- [8] T. Hirisatja, B. Lila, and R. Chantrasa, “Healthcare operations improvement with an integration of discrete-event simulation and lean thinking,” in International conference on Innovative Engineering Technologies (ICIET 2014), Bangkok, 2014, pp. 85-91.
- [9] A. Clissold, J. Filar, M. Mackay, S. Qin, and D. Ward, “Simulating hospital patient flow for insight and improvement,” in The 8th Australasian Workshop on Health Informatics and Knowledge Management (HIKM 2015), Sydney, 2015, pp. 15-23.

แบบจำลองการอบแห้งพริกไทยด้วยเทคนิคเจ็ตสเปาต์เต็ดเบดโดยใช้ ระบบอนุมานฟัซซี่โครงข่ายปรับตัวได้ Modeling Pepper Drying by Jet Spouted Bed Technique Using ANFIS System

กิตติ สถาพรประสารณ์¹โพธิ์ทอง ปราณิตพลกรัง^{2*}

¹ผู้ช่วยศาสตราจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

²อาจารย์ สาขาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม(ต่อเนื่อง) คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

Kitti Sathapornprasath¹ Pothong Praneetpolkrang^{2*}

¹Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering

Srinakharinwirot University

²Instructor, Department of Industrial Technology (Continuous), Faculty of Industrial Technology

Rambhai BarniRajabhat University

*Corresponding author: Email:pttmbj@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อหาแบบจำลองการอบแห้งพริกไทยด้วยเครื่องอบแห้งแบบเจ็ตสเปาต์เต็ดเบดทำการทดสอบ โดยหาแบบจำลองที่เหมาะสมระหว่างแบบจำลองเอมพิริคัลกับแบบจำลอง ANFIS ทดลองอบแห้งพริกไทยภายใต้อุณหภูมิอบแห้งคือ 70, 80 และ 90°C ความเร็วลมร้อน คือ 20 m/sec และความสูงของชั้นพริกไทย 250 mm โครงสร้าง ANFIS ประกอบด้วยตัวแปรอินพุต คือ อุณหภูมิลมร้อน และเวลาในการอบแห้ง ตัวแปรเอาต์พุต คือ อัตราส่วนความชื้นผลการวิเคราะห์พบว่า แบบจำลอง ANFIS มีความเหมาะสมมากกว่าแบบจำลองเอมพิริคัลโดย แบบจำลอง ANFIS แบบที่ 8 มีความเหมาะสมมากที่สุด โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9991 และ RMSE เท่ากับ 0.0032 ตามลำดับ ในส่วนของแบบจำลองเอมพิริคัล แบบจำลองของ Page (Page model) มีความเหมาะสมมากที่สุดสำหรับการอบแห้งพริกไทย โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9983 และ RMSE เท่ากับ 0.0067 ตามลำดับ

คำสำคัญ: เจ็ตสเปาต์เต็ดเบด แบบจำลองคณิตศาสตร์ ระบบอนุมานฟัซซี่โครงข่ายปรับตัวได้ พริกไทย

ABSTRACT

This research aimed to determine the drying model of pepper undergoing a jet spouted bed drying process. A comparative study was executed among experimental results and empirical models and adaptive- network- based fuzzy inference system (ANFIS) . Pepper was dried under drying temperatures of 70, 80 and 90 °C, hot air velocity 20 m/s, bed height 250 mm. ANFIS input were air drying temperature and drying time and output was moisture ratio. The results showed that, the

ANFIS had better capability than the empirical models. The best ANFIS model was model no.8 with the coefficient of determination (R^2) and root-mean-square error (RMSE) are 0.9991 and 0.0032 respectively. Among empirical drying models considered, the page model, was found to best describe the drying behavior of pepper, the coefficient of determination (R^2) and root-mean-square error (RMSE) are 0.9983 and 0.0067 respectively.

Keyword: Jet spouted bed, mathematical model, adaptive neuro-fuzzy inference systems, pepper.

1. บทนำ

พริกไทย (*Piper nigrum* L.) พริกไทยเป็นเครื่องเทศที่ใช้กันแพร่หลายมาเป็นเวลานาน เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งของไทย มีปลูกมากในจังหวัดจันทบุรี มีพื้นที่ปลูกคิดเป็นร้อยละ 95 ของประเทศ ปริมาณส่งออก 3,180 ตัน ในปี 2553 คิดเป็นมูลค่า 124 ล้านบาท [1], [2] พริกไทยหลังเก็บเกี่ยวนั้นมีความจำเป็นต้องทำการลดความชื้นเพื่อป้องกันการเน่าเสีย โดยทั่วไปเกษตรกรจะทำการตากแห้งใช้เวลาประมาณ 4-5 วัน [1] ในการใช้แสงแดดสำหรับการตากแห้งเป็นวิธีการที่ง่ายและมีค่าใช้จ่ายน้อย แต่ปัญหาสำหรับวิธีการตากแห้งก็คือไม่สามารถที่จะควบคุมการผลิตและคุณภาพได้ [1] ดังนั้นเทคโนโลยีการอบแห้งเป็นกระบวนการแปรรูปผลผลิตจึงได้รับความนิยมและใช้กันอย่างแพร่หลาย วัตถุประสงค์ของการอบแห้งนั้นคือ ลดการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์และการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลผลิตนั้นเพื่อยืดอายุในการเก็บรักษา ลดน้ำหนักและสะดวกในการขนส่ง [3]-[4] ซึ่งกระบวนการอบแห้งจะมีการถ่ายเทความร้อนและถ่ายเทมวลสารที่จะเกิดขึ้นพร้อมกัน กระบวนการที่ซับซ้อนกันนี้จะขึ้นอยู่กับปัจจัยที่ต่างกัน เช่น อุณหภูมิและความเร็วลมร้อน อัตราการไหลของอากาศ ลักษณะทางกายภาพและความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ พื้นที่และความดัน [3], [5], [23]

การอบแห้งเมล็ดพืชด้วยเทคนิคสเปาต์เต็ดเบดเป็นการอบแห้งวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ในปัจจุบัน แต่เครื่องอบแห้งแบบสเปาต์เต็ดเบดแบบดั้งเดิมนั้นยังมีข้อจำกัดอยู่หลาย

ประการ เช่น ความหนาแน่นของเบดสูงทำให้การกระจายตัวและการสัมผัสของอนุภาคกับอากาศร้อนไม่ดีเท่าที่ควร สัดส่วนช่องว่างระหว่างบริเวณวงแหวนและบริเวณสเปาต์แตกต่างกันมาก มีอัตราการหมุนเวียนของอนุภาคต่ำ [6]-[9] เครื่องอบแห้งแบบเจ็ตสเปาต์เต็ดเบด (Jet spouted bed) เป็นเครื่องอบแห้งชนิดหนึ่งที่ถูกพัฒนาขึ้น เพื่อแก้ไขข้อจำกัดของเครื่องอบแห้งแบบสเปาต์เต็ดเบดแบบดั้งเดิม [6]-[12] และได้นำไปประยุกต์ใช้กับการอบแห้งผลิตภัณฑ์อาหารและผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรหลายชนิด ซึ่งผลการอบแห้งที่ได้ก็อยู่ในระดับที่น่าพอใจ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อพิจารณาในแง่คุณภาพของผลิตภัณฑ์ [8], [12]

การทราบพฤติกรรมในการอบแห้งดังเช่น อัตราส่วนความชื้นเป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบจำลองกระบวนการอบแห้งให้มีความเหมาะสม [13] ในปัจจุบันนั้นได้มีการนำเทคนิคต่าง ๆ มาใช้ในการทำนายหรือพยากรณ์ เช่น การทำนายโดยใช้วิธีการทางสถิติ การสร้างแบบจำลองโดยใช้นิวโรฟัซซี และการใช้โครงข่ายประสาทเทียม เป็นต้น [14] ซึ่งแบบจำลองนิวโรฟัซซียังเป็นแบบจำลองหนึ่งที่นิยมนำมาใช้ในปัจจุบันในหลาย ๆ ด้าน [14]-[21], [23], [29]-[30] และได้นำมาใช้ทำนายพฤติกรรมในการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตร [18] ดังนั้นบทความวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์แบบเอมพิริคัลและ ANFIS ในการทำนายอัตราส่วนความชื้นการอบแห้งพริกไทยด้วยเทคนิคเจ็ตสเปาต์เต็ดเบด และเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาการอบแห้งเทคนิคเจ็ตสเปาต์เต็ดเบดต่อไป

2. แบบจำลองคณิตศาสตร์

2.1 แบบจำลองในรูปของสมการเอมพิริคัล (Empirical equation)

แบบจำลองการอบแห้งเป็นการจำลองการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในระหว่างการอบแห้ง ซึ่งจะช่วยในการออกแบบระบบการอบแห้งต่างๆ [3]-[5], [13], [21], [23] แบบจำลองในรูปของสมการเอมพิริคัล เป็นแบบจำลองการอบแห้งที่นิยมใช้ในการศึกษาอาหารหรือวัสดุชีวภาพจำพวกผักและผลไม้ [21] สมการเอมพิริคัลคือสมการที่สร้างจากแนวโน้มข้อมูลการทดลองสำหรับวัสดุที่ใช้อบแห้งในช่วงอุณหภูมิ ความเร็วลมและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้งหนึ่งๆ [5]

2.2 ระบบอนุมานฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้ (Adaptive neural fuzzy inference systems, ANFIS)

ANFIS เป็นการประยุกต์ผสมผสาน (Hybrid algorithm) วิธีการโครงข่ายประสาทเทียมและโมเดลฟัซซีเข้าด้วยกัน ทำให้สามารถนำข้อดีของแต่ละวิธีการมาสนับสนุนกันและช่วยลดข้อจำกัดของแต่ละวิธีการ [14]-[20], [29], [30] การปรับตัวเรียนรู้รูปแบบของข้อมูลเป็นข้อดีของโครงข่ายประสาทเทียม แต่มีข้อจำกัดในเรื่องการอธิบายการปรับเรียนรู้ภายในที่ยากต่อการสื่อเพื่อทำความเข้าใจเมื่อเทียบกับในมุมมองของมนุษย์ทั่วไปหรือในภาษาสื่อทั่วไป [30] ในขณะที่ตรรกะแบบฟัซซี (Fuzzy logic) มีจุดเด่นตรงที่มีการใช้เหตุผลในเชิงตรรกะเหมือนความคิดของมนุษย์ สามารถอธิบายการตัดสินใจได้จากกฎฟัซซี

และสามารถใช้กับข้อมูลที่คลุมเครือได้ซึ่งมีการพัฒนาจากการตัดสินใจแบบตรรกะเชิงทวินัย (Crisp logic) ด้วยการเปรียบเทียบกฎแบบแบบถ้า-แล้ว (If-then) แต่ข้อเสียของฟัซซีลอจิกคือไม่สามารถเรียนรู้และปรับแต่งกฎต่าง ๆ ด้วยตัวเอง [30] โมเดลฟัซซีพื้นฐานที่ได้รับการอ้างอิงและเป็นที่ยอมรับคือ โมเดลฟัซซีแมนดานิ (Mandani fuzzy) และโมเดลฟัซซีซูเกโน (Sugeno fuzzy) ทั้งสองวิธีการมีข้อแตกต่างหลักที่ผลค่าเอาต์พุตฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Output membership function) ซึ่งวิธีหลังสามารถเลือกได้ทั้งฟังก์ชันเชิงเส้นหรือเลือกเป็นค่าคงที่ได้ [30]

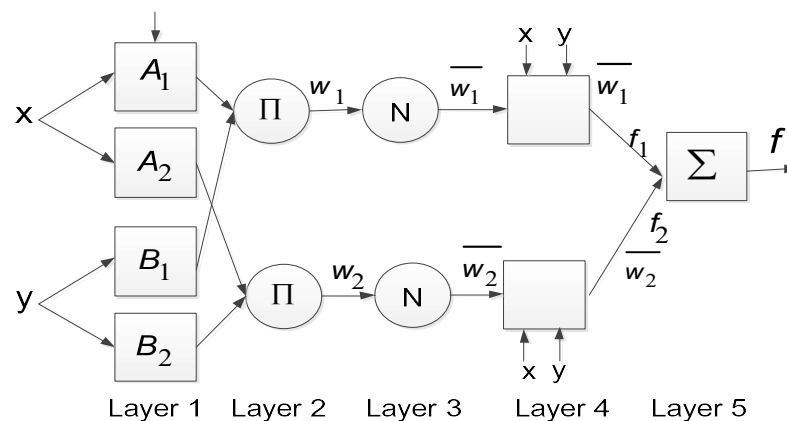
2.3 ระบบอนุมานฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้ (Adaptive neural fuzzy inference systems, ANFIS)

โมเดล ANFIS ที่ได้รับการพัฒนามาจากโมเดลฟัซซีซูเกโน ซึ่งใช้ในงานวิจัยนี้มีขั้นตอนการฝึกเรียนรู้ก่อนใช้งาน สามารถแสดงรูปแบบของโครงสร้างออกเป็น 5 ชั้น [20], [30] แสดงดังรูปที่ 1 ประกอบไปด้วยตัวแปร 2 อินพุต x และ y และตัวแปร 1 เอาต์พุต f โดยทั่วไปหลักปฏิบัติเซตของ 2 ฟัซซี คือหลัก if-then สามารถแสดงเป็น [15]-[20], [29]-[30]

Rule 1: If x is A_1 and y is B_1
then $f_1 = p_1x + q_1y + r_1$

Rule 2: If x is A_2 and y is B_2
then $f_2 = p_2x + q_2y + r_2$

เมื่อ p_1, q_1, r_1, p_2, q_2 และ r_2 เป็นพารามิเตอร์ผลลัพธ์



รูปที่ 1 โครงสร้างของ ANFIS [15]

โครงสร้างของ ANFIS ดังรูปที่ 1 สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้ [15]-[20], [29]

ขั้นที่ 1 ผลลัพธ์ของขั้นที่ 1 นี้เป็นค่าความเป็นสมาชิกและตัวแปรภาษา ทุกหน่วยย่อย ในขั้นนี้คือการปรับหน่วยย่อยเอาท์พุตกำหนดโดย

$$O_{1,i} = \mu_{A_i}(x), i=1,2 \quad (1)$$

หรือ

$$O_{1,i} = \mu_{B_{i-2}}(y), j=3,4 \quad (2)$$

เมื่อ x หรือ y คือ อินพุตของหน่วยย่อย และ A_i หรือ B_{i-2} แทนค่าตัวแปรภาษา (Linguistic variable) เอาท์พุตของขั้นนี้คือฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership function) งานวิจัยนี้เลือกใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบ Gaussian membership function สามารถแสดงในสมการ

$$\mu_{A_i}(x) = \exp\left(\frac{-(x - c_i)^2}{2\sigma_i^2}\right) \quad (3)$$

โดยที่ σ_i และ c_i คือ เซตพารามิเตอร์ (Premise parameters)

ขั้นที่ 2 ในขั้นที่ 2 นี้จะเป็นการหาค่าฟิซซี (Firing strength) จากข้อตั้งของกฎแต่ละข้อทุกหน่วยย่อยในขั้นที่ถูกกำหนดด้วย Π ซึ่งคือการคูณกันของสัญญาณที่เข้ามาและเป็นเอาท์พุตตัวอย่างเช่น

$$O_{2,i} = w_i = \mu_{A_i}(x) \cdot \mu_{B_i}(y), i=1,2 \quad (4)$$

ขั้นที่ 3 ทุกๆหน่วยย่อยในขั้นที่ 3 จะเป็นการคำนวณหาอัตราส่วนระหว่างค่าฟิซซีจากข้อตั้งของกฎแต่ละข้อกับผลรวมของค่าฟิซซีจากข้อตั้งของทุกกฎเรียกผลลัพธ์ที่ได้จากขั้นนี้ว่า Normalized firing strength

$$O_{3,i} = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, i=1,2 \quad (5)$$

ขั้นที่ 4 ทุกหน่วยย่อยในขั้นนี้ คือหน่วยย่อยปรับตัวได้กับฟังก์ชันหน่วยย่อย

$$O_{4,i} = \bar{w}_i \cdot f_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, i=1,2 \quad (6)$$

เมื่อ w_i คือ เอาท์พุตของขั้นที่ 3 และ $\{p_i, q_i, r_i\}$ เป็นเซตพารามิเตอร์ พารามิเตอร์ในขั้นนี้เรียกว่าพารามิเตอร์ที่เป็นผลลัพธ์ (Consequent parameters)

ขั้นที่ 5 ขั้นนี้จะมียู่อหน่วยย่อยเดียว กำหนดโดย S ซึ่งเอาท์พุตที่ได้คือการรวมกันของสัญญาณเข้ามาทั้งหมด

$$O_{5,i} = \sum_i \bar{w}_i \cdot f_i = \frac{\sum_i w_i \cdot f_i}{\sum_i w_i} \quad (7)$$

จากโครงสร้างของ ANFIS เมื่อค่าพารามิเตอร์หลักฐานถูกกำหนดไม่ให้เกิดเปลี่ยนแปลง เอาท์พุตทั้งหมดสามารถแสดงในรูปของผลรวมเชิงเส้นของพารามิเตอร์ที่เป็นผลลัพธ์ ในสัญลักษณ์เอาท์พุต f

$$f = (\bar{w}_1 x) p_1 + (\bar{w}_1 y) q_1 + (\bar{w}_2 y) q_2 + (\bar{w}_2) r_2 + (\bar{w}_1) r_1 + (\bar{w}_2 x) p_2 \quad (8)$$

ซึ่งคือความเป็นเชิงเส้นในพารามิเตอร์ที่เป็นผลลัพธ์ p_1, q_1, r_1, p_2, q_2 และ r_2 เป็นเซตของ Consequent parameters

3. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการวิจัย

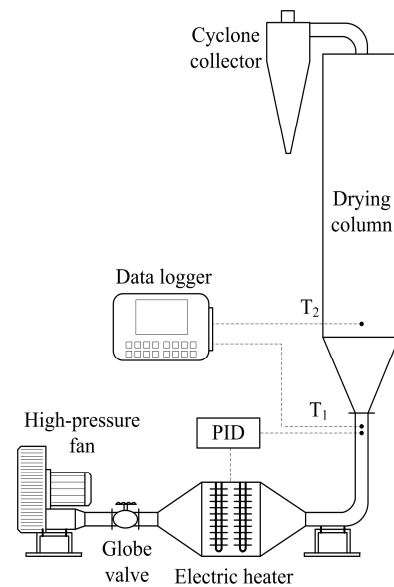
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เมล็ดของพริกไทยสดซึ่งมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 2.56 ± 0.23 kg/kg (d.b.) [22] เป็นวัสดุตัวอย่างในการทดลองอบแห้ง และจะถูกเก็บที่อุณหภูมิ 4°C ก่อนการทดลองอบแห้งแต่ละครั้ง พริกไทยสดจะถูกนำมาผึ่งลมทิ้งไว้จนกระทั่งมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง

ทั้งนี้เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการควบแน่นของไอน้ำในช่วงแรกของการอบแห้ง

3.2 อุปกรณ์สำหรับทดลอง

เครื่องอบแห้งแบบเจ็ตสเปาต์เตดเบตที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 2 ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ 1) พัดลมแรงดันสูง (High-pressure fan) (CRELEC, HB-329, Taiwan) ขนาด 2.2 kW ซึ่งทำหน้าที่ป้อนอากาศเข้าสู่ระบบ 2) โกลบวาล์ว (Globe valve) ซึ่งทำหน้าที่ปรับความเร็วของอากาศที่เข้าสู่ระบบให้ได้ค่าที่เหมาะสม โดยความเร็วของอากาศจะถูกวัดด้วยท่อปีโดท์ (Pitot tube) ซึ่งต่ออยู่กับอุปกรณ์สำหรับประมวลผล (TESTO, 435-4, Germany) 3) ชุดกำเนิดความร้อนด้วยไฟฟ้า (Electric heater) ขนาด 15 kW ซึ่งทำหน้าที่เพิ่มอุณหภูมิให้กับอากาศที่ใช้เป็นตัวกลางในการอบแห้ง 4) หอบแห้ง (Drying column) ทำจากเหล็กสแตนเลส (Stainless steel) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 125 mm และสูง 800 mm อากาศร้อนที่ผ่านชุดทำความร้อนจะไหลเข้าหอบแห้งที่ด้านล่างผ่านช่องทางเข้าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 63 mm ซึ่งเชื่อมต่อกับหอบแห้งด้วยกรวยสแตนเลสที่มีมุมเอียง 20 องศา 5) ไซโคลนดักฝุ่น (Cyclone collector) ซึ่งทำหน้าที่แยกผลิตภัณฑ์ออกจากอากาศร้อน 6) ชุดควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller) แบบ PID (SHINKO, JCS-33A, Japan) ซึ่งมีความแม่นยำในการควบคุม $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ชุดควบคุมนี้จะทำงานโดยอาศัยอุณหภูมิของอากาศที่เข้าหอบแห้ง (T_1) เป็นตัวควบคุมการทำงานของชุดทำความร้อน 7) เครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Data logger) (HIOKI, 8421-52, Japan) 8) เทอร์โมคัปเปิลชนิด K (Type K Thermocouples) ซึ่งทำหน้าที่ส่งค่าอุณหภูมิที่วัดได้ไปเก็บไว้ที่เครื่องบันทึกอุณหภูมิ หุ้มฉนวนความร้อนให้กับอุปกรณ์ของเครื่องอบแห้งแบบเจ็ตสเปาต์เตดเบตไว้ทั้งหมด เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนให้กับอากาศแวดล้อม



รูปที่ 2 แสดงเครื่องอบแห้งแบบเจ็ตสเปาต์เตดเบต

3.3 วิธีการทดลอง

การทดลองอบแห้งจะกระทำที่อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าหอบแห้ง 3 ระดับกล่าวคือ 70, 80 และ 90°C โดยใช้ความสูงเบตของเมล็ดพริกไทย 250 mm ซึ่งที่ระดับความสูงเบตดังกล่าวจะต้องใช้ความเร็วต่ำสุดของอากาศในท่อทางเข้าหอบแห้งประมาณ 20 m/s เพื่อที่จะทำให้เบตเกิดการสเปาต์อย่างสม่ำเสมอ ในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง น้ำหนักของพริกไทยจะถูกวัดอย่างต่อเนื่อง (ทุก ๆ 10 นาที) สำหรับการทดลองเพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งพริกไทยนั้น การอบแห้งจะดำเนินไปจนกระทั่งความชื้นของพริกไทยไม่เปลี่ยนแปลง (สังเกตได้จากมวลมีค่าคงที่) โดยความชื้นในสภาวะดังกล่าวถือเป็นความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content) ของพริกไทยที่เงื่อนไขการทดลองนั้นๆ โดยแต่ละเงื่อนไขการอบแห้งจะทำการทดลอง 3 ครั้ง

3.4 แบบสมการทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัล

รูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัลที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังตารางที่ 1

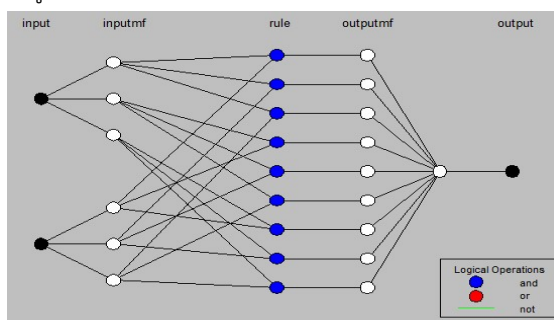
ตารางที่ 1 สมการทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัล [4], [13], [18], [21], [24]-[28]

No	Model name	Model
1	Newton	$MR = \exp(-kt)$
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$
3	Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
4	Modified Page	$MR = \exp(-kt)^n$

การหารูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัลที่เหมาะสมสำหรับวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งได้ใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบสมการถดถอยที่ไม่เชิงเส้นโดยใช้โปรแกรม MATLAB [21]

3.5 โครงสร้างของ ANFIS

สำหรับโครงสร้างของ ANFIS ที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 โครงสร้างของ ANFIS

ตารางที่ 2 แสดงจำนวน Membership Function ตัวแปรอินพุต

ลำดับ	อุณหภูมิ (°C) Range[70 90]	เวลา (min) Range[0 270]
1	3	3
2	3	4
3	3	5
4	4	3
5	4	4
6	4	5
7	5	3
8	5	4
9	5	5

โครงสร้างของ ANFIS ที่ใช้ในงานวิจัยเลือกใช้โมเดลฟัซซี่ Sugeno อันดับหนึ่ง ตัวแปรอินพุตที่ใช้มี 2 ค่า คือ อุณหภูมิ และเวลา และเอาต์พุต 1 ค่า คือ อัตราส่วนความชื้น ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเป็นแบบ Gaussian membership function ฟังก์ชันเอาต์พุตเป็นแบบ Linear และใช้กระบวนการเรียนรู้แบบผสม (Hybrid algorithm) โดยใช้โปรแกรม MATLAB ในการจำลองจำนวน Membership function ตัวแปรอินพุตที่ใช้เพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสมแสดงดังตารางที่ 2 ในการเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดนั้น จะพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determine, R^2) ซึ่งจะต้องมีค่ามากกว่าที่สุด หรือเข้าใกล้ 1 มากที่สุด และค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error, RMSE) ซึ่งจะต้องมีค่าต่ำที่สุด [4], [13], [21], [24] แสดงดังสมการที่ (9)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (MR_{pred,i} - MR_{exp,i})^2}{n}} \quad (9)$$

เมื่อ $MR_{exp,i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลอง

$MR_{pred,i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลอง

n คือ จำนวนข้อมูล

4. ผลการทดลอง

4.1 แบบจำลองคณิตศาสตร์การอบแห้งพริกไทยด้วยเครื่องอบแห้งแบบเจ็ดสเปาต์เตี๊ยะเบด

จากผลการทดลองการอบแห้งเมล็ดพริกไทยที่ได้นำมาวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งดัชนีบ่งชี้ความสามารถในการทำนายค่าความชื้นคือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) และ RMSE เป็นค่าทางสถิติที่ใช้เลือกแบบจำลองที่เหมาะสม [12], [20] ดังตารางที่ 3 ผลวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบจำลองเอมพิริคัลกับผลการทดลองอบแห้งที่อุณหภูมิ 70-90°C

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองเอมพีริคัล

No	Model name	R ²	RMSE
1	Newton	0.9821	0.0371
2	Page	0.9983	0.0067
3	Henderson and Pabis	0.9882	0.0304
4	Modified Page	0.9824	0.0375

ตารางที่ 4 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองต่างๆ

Temp. (°C)	Model constants	R ²	RMSE
Newtonmodel			
70 °C	k=0.01186	0.9847	0.0381
80 °C	k = 0.01704	0.9811	0.0414
90 °C	k = 0.02462	0.9840	0.0350
Page model			
70 °C	k=0.003677, n = 1.254	0.9986	0.0118
80 °C	k = 0.003758, n = 1.354	0.9965	0.0067
90 °C	k = 0.003983, n = 1.363	0.9987	0.0049
Henderson and Pabis model			
70 °C	a = 1.08, k =0.01275	0.9909	0.0298
80 °C	a = 1.091, k =0.01842	0.9877	0.0340
90 °C	a = 1.082, k = 0.02637	0.9889	0.0296
Modified Page model			
70 °C	k = 0.6806, n = 0.01742	0.9847	0.0387
80 °C	k = 0.03867, n = 0.4408	0.9811	0.0422
90 °C	k = 0.3499, n = 0.07037	0.9840	0.0356

ในตารางที่ 3 จะพบว่าแบบจำลองของ Page (Page model) มีความเหมาะสมในการทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของพริกไทยได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิอบแห้งที่ 70-90 °C เนื่องจากมีค่า R² สูงที่สุด คือ 0.9983 และค่า RMSE ต่ำสุด คือ 0.0067 และค่าความสัมพันธ์ของแบบจำลองกับผลการทดลองทั้ง 4 แบบ มีค่า R² อยู่ในช่วง 0.9821-0.9983 และค่า RMSE อยู่ในช่วง 0.0067-0.0375 ตารางที่ 4 แสดงค่าพารามิเตอร์ของของแบบจำลองที่อุณหภูมิ 70-90 °C

จากตารางที่ 3 และตารางที่ 4 จะพบว่าผลการคำนวณโดยใช้สมการอบแห้งตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page สามารถทำนายผลการทดลองได้ดีที่สุด ดังนั้นจึงได้นำค่าคงที่ k และ n มาหาความสัมพันธ์กับตัวแปรอุณหภูมิ จะได้แบบจำลองสำหรับทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของพริกไทยในทุกอุณหภูมิอบแห้ง ดังสมการที่ (10)

$$\text{Page model ; } MR = \exp(-kt^n) \quad (10)$$

เมื่อค่า k และ n เขียนความสัมพันธ์เป็นฟังก์ชันอุณหภูมิ (T) ในรูปแบบสมการเชิงเส้นได้ดังนี้

$$k = 0.003 + 1.53 \times 10^{-5} T \quad ; R^2 = 0.931$$

$$n = 0.888 + 0.005 T \quad ; R^2 = 0.811$$

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้ ANFIS ตาม Membership function ตัวแปรอินพุต

ลำดับ	อุณหภูมิ	เวลา	R ²	RMSE
1	3	3	0.9865	0.0356
2	3	4	0.9874	0.0315
3	3	5	0.9907	0.0089
4	4	3	0.9913	0.0092
5	4	4	0.9962	0.0080
6	4	5	0.9955	0.0083
7	5	3	0.9982	0.0070
8	5	4	0.9991	0.0032
9	5	5	0.9989	0.0056

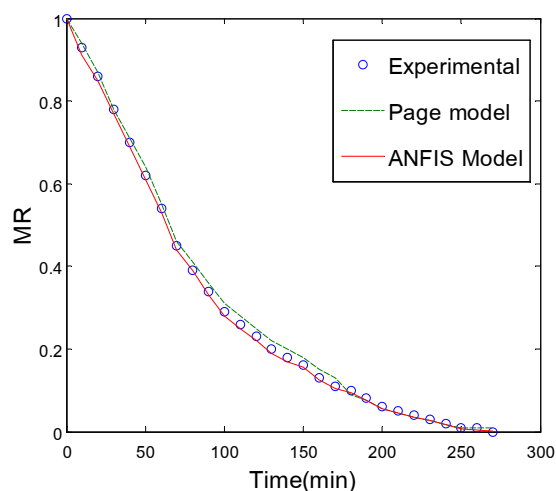
ในตารางที่ 5 แสดงผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้ ANFIS ตาม Membership function ตัวแปรอินพุตแบบจำลอง ANFIS แบบที่ 8 ที่มีจำนวนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกตัวแปรอินพุต อุณหภูมิเท่ากับ 5 และ ตัวแปรอินพุต เวลา เท่ากับ 4 มีความเหมาะสมในการทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของพริกไทยได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิอบแห้งที่ 70-90 °C เนื่องจากมีค่า R^2 สูงที่สุด คือ 0.9991 และค่า RMSE ต่ำสุด คือ 0.0032 และผลวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้ ANFIS ทั้ง 8 แบบ พบว่ามีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.9865-0.9991 และค่า RMSE อยู่ในช่วง 0.0032-0.0356 ตารางที่ 6 แสดงเปรียบเทียบผลที่ได้จากแบบจำลองเอมพีรีคัลกับ ANFIS ซึ่งจะพบว่า แบบจำลอง ANFIS ให้ผลวิเคราะห์มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองจริงมากกว่าแบบจำลองของ Page เนื่องจากมีค่า R^2 สูงมากกว่า และค่า RMSE ต่ำ

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบผลของแบบจำลองเอมพีรีคัลกับ ANFIS

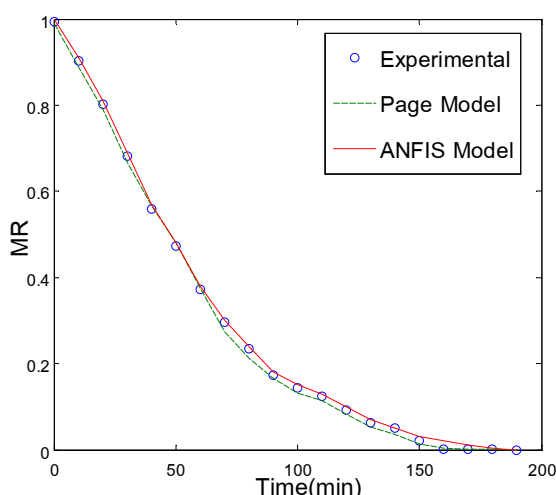
No	Model Name	R^2	RMSE
1	Page model	0.9983	0.0067
2	ANFIS model	0.9991	0.0032

4.2 เปรียบเทียบแบบจำลองกับผลการทดลองอบแห้งเมล็ดพริกไทย

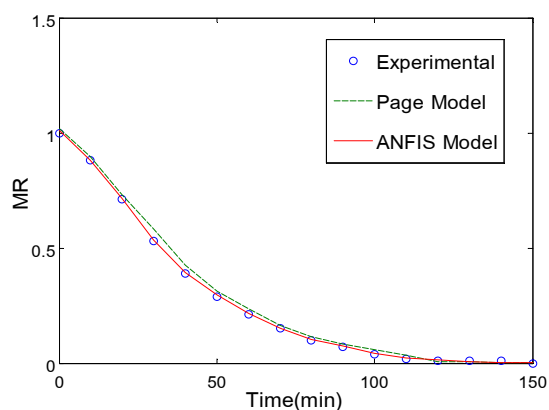
จากผลการทดลองการอบแห้งเมล็ดพริกไทยด้วยเครื่องอบแห้งแบบเจ็ดสเปาต์เต็ดเบดที่อุณหภูมิ 70-90 °C แสดงดังรูปที่ 4-6 พบว่าในช่วงแรกอัตราส่วนการลดลงของความชื้นในเมล็ดพริกไทยลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากภายในเมล็ดมีความชื้นสูง ทำให้การถ่ายเทมวลของน้ำมายังผิวนอกเป็นไปอย่างรวดเร็ว [11], [21] เมื่อพิจารณาอิทธิพลอุณหภูมิลรอนที่มีต่ออัตราส่วนการลดความชื้นจากรูปที่ 4-6 พบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะมีอัตราการลดความชื้นที่สูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งยังส่งผลให้เวลาในการอบแห้งลดลง สอดคล้องกับผลการอบแห้งผลิตภัณฑ์เกษตรอื่นๆ [13]-[21], [24]-[26] จากผลการทดลองจะพบว่าอุณหภูมิอบแห้งมีอิทธิพลเป็นอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของพริกไทย



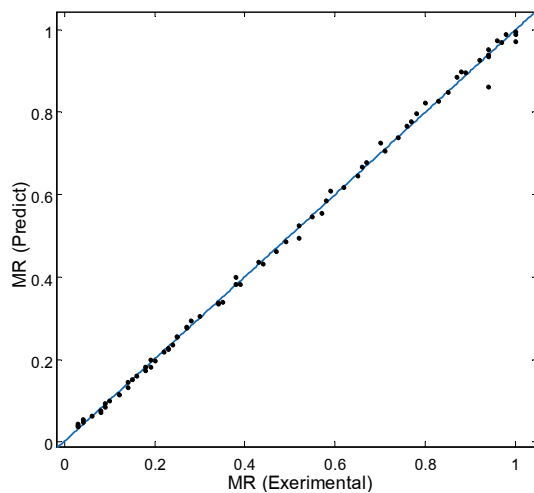
รูปที่ 4 แสดงผลการทำนายอัตราส่วนความชื้นการอบแห้งพริกไทยที่อุณหภูมิ 70 °C



รูปที่ 5 แสดงผลการทำนายอัตราส่วนความชื้นการอบแห้งพริกไทยที่อุณหภูมิ 80 °C



รูปที่ 6 แสดงผลการทำนายอัตราส่วนความชื้นการอบแห้งพริกไทยที่อุณหภูมิ 90 °C



รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลการทดลองและผลการคำนวณจากแบบจำลอง ANFIS

และจากรูปที่ 4-6 แสดงผลที่ได้จากการคำนวณทั้งจากแบบจำลองเอมพิริคัลและของ ANFIS สำหรับการทำนายอัตราส่วนความชื้นจะพบว่ามีค่าที่ใกล้เคียงและมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน ในรูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลการทดลองและผลการคำนวณจากแบบจำลอง ANFIS สำหรับการอบแห้งพริกไทยด้วยเครื่องอบแห้งแบบเจ็ตสเปาต์เด็ตเบด ซึ่งสามารถให้ผลการทำนายความชื้นได้ดี

5. สรุปผลการทดลอง

บทความวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์แบบเอมพิริคัลและ ANFIS ในการทำนายอัตราส่วนความชื้นการอบแห้งพริกไทยด้วยเทคนิคเจ็ตสเปาต์เด็ตเบด ทดลองอบแห้งอุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าหอบแห้งที่ 70, 80 และ 90 °C โดยใช้ความสูงเบดของเมล็ดพริกไทย 250 mm ความเร็วของอากาศประมาณ 20 m/s จากผลการทดลองพบว่า ค่ารวมทั้งจากแบบจำลองเอมพิริคัลและ ANFIS สามารถทำนายอัตราส่วนความชื้นได้ดี มีค่าใกล้เคียงและมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน ผลวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบจำลองเอมพิริคัลทั้ง 4 แบบกับผลการทดลอง พบว่ามีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.9821-0.9983 และค่า RMSE อยู่ในช่วง 0.0067-0.0375 โดยแบบจำลองของ Page (Page

model) มีความเหมาะสมในการทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของพริกไทยได้ดีที่สุด ที่อุณหภูมิอบแห้งที่ 70-90 °C เนื่องจากมีค่า R^2 สูงที่สุด คือ 0.9983 และค่า RMSE ต่ำสุด คือ 0.0067 ในส่วนของแบบจำลอง ANFIS ทั้ง 8 แบบ พบว่ามีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.9865-0.9991 และค่า RMSE อยู่ในช่วง 0.0032-0.0356 โดยแบบจำลอง ANFIS แบบที่ 8 ที่มีจำนวนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกตัวแปรอินพุต อุณหภูมิเท่ากับ 5 และ ตัวแปรอินพุตเวลา เท่ากับ 4 มีความเหมาะสมในการทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของพริกไทยได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิอบแห้งที่ 70-90°C เนื่องจากมีค่า R^2 สูงที่สุด คือ 0.9991 และค่า RMSE ต่ำสุด คือ 0.0032 เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองเอมพิริคัลกับแบบจำลอง ANFIS พบว่า แบบจำลองมีค่า R^2 สูงกว่าและค่า RMSE มีค่าต่ำกว่าแบบจำลองเอมพิริคัล

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณนิสิตปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องค์กรที่ช่วยเก็บข้อมูลผลการทดลอง

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Torpol, "A study on thin layer drying of pepper using hot air dryer," M.S. thesis, Dept. Phys., Burapha Univ., Chonburi, Thailand, 2013.
- [2] Ministry of Agriculture and Cooperatives. (10 October 2010). Thailand's agricultural trade statistics for 2010 [Online]. Available: <http://www.oae.go.th>
- [3] P. Praneetpolkrang and K. Sathapornprasath, "Application of a combined jet spouted bed and ultrasound waves for drying of agricultural products," Srinakharinwirot Univ. Eng. J., vol.12, no.1, pp.163-175, Jan. 2017.
- [4] C. Ertekin and O. Yaldiz, "Drying of eggplant and selection of suitable thin layer drying

- model,” *J. of Food Eng.*, vol.21, pp.349-359, Aug. 2004.
- [5] S. Suthicharoenpanich, “Paddy drying by two-dimensional spouted bed technique,” M.S. thesis, Dept. Food Eng., King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand, 1998.
- [6] K.B. Mathur and P. Gishler, “” *AIChE J.*, vol.1, pp. 157-164, Jun. 1955.
- [7] R.Tapaneyasin, “Study of hydrodynamics and drying characteristics of a jet spouted bed of shrimp,” M.S. thesis, Dept. Food Eng., King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand, 2003.
- [8] S. Wachiraphansakul, “Drying of soy residue using sorbent particles in a jet spouted bed,” M.S. thesis, Dept. Food Eng., King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand 2005.
- [9] K. Sathapornprasathand C. Nimmol, “Influences of Far-infrared radiation on the energy efficiency of stepwise jet spouted bed drying system,” *KKU Res. J.*, vol.18, pp.325-343, Mar. 2013.
- [10] S. Wachiraphansakul and S. Devahastin, “Drying kinetics and quality of soy residue (okara) dried in a jet spouted bed dryer,” *Drying Technol.*, vol.23, pp.1229-1242, Feb. 2005.
- [11] S. Wachiraphansakul and S. Devahastin, “Drying kinetics and quality of okara dried in a jet spouted bed of sorbent particles,” *LWT-Food Sci. Technol.*, vol. 40, pp.207-219, Mar. 2007.
- [12] K. Sathapornprasath, “Intermittent batch drying for agricultural products in jet spouted bed drying,” *Srinakharinwirot Univ. Eng. J.*, vol.5, no.1, pp.50-64, Jan. 2010.
- [13] P. Waramit, N. Weerayuth, and U. Teeboonma, “Prediction of hot air drying moisture ratio using an empirical model and artificial neural network model,” *Srinakharinwirot Univ. Eng. J.*, vol. 6 no.1, pp. 39-47, Jan. 2011.
- [14] L. Olatomiwa, S. Mekhilef, S. Shamshirband and D. Petkovic, “Adaptive neuro- fuzzy approach for solar radiation prediction in Nigeria,” *Renewable Sustainable Ener. Rev.*, Vol.51, pp.1784-1791, Nov. 2015.
- [15] M. Hosoz, H.M. Ertuncand H. Bulgurcu, “An adaptive neuro- fuzzy inference system model for predicting the performance of a refrigeration system with a cooling tower,” *Expert Syst. Appl.*, Vol. 38, pp. 14148- 14155, Oct. 2011.
- [16] S. Soyguder and A. Alli, “Predicting of fan speed for energy saving in HVAC system based on adaptive network based fuzzy inference system,” *Expert Syst. Appl.*, Vol. 36, pp.8631-8638, May 2009.
- [17] A. Hasiloglu, M. Yilmaz, O. Comakli and I. Ekmekci, “Adaptive neuro-fuzzy modeling of transient heat transfer in circular duct air flow,” *Int. J. Therm. Sci.*, Vol.43, pp.1075-1090, Nov. 2004.
- [18] S. Lertworasirikul, “Drying kinetics of semi-finished cassava crackers: A comparative study,” *LWT*, Vol. 41, pp. 1360- 1371, Nov. 2008.
- [19] Y. Tana, C. Shuaia, L. Jiaoc and L. Shen, “An adaptive neuro- fuzzy inference system (ANFIS) approach for measuring country

- sustainability performance,” *Environ. Impact Assess. Rev.*, Vol.65, pp.29-40, Jul. 2017.
- [20] L. Virgen-Navarroa, E. J. Herrera-Lópezb, R. Corona-González, E. Arriola-Guevarac and G. M. Guatemala- Morales, “ Neuro- fuzzy model based on digital images for the monitoring of coffee bean color during roasting in a spouted bed,” *Expert Syst. Appl.*, Vol.54, pp.162-169, Jul. 2016.
- [21] R. Assawarachan, “Microwave Vacuum Drying Kinetics of Dried *Spirogyra* sp.,” *TSAE J.*, Vol.19(1), pp. 14-24, Jan. 2013.
- [22] AOAC (Association of Official Analytical Chemists). *Official Methods of Analysis*. 17th ed. Association of Official Analytical Chemists. Maryland: Gaithersburg; 2000.
- [23] A. Seangsai and S. Jiriwibhakorn, “ Power system quality evaluation using adaptive neuro- fuzzy inference systems,” *Kasetsart Engi. J.* vol. 92, pp. 9-16, Apr. 2014.
- [24] T. Madhiyanon, A. Phila and S. Soponronnarit, “ Models of fluidized bed drying for thin- layer chopped coconut,” *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 29, pp. 2849- 2854, Oct. 2009.
- [25] I. Doymaz, “ Convective drying kinetics of strawberry,” *Chem. Eng. Process.*, vol. 47, pp.914-919, May 2008.
- [26] K. Sacilik and A.K. Elicin, “ The thin layer drying characteristics of organic apple slices,” *J. Food Eng.*, vol.73, pp.281-289, Apr. 2006.
- [27] C. Srinivasakannan and N. Balasubramaniam, “ An experimental and modeling investigation on drying of ragi (Eleusinecorocana) in fluidized bed,” *Drying Technol.*, vol.24, pp.1683-1689, Apr. 2006.
- [28] E. K. Akpınar and Y. Bicer, “ Mathematical modelling of thin layer drying process of long green pepper in solar dryer and under open sun,” *Energy Convers. Manage.*, vol.49, pp.1367-1375, Jun. 2008.
- [29] S. Pusat, M. T. Akkoyunlu, E. Pekel, M. C. Akkoyunlu, C. Özkan and S. S. Kara, “ Estimation of coal moisture content in convective drying process using ANFIS,” *Fuel Process. Technol.*, vol. 147, pp. 12- 17, Jun. 2016.
- [30] T. Srikhacha, “Short-term prediction in stock price using hybrid optimized recursive Slope filtering, adaptive moving approach and neuro fuzzy adaptive learning,” Ph.D. thesis, Dept. Information Tech., King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand, 2007.

การลดของเสียในกระบวนการเป่าฟิล์มสำหรับถุงพลาสติกชนิด PP โดยวิธีซิกซ์ ซิกมา

Defect Reduction in Film Blowing Process by Six Sigma Approach

กุศลสิน กิจพงษ์นิกร^{1*} นภัสสวงศ์ โอโสธสิลป์²

¹นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

²ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Kusalin Kitpongnikorn^{1*} Napassavong Osothsilp²

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

Phayathai Road, Patumwan, Bangkok 10330

²Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering

Chulalongkorn University, Phayathai Road, Patumwan, Bangkok 10330

*Corresponding author: Email: kusalin.kit@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเพื่อลดปัญหาของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการเป่าฟิล์ม โดยมุ่งเน้นลดของเสียที่เกิดจากข้อบกพร่องประเภทเจล ยับ และหนابางไม่สม่ำเสมอในแนวขวางเครื่องจักร โดยใช้แนวคิดซิกซ์ ซิกมา เริ่มจาก 1) ระบุนิยามปัญหา ซึ่งพบว่าของเสียจากการผลิตในกระบวนการเป่าฟิล์มถุงพลาสติกชนิดพีพีขนาด 30 x (6+2+2) นิ้ว ประเภทเจล ยับ และหนابางมีสัดส่วนสูงที่สุดรวมกันเป็นร้อยละ 11.03 ของปริมาณการผลิต 2) ระบุการวัด ทำการประเมินระบบการตรวจสอบพบว่ามีความแม่นยำและเที่ยงอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้ 3) ระบุการหาสาเหตุของปัญหา ในขั้นแรกทำการระดมสมองโดยใช้แผนผังก้างปลาพบว่า มี 22 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อข้อบกพร่องประเภทเจล ยับ และหนابาง จากนั้นนำไปคัดกรองด้วยแผนผังแสดงสาเหตุและผล ทำให้เหลือเพียง 9 ปัจจัยนำไปศึกษาต่อ 4) ระบุการปรับปรุงกระบวนการ ได้ดำเนินการปรับปรุง 2 ส่วนด้วยกัน ได้แก่ 1) การออกแบบการทดลองโดยใช้วิธีพินผิวดอบแบบส่วนประสมกลาง เพื่อทดสอบความมีนัยสำคัญของปัจจัยด้วยวิธีการทางสถิติ และหาค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย 2) การสร้างระเบียบวิธีปฏิบัติงานที่ถูกต้อง และในขั้นตอนสุดท้าย 5) ระบุควบคุมกระบวนการ ทำการทดสอบเพื่อยืนยันผลการปรับปรุงและจัดทำแผนควบคุมเพื่อรักษาคุณภาพหลังการปรับปรุงกระบวนการ ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตคือการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องที่จุดต่างๆ ความเร็วในการผลิตและสภาพของเครื่องจักร พบว่าภายหลังการปรับปรุงกระบวนการสามารถลดของเสียในกระบวนการเป่าฟิล์มสำหรับข้อบกพร่องประเภทเจล ยับ และหนابางจากร้อยละ 11.03 เป็นร้อยละ 0.39 ซึ่งคิดเป็นสัดส่วนของเสียที่ลดลงถึงร้อยละ 99 มีมูลค่าความสูญเสียที่ลดลง 68,527 บาทต่อปี

คำสำคัญ: กระบวนการเป่าฟิล์ม การออกแบบการทดลอง การลดของเสีย การทดลองแบบส่วนประสมกลาง ถุงพลาสติกพีพี

ABSTRACT

This research aims to reduce waste from the production of defects which are gel or dark specks, wrinkle and uneven thinness defect along Transverse Direction (TD) of machine that occur in film blowing process. The research applied Six Sigma methodology which composed for five phases. Phase I : Define phase, it was found the waste from plastic bags of size 30 x (6 + 2 + 2) inches had the defective rate due to these three defects totaling 11.03 percent of the production volume. Phase II : Measures phase, the accuracy precision of the inspection system were analyzed and found that it was acceptable. Phase III : Analyze phase, 22 potential factors affecting these defects were listed by using brainstorming technique and Fishbone diagram. Next 9 factors were selected to be studied further using the Cause and Effect matrix. Phase IV : Improvement phase, two improvement approaches were performed. First, the design of experiments technique was applied to prove for significance of factors and find the optimal setting. Second, quality procedure and work instructions were created. Phase V : Control phase, confirmatory experiment was performed and control plan was set up to maintain the quality level after improvement. The factors, which affect these defect are temperature control, production speed, and condition of machine. After improvement, the defective rate due to these defects was reduced from 11.03 percent to 0.39 percent, which equivalent to a reduction of 99 percent. The improvement leads to the loss saving of 68,527 baht per year for the model under study.

Keyword: Blown film process, design of experiment, defect reduction, central composite design, polypropylene.

1. บทนำ

ในปัจจุบันผู้ประกอบการอุตสาหกรรมพลาสติกในประเทศไทยได้รับผลกระทบจากปัญหาเศรษฐกิจทำให้ต้นทุนเม็ดพลาสติกมีค่าสูงขึ้น อีกทั้งค่าแรงงานยังปรับตัวสูงขึ้นด้วย ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตที่สูงขึ้นตาม จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่ผู้ประกอบการอุตสาหกรรมพลาสติกต้องมีการปรับตัวเพื่อให้ธุรกิจสามารถอยู่รอดได้ในสภาวะปัจจุบัน การหาแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อลดปริมาณของเสียลงนั้นเป็นแนวทางที่สำคัญที่สามารถช่วยลดต้นทุนการผลิตลงได้โดยมีระดับคุณภาพที่ดีขึ้น

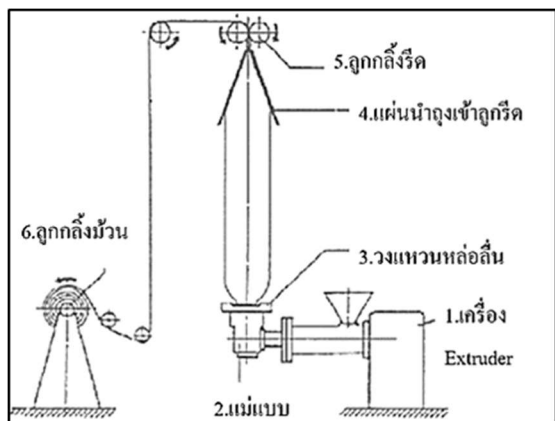
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องแล้วจะเห็นได้ว่าการนำแนวทางซิกซ์ ซิกมา มาประยุกต์ใช้ในการลดของเสียในกระบวนการต่างๆ ได้ผลเป็นที่น่าพอใจ สามารถลด

ของเสียได้อย่างมาก [1] ซิกซ์ ซิกมา คือ การปรับปรุงคุณภาพโดยนำวิธีการทางสถิติมาแก้ปัญหาอย่างเป็นระบบ โดยมีเป้าหมายในการแก้จุดต้นตอของปัญหาของความแปรปรวน การดำเนินการตามแนวทางของซิกซ์ ซิกมา แบ่งออกเป็น 5 ระยะ โดยเป็นไปตามกระบวนการ DMAIC คือ ระยะนิยามปัญหา (Define Phase) ระยะการวัด (Measure Phase) ระยะการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา (Analysis Phase) ระยะการปรับปรุงกระบวนการ (Improvement Phase) และระยะการติดตามควบคุม (Control Phase) [2]

ในส่วนทฤษฎีที่เกี่ยวกับกระบวนการเป่า ในโรงงานกรณีศึกษาจะใช้เม็ดพลาสติกชนิด PP (Polypropylene) เป็นพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติกที่เบาที่สุด มีจุดหลอมเหลวที่ 160 °C มีความแข็งแรงและเหนียว ทนต่อความร้อนและสารเคมีได้ดี ไม่เสียรูปง่าย ใสน้ำและออกซิเจนซึม

ผ่านได้น้อย ซึ่งกระบวนการเป่าฟิล์มสามารถแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ส่วนประกอบของเครื่องเป่าฟิล์มพลาสติก (Blow Film Extrusion)

จากรูปที่ 1 สามารถอธิบายขั้นตอนการเป่าฟิล์มพลาสติกได้โดย เริ่มจากเม็ดพลาสติกในกรวยเติมพลาสติก ถูกป้อนเข้าสู่ในกระบอกสูบซึ่งภายในกระบอกสูบจะประกอบไปด้วยสกรู 3 ส่วน คือ 1) ส่วนป้อน 2) ส่วนส่ง 3) ส่วนรีด โดยความเร็วของสกรูจะถูกควบคุมด้วยมอเตอร์ขับเคลื่อน เมื่อเม็ดพลาสติกถูกป้อนด้วยสกรูและได้รับความร้อนจากอุณหภูมิภายในกระบอกสูบจึงเกิดการหลอมละลาย บริเวณปลายกระบอกสูบจะมีโลหะหรือในที่นี่เรียกว่าหน้าแปลน จะทำหน้าที่ยึดตะแกรงและแผ่นเบรกเกอร์ไว้ อุณหภูมิหน้าแปลนจะทำหน้าที่ควบคุมความร้อนและความดันของพลาสติกไหลเข้าสู่สายเพื่อขึ้นรูป สายจะมีหน้าที่ควบคุมขนาดความกว้างของถุงและขึ้นรูปเป็นลักษณะคล้ายลูกโป่งทอดยาวไปแล้วลูกรีดเป็นแผ่นด้วยลูกกลิ้งรีดสามารถกำหนดขนาดความหนาบางได้ด้วยมอเตอร์ควบคุมค่าความหนาบาง จากนั้นจะผ่านเข้าสู่ลูกกลิ้งเก็บม้วนได้ชิ้นงานออกมาเป็นลักษณะม้วนฟิล์มเพื่อรอเข้าสู่กระบวนการพิมพ์สี หรือตัดต่อไป [3]

Hiesgen, Saul, และ Rauwendaal ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิหลอมกับรูปทรงของท่อ PE100 พบว่าอุณหภูมิหลอมที่เปลี่ยนไปมีผลต่อขนาดและความหนาของท่อ ซึ่งหากอุณหภูมิหลอมไม่สม่ำเสมอจะ

ส่งผลต่อคุณภาพและรูปทรงผลิตภัณฑ์ [4] ต่อมา Rauwendaal จึงนำงานวิจัยข้างต้นมาศึกษาต่อพบว่าที่อุณหภูมิหลอม 235 องศาเซลเซียสทำให้วัตถุดิบเกิดการหลอมได้เร็วซึ่งส่งผลต่อขนาดความหนาของผลิตภัณฑ์ โดยในระยะสั้นสามารถแก้ปัญหาโดยการลดความเร็วของสกรูแต่ก็จะทำให้ระยะเวลาในการผลิตนานขึ้นเช่นกัน ซึ่งการแก้ปัญหาระยะยาวคือการเปลี่ยนรูปทรงสกรูไปเป็นรูปทรงที่ทำให้เกิดความร้อนน้อยลงซึ่งจะช่วยให้สามารถรักษาเอาต์พุตได้ในขณะลดอุณหภูมิหลอมในเวลาเดียวกัน [5] Sung Lee, Shin, Song, Wook Jung และ Hyun ได้ศึกษาหาค่าความแรงลมที่เหมาะสมในกระบวนการเป่าฟิล์มโดยการวิเคราะห์ความเสถียรเชิงเส้นสามารถยืนยันค่าความแรงลมที่ดีที่สุดในการทดลอง พบว่าความแรงลมคงที่จะช่วยเพิ่มเสถียรภาพของกระบวนการ [6] Khan, Dalu และ Gadekar กล่าวว่าสิ่งสำคัญในการแก้ไขเพื่อปรับปรุงกระบวนการอัดขึ้นรูปคือ การควบคุมและตรวจสอบคุณภาพตัวแปรพารามิเตอร์ทั้งหมด ซึ่งพารามิเตอร์ที่สำคัญคือ สภาพของเครื่องจักร, อุณหภูมิ, ความเร็วของสกรู และคุณภาพของวัตถุดิบ จากนั้นได้อธิบายผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์และแนะนำวิธีการแก้ไขเพื่อปรับปรุงกระบวนการอัดขึ้นรูปพร้อมด้วย [7] Yoon และ Park ได้ใช้แบบจำลองนิวโตเนียนแบบไอโซเทอร์มอลเพื่อศึกษากระบวนการเป่าฟิล์มสำหรับโพลิเอทิลีนเชิงเส้นเช่น LLDPE ผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์ความเสถียรเชิงเส้น แสดงให้เห็นว่ากระบวนการเป่าฟิล์มจะไม่เสถียรถ้าอัตราการพองตัวของลูกโป่ง (Blow-up Ratio) ไม่เหมาะสม [8] Sung Lee, Kwon, Wook Jung และ Hyun บอกว่ากระบวนการเป่าฟิล์มเป็นหนึ่งในกระบวนการผลิตโพลิเมอร์ที่สำคัญที่สุดซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลายในการผลิตผลิตภัณฑ์ฟิล์ม ซึ่งปัญหาในกระบวนการเป่าฟิล์มพบได้บ่อยในสภาวะของกระบวนการที่มีอัตราการพองตัวของลูกโป่งสูง (Blow-up Ratio) หรืออุณหภูมิการอัดขึ้นรูปที่สูงเกินไป [9] จากนั้น Peng, Wei และ Lui จึงได้มีการนำวิธีพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology) แบบส่วนประสม

กลาง (Central Composite Design) มาใช้ในการวิเคราะห์ผลกระทบของแอลกอฮอล์โพลีไวนิล (PVOH) และแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ต่อสมบัติทางกายภาพและทางกล ของวัสดุรองพื้นแบบกันกระแทกย่อยสลายทางชีวภาพ [10] ซึ่งวิธีพื้นผิวผลตอบนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้ได้เช่นกัน

จากงานวิจัยข้างต้นดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่ามีปัจจัยที่ส่งผลต่อเสถียรภาพในกระบวนการเป่าฟิล์ม ได้แก่ อุณหภูมิ ความเร็วของสกรู ความแรงลม สภาพเครื่องจักร คุณภาพวัตถุดิบ และอัตราการพองตัวของลูกโป่ง

3. การดำเนินงานวิจัย

3.1 ระเบียบวิธีปัญหา

กระบวนการผลิตถุงพลาสติกชนิด PP จะเริ่มจากกระบวนการเป่าฟิล์ม ในระหว่างการผลิตจะมีการสุ่มตรวจสอบชิ้นงานเป็นระยะเมื่อได้ลักษณะชิ้นงานที่เป็นม้วนฟิล์มแล้วจะทำการตรวจสอบความหนาบริเวณต้นม้วนและปลายม้วนก่อนจะนำไปสู่กระบวนการพิมพ์และตัด จากนั้นจึงทำการตรวจสอบชิ้นงานแบบ 100% ก่อนที่จะเตรียมจัดส่งลูกค้าต่อไป โดยงานวิจัยจะเริ่มจากการศึกษาข้อมูลการผลิตในกระบวนการเป่าฟิล์ม ตั้งแต่เดือนมิถุนายน 2558 ถึง พฤษภาคม 2559 พบว่าของเสียจากการผลิตมีสัดส่วนสูงสุดถึงร้อยละ 64.18 โดยพบว่ามีข้อบกพร่อง 3 ประเภท ที่มีสัดส่วนที่สูงมาก ได้แก่ 1) เจล ซึ่งเป็นข้อบกพร่องจากการผลิตที่ทำให้ชิ้นงานมีลักษณะเป็นจุดสีดำหรือสีใสบริเวณผิวฟิล์ม สามารถมองเห็นได้ชัดเจนด้วยตาเปล่าซึ่งแสดงดังรูปที่ 2 2) ยับ เป็นข้อบกพร่องที่ทำให้ชิ้นงานมีลักษณะเป็นรอยยับย่น ไม่เรียบ ทำให้พิมพ์สีไม่ติด สามารถมองเห็นได้ชัดเจนด้วยตาเปล่าเช่นเดียวกันซึ่งแสดงดังรูปที่ 3 และ 3) หนาบาง เป็นข้อบกพร่องที่ทำให้แผ่นฟิล์มมีความหนาไม่สม่ำเสมอในแนวขวางเครื่องจักร (TD) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4 โดยในบางครั้งอาจไม่สามารถมองเห็นได้ชัดเจนด้วยตาเปล่า โดย

ในระหว่างการผลิตจะมีการใช้เครื่องมือวัดความหนา (Thickness gauge) ทำการวัดความหนาของแผ่นฟิล์มอยู่เป็นระยะเพื่อตรวจสอบว่าความหนาของฟิล์มถูกต้อง แต่เนื่องจากในระหว่างการผลิตถุงพลาสติกนั้นไม่ได้มีการตรวจสอบชิ้นงาน 100% จึงทำให้ข้อบกพร่องทั้ง 3 ประเภทนี้สามารถเกิดขึ้นได้จนผ่านเข้าสู่กระบวนการพิมพ์และตัดจนกระทั่งได้เป็นชิ้นงานสำเร็จรูป ซึ่งพบว่ามีข้อบกพร่องประเภทเจลร้อยละ 5.54 ประเภทยับร้อยละ 2.32 และประเภทหนาบางร้อยละ 3.17 คิดเป็นสัดส่วนของเสียรวมร้อยละ 11.03 ของปริมาณการผลิตในรุ่นนี้

เมื่อศึกษาการผลิตถุงพลาสติกชนิด PP รุ่น 30 x (6+2+2) นิ้ว โดยเครื่องจักร BB-PP-02 พบว่ามีของเสียเกิดขึ้นซ้ำๆทุกเดือนที่มีการผลิต งานวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายที่จะลดสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องทั้งสามนี้ลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งตัวอย่างข้อบกพร่องแต่ละประเภทสามารถแสดงดังรูปที่ 2-4



รูปที่ 2 ลักษณะข้อบกพร่องประเภท (ก) เจลดำ และ (ข) เจลใส



รูปที่ 3 ลักษณะข้อบกพร่องประเภทยับ



รูปที่ 4 ลักษณะข้อบกพร่องประเภทหนาวาง

3.2 ระยะการวัด

เนื่องจากกระบวนการวัดของเสียในกรณีนี้เป็นการตรวจสอบข้อบกพร่องจากกระบวนการเป่าซึ่งจะทำได้โดยใช้สายตาในการตรวจสอบ ซึ่งการตรวจสอบด้วยสายตาอาจทำให้เกิดข้อผิดพลาดหรือคลาดเคลื่อนได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาวิธีตรวจสอบความแม่นยำและเที่ยงของพนักงานวัดในการตรวจสอบข้อบกพร่อง เพื่อให้มั่นใจว่าระบบการตรวจสอบมีความแม่นยำและเที่ยง 100% ดำเนินการโดยการคัดเลือกทีมงานผู้ชำนาญการ ทำการคัดเลือกชิ้นงานที่ผ่านการตรวจสอบโดยเครื่องมือวัดที่มีความเที่ยงตรงและคัดแยกแล้วว่าชิ้นงานใดเป็นชิ้นงานดีหรือเสียหรือก้ำกึ่ง โดยเลือกชิ้นงานดี 7 ชิ้น เป็นลักษณะชิ้นงานที่สมบูรณ์ไม่พบข้อบกพร่องใดๆ ชิ้นงานเสีย 7 ชิ้น คือ ชิ้นงานที่สามารถแยกแยะว่าเป็นของเสียได้โดยง่าย ชิ้นงานก้ำกึ่งดี 3 ชิ้น และชิ้นงานก้ำกึ่งเสีย 3 ชิ้น เป็นลักษณะชิ้นงานที่ยากแก่การตัดสินใจว่าเป็นของดีหรือของเสีย โดยชิ้นงานนั้นจะมีข้อบกพร่องแต่ละประเภทเพียงเล็กน้อย ซึ่งหากพนักงานวัดขาดความชำนาญอาจทำให้มองข้ามข้อบกพร่องนี้ไปได้ โดยทำการสุ่มชิ้นงานให้พนักงาน 3 คน ทำการตรวจสอบด้วยตาเปล่าและการสัมผัส จากนั้นบันทึกผลการตรวจสอบลงในแบบฟอร์ม ซึ่งจะทำให้การตรวจสอบซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง จากนั้นประเมินความแม่นยำและเที่ยงของพนักงานโดยมีเกณฑ์การยอมรับของระบบการวัด ดังตารางที่ 1 จากการทดลองพบว่าพนักงานทุกคนตรวจสอบได้ถูกต้องทุกครั้ง ระบบการ

ตรวจสอบจึงมีความแม่นยำและเที่ยงอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้

ตารางที่ 1 เกณฑ์การยอมรับของระบบการวัด

ดัชนี	เกณฑ์การยอมรับ
% รีพีทอะบิลิตีของพนักงาน (% appraiser score)	100%
% ความไม่ไบอัสของพนักงาน (% attribute score)	100%
ดัชนีความมีประสิทธิภาพของพนักงาน (O_E)	100%
ดัชนีการตรวจสอบที่ปฏิเสธอย่างผิดพลาด (I_{FA})	100%
ดัชนีการตรวจสอบที่ยอมรับอย่างผิดพลาด (I_{MISS})	100%
% ประสิทธิภาพรีพีทอะบิลิตีของการตรวจสอบ (% reproducibility)	100%
% ประสิทธิภาพความไม่ไบอัสของการตรวจสอบ (% accuracy)	100%

3.3 ระยะการวิเคราะห์หาสาเหตุหลักของปัญหา

เริ่มจากการระดมสมองในทีมงานโดยนำเอาแผนผังก้างปลา (Fishbone diagram) มาหาปัจจัยทั้งหมดที่คาดว่าจะส่งผลต่อการเกิดข้อบกพร่องประเภทเจล ยับ และหนาวางในกระบวนการเป่าฟิล์ม ดังรูปที่ 5, 6 และ 7 จากการระดมสมองโดยพิจารณาจากปัจจัยที่พบในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและประสบการณ์ของพนักงานได้ปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลต่อปัญหาของเสีย จำนวนทั้งสิ้น 22 ปัจจัย จากนั้นทำการคัดกรองปัจจัยด้วยเมทริกซ์แสดงสาเหตุและผล (Cause and Effect Matrix) โดยทำการสุ่มเลือกพนักงานในฝ่ายผลิตเป่าที่มีประสบการณ์ในการผลิตถุงพลาสติกอย่างน้อย 3 ปี จำนวน 6 คน ให้คะแนนความสำคัญจาก 0-10 โดย

0 หมายถึง ไม่มีความสัมพันธ์ต่อการเกิดข้อบกพร่องประเภทเจล ยับ และหนابาง

10 หมายถึง มีความสัมพันธ์อย่างมากต่อการเกิดข้อบกพร่องประเภทเจล ยับ และหนابาง

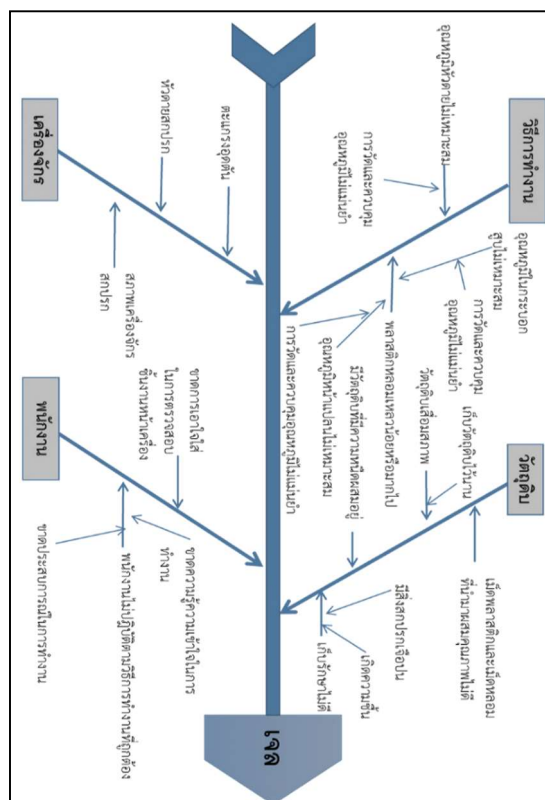
ซึ่งในการให้คะแนนความสำคัญจะทำโดยให้พนักงานแต่ละคนเขียนคะแนนลงในแบบสอบถามการให้คะแนนความสำคัญของแต่ละปัจจัยเพื่อป้องกันการไบอัสในการให้คะแนนของพนักงาน

เนื่องจากข้อบกพร่องประเภทเจล มีสัดส่วนของเสียร้อยละ 5.54 ประเภทยับ ร้อยละ 2.32 และประเภทหนาบาง ร้อยละ 3.17 จากข้อบกพร่องรวมทั้ง 3 ประเภท คิดเป็นสัดส่วนของเสียร้อยละ 11.03 จากปริมาณการผลิต จึงได้นำวิธีค่าเฉลี่ยเลขคณิตถ่วงน้ำหนัก (Weighted Average)

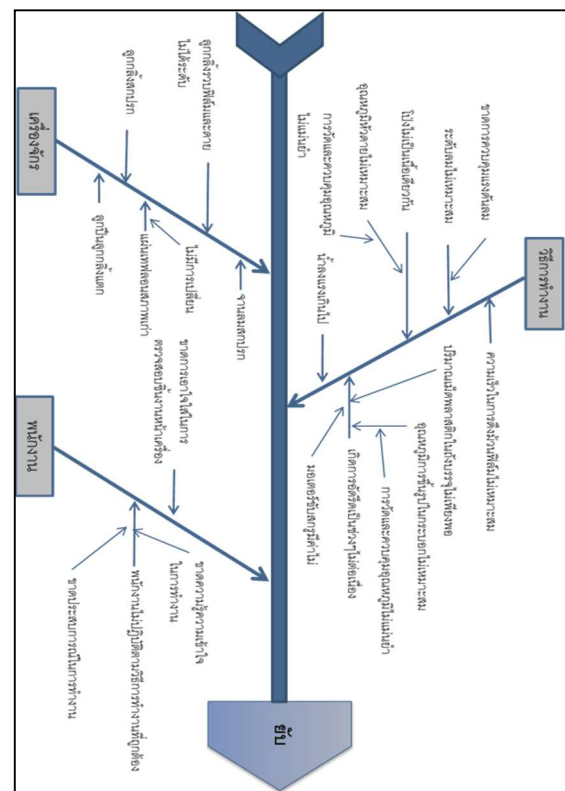
มาใช้ โดยกำหนดให้น้ำหนักรวมคือ 1 และคะแนนความสำคัญของข้อบกพร่องประเภทเจล ยับ และหนาบางเฉลี่ยน้ำหนักตามสัดส่วนข้อบกพร่องดังกล่าว เพื่อให้คะแนนความสัมพันธ์ของแต่ละข้อบกพร่องสอดคล้องกับ

สัดส่วนข้อบกพร่องแต่ละประเภทที่เกิดขึ้น ดังนั้นคะแนนความสัมพันธ์รวมคือ ผลรวมของผลคูณระหว่างคะแนนความสำคัญกับคะแนนความสัมพันธ์ที่ได้จากทุกคน ซึ่งจากการวิเคราะห์พบว่าสามารถคัดกรองปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อข้อบกพร่องประเภทเจล ยับ และหนาบางเหลือเพียง 9 ปัจจัย ซึ่งก่อให้เกิดคะแนนรวมร้อยละ 80 ของคะแนนทั้งหมดจากทุกปัจจัย ซึ่งปัจจัยดังกล่าวนี้ได้แสดงในตารางที่

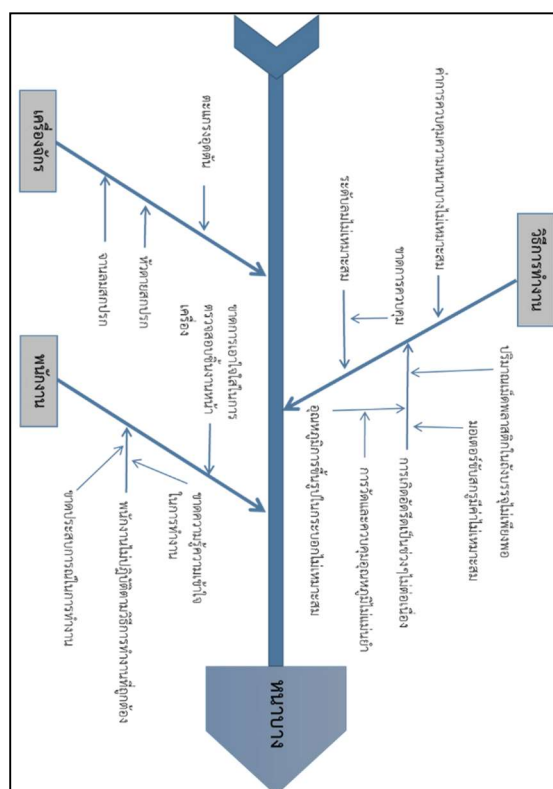
2



รูปที่ 5 แผนผังก้างปลาของปัญหาของเสียประเภทเจล



รูปที่ 6 แผนผังก้างปลาของปัญหาของเสียประเภทยับ



รูปที่ 7 แผนผังก้างปลาของปัญหาของเสียประเภทหนาบาง

ตารางที่ 2 ปัจจัยสำคัญที่ได้จากการคัดเลือกจากเมทริกซ์แสดงเหตุและผล

ปัจจัยที่ส่งผลต่อปัญหาเจล ยับ และหนาบาง	รวมทั้งหมด	ร้อยละคะแนนของทุกปัจจัย	ร้อยละสะสม
อุณหภูมิในระบบหล่อไม่เหมาะสม	60	10.74	10.74
อุณหภูมิหน้าแปลนไม่เหมาะสม	59.7	10.69	21.43
อุณหภูมิหัวตายไม่เหมาะสม	57.18	10.24	31.67
การขาดความรู้และความเข้าใจในการทำงาน	53.64	9.60	41.28
การขาดความเข้าใจใส่ในการตรวจสอบชิ้นงานหน้าเครื่อง	51.79	9.27	50.55
ตะแกรงอุดตัน	51.14	9.16	59.71
มอเตอร์ขับเคลื่อนสกรูมีค่าไม่เหมาะสม	47.78	8.56	68.26
หัวตายสกปรก	36.09	6.46	74.72
จานลมสกปรก	29.59	5.30	80.02

จากการเปรียบเทียบปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อสัดส่วนของเสียในกระบวนการเป่าฟิล์มที่ได้จากการศึกษาค้นคว้างานวิจัยต่างๆต่างข้างต้นพบว่าปัจจัยที่สอดคล้องกันกับ

งานวิจัยนี้ได้แก่ อุณหภูมิ ความเร็วของสกรู ความแรงลม และสภาพเครื่องจักร จากปัจจัยเรื่องความแรงลมสามารถอ้างอิงปัจจัยเรื่องจานลมสกปรกจากงานวิจัยนี้ได้เนื่องจากหากจานลมปราศจากสิ่งสกปรกจะส่งผลให้ระดับลมที่ออกมามีความแรงคงที่ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าปัจจัยที่ได้จากการคัดเลือกในงานวิจัยนี้มีความเหมาะสมในการนำไปศึกษาผลกระทบต่อเสถียรภาพของกระบวนการเป่าฟิล์มซึ่งหากกระบวนการผลิตขาดเสถียรภาพก็จะส่งผลให้มีของเสียเกิดขึ้น โดยปัจจัยดังกล่าวนี้ ได้แก่ อุณหภูมิที่จุดต่างๆ การบำรุงรักษาเครื่องจักร เช่น จานลมสกปรก หัวตายสกปรก และตะแกรงอุดตัน เป็นต้น

สำหรับปัจจัยในเรื่องของอัตราการพองตัวของลูกโป่งไม่เหมาะสมนั้นจะส่งผลให้มีของเสียประเภทการฉีกขาดง่ายตามแนวเครื่องจักร (MD) เกิดขึ้น ซึ่งไม่พบปัญหาของเสียประเภทนี้ในโรงงานกรณีศึกษาเท่าที่ควร งานวิจัยนี้จึงไม่ได้เลือกมาศึกษาและปรับปรุง รวมถึงปัจจัยเรื่องคุณภาพของวัตถุดิบด้วยเช่นกัน เนื่องจากหากมีการเปลี่ยนวัตถุดิบจะส่งผลกระทบต่อต้นทุนวัตถุดิบและความเห็นชอบจากลูกค้า จึงได้ทำการศึกษาปัจจัยอื่นๆ เช่น การปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรและการดูแลสภาพของเครื่องจักรก่อน หากสามารถลดสัดส่วนของเสียได้เป็นที่น่าพอใจก็就不用จำเป็นต้องปรับปรุงในส่วนของวัตถุดิบ อีกทั้งยังมีการควบคุมค่าความชื้นของวัตถุดิบและการป้องกันการเกิดสิ่งสกปรกเจือปนในวัตถุดิบอีกด้วย นอกจากนี้ยังมีอีก 2 ปัจจัยที่งานวิจัยนี้ได้เห็นว่ามีความสำคัญและได้ทำการปรับปรุง ได้แก่ การขาดความเข้าใจใส่ในการตรวจสอบชิ้นงาน และการขาดความรู้และความเข้าใจในการทำงาน

ซึ่งปัจจัยที่ได้คัดเลือกเพื่อนำมาศึกษาทั้ง 9 ปัจจัย ดังตารางที่ 2 นี้มีแนวทางในการแก้ปัญหาโดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มวิธี คือ 1) การออกแบบการทดลอง ซึ่งเป็นวิธีการแก้ปัญหาโดยใช้วิธีการทางสถิติเพื่อหาระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิระบบหล่อ อุณหภูมิหน้าแปลน อุณหภูมิหัวตาย และความเร็วมอเตอร์ขับเคลื่อนสกรู 2) การสร้างวิธีปฏิบัติงาน สำหรับนำไปใช้ฝึกอบรมวิธีการปฏิบัติงานที่ถูกต้องให้แก่

พนักงาน รวมถึงการบำรุงรักษาเครื่องจักรอย่างเหมาะสม โดยสามารถแก้ปัญหาปัจจัยนำเข้า 5 ปัจจัย ได้แก่ การขาดความรู้และความเข้าใจในการทำงาน การขาดความเอาใจใส่ในการตรวจสอบชิ้นงานหน้าเครื่องจักร ตะแกรงอุดตัน หัวตายสกปรก และจานลมสกปรก

3.4 ระยะปรับปรุงกระบวนการ

3.4.1 การออกแบบการทดลอง

3.4.1.1 กำหนดตัวแปรตอบสนอง

สัดส่วนข้อบกพร่องของประเภทเจล ยับ และหนาบาง สามารถคำนวณได้จากปริมาณข้อบกพร่องแต่ละประเภท หารด้วยปริมาณการผลิต ทั้งนี้ในแต่ละครั้งการทดลองจะทดลองครั้งละ 25 กิโลกรัม

3.4.1.2 กำหนดตัวแปรอิสระของการทดลอง

ตัวแปรอิสระในการทดลองนี้มี 6 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิกระบอกส่วนต้น (A) อุณหภูมิกระบอกสูบส่วนกลาง (B) อุณหภูมิกระบอกสูบส่วนท้าย (C) อุณหภูมิหน้าแปลน (D) อุณหภูมิหัวตาย (E) และความเร็วมอเตอร์ขับเคลื่อน (F) โดยที่ (A)-(D) เป็นการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องจักร และมีปัจจัยที่ต้องควบคุมคือความเร็วมอเตอร์ขับเคลื่อนความหนาบางโดยการใช้ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ (อินเวอร์เตอร์) เพื่อควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ให้คงที่ ในที่นี้กำหนดให้มีค่า 24 เฮิร์ต นอกจากนี้ จะทำการเปลี่ยนตะแกรงใหม่ ทำความสะอาดหัวตาย และทำความสะอาดจานลมก่อนเริ่มทำการทดลอง

3.4.1.3 การเลือกแบบการทดลอง

ในกรณีที่มี 6 ปัจจัย ผู้วิจัยได้เลือกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design: CCD) แบบเศษส่วน 2^{6-1} เนื่องจากมีจำนวนการทดลองน้อยกว่าและให้ความสามารถในการพยากรณ์ที่ดีกว่าแบบการทดลองอื่น เช่น แบบบ็อกซ์-เบห์นเคน และแบบ 3^k แบบการทดลองที่เลือกประกอบไปด้วย 53 ครั้งการทดลองย่อย ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ 1) ส่วนการทดลองแฟคทอเรียลแบบบางส่วน 2^{6-1} (Factorial Runs) 32 การทดลอง ซึ่งมี Resolution เท่ากับ VI ซึ่งสามารถหาผลกระทบเชิงเส้น (Linear Effects) ผลกระทบเชิงเส้นกำลังสอง (Quadratic Effects) และ

ผลกระทบร่วมระหว่าง 2 ปัจจัยได้ (Interaction Effects) โดยไม่ปะปนกันเอง [11,12] 2) ส่วนของจุดศูนย์กลาง (Center Runs) 9 การทดลอง 3) ส่วนของจุดแกน (Axial Runs) 12 การทดลอง โดยมีค่า $\alpha = 2.378$

3.4.1.4 ระดับของปัจจัยที่ทำการทดลอง

ปัจจัยต่างๆจะถูกกำหนดระดับการทดลองเป็น 5 ระดับ คือ ระดับ $-\alpha$ (-2.378) ระดับต่ำ (-1) ระดับกลาง (0) ระดับสูง (+1) และระดับ $+\alpha$ (2.378) ซึ่งค่าระดับของปัจจัยแบบ Coded Unit และ Uncoded Unit แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ระดับของปัจจัยนำเข้าในการทดลอง

ปัจจัยนำเข้า (X)	-2.378	-1	0	1	2.378	หน่วย
อุณหภูมิกระบอกสูบส่วนต้น (A)	190	207	220	232	250	องศาเซลเซียส
อุณหภูมิกระบอกสูบส่วนกลาง (B)	190	207	220	232	250	องศาเซลเซียส
อุณหภูมิกระบอกสูบส่วนท้าย (C)	190	207	220	232	250	องศาเซลเซียส
อุณหภูมิหน้าแปลน (D)	190	207	220	232	250	องศาเซลเซียส
อุณหภูมิหัวตาย (E)	190	207	220	232	250	องศาเซลเซียส
มอเตอร์ขับเคลื่อน (F)	20	28.7	35	41.3	50	กิโลวัตต์

ในการกำหนดระดับของปัจจัยที่ทดลองในครั้งนี้มีรายละเอียดการตั้งค่าดังนี้คือ อุณหภูมิกระบอกสูบส่วนต้น (A) อุณหภูมิกระบอกสูบส่วนกลาง (B) อุณหภูมิกระบอกสูบส่วนท้าย (C) อุณหภูมิหน้าแปลน (D) อุณหภูมิหัวตาย (E) ถูกกำหนดระดับในการทดลองให้อยู่ในช่วง 190-250 องศาเซลเซียส และ ความเร็วมอเตอร์ขับเคลื่อน (F) ถูกกำหนดระดับในการทดลองให้อยู่ในช่วง 20-50 กิโลวัตต์ เนื่องจากเป็นช่วงที่เครื่องจักรยังสามารถทำการผลิตได้

ปีที่ 13 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม – เมษายน พ.ศ. 2561

3.4.1.5 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการ

ทดลอง

ผลการทดลองของกระบวนการเป่าถุงพลาสติกแสดง

ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 เมตริกซ์การออกแบบส่วนประสมกลาง

Std Order	Run Order	A	B	C	D	E	F	Y1	Y2	Y3	Yall
1	52	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0.200	0.080	0.198	0.478
2	17	1	-1	-1	-1	-1	1	0.042	0.018	0.038	0.097
3	1	-1	1	-1	-1	-1	1	0.050	0.008	0.011	0.068
4	35	1	1	-1	-1	-1	-1	0.070	0.005	0.063	0.138
5	11	-1	-1	1	-1	-1	1	0.180	0.006	0.010	0.196
6	18	1	-1	1	-1	-1	-1	0.250	0.033	0.075	0.358
7	3	-1	1	1	-1	-1	-1	0.175	0.018	0.057	0.250
8	48	1	1	1	-1	-1	1	0.031	0.003	0.021	0.054
9	16	-1	-1	-1	1	-1	1	0.012	0.017	0.009	0.038
10	36	1	-1	-1	1	-1	-1	0.049	0.027	0.094	0.171
11	10	-1	1	-1	1	-1	-1	0.070	0.032	0.080	0.182
12	19	1	1	-1	1	-1	1	0.020	0.018	0.011	0.049
13	23	-1	-1	1	1	-1	-1	0.040	0.007	0.065	0.112
14	6	1	-1	1	1	-1	1	0.081	0.007	0.020	0.108
15	25	-1	1	1	1	-1	1	0.080	0.007	0.018	0.106
16	42	1	1	1	1	-1	-1	0.212	0.023	0.089	0.324
17	12	-1	-1	-1	-1	1	1	0.110	0.020	0.042	0.172
18	7	1	-1	-1	-1	1	-1	0.180	0.036	0.134	0.351
19	28	-1	1	-1	-1	1	-1	0.100	0.017	0.164	0.281
20	4	1	1	-1	-1	1	1	0.160	0.012	0.007	0.179
21	32	-1	-1	1	-1	1	-1	0.110	0.021	0.071	0.202
22	50	1	-1	1	-1	1	1	0.230	0.009	0.004	0.243
23	8	-1	1	1	-1	1	1	0.310	0.015	0.040	0.365
24	44	1	1	1	-1	1	-1	0.270	0.020	0.054	0.344
25	14	-1	-1	-1	1	1	-1	0.311	0.031	0.100	0.442
26	20	1	-1	-1	1	1	1	0.130	0.022	0.092	0.244
27	46	-1	1	-1	1	1	1	0.290	0.001	0.018	0.309
28	49	1	1	-1	1	1	-1	0.220	0.036	0.112	0.368
29	24	-1	-1	1	1	1	1	0.285	0.007	0.017	0.308
30	30	1	-1	1	1	1	-1	0.250	0.029	0.068	0.347
31	53	-1	1	1	1	1	-1	0.300	0.022	0.089	0.411
32	41	1	1	1	1	1	1	0.220	0.010	0.031	0.260

ตารางที่ 4 เมตริกซ์การออกแบบส่วนประสมกลาง (ต่อ)

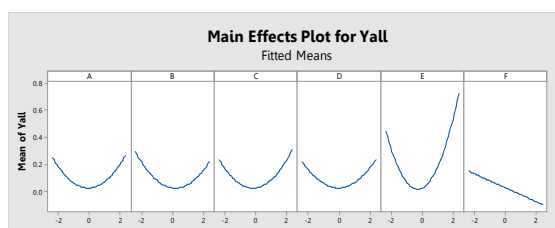
33	38	2.37841	0	0	0	0	0	0.295	0.000	0.000	0.295
34	40	2.37841	0	0	0	0	0	0.480	0.000	0.000	0.480
35	37	0	2.37841	0	0	0	0	0.490	0.000	0.000	0.490
36	15	0	2.37841	0	0	0	0	0.280	0.000	0.000	0.280
37	31	0	0	2.37841	0	0	0	0.351	0.000	0.000	0.351
38	22	0	0	2.37841	0	0	0	0.450	0.000	0.000	0.450
39	13	0	0	0	2.37841	0	0	0.330	0.000	0.000	0.330
40	26	0	0	0	2.37841	0	0	0.390	0.000	0.000	0.390
41	34	0	0	0	0	2.37841	0	0.620	0.000	0.000	0.620
42	5	0	0	0	0	2.37841	0	0.800	0.000	0.000	0.800
43	21	0	0	0	0	0	2.37841	0.035	0.073	0.142	0.250
44	2	0	0	0	0	0	2.37841	0.058	0.002	0.080	0.140
45	9	0	0	0	0	0	0	0.000	0.000	0.000	0.000
46	51	0	0	0	0	0	0	0.000	0.000	0.000	0.000
47	27	0	0	0	0	0	0	0.000	0.000	0.000	0.000
48	43	0	0	0	0	0	0	0.000	0.000	0.000	0.000
49	45	0	0	0	0	0	0	0.000	0.000	0.000	0.000
50	33	0	0	0	0	0	0	0.000	0.000	0.000	0.000
51	47	0	0	0	0	0	0	0.000	0.000	0.000	0.000
52	39	0	0	0	0	0	0	0.000	0.000	0.000	0.000
53	29	0	0	0	0	0	0	0.080	0.000	0.000	0.080

เนื่องจากในการทดลองนี้จะทำการเก็บค่าสัดส่วนของเสียที่เกิดจากข้อบกพร่องประเภทเจล (Y1) ประเภทยับ (Y2) และประเภทหนابาง (Y3) โดยสัดส่วนของของเสียจากแต่ละข้อบกพร่องจะคิดจากปริมาณของเสียที่เกิดจากข้อบกพร่องแต่ละประเภทหารด้วยปริมาณการผลิตทั้งหมด จากนั้นได้ใช้ค่า Yall ซึ่งคือ สัดส่วนของเสียรวมประเภทเจล ยับ และหนابาง เนื่องจากต้องการหาค่าระดับปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดของเสียโดยรวมน้อยที่สุด จึงจะพิจารณาสัดส่วนของเสียรวมประเภทเจล ยับ และหนابางเป็นหลัก เนื่องจากหาค่าระดับที่เหมาะสมของปัจจัยโดยพิจารณาแยกแต่ละตัวแปรตอบสนอง อาจทำให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่ขัดแย้งกัน ซึ่งค่าที่เหมาะสมที่ทำให้สัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องประเภทหนึ่งลดลงอาจทำให้สัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องอีกประเภทหนึ่งเพิ่มขึ้นได้ เป็นต้น จากผลการทดลองดังตารางที่ 4 จะได้

สมการความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของเสียรวมและปัจจัยต่างๆ หลังจากตัดเทอมที่ไม่มีนัยสำคัญออกไปแล้ว ด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) แบบวิธีลดตัวแปรอิสระ (Backward Elimination) ดังแสดงในสมการที่ 1

$$Y_{all} = 0.0270 + 0.0036 A - 0.0156 B + 0.0152 C + 0.0034 D + 0.0583 E - 0.0512 F + 0.0404 A^2 + 0.0399 B^2 + 0.0426 C^2 + 0.0355 D^2 + 0.0974 E^2 \quad (1)$$

เมื่อพิจารณาสมการความสัมพันธ์พบว่าพจน์ที่มีนัยสำคัญต่อสัดส่วนของเสียรวมประเภทเจล ยับ และหนาบาง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ได้แก่ อุณหภูมิกระบอบกอบส่วนต้น (A) อุณหภูมิกระบอบกอบส่วนกลาง (B) อุณหภูมิกระบอบกอบส่วนท้าย (C) อุณหภูมิหน้าแปลน (D) อุณหภูมิหัวตาย (E) ความเร็วมอเตอร์ขับเคลื่อน (F) และพจน์กำลังสองของ A, B, C, D และ E ในขณะที่ไม่มีพจน์อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยใดมีนัยสำคัญต่อค่าสัดส่วนของเสียรวม โดยความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยทั้งหกและค่าสัดส่วนของเสียรวมแสดงได้ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแต่ละปัจจัยนำเข้ากับสัดส่วนของเสียรวม

จากรูปที่ 8 สามารถอธิบายผลได้ดังนี้

- อุณหภูมิกระบอบกอบส่วนต้น (A) อุณหภูมิกระบอบกอบส่วนกลาง (B) อุณหภูมิกระบอบกอบส่วนท้าย (C) ทำหน้าที่อัดฉีดและส่งผ่านเม็ดพลาสติกจากกรวยเพื่อหลอมเม็ดพลาสติก และส่งต่อไปยังส่วนถัดไป เนื่องจากภายในกระบอบกอบจะมีสกรูที่ถูกควบคุมความเร็วด้วยมอเตอร์ขับเคลื่อน เมื่ออุณหภูมิในกระบอบกอบมีค่าต่ำเกินไป ทำให้

เม็ดพลาสติกหลอมเหลวไม่หมดและไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน เมื่อส่งผ่านไปยังส่วนถัดไปเพื่อขึ้นรูปก็จะเกิดของเสียลักษณะเจลใส และปริมาณเนื้อพลาสติกที่หลอมละลายได้ก็มีปริมาณน้อยเกินไปเป็นผลให้เกิดของเสียประเภทหนาบาง และเมื่อความหนาบางไม่เท่ากันทุกส่วนเมื่อฟิล์มถูกอัดรีดด้วยลูกกลิ้งก็จะทำให้เกิดการยับตามมา และหากอุณหภูมิกระบอบกอบมีค่าสูงเกินไปจะทำให้เม็ดพลาสติกหลอมละลายเร็วเกินไป และเกิดความร้อนสูงภายในบริเวณกระบอบกอบทำให้พลาสติกเกิดการไหม้เป็นผลให้เกิดของเสียประเภทเจลดำ

- อุณหภูมิหน้าแปลน (D) หากอุณหภูมิหน้าแปลนสูงไปจะทำให้โป่งสันและสายซึ่งส่งผลให้ฟิล์มมีความหนาบางไม่เท่ากันได้ จึงส่งผลต่อของเสียประเภทหนาบางและยับตามมา แต่หากอุณหภูมิหน้าแปลนต่ำเกินไปจะทำให้เกิดแรงดันไม่มากพอที่จะดันพลาสติกหลอมเพื่อไปยังหัวตาย พลาสติกจึงเกิดการหลอมละลายมากขึ้นเรื่อยๆ ในส่วนที่ถูกแรงดันจากภายในขับออกมาเพื่อขึ้นรูปนั้นก็ส่งผลให้เกิดของเสียประเภทเจลดำเนื่องจากพลาสติกหลอมเกิดการไหม้ นอกจากนี้ยังส่งผลต่อของเสียประเภทหนาบางได้เช่นกันเนื่องจากมีปริมาณพลาสติกไหลออกมาได้ไม่มากพอ

- อุณหภูมิหัวตาย (E) ซึ่งหัวตายจะทำหน้าที่ขึ้นรูปถุงพลาสติก เมื่อได้รับลมก็จะถูกเป่าให้ขยายออกเป็นลักษณะคล้ายลูกโป่งทอดยาวตลอดก่อนจะเข้าสู่เครื่องรีดเพื่อให้ได้ลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มบางๆต่อไป โดยค่าอุณหภูมิควรจะใกล้เคียงกับอุณหภูมิหน้าแปลนไม่ห่างกันมากนักเพื่อคงสภาพสถานะของพลาสติกหลอม ซึ่งหากอุณหภูมิหัวตายมีค่าสูงหรือต่ำไปก็จะทำให้เกิดของเสียประเภทเจล

- ความเร็วมอเตอร์ขับเคลื่อน (F) เป็นตัวกำหนดความเร็วของสกรูในกระบอบกอบ หากกำหนดความเร็วน้อยไปจะทำให้สกรูหมุนช้าส่งผลให้เม็ดพลาสติกถูกบดผสมกันช้าจึงหลอมละลายเป็นเนื้อเดียวกันได้ช้าทำให้ได้ปริมาณพลาสติกหลอมน้อย ส่งผลให้เกิดปัญหาของเสียประเภทหนาบางและยับตามมาได้ ในขณะที่ความเร็วมอเตอร์ขับเคลื่อนมีค่ามากจะทำให้บดผสมเม็ดพลาสติกได้

เร็วขึ้น และเมื่อได้รับความร้อนจากในกระบอกสูบเพื่อหลอมรวมพลาสติกให้เป็นเนื้อเดียวกันแล้ว แรงดันที่เกิดขึ้นภายในกระบอกสูบจะทำให้มีปริมาณพลาสติกหลอมถูกอัดฉีดออกมาได้ต่อเนื่องทำให้ของเสียประเภทหนาบางลดลง และเมื่อฟิล์มมีความหนาบางสม่ำเสมอทั้งนี้ค่าความเร็วมอเตอร์ขับเคลื่อนต้องสัมพันธ์กับค่าของความเร็วมอเตอร์ควบคุมความหนาบาง

3.4.1.6 การหาค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยนำเข้า

ในการหาค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยนำเข้าที่ส่งผลต่อของเสียรวมประเภทเจล ยับ และหนาบาง (Yall) ให้เกิดของเสียน้อยที่สุด สามารถใช้วิธี Response Optimizer ในโปรแกรม MINITAB จากการนำค่าที่ได้มาแปลงเป็น Uncoded Unit สรุปได้ว่า ค่าของระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ส่งผลต่อการเกิดของเสียรวมประเภทเจล ยับ และหนาบางน้อยที่สุด คือ ค่าอุณหภูมิกระบอกส่วนต้น 220 องศาเซลเซียส ค่าอุณหภูมิกระบอกส่วนกลาง 212 องศาเซลเซียส ค่าอุณหภูมิกระบอกส่วนท้าย 217 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหน้าแปลน 220 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหัวตาย 216 องศาเซลเซียส และความเร็วมอเตอร์ขับเคลื่อน 50 กิโลวัตต์

3.4.2 การสร้างวิธีปฏิบัติงาน

ในส่วนนี้จะเป็นการปรับปรุงกระบวนการสำหรับปัจจัยนำเข้าอื่นๆ 5 ปัจจัย ได้แก่ การขาดความรู้และความเข้าใจในการทำงาน การขาดความเอาใจใส่ในการตรวจสอบชิ้นงานหน้าเครื่อง ตะแกรงอุดตัน หัวตายสกปรก และจานลมสกปรก ด้วยการจัดทำวิธีการปฏิบัติงานเพื่อให้พนักงานเกิดความเข้าใจและสามารถปฏิบัติงานได้ถูกต้อง มีการซ่อมบำรุงเครื่องจักรภายในระยะเวลาที่เหมาะสมเพื่อป้องกันการหยุดซ่อมระหว่างผลิต ทั้งยังสามารถนำไปใช้ได้กับทุกเครื่องเป่าอีกด้วย จากข้อมูลเหตุการณ์ในอดีตพบว่าเมื่อใดที่เกิดปัจจัยเหล่านี้ คือ ตะแกรงอุดตัน หัวตายสกปรก และจานลมสกปรก จะทำให้มีของเสียเกิดขึ้นปริมาณมากร่วมกับการที่เมื่อพนักงานไม่เข้าใจวิธีปฏิบัติงานที่ถูกต้องและไม่มีการตรวจสอบความผิดปกติของเครื่องจักรก็จะทำให้เมื่อเกิดของเสียขึ้นจะไม่สามารถแก้ไขกระบวนการผลิตได้อย่าง

ทันท่วงที ซึ่งแต่ละปัจจัยดังกล่าวสามารถอธิบายความเกี่ยวข้องต่อข้อบกพร่องทั้ง 3 ประเภท ดังนี้

- การขาดความรู้ ความเข้าใจในการทำงาน ทำให้ไม่ทราบวิธีการปฏิบัติงานที่ถูกต้อง ทำงานโดยอาศัยความเคยชิน ซึ่งอาจจะเป็นวิธีการทำงานที่ถูกต้องหรือไม่ก็ได้ ดังนั้นจึงควรมีวิธีปฏิบัติงานที่ถูกต้องเพื่ออบรมและให้ความรู้แก่พนักงาน

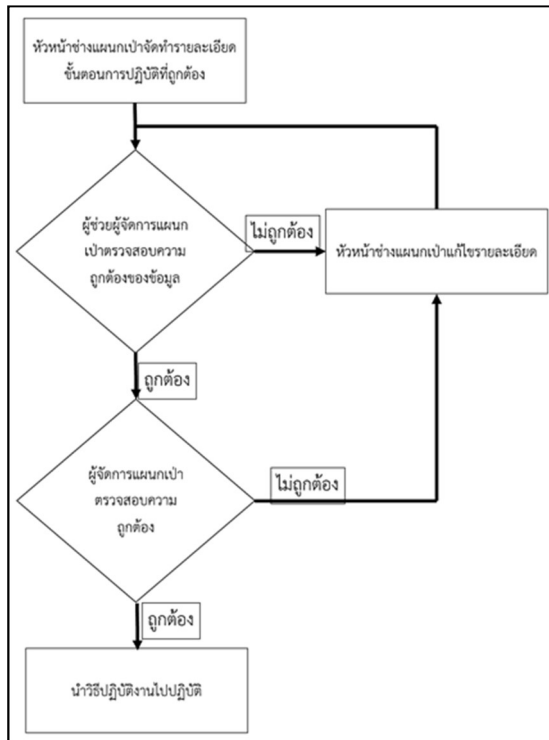
- การขาดความเอาใจใส่ในการตรวจสอบชิ้นงานหน้าเครื่อง เป็นผลสืบเนื่องมาจากการที่พนักงานขาดความรู้และความเข้าใจในการปฏิบัติงาน หรือไม่มีวิธีการทำงานที่ถูกต้องเป็นระเบียบแบบแผน จึงควรมีวิธีปฏิบัติงานที่ถูกต้องเพื่อให้พนักงานมีการปฏิบัติงานเป็นขั้นตอน

- ตะแกรงอุดตัน ในส่วนนี้จะทำหน้าที่กรองสิ่งสกปรกและเม็ดพลาสติกที่ไม่ได้ถูกหลอมเป็นเนื้อเดียวกันก่อนที่จะถูกส่งไปยังหัวตายเพื่อขึ้นรูป ดังนั้นหากตะแกรงอุดตันก็จะส่งผลให้พลาสติกไม่สามารถถูกส่งผ่านไปได้ จึงควรมีวิธีปฏิบัติงานที่ถูกต้อง โดยใช้วิธีสร้างแผนบำรุงรักษาเครื่องจักร

- หัวตายสกปรก จะส่งผลให้พลาสติกไหลออกได้ไม่สม่ำเสมอหรืออาจมีสิ่งสกปรกเจือปนติดมากับพลาสติกหลอมในขณะขึ้นรูปได้ เนื่องจากไม่มีแผนการบำรุงรักษาตามระยะเวลาที่เหมาะสม แม้ว่าทางโรงงานจะมีแผนบำรุงรักษารายปี แต่ไม่สามารถปฏิบัติตามแผนได้ โดยจะทำการซ่อมเมื่อเครื่องจักร หรืออุปกรณ์เสียหายชำรุดเท่านั้น ดังนั้นในการแก้ปัญหานี้จึงต้องทำความสะอาดตามระยะเวลาที่สมควรหลังจากมีการใช้งานมาระยะหนึ่งเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดของเสียเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก

- จานลมสกปรก จะทำให้ลมออกได้ไม่สม่ำเสมอและเมื่อลูกโป่งได้รับลมไม่ต่อเนื่องหรือเท่ากันทุกส่วน จะทำให้พลาสติกเซ็ดตัวไม่ทัน เนื่องจากไม่มีแผนการบำรุงรักษาตามระยะเวลาที่เหมาะสม ดังนั้นในการแก้ปัญหานี้จึงต้องทำความสะอาดตามระยะเวลาที่สมควรหลังจากมีการใช้งานมาระยะหนึ่ง เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดของเสียเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก

ซึ่งการสร้างวิธีปฏิบัติงานสามารถแสดงดังรูปที่ 9-10



ตารางที่ 5 ควบคุมกระบวนการเป่าฟิล์ม

ขนาด	ลำดับ	ปัจจัย	ค่าปรับตั้ง	หน่วย	การควบคุม		ผู้รับผิดชอบ	บันทึก	คุณภาพ	แผนการ	อื่นๆ
					เครื่องมือ	ความถี่					
ถุงพลาสติก ขนาด 30 x (6+2+2) นิ้ว	1	อุณหภูมิกระบอกส่วนต้น	220	°C	ใบตรวจสอบค่าพารามิเตอร์	ทุก 30 นาที	พนักงานประจำเครื่อง 88-PP-02	ใบตรวจสอบค่าพารามิเตอร์			แจ้งหัวหน้าวิศวกรเพื่อควบคุมและแก้ไข
	2	อุณหภูมิกระบอกส่วนกลาง	212	°C							
	3	อุณหภูมิกระบอกส่วนท้าย	217	°C							
	4	อุณหภูมิหน้าแปลน	220	°C							
	5	อุณหภูมิหัวตาย	216	°C							
	6	ความเร็วมอเตอร์ขับเคลื่อน	50	kW							
	7	ความเร็วมอเตอร์ควบคุมค่าความหนา	10	Hz							
	8	เปลี่ยนตะแกรง	ไม่มีสิ่งสกปรก		ทุก 7 วัน						
	9	ทำความสะอาดหัวตาย	ไม่มีสิ่งสกปรก								
	10	ทำความสะอาดจานลม	ตรวจสอบ ล้าเวลา ทุกปีหรือขึ้น ไม่ตาย		ทุก 4 ชั่วโมง						
	11	ของเสียประเภทเจลด	0.17	แผนภูมิ I-MR	ทุก 2 สัปดาห์						
	12	ของเสียประเภทยับ	0.1								
	13	ของเสียประเภทหนาบาง	0.11								

รูปที่ 9 ขั้นตอนการจัดทำวิธีปฏิบัติงานในกระบวนการเป่าฟิล์ม

วิธีปฏิบัติงานในการควบคุมการเป่าฟิล์ม		
Doc no. : WI-01	Effective date :	หัวหน้าแผนก :
เรื่อง : การควบคุมของห้องพ่นกระจกประเภทเจล ยับ และหนามบาง		
วัตถุประสงค์ : เพื่อเป็นคู่มือในการควบคุมห้องพ่นกระจกประเภทเจล ยับ และหนามบาง		
ขอบเขต : ใช้งานการผลิตลูกพลาสติกขนาด 30 x (6+2+2) นิ้ว บนเครื่องจักร BB-PP-02		
หน้าที่ความรับผิดชอบ : พนักงานแผนกเป่าฟิวส์และรับผลิตขอบเครื่องจักร BB-PP-02		
ขั้นตอนการทำงาน		
1. ศึกษาขั้นตอนก่อนเริ่มทำการผลิตในแต่ละวัน		
2. กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆบนเครื่องจักร ดังนี้		
● อุณหภูมิกระบอกสูบส่วนต้น 220 °C		
● อุณหภูมิกระบอกสูบส่วนกลาง 212 °C		
● อุณหภูมิกระบอกสูบส่วนท้าย 217 °C		
● อุณหภูมิหน้าแปลน 220 °C		
● อุณหภูมิหัวตาย 216 °C		
● ความเร็วมอเตอร์ขับเคลื่อน 50 kW		
● ความเร็วมอเตอร์ควบคุมหนามบาง 24 Hz.		
● อุณหภูมิได้ตั้งบรรจุมืด 70 °C		
3. บันทึกค่าอุณหภูมิกระบอกสูบแต่ละส่วน อุณหภูมิหน้าแปลน และอุณหภูมิหัวตายทุกครั้ง ชั่วโมง ลงในแบบฟอร์มการบันทึกค่าพารามิเตอร์		
4. เปลี่ยนตะแกรงทุก 7 วัน โดยต้องทำความสะอาดชุดทุยทุกครั้งที่เปลี่ยนตะแกรงหรือเปลี่ยน รุ่นที่จะทำการผลิต และบันทึกลงในแบบฟอร์มการบันทึกค่าพารามิเตอร์		
5. ทำความสะอาดจานหมุนทุก 4 ชั่วโมง และบันทึกลงในแบบฟอร์มการบันทึกค่าพารามิเตอร์		
เอกสารอ้างอิง : เอกสารขั้นตอนการปฏิบัติงาน		
แบบฟอร์มที่ใช้ : แบบฟอร์มบันทึกค่าพารามิเตอร์		
เอกสารบังคับ : ทุกเวลา 9.00 น. ของทุกวัน ให้นำแบบฟอร์มบันทึกการทำงานของเมื่อวานไปให้ หัวหน้าแผนกเป่าและทำการจัดเก็บเพื่อรวบรวมไว้		
**หมายเหตุ หากพบปริมาณของเสียใดเกิดขึ้นเป็นจำนวนมากอย่างต่อเนื่องให้รีบแจ้งหัวหน้าแผนก		

ตารางที่ 6 แบบฟอร์มบันทึกค่าพารามิเตอร์

[illegible]

3.5 การควบคุมและติดตามผล

3.5.1 แนวทางการควบคุมกระบวนการ

ผู้วิจัยได้เสนอแนวทางการควบคุมกระบวนการดังนี้

รูปที่ 10 วิธีการปฏิบัติงานในกระบวนการเป่าฟิล์ม

1) ศึกษาวิธีปฏิบัติงาน (Work Instruction) ก่อนเริ่มทำการผลิตในแต่ละวันเพื่อให้พนักงานสามารถปฏิบัติงานได้อย่างถูกต้อง ซึ่งแสดงดังรูปที่ 10

2) สร้างแผนควบคุม (Control Plan) เพื่อควบคุมกระบวนการทำงาน เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดข้อเสียในระดับที่ผิดปกติ แสดงดังตารางที่ 5

3) ทำการบันทึกค่าอุณหภูมิในส่วนต่างๆ ทุกครึ่งชั่วโมงลงในแบบฟอร์มบันทึกค่าพารามิเตอร์ แสดงดังตารางที่ 6 เนื่องจากอุณหภูมิระหว่างการผลิตสามารถเปลี่ยนแปลงได้จากความร้อนภายในเครื่องจักรที่เพิ่มสูงขึ้นระหว่างการผลิต รวมถึงสภาพแวดล้อมภายนอกก็สามารถส่งผลต่อค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงระหว่างผลิตได้ จึงต้องมีการควบคุมค่าอุณหภูมิให้คงที่อย่างต่อเนื่องเพื่อป้องกันการเกิดของเสียประเภทต่างๆ ที่สูงขึ้น

4) ทำการเปลี่ยนตะแกรงทุก 7 วัน โดยต้องทำความสะอาดทุกครั้งก่อนที่เปลี่ยนตะแกรงหรือเปลี่ยนรุ่นที่จะทำการผลิต และบันทึกลงในแบบฟอร์มบันทึกค่าพารามิเตอร์ แสดงดังตารางที่ 6 โดยกำหนดความถี่ในการเปลี่ยนตะแกรงมาจากอายุการใช้งานโดยเฉลี่ยตามที่ผู้ผลิตได้มีการระบุไว้สำหรับยี่ห้ออื่นๆ และตรวจสอบจากข้อมูลการขอเบิกวัสดุในช่วงเวลาที่ผ่านมาร่วมด้วย

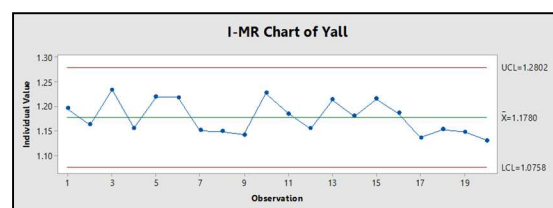
5) ทำความสะอาดจานลมทุก 4 ชั่วโมง และบันทึกลงในแบบฟอร์มบันทึกค่าพารามิเตอร์ แสดงดังตารางที่ 6 โดยกำหนดความถี่ในการทำความสะอาดจานลมจากรยะเวลาเฉลี่ยที่พบน้ำมันหยดลงบนผิวฟิล์ม เนื่องจากบริเวณจานลมจะเป็นส่วนที่อยู่ใกล้กับหัวตายซึ่งเมื่อมีการผลิตไประยะเวลาหนึ่งอาจมีน้ำมันหล่อลื่นจากหัวตายปนเปื้อนมากับถุงพลาสติก

ซึ่งพนักงานที่ทำการดูแลการผลิตเครื่องจักรนั้นเป็นผู้รับผิดชอบ

3.5.2 ผลหลังปรับปรุงกระบวนการ

ผู้วิจัยได้เก็บข้อมูลสัดส่วนของเสียที่เกิดขึ้นหลังจากปรับปรุงกระบวนการโดยทำการทดลองเพื่อเก็บข้อมูลของเสียประเภทเจล ยับ และหนابาง จำนวน 6,000 กิโลกรัม โดยแต่ละวันสามารถผลิตได้ 300 กิโลกรัม ดังนั้นการปรับปรุงกระบวนการนี้จะทำการบันทึกผลเป็น

เวลา 20 วัน เมื่อนำข้อมูลการทดลองหลังการปรับปรุงกระบวนการในแต่ละวัน มาพลอตในแผนภูมิควบคุม (Control Chart) แสดงดังรูปที่ 11 พบว่าจำนวนของเสียรวมประเภทเจล ยับ และหนابางในแต่ละม้วนคงที่อยู่ในสภาวะที่ควบคุมได้ มีค่าเฉลี่ยของปริมาณของเสียรวม คือ 1.18 กิโลกรัม ต่อปริมาณการผลิต 300 กิโลกรัม หรือคิดเป็นร้อยละ 0.39



รูปที่ 11 แผนภูมิควบคุมปริมาณของเสียหลังการปรับปรุง

4. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาได้นำแนวคิดซิกมา มาใช้โดยการออกแบบการทดลองด้วยวิธีพินผลตอบแบบส่วนประสมกลางสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างสมการความสัมพันธ์สำหรับหาค่าที่เหมาะสมของระดับปัจจัยนำเข้า โดยระดับของปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการผลิตถุงพลาสติกขนาด 30 x (6+2+2) นิ้ว คือ อุณหภูมิกระบอกสุบส่วนต้น 220 องศาเซลเซียส อุณหภูมิกระบอกส่วนกลาง 212 องศาเซลเซียส อุณหภูมิกระบอกส่วนท้าย 217 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหน้าแปลน 220 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหัวตาย 216 องศาเซลเซียส และความเร็วมอเตอร์ขับเคลื่อน 50 กิโลวัตต์ ซึ่งหลังการปรับปรุงกระบวนการสามารถลดของเสียรวมประเภทเจล ยับ และหนابางเหลือเพียงร้อยละ 0.39 จากเดิม ร้อยละ 11.03 จำแนกเป็นข้อบกพร่องประเภทเจลร้อยละ 0.17 ประเภทยับร้อยละ 0.1 และประเภทหนابางร้อยละ 0.11 กล่าวคือ สามารถลดของเสียลงได้ถึง 99% โดยแสดงผลการเปรียบเทียบก่อนและหลังการปรับปรุงกระบวนการได้ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ผลการทดลองเปรียบเทียบก่อน-หลังการปรับปรุงกระบวนการ

ประเภท	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง
อุณหภูมิกระบอบกึ่งส่วนต้น (°C)	210	220
อุณหภูมิกระบอบกึ่งส่วนกลาง (°C)	211	212
อุณหภูมิกระบอบกึ่งส่วนท้าย (°C)	214	217
อุณหภูมิหน้าแปลน (°C)	215	220
อุณหภูมิหัวตาย (°C)	220	216
ความเร็วมอเตอร์ขับเคลื่อน (kW)	40	50
ร้อยละของเสียประเภทเจล	5.54	0.17
ร้อยละของเสียประเภทยับ	2.32	0.10
ร้อยละของเสียประเภทหนابาง	3.17	0.11
ร้อยละของเสียรวมเจล ยับ หนาบาง	11.03	0.39

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าปัจจัยเรื่องอุณหภูมิ ความเร็วรอบ และสภาพของเครื่องจักร มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์เป็นหลัก เนื่องจากสามารถลดของเสียส่วนของเสียจากเดิมได้ถึงร้อยละ 99 ปัจจัยเรื่องวัตถุดิบมีผลน้อยต่อสัดส่วนของเสียโดยรวมทั้ง 3 ประเภทนี้เนื่องจากในงานวิจัยนี้ไม่ได้ทำการเปลี่ยนแปลงวัตถุดิบแต่สามารถหาค่าปรับตั้งเครื่องจักรและดูแลสมรรถภาพเครื่องจักรให้สามารถผลิตถุงพลาสติกด้วยวัตถุดิบในปัจจุบันได้โดยมีของเสียในระดับที่น้อยมาก ทั้งนี้ผลของระดับปัจจัยที่ได้จากงานวิจัยนี้เป็นค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการผลิตถุงพลาสติกขนาด 30 x (6+2+2) บนเครื่องจักร BB-PP-02 เท่านั้น ซึ่งอาจไม่เหมาะสมกับการผลิตถุงพลาสติกในขนาดอื่นๆ แต่สามารถนำงานวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้เพื่อเป็นแนวทางในการลดของเสียข้อบกพร่องประเภทเจล ยับ และหนาบางสำหรับการผลิตถุงพลาสติกขนาดอื่นๆได้ โดยใช้แนวคิดซิกซ์ ซิกมา และวิธีการพื้นผิวผลตอบในการหาค่าระดับที่เหมาะสมของปัจจัย และยังมีปัจจัยอื่นที่ส่งผลต่อปัญหาของเสียประเภทเจล ยับ และหนาบาง นอกเหนือจาก 9 ปัจจัยที่ได้เลือกมาทำการปรับปรุง เช่น

การขาดการควบคุมแรงดันลม วัตถุดิบเกิดความชื้น เป็นต้น จึงควรศึกษาและปรับปรุงปัจจัยอื่นๆเพิ่มเติม เพื่อสามารถลดมูลค่าความสูญเสียลงได้มากขึ้น

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Cherry and S. Seshadri, “Six Sigma: using statistics to reduce process variability and costs in radiology,” Radiology Management, vol. 22, pp. 42-49, Jan. 2000.
- [2] ไพโรจน์ บาลัน, การจัดการกระบวนการตามหลัก Six Sigma. กรุงเทพมหานคร: อีไอเอสควอร์ปับลิชชิง, 2549.
- [3] เจริญ นาคะสรรค์, กระบวนการแปรรูปพลาสติก. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์นิติธรรม, 2547.
- [4] G. Hiesgen, K. Saul, and C. Rauwendaal, “Temperature induced dimensional variation in extrusion,” in The Regional Conference Graz 2015 – Polymer Processing Society PPS, Graz, Austria, 2015, pp. 030005.
- [5] C. Rauwendaal, “Effective troubleshooting of extrusion problems,” in The Regional Conference Graz 2015 – Polymer Processing Society PPS, Graz, Austria, 2015, pp. 030021.
- [6] J. Sung Lee, D. M. Shin, H. S. Song, H. Wook Jung and J. Chun Hyun, “Existence of optimal cooling conditions in the film blowing process,” J. Non-Newtonian Fluid Mech., vol. 137, pp. 24-30, Aug. 2006.
- [7] J. G. Khan, R. S. Dalu and S. S. Gaddekar, “Defects in extrusion process and their impact on product quality,” Inter. J. Mech. Eng. Robot. Res., vol. 187, pp. 187-194, Jul. 2014.
- [8] K. S. Yoon and C. W. Park, “Stability of a blown film extrusion process,” Int. Polym. Proc., vol. 14, pp. 342-349, Dec. 1999.

- [9] J. S. Lee, I. Kwon, H. W. Jung, and J. C. Hyun, “Helical instability in film blowing process: Analogy to buckling instability,” *Phys. Fluids*, vol. 29, p. 121501, Dec. 2017.
- [10] J. Peng, K. Wei and W. Lui, “Response surface optimization of the feed compositions of biodegradable packaging foams,” *Packaging Technol. Sci.*, vol. 18, pp. 321-330, Sep. 2005.
- [11] D. C. Montgomery, *Design and analysis of experiments*, 8th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2005.
- [12] ปารเมศ ชูติมา, การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม” กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.

Non-Line-Impedance-Synthesized Power Sharing Control in Microgrid Using On-Demand Power Feeding

Suchart Janjornmanit ^{1*} Suttichai Premrudeepreechacharn ¹ Kohji Higuchi ²

¹ Chiang Mai University, 239, Huay Kaew Road, Mueang District, Chiang Mai 50300, Thailand

² The University of Electro-Communication, 1-5-1 Chofugaoka, Chofu, Tokyo 182-8585, Japan

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

ABSTRACT

A method of power sharing control in the islanding operation of microgrid is proposed in this paper. The proposed approach formulates the power generation of each DG by the relationship of power-angle control, in which the magnitude and angle of the generating voltage are adjusted to follow the change of demanding power. By comparison to the previous work, the new method does not need the value of line impedance, connecting between DG and the common bus, to incorporate the control function. The method, limiting the output power and preventing power consumed by the DG, is also improved. The new method of power-angle control demonstrated that without using the knowledge of line impedance, the suitable power sharing point in the microgrid could also be tracked within each DG's capacity autonomously. Simulation and experimental results demonstrate the validity of the proposed control.

Keyword: Automatic generation control, distributed power generation, microgrids, power control, power sharing.

1. Introduction

Nowadays, microgrid is becoming a viable option for power generation since it distributes the autonomous energy supply. It provides a solution to the system where the energy demand is in the remote area and sometimes the power is disconnected from the public electricity. The Distributed Generation (DG) operated by power electronic converter, such as the Voltage Source Converter (VSC), plays an important role in microgrid. In addition, the droop control technique is widely used for power sharing control in the islanding microgrid. In general, this technique

emulates the power generated by the synchronous generator where the output voltage magnitude and frequency are adjusted linearly to the power. There are studies on droop control with minimum communication between DGs [1]-[4]. The works on droop control without using additional communication [5]-[7] are also published. There are studies of the droop [8]-[9] published recently, but the works need the knowledge of line impedance to incorporate into the formulation of the control. Although the power sharing by the droop gains intensive implementation, it is proven to have limitations [10]-[11]. The control of power output

by varying voltage magnitude and frequency itself creates the residual deviation in the interconnected system. Angle droop [12] - [14] is proposed to eliminate the residual frequency deviation; however, in this method the power is still varied linearly with the voltage magnitude and angle by the droop equation. In addition, the operation relies on the Global Positioning System (GPS). There is also a study of GPS synchronized droop control [15] published recently, but the formulation of the control based on the assumption that the line impedance is known. The power sharing by droop is problematic to the system with resistive line impedance [6], [10]-[11], [16]-[19]. The concept of virtual impedance [20]-[22] has been proposed and successfully implemented to overcome this problem. The concept is actually the reference voltage modification that introduces the line impedance into the control loop. However, choosing of virtual impedance is complicated, it requires a trade-off between power sharing and voltage regulation [11]. The power sharing control by the droop has been used for a long time. Although this technique achieves high reliability and flexibility, it has several drawbacks that limit its application [11].

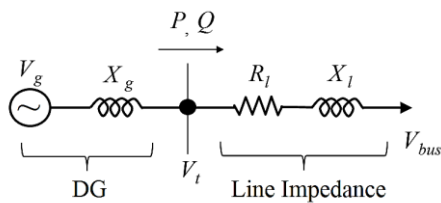


Fig. 1 Power delivery from DG to the bus.

In this research, the usage of droop control is eliminated. The idea of the power-angle control without incorporating the droop [23] is proposed firstly, but the method requires the value of line

impedance to formulate the control function. The limitation is further improved by this work.

2. Power Sharing Analysis

Fig. 1 shows the power delivery from DG via a line to its connected bus.

The active power generation [24], P , of the DG can be calculated by:

$$P = \frac{|V_g||V_t|}{X_g} \sin(\delta_g) \quad (1)$$

where V_g is the generating voltage, V_t is the voltage at DG's terminal, δ_g is the angle between V_g and V_t , and X_g is output inductance of the DG. In addition, the reactive power generation [24], Q , can be calculated by:

$$Q = \frac{|V_t|}{X_g} (|V_g| \cos(\delta_g) - |V_t|) \quad (2)$$

The assumption is that the angle δ_g is small and it can be inferred from the above equations that increasing δ_g causes a greater change in active power than reactive power. In addition, the reactive power is changed depending on the difference in voltage magnitude between V_g and V_t , called ΔV .

3. The Proposed Power-Angle Control using On-demand Power Feeding

By using (1), the relationship between active power generation and the angle difference, δ_g , can be rewritten as:

$$\delta_g \approx \sin^{-1} \left(\frac{PX_g}{(|V_{bus}|^*)^2} \right) \quad (3)$$

To simplify the operation, the magnitude of voltage at bus $|V_{bus}|^*$ is used instead of V_g and V_t in (1), and it is treated as a constant value, as the rated voltage on the bus, to determine the required constraint operation of the DGs. In addition, by using (2) the relationship between

reactive power generation and the voltage difference, ΔV , can be rewritten as:

$$\Delta V \approx \frac{QX_g}{|V_{bus}|^*} \quad (4)$$

To simplify further, $\cos(\delta_g)$ is omitted due to the fact that the angle is small.

The power in (3) and (4) can be calculated in every voltage cycle or updating round by:

$$P^i = \frac{V_{max}I_{max}\cos(\theta)}{2} \quad (5)$$

$$Q^i = \frac{V_{max}I_{max}\sin(\theta)}{2} \quad (6)$$

where the superscript i indicates the number of consecutive cycle or round of update. θ is the angle of power factor. V_{max} and I_{max} are voltage and current magnitude detected at DG's terminal.

In order to control the power generation to follow the change of demanding power, the change of power from previous updating round, ΔP and ΔQ , needs to be detected, which can be calculated by:

$$\Delta P = P^i - P^{i-1} \quad (7)$$

$$\Delta Q = Q^i - Q^{i-1} \quad (8)$$

As it can be seen from (3) that the active power generation has a direct relationship to δ_g ; therefore, the control of active power generation by adjusting the angle difference δ_g can be calculated with:

$$\delta_g^i = \delta_g^{i-1} + \sin^{-1}\left(\frac{\Delta PX_g}{(|V_{bus}|^*)^2}\right) \quad (9)$$

The adjusting of the angle difference δ_g in this way is the determination to adjust the power sharing of each DG to the microgrid with the DG's constraint. The suitable power sharing point may not reach immediately, but rather for a number of updating rounds.

In addition, as it can be seen from (4) that the reactive power generation has a direct

relationship to ΔV ; therefore, the control of reactive power generation by adjusting the voltage difference P_m can be calculated by:

$$\Delta V^i = \Delta V^{i-1} + \frac{\Delta QX_g}{|V_{bus}|^*} \quad (10)$$

The determination of the adjusting of ΔV in this way is also the same as the adjusting of δ_g in which it adjusts the power sharing of each DG to the microgrid with the DG's constraint.

Thus, in each round of updating cycle the reference voltage is generated by:

$$V_g(t) = (V_g^i + \Delta V^i) \sin(\omega t + \delta_g^i) \quad (11)$$

In order to avoid the exchanging power between DGs, or the power is consumed by the DG, the output power of each DG should be limited to its capacity. From Eq. (3), the maximum active power P_m can be translated into a maximum angle δ_{gm} , which can be expressed by:

$$\delta_{gm} \approx \sin^{-1}\left(\frac{P_m X_g}{(|V_{bus}|^*)^2}\right) \quad (12)$$

In each round of updating cycle, after the active power is detected, if the value of P is negative, δ_g is forced to increase a small degree (use +5% of δ_{gm} in this work), and if P is greater than its capacity, δ_g is forced to decrease a small degree as well (use -5% of δ_{gm} in this work). This creates a constraint of the power sharing to the microgrid so that the other DGs is perceived the limitation from the DG and the power generation is then adjusted in accordingly.

In the case of reactive power, the maximum reactive power Q_m is a maximum of voltage magnitude difference ΔV_m . From Eq. (4), it can be expressed by:

$$\Delta V_m \approx \frac{Q_m X_g}{|V_{bus}|^*} \quad (13)$$

In each round of updating cycle, after the reactive power is detected, if the value of Q is negative, V_g is forced to increase a small magnitude (use +5% of ΔV_m in this work), and if Q is greater than its capacity, V_g is forced to decrease a small magnitude as well (use -5% of

ΔV_m in this work). This also creates a constraint of the power sharing so that the other DGs is perceived and the power generation is then adjusted in accordingly too.

A flowchart of reference voltage generation is showed in Fig. 2 and Fig. 3 shows VSC using the

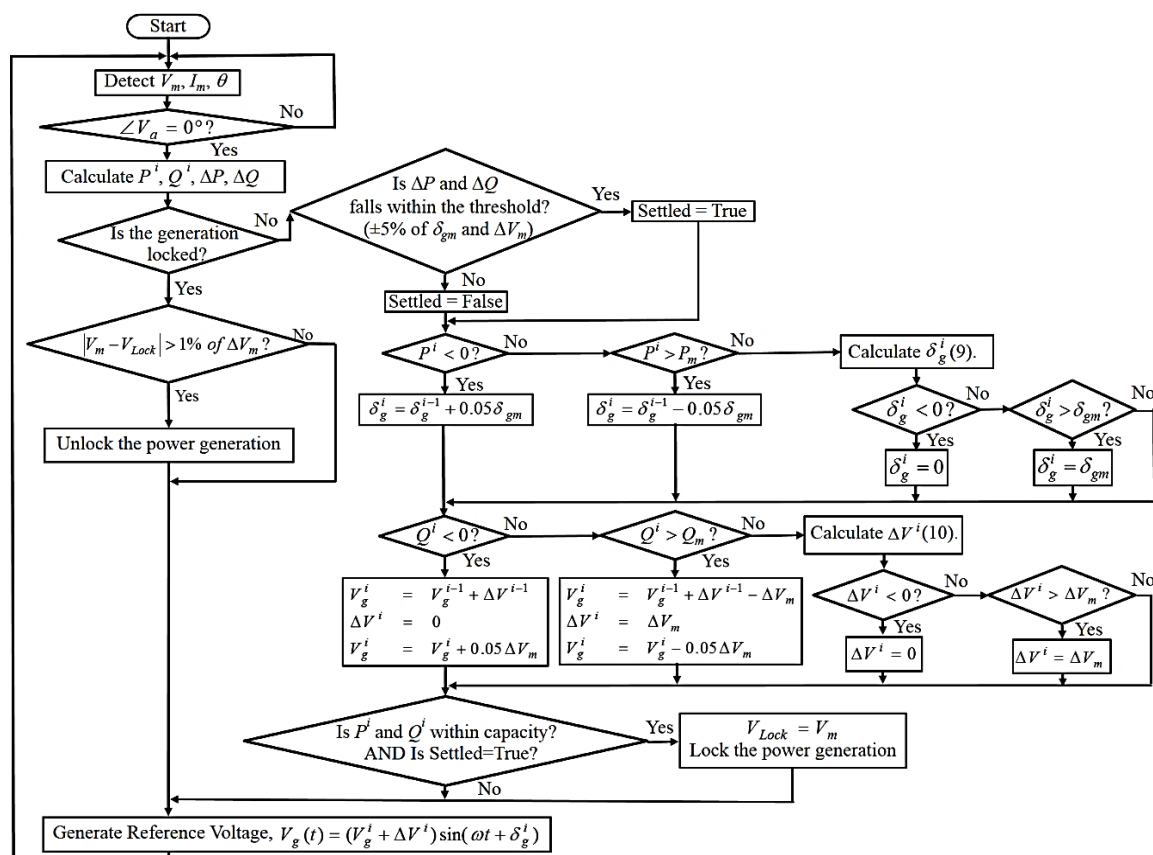


Fig. 2 Flowchart of the reference voltage generation.

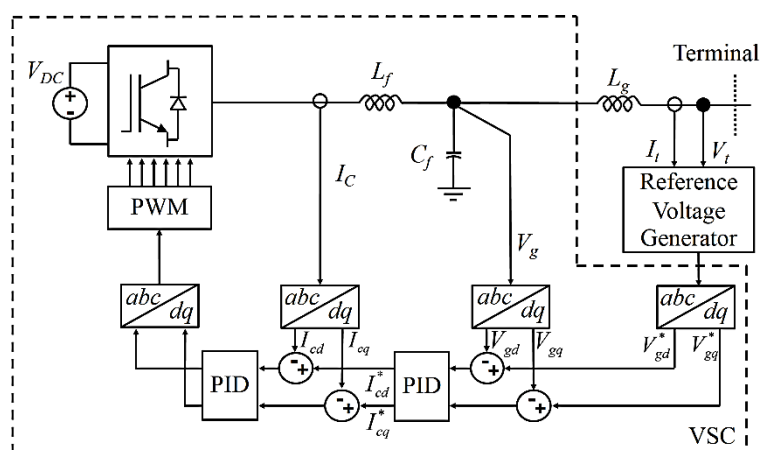


Fig. 3 A VSC with reference voltage generator.

reference voltage generator. The proposed analysis is based on the assumption that the load is balance. If the system is unbalanced, then all three lines need to be sensed and the proposed reference voltage generation may be formulated in the rotating d-q-0 coordinates, or at least the system should be separated to be three single-phase systems.

4. Simulation Studies

The simulation are performed using MATLAB /SIMULINK. The operation of the network is regarded as the islanding microgrid. The system is a 3-phase 380V/50Hz. The results are the locked values when the system is in the stable and steady-state power sharing point. All values are per unit with base MVA(1MVA) and the base kVLL(0.380). In order to compensate for voltage drop on the line, V_g at the beginning of the reference voltage generation should be higher than V_{bus} . In the simulations, V_g begins with 390V. In the simulation studies, the DG is simulated by ‘Controlled Voltage Source’ which means that there would not be voltage tracking error in the studies. The effect of voltage tracking error can be neglected when the error is minimal [23].

4.1. The Step Change of Load

Fig. 4 shows configuration of microgrid for this study. Table I gives parameters for systems under consideration.

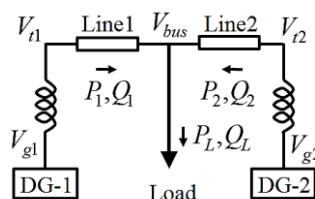
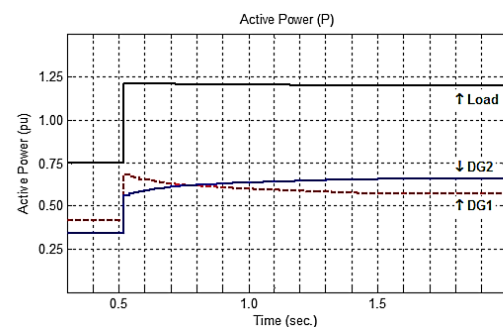


Fig. 4 Microgrid system under consideration.

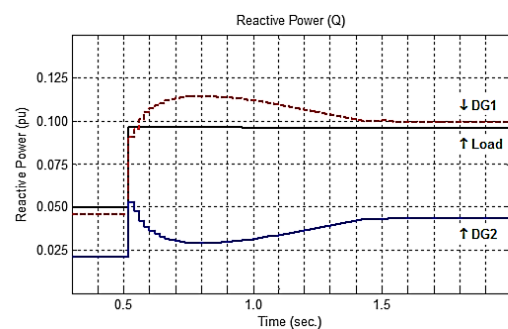
TABLE I System parameters (step load change)

Quantities	Values(pu)
Line1 impedance	0.125+j0.166
Line2 impedance	0.166+j0.208
Load rating(before)	P=0.75, Q=0.05
Load rating(after)	P=1.25, Q=0.1
DG-1 rating	P _{m1} =0.75, Q _{m1} =0.1
DG-2 rating	P _{m2} =0.75, Q _{m2} =0.1
Output inductance 1	j0.125
Output inductance 2	j0.125

The load begins by $P_L=0.75$ pu and $Q_L=0.05$ pu. The locked values before the load change are shown in Table II At 0.5 second, the load is step changed to $P_L=1.25$ pu. and $Q_L=0.1$ pu., and the simulation results during load changing are in Fig. 5(a) and 5(b). The simulation results of locked values after the load change are in Table III. The



(a)



(b)

Fig. 5 Results of the step load change, (a) result of active power, and (b) result of reactive

results indicate that the approach is able to control the power generation even when the load is suddenly changed. In addition, it has to be noted in Fig. 5(b) that after the load change the reactive power of DG-1 are greater than its maximum capacity of 0.1, but the control is able to force the power down under its capacity.

TABLE II Results of step load change (before)

Quantities	Values(pu)
Result of DG-1 output	$P_1=0.421, Q_1=0.0458$
Result of DG-2 output	$P_2=0.343, Q_2=0.0216$
Result of load	$P_L=0.751, Q_L=0.0501$
Volt. at bus	$V_{bus}=1.0039\angle 0^\circ$
Volt. at DG-1 output	$V_{g1}=1.0281\angle 2.15^\circ$
Volt. at DG-2 output	$V_{g2}=1.0271\angle 2.05^\circ$
Volt. at DG-1 terminal	$V_{t1}=1.0234\angle 1.16^\circ$
Volt. at DG-2 terminal	$V_{t2}=1.0237\angle 1.22^\circ$

TABLE III Results of step load change (after)

Quantities	Values(pu)
Result of DG-1 output	$P_1=0.576, Q_1=0.1000$
Result of DG-2 output	$P_2=0.659, Q_2=0.0431$
Result of load	$P_L=1.198, Q_L=0.0994$
Volt. at bus	$V_{bus}=0.9824\angle 0^\circ$
Volt. at DG-1 output	$V_{g1}=1.0195\angle 2.71^\circ$
Volt. at DG-2 output	$V_{g2}=1.0268\angle 3.78^\circ$
Volt. at DG-1 terminal	$V_{t1}=1.0113\angle 1.93^\circ$
Volt. at DG-2 terminal	$V_{t2}=1.0203\angle 2.87^\circ$

4.2. Test of Meshed Network

Fig. 6 shows configuration of microgrid for consideration of meshed network. Table IV gives parameters for the system under consideration.

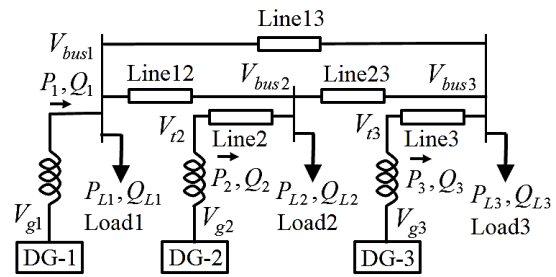


Fig. 6 Three-bus meshed network.

The simulation result of the three-bus meshed network are in Table V.

TABLE IV System parameters (meshed network)

Quantities	Values(pu)
Line1 impedance	- (Connected directly to the bus)
Line2 impedance	$0.166+j0.021$
Line3 impedance	$0.332+j0.041$
Line12 impedance	$0.166+j0.208$
Line13 impedance	$0.021+j0.083$
Line23 impedance	$0.125+j0.166$
Load1 rating	$P=0.25, Q=0.05$
Load2 rating	$P=0.5, Q=0.1$
Load3 rating	$P=0.5, Q=0.05$
DG-1 rating	$P_{m1}=0.5, Q_{m1}=0.1$
DG-2 rating	$P_{m2}=1, Q_{m2}=0.2$
DG-3 rating	$P_{m3}=0.75, Q_{m3}=0.1$
Output inductance 1	$j0.125$
Output inductance 2	$j0.125$
Output inductance 3	$j0.125$

It has been reported [11] that by far, the largest body of research work done in the decentralized microgrid control has been for radial network. The simulation results demonstrate that proposed method has a capability to control the power

sharing not only in the radial network, but also in the meshed network.

TABLE V Results of three-bus meshed network

Quantities	Values(pu)
DG-1 output	$P_1=0.455, Q_1=0.0978$
DG-2 output	$P_2=0.511, Q_2=0.0633$
DG-3 output	$P_3=0.285, Q_3=0.0394$
Bus1 to bus2	$P_{L12}=0.029, Q_{L12}=0.0096$
Bus1 to bus3	$P_{L13}=0.175, Q_{L13}=0.0389$
Bus2 to bus3	$P_{L23}=0.036, Q_{L23}=-0.0271$
Result of load1	$P_{L1}=0.246, Q_{L1}=0.0493$
Result of load2	$P_{L2}=0.491, Q_{L2}=0.0982$
Result of load3	$P_{L3}=0.491, Q_{L3}=0.0491$
V at bus1	$V_{bus1}=0.9961\angle 0.26^\circ$
V at bus2	$V_{bus2}=0.9939\angle 0.17^\circ$
V at bus3	$V_{bus3}=0.9939\angle 0^\circ$
V at DG-1 output	$V_{g1}=1.003\angle 71.35^\circ$
V at DG-2 output	$V_{g2}=1.0282\angle 1.34^\circ$
V at DG-3 output	$V_{g3}=1.0287\angle 0.63^\circ$
V at DG-1 terminal	$V_{t1}=0.9961\angle 0.26^\circ$
V at DG-2 terminal	$V_{t2}=1.0218\angle 0.18^\circ$
V at DG-3 terminal	$V_{t3}=1.0250\angle -0.03^\circ$

5. Experimental Results

In order to prove that the concept has a feasibility to be implemented in real microgrid,

the proposed approach is tested in a down-scale single phase 220V/50Hz system.

Fig. 7 shows the configuration of the system of two DGs; all parameters are included in the figure. The system can be regarded as the system in Fig. 4. The parameters for the system in per unit with base kVA(0.3) and base kV(0.22), are in Table VI. To simplify the operation of the V_g tracking control, the V_g is controlled by a direct voltage-PWM control loop. The control functions of both DGs are operated by a single dSPACE system, but modules of the proposed power sharing control for each DG are separated.

There are problems related to the implementation of the VSC-type DG. The recommendation is given as follows for implementation of the proposed approach. If there are noisy environment, voltage fluctuation by controlling of VSC, and inaccuracy of the phase angle and peak detection, then the adjustment of power sharing by (9) and (10) may not be smooth and desirable. In order to mitigate those effects on power sharing, equation (9) and (10) need to be modified by adding a damping coefficient (C_d). Therefore, equation (9) is modified to be:

$$\delta_g^i = \delta_g^{i-1} + C_d \sin^{-1} \left(\frac{\Delta P X_g}{(|V_{bus}|^*)^2} \right) \quad (14)$$

, where equation (10) is modified as:

$$\Delta V^i = \Delta V^{i-1} + C_d \frac{\Delta Q X_g}{|V_{bus}|^*} \quad (15)$$

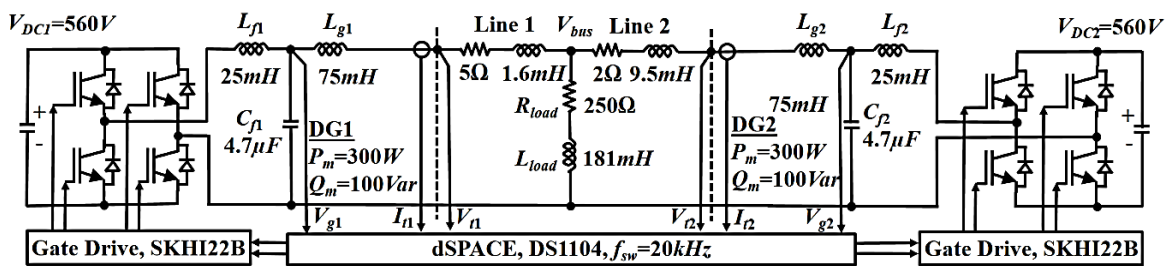


Fig. 7 Configuration of the experimental system.

The value of damping coefficient is between 0-1. For the system without any concerns about those effects, such as in the simulation study, C_d can be 1. The lower value of C_d is more mitigation of the effects on power sharing, but its response would be slower. In the experiment, it found that $C_d=0.2$ is the optimal value in the test condition.

TABLE VI

System parameters (experimental system)

Quantities	Values(pu)
Line1 impedance	0.0310+j0.0031
Line2 impedance	0.0124+j0.0185
Load rating	P=0.613, Q=0.138
DG-1 rating	$P_{m1}=1, Q_{m1}=0.333$
DG-2 rating	$P_{m2}=1, Q_{m2}=0.333$
Output inductance 1	j0.146
Output inductance 2	j0.146

Table VII shows the results of the experiment in per unit and the parameters in the Table VI are the same values as in Fig. 7. Table VIII shows the results of the experiment of the previous work [23], in the same system. It can be noted that the results of power sharing are different between the two methods. This is due to the fact that the adjusting of V_g , ΔV and δ_g are different; whereas the previous work [23] need the value of line impedance to calculate the adjustment, this work does not need the value. The adjustment of each method leads to its own suitable power sharing point, which is different from each other.

6. Conclusions

This article proposes a method to control active and reactive power sharing in Microgrid. The proposed control is based on the power-angle control with on-demand power feeding. The presented technique is able to operate autonomously in islanding mode and in DG with either inductive or resistive line. The design of the control function is simple and it guarantees that there would not be the power consumed by the DGs. The experimental results show the validity that the proposed approach can be implemented in practices.

TABLE VII

Experimental results of the proposed method

Quantities	Values(pu)
DG-1 output	$P_1=0.459, Q_1=0.016$
DG-2 output	$P_2=0.161, Q_2=0.128$
Result of load	$P_L=0.615, Q_L=0.140$
Voltage at bus	$V_{bus}=1.0002\angle 0^\circ$
V at DG-1 output	$V_{g1}=1.0173\angle 4.10^\circ$
V at DG-2 output	$V_{g2}=1.0182\angle 1.73^\circ$
V at DG-1 terminal	$V_{t1}=1.0141\angle 0.05^\circ$
V at DG-2 terminal	$V_{t2}=1.0041\angle 0.08^\circ$

TABLE VIII

Experimental results of the previous work [23]

Quantities	Values(pu)
DG-1 output	$P_1=0.276, Q_1=0.003$
DG-2 output	$P_2=0.343, Q_2=0.149$
Result of load	$P_L=0.6166, Q_L=0.141$
Voltage at bus	$V_{bus}=1.0032\angle 0^\circ$
V at DG-1 output	$V_{g1}=1.0110\angle 1.96^\circ$
V at DG-2 output	$V_{g2}=1.0296\angle 2.59^\circ$
V at DG-1 terminal	$V_{t1}=1.0109\angle -0.35^\circ$
V at DG-2 terminal	$V_{t2}=1.0100\angle -0.15^\circ$

7. Acknowledgements

This research was performed partly under the National Research University Project, Office of the Higher Education Commission, Thailand and Chiang Mai University. The authors would like to thank National Science and Technology Development Agency and Rajamangala University of Technology Lanna for scholarship and support for studying.

8. References

- [1] M. Prodanovic and T. C. Green, "High-quality power generation through distributed control of a power park microgrid," *IEEE Trans. Ind. Electron*, vol. 53, no. 5, pp. 1471–1482, 2006.
- [2] M. N. Marwali, J. W. Jung, and A. Keyhani, "Control of distributed generation systems—Part II: Load sharing control," *IEEE Trans. Power Electron*, vol. 19, no. 6, pp. 1551–1561, 2004.
- [3] A. Mehrizi-Sani and R. Iravani, "Potential function based control of a microgrid in islanded and grid-connected modes," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 25, no. 4, pp. 1883–1891, 2010.
- [4] J. M. Guerrero, L. Hang, and J. Uceda, "Control of distributed uninterruptible power supply systems," *IEEE Trans. Ind. Electron*, vol. 55, no. 8, pp. 2845–2859, 2008.
- [5] F. Katiraei and M. R. Iravani, "Power Management Strategies for a Microgrid with Multiple Distributed Generation Units," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, no. 4, pp. 1821–1831, 2006.
- [6] J. M. Guerrero, J. Matas, L. G. de Vicuña, M. Castilla, and J. Miret, "Wireless- control strategy for parallel operation of distributed generation inverters," *IEEE Trans. Ind. Electron*, vol. 53, no. 5, pp. 1461–1470, 2006.
- [7] K. D. Brabandere, B. Bolsens, J. V. D. Keybus, A. Woyte, J. Driesen, and R. Belmans, "A voltage and frequency droop control method for parallel inverters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 22, no. 4, pp. 1107–1115, 2007.
- [8] M. Ashabani, Y.A.-R.I. Mohamed, M. Mirsalim, and M. Aghashabani, "Multivariable droop control of synchronous current converters in weak grids/ microgrids with decoupled dq- axes currents," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 6, no. 4, pp. 1610-1620, 2015.
- [9] W. Ferreira de Souza, M.A. Severo-Mendes, and L.A.C. Lopes, "Power sharing control strategies for a three- phase microgrid in different operating condition with droop control and damping factor investigation," *IET Renewable Power Gener.*, vol. 9, no. 7, pp. 831-839, 2015.
- [10] J. Rocabert, A. Luna, F. Blaabjerg, and P. Rodríguez, "Control of power converters in AC microgrids," *IEEE Trans. Power Electron*, vol. 27, no. 11, pp. 4734-4749, 2012.
- [11] J. M. Guerrero, M. Chandorkar, T. Lee, and P. C. Loh, "Advanced control architectures for intelligent microgrids—Part I: decentralized and hierarchical control," *IEEE Trans. Ind. Electron*, vol. 60, no. 4, pp. 1254-1262, 2013.
- [12] R. Majumder, A. Ghosh, G. Ledwich and F. Zare, "Angle droop versus frequency droop in a voltage source converter based

- autonomous microgrid," in IEEE Power & Energy Society General Meeting, Calgary, AB, 2009, pp. 1-8.
- [13] R. Majumder, B. Chaudhuri, A. Ghosh, R. Majumder, G. Ledwich, and F. Zare, "Improvement of stability and load sharing in an autonomous microgrid using supplementary droop control loop," IEEE Trans. Power Syst., vol. 25, no. 2, pp. 796–808, 2010.
- [14] R. Majumder, A. Ghosh, G. Ledwich, and F. Zare, "Load sharing and power quality enhanced operation of a distributed microgrid," IET Renewable Power Gener., vol. 3, no. 2, pp. 109–119, 2009.
- [15] M.S. Golsorkhi and D.D.C. Lu, "A control method for inverter- Based islanded microgrids based on V- I droop characteristics," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 30, no. 3, pp. 1196-1204, 2015.
- [16] S. Tabatabaee, H. R. Karshenas, A. Bakhshai and P. Jain, " Investigation of droop characteristics and X/R ratio on small-signal stability of autonomous Microgrid," in The 2nd Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference, Tehran, 2011, pp. 223-228.
- [17] J. M. Guerrero, L. Garcia de Vicuna, J. Matas, M. Castilla, and J. Miret, "Output impedance design of parallel- connected UPS inverters with wireless load-sharing control," IEEE Trans. Ind. Electron, vol. 52, no. 4, pp. 1126–1135, 2005.
- [18] W. Yao, M. Chen, J. Matas, M. Guerrero, and Z. Qian, "Design and analysis of the droop control method for parallel inverters considering the impact of the complex impedance on the power sharing," IEEE Trans. Ind. Electron, vol. 58, no. 2, pp. 576–588, 2011.
- [19] F. Z. Peng, Y. W. Li and L. M. Tolbert, "Control and protection of power electronics interfaced distributed generation systems in a customer-driven microgrid," in IEEE Power & Energy Society General Meeting, Calgary, AB, 2009, pp. 1-8.
- [20] S. J. Chiang, C. Y. Yen, and K. T. Chang, "A multi module parallelable series-connected PWM voltage regulator," IEEE Trans. Ind. Electron, vol. 48, no. 3, pp. 506–516, 2001.
- [21] Y. Xiaoxiao, A. M. Khambadkone, W. Huanhuan, and S. Terence, "Control of parallel- connected power converters for low- voltage microgrid— Part I: A hybrid control architecture," IEEE Trans. Power Electron, vol. 25, no. 12, pp. 2962–2970, 2010.
- [22] D. M. Vilathgamuwa, L. Poh Chiang, and Y. Li, "Protection of microgrids during utility voltage sags," IEEE Trans. Ind. Electron, vol. 53, no. 5, pp. 1427–1436, 2006.
- [23] S. Janjornmanit and S. Premrudeepreechacharn, "A power sharing control for microgrid based on extrapolation of injecting power and power-angle control," Turk. J. Elec. Eng. & Comp. Sci., vol. 25, no. 2, pp. 689–704, 2017.
- [24] W. D. Stevenson, *Elements of Power System Analysis*. Singapore, McGraw-Hill, 1982, pp. 206-208.

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิ (Reader)

ต้นฉบับบทความวิจัยที่ตีพิมพ์วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีที่ 13 ฉบับที่ 1 (เดือนมกราคม – เมษายน พ.ศ. 2561) ได้รับการตรวจสอบแก้ไขจากผู้ทรงคุณวุฒิดังรายนามต่อไปนี้

- | | |
|--|--|
| 1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นำคุณ ศรีสนิท | ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 2. อาจารย์ ดร.ภาณุวัฒน์ จ้อยกลัด | ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 3. อาจารย์ ดร.ธนธิป สุ่มอิม | ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 4. รองศาสตราจารย์ ดร.นิลวรรณ ชุ่มฤทธิ์ | ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 5. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัฐสิทธิ์ ศิริวิชารมณ | ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 6. อาจารย์สมชาย แยมใส | ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 7. รองศาสตราจารย์ ดร.วุฒิพล ธาราธิระเศรษฐ์ | ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 8. อาจารย์ ดร.วรารช ปัญญางาม | ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 9. อาจารย์ ดร.อนุวัฒน์ จุติลาภการ | ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 10. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ว่าที่ร้อยตรี ดร.ศุภชัย สีนถาวร | ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 11. รองศาสตราจารย์ ดร.กัณวรัช พลูปราชน | ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 12. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงษ์ คงประเสริฐ | ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 13. อาจารย์ ดร.สุชาติ ตันตสิริระพงษ์ | ภาควิชาวิศวกรรมชีวการแพทย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 14. อาจารย์ ดร.เกียรติศักดิ์ ใหม่เจริญกุล | วิทยาลัยเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร
มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 15. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปวีร์ ศิริรักษ์ | สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี |
| 16. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรีดา ไชยมหาวัน | สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยพะเยา |

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิ (Reader)

ต้นฉบับบทความวิจัยที่ตีพิมพ์วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีที่ 13 ฉบับที่ 1 (เดือนมกราคม – เมษายน พ.ศ. 2561) ได้รับการตรวจสอบแก้ไขจากผู้ทรงคุณวุฒิดังรายนามต่อไปนี้

- | | |
|--|--|
| 17. อาจารย์ ดร.พงษ์ธร จุฬพันธ์ทอง | ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยนเรศวร |
| 18. อาจารย์ ดร.เอกชัย อยู่ประเสริฐชัย | สาขาวิศวกรรมโยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 19. อาจารย์ ดร.สุสิทธิ์ ฉายประกายแก้ว | สาขาวิศวกรรมบริหารการก่อสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 20. อาจารย์ ดร.บุปผเวช พันธุ์ศรี | สาขาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่ |
| 21. รองศาสตราจารย์ ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง | ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 22. รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ธิวัชรวิชัย | ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยสยาม |
| 23. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยวัฒน์ เอกวัฒน์พานิชย์ | สาขาวิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| 24. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฏิภาณ ถิ่นพระบาท | ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร |
| 25. รองศาสตราจารย์ ดร.เดชา พวงดาวเรือง | สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ |
| 26. อาจารย์ .ดร.กิตติศักดิ์ วิธินันทกิจดี | สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
วิทยาเขตบางพระ |
| 27. อาจารย์ ดร.ณรงค์ อังกิมบัวน | ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา |
| 28. รองศาสตราจารย์ ดร.ยุทธชัย บันเทิงจิต | ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 29. อาจารย์ ดร.วุฒินันท์ นุ่นแก้ว | ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| 30. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนะ เยี่ยงกมลสิงห์ | สาขาวิชาวิศวกรรมธุรกิจยานยนต์ วิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย |
| 31. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยวัฒน์ นุ่มทอง | ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา |
| 32. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กิตติพงษ์ กิมะพงษ์ | ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิ (Reader)

ต้นฉบับบทความวิจัยที่ตีพิมพ์วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีที่ 13 ฉบับที่ 1 (เดือนมกราคม – เมษายน พ.ศ. 2561) ได้รับการตรวจสอบแก้ไขจากผู้ทรงคุณวุฒิดังรายนามต่อไปนี้

- | | |
|--|--|
| 33. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทวีชัย สำราญวานิช | ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยบูรพา |
| 34. อาจารย์ ดร.สนธยา ทองอรุณศรี | สาขาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาตาก |
| 35. รองศาสตราจารย์ ดร.เตือนใจ สมบูรณ์วิวัฒน์ | ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| 36. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สราวุธ ประเสริฐศรี | ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี |
| 37. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรรถรัตน์ นาวิกาวตาร | สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ |
| 38. รองศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ โกกัมน์ | ภาควิชารังสีเทคนิค คณะเทคนิคการแพทย์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ |

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

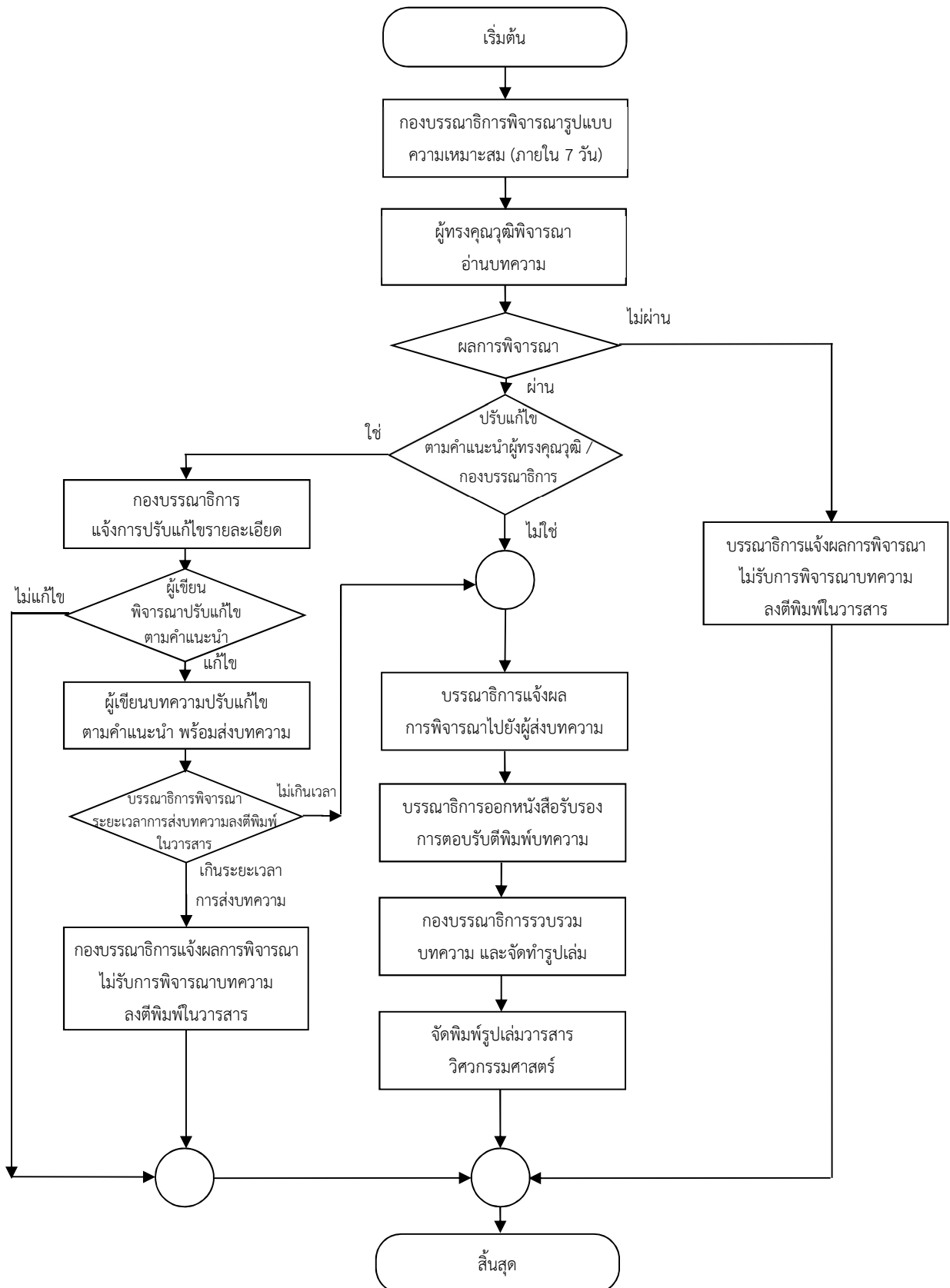
- 1) ส่งต้นฉบับบทความ ไฟล์ Microsoft Word และ pdf พร้อมแนบไฟล์สแกนแบบเสนอผลงานวิชาการเพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
- 2) ส่งไฟล์ต้นฉบับทางออนไลน์ที่
<https://www.tci-thaijo.org/index.php/sej/login>
หรือทางอีเมล JournalEngSWU@gmail.com
- 3) ดูข้อมูลวารสารวิศวกรรมศาสตร์ 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 27073 22010 22011 โทร 0 3732 2602
<http://eng.swu.ac.th>

บทความวิจัย

- Mechanical Properties of Local Cement-Clay Interlocking Bricks in Central Part of Thailand
By Panuwat Joyklad Satit Areecharoen Qudeer Hussain
- การควบคุมเวลาล่าช้าของงานด้วยเทคนิค PERT/CPM บริษัท ทีโอที จำกัด(มหาชน) กรณีศึกษา : การติดตั้งระบบอินเทอร์เน็ตความเร็ว Fiber to the x (FTTx) ที่สถานีก๊าซ NGV ปตท. จ.ปทุมธานี
The Time Delay Control of the Technique PERT CPM TOT Public Company Limited Case Study: The Project to Install Speed Fiber to the x (FTTx) at the NGV Stations PTT Pathum Thani
โดย จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร ธนวัฒน์ สว่างงาม
- สมบัติพื้นฐานและการเกิดคาร์บอนในชั้นของคอนกรีตที่แทนที่ด้วยวัสดุประสานต่างชนิดกัน
Basic Properties and Carbonation of Concrete Replaced with Different Binders
โดย บัญญัติ วารินทร์โหล ปิติศานต์ กรามมาตร
- พฤติกรรมภายใต้แรงแผ่นดินไหวของผนังรับแรงคอนกรีตหล่อสำเร็จรูปด้วยรอยต่อแบบการเชื่อมทาบเหล็กเส้น
Seismic Behavior of Precast Concrete Load Bearing Wall with Welded Rebar Connections
โดย เอกชัย อยู่ประเสริฐชัย พงษ์ศักดิ์ วิวัฒน์โรจนกุล พิชัย สุวรรณสายะ อมร ทัฬหามาต
- การจำลองหุ่นส่วนร่างกายของทรวงอกสำหรับการศึกษาการประมวลผลภาพทางการแพทย์
A Phantom Simulation of Thoracic for Medical Image Processing Study
โดย ธนาธร สันติธรรม ณัฐพงศ์ จันทราดา ปวีตรา บัลลังก์นาค ประธาน วงศ์ดาด้า ชัยณุกพงศ์ บุตรดีปฏิวัติ โชติมล ธัชชัย ศรีเสน วิฑิตพงศ์ แก้วเหล็ก
- การแก้ปัญหาการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนานที่มีมากวัตถุประสงค์
Solving Line Balancing and Allocation Multi-skilled Workers Problem on Parallel Assembly Lines under Many-objective
โดย ชินวิทย์ สันธะชากุล ปารเมศ ชุตินา
- การจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะตัวขนานที่มีวัตถุประสงค์จำนวนมากโดยใช้วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก
Mixed-model Parallel U-shaped Assembly Line Balancing under Many-objectives Using a Multi-objective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition
โดย เพ็ญภัส จิรัชัย ปารเมศ ชุตินา
- ผลกระทบต่อการเปลี่ยนขนาดความยาวและการปรับมุมใบกังหันต่อความเร็วรอบการหมุนและโมเมนต์บิดของกังหันลมแกนตั้ง
The Effects of Chord Line Size Changing and Blade Pitch Adjustment on Rotational Speed and Torque of Vertical Axis Wind Turbine
โดย สุรัชย์ เหมศิริบุญ
- สมบัติทางกลและทางกายภาพของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกและซีล้อยไม้ยางพารา
Mechanical and Physical Properties of Thermoplastic Natural Rubber Composites Reinforced with Rubberwood Sawdust
โดย ชาตรี หอมเขียว สุรสิทธิ์ ระวีวงศ์ วรพงศ์ บุญช่วยแทน วิริยะ ทองเรือง
- การวิเคราะห์แนวโน้มปริมาณน้ำหลากสูงสุดของลุ่มน้ำหลักในประเทศไทย
Flood Peak Trend Analysis of the Major River Basin in Thailand
โดย ไชยาพงษ์ เทพประสิทธิ์ พงศธร โสภากันธุ์ นิมิตร เมื่อนันท์พิพัฒน์
- A Unique Grid-flux-oriented Control Algorithm for Synchronization and Power Controls of a Doubly-Fed Induction Generator System
By Sutthimat Mueangngoen Yuttana Kumsuwan
- การพัฒนาเครื่องจักรซีเอ็นซีขนาดเล็กเพื่อตัดแผ่นอลูมิเนียมคอมโพสิต
Aluminum Composite Cutting Machine Development Using CNC
โดย พรเทพ มานิตยวงษ์ สุวรรณ อัครกุลชัย
- การพัฒนาเครื่องฟักไข่สำหรับการตรวจหาตัวอ่อนในไข่ไก่โดยใช้เทคนิคการประมวลผลภาพดิจิทัล
Development of Egg Incubator for Detecting Embryos in Chicken Eggs Using Digital Image Processing Techniques
โดย วิสิทธิ์ ลุ่มชนะนาวี ณัฐวุฒิ พจน์ปริญญ์
- การจำลองสถานการณ์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการให้บริการของแผนกผู้ป่วยนอก โรงพยาบาลแหลมฉบัง
Simulation to Improve Service Performance of Outpatient Department in Laem Chabang Hospital
โดย เขษฏรา ชำนาญหล่อ กุลสัมพันธ์ สุขसानต์ จริสตา สายบุญณะ
- แบบจำลองการอบแห้งพริกไทยด้วยเทคนิคเจ็ตสเปาต์ได้เด็ดโดยใช้ระบบอนุมานฟัซซีโครงข่ายปรับตัวได้
Modeling Pepper Drying by Jet Spouted Bed Technique Using ANFIS
โดย กิตติ สถาพรประสาธน์ ไพรัชทอง ปราณิตพลกรัง
- การศึกษาเปรียบเทียบกระบวนการฮิวริสติกส์ในการจัดการการขนส่งสำหรับโรงงานกรณีศึกษาโรงงานจำหน่ายอุปกรณ์ระบบงานไฟฟ้า
Defect Reduction in Film Blowing Process by Six Sigma approach
โดย ณฤมล ไชยโคตร ภารภากร อธิษฐานันท์ รัตนรัตน์ กิตติปัญญาพัฒน์ สิริเดช ขาดินิยม

บทความวิชาการ

- Non-line-impedance-synthesized Power Sharing Control in Microgrid Using On-demand Power Feeding
By Suchart Janjornmanit Suttichai Premrudeepreechacharn Kohji Higuchi