

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

SRINAKHARINWIROT ENGINEERING JOURNAL

ปีที่ 14 ฉบับที่ 3 เดือนกันยายน - ธันวาคม พ.ศ. 2562



คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

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

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

วัตถุประสงค์

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

เจ้าของ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

กองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

63 หมู่ 7 ตำบลอโศก อำเภอบางบัวทอง

จังหวัดนนทบุรี 11000

โทร. 0 2649 5000 ต่อ 27560

<http://eng.swu.ac.th> และ <https://www.tci-thaijo.org/index.php/sej>

อีเมล journalengswu@gmail.com



วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ที่ปรึกษากองบรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมภพ รอดอัมพร

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตติ สถาพรประสาธน์

รองคณบดีฝ่ายแผนและพัฒนา

รายนามคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ

ศาสตราจารย์ ดร.ทนงเกียรติ	เกียรติศิริโรจน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศาสตราจารย์ ดร.อภิรัฐ	ศิริธราธิวัตร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์	เดชะอำไพ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ	อัครเอกผาณิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร.โกสินทร์	จำนงไทย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.ศราวุธ	ริมดุสิต	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.พงศ์ชนัน	เหลื่องไพบูลย์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ศาสตราจารย์ ดร.ชิตชนก	เหลื่อสินทรัพย์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ	โสภาแดง	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย	เปรมฤดีปรีชาชาญ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงพรรณ	ศฤงคารินทร์	มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.สีรุ่ง	ปรีชานนท์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รองศาสตราจารย์ ดร.อนันต์	มั่งวัฒนา	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต	ชาลิรักษ์ตระกูล	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.อริคม	ฤกษ์บุตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
รองศาสตราจารย์ ดร.เตือนใจ	สมบูรณ์วิวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.สุรพันธ์	ยิ้มมัน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์เจต	พรหมวงศ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.จารุวัตร	เจริญสุข	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.ฤดี	มาสุจันทร์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.วิจิตร	กิมเรศ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา	ทิพย์สุวรรณพร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.โกศล	โอฬารไพโรจน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริวรรณ	ศรีสรณ์	46/18 ซอยพหลโยธิน 51 แขวงอนุสาวรีย์ เขตบางเขน กรุงเทพมหานคร 10220

บรรณาธิการอำนวยการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิไลดา หวังพานิช

หัวหน้ากองบรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กำพล วรดิษฐ์

กองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล	นาพล	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ ดร.จันจิรา	จับศิลป์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ ดร.นิลวรรณ	ชุ่มฤทธิ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ ดร.ทิมพันธุ์	เจริญพงษ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ ดร.สุนิติ	สุภาพ	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ ดร.วุฒิพล	ธาราธิ์เศรษฐ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ ดร.ประชา	บุญยวานิชกุล	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงษ์	คงประเสริฐ	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาคภูมิ	ศรีมรินทร์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
อาจารย์ ดร.สุธิดา	ทีปักษ์พันธุ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
อาจารย์นาวิ	รุจิตามพ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ศาสตราจารย์ ดร.ทนงเกียรติ	เกียรติศิริโรจน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศาสตราจารย์ ดร.อภิรัฐ	ศิริธราธิวัตร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์	เดชะอำไพ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ	อัครเอกผาลิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร.โกสินทร์	จำนงไทย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.ศราวุธ	ริมดุสิต	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.พงศ์ชนัน	เหลื่องไพบูลย์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ศาสตราจารย์ ดร.จิตชนก	เหลื่อสินทรัพย์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ	โสภาคแดง	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย	เปรมฤดีปรีชาชาญ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงพรรณ	ศฤงคารินทร์	มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.สีรุ่ง	ปรีชานนท์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รองศาสตราจารย์ ดร.อนันต์	มั่งวัฒนา	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต	ชาลิรักษ์ตระกูล	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.อริคม	ฤกษ์บุตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
รองศาสตราจารย์ ดร.เตือนใจ	สมบูรณ์วิวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.สุรพันธ์	ยิ้มมัน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์เจต	พรหมวงศ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.จารุวัตร	เจริญสุข	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.ฤดี	มาสุจันทร์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.วิจิตร	กิมเรศ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา	ทิพย์สุวรรณพร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.โกศล	โอฬารไพโรจน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริวรรณ	ศรีสรณ์ตร์	46/18 ซอยพหลโยธิน 51 แขวงอนุสาวรีย์ เขตบางเขน กรุงเทพมหานคร 10220

ผู้ช่วยบรรณาธิการ

นางสาวยุพาพร ประไพย์

บทบรรณาธิการ

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

สำหรับการบริหารจัดการทรัพยากรคนอาจารย์ให้เปลี่ยนแปลงทันกับการเปลี่ยนแปลงของหลักสูตรและความต้องการของสังคมเป็นสิ่งที่ทำได้ยาก เพราะคนอาจารย์สำเร็จการศึกษามาด้วยการทำปริญญาโทในหัวข้อที่ต้องมีความลุ่มลึก ทำให้ขาดมิติความกว้างที่จะปรับเปลี่ยนหัวข้อการสอนตามการเปลี่ยนแปลงของหลักสูตรได้ ขณะเดียวกันก็ไม่สามารถแก้ไขปัญหาได้ด้วยการเปิดรับอาจารย์ใหม่ เพราะอายุการทำงานของคนอาจารย์แต่ละคนยาวนานเกินการเปลี่ยนแปลงของความ ต้องการของหลักสูตร การแก้ปัญหาแนวทางนี้ เมื่อเวลาผ่านไปไม่นาน ปัญหาความไม่สอดคล้องระหว่างคนอาจารย์ที่มีความต้องการของหลักสูตรก็จะวนกลับมาเกิดซ้ำอีก ไม่นับรวมภาระค่าใช้จ่ายที่ต้องแบกรับในการจ้างคนอาจารย์กลุ่มเดิมที่ไม่สามารถสอนในหลักสูตรที่เปลี่ยนแปลงไปได้ ซึ่งจะทำให้ต้นทุนค่าธรรมเนียมการศึกษาสูงโดยไม่จำเป็น เกิดความไม่มีประสิทธิภาพในการใช้งบประมาณที่ได้รับ

ดังนั้นหากคนอาจารย์มีความพยายามที่จะทำงานวิจัยในหัวข้อใหม่ ๆ ที่ไม่ถนัด และสามารถปรับเปลี่ยนหัวข้อการสอนให้ตรงตามการเปลี่ยนแปลงของหลักสูตรได้ ผู้กำกับดูแลงานวิจัยของหน่วยงานต่าง ๆ จึงควรทำงานบูรณาการกับหลักสูตรและการเรียนการสอน เพื่อกำหนดเป้าหมายและขอบเขตของการสนับสนุนโครงการวิจัยในหน่วยงาน ให้นำไปสู่ความสามารถในการสอนหัวข้อที่ตรงกับหลักสูตรที่เปลี่ยนแปลงไปได้ อีกทั้งผลลัพธ์ของโครงการวิจัยได้อีกทางคือ การตีพิมพ์บทความวิจัย วารสารคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒที่ท่านถืออยู่นี้ จึงเป็นกลไกสำคัญในการผลักดันให้คนอาจารย์ทำวิจัย ซึ่งกองบรรณาธิการดูแลเป็นอย่างดีเสมอมา

สุดท้ายนี้ ขอแจ้งว่ากองบรรณาธิการได้ปรับแก้รูปแบบการเขียนเอกสารอ้างอิง ให้เป็นรูปแบบ IEEE ร้อยละร้อย เพื่อให้ผู้เขียนเตรียมต้นฉบับได้สะดวกขึ้น พร้อมให้ตัวอย่างอย่างครอบคลุม ท่านผู้เขียนที่เคยส่งบทความมาก่อน โปรดใช้รูปแบบ IEEE ในการเขียนเอกสารอ้างอิง

บทความวิจัย

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งเห็ดหอมด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด Mathematical Modeling of Shiitake Mushroom Drying Using Infrared-Vacuum Technique กิตติศักดิ์ วิธินันทกิตต์ ณรงค์ อังกิมบัวน สิทธิชัย รุ่งสว่าง	1
Evaluation of Sustainable Urban Storm Drainage Systems Approach for Reducing Peak Runoff at Sukhumvit Area in Bangkok, Thailand Detchphol Chitwatkul Siri	14
การบรรเทาการขาดเสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่จ่ายโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุม โดยใช้วงรอบป้อนไปหน้า Instability Mitigation of a Three-Phase Diode Rectifier Feeding a Controlled Buck Converter by Using Feedforward Loop รัฐพล โพธิ์สังข์ เทพพนม โสภภาพิม กองพันธ์ อาริรักษ์	22
ระบบสารสนเทศเพื่อการจัดซื้อ กรณีศึกษา : โรงงานกระดาษ Information System for Purchasing A Case Study : Paper Mill ภัทรพงษ์ ภาควณิ กิตติชัย อธิกุลรัตน์ ศิริรัตน์ แจ่มรักษ์สกุล	35
Review on Microalgae Cultivation Using Wastewater for Biofuel Production Saowapak Thammasane and Thaniya Kaosol	46
สาเหตุที่ก่อให้เกิดความล่าช้าในโครงการก่อสร้างอาคารขนาดใหญ่: กรณีศึกษาจังหวัดนครพนม Cause of Delays in Large Building Construction Projects: A Case Study of Nakhon Phanom Province จิรเดช เศรษฐภูมิพูน นาด สุขศิลป์	60
การสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดิซีที่มีโหลดเป็นอิเล็กทรอนิกส์กำลัง Stabilization using Reference-Voltage-Based Active Compensator Method for AC-DC Power System Feeding Power Electronic Load กษมา รุ่งรัตน์รัชชัย เทพพนม โสภภาพิม กองพันธ์ อาริรักษ์	73
เครื่องปิ้งเนื้อสัตว์กึ่งอัตโนมัติเพื่อสุขภาพ Healthy Semi Automatic Grill Machine ธีรพงศ์ บริรักษ์	84
Mixed Solar Drying System for Drying of pineapple Wannee Ekasilp Sirikul Chunsawang	98

บทความวิจัย

การพยากรณ์เพื่อการจัดการสินค้าคงคลังเมื่อมีข้อมูลจำนวนน้อย

106

Forecasting Techniques for Inventory Management when there is a Small Amount of Data

พงษ์เพ็ญ จันทนะ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งเห็ดหอมด้วยเทคนิคสุญญากาศ ร่วมกับอินฟราเรด

Mathematical Modeling of Shiitake Mushroom Drying Using Infrared-Vacuum Technique

กิตติศักดิ์ วิธินันท์กิตติ^{1*} ณรงค์ อึ้งกิมบัว² และ สิริชัย รุ่งสว่าง³

¹อาจารย์ ³นักศึกษา สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก

43 ม.6 ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20110

²ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

169 ถ.ลงหาดบางแสน ต.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131

Kittisak Witinantakit^{1*}, Narong Uengkimbuan² and Sittichai Rungsawang³

¹Lecturer, ³Graduate Student, Energy Technology Department,

Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Tawan-ok

43 Moo 6 Bangpra Subdistrict, Sriracha District, Choburi 20110

²Assistant Professor, Department of Physics, Faculty of Science, Burapha University

169 Long-Haad Bangsaen Rd. Saensuk Subdistrict, Muang District, Choburi 20131

*Corresponding author Email: k_yong28@hotmail.com

(Received: September 19, 2019; Accepted: December 20, 2019)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการอบแห้งเห็ดหอมด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด ความสัมพันธ์ของพลังงานจำเพาะ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมเพื่อทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งเห็ดหอม โดยทดลองอบแห้งเห็ดหอมภายใต้อุณหภูมิ 50 60 และ 70 °C และความดันสัมบูรณ์ ในห้องอบแห้ง 10 15 และ 20 kPa จากผลการทดลองพบว่า เมื่ออบแห้งเห็ดหอมภายใต้อุณหภูมิที่สูงขึ้นหรือความดันสัมบูรณ์ในห้องอบแห้งลดลง จะทำให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้น และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีแนวโน้มลดลง สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมีค่าอยู่ระหว่าง 4.003×10^{-9} ถึง 6.630×10^{-9} m²/s โดยมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิอบแห้งที่สูงขึ้นหรือความดันสัมบูรณ์ในห้องอบแห้งที่ลดลง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัลจากสมการของ Midilli สามารถทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งเห็ดหอมได้ดีที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ($R^2=0.99689$) สูงที่สุด ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE=0.18370) และค่าการลดลงค่ากำลังสอง ($\chi^2=0.21419 \times 10^{-3}$) ต่ำที่สุด

คำสำคัญ: การอบแห้งด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล เห็ดหอม

ABSTRACT

The objective of this research is to study the drying of shiitake mushrooms by infrared-vacuum technique. Specific energy consumption, effective moisture diffusivity coefficient and suitable mathematical models to predict the drying kinetics of shiitake mushrooms were investigated under the drying conditions with the drying temperature of 50, 60, and 70 °C and the absolute pressure in drying chamber at 10, 15, and 20 kPa. The results showed that, the increment of the temperature or the reduction of absolute pressure in the drying chamber, the drying rate was high and low specific energy consumption. Effective moisture diffusivity coefficient ranged from 1.77×10^{-9} to 2.685×10^{-9} m²/s with increasing values according to higher drying temperature and lower absolute pressure in drying chamber. Midilli mathematical model gave the most appropriate predictions due to the highest coefficient of determination ($R^2=0.99689$), the lowest root mean square error (RMSE=0.18370) and chi square ($\chi^2=0.21419 \times 10^{-3}$).

Keyword: Vacuum-infrared drying, Specific energy consumption, Mathematical modeling, Effective moisture diffusivity coefficient, Shiitake mushrooms.

1. บทนำ

เห็ดหอม (ชื่อทางวิทยาศาสตร์ *Lentinus dodes* (Berk.) Sing.) หรือเห็ดชิตาเกะ (Shiitake Mushroom) เป็นพืชตระกูลเห็ดที่นิยมบริโภคในประเทศไทย เนื่องจากมีรสชาติดี มีความหอมกว่าเห็ดชนิดอื่น สามารถนำไปประกอบอาหารได้หลากหลาย เห็ดหอมเป็นยาอายุวัฒนะ และมีคุณค่าทางโภชนาการสูง เช่น ช่วยบำรุงสมอง ช่วยในระบบย่อยอาหาร ป้องกันหลอดเลือดแดงแข็งตัว โรคหลอดเลือดหัวใจตีบ โรคภัยจากเชื้อไวรัส ลดคอเลสเตอรอล ป้องกันการเติบโตของเนื้องอก ป้องกันโรคเลือด ช่วยกระตุ้นการทำงานของเซลล์ในระบบภูมิคุ้มกัน ให้มีประสิทธิภาพในการต่อสู้กับเซลล์เนื้องอก ด้านมะเร็ง ลดความเครียด บำรุงระบบประสาท ช่วยให้หลับง่าย ฯลฯ เห็ดหอมเป็นเห็ดที่ขึ้นในที่ที่มีอากาศหนาวเย็น จึงนิยมปลูกในภาคเหนือของประเทศไทย ซึ่งจะทำให้ได้ผลผลิตที่มีคุณภาพ เป็นที่ต้องการของตลาดทำให้มีราคาค่อนข้างสูง สามารถจำหน่ายเป็นเห็ดสดหรือแปรรูปเป็นเห็ดชนิดแห้ง

การทำแห้งโดยทั่วไปใช้วิธีการตากแดดซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย และมีค่าใช้จ่ายน้อย แต่ใช้พื้นที่ในการตากแดดมาก ใช้

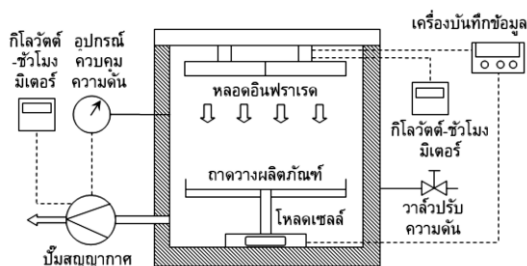
เวลานาน เห็ดหอมแห้งไม่สม่ำเสมอ และอาจทำให้เห็ดหอมมีคุณภาพไม่ดี ดังนั้นการนำเทคโนโลยีการอบแห้งมาใช้ในการลดความชื้นของผลผลิตทางการเกษตรจึงได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถอบแห้งวัสดุได้ในปริมาณมากและควบคุมคุณภาพของผลผลิตได้ การนำเทคนิคสุญญากาศมาใช้ในการแปรรูปผลผลิตจะสามารถอบแห้งได้อย่างรวดเร็ว เนื่องจาก แรงดันไอของอากาศในวัสดุมีค่าต่ำกว่าความดันบรรยากาศ ทำให้น้ำระเหยได้ที่อุณหภูมิต่ำ ช่วยลดเวลาและพลังงานในการอบแห้ง [1], [2] และวัสดุหลังอบแห้งมีคุณภาพอยู่ในเกณฑ์ที่ดี อย่างไรก็ตามการอบแห้งด้วยวิธีนี้ยังต้องใช้แหล่งให้ความร้อนเพื่อลดเวลาในการอบแห้ง ซึ่งการนำรังสีอินฟราเรดมาช่วยในการอบแห้งเป็นวิธีการที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย [2]-[4] เนื่องจากการแผ่รังสีอินฟราเรดไปยังวัสดุ จะทำให้โมเลกุลของน้ำในเนื้อวัสดุสั่นและเกิดความร้อนขึ้นภายในวัสดุ ช่วยเพิ่มอัตราการอบแห้ง ส่งผลให้การอบแห้งใช้เวลาน้อยลง และมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานสูง [3]

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนและมวลสาร เพื่อทำนายพฤติกรรมการอบแห้ง ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบกระบวนการอบแห้งให้มีความเหมาะสมกับวิธีการและวัสดุที่อบแห้ง ในปัจจุบันมีการใช้เทคนิคต่างๆ ในการทำนายพฤติกรรมการอบแห้งหรือการเปลี่ยนแปลงความชื้นระหว่างการอบแห้ง ซึ่งแบบจำลองเอมพิริคัลเป็นแบบจำลองที่นิยมใช้ในการศึกษาการอบแห้งอาหารและวัสดุชีวภาพ [1], [3], [5], [6] เนื่องจากมีกระบวนการวิเคราะห์ที่ง่ายไม่ซับซ้อน

ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการอบแห้งเห็ดหอมด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นสำหรับอธิบายพฤติกรรมการอบแห้ง ซึ่งจะ เป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาวิธีการอบแห้งเห็ดหอมด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดต่อไป

2. อุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย

2.1 อุปกรณ์ในการทดลอง



รูปที่ 1 เครื่องอบแห้งสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด

เครื่องอบแห้งสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรดที่ใช้ในการทดลองดังรูปที่ 1 ประกอบด้วย ห้องอบแห้งทรงกระบอก วัสดุทำด้วย Stainless steel หนา 2 cm มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 cm สูง 60 cm ติดตั้งพัดลมร้อนขนาด 250 W จำนวน 4 หลอด โดยระยะห่างระหว่างผลิตภัณฑ์อบแห้งกับพัดลมร้อนประมาณ 20 cm และใช้สายวัดอุณหภูมิเทอร์โมคัปเปิลชนิดเชื่อมกับเครื่องควบคุมอุณหภูมิแบบ PID (Digicon

MD-400N) มีความแม่นยำในการควบคุม $\pm 1^{\circ}\text{C}$ เพื่อควบคุมอุณหภูมิการอบแห้ง ทำสถานะสุญญากาศภายในห้องอบแห้งโดยปั๊มสุญญากาศขนาด 0.35 kW และใช้อุปกรณ์วัดร่วมกับอุปกรณ์ควบคุมความดัน (Pressure controller, Panasonic รุ่น DP-100) เพื่อควบคุมความดันที่ใช้ในการอบแห้ง ซึ่งน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ระหว่างอบแห้งด้วยโหลดเซลล์ความละเอียด 0.01 g วัดปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้งด้วย Kilowatt hour meter ความละเอียด 0.01 kWh และบันทึกการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ และอุณหภูมิการอบแห้งด้วยเครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger, Graphtec midi logger รุ่น GL820) ซึ่งรับสัญญาณค่าอุณหภูมิมาจากสายเทอร์โมคัปเปิลชนิดเค ซึ่งมีความละเอียดในการบันทึกค่า 0.1°C

2.2 วิธีการทดลอง

เห็ดหอมสดที่ใช้ในการทดลองเป็นเห็ดหอมสายพันธุ์ดอนโก (Donko) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของดอกประมาณ 4-5 cm โดยมีขั้นตอนการเตรียมผลิตภัณฑ์ก่อนอบแห้ง คือ นำเห็ดหอมมาตัดขาออกให้ชิดกับดอกเห็ด นำดอกเห็ดหอมไปล้างทำความสะอาดด้วยน้ำเปล่าแล้วนำไปวางคว่ำในตะแกรงเพื่อให้สะเด็ดน้ำโดยใช้เวลาประมาณ 20 นาที จากนั้นนำเห็ดหอมไปวางเรียงบนถาดอบแห้ง นำสายเทอร์โมคัปเปิลเสียบเข้าไปในเนื้อเห็ดหอมเพื่อใช้ควบคุมอุณหภูมิการอบแห้งและวัดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเห็ดหอม ทำการอบแห้งเห็ดหอมด้วยเครื่องอบแห้งสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรด จากความชื้นเริ่มต้นประมาณ 1,015-1,076% d.b. จนได้ความชื้นสุดท้ายประมาณ 10-13% d.b. โดยมีเงื่อนไขในการทดลอง คือ อบแห้งเห็ดหอมที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70°C และความดันสัมบูรณ์ภายในห้องอบแห้ง 10 15 และ 20 kPa ในระหว่างทำการอบแห้งได้บันทึกการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและน้ำหนักของเห็ดหอมทุกๆ 1 นาที โดยใช้เครื่องบันทึกข้อมูล และบันทึกพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหลอดรังสีอินฟราเรด และปั๊มสุญญากาศโดยใช้ Kilowatt-hour meter

2.3 การหาความชื้นของผลิตภัณฑ์

เมื่อเริ่มต้นการอบแห้งความชื้นของเห็ดหอมจะมีค่าลดลงจากความชื้นเริ่มต้นจนถึงความชื้นสุดท้ายที่ต้องการ ซึ่งการคำนวณหาความชื้นที่เวลาใดๆ ของเห็ดหอม ต้องนำเห็ดหอมไปอบแห้งในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 103 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง [7] เพื่อหาน้ำหนักแห้งของเห็ดหอม แล้วนำค่าได้ไปคำนวณหาปริมาณความชื้น (Moisture content) ได้จากสมการที่ (1) [2]

$$MC = \frac{w - d}{w} \quad (1)$$

เมื่อ MC คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (d.b.)

w คือ น้ำหนักของเห็ดหอมที่เวลาใดๆ (g)

d คือ น้ำหนักแห้งของเห็ดหอม (g)

อัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2) [2]

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_i - M_{eq}} \quad (2)$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น (decimal)

M_t คือ ความชื้นที่เวลาใดๆ (d.b.)

M_i คือ ความชื้นเริ่มต้น (d.b.)

M_{eq} คือ ความชื้นสมดุล (d.b.)

ในงานวิจัยนี้ไม่คิดความชื้นสมดุล เนื่องจากความชื้นสมดุลมีค่าน้อยกว่าความชื้นเริ่มต้นและความชื้นที่เวลาใดๆ ค่อนข้างมาก ดังนั้นอัตราส่วนความชื้นสามารถจัดรูปใหม่ได้ดังสมการที่ (3) [8]

$$MR = \frac{M_t}{M_i} \quad (3)$$

2.4 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

การคำนวณค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC, MJ/kg of water evaporated) ที่ใช้ในการอบแห้ง นำข้อมูลที่ได้จากการทดลอง คือ มวลวัสดุก่อนการอบแห้ง

และหลังการอบแห้ง และปริมาณการใช้พลังงานตลอดกระบวนการอบแห้ง เพื่อนำมาคำนวณหาความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งเห็ดหอม ได้จากสมการที่ 4 [2]

$$SEC = \frac{3.6E_p}{m_w} \quad (4)$$

เมื่อ m_w คือ ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากเห็ดหอม (kg)

E_p คือ ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง (kW-h)

2.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัล

สมการทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัลมีหลายรูปแบบ ซึ่งแบบจำลองที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับวิธีการอบแห้งหรือคุณสมบัติของวัสดุทางการเกษตร [1]-[3], [5]-[6] ในงานวิจัยนี้ใช้รูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัลแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัล [9]-[18]

No.	ชื่อสมการ	รูปแบบสมการ
1	Lewis	$MR = \exp(-kt)$
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$
3	Modified Page	$MR = \exp(-(kt)^n)$
4	Two-term	$MR = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$
5	Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
6	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$
7	Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$
8	Midilli	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$
9	Demir et al.	$MR = a \exp(-kt^n) + b$
10	Verma et al.	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt)$
11	Weibull distribution	$MR = a - b \exp(-(kt)^n)$

* a b c g k k_0 k_1 และ n คือ ค่าคงที่ซึ่งจะได้จากการวิเคราะห์แบบจำลอง และ t คือ เวลาในการอบแห้ง (นาที)

ในการอบแห้งเห็ดหอมมีเงื่อนไขการทดลองที่มีการเปลี่ยนแปลงความดันสัมบูรณ์และอุณหภูมิการอบแห้ง ซึ่งค่าคงที่ของสมการคณิตศาสตร์เอมพิริคัลที่วิเคราะห์ได้จะไม่ขึ้นอยู่กับตัวแปรการอบแห้ง การนำค่าคงที่ไปใช้งานจึงใช้ได้เฉพาะอุณหภูมิและความดันสัมบูรณ์ที่ตรงกับเงื่อนไขการอบแห้งเท่านั้น ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้ค่าคงที่ (constants and coefficients, coc) ในตารางที่ 1 เป็นฟังก์ชันของความดันและอุณหภูมิการอบแห้ง [2] ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (5)

$$\text{coc} = x_0 + x_1 T + x_2 P \quad (5)$$

เมื่อ coc คือ ค่าคงที่ a b c g k k₀ k₁ และ n
 T คือ อุณหภูมิอบแห้ง (K)
 P คือ ความดันสัมบูรณ์ในห้องอบแห้ง (kPa)
 x₀ x₁ x₂ คือ ค่าคงที่ของสมการที่ (5) ซึ่งจะได้จากการวิเคราะห์แบบจำลอง

การวิเคราะห์รูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัลที่เหมาะสมสำหรับทำนายกระบวนการอบแห้ง ใช้เทคนิคการวิเคราะห์สมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear regression) ซึ่งมีดัชนีบ่งชี้ความสามารถในการทำนายสมการทางคณิตศาสตร์ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R²) ค่าการลดลงไคกำลังสอง (Chi-square, χ^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error, RMSE) [3], [5], [6], [8] โดยสมการที่ให้ค่า R² สูงที่สุด และให้ค่า RMSE และ χ^2 ต่ำที่สุด จะเป็นสมการที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้ง ค่า RMSE และ χ^2 มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (6) และ (7) ตามลำดับ [3]

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^N (\text{MR}_{\text{exp},i} - \text{MR}_{\text{pre},i})^2 \right]} \quad (6)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\text{MR}_{\text{exp},i} - \text{MR}_{\text{pre},i})^2}{N - p} \quad (7)$$

เมื่อ MR_{exp,i} คือ อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลอง (decimal)

MR_{pre,i} คือ อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการคำนวณ (decimal)

N คือ จำนวนข้อมูลในการทดลอง

p คือ จำนวนพารามิเตอร์ในแต่ละสมการ

2.6 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นและพลังงานกระตุ้น

สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (Effective moisture diffusivity coefficient) เป็นสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่แสดงถึงความสามารถในการเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุหรือเรียกว่าการแพร่ของของเหลว โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการแพร่ของเหลวสามารถเขียนสมการหลักได้จากกฎการแพร่ของฟิคส์ (Fick's second law of diffusion) ซึ่งในการทดลองนี้ตั้งสมมติฐานว่าวัสดุเกิดการหดตัวขณะอบแห้งน้อยมาก มีลักษณะเป็นแผ่นบาง และมีการเคลื่อนที่ของความชื้นไปในทิศทางเดียว ซึ่งจะได้คำตอบดังสมการที่ (8) [19]

$$\text{MR} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2}{4L^2} \pi^2 D_{\text{eff}} t\right) \quad (8)$$

ในการอบแห้งที่ใช้เวลาในการอบแห้งค่อนข้างนาน และเป็นช่วงอัตราการอบแห้งลดลง สามารถแทนค่า n=0 ในสมการที่ (8) เพียงเทอมเดียว ซึ่งจะได้ผลเฉลยดังสมการที่ (9) [20]

$$\ln(\text{MR}) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \left(\frac{\pi^2 D_{\text{eff}} t}{4L^2}\right) \quad (9)$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น (decimal)

D_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (m²/s)

L คือ ครึ่งหนึ่งของความหนาวัสดุ (m)

t คือ เวลาในการอบแห้ง (sec)

จากสมการที่ (9) เมื่อวาดเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(MR)$ กับเวลาในการอบแห้งจะได้กราฟในส่วนที่เป็นเส้นตรงซึ่งจะมีความลาดชันเท่ากับ $(-\pi^2 D_{eff})/(4L^2)$ ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลได้ โดยค่าที่คำนวณได้นี้เป็นค่าคงที่ที่เงื่อนไขการอบแห้งหนึ่งเท่านั้น อย่างไรก็ตามเพื่อให้สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลได้ทุกค่าอุณหภูมิในช่วงที่ทำการทดลอง สามารถเขียนได้ในรูปแบบของสมการอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) ดังสมการที่ (11) [3], [6], [20]

$$D_{eff} = D_o \exp\left(-\frac{E_a}{RT_{abs}}\right) \quad (11)$$

หรือ

$$\ln(D_{eff}) = \ln(D_o) - \frac{E_a}{RT_{abs}} \quad (12)$$

เมื่อ D_o คือ ปัจจัยเลขชี้กำลัง (m^2/s)

E_a คือ พลังงานกระตุ้น ($kJ/kmol$)

R คือ ค่าคงที่สากลของแก๊ส (8.314 kJ/kmol K)

T_{abs} คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ในการอบแห้ง (K)

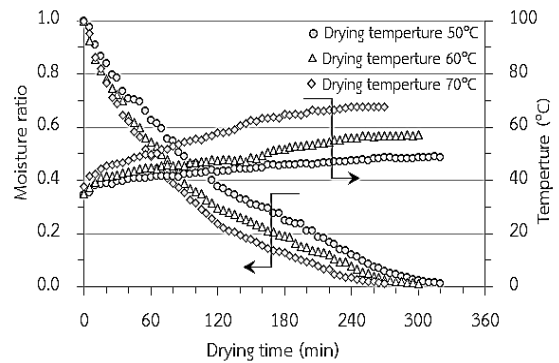
การวิเคราะห์หาพลังงานกระตุ้นของการแพร่ความชื้น (Activation energy for diffusion) ซึ่งเป็นพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นให้น้ำเคลื่อนที่ออกจากวัสดุที่อบแห้ง สามารถคำนวณได้จากความลาดชันของเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(D_{eff})$ กับ อุณหภูมิสัมบูรณ์ ($1/T_{abs}$) ตามสมการที่ (12) ซึ่งจะได้กราฟในส่วนที่เป็นเส้นตรงและมีความลาดชันเท่ากับ $(-E_a/R)$

3. ผลการทดลอง

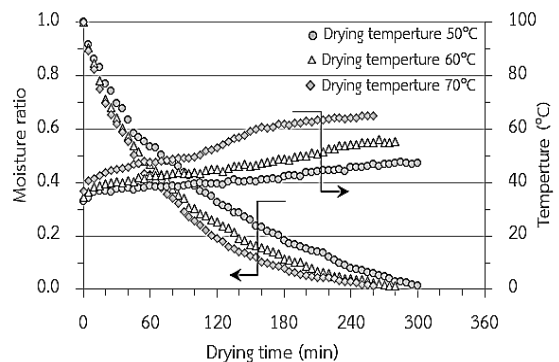
3.1 ผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเห็ดหอม

จากรูปที่ 2 (ก) แสดงการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นในการอบแห้งเห็ดหอมที่ความดันสัมบูรณ์ 20 kPa พบว่า ในช่วงแรกของการอบแห้ง ความชื้นของ

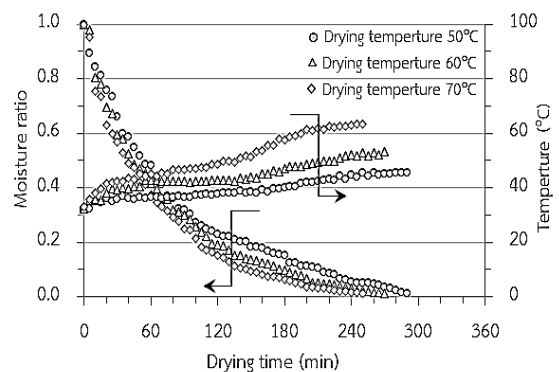
เห็ดหอมจะลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเห็ดหอมมีความชื้นสูงโดยเฉพาะที่ผิวของเห็ดหอม เมื่อเห็ดหอมได้รับความร้อน น้ำที่บริเวณผิวเห็ดหอมจะระเหยออกอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นความชื้นของเห็ดหอมจะลดลงอย่างช้าๆ จนกระทั่งถึงความชื้นสุดท้ายที่ต้องการ [2]



(ก) ความดันสัมบูรณ์ 20 kPa



(ข) ความดันสัมบูรณ์ 15 kPa



(ค) ความดันสัมบูรณ์ 10 kPa

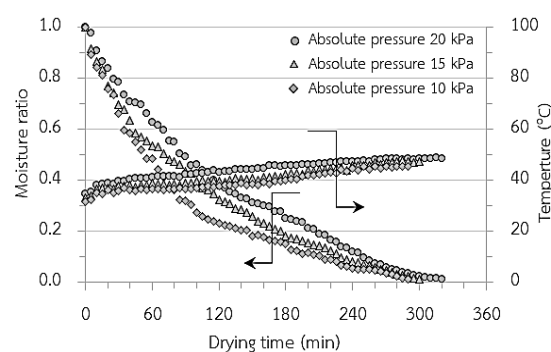
รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นและอุณหภูมิของเห็ดหอมที่ความดันสัมบูรณ์ 10 15 และ 20 kPa

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งให้สูงขึ้นจาก 50 เป็น 60 °C หรือ จากอุณหภูมิ 60 เป็น 70 °C ความชื้นของเห็ดหอมจะลดลงได้เร็วขึ้นทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยลง [2], [13] ประมาณร้อยละ 6.6 และ 8.2 ตามลำดับ เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิการอบแห้งจะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อน และสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้การถ่ายเทมวลดีขึ้น นอกจากนี้เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเห็ดหอม พบว่า อุณหภูมิของเห็ดหอมจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนถึงค่าประมาณจุดเดือดของน้ำที่ความดันสัมบูรณ์ในห้องอบแห้งนั้นๆ และค่อนข้างคงที่ เนื่องจากความร้อนส่วนใหญ่ที่เห็ดหอมได้รับจะใช้ในการระเหยน้ำ หลังจากการอบแห้งผ่านไปประมาณสองชั่วโมง น้ำภายในเห็ดหอมลดลงจนเห็ดหอมใกล้แห้ง ความร้อนที่เห็ดหอมได้รับนอกจากใช้ในการระเหยน้ำที่เหลืออยู่ ความร้อนอีกส่วนหนึ่งจะทำให้เห็ดหอมมีอุณหภูมิสูงกว่าจุดเดือดของน้ำจนใกล้เคียงกับอุณหภูมิอบแห้ง โดยเฉพาะที่การอบแห้งเห็ดหอมที่อุณหภูมิ 70 °C จะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเห็ดหอมอย่างชัดเจน ส่วนการอบแห้งเห็ดหอมที่ความดันสัมบูรณ์ในห้องอบแห้ง 15 และ 10 kPa ดังรูปที่ 2 (ข) และ 2 (ค) ก็มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิคล้ายกับการอบแห้งเห็ดหอมที่ความดันสัมบูรณ์ 20 kPa

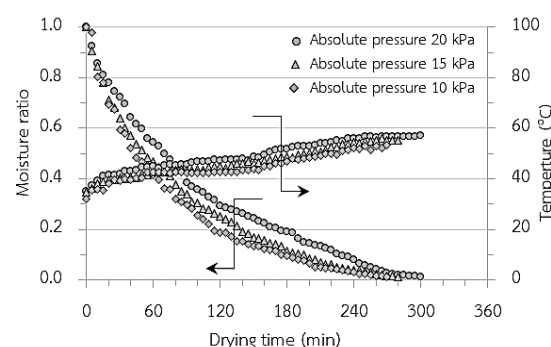
3.2 ผลของความดันสัมบูรณ์ต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเห็ดหอม

จากรูปที่ 3 (ก) การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นและอุณหภูมิของเห็ดหอมที่อุณหภูมิอบแห้ง 50 °C จากผลการทดลอง พบว่า เมื่อความดันสัมบูรณ์ในห้องอบแห้งลดลงจาก 20 เป็น 15 kPa หรือจากความดัน 15 เป็น 10 kPa ความชื้นของเห็ดหอมจะลดลงเร็วกว่า และใช้เวลาในการอบแห้งน้อยลงโดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 3.6 และ 5.5 ตามลำดับ เนื่องจากที่ความดันสุญญากาศน้ำจะมีอุณหภูมิจุดเดือดต่ำกว่า 100 °C ซึ่งที่ความดันสัมบูรณ์ 10 15 และ 20 kPa น้ำจะมีอุณหภูมิจุดเดือดเท่ากับ 45.8 54.0

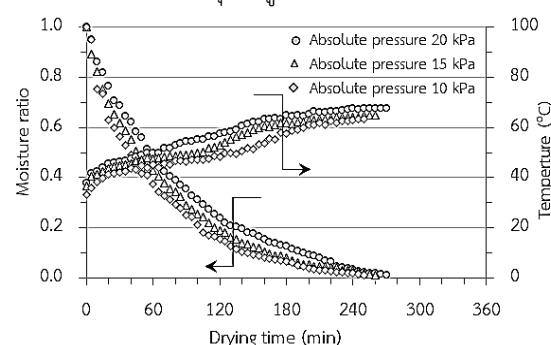
และ 60.1 °C ตามลำดับ [2], [4] ดังนั้นที่ความดันสัมบูรณ์ต่ำจึงสามารถอบแห้งวัสดุได้เร็วกว่าการอบแห้งวัสดุที่ความดันสัมบูรณ์สูง ส่วนการอบแห้งเห็ดหอมที่อบแห้ง 60 และ 70 °C ดังรูปที่ 3 (ข) และ 2 (ค) ก็มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงความชื้นคล้ายกับการอบแห้งเห็ดหอมที่ความดันสัมบูรณ์ 50 °C



(ก) อุณหภูมิอบแห้ง 50 °C



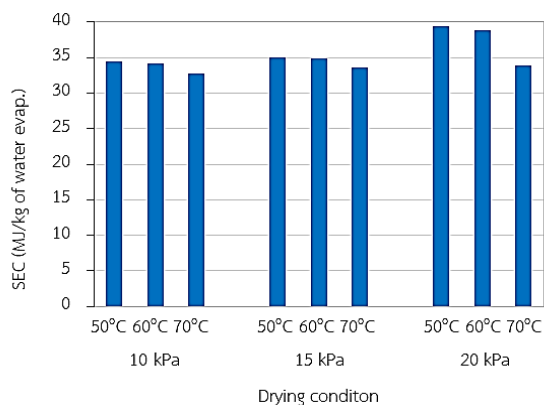
(ข) อุณหภูมิอบแห้ง 60 °C



(ค) อุณหภูมิอบแห้ง 70 °C

รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นและอุณหภูมิของเห็ดหอม ที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 °C

3.3 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ



รูปที่ 4 การสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

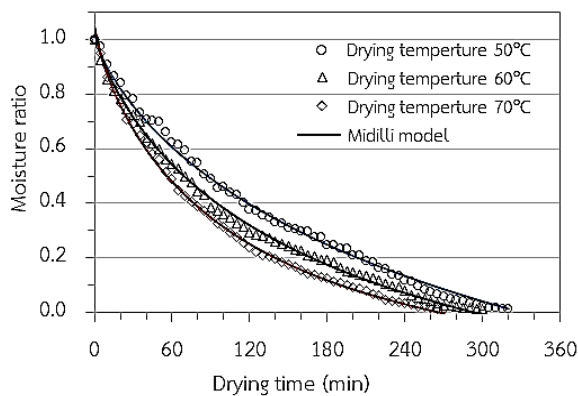
จากกราฟดังรูปที่ 4 พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งจาก 50 เป็น 60 °C หรือ จาก 60 เป็น 70 °C จะทำให้การสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลง [2] โดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 1.1 และ 6.8 ตามลำดับ เนื่องจากที่อุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้นจะส่งผลให้การถ่ายความร้อนและมวลดีขึ้น ทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยลง ส่วนการลดความดันสัมบูรณ์ในห้องอบแห้งจาก 20 เป็น 15 หรือ จาก 15 เป็น 10 kPa จะทำให้การสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลง [2] โดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 2.1 และ 7.4 ตามลำดับ เนื่องจากการลดความดันสัมบูรณ์จะส่งผลให้จุดเดือดของน้ำลดต่ำลง น้ำระเหยได้ง่ายขึ้น และทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยลง โดยที่อุณหภูมิอบแห้ง 50 °C และความดันสัมบูรณ์ 20 kPa ใช้เวลาในการอบแห้งเห็ดหอมนานที่สุด ประมาณ 320 นาที ใช้พลังงานไฟฟ้ารวม 2.52 kWh และมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 39.43 MJ/kg_w และอุณหภูมิอบแห้ง 70 °C และความดันสัมบูรณ์ 10 kPa สามารถอบแห้งเห็ดหอมได้เร็วที่สุด โดยใช้เวลาในการอบแห้งเห็ดหอมประมาณ 250 นาที ใช้พลังงานไฟฟ้ารวม 1.91 kWh และมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 32.71 MJ/kg_w

3.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัล

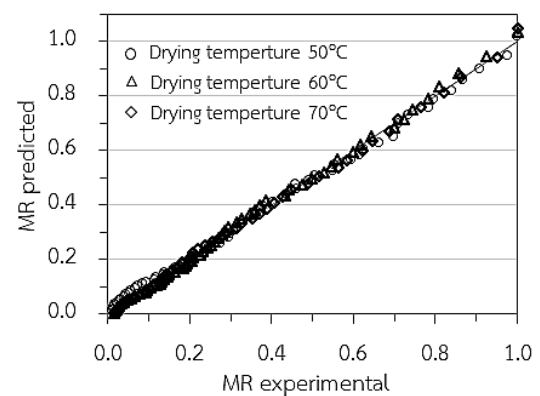
จากผลการทดลองอบแห้งเห็ดหอมที่อุณหภูมิแห้ง 50 และ 60 °C และความดันสัมบูรณ์ในห้องอบแห้ง 10 15 และ 20 kPa ที่แสดงผลในรูปแบบของอัตราส่วนความชื้น เมื่อนำมาวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสมการในตารางที่ 1 จำนวน 11 สมการ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ในแต่ละสมการเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิอบแห้งและความดันสัมบูรณ์ในห้องอบแห้ง ดังสมการที่ (5) โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัลที่เหมาะสมที่สุดจะสามารถทำนายผลการทดลองได้ดีที่สุดซึ่งจะต้องมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) สูงที่สุด ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) และค่าการลดคลอค่ากำลังสอง (χ^2) ต่ำที่สุด [1], [3], [8] จากผลการทดลองพบว่า แบบจำลองเอมพิริคัลมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย และค่าการลดคลอค่ากำลังสองอยู่ในช่วง 0.95208-0.99689, 0.18370-0.31757 และ 0.21419×10^{-3} - 0.326792×10^{-3} ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 2 โดยแบบจำลองเอมพิริคัล Midilli มีความเหมาะสมสามารถทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งเห็ดหอมได้ดีที่สุด [1] โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงที่สุด ($R^2=0.99689$) ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยต่ำที่สุด (RMSE=0.18370) และค่าการลดคลอค่ากำลังสองต่ำที่สุด ($\chi^2=0.21419 \times 10^{-3}$) สอดคล้องกับรูปที่ 5 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นจากการทดลองและจากการทำนายของแบบจำลอง Midilli นอกจากนี้ความสัมพันธ์ของผลการทำนายอัตราส่วนความชื้นกับผลการทดลองที่แสดงดังรูปที่ 6 มีความสัมพันธ์ของข้อมูลค่อนข้างเป็นแนวเส้นตรง และมีความชัน 45 องศา แสดงว่าแบบจำลองของ Midilli สามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นได้ค่อนข้างแม่นยำ

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองเอมพิริคัล

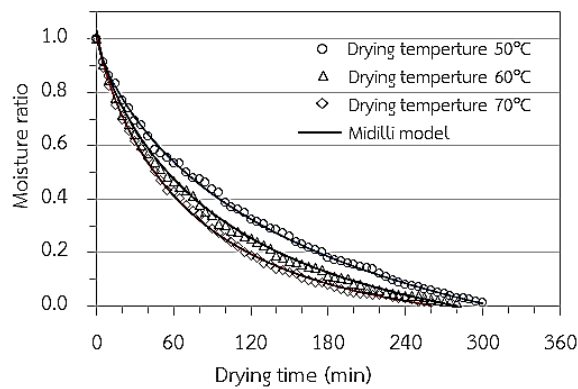
No.	Model	Parameter	x_1	x_2	x_3	R^2	RMSE	$\chi^2 (10^{-3})$
1	Page	k	-0.05124	0.00021	-0.00041	0.99133	0.22559	0.58765
2	Page	k	-0.03965	0.00020	-0.00079	0.99259	0.21858	0.50480
		n	0.65722	0.00068	0.00435			
3	Modified Page	k	-0.05276	0.00022	-0.00044	0.99337	0.21382	0.45215
		n	1.32684	-0.00166	0.01148			
4	Two-term	a	5.09229	-0.00572	0.12173	0.99361	0.21228	0.44128
		k_0	0.01526	0.00000	-0.00012			
		b	-4.35416	0.00625	-0.11902			
		k_1	0.03409	-0.00006	-0.00005			
5	Henderson and Pabis	a	1.09705	-0.00061	0.00461	0.99320	0.21489	0.46359
		k	-0.04860	0.00020	-0.00034			
6	Logarithmic	a	1.19804	-0.00093	0.00593	0.99094	0.22762	0.62188
		k	-0.10682	0.00037	-0.00032			
		c	-1.24800	0.00376	-0.00042			
7	Wang and Singh	a	0.02724	-0.00012	0.00022	0.95208	0.31757	3.26792
		b	-0.00013	0.00000	0.00000			
8	Midilli	a	0.48763	0.00144	0.00335	0.99689	0.18370	0.21419
		k	-0.11366	0.00044	-0.00043			
		n	0.41224	0.00139	-0.00543			
		b	-0.00334	0.00001	-0.00003			
9	Demir	a	0.95877	-0.00039	0.01859	0.99626	0.19066	0.25794
		k	-0.14141	0.00050	-0.00026			
		n	1.61011	-0.00202	-0.00717			
		b	0.02690	0.00019	-0.01324			
10	Verma et al.	a	0.29777	0.03640	-0.08811	0.99250	0.21915	0.51439
		k	-0.07305	0.00029	-0.00074			
		g	-0.07468	0.00029	-0.00077			
11	Weibull distribution	a	0.70720	-0.00221	-0.00554	0.99468	0.20460	0.36705
		b	-1.87187	0.00244	-0.00379			
		k	0.00042	0.00005	-0.00046			
		n	-0.01210	0.00203	0.01008			



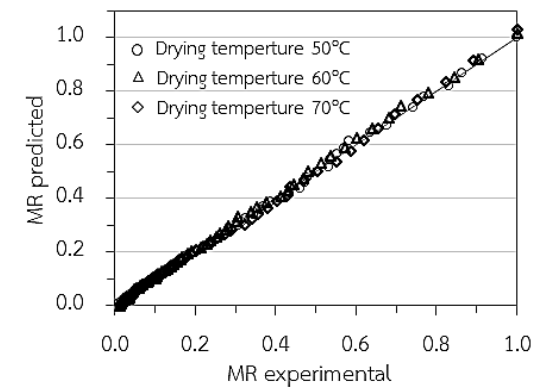
(ก) ความดันสมบูรณ์ 20 kPa



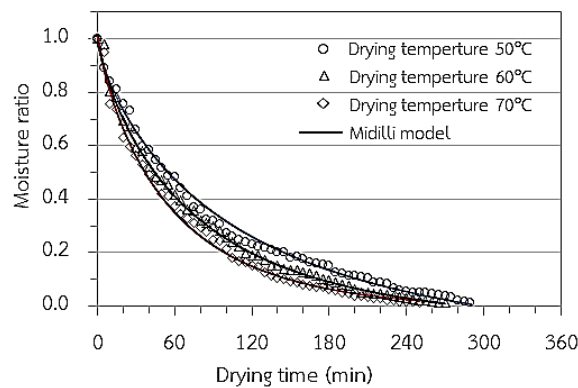
(ก) ความดันสมบูรณ์ 20 kPa



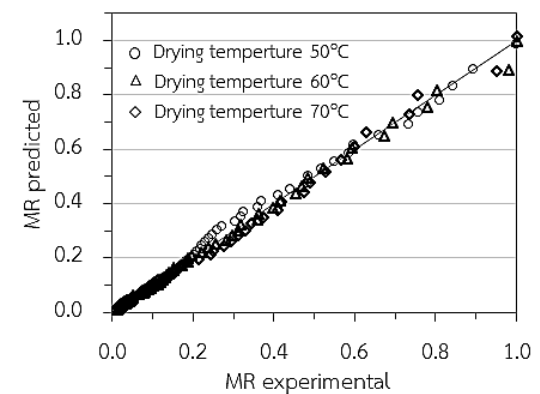
(ข) ความดันสมบูรณ์ 15 kPa



(ข) ความดันสมบูรณ์ 15 kPa



(ค) ความดันสมบูรณ์ 10 kPa



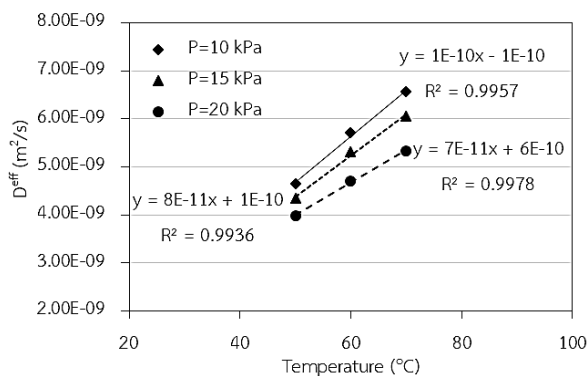
(ค) ความดันสมบูรณ์ 10 kPa

รูปที่ 5 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นจากการทดลองและจากการทำนายของแบบจำลอง Midilli

รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ของผลการทำนายอัตราส่วนความชื้นจากแบบจำลองของ Midilli กับผลการทดลอง

3.5 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นและพลังงานกระตุ้น

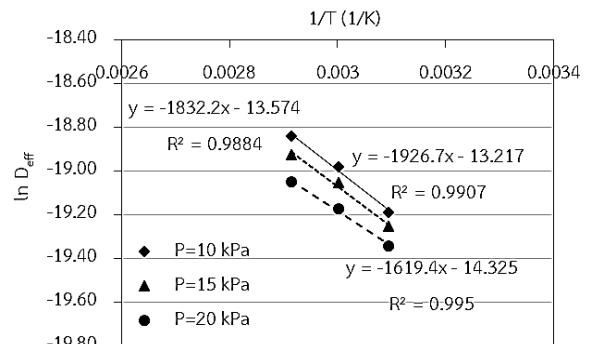
เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิธึมธรรมชาติของอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้ง และพิจารณาความชันของกราฟดังสมการที่ (9) จะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลในแต่ละการทดลองได้ดังแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งจะพบว่าความดันสัมบูรณ์และอุณหภูมิในห้องอบแห้งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล กล่าวคือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิการอบแห้งที่สูงขึ้น [6] หรือความดันสัมบูรณ์ในห้องอบแห้งลดลง [22] โดยที่ความดันสัมบูรณ์ 10 15 และ 20 kPa สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลมีค่าอยู่ในช่วง 4.684×10^{-9} ถึง 6.630×10^{-9} , 4.391×10^{-9} ถึง 6.110×10^{-9} และ 4.003×10^{-9} ถึง $5.361 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ตามลำดับ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลที่สูงขึ้นจะทำให้เพิ่มอัตราการอบแห้งและลดเวลาในการอบแห้งได้ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองดังรูปที่ (2) และรูปที่ (3)



รูปที่ 7 อิทธิพลของความดันสัมบูรณ์และอุณหภูมิอบแห้งต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล

จากผลการวิเคราะห์กราฟในรูปที่ 7 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลจะขึ้นอยู่กับความดันสัมบูรณ์ในห้องอบแห้งและอุณหภูมิอบแห้ง [21], [22] ดังนั้น การหาค่าพลังงานกระตุ้นตามสมการที่ 12 จะพิจารณาวิเคราะห์แยกทีละความดัน โดยสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า

ลอการิธึมธรรมชาติของสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลกับอุณหภูมิอบแห้ง ($1/T$) ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นกับอุณหภูมิอบแห้ง

ตารางที่ 3 พลังงานกระตุ้นที่ความดันสัมบูรณ์ต่างๆ

P (kPa)	$D_o \text{ (m}^2/\text{s)}$	$E_a \text{ (kJ/kmol)}$
10	1.819×10^{-6}	16,018.25
15	1.273×10^{-6}	15,232.76
20	6.008×10^{-7}	13,463.41

เมื่อพิจารณาความลาดชันของเส้นกราฟที่ความดันสัมบูรณ์ในห้องอบแห้ง 10 15 และ 20 kPa จะได้ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 3 ซึ่งพบว่า เมื่อความดันสัมบูรณ์ในห้องอบแห้งเพิ่มขึ้น พลังงานกระตุ้นมีค่าลดลงสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลที่ลดลงเช่นกัน เนื่องจาก ที่ความดันสัมบูรณ์ต่ำน้ำจะระเหยได้มาก ซึ่งต้องใช้พลังงานในการกระตุ้นให้น้ำเคลื่อนที่ออกจากวัสดุมากขึ้นตามไปด้วย โดยความดันสัมบูรณ์ในห้องอบแห้ง 10 15 และ 20 kPa มีค่าพลังงานกระตุ้น 16,018.25 15,232.76 และ 13,463.41 kJ/kmol ตามลำดับ

4. สรุป

บทความวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการอบแห้งเห็ดหอมด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด โดยทดลองอบแห้งเห็ดหอมพันธุ์ดอนโกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 4-5 cm อบแห้งเห็ดหอมภายใต้อุณหภูมิ 50 60 และ 70 °C และความดันสัมบูรณ์ในห้อง

อบแห้ง 10 15 และ 20 kPa จากความชื้นเริ่มต้นประมาณ 1,015-1,076% d.b. จนได้ปริมาณความชื้นสุดท้ายประมาณ 10-13% d.b.

จากผลการทดลองพบว่า เมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งสูงขึ้นหรือความดันสัมบูรณ์ในห้องอบแห้งลดลงจะทำให้ อัตราการอบแห้งเห็ดหอมสูงขึ้น ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยลง และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีแนวโน้มลดลง สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิอบแห้งที่สูงขึ้นหรือความดันสัมบูรณ์ในห้องอบแห้งที่ลดลง โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 4.684×10^{-9} ถึง 6.630×10^{-9} , 4.391×10^{-9} ถึง 6.110×10^{-9} และ 4.003×10^{-9} ถึง 5.361×10^{-9} m²/s และพลังงานกระตุ้นมีค่า 16,018.25 15,232.76 และ 13,463.41 kJ/kmol ที่ความดันสัมบูรณ์ในห้องอบแห้ง 10 15 และ 20 kPa ตามลำดับ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัลจากสมการของ Midilli สามารถทำนายจนผลศาสตร์การอบแห้งเห็ดหอมได้ดีที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงสุด คือ $R^2=0.99689$ ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยต่ำที่สุด คือ $RMSE=0.18370$ และค่าการลดลงไคกำลังสองต่ำที่สุด คือ $\chi^2=0.21419 \times 10^{-3}$

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออกที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Artnaseaw, S. Theerakulpisut and C. Benjapiyaporn, "Drying characteristics of Shiitake mushroom and Jinda chili during vacuum heat pump drying," *Food and Bioproducts Processing*, vol. 88, no.2-3, pp. 105-114, June-Sep. 2010.
- [2] U. Teeboonma and S. Jongiam, "Ginger drying using infrared-vacuum technique," *Burapha Sci. J.*, vol. 15, no. 2, pp. 76-86, 2010.
- [3] M. Younis, D. Abdelkarim and A.Z. El-Abdein, "Kinetics and mathematical modeling of infrared thin-layer drying of garlic slices," *Saudi Journal of Biological Sciences*, vol. 25, no. 2, pp. 332-338, Feb. 2018.
- [4] S. Rungsawang, S. Jaekhum, N. Uengkimbuan and K. Witinantakit, "Shiitake Mushroom Drying Using Vacuum and Infrared Radiation Technique," in *12th Conference On Energy Network of Thailand*, Phitsanulok, 2016, pp. 1591-1596.
- [5] K. Sathapornprasath and P. Praneetpolkrang, "Modeling pepper drying by jet spouted bed technique using ANFIS system," *SWU Engineering Journal*, vol.13, no. 1, pp. 176-186. Jan.-Apr. 2018.
- [6] A.O. Omolola, P.F. Kapila and H.M. Silungwe, "Mathematical modeling of drying characteristics of Jew's mallow (*Corchorus olitorius*) leaves," *Information Processing in Agriculture*, vol. 6, no. 1, pp.109-115, Mar. 2019.
- [7] AOAC (Association of Official Analytical Chemists). Official Methods of Analysis. 17thed. Association of Official Analytical Chemists. Maryland: Gaithersburg, 2000.
- [8] N. IZLI, G. IZLI and O. Taskin, "Influence of different drying techniques on drying parameters of mango," *Food Science and Technology*, vol. 37, no. 4, pp. 604-612, Oct.-Dec. 2017.

- [9] Q. Lui and F.W. Bakker-Arkema, "Stochastic modeling of grain drying, part 2; model development," *Journal of Agricultural Research*, vol. 66, pp. 275-280, Apr. 1997.
- [10] G.P. Sharma and S. Prasad, "Drying of garlic cloves by microwave-hot air combination," *Journal of Food Engineering*, vol. 50, pp. 99-105, Nov. 2001.
- [11] H. Togrul, "Simple modeling of infrared drying of fresh apple slices," *Journal of Food Engineering*, vol. 71, pp. 311-323, Dec. 2005.
- [12] A. Ruiz-Celma, S. Rojas and F. Lopez-Rodriguez, "Mathematical modeling of thin-layer infrared drying of wet olive husk," *Chemical Engineering and Processing*, vol. 47, pp. 1810-1818, Sep. 2008.
- [13] M. Ozdemir and Y. Onur-Devres, "The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting," *Journal of Food Engineering*, vol. 42, pp. 225-233, Dec. 1999.
- [14] A. Midilli, H. Kucuk and Z. Yapar, "A new model for single-layer drying," *Drying Technology*, vol. 20, no. 7, pp. 1503-1513, Jul. 2002.
- [15] L.R. Verma, R.A. Bucklin, J.B. Endan, F.T. Wratten, "Drying effects of drying air parameters on rice drying models," *Trans. ASAE*, vol. 85, pp. 296-301, Jan. 1985.
- [16] I. Alibas, "Microwave, Air and Combined Microwave-Air Drying of Grape Leaves (*Vitis vinifera* L.) and the Determination of Some Quality Parameters," *International Journal of Food Engineering*, vol. 10, no. 1, pp. 69-88, Jan. 2014.
- [17] S.J. Babalis, E. Papanicolaou, N. Kyriakis and V.G. Belessiotis, "Evaluation of thin-layer drying models for describing drying kinetics of figs (*Ficus carica*)," *Journal of Food Engineering*, vol. 75, pp. 205-214, Jul. 2006.
- [18] V. Demir, T. Gunhan, and A.K. Yagcioglu, "Mathematical modelling of convection drying of green table olives," *Biosystems Engineering*, vol. 98, no. 1, pp. 47-53, Sep. 2007.
- [19] J. Crank, "The mathematics of diffusion," Clarendon press, Oxford, UK, 1972, pp. 47-53.
- [20] S. Devahastin, "Drying of Foods and Biomaterials," Top Publishing, 2012, pp. 253-260.
- [21] T. Swasdisevi, S. Devahastin, P. Sa-Adchom and S. Soponronnarit, "Mathematical modeling of combined far-infrared and vacuum drying banana slice," *Journal of Food Engineering*, vol. 92, no. 1, pp. 100-106, May. 2009.
- [22] I. Alibas and N. Koksai, "Convective, vacuum and microwave drying kinetics of mallow leaves and comparison of color and ascorbic acid values of three drying methods," *Food Science and Technology*, vol. 34, no. 2, pp. 358-364, Apr.-June 2014.

Evaluation of sustainable urban storm drainage systems approach for reducing peak runoff at Sukhumvit area in Bangkok, Thailand*

Detchphol Chitwatkulsiri

Faculty of science and technology, Valaya Alongkorn Rajabhat University under the Royal Patronage
1 moo 20, Phahonyothin Road, Khlong Nueng, Khlong Luang District, Pathum Thani, 13180

Corresponding author Email: detchphol@vru.ac.th

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

ABSTRACT

Urban Flooding has long been believed to be the results of natural phenomena which could be cited as heavy rainfall, tidal surges, and land subsidence. Urban flooding becomes more frequent as the population rapidly increasing, urbanization, unplanned development, and climate change. This phenomenon are not only damages lives and environment but also impacts of economy, health, social, and transportation. In urban areas, flooding is caused by several reasons: the rise of the water level in the river through the city high tides for coastal cities, poor operation of the drainage system, and poor maintenance, etc. Flood management requires an understanding of the causes and adaptation to take appropriate improvement by implementing sustainable urban drainage systems techniques (SUDS). Thus, it will be a decreased percentage of imperviousness in an urban area. In this study, SUDS solutions, such as green roofs, rainwater harvesting, pervious pavements, urban green space, are applied at representative inundated sub-catchments. The study was conducted in the Sukhumvit area, Bangkok, Thailand. The results show green roofs are the best performer for reducing peak runoff because it is applied to all kinds of buildings, either residential, commercial. Rainwater harvesting and pervious pavements require specific available space for application making their performance very unstable. The best performing overall is green roofs, followed by rainwater harvesting, pervious pavements, and urban green.

Keyword: SUDS, Green roofs, Rainwater harvesting, Porous pavements, Urban green space.

1. Introduction

Urbanization is the process of turning greenfield sites into developments. For example, building in the countryside. Infiltration is rainfall soaking into the ground and eventually ending up in rivers over days. Once the site has been developed, and the site is now impermeable, so

the rainfall becomes surface runoff quickly without soaking into the ground to get to the rivers in hours or even minutes. These make the hydrograph to peak higher and sharper (more water in less time), and flooding occurs.

Bangkok is the capital city of Thailand. Bangkok is located in the Chao Phraya River basin,

* บทความนี้ได้ถูกนำเสนอบางส่วนในการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 23

and the river split down the middle of the city. Nowadays, Bangkok has flooding regularly and more impacts to residential than the past because Bangkok has rapid urbanization, impact from change of both upstream and downstream condition from the northern to the central part of Thailand, heavy rainfall on the upstream and also inside Bangkok area, insufficient drainage capacity, tidal effect, land subsidence from groundwater consumption and climate change. These can cause urban flooding in Bangkok area. In the central part of Bangkok, Sukhumvit area is a representative of urbanization. Bangkok metropolitan administration (BMA) has a department of drainage and sewerage (DDS) working on flood problem in Bangkok. Several studies from DDS have shown that the drainage capacity of the existing system is still not perfect enough. In Sukhumvit area has a primary drainage system from surrounded canals and the secondary drainage system inside the area. Therefore, when the water level in primary drainage system around this area higher, the secondary drainage system will have a problem to drain water out [1].

The study in the Sukhumvit area by using a modeling tool and analyze the decreasing percentage of imperviousness can show the capability of infiltration effect to the urban area. These can help to reduce the impact of floods in the urban area.

2. Study area and Methodology

2.1 Study area

This research is the case of Bangkok, Thailand, where the Sukhumvit area has been chosen as a case study area due to its history of frequent pluvial floods and a wealth of information produced by Bangkok metropolitan administration (BMA). Sukhumvit area which is located at the eastern suburban part of Bangkok which is one of the parts of the central business district. The geographical location of the Sukhumvit, Bangkok is 13°44'18.01"N latitude and 100°33'41.31"E longitude. The catchment had an area of 21 km² and located at the right side of Chao Phra Ya river. The elevation of the study area is around 0.4 to 1 m (MSL) [1]. The primary drainage of Bangkok consists of 10 polders as the secondary drainage system. Its characteristics are to prevent floodwater from outside by pumping stormwater out of the area to the main drainage. The city was able to avoid fluvial floods caused by Chao Phraya River overflow in 1995 and 1996 [2]. The rainfall station data used is from Bangkok metropolis rainfall station of Thai meteorological station.



Fig.1. Case of Study. Sukhumvit area.
Bangkok, Thailand

Table 1 Methodological Framework

1. Data Collection	● Rainfall 20 years return period IDF curves in Bangkok, Thailand. ● Account the various SUDS solutions at representative sub-catchments.
2. Modelling Approach	● Model calibration and verification ● SUDS solutions are applied at representative inundated sub-catchments.
3. Evaluation	● Data analysis ● Resulting

2.2 Methodology

To evaluate the sustainable urban drainage systems (SUDS) techniques approach for reducing flood inundation at the study area, the study is subdivided into three processes which are data collection, modeling approach, evaluation.

2.2.1 Data collection

Rainfall input data - Information about IDF curves in Bangkok, Thailand, was obtained from the M.Sc. research “Impact of climate change on urban flooding in the Sukhumvit area of Bangkok.” This information was used for modeling different scenarios of precipitation in the study area [3].

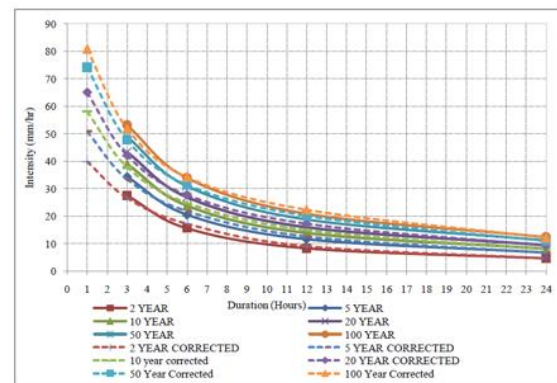


Fig.3. Corrected IDF curve for 1981-2010.

Source: Shrestha (2013)

Representative inundated sub-catchments - The criteria to evaluate are the most residential Area (from land-use map) and mostly flooded area. The representative inundated and characteristics of sub-catchment are shown in Fig.4 and Table 2.



Fig.4. The locations of 3 sub-catchments in the study area.

Table 2 Characteristics of sub-catchment

Characteristics	Sub-catchment		
	1	2	3
Area (sq.km.)	0.36	0.25	0.30
Residential area (%)	64	72	44
Roads (%)	35	21	40
Other (%)	1	7	16
Green roofs implement (%)	25	35	15
Rainwater harvesting implement (%)	20	30	20
Urban green space implement (%)	10	15	10
Pervious pavements implement (%)	35	21	40

2.2.2 Modelling approach

SWMM - Stormwater management model is a comprehensive computer model for the analysis of quality and quantity problems associated with urban runoff [4]. Both single event and continuous simulation can be performed on

catchments having storm sewers, or combined sewers and natural drainage, for prediction of flows, stages and pollutant concentrations. The model offers several choices for simple rainfall-runoff estimates and utilizes kinematic routing to form the hydrographs. Sustainable urban drainage systems techniques such as green roofs, rainwater harvesting, pervious pavements, urban green space, are applied at representative inundated sub-catchments in SWMM. The modeling which is already calibrated and verified will use four of SUDS and evaluate their performance for reducing flood inundation at a particular area.

One of the fundamental principles for SUDS application is site-specific functionality. Therefore, the ultimate goal of this section is to identify the right tools for the job. These are some examples of SUDS.

- Porous pavements

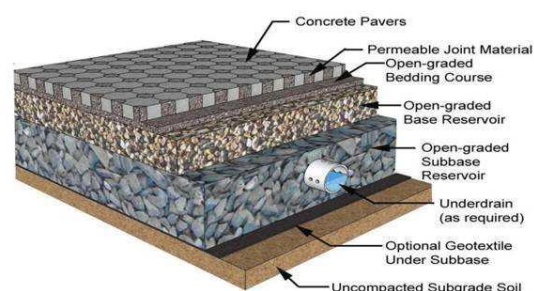


Fig.5. Porous pavements

A solution to the increase of impervious areas in urbanized areas is porous pavements. These include pavers, asphalt, concrete, or other kinds of porous materials letting water passing through. These pavements retain water in a subgrade where it can percolate into the groundwater, evaporate or drained away afterward. The general principle of porous pavements is to collect, treat,

and infiltrate any surface runoff freely for groundwater recharge. Therefore, Porous has many potential benefits over traditional, impermeable pavements, including reduction of surface runoff, groundwater recharge, recycling of water, and prevention of pollution. Porous pavements have been seen as a technology for pollutant control concerning surface runoff from adjoining buildings, parking lots, driving lanes or roads where polluted water can contaminate the underlying soil. Another advantage of this SUDS techniques is that it needs no frequent maintenance.

- Rainwater Harvesting

Rainwater Harvesting (RWH) is presented as a sound strategy for SUDS. It offers several benefits such as being supplementary for water supply sources; reducing other direct discharge to the drainage system and preventing urban flooding.

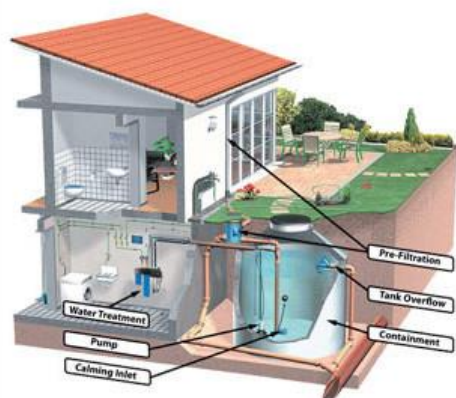


Fig.6. Rainwater harvesting

RWH can provide a supplemental water source in urbanized areas for secondary uses such as gardening, toilet flush, landscaping, etc. This amount of water can even serve as a significant water supply source in less-developed areas or places suffering from severe water scarcity. RWH

has been recognized as a sound strategy to increase water supply capacity.

- Urban green space



Fig.7. Urban green space

The urban green space is an important source control strategy for sustainable stormwater management, provided that the soil is sufficiently previous and the quality of runoff does not pose any risks of contaminating groundwater identified these devices are an essential part of developing a sustainable system for urban drainage. Relatively common devices of this type are infiltration trenches and soakaways. These underground structures are filled with materials like gravels or highly porous plastic media which can act as temporary storage for collected water and at the same time infiltrate it into the surrounding soil. Soakaways may be equipped with an overflow pipe that diverts runoff to the sewer network or another SUDS device.

- Green roofs

Green roofs, due to its typical design consisting of layers of membranes and vegetation medium, are capable of capturing water falling on the rooftop area and therefore resulting in the attenuation of runoff to the pipe network. The benefits of turning the roofs green by covering them with soil, plants have numerous benefits [5].



Fig.8. Example of green roofs implemented

2.2.3 Evaluation

SUDS solutions, such as green roofs, rainwater harvesting, pervious pavements, urban green space, are applied at representative inundated sub-catchments. The evaluation will focus on peak runoff from modeling results.

3. Results

The study showed that green roofs are the best performer because it is applied to all kinds of buildings, either residential, commercial. Rainwater harvesting and pervious pavements require specific available space for application making their performance very unstable. More specifically, sub-catchment 3 is representative for an area with suitable conditions to apply rainwater harvesting and pervious pavements. The best performing of overall is green roofs followed by rainwater harvesting, pervious pavements, and urban green space. SUDS evaluation table is shown in Table 3.

Table 3 SUDS evaluation results

SUDS evaluation		Sub-catchment			Average
		1	2	3	
Normal	Peak runoff (m3/s)	25.17	9.45	7.54	14.05
Green roofs	Peak runoff reduction (m3/s)	20.10	48.25	12.86	27.07
R.W.H.	Peak runoff reduction (m3/s)	11.16	23.39	40.45	25.00
Space	Peak runoff reduction (m3/s)	3.26	12.91	2.65	6.27
Pervious	Peak runoff reduction (m3/s)	14.82	19.26	27.98	20.69

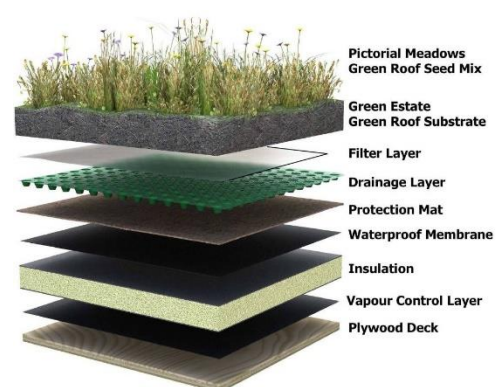


Fig.9. Example of green roofs structure

Green roofs, due to its typical design consisting of layers of membranes and vegetation medium, are capable of capturing water falling on the rooftop area and therefore resulting in the attenuation of

runoff to the pipe network. The benefits of turning the roofs green by covering them with soil, plants have numerous benefits such as reducing runoff peaks and volumes, resulting in lower urban flood risks, achieving thermal benefits through the insulation of heat transfer, resulting in cost for air conditioning, heat island effect can also be reduced, reducing air pollution and providing wildlife habitat for birds, enhancing the environment for the area.

4. Conclusions

The results showed that green roofs have the most signification of reducing peak runoff at the study area. Green roofs are the best performer because it is applied to all kinds of buildings either residential, commercial. Rain barrels will be filled up quickly with massive storms, hence could not offer many improvements. The other two methods, urban green space, and pervious pavements require specific available space for application making their performance very unstable. On the other hand, represents areas with a high density of residential houses. The best player, in this case, is green roofs followed by rainwater harvesting, pervious pavements, and urban green space. Summarized percentage of peak runoff reduction is shown in Table 4 and Fig.10.

Table 4 Summarized percentage of peak runoff reduction.

Type of implements	Sub catchment 1	Sub catchment 2	Sub catchment 3	Average
Green roofs	20.10%	48.25%	12.86%	20.07%
Rainwater harvesting	11.16%	23.39%	40.45%	25.00%
Urban green space	3.26%	12.91%	2.65%	6.27%
Pervious pavement	14.82%	19.26%	27.98%	20.69%

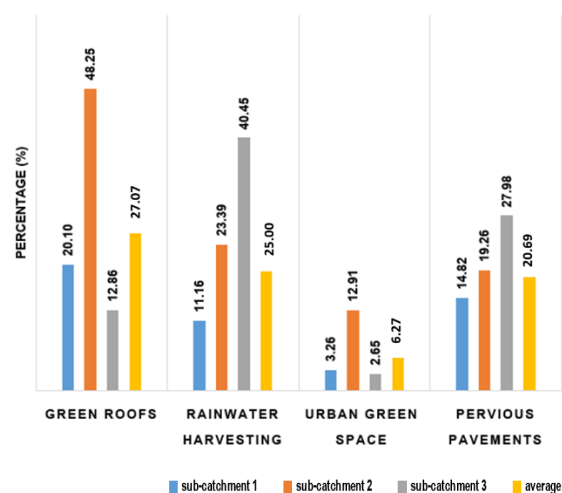


Fig.10. Peak runoff reduction capacity

5. Acknowledgments

This study was conducted as a part of APN project. Sincere thanks are extended to the

advisors and faculties of AIT. Also, I would like extend my gratitude to Bangkok metropolitan administration (BMA) for providing data for the study.

6. References

- [1] Bangkok.go.th, 2019. [Online]. Available: [http://www.bangkok.go.th/upload/user/00000130/Logo/statistic/stat%202016%20eng%20\(2\).pdf](http://www.bangkok.go.th/upload/user/00000130/Logo/statistic/stat%202016%20eng%20(2).pdf). [Accessed: 27- Dec- 2018].
- [2] J. Leitão, S. Boonya-aroonnet, D. Prodanović and Č. Maksimović, "The influence of digital elevation model resolution on overland flow networks for modelling urban pluvial flooding", Water Science and Technology, vol. 60, no. 12, pp. 3137-3149, 2009. Available: 10.2166/wst.2009.754.
- [3] N. Thanvisitthpon, S. Shrestha and I. Pal, "Urban Flooding and Climate Change", Environment and Urbanization ASIA, vol. 9, no. 1, pp. 86-100, 2018. Available: 10.1177/0975425317748532.
- [4] L. Rossman, "Modeling Low Impact Development Alternatives with SWMM", Journal of Water Management Modeling, 2010. Available: 10.14796/jwmm.r236-11.
- [5] J. Czemiel Berndtsson, "Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review", Ecological Engineering, vol. 36, no. 4, pp. 351-360, 2010. Available: 10.1016/j.ecoleng.2009.12.014.

**การบรรเทาการขาดเสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่จ่ายโหลด
วงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมโดยใช้วงรอบป้อนไปหน้า
Instability Mitigation of a Three-Phase Diode Rectifier Feeding
a Controlled Buck Converter by Using Feedforward Loop**

รัฐพล โพธิ์สังข์¹ เทพพนม โสภะเพิ่ม² กองพัน อารีรักษ์^{1*}

¹สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

²ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

Ratapon Phosung¹ Theppanom Sopapirm² Kongpan Areerak^{1*}

¹ School of electrical engineering, Suranaree university of technology

111 University Avenue, Muang, Nakhon Rachasima, Thailand, 30000

²Department of electrical power engineering, Mahanakhon university of technology

140 Cheumsampan Rd, Nongchok, Bangkok, Thailand, 10530

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

(Received: September 19, 2019; Accepted: December 20, 2019)

บทคัดย่อ

ในบทความนี้นำเสนอการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวงรอบป้อนไปหน้าสำหรับวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ โดยโหลดวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมการทำงานจะมีพฤติกรรมเปรียบเสมือนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งโหลดดังกล่าวจะมีลักษณะเป็นค่าตัวต้านทานติดลบต่อระบบโดยรวม อันเป็นสาเหตุทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการศึกษาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์จากวิธีตีความสมผสานกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป สำหรับนำมาใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพร่วมกับทฤษฎีบทค่าเจาะจง การตรวจสอบผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีที่นำเสนอในบทความนี้จะพึงพาการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB จากผลการตรวจสอบ แสดงให้เห็นว่าวิธีการที่นำเสนอในบทความนี้มีความสอดคล้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพในทางทฤษฎี อีกทั้งยังสามารถทำให้ระบบที่ขาดเสถียรอันเนื่องมาจากผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวกลับมามีเสถียรภาพตลอดการทำงาน

คำสำคัญ: โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว การบรรเทาการขาดเสถียรภาพ วงรอบป้อนไปหน้า ทฤษฎีบทค่าเจาะจง

ABSTRACT

This paper presents the instability mitigation of AC-DC power system feeding a controlled buck converter by using a feedforward loop. Power converters with their controls normally behave as constant power loads (CPLs). These CPLs have negative resistance which may cause system instability. Therefore, it is essential to study the instability mitigation technique for improving the system stability. The dynamic model derived from the DQ method and the generalized state-space averaging

method (GSSA) is used with the eigenvalue theorem for the stability analysis. The proposed instability mitigation is verified by the intensive time-domain in MATLAB. The results show that the proposed instability mitigation in article is consistent with the stability analysis in theorem. In addition, the unstable system due to a constant power load can become back to the stable operation using the proposed technique.

Keyword: Constant power loads, instability mitigation, feedforward loop, eigenvalue theorem.

รายการสัญลักษณ์	
V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}	แรงดันเฟสที่บัสแหล่งจ่ายแรงดัน
R_{eq}, L_{eq}, C_{eq}	ค่าพารามิเตอร์ของสายส่งกำลังไฟฟ้า
ω	ค่าความถี่เชิงมุมของแหล่งจ่ายไฟฟ้า
ϕ	มุมเฟสของแกนหมุนดีคิว
ϕ_1	มุมเฟสของบัสแรงดันเอซี
λ	มุมต่างเฟสระหว่างแรงดันเฟสที่บัสแหล่งจ่ายและแรงดันเฟสที่บัสเอซี
I_{in}	กระแสไฟฟ้าอินพุตของวงจรเรียงกระแส
r_L, L_{dc}	ค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง
r_c, C_{dc}	ค่าพารามิเตอร์ตัวเก็บประจุของวงจรกรอง
E_{dc1}	แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสโดยไม่พิจารณาผลของมุมเหลื่อม
E_{dc}	แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแส
V_{dc}, I_{dc}	แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าบัสดีซี
V_{sd}, V_{sq}	แรงดันไฟฟ้าที่บัสแหล่งจ่ายบนแกนดีคิว
I_{sd}, I_{sq}	กระแสไฟฟ้าที่บัสแหล่งจ่ายบนแกนดีคิว
$V_{bus,d}, V_{bus,q}$	แรงดันไฟฟ้าที่บัสเอซีบนแกนดีคิว
$I_{in,d}, I_{in,q}$	กระแสไฟฟ้าที่บัสเอซีบนแกนดีคิว
L, C, R	ค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปรผันแบบบัก
I_L, V_o	กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปรผันแบบบัก
V_o^*	แรงดันเอาต์พุตที่กำหนด
X_v, X_i	อัตราการผลิตเปลี่ยนแปลงวงจรรอบกระแสและแรงดันของวงจรแปรผันแบบบัก
K_{pv}, K_{pi}	ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพี

K_{iv}, K_{ii}	ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบไอ
A_r	ค่ายอดของสัญญาณสามเหลี่ยม
d_x	สัญญาณการควบคุม
d^*	ค่าวัฏจักรการทำงานของสวิตช์
K_f	ค่าอัตราขยายเชิงสัดส่วน
ω_o	ความถี่ศูนย์กลางของตัวกรองผ่านแถบ
ω_1, ω_2	ความถี่ตัดของตัวกรองผ่านแถบ
V_{ref}	แรงดันเอาต์พุตที่กำหนดใหม่

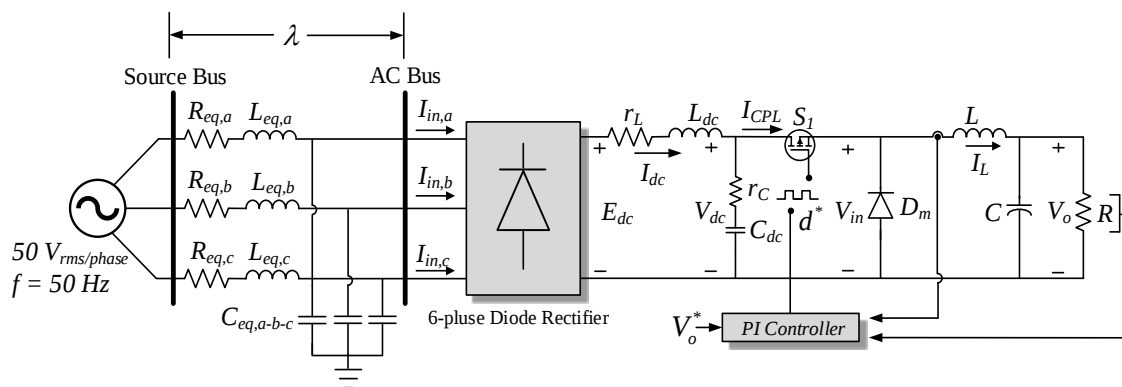
1. บทนำ

ณ ปัจจุบันได้มีการนำวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังมาใช้งานในระบบต่าง ๆ เป็นจำนวนมาก อาทิเช่น การใช้งานในระบบไฟฟ้าบนเครื่องบิน รถไฟฟ้า เรือดำน้ำ หรือระบบควบคุมในกระบวนการผลิตของภาคอุตสาหกรรม เป็นต้น การใช้งานในระบบดังกล่าวมักจะทำให้วงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุม ทั้งแปลงจากเอซีเป็นดีซี ดีซีเป็นดีซี ดีซีเป็นเอซี และเอซีเป็นเอซี เนื่องจากสามารถควบคุมการทำงานได้ง่าย มีการดูแลบำรุงรักษาที่ต่ำ และมีประสิทธิภาพในการทำงานสูง ซึ่งวงจรแปลงผันที่มีการควบคุมมักจะมีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (constant power load: CPL) ซึ่งโหลดดังกล่าวจะมีลักษณะเป็นค่าตัวต้านทานติดลบ (negative resistance) [1]-[3] ต่อระบบโดยรวม ที่นอกจากจะทำให้ระบบมีความไม่มั่นคงแล้ว ยังส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพโดยตรง ซึ่งการขาดเสถียรภาพอาจส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมได้ จากสาเหตุดังกล่าวจึงทำให้มีการศึกษาและการตรวจสอบเสถียรภาพ โดยอาศัยแบบจำลองทาง

คณิตศาสตร์ เพื่อคาดเดาจุดที่ทำให้ระบบไฟฟ้าเกิดการขาดเสถียรภาพและหลีกเลี่ยงการทำงานของระบบ ณ จุดดังกล่าว ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง โดยทั่วไปการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันส่วนใหญ่จะเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา (time varying model) อันเนื่องมาจากผลการสวิตช์ในวงจร ซึ่งจะทำให้เกิดความยุ่งยากซับซ้อนในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงต้องหาวิธีในการพิสูจน์แบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลาเปลี่ยนไปเป็นแบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา (time-invariant model) ซึ่งมีอยู่ 3 วิธีที่นิยมนำมาใช้อย่างแพร่หลายคือ วิธีดีคิว (DQ method) [4] วิธีค่าเฉลี่ยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear average-value method) [5] และวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (generalized state-space averaging method: GSSA) [6] เป็นต้น แต่เนื่องจากแบบจำลองที่ได้จากวิธีค่าเฉลี่ยแบบไม่เป็นเชิงเส้นไม่ยืดหยุ่นและอาจจะต้องพิจารณาเป็นกรณี ๆ ไป ซึ่งอาจเกิดความผิดพลาดได้ง่าย ดังนั้นในบทความนี้จะทำการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้วิธีการร่วมกันระหว่างวิธีดีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป เนื่องจากวิธีการดังกล่าวทำให้ได้แบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา อีกทั้งยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับทฤษฎีบทค่าเจาะจง (eigenvalue theorem) เพื่อนำมาวิเคราะห์เสถียรภาพได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ [7], [8] แต่อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์เสถียรภาพทำได้เพียงคาดเดาจุดที่ทำให้ระบบขาดเสถียรภาพเท่านั้น แต่ไม่สามารถทำให้ระบบไฟฟ้าจ่ายโหลดในระดับกำลังไฟฟ้าที่สูงขึ้นภายใต้พิกัดของแหล่งจ่ายได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ในการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ อันเนื่องมาจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธีการคือ วิธีแบบพาสซีฟและวิธีแบบแอกทีฟ โดยวิธีแบบพาสซีฟจะอาศัยการเพิ่มค่าตัวเก็บประจุหรือลดค่าตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง [9] เพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพและทำให้ระบบจ่ายโหลดได้สูงขึ้น รวมถึงการเพิ่มความต้านทานในระบบ [10] ซึ่งง่ายต่อการออกแบบและการนำไปใช้งาน

จริง แต่มีข้อเสียคือ ทำให้ขนาด น้ำหนัก และราคาของระบบมีค่าเพิ่มสูงมากขึ้น อีกทั้งยังทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียเพิ่มขึ้นในระบบ สำหรับวิธีแบบแอกทีฟแบ่งได้เป็น 2 แนวทางคือ แนวทางที่ 1 การบรรเทาด้านแหล่งจ่าย [11]-[15] วิธีนี้ทำได้โดยการสร้างสัญญาณชดเชยฉีดไปยังระบบควบคุมด้านแหล่งจ่ายเพื่อสร้างผลการหน่วงให้กับระบบ แต่ถึงอย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวนี้ เมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับวงจรเรียงกระแสที่ไม่มีการควบคุมเฟสจำเป็นต้องเพิ่มวงจรช่วยเข้ามาในระบบ [16], [17] ซึ่งส่งผลให้เกิดกำลังงานสูญเสียในระบบและทำให้ประสิทธิภาพของระบบต่ำลง ในส่วนของแนวทางที่ 2 คือ การบรรเทาด้านโหลด [18]-[23] จะอาศัยหลักในการเพิ่มผลการหน่วงเช่นเดียวกับการบรรเทาด้านแหล่งจ่าย แต่จะนำสัญญาณชดเชยที่สร้างขึ้นฉีดไปยังระบบควบคุมด้านโหลดแทน ซึ่งวิธีการนี้จะไม่ก่อให้เกิดกำลังงานสูญเสียในระบบจึงทำให้มีความน่าเชื่อถือสูงกว่าการบรรเทาด้านแหล่งจ่าย ด้วยเหตุผลดังกล่าวในบทความนี้จึงเลือกการบรรเทาด้านโหลดโดยใช้วงจรฟีดฟอร์เวิร์ด (feedforward loop) [21], [22] ซึ่งเป็นวิธีการที่ยังไม่พบเจอในงานวิจัยในอดีตที่นำมาใช้กับระบบที่พิจารณาในบทความ จากการวิเคราะห์เสถียรภาพ ภายใต้ทฤษฎีบทค่าเจาะจง พร้อมทั้งการยืนยันผลด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ สำหรับระบบที่พิจารณาในบทความนี้ แสดงให้เห็นว่าวิธีการที่ได้นำเสนอในบทความนี้ สามารถทำให้ระบบที่ขาดเสถียรภาพกลับมามีเสถียรภาพและสามารถทำงานในระดับกำลังไฟฟ้าที่สูงขึ้นได้อีกด้วย

บทความนี้ประกอบไปด้วย 5 ส่วนด้วยกันคือ ส่วนที่ 1 เป็นบทนำ ส่วนที่ 2 เป็นการนำเสนอระบบที่พิจารณา ส่วนที่ 3 กล่าวถึงการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่พิจารณา หลักการในการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวงจรฟีดฟอร์เวิร์ด พร้อมทั้งการยืนยันประสิทธิภาพของวิธีดังกล่าว ผ่านการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้รับการนำเสนอ ในส่วนที่ 4 ในส่วนที่ 5 เป็นการสรุปข้อดีของวิธีการที่ได้นำเสนอในบทความนี้



รูปที่ 1 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

2. ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาดังรูปที่ 1 ประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส สายส่งกำลังฟึงเอช (R_{eq}, L_{eq}, C_{eq}) วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ และ วงจรกรองสัญญาณดีซี (r_c, C_{dc}, r_L, L_{dc}) ที่เชื่อมต่อกับ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งก็คือวงจรแปลงผันแบบบักที่มี การควบคุม โดยโหลดดังกล่าวสามารถทำให้ระบบเกิดการ ขาดเสถียรภาพ ซึ่งส่งผลให้แรงดันบัสดีซี (V_{dc}) เกิดการ กระเพื่อมของแรงดันเพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งไม่สามารถ ควบคุมแรงดันเอาต์พุต (V_o) ได้ ดังนั้นในหัวข้อที่ 3 จึง นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้ วิธีตีความสมมูลกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ซึ่งจะ ทำให้ได้แบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กัเวลา และมีความ เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพต่อไป

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่พิจารณา

การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในบทความ นี้จะต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขของการพิสูจน์หาแบบจำลองคือ พิจารณาเฉพาะโหมดการนำกระแสต่อเนื่องและไม่ พิจารณาฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นในระบบ โดยในส่วนแรกจะใช้ วิธีตีความ [4] วิเคราะห์วงจรทางฟึงแหล่งจ่ายของระบบ ไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับผ่าน สายส่งกำลังไฟฟ้าที่ต่อเข้ากับวงจรเรียงกระแสสามเฟส แบบบริดจ์ โดยกำหนดให้มุมเฟสการหมุนของสัญญาณ การสวิตช์ ($\phi = \phi$) เพื่อลดความซับซ้อนของแบบจำลอง

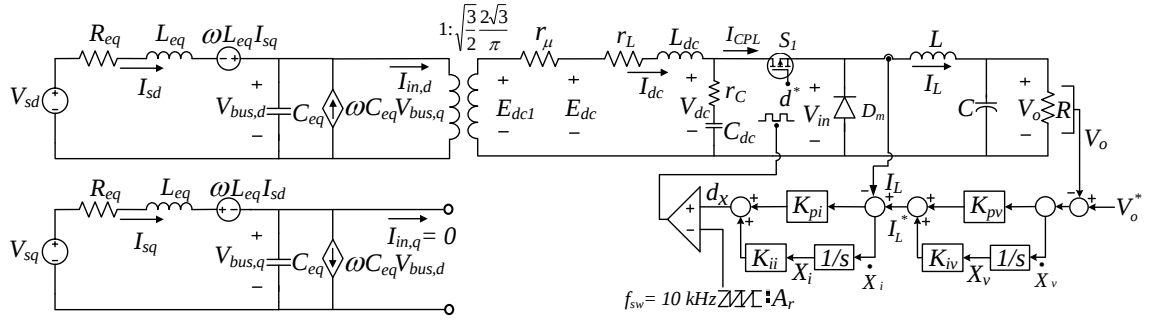
ดังนั้น จะได้วงจรสมมูลอย่างง่ายบนแกนดีคิวของระบบ ไฟฟ้าที่พิจารณาดังรูปที่ 2

จากรูปที่ 2 พบว่า แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับรวมทั้ง สายส่งกำลังไฟฟ้าฟึงเอชจะถูกเปลี่ยนให้อยู่บนแกนดีคิว โดยวงจรเรียงกระแสสามเฟสได้ถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปหม้อ แปลงไฟฟ้า ซึ่งเป็นวงจรไฟฟ้ากระแสตรงที่ง่ายต่อการ วิเคราะห์วงจร รวมไปถึงสามารถกำจัดสัญญาณการสวิตช์ ของไดโอดซึ่งจะทำให้ได้แบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กัเวลา

ลำดับต่อไปจะใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปใน [6] พิจารณาวงจรทางฟึงโหลดของระบบไฟฟ้า เพื่อกำจัด สัญญาณการสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบักที่มีตัว ควบคุมแบบพีไอ โดยโครงสร้างของตัวควบคุมแบ่ง ออกเป็น 2 ส่วนคือ ตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต (K_{pv}, K_{iv}) และตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (K_{pi}, K_{ii}) ซึ่งมีอินพุตคือ แรงดันอ้างอิง (V_o^*) และมีเอาต์พุต คือ สัญญาณควบคุม (d_x) โดยสัญญาณควบคุม d_x จะ นำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยม เพื่อสร้างเป็น ค่าวัฏจักรการทำงานของสวิตช์ (d^*) ดังสมการที่ (1)

$$d^* = \frac{1}{A_r} (-K_{pi} I_L - K_{pv} K_{pi} V_o + K_{iv} K_{pi} X_v + K_{ii} X_i + K_{pv} K_{pi} V_o^*) \quad (1)$$

ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงพลวัตของ ระบบในรูปที่ 2 ที่ได้จากวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป และสมการที่ (1) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2)



รูปที่ 2 วงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้าที่พิจารณานบนแกนดีคิว

$$\begin{aligned}
 \dot{I}_{sd} &= -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sd} + \omega I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \cos(\lambda) \\
 \dot{I}_{sq} &= -\omega I_{sd} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \sin(\lambda) \\
 \dot{V}_{bus,d} &= \frac{1}{C_{eq}} I_{sd} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} I_{dc} \\
 \dot{V}_{bus,q} &= \frac{1}{C_{eq}} I_{sq} - \omega V_{bus,d} \\
 \dot{I}_{dc} &= \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} V_{bus,d} - \frac{(r_\mu + r_L + r_c)}{L_{dc}} I_{dc} - \frac{1}{L_{dc}} V_{dc} \\
 &\quad - \frac{r_c K_{pi}}{A_r L_{dc}} I_L^2 - \frac{r_c K_{pv} K_{pi}}{A_r L_{dc}} I_L V_o + \frac{r_c K_{iv} K_{pi}}{A_r L_{dc}} I_L X_v \\
 &\quad + \frac{r_c K_{ii}}{A_r L_{dc}} I_L X_i + \frac{r_c K_{pv} K_{pi}}{A_r L_{dc}} I_L V_o^* \\
 \dot{V}_{dc} &= \frac{1}{C_{dc}} I_{dc} + \frac{K_{pi}}{A_r C_{dc}} I_L^2 + \frac{K_{pv} K_{pi}}{A_r C_{dc}} I_L V_o \\
 &\quad - \frac{K_{iv} K_{pi}}{A_r C_{dc}} I_L X_v - \frac{K_{ii}}{A_r C_{dc}} I_L X_i - \frac{K_{pv} K_{pi}}{A_r C_{dc}} I_L V_o^* \\
 \dot{I}_L &= -\frac{K_{pi}}{A_r L} V_{dc} I_L - \frac{K_{pv} K_{pi}}{A_r L} V_{dc} V_o - \frac{1}{L} V_o + \frac{K_{iv} K_{pi}}{A_r L} V_{dc} X_v \\
 &\quad + \frac{K_{ii}}{A_r L} V_{dc} X_i + \frac{K_{pv} K_{pi}}{A_r L} V_{dc} V_o^* \\
 \dot{V}_o &= \frac{1}{C} I_L - \frac{1}{RC} V_o \\
 \dot{X}_v &= -V_o + V_o^* \\
 \dot{X}_i &= -I_L - K_{pv} V_o + K_{iv} X_v + K_{pv} V_o^*
 \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{\delta \mathbf{x}} &= \mathbf{A}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o) \delta \mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o) \delta \mathbf{u} \\
 \delta \mathbf{y} &= \mathbf{C}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o) \delta \mathbf{x} + \mathbf{D}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o) \delta \mathbf{u}
 \end{aligned} \tag{3}$$

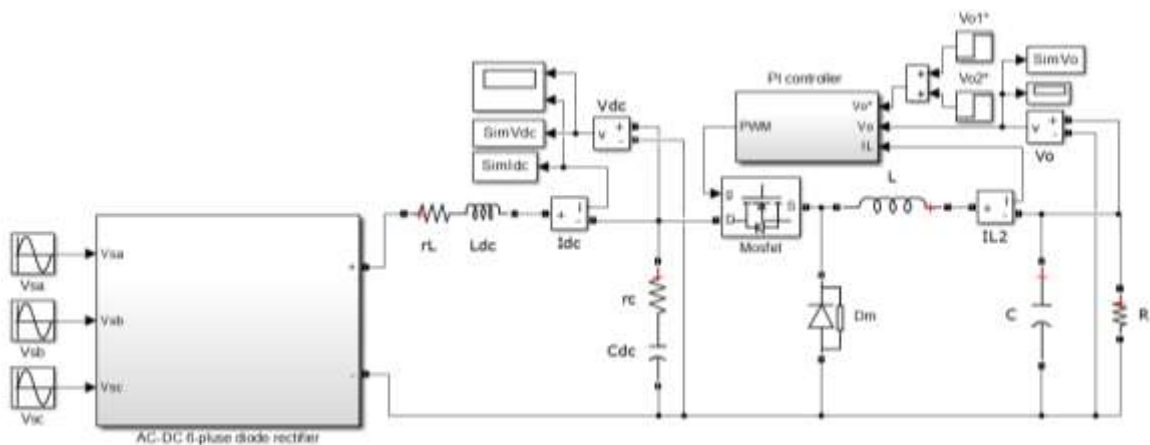
การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองจะอาศัยการเปรียบเทียบผลเฉลยที่ได้จากแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (3) กับผลการจำลองสถานการณ์ผ่านชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบนโปรแกรม MATLAB ในรูปที่ 3 เพื่อพิจารณาพฤติกรรมทางพลวัตของระบบในเงื่อนไขการทำงานต่าง ๆ โดยกำหนดให้พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

พารามิเตอร์	ค่า
R_{eq}	0.1 Ω
C_{eq}	2 nF
r_L	0.01 Ω
L_{dc}	30 mH
r_c	0.4 Ω
C_{dc}	1000 μ F
L ($\Delta I_L \leq 0.2$ A)	15 mH
C ($\Delta V_o \leq 2.8$ mV)	1000 μ F
R	20 Ω
K_{pv}	0.0757
K_{iv}	3.9478
K_{pi}	2.2564
K_{ii}	2025.3
A_r	10

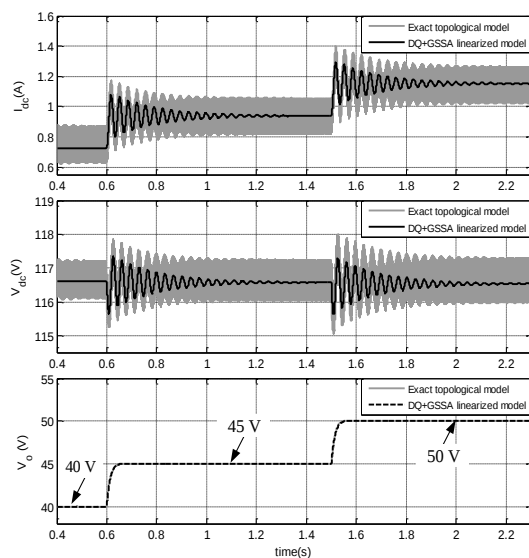
3.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

จากสมการที่ (2) เป็นสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นจึงอาศัยอนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่งเขียนสมการให้อยู่ในรูปแบบตัวแปรสถานะของแบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กที่เป็นเชิงเส้นได้ดังสมการที่ (3) ซึ่งค่าต่าง ๆ ในเมตริกซ์ **A** **B** **C** และ **D** จะขึ้นอยู่กับจุดปฏิบัติงานของระบบ



รูปที่ 3 ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB สำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

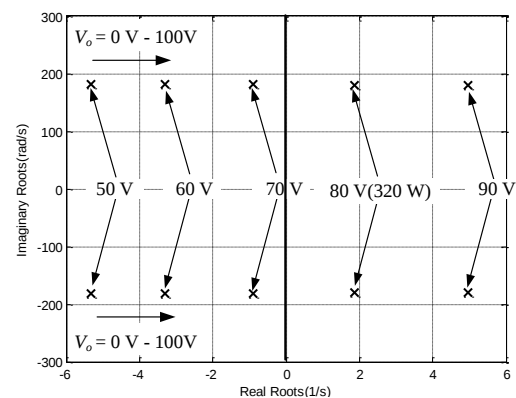
จากรูปที่ 4 ได้ดำเนินการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่กำหนด จาก 40 V ไปเป็น 45 V ที่เวลา 0.6 วินาที และจาก 45 V ไปเป็น 50 V ที่เวลา 1.5 วินาที ตามลำดับ จะสังเกตได้ว่า ผลตอบสนองของ I_{dc} , V_{dc} และ V_o ที่ได้จากแบบจำลองมีรูปร่างลักษณะที่สอดคล้องกับการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง หรือกล่าวได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการพิสูจน์ในทางทฤษฎีนั้นสามารถอธิบายพฤติกรรมทางพลวัตของระบบได้อย่างถูกต้องแม่นยำ อีกทั้งยังเหมาะสำหรับนำไปใช้วิเคราะห์เสถียรภาพของระบบผ่านทฤษฎีบทค่าเจาะจง ซึ่งรายละเอียดจะได้รับการนำเสนอในหัวข้อที่ 3.2



รูปที่ 4 ผลการจำลองสถานการณ์ของระบบที่พิจารณา

3.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่พิจารณา

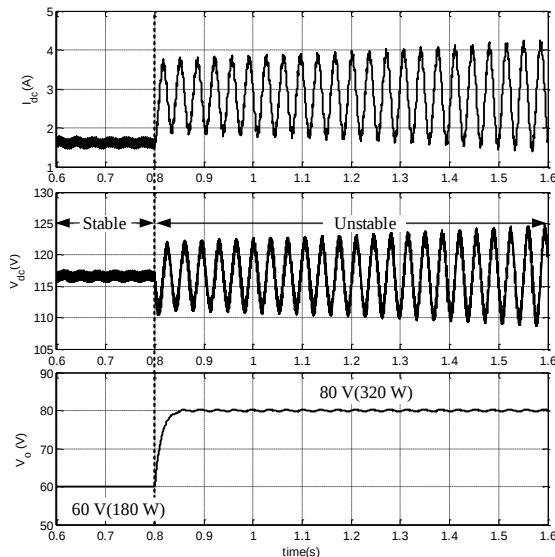
การวิเคราะห์หาจุดปฏิบัติงานที่ส่งผลให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพจะอาศัยแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (3) ภายใต้ทฤษฎีบทค่าเจาะจง เพื่อนำมาใช้ในการพิจารณาเสถียรภาพของระบบ ค่าเจาะจงสามารถคำนวณได้จากเมทริกซ์จาโคเบียน (jacobian matrix) $A(x_o, u_o)$ แสดงได้ดังในรูปที่ 5 โดยกำหนดให้โหลดคงจรรแปลงผันแบบบักมีกมีการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจาก 0 V (0 W) ไปจนถึง 100 V (500 W)



รูปที่ 5 ค่าเจาะจงของระบบเมื่อทำการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโหลด จาก 0 - 100 V

จากรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่าเมื่อแรงดันเอาต์พุตของโหลดมีค่าเพิ่มจาก 70 V (245 W) ไปเป็น 80 V (320 W) จะทำให้ค่าเจาะจงเด่นของระบบเคลื่อนที่จากฝั่งซ้ายของระนาบเอสมาอยู่ที่ฝั่งขวา ซึ่งหมายถึงระบบไฟฟ้าที่

พิจารณาเกิดการขาดเสถียรภาพ โดยการยืนยันผลการวิเคราะห์ในรูปที่ 5 จะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB แสดงได้ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพในรูปที่ 5 ด้วยการจำลองสถานการณ์

จากรูปที่ 6 จะเห็นว่า เมื่อแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 60 V (180 W) ไปเป็น 80 V (320 W) ที่เวลา 0.8 วินาที จะทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ ซึ่งพิจารณาจากการกระเพื่อมของแรงดันบัสดีซี (V_{dc}) ที่มีค่าเพิ่มมากขึ้น และทำให้สมรรถนะการควบคุมของระบบลดลง ดังนั้น ในบทความนี้จึงได้นำวงรอบป้อนไปนำมาใช้ในการบรรเทาการขาดเสถียรภาพสำหรับระบบที่พิจารณาในบทความนี้ ซึ่งรายละเอียดดังกล่าวจะได้รับการนำเสนอในหัวข้อที่ 4

4. การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวงรอบป้อนไปหน้า

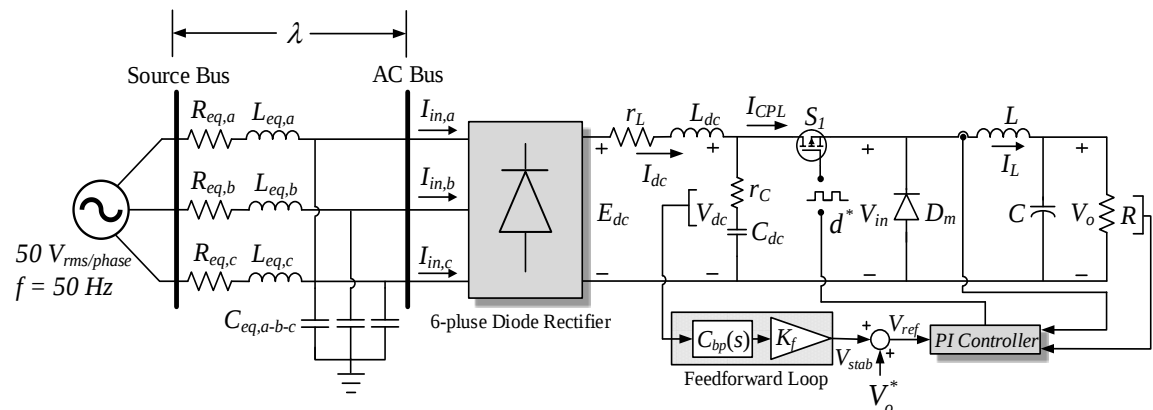
ในหัวข้อนี้ได้นำเสนอการบรรเทาการขาดเสถียรภาพโดยใช้วงรอบป้อนไปหน้าสำหรับประยุกต์ใช้กับวงจรกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่เชื่อมต่อกับวงจรแปลงผันแบบบักที่มีกรควบคุม แสดงดังรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่าถ้าต้องการลดผลกระทบทางด้านเสถียรภาพที่เกิดจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวในที่นี้ก็คือ วงจรแปลงผันแบบบักที่มี

การควบคุม ทำได้โดยการตรวจจับแรงดันบัสดีซี (V_{dc}) ผ่านตัวกรองผ่านแถบ ($C_{bp}(s)$) โดยตัวกรองผ่านแถบนี้จะกรองสัญญาณความถี่รอบ ๆ ความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรกรองสัญญาณดีซี จากนั้นนำมาปรับคูณกับค่าอัตราขยายเชิงสัดส่วน (K_f) เพื่อทำหน้าที่ปรับอัตราขยายในการชดเชยผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งค่าที่ได้จะเป็นการสร้างแรงดันสำหรับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ (V_{stab}) และนำไปป้อนรวมกับแรงดันเอาต์พุตที่กำหนด (V_o^*) สำหรับใช้สร้างแรงดันเอาต์พุตที่กำหนดใหม่ (V_{ref}) ของวงจรแปลงผันแบบบัก แสดงดังสมการที่ (4)

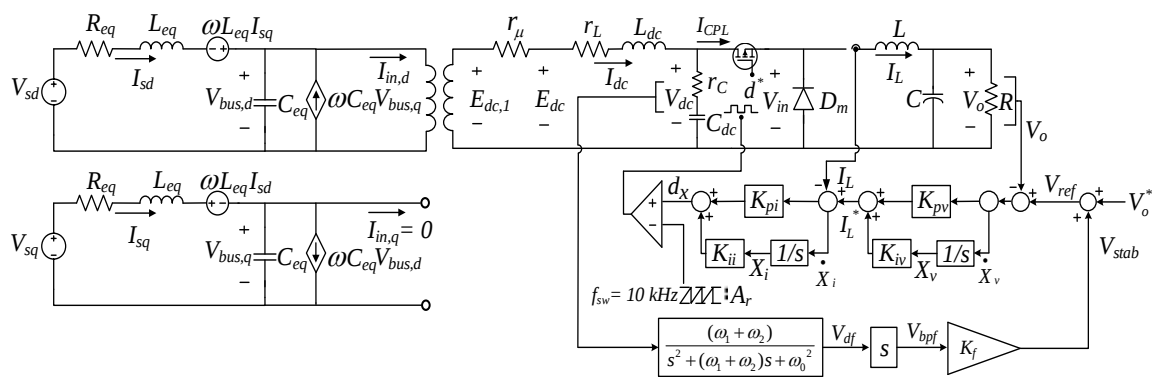
$$V_{ref} = V_o^* + V_{stab} \quad (4)$$

เมื่อ $V_{stab} = K_f C_{bp}(s) V_{dc}$

ซึ่งผลที่ได้ จะทำให้แรงดันเอาต์พุต (V_o) ปรับตามรูปสัญญาณแรงดันเอาต์พุตที่กำหนดใหม่ ส่งผลให้กระแสที่ไหลผ่านบัสดีซี (I_{dc}) มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมที่ความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำ (r_L) เพิ่มมากขึ้นเช่นกัน ด้วยเหตุผลนี้จึงทำให้แรงดันบัสดีซีลดลงเปรียบเสมือนกับการมีอิมพีแดนซ์เสมือน ซึ่งประกอบด้วยตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ ต่อขนานกับตัวเก็บประจุของวงจรกรองสัญญาณดีซี [21], [22] จึงทำให้สามารถบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบที่พิจารณาในบทความนี้ได้ ดังนั้นการวิเคราะห์หาค่า K_f ที่ส่งผลต่อการชดเชยโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวโดยตรงจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง ซึ่งต้องอาศัยการคำนวณผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เนื่องจากเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพสูง อีกทั้งยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง เพื่อคาดเดาผลการคำนวณหาค่า K_f ที่ทำให้ระบบกลับมามีเสถียรภาพได้อีกด้วย จากระบบไฟฟ้าในรูปที่ 7 จะพิจารณาการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธีการร่วมกันระหว่างวิธีดีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ซึ่งสามารถเขียนวงจรสมมูลที่อยู่บนแกนดีคิวได้ดังรูปที่ 8



รูปที่ 7 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวงรอบป้อนไปหน้า



รูปที่ 8 วงจรสมมูลบนแกนดีคิวที่พิจารณาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวงรอบป้อนไปหน้า

จากรูปที่ 8 สามารถหาสมการเชิงอนุพันธ์ของวงจรสมมูลที่อยู่บนแกนหมุนดีคิว โดยพิจารณาวงรอบป้อนไปหน้า แสดงดังสมการที่ (5) และ (6)

$$\dot{I}_{sd} = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sd} + \omega I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \cos(\lambda)$$

$$\dot{I}_{sq} = -\omega I_{sd} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \sin(\lambda)$$

$$\dot{V}_{bus,d} = \frac{1}{C_{eq}} I_{sd} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} I_{dc}$$

$$\dot{V}_{bus,q} = \frac{1}{C_{eq}} I_{sq} - \omega V_{bus,d}$$

$$\dot{I}_{dc} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} V_{bus,d} - \frac{(r_\mu + r_L + r_c)}{L_{dc}} I_{dc} - \frac{1}{L_{dc}} V_{dc} - \frac{r_c K_{pi}}{A_r L_{dc}} I_L^2 - \frac{r_c K_{pv} K_{pi}}{A_r L_{dc}} I_L V_o + \frac{r_c K_{iv} K_{pi}}{A_r L_{dc}} I_L X_v - \frac{r_c K_{ii}}{A_r L_{dc}} I_L X_i + \frac{r_c K_{pv} K_{pi}}{A_r L_{dc}} I_L V_o^* + \frac{r_c K_{pv} K_{pi} K_f}{A_r L_{dc}} I_L V_{bpf}$$

(5)

$$\dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} I_{dc} + \frac{K_{pi}}{A_r C_{dc}} I_L^2 + \frac{K_{pv} K_{pi}}{A_r C_{dc}} I_L V_o - \frac{K_{iv} K_{pi}}{A_r C_{dc}} I_L X_v - \frac{K_{ii}}{A_r C_{dc}} I_L X_i - \frac{K_{pv} K_{pi}}{A_r C_{dc}} I_L V_o^* - \frac{K_{pv} K_{pi} K_f}{A_r C_{dc}} I_L V_{bpf}$$

$$\dot{I}_L = -\frac{K_{pi}}{A_r L} V_{dc} I_L - \frac{K_{pv} K_{pi}}{A_r L} V_{dc} V_o - \frac{1}{L} V_o + \frac{K_{iv} K_{pi}}{A_r L} V_{dc} X_v + \frac{K_{ii}}{A_r L} V_{dc} X_i$$

$$+ \frac{K_{pv} K_{pi}}{A_r L} V_{dc} V_o^* + \frac{K_{pv} K_{pi} K_f}{A_r L} V_{dc} V_{bpf}$$

$$\dot{V}_o = \frac{1}{C} I_L - \frac{1}{RC} V_o$$

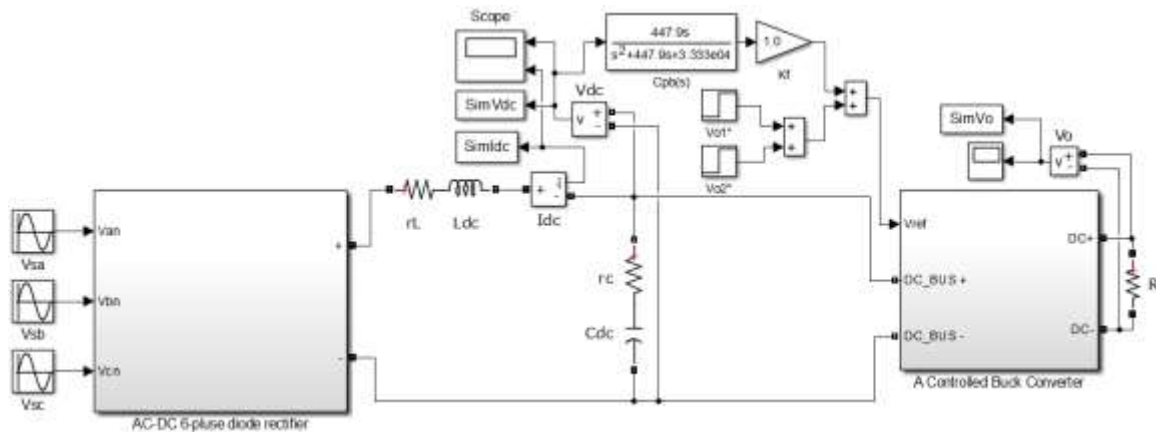
$$\dot{X}_v = -V_o + V_o^* + K_f V_{bpf}$$

$$\dot{X}_i = -I_L - K_{pv} V_o + K_{iv} X_v + K_{pv} V_o^* + K_{pv} K_f V_{bpf}$$

$$\dot{V}_{df} = V_{bpf}$$

$$\dot{V}_{bpf} = (\omega_1 + \omega_2) V_{dc} - \omega_o^2 V_{df} - (\omega_1 + \omega_2) V_{bpf}$$

(6)



รูปที่ 9 ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB สำหรับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ

4.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

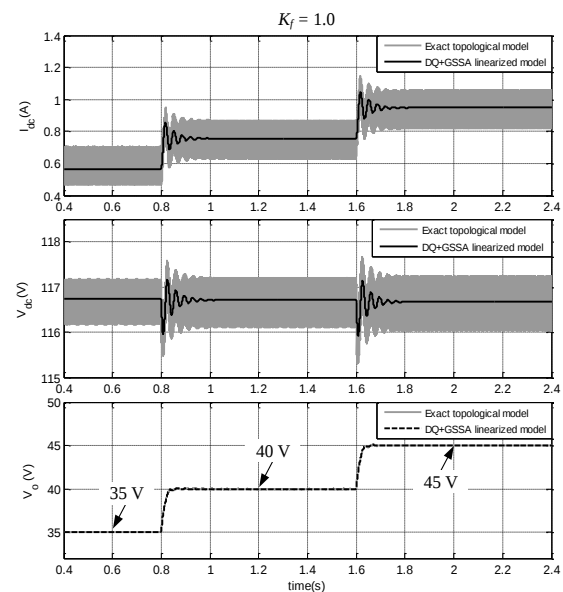
จากสมการที่ (5) และ (6) เป็นสมการเชิงอนุพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งการหาค่าอัตราขยายเชิงสัดส่วนที่ทำให้ระบบกลับมามีเสถียรภาพจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองที่มีความถูกต้องแม่นยำสูง และผ่านการทำให้เป็นเชิงเส้นด้วยอนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่ง ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการที่มีรูปแบบดังสมการที่ (7) โดยค่าต่าง ๆ ในเมทริกซ์ **A B C** และ **D** จะขึ้นอยู่กับจุดปฏิบัติงานของระบบ

$$\begin{cases} \dot{\delta x} = A(x_0, u_0)\delta x + B(x_0, u_0)\delta u \\ \delta y = C(x_0, u_0)\delta x + D(x_0, u_0)\delta u \end{cases} \quad (7)$$

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองจะอาศัยการเปรียบเทียบผลเฉลยที่ได้จากแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (7) กับผลการจำลองสถานการณ์ผ่านชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบนโปรแกรม MATLAB ในรูปที่ 9 เพื่อพิจารณาพฤติกรรมทางพลวัตของระบบในเงื่อนไขการทำงานต่าง ๆ โดยกำหนดให้พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 7 แสดงดังตารางที่ 1 พร้อมด้วยค่าพารามิเตอร์ของวงจรบัพโอนไปหน้าดังนี้ $K_f = 1.0$, $\omega_o = 182.57$ rad/s, $\omega_f = 94.25$ rad/s, $\omega_2 = 353.68$ rad/s

จากรูปที่ 10 ได้ดำเนินการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตที่กำหนดจาก 35 V ไปเป็น 40 V ที่เวลา 0.8 วินาที และจาก 40 V ไปเป็น 45 V ที่เวลา 1.6 วินาที

ตามลำดับ โดยกำหนดให้ $K_f = 1.0$ จะสังเกตได้ว่า ผลการตอบสนองของ I_{dc} , V_{dc} และ V_o ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นมีลักษณะของรูปสัญญาณที่สอดคล้องกับผลการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง ทั้งในสภาวะชั่วคราวและสภาวะอยู่ตัว ดังนั้นจึงยืนยันได้ว่า การพิสูจน์หาแบบทางคณิตศาสตร์ที่พิจารณาโครงสร้างการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวงรอบบัพโอนไปหน้ามีความถูกต้องแม่นยำ เหมาะสมสำหรับนำไปวิเคราะห์หาค่า K_f ที่ส่งผลให้ระบบกลับมามีเสถียรภาพได้ ซึ่งรายละเอียดจะได้รับการนำเสนอในหัวข้อที่ 4.2

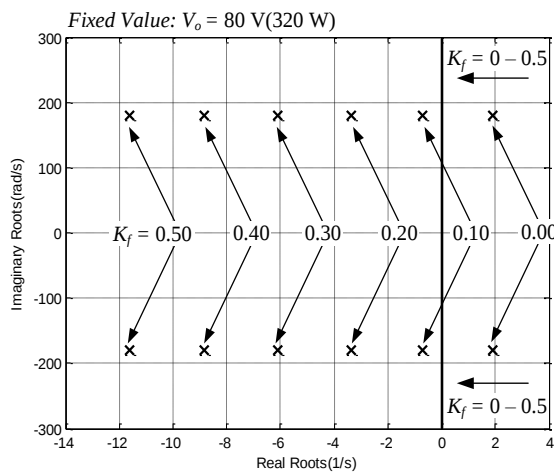


รูปที่ 10 ผลการตอบสนอง I_{dc} , V_{dc} และ V_o ของระบบที่มีการเปลี่ยนแปลง V_o^* โดยที่ $K_f = 1.0$

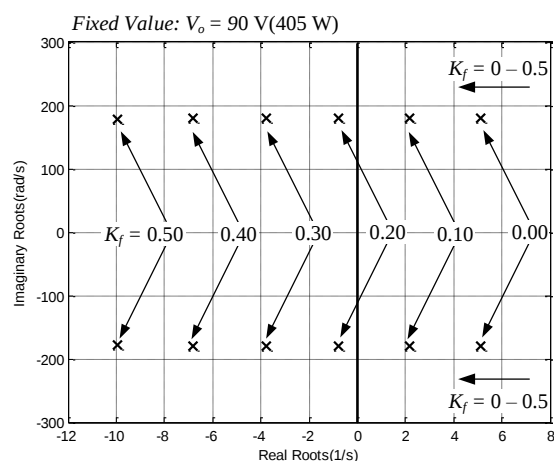
ปีที่ 14 ฉบับที่ 3 เดือน กันยายน – ธันวาคม พ.ศ. 2562

4.2 การหาค่า K_f ที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพ

การวิเคราะห์ผลของค่า K_f ที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพ จะพิจารณาแบบจำลองที่ผ่านการทำให้เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (7) ร่วมกับทฤษฎีบทค่าเจาะจงนำมาใช้พิจารณา ซึ่งค่าเจาะจงสามารถคำนวณได้จากเมตริกซ์จาโคเบียน $A(x_0, u_0)$ แสดงได้ดังรูปที่ 11 และ รูปที่ 12 ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า K_f จาก 0 ถึง 0.5 โดยมีการปรับตั้งค่าระดับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโหนดมีค่าเท่ากับ 80 V (320 W) และ 90 V (405 W) ตามลำดับ

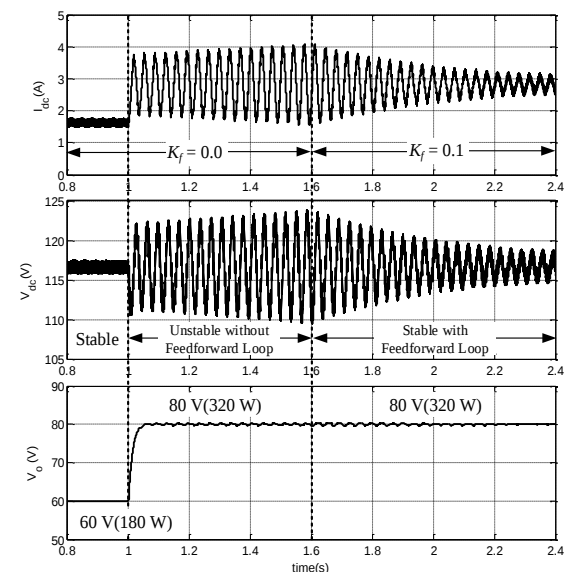


รูปที่ 11 ผลการคำนวณค่าเจาะจงที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพ เมื่อกำหนด $V_o = 80$ V (320 W)

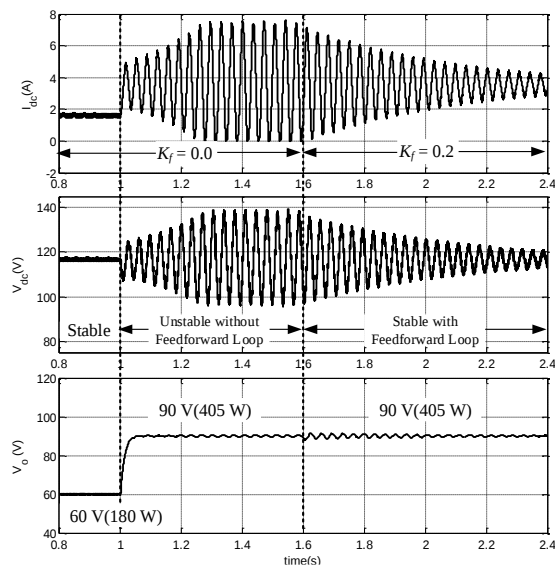


รูปที่ 12 ผลการคำนวณค่าเจาะจงที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพ เมื่อกำหนด $V_o = 90$ V (405 W)

จากรูปที่ 11 จะเห็นได้ว่า เมื่อกำหนดให้โหนดวงจรแปลงผันแบบบักมีระดับแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 80 V (320 W) ที่ค่า K_f มีค่าเท่ากับ 0 นั่นคือ ยังไม่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ ระบบจะขาดเสถียรภาพที่จุดปฏิบัติงานนี้ แต่เมื่อค่า K_f มีค่าเท่ากับ 0.1 ค่าเจาะจงเด่นของระบบจะเคลื่อนที่จากฝั่งขวาของระนาบเอสมาอยู่ที่ฝั่งซ้าย ซึ่งหมายถึง ระบบที่ขาดเสถียรภาพกลับมามีเสถียรภาพอีกครั้ง เพียงแค่เพิ่มค่า K_f จาก 0 ไปเป็น 0.1 แต่ถ้าโหนดวงจรแปลงผันแบบบักมีการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าไปเป็น 90 V (405 W) ดังแสดงในรูปที่ 12 จะเห็นได้ว่า ระบบจะกลับมาเสถียรภาพขาดเสถียรภาพอีกครั้งที่ค่า K_f มีค่าเท่ากับ 0.1 ดังนั้นค่า K_f ควรมีค่าเพิ่มตามระดับแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ซึ่งในที่นี้คือ 0.2 จึงทำให้ค่าเจาะจงเด่นของระบบเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่จากฝั่งขวาของระนาบเอสมาอยู่ที่ฝั่งซ้ายอีกครั้ง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ระบบสามารถทำงานในระดับกำลังไฟฟ้าที่สูงขึ้นได้ การยืนยันผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบ จะอาศัยผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์แสดงดังรูปที่ 13 และ 14



รูปที่ 13 ผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของโหนดกำลังไฟฟ้าคงตัว เมื่อ $V_o = 80$ V (320 W)



รูปที่ 14 ผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของโหลด

กำลังไฟฟ้าคงตัว เมื่อ $V_o = 90\text{V}$ (405 W)

จากรูปที่ 13 จะเห็นได้ว่า เมื่อโหลดวงจรแปลงผันแบบบักมีค่าเปลี่ยนแปลงจาก 60 V (180 W) เป็น 80 V (320 W) ที่เวลา 1.0 วินาที โดยกำหนดให้ K_f มีค่าเท่ากับ 0 จะทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ ซึ่งดูได้จากแรงดันบัสดีซี (V_{dc}) ที่มีการกระเพื่อมของแรงดันมากขึ้น และภายหลังจากเวลาที่ 1.6 วินาที ได้กำหนดให้วงจรบัพ้อนไปหน้าเริ่มทำงาน โดยที่กำหนดให้ค่า K_f ให้มีค่าเท่ากับ 0.1 ซึ่งจะเห็นได้ว่า แรงดันบัสดีซี (V_{dc}) จะค่อยๆ มีผลการกระเพื่อมของแรงดันที่ลดลง ซึ่งหมายถึง ระบบไฟฟ้าในรูปที่ 7 เริ่มกลับมามีเสถียรภาพอีกครั้ง แต่ถ้าค่าระดับแรงดันไฟฟ้าของโหลดวงจรแปลงผันแบบบักเพิ่มขึ้นเป็น 90 V (405 W) ดังแสดงในรูปที่ 14 จะต้องทำการเพิ่มค่า K_f ให้มีค่าเท่ากับ 0.2 ตามการคำนวณค่าเจาะจงที่แสดงในรูปที่ 12 จะสังเกตได้ว่าผลของแรงดันบัสดีซี (V_{dc}) ที่มีการกระเพื่อมเพิ่มขึ้นจะถูกทำให้มีค่าค่อยๆ ลดลง ส่งผลทำให้ระบบกลับมามีเสถียรภาพได้อีกครั้ง จากผลการยืนยันด้วยการจำลองสถานการณ์ข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์หาค่า K_f ที่เหมาะสมกับระดับกำลังไฟฟ้าของโหลดวงจรแปลงผันแบบบักผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้ผลที่มีความถูกต้องแม่นยำและความน่าเชื่อถือสูง

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และกลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม (PEMC) ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัย รวมทั้งสถานที่และเครื่องมือต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำวิจัย

6. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอวิธีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพแบบแอกทีฟโดยใช้วงรอบป้อนไปหน้า เพื่อกำจัดผลของโหลดวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุมซึ่งสามารถลดทอนเสถียรภาพของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเอซีเป็นดีซีได้โดยตรง ผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้องแม่นยำ จากการวิเคราะห์ผลของค่าอัตราขยายเชิงสัดส่วน (K_p) โดยอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจงและการยืนยันผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ที่มีความสอดคล้องกัน แสดงให้เห็นว่า โครงสร้างการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวงรอบป้อนไปหน้าที่อาศัยการวัดค่าแรงดันบัสดีซี (V_{dc}) ผ่านตัวกรองผ่านแถบ ($C_{bp}(s)$) จากนั้นนำผลของสัญญาณที่ได้มาคูณกับค่า K_f และนำมาบวกกับค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่กำหนด (V_o^*) ตามที่ได้นำเสนอในบทความนี้สามารถทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังนอกจากจะไม่ขาดเสถียรภาพที่จุดการขาดเสถียรภาพก่อนการบรรเทาการขาดเสถียรภาพแล้ว ยังสามารถทำงานต่อได้ในระดับกำลังไฟฟ้าที่สูงขึ้นได้อีกด้วย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Emadi, A. Khaligh, C.H. Rivetta and G.A. Williamson, "Constant power loads and negative impedance instability in automotive systems: definition, modeling, stability, and control of power electronic converters and motor drives," *IEEE Trans.*

- Veh. Technol.*, vol. 55, no. 4, pp. 1112-1125, Jul. 2006.
- [2] A. M. Rahimi and A. Emadi, "An analytical investigation of DC/DC power electronic converters with constant power loads in vehicular power systems," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 58, no. 6, pp. 2689-2702, Jul. 2009.
- [3] U. Ghisla, I. Kondratiev and R. Dougal, "Protection of medium voltage DC power systems against ground faults and negative incremental impedances," in *IEEE SoutheastCon 2010*, Concord, NC, 2010, pp. 259-263.
- [4] K-N. Areerak, S.V. Bozhko, G.M. Asher and D.W.P. Thomas, "Stability analysis and modelling of AC-DC system with mixed load using DQ-transformation method," in *2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Cambridge, UK, 2008, pp. 19-24.
- [5] A. Baghrmian and A.J. Forsyth, "Averaged-value models of twelve-pulse rectifiers for aerospace applications," in *Second International on Power Electronics, Machines and Drives*, Edinburgh, UK, 2004, pp. 220-225.
- [6] J. Mahdavi, A. Emadi, M.D. Bellar and M. Ehsani, "Analysis of power electronic converters using the generalized state-space averaging approach," *IEEE Trans. Circuits Syst. I, Fundam. Theory Appl.*, vol. 44, no. 8, pp. 767-770, Aug. 1997.
- [7] T. Sopapirm, K-N. Areerak and K-L. Areerak, "Stability analysis of AC distribution system with six-pulse diode rectifier and multi-converter power electronic loads," *Int. Rev. Elect. Eng.*, vol. 6, no. 7, pp. 2919-2928, Nov./Dec. 2011.
- [8] K-N. Areerak, S.V. Bozhko, G.M. Asher, L. De lillo and D. W. P. Thomas, "Stability study for a hybrid AC-DC more-electric aircraft power system," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 48 no. 1, pp. 329-347, Jan. 2012.
- [9] M. Cespedes, L. Xing and J. Sun, "Constant-power loads system stabilization by passive damping," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, no. 7, pp. 1832-1836, Jul. 2011.
- [10] X. Liu and S. Ma, "Large signal stabilization method of constant power loads by adding R parallel damping filters," in *2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Montreal, QC, 2015, pp. 1314-1319.
- [11] A.M. Rahimi and A. Emadi, "Active damping in DC/DC power electronic converters: a novel method to overcome the problems of constant power loads," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 5, pp. 1428-1439, Feb. 2009.
- [12] A.M. Rahimi, G.A. Williamson and A. Emadi, "Loop-cancellation technique: a novel nonlinear feedback to overcome the destabilizing effect of constant-power loads," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 59, no. 2, pp. 650-661, Feb. 2010.
- [13] Y. Li, K.R. Vannorsdel, A.J. Zirger, M. Norris and D. Maksimovic, "Current mod control for boost converters with constant power loads," *IEEE Trans. Circuits Syst. I, Reg. Papers*, vol. 59, no. 1, pp. 198-206, Jan. 2012.

- [14] Y. Zhao, W. Qiao and D. Ha, “A sliding-mode duty-ratio controller for DC/DC buck converters with constant power loads,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 50, no. 2, pp. 1448–1458, Mar./Apr. 2014.
- [15] M. Wu and D. D. Lu, “A novel stabilization method of LC input filter with constant power loads without load performance compromise in dc microgrid,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 7, pp. 4552-4562, Jul. 2015.
- [16] T. Sopapirm, K-N. Areerak and K-L. Areerak, “The active damping stabilization of AC-DC power systems feeding constant power loads,” *Int. Rev. Elect. Eng.*, vol. 12, no. 4, pp. 287-295., Jul./Aug. 2017.
- [17] K-N. Areerak, T. Sopapirm, S.V. Bozhko, C. I. Hill, A. Suyapan and K-L. Areerak, “Adaptive stabilization of uncontrolled rectifier based AC-DC power systems feeding constant power loads,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 33, no. 10, pp. 8927-8935, Oct. 2018.
- [18] X. Liu, A. Forsyth, and A. Cross, “Negative input-resistance compensator for a constant power load,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 6, pp. 3188–3196, Dec. 2007.
- [19] P. Magne, D. Marx, B. Nahid-Mobarakeh and S. Pierfederici, “Large-signal stabilization of a dc-link supplying a constant power load using a virtual capacitor: impact on the domain of attraction,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 48, no. 3, pp. 878-887, May/June 2012.
- [20] Y.R. Mohamed, A.A.A. Radwan and T. Lee, “Decoupled reference voltage-based active dc-link stabilization for pmsm drives with tight-speed regulation,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no. 12, pp.4523- 4536, Dec. 2012.
- [21] M. Wu and D. D. C. Lu, “Investigation on active method for stabilization of LC input filter and DC/DC buck converter under voltage mode control,” in *2015 IEEE 11th International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, Sydney, NSW, 2015, pp. 721–726.
- [22] M. Wu an, D. D. C. Lu and C.K. Tse, “Direct and optimal linear active methods for stabilization of LC input filters and DC/DC converters under voltage mode control,” *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Circuits Syst.*, vol. 5, no. 3, pp. 402-412, Sep. 2015.
- [23] T. Sopapirm, “Instability mitigation of a three-phase diode rectifier feeding a controlled buck converter by using the active damping method,” in *2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems*, Jeju, 2018, pp. 745–748.

ระบบสารสนเทศเพื่อการจัดซื้อ กรณีศึกษา : โรงงานกระดาษ Information System for Purchasing A Case Study : Paper Mill

ภัทรพงษ์ ภาควงษ์^{1*} กิตติชัย อธิกุลรัตน์² ศิรพันธ์ แจ่มรักษสกุล³

¹สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

²ภาควิชาวิศวกรรมขนถ่ายวัสดุและโลจิสติกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

³วิทยาลัยบริหารธุรกิจนวัตกรรมและการบัญชี มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต

Pattarapong Pakpoom^{1*} Kittichai Athikulrat² Sirat Jangruksakul³

¹Division of Industrial Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University

²Department of Materials Handling and Logistics Engineering, Faculty of Engineering

King Mongkut's University of Technology North Bangkok.

³College of Innovative Business Administration and Accountancy Dhurakij Pundit University

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

(Received: September 19, 2019; Accepted: December 20, 2019)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงกระบวนการโลจิสติกส์ในขั้นตอนการจัดซื้อ กรณีศึกษาอุตสาหกรรมผลิตกระดาษคราฟท์ โดยทำการศึกษากระบวนการจัดซื้อผ่านผังระบบงาน (IDEFO) พร้อมกับวิเคราะห์กระบวนการด้วยการวิเคราะห์ ทำไม ทำไม่ สำหรับวิเคราะห์ปัญหาพบว่า ข้อมูลสินค้าและผู้จำหน่ายสินค้ามีจำนวนมากแต่ขาดการเชื่อมโยงข้อมูลระหว่างหน่วยงาน ที่ต้องปฏิบัติงานร่วมกัน ทำให้ใช้เวลาในการจัดซื้อและตรวจสอบเป็นจำนวนมาก การใช้โปรแกรมการจัดการจัดซื้อจึงมีความจำเป็นในขั้นตอนการดำเนินงาน เพื่อให้เกิดความสะดวกและรวดเร็วต่อผู้ปฏิบัติงานในการจัดซื้อ และยังสามารถจัดทำรายงานการจัดซื้อได้ หลังจากการทดลองใช้งาน พบว่าโปรแกรมที่ได้จัดทำขึ้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของพนักงานและลดความซ้ำซ้อนการทำงานรวมถึงเวลาการทำงานได้จากเดิมต้องใช้เวลาในการดำเนินงานเฉลี่ย 200.98 นาที เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีใหม่ซึ่งใช้เวลาในการดำเนินงานเฉลี่ย 57.41 นาที ลดลง ซึ่งสามารถลดลงได้ร้อยละ 71.43

คำสำคัญ: การจัดซื้อ ผังระบบงาน IDEFO กิจกรรมโลจิสติกส์

ABSTRACT

The objective of this research is to improve the logistics process in case of the purchasing process in Craft Paper production. This research study Integrated Definition for function modeling (IDEFO) of purchasing department. The purchasing process is more complexed due to various procedures of data storages and many suppliers. This research proposes the use of a purchasing management software is needed in order to gain data accuracy and convenient to use for the

purchasing staff. After trial use a purchasing management software, the result shows that the software be able to increase staff effectiveness and decreased complex processes. Previous average operating time was 200.98 minutes compared to current average operating time is 57.41 minutes, time decreased 71.43 percent. It concludes that a purchasing management software can reduce operating time and simplify purchasing process.

Keyword: Purchase, IDEF0 system flow, logistics activity.

1. บทนำ

อุตสาหกรรมกระดาษมีความสำคัญต่อหลายอุตสาหกรรมเนื่องจากกระดาษเป็นอุตสาหกรรมต้นน้ำ ในหลายๆ อุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ รวมถึงอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ ฯลฯ ปัจจุบันอุตสาหกรรมกระดาษในประเทศไทยมีบริษัทที่ผลิตกระดาษมีจำนวนไม่มาก เนื่องจากต้องใช้เงินลงทุนด้านเครื่องจักรสูงเป็นอุตสาหกรรมที่เน้นการใช้เครื่องจักรสำหรับการผลิต (Machine Intensive) อีกทั้งต้นทุนวัตถุดิบและราคาขายยังอ้างอิงราคาจากต่างประเทศ ทำให้ผู้ประกอบการให้ความสำคัญกับการบริหารจัดการการสินค้าคงคลัง ตั้งแต่สินค้าคงคลังประเภทวัตถุดิบ รวมถึงสินค้าคงคลังประเภทสินค้าสำเร็จรูป เพื่อให้มีในปริมาณที่เหมาะสมเพียงพอต่อความต้องการและไม่ส่งผลกระทบต่อต้นทุนและราคาขายของสินค้า เช่น ในกรณีที่ราคากระดาษลดลง ส่งผลทำให้ราคาซื้อและราคาขายลดลงไปด้วย ดังนั้นเองการซื้อวัตถุดิบในปริมาณมากจะส่งผลต่อการบริหารจัดการสินค้าคงคลังเกิดต้นทุนจม และมีความเสี่ยงมากขึ้นหากกระดาษมีแนวโน้มลดลงส่งผลทำให้เกิดการขาดทุนเนื่องจากการมีสินค้าคงคลัง แต่ถ้าหากเกิดกรณีราคากระดาษมีแนวโน้มสูงขึ้นจะส่งผลทำให้สินค้าคงคลังมีมูลค่าสูงขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นเองกิจกรรมด้านการจัดซื้อและการบริหารจัดการสินค้าคงคลังจึงมีความสำคัญและเกี่ยวข้องกันอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ และมีส่วนสำคัญต่อการช่วยลดต้นทุนและเพิ่มความสามารถในการแข่งขันแก่กิจการ ทำให้สามารถ

ลดต้นทุนด้านทั้งทางตรงและทางอ้อม ได้แก่ ต้นทุนการจัดซื้อเอง และต้นทุนการมีวัสดุคงคลัง [1]. อย่างไรก็ตามในการจัดซื้อนั้นกิจการจำเป็นต้องให้ความสำคัญกับการไหลของข้อมูล (Information Flow) ควบคู่กับการไหลของวัตถุดิบ (Material Flow) เพื่อเข้าสู่กิจการนั้น ซึ่งโดยทั่วไปแล้วในหลายธุรกิจ การไหลของข้อมูลดำเนินการก่อนการไหลของวัตถุดิบ กล่าวคือ ผู้ซื้อทำการสั่งซื้อวัตถุดิบ (Order Entry) ไปยังผู้ขาย จากนั้นผู้ขายจึงดำเนินการจัดส่งวัตถุดิบมายังผู้ซื้อ จึงจะเกิดการไหลของวัตถุดิบตามคำสั่งซื้อแต่อย่างไรก็ตามบางธุรกิจการไหลของวัตถุดิบดำเนินการก่อนการไหลของข้อมูล เช่น ธุรกิจรับซื้อสินค้าเกษตร ซึ่งเกษตรกรนำผลผลิตทางการเกษตรส่งขายยังจุดรับซื้อหรือโรงงานโดยตรง รวมถึงธุรกิจรับซื้อของเก่าเพื่อทำการรีไซเคิล (Recycle) เป็นต้น ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อกิจการ ได้แก่ การบริหารจัดการ ข้อมูลเพื่อการตรวจสอบและติดตามปริมาณสินค้าคงคลัง ซึ่งกิจการจำเป็นต้องเข้าถึงข้อมูลสินค้าคงคลังได้อย่างท่วงที รวมถึงกิจการจำเป็นต้องบริหารจัดการสินค้าคงคลังประเภทวัตถุดิบไม่ให้มีมากเกินไปส่งผลทำให้เกิดต้นทุนจม และกิจการจำเป็นต้องบริหารจัดการเงินสดจากการรับซื้อวัตถุดิบที่ไม่สามารถคาดการณ์ได้ อีกทั้งกิจการจำเป็นต้องบริหารจัดการการไหลหรือการจราจรของการขนส่งวัตถุดิบเข้าซึ่งไม่สามารถคาดการณ์ได้ ไม่ให้เป็นอุปสรรคการไหลหรือการจราจรของการขนส่งผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปออกจนเป็นอุปสรรคต่อการจัดส่งสินค้าไปยังลูกค้าต่อไป อย่างไรก็ตามมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการ

จัดซื้อสามารถจัดกลุ่มงานวิจัยประเภทนี้ได้เป็น 3 กลุ่ม คือ 1. งานวิจัยที่มุ่งเน้นการหาปริมาณการสั่งซื้อที่เหมาะสมเพื่อลดต้นทุนการจัดซื้อและการจัดเก็บสินค้าคงคลัง [1], [2] 2. งานวิจัยที่มุ่งเน้นการพิจารณาปัจจัยหรือศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการคัดเลือกผู้ขาย [3]-[6] และ 3. งานวิจัยที่มุ่งเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพด้านการจัดซื้อโดยการปรับปรุงขั้นตอน หรือปรับปรุงระบบการจัดซื้อ [7], [8].

ในส่วนระบบงานจัดซื้อของกิจการ กรณีศึกษานี้ ดำเนินการจัดซื้อกระดาษจากผู้ขายที่นำกระดาษบรรจุทุกด้วยรถบรรทุกประเภทต่างๆ เช่น รถกระบะ, 6 ล้อ, 10 ล้อ เพื่อมาขายยังกิจการ ซึ่งการจัดซื้อลักษณะนี้เป็นลักษณะที่ไม่สามารถคาดการณ์ได้ เนื่องจากไม่ได้วางแผนการจัดซื้อและไม่ได้อัดต่อผู้ขายก่อนล่วงหน้า ส่งผลให้เกิดการรอคอยของผู้ขาย (พนักงานขับรถ) เนื่องจากมีคิวในการขายกระดาษ และทำให้เกิดการแออัดของการไหลหรือจราจรทั้งขาเข้าเพื่อรอคอยเอกสารการจัดซื้ออันเนื่องมาจากกิจการจำเป็นต้องตรวจสอบข้อมูลปริมาณสินค้าคงคลังที่มีอยู่ รวมถึงสถานะเงินสดของกิจการ และในส่วนการจราจรขาออกเนื่องจากมีการใช้ทรัพยากร (เครื่องชั่งน้ำหนัก) ร่วมกันทั้งขาเข้าและขาออก

ดังนั้นเองงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงกระบวนการโลจิสติกส์ในขั้นตอนการจัดซื้อของโรงงานกระดาษกรณีศึกษา ซึ่งการไหลของวัตถุดิบดำเนินการก่อนการไหลของข้อมูลกล่าวคือ ผู้ขายกระดาษเก็บรถบรรทุกด้วยรถบรรทุกประเภทต่างๆ มายังโรงงาน เพื่อทำการขายให้แก่โรงงานกระดาษ ส่งผลให้การแออัดของการไหลหรือการจราจรทั้งขาเข้าจากวัตถุดิบอันเนื่องมาจากการรอคอยเอกสารการจัดซื้อ โดยการออกแบบและจัดทำโปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อลดเวลาการจัดซื้อวัตถุดิบของโรงงานกระดาษ ให้ลดลงเพื่อให้การไหลของข้อมูลเร็วขึ้นส่งผลทำให้การไหลของวัตถุดิบเร็วขึ้นเช่นกัน

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

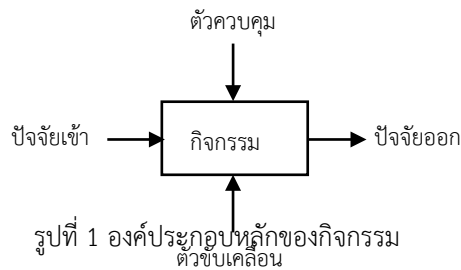
2.1 ทฤษฎีและงานวิจัยด้านการจัดซื้อ

การจัดซื้อ (Purchasing) หมายถึง การดำเนินงานตามขั้นตอนต่างๆ กิจกรรมเพื่อให้ได้มาซึ่งสินค้าหรือบริการ วัตถุดิบ ตลอดจนเครื่องจักรเครื่องมือ ที่จำเป็น โดยมีคุณสมบัติ ปริมาณ เวลา แหล่งขาย และการนำส่ง ณ. สถานที่ถูกต้อง [9] เพื่อต้องการให้บรรลุวัตถุประสงค์ทางธุรกิจ 3 ประการ คือ 1.เพื่อให้กิจการมี สินค้า วัตถุดิบ เครื่องจักร 2. เพื่อให้กิจการได้รับสินค้าในเวลาและคุณภาพที่ต้องการ ปริมาณที่เหมาะสม 3.เพื่อเป็นการบริหารด้านการเงินไม่ให้จมอยู่ในสินค้าคงคลัง ทั้งนี้มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดซื้อสามารถจำแนกได้เป็น 3 กลุ่ม ดังนี้ 1. งานวิจัยที่มุ่งเน้นการหาปริมาณการสั่งซื้อที่เหมาะสมเพื่อลดต้นทุนการจัดซื้อและการจัดเก็บสินค้าคงคลัง [1], [2] 2. งานวิจัยที่มุ่งเน้นการพิจารณาปัจจัยหรือศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการคัดเลือกผู้ขาย [3]-[6] และ 3. งานวิจัยที่มุ่งเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพด้านการจัดซื้อ โดยการปรับปรุงขั้นตอน หรือปรับปรุงระบบการจัดซื้อ [7], [8].

2.2 แผนภาพกระบวนการทางธุรกิจ (Integration Definition for Function Model)

การวาดแผนภาพกระบวนการทางธุรกิจเป็นเครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์และปรับปรุงกระบวนการทางธุรกิจ ซึ่งมุ่งเน้นการบ่งชี้กระบวนการ แสดงถึงรูปร่าง การจัดการธุรกิจการปรับปรุงกระบวนการและระบบที่ซับซ้อน ซึ่งสามารถแสดงกระบวนการทางธุรกิจและการไหลของข้อมูล เป็นวิธีที่ใช้สำหรับการจำลองการตัดสินใจ การกระทำขององค์กรแสดงและวิเคราะห์การติดต่อสื่อสารประสานงานซึ่งอยู่ในรูปแบบของกิจกรรมทางธุรกิจ (Activity Modeling) ซึ่งจะบ่งชี้การดำเนินงานในแต่ละกิจกรรมที่แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของการดำเนินงานในแต่ละกิจกรรมที่มีทรัพยากรที่ใช้ และปัจจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งกำกับในแต่

กระบวนการ โดยการเขียนแผนผังดังกล่าว ประกอบไปด้วย 4 องค์ประกอบหลัก คือดังรูปที่ 1



1. ปัจจัยเข้า คือวัตถุดิบ หรือข้อมูลเพื่อนำมาทำกิจกรรม หรือแปรรูปให้เกิดความสมบูรณ์ของกิจกรรม

2. ตัวควบคุม คือแนวทางหรือตัวควบคุมที่มีร่วมกับปัจจัยนำเข้าในการดำเนินการ เพื่อสร้างมาตรฐาน หรือนโยบายในกิจกรรมนั้นๆ

3. ตัวขับเคลื่อน เป็นสิ่งที่ระบุว่าการกิจกรรมจะบรรลุผลสำเร็จได้ด้วยอะไรบ้าง

4. ปัจจัยออก คือผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากความสมบูรณ์ของกิจกรรมนั้นๆ

2.3 เครื่องมือสำหรับวิเคราะห์เพื่อปรับปรุง

เครื่องมือสำหรับวิเคราะห์เพื่อปรับปรุง เป็นการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา ซึ่งสามารถใช้การวิเคราะห์ทำไม ทำไม (Why-Why Analysis) สำหรับหาสาเหตุของปัญหาและหาแนวปฏิบัติเพื่อทำการปรับปรุงต่อไป เช่น การศึกษาหาสาเหตุของการขนย้ายน้ำมันปาล์มไม่มีประสิทธิภาพด้วยการวิเคราะห์ทำไม ทำไม พร้อมกำหนดมาตรการการปรับปรุง [11]. อีกทั้งยังมีงานวิจัยที่ใช้การวิเคราะห์ ทำไม ทำไม เพื่อค้นหาสาเหตุของปัญหาเครื่องจักรขัดข้อง พร้อมกำหนดมาตรการการปรับปรุงเพื่อลดปัญหาเครื่องจักรขัดข้อง [12].

2.4 โปรแกรมการจัดการข้อมูล

2.4.1 โปรแกรม Microsoft Access 2016

โปรแกรมบริหารจัดการฐานข้อมูลของ Microsoft Office จะมีการปรับปรุงให้ใช้งานได้ง่าย

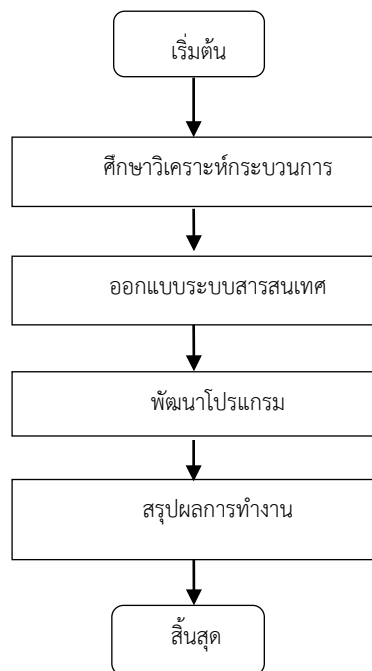
ขึ้น และมีความสามารถเพิ่มเติมในการส่งออกนำเข้า และทำงานกับแฟ้มข้อมูล XML ได้ดียิ่งขึ้น เนื่องจากข้อผิดพลาดพลาดทั่วไปจะถูกระบุและกำหนดสถานะเพื่อให้ทราบ คุณลักษณะใหม่นี้ยังช่วยให้นักพัฒนาฐานข้อมูลสามารถค้นหาความสัมพันธ์ของวัตถุเหล่านั้นได้ [13].

2.4.2 โปรแกรม Microsoft Visual studio

เป็นชุดการพัฒนา (Integrated Development Environment : IDE) ซึ่งหมายถึงสภาพแวดล้อมที่รวบรวมเครื่องมือและคุณสมบัติทุกอย่างที่จำเป็นสำหรับการพัฒนาโปรแกรมเข้าไว้ด้วยกันในที่เดียว ไม่ว่าจะเป็นการออกแบบหน้าจอเขียนโค้ด รันเพื่อทดสอบการทำงาน ค้นหาหรือแก้ไขข้อผิดพลาด เผยแพร่โปรแกรม เพื่ออำนวยความสะดวกในขั้นตอนการจัดซื้อ และลดเวลาแต่ละขั้นตอนลง [14]

3. วิธีการดำเนินการวิจัย

การจัดการข้อมูลของแผนกจัดซื้อ มีขั้นตอนในการจัดซื้อและเอกสารที่มีจำนวนมาก อีกทั้งการไหลของข้อมูลและการไหลของวัตถุดิบ ที่ทำให้กระบวนการจัดซื้อเสร็จสิ้น ตั้งแต่เริ่มต้นและสิ้นสุดมีความสัมพันธ์ขึ้นกับกิจกรรมก่อนหน้าอื่นๆ ดังนั้นการใช้ระบบฐานข้อมูลการจัดซื้อเพื่อตรวจสอบผู้ขาย ตรวจสอบข้อมูลและความสำเร็จของกิจกรรมก่อนหน้า จึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งในการจัดการเพื่อให้เกิดความสะดวกรวดเร็ว ถูกต้องของข้อมูลการจัดซื้อ รวมถึงทำให้ง่ายต่อการดำเนินงานของผู้ปฏิบัติงาน โดยการออกแบบโปรแกรมการจัดซื้อเพื่อประยุกต์การบริหารการจัดซื้อ โดยรวบรวมรายละเอียดขั้นตอนการวิจัย เพื่อการจัดการอย่างเป็นระบบ โปรแกรมนี้สามารถลดระยะเวลาในการจัดซื้อเพื่อสะดวกต่อการจัดซื้อ และยังสามารถจัดทำรายงาน เพื่อนำเสนอต่อผู้บริหารของกิจการ ทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานมากยิ่งขึ้น ซึ่งในการจัดทำวิจัยในครั้งนี้ทางผู้วิจัยได้กำหนดขั้นตอนการดำเนินงานแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 ศึกษาวิเคราะห์ระบบงานเดิม

ศึกษากระบวนการจัดซื้อด้วยแผนผังระบบงาน (IDEFO) รวมถึงการไหลของข้อมูลการจัดซื้อ เพื่อศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้อง ปัจจัยเข้า, ปัจจัยออก, ตัวขับเคลื่อน, ตัวควบคุม พร้อมทั้งเวลาในการปฏิบัติงาน

3.2 ออกแบบระบบสารสนเทศ

ศึกษาและออกแบบโปรแกรมงานจัดซื้อใหม่เพื่อให้เกิดการเชื่อมโยงข้อมูลระหว่างกระบวนการลดเวลาการปฏิบัติงานของพนักงาน

3.3 พัฒนาโปรแกรม

เป็นขั้นตอนการพัฒนาโปรแกรม สำหรับการใช้งาน พร้อมทั้งทดลองใช้งานและจับเวลาการปฏิบัติงานเพื่อหาค่าเฉลี่ยเวลาการปฏิบัติงาน

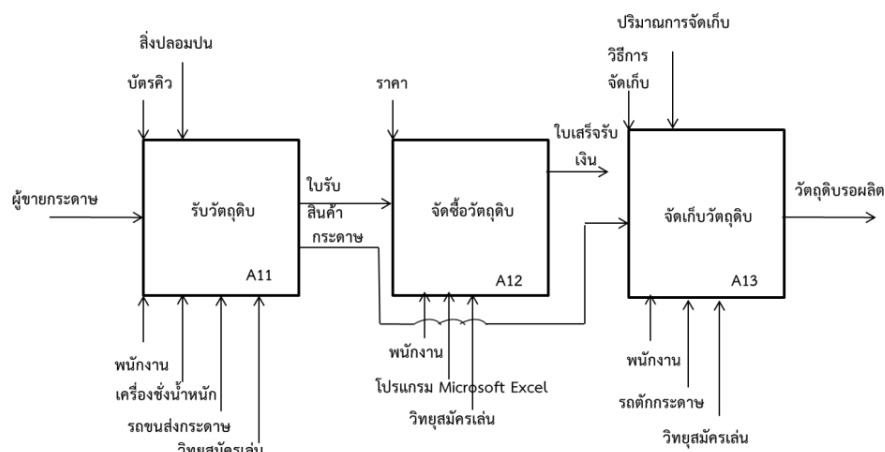
3.4 สรุปผลการการทำงาน

สรุปผลการดำเนินงานด้วยโปรแกรมพร้อมเปรียบเทียบ

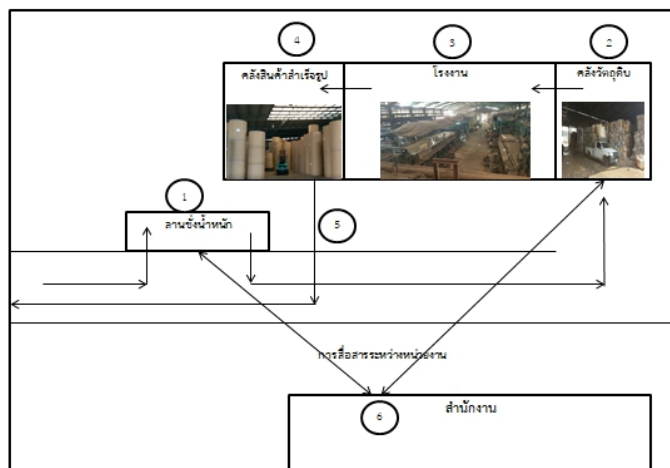
4. ผลการวิจัย

4.1 ผลการศึกษาวิเคราะห์ระบบงานเดิม

ผลการศึกษาและวิเคราะห์กระบวนการ ผ่านผังกระบวนการทางธุรกิจ ของกระบวนการจัดซื้อ (IDEFO) สินค้า (กระดาษ) จากผู้ขาย ดังรูปที่ 3



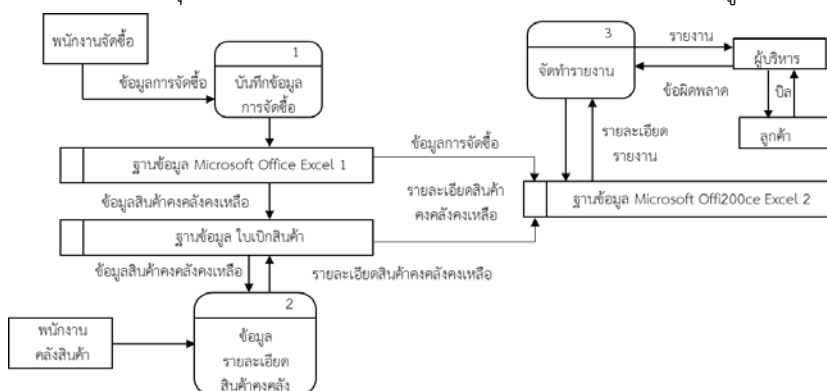
รูปที่ 3 แผนผังกระบวนการจัดซื้อกระดาษ



รูปที่ 4 ผังการไหลของวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป

ทำให้ทราบถึงปัจจัยเข้า, ปัจจัยออก, ตัวขับเคลื่อน, ตัวควบคุม ทราบถึงข้อมูลที่เกี่ยวข้อง ดังรูปที่ 3 ได้แก่ เลขที่ใบสั่งซื้อ รายการการสั่งซื้อ โดยมีตัวควบคุม ได้แก่ ราคาสินค้าหรือวัตถุดิบในการสั่งซื้อ และมีตัวขับเคลื่อนที่สำคัญได้แก่ วิทยุสื่อสารเพื่อทำการสื่อสารระหว่างหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง 3 หน่วยงาน ได้แก่ หน่วยงานรับวัตถุดิบซึ่งอยู่ที่ลานซังน้ำหนักรัตถุดิบ หน่วยงานจัดซื้อซึ่งอยู่ในสำนักงาน และหน่วยงานจัดเก็บวัตถุดิบซึ่งอยู่ในส่วนคลังวัตถุดิบ เพื่อทำการตรวจสอบปริมาณวัตถุดิบคงคลังและยืนยันการรับสินค้าเข้าคลังวัตถุดิบ พร้อมเป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตต่อไป ดังรูปที่ 4 ผังการไหลของวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป ตั้งแต่วัตถุดิบ (กระดาษ) เข้ามายังโรงงานเพื่อทำการขายให้ โดยผู้ขายขับรถไปยังลานซังน้ำหนัก (จุดที่ 1) เพื่อชั่งน้ำหนักวัตถุดิบ จากนั้นเคลื่อนไป

ยังคลังวัตถุดิบ (จุดที่ 2) เพื่อจัดเก็บกระดาษเข้าสู่คลังซึ่ง ณ จุดนี้กระบวนการไหลของข้อมูลในการจัดซื้อต้องแล้วเสร็จ พร้อมเป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตต่อไปเพื่อเข้าสู่กระบวนการผลิต (จุดที่ 3) เป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปเพื่อจัดเก็บยังคลังสินค้ารอจัดส่งให้ลูกค้าต่อไป (จุดที่ 4) และจัดส่งให้แก่ลูกค้าเมื่อมีความต้องการสินค้า (จุดที่ 5) นอกจากนี้แล้วยังมีการใช้ โปรแกรม Microsoft Excel สำหรับการจัดเก็บข้อมูลสั่งซื้อ และข้อมูลปริมาณสินค้าคงคลัง รวมถึงเพื่อจัดทำเอกสารต่างๆ ได้แก่ 1.ใบรับสินค้า เพื่อส่งให้ส่วนงานจัดเก็บวัตถุดิบตรวจสอบการรับสินค้าได้แก่ ประเภทสินค้า จำนวนสินค้า 2.เอกสารรับเงินจากผู้ขาย ได้แก่ ใบเสร็จการจ่ายเงินให้แก่ผู้ขาย เป็นต้น ดังรูปที่ 5 แผนภาพการไหลของข้อมูลจัดซื้อรูปแบบเดิม ตั้งแต่การจัดซื้อกระดาษ บันทึกข้อมูลการจัดซื้อลงฐานข้อมูล



รูปที่ 5 แผนภาพการไหลของข้อมูลจัดซื้อรูปแบบเดิม

ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel ซึ่งมีฐานข้อมูลการจัดซื้อ ฐานข้อมูลใบเบิกสินค้าเพื่อจัดทำปริมาณสินค้าคงเหลือ รวมถึงฐานข้อมูลสรุปเพื่อการนำเสนอต่อผู้บริหาร ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel ซึ่งไม่มีการเชื่อมโยงข้อมูลระหว่างกันทำให้การจัดซื้อแต่ละครั้งต้องมีการติดต่อประสานงานระหว่างแผนกกันระหว่างหน่วยงานจัดซื้อและหน่วยงาน คลังสินค้า พร้อมกันนี้ได้บันทึกเวลาเฉลี่ยในการดำเนินงานด้านเอกสาร พบว่า การดำเนินงานในกระบวนการจัดซื้อใช้เวลาเฉลี่ย 200.98 นาทีต่อครั้ง จากปัญหาดังกล่าวทั้ง 2 ปัญหา จึงทำการวิเคราะห์เพื่อหาแนวทางการปรับปรุงด้วยการตั้งคำถามทำไม-ทำไม พร้อมกับวิเคราะห์ เพื่อหาแนวทางการปรับปรุงด้วยวิธี การ วิเคราะห์ ทำไม ทำไม (Why Why Analysis) พร้อมกำหนดแนวทางการปรับปรุง ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การวิเคราะห์ ทำไม ทำไม

ทำไม	ทำไม	ทำไม
การออกรายงานสรุปการจัดซื้อและปริมาณสินค้าคงเหลือล่าช้าใช้เวลานานถึง 200.98 นาทีต่อครั้ง	มีการตรวจสอบข้อมูลให้ตรงกันระหว่างหน่วยงานจัดซื้อและคลังสินค้า ทั้งข้อมูลสินค้าเข้าและข้อมูลสินค้าขาออก	ข้อมูลของแต่ละหน่วยงานแยกกันไม่มีการเชื่อมโยงข้อมูลระหว่างกัน
การจัดซื้อกระดาษแต่ละครั้งถึงต้องติดต่อกับหน่วยงานคลังวัสดุ	ไม่ทราบปริมาณวัสดุที่มีอยู่ปัจจุบัน	ข้อมูลของแต่ละหน่วยงานแยกกันไม่มีการเชื่อมโยงข้อมูลระหว่างกัน

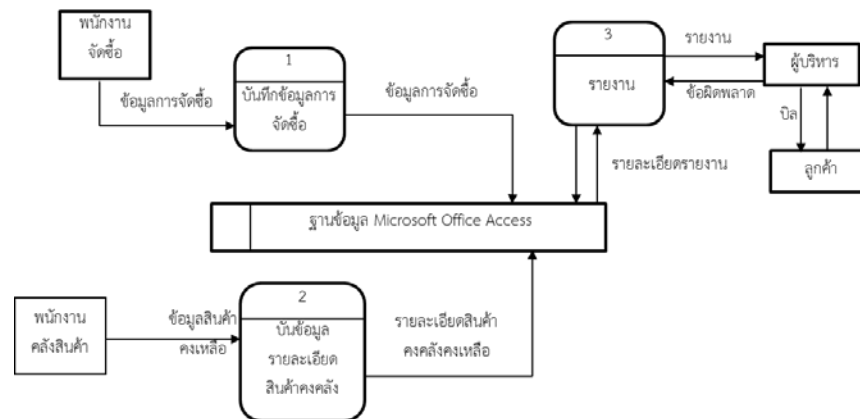
จากตารางที่ 1 การวิเคราะห์ ทำไม ทำไม พบว่าทั้ง 2

ปัญหา คือ การออกรายงานสรุปการจัดซื้อและปริมาณสินค้าคงเหลือล่าช้าใช้เวลา ถึง 200.98 นาที และการจัดซื้อกระดาษแต่ละครั้งต้องมีขั้นตอนการติดต่อ

ประสานงานกับหน่วยงานคลังวัสดุ ทำให้สามารถสรุป สาเหตุที่สำคัญของปัญหาทั้ง 2 ปัญหา คือ ข้อมูลของแต่ละหน่วยงานแยกกันไม่มีการเชื่อมโยงข้อมูลระหว่างกัน ซึ่งทั้ง 2 ปัญหาดังกล่าวสามารถดำเนินการปรับปรุงกระบวนการจัดซื้อ โดยจัดให้มีฐานข้อมูลกลางร่วมกันเพื่อลดเวลาการจัดทำรายงานและใช้การสื่อสารด้านข้อมูลเพื่อ ตรวจสอบปริมาณสินค้าคงคลังที่เหมาะสม โดยไม่ต้องใช้วิทยุสื่อสารในการติดต่อระหว่างกัน

4.2 ออกแบบระบบสารสนเทศ

การออกแบบระบบสารสนเทศใหม่ ในขั้นตอนนี้จะทำการออกแบบโปรแกรมการทำงานเพื่อนำมาใช้ในกระบวนการจัดซื้อ โดยจะออกแบบโปรแกรมที่มีการจัดเก็บข้อมูลตั้งแต่การเช็คจำนวนสินค้าคงคลัง การทำการจัดซื้อ จนถึงการรายงานผลการจัดซื้อให้กับฝ่ายบริหาร ดังนั้นการออกแบบโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อการจัดซื้อจะต้องทำให้ผู้ใช้งานมีความสะดวกในการดำเนินงาน รวมถึงง่ายต่อการจัดเก็บข้อมูลสินค้าคงคลัง และสามารถดำเนินงานได้อย่างรวดเร็ว จากการเก็บรวบรวมข้อมูลอย่างละเอียด การวิเคราะห์ ทำไม ทำไม



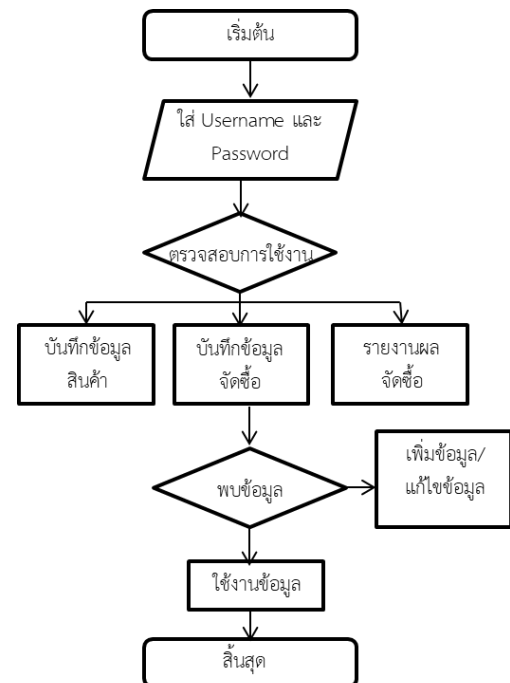
รูปที่ 6 แผนภาพการไหลของข้อมูลจัดซื้อรูปแบบใหม่

และสอบถามความต้องการของผู้ใช้งานของโปรแกรม จากนั้นทำการวิเคราะห์ข้อมูลที่รวบรวมมาได้ทำการวิเคราะห์โปรแกรม เพื่อให้ได้โปรแกรมที่สอดคล้องกับการใช้งานและความต้องการของผู้ใช้ ดังนั้นจึงได้มีการออกแบบระบบสารสนเทศใหม่ โดยให้สามารถแก้ไขปัญหาได้ตามที่ออกแบบระบบการทำงานไว้ มีการดำเนินการของการไหลของข้อมูล ดังรูปที่ 6 คือ ฐานข้อมูล สำหรับการจัดซื้อและฐานข้อมูลสำหรับสินค้าคงคลัง รวมเข้าด้วยกันเพื่อให้สะดวกและลดเวลาในการจัดทำรายงานเพื่อนำเสนอต่อผู้บริหารและลดขั้นตอนการติดต่อประสานงานระหว่างหน่วยงานจัดซื้อและหน่วยงานคลังสินค้าเนื่องจากใช้ฐานข้อมูลร่วมกัน

4.3 พัฒนาโปรแกรม

โปรแกรมจัดซื้อ ช่วยในการจัดเก็บรวบรวมข้อมูล เพื่อช่วยลดระยะเวลา ในการค้นหาข้อมูลสินค้าคงคลัง และการดำเนินการจัดซื้อ ลดความยุ่งยากและความล่าช้า ของโปรแกรมตัวเดิม มีความสะดวกในการใช้งานมากขึ้น ซึ่งแบ่งตามขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมได้ ดังรูปที่

7-12



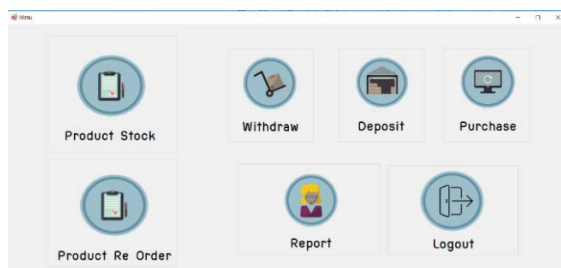
รูปที่ 7 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมจัดซื้อ



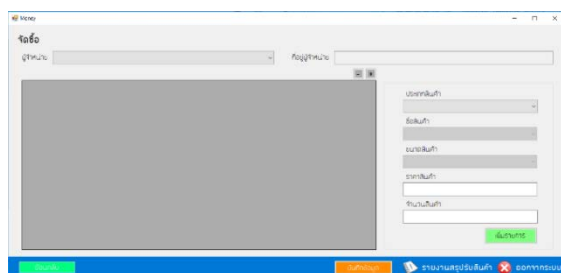
รูปที่ 8 แบบฟอร์มสำหรับกรอกรหัสผ่านผู้ใช้งาน

ปีที่ 14 ฉบับที่ 3 เดือน กันยายน – ธันวาคม พ.ศ. 2562

รูปที่ 8 เป็นแบบฟอร์มแสดงหน้าต่างการบันทึกข้อมูลผู้ปฏิบัติงาน (User)เป็นฐานข้อมูลผู้ใช้งาน เพื่อเข้าทำงานสู่ระบบการจัดซื้อ



รูปที่ 9 แบบฟอร์มเมนูหลักสำหรับการเข้าสู่การทำงาน

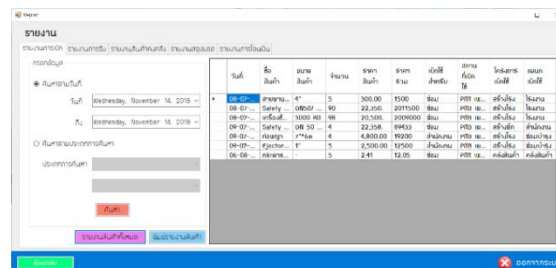


รูปที่ 10 แบบฟอร์มการจัดซื้อโดยพนักงานเป็นผู้บันทึก

รูปที่ 10 การบันทึกข้อมูลการจัดซื้อโดยพนักงานสำหรับบันทึกข้อมูลการจัดซื้อ

รูปที่ 11 การออกแบบการเพิ่มข้อมูลสินค้าและรายละเอียดต่างๆ โดยพนักงานเป็นผู้บันทึก

รูปที่ 11 เป็นหน้าต่างการเพิ่มข้อมูลรายการสินค้าและรายละเอียดสินค้าสำหรับการจัดซื้อในฐานข้อมูล



รูปที่ 12 การออกแบบการรายงานผลการบันทึกจัดซื้อ

รูปที่ 12 รายงานสรุปผลการจัดซื้อสำหรับผู้บริหารตามความต้องการของผู้บริหาร

4.4 สรุปผลการทำงาน

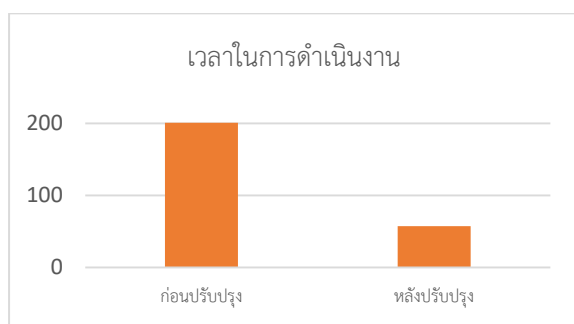
การสรุปผลการทำงานของโปรแกรมสามารถวัดผลเปรียบเทียบการทำงานก่อนการนำโปรแกรมมาใช้งาน และภายหลังการนำโปรแกรมมาใช้งาน สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยเวลาในการดำเนินงาน

กิจกรรมในกระบวนการจัดซื้อ	เวลาเฉลี่ย (นาที)	
	ก่อนปรับปรุง	หลังการปรับปรุง
ตรวจสอบจำนวนสินค้าคงเหลือ	90.62	0.53
ทำการสั่งซื้อกับผู้ขาย	6.42	1.58
ทำการรวบรวมข้อมูลย้อนหลัง	47.46	15.35
จัดทำเอกสารงบประมาณการจัดซื้อ	56.48	39.95
รวม	200.98	57.41

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบโปรแกรมการใช้งาน

เวลาเฉลี่ย (นาที)		ร้อยละการเปลี่ยนแปลง
ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง	
200.98	57.41	71.43



รูปที่ 13 เปรียบเทียบเวลาเฉลี่ยในการดำเนินงาน

5. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงกระบวนการโลจิสติกส์ในขั้นตอนการจัดซื้อของโรงงาน กรณีศึกษา โดยมีเป้าหมายเพื่อให้ผู้ดำเนินงานทำงานได้ง่ายขึ้น สะดวก และรวดเร็ว ลดเวลาการปฏิบัติงานและลดขั้นตอนการติดต่อประสานงานระหว่างกัน โดยทำการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา ด้วยการวิเคราะห์ ทำไม ทำไม พร้อมกับการกำหนดแนวทางการแก้ไขปัญหา โดยการออกแบบระบบการไหลของข้อมูลใหม่พร้อมกับจัดทำโปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อการจัดซื้อ หลังจากที่ได้ทำโปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อการจัดซื้อ ได้จัดให้มีการใช้งานกับโปรแกรมดังกล่าว พบว่าโปรแกรมสามารถตอบสนองความต้องการการใช้งานของผู้ปฏิบัติงานและตรงตามวัตถุประสงค์ที่ได้จัดทำงานวิจัยขึ้น เมื่อเทียบกับโปรแกรมการทำงานเดิมสามารถลดเวลาการดำเนินงานได้ 57.41 นาทีหรือ ร้อยละ 71.43

6. เอกสารอ้างอิง

[1] V. Phupha, “An Application of Monte Carlo

Simulation for Optimal Order Quantity : A Case Study of Raw Materials Purchasing in Processed food Industry,” Kasetsart Engineering Journal, Vol. 27, No.88, pp. 41-56, April-June. 2014.

[2] K. Athikulrat, W. Jitrakman, C. Kammuanmai and K. Rattanabua-ngam, “An Appropriate Raw Material Purchasing System Model of Max Kios (PN-516) Production Process : A Case Study of Exhibition Parts Manufacturing Company,” Engineering Journal of Siam University, Vol. 19, No. 2, pp.46-58, July-Dec. 2018.

[3] S. Julraphan, I. Sirisawad, “Factor Affecting Purchasing in Construction by Government Agencies using Electronic Bidding (e-Bidding) Case Study : Srinakharinwirot University,” SWU Engineering Journal, Vol. 11, No. 2, pp.14-25, July-Dec. 2016.

[4] T. Rattanatrakul, K. Sukkrachang, N. hatlao and A. Srirattana, “Factor Influencing Supplier Selection in seafood Delivery. Case Study of ABC,” 9th Hatyai National and International Conference, Songkhla, April 2, 2018, pp.1429-1439.

[5] S. Chermeu, W. Chumsuk, M. Kumphangpeth, P.Tiangwathawat and S Wattakanon, “Factor that Affect to supplier selection for Chinese of Raw Materials and Automotive Parts : A Case Study of Five Star Autoparts Co., Ltd.” 5th National and International Conference Huachiew Chalermprakiet Univ., Bangkok, May 26, 2016, pp.110-124.

[6] T. Chanhom, “Factor Affecting the Selection

ปีที่ 14 ฉบับที่ 3 เดือน กันยายน – ธันวาคม พ.ศ. 2562

- of Parts and Raw material Suppliers in Motorcycle Industry,” M.B.A. thesis, Dept. General Management Rajamangala Univ. of Tech. Thanyaburi. Thanyaburi, Pathumthani, Thailand, 2011.
- [7] S. karsojun, A.Nongpha and R. Udomsub. “Improvement the Purchasing Process to increase efficiency : Case Study of Automotive Parts,” 9th National and International Conference, Bangkok, March 20, 2018, pp.1221-1230.
- [8] W.Tiengthongkum, “Improvement the Direct Purchasing of Material to Produce Garments of Thai Parfun Co., Ltd, ” M.S. thesis. Dept, Logistics Tech., Siam Tech. College, Bangkok, Thailand, 2014.
- [9] P. Tunprayoon, “Production Management,” Bangkok : OdianStore Printing, 1994.
- [10] R. kaolim, “Guideline for Improvement of Major Raw material Purchasing Efficiency Case Study : Seasoning Manufacturer Company. ” M.B.A. Thesis. Program of Entrepreneurship, Silpakorn University, 2012.
- [11] K. Athikulrat, “Increasing Warehouse Management Efficiency by Material Handling Case Study of Oil Palm Filling Plant.” KMUTT Research and Development Journal, Vol. 41, No. 2, pp.225-234, April-June, 2018.
- [12] P. Santaweek and J. Rukijkanpanich “Modification Maintenance Period for Master batch Production,” KMUTT Research and Development Journal. Vol. 40, No.3, pp.427-445, July-Sep, 2017.
- [13] D. Kengkham, “Manual of Access 2013 (Full Edition),” Nonthaburi : I.D.C. Premier Printing Co., Ltd., 2013.
- [14] P. Hlowwjit. “Visual Basic Student Edition.” Bangkok. Provision Printing Co., Ltd., 2010.

Review on Microalgae Cultivation Using Wastewater for Biofuel Production[•]

Saowapak Thammasane and Thaniya Kaosol*

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University,
Songkhla, Thailand

*Corresponding author E-mail: thaniya.k@psu.ac.th

(Received: September 19, 2019; Accepted: October 20, 2019)

Abstract

The integrations of wastewater treatment and microalgae-based biofuel have attended considerable. This paper describes the overview of microalgae in terms of biofuel productivity, cultivation of microalgae, harvesting microalgae and method for converting microalgae biomass to biofuel productions. The species of microalgae mostly used for cultivating in the wastewater to produce biofuel are presented. There are two major systems for cultivating microalgae: 1) opened system (raceway, circular and unmixed pond) and 2) closed system (photobioreactor, tubular and flat plate). The suitable selection of harvesting method is very critical because it can reduce the overall cost. Microalgae can be harvested by flocculation, flotation, filtration and gravity, and centrifugal sedimentation. In the present paper, the energy conversion process is explained and can be classified into thermochemical and biochemical conversions. Microalgae biomass can be used in a wide range of applications, including fertilizers, nutraceuticals, cosmetics, wastewater treatment, fish and animal feeds, and biofuels. Furthermore, microalgae biomass can also be converted into bio-oil, ethanol, methane, biodiesel and syngas. The selection of the conversion process depends on the species of microalgae, the final productivity and the possible economic factor. Most researchers are investigated the sustainable energy source as an alternative to fossil fuels. The microalgae are identified as the best feedstock to be convert into a biofuel production. The microalgae cultivation does not need a large land, possesses a high growth rate, and enhances the amount of lipid for a biofuel production. There have been few studies involving microalgae biofuel production using industrial wastewater. Finally, the future directions for integrated wastewater treatment and microalgae biofuel production are suggested.

Keywords: Microalgae, cultivation system, harvesting system, energy conversion process, wastewater.

[•] บทความนี้ได้ถูกนำเสนอบางส่วนในการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 23

1. Introduction

In the 21st century, there are two major issues for human society in the world, 1) energy and 2) water quality [1]. Water scarcity is a growing international concern [2]. When the water sources are contaminated from pollutants making the water unsuitable for use [3]. For the energy issue, the gap between the requirement and the supply of energy is growing wider [4]. The 80% of global energy demand which produces from fossil fuels. Fossil fuels as energy sources are unsustainable due to the limited resources [5]. Using fossil fuels cause global warming and greenhouse effect gases. Therefore,

the renewable clean energy is required as a fossil fuel replacement [6]. Bioenergy is a key role to meet the global challenges of clean and sustainable energy requirement [4].

The interest in a biological wastewater treatment and the biomass conversion from waste to bioenergy production, is increasing. Phytoremediation is a common wastewater treatment using macro algae and microalgae for the removal pollutants such as organic and inorganic [2]. Fig. 1 shows the concept of using microalgae for wastewater treatment and bioenergy production.

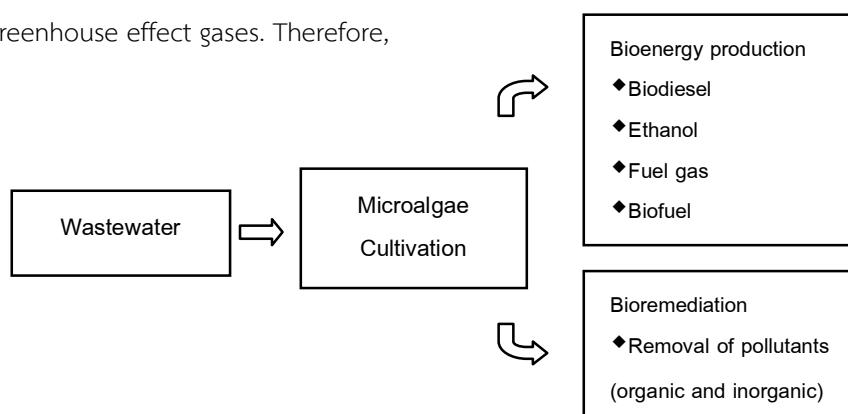


Fig. 1 The concept about using microalgae for wastewater treatment and bioenergy production
(adapted from Ma et al. [7])

Microalgae can produce the lipid production but they require the suitable physical and chemical conditions such as temperature, light and other conditions in the culture medium to increase the overall lipid yield. The microalgae have increased its attention in recent years [8]. The advantages of using microalgae as a source of biomass for bioenergy production are: fast growth, short time for generation, high oil content, not much land requirements, synergy with CO₂ biofixation and wastewater

bioremediation that can use nutrients in wastewater to grow [7-8]. Moreover, biomass from microalgae can be used in many applications, such as fertilizers, cosmetics, biofuels, fish and animal feeds [7].

There are many studies on bioenergy productions from microalgae. Thus, the bioenergy from microalgae is not new, and such method can reduce the global warming and greenhouse effect gases. Most of the studies focus on cultivation system, collection of

microalgae, genetic engineering and system and resource analysis [10]. This paper presents an overall review on microalgae cultivation technology and the method for converting the microalgae to bioenergy production.

2. Microalgae for bioenergy production

There are about 100,000 species of algae which 35,000 species are described before [11]. Microalgae are unicellular and autotrophic organisms using sunlight, water and CO₂ from the atmosphere to grow [11-14]. Diameter of microalgae is usually smaller than 2 mm and they are either single cellular or multicellular. The microalgae can live in several environments such as freshwater, marine water and wastewater, depending on the species of microalgae [15]. The microalgae are both of autotrophic and heterotrophic. Non-photosynthesis requires an external source of organic compounds as nutrients sources. Autotrophic microalgae convert solar radiation and CO₂ absorbed by chloroplasts, to adenosine triphosphate (ATP) and O₂ [16].

The microalgae produce biomass that can be converted to renewable fuel such as ethanol, biodiesel, bio-oil and charcoal [17].

The advantages of microalgae utilization as the resources of biomass include [6], [17]:

- Microalgae are an efficient biological system for harvesting the solar energy to produce the organic compound;
- Microalgae can produce high concentrations of proteins, lipids, pigments and carbohydrates;
- Microalgae cell is a simple cell division cycle;

- Microalgae can grow in several environments;

- Biomass from microalgae can easily be adapted to various options of operational or technological skills;

- Microalgae have very short harvesting life.

Microalgae are rich in oil [6]. Eighty percentages of biomass from microalgae can produce oil [18-19]. The Aquatic Species Program (ASP) considered three main options of biomass from microalgae that can be converted to fuel production [6], [20], including biodiesel, ethanol and methane. The last option is the direct combustion of the biomass from the microalgae for production of electricity [6].

Microalgae cultivation on the wastewater had developed from the microalgae in wastewater treatment [21]. In 1950, USA started to study how to use the microalgae for wastewater treatment [22]. The Wastewater is unique in chemical and physical properties in comparison with the fresh water and the marine water [21]. The microalgae have some advantages because of their structures and metabolisms in their cells [1]. The microalgae can use organic and inorganic nutrients from the wastewater to produce biomass that can be used as raw material for biofuel productions. The wastewater is suitable for microalgae cultivation due to the nutrient content that can support the microalgae growth [23]. The nutrients exist in wastewater include nitrate, ammonia, organic nitrogen, phosphate, urea and trace minerals such as Mg, K, Fe, Ca, Cu and Mn. Many researches indicated that ammonium had effect on microalgae as much as concentration. The microalgae require nitrogen source for their

growth. One thing to be concern is nitrogen source is not easy to manage in wastewater. Table 1 shows the summary of the studies on species of microalgae that can be cultivated in the wastewater. Therefore, using wastewater as a resource for microalgae cultivation could serve dual purposes: 1) improving microalgae biomass production and 2) improving wastewater treatment efficiency.

3. Microalgae cultivation system

There are many systems for cultivating the microalgae. The microalgae can be cultivated in open systems including raceway, circular, inclined and unmixed pond or in closed system including photobioreactor, tubular, fermenter-type, vertical, flat plate, flat tank, bubble column, serpentine, annular and internally illuminated photobioreactors [34].

The opened systems are very simple and usually established as shallow ponds by the walls for microalgae growth. Water and nutrients can easily be added by runoff water [9], [35] or by wastewater from the point sources. Water, nutrients and CO₂ are continuously fed to the ponds. The opened systems have received a lot of attention for the commercial cultivation because of its ease of set-up process [34].

The closed system cultivation has less contamination and easy to control [34]. The closed system can be an indoor with artificial light or outdoor with direct sunlight [9].

3.1 Opened pond system

Opened pond systems are commonly used for cultivation of microalgae at the commercial

level [1]. The cost of a system that uses an opened pond of large-scale microalgae for producing microalgae biomass, is lower than closed system. Raceway ponds commonly use because of their simple set-up process [36]. The raceway ponds are operated with the aid of paddle wheels to make the water flow continuously [34]. The raceway ponds can increase the productivity by improving the CO₂ mass transfer [37]. High rate algae pond (HRAP) has been used in the opened pond system for a wastewater treatment. Most researches have reported that the opened pond does not need a lot of maintenance or cost. Nevertheless, the opened ponds need some maintenance and easy for contamination. Other uncontrollable factors are intensity, sunlight and temperature. High biomass productivity cannot be achieved from these systems. The number of species that can be cultivated in opened ponds include *Chlorella sp.*, *Dunaliella sp.* and *Spirulina sp.* [38].

3.2 Closed system

The limitations of opened ponds can be adjusted by photobioreactors, as an alternative way to overcome the low productivity and contamination [16], [38]. The closed system has many benefits including high microalgae biomass production, the environmental issue management, and another microalgae species contamination prevention. The popular types of photobioreactor are tubular, column and flat plate. The most popular reactor is the vertical tubular reactor with has high surface, low cost, low shear forces, high CO₂ use efficiency and ability to use sunlight [34].

Table 1 Summary of microalgae that cultivate in wastewater.

<i>Species</i>	<i>Wastewater</i>	<i>Characteristics of wastewater</i>	<i>Biomass productivity (mgL⁻¹d⁻¹)</i>	<i>Ref.</i>
<i>Botryococcus braunii</i>	Piggery	284 mgL ⁻¹ COD 836 mgL ⁻¹ TN 788 mgL ⁻¹ NO ₃ ⁻	1.80	[24]
	Secondary treated sewage	7.67 mgL ⁻¹ NO ₃ ⁻ 0.19 mgL ⁻¹ NO ₂ ⁻	35	[25]
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	Municipal (centrate)	128.6 mgL ⁻¹ TN 120.6 mgL ⁻¹ TP	820	[26]
	Municipal wastewater	128 mgL ⁻¹ TKN 67 mgL ⁻¹ NH ₃ 120 mgL ⁻¹ TP	2	[27]
<i>Chlorella sp.</i>	Centrate, municipal wastewater	85.9 mgL ⁻¹ NH ₄ ⁺ 132.3 mgL ⁻¹ TN 215.1 mgL ⁻¹ TP	920	[28]
	Animal wastewater	10-400 mgL ⁻¹ TN 0.7-4.4 mgL ⁻¹ TP	6.83	[29]
	Municipal wastewater	132.3 mgL ⁻¹ TN 215.1 mgL ⁻¹ TP 2389.5 mgL ⁻¹ COD	0.92	[28]
<i>Chlorella vulgaris</i>	Dairy manures	1008 mgL ⁻¹ NH ₄ ⁺ 180 mgL ⁻¹ TP 17820 mgL ⁻¹ COD	80-152	[30]
	Dried anaerobic sludge	1.6-9.8 mgL ⁻¹ TN 1.1-3.0 mgL ⁻¹ TP	39-195	[31]
<i>Consortia microalgae</i>	Carpet mill	2.83 mgL ⁻¹ NO ₃ ⁻ 4.8 mgL ⁻¹ PO ₄ ⁻³	41	[32]
<i>Scenedesmus acutus</i>	Municipal wastewater after aerobic treatment	5.3-97.6 mgL ⁻¹ NO ₃ ⁻ 27.7-207.2 mgL ⁻¹ NH ₄ ⁺ 7.3-122.1 mgL ⁻¹ PO ₄ ⁻³ 273.5-782.8 mgL ⁻¹ COD	73.7	[33]

Table 2 The comparison of open ponds and photobioreactors [1], [16], [39-40], [42].

System	Advantages	Limitations
Raceway pond	-Easy set up -Easy maintenance -Low capital and operation costs -Easy cleaning -Low energy input -Utilized non-agricultural land	-Poor biomass productivity -Large area of land required -Easy contaminated -Limited to a few strains of algae -Poor mixing, light and CO₂ utilization -Loss of water -Grow slower
Tubular photobioreactor	-Good biomass productivity -Suitable for outdoor cultures -Large illumination surface area -Single species culture -Easy to operate -Short time for harvesting -High surface to volume ratio	-Large are of land required -Gradients of pH, dissolved oxygen and CO₂ along the tubes -Required supplied of air to operate by using airlift pumps -High concentration of O₂ will inhabit photosynthesis -Fouling
Flat plate photobioreactor	-Relatively cheap -High biomass productivity -Good for microalgae immobilization -Easy cleaning -Good light path -Large illumination surface area -Low O₂ accumulation -Low contamination -Good for indoor and outdoor cultures	-Difficult large scale-up -Difficult control for temperature -Some degree of wall growth -Difficult control for CO₂ -Photo-inhibition may occurs

Microalgae in photobioreactor are cultivated in suspension, and the systems are closed while the water can be circulated by pumps [39]. Photobioreactors consist of an array of plastic tubes or straight glass [16], [40]. The tubular array captures the sunlight. Gas liquid mass

transfer is very important feature for the photobioreactors. The microalgae in photobioreactors can be re-circulated by pump and air lift system. Thus the CO₂ and O₂ can be exchanged between the aeration gas and the liquid medium [16]. Flat plate photobioreactors

can achieve high cell densities due to the large surface area exposed for the solar capture [16], [38]. The flat plate reactors are more suitable than the tubular reactors for large scale [16]. A larger reactor of species can be cultivated in photobioreactors [41]. Table 2 shows the comparisons of opened ponds and photobioreactors. The opened pond system causes lower productivity of microalgae biomass than that of the closed pond system, due to some limitation factors such as lacking of carbon dioxide, decreasing of evaporation, incapable mixing, suitable temperature for growth and light intensity limitation [16].

4. Microalgae harvesting systems

Harvesting is the serial progress of water removal from microalgae cultivation and supports the different of downstream processes. The downstream process is dewatering, drying and lipids extraction. It is very important to choose a suitable harvesting method to reduce the overall cost [42]. The harvesting methods always depend on the species of microalgae such as size, density of microalgae. Normally, the microalgae harvesting is a two-stage process. The first stage is a bulk harvesting to separate the biomass from the bulk suspension such as flocculation, flotation or gravity sedimentation. The second stage is thickening to concentrate the slurry though techniques like centrifugation, filtration and ultrasonic aggregation [16], [42-43].

4.1 Screening

Screening is the first process for wastewater treatment plant. Microalgae harvesting also uses the screening. The principle of screening

involves introducing microalgae biomass onto a screen of given aperture size. The aim of screening is to take the particle or microalgae biomass and put into the space of screening medium. The efficiency of screening depends on the spacing between the screen opening hole and the microalgae particle size. Two screening devices of for harvesting microalgae include microstrainer and vibrating screen, a common screening device.

4.2 Flocculation

Microalgae generally have negative charge at their microalgae cell surface that prevents self-aggregate. Flocculation is used for microalgae suspension. Substance is combined with the negative charge of microalgae cell surface. Adding of a flocculants into the medium, the metal salts such as ferric chloride, aluminum sulfate and ferric sulfate from flocculants act to displace the charge and allow the aggregation of microalgae, resulting in a better sedimentation [8]. Alum and ferric chloride are flocculants that used for harvest microalgae [44]. Use of chemical flocculants is expensive for a large operation [6], [8]. Autoflocculation, is the spontaneous aggregation of microalgae, can occur by limitation of carbon or certain abiotic factors [8], [45]. The flocculation process requires lower energy than other methods, such as filtration, flotation, gravity sedimentation, and centrifugal sedimentation.

4.3 Filtration

Filtration is a commonly used for separating of liquid and solid phases. It is a flowing of microalgae suspension that passes through filter equipment using suction pump. The microalgae pass through other filtration process for

prevention of pore blocking or membrane fouling. The filtration is suitable for large colony or large cell of microalgae. The filtration is separated into 0.1 to 10 microns. There are many types of filtration process such as vibrating screen, belt filter, vacuum drum, microfiltration, vacuum filtration, dead end filtration, and pressure filtration [46]. The filtration tends to be costly, energy intensive, fouling and pumping [45].

4.4 Flotation

Flotation is based on the trapping of microalgae cells using dispersed bubbles. It depends on air or gas foam. Air and particle are attached each other and then push them to the top of water, they are harvested using a skimming equipment. Some cells of microalgae float the surface water [16]. The flotation aims to enhance the solid loading, how many percent that the solid is floated, and make the product be clearly. Flotation has many different kinds such as dissolved air flotation, electro flotation, dispersed flotation and ozone flotation.

4.5 Gravity sedimentation

Gravity sedimentation is commonly used for harvesting microalgae biomass. It is a technique to separate liquid and solid to get clear water and take a feed suspension into slurry in high concentration. The gravity sedimentation is suitable for high density and large size of microalgae [47]. However, it may take more time to setting them down for small cell.

4.6 Centrifugal sedimentation

Centrifugal sedimentation is the way to separate to liquids that cannot mix together. It is the most rapid and reliable method of recovering suspended microalgae [48]. The

centrifugal sedimentation is similar with sedimentation tank but the particle suspension is forced using centrifugation for their division which is greater than gravity force. Two important factors for centrifugal sedimentation are size and density of microalgae. There are many kinds of centrifugal sedimentation such as solid bowl decanter, hydro cyclone, nozzle type, solid ejecting disc, imperforate, multi-chamber, tubular centrifuge and decanter centrifugation. This process is rapid and energy intensive. The centrifugal sedimentation has a high energy cost and a high maintenance requirement [16], [42].

5. Energy conversion process

The energy conversion processes from microalgae biomass can be classified into thermochemical and biochemical conversions [48-49]. The thermochemical conversions include gasification, pyrolysis, liquefaction, direct combustion, and hydrogenation. The biochemical conversions include fermentation, anaerobic digestion and transesterification. Fig 2 shows the converting microalgae biomass process. The microalgae biomass can be converted into bio-oil, ethanol, methane, biodiesel, syngas, hydrogen and electricity. The selection of conversion process is determined by the species of microalgae to biomass, final productivity that needed and the possible economic factor [16], [42].

5.1 Thermochemical conversion

5.1.1 Gasification

Gasification can be used for converting microalgae biomass into syngas and fuel gas by partial oxidation with air at high temperatures ranging from 800 to 1000 °C [50]. Syngas can

produce a wide variety of potential feedstock [16]. The syngas from this process is a low calorific gas and it can be used directly as a fuel for engines and turbines [16], [42], [51].

5.1.2 Pyrolysis

Pyrolysis is an energy process for converting microalgae biomass by heating at temperature

ranging from 350 to 700 °C in the absence of air or oxygen become bio-oil, syngas and charcoal [52]. There are 3 classes of pyrolysis process include flash pyrolysis, fast pyrolysis and conventional pyrolysis [42]. The fast pyrolysis can directly produce a liquid fuel [53].

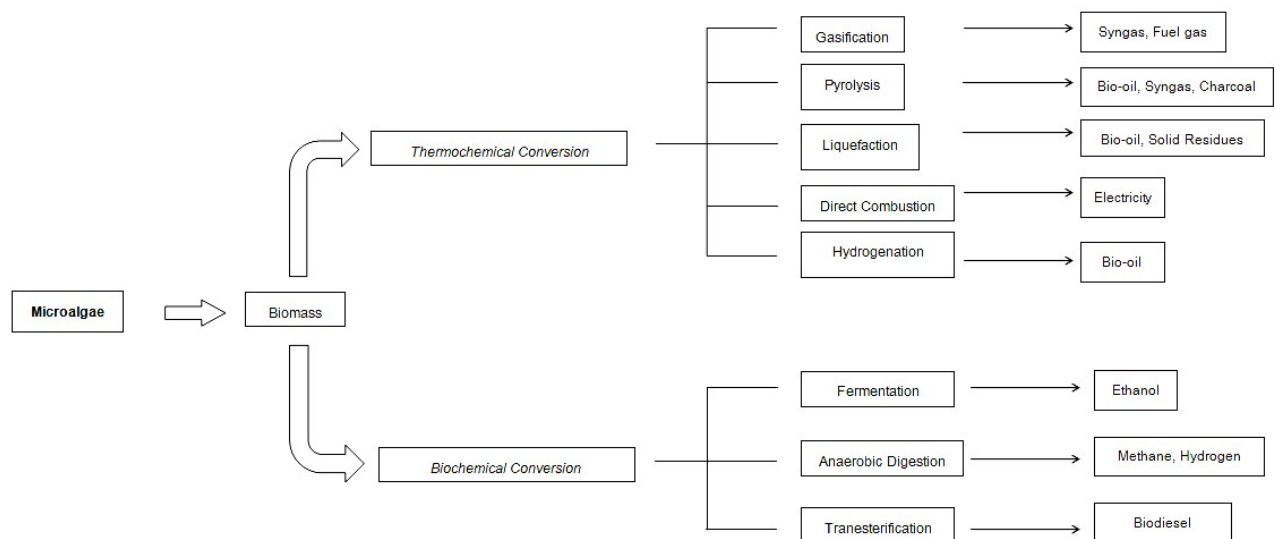


Fig. 2 The energy conversion process from microalgae biomass [6], [16], [42]

5.1.3 Liquefaction

Liquefaction is an energy process for converting the wet microalgae biomass to biofuels [54]. The liquefaction has a temperature ranging from 200 to 350 °C at high pressure (5-20 MPa) with catalyst convert to bio-oil and hydrogen [44], [52]. The liquefaction is a practical option for the conversion of wet microalgae biomass to bioenergy.

5.1.4 Direct combustion

The microalgae biomass is burnt in the air to convert the chemical energy that stored in microalgae biomass into hot gases with temperature ranging from 800 to 1,000 °C [42], [52]. Direct combustion is suitable for microalgae

biomass which has the moisture content less than 50% dry weight [42]. Limitations of direct combustion are the requirement of pretreatment such as grinding, chopping and drying and some extra cost [16], [52].

5.1.5 Hydrogenation

Hydrogenation is a process that adds the hydrogen atoms to double bonds of a molecule by catalyst [55]. Microalgae hydrogenation is performed by using an autoclave at high temperature and using the pressure conditions of catalyst and solvent [6].

5.2 Biochemical conversion

5.2.1 Fermentation

Fermentation is an energy process for converting microalgae biomass, containing starch, cellulose and sugar to ethanol. The fermentation is commonly used in a large scale. The first step is to extract the starch from the microalgae cell and to convert the starch by enzymes into sugars. Then, sugars are converted to ethanol by yeast. The distillation process is used to purify the ethanol by removing the water and impurities.

5.2.2 Anaerobic digestion

Anaerobic digestion is an energy process for converting organic waste to a biogas, consisting of methane and carbon dioxide. Methane and carbon dioxide from this process can be used directly as cooking fuel, gas-quality bio-methane and generating power gas engines [42]. The anaerobic digestion is suitable for high moisture material such as wet microalgae biomass [16].

5.2.3 Transesterification

Transesterification is a process of exchanging an ester compound with another alcohol [6]. The reaction of transesterification is fat or oil conversion using alcohol into ester and glycerol. The productivity of transesterification is biodiesel.

6. Conclusions

The microalgae have attended considerable in recent year. The cultivation of microalgae can be used in wastewater treatment and renewable energy. The advantages of using microalgae are fast growth, high oil content and synergy with CO₂ biofixation. For cultivating microalgae and energy conversion process, there are many

systems that still required a high investment in comparison with the conventional diesel from fossil or conventional wastewater treatment. The new approach involves several industrial wastewaters to attain the optimum technology for improvement microalgae biomass production. This topic is very challenging for improving the alternative energy that can be used and reduced the use of fossil fuels. Future research in the directions discussed in this review will ensure sustainable microalgae for biofuel production using industrial wastewater as a resource.

Acknowledgement

The authors would like to acknowledge SWM team (ENG-58-2-7-11-0208-S), Faculty of Engineering (PSU).

References

- [1] E.-S., Salama, M. B., Kurade, R. A. I., Abou-Shanab, M. M., El-Dalatony, I. S., Yang, B., Min and B. H., Jeon, "Recent progress in microalgae biomass production coupled with wastewater treatment for biofuel generation," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, pp. 1189-1211, 2017.
- [2] S. P., Cuellar-Bermudez, G. S., Aleman-Nava, R., Chandra, J. S., Garcia-Perez, J. R., Contreras-Angulo, G., Markou, K., Muylaert, B. E., Rittmann and R., Parra-Saldivar, "Nutrients utilization and contaminants removal," A review of two approaches of algae and cyanobacteria in wastewater. *Algal Research*, 24, pp. 438-449, 2017.

- [3] M, Falkenmark and J, Rockstrom, "Balancing water for humans and nature: the new approach in ecohydrology," Earthscan, 2004.
- [4] K., Kumar, S., Ghosh, I., Angelidaki, S. L., Holdt, D.B., Karakashev, M. A., Morales and D, Das, "Recent developments on biofuels production from microalgae and macroalgae," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65, pp. 235-249, 2016.
- [5] A., Ahmad, A., Buang and A. H., Bhat, "Renewable and sustainable bioenergy production from microalgae co-cultivation with palm oil mill effluent (POME): A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, pp. 214-234, 2016.
- [6] S., Amin, "Review on biofuel oil and gas production processes from microalgae," *Energy Conversion and Management*, 50, pp. 1834-1840, 2009.
- [7] X., Ma, W., Zhou, Z., Fu, Y., Cheng, M., Min, Y., Liu, Y., Zhang, P., Chen and R., Ruan, "Effect of wastewater-born bacteria on algal growth and nutrients removal in wastewater-based algae cultivation system," *Bioresource Technology*, 167, pp. 8-13, 2014.
- [8] I., Rawat, R. R., Kumar, T., Mutanda and F., Bux, "Dual role of microalgae: Phytoremediation of domestic wastewater and biomass production for sustainable biofuels production," *Applied Energy*, 88, pp. 3411-3424, 2011.
- [9] L. D., Zhu, E., Hiltunen, E., Antila, J. J., Zhong, Z. H., Yuan and Z. M., Wang, "Microalgae biofuels: Flexible bioenergies for sustainable development," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, pp. 1035-1046, 2014.
- [10] W. Y., Cheah, T. C., Ling, P. L., Show, J. C., Juan, J.-S., Chang and D.-J., Lee, "Cultivation in wastewater for energy: A microalgae platform," *Applied Energy*, 179, pp. 609-625, 2016.
- [11] E., Jankowska, A. K., Sau and P., Oleskoicz-Popiel, "Biogas from microalgae: Review on microalgae's cultivation, harvesting and pretreatment for anaerobic digestion," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, pp. 692-709, 2017.
- [12] M., Kroger and F., Muller-Langer, "Review on possible algal-biofuel production processes," *Biofuels*, 3(3), pp. 333-349, 2012.
- [13] I., Ozkurt, "Qualifying of safflower and algae for energy," *Energy Educ Sci Technol Part A*, 23, pp.145-151, 2009.
- [14] S., Schwede, A., Kowalczyk, M., Gerber and R., Span, "Influence of different cell disruption techniques on mono digestion of algal biomass," World Renew Energy Congress Linkoping. Sweden. 2011.
- [15] L., Moreno-Garcia, K., Adjalle, S., Barnabe and G. S. V., Raghavan, "Microalgae biomass production for a biorefinery system: Recent advances and the way towards sustainability," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, pp. 493-506, 2017.
- [16] L., Brennan and P., Owende, "Biofuels from microalgae-A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, pp. 557-577, 2010.
- [17] T. M., Mata, A. A., Martins and N. S., Caetano, "Microalgae for biodiesel production and

- other application: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, pp. 217-232, 2010.
- [18] V., Patil, K. Q., Tran and H. R., Gislerod, “Toward sustainable production of biofuels from microalgae,” *Int J Mol Sci*, 9, pp. 1188-1195, 2008.
- [19] Y., Christi, “Biodiesel from microalgae,” *Biotech Adv*, 25, pp. 294-306, 2007.
- [20] J., Sheeahan, T., Dunahay, J., Benemann, and P., Roessler, “A look back at the US Depart of Energy's Aquatic Species Program-Biodiesel,” from *Algal*, 1998.
- [21] W., Zhou, P., Chen, M., Min, X., Ma, J., Wang, R., Griffith, F., Hussain, P., Peng, Q., Xie, Y., Li, J., Shi, J., Meng and R., Ruan, “Environment-enhancing algal biofuel production using wastewaters,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 36, pp. 256-269, 2014.
- [22] W. J., Oswald, H. B., Gotaas, C. G., Golueke and W. R., Kellen, “Algae in waste treatment,” *Sewage and Industrial Wastes*, 29, pp. 437-455, 1957.
- [23] K. V., Ajayan, M., Selvaraju, P., Unnikannan and P., Sruthi, “Phycoremediation of Tannery Wastewater Using Microalgae *Scenedemus* Species,” *Int J Phytoremeaist*, 17, pp. 907-916, 2015.
- [24] J.-Y., An, S.-J., Sim, J. S. Lee and B. W., Kim, “Hydrocarbon production from secondarily treated piggery wastewater by the green alga *Botryococcus braunii*,” *J Appl Phycol*, 15, pp. 185-191, 2003.
- [25] S., Sawayama, T., Minowa, Y., Dote and S., Yokoyama, “Growth of the hydrocarbon-rich microalgae *Botryococcus braunii* in secondarily treated sewage,” *Appl Microbio Biotechnol*. 38, 1992.
- [26] O., Mudimu, N., Rybalka, T., Bauersachs, J., Born, T., Friedl, and R., Schulz, “Biotechnological screening of microalgae and cyanobacteria strains for biogas production and antibacteria and antifungal effects,” *Metabolites*, 4, pp. 373-393, 2014.
- [27] Q. X., Kong, L., Li, B., Martinez, P., Chen and R., Ruan, “Culture of microalgae *Chlamydomonas reinhardtii* in wastewater for biomass feedstock production,” *Appl Biochem Biotechnol*, 160, pp. 9-18, 2010.
- [28] Y., Li, Y.-F., Chen, P., Chen, M., Min, W., Zhou, B., Martinez, J., Zhu and R., Ruan, “Characterization of a microalga *Chlorella* sp. well adapted to highly concentrated municipal wastewater for nutrient removal and biodiesel production,” *Bioresource Technology*, 102, pp. 5138-5144, 2011.
- [29] R., Chen, R., Li, L., Deitz, Y., Liu, R. J., Stevenson, and W., Liao, “Freshwater algal cultivation with animal waste for nutrient removal and biomass production,” *Biomass Bioenergy*, 39, pp. 128-138, 2012.
- [30] L., Wang, Y., Wang, P., Chen and R., Ruan, “Semi-continuous cultivation of *Chlorella vulgaris* for treating undigested and digested dairy manures,” *Appl Biochem Biotechnol*, 162, pp. 2324-2332, 2010.
- [31] I. T. D., Cabanelas, J., Ruiz, Z., Arbib, F. A., Chinalia, C., Garrido-Perez, F., Rogalla, I. A. Nascimento and J. A., Perales, “Comparing the use of different domestic wastewaters for coupling microalgal production and

- nutrient removal,” *Bioresource Technology*, 131, pp. 429-436, 2013.
- [32] S., Chinnasamy, A., Bhatnagar, R. W., Hunt and K. C., Das, “Microalgae cultivation in a wastewater dominated by carpet mill effluents for biofuel applications,” *Bioresource Technology*, 101, pp. 3097-3105, 2010.
- [33] M., Sacristan de Alva, V. M., Luna-Pabello, E., Cadena and E., Ortiz, “Green microalgae *Scenedesmus acutus* grown on municipal wastewater to couple nutrient removal with lipid accumulation for biodiesel production,” *Bioresource Technology*, 146, pp. 744-748, 2013.
- [34] E., Suali and R., Sarbatly, “Conversion of microalgae to biofuel,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, pp. 4316-4342, 2012.
- [35] T. M., Mata, A. A., Martins and N. S. Caetano, “Microalgae for biodiesel production and other applications: a review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, pp. 217-232, 2010.
- [36] M. A., Borowitzka, “In: Anderson, R.A. editor. Algal culturing technique,”. *New York: Elsevier, Academic Press*, pp. 205-218, 2005.
- [37] R., Putt M., Singh, S., Chinnasamy and K. C., Dasa, “An efficient system for carbonation of high-rate algae pond water to enhance CO₂ mass transfer,” *Bioresource Technology*, 102, pp. 3240-3245, 2011.
- [38] I., Rawat, R. R., Kumar, T., Mutanda and F., Bux, “Biodiesel from microalgae: A critical evaluation from laboratory to large scale production,” *Applied Energy*, 103, pp. 444-467, 2013.
- [39] A., Singh, P. S., Nigam and J. D., “Murphy, Mechanism and challenges in commercialisation of algal biofuels,” *Bioresource Technology*, 102, pp. 26-34, 2011.
- [40] C. U., Ugwu, H., Aoyagi and H., Uchiyama, “Photobioreactors for mass cultivation of algae,” *Bioresource Technology*, 99, pp. 4021-4028, 2008.
- [41] R., Davis, A. Aden and P. T., Pienkos, “Techno-economic analysis of autotrophic microalgae for fuel production,” *Applied Energy*, 88, pp. 3524-3531, 2011.
- [42] J., Milano, H. C., Ong, H. H., Masjuki, W. T., Chong, M. K., Lam, P. K., Loh and V., Vellayan, “Microalgae biofuels as an alternative to fossil fuel for power generation,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, pp. 180-197, 2016.
- [43] M. B., Tasic, L. F. R., Pinto, B. C., Klein, V. B. Veljkovic and R. M. Filho, “*Botryococcus braunii* for biodiesel production,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64, pp. 260-270, 2016.
- [44] J. K., Pittman, A. P., Dean and O., Osundeko, “The potential of sustainable algal biofuel production using wastewater resources,” *Bioresource Technology*, 102(1), pp. 17-25, 2011.
- [45] N., Pragma, K. K., Pandey and P. K., Sahoo, “A review on harvesting, oil extraction and biofuels production technologies from microalgae,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, pp. 159-171, 2013.
- [46] Y., Nurdogan and W. J., Oswald, “Tube setting rate of high-rate pond algae,” *Water Science Technology*, 33, pp. 229-241, 1996.

- [47] L., Christenson and R., Sims, “Production and harvesting of microalgae for wastewater treatment, biofuels, and bioproducts,” *Biotechnology Advances*, 29, pp. 686-702, 2011.
- [48] K., Tsukahara and S., Sawayama, “Liquid fuel production using microalgae,” *J Jpn Petrol Inst*, 48(5), pp. 251–259, 2005.
- [49] M., Satin, “Microalgae,” <<http://www.fao.org/ag/ags/Agsi/MICROALG.htm>> [accessed 20.11.17], 2017.
- [50] J., Clark and F., Deswarte, “Introduction to chemicals from biomass,” In: Stevens CV, editor. Wiley series in renewable resources. John Wiley & Sons. 2008.
- [51] S. A., Razzak, M. M., Hossain, R. A., Lucky, A. S., Bassi and H., de Lasa, “Integrated CO₂ capture, wastewater treatment and biofuel production by microalgae culturing-a review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, pp. 622–653, 2013.
- [52] H. B., Goyal, D., Seal and R. C., Saxena, “Bio-fuels from thermochemical conversion of renewable resources: a review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(2), pp. 504–517, 2008.
- [53] A. V., Bridgwater and G. V. C., Peacocke, “Fast pyrolysis processes for biomass,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4, pp. 1–73, 2000.
- [54] V., Patil, K.-Q., Tran and H. R., Giselrad, “Towards sustainable production of biofuels from microalgae,” *International Journal of Molecular Sciences*, 9(7), pp.1188–1195, 2008.
- [55] P., McKendry, “Energy production from biomass (part 2): conversion technologies,” *Bioresource Technology*, 83(1), pp. 47–54, 2002.

สาเหตุที่ก่อให้เกิดความล่าช้าในโครงการก่อสร้างอาคารขนาดใหญ่

: กรณีศึกษาจังหวัดนครพนม

Cause of Delays in Large Building Construction Projects

: A Case Study of Nakhon Phanom Province

จิรเดช เศรษฐภูมิพูน นาท สุขศีล*

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครพนม จังหวัดนครพนม 48000

Jiradet Settakhumpoo Nart Sooksil*

Program in Civil Engineering, Faculty of Engineering, Nakhon Phanom University,
Nakhon Phanom, Thailand, 48000

*Corresponding author Email: nartsooksil@npu.ac.th

(Received: September 19, 2019; Accepted: December 20, 2019)

บทคัดย่อ

ความล่าช้าเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในเกือบทุกโครงการแม้ว่าได้มีการวางแผนการทำงานไว้เป็นอย่างดีก็ยังคงประสบปัญหาความล่าช้า งานวิจัยนี้เป็นการสำรวจสาเหตุความล่าช้าของกลุ่มตัวอย่างโครงการก่อสร้างอาคารขนาดใหญ่ในเขตพื้นที่จังหวัดนครพนม โดยพิจารณาจากการประเมินค่าระดับความถี่และระดับผลกระทบพร้อมทั้งนำเสนอด้วยแผนภาพความเสี่ยง 18 สาเหตุการเกิดความล่าช้าของงานในแต่ละหมวด พบว่าหมวดงานโครงสร้างเป็นหมวดงานที่ส่งผลกระทบต่อ การเกิดความล่าช้ามากที่สุด และ 18 สาเหตุการเกิดความล่าช้าในหมวดงานโครงสร้างสามารถจัดกลุ่มค่าความเสี่ยงได้เป็น 2 กลุ่มด้วยกัน คือ กลุ่มสาเหตุที่มีความเสี่ยงค่อนข้างสูง และกลุ่มสาเหตุที่มีความเสี่ยงปานกลาง ส่วนสาเหตุที่มีค่าดัชนี ความสำคัญสูงสุด 5 อันดับแรกและถูกจัดอยู่ในกลุ่มสาเหตุที่มีความเสี่ยงค่อนข้างสูงนั้น พบว่า 4 สาเหตุแรกดังกล่าวถูกจัด อยู่ในประเภทความล่าช้าที่อ้างไม่ได้ โดยมีสาเหตุ D15: การวางแผนด้านเวลาการและการประสานงานที่ไม่เหมาะสมมีค่า ดัชนีความสำคัญสูงสุด ส่วน 1 สาเหตุนั้นถูกจัดในประเภทความล่าช้าที่อ้างและเรียกร้องค่าชดเชยได้ซึ่งก็คือสาเหตุ D4: การอนุมัติเปลี่ยนแปลงแก้ไขสัญญาจ้างเช่น งานเพิ่ม ลด ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ ผู้บริหารโครงการสามารถนำข้อมูลที่ได้ไป ช่วยในการตัดสินใจสำหรับการวางแผนการทำงาน โดยเน้นพิจารณาสาเหตุความล่าช้าที่ถูกจัดอยู่ในประเภทความเสี่ยง ค่อนข้างสูงเป็นหลัก

คำสำคัญ: อาคารขนาดใหญ่ การประเมินความเสี่ยง ความล่าช้า

ABSTRACT

Time delay is a very frequent phenomenon and is almost associated with nearly all constructing projects. Every construction project tries to mitigate the delay of its project by applied the management strategies and planning theories, but the construction delay still happens. This study investigated the causes of delay in large building construction projects which located at Nakhon Phanom province. The likelihood level and the impact level were considered then presented on the risk map. Eighteen causes of construction delay are proposed which based on literature reviews. The results shown that the structural work was the most influence work on the project delay time. The 18

delay causes in structural work were grouped into 2 groups of delay risk. One group was the medium-high risk cause, and the another was medium risk cause. The first five causes that occupied the highest importance indices and were grouped in the medium-high risk are identified. As the results, four of them came from non-excusable delay cause and the rest was excusable and compensable delay cause. Moreover, D15: Unappropriated planning and coordinating cause occupied the highest importance index which is non-excusable delay cause. The research outcomes can help project managements to control projects by focus on the delay causes that were grouped in the medium-high risk.

Keyword: Large Building, Risk Assessment, Time Delay

1. บทนำ

เวลาเป็นสิ่งที่ถูกพิจารณาให้เป็นประเด็นหลักในการบริหารโครงการไปตลอดวงจรชีวิตของสิ่งก่อสร้างที่ถูกสร้างขึ้น และยังเป็นตัวแปรสำคัญในการบ่งบอกถึงความสำเร็จของโครงการนั้น ๆ ความล่าช้าเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นบ่อยและเกิดขึ้นในเกือบทุกโครงการก่อสร้าง ถึงแม้ว่าแต่ละโครงการได้มีการวางแผนการทำงานไว้เป็นอย่างดี แต่ก็ยังประสบปัญหาการก่อสร้างที่ล่าช้ากว่าแผนงานที่วางไว้ ผลที่ตามมาคือต้นทุนการก่อสร้างที่สูงขึ้น ขาดประสิทธิภาพในการจัดการโครงการ เสียชื่อเสียงสำหรับผู้รับงานก่อสร้าง และมีการเกิดข้อพิพาทในกลุ่มบุคคลที่เกี่ยวข้องในโครงการ โดย 3 กลุ่มหลักๆ ที่มีส่วนได้ส่วนเสียในโครงการก่อสร้างก็คือผู้ว่าจ้าง วิศวกร/สถาปนิก และผู้รับเหมาก่อสร้าง ซึ่งข้อพิพาทที่เกิดขึ้นทำให้สูญเสียความสัมพันธ์ที่ดีระหว่างกลุ่มที่ร่วมกันทำงานในโครงการ [1]

วงจรชีวิตของโครงการก่อสร้างนั้น ประกอบด้วยช่วงชีวิตจำนวน 7 ระยะด้วยกัน ได้แก่ การสร้างมโนทัศน์และการวิเคราะห์หาความเป็นไปได้ของโครงการ การออกแบบการจัดซื้อจัดจ้าง การก่อสร้าง การส่งมอบงาน การใช้งานและซ่อมบำรุง และการรื้อถอน [2] โดยงานวิจัยของ Abdul-Rahman และคณะ [3] ชี้ให้เห็นว่าเหตุการณ์ความล่าช้าขึ้นเกิดมากที่สุดในช่วงระยะการก่อสร้าง (Construction Phase) ในการก่อสร้างอาคารนั้น ไม่ว่าจะอาคารขนาดใหญ่หรือขนาดเล็ก จะมีหมวดงานหลักๆ ที่ผู้รับเหมาก่อสร้างต้องดำเนินการอยู่ 5 ส่วน คือ หมวดงานสถาปัตยกรรม หมวดงานโครงสร้าง หมวดงาน

ระบบไฟฟ้า หมวดงานระบบประปาสุขาภิบาล และหมวดงานระบบปรับอากาศและสื่อสาร ซึ่งงานในแต่ละหมวดก็จะส่งผลต่อความล่าช้าของโครงการแตกต่างกันไป

จังหวัดนครพนมเป็นจังหวัดในภาคอีสานตอนบนของประเทศไทย เป็นจังหวัดชายแดนที่ติดกับแม่น้ำโขงซึ่งกันกับประเทศลาว และเป็นจังหวัดที่มีสัญญาณการขยายตัวทางเศรษฐกิจเป็นที่น่าสนใจแก่นักลงทุน โดยรายงานภาวะเศรษฐกิจการคลังจังหวัดนครพนม ประจำเดือนพฤษภาคม 2561 [4] บ่งชี้เศรษฐกิจจังหวัดนครพนมมีสัญญาณขยายตัวจากการใช้จ่ายภาครัฐ การบริโภคภาคเอกชน และการลงทุน ภาคเอกชน ซึ่งการลงทุนของเอกชนในหมวดงานธุรกิจก่อสร้างนั้น พบว่าในปี 2557 เป็นหมวดงานธุรกิจที่มีการจดทะเบียนนิติบุคคลตั้งใหม่มากเป็นอันดับ 2 รองจากหมวดงานธุรกิจการขายส่งขายปลีก [5]

การนำเสนอสาเหตุที่ก่อให้เกิดความล่าช้าโดยใช้ข้อมูลจากผู้ปฏิบัติงานในโครงการก่อสร้างอาคารขนาดใหญ่ในเขตจังหวัดนครพนม โดยใช้ระดับความถี่ (Likelihood) และระดับผลกระทบ (Impact) ที่เกิดขึ้นในแต่ละสาเหตุจะช่วยให้ผู้บริหารโครงการสามารถวางแผนการทำงานหรือวางกลยุทธ์ต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพเพื่อหลีกเลี่ยงสาเหตุความล่าช้าที่อาจจะเกิดขึ้นต่อโครงการ ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ จึงมุ่งไปที่การศึกษาหมวดงานก่อสร้างที่มีค่าความเสี่ยง (Risk Score) ต่อการเกิดความล่าช้าที่มากที่สุด และศึกษาสาเหตุที่ส่งผลให้เกิดค่าความเสี่ยงดังกล่าวพร้อมทั้งวิเคราะห์แนวทางการป้องกันของสาเหตุที่เกิดขึ้น

2. ความล่าช้า

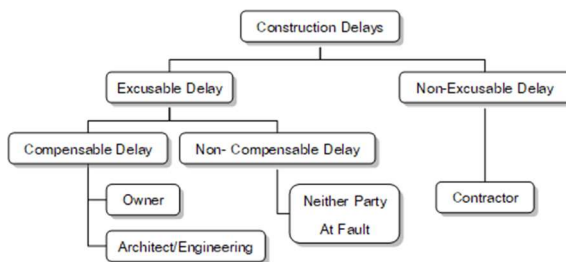
2.1 ความหมายความล่าช้า

Bramble และ Callahan [6] ได้ให้ความหมายของความล่าช้าในงานก่อสร้างไว้ว่า “ความล่าช้าคือระยะเวลาบางส่วนของการก่อสร้างที่ได้ถูกขยายเวลาออกไปหรือเกิดการปฏิบัติงานไม่ได้เนื่องจากสถานการณ์ที่ไม่คาดคิด”

ดังนั้น ความหมายของความล่าช้าในการก่อสร้างสำหรับการวิจัยในครั้งนี้คือ ช่วงเวลาที่ถูกละเลยออกไปจากแผนงานหรือสัญญางานก่อสร้างโดยเกิดจากเวลาการทำงานของกิจกรรมบางกิจกรรมถูกละเลยออกไปแล้วส่งผลกระทบต่อกิจกรรมที่ตามหลังต้องเริ่มงานช้ากว่าแผนงาน หรือทำให้เวลารวมของโครงการถูกละเลยออกไป

2.2 ประเภทของความล่าช้า

2.2.1 Bramble และ Callahan [6] ได้แบ่งประเภทของความล่าช้าตามการเรียกร้องจากความเสียหายที่เกิดขึ้น ไม่ว่าจะเป็นค่าชดเชย หรือ เวลาการทำงาน และประเภทความล่าช้ายังขึ้นอยู่กับหน้าที่ความรับผิดชอบของแต่ละกลุ่มบุคคลที่เกี่ยวข้อง โดยความล่าช้าสามารถแบ่งออกเป็นประเภทดังต่อไปนี้ (ดังรูปที่ 1)



รูปที่ 1 ประเภทของความล่าช้าแบ่งตามการเรียกร้องจากความเสียหาย [6]

2.2.1.1 ความล่าช้าที่อ้างได้ (Excusable Delay) คือ ความล่าช้าที่ผู้รับเหมาสามารถเรียกร้องความเสียหายได้ในด้านเวลาและค่าใช้จ่าย โดยความล่าช้าที่อ้างได้ สามารถแบ่งออกได้อีก 2 ประเภท

ก) ความล่าช้าที่เรียกร้องค่าชดเชยได้ (Compensable Delay) คือความล่าช้าที่มักจะขึ้นเกิดจากกลุ่มบุคคล 2 กลุ่ม ได้แก่ ความล่าช้าจากผู้ว่าจ้าง (Owner Delay) และความล่าช้าจากสถาปนิกและวิศวกร

(Architect/Engineering Delay) ซึ่งเมื่อเกิดขึ้นแล้วสามารถเรียกร้องค่าชดเชยหรือค่าเสียหายจากความล่าช้าที่เกิดขึ้นได้ทั้งเวลาและค่าใช้จ่าย เช่น การจ่ายเงินตามงวดงานล่าช้า การเปลี่ยนแปลงรายการก่อสร้างจากผู้ว่าจ้าง เป็นต้น

ข) ความล่าช้าที่ไม่สามารถเรียกร้องค่าชดเชยได้ (Non-Compensable Delay) คือ ความล่าช้าที่เกิดขึ้นจากกลุ่มบุคคลที่สาม (Third Party Delay) ที่ไม่ใช่จากผู้ว่าจ้างสถาปนิกและวิศวกร และผู้รับเหมา ซึ่งเมื่อเกิดขึ้นแล้วไม่สามารถเรียกร้องค่าชดเชยได้แต่สามารถขอเพิ่มระยะเวลาในการทำงานได้ เช่น ความผิดปกติของสภาพอากาศ ภัยธรรมชาติ โรคระบาด เป็นต้น

2.2.1.2 ความล่าช้าที่อ้างไม่ได้ (Non-Excusable Delay) คือ สาเหตุความล่าช้าที่เกิดขึ้นโดยเป็นผลมาจากผู้รับเหมา (Contractor) โดยตรง ซึ่งเมื่อเกิดขึ้นแล้วผู้รับเหมาเองอาจต้องชดเชยให้กับเจ้าของงานในรูปแบบของค่าปรับ เช่น การขาดแคลนแรงงาน คนงานขาดทักษะและมีฝีมือในการทำงาน ผู้ควบคุมงานขาดทักษะและประสบการณ์ทำงาน เครื่องจักรกลชำรุด การก่อสร้างที่ผิดกระบวนการหรือข้ามขั้นตอน เป็นต้น

2.2.2 Scott [7] ได้แบ่งประเภทของความล่าช้าในงานก่อสร้างออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่

2.2.2.1 ความล่าช้าประเภทต้องชดเชย (Compensable Delay) เป็นความล่าช้าที่เกิดจากความผิดของเจ้าของงาน เช่น เจ้าของงานมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบหรือข้อกำหนด เจ้าของงานมีคำสั่งให้หยุดงาน ความล่าช้าในการอนุมัติแบบ เป็นต้น ซึ่งเจ้าของงานต้อง ขยายเวลาในการก่อสร้างให้กับผู้รับเหมา และต้องรับผิดชอบต่อค่าใช้จ่ายสำหรับสิ่งที่เกิดขึ้น

2.2.2.2 ความล่าช้าประเภทยอมรับได้ (Excusable Delay) เป็นความล่าช้าที่ไม่ได้เกิดจากความผิดของทั้งเจ้าของงานและผู้รับเหมา หรือเป็นเหตุสุดวิสัย เช่น ความผิดปกติของสภาพภูมิอากาศ การประท้วงหยุดงาน การค้นพบซากอารยธรรมโบราณในพื้นที่ก่อสร้าง เป็นต้น ซึ่งเจ้าของงานอาจขยายเวลาในการ

ก่อสร้างให้กับผู้รับเหมา แต่ไม่ต้องรับผิดชอบต่อค่าใช้จ่ายจากปัญหาที่เกิดขึ้น

2.2.2.3 ความล่าช้าประเภทยอมรับไม่ได้ (Non-Excusable Delay) เป็นความล่าช้าที่เกิดจากผู้รับเหมา เช่น อาคารสิ่งปลูกสร้างไม่เป็นไปตามแบบและข้อกำหนด ความล่าช้าในการปฏิบัติงาน ความล่าช้าเนื่องจากอุบัติเหตุในระหว่างการทำงานของผู้รับเหมา เป็นต้น ซึ่งเจ้าของงานไม่จำเป็นต้องขยายเวลาในการก่อสร้างให้กับผู้รับเหมา และไม่ต้องรับผิดชอบต่อค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากความล่าช้าประเภทนี้

2.3 สาเหตุของความล่าช้า

2.3.1 สาเหตุของความล่าช้าของโครงการก่อสร้างอาคารในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

วุฒิพงศ์ [8] ได้นำเสนอสาเหตุของความล่าช้าของโครงการก่อสร้างอาคารในภาคตะวันออกเฉียงเหนือทั้งหมด 35 สาเหตุและจำแนกออกเป็น 3 ประเภทของความล่าช้า โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สาเหตุความล่าช้าทั้ง 3 ประเภท [8]

สาเหตุของความล่าช้าประเภทต้องชดเชย	
1	การอนุมัติแบบที่ใช้ในการก่อสร้าง (Shop Drawing) ล่าช้า
2	ความล่าช้าของเจ้าของงานในการตอบคำถามจากผู้รับเหมา
3	การจ่ายเงินงวดไม่เป็นไปตามกำหนด
4	ความบกพร่องและความไม่ชัดเจนของสัญญาก่อสร้าง
5	รายละเอียดของแบบที่ใช้ในการก่อสร้างขัดแย้งกันเอง
6	การติดต่อขออนุญาตต่อหน่วยราชการที่เกี่ยวข้องในพื้นที่ทำงานล่าช้า
7	การแทรกแซงการทำงานของผู้รับเหมาจากเจ้าของงาน
8	การแทรกแซงการทำงานของผู้รับเหมาโดยผู้รับเหมาเจ้าอื่นหรือเจ้าของงานรายอื่น
9	การขาดความเชี่ยวชาญในการปฏิบัติงานของผู้ควบคุมงาน
10	ผู้ควบคุมงานมีจำนวนบุคลากรไม่เพียงพอ
11	การเปลี่ยนแปลงวิธีการทำงานและเปลี่ยนแปลงมาตรฐานการตรวจงาน
12	การออกคำสั่งเปลี่ยนแปลงรายละเอียดของแบบที่ใช้ในการก่อสร้างและรายละเอียดกำหนดการต่าง ๆ
13	ผู้ควบคุมงานมีงานสายการบังคับบัญชาหลายชั้นตอนมีผลทำให้การตัดสินใจล่าช้า
14	ความล้มเหลวในการครอบครองกรรมสิทธิ์พื้นที่ก่อสร้าง และ การใช้สิทธิ์บนเส้นทางการเข้าสู่พื้นที่ก่อสร้าง

สาเหตุของความล่าช้าประเภทยอมรับได้	
1	การค้นพบโบราณวัตถุ หรือแหล่งอารยธรรมโบราณในพื้นที่ก่อสร้าง
2	การพบสัตว์ดุร้าย การค้นพบสารพิษ หรือวัตถุอันตรายในพื้นที่ก่อสร้าง
3	การกีดขวางของสิ่งปลูกสร้าง ต้นไม้หวงห้าม และระบบสาธารณูปโภคของหน่วยงานอื่น
4	ความผิดปกติของสภาพภูมิอากาศ และภัยธรรมชาติ
5	ปัญหาทางการเมืองในท้องถิ่น หรือในประเทศ
6	ปัญหาจากสภาพพื้นที่ในการทำงานเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากแบบคู่สัญญา
7	ปัญหาจากสภาพหน้างานพบหินแข็งกีดขวางทำให้ต้องมีการใช้เครื่องมือพิเศษในการทำลาย
สาเหตุของความล่าช้าประเภทยอมรับไม่ได้	
1	ความล่าช้าในการส่งแบบที่ใช้ในการก่อสร้าง (Shop Drawing) ล่าช้า
2	ความล่าช้าในการส่งแบบก่อสร้าง (As build Drawing) ล่าช้า
3	การใช้บุคลากรไม่เหมาะสมกับงาน และมีบุคลากรไม่เพียงพอ
4	การที่มีแรงงานก่อสร้างไม่เพียงพอ
5	การที่บุคลากรขาดประสบการณ์ และความเชี่ยวชาญในการปฏิบัติงาน หรือวางแผนงานก่อสร้าง
6	ความล่าช้าที่เกิดจากการทำงานของผู้รับเหมาย่อย
7	สิ่งก่อสร้างไม่เป็นไปตามสัญญาโดยไม่ตรงกับข้อกำหนดหรือแบบก่อสร้าง
8	การไม่ปฏิบัติตามคำขอร้องจากเจ้าของงานที่ผู้รับเหมาได้ตอบตกลงตามคำขอร้องนั้นไปแล้ว
9	ความบกพร่องในการติดตามงานและปรับแผนการทำงาน
10	ความบกพร่องในการประสานงานที่หน้าสนาม
11	ความบกพร่องในการจัดการและประสานงานภายในองค์กรของผู้รับเหมา
12	ความล่าช้าในการจัดหาเครื่องมือ อุปกรณ์ หรือวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้าง
13	การใช้เครื่องมือหรืออุปกรณ์ในการก่อสร้างที่ไม่ตรงกับข้อกำหนด
14	การขาดสภาพคล่องทางการเงินของผู้รับเหมา

2.3.2 ความล่าช้าในโครงการก่อสร้างขนาดใหญ่ของประเทศชาอุดิอาระเบีย

Assaf Sadi และคณะ [9] ได้ศึกษาสาเหตุหลักและน้ำหนักความสำคัญของสาเหตุที่ทำให้เกิดความล่าช้าในโครงการก่อสร้างขนาดใหญ่ของจังหวัดทางภาคตะวันออกเฉียงในประเทศชาอุดิอาระเบีย ในการสำรวจดังกล่าวได้ใช้ 56 สาเหตุของความล่าช้าในการให้ผู้เข้าร่วม

ให้ข้อมูลทำการระบุระดับความสำคัญ และ 56 สาเหตุ ความล่าช้าดังกล่าวได้ถูกจัดกลุ่มเป็น 9 กลุ่มหลัก ประกอบด้วย กลุ่มวัสดุก่อสร้าง (Material: Mat) กลุ่มบุคลากร (Manpower: Man) กลุ่มเครื่องจักรกลก่อสร้าง (Equipment: Equ) กลุ่มการเงิน (Finance: Fin) กลุ่มการเปลี่ยนแปลงของงานก่อสร้าง (Changes: Cha) กลุ่มข้อกำหนดราชการ (Government relations: Gov) กลุ่มการควบคุมและกำหนดการทำงาน (Scheduling and controlling: Sch) กลุ่มสภาพแวดล้อม (Environment: Env) และ กลุ่มสัญญา ก่อ ส ร ้าง (Contractual relationships: Con)

2.4 การสังเคราะห์สาเหตุของความล่าช้าจากงานวิจัยที่ผ่านมา

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าสามารถจำแนกประเภทของความล่าช้าในงานก่อสร้างได้ 3 ประเภท ตามการศึกษาของ Bramble และ Callahan [6] คือ 1) ความล่าช้าที่อ้างไม่ได้ (Non-Excusable Delay) ซึ่งเกิดจากตัวผู้รับเหมาโดยตรง 2) ความล่าช้าที่เรียกร้องค่าชดเชยได้ (Compensable Delay) โดยเกิดมาจากเจ้าของงาน/ฝ่าย

สถาปนิกและวิศวกร และ 3) ความล่าช้าที่ไม่สามารถเรียกร้องค่าชดเชยได้ (Non-Compensable Delay) ซึ่งเกิดจากเหตุสุดวิสัยและภัยธรรมชาติ หรือกลุ่มบุคคลที่สาม และมากกว่านั้นสาเหตุการเกิดความล่าช้าในงานก่อสร้างก็มาจากสาเหตุที่อยู่ในกลุ่ม 9 กลุ่มสาเหตุความล่าช้าซึ่งถูกจัดกลุ่มโดยการศึกษาของ Assaf Said และคณะ [9]

งานวิจัยนี้ต้องการศึกษาสาเหตุของความล่าช้าที่เกิดขึ้นในหมวดงานต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็น หมวดงานสถาปัตยกรรม (AR) หมวดงานโครงสร้าง (ST) หมวดงานระบบไฟฟ้า (ET) หมวดงานระบบประปาสุขาภิบาล (SN) และหมวดงานระบบปรับอากาศและสื่อน้ำ (AC) แล้วทำการเปรียบเทียบค่าความเสี่ยงต่อการเกิดความล่าช้าในงานแต่ละหมวด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการสังเคราะห์สาเหตุการเกิดความล่าช้าจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [6] [8] [9] ว่ามีสาเหตุใดบ้างที่เป็นสาเหตุการเกิดความล่าช้าในงานทั้ง 5 หมวด โดยสามารถสรุปสาเหตุการเกิดความล่าช้าในงานทั้ง 5 หมวดออกมาได้ทั้งสิ้น 18 สาเหตุ (D1-D18) รายละเอียดดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สาเหตุความล่าช้าที่นำเสนอ (D1-D18)

สาเหตุความล่าช้า		Bramble and Callahan (1987)				Assaf Sadi. A., et al. (1995)
		อ้างไม่ได้	อ้างได้			
			เรียกร้องค่าชดเชยได้		ไม่สามารถเรียกร้องค่าชดเชยได้	
D1	การอ่านแบบที่ผิดพลาด	X				Man.
D2	การที่ออกแบบ ออกแบบผิดพลาดไม่มีความชัดเจน ก่อให้เกิดความผิดพลาด			X		Cha.
D3	การก่อสร้างขัดแย้งกับหลักกฎหมายก่อสร้าง				X	Gov.
D4	การอนุมัติเปลี่ยนแปลงแก้ไขสัญญาจ้างเช่น งานเพิ่ม ลด		X			Cha.
D5	การเบิกจ่ายเงินตามงวดงานที่ได้เงินล่าช้า		X			Fin.
D6	แรงงานนัดหยุดงานและละทิ้งงาน หรือ จากการทำ เกษตรกรรม	X				Man.
D7	คณะกรรมการตรวจการจ้างความเห็นไม่ตรงกัน				X	Con.
D8	วิศวกรหรือช่างเทคนิคขาดประสบการณ์ในการควบคุม งาน	X				Man.

ตารางที่ 2 สาเหตุความล่าช้าที่นำเสนอ (D1-D18) ต่อ

สาเหตุความล่าช้า		Bramble and Callahan (1987)				Assaf Sadi, A., et al (1995)
		อ้างไม่ได้	อ้างได้			
			เรียกร้องค่าชดเชยได้		ไม่สามารถเรียกร้องค่าชดเชยได้	
		ผู้รับเหมา	เจ้าของ	สถาปนิกวิศวกร	บุคคลที่ 3	
D9	แรงงานฝีมือด้อยประสิทธิภาพทำให้ต้องแก้ไขงานบ่อยครั้ง	X				Man.
D10	การสั่งหยุดงาน เนื่องจากสาเหตุด้านความปลอดภัยหรือ เกิดอุบัติเหตุในระหว่างงาน	X				Sch.
D11	การที่ผู้ควบคุมงานหรือผู้รับจ้างไม่สามารถแก้ไขปัญหาเฉพาะหน้า	X				Man.
D12	การที่ไม่มีเครื่องจักรประจำ เป็นของตัวเองและ รอคิวการเช่าเครื่องจักร	X				Equ.
D13	เครื่องจักรไม่สามารถทำงานช่วงเวลาที่ประชาชนพักผ่อนได้				X	Gov.
D14	สถานที่ก่อสร้างห่างไกลแหล่งวัสดุ	X				Mat.
D15	การวางแผนด้านเวลาการและการประสานงาน ที่ไม่เหมาะสม	X				Sch.
D16	การวางแผนด้านแรงงานที่ไม่เหมาะสม	X				Man.
D17	การก่อสร้างที่ผิดหรือข้ามขั้นตอน	X				Sch.
D18	ความผิดปกติของ สภาพภูมิอากาศ และ ภัยธรรมชาติ				X	Env.

3. ความเสี่ยงต่อการเกิดความล่าช้า

3.1 ความหมายความเสี่ยง

ความเสี่ยง (Risk) หมายถึง โอกาส/เหตุการณ์ที่มีความไม่แน่นอน หรือสิ่งที่ทำให้แผนงานหรือการดำเนินการอยู่ ณ ปัจจุบันไม่สามารถบรรลุวัตถุประสงค์/เป้าหมายที่กำหนดไว้ได้ โดยก่อให้เกิดผลกระทบหรือความเสียหายต่อองค์กรทั้งในแง่ผลกระทบที่เป็นตัวเงินหรือผลกระทบที่มีต่อภาพลักษณ์และชื่อเสียงองค์กร [10]

3.2 ค่าความเสี่ยง (Risk Score) [10]

ความเสี่ยงในการเกิดความล่าช้าสามารถประเมินออกมาเป็นค่าความเสี่ยงได้ โดยพิจารณาจากระดับความถี่ (Likelihood) ในการเกิดเหตุการณ์ และระดับผลกระทบ (Impact) ของเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น โดยงานวิจัยนี้ได้มีการประเมินค่าทั้ง 2 ดังกล่าว โดยมีระดับการประเมินเป็น 5 ระดับ รายละเอียดดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ระดับการประเมินความถี่และผลกระทบ

ระดับความถี่ (Likelihood)		ระดับผลกระทบ (Impact)	
ระดับ	คำนิยาม	ระดับ	คำนิยาม
5	เกิดขึ้นบ่อยมาก	5	มีผลกระทบมากที่สุด
4	เกิดขึ้นบ่อย	4	มีผลกระทบมาก
3	เกิดขึ้นบางครั้ง	3	มีผลกระทบปานกลาง
2	เกิดขึ้นน้อยมาก	2	มีผลกระทบน้อย
1	ไม่เคยเกิดขึ้น	1	มีผลกระทบน้อยที่สุด

ค่าประเมินทั้ง 2 ค่าสามารถแสดงค่าความเสี่ยงของการเกิดความล่าช้าได้ด้วยแผนภาพของความเสี่ยง (Risk Map) ซึ่งแผนภาพความเสี่ยงนี้ เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับรายงานระดับความเสี่ยงที่ได้รับการประเมิน โดยแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และผลกระทบของการเกิดเหตุการณ์ โดยแผนภาพความเสี่ยงจะประกอบด้วย 2

แกนได้แก่ แกนระดับความถี่ (Likelihood) และแกนระดับผลกระทบ (Impact) และสามารถจัดลำดับความเสี่ยงที่เกิดขึ้นออกเป็น 5 กลุ่มตามสีของระดับความเสี่ยง ได้แก่ สีแดง เป็นกลุ่มที่ถูกประเมินอยู่ในประเภทความเสี่ยงสูง สีส้ม เป็นกลุ่มที่ถูกประเมินอยู่ในประเภทความเสี่ยงค่อนข้างสูง สีเหลือง เป็นกลุ่มที่ถูกประเมินอยู่ในประเภทความเสี่ยงปานกลาง และสีเขียว เป็นกลุ่มที่ถูกประเมินอยู่ในประเภทความเสี่ยงต่ำ ดังรูปที่ 2

ผลกระทบ (Impact)	5					
	4					
	3					
	2					
	1					
		1	2	3	4	5
		ความถี่ (Likelihood)				

รูปที่ 2 แผนภาพความเสี่ยง (Risk Map) ที่ใช้ประเมิน [10]

3.3 ดัชนีความสำคัญ (Importance Index) [8] [11]

ค่าดัชนีความสำคัญในแต่ละสาเหตุที่ส่งผลกระทบต่อความล่าช้าในงานก่อสร้างอาคาร สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (1)

$$\text{ดัชนีความสำคัญ} = \bar{X}\text{ระดับความถี่} \cdot \bar{X}\text{ระดับผลกระทบ} \quad (1)$$

4. กลุ่มตัวอย่างและเครื่องมือในการเก็บข้อมูล

กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการเก็บข้อมูลในครั้งนี้ เป็นโครงการก่อสร้างอาคารขนาดใหญ่ในจังหวัดนครพนม โดยนิยามของ “อาคารขนาดใหญ่” นั้นอิงตามประกาศกฎกระทรวง ฉบับที่ 55 (พ.ศ. 2543) [12] ซึ่งหมายถึงอาคารที่มีพื้นที่รวมกันทุกชั้นหรือชั้นหนึ่งชั้นใดในหลังเดียวกันเกิน 2,000 ตารางเมตร

4.1 กลุ่มตัวอย่าง

การเก็บข้อมูลงานวิจัยในครั้งนี้ใช้วิธีการสัมภาษณ์ผู้ให้ข้อมูลตามแบบสอบถามที่ถูกสร้างขึ้น กลุ่มตัวอย่างที่ให้ข้อมูลในครั้งนี้ประกอบไปด้วยผู้บริหารโครงการ ผู้รับเหมาผู้ออกแบบ และหัวหน้าคนงาน อายุผู้ให้ข้อมูลส่วนใหญ่ไม่เกิน 40 ปี และการศึกษาอยู่ในระดับต่ำกว่าปริญญาตรี คิดเป็นสัดส่วน 75% ของกลุ่มตัวอย่างทั้งหมด ประสบการณ์การทำงานจะอยู่ในช่วง 1-10 ปีเป็นส่วนใหญ่ คิดเป็นสัดส่วน 60% ซึ่งกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลในครั้งนี้ มีทั้งสิ้น 36 ราย โดยทั้งหมดกำลังปฏิบัติงานในโครงการก่อสร้างขนาดใหญ่จำนวน 7 โครงการในพื้นที่เขตอำเภอเมืองนครพนม จังหวัดนครพนม ซึ่งแต่ละโครงการมีมูลค่าโครงการตั้งแต่ 20 ล้านบาท ไปจนถึง 173 ล้านบาท

4.2 เครื่องมือในการเก็บข้อมูล

แบบสอบถามที่ถูกสร้างขึ้นนี้เป็นแบบสอบถามเกี่ยวกับระดับความถี่และระดับผลกระทบของ 18 สาเหตุ (D1-D18) ใน 5 หมวดงาน ประกอบไปด้วย หมวดงานสถาปัตยกรรม (AR) หมวดงานโครงสร้าง (ST) หมวดงานระบบไฟฟ้า (ET) หมวดงานระบบประปาสุขาภิบาล (SN) และหมวดงานระบบปรับอากาศและสื่อน้ำ (AC) ซึ่งจะเป็นกรอบในการถามถึงสาเหตุความล่าช้าในแต่ละหมวดงานของโครงการก่อสร้างอาคารขนาดใหญ่ ผู้ให้ข้อมูลจะต้องทำการให้ข้อมูลระดับความถี่ ระดับความผลกระทบของแต่ละสาเหตุ รวมไปถึงแนวทางป้องกันสาเหตุของความล่าช้าที่อาจจะเกิดขึ้น

5. ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

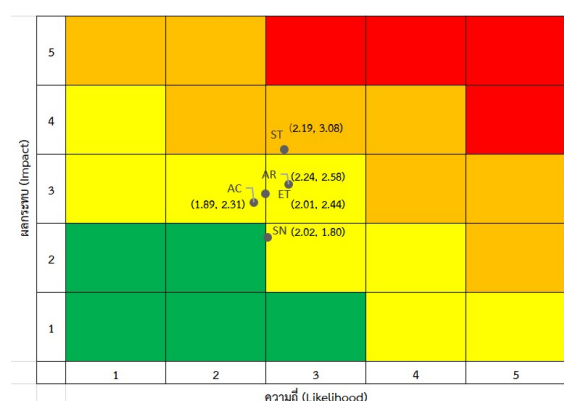
5.1 ค่าความเสี่ยงในแต่ละหมวดงาน

หลังจากที่ได้เก็บข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่างทั้ง 36 กลุ่มตัวอย่าง ผู้วิจัยจึงได้ทำการสรุปค่าระดับความถี่และระดับผลกระทบเฉลี่ยของทั้ง 18 สาเหตุความล่าช้า (D1-D18) ในแต่ละหมวดงานทั้ง 5 หมวดออกมา รายละเอียดดังตารางที่ 4 (ค่าดัชนีความสำคัญในตารางที่ 4 นี้ เป็นค่ารวมที่ได้จากทั้ง 18 สาเหตุสาเหตุความล่าช้าในแต่ละหมวดงาน) และสามารถเขียนแผนภาพความเสี่ยง (Risk Map) ของงานแต่ละหมวดออกมาได้ดังรูปที่ 3

ตารางที่ 4 ระดับผลกระทบและระดับความถี่ของความล่าช้าในแต่ละหมวดงาน

ค่าเฉลี่ยของระดับผลกระทบและระดับความถี่	ระดับผลกระทบ		ระดับความถี่		ดัชนีความล่าช้า	ดัชนีความสำคัญ (%)
	$\bar{x}$	S.D	$\bar{x}$	S.D		
หมวดงานสถาปัตยกรรม (AR)	2.58	0.10	2.24	0.10	104.11	23%
หมวดงานโครงสร้าง (ST)	3.08	0.12	2.19	0.12	121.87	27%
หมวดงานระบบไฟฟ้า (ET)	2.44	0.14	2.01	0.11	88.09	19%
หมวดงานระบบประปาสุขาภิบาล (SN)	1.80	0.11	2.02	0.20	65.82	14%
หมวดงานระบบปรับอากาศและสื่อสาร (AC)	2.31	0.08	1.89	0.12	78.43	17%
รวม					458.32	-

จากผลตามตารางที่ 4 จะเห็นได้ว่าในหมวดงานโครงสร้าง (ST) นั้น เป็นหมวดงานที่มีค่าดัชนีความสำคัญ (Importance Index) สูงกว่าหมวดงานอื่น ๆ ด้วยกัน โดยมีค่า 121.87 ของค่าดัชนีความสำคัญ หรือคิดเป็น 27% สิ่งที่ส่งผลให้หมวดงานโครงสร้างเป็นงานที่มีดัชนีความสำคัญสูงกว่าหมวดงานอื่น ๆ เนื่องจากงานโครงสร้างเป็นงานที่มีระดับผลกระทบต่อการเกิดความล่าช้าเฉลี่ยเท่ากับ 3.08 ซึ่งนิยามได้ว่าหมวดงานนี้มีผลกระทบต่อการเกิดความล่าช้าอยู่ในระดับปานกลาง ขณะที่หมวดงานที่เหลือนั้นมีผลกระทบเฉลี่ยอยู่ในระดับผลกระทบที่น้อยเท่านั้น ส่วนระดับความถี่เฉลี่ยของหมวดงานทั้ง 5 นั้น อยู่ในระดับความถี่ที่ส่งผลให้เกิดความล่าช้าในระดับความถี่ที่น้อยมากในทุกหมวดงาน



รูปที่ 3 แผนภาพความเสี่ยงความล่าช้าในงานทั้ง 5 หมวด

เมื่อพิจารณาแผนภาพความเสี่ยงในรูปที่ 3 ที่แสดงการจัดกลุ่มความเสี่ยงในแต่ละหมวดงาน พบว่าในหมวด

งานสถาปัตยกรรม (AR) หมวดงานระบบไฟฟ้า (ET) หมวดงานระบบประปาสุขาภิบาล (SN) และหมวดงานระบบปรับอากาศและสื่อสาร (AC) นั้นถูกจัดกลุ่มให้อยู่ในหมวดงานที่ถูกประเมินให้อยู่ในประเภทความเสี่ยงปานกลาง (สีเหลือง) ยกเว้น หมวดงานโครงสร้าง (ST) เพียงหมวดเดียวที่ถูกประเมินให้อยู่ในประเภทความเสี่ยงค่อนข้างสูง (สีแดง) สะท้อนถึงความคิดเห็นของกลุ่มตัวอย่างที่ให้ข้อมูล ว่าหมวดงานที่จะส่งผลกระทบต่อการเกิดความล่าช้ามากที่สุด คืองานในหมวดงานโครงสร้าง เนื่องจากกลุ่มตัวอย่างมีความคิดเห็นว่าหมวดงานโครงสร้างนั้นเหมือนเป็นเส้นทางวิกฤตของโครงการ ถ้าเกิดความล่าช้าในกิจกรรมหมวดงานโครงสร้าง ก็จะส่งผลให้เกิดการล่าช้าของทั้งโครงการ สอดคล้องกับผลการวิจัยของ Abdul-Rahman และคณะ [3] ที่พบว่าหมวดงานก่อสร้างที่เกิดเหตุการณ์ล่าช้ามากที่สุดคือ หมวดงานโครงสร้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกิจกรรมงานฐานราก เนื่องจากการขาดข้อมูลในเรื่องการสำรวจดินที่เพียงพอ

5.2 สาเหตุความล่าช้าในหมวดงานโครงสร้าง

หลังจากที่ทราบถึงข้อมูลว่า หมวดงานโครงสร้างเป็นหมวดงานที่ส่งผลกระทบต่อการเกิดความล่าช้าของโครงการก่อสร้างขนาดใหญ่ในเขตพื้นที่จังหวัดนครพนม ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์สาเหตุที่ส่งผลให้งานโครงสร้างเป็นหมวดงานที่ต้องให้ความสำคัญ เมื่อพิจารณาถึงค่าความเสี่ยงในเรื่องการเกิดความล่าช้า

ตารางที่ 5 ระดับผลกระทบและระดับความถี่ของสาเหตุความล่าช้า (D1-D18) ในหมวดงานโครงสร้าง

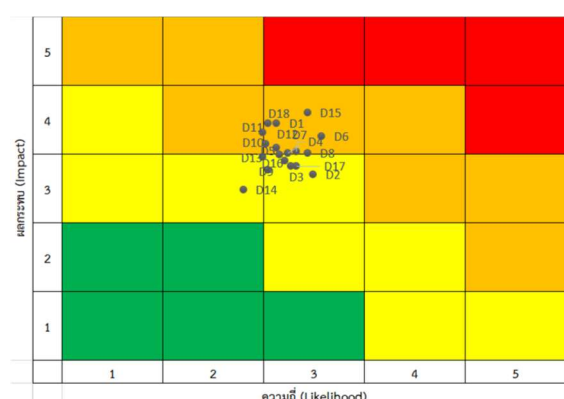
สาเหตุความล่าช้า		ระดับผลกระทบ		ระดับความถี่		ดัชนีความสำคัญ	ดัชนีความสำคัญ (%)	อันดับค่าดัชนีความสำคัญ
		$\bar{x}$	S.D	$\bar{x}$	S.D			
D1	การอ่านแบบที่ผิดพลาด	3.46	1.37	2.14	0.96	7.40	6.07	3
D2	การที่ออกแบบ ออกแบบผิดพลาดไม่มีความชัดเจน ก่อให้เกิดความผิดพลาด	2.72	1.21	2.50	0.91	6.79	5.57	8
D3	การก่อสร้างขัดแย้งกับหลักกฎหมายก่อสร้าง	2.84	1.21	2.28	0.91	6.46	5.30	14
D4	การอนุมัติเปลี่ยนแปลงแก้ไขสัญญาจ้างเช่นงานเพิ่ม ลด	3.05	1.25	2.33	1.04	7.12	5.85	5
D5	การเบิกจ่ายเงินตามงวดงานที่ได้เงินล่าช้า	3.00	1.35	2.17	1.08	6.50	5.33	12
D6	แรงงานนัดหยุดงานและละทิ้งงาน หรือ จากการทำเกษตรกรรม	3.27	1.45	2.58	0.97	8.45	6.93	2
D7	คณะกรรมการตรวจการจ้างความเห็นไม่ตรงกัน	3.03	1.30	2.25	1.00	6.81	5.59	7
D8	วิศวกรหรือช่างเทคนิคขาดประสบการณ์ในการควบคุมงาน	3.03	1.48	2.44	0.88	7.40	6.07	4
D9	แรงงานฝีมือด้อยประสิทธิภาพทำให้ต้องแก้ไขงานบ่อยครั้ง	2.78	1.11	2.06	1.04	5.72	4.70	17
D10	การสั่งหยุดงาน เนื่องจากสาเหตุด้านความปลอดภัย หรือ เกิดอุบัติเหตุในระหว่างงาน	3.16	1.30	2.03	0.97	6.41	5.26	15
D11	การที่ผู้ควบคุมงานหรือผู้รับจ้างไม่สามารถแก้ไขปัญหาเฉพาะหน้า	3.32	1.33	2.00	0.79	6.65	5.46	9
D12	การที่ไม่มีเครื่องจักรประจำ เป็นของตัวเอง และ รอคิวการเช่าเครื่องจักร	3.11	1.54	2.14	0.76	6.65	5.46	10
D13	เครื่องจักรไม่สามารถทำงานช่วงเวลาที่ประชาชนพักผ่อนได้	2.97	1.24	2.00	0.72	5.95	4.88	16
D14	สถานที่ก่อสร้างห่างไกลแหล่งวัสดุ	2.49	1.26	1.81	0.86	4.49	3.68	18
D15	การวางแผนด้านเวลาการและการประสานงาน ที่ไม่เหมาะสม	3.62	1.11	2.44	0.77	8.85	7.26	1
D16	การวางแผนด้านแรงงานที่ไม่เหมาะสม	2.92	1.14	2.22	0.83	6.49	5.32	13
D17	การก่อสร้างที่ผิดหรือข้ามขั้นตอน	2.84	1.28	2.33	0.76	6.62	5.43	11
D18	ความผิดปกติของ สภาพภูมิอากาศ และ ภัยธรรมชาติ	3.46	1.45	2.06	1.04	7.11	5.84	6
ค่าเฉลี่ย		3.08	0.12	2.19	0.12	-	-	-
รวม						121.87	100	-

เมื่อนำค่าระดับผลกระทบเฉลี่ยและระดับความถี่เฉลี่ยคูณกันในแต่ละสาเหตุความล่าช้าตามสมการที่ (1) ทำให้ได้ค่าดัชนีความสำคัญในทุกสาเหตุ ดังแสดงตามตารางที่ 5 ซึ่งทำให้พบว่าสาเหตุที่มีค่าดัชนีความสำคัญสูงสุด 5 อันดับแรก คือ D15: การวางแผนด้านเวลาการ

และการประสานงานที่ไม่เหมาะสม D6: แรงงานนัดหยุดงานและละทิ้งงาน หรือ จากการทำเกษตรกรรม D1: การอ่านแบบที่ผิดพลาด D8: วิศวกรหรือช่างเทคนิคขาดประสบการณ์ในการควบคุมงาน และ D4: การอนุมัติเปลี่ยนแปลงแก้ไขสัญญาจ้างเช่น งานเพิ่ม ลด โดยมีค่า

ดัชนีความสำคัญเท่ากับ 8.85, 8.45, 7.40, 7.40 และ 7.12 ตามลำดับ ซึ่ง 4 ใน 5 สาเหตุดังกล่าวนี้ถูกจัดอยู่ในประเภทความล่าช้าที่อ้างไม่ได้ (ส่วนของผู้รับเหมา) ส่วน 1 สาเหตุนั้นถูกจัดในประเภทความล่าช้าที่อ้างและเรียกร้องค่าชดเชยได้ (ส่วนของผู้จ้างงาน) ซึ่งก็คือสาเหตุ D4: การอนุมัติเปลี่ยนแปลงแก้ไขสัญญาจ้างงานเพิ่มลด ซึ่งตรงกับการศึกษาของ Abdul-Rahman และคณะ [3] ที่พบว่า การเปลี่ยนแปลงงานของผู้จ้างงานนั้นเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นและเกิดการล่าช้าของโครงการที่ 43.4% ซึ่งสาเหตุที่ได้ค่าดัชนีความสำคัญสูงสุด 4 ตัวแรกนี้สะท้อนให้เห็นภาพรวมการบริหารจัดการโครงการก่อสร้างของกลุ่มตัวอย่างที่ไม่มีประสิทธิภาพมากนัก ไม่ว่าจะเป็นเรื่อง การวางแผนและประสานงาน [13] การจัดการด้านแรงงาน ตลอดจนความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากตัวบุคลากรของผู้รับจ้าง [3] จนกลายเป็นสาเหตุสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อความล่าช้าของโครงการ

สาเหตุที่ได้ค่าดัชนีความสำคัญน้อยที่สุดคือ D14: สถานที่ก่อสร้างห่างไกลแหล่งวัสดุ ซึ่งมีค่าดัชนีความสำคัญเท่ากับ 4.40 ซึ่งอาจเป็นได้ทั้งกลุ่มตัวอย่างที่เก็บข้อมูลเป็นโครงการที่มีที่ตั้งอยู่ในพื้นที่ภายในอำเภอเมืองนครพนม ทำให้ไม่ได้มีปัญหาด้านการสั่งซื้อวัสดุจึงส่งผลกระทบต่อความล่าช้าไม่มากนัก



รูปที่ 4 แผนภาพความเสี่ยงของสาเหตุความความล่าช้าทั้ง 18 สาเหตุในหมวดงานโครงสร้าง

เมื่อพิจารณารูปที่ 4 ซึ่งแสดงแผนภาพของความเสี่ยงของสาเหตุความความล่าช้าทั้ง 18 สาเหตุในหมวดงานโครงสร้าง จะพบว่าไม่มีสาเหตุใดเลยที่ถูกจัดอยู่ในกลุ่มที่ถูกประเมินอยู่ในประเภทความเสี่ยงสูง (สีแดง) หรือถูกจัดอยู่ในกลุ่มความเสี่ยงต่ำ (สีเขียว) โดยทั้ง 18 สาเหตุถูกประเมินอยู่ใน 2 ประเภทความเสี่ยงคือ ประเภทความเสี่ยงค่อนข้างสูง (สีส้ม) และประเภทความเสี่ยงปานกลาง (สีเหลือง) เท่านั้น

สิ่งที่น่าสนใจก็คือสาเหตุที่ถูกจัดอยู่ในประเภทของความเสี่ยงค่อนข้างสูง (สีส้ม) นั้นมีอยู่ถึง 11 สาเหตุด้วยกัน ประกอบไปด้วย D15: การวางแผนด้านเวลาการและการประสานงานที่ไม่เหมาะสม D6: แรงงานนัดหยุดงานและละทิ้งงาน หรือ จากการทำเกษตรกรรม D1: การอ่านแบบที่ผิดพลาด D8: วิศวกรหรือช่างเทคนิคขาดประสบการณ์ในการควบคุมงาน D4: การอนุมัติเปลี่ยนแปลงแก้ไขสัญญาจ้างงานเพิ่มลด D18: ความผิดปกติของ สภาพภูมิอากาศ และ ภัยธรรมชาติ D7: คณะกรรมการตรวจการจ้างงานเห็นไม่ตรงกัน D11: การที่ผู้ควบคุมงานหรือผู้รับจ้างไม่สามารถแก้ไขปัญหาลเฉพาะหน้า D12: การที่ไม่มีเครื่องจักรประจำ เป็นของตัวเอง และ รอคิวการเช่าเครื่องจักร D5: การเบิกจ่ายเงินตามงวดงานที่ได้เงินล่าช้า และสุดท้าย D10: การสั่งหยุดงานเนื่องจากสาเหตุด้านความปลอดภัย หรือ เกิดอุบัติเหตุในระหว่างงาน ซึ่งตีความได้ว่าทั้ง 11 สาเหตุดังกล่าวถูกจัดอยู่ในกลุ่มสาเหตุที่มีความเสี่ยงค่อนข้างสูงที่จะส่งผลกระทบในการเกิดความล่าช้าของโครงการก่อสร้าง ดังนั้นผู้บริหารโครงการหรือบุคลากรที่เกี่ยวข้องกับการจัดการโครงการต้องให้ความสำคัญในสาเหตุดังกล่าวให้มาก และควรจะมีกลยุทธ์ในการจัดการกับสาเหตุข้างต้นเพื่อหลีกเลี่ยงความล่าช้าที่อาจเกิดขึ้นต่อโครงการ

สาเหตุที่ถูกจัดกลุ่มอยู่ในและประเภทความเสี่ยงปานกลาง (สีเหลือง) ประกอบไปด้วย 7 สาเหตุที่เหลือ ได้แก่ D2: การที่ออกแบบ ออกแบบผิดพลาดไม่มีความชัดเจนก่อให้เกิดความผิดพลาด D17: การก่อสร้างที่ผิดหรือข้ามขั้นตอน D16: การวางแผนด้านแรงงานที่ไม่เหมาะสม D3:

การก่อสร้างขัดแย้งกับหลักกฎหมายก่อสร้าง D13: เครื่องจักรไม่สามารถทำงานช่วงเวลาที่ประชาชนพักผ่อนได้ D9: แรงงานฝีมือด้อยประสิทธิภาพทำให้ต้องแก้ไขงานบ่อยครั้ง และ D14:สถานที่ก่อสร้างห่างไกลแหล่งวัสดุ ซึ่งสาเหตุเหล่านี้ผู้บริหารโครงการอาจไม่ต้องให้ความสนใจมากนัก เนื่องจากเป็นสาเหตุที่ส่งผลต่อการล่าช้าของโครงการในระดับปานกลางเท่านั้น

5.3 แนวทางป้องกันสาเหตุความล่าช้า

หลังจากที่จัดกลุ่มประเภทความเสี่ยงต่อการเกิดความล่าช้าในโครงการก่อสร้างโดยใช้แผนภาพความเสี่ยงและได้ค่าดัชนีความสำคัญของแต่ละสาเหตุของความเสี่ยงในหมวดงานโครงสร้างแล้ว ผู้วิจัยได้พิจารณาสาเหตุของความความเสี่ยงที่มีค่าดัชนีความสำคัญสูงสุด 5 อันดับแรกในหมวดงานโครงสร้างมาใช้ในการวิเคราะห์หาข้อมูลแนวทางป้องกันสาเหตุดังกล่าว ซึ่งแนวทางการป้องกันสาเหตุที่จะนำเสนอต่อไปนี้เป็นข้อมูลที่ได้จากการเก็บข้อมูลในกลุ่มตัวอย่างทั้ง 36 รายผนวกกับข้อมูลงานวิจัยที่ผ่านมา ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

5.3.1 สาเหตุเรื่อง การวางแผนด้านเวลาการและการประสานงานที่ไม่เหมาะสม (D15)

สำหรับสาเหตุความล่าช้าในเรื่องนี้ เจ้าของโครงการหรือผู้รับเหมาต้องมีการจัดการหาบุคลากรที่เชี่ยวชาญในการบริหารเวลาปฏิบัติงานในโครงการเพื่อลดความเสี่ยงต่อการเกิดปัญหา มีการใช้การวางแผนงานโดยวิธี Critical Path Method : CPM มาใช้ [14] เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจสอบและควบคุมการทำงานมากกว่านั้น ควรมีการจัดประชุมเป็นประจำทุกสัปดาห์โดยผู้ที่มีอำนาจสามารถตัดสินใจได้ในแต่ละงาน เพื่อให้แต่ละทีมงานได้มีการประสานการทำงานไปในทิศทางเดียวกัน และลดปัญหาด้านการเข้าใจที่คลาดเคลื่อน

5.3.2 สาเหตุเรื่อง แรงงานนัดหยุดงานและละทิ้งงาน หรือ จากการทำเกษตรกรรม (D6)

แนวทางการป้องกันอาจจะเป็นการปรับเปลี่ยนแผนการทำงานให้สอดคล้องกับปริมาณแรงงานที่มีอยู่ จัดหาผู้รับเหมาย่อยที่มีศักยภาพและมีแรงงานที่เพียงพอ

จัดหาแรงงานต่างด้าวที่ถูกต้องตามกฎหมายมาทดแทนแรงงานที่ไม่เพียงพอ หรือในช่วงที่ยังมีแรงงานเพียงพอ อาจจะต้องมีการเร่งงานให้มีอัตราผลิตภาพที่สูงขึ้นก่อนที่แรงงานจะลดหายไปในช่วงเกษตรกรรม [15] หรืออาจจะเป็นการจัดหาเครื่องจักรกลมาช่วยลดปริมาณแรงงานที่ไม่เพียงพอ เช่น เครื่องพ่นปูนฉาบ เป็นต้น

5.3.3 สาเหตุเรื่อง การอ่านแบบที่ผิดพลาด (D1)

ควรที่จะมีการปรึกษาหารือในเรื่อง Detail Drawing อย่างสม่ำเสมอระหว่างผู้ปฏิบัติงานและผู้ออกแบบ [15] ให้มีความเข้าใจในแบบที่ตรงกันและลดความผิดพลาดในระหว่างการก่อสร้าง

5.3.4 สาเหตุเรื่อง วิศวกรหรือช่างเทคนิคขาด

ประสบการณ์ในการควบคุมงาน (D8)

ผู้รับเหมาต้องมีการสรรหาบุคลากรที่มีประสบการณ์และมีความเหมาะสมกับลักษณะงาน [16] โดยบุคลากรมีความสำคัญเป็นอย่างมากที่จะขับเคลื่อนให้งานสำเร็จตามแผนงานที่ได้วางไว้ หากบุคลากรไม่มีความชำนาญเพียงพอ ก็จะส่งผลให้งานเกิดมีปัญหาล่าช้าและทำให้เกิดความล่าช้าต่อโครงการ หรืออาจจะเป็นการส่งบุคลากรเข้ารับการฝึกอบรมและเพิ่มเติมทักษะในการทำงาน

5.3.5 สาเหตุเรื่อง การอนุมัติเปลี่ยนแปลงแก้ไขสัญญาจ้างเช่น งานเพิ่ม ลด (D4)

สำหรับสาเหตุความล่าช้าในเรื่องนี้เกิดมาจากเจ้าของงานหรือเจ้าของโครงการ วิธีการแก้ปัญหา เจ้าของโครงการอาจจะต้องมีการตรวจสอบแบบและข้อกำหนดต่าง ๆ ให้ถี่ถ้วนก่อนที่จะอนุมัติแบบก่อสร้างให้กับผู้รับจ้าง [16] และแบบก่อสร้างดังกล่าวควรเป็นแบบที่ตรงกับความต้องการและวัตถุประสงค์ของโครงการมากที่สุด

5.3.1 Bramble และ Callahan [6] ได้แบ่งประเภทของความ

6. สรุปผล

จากการสำรวจสาเหตุความล่าช้าของกลุ่มตัวอย่างโครงการก่อสร้างอาคารขนาดใหญ่ในเขตพื้นที่จังหวัด

นครพนม โดยพิจารณาจากการประเมินค่าระดับความถี่ และระดับผลกระทบพร้อมทั้งนำเสนอด้วยแผนภาพความเสี่ยง พบว่าหมวดงานที่ส่งผลกระทบต่อการเกิดความล่าช้าของโครงการมากที่สุดคือหมวดงานโครงสร้าง และเมื่อพิจารณาลงลึกลงไปถึง 18 สาเหตุการเกิดความล่าช้า ในหมวดงานโครงสร้างพบว่าสามารถจัดกลุ่มค่าความเสี่ยงได้เป็น 2 กลุ่มด้วยกัน คือ กลุ่มสาเหตุที่มีความเสี่ยงค่อนข้างสูง (สีส้ม) และกลุ่มสาเหตุที่มีความเสี่ยงปานกลาง (สีเหลือง) โดยสาเหตุที่มีค่าดัชนีความสำคัญสูงสุด 5 อันดับแรกและถูกจัดอยู่ในกลุ่มสาเหตุที่มีความเสี่ยงค่อนข้างสูงด้วยกัน ได้แก่ D15: การวางแผนด้านเวลาและการประสานงานที่ไม่เหมาะสม D6: แรงงานนัดหยุดงานและละทิ้งงาน หรือ จากการทำเกษตรกรรม D1: การอ่านแบบที่ผิดพลาด D8: วิศวกรหรือช่างเทคนิคขาดประสบการณ์ในการควบคุมงาน และ D4: การอนุมัติเปลี่ยนแปลงแก้ไขสัญญาจ้างเช่น งานเพิ่ม ลด ซึ่ง 4 สาเหตุแรกดังกล่าวนี้ถูกจัดอยู่ในประเภทความล่าช้าที่อ้างไม่ได้ (ส่วนของผู้รับเหมา) ส่วน 1 สาเหตุสุดท้ายนั้นถูกจัดในประเภทความล่าช้าที่อ้างและเรียกร้องค่าชดเชยได้ (ส่วนของผู้จ้างงาน)

ผลของการศึกษานี้ช่วยให้ผู้บริหารโครงการสามารถนำข้อมูลที่ได้ไปช่วยในการตัดสินใจสำหรับการวางแผนการทำงานหรือวางแผนกลยุทธ์ต่าง ๆ โดยเน้นพิจารณาสาเหตุที่ถูกจัดอยู่ในประเภทความเสี่ยงค่อนข้างสูงเป็นหลัก ซึ่งจะทำให้ผู้บริหารโครงการไม่ต้องให้ความกังวลกับทุกสาเหตุความล่าช้าในการบริหารโครงการก่อสร้างอาคารขนาดใหญ่

7. ข้อจำกัดและข้อเสนอแนะ

7.1 ข้อมูลที่ใช้ในการสำรวจนี้ เป็นข้อมูลที่ได้มาจากโครงการก่อสร้างของจังหวัดนครพนมเท่านั้น และระบุเฉพาะเป็นโครงการก่อสร้างอาคารขนาดใหญ่ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้นั้นทำให้สามารถประยุกต์ใช้ได้กับโครงการก่อสร้างในจังหวัดที่มีบริบทที่คล้ายกันเท่านั้น

7.2 การศึกษาในครั้งนี้เป็นการศึกษาโดยใช้กลุ่มตัวอย่างที่สามารถเข้าถึงข้อมูลได้เพื่อที่จะได้ข้อมูลอย่างพอเพียงสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลที่มีนัยยะสำคัญ ถึงแม้ว่าข้อมูลที่ใช้ในวิเคราะห์นั้นสามารถเป็นตัวแทนทั่วไปของงานก่อสร้างอาคารขนาดใหญ่ในจังหวัดนครพนมได้ แต่วิธีการเก็บข้อมูลดังกล่าวก็ยังคงเป็นปัญหาด้านความถูกต้องของข้อมูลอยู่ ดังนั้น การศึกษาต่อเนื่องจากนี้อาจต้องนำกลยุทธ์การสุ่มตัวอย่างแบบชั้น (Stratified Sampling) เข้ามาลบเลือนข้อด้อยดังกล่าวมากกว่านั้นควรมีการวิเคราะห์ผลความแตกต่างของกลุ่มที่เก็บข้อมูล ไม่ว่าจะเป็นตำแหน่งงาน อายุงาน วุฒิการศึกษา และขนาดของมูลค่าของโครงการเพิ่มเติมในอนาคต

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] สัญชัย เผือกโสภณ, “สาเหตุความล่าช้าของผู้รับเหมาก่อสร้างในโครงการก่อสร้างอาคารขนาดใหญ่,” วิทยานิพนธ์, วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2549.
- [2] C. T. Hendrickson and T. Au, “*Project management for construction: Fundamental concepts for owners, engineers, architects, and builders.*” Chris Hendrickson, 1989.
- [3] H. Abdul-Rahman, M. A. Berawi, A. R. Berawi, O. Mohamed, M. Othman, and I. A. Yahya, “Delay Mitigation in the Malaysian Construction Industry,” *J. Constr. Eng. M.*, vol. 132, no. 2, pp. 125-133, 2006.
- [4] กรมบัญชีกลาง. (23 กุมภาพันธ์ 2562). รายงานภาวะเศรษฐกิจการคลังจังหวัดนครพนมประจำเดือนพฤษภาคม 2561. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: shorturl.at/fmpP2

- [5] สำนักงานแรงงานจังหวัดนครพนม. (23 กุมภาพันธ์ 2562). ภาวะเศรษฐกิจและสังคมของจังหวัดนครพนม ปี 2557. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: http://nakhonphanom.mol.go.th/sites/nakhonphanom.mol.go.th/files/5bththii_1__aitr_2-57__0.pdf
- [6] B. B. Bramble and M. T. Callahan, "Construction Delay Claims." Aspen Publishers, 2010.
- [7] S. Scott, "Dealing with delay claims: a survey," *Int. J. Proj. Manag.*, vol. 11, no. 3, pp. 143-153, 1993.
- [8] วุฒิพงศ์ อ่อนศรีสมบัติ, "การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความล่าช้าในโครงการก่อสร้างอาคาร ในเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ," วิทยานิพนธ์, วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, การบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2556.
- [9] A. Assaf Sadi, M. Al-Khalil, and M. Al-Hazmi, "Causes of Delay in Large Building Construction Projects," *J. Manage. Eng.*, vol. 11, no. 2, pp. 45-50, 1995.
- [10] ตลาดหลักทรัพย์แห่งประเทศไทย. (23 กุมภาพันธ์ 2562). กรอบการบริหารความเสี่ยงองค์กร (ERM Framework). [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: https://www.set.or.th/th/about/overview/files/Risk_2015.pdf
- [11] ทัด นาวิเชียร, "ปัจจัยที่มีผลต่อความล่าช้าในโครงการก่อสร้างถนนขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นในเขตปริมณฑล," วิทยานิพนธ์, วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2555.
- [12] กฎกระทรวง ฉบับที่ 55 ออกตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522, กระทรวงมหาดไทย, 2543.
- [13] L. J. Goodman and R. N. Love, "Project Planning and Management: An Integrated Approach." Pergamon Press, 1980.
- [14] ประวิทย์ แก้วเจริญ, "การลดการทำงานเสร็จล่าช้าโดยการประยุกต์ใช้เทคนิค CPM : กรณีศึกษา บริษัทรับเหมาก่อสร้างตัวอย่าง," วิทยานิพนธ์, วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2552.
- [15] พรชมล เทียนพลู และ อภิชาติ ประสิทธิ์สม, "ปัจจัยที่ทำให้เกิดความล่าช้าในการดำเนินงานโครงการก่อสร้างอาคาร ชลประทาน กรณีศึกษา: โครงการก่อสร้างอาคารชลประทาน ของสำนักงานชลประทานที่ 9," *วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต*, 8 (2), หน้า. 266-286, 2561.
- [16] วรพล จันทนลิน, "แนวทางการป้องกันและแก้ไขความล่าช้าโครงการก่อสร้างอาคารชุด: กรณีศึกษาอาคารชุดในเขตกรุงเทพมหานคร," วิทยานิพนธ์, สถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาสถาปัตยกรรม, คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2553.

การสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็น อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

Stabilization using Reference-Voltage-Based Active Compensator Method For AC-DC Power System Feeding Power Electronic Load

กษมา รุ่งรัตน์รัชชัย¹ เทพพนม โสกาเพิ่ม² กองพัน อารีรักษ์^{1*}

¹สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

²ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

Kasama Rungrattawatchai¹ Theppanom Sopapirm² Kongpan Areerak^{1*}

¹School of electrical engineering, Suranaree university of technology

111 University Avenue Muang, Nakhon Rachasima, Thailand, 30000

²Department of electrical power engineering, Mahanakhon university of technology

*Corresponding author E-mail: kongpan@sut.ac.th

(Received: September 19, 2019; Accepted: December 20, 2019)

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอหลักการสร้างเสถียรภาพสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบักก์ วงจรแปลงผันที่มีการควบคุมดังกล่าวจะมีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า การขาดเสถียรภาพอาจจะส่งผลทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าเกิดความเสียหาย และอาจลดสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุม ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการศึกษาการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี (Reference-Voltage-Based Active Compensator : RVC) ซึ่งเป็นหนึ่งในวิธีการสร้างสัญญาณชดเชยไปยังส่วนการควบคุมของโหลดเพื่อทำให้ระบบไฟฟ้ากลับมามีเสถียรภาพ ซึ่งเหมาะสำหรับระบบไฟฟ้าที่ไม่สามารถควบคุมแรงดันบัสดีซีได้ จากการศึกษาผ่านทางแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี เพื่อนำมาวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีค่าเจาะจง และยืนยันผลผ่านทางผลการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกกำลังไฟฟ้าด้วยโปรแกรม MATLAB พบว่าการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีที่ได้นำเสนอในบทความนี้สามารถทำให้ระบบที่ขาดเสถียรภาพเนื่องจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวกลับมามีเสถียรภาพได้ตลอดช่วงการทำงาน

คำสำคัญ: การสร้างเสถียรภาพ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว วงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุม

ABSTRACT

This paper presents the stabilization for 3 phase AC-DC converter feeding controlled buck converter. Power converters with their controllers normally behave as constant power loads that can affect system stability. Therefore, the Reference-Voltage-Based active compensator (RVC) method will be presented to mitigate the instability due to the constant power load. The results will show that the proposed system can become back from unstable to stable operation when the RVC is applied. The

simulation via the exact topological model of MATLAB is used to validate the theoretical results in which the good agreement between the theory and the simulation is achieved.

Keyword: Stabilization, Constant power loads (CPL), Controlled converters.

รายการสัญลักษณ์			
V_{sd}, V_{sq}	แรงดันไฟฟ้าบัสแหล่งจ่ายไฟฟ้าบนแกนดี คิว	K_{pv}, K_{iv}	ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดูบ แรงดันไฟฟ้า
I_{sd}, I_{sq}	กระแสไฟฟ้าบัสแหล่งจ่ายไฟฟ้าบนแกนดี คิว	K_{pi}, K_{ii}	ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดูบ กระแสไฟฟ้า
$V_{bus,d}, V_{bus,q}$	แรงดันไฟฟ้าบัสอินพุตไดโอดบนแกนดีคิว	X_i, X_v	อัตราการใช้เปลี่ยนแปลงรูปกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้า
R_{eq}, L_{eq}, C_{eq}	ค่าพารามิเตอร์ของสายส่งกำลังไฟฟ้า	d	ค่าดัชนีการสวิตช์ของวงจรแปรผันกำลัง แบบบัทค
r_L, L_{dc}	ค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำของวงจร กรอง	1. บทนำ ปัจจุบันวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้านิยมใช้อย่าง แพร่หลาย ซึ่งวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมจะมี พฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (Constant power loads : CPLs) [1-2] ซึ่งโหลดในลักษณะนี้ จะมีลักษณะเป็น ค่าอิมพีแดนซ์ติดลบต่อระบบโดยรวม และโดยทั่วไปโหลดที่ เป็นวงจรแปลงผันที่มีการควบคุมจะต่อกับระบบไฟฟ้ากำลัง ผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (low pass filter) ดังนั้นค่า อิมพีแดนซ์ติดลบของโหลดชนิดนี้จะไปลดค่าความต้านทาน ของวงจรกรอง (damping) ซึ่งปกติค่าความต้านทานของ วงจรกรองชนิดนี้จะมีค่าบวก การลดลงของค่าความ ต้านทานของวงจรกรองจะทำให้เกิดการกระเพื่อมของ สัญญาณขึ้นถ้าระบบมีค่าอิมพีแดนซ์ติดลบมากพอ นั่นคือ ปริมาณโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่ามากพอ จะทำให้เกิดการ กระเพื่อมของสัญญาณมีค่าสูงมาก หรือทำให้ระบบไฟฟ้า กำลังโดยรวมขาดเสถียรภาพได้ ซึ่งการขาดเสถียรภาพจะ ส่งผลต่อความสามารถการทำงานของระบบควบคุม [3] ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ ซึ่งในบทความนี้ใช้วิธีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพแบบ แอคทีฟ [4-5] ด้วยวิธีอาร์วีซี(Reference-Voltage-Based Active Compensator : RVC) ซึ่งมีหลักการโดยอาศัยการ	
r_C, C_{dc}	ค่าพารามิเตอร์ตัวเก็บประจุของวงจร กรอง		
V_{dc}, I_{Cdc}	แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่บัส แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง		
L_{dc}	ความเหนี่ยวนำของวงจรกรอง		
C_{dc}	ความจุไฟฟ้าของวงจรกรอง		
I_{dc}	กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำวงจร กรอง		
I_{CPL}, P_{CPL}	กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าของวงจร แปลงผันกำลังแบบบัทค		
$I_{L,b}, V_O$	กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ของวงจรแปรผันกำลังแบบบัทค		
L_b, C_b	ค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปรผันแบบบัทค		
R	ความต้านทานของโหลดวงจรแปลงผัน กำลังแบบบัทค		

ฉีตแรงดันชดเชยเข้าไปในระบบควบคุมของวงจรแปลงผันกำลังแบบบักท์ที่ได้มาจากการวัดค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุของวงจรกรอง และนำมาถูกปรับคูณด้วยค่าอัตราขยาย ซึ่งผลที่ได้จะเป็นการจำลองแรงดันตกเพิ่มเข้ามาในระบบไฟฟ้ากำลัง จากนั้นแรงดันตกที่ได้จะถูกกรองผ่านวงจรกรองความถี่แบบผ่านต่ำ (Low-pass filter : LPF) เพื่อให้ความถี่ที่ผ่านเข้ามาอยู่ในย่านความถี่เรโซแนนซ์เท่านั้น หรืออีกนัยหนึ่งก็คือความถี่ของระบบที่ขาดเสถียรภาพ และเมื่อมีการขาดเสถียรภาพของระบบที่พิจารณา สัญญาณของผลการจำลองแรงดันตกนี้จะไปลบออกจากแรงดันอ้างอิงในระบบควบคุมของวงจรแปลงผันกำลังแบบบักท์ที่มีการควบคุมแบบพีไอ (PI Controller) เพื่อสร้างสัญญาณไปปรับปรุงวัฏจักรหน้าที (Duty cycle : d) เพื่อทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม (Pulse-width-modulation : PWM) ของวงจรแปลงผันกำลังแบบบักท์ใหม่ (d^*) ซึ่งจะทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังมีเสถียรภาพตามหลักของวิธีอาร์วีซี [6] การออกแบบตัวบรรเทาการขาดเสถียรภาพที่เหมาะสมทำได้โดยใช้การวิเคราะห์เสถียรภาพ [7-9] ของระบบซึ่งแบบจำลองของระบบไฟฟ้าในบทความนี้เป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลาเนื่องจากผลของการสวิตช์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังซึ่งจะทำให้มีความยุ่งยากสำหรับการนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพ ด้วยเหตุนี้จึงมีความจำเป็นในการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาซึ่งมีหลากหลายวิธี สำหรับวิธีการพิสูจน์ที่เหมาะสมกับระบบนี้คือ วิธีดีคิว (DQ) [7] และ วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะแบบทั่วไป (generalized state space averaging : GSSA) [10]

บทความนี้ประกอบด้วย ระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในส่วนที่ 4 จะนำเสนอการ

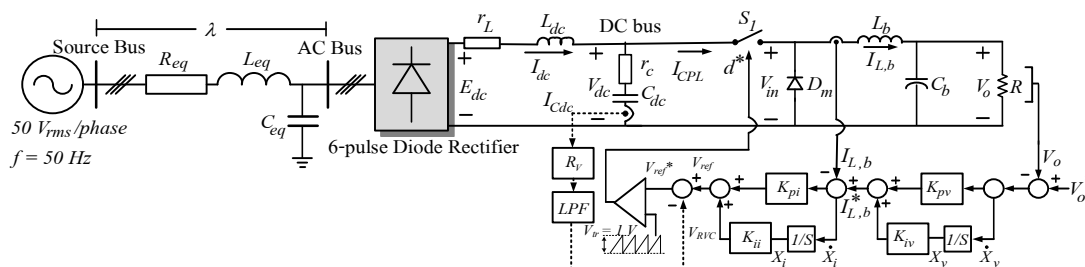
พิจารณาในส่วนที่ 2 สำหรับส่วนที่ 3 เป็นการพิสูจน์หาวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่เป็นเชิงเส้น ในส่วนที่ 5 จะนำเสนอการตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยชุดบล็อกกำลังไฟฟ้าง่ายด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK และส่วนสุดท้ายคือการสรุปผลของบทความ

2. ระบบไฟฟ้าที่ใช้พิจารณา

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในบทความนี้ประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้าสามเฟสสมมูล สายส่งกำลังไฟฟ้า วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเต็มคลื่น วงจรกรองที่มีตัวเก็บประจุและขดลวดเหนี่ยวนำและโหลดวงจรแปลงผันกำลังแบบบักท์ที่มีการควบคุมแบบพีไอเรียงต่อกัน แสดงในรูปที่ 1 โดยวิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรแปลงผันกำลังแบบบักท์สามารถพบได้ในบทความที่ [11] และการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี ทำได้โดยใช้เซ็นเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุที่วงจรกรอง (I_{Cdc}) เพื่อนำค่าดังกล่าวไปลบกับชุดควบคุมพีไอซึ่งจะทำให้มีเสถียรภาพเพิ่มขึ้น [6] การพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะพิจารณาเฉพาะโหมดการนำกระแสต่อเนื่องและไม่พิจารณาฮาร์มอนิกที่เกิดในระบบ

3. การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในบทความนี้ทำการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการดีคิวในการแปลงพารามิเตอร์ในสายส่งให้อยู่บนแกนดีคิวและทำการกำจัดฟังก์ชันการสวิตช์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสให้อยู่บนแกนดีคิว เมื่อพิจารณาวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่ใช้ไดโอดพบว่าผลกระทบที่เกิดจาก L_{eq} ในรูปที่ 1 ส่งผลทำให้เกิดมุม



รูปที่ 1 ระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการบรรเทาเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี

เหลื่อมและทำให้เกิดแรงดันตกของแรงดันเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแส ซึ่งแรงดันตกดังกล่าวถูกแทนด้วย r_μ [12] ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$r_\mu = \frac{3\omega L_{eq}}{\pi} \quad (1)$$

เมื่อพิจารณาฟังก์ชันการสวิตช์ของวงจรเรียงกระแสแบบสามเฟสโดยใช้วิธีตีความสามารถเปลี่ยนสมการฟังก์ชันการสวิตช์ของไดโอดให้เป็นฟังก์ชันที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาได้ดังสมการที่ (2)

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

โดยที่ ϕ_1 คือ มุมเฟสของแกนหมุนตีความ

ϕ คือ มุมเฟสของบัสแรงดันเอซี

แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสที่ต่อผ่านสายส่งเข้าวงจรเรียงกระแสสามเฟสสามารถแปลงให้อยู่บนแกนตีความและนำไปเขียนเป็นวงจรสมมูลบนแกนตีความสำหรับการแปลงตีความทางด้านแหล่งจ่ายได้ดังรูปที่ 2 โดยกำหนดมุมเฟสของแกนหมุนตีความให้มีค่าเท่ากับมุมเฟสของแรงดันบัสเอซี เพื่อลดความซับซ้อนของแบบจำลอง และเมื่อพิจารณาค่าพารามิเตอร์สายส่ง (R_{eq} , L_{eq} , C_{eq}) จะทำให้เกิดมุมต่างเฟสระหว่างบัสแหล่งจ่ายไฟฟ้า (Source Bus) กับบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Bus) เท่ากับ (λ) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากหลักการการไหลของกำลังไฟฟ้า[7]

จากนั้นใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปทางด้านโหลดวงจรแปลงผันกำลังแบบบักก์ที่มีการควบคุมและมีการสร้างเสถียรภาพ เพื่อกำจัดฟังก์ชันการสวิตช์ทางด้านโหลด โดยแสดงฟังก์ชันการสวิตช์ของวงจรแปลงผันกำลังแบบบักก์ในสมการที่ (3)

$$u(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t < dT \\ 0, & dT < t < T \end{cases} \quad (3)$$

โดย T และ d คือ คาบการสวิตช์และค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันแบบบักก์ ตามลำดับ

พิจารณาฟังก์ชันการสวิตช์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป โดยพิจารณาเฉพาะความถี่มูลฐานและโหมดกระแสต่อเนื่อง [7] ได้ดังสมการที่ (4)

$$\langle u(t) \rangle_0 = d \quad (4)$$

การวิเคราะห์วงจรโดยที่ยังไม่พิจารณาตัวควบคุมพีไอหรือระบบแบบวงเปิด จะกำหนดให้ค่า d เป็นตัวแปรหนึ่งในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เมื่อพิจารณาตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการสร้างเสถียรภาพจากรูปที่ 2 จะได้สมการวัฏจักรหน้าที่สำหรับระบบแบบวงรอบปิดที่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีแล้วคือค่า d^* ดังสมการที่ (5)

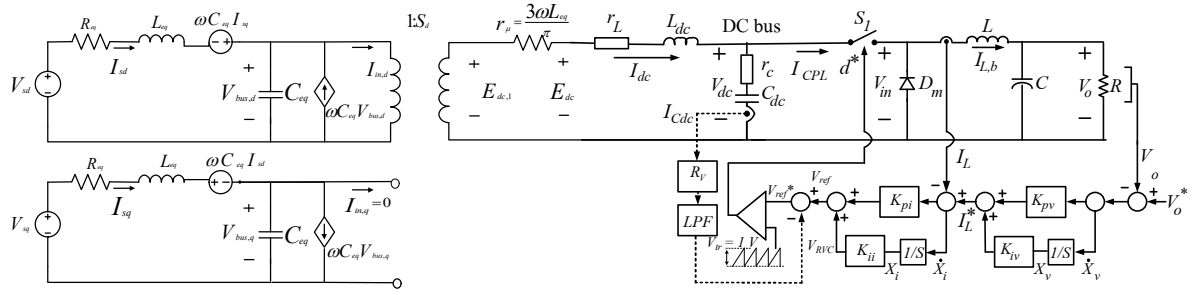
$$d^* = V_{ref} - V_{RVC} \quad (5)$$

โดยที่ V_{ref} คือสัญญาณควบคุมของตัวควบคุมพีไอ ซึ่งมีขั้นตอนการออกแบบดังบทความที่ [11] และ V_{RVC} คือสัญญาณชดเชยการบรรเทาการขาดเสถียรภาพที่ผ่านวงจรกรองสัญญาณผ่านต่ำ [13] สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการได้ดังสมการที่ (6) และ (7) ตามลำดับ

$$V_{ref} = K_{pi} K_{pv} V_o^* - K_{pi} K_{pv} V_o + K_{pi} K_{iv} X_v - K_{pi} I_{L,b} + X_i K_{ii} \quad (6)$$

$$V_{RVC} = -C_{dc} R_v a V_{dc,filter} + C_{dc} R_v a V_{dc} \quad (7)$$

เมื่อ $a = 1 / \omega_c$ และ ω_c คือความถี่ตัดผ่านของวงจรกรองผ่านต่ำ



รูปที่ 2 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณามบนแกนดีคิว

เมื่อนำค่า d^* ไปแทนค่าในตัวแปร d จะทำให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กัเวลาของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาแสดงดังสมการที่ (8)

สามารถทำให้เป็นเชิงเส้นได้ด้วยเทคนิคคอนทูลกรเมทซ์เลอร์อันดับที่หนึ่ง ดังสมการที่ (9)

$$\begin{cases} \dot{I}_{sd} = -\frac{R_{eq} I_{sd}}{L_{eq}} + \omega I_{sq} - \frac{V_{bus,d}}{L_{eq}} + \left(\frac{1}{L_{eq}} \right) \left(\sqrt{\frac{3}{2}} \right) V_m \cos(\lambda) \\ \dot{I}_{sq} = -\frac{R_{eq} I_{sq}}{L_{eq}} - \omega I_{sd} - \frac{V_{bus,q}}{L_{eq}} + \left(\frac{1}{L_{eq}} \right) \left(\sqrt{\frac{3}{2}} \right) V_m \sin(\lambda) \\ \dot{V}_{bus,d} = \frac{I_{sd}}{C_{eq}} + \omega V_{bus,q} - \left(\sqrt{\frac{3}{2}} \right) \left(\frac{2\sqrt{3}}{\pi} \right) \left(\frac{I_{dc}}{C_{eq}} \right) \\ \dot{V}_{bus,q} = \frac{I_{sq}}{C_{eq}} - \omega V_{bus,d} \\ \dot{I}_{dc} = \left(\frac{1}{L_{dc}} \right) \left(\sqrt{\frac{3}{2}} \right) \left(\frac{2\sqrt{3}}{\pi} \right) V_{bus,d} - \frac{I_{dc} (r_\mu + r_L + r_c)}{L_{dc}} - \frac{V_{dc}}{L_{dc}} \\ - \frac{K_{pi} r_c I_{L,b}^2}{L_{dc}} - \frac{K_{pv} K_{pi} r_c I_{L,b} V_o}{L_{dc}} + \frac{K_{iv} K_{pi} r_c I_{L,b} X_v}{L_{dc}} + \frac{K_{ii} r_c I_{L,b} X_i}{L_{dc}} \\ + \frac{K_{pv} K_{pi} r_c I_{L,b} V_o^*}{L_{dc}} + \frac{R_v a V_{dc,filter} r_c I_{L,b} C_{dc}}{L_{dc}} - \frac{R_v a V_{dc} r_c I_{L,b} C_{dc}}{L_{dc}} \\ \dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} I_{dc} + \frac{K_{pi} I_{L,b}^2}{C_{dc}} + \frac{K_{pv} K_{pi} I_{L,b} V_o}{C_{dc}} - \frac{K_{iv} K_{pi} I_{L,b} X_v}{C_{dc}} \\ - \frac{K_{ii} I_{L,b} X_i}{C_{dc}} - \frac{K_{pv} K_{pi} I_{L,b} V_o^*}{C_{dc}} - R_v a V_{dc,filter} I_{L,b} + R_v a V_{dc} I_{L,b} \\ \dot{I}_{L,b} = -\frac{K_{pi} V_{dc} I_{L,b}}{L_b} - \frac{K_{pv} K_{pi} V_{dc} V_o}{L_b} + \frac{K_{iv} K_{pi} V_{dc} X_v}{L_b} + \frac{K_{ii} V_{dc} X_i}{L_b} \\ + \frac{K_{pv} K_{pi} V_{dc} V_o^*}{L_b} - \frac{V_o}{L_b} + \frac{R_v a V_{dc,filter} V_{dc} C_{dc}}{L_b} - \frac{R_v a V_{dc}^2 C_{dc}}{L_b} \\ \dot{V}_o = \frac{I_{L,b}}{C_b} - \frac{V_o}{RC_b} \\ \dot{X}_v = V_o^* - V_o \\ \dot{X}_i = -I_{L,b} - K_{pv} V_o + K_{iv} X_v + K_{pi} V_o^* \\ \dot{V}_{dc,filter} = -a V_{dc,filter} + a V_{dc} \end{cases} \quad (8)$$

จากสมการที่ (8) เป็นสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้นเนื่องมาจากมีตัวแปรที่เป็นตัวแปรสถานะที่คูณกันอยู่

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{u} \\ \delta \mathbf{y} = \mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{u} \end{cases} \quad (9)$$

โดยที่ตัวแปรสถานะ, ตัวแปรอินพุต, ตัวแปรเอาต์พุต และพารามิเตอร์ต่างๆในเมตริกซ์ $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$, $\mathbf{C}$ และ $\mathbf{D}$ ขึ้นอยู่กับจุดการทำงานของระบบ โดยเรียกสมการนี้ว่าแบบจำลองสัญญาณขนาดเล็ก (Small signal model) มีรายละเอียดดังสมการที่ (10)

4. การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

การวิเคราะห์เสถียรภาพสามารถทำได้โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กัเวลาและเป็นเชิงเส้นที่ได้ในสมการที่ (9) ด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงซึ่งสามารถคำนวณได้จากเมตริกจาโคเบียน $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{x}$ [7-9] ดังสมการที่ (11)

$$\det[\lambda \mathbf{I} - \mathbf{A}] = 0 \quad (11)$$

โดยระบบจะมีความเสถียรภาพดังเงื่อนไขในสมการที่ (12)

$$\text{real} \lambda_i < 0 \quad (12)$$

เมื่อ $i = 1, 2, 3, \dots, n$ (โดยที่ n คือจำนวนตัวแปรสถานะของระบบ)

$$\delta x = [\delta I_{sd}, \delta I_{sq}, \delta V_{bs,d}, \delta V_{bs,q}, \delta I_{dk}, \delta V_{dk}, \delta I_{Lb}, \delta V_o, X_v, X_i, V_{dc,filter}]^T$$

$$\delta u = [\delta V_m, \delta V_o^*]^T$$

$$\delta y = [\delta I_{dk}, \delta V_{dk}, \delta I_{Lb}, \delta V_o]^T$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{R_{eq}}{L_{eq}} & \omega & \frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\omega & \frac{R_{eq}}{L_{eq}} & 0 & \frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_{eq}} & 0 & 0 & \omega & -\frac{\sqrt{3} 2\sqrt{3}}{\sqrt{2} \pi C_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_{eq}} & -\omega & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\sqrt{3} 2\sqrt{3}}{\sqrt{2} \pi L_{dk}} & 0 & \frac{(r_\mu + r_L + r_c)}{L_{dk}} & \frac{1}{L_{dk}} \frac{R_a r_c I_{Lb0} C_{dk}}{L_{dk}} & a(5,7) & \frac{-r_c K_{pv} K_{pi} I_{Lb0}}{L_{dk}} & \frac{r_c K_{iv} K_{pi} I_{Lb0}}{L_{dk}} & \frac{r_c K_{ii} I_{Lb0}}{L_{dk}} & \frac{R_a r_c I_{Lb0} C_{dk}}{L_{dk}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_{dk}} & R_a I_{Lb0} & a(6,7) & \frac{K_{pv} K_{pi} I_{Lb0}}{C_{dk}} & \frac{K_{iv} K_{pi} I_{Lb0}}{C_{dk}} & \frac{K_{ii} I_{Lb0}}{C_{dk}} & -R_a I_{Lb0} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a(7,6) & \frac{K_{pi} V_{dk0}}{L_b} & \frac{K_{pv} K_{pi} V_{dk0} + 1}{L_b} & \frac{K_{iv} K_{pi} V_{dk0}}{L_b} & \frac{K_{ii} V_{dk0}}{L_b} & \frac{R_a V_{dk0} C_{dk}}{L_b} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_b} & \frac{1}{RC} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -K_{pv} & K_{iv} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a & 0 & 0 & 0 & 0 & -a \end{bmatrix}_{11 \times 11}$$

$$a(5,7) = \frac{-2r_c K_{pi} I_{Lb0}}{L_{dk}} - \frac{r_c K_{pv} K_{pi} V_{a0}}{L_{dk}} + \frac{r_c K_{iv} K_{pi} X_{i0}}{L_{dk}} + \frac{r_c K_{ii} X_{i0}}{L_{dk}} + \frac{r_c K_{pv} K_{pi} V_{a0}^*}{L_{dk}}, a(6,7) = \frac{-2K_{pi} I_{Lb0}}{C_{dk}} - \frac{K_{pv} K_{pi} V_{a0}}{C_{dk}} + \frac{K_{iv} K_{pi} X_{i0}}{C_{dk}} + \frac{K_{ii} X_{i0}}{C_{dk}} + \frac{K_{pv} K_{pi} V_{a0}^*}{C_{dk}}$$

$$a(7,6) = \frac{-K_{pi} I_{Lb0}}{L_b} - \frac{K_{pv} K_{pi} V_{a0}}{L_b} + \frac{K_{iv} K_{pi} X_{i0}}{L_b} + \frac{K_{ii} X_{i0}}{L_b} + \frac{K_{pv} K_{pi} V_{a0}^*}{L_b} - \frac{R_a V_{dk0} C_{dk}}{L_b}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} \cos(\lambda) & 0 \\ \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} \sin(\lambda) & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{r_c K_{pv} K_{pi} I_{Lb0}}{L_{dk}} \\ 0 & \frac{K_{pv} K_{pi} I_{Lb0}}{C_{dk}} \\ 0 & \frac{K_{pv} K_{pi} V_{dk0}}{L_b} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & K_{pv} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}_{11 \times 2}, \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{4 \times 11}, \mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}_{4 \times 2}$$

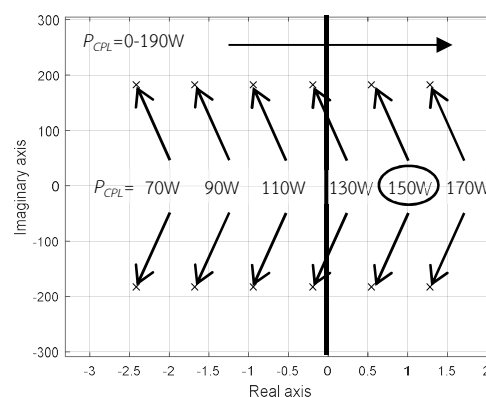
(10)

4.1 กรณีไม่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี

การวิเคราะห์เสถียรภาพระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 1 จะพิจารณาโดยกำหนดให้ค่าอัตราขยาย R_v มีค่าเท่ากับ 0 หรือไม่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีให้แก่ระบบ ค่าจะแจ้งที่คำนวณได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้น ประกอบด้วยโดยค่าจะแจ้งสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพจะพิจารณาเฉพาะโพลเด่นที่มีเส้นทางการเคลื่อนที่อยู่ในบริเวณที่มีค่าใกล้เคียง 0 เนื่องจากเป็นค่าเฉพาะจะแจ้งที่มีผลต่อเสถียรภาพมากที่สุด ซึ่งแสดงในรูปที่ 3 โดยพิจารณาผลการเปลี่ยนแปลงของโพลกำลังไฟฟ้าของวงจรแปลงผันกำลังแบบบับค P_{CPL} จาก 0-190W โดยมีค่าพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์สำหรับระบบในรูปที่ 1

Parameter	Value
V_s	50 V _{rms/phase}
ω	$2\pi \times 50$ rad/sec.
R_{eq}	0.1 Ω
L_{eq}	0.24 mH
C_{eq}	2 nF
r_L	0.1 Ω
r_c	0.1 Ω
L_{dc}	30 mH
C_{dc}	1000 μ F
L	15 mH
C	1000 μ F
R	10 Ω
K_{pv}	0.01
K_{iv}	10
K_{pi}	0.7210
K_{ii}	2060.1
a	300

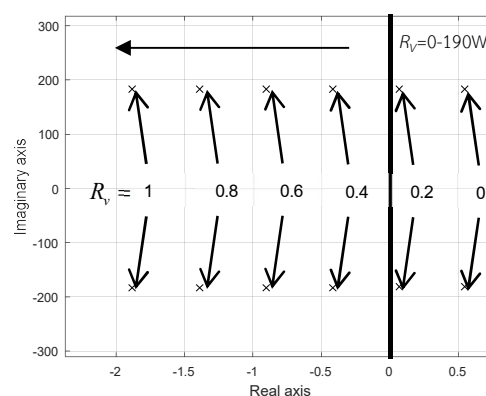


รูปที่ 3 ค่าจะแจ้งที่ใช้สำหรับการพิจารณการวิเคราะห์เสถียรภาพกรณีไม่มีการสร้างเสถียรภาพ

จากรูปที่ 3 สังเกตได้ว่า เมื่อโพลกำลังไฟฟ้าของวงจรแปลงผันกำลังแบบบับคมีค่าเท่ากับ 150 W ซึ่งเป็นกำลังไฟฟ้าน้อยที่สุดที่ทำให้โพลของระบบเคลื่อนที่จากฝั่งซ้ายของระนาบเอสมาอยู่ฝั่งขวา ซึ่งหมายความว่าระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเกิดการขาดเสถียรภาพขึ้นเนื่องมาจากผลของโพลกำลังไฟฟ้าคงตัว

4.2 กรณีมีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี

การวิเคราะห์เสถียรภาพระบบไฟฟ้าที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีดังรูปที่ 1 จะพิจารณาผลการเปลี่ยนแปลงของ R_v จาก 0 ถึง 1 โดยกำหนดให้โพลกำลังไฟฟ้าของวงจรแปลงผันกำลังแบบบับค (P_{CPL}) ที่ 150W แสดงได้ดังรูปที่ 4

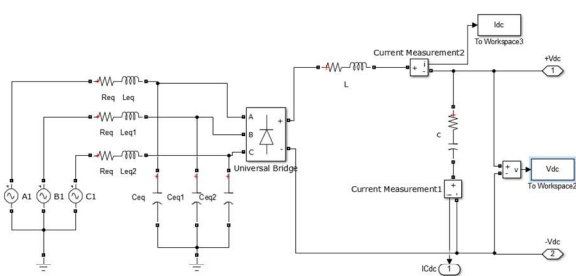


รูปที่ 4 ค่าจะแจ้งที่ใช้สำหรับการพิจารณการวิเคราะห์เสถียรภาพกรณีมีการสร้างเสถียรภาพ

จากรูปที่ 4 จะเห็นว่า เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเท่ากับ 150W ที่ค่า R_v มีค่าเท่ากับ 0 (ยังไม่มีภาระสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี) ระบบจะเกิดการขาดเสถียรภาพ และเมื่อค่า R_v มีค่าเป็น 0.4 (วงจรสร้างเสถียรภาพอาร์วีซีเริ่มทำงาน) ซึ่งเป็นค่าที่น้อยที่สุดที่ทำให้โพลของระบบเคลื่อนที่จากฝั่งขวาของระนาบเอสมายู่ที่ฝั่งซ้าย ซึ่งหมายถึงระบบที่เกิดการขาดเสถียรสามารถกลับมาเสถียรภาพได้อีกครั้ง

5. การตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์เสถียรภาพ

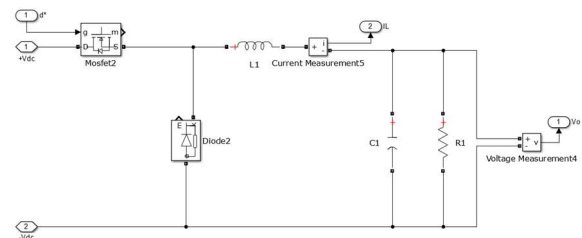
การยืนยันการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าจะอาศัยผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้าในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ประกอบด้วยส่วนของแหล่งจ่ายไฟฟ้าสามเฟสสมมูล, พารามิเตอร์สายส่ง, วงจรเรียงกระแสสามเฟส และวงจรกรองแสดดังรูปที่ 5 โหลดวงจรแปลงผันกำลังแบบบักที่แสดงดังรูปที่ 6 ส่วนของตัวควบคุมพีไอเรียงต่อกันสำหรับวงจรแปลงผันกำลังแบบบักที่แสดงดังรูปที่ 7 และส่วนของการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีแสดงในรูปที่ 8 โดยจะทำการตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์เสถียรภาพในกรณีที่ไม่มีการสร้างเสถียรภาพและมีการสร้างเสถียรภาพโดยใช้พารามิเตอร์ของระบบดังตารางที่ 1



รูปที่ 5 แหล่งจ่ายสามเฟสสมมูล, สายส่งกำลังไฟฟ้าวงจรเรียงกระแสสามเฟสและวงจรกรอง

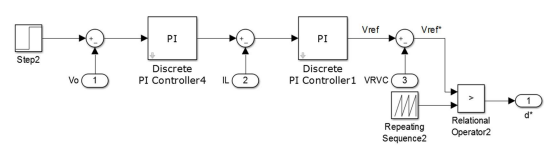
โดยวงจรแปลงผันกำลังแบบบักในรูปที่ 6 จะถูกต่อขนานกับวงจรกรอง หรือบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และ

ทำการวัดค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุของวงจรกรอง (I_{Cdc}) แล้วทำการส่งสัญญาณดังกล่าวไปยังชุดสร้างเสถียรภาพอาร์วีซีในรูปที่ 8



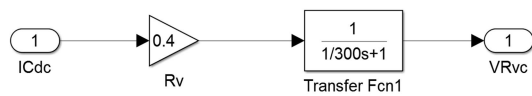
รูปที่ 6 วงจรแปลงผันกำลังแบบบักที่มีการควบคุม

วงจรแปลงผันกำลังแบบบักที่ต่อขนานเข้ากับวงจรกรองหรือบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง จะได้รับสัญญาณวัฏจักรหน้าที่ได้จากเทคนิคพีดีบีแอลเอ็มจากตัวควบคุมพีไอเรียงต่อกันรวมถึงสัญญาณการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี และมีการควบคุมกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (I_L) แสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ตัวควบคุมพีไอเรียงต่อกันที่มีการสร้างเสถียรภาพสำหรับวงจรแปลงผันกำลังแบบบัก

ตัวควบคุมพีไอเรียงต่อกันประกอบไปด้วยลูควบคุมแรงดันและลูควบคุมกระแส และสัญญาณที่ได้จากลูควบคุมพีไอ (V_{ref}) จะถูกกลบออกด้วยสัญญาณชดเชยสำหรับการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี (V_{RVC}) และสัญญาณที่ได้จากการลบกันแล้ว จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยมตามหลักพีดีบีแอลเอ็มทำให้ได้ค่าวัฏจักรหน้าที่สำหรับควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังแบบบัก

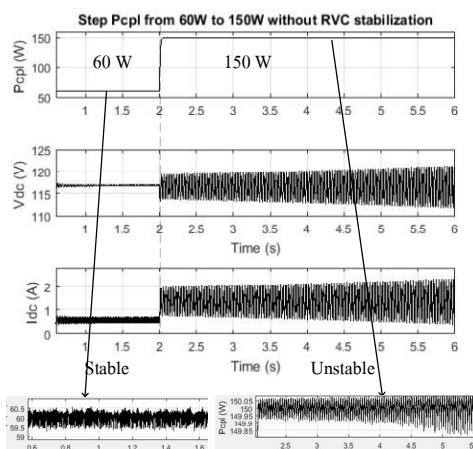


รูปที่ 8 ส่วนการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี

ในส่วนของการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีจะทำการรับค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุในวงจรกรอง (I_{Cdc}) และนำมาถูกปรับคูณด้วยค่าอัตราขยาย R_v ซึ่งผลที่ได้จะเป็นการจำลองแรงดันตกเพิ่มเข้ามาในระบบไฟฟ้ากำลัง จากนั้นแรงดันตกที่ได้จะถูกกรองผ่านวงจรกรองความถี่แบบผ่าน เพื่อให้ความถี่ที่ผ่านเข้ามาอยู่ในย่านความถี่เรโซแนนซ์ทำการกรองเฉพาะความถี่และนำสัญญาณชดเชย (V_{Rvc}) ไปลบออกจากตัวควบคุมพีไอเพื่อสร้างเสถียรภาพให้กับระบบ

5.1 กรณีไม่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี

การยืนยันการวิเคราะห์เสถียรภาพระบบที่พิจารณาดังรูปที่ 3 พบว่าระบบที่ไม่มีการสร้างเสถียรภาพเกิดการขาดเสถียรภาพขึ้นเมื่อโหลดของวงจรแปลงผันกำลังแบบบัสก์มีค่าเท่ากับ 150W สามารถทำการยืนยันความถูกต้องโดยทำการปรับเพิ่มโหลดวงจรแปลงผันกำลังแบบบัสก์ จาก 60W (ระบบมีเสถียรภาพ) ไปเป็น 150W ที่เวลา 2 วินาทีซึ่งผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์แสดงได้ดังรูปที่ 9

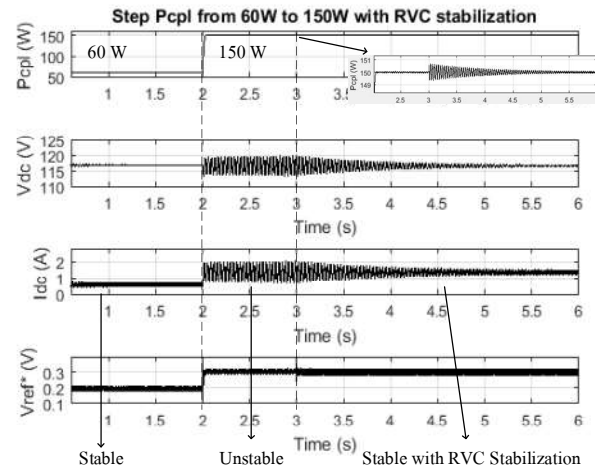


รูปที่ 9 การยืนยันการวิเคราะห์เสถียรภาพกรณีไม่มีการสร้างเสถียรภาพ

จากผลการจำลองสถานการณ์พบว่าที่เวลา 2 วินาทีแรงดันไฟฟ้าบัสดีซีของระบบเกิดการขาดเสถียรภาพเมื่อโหลดของวงจรแปลงผันแบบบัสก์มีขนาด 150W ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพในรูปที่ 3 ที่โพลของระบบไปอยู่ทางฝั่งขวาของระนาบเอสเมื่อโหลดของวงจรแปลงผันแบบบัสก์มีขนาด 150W

5.2 กรณีมีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี

การยืนยันการวิเคราะห์เสถียรภาพระบบที่พิจารณาดังรูปที่ 4 พบว่าระบบที่มีการสร้างเสถียรภาพทำให้ระบบกลับมามีเสถียรภาพได้เมื่ออัตราขยาย R_v มีค่าน้อย 0.4 สามารถทำการยืนยันความถูกต้องโดยทำการปรับเพิ่มโหลดวงจรแปลงผันกำลังแบบบัสก์ จาก 60W (ระบบยังมีเสถียรภาพ) ไปเป็น 150W ที่เวลา 2 วินาทีซึ่งเกิดการขาดเสถียรภาพและได้กำหนดให้วงจรสร้างเสถียรภาพอาร์วีซีทำงานที่วินาทีที่ 3 โดยกำหนดให้ค่าอัตราขยาย R_v มีค่าเท่ากับ 0.4 แสดงได้ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 การยืนยันการวิเคราะห์เสถียรภาพกรณีมีการสร้างเสถียรภาพ

จากผลการจำลองสถานการณ์พบว่าที่เวลา 2 วินาทีแรงดันไฟฟ้าบัสดีซีของระบบเกิดการขาดเสถียรภาพเมื่อโหลดของวงจรแปลงผันแบบบัสก์มีขนาด 150W ซึ่งดูได้จากการแกว่งของแรงดันบัสดีซีที่มีค่าสูงและภายหลังจากที่เวลา 3 วินาทีกำหนดให้วงจรสร้าง

เสถียรภาพอาร์วีซีทำงาน ที่ $R_v = 0.4$ ซึ่งจะเห็นได้ว่าระบบจะกลับมามีเสถียรภาพตลอดย่านการทำงานโดยดูได้จากการแกว่งของแรงดันบัสดิซีที่มีค่าลดลง และคงที่ในสภาวะคงตัวเมื่อเวลาผ่านไป

6. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการสร้างความเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดิซีที่มีโหลดเป็นอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มีการควบคุม ซึ่งโหลดดังกล่าวจะมีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจึงเป็นสาเหตุที่ทำให้ระบบที่พิจารณาในบทความนี้เกิดการขาดเสถียรภาพ ซึ่งการคาดเดาจุดขาดเสถียรภาพจะใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปและวิธีคิวในการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังและอาศัยทฤษฎีบทค่าเฉพาะเจาะจงมาใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบต่อไป จากผลการวิเคราะห์เสถียรภาพและการยืนยันผลด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์พบว่าระบบส่งจ่ายที่เกิดการขาดเสถียรภาพเนื่องจากผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวสามารถกลับมามีเสถียรภาพได้หลังจากที่มีการสร้างความเสถียรภาพด้วยวิธีที่ได้รับนำเสนอในบทความนี้

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนวิจัย ทุนการศึกษาจากกลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงานเครื่องจักรกลไฟฟ้าและควบคุม (PEMC) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] V. Grigore, J. Hatonen, J. Kyyra, and T. Suntio, "Dynamics of a buck converter with a constant power load," in *Proc. IEEE 29th Power Electron. Spec. Conf.*, Fukuoka, Japan, May 1998, pp. 72–78
- [2] A. Emadi, A. Khaligh, C. H. Rivetta, and G. A. Williamson, "Constant power loads and negative impedance instability in automotive systems: Definition, modeling, stability, and control of power electronic converters and motor drives," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 55, no. 4, pp. 1112–1125, Jul. 2006.
- [3] C. Rivetta, G. A. Williamson, and A. Emadi, "Constant power loads and negative impedance instability in sea and undersea vehicles: statement of the problem and comprehensive Large-Signal solution," *Proc. IEEE Electric Ship Tech Symposium.*, July 2005, pp. 313–320.
- [4] A.M. Rahimi and A. Emadi, "Active damping in dc/dc power electronic converters: a novel method to overcome the problems of constant power loads," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 5, pp. 1428–1439, Feb. 2009.
- [5] K-N. Areerak, T. Sopapirm, S.V. Bozhko, C. Hill, A. Suyapan and K-L. Areerak, "Adaptive stabilization of uncontrolled rectifier based AC–DC power systems feeding constant power loads" *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 33, no. 10, pp. 8927–8935, Oct. 2018.
- [6] Y. R. Mohamed, A. A. A. Radwan, and T. Lee, "Decoupled reference-voltage-based active dc-link stabilization for PMSM drives with tight-speed regulation," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no. 12, pp. 4523–4536, Dec. 2012.
- [7] K-N. Areerak, S.V. Bozhko, G.M. Asher and D. W. P. Thomas, "Stability analysis and modelling of AC-DC system with mixed load

- using DQ- transformation method," *IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE08)*, Cambridge, UK, pp. 19-24, June/Jul. 2008.
- [8] K-N. Areerak, T. WU, S.V. Bozhko, G.M. Asher and D. W. P. Thomas, "Aircraft power system stability study including effect of voltage control and actuators dynamic," *IEEE Trans. Aerospace and electronic systems*, vol. 47, no. 7, pp. 2574-2589, Oct. 2011.
- [9] T. Sopapirm, K-N. Areerak and K-L. Areerak, "Stability analysis of AC distribution system with six- pulse diode rectifier and multi-converter power electronic loads," *International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E.)*, vol. 6, no. 7(Part A), pp. 2919-2928, Nov./Dec. 2011.
- [10] J. Mahdavi, A. Emadi, M.D. Bellar, and M. Ehsani, "Analysis of power electronic converters using the generalized state-space averaging approach", *IEEE Trans. on Circuit and Systems*, Vol. 44., pp.767-770, August 1997.
- [11] K. M. Tsang, and W. L. Chan, "cascade controller for DC/DC buck converter," *IEE Electric Power Application*, vol. 152, no. 4, pp. 827-831, July 2005.
- [12] N. Mohan, T. Undeland and W. Robbins, "Line- Frequency diode rectifiers: Line-Frequency uncontrolled ac to dc" in *Power electronics*. 2nd Ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1995, pp.79-117.
- [13] A. M. Rahimi, G. A. Williamson, and A. Emadi, "Loop- cancellation technique: A novel nonlinear feedback to overcome the destabilizing effect of constant- power loads," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 59, no. 2, pp. 650-661, Feb. 2010.

เครื่องปิ้งเนื้อสัตว์กึ่งอัตโนมัติเพื่อสุขภาพ Healthy Semi Automatic Grill Machine

ธีรพงศ์ บริรักษ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย

200 ม.1 ถ.รังสิต – นครนายก ต.รังสิต อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

Theerapong Borirak

Faculty of Engineering, Eastern Asia University

200 m.1 Rangsit - Nakornnayok, Rangsit, Thanyaburi, Pathumtani, 12110

E-mail: t_borirak@eau.ac.th

(Received: September 9, 2019; Accepted: October 29, 2019)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนากระบวนการผลิตอาหารปิ้งย่าง ลดการเกิดควันและกลิ่นรบกวนจากการผลิตอาหารปิ้งย่าง โดยทำการออกแบบและสร้างเครื่องปิ้งเนื้อสัตว์กึ่งอัตโนมัติเพื่อสุขภาพ โครงสร้างภายในและภายนอกทำจากสแตนเลสชนิด 304 ขนาดกว้าง 60 cm ยาว 90 cm และสูง 450 cm ระบบการให้ความร้อนในการปิ้งใช้อินฟราเรดฮีตเตอร์พร้อมคอมสัทอน จำนวน 4 แท่ง กำลังไฟรวม ,2400 W ขับเคลื่อนชุดโซ่ลำเลียงด้วยมอเตอร์และใช้โซ่ลำเลียงทำจากสแตนเลสชนิด 304 พร้อมติดตั้งชุดหนีบไม้ ในการลำเลียงเนื้อสัตว์เพื่อทำการปิ้งระบบโซ่ลำเลียงจะมีลักษณะการหมุนเคลื่อนที่เป็นลักษณะวงรี เคลื่อนที่ผ่านอินฟราเรดฮีตเตอร์ในลักษณะที่ไม่เสียบแว่นบนชุดโซ่ลำเลียงตั้งฉากกับพื้นโลกและให้ชุดอินฟราเรดฮีตเตอร์วางขนานกับไม้เสียบทำให้ไม่เกิดควันจากการปิ้ง เมื่อคุณภาพเนื้อสัตว์ได้ตามต้องการจะมีชุดปลดไม้เสียบทางออกปลดให้ผลิตภัณฑ์ถูกส่งมาในช่องเก็บผลิตภัณฑ์เพื่อนำไปจัดจำหน่าย ในการทดสอบทำการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ต้นกำลังที่ความเร็วรอบ 3 ระดับ ได้แก่ 0.32, 0.24 และ 0.19 รอบต่อนาที ควบคุมอุณหภูมิของอินฟราเรดฮีตเตอร์ระหว่าง 210 - 240°C ใช้วัตถุดิบในการทดสอบ 5 ตัวอย่าง ได้แก่ เนื้อหมูหมักซอส เนื้อหมูหมักนมสดและซอส หมูสะเต๊ะ เนื้อไก่ และเนื้อวัว เครื่องปิ้งเนื้อสัตว์กึ่งอัตโนมัติมีอัตราการผลิตเนื้อสัตว์ปิ้งได้ตั้งแต่ 80 - 500 ไม้ต่อชั่วโมง ขึ้นอยู่กับขนาดและน้ำหนักต่อไม้ของเนื้อสัตว์ที่ปิ้ง ค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 2.21 kWh สามารถลดต้นทุนค่าใช้จ่ายด้านพลังงานได้ร้อยละ 13.4 เมื่อเทียบกับการใช้ถ่านไม้ในการผลิต

คำสำคัญ: เครื่องปิ้งเนื้อสัตว์กึ่งอัตโนมัติเพื่อสุขภาพ อินฟราเรดฮีตเตอร์ ประสิทธิภาพเชิงความร้อน

ABSTRACT

The objective of this research aimed to develop low smoke and scent roasting food process by design and fabricate a healthy semi - automatic grill machine. The machine made by 304 stainless steel with dimension of 60 cm width, 90 cm length and 45 cm height. In the machine installed 4 sets of infrared heaters with the reflector total electrical power 2,400 W of the infrared heaters. A stainless chain conveyor with the jigs used for carrying roasted meat sticks. The chain conveyor transports meat to grill. The chain conveyor system features elliptical motion pass infrared heaters roasted meat sticks. The chain conveyor is set perpendicular to the ground and a series of infrared heaters are placed parallel to roasted meat sticks the prevent the smoke from the grill. The sticks of meat are released from the chain conveyer to the tray to distribute products after grill process. The machine used the 12 V DC motor for driving the conveyor gear 3 revolution speeds 0.32 rpm, 0.24 rpm and 0.19 rpm. The infrared heater temperature control is set at 210 - 240°C. The 5 samples of materials for testing are pork with sauce, pork with milk and sauce, pork satay, chicken and beef. The thermal efficiency depends on the size and weight of the meat. The healthy semi - automatic grill machine can make production rate 80 – 500 pieces of grill meat per hour. The average electricity consumption of the machine is 2.21 kWh. The machine can reduce energy costs by 13.4 percent compared to the use of charcoal production.

Keyword: Healthy Semi – Automatic Grill Machine, Infrared Heater, Thermal Efficiency

1. บทนำ

ในปัจจุบันอาหารประเภทปิ้งย่างเป็นอาหารจานด่วนที่นิยมรับประทาน โดยการรับประทานอาหารปิ้งย่างหรืออาหารรมควันเป็นประจำจะมีความเสี่ยงต่อการได้รับสารอันตราย 3 ชนิดด้วยกัน ได้แก่ สารไนโตรซามีน (nitrosamines) ที่พบในปลาหมึกย่าง ปลาทะเลย่าง และอาหารที่ใส่สารไนเตรต ซึ่งเป็นสารกันบูด เช่น แหนม ไส้กรอก เบคอน แฮม เป็นต้น สารพัยโรลัยเซต (Pyrolysates) พบมากในส่วนที่ไหม้เกรียมของอาหาร ปิ้งย่าง และสารพีเอเอช หรือสารกลุ่มโพลีไซคลิก อะโรมาติก ไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic aromatic hydrocarbon : PAHs) เป็นสารเริ่มต้นของสารกลายพันธุ์ (Premutagen) และสารเริ่มต้นของสารก่อมะเร็ง (Precarcinogen) ซึ่ง

เป็นสารชนิดเดียวกับที่ควันไฟไอเสียของเครื่องยนต์ ควันบุหรี่ และเตาเผาเชื้อเพลิงในโรงงานอุตสาหกรรม

สารพิษทั้ง 3 ชนิดนี้ เกิดขึ้นขณะการปิ้งย่างอาหาร เพราะไขมันหรือน้ำมันจะหยดลงบนเตาไฟ ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ และก่อให้เกิดสาร PAHs ลอยขึ้นมาพร้อมเขม่าควันเกาะที่บริเวณผิวของอาหาร และพบในปริมาณมาก ถ้าปิ้งย่างจนไหม้เกรียม หากรับประทานเป็นประจำจะมีโอกาสเสี่ยงต่อการเกิดโรคมะเร็ง โดยเฉพาะมะเร็งตับ ซึ่งจากสถิติขององค์การอนามัยโลก (WHO) พบว่าในปี 2553 มีผู้ป่วยมะเร็งตับในประเทศไทย 23,410 ราย และเสียชีวิต 20,334 ราย คิดเป็นอัตราการเสียชีวิต 55 คนต่อวัน หรือ 2 คนต่อชั่วโมง

สำหรับเทคโนโลยีในการผลิตอาหารประเภทปิ้งย่างมีการพัฒนากระบวนการผลิตอย่างต่อเนื่องเพื่อตอบสนองวิถีการดำรงชีวิตของมนุษย์จากการศึกษาทบทวนผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า ชีรพงศ์ บริรักษ์ [1] ได้พัฒนากระบวนการผลิตหมูปิ้งเพื่อลดควันและกลิ่นรบกวนจากการผลิตหมูปิ้ง โดยทำการออกแบบและสร้างเครื่องปิ้งหมูกึ่งอัตโนมัติ ทำจากสแตนเลส 304 ขนาดกว้าง 70 cm ยาว 60 cm และสูง 110 cm ระบบการให้ความร้อนในการปิ้งใช้อินฟราเรดฮีตเตอร์จำนวน 4 แท่ง กำลังไฟฟ้ารวม 2,150 W ขับเคลื่อนชุดโซ่ลำเลียงด้วยมอเตอร์ขนาด 8 W 12V DC ใช้โซ่ลำเลียงพร้อมติดตั้งชุดหนีบไม้ทำจากสแตนเลสในการลำเลียงหมูปิ้ง โดยทำการควบคุมมอเตอร์ต้นกำลังที่ความเร็วรอบ 3 ระดับ ได้แก่ 0.16, 0.2, 0.24 รอบ/นาที ควบคุมอุณหภูมิของอินฟราเรดฮีตเตอร์ระหว่าง 210 – 220°C จากการทดสอบความเร็วรอบที่เหมาะสมของชุดลำเลียงอยู่ที่ 0.2 รอบต่อนาที สามารถผลิตหมูปิ้งได้สูงสุดเฉลี่ย 450 ไม้ต่อชั่วโมงค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนเท่ากับ 32%

อนุชัย วรรณจิตผ่องใส และคณะ [2] ได้ออกแบบและสร้างการออกแบบและสร้างเครื่องปิ้งย่างเอนกประสงค์ ทำจากเหล็กชุบ ระบบการให้ความร้อนในการปิ้งใช้ฮีตเตอร์ โดยวางไม้เสียบในแนวนอนและติดตั้งฮีตเตอร์ด้านใต้ ระบบในการใส่ไม้ปิ้งและปลดไม้ปิ้งยังคงใช้แรงงานจากคน ทำการทดสอบโดยปิ้งผลิตภัณฑ์ได้แก่ ลูกชิ้น ไส้กรอก หมูปิ้ง หมูสะเต๊ะ ปีกไก่ และปลาหมึก ใช้เวลาในการผลิตระหว่าง 4 – 6 นาทีและใช้อุณหภูมิในการปิ้งย่างตั้งแต่ 100 – 250°C ขึ้นอยู่กับผลิตภัณฑ์

ธนิต ภัคธนาเดชาพันธ์ [3] ได้ออกแบบและสร้างเตापิ้งย่างเพื่อสุขภาพสร้างขึ้นมาเพื่อใช้ในการปิ้งย่าง โดยอาศัยหลักการแผ่รังสีความร้อนจากหลอดความร้อนไฟฟ้า แล้วเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนด้วยหลอดนิโครม ขนาด 1000 W โดยจัดวางชุดเสียบไม้ปิ้งหมูให้ไม้เสียบวางในแนวแกนตั้ง และติดตั้งอยู่ตรงกึ่งกลางของเครื่องและติดตั้งชุดฮีตเตอร์โดยรอบ ผลการทดลองใช้งานเตापิ้งย่างเพื่อสุขภาพสามารถปิ้ง-ย่างได้สะดวกและเร็ว

ลดควัน ลดการไหม้ของเนื้อในการปิ้งย่าง 1 รอบจะปิ้งย่างได้ 16 ไม้ โดยมีข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขใช้วัสดุอื่นที่ทนความร้อนได้สูงและไม่ทำให้ตัวเครื่องร้อน ออกแบบการจัดวางหลอดความร้อนให้อยู่ในระดับใกล้กับเนื้อมากขึ้น

ธีรศาสตร์ คณาศร และคณะ [4] ได้พัฒนาเตาอบย่างไก่ด้วยความร้อนจากเตาถ่านโดยใช้เทคนิคการสะสมความร้อนจากเตาถ่านในห้องอบย่างไก่ที่ออกแบบใช้ถังเหล็กขนาดความจุ 200 ลิตร มีขนาดความกว้างเส้นผ่านศูนย์กลาง 58 cm และความสูง 140 cm พื้นด้านล่างเจาะเป็นช่องวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 cm สำหรับวางเตาถ่านส่วนด้านบนมีฝาปิดเท่ากับขนาดความกว้าง 60 cm ภายในห้องอบมีราวเหล็กเป็นชั้นวางอบย่างไก่มีระยะห่างจากผนัง 10 cm จำนวน 2 ชั้น เว้นระยะห่างแต่ละชั้นๆ ละ 30 cm ก่อนทดสอบนำตัวอย่างไก่ไปวางแขวนในห้องอบ แล้วจุดเตาถ่านไฟให้ติดเตาถ่านใช้ชนิดไม้ยูคาลิปตัส 1 kg จากนั้นทดสอบอบย่างไก่แบบหิบบนไม้ที่แขวนบนชั้นๆ วางละ 4 ตัว ผลการทดสอบอบย่างไก่พบว่าเตาอบย่างมีประสิทธิภาพเชิงความร้อน 31% อบย่างไก่ด้วยอุณหภูมิที่มากที่สุดอยู่ในช่วง 270 - 320°C

คมสันต์ แร้งจบ และกาญจนา นาคะพินธุ [5] ได้ทำการศึกษา การกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่เกิดจากกิจกรรมประเภทปิ้งย่างจากผลการศึกษา พบว่ามีปริมาณอนุภาคขนาดเล็กกว่า 10 μm ในบรรยากาศทั่วไป ในปริมาณที่สูงใน ช่วงเวลาที่มีการปิ้งย่าง โดยเฉพาะกิจกรรมการปิ้งย่างอาหารที่มีปริมาณไขมันสูง เช่น ไก่ย่าง และหมูปิ้ง และพบว่าปริมาณ ของอนุภาคจากการปิ้งย่างมีค่าลดลงเมื่อมีการใช้อุปกรณ์ควบคุมควัน ได้แก่ พัดลมดูดควันและครอบดูดควัน (Hood) ดังนั้นควรมีการส่งเสริมให้ร้านค้าที่มีกิจกรรมปิ้งย่างมีการใช้อุปกรณ์ควบคุมควันเพื่อลดโอกาสเสี่ยงต่ออาการเจ็บป่วยของโรคระบบทางเดินหายใจและผลกระทบต่อด้านสุขภาพเนื่องจากอนุภาคที่เกิดจากกิจกรรมปิ้งย่างส่วนใหญ่เป็นอนุภาคที่มี ขนาดเล็กกว่า 2.5 μm ซึ่งมีโอกาสมากที่จะเข้าไปสะสมอยู่ภายในปอดมากกว่าอนุภาคขนาดใหญ่

ในปี 2556 สำนักสิ่งแวดล้อม [6] ได้ทำการเก็บ และวิเคราะห์ตัวอย่างอากาศจาก การปิ้งย่างเนื้อสัตว์ประเภท ไก่บนเตาไม้คั่นและเตาถ่าน เพื่อศึกษาหาระดับความเข้มข้นของสารเบนซีน (Benzene) ซึ่งจัดเป็นสารก่อมะเร็ง และ สารอินทรีย์ระเหยง่ายรวม (Total Volatile Compounds : Total VOCs) ผลการเก็บและวิเคราะห์ ตัวอย่างอากาศจากการปิ้งย่างไก่ ผลที่ได้จากการเก็บตัวอย่างคือ พบสารเบนซีน พบในตัวอย่างอากาศบนทั้งสองเตา ส่วนใหญ่มีระดับความเข้มข้นเฉลี่ยของสารเบนซีนน้อยกว่า 0.03 ppm. ถึงแม้ว่าจะพบในระดับน้อยแต่ถ้าหากได้รับเป็นเวลานานอาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยในระยะยาวได้ - สารอินทรีย์ระเหยง่ายรวม พบในตัวอย่างอากาศ มีระดับความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่ายรวมเฉลี่ยของ เตาไม้คั่นเท่ากับ 6.66 ppm. และเตาถ่านเท่ากับ 1.96 ppm. - อัตราการปล่อยมลสารทางอากาศของสารอินทรีย์ระเหยง่าย พบว่าเตาถ่านสามารถลดการปล่อยมลสารทางอากาศของสารอินทรีย์ระเหยง่ายรวมเท่ากับ 18.70×10^{-3} g/kg ในห้องสเปกโตรโฟโตเมตริกประมาณ 4.6 เท่า

พงศ์เทพ วรธรรมเดช [7] กล่าวว่าสามารถพบสารในกลุ่ม PAHs ในอาหารมากถึงร้อยละ 70 สารในกลุ่ม PAHs สามารถตรวจพบในอาหารได้แตกต่างกันตั้งแต่ระดับส่วนในล้านส่วน (parts per million-ppm) จนถึง $\mu\text{g/kg}$ โดยส่วนใหญ่เป็นอาหารที่ได้มาจากการรมควันหรือผ่านการปิ้งย่างด้วยถ่าน ฟืน เนื้อ และปลาปิ้งย่างมีสาร benzo[a]pyrene ได้มากถึง $2.0 \mu\text{g/kg}$

Lawrence Gyansah [8] ได้ทำการออกแบบเตาปิ้งย่างบาร์บีคิว แบบพกพา ขนาดความกว้างหน้าเตา 42 cm ความยาวหน้าเตา 62 cm ใช้ก๊าซ LPG เป็นเชื้อเพลิง โดยมีวัตถุประสงค์หลักคือ เตาปิ้งย่างสามารถเคลื่อนย้ายได้อย่างง่ายดาย ลดอันตรายต่อสุขภาพจากการปิ้งย่างบาร์บีคิวแบบดั้งเดิมที่ใช้ถ่านไม้เป็นเชื้อเพลิงในการให้ความร้อน ในการสร้างเปลือกเตาใช้สแตนเลสชนิด 304 และใช้เหล็กหล่อในการทำหัวเตาเผา ใช้ก๊าซ LPG เป็น

เชื้อเพลิงเพื่อลดปัญหาเขม่าถ่านไม้เกาะที่เนื้อสัตว์จากการใช้ถ่านไม้เป็นเชื้อเพลิง

Muna Turkey Mossa Al-Mossawei และคณะ[9] ได้ทำการศึกษาการลดการเกิดจุลินทรีย์ที่เกิดจากกระบวนการย่างเนื้อไก่ โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างการย่างแบบดั้งเดิมและการปรับปรุงกระบวนการผลิตโดยใช้เครื่องปิ้งเนื้อไก่ ปัญหาที่พบเมื่อใช้วิธีการปิ้งย่างแบบดั้งเดิมคือของเหลวไหลออกจากเนื้อไก่ดิบที่ทำการปิ้งจากแกนบนสุดไหลไปสะสมในเนื้อไก่แถวด้านล่างของเตาย่างของเหลวที่ไหลออกมาเมื่อนำไปทดสอบพบว่ามีกรปนเปื้อนของเชื้อ Salmonella เมื่อทำการปรับปรุงโดยใช้เครื่องปิ้งเนื้อไก่ซึ่งแก้ไขข้อบกพร่องโดยการติดตั้งถาดรองน้ำมันและของเหลวที่เกิดจากการปิ้งย่าง และการติดตั้งพัดลมดูดควันในตู้ปิ้งย่างคุณภาพเนื้อไก่ที่ได้จากเครื่องปิ้งที่ปรับปรุงวิธีการปิ้งและการระบายควันพบว่าสารปนเปื้อนและเชื้อจุลินทรีย์ที่พบในเนื้อไก่ลดลง

จากการศึกษาทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องจึงนำมาทำการออกแบบโดยมีหลักการซึ่งนำหลักการจากเครื่องปิ้งเนื้อสัตว์กึ่งอัตโนมัติ [1] มาทำการปรับปรุงโดยกระบวนการปิ้งย่างจะไม่มีการเกิดควันขาวจากการที่ไขมันในเนื้อสัตว์ที่ได้รับความร้อนหยดลงไปโดนชุดให้ความร้อนซึ่งไขมันที่เกิดจากกระบวนการปิ้งย่างจะตกลงไปในถาดรองรับสามารถนำไปทำความสะอาดได้และมีการเพิ่มชุดปลดไ้มเมื่อผลิตภัณฑ์ได้คุณภาพตามต้องการรวมทั้งเครื่องปิ้งย่างที่ทำการออกแบบและสร้างใช้วัสดุที่ปลอดภัยต่อผู้ผลิตและผู้บริโภค

2. เครื่องปิ้งเนื้อสัตว์กึ่งอัตโนมัติเพื่อสุขภาพ

2.1 อินฟราเรดฮีตเตอร์ (Infrared Heater)

ลักษณะการทำงานของอินฟราเรดฮีตเตอร์ดังรูปที่ 1 เป็นการส่งผ่านความร้อนแบบแผ่รังสี (เหมือนกับที่ดวงอาทิตย์ส่งความร้อนมายังโลก) จึงมีประสิทธิภาพสูง ความสูญเสียต่ำ ประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้ 30 – 50% สามารถให้ความร้อนวัตถุได้ถึงเนื้อใน จึงทำให้ประหยัดเวลาได้ 1 – 10 เท่า (การให้ความร้อนแบบการพาและการนำความร้อนจะทำให้วัตถุร้อนเฉพาะที่ผิวแล้ว

ค่อยๆ ซึมเข้าไปเนื้อในจึงใช้เวลามาก) มีขนาดเล็กกว่าฮีตเตอร์แบบทั่วไปทำให้ประหยัดเนื้อที่การติดตั้งและการถอดเปลี่ยนเพื่อซ่อมบำรุงง่ายมีความปลอดภัยสูงเนื่องจากไม่มีเปลวไฟตัวเรือนมีความเป็นฉนวนสูงไฟไม่รั่วและให้รังสีช่วง 3 – 10 μm ซึ่งเป็นช่วงที่วัสดุเกือบทุกชนิดสามารถดูดซับรังสีได้ดี ลักษณะการแผ่รังสีความร้อนของอินฟราเรดฮีตเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 การแผ่รังสีความร้อนของอินฟราเรดฮีตเตอร์

ประโยชน์รังสีอินฟราเรดด้านอุตสาหกรรมอาหาร

1. การอบแห้ง รังสีอินฟราเรดไกลมีสามารถให้ความร้อนและทะลุผ่านเข้าไปในอาหารได้มาก จึงประยุกต์ใช้สำหรับการอบแห้งอาหารต่างๆ เช่น เมล็ดพันธุ์พืช ผลิตภัณฑ์ผัก และผลไม้ รวมถึงเนื้อสัตว์ ช่วยลดเวลาและพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งลง

ข้อดีการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

- ระบบให้ความร้อนควบคุมได้ง่าย
- สามารถถ่ายเทความร้อนไปยังผลิตภัณฑ์ได้ดี และความร้อนสามารถทะลุผ่านเข้าไปในผลิตภัณฑ์ได้สูง
- มีราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับแหล่งพลังงานบางชนิด เช่น ไดโอดีทริก และไมโครเวฟ
- มีอายุการใช้งานยาวนาน และมีค่าซ่อมบำรุงต่ำ
- ทั้งระบบน้ำหนักเบา ใช้ใช้พื้นที่ของอุปกรณ์น้อย ติดตั้งง่าย และสามารถใช้ร่วมกับเครื่องอบแห้งแบบทั่วไปได้
- ผลิตภัณฑ์มีความแห้งสม่ำเสมอ และมีความสะอาด

ข้อเสียการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

- สำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดใหญ่จะต้องเพิ่มขนาดหลอดรังสีอินฟราเรด ทำให้ต้นทุนสูงขึ้น

- ไม่เหมาะสำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีความหนามาก

2. การแปรรูปอาหารให้สุก การใช้รังสีอินฟราเรดแปรรูปอาหารให้สุก แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

-ระดับอุณหภูมิปานกลาง (Medium temperature radiate) ระดับอุณหภูมิปานกลาง ได้จากเครื่องกำเนิดรังสีอินฟราเรดแบบคลื่นสั้น ซึ่งใช้หลอดเป็นเส้นลวดหรือหลอดซิลิกา สามารถให้ความร้อนในช่วง 500 – 1000 $^{\circ}\text{C}$ และให้พลังงานประมาณ 15 kW/m^2 นิยมใช้กับอาหารที่ไม่ไวต่อความร้อน

-ระดับอุณหภูมิสูง (High temperature radiate) ระดับอุณหภูมิสูง ได้จากเครื่องกำเนิดรังสีอินฟราเรดแบบคลื่นสั้น ซึ่งใช้เป็นหลอดทั้งสแตน หรือหลอดควอทซ์ สามารถให้ความร้อนสูงสุดถึง 2,500 $^{\circ}\text{C}$ และให้พลังงานประมาณ 10 – 65 kW/m^2 นิยมใช้กับอาหารที่ไวต่อความร้อน

ตัวอย่างการใช้อินฟราเรดฮีตเตอร์ในการแปรรูปอาหาร ดังแสดงในรูปที่ 2

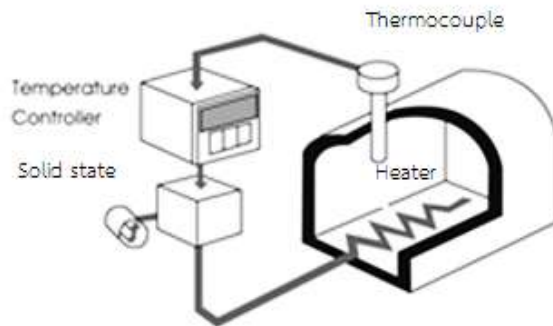


รูปที่ 2 การใช้อินฟราเรดฮีตเตอร์แปรรูปอาหาร

2.2 ระบบควบคุมอุณหภูมิ

การควบคุมอุณหภูมิเป็นการควบคุมแบบระบบปิด โดยมีการตั้งค่าอุณหภูมิที่ต้องการควบคุม (Set Point) ไว้ที่ตัวควบคุม out put ของตัวควบคุมจะถูกต่อเข้ากับอุปกรณ์ที่เป็นตัวตัด/ต่อกระแสไฟให้กับแหล่งจ่ายความร้อน เช่น ฮีตเตอร์อุณหภูมิของระบบจะถูกวัดโดยตัววัดอุณหภูมิ และส่งกลับมายังตัวควบคุมเพื่อเปรียบเทียบกับ set point ตัวควบคุมจะนำผลต่างที่ใช้ไปคำนวณเพื่อให้

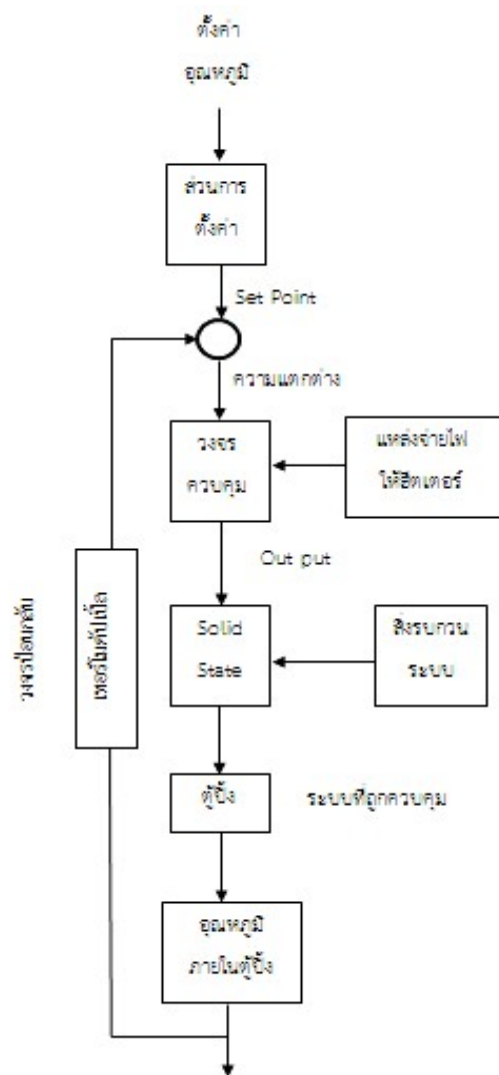
out put ออกมาเพื่อทำให้อุณหภูมิที่วัดได้มีค่าเท่ากับ set point



รูปที่ 3 การควบคุมอุณหภูมิของระบบตู้บั้งเนื้อสัตว์
กึ่งอัตโนมัติเพื่อสุขภาพ

จากรูปที่ 3 ตู้บั้งเนื้อสัตว์กึ่งอัตโนมัติเพื่อสุขภาพ จะได้รับความร้อนจากอินฟราเรดฮีตเตอร์ เทอร์โมคัปเปิ้ลจะ ทำหน้าที่วัดอุณหภูมิในตู้แล้วส่งไปที่ตัวควบคุมที่ตั้งค่า set point ไว้ ถ้ามีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่วัดได้กับค่า set point (Deviation) ตัวควบคุมจะพยายามทำให้ความ แตกต่างนั้นเหลือน้อยจนเท่ากับ 0 โดยจะทำการให้ out put (Manipulate Variable: MV) ออกมา โดยตัวอย่างนี้ out put ของตัวควบคุมเป็นรีเลย์หรือหน้าสัมผัสทำหน้าที่ ตัดต่อไฟให้กับแมคเนติกคอนแทคเตอร์ที่เป็นตัวตัด/ต่อ ไฟฟ้าให้กับอินฟราเรดฮีตเตอร์ ไดอะแกรมของการ ควบคุมอุณหภูมิของระบบเครื่องบั้งเนื้อสัตว์กึ่งอัตโนมัติ เพื่อสุขภาพ ดังรูปที่ 4

การควบคุมแบบ PID เป็นการรวมเอาการ ควบคุมแบบ P, I และ D เข้าด้วยกันคุณสมบัติของแต่ละ การควบคุมจะช่วยให้การควบคุมมีประสิทธิภาพสูงสุด การควบคุมแบบ P ลด Overshoot และ Hunting การ ควบคุมแบบ I ลด Offset ส่วนการควบคุมแบบ D จะ ตอบสนองต่อสิ่งรบกวนจากภายนอก



รูปที่ 4 ไดอะแกรมของการควบคุมอุณหภูมิของตู้บั้ง
เนื้อสัตว์กึ่งอัตโนมัติเพื่อสุขภาพ

2.3 การคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของ เครื่องบั้งเนื้อกึ่งอัตโนมัติเพื่อสุขภาพ

การคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาบั้ง ได้จากสมการดังนี้

$$\text{ประสิทธิภาพเชิงความร้อน} = \frac{\text{ความร้อนที่ใช้ประโยชน์}}{\text{ความร้อนที่เข้าจากเชื้อเพลิง}} \times 100 \% \quad (1)$$

การหาความร้อนที่ใช้ประโยชน์

$$Q_{out} = MC_p (T_2 - T_1) + M_1 C_p (T_2 - T_1) + (M - M_1) L \quad (2)$$

โดยที่

Q_{out} คือ ค่าความร้อนใช้ประโยชน์ (kJ)

M คือ น้ำหนักหมูก่อนปิ้ง (kg)

C_p คือ ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ (4.187 kJ/kg.K)

T_1 คือ อุณหภูมิของเตาด้านนอก (°C)

T_2 คือ อุณหภูมิของเตาด้านใน (°C)

M_1 คือ น้ำหนักหมูหลังปิ้ง (kg)

L คือ ค่าความร้อนแฝงของน้ำ (2,260.98 kJ/kg)

3.การออกแบบเครื่องปิ้งเนื้อสัตว์กึ่งอัตโนมัติเพื่อสุขภาพ

3.1 เครื่องปิ้งเนื้อสัตว์กึ่งอัตโนมัติเพื่อสุขภาพ

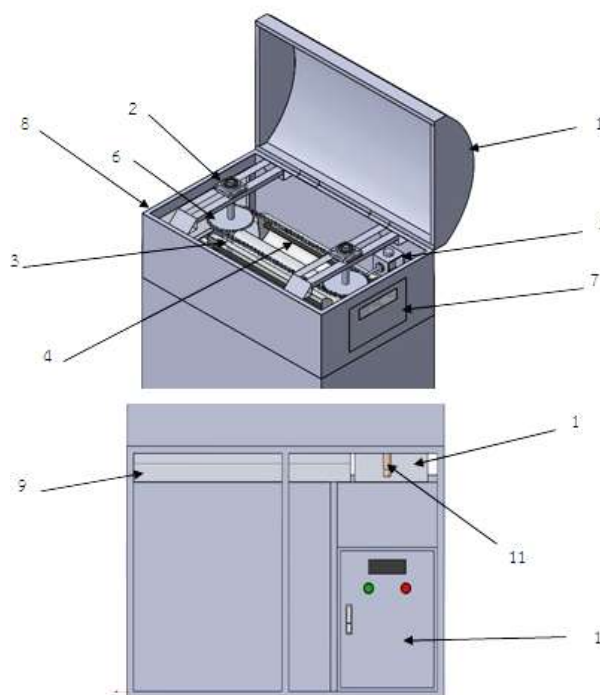
มีส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วนได้แก่ ตู้ปิ้ง ระบบขับเคลื่อนโซ่ลำเลียง และระบบปลดไม้เสียบผลิตภัณฑ์

ตู้ปิ้งของเครื่องปิ้งเนื้อสัตว์กึ่งอัตโนมัติเพื่อสุขภาพ ทำจากสแตนเลสชนิด 304 ผนัง 2 ชั้นกั้นกลางด้วยฉนวนทนความร้อนตัวตู้มีขนาดกว้าง 60 cm ความยาว 95 cm และความสูง 30 cm ทำการติดตั้งอินฟราเรดฮีตเตอร์ขนาด 600 W จำนวน 4 แห่ง สามารถปรับตั้งอุณหภูมิในการปิ้งผลิตภัณฑ์ได้ตั้งแต่ 25 °C ถึง 400 °C

ระบบขับเคลื่อนโซ่ลำเลียงประกอบไปด้วยมอเตอร์กระแสตรงขนาด 8 W 12 V ชุดอุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ ชุดโซ่ลำเลียงสแตนเลสชนิด 304 และตะขอเกี่ยวไม้เสียบ สเตอร์สแตนเลสชนิด แบร์ริงรองรับเพลลา ชุดเพลลาส่งกำลัง

ระบบปลดไม้เสียบผลิตภัณฑ์ ประกอบด้วยมอเตอร์ขับเคลื่อนที่ใช้ในการกางไม้กั้นเปลือกนอกทำจากสแตนเลสชนิด 304 ชุดวงจรควบคุมมอเตอร์ และไม้กั้น รวมทั้งมีชุดถาดรองรับผลิตภัณฑ์อยู่ด้านล่างของชุดปลดไม้เสียบผลิตภัณฑ์

ในการออกแบบได้ทำการติดตั้งถาดรองรับน้ำมันจากไขมันสัตว์ไว้ที่ด้านใต้ของตัวตู้สามารถถอดออกไปทำความสะอาดได้เมื่อเสร็จสิ้นการใช้งาน



รูปที่ 5 แสดงส่วนประกอบหลักของเครื่องปิ้งเนื้อสัตว์กึ่งอัตโนมัติเพื่อสุขภาพ

จากรูปที่ 5 ส่วนประกอบหลักของเครื่องปิ้งเนื้อสัตว์กึ่งอัตโนมัติเพื่อสุขภาพ

- | | |
|---------------------|---------------------------------|
| 1.ฝาปิด-เปิด | 7. ประตูป้อนผลิตภัณฑ์ |
| 2.แบร์ริง | 8. กระจกกันความร้อน |
| 3.โซ่ลำเลียง | 9. ถาดรองน้ำมัน |
| 4.อินฟราเรดฮีตเตอร์ | 10. ถาดรองรับผลิตภัณฑ์ |
| 5.ชุดปลดไม้ | 11. มอเตอร์ขับเคลื่อนโซ่ลำเลียง |
| 6.เฟืองส่งกำลัง | 12. ตู้ควบคุม |

3.2 ชุดเครื่องมือวัดที่ใช้ในการเก็บผลการทดสอบ

ในการเก็บบันทึกผลการทดสอบใช้เครื่องมือวัดค่าตัวแปรต่าง ๆ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ตารางที่ 1 รายการเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

เครื่องมือ	คุณสมบัติ
1. เครื่องชั่งน้ำหนัก 	เครื่องชั่งน้ำหนัก ใช้ในการชั่งน้ำหนักผลิตภัณฑ์ก่อนและหลังบั้ง - ความละเอียดอ่านค่า 1 μg - ชั่งน้ำหนักต่ำสุด 3 mg - ชั่งน้ำหนักสูงสุด 300 g - อุณหภูมิขณะทำงาน 10 – 40 °C
2. นาฬิกาจับเวลา 	นาฬิกาจับเวลา ใช้จับเวลาการทำงานของเครื่อง - ความละเอียด 1/100 วินาที - สามารถเรียกดูค่าการจับเวลาจากหน่วยความจำได้
3. อินฟราเรด เทอร์มิเตอร์ 	ช่วงการวัด IR Temp -40 to 550 °C Type K 0 to 100 °C ความละเอียดการวัด 0.1 °C ค่าความผิดพลาด : ±(1.0 °C + 0.1 °/1 °C) (below 0 °C) / ±1% or ±1.0 °C (above 0 °C) Type K ±2.2 °C
4. ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ fluke 325 	วัดกระแสไฟฟ้าได้ตั้งแต่ 40 A – 400 A ค่าความผิดพลาด 2%± ค่าความละเอียด 5 digit วัดแรงดันไฟฟ้าได้ 600 V

3.3 ตัวแปรที่การศึกษาและเก็บผลการทดสอบ

ในการทำการทดสอบและวิเคราะห์ผลเครื่องบั้งเนื้อสัตว์กึ่งอัตโนมัติเพื่อสุขภาพที่ทำการออกแบบมีตัวแปรต่างๆ ที่ทำการบันทึกเพื่อใช้ในการคำนวณหาอัตราการผลิตที่เหมาะสม ค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน และคุณภาพทางกายภาพของเนื้อสัตว์บั้ง ดังต่อไปนี้

ตัวแปรต้น

1. ขนาดและชนิดของเนื้อสัตว์ที่ใช้ในการทดสอบ
2. น้ำหนักเริ่มต้นของเนื้อสัตว์

ตัวแปรตาม

1. ระยะเวลาที่ใช้ในการผลิต
2. น้ำหนักสุดท้ายหลังผลิต
3. ลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์
4. ค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน

ตัวแปรควบคุม

1. ความเร็วรอบของมอเตอร์ลำเลียง
2. อุณหภูมิของอินฟราเรดฮีตเตอร์

3.3 วิธีการทำการทดสอบ

การทดสอบใช้เนื้อสัตว์จำนวน 5 ตัวอย่าง ได้แก่

1. เนื้อหมูเสียบไม้ ชนิดหมักด้วยซอสปรุงรสรสชาติเผ็ดเล็กน้อย 4.5 cm ยาว 7.5 cm หนา 1.2 cm
2. เนื้อหมูเสียบไม้ชนิดหมักด้วยนมสดและซอสปรุงรสรสชาติเผ็ดเล็กน้อย 6.5 cm ยาว 7 cm หนา 1.4 cm
3. หมูสะเต๊ะ ขนาดเผ็ดเล็กน้อย 2 cm ยาว 7 cm หนา 1.0 cm
4. เนื้อไก่ ขนาดเผ็ดเล็กน้อย 5 cm ยาว 7.5 cm หนา 1.5 cm
5. เนื้อวัว ขนาดเผ็ดเล็กน้อย 2.5 cm ยาว 7.5 cm หนา 1.1 cm

เงื่อนไขในการทดสอบมีดังนี้

1. ทำการปรับความเร็วรอบเพื่อหาความเร็วรอบที่เหมาะสมโดยการปรับตั้งความเร็วรอบของมอเตอร์ลำเลียงที่ 0.32 รอบ/นาที 0.24 รอบ/นาที และ 0.19 รอบ/นาที
2. ทำการปรับอุณหภูมิของอินฟราเรดฮีตเตอร์ เพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมโดยทำการปรับตั้งอุณหภูมิของอินฟราเรดฮีตเตอร์ที่ 200 °C, 210 °C และ 220 °C

3.4 ขั้นตอนทำการทดสอบ

- 3.4.1 เตรียมเนื้อสัตว์เสียบไม้ดังรูปที่ 6 พร้อมชั่งน้ำหนักก่อนทำการทดสอบดังรูปที่ 7



รูปที่ 6 แสดงการเตรียมตัวอย่างวัตถุดิบที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 7 การชั่งน้ำหนักวัตถุดิบก่อนทำการปิ้ง

3.4.2 นำเนื้อสัตว์เสียบไม้แล้วนำไปใส่เครื่องปิ้งเนื้อสัตว์กึ่งอัตโนมัติ โดยทำการบรรจุเนื้อสัตว์ ครั้งละ 10 ไม้ และทำการปิ้งจนเนื้อสัตว์สุกพอดี เริ่มทดสอบที่อุณหภูมิ 200 °C, 210 °C , 220 °C ตามลำดับและเริ่มจากความเร็ว 0.32 รอบ/นาที



รูปที่ 8 ตู้ควบคุมอุณหภูมิของอินฟราเรดฮีตเตอร์

3.4.3 จับเวลาต่อรอบ และตรวจสอบคุณภาพของเนื้อสัตว์ต่อรอบว่าสุกหรือไม่ ทำการชั่งน้ำหนักหลังปิ้ง

3.4.4 เปลี่ยนความเร็วของชุดลำเลียงเป็น 0.24 รอบ/นาที และ 0.19 รอบ/นาที ตามลำดับ

3.4.5 บันทึกผลการทดสอบและสรุปผลการทดสอบ

3.4.6 เปลี่ยนวัตถุดิบที่ใช้ในการทดสอบ ทำตามข้อ

3.4.1 – 3.4.5

4. ผลและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากการทดสอบเครื่องปิ้งเนื้อสัตว์กึ่งอัตโนมัติเพื่อสุขภาพ ได้ผลการทดสอบดังนี้

1. ด้านการออกแบบและสร้างได้เครื่องปิ้งเนื้อสัตว์กึ่งอัตโนมัติเพื่อสุขภาพที่มีคุณสมบัติเป็นไปตามวัตถุประสงค์การวิจัย ทำการทดสอบตามเงื่อนไขในการทดสอบโดยใช้เนื้อสัตว์ตัวอย่างในการทดสอบจำนวน 5 ตัวอย่างได้แก่ เนื้อหมูหมักซอส เนื้อหมูหมักนมสดและซอส หมูสะเต๊ะ เนื้อไก่ และเนื้อวัว เมื่อทำการทดสอบไม่เกิดควันสีขาวจากกระบวนการผลิตและได้ผลการทดสอบโดยสรุปดังตารางที่ 2

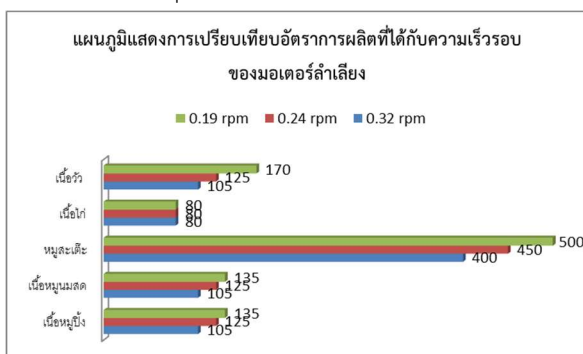
ตารางที่ 2 สรุปผลการทดสอบผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการใช้เครื่องปิ้งเนื้อสัตว์กึ่งอัตโนมัติเพื่อสุขภาพ

ลำดับที่	ผลิตภัณฑ์	ขนาด/ไม้ ก x ย x หนา (cm)	เวลาในการผลิต (min)/ไม้	อัตรา การ ผลิต เฉลี่ย ไม้ต่อ ชั่วโมง	กำลัง ไฟฟ้า ที่ใช้ kWh	ค่าใช้จ่าย ด้าน พลังงาน บาท/ชิ้น
1.	หมูปิ้ง	4.5 x 7.5 x 1.2	5.2	135	2.27	0.03 - 0.04
2.	หมูปิ้ง นมสด	6.5 x 7 x 1.4	16.8	125	2.17	0.04 - 0.05
3.	หมู สะเต๊ะ	2 x 7 x 1.0	3.15	400 - 500	2.18	0.02 - 0.03
4.	เนื้อไก่ ย่าง	5 x 7.5 x 1.5	25.3	80	2.24	0.06 - 0.07
5.	เนื้อวัว ย่าง	2.5 x 7.5 x 1.1	12.4	105	2.19	0.035- 0.04

จากตารางที่ 2 แสดงสรุปผลการทดสอบผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการใช้เครื่องปิ้งเนื้อสัตว์กึ่งอัตโนมัติเพื่อสุขภาพโดยเฉลี่ย ซึ่งแสดงชนิดผลิตภัณฑ์ที่ใช้ทำการทดสอบสมรรถนะของเครื่องปิ้งเนื้อสัตว์กึ่งอัตโนมัติเพื่อสุขภาพ โดยเปรียบเทียบระยะเวลาในการผลิต อัตราการผลิต กำลังไฟฟ้าที่ใช้และค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน โดยเครื่องปิ้งสามารถทำการปิ้งเนื้อสัตว์เสียบไม้ที่มีขนาดตั้งแต่ความกว้าง 2 cm ยาว 7 cm และ หนา 1.0 cm ขึ้นไป ใช้เวลาในการผลิตขั้นต่ำ 5 นาที และใช้กำลังไฟฟ้าขั้นต่ำ 2.17 kWh คิดเป็นค่าใช้จ่ายด้านพลังงานขั้นต่ำ 0.02 บาท/ชิ้น

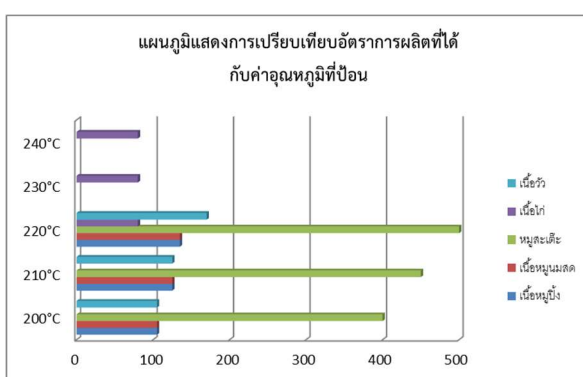
ปีที่ 14 ฉบับที่ 3 เดือน กันยายน – ธันวาคม พ.ศ. 2562

ทั้งนี้ค่าจำนวนการผลิต เวลาที่ใช้ กำลังไฟฟ้าที่ใช้และค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่ได้จะเปลี่ยนแปลงไปตามขนาดชนิด และปริมาณไขมันที่มีอยู่ในเนื้อสัตว์นั้นๆ และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าใช้จ่ายด้านพลังงานของเครื่องปิ้งเนื้อสัตว์กึ่งอัตโนมัติเพื่อสุขภาพกับการใช้ถ่านไม้พบว่าสามารถลดต้นทุนการผลิตได้ร้อยละ 13.4



รูปที่ 9 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบอัตราการผลิตกับความเร็วยรอบของมอเตอร์ลำเลียง

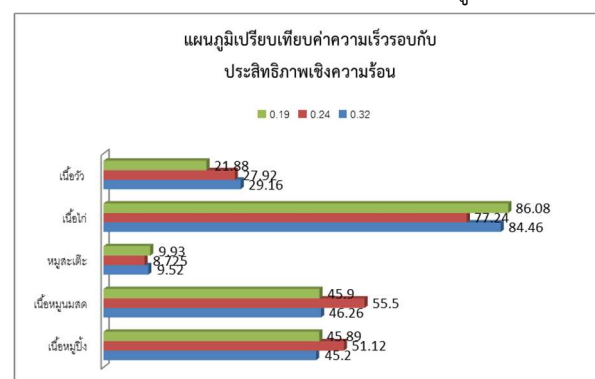
จากรูปที่ 9 แสดงแผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบอัตราการผลิตที่ได้เปรียบเทียบกับจำนวนไม้/ความเร็วรอบของเนื้อสัตว์แต่ละชนิด จากการทำการทดสอบพบว่าความเร็วรอบในการหมุนของโซ่ลำเลียงมีผลต่อจำนวนการผลิตที่ได้จากการใช้เครื่องปิ้งเนื้อสัตว์กึ่งอัตโนมัติเพื่อสุขภาพ เมื่อความเร็วในการหมุนเร็วขึ้นจำนวนผลผลิตที่ได้จะสูงขึ้นแต่ต้องทำการปรับเพิ่มค่าอุณหภูมิของอินฟราเรดฮีตเตอร์เพิ่มขึ้นตาม



รูปที่ 10 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบอัตราการผลิตที่ได้กับค่าอุณหภูมิที่ป้อน

จากรูปที่ 10 แสดงการเปรียบเทียบกับอัตราการผลิตที่ได้กับค่าอุณหภูมิที่ป้อนให้กับอินฟราเรดฮีตเตอร์ การทดสอบจะเริ่มทำการให้ความร้อนแก่อินฟราเรดฮีตเตอร์จากอุณหภูมิห้องจนอุณหภูมิภายในตู้เป็นไปตามค่าที่ต้องการทดสอบซึ่งจะเริ่มทำการทดสอบที่ 200°C สำหรับเนื้อสัตว์ 4 ชนิด ยกเว้นเนื้อไก่ที่เริ่มทำการทดสอบที่ 220°C เนื่องจากหากทดสอบที่อุณหภูมิต่ำกว่า 220°C จะไม่สามารถทำให้เนื้อไก่สุกได้ ในการทดสอบการเปลี่ยนแปลงระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะทำให้จำนวนผลผลิตที่ได้สูงขึ้นตาม ยกเว้นเนื้อไก่ซึ่งมีขนาดความกว้างยาวและหนามากกว่าเนื้อสัตว์ชนิดอื่นๆ จึงทำให้ได้ค่าผลผลิตคงที่ ในการเพิ่มค่าอุณหภูมิมีผลกระทบกับคุณภาพเนื้อสัตว์ สีและความฉ่ำของเนื้อหากมีปริมาณสูงมากไม่สัมพันธ์กับความเร็วยรอบจะทำให้เนื้อสัตว์เกิดการไหม้เกรียมขึ้นได้

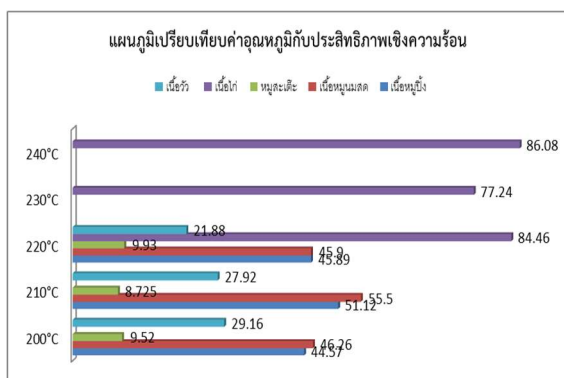
2. ด้านประสิทธิภาพเชิงความร้อน ในการทดสอบสมรรถนะของเครื่องปิ้งเนื้อสัตว์กึ่งอัตโนมัติเพื่อสุขภาพ ในด้านประสิทธิภาพเชิงความร้อนปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนได้แก่ ความเร็วยรอบของโซ่ลำเลียง ค่าอุณหภูมิของอินฟราเรดฮีตเตอร์ และขนาดของเนื้อสัตว์ที่นำมาทำการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 11 แสดงแผนภูมิเปรียบเทียบค่าความเร็วยรอบกับประสิทธิภาพเชิงความร้อน

จากรูปที่ 11 แสดงแผนภูมิเปรียบเทียบค่าความเร็วยรอบกับประสิทธิภาพเชิงความร้อน จากผลการทดสอบพบว่าเนื้อสัตว์ที่มีความหนาขึ้นเนื้อมากกว่า 1.4 cm เช่น เนื้อไก่ จะมีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูง

เนื่องจากค่าน้ำหนักต่อไม่มีผลต่อค่าความร้อนในการนำไปใช้ประโยชน์ ความเร็วรอบในการหมุนของโซ่ลำเลียงสำหรับการปิ้งเนื้อไก่ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนและอัตราการผลิต ส่วนเนื้อสัตว์ที่มีความหนาต่ำกว่า 1.2 cm เช่นหมูสะเต๊ะ ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนจะต่ำเนื่องจากค่าน้ำหนักต่อไม่สูง รวมทั้งค่าความเร็วรอบไม่มีผลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนแต่จะมีผลต่ออัตราการผลิต สำหรับเนื้อสัตว์ที่มีความหนามากกว่า 1.2 cm แต่ไม่เกิน 1.4 cm อันได้แก่ เนื้อหมูหมักขอส เนื้อหมูหมักนมสดและขอส และเนื้อวัว ค่าความเร็วรอบมีผลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนและอัตราการผลิต



รูปที่ 12 แสดงแผนภูมิเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิกับประสิทธิภาพเชิงความร้อน

จากรูปที่ 12 แสดงแผนภูมิเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ใช้ในการปิ้งเปรียบเทียบกับค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ได้จากการปิ้ง จากผลการทดสอบพบว่า ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงขึ้นตามค่าความร้อนที่ป้อนตั้งแต่ค่าอุณหภูมิ 200°C - 210°C สำหรับเนื้อสัตว์ที่มีความหนาไม่เกิน 1.2 cm ได้แก่ เนื้อหมูหมักขอส เนื้อหมูหมักนมสดและขอส หมูสะเต๊ะ และเนื้อวัว แต่เมื่อเพิ่มความร้อนเกิน 210°C ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนจะต่ำลงเนื่องจากค่าความร้อนในการใช้ประโยชน์จะสูงขึ้นในขณะที่ค่าความร้อนที่ให้เพิ่มขึ้น สาเหตุเนื่องมาจากน้ำหนักของเนื้อสัตว์ที่ได้จากการผลิตมีค่าลดลงจากการระเหยของน้ำในตัวเนื้อสัตว์ที่ได้รับค่าอุณหภูมิจากอินฟราเรดฮีตเตอร์นั่นเอง สำหรับเนื้อไก่นั้น ขนาดของ

เนื้อสัตว์ที่เสียบไม้มีความหนาทำให้มีค่าน้ำหนักก่อนและหลังปิ้งสูง ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน จึงสูงกว่าเนื้อสัตว์ชนิดอื่นๆ

3. ด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการผลิต จากรูปที่ 13 - 17 แสดงเนื้อสัตว์ที่ได้จากการผลิตโดยใช้เครื่องปิ้งเนื้อสัตว์กึ่งอัตโนมัติเพื่อสุขภาพ เนื้อสัตว์ที่ได้มีสีและคุณภาพเนื้อที่ไม่เกิดรอยไหม้และเขม่าจากการปิ้งย่างเนื้อ ซึ่งจะแตกต่างจากรูปที่ 18 ซึ่งเป็นเนื้อสัตว์ที่ได้จากกระบวนการผลิตโดยใช้เตาถ่าน ทั้งนี้การผลิตจากเครื่องปิ้งเนื้อสัตว์กึ่งอัตโนมัติมีข้อดีกว่าการผลิตจากเตาถ่านเนื่องมาจากการออกแบบให้การวางไม้เสียบอยู่ในแนวตั้งฉากกับพื้นโลกและให้อินฟราเรดฮีตเตอร์ซึ่งเป็นแหล่งให้ความร้อนอยู่ในแนวนอน ดังแสดงในรูปที่ 19 เมื่อให้ความร้อนกับเนื้อสัตว์จึงไม่เกิดการไหม้จากไขมันสัตว์เมื่อได้รับความร้อน ไขมันที่เกิดจากกระบวนการผลิตจะตกลงในถาดรองรับไขมันซึ่งสามารถนำออกไปกำจัดและสามารถล้างทำความสะอาดได้ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงมีความสะอาดปลอดภัยทั้งผู้ผลิตและผู้บริโภคเนื่องจากไม่ได้รับควันสีขาวซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง เนื้อหมูปิ้งที่ใช้เตาถ่านจะมีเขม่าและรอยไหม้ดำที่ชิ้นเนื้อ



รูปที่ 13 เนื้อหมูปิ้ง



รูปที่ 14 เนื้อไก่อ่าง



รูปที่ 17 หมูสะเต๊ะ



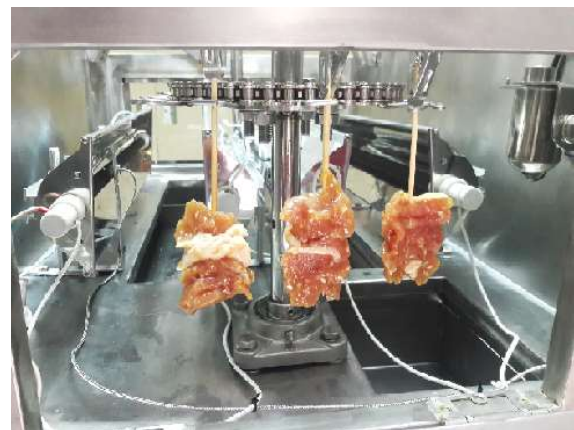
รูปที่ 15 เนื้อวัวย่าง



รูปที่ 18 หมูปิ้งที่ใช้เตาถ่านในการผลิต



รูปที่ 16 หมูปิ้งนมสด



รูปที่ 19 กระบวนการให้ความร้อนของเครื่องปิ้ง
เนื้อสัตว์กึ่งอัตโนมัติเพื่อสุขภาพ

5. สรุป

ปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะและอัตราการผลิตของเครื่องปิ้งเนื้อสัตว์กึ่งอัตโนมัติเพื่อสุขภาพ

1. อุณหภูมิที่ใช้เป็นตัวกำหนดในการปิ้ง

การปรับอุณหภูมิของอินฟราเรดหลอดตั้งค่าต่ำกว่า 190°C กับเนื้อสัตว์บางชนิดจะมีผลทำให้สุกช้า อัตราการผลิตจะลดลง และหากปรับอุณหภูมิของอินฟราเรดสูงเกินกว่า 230°C ในเนื้อสัตว์บางชนิดจะมีผลทำให้คุณภาพของเนื้อแห้งและเกิดการไหม้เกรียมของส่วนที่เป็นไขมันในตัวชิ้นเนื้อ การปรับอุณหภูมิที่สูงกว่าค่าผลการทดสอบที่แนะนำกับเนื้อสัตว์ชนิดและขนาดที่ทำการทดสอบควรใช้ ในกรณีที่ต้องเพิ่มกำลังการผลิตให้ทันต่อผู้บริโภค ซึ่งการปรับค่าอุณหภูมิที่สูงกว่าค่าแนะนำจะมีผลต่อคุณภาพของเนื้อสัตว์ในส่วนของความฉ่ำของเนื้อและคุณภาพของสีชิ้นเนื้ออาจจะคล้ำกว่าปกติ

2. ความเร็วรอบในการหมุนของโซ่ลำเลียง การปรับความเร็วรอบในการหมุนของโซ่ลำเลียงไม่สัมพันธ์กับค่าการตั้งอุณหภูมิจะมีผลต่อการสุกของชิ้นเนื้อ การปรับความเร็วรอบในการหมุนให้มีค่าความเร็วในการหมุนสูงกว่าค่าที่แนะนำอาจทำให้เนื้อที่นำมาปิ้งสุกแต่เพียงผิวภายนอก

3. ขนาดและความหนาบางของวัตถุดิบ มีผลต่อการผลิต จากการทดสอบพบว่าชิ้นเนื้อที่มีขนาดความหนา มากกว่า 1.2 cm. จะใช้เวลาในการผลิตมากกว่าชิ้นเนื้อที่มีความหนาน้อยกว่า 1.2 cm. รวมทั้งถ้าชิ้นเนื้อมีความหนาต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่าชิ้นเนื้อที่มีความบางมากกว่า

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซียที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยซึ่งทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ขอขอบคุณนายสิทธิศักดิ์ สุขรอดและนายวัชรกร ชระสุ ในการช่วยเก็บรวบรวมข้อมูลในการวิจัยนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] ชีรพงศ์ บริรักษ์, “การออกแบบและสร้างเครื่องปิ้งหมูกึ่งอัตโนมัติ โดยใช้อินฟราเรดฮีตเตอร์,” *วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยรังสิต*, ปีที่ 20 ฉบับที่ 2, 1 – 13, 2560.
- [2] อนุชัย วรรณจิตผ่องใส, พูลศักดิ์ ฐิติเบญจพล, วรากร สิริบุญยชาติ และภาสวีร์ ผลดี, “การออกแบบและสร้างเครื่องปิ้งย่างเอนกประสงค์,” *โครงการวิศวกรรมไฟฟ้า, วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, วิศวกรรมศาสตร์และอุตสาหกรรมวิจัย, มหาวิทยาลัยสยาม*, 2560.
- [3] ธนิต ภัคธนาเดชาพันธ์. (2019, August 10). เตาปิ้งย่างเพื่อสุขภาพ. [Online]. Available: http://202.29.232.198/files/20130005_18021615150245.pdf
- [4] ชีรศาสตร์ คราคร. “เตาอบย่างไก่ความร้อนจากพลังงานไฟฟ้า,” *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี*, ปีที่ 4 ฉบับที่ 1, 35 – 47, 2559.
- [5] คมสันต์ แรจจบ และกาญจนา นาถะพินธุ. “การกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่เกิดจากกิจกรรมประเภทปิ้งย่าง,” *วารสารวิจัยสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น*, ปีที่ 5 ฉบับที่ 2, 11 – 20, 2555.
- [6] สำนักสิ่งแวดล้อม. (2019, August 10). ลดมลพิษทางอากาศจากการปิ้งย่าง...ทำได้อย่างไร. [Online]. Available: <http://www.foodsanitation.bangkok.go.th/pdf>.
- [7] พงศ์เทพ วรรณะเดช. (2019, August 10). Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs). [Online]. Available: http://www.med.cmu.ac.th/dept/commed/2015/images/3153042560/7Polycyclic_Aromatic_Hydrocarbons.pdf

- [8] Lawrence Gyansah, “Design, Construction and Modeling of a Mechanical Portable Barbecue Machine,” *Global Journal of Researches in Engineering Mechanical and Mechanics Engineering*, vol.12, pp.42–60, 2012.
- [9] Muna Turkey Mossa Al-Mossawei, Abdulrazzak Abdullatif Jasim and Khalid Zemam Amer, “Reducing The Microbialled Of Chicken Meat by Improving Grill Machine Design,” *Kufa Journal For Agricultural Sciences*, vol10, pp.26– 45, 2018.
- [10] ไพศาล นาผล, *การถ่ายเทความร้อนและการระบายความร้อนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์*, กรุงเทพฯ : ทริปเพิล เอ็ดดูเคชั่น, 2558.
- [11] สมชัย อัครทิวา และขวัญจิต วงษ์ขาริ, *เทอร์โมไดนามิกส์*, กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แมคกรอ – ฮิล, 2554.

Mixed Solar Drying System for Drying of pineapple

Wannee Ekasilp¹ Sirikul Chunsawang^{2*}

¹Department of Mechanical Engineering College of Engineering Rangsit University Muang-Ake
Paholyothin RD. Pathumthani 12000

² Department of Chemical Engineering College of Engineering Rangsit University Muang-Ake
Paholyothin RD. Pathumthani 12000

*Corresponding author Email: sirikul@rsu.ac.th

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

ABSTRACT

In this study, a mixed solar dryer (MSD) was designed, fabricated, and evaluated for drying of pineapple. The dryer cabinet was modified from Lyes Bennamoum's dryer cabinet. Its performance was better with the angle of receive and reflect of radiation in dryer cabinet. It was found that the maximum temperature of the mixed solar dryer system without drying material was 67 °C while the environmental temperature was 34.5 °C. at 12:50 pm. (24/04/2018) For total drying time of 33 h was required for 1,060 g of pineapple with a size of 8-9 cm diameter, 1.3-1.5 cm thickness (cylinder shape) drying in the mixed solar dryer to reduce the moisture content from 87.46 % to 7.97% (the industry standard for dehydrated fruits and vegetables was $\leq 8.4\%$). The average temperature of the mixed solar dryer system was 45.7 °C while the average environmental temperature was 35 °C with 55.73 W/m² of the average intensity of solar radiation at 2:20 pm. (28/05/2018-03/5/2018) The percentage of moisture content could be reduced to 91.33 % and the efficiency of solar collector was 30%. Drying system efficiency of MSD was 13 %. The physical properties of dry pineapple were suitable for sale, nice color on skin, soft taste and sweet smell.

Keyword: Mixed solar dryer, flat plate collector, dryer cabinet, dry fruit

1. Introduction

Thailand is an agricultural country with so many agricultural products. Therefore, overproductions of agricultural products cause the problem. The farmers lose their profit. Especially pineapple, it is the tropical plant in Thailand that is an excellent edible fruit. The juice and flesh of them are used in cuisines all over the

world. They are a lot and cannot sell out immediately at a high price. From these problems, the overproduction of pineapple is processed to add value. In this project, drying is one method to do with the Pattawia pineapple or Smooth Cayenne. [1] This process requires high energy input because of the high latent heat of water. Thailand is in the tropical zone which has

the average solar energy (the average solar radiation intensity) $18.0 \text{ MJ/m}^2\text{day}$. [2] That mean Thailand has potential to do solar dryer. As known that drying is a process which high energy consumption. If we can substitute by using free solar energy and help to decrease the cost of the process, the research and the technology should be developed.

The aim of this study is design, construction and efficiency development of MSD for drying of pineapple. There are 3 types of solar dryer system; 1. Direct solar drying; DSD, the products are directly exposed to the solar ray. 2. Indirect solar drying; ISD, the ambient air is flowed and heated in flat plate collector then flow in dryer cabinet where products are stored. 3. Mixed solar drying; MSD, It is a combination of direct and indirect solar drying. Products will be dried with both of heat from directly and flowed from flat plate collector. In this project MSD is used, the design of the dryer cabinet, in order to reflect the solar radiation in the cabinet, was modified from Lyes Bennamoum. [3], and the flat plate collector to receive the solar radiation with natural convection was constructed. Guided by the principle of buoyancy of hot air into the dryer and the cold air from the bottom was replaced. Pattawia pineapple was dried in MSD to determine the efficiency of solar flat plate collector and drying system efficiency.

In the drying process, there are two basic mechanisms; 1. The transportation of moisture from the interior of an individual material to the surface. 2. The evaporation of moisture from the surface to the environmental air. The product

drying is heat and mass transfer process which depends on external variables such as velocity, temperature, and moisture content of hot air stream, and internal variables such as characteristic of surface of drying product (smooth or rough surface), porosity, density, size, and shape of product and include chemical composition of raw material. (Starches, proteins, lipids, sugars, etc.) [4-5].

2. Materials and methods

2.1 Materials

In this study, a mixed solar dryer was designed, fabricated. (Fig.1). Mixed solar dryer system (Fig 1a) consists of 2 parts. The first part is the solar dryer cabinet section (Fig.1b) and the second part is the solar flat plate collector. (Fig.1c) The solar dryer cabinet section was developed to increase the efficiency of the solar dryer; the solar dryer cabinet is divided into 3 parts. The first part is inclined with 55° , in order to optimize the collection of radiation in winter. The second part is inclined with 15° to optimum captivated radiations during summer. The last is its floor contains bed paint in black used for the unfavorable drying condition as heat storage system [3]. The structure and frames of dryer cabinet and solar flat plate collector were fabricated from stainless steel thickness 0.2 cm. The dryer cabinet was made up of dimensions with length and width of 80 cm and height of 40 cm, covered with float glass in beside and polyacrylic on the top with 0.2 cm diameter of 8 holes of the vent. In the bottom of the cabinet is covered with 0.3 cm of black galvanized sheet

thickness and screen mesh for drying material. Dimensions of solar flat plate collector (120 cm x 80 cm x 8 cm) were fabricated and covered with a transparent glass sheet thickness 0.3 cm. The galvanized sheet of 0.2 cm thickness with black paint was used as absorbing material.

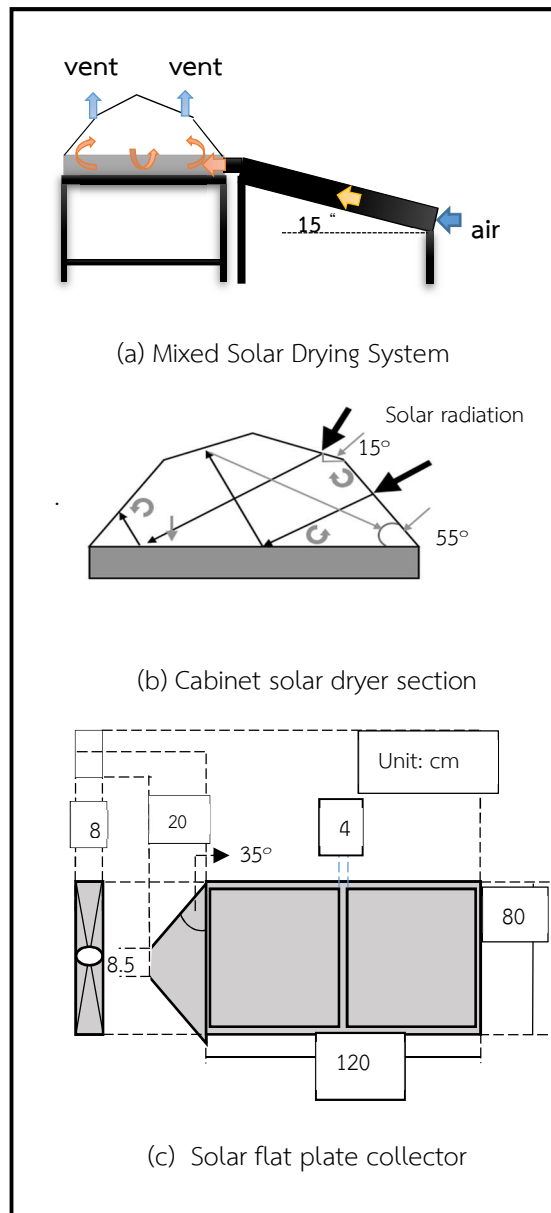


Fig. 1 Mixed Solar Drying System

2.2 Methods

After designed and constructed the MSD, the experiment will be done with 3 steps. 1. Determine the maximum temperature of the solar dryer cabinet, solar flat plate collector, and environment temperature. 2. The moisture content of pineapple in an electric oven, and 3. Drying of pineapple in the MSD. In order to determine the maximum temperature, the experiment was started in May with the empty solar dryer system. Fig. 2 was shown the position of the temperature detector. Three thermometers have been placed at position number 1-3 to detect the temperature at the inlet, center, and outlet portion of air in flat plate collector. Another two thermometers have been positioned to measure the temperature of the solar dryer cabinet at position number 4, and 5. Thermometer at the position number 6 has been placed to measure the temperature of the environment during the experiment. The Data were collected every 30 min started from 9.20 a.m.- 8.20 p.m. for 3 days. The average temperature of the solar dryer cabinet, solar flat plate collector, environment air, and time were plotted. The storage solar radiation on the surface and thermal efficiency of solar flat plate collector was calculated by the equation below; [6]

$$I_t = \frac{I_0 \square T}{2\beta(T_b - T_c)} \quad (1)$$

$$\eta_d = \frac{MwL_t}{I_t A_t t} \quad (2)$$

Where I_t is the average storage solar energy on surface (W/m^2), I_0 is the average solar energy

per day ($18.0 \text{ MJ/m}^3\text{day}$), ΔT is the different temperature between drying and environment ($^{\circ}\text{C}$), β is a parameter of F.K. Forson (0.2), T_b , T_c is the boiling point and cooling point of water. η_d is the thermal efficiency of solar flat plate collector, M_w is the mass of remove water from product (kg), L_t is the latent heat of vaporization of water (2.257 J/kg), A_t is the storage area of solar flat plate collector (m^2), M is the mass of the crop, and t is the time of drying

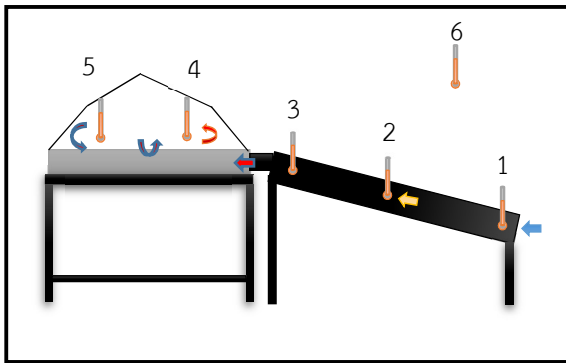


Fig. 2 The position of the temperature detector

Pineapple preparing and processing: drying material was the Pattawia pineapple or Smooth Cayenne was obtained from the East of Thailand. They were cut to 8-9 cm in diameter, 1.3-1.5 cm in thickness and 260 grams in weight before drying in an electric oven at 60°C until constant weight (5 days), then the equilibrium moisture content was assumed reached. The initial moisture content (% wet basis) is determined by the following equation:

Assume for wet weight basis

$$\square_{\square} = \frac{\square_{\square} - \square_{\square}}{\square_{\square}} \square 100 \quad (3)$$

Where m_i and m_f are the initial and final of material mass (kg), M_w is moisture content (% wet basis).

The 1,060 g of the Pattawia pineapple as mentioned above were dried in MSD, laid on screen mesh in solar dryer cabinet as shown in Fig. 3 and 4. The distance between 2 pieces of pineapple was 2 cm, and 1 cm from the wall. The solar flat plate collector is setup front to the south with incline 15° to the horizontal. It was carried out within the period from 28/05/2018-30/05/2018 (3 days). The equilibrium moisture content was assumed reached when the weights of the Pattawia pineapple did not change significantly during the drying period. At drying process, water from the Pattawia pineapple was evaporated until it reached equilibrium weight.

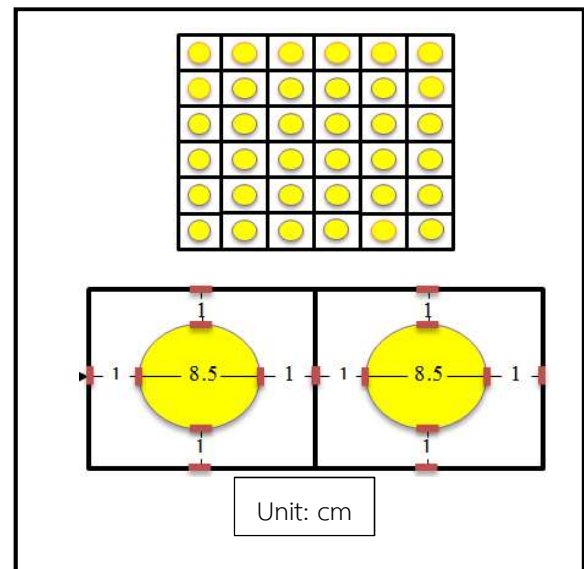


Fig. 3 The arrangement of pineapple in the solar dryer cabinet

Drying system efficiency (η_{ds}): Total efficiency of MSD system was consumed in evaporating water from pineapple and heat which was

consumed in rising up the temperature of pineapple. [7] It is given by the following expression.

$$\eta_{\square\square} = \frac{\square\square + \square\square \square\square \Delta\square}{\square\square \square\square} \quad (4)$$

Where m is released vapor mass (kg), L is the latent heat of evaporation (2,260 kJ/kg), m_p is mass of pineapple determine at time t in seconds, C_p is the specific heat of pineapple (3.68 kJ/kg °C), A is the area of the solar dryer cabinet



Fig. 4 drying of pineapple in the solar dryer cabinet

3. Results and discussion

Figure 5 shows the completed mixed solar dryer, which is two parts. The first part is the solar dryer cabinet section (80 cm x 80 cm x 40 cm) and the second part is solar flat plate collector (120 cm x 80 cm x 8 cm)

The temperature distribution on a day during the no-load operation is as shown in Figure 6. The X-direction is time and the Y- direction is the



Fig. 5 The completed mixed solar dryer

temperature in degree Celsius. It shown that the temperature of environment air range from 30 °C to 40 °C, while the temperature of flat plate collector varied from 35 °C to 62 °C and the solar dryer cabinet temperature was from 36 °C to 67 °C at the average intensity of solar radiation was 55.73 W/m². In a solar drying system, the intensity of the solar radiation received affects the efficiency of the system. If more solar radiation received, more heat will be obtained in the solar drying system [8].

The maximum temperature of the solar dryer cabinet is 67 °C, while the maximum temperature of solar flat plate collector and environment are 62 °C and 40 °C respectively. The temperature of the solar dryer cabinet was always higher than the temperature of the environment air throughout the period of the experiment. That means it confirmed that MSD could raise the temperature of the dryer cabinet for effective drying. Thus the temperature of the

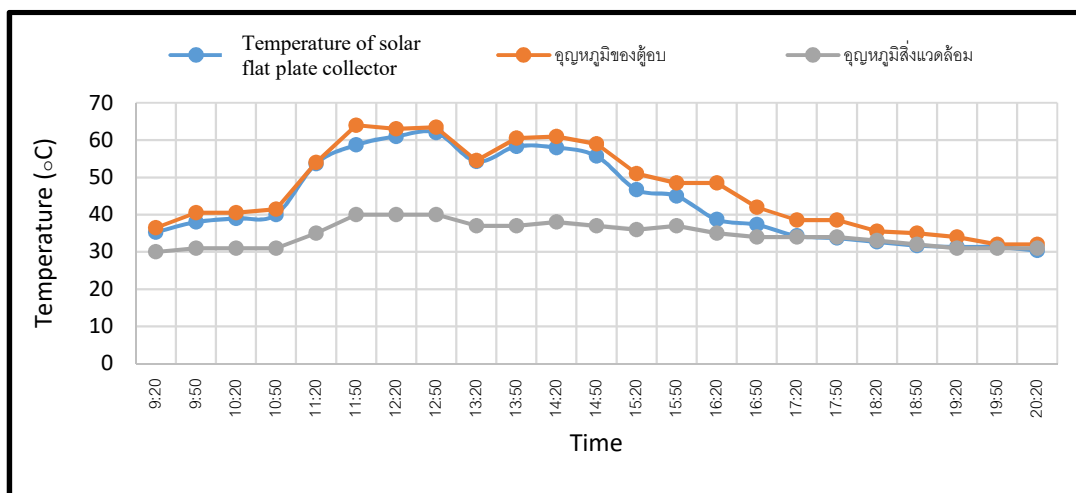


Fig. 6 Temperature of solar dryer cabinet, solar flat plate collector and the environment represented VS. Time

solar dryer cabinet is important in drying efficiency. If it becomes higher, the drying process will be fast, then making the drying time shorter.

The average storage solar energy on the surface which was calculated from Equation (1) is 55.73 W/m^2 and thermal efficiency of solar flat plate collector from equation (2) is 30%. It was noted that it had rained in some days, so the maximum temperature of the solar dryer cabinet was not so high.

The initial moisture content of pineapple versus drying time in the electric oven is as shown in Figure 7. The X direction is a time in the day units and the Y direction is moisture content in percentage. The initial moisture content of pineapple from the electric oven (wet basis) according to Equation (3) is 87.46 wt% within 5 days

For drying of pineapple in MSD within the period from 28/05/2018-30/5/2018 (3 days), the

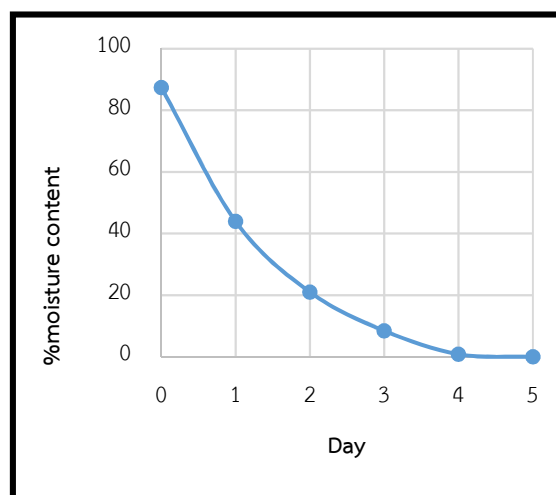


Fig. 7 The initial moisture content of pineapple

initial mass of pineapple 1,060 g with 87.46 %wt basis of initial moisture content is dried. The weight of pineapple after drying and moisture content versus days were represented in Figure 8 and 9 respectively. In day 3, the weight of pineapple was reduced from 1,060 g to 300.84 g and the final moisture content of pineapple is

7.97 wt%. (The industry standard for dehydrated fruits and vegetables was ≤ 8.4 wt%), so the percentage of moisture content was reduced to 91.33 within 3 days. It was noticed that the MSD system, moisture content was faster and lower contents than dried under the direct sunlight. The high moisture content of the samples also affected the temperature of the drying chamber causing the heated air to become moist and reduced the temperature of the air too.

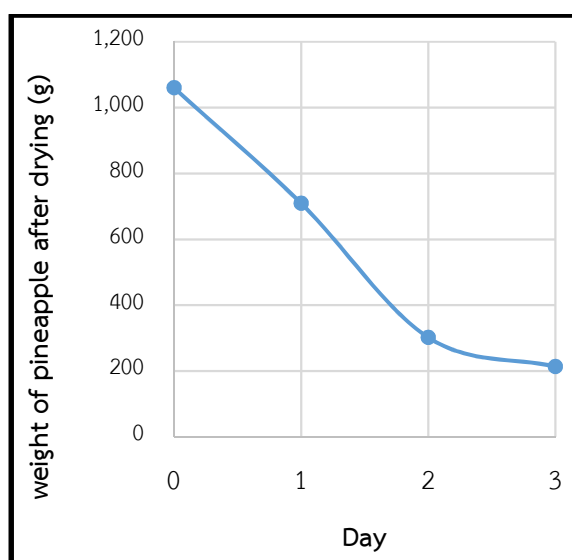


Fig. 8 The weight of pineapple after drying 3 days

In the MSD process, the direct solar radiation passed through the top, front, back, and side of the dryer cabinet is important together with the heated air from flat plate collector. The average temperature obtained for 3 days of drying period was 40-45.7 °C. The average temperature of solar dryer cabinet was 35.9 °C -45.7 °C whereas the average temperature of flat plate collector was 40.8 °C -62.0 °C. The decrease in temperature in

the dryer cabinet was due to the vent outlet on the top part of the cabinet, and the high moisture content of the Pattawia pineapple had affected the temperature of the solar dryer cabinet. It was resulting in the hot air become humid while lowering the temperature in the cabinet. In addition, the average storage solar energy on the surface was 55.73 W/m², so that the useful gain of heat was very low.

Drying system efficiency of MSD was determined to follow to the Equation (4). It was found that the total drying system efficiency of MSD was 13 %

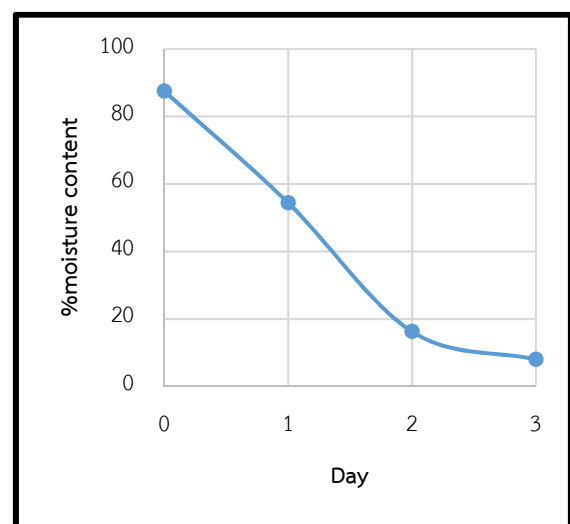


Fig. 9 The moisture content of pineapple

4. Conclusion

A mixed solar drying system for drying of pineapple, the dryer cabinet was modified from Lyes Bennamoum to increase the performance of MSD. The moisture content was faster and lower content than dried under direct sun radiation. The physical properties of dry pineapple were suitable for sale, nice color on skin, soft taste and

sweet smell. (The industry standard for dehydrated fruits and vegetables was $\leq 8.4\%$) The percentage of moisture content could be reduced to 91.33 wt%, the efficiency of the solar collector and drying system efficiency of MSD were 30 % and 13 % respectively. It will be more efficiencies of solar dryer cabinet and solar flat plate collector when the MSD is operated on a sunny day.

5. References

- [1] เกตุอร ทองเครือ, กำภู สหกันไทรภพ และสมบัติ ทรงโฉม (1993) การปลูกสับปะรด (พิมพ์ครั้งที่ 7) โรงพิมพ์สหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย จำกัด: กรุงเทพฯ
- [2] คู่มือการพัฒนาและการลงทุน ผลิตพลังงานทดแทน พลังงานแสงอาทิตย์ กรมพัฒนาพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงาน
- [3] Lyes Bennamoun (2011). Reviewing the experience of solar drying in Algeria with presentation of the different design aspects of solar dryers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 3371-3375.
- [4] Ahmed Abed Gatea (2011). Oerformance evaluation of a mixed-mode solar dryer for evaporating moisture in beans. *Journal of Agricultural Biotechnology and Sustainable Development*, 3(4), 65-71
- [5] Youcef-Ali S, Messaoudi H, Desmons DJY, Abene A, Le Ray M (2001). Determination of the average coefficient of internal moisture transfer during the drying of a thin bed of potato slice. *Food Engineering*, 48(2), 95-101.
- [6] F.K. Forson, M.A.A. Nazha, F.O. Akuffo and H. Rajakaruna (2007). Design of mixed-mode natural convection solar crop dryers: Application of principles and rules of thumb. *Renewable energy*, 32(14), 2306-2319.
- [7] A.A. Hassanain (2009). Simple solar system for banana fruit. *World Journal of Agricultural Sciences*, 5(4), 446-455.
- [8] F. Sulaiman, N. Abdullah and Z. Aliasak (2013). Solar Drying System for Drying Empty Fruit Bunches. *Journal of Physical Science*, 24(1), 75-93.

การพยากรณ์เพื่อการจัดการสินค้าคงคลังเมื่อมีข้อมูลจำนวนน้อย Forecasting Techniques for Inventory Management when there is a Small Amount of Data

พงษ์เพ็ญ จันทนะ

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

Phongpen Chantana

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering

Srinakharinwirot University

(Received: November 29, 2019; Accepted: December 20, 2019)

บทคัดย่อ

บทความนี้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลอนุกรมเวลารายเดือนจำนวน 24 ค่า เพื่อหารูปแบบการเคลื่อนไหวของอนุกรมเวลา ซึ่งเมื่อมีข้อมูลอนุกรมเวลารายเดือนที่มีจำนวนน้อยกว่า 36 ค่า ข้อสังเกตเกี่ยวกับธรรมชาติของข้อมูล และการสังเกตความยาวของฤดูกาลด้วยการปรับเรียบค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ ซึ่งทำให้เลือกตัวแบบในการพยากรณ์ที่ได้ค่าคลาดเคลื่อนต่ำลง หลังจากนั้นทำการพยากรณ์อนุกรมเวลาล่วงหน้าไปหนึ่งปี แล้วทำการคำนวณค่าปริมาณการสั่งซื้อ และช่วงเวลาการสั่งซื้อ

คำสำคัญ: การพยากรณ์ข้อมูลอนุกรมเวลา ระบบพัสดุคงคลัง

ABSTRACT

This paper present analysis 24 month of time series data, the study aims to finding data pattern when time series data less than 36 period. There is one thing possible that knowing the nature of data and use Moving Average technic to observe the season length. Then the study refine forecasting model to forecast the next year of inventory requirement. After that find the order quantity and order period.

Keyword: Time series forecasting, inventory system.

1. บทนำ

ในการจัดระบบพัสดุคงคลัง จะต้องทราบข้อมูลความต้องการพัสดุนั้นๆ ซึ่งจะได้การพยากรณ์ค่าความต้องการล่วงหน้าเป็นเวลา 1 ปี

ข้อมูลอนุกรมเวลารายเดือน เป็นข้อมูลที่มีเก็บในภาคอุตสาหกรรมทั่วไป เมื่อนำมาใช้พยากรณ์เชิงปริมาณถึงเหตุการณ์ในอนาคต ภายใต้ข้อสมมติว่าลักษณะการ

เคลื่อนไหวของอนุกรมเวลาในอนาคตจะไม่ต่างจากการเคลื่อนไหวในอดีต

แต่ข้อมูลในภาคอุตสาหกรรมมักไม่ได้เก็บย้อนหลังไว้นานนัก ในบทความนี้เป็นการวิเคราะห์ข้อมูลอนุกรมเวลาที่มีจำนวนน้อยกว่า 36 ค่า โดยวิธีทั่วไปที่พบได้ในการวิเคราะห์ข้อมูลอนุกรมเวลา แต่มีข้อสังเกตเพิ่มเติมจากประสบการณ์ เพื่อช่วยในการเลือกค่าความยาวของฤดูกาล หลังจากนั้นทำการพยากรณ์ล่วงหน้าหนึ่งปี แล้ว

คำนวณปริมาณการสั่งซื้อ และระยะเวลาในการออกไปสั่งซื้อ

2. ทฤษฎี

เทคนิคการพยากรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล เมื่อ Y_t คือ ค่าสังเกตเมื่อเวลา t

2.1 วิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบง่าย

$$\hat{Y}_t(1) = \frac{Y_t + \dots + Y_{t-k+1}}{k} \quad (1)$$

2.2 วิธีปรับเรียบเอ็กซ์โปเนนเชียลแบบง่าย

$$\hat{Y}_t(1) = \alpha Y_t + (1 - \alpha) \hat{Y}_{t-1}(1) \quad (2)$$

เมื่อ α มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1

2.3 วิธีปรับเรียบเอ็กซ์โปเนนเชียลสองชั้น

$$A_t = \alpha Y_t + (1 - \alpha) A_{t-1} \quad (3)$$

$$A'_t = \alpha A_t + (1 - \alpha) A'_{t-1} \quad (4)$$

เมื่อ A_t, A'_t เป็นค่าปรับเรียบเอ็กซ์โปเนนเชียลครั้งที่หนึ่ง และ สอง

2.4 วิธีแยกส่วนประกอบ

วิธีแยกส่วนประกอบที่มีรูปแบบแนวโน้มและฤดูกาลแบบบวก

$$Y_t = \beta_0 + \beta_1 t + S_t + \varepsilon_t \quad (5)$$

เมื่อ β_0 เป็นค่าคงที่ และ $\hat{\beta}_0 = \bar{Y}$

β_1 เป็นอัตราการเพิ่มขึ้นหรือลดลงต่อหนึ่งปี

โดยนำค่าเฉลี่ยของแต่ละปี มาสร้างสมการแนวโน้มด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด มี $\hat{\beta}_1^*$ เป็นอัตราการเพิ่มขึ้นหรือลดลงต่อหนึ่งฤดูกาลและ $\hat{\beta}_1^* = \frac{\hat{\beta}_1}{L}$

S_t เป็นดัชนีฤดูกาล และ $\hat{S}_i = \bar{Y}_i - \bar{Y}$

โดย $i = 1, \dots, L$ และ L เป็นจำนวนฤดูกาล ซึ่งมีค่า

$$\sum_{i=1}^L \hat{S}_i = 0$$

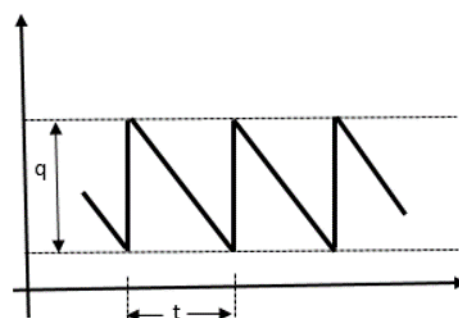
2.5 ค่าคลาดเคลื่อนในการพยากรณ์

$$MSE = \frac{\sum_{t=1}^n (y_t - \hat{y}_t)^2}{n} \quad (6)$$

2.6 สัมประสิทธิ์อัตราคลาดเคลื่อน

$$r_k = \frac{\sum_{t=k+1}^n (Y_t - \bar{Y})(Y_{t-k} - \bar{Y})}{\sum_{t=1}^n (Y_t - \bar{Y})^2} \quad (7)$$

จากนี้จะทำการวิเคราะห์ข้อมูลอนุกรมเวลา เพื่อหาแบบการเคลื่อนไหวของอนุกรมเวลา เมื่อมีข้อมูลอนุกรมเวลารายเดือนซึ่งมีจำนวนน้อยกว่า 36 ค่า หลังจากนั้นทำการพยากรณ์อนุกรมเวลาล่วงหน้าไปหนึ่งปี แล้วทำการคำนวณค่าปริมาณการสั่งซื้อ และช่วงเวลาการสั่งซื้อ



รูปที่ 1 แสดงระบบคงคลัง ไม่มีการร่างพัสดุ และมีสต็อกกันชน

โดยมีการคำนวณค่าดังนี้

$$q^* = (((2rc_3)/c_1)^{0.5}) \quad (8)$$

$$t^* = q^*/r \quad (9)$$

เมื่อ q คือ ปริมาณการสั่งซื้อ

t คือ ระยะเวลาในการสั่งซื้อ

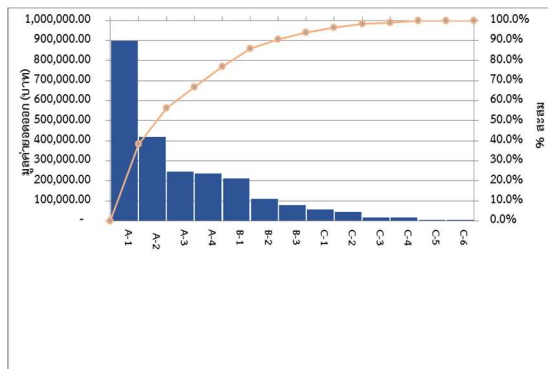
c_1 คือ ค่าใช้จ่ายในการสั่งซื้อ

C_3 คือ ค่าใช้จ่ายในการเก็บวัสดุ

3. การวิเคราะห์การเคลื่อนไหวของอนุกรมเวลา

ข้อมูลอนุกรมเวลาย้อนหลังที่จะนำมาใช้ในการพยากรณ์กรณีที่เป็นข้อมูลรายเดือน มักแนะนำให้ใช้ข้อมูลย้อนหลังสามปี (36ค่า) แต่ในความเป็นจริงโรงงานมักไม่ได้เก็บข้อมูลย้อนหลังไว้นานนัก ในการวิเคราะห์เพื่อหารูปแบบการเคลื่อนไหวของข้อมูลอนุกรมเวลามักไม่เห็นรูปแบบที่ชัดเจน ซึ่งเป็นจุดอ่อนของการมีข้อมูลจำนวนน้อย

ในตัวอย่างนี้เป็นข้อมูลการใช้สารหล่อลื่นในอุตสาหกรรมที่ใช้กับเครื่องจักรกลขนถ่าย หลังจากที่มีการจัดกลุ่มสารหล่อลื่นตามมูลค่าออกเป็นกลุ่ม A B C ดังแสดงในรูปที่ 2 แล้ว สารหล่อลื่นตัวอย่างจัดอยู่ในกลุ่ม A คือ ชนิด A-1 จะมีการจัดการพัสดุอย่างเข้มงวด โดยการ



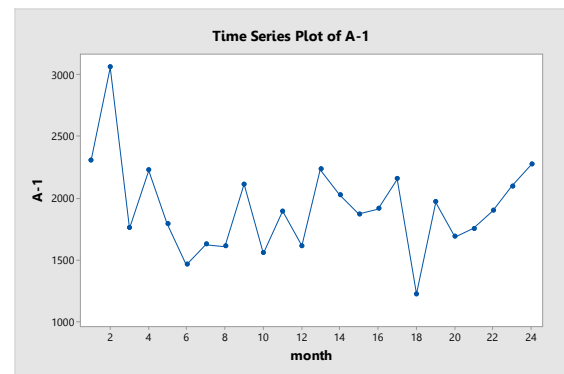
รูปที่ 2 แสดงมูลค่าของสารหล่อลื่นที่ใช้

พยากรณ์ยอดความต้องการรายเดือน ล่วงหน้าเป็นเวลานานปี และนำค่าพยากรณ์นั้นไปใช้ในการจัดการพัสดุดังคลั่ง

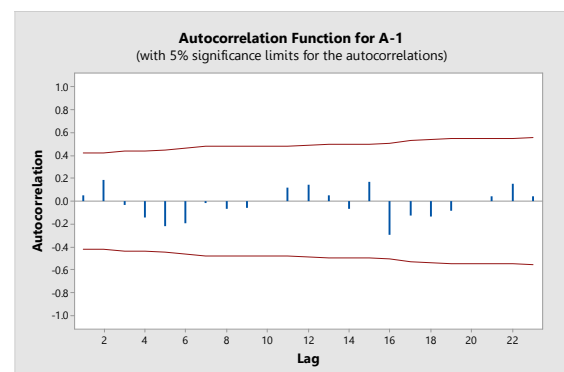
3.1 การวิเคราะห์การเคลื่อนไหวของข้อมูล

นำข้อมูลปริมาณการใช้สารหล่อลื่นจากอุตสาหกรรมการขนถ่ายวัสดุรายเดือนจำนวน 24 ข้อมูลมาวิเคราะห์ เพื่อหารูปแบบของวิธีพยากรณ์ที่เหมาะสมกับการเคลื่อนไหวของข้อมูล โดยเริ่มจากการนำข้อมูลมาพล็อตตามลำดับเวลา

พบว่าข้อมูลคล้ายมีแนวโน้มลง และ ไม่เห็นฤดูกาลที่ชัดเจน จึงทำการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ตามกัน k ช่วงเวลา (r_k) แล้วพล็อตคอเรลโรแกรมเพื่อดูแนวโน้มและฤดูกาลในการเคลื่อนไหวของข้อมูล



รูปที่ 3 แสดงค่าปริมาณการใช้สารหล่อลื่นรายเดือน



รูปที่ 4 แสดงค่า r_k ของข้อมูลปริมาณการใช้สารหล่อลื่นรายเดือน

จากคอเรลโรแกรมที่สร้างขึ้น ไม่เห็นทั้งแนวโน้มและฤดูกาลที่ชัดเจน แต่การเรียงตัวค่า (r_k) คล้ายมีคลื่นรูปไซค์ ทำให้สงสัยว่าข้อมูลนี้มีฤดูกาลหรือไม่ แต่ลักษณะของคลื่นรูปไซค์ก็ไม่ชัดเจน จึงจะเลือกวิธีพยากรณ์ที่เหมาะสมกับข้อมูลที่มีการเคลื่อนไหวไม่มีทั้งแนวโน้มและฤดูกาลโดยพยากรณ์ยอดความต้องการรายเดือน ล่วงหน้าเป็นเวลานานปี

ในการพยากรณ์อนุกรมเวลาชุดนี้โดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่อย่างง่ายเมื่อ $k=3$ วิธีปรับเรียบเอ็กซ์โปเนนเชียลอย่างง่าย $\alpha=0.044$ วิธีปรับเรียบเอ็กซ์โปเนนเชียลสองชั้น ที่ $\alpha=0.204$ $\gamma=115$ ได้

โปเนนเซียอย่างง่าย $\alpha=0.044$ วิธีปรับเรียบเอ็กซ์โปเนนเซียสองชั้น ที่ $\alpha=0.204$ $\gamma=115$ ได้ค่าคลาดเคลื่อนในการพยากรณ์แสดงได้ดังในตารางที่ 1 ซึ่งพบว่าพยากรณ์ทั้งสามวิธีมีค่าคลาดเคลื่อนสูงมาก และการพยากรณ์ค่าล่วงหน้าหนึ่งปีจะได้ดังในตารางที่ 2

ตารางที่ 1 แสดงค่าคลาดเคลื่อนในพยากรณ์

วิธีพยากรณ์	MSE
ค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่อย่างง่ายเมื่อ $k=3$	107,497
ปรับเรียบเอ็กซ์โปเนนเซียอย่างง่าย $\alpha=0.044$	136,295
ปรับเรียบเอ็กซ์โปเนนเซียสองชั้น $\alpha=0.204$ $\gamma=115$	136,200

ตารางที่ 2 แสดงค่าพยากรณ์ล่วงหน้า 1 ปี

ค่าพยากรณ์ความต้องการใช้สารหล่อลื่นล่วงหน้า 1 ปี		
Moving Average $L=3$	ปรับเรียบเอ็กซ์โปเนนเซียอย่างง่าย $\alpha=0.044$	ปรับเรียบเอ็กซ์โปเนนเซียสองชั้น $\alpha=0.204$ $\gamma=115$
2085	1934.79	1914.63
2085	1934.79	1924.45
2085	1934.79	1934.28
2085	1934.79	1944.10
2085	1934.79	1953.92
2085	1934.79	1963.74
2085	1934.79	1973.57
2085	1934.79	1983.39
2085	1934.79	1993.21
2085	1934.79	2003.04
2085	1934.79	2012.86
2085	1934.79	2022.68

พบว่าในการพยากรณ์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ และวิธีการปรับเรียบแบบเอ็กซ์โปเนนเซียอย่างง่าย ได้ค่าพยากรณ์รายเดือนเป็นค่าคงที่ เนื่องจากการปรับค่าใหม่ล่าสุดเข้าในการพยากรณ์ ส่วนการพยากรณ์ด้วยปรับเรียบเอ็กซ์โปเนนเซียสองชั้นได้ค่าแตกต่างกันไปในแต่ละเดือน จึงทำการหาผลรวมความต้องการใช้พัสดุทั้งปีได้ผลดังในตารางที่ 3

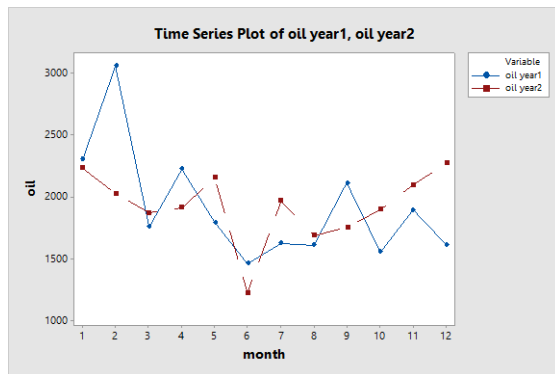
พบว่าค่าพยากรณ์มีค่ามากกว่าข้อมูลเดิมทุกค่า แต่ในวิธีปรับเรียบเอ็กซ์โปเนนเซียอย่างง่าย มีค่าใกล้เคียงค่าเดิมแต่เพิ่มขึ้นเล็กน้อย

ตารางที่ 3 แสดงปริมาณความต้องการในหนึ่งปี

	รวมปริมาณความต้องการ(ลิตร/ปี)
ข้อมูลปริมาณความต้องการปีที่1	22,978
ข้อมูลปริมาณความต้องการปีที่2	23,064
Moving Average $L=3$	25,020
ปรับเรียบเอ็กซ์โปเนนเซียอย่างง่าย $\alpha=0.044$	23,217.48
ปรับเรียบเอ็กซ์โปเนนเซียสองชั้น $\alpha=0.204$ $\gamma=115$	23,623.87

จากการที่วิธีพยากรณ์ทั้งสามแบบมีค่าคลาดเคลื่อนมาก และค่าพยากรณ์ห่างจากข้อมูลเดิมมาก จึงจะตั้งข้อสังเกตเพิ่มเติมว่าการเคลื่อนไหวของอนุกรมเวลา มีฤดูกาล หรือแนวโน้มหรือไม่

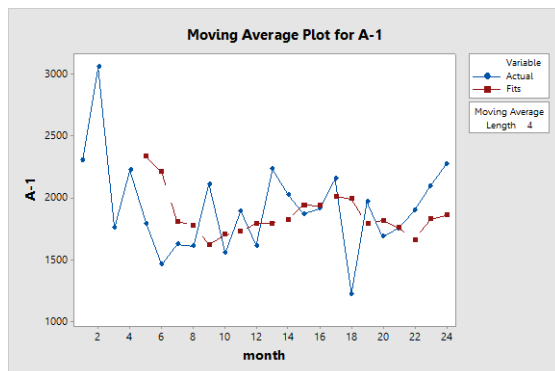
จึงพล็อตค่าปริมาณการใช้แต่ละปีแยกกัน พบว่าการเคลื่อนไหวของข้อมูลมีลักษณะคล้ายคลึงกัน คือมีการใช้มากในช่วงต้นปีและปลายปีของการบันทึกข้อมูล ส่วนช่วงกลางปีมีการใช้ลดลง



รูปที่ 5 แสดงค่าปริมาณการใช้สารหล่อลื่นรายเดือนโดยพล็อตแยกรายปี

เมื่อพิจารณา การใช้สารหล่อลื่นนี้ในการซ่อมบำรุง พบว่าช่วงต้นปีและปลายปีของการบันทึกข้อมูลเป็นช่วงฤดูฝนซึ่งสภาพอากาศอาจเป็นอุปสรรคในการทำงานของเครื่องมือกล และอาจเกิดการบำรุงรักษาเกินจำเป็น ส่วนช่วงกลางปีสามารถทำงานได้โดยไม่มีอุปสรรคทางธรรมชาติ ทำให้การซ่อมบำรุงเป็นไปตามปกติ

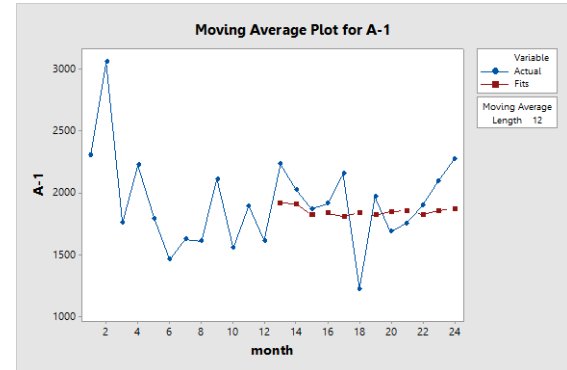
พิจารณา หาค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่อย่างง่ายเมื่อ $k=4$ ที่เป็นการปรับเรียบเพื่อขจัด noise ออกจากข้อมูลค่าสังเกต นั่นคือถ้าข้อมูลมีรูปแบบอะไรอยู่ในข้อมูลก็จะทำให้สังเกตเห็นรูปแบบต่าง ๆ นั้นได้ง่ายขึ้น



รูปที่ 6 แสดงค่าการหาค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่อย่างง่าย $k=4$

จากการหาค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่อย่างง่ายเมื่อ $k=4$ สังเกตเห็นคลื่นจากค่าที่ 5 ถึงค่าที่ 9 มีลักษณะค่อยๆ ลดลง เมื่อถึงค่าที่ 10 ค่อยๆ เพิ่มขึ้น จนถึงค่าที่ 17 จากนั้น

ลดลงอีก จนถึงค่าที่ 22 ค่อยๆ เพิ่มขึ้นอีก จึงทำการหาค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่อย่างง่ายเมื่อ $k=12$

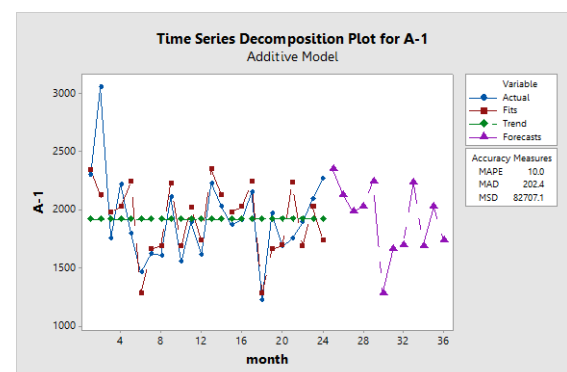


รูปที่ 7 แสดงค่าการหาค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่อย่างง่าย $k=12$

จากค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่อย่างง่ายเมื่อ $k=12$ กำจัดฤดูกาลหมดไป ได้เส้นค่อนข้างเรียบตรงคล้าย ไม่มีแนวโน้ม

จากความรู้เกี่ยวกับการใช้พัสดุนิตินี้ พร้อมทั้ง การสังเกตการเคลื่อนไหวรายปี และการเคลื่อนไหวของข้อมูลที่ปรับเรียบ ทำให้เป็นไปได้ที่ข้อมูลจะมีฤดูกาล จึงลองใช้การพยากรณ์ด้วยเทคนิคแยกส่วนประกอบที่มีค่าความยาวฤดูกาลเป็น 12 ได้ผลดังนี้

พบว่าวิธีแยกส่วนประกอบ แบบบวก ความยาวของฤดูกาลเป็น 12 ได้ค่าคลาดเคลื่อนต่ำกว่าในเทคนิคการปรับเรียบที่ผ่านมา



รูปที่ 8 แสดง การพยากรณ์ด้วยวิธีแยกส่วนประกอบ เมื่อความยาวฤดูกาล = 12 รูปแบบบวก

โดยในการพยากรณ์วิธีนี้ได้ค่าคลาดเคลื่อนในการพยากรณ์ $MSE = 82,708.7$ และได้ค่าพยากรณ์ดังในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ค่าพยากรณ์ในวิธีแยกส่วนประกอบแบบบวกความยาวของฤดูกาลเป็น 12

ค่าพยากรณ์ความต้องการใช้สารหล่อลื่น ล่วงหน้า 1 ปี
2350.30
2128.81
1982.57
2027.42
2245.10
1280.61
1663.54
1693.64
2235.07
1687.46
2025.55
1739.69

เมื่อนำค่าพยากรณ์มารวมปริมาณความต้องการตลอดปีได้ค่าดังในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณความต้องการในหนึ่งปี

	รวมปริมาณความต้องการ(ลิตร/ปี)
ข้อมูลปริมาณความต้องการปีที่ 1	22,978
ข้อมูลปริมาณความต้องการปีที่ 2	23,064
แยกส่วนประกอบแบบบวกความยาวของฤดูกาลเป็น 12	23,059.76

พบว่าค่าพยากรณ์มีค่าต่ำกว่าข้อมูลเดิมเล็กน้อย ซึ่งสมการพยากรณ์วิธีแยกส่วนประกอบแบบบวก

ความยาวของฤดูกาลเป็น 12 ส่วนที่แสดงแนวโน้มมีสมการดังนี้

$$Y_t = 1916 + 0.18 \times t$$

และค่าดัชนีฤดูกาลมีค่าดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 แสดงดัชนีฤดูกาลในวิธีแยกส่วนประกอบ

Period	ดัชนีฤดูกาล
1	429.639
2	207.972
3	61.556
4	106.222
5	323.722
6	-640.944
7	-258.194
8	-228.278
9	312.972
10	-234.819
11	103.097
12	-182.944

จากค่าผลรวมตลอดปีของการพยากรณ์แบบแยกส่วนประกอบ = 23059.8 ลิตร/ปี จากนั้นนำไปหาค่าพัสดुकงคลัง เมื่อทางบริษัทต้องการให้มีสต็อกกันชน 5 % และสั่งซื้อในปริมาณคงที่ และเวลาที่คงที่

ตารางที่ 8 แสดงค่าในการคงคลังพัสดุ

r = ความต้องการพัสดุ/ปี	23,059.8	ลิตร/ปี
C_1 = ค่าเก็บรักษาพัสดุ-บาท/หน่วย-ลิตร/เวลา-ปี	3	บาท/ลิตร/ปี
C_3 = ค่าใบสั่งซื้อ-บาท/ครั้ง	240	บาท/ครั้ง

ได้ค่าดังนี้

$$q^* = 1920.824 \text{ ลิตร}$$

$$t^* = 0.083297 \text{ ปี หรือ } 30.40359 \text{ วัน}$$

ซึ่งในการส่งสารหล่อลื่นนี้จะบรรจุถังละ 200 ลิตร ในการสั่งซื้อจริงอาจปรับค่า q ให้พอดีกับจำนวนถังบรรจุที่จะสั่งซื้อ และถ้าทางบริษัทมีการจัดการใช้สารหล่อลื่นที่พอเพียงกับการใช้งานของเครื่องกลขนถ่าย โดยไม่มีการซ่อมบำรุงที่เกินจำเป็น อาจมีความต้องการใช้ต่อปีที่ลดลงได้

4. สรุป

ข้อมูลรายเดือนที่มีจำนวนน้อยกว่า 36 ค่า เช่น ในข้อมูลชุด A-1 นี้ เป็นการยากสำหรับผู้เพิ่งเริ่มทำการพยากรณ์ที่จะสังเกตเห็นการเคลื่อนไหวของข้อมูลที่ชัดเจน เมื่อมีข้อมูลรายเดือนจำนวนน้อย เช่นมีเพียง 24 ค่า การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีพล็อตค่าอนุกรมเวลารวมทั้ง 24 ค่า และการพล็อตคอเรโลแกรม อาจไม่ช่วยให้เห็นรูปแบบการเคลื่อนไหวที่ชัดเจนได้ ข้อสังเกตหนึ่งคือการรู้จักธรรมชาติของข้อมูล เช่นในตัวอย่างวัสดุ A-1 นี้มีความต้องการขึ้นลงตามสภาพอากาศ จึงน่าจะสงสัยว่าข้อมูลมีฤดูกาลหรือไม่ การพล็อตอนุกรมเวลาแยกรายปีเพื่อสังเกตลักษณะการเคลื่อนไหวที่มีรูปแบบซ้ำกัน และการใช้วิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ที่มีค่า k ต่ำๆ เพื่อปรับเรียบให้เห็นความยาวของฤดูกาล ดังในบทความนี้ อาจช่วยให้ผู้ที่เพิ่งเริ่มทำการวิเคราะห์ข้อมูลสามารถหาช่วงความยาวของฤดูกาลได้ และได้วิธีพยากรณ์ที่มีค่าคลาดเคลื่อนต่ำลง

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณข้อมูลจากโครงการฝึกงานสหกิจศึกษาของบริษัทธนนิศึกษาตัวอย่าง

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Gareth, *Time Series Forecasting, Simulation, Applications*. ELLIS Horwood Limited, West Sussex, 1993.
- [2] K. Maurich, *Time-Series*. Charles Griffin and Company Ltd., London, 1976.
- [3] D. G. Montgomery, *Forecasting and Time Series Analysis*. McGraw-Hill Inc., Singapore, 1990.
- [4] ทรงศิริ แต่สมบัติ, *การพยากรณ์เชิงปริมาณ*. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ, 2549.
- [5] ทรงศิริ แต่สมบัติ, “ปัจจัยที่มีผลต่อความถูกต้องของการพยากรณ์เชิงปริมาณ,” รายงานผลการวิจัยฉบับสมบูรณ์ ทุนอุดหนุนวิจัย มก. ประจำปี 2543.
- [6] วิชิต หล่อจิระสุนท์กุล, *เทคนิคการพยากรณ์*. โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์ กรุงเทพฯ, 2539.
- [7] ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ, *ระบบพัสดุคงคลัง*. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ, 2530.

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิ (Reader)

ต้นฉบับบทความวิจัยที่ตีพิมพ์วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีที่ 14 ฉบับที่ 3 (เดือนกันยายน – ธันวาคม พ.ศ. 2562) ได้รับการตรวจสอบแก้ไขจากผู้ทรงคุณวุฒิดังรายนามต่อไปนี้

- | | |
|--|---|
| 1. รองศาสตราจารย์ ดร.ทศพล เกียรติเจริญผล | สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| 2. รองศาสตราจารย์ ดร.วาทีต ภัคดี | ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต |
| 3. พันเอก รองศาสตราจารย์ ดร.อโณทัย สุขแสงพนมรุ้ง | กองวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ส่วนการศึกษา
โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า |
| 4. อาจารย์ ดร.วุฒินันท์ นุ่นแก้ว | ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต |
| 5. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิตางค์ ฟิลัยหล้า | ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 6. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย โชติษฐยางกูร | สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี |
| 7. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธิดารัตน์ บุญศรี | ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| 8. รองศาสตราจารย์ ดร.กมลวัลย์ ลือประเสริฐ | ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 9. รองศาสตราจารย์ ดร.วชรภูมิ เบญจโอฬาร | สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี |
| 10. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ ศรีชาติ | สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี |
| 11. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐภัทร พันธุ์คง | ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 12. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประภาพรพรณ เกษราพงศ์ | สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา |
| 13. อาจารย์ ดร.วันโน ยี่ดำ | สถาบันนวัตกรรมการมหานคร คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร |
| 14. อาจารย์ ดร.เสกสรรค์ สุทธิสงค์ | คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน |
| 15. ผู้ช่วยศาสตราจารย์รติรัตน์ กิตติปัญญาพัฒน์ | ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 16. อาจารย์นารี รุจิตามพ์ | ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิ (Reader)

ต้นฉบับบทความวิจัยที่ตีพิมพ์วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีที่ 14 ฉบับที่ 3 (เดือนกันยายน – ธันวาคม พ.ศ. 2562) ได้รับการตรวจสอบแก้ไขจากผู้ทรงคุณวุฒิดังรายนามต่อไปนี้

- | | |
|--|---|
| 17. อาจารย์ ดร.สุธิดา ทิประักษ์พันธุ์ | ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 18. รองศาสตราจารย์ธีรภัทร หล่มบุญเรือง | ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |

คำแนะนำสำหรับผู้เขียนบทความลงตีพิมพ์
วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒจัดพิมพ์ปีละ 3 ฉบับ ฉบับที่ 1 ช่วงเดือนมกราคม – เมษายน ฉบับที่ 2 ช่วงเดือนพฤษภาคม – สิงหาคม และฉบับที่ 3 ช่วงเดือนกันยายน – ธันวาคม โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะให้เป็นการรวบรวมผลงานทางวิชาการและงานวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ซึ่งบทความที่ได้รับการตีพิมพ์ทุกบทความจะผ่านความการพิจารณาและความเห็นชอบจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาที่เกี่ยวข้องและสงวนสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พุทธศักราช 2521 และเผยแพร่แบบออนไลน์ทั่วประเทศ

1. การเตรียมต้นฉบับ

- 1) เป็นบทความวิจัย หรือบทความวิชาการ ที่มีความยาวไม่ควรน้อยกว่า 7 หน้า และไม่ควรเกิน 10 หน้า กระดาษ A4 พิมพ์ห่างจากขอบกระดาษด้านซ้าย 1.25 นิ้ว ด้านอื่น ๆ 1 นิ้ว
- 2) เป็นบทความที่ไม่ได้อยู่ระหว่างการพิจารณาตีพิมพ์ของสื่อสิ่งพิมพ์อื่น ๆ และไม่เคยได้รับการตีพิมพ์ในวารสารใด ๆ มาก่อน
- 3) ต้องไม่มีการละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่น ไม่มีการลอกเลียน 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

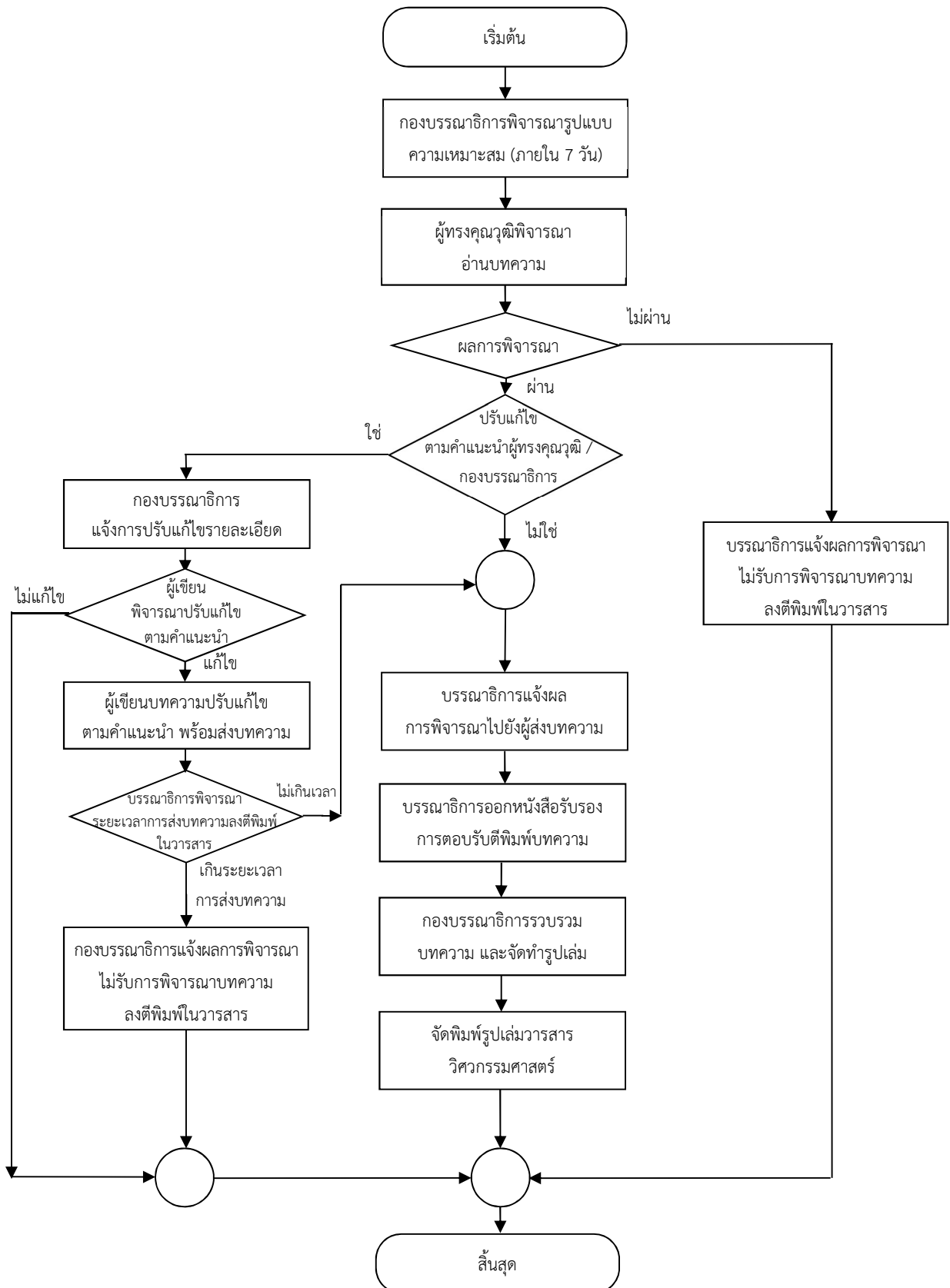
- 1) ส่งต้นฉบับบทความ ไฟล์ Microsoft Word และ pdf พร้อมแนบไฟล์สแกนแบบเสนอผลงานวิชาการเพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
- 2) ส่งไฟล์ต้นฉบับทางออนไลน์ที่
<https://www.tci-thaijo.org/index.php/sej/login>
- 3) ดูข้อมูลวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒเพิ่มเติม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

3. ขั้นตอนการประเมินบทความ

การประเมินบทความวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ มีขั้นตอนดังนี้

- 1) การทบทวนโดยผู้รู้เสมอ (peer review) โดยผู้ทรงคุณวุฒิตั้งน้อยสองคนในสาขาที่เกี่ยวข้องแบบอำพรางฝ่ายเดียว (double-blind)
- 2) การเขียนตอบข้อซักถามและการแก้ไขปรับปรุงต้นฉบับตามข้อคิดเห็น (comments) ของผู้ทรงคุณวุฒิ โดยผู้เขียน และการพิจารณาอีกครั้งโดยผู้ทรงคุณวุฒิคนเดิม หากผู้ทรงคุณวุฒิได้แจ้งความประสงค์ขอพิจารณาอีกครั้งไว้
- 3) การประชุมกองบรรณาธิการเพื่อพิจารณาผลการทบทวนโดยผู้รู้เสมอจากผู้ทรงคุณวุฒิ และการแก้ไขปรับปรุงต้นฉบับ เพื่อตัดสินใจว่าจะตอบรับหรือไม่ในขั้นสุดท้าย
- 4) สำหรับบทความที่ได้รับการตอบรับ กองบรรณาธิการจะพิจารณาความถูกต้องของรูปแบบเพื่อแจ้งผู้เขียนแก้ไข
- 5) บรรณาธิการออกหนังสือรับรองการเผยแพร่ให้ผู้เขียน โดยมอบไว้กับผู้เขียนหลัก

ขั้นตอนการพิจารณาผลงานเพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารคณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ





คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
เลขที่ 63 หมู่ 7 ถนนรังสิต - นครนายก
อำเภอองครักษ์ จังหวัดนครนายก 26120
โทร 0 2649 5000 ต่อ 27560 27070
โทรสาร 0 3739 5527
<http://eng.swu.ac.th>

บทความวิจัย

- แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งเห็ดหอมด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด
Mathematical Modeling of Shiitake Mushroom Drying Using Infrared-Vacuum Technique
โดย กิตติศักดิ์ วิธินันทกิจดัด ณรงค์ อังกิมบัววัน สิทธิชัย รุ่งสว่าง
- Evaluation of Sustainable Urban Storm Drainage Systems Approach for Reducing Peak Runoff at Sukhumvit Area in Bangkok, Thailand
By Detchphol Chitwatkul Siri
- การบรรเทาการขาดเสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่จ่ายโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมโดยใช้วงรอบป้อนไปหน้า
Instability Mitigation of a Three-Phase Diode Rectifier Feeding a Controlled Buck Converter by Using Feedforward Loop
โดย รัฐพล โพธิ์สังข์ เทพพนม โสภาคเพิ่ม กองพัน อารีรักษ์
- ระบบสารสนเทศเพื่อการจัดซื้อ กรณีศึกษา : โรงงานกระดาษ
Information System for Purchasing A Case Study : Paper Mill
โดย ภัทรพงษ์ ภาควุมิ กิตติชัย อธิกุลรัตน์ ศิริรัตน์ แจ่มรักษ์สกุล
- Review on Microalgae Cultivation Using Wastewater for Biofuel Production
By Saowapak Thammasane and Thaniya Kaosol
- สาเหตุที่ก่อให้เกิดความล่าช้าในโครงการก่อสร้างอาคารขนาดใหญ่: กรณีศึกษาจังหวัดนครพนม
Cause of Delays in Large Building Construction Projects: A Case Study of Nakhon Phanom Province
โดย จิรเดช เศรษฐภูมิพูน นาด สุขศีล
- การสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นอิเล็กทรอนิกส์กำลัง
Stabilization using Reference-Voltage-Based Active Compensator Method for AC-DC Power System Feeding Power Electronic Load
โดย กษมา รุ่งรัตน์ธวัชชัย เทพพนม โสภาคเพิ่ม กองพัน อารีรักษ์
- เครื่องปิ้งเนื้อสัตว์กึ่งอัตโนมัติเพื่อสุขภาพ
Healthy Semi Automatic Grill Machine
โดย อีรพงศ์ บริรักษ์
- Mixed Solar Drying System for Drying of pineapple
By Wannee Ekasilp Sirikul Chunsawang
- การพยากรณ์เพื่อการจัดการสินค้าคงคลังเมื่อมีข้อมูลจำนวนน้อย
Forecasting Techniques for Inventory Management when there is a Small Amount of Data
โดย พงษ์เพ็ญ จันทนะ