

บทความวิจัย

- ◆ การศึกษาเชิงทดสอบการใช้น้ำสำหรับระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์
ยุธนา ศรีอุดม อนุรัตน์ เทวตา สังคม สัพโส และ นิวัฒน์ ประทุมไชย
- ◆ การหาปริมาณปรอทในตัวอย่างครีมน้ำขาวโดยเทคนิคการวิเคราะห์ปรอทโดยตรงด้วยการสลายตัวด้วยความร้อน
นภาพร บุญนารักษ์ และ นภา ตั้งเตรียมจิตมั่น
- ◆ สมบัติทางเคมีกายภาพ ทางกล และทางความร้อนของฟิล์มบริโกลได้จากแป้งมันเลือด
น้ำฝน สามสาลี นิสารัม สัมช่า และ สุมาลี มุลิกา
- ◆ การประยุกต์ใช้หม้อแปลงฟลายแบคสำเร็จรูปสำหรับแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง
ยุทธนา กันทะพะเยา และ เฉลิมพล เรืองพัฒนาวิวัฒน์
- ◆ การพัฒนาต้นแบบเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลและแอลพีจีเป็นเชื้อเพลิงสำหรับการเกษตร
ชัยยง ศิริพรมงคลชัย
- ◆ การวิเคราะห์โครงการผลิตหมักฟัรฟรอนพื้นสีขาวฐานตัวทำละลายสำหรับผลิตบรรจุภัณฑ์อ่อนตัว
พิชิต ขจรเดช และ อนันต์ ต้นวิไลศิริ
- ◆ การพัฒนาแบบจำลองและการพยากรณ์ดัชนีรังสีอัลตราไวโอเลตรายชั่วโมงโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมในจังหวัดสงขลา
ประนอมกร ชูศรี สรวุฒิ แนนเนียร วรพันธุ์ การชนะชาติ และ สนิธดา เทียนสี
- ◆ Flexural Performance of Corroded Reinforced Concrete Beams Repaired with CFRP Sheets
Arnon Wongkaew
- ◆ การควบคุมคุณภาพและลดการสูญเสียในกระบวนการประกอบชิ้นส่วนบังโคลนหน้าแก้มข้างรถยนต์ด้วยวิธีโพคา-โยเกะ
อภิชาติ เสมศรี เอกรัตน์ สุขสุนธ์ ส้ารวัย สีสุมพร และ ธนิตศักดิ์ พุฒิพัฒน์โมฆิต
- ◆ การวิเคราะห์ปริมาณสารสำคัญและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดใบกะเปียดเครือ
หวันธิดา ปะดุกา ปัญจพร สันทัดเลขา ทวีภรณ์ ศิริคช และ นางลักษณ์ กุลวรรธต์
- ◆ ความสามารถในการดูดซับและกลไกความเสียหายของโลหะแผ่นอลูมิเนียม AA6016
ณัฐศักดิ์ พรพุดศิริ
- ◆ ผลของแรงต้านอากาศต่อการตกของกรวยกระดาดด้วยเทคนิคการวิเคราะห์วิธีดีไอโอตราเร็วสูง
จิราภรณ์ ปุณยวัจน์พรกุล และ วิไลพร ลักษมีวาณิชย์
- ◆ การตรึงอะไซด์แบคเตอร์แบคทีเรียตรึงไนโตรเจนในอากาศด้วยวัสดุธรรมชาติและผลต่อการเจริญเติบโตของผักกวางตุ้งในดิน
พิชญ์ ตั้งสมบัติวิจิตร ธิติรัตน์ เทียมมงคล และ นารัตน์ คงอนันต์
- ◆ การวิเคราะห์ศักยภาพพลังงานลมและข้อมูลลมรายปีบริเวณพื้นที่ อำเภอสะเมิง จังหวัดเชียงใหม่
กิตติกร สาสุจิตต์ และ นิกราน หอมดวง
- ◆ ลักษณะรูปแบบหัวพ่นอะตอมไมซีในกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ
มนตรี ขาวสุข สุรัตน์ วรณศรี และ ศิริชัย ต่อสกุล
- ◆ การจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบกับปฏิบัติการโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดเล็กแบบกระจายตัว
ในระบบจำหน่าย
มนัส บุญเกียรติทอง ปพน งามประเสริฐ และ นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ

วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร

RMUTP RESEARCH JOURNAL

ที่ปรึกษา

ดร.ณัฐวรพล รัชสิริวัชรบุล

อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ดร.ปริญญ์ บุญกนิษฐ

รองอธิการบดีฝ่ายบริหาร วิจัยและพัฒนานวัตกรรม

บรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ว่าที่เรือตรี ดร.ทรงวุฒิ มงคลเลิศมณี

กองบรรณาธิการ จากหน่วยงานภายนอก

ศาสตราจารย์ ดร.ทนงเกียรติ	เกียรติศิริโรจน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศาสตราจารย์ ดร.สมชาย	วงศ์วิเศษ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.อรุณกร	เก่งพล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร.สันติ	แมนศิริ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ศาสตราจารย์ ดร.ทรงศักดิ์	เพ็ชรมิตร	มหาวิทยาลัยมหิดล
ศาสตราจารย์ ดร.รัตติก	ยัมนิรัญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.สายประสิทธิ์	เกิดนิยม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.ทวีชัย	อมรศักดิ์ชัย	มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.ธงชัย	พองสมุทร	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

กองบรรณาธิการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รุ่งอรุณ พรเจริญ	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรลักษณ์ ปัญญาธิพิงศ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กัลทิมา เขาวาญชัยกุล	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัตนพล มงคลรัตนสิทธิ์
ดร.ชลากร อุดมรักษาสกุล	ดร.สิงห์แก้ว ปือกเพ็ง
ดร.วราพร ทองเงิน	นางสาวเจนจิรา บ.ป.สูงเนิน
นางสาวพัชรนันท์ ยังวรวิเชียร	นายปิยวัฒน์ เจริญทรัพย์

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิผู้ประเมินบทความ (Peer Review)
ประจำปี 15 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม – ธันวาคม 2564

ศาสตราจารย์ ดร.เสริม จันทน์ฉาย	มหาวิทยาลัยศิลปากร
รองศาสตราจารย์ ดร.เอกไท วิโรจน์สกุลชัย	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.อุบลรัตน์ หวังรักษาศิกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.เสกสรร สุธรรมานนท์	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รองศาสตราจารย์ ดร.สุทธิดา รักกะเปา	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ รุ่งทองใบสุรีย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.วรรณวิมล ปาสาณพันธ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.ประมุข อุณหเลขกะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
รองศาสตราจารย์ ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.ธวัช สุริวงษ์	มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ ดร.ธนศ ธนิตย์ธีรพันธ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐกาญจน์ หงส์ศรีพันธ์	มหาวิทยาลัยศิลปากร
รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐฐา เลหากุลจิตต์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐฐา จินดาเพชร	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รองศาสตราจารย์ ดร.ชาลิตา บรมพิชัยชาติกุล	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รองศาสตราจารย์ ดร.จอมภพ แววศักดิ์	มหาวิทยาลัยทักษิณ
รองศาสตราจารย์ ดร.คณิต วัฒนวิเชียร	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รองศาสตราจารย์ ดร.เกียรติฟ้า ตั้งใจจิต	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.เกรียงไกร ราชกิจ	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
รองศาสตราจารย์ระพีพรรณ นลองสุข	มหาวิทยาลัยศิลปากร
รองศาสตราจารย์เดช เหมือนขาว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุทธวรรณ สุพรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุชีรา ธนนิมิตร	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมลักษณ์ วรรณฤมล กิเยลาโรว่า	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ พรพิสุทธิมาศ	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันฐณพงษ์ คงแก้ว	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภญ.วฐุ พรหมพิทยารัตน์	มหาวิทยาลัยนเรศวร

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิผู้ประเมินบทความ (Peer Review)
ประจำปี 15 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม – ธันวาคม 2564

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชัย อัมมมงคล	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปพิชญา ชัยสกุล	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปณิต หาสิน	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บรรลือ สังข์ทอง	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภิสพร มีมงคล	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทนต์ศักดิ์ อิ่มใจ	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สนใจธรรม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฐิติมา วงศ์อินตา	มหาวิทยาลัยบูรพา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญณรงค์ อัครเทศานภาพ	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ดร.วาริช วีระพันธ์	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

สารบัญ

วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร

ปีที่ 15 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม – ธันวาคม 2564 ISSN 2651-1096 (Online)

	หน้า
บทความวิจัย	
การศึกษาเชิงทดสอบการใช้น้ำสำหรับระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ยุธนา ศรีอุดม อนูรัตน์ เทวตา สังคม สัพโส และ นิวัฒน์ ประทุมไชย	1
การหาปริมาณปรอทในตัวอย่างครีมหน้าขาวโดยเทคนิคการวิเคราะห์ปรอทโดยตรงด้วยการ สลายตัวด้วยความร้อน นภาพร บุญนารักษ์ และ นภา ตั้งเตรียมจิตมั่น	14
สมบัติทางเคมีกายภาพ ทางกล และทางความร้อนของฟิล์มบรีโกลได้จากแป้งมันเลือด น้ำฝน สามสาลี นิสารัม สัมช่า และ สุมาลี มุสิกกา	24
การประยุกต์ใช้หม้อแปลงฟลายแบคสำเร็จรูปสำหรับแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง ยุธนา กันทะพะเยา และ เฉลิมพล เรื่องพัฒนาวิวัฒน์	40
การพัฒนาต้นแบบเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลและแอลพีจีเป็นเชื้อเพลิงสำหรับการเกษตร ชัยยง ศิริพรมงคลชัย	50
การวิเคราะห์โครงการผลิตหมักพืชมักรองพื้นสีชาวฐานตัวทำลายสำหรับผลิตบรรจุภัณฑ์ อ่อนตัว พิชิต ขจรเดชะ และ อนันต์ ต้นไฉศิริ	63
การพัฒนาแบบจำลองและการพยากรณ์ดัชนีรังสีอัลตราไวโอเลตรายชั่วโมงโดยใช้โครงข่าย ประสาทเทียมในจังหวัดสงขลา ประนมกร ชูศรี สราวุฒิ แนนเนียร์ วรพันธุ์ การชนะชาติ และ สนิธดา เทียนสี	75
Flexural Performance of Corroded Reinforced Concrete Beams Repaired with CFRP Sheets Arnon Wongkaew	88
การควบคุมคุณภาพและลดการสูญเสียในกระบวนการประกอบชิ้นส่วนบังโคลนหน้าแก้มข้าง รถยนต์ด้วยวิธีโพคา-โยเกะ อภิชาติ เสมศรี เอกรัตน์ สุขสุคนธ์ สำรวย สีสมุทร และ ธนิตศักดิ์ พุฒิพัฒนาโมชิต	103
การวิเคราะห์ปริมาณสารสำคัญและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดใบกะปิเยดเครือ หวันฮูดา ปะดุกา ปัญจพร สันทัดเลขา ทวีภรณ์ ศิริคช และ นางลักษณ์ กุลวรรธต์	118

สารบัญ

วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร

ปีที่ 15 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม – ธันวาคม 2564 ISSN 2651-1096 (Online)

	หน้า
ความสามารถในการดัดขึ้นรูปและกลไกความเสียหายของโลหะแผ่นอลูมิเนียม AA6016 ณัฐศักดิ์ พรพุดศิริ	130
ผลของแรงต้านอากาศต่อการตกของกรวยกระดาษด้วยเทคนิคการวิเคราะห์วิถีโออัตรเร็วสูง จิราภรณ์ ปุณยวัจนพรกุล และ วิไลพร ลักษณะมีวาณิชย์	146
การตรึงอะโซโตแบคทีเรียที่เรียวตรงในโตรเจนในอากาศด้วยวัสดุธรรมชาติและผลต่อการ เจริญเติบโตของผักกวางตุ้งในดิน พิชญ์ ตั้งสมบัติวิจิตร อิตารัตน์ เทียมมงคล และ นารีรัตน์ คงอนันต์	158
การวิเคราะห์ศักยภาพพลังงานลมและข้อมูลลมรายปีบริเวณพื้นที่ อำเภอสะเมิง จังหวัด เชียงใหม่ กิตติกร สาสุจิตต์ และ นิกราน หอมดวง	169
ลักษณะรูปแบบหัวพ่นอะตอมไมซีในกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ มนตรี ขาวสุข สุรัตน์ วรรณศรี และ ศิริชัย ต่อสกุล	180
การจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบกับปฏิบัติการโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด เล็กแบบกระจายตัวในระบบจำหน่าย มนัส บุญเที่ยรทอง ปพน งามประเสริฐ และ นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ	194

<http://journal.rmutp.ac.th/>

การศึกษาเชิงทดสอบการใช้น้ำสำหรับระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ยุธนา ศรีอุดม* อนูรัตน์ เทวตา สังคม สัพโส และ นิวัฒน์ ประทุมไชย

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก
41/1 หมู่ 7 ถนนพหลโยธิน ตำบลไม้งาม อำเภอเมือง จังหวัดตาก 63000

รับบทความ 19 มิถุนายน 2563 แก้ไขบทความ 30 พฤศจิกายน 2563 ตอรับบทความ 17 กุมภาพันธ์ 2564

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเชิงทดสอบประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยการใช้ในการระบายความร้อน โดยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่นำมาใช้ในการทดสอบเป็นแบบโมโนคริสตัลไลน์ ขนาด 80 วัตต์ ซึ่งจะมีการแบ่งชุดทดสอบออกเป็น 3 แบบ ประกอบไปด้วย แผงที่ 1 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ได้ระบายความร้อน แผงที่ 2 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ระบายความร้อนด้วยการสเปรย์น้ำ และ แผงที่ 3 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ระบายความร้อนด้วยน้ำหยด โดยแบ่งอัตราการไหลของน้ำเป็น 3 อัตราการไหล ได้แก่ 50, 75 และ 100 ลิตรต่อชั่วโมง ซึ่งผลจากการทดสอบ พบว่าแผงทดสอบทั้ง 3 แบบ มีแนวโน้มด้านอุณหภูมิที่คล้ายคลึงกัน คือ เมื่ออุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าสูงขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่ำลงตามไปด้วย และเมื่ออัตราการไหลของน้ำสำหรับการระบายความร้อนทั้งแบบสเปรย์น้ำและแบบน้ำหยดมีค่าสูงขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยการระบายความร้อนด้วยการสเปรย์น้ำ จะมีประสิทธิภาพแผงสูงกว่าการระบายความร้อนด้วยน้ำหยด ในทั้ง 3 อัตราการไหล และการระบายความร้อนด้วยการสเปรย์น้ำ ที่อัตราการไหล 100 ลิตรต่อชั่วโมง จะทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพสูงสุด

คำสำคัญ : การระบายความร้อน; การทดสอบ; แผงเซลล์แสงอาทิตย์; น้ำ

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +669 6976 5424, ไลน์ไอดี: yuttana.sriudom@gmail.com

<http://journal.rmutp.ac.th/>

An Experimental Study of Solar Panel Efficiency with Water Cooling

Yuttana Sriudom* Anurat Tewata Sangkom Sapso and Niwat Pratumchai

Faculty of Engineering, University Rajamangala University of Technology Lanna Tak
41/1 Moo. 7, Paholayothin Road, Mai Ngam, Muang, Tak, 63000

Received 19 June 2020; Revised 30 November 2020; Accepted 17 February 2021

Abstract

This research aimed to experimentally study of solar panel efficiency with water cooling. Three mono-crystalline solar panels with the capacity of 80 W (for each panel) were used for this test. The first panel was a solar panel without water cooling. The second panel was a panel with water spray cooling. The last panel was a solar panel with water drop cooling. The cooling water flow rate was varied to 50, 75 and 100 LPH. From the test, it was found that the temperatures of all solar panels had the similar trends. The solar panel efficiency decreased when the temperature of solar panel increases. The solar panel efficiency increased when the cooling water flow rate was increased for both of water spray cooling and water drop cooling. For all water cooling flow rates the water spray cooling solar panel performed higher efficiency than water drop cooling solar panel. The highest solar panel efficiency in this test occurred when the water spray cooling flow rate of 100 LPH.

Keywords : Cooling; Experimental; Solar Cell Module; Water

* Corresponding Author. Tel.: +669 6976 5424, E-mail Address: yuttana.sriudom@gmail.com

1. บทนำ

พลังงานแสงอาทิตย์ จัดเป็นพลังงานทดแทนประเภทหมุนเวียนที่ใช้แล้วไม่หมดไป การใช้พลังงานแสงอาทิตย์มีมาตั้งแต่บรรพบุรุษ โดยการใช้ประโยชน์โดยตรงจากแสงและความร้อนของดวงอาทิตย์ ความร้อนที่ได้จากแสงแดดสามารถทำให้ผ้าแห้ง อาหารแห้ง สร้างความอบอุ่นให้แก่ร่างกาย และเรายังใช้แสงสว่างของดวงอาทิตย์ในการดำรงชีวิตประจำวัน ช่วยในการมองเห็น เป็นตัวบอกเวลาตามธรรมชาติ และนอกจากนี้พลังงานจากแสงอาทิตย์ยังช่วยให้พืชเจริญเติบโตเป็นแหล่งอาหารของมนุษย์และสัตว์ เป็นต้น เมื่อเทคโนโลยีก้าวหน้ามากขึ้น ความต้องการของมนุษย์สูงขึ้นในด้านการใช้พลังงาน จึงได้มีการคิดค้นและพัฒนาพลังงานแสงอาทิตย์ในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งสามารถผลิตไฟฟ้าได้ทุกที่มีแสงอาทิตย์ พลังงานแสงอาทิตย์ถูกพัฒนาให้สร้างเป็นกระแสไฟฟ้าได้ ด้วยอุปกรณ์ที่เรียกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ ประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตพื้นที่ระหว่างเส้นละติจูดที่ 5-21 องศาเหนือและเส้นลองจิจูดที่ 97-106 องศาตะวันออก ซึ่งอยู่ใกล้แนวเส้นศูนย์สูตร จึงมีศักยภาพในการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ค่อนข้างสูง และปัจจุบันประเทศไทยมีการติดตั้งและลงทุนทางด้านพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องประกอบกับราคาของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบันมีราคาลดลงอย่างมาก จึงได้รับความนิยมนำมาใช้งาน แต่ในการใช้งานจริงประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น T.Kiatsiriroat [1] โดยจะลดลงประมาณร้อยละ 0.4 สำหรับทุก 1 องศาเซลเซียสที่สูงขึ้น ดังนั้นที่อุณหภูมิทำงานจริงประมาณ 50–60 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จะลดลงประมาณร้อยละ 10–15 จากผลที่เกิดขึ้นจึงได้มีนักวิจัยหลายคน ได้ทำการวิจัยและทดสอบหาแนวทางในการลดอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ลงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้สูงขึ้น อาทิเช่น

N. Phuengkum [2] ได้ทำการศึกษาการเพิ่มสมรรถนะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยระบบหล่อเย็น พบว่า ที่อุณหภูมิของแผงอ้างอิงใกล้เคียงกันของแต่ละเงื่อนไข ระบบหล่อเย็นด้วยน้ำที่อัตราการไหลเชิงปริมาตร 4.24×10^{-6} ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ให้ผลดีที่สุด ซึ่งทำให้อุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง 21.05 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นร้อยละ 0.51 ให้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นร้อยละ 9.35 ส่วนระบบหล่อเย็นด้วยแผ่น คีรีบ ทำให้ลดลง 9.19 องศาเซลเซียส มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นร้อยละ 0.28 ให้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นร้อยละ 5.02 P. Bhulla et. al. [3] ได้ทำการศึกษาปรับปรุงประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการใช้น้ำในระบบระบายความร้อนสำหรับการลดอุณหภูมิในการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยได้ทำการทดสอบระบบระบายความร้อน 2 แบบ คือ แบบพ่นน้ำบนผิวหน้าแผงเซลล์แสงอาทิตย์และแบบน้ำหยดบนผิวหน้าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่นำมาใช้ในการทดสอบคือ ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน ขนาด 40 วัตต์ จากการทดสอบ พบว่า การทดสอบแบบพ่นน้ำและแบบน้ำหยดบนผิวหน้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีความสามารถในการลดอุณหภูมิโดยเฉลี่ยร้อยละ 30.1 และ 39.9 ตามลำดับ และจากการลดอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละการทดสอบ พบว่า มีผลต่อประสิทธิภาพในการทำงานการทดสอบแบบพ่นน้ำและแบบน้ำหยดบนผิวหน้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะสามารถทำให้ค่าประสิทธิภาพในการทำงานเพิ่มขึ้นได้โดยเฉลี่ยร้อยละ 12.6 และ 8.6 ตามลำดับ ที่ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของ S. Krauter [4] ได้ทำการวิจัยและทดสอบการลดอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้น้ำเป็นสารระบายความร้อนพบว่า การพ่นน้ำบนผิวหน้าแผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถลดอุณหภูมิได้ถึง 22 องศาเซลเซียส และสามารถเพิ่มกำลังการผลิตทางไฟฟ้าได้ร้อยละ 10.3 สำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนแบบผลึกเดี่ยวและแบบหลายผลึก A. Tewata

และ Y. Sriudom [5] ได้ทำการศึกษาการเพิ่มสมรรถนะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยการติดตั้งท่อความร้อนสำหรับระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สำหรับทดสอบเป็นแบบโมโนคริสตัลไลน์ ขนาด 80 วัตต์ ซึ่งจะทำทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 3 แบบ คือ แบบที่ 1 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ไม่ได้ติดตั้งท่อความร้อน แบบที่ 2 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งท่อความร้อนโดยใช้เอทานอลเป็นสารทำงาน และ แบบที่ 3 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งท่อความร้อนโดยใช้สารทำความเย็น R-11 เป็นสารทำงาน ซึ่งการทดสอบ พบว่า ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ได้ติดตั้งท่อความร้อน มีค่าเท่ากับร้อยละ 9.3 ส่วนแผงที่ทำติดตั้งท่อความร้อนโดยใช้เอทานอลเป็นสารทำงาน มีประสิทธิภาพ เท่ากับร้อยละ 10.2 และ แผงที่ทำติดตั้งท่อความร้อนโดยใช้สารทำความเย็น R-11 เป็นสารทำงาน มีประสิทธิภาพ เท่ากับร้อยละ 11.8 จากการทดสอบพบว่า การติดตั้งท่อความร้อนเพื่อระบายความร้อนทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น จากปัจจัยที่กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการใช้น้ำในการระบายความร้อน

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาเชิงทดลองการระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้น้ำเป็นตัวกลางในการระบายความร้อน ซึ่งประกอบไปด้วย การสเปรย์น้ำลงบนผิวหน้าแผง และการใช้น้ำหยดลงบนผิวหน้าแผง และทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ระบายความร้อนด้วยน้ำ และแผงที่ไม่ได้ระบายความร้อน

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อน

คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อน [6] ของน้ำที่ไหลผ่านแผงเซลล์แสงอาทิตย์ คำนวณได้ดังสมการที่ (1)

$$Q = \dot{m} C_p \Delta T \quad (1)$$

โดยที่

Q คือ ค่าความร้อนของน้ำในส่วนควบแน่น (วัตต์)

$\dot{m}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำ (กิโลกรัมต่อวินาที)

C_p คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (กิโลจูลต่อกิโลกรัม-องศาเซลเซียส)

ΔT คือ ผลต่างอุณหภูมิของน้ำขาออกและขาเข้าที่ส่วนควบแน่น (องศาเซลเซียส)

เมื่อ

$$\dot{m} = \rho v A \quad (2)$$

โดยที่

ρ คือ ค่าความหนาแน่นของน้ำ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

v คือ ค่าความเร็วของน้ำ (เมตรต่อวินาที)

A คือ ค่าพื้นที่หน้าตัดที่น้ำไหลผ่าน (ตารางเมตร)

1.1 การคำนวณประสิทธิภาพ (η) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ แสดงดังสมการที่ (3)

$$\eta = (VI)/(GA) \quad (3)$$

1.2 การคำนวณกำลังไฟฟ้า (P) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ แสดงดังสมการที่ (4)

$$P = VI \quad (4)$$

โดยที่

P คือ กำลังไฟฟ้า (วัตต์)

I คือ กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

V คือ แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)

G คือ ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ (วัตต์ต่อตารางเมตร)

A คือ พื้นที่รับรังสีแสงอาทิตย์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (ตารางเมตร)

2.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

ผู้วิจัยได้ออกแบบและสร้างชุดทดสอบ 3 แบบ ได้แก่ 1. ชุดทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ได้ระบายความร้อน (แผงที่ 1) 2. ชุดทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ระบายความร้อนด้วยการสเปรย์น้ำ (แผงที่ 2) และ 3. ชุดทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ระบายความร้อนด้วยน้ำหยด (แผงที่ 3) โดยทดสอบระหว่างเดือนมกราคม ถึงเดือนกุมภาพันธ์ 2563 ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ ประกอบไปด้วย

2.1.2.1 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตัลไลน์ (Mono-crystalline) ขนาด 80 วัตต์ แรงดันไฟฟ้าสูงสุด 18.0 โวลต์ กระแสสูงสุด 2.23 แอมแปร์

2.1.2.2 สายเทอร์โมคัปเปิลยี่ห้อ OMEGA ชนิด K แม่นยำ ± 1 องศาเซลเซียส

2.1.2.3 เครื่องวัดความเข้มแสง ยี่ห้อ Lutron รุ่น SPM-1116SD ช่วงการวัด 0.0 ถึง 2,000 วัตต์ต่อตารางเมตร ความแม่นยำ ± 10 วัตต์ต่อตารางเมตร

2.1.2.4 เครื่องบันทึกข้อมูล ยี่ห้อ Wisco รุ่น DL 2200 ขนาด 8 ช่องสัญญาณ มีช่วงการวัดอุณหภูมิ -250 ถึง 1,300 องศาเซลเซียส มีความแม่นยำ ± 0.1 องศาเซลเซียส

2.1.2.5 ตัวขยายสัญญาณ ยี่ห้อ Wisco รุ่น EX24 ขนาด 16 ช่องสัญญาณ มีช่วงการวัดอุณหภูมิ -250 ถึง 1,300 องศาเซลเซียส มีความแม่นยำ ± 0.1 องศาเซลเซียส

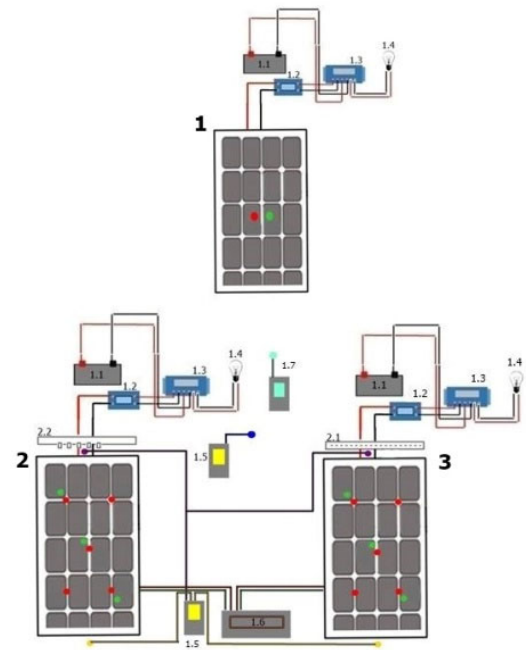
2.1.2.6 มัลติมิเตอร์ ยี่ห้อ GW instek รุ่น GDM-394/396 ใช้สำหรับวัดค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า

2.1.2.7 เครื่องควบคุมการประจุกระแสไฟฟ้า ยี่ห้อ LEONICS รุ่น APOLLO S-120A แรงดันไฟฟ้าขาเข้า 12 VDC แรงดันไฟฟ้าขาออก 220 VAC 1 เฟส ความถี่ไฟฟ้า 50 Hz

2.1.2.8 แบตเตอรี่ (Deep cycle) ยี่ห้อ YUASA ใช้ขนาด 12 โวลต์ 100 แอมแปร์ โดยแบตเตอรี่จะเก็บพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์

2.1.2.9 โรตารีมอเตอร์ ใช้สำหรับวัดอัตราการไหลของน้ำ โดยมีช่วงการวัด ระหว่าง 30-250 ลิตรต่อชั่วโมง

2.1.2.10 ไดอะแกรมการติดตั้งวัสดุอุปกรณ์ในการทดสอบ แสดงดังรูปที่ 1 และ รายการสัญลักษณ์แสดงดังตารางที่ 1-2



รูปที่ 1 ไดอะแกรมการติดตั้งวัสดุอุปกรณ์ในการทดสอบ

ตารางที่ 1 อุปกรณ์ เครื่องมือวัด และตำแหน่งในการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัด

หมายเลข	รายการ
1	แผงเซลล์แสงอาทิตย์แผงที่ 1
2	แผงเซลล์แสงอาทิตย์แผงที่ 2
3	แผงเซลล์แสงอาทิตย์แผงที่ 3
1.1	แบตเตอรี่
1.2	วัตต์มิเตอร์
1.3	เครื่องควบคุมประจุกระแสไฟฟ้า

ตารางที่ 1 อุปกรณ์ เครื่องมือวัด และตำแหน่งในการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัด (ต่อ)

หมายเลข	รายการ
1.4	หลอดไฟ DC 12 V
1.5	เครื่องวัดและบันทึกอุณหภูมิ
1.6	เครื่องวัดและบันทึกอุณหภูมิ (Data logger)
1.7	เครื่องวัดความเข้มแสง
2.1	ชุดหยดน้ำ
2.2	ชุดสเปรย์น้ำ

ตารางที่ 2 สัญลักษณ์แสดงตำแหน่งตรวจวัดอุณหภูมิ และตำแหน่งติดตั้งเครื่องมือ

สี	รายการ
●	ตำแหน่งตรวจวัดอุณหภูมิบนแผง
●	ตำแหน่งตรวจวัดอุณหภูมิน้ำเข้าแผง
●	ตำแหน่งตรวจวัดอุณหภูมิน้ำออกจากแผง
●	ตำแหน่งตรวจวัดอุณหภูมิใต้แผง
●	ตำแหน่งตรวจวัดอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม
●	ตำแหน่งติดตั้งเครื่องวัดความเข้มแสง

ตารางที่ 3 รายละเอียดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

Berkit Manufacturing	
P_{max}	80W
V_{oc}	21.6V
I_{sc}	5.18A
I_{mp}	4.7A
V_{mp}	18V
FF	76.0%
n	18%

3. ขั้นตอนการทดสอบ

3.1 ในการทดสอบจะวางแผงเซลล์แสงอาทิตย์ท่ามกลาง 17 องศา กับแนวระดับ

3.2 ทำการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ก่อนติดชุดสเปรย์น้ำและน้ำหยด เพื่อหาประสิทธิภาพแผงของทั้ง 3 แผง และคำนวณหาประสิทธิภาพแผงทั้ง 3 แผง

3.3 ติดตั้งชุดสเปรย์น้ำ และน้ำหยดเพื่อระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยกำหนดให้แผงที่ 1 คือ แผงที่ไม่ติดตั้งชุดระบายความร้อน แผงที่ 2 คือ แผงติดตั้งชุดระบายความร้อนด้วยการสเปรย์น้ำ ซึ่ง จะทำการติดตั้งหัวสปริงเกอร์แบบพ่นฝอยหรือพ่นละอองไว้ที่ด้านบนของแผง จำนวน 5 หัว และ แผงที่ 3 คือ แผงที่ติดตั้งชุดระบายความร้อนด้วยน้ำหยด โดยจะทำการติดตั้งหัวน้ำหยดไว้ที่ด้านบนของแผง จำนวน 7 หัว โดยทั้ง 2 แบบ จะปล่อยให้น้ำไหลจากด้านบนแผง ลงสู่ด้านล่างแผง และจะถูกควบคุมอัตราการไหลให้คงที่ ด้วยวาล์วควบคุมอัตราการไหลของน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 2 (b)



(a)



(b)

รูปที่ 2 (a)–(b) การติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับตรวจวัดของแผงทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์

3.4 ติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือวัด ประกอบไปด้วย เครื่องวัดและบันทึกอุณหภูมิ เครื่องวัดกำลังไฟฟ้า เครื่องควบคุมประจุกระแสไฟฟ้า แบตเตอรี่ หลอดไฟ เครื่องวัดความเข้มแสง โรตاميเตอร์ และมอเตอร์ แสดงดังรูปที่ 2

3.5 ติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิลในตำแหน่งบนแผง ใต้แผง น้ำเข้าแผง น้ำออกจากแผง บันทึกค่า โดยทำการบันทึกค่ากำลังไฟฟ้า อุณหภูมิ และความเข้มแสงทุก ๆ 5 วินาที

3.6 การทดสอบจะแบ่งอัตราการไหลของน้ำสำหรับระบายความร้อนออกเป็น 3 อัตราการไหล ได้แก่ 50, 75 และ 100 ลิตรต่อชั่วโมง โดยจะทำการทดสอบและบันทึกข้อมูล อัตราการไหลละ 7 วัน รวมเป็นระยะเวลา 21 วัน ทำการทดสอบและบันทึกค่าระหว่างเวลา 08.30–17.00 น.

3.7 นำผลที่ได้จากการทดสอบมาหาการถ่ายเทความร้อน กำลังไฟฟ้า และประสิทธิภาพ ดังสมการที่ (1)–(4)

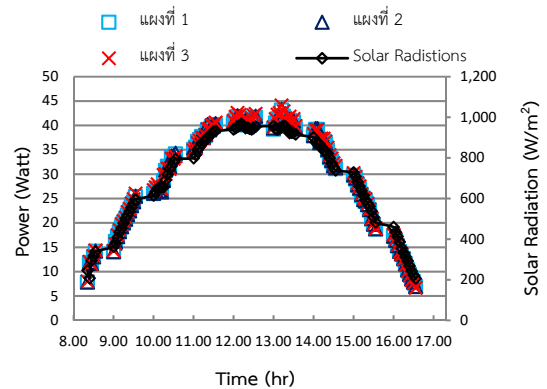
4. ผลและอภิปรายผลการวิจัย

จากการทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดแรงดัน 12 โวลต์ 80 วัตต์ ทั้ง 3 แผง จะแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 กรณี ประกอบด้วย กรณีที่ 1 การทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ยังไม่ได้ติดตั้งชุดระบายความร้อน (แผงที่ 1) เพื่อหาประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 แผง ก่อนนำไปใช้ทดสอบและติดตั้งชุดระบายความร้อนด้วยน้ำ กรณีที่ 2 การทดสอบประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งชุดระบายความร้อนด้วยน้ำ แบ่งเป็น 1 การระบายความร้อนด้วยการสปร์น้ำ (แผงที่ 2) และ 2 การระบายความร้อนด้วยน้ำหยด (แผงที่ 3) และเปรียบเทียบกับแผงที่ไม่ได้ติดตั้งชุดระบายความร้อน (แผงที่ 1) ซึ่งการระบายความร้อนด้วยน้ำจะทำการปรับอัตราการไหลของน้ำ 3 ระดับ ได้แก่ 50, 75 และ 100

ลิตรต่อชั่วโมง โดยจากการทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์ของทั้ง 2 กรณี พบว่า

4.1 ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ กรณีที่ 1

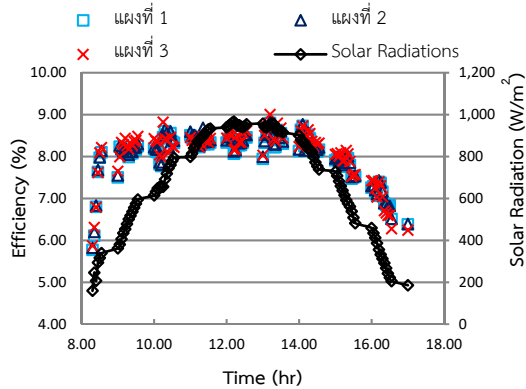
4.1.1 ผลของความเข้มแสงที่มีผลต่อกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 แผง แสดงดังรูปที่ 3 โดยจะนำข้อมูลวันที่ท้องฟ้าโปร่งใสตลอดทั้งวันมาเป็นตัวอย่างในการนำเสนอ



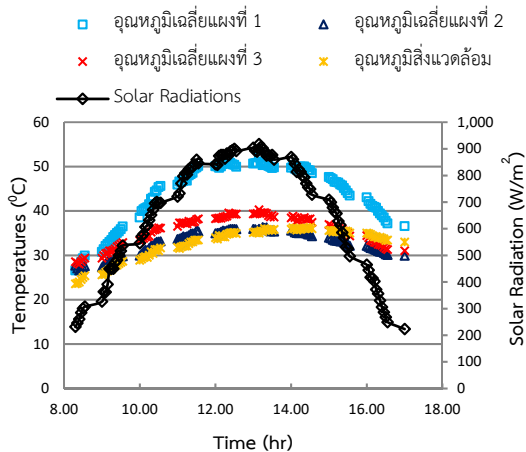
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและความเข้มแสงที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 แผง ณ วันที่ 10 มกราคม พ.ศ. 2563

จากรูปที่ 3 พบว่า กำลังไฟฟ้าที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 แผง มีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกัน เมื่อความเข้มแสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มขึ้นและส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้จากแผงที่ 1 แผงที่ 2 และแผงที่ 3 มีค่าเท่ากับ 28.77, 28.93 และ 29.12 วัตต์ ตามลำดับ และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้สูงสุดจากแผงที่ 1 แผงที่ 2 และ แผงที่ 3 มีค่าเท่ากับ 43.10, 43.3 และ 44.12 วัตต์ ตามลำดับ จากการทดสอบพบว่า กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้เฉลี่ยของทั้ง 3 แผง มีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนความเข้มแสงเฉลี่ยตลอดวัน มีค่าเท่ากับ 687.1 วัตต์ต่อตารางเมตร และความเข้มแสงสูงสุด มีค่าเท่ากับ 949.7 วัตต์ต่อตารางเมตร ณ เวลา 12.20 น.

4.1.2 ผลของความเข้มแสงที่มีผลต่อประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 แผง แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและความเข้มแสงที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 แผง ณ วันที่ 10 มกราคม พ.ศ. 2563



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยและความเข้มแสงที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 แผง ณ วันที่ 2 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2563

จากรูปที่ 4 พบว่า ประสิทธิภาพที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 แผง มีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกัน โดยประสิทธิภาพเฉลี่ยที่ได้จากแผงที่ 1 แผงที่ 2 และแผงที่ 3 มีค่า เท่ากับร้อยละ 8.10, 8.08 และ 8.11

ตามลำดับ และประสิทธิภาพที่ได้สูงสุดจากแผงที่ 1 แผงที่ 2 และแผงที่ 3 มีค่าเท่ากับร้อยละ 11.04, 11.09 และ 11.01 ตามลำดับ ซึ่งจากการทดสอบหาประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยเฉลี่ยของทั้ง 3 แผง จะมีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกัน

4.2 ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์กรณีที่ 2

4.2.1 ผลของการใช้น้ำในการระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่อัตราการไหล ที่อัตราการไหล 50 ลิตรต่อชั่วโมง

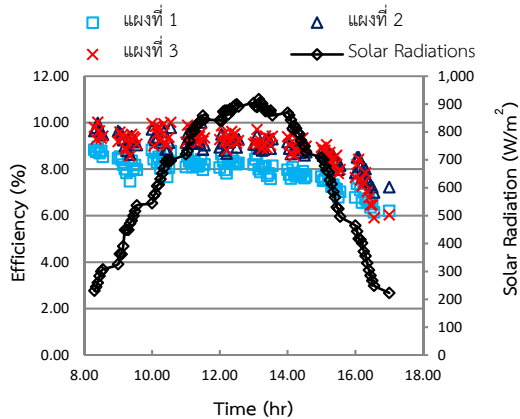
4.2.1.1 ผลของอุณหภูมิเฉลี่ยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 แผง แสดงดังรูปที่ 5

จากรูปที่ 5 เมื่อทำการระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีการสเปรย์น้ำ (แผงที่ 2) และ การระบายความร้อนด้วยวิธีการใช้น้ำหยด (แผงที่ 3) พบว่า อุณหภูมิเฉลี่ยของแผงที่ 1 แผงที่ 2 และแผงที่ 3 มีค่าเท่ากับ 43.97, 32.83 และ 35.58 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งจากการทดสอบการระบายความร้อนด้วยวิธีการสเปรย์น้ำ และน้ำหยดสามารถลดอุณหภูมิเฉลี่ยได้เท่ากับ 11.14 และ 8.39 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งการระบายความร้อนด้วยการสเปรย์น้ำสามารถลดอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้สูงที่สุด โดยอุณหภูมิสูงสุดของแผงที่ 1 แผงที่ 2 และ แผงที่ 3 มีค่าเท่ากับ 52.01, 36.34 และ 40.29 องศาเซลเซียส และความเข้มแสงอาทิตย์สูงสุดมีค่า เท่ากับ 918.07 วัตต์ต่อตารางเมตร ที่เวลา 13.45 น.

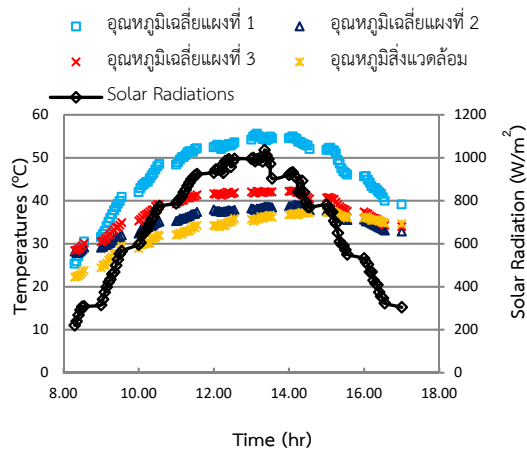
4.2.1.2 ผลของประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 แผง แสดงดังรูปที่ 6

จากรูปที่ 6 เมื่อทำการระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีการสเปรย์น้ำ (แผงที่ 2) และ การระบายความร้อนด้วยวิธีการใช้น้ำหยด (แผงที่ 3) พบว่า ประสิทธิภาพเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบของแผงที่ 1 แผงที่ 2 และแผงที่ 3 มีค่าเท่ากับร้อยละ 7.92,

8.99 และ 8.95 ตามลำดับ และประสิทธิภาพที่ได้สูงสุดจากแผงที่ 1 แผงที่ 2 และแผงที่ 3 มีค่าเท่ากับร้อยละ 8.79, 10.11 และ 10.02 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อทำการระบายความร้อนด้วยวิธีสเปรย์น้ำ จะทำให้ประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าสูงสุด เนื่องจากการกระจายตัวของน้ำด้วยวิธีการสเปรย์น้ำสามารถกระจายตัวได้ครอบคลุมพื้นที่แผงมากกว่าวิธีการระบายความร้อนด้วยน้ำหยด



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและความเข้มแสงที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 แผง ณ วันที่ 2 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2563



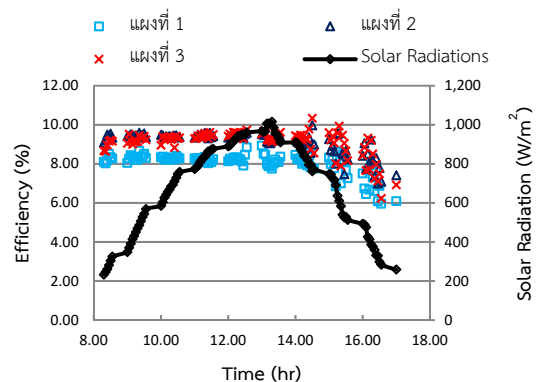
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ความเข้มแสงที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 แผง ณ วันที่ 5 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2563

4.2.2 ผลของการใช้น้ำในการระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่อัตราการไหล ที่อัตราการไหล 75 ลิตรต่อชั่วโมง

4.2.2.1 ผล ของ อุณหภูมิ เฉลี่ย แผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 แผง แสดงดังรูปที่ 7

จากรูปที่ 7 เมื่อทำการระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีการสเปรย์น้ำ (แผงที่ 2) และการระบายความร้อนด้วยวิธีการใช้น้ำหยด (แผงที่ 3) พบว่า อุณหภูมิเฉลี่ยของแผงที่ 1 แผงที่ 2 และ แผงที่ 3 มีค่า เท่ากับ 46.96, 35.36 และ 38.24 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งจากการทดสอบระบายความร้อนด้วยวิธีการสเปรย์น้ำ และน้ำหยด สามารถลดอุณหภูมิโดยเฉลี่ยได้เท่ากับ 11.60 และ 8.72 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งการระบายความร้อนด้วยวิธีสเปรย์น้ำสามารถลดอุณหภูมิของแผงได้สูงสุด ส่วนแผงที่ 1 (แผงเปล่า) มีอุณหภูมิแผงโดยเฉลี่ยสูงสุด เนื่องจากไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์ในการระบายความร้อน โดยอุณหภูมิสูงสุดของแผงที่ 1 แผงที่ 2 และ แผงที่ 3 มีค่าเท่ากับ 55.58, 39.05 และ 42.29 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และความเข้มแสงอาทิตย์สูงสุดมีค่า เท่ากับ 1,035.81 วัตต์ต่อตารางเมตร ที่เวลา 13.35 น.

4.2.2.2 ผลของประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 แผง แสดงดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ความเข้มแสงที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 แผง ณ วันที่ 5 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2563

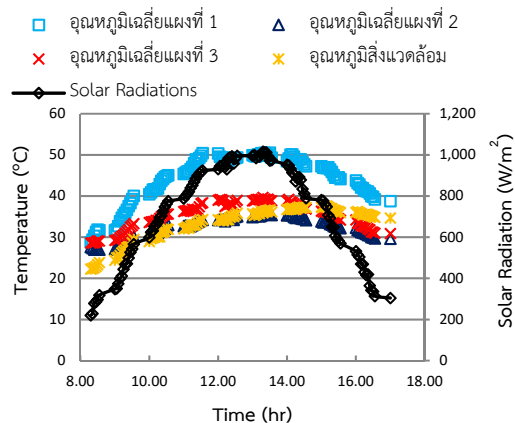
จากรูปที่ 8 เมื่อทำการระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีการสเปรย์น้ำ (แผงที่ 2) และการระบายความร้อนด้วยวิธีการใช้น้ำหยด (แผงที่ 3) พบว่า ประสิทธิภาพเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบของแผงที่ 1 แผงที่ 2 และ แผงที่ 3 มีค่าเท่ากับร้อยละ 8.03, 9.19 และ 9.12 ตามลำดับ และประสิทธิภาพที่ได้สูงสุดจากแผงที่ 1 แผงที่ 2 และแผงที่ 3 มีค่าเท่ากับร้อยละ 8.93, 10.97 และ 10.34 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อทำการระบายความร้อนด้วยวิธีสเปรย์น้ำจะทำให้ประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าสูงสุด เนื่องจากการสเปรย์น้ำสามารถกระจายตัวไปยังแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ครอบคลุมพื้นที่แผงมากกว่าการระบายความร้อนด้วยวิธีน้ำหยด แต่หากน้ำหยดสามารถกระจายตัวได้ครอบคลุมพื้นที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้อย่างทั่วถึงเหมือนกับวิธีสเปรย์น้ำ อาจจะส่งผลให้การระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำได้ดียิ่งขึ้น

4.2.3 ผลของการใช้น้ำในการระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่อัตราการไหล ที่อัตราการไหล 100 ลิตรต่อชั่วโมง

4.2.3.1 ผล ของ อุณหภูมิเฉลี่ยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 แผง แสดงดังรูปที่ 9

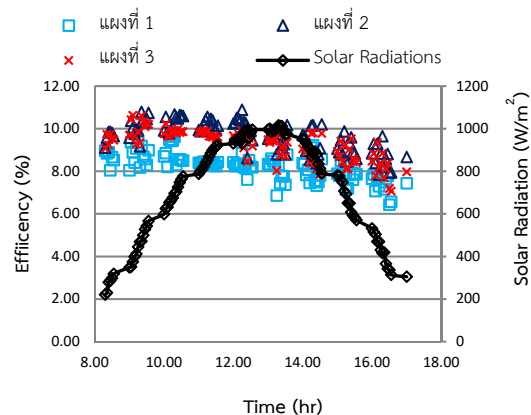
จากรูปที่ 9 เมื่อทำการระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีการสเปรย์น้ำ (แผงที่ 2) และการระบายความร้อนด้วยวิธีการใช้น้ำหยด (แผงที่ 3) พบว่า อุณหภูมิเฉลี่ยของแผงที่ 1 แผงที่ 2 และ แผงที่ 3 มีค่าเท่ากับ 44.27, 32.38 และ 35.25 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งจากการทดสอบระบายความร้อนด้วยวิธีการสเปรย์น้ำ และน้ำหยด สามารถลดอุณหภูมิโดยเฉลี่ยได้เท่ากับ 11.89 และ 9.02 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งการระบายความร้อนด้วยวิธีสเปรย์น้ำสามารถลดอุณหภูมิของแผงได้สูงสุด ส่วนแผงที่ 1 (แผงเปล่า) มีอุณหภูมิเฉลี่ยโดยเฉลี่ยสูงสุด เนื่องจากไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์ในการระบายความร้อน โดยอุณหภูมิ

สูงสุดของแผงที่ 1 แผงที่ 2 และ แผงที่ 3 มีค่าเท่ากับ 50.54, 35.86 และ 39.68 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และความเข้มแสงอาทิตย์สูงสุดมีค่า เท่ากับ 1,015.39 วัตต์ต่อตารางเมตร ที่เวลา 13.30 น.



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ความเข้มแสงที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 แผง ณ วันที่ 10 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2563

4.2.3.2 ผลของประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 แผง แสดงดังรูปที่ 10

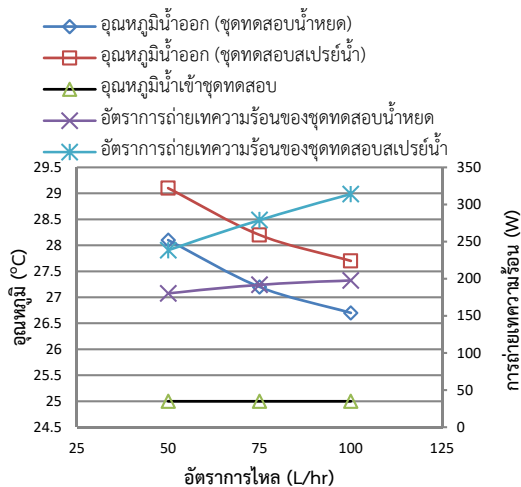


รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ความเข้มแสงที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 แผง ณ วันที่ 10 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2563

จากรูปที่ 10 เมื่อทำการระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีการสเปรย์น้ำ (แผงที่ 2)

และ การระบายความร้อนด้วยวิธีการใช้น้ำหยด (แผงที่ 3) พบว่า ประสิทธิภาพเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบของแผงที่ 1 แผงที่ 2 และ แผงที่ 3 มีค่าเท่ากับร้อยละ 7.98, 9.41 และ 9.33 ตามลำดับ และประสิทธิภาพที่ได้สูงสุดจากแผงที่ 1 แผงที่ 2 และแผงที่ 3 มีค่าเท่ากับร้อยละ 9.96, 11.49 และ 11.43 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อทำการระบายความร้อนด้วยวิธีสเปรย์น้ำจะทำให้ประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าสูงที่สุด เนื่องจากการสเปรย์น้ำสามารถกระจายตัวไปยังแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ครอบคลุมพื้นที่แผงมากกว่าการระบายความร้อนด้วยวิธีน้ำหยด

4.2.4 ผลของอัตราการถ่ายเทความร้อนของชุดทดสอบระบายความร้อนแบบน้ำหยด และแบบสเปรย์น้ำ ของทั้ง 3 อัตราการไหล แสดงดังรูปที่ 11

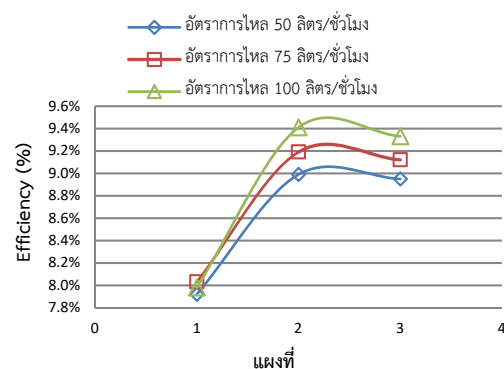


รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ อัตราการไหล และการถ่ายเทความร้อนของชุดทดสอบน้ำหยด และสเปรย์น้ำ

จากรูปที่ 11 พบว่า เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้อุณหภูมิน้ำออกที่ใช้สำหรับระบายความร้อนของทั้ง 2 ชุดทดสอบมีค่าลดลง โดยอุณหภูมิน้ำออกของชุดทดสอบน้ำหยด ที่อัตราการไหล 50, 75 และ 100

ลิตรต่อชั่วโมง มีค่าเท่ากับ 28.1, 27.2 และ 26.7 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และ อุณหภูมิน้ำออกของชุดทดสอบสเปรย์น้ำ ที่อัตราการไหล 50, 75 และ 100 ลิตรต่อชั่วโมง มีค่าเท่ากับ 29.0, 28.0 และ 27.6 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยที่อัตราการไหล 50 ลิตรต่อชั่วโมง จะมีค่าอุณหภูมิน้ำออกสูงสุด ส่วนการถ่ายเทความร้อนของทั้ง 2 ชุดทดสอบ จะมีแนวโน้มที่เหมือนกันคือ เมื่ออัตราการไหลมีค่าสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย โดยค่าการถ่ายเทความร้อนของชุดทดสอบน้ำหยด ที่อัตราการไหล 50, 75 และ 100 ลิตรต่อชั่วโมง มีค่าเท่ากับ 180.3, 191.9 และ 197.7 วัตต์ ตามลำดับ ส่วนค่าการถ่ายเทความร้อนของชุดทดสอบสเปรย์น้ำ ที่อัตราการไหล 50, 75 และ 100 ลิตรต่อชั่วโมง มีค่าเท่ากับ 232.6, 261.7 และ 302.4 วัตต์ ตามลำดับ โดยค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุด เกิดขึ้นที่อัตราการไหล 100 ลิตรต่อชั่วโมง ของทั้งกรณี

4.2.5 ผลของประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์ของทั้ง 3 แผง แสดงดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับอัตราการระบายความร้อนด้วยน้ำของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 แผง

จากรูปที่ 12 พบว่า ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ระบายความร้อนด้วยวิธีสเปรย์น้ำ และวิธีน้ำหยด จะมีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกัน คือ เมื่ออัตราการ

ไหลของน้ำที่ใช้ในการระบายความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ของแผงที่ 2 ที่อัตราการไหล 50 ลิตรต่อชั่วโมง 70 ลิตรต่อชั่วโมง และ 100 ลิตรต่อชั่วโมง มีค่าเท่ากับร้อยละ 8.99, 9.19 และ 9.41 ตามลำดับ ส่วนประสิทธิภาพของแผงที่ 3 ที่อัตราการไหล 50 ลิตรต่อชั่วโมง 70 ลิตรต่อชั่วโมง และ 100 ลิตรต่อชั่วโมง มีค่าเท่ากับร้อยละ 8.95, 9.12 และ 9.33 ซึ่งวิธีการระบายความร้อนด้วยการสเปรย์น้ำ (แผงที่ 2) จะส่งผลให้ประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าสูงสุดในทุก ๆ อัตราการไหล ซึ่งอัตราการระบายความร้อนของน้ำที่ส่งผลให้ประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าสูงสุด คือ อัตราการไหลที่ 100 ลิตรต่อชั่วโมง โดยมีประสิทธิภาพเฉลี่ย เท่ากับร้อยละ 9.41

5. สรุป

จากการออกแบบ และทดสอบการระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ขนาด 12 โวลต์ 80 วัตต์ ด้วยวิธีการสเปรย์น้ำและน้ำหยดลงบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ของทั้ง 2 กรณี สามารถสรุปผลได้ ดังนี้

5.1 สรุปผลการทดสอบประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์ กรณีที่ 1 พบว่า ประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยเฉลี่ยของแผงที่ 1 แผงที่ 2 และแผงที่ 3 มีค่า เท่ากับร้อยละ 8.10, 8.08 และ 8.11 ตามลำดับ และประสิทธิภาพสูงสุดจากแผงที่ 1 แผงที่ 2 และแผงที่ 3 มีค่าเท่ากับร้อยละ 11.4, 11.09 และ 11.01 ตามลำดับ โดยผลการทดสอบทั้ง 3 แผง มีประสิทธิภาพเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกัน สามารถนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 แผงมาใช้ทดสอบและเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างแผงได้

5.2 สรุปผลการทดสอบประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์ กรณีที่ 2 พบว่า ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ระบายความร้อนด้วยวิธีสเปรย์น้ำ และวิธี

น้ำหยด จะมีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกัน คือ เมื่ออัตราการไหลของน้ำที่ใช้ในการระบายความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วยในทั้ง 2 วิธี ซึ่งวิธีการระบายความร้อนด้วยการสเปรย์น้ำจะสามารถระบายความร้อนได้ดีกว่าการระบายความร้อนด้วยน้ำหยด ในทุก ๆ อัตราการไหล เนื่องจากการระบายความร้อนด้วยวิธีการสเปรย์น้ำนั้นการกระจายตัวของน้ำไปยังหน้าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดีกว่าการระบายความร้อนด้วยน้ำหยด จึงทำให้น้ำที่กระจายตัวอยู่บนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ดูดซับความร้อนและระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดีกว่านั่นเอง ซึ่งอัตราการระบายความร้อนของน้ำที่ส่งผลให้ประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าสูงสุด คือ อัตราการไหลที่ 100 ลิตรต่อชั่วโมง โดยมีประสิทธิภาพเฉลี่ย เท่ากับร้อยละ 9.41

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ และสถานที่ในการทำวิจัยในครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] T. Kiatsiroat. (2016, April 14). National Science and Technology Development Agency (NSTDA). [Online]. Available: <http://www.clinictech.most.go.th/online/techlist/attachFile/20172251157371.pdf>
- [2] N. Phuengkum, "Increasing Performance of Solar Cell Panels by Cooling System," M.S. thesis, Dept. Science in Physics, Prince of Songkla Univ., Songkla, 2008.
- [3] P. Bhulla, C. Lertsatittanakorn and N. Suwaphat, "The Improvement of

- Photovoltaic Module Efficiency using Temperature Reduction Techniques,” *SWU Engineering Journal*, vol. 8, pp. 1–10, 2013.
- [4] S. Krauter, “Increased electrical yield via water flow over the front of photovoltaic panels,” *Solar Energy Materials & Solar Cells.*, vol. 82, pp. 131–137, 2004.
- [5] A. Tewata, and Y. Sriudom, “An Experimental Study on Increasing Efficiency of Solar Cell Modules by Flat Heat Pipe Cooling,” *RMUTP Research Journal*, vol. 12, pp. 83–94, 2018.
- [6] Y. Sriudom, S. Rittidech and T. Chompookham, “The Helical Oscillating Heat Pipe: Flow Pattern Behaviour Study,” *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 7, pp. 1–11, Jan. 2015.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

การหาปริมาณปรอทในตัวอย่างครีมหน้าขาวโดยเทคนิคการวิเคราะห์ ปรอทโดยตรงด้วยการสลายตัวด้วยความร้อน

นภาพร บุญรานุรักษ์ และ นภา ตั้งเตรียมจิตมั่น*

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

169 ถนนลงหาดบางแสน ตำบลแสนสุข อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี 20131

รับบทความ 28 มิถุนายน 2563 แก้ไขบทความ 24 ธันวาคม 2563 ตอรับบทความ 17 กุมภาพันธ์ 2564

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอเทคนิคการวิเคราะห์ปรอทโดยตรงด้วยการสลายตัวด้วยความร้อน เทคนิคนี้จัดเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพในการหาปริมาณปรอทในตัวอย่างครีมหน้าขาว โดยที่สามารถชั่งตัวอย่างครีมเข้าเครื่องวิเคราะห์ได้โดยไม่ต้องมีการเตรียมตัวอย่าง เป็นการลดมลพิษจากของเสียที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่าง รวมทั้งประหยัดเวลาและพลังงานที่ใช้ในการย่อยตัวอย่างอีกด้วย กราฟมาตรฐานที่ใช้พล็อตระหว่างค่าการดูดกลืนแสงของปรอทในรูปความสูงพีคและน้ำหนักของสารมาตรฐานปรอทช่วง 0.1-10 นาโนกรัม กราฟที่ได้มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงดังสมการ $y = 2.003 \times 10^{-2}x - 5.14 \times 10^{-4}$ มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) 0.9991 ความเที่ยงของการวิเคราะห์แสดงในเทอม Repeatability มีค่าร้อยละ 14 และ 5.9 rsd (n=3) ที่ 1.2 และ 868 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ค่าร้อยละการได้กลับคืนอยู่ระหว่างร้อยละ 88-110 ค่าขีดจำกัดการตรวจวัด (LOD) เท่ากับ 0.1 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม (3sd/m, n=10) ปริมาณปรอทที่ตรวจพบในตัวอย่างครีมหน้าขาว 12 ตัวอย่างที่จำหน่ายใน จ.ชลบุรี ในช่วงปี พ.ศ. 2562 พบว่ามีสองตัวอย่างที่เกินเกณฑ์มาตรฐานที่อนุญาตให้มีในเครื่องสำอางไปมาก นอกนั้นอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานปลอดภัยต่อผู้ใช้ตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข

คำสำคัญ : ครีมหน้าขาว; ปรอท; อะมัลกัม; เทคนิคการวิเคราะห์ปรอทโดยตรงด้วยการสลายตัวด้วยความร้อน

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +66 3810 3111, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: napa@buu.ac.th

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Determination of Mercury Contents in Facial Whitening Cream Samples by Direct Thermal Decomposition Mercury Analyzer

Napaporn Bunnaranurak and Napa Tangtreamjitmun*

Chemistry Department, Faculty of Science, Burapha University
169 Longhard-Bangsean Road, Saensuk, Mueang, Chonburi 20131

Received 28 June 2020; Revised 24 December 2020; Accepted 17 February 2021

Abstract

Direct thermal decomposition mercury analysis is an efficient technique for determination of mercury in facial whitening creams. The analysis can be performed without any sample preparation. The samples can be weighed and placed directly into the analyzer. Thus, there is no chemical waste produced in sample preparation. The time and energy used in sample digestion are saved as well. The calibration curve between mercury absorbance in terms of peak height and weight of standard mercury in the range of 0.1-10 ng was created. The calibration curve was linear followed the equation $y = 2.003 \times 10^{-2}x - 5.14 \times 10^{-4}$ with coefficient of determination (R^2) 0.9991. The precision in term of repeatability were 14% and 5.9% *rsd* ($n=3$) at 1.2 and 868 $\mu\text{g kg}^{-1}$, respectively. The recoveries were between 88-110%. The detection limit (LOD) was 0.1 $\mu\text{g kg}^{-1}$ (3*sd*/m, $n=10$). The amount of mercury detected in 12 whitening cream samples sold in Chonburi province during the year 2019 were within the safety standard permitted in general cosmetics under the notification of the Ministry of Public, except two samples were over the permitted standard.

Keywords : Facial Whitening Cream; Mercury; Amalgam; Direct Thermal Decomposition Mercury Analysis

* Corresponding Author. Tel.: +66 3810 3111, E-mail Address: napa@buu.ac.th

1. บทนำ

ครีมหน้าขาว หรือครีมหน้าใส จัดเป็นเครื่องสำอางที่เป็นที่นิยมกันมากสำหรับผู้หญิงเพื่อใช้ทาใบหน้าให้ขาวใสตามชื่อครีม โปรทเป็นองค์ประกอบหนึ่งที่ถูกลักลอบใส่ลงในครีมหน้าขาว โดยโปรทจะไปยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ไทโรซิเนส (Tyrosinase) ซึ่งเป็นตัวสร้างเม็ดสีเมลานิน (Melanin) เมื่อร่างกายมีการสร้างเม็ดสีลดลงจึงทำให้สีผิวขาวขึ้น โปรทจัดเป็นสารที่เป็นพิษต่อร่างกายมนุษย์ โปรทในครีมทาหน้าเป็นหนึ่งในสาเหตุสำคัญที่ทำให้มนุษย์ได้รับพิษจากโปรทที่เข้าสู่ร่างกายทางผิวหนัง โดยมีงานวิจัยตรวจพบปริมาณโปรท ในปัสสาวะในสตรีที่ใช้ครีมทาหน้าขาว [1]-[4] ในประเทศไทยกระทรวงสาธารณสุขได้กำหนดให้โปรทเป็นสารห้ามใช้ ลำดับที่ 221 ตามประกาศวัตถุที่ห้ามใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตเครื่องสำอาง ในราชกิจจานุเบกษา เล่ม 133 ตอนพิเศษ 114 ง ลงวันที่ 17 พฤษภาคม 2559 โดยกำหนดชื่อสารห้ามใช้ คือ “โปรท (CAS No. 7439-97-6) และสารประกอบของโปรท” โดยยกเว้นโปรทที่อนุญาตให้ใส่เป็นวัตถุดิบเสียในเครื่องสำอางบริเวณรอบดวงตา ตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข แห่งพระราชบัญญัติเครื่องสำอาง พ.ศ. 2558 เรื่อง กำหนดวัตถุกันเสียที่อาจใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตเครื่องสำอาง พ.ศ. 2560 ลำดับที่ 14 ไทเมอโรซอล และลำดับที่ 15 เฟนิล เมอคิวริก อะซีเตท หรือเฟนิล เมอคิวริก เบนโซเอต ในปริมาณไม่เกินร้อยละ 0.007 (70 ส่วนในล้านส่วน หรือ 70 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ในรูปโปรท ดังนั้นในเครื่องสำอางชนิดอื่นที่ไม่มีการยกเว้น จึงมีเงื่อนไขว่า ให้มีการปนเปื้อนในผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปได้ไม่เกิน 1 ส่วนในล้านส่วนโดยน้ำหนัก (1 ส่วนในล้านส่วน หรือ 1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ดังนั้นการตรวจวิเคราะห์ปริมาณโปรทในครีมหน้าขาวจึงมีความสำคัญ

วิธีวิเคราะห์โปรทที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน มีตั้งแต่การใช้ชุดทดสอบสารประกอบโปรทแอมโมเนียของ

กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ ซึ่งปริมาณต่ำสุดของโปรทที่ตรวจพบได้ คือร้อยละ 0.15 น้ำหนักต่อน้ำหนัก หรือ 1500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม [5] หรือชุดตรวจสอบสารโปรทจากผลิตภัณฑ์ฟอกผิวขาวของภาควิชาเคมี มหาวิทยาลัยมหิดล ที่ตรวจสอบสารประกอบโปรทได้ทุกชนิด ทั้งโปรทแอมโมเนีย โปรทคลอไรด์ และโปรทอะซีเตท เป็นต้น โดยช่วงปริมาณที่ตรวจสอบได้อยู่ระหว่าง 25-1000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม [6] จะเห็นว่าการใช้ชุดทดสอบนี้ไม่สามารถตรวจโปรทที่มีปริมาณระหว่าง 1-25 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งเป็นปริมาณที่เกินเกณฑ์ที่กำหนดให้มีในเครื่องสำอางได้ แต่ถือว่าการตรวจสอบเบื้องต้นด้วยการใช้ระยะเวลาอันสั้น การวิเคราะห์โปรทในระดับน้อยจึงต้องใช้เทคนิคขั้นสูงทางเครื่องมือวิทยาศาสตร์ โดยเทคนิคที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันสำหรับวิเคราะห์โปรทในครีมหน้าขาว ได้แก่ เทคนิคโคลด์เวเปอร์อะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรเมตรี [7]-[9] อินดักทีฟพลาสมา แมสสเปกโทรเมตรี [10], [11] โดยเทคนิคทั้งสองนี้จะต้องมีการย่อยตัวอย่างครีม หรือใช้สารเคมีในการรีดิวซ์ให้โปรทกลายเป็นไอที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งเป็นการเพิ่มมลพิษที่มาจากของเสียจากการวิเคราะห์ และเสียเวลาและพลังงานในการวิเคราะห์งานวิจัยนี้จึงนำเสนอเทคนิคการวิเคราะห์โปรทโดยตรงด้วยการสลายตัวด้วยความร้อน ซึ่งไม่มีขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง เพียงแต่นำน้ำหนักตัวอย่างโปรทและนำไปวิเคราะห์ โปรทจะถูกเผาไหม้ที่ 700 องศาเซลเซียส ไอออนโปรทจะถูกรีดิวซ์ด้วยสารอะตอมลิสต์กลายเป็นไอของโปรท และถูกจับด้วยทองเกิดเป็นสารอะมัลกัม แล้วจึงให้ความร้อนให้โปรทหลุดออกมากลายเป็นอะตอมอิสระของโปรท ผ่านไปยังเซลล์สำหรับตรวจวัดการดูดกลืนแสงของอะตอมโปรท ที่ความยาวคลื่น 253.7 นาโนเมตร ของเสียที่เกิดขึ้นหลังการตรวจวัดจะมีแคไอโปรทซึ่งจะถูกดูดซับเอาไว้ด้วยตัวดูดซับ เพื่อนำไปกำจัดต่อไป จึงจัดเป็นเทคนิคที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ผู้วิเคราะห์ไม่จำเป็นต้องใช้ความชำนาญใน

การฝึกใช้เครื่องมือ เมื่อเทียบกับเครื่องโคลด์เวเปอร์ อะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรมิเตอร์ และเครื่อง อินดักทีฟฟลักซ์เพิลพลาสมา แมสสเปกโทรมิเตอร์ เทคนิคการวิเคราะห์ปรอทโดยตรงด้วยการสลายตัวด้วยความร้อนได้ถูกนำมาใช้ในการตรวจวัดปรอทในตัวอย่างหลายชนิด ได้แก่ ในเส้นผมและขนสัตว์ [12] ในดิน [13] ในอาหารเม็ดของแมวและสุนัข [14] ในปลา [15] งานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะนำมาตรวจวัดปรอทในครีมน้ำหน้า

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

เครื่องวิเคราะห์ปรอท Direct Thermal Decomposition Mercury Analyzer (Mercury Analyzer 3000; MA-3000 บริษัท Nippon Instruments Corporation; NIC ประเทศญี่ปุ่น) เครื่อง

ชั่งตวงวัด 5 ตำแหน่ง (Analytical Balance รุ่น MS105DU บริษัท Mettler Toledo ประเทศ สวิตเซอร์แลนด์) ไมโครปิเปต ขนาด 0.5-10 และ 10-100 ไมโครลิตร (รุ่น Research® Plus บริษัท Eppendorf ประเทศเยอรมนี) สารละลายมาตรฐาน ปรอท 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร (HgCl_2 ในกรดไนตริก 0.1 โมลต่อลิตร) กรดไนตริก 16 โมลต่อลิตร (Nitric acid: HNO_3) เกรดบริสุทธิ์สูง ของบริษัท Kanto ประเทศญี่ปุ่น และ แอล - ซิส เต อีน (L-Cysteine : $\text{HSCH}_2\text{CH}(\text{NH}_2)\text{COOH}$, 121.16 กรัมต่อโมล) ของ บริษัท Nacalai ประเทศญี่ปุ่น

2.2 ตัวอย่าง

ตัวอย่างครีมหน้าขาว จำนวน 12 ตัวอย่าง ซื้อจากร้านค้าใน จ.ชลบุรี ในระหว่างเดือน ตุลาคม พ.ศ. 2561-เดือนมกราคม พ.ศ. 2562 มีรายละเอียด ดังใน ตารางที่ 1

ตารางที่ 1 รายละเอียดข้อมูลตัวอย่างครีมหน้าขาว

ตัวอย่าง ที่	ข้อบ่งใช้ในการรักษาที่ติดบนฉลาก	ราคา (บาท/กรัม)	แหล่งผลิตที่ ระบุบนฉลาก	แหล่งจำหน่าย	สถานะเลขที่ จดแจ้ง*
L1	ผิวขาวกระจ่างใส ลดเลือนจุดต่างดำ	7	มี	ห้างสรรพสินค้า	คงอยู่
L2	ผิวขาวกระจ่างใส	3	มี	ร้านขายส่ง	คงอยู่
L3	ผิวขาวกระจ่างใส ผิวชุ่มชื้น ลดเลือนริ้วรอย	6	มี	ร้านสะดวกซื้อ 7-11	คงอยู่
L4	ผิวขาวกระจ่างใส	3	ไม่มี	ร้านขายส่ง	คงอยู่
L5	ผิวขาวกระจ่างใส ผิวชุ่มชื้น	1	มี	ห้างสรรพสินค้า	คงอยู่
L6	ผิวขาวกระจ่างใส ผิวชุ่มชื้น ฆ่าเชื้อสิว รักษาสิว อักเสบ	8	ไม่มี	ร้านขายส่ง	ยกเลิก
L7	ปรับผิวขาว ผิวชุ่มชื้น	0.3	มี	ตลาดนัด	คงอยู่
L8	ปรับสีผิวใต้วงแขน ผิวเรียบเนียน ลดกลิ่นกาย	9	มี	ร้านขายส่ง	คงอยู่
M9	ผิวขาวกระจ่างใส ลดฝ้า-กระ จุดต่างดำ	5	มี	ร้านสะดวกซื้อ 7-11	คงอยู่
M10	ปรับสีผิวใต้วงแขน ลดกลิ่นกาย เห็นผลภายใน 3-7 วัน	8	ไม่มี	ร้านขายส่ง	ไม่มี
H11	ลดสิว ฝ้า จุดต่างดำ	7	ไม่มี	ตลาดนัด	ไม่มี
H12	ผิวขาวกระจ่างใส ผิวเนียนนุ่ม ลดริ้วรอย ลดสิว ฝ้า จุดต่างดำ	30	มี	ร้านขายส่ง	คงอยู่

*http://164.115.28.102/FDA_SEARCH_CENTER/PRODUCT/FRM_SEARCH_CMT.aspx (สืบค้นเมื่อ เดือนมกราคม พ.ศ. 2562)

2.3 การวิเคราะห์ปรอท

เครื่อง MA-3000 นี้ มีเครื่องจัดการตัวอย่างส่งตรวจอัตโนมัติ (Autosampler) โดยตัวอย่างจะถูกซ่งใส่ภาชนะสำหรับใส่ตัวอย่างทำด้วยเซรามิก ทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า กว้าง × ยาว × ลึก 0.5 × 3.1 × 0.8 เซนติเมตร มีลักษณะคล้ายเรือ (โบท) วางอยู่บนภาตถาหนึ่งจะบรรจุได้ 10 โบท และเครื่องจัดการตัวอย่างส่งตรวจอัตโนมัติ ใส่ได้มากที่สุด 10 ภาตถา จึงสามารถใส่ตัวอย่างเพื่อรอการตรวจวัดได้ทีเดียว 100 ตัวอย่าง ก่อนการตรวจวัดทุกครั้ง ต้องทำความสะอาดโบท โดยตั้งโปรแกรม Purge ในเครื่อง MA-3000 ให้อยู่ที่ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 นาทีต่อโบท โดยให้สัญญาณของโบทเปล่า ที่ได้ต้องเข้าใกล้ศูนย์มากที่สุด กรณีนี้ให้มีความสูงพีคน้อยกว่า 0.0002 เนื่องจากทำการวิเคราะห์ในช่วง 10 นาโนกรัม

2.3.1 การตรวจสอบเบื้องต้น โดยการสกรีนนิ่ง (Screening)

เป็นการตรวจวัดหาปริมาณปรอท โดยใช้ปลายไม้แหลม เช่น ไม้จิ้มฟัน จิ้มคริมตัวอย่าง แล้วนำไปแตะเบาๆ ที่ภายในโบท ซึ่งจะมองไม่เห็นด้วยตาเปล่าว่ามีคริมติดอยู่ที่โบท เพราะมีปริมาณน้อยมาก แล้วจึงนำโบทเข้าเครื่องจัดการตัวอย่างส่งตรวจอัตโนมัติ เพื่อตรวจวัดปริมาณปรอท โดยตั้งโปรแกรมอุณหภูมิในเครื่อง MA-3000 สำหรับวิเคราะห์ตัวอย่าง ดังตารางที่ 2

2.3.2 การสร้างกราฟมาตรฐานปรอท

เตรียมสารละลายมาตรฐานปรอท 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร จากสารละลายมาตรฐานปรอท 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับปริมาตรด้วยสารละลาย L-Cysteine 100 มิลลิกรัมต่อลิตร (เตรียมในกรดไนตริกร้อยละ 0.2) ปีเปตสารละลายมาตรฐานปรอท 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตรนี้ลงในโบทที่ปริมาตร 1, 3, 8, 25, 50 และ 100 ไมโครลิตร เพื่อให้ได้ปรอทหนัก 0.1, 0.3, 0.8, 2.5, 5 และ 10 นาโนกรัม ตามลำดับ และนำไปเข้าเครื่องจัดการ

ตัวอย่างส่งตรวจอัตโนมัติ ของเครื่อง MA-3000 เพื่อวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของปรอทในหน่วยความสูงพีค (Peak Height) โดยตั้งโปรแกรมอุณหภูมิในเครื่อง MA-3000 สำหรับวิเคราะห์สารมาตรฐาน ดังตารางที่ 2

2.3.3 การวิเคราะห์ตัวอย่าง

ซ่งตัวอย่างคริมให้รู้น้ำหนักแน่นอนถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 5 ลงในโบทที่ทำความสะอาดแล้ว นำเข้าเครื่องจัดการตัวอย่างส่งตรวจอัตโนมัติ ของเครื่อง MA-3000 เพื่อวิเคราะห์ปริมาณปรอท โดยใช้โปรแกรมอุณหภูมิในเครื่อง MA-3000 สำหรับวิเคราะห์ตัวอย่าง ดังตารางที่ 2 สภาวะเดียวกับที่ใช้ในการตรวจสอบปริมาณปรอทเบื้องต้นในข้อ 2.3.1

ตารางที่ 2 สภาวะของเครื่อง MA-3000 ที่ใช้ในการวิเคราะห์สาร

สภาวะที่ใช้วิเคราะห์สารตัวอย่าง	
Air flow	0.4 L min ⁻¹
1 st Decomposition	200°C 60 s
2 nd Decomposition	350°C 150 s
3 rd Decomposition	850°C 180 s
สภาวะที่ใช้วิเคราะห์สารมาตรฐาน	
Air flow	0.4 L min ⁻¹
Drying	150°C 60 s
2 nd Decomposition	800°C 120 s

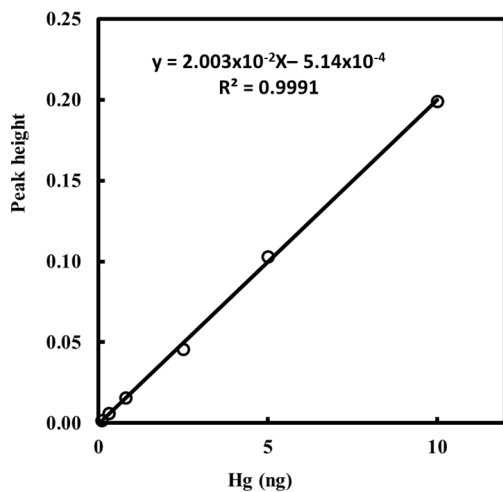
3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 ประสิทธิภาพของวิธีวิเคราะห์

กราฟมาตรฐานของปรอท ที่ตรวจวัดด้วยเครื่อง MA-3000 จะได้ค่าการดูดกลืนแสงในรูปความสูงพีค ซึ่งแปรผันตรงกับ น้ำหนักของปรอท ในหน่วยนาโนกรัม เนื่องจากพีคการดูดกลืนแสงที่ได้เป็นของปรอททั้งหมดที่ใส่ลงไปโบท จึงมีความสะดวกในการคำนวณออกมาในหน่วยน้ำหนักมากกว่าความเข้มข้น เพราะเมื่อนำไปคำนวณปริมาณปรอทในตัวอย่าง จะต้องคำนวณจาก

น้ำหนักตัวอย่างที่ซั่งลงไปในโบทเพื่อตรวจวัด จึงจะได้ปริมาณปรอทในตัวอย่างออกมาเป็นหน่วยความเข้มข้นของปรอทต่อน้ำหนักตัวอย่าง ซึ่งน้ำหนักตัวอย่างที่ใช้ขึ้นอยู่กับปริมาณปรอท ถ้าสารตัวอย่างมีปริมาณปรอทมากก็สามารถซั่งตัวอย่างน้ำหนักน้อยเพียง 1 มิลลิกรัมหรือในทางตรงกันข้ามถ้าสารตัวอย่างมีปรอทมากก็สามารถซั่งสารตัวอย่างได้มากที่สุดถึง 1500 มิลลิกรัม (ขึ้นกับความหนาแน่นของตัวอย่างแต่ละชนิด)

กราฟมาตรฐานทุกจุดเตรียมจากสารละลายมาตรฐานตัวเดียวกัน คือสารละลายมาตรฐานปรอท 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร และใช้ไมโครปิเปตดูดสารมาตรฐานความเข้มข้นเดียวกันที่ปริมาตรต่าง ๆ กัน จึงไม่ต้องเตรียมสารมาตรฐานหลายความเข้มข้น ทำให้ลดความคลาดเคลื่อนจากการเตรียมผนวกกับทักษะการใช้ไมโครปิเปต ทำให้กราฟมาตรฐานที่ได้มีจุดทุกจุดอยู่บนเส้นตรง โดยเป็นการวัดจุดละ 1 ครั้งเท่านั้นดังในรูปที่ 1



รูปที่ 1 กราฟมาตรฐานปรอท (n=1)

กราฟมาตรฐานในรูปที่ 1 นี้ จึงแสดงถึงข้อมูลที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นสูงมากซึ่งสอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ที่เข้าใกล้ 1 มาก นอกจากนี้ผลของการเติม L-Cysteine ในสารละลายมาตรฐานปรอทที่เตรียมขึ้น ทำให้ปรอทเกิดสารเชิงซ้อนกับ L-Cysteine [16] ช่วยให้สารละลายมาตรฐานปรอท

มีความเสถียร ความเข้มข้นไม่เปลี่ยนแปลง สามารถเก็บไว้ใช้ได้นาน 4-6 เดือน เมื่อเก็บในที่เย็น

ค่าขีดจำกัดการตรวจวัดทำโดยวิเคราะห์สารละลายแบบลงค์ (สารละลาย L-Cysteine 100 มิลลิกรัมต่อลิตร) จำนวน 10 โบท และนำค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณที่ได้ ไปคำนวณหาความเข้มข้นดังสมการที่ (1) [17]

$$LOD = \frac{3sd}{m} \quad (1)$$

โดยที่

LOD = ค่าขีดจำกัดการตรวจวัด

sd = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณ

m = ความชันของสมการกราฟมาตรฐาน

ปรากฏว่าได้ค่า LOD เท่ากับ 0.010 นาโนกรัม ซึ่งเมื่อคำนวณต่อน้ำหนักตัวอย่าง 100 มิลลิกรัม จะได้ค่า LOD เท่ากับ 0.1 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานปริมาณปรอท 1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข เทคนิคนี้จึงสามารถตรวจวัดปริมาณปรอทในครีมหน้าขาวได้อย่างน่าเชื่อถือ

ค่าความเที่ยงของวิธีในทอม Repeatability ทำโดยซั่งตัวอย่าง L1 ปริมาณ 100 มิลลิกรัม และตัวอย่าง M10 ปริมาณ 5 มิลลิกรัม ซั่งตัวอย่างละ 3 ชุด นำไปตรวจวัดด้วยเครื่อง MA-3000 ได้ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (%rsd) เท่ากับร้อยละ 14 ที่ 1.2 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม และร้อยละ 5.9 ที่ 868 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม จะเห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ที่ได้ต่ำกว่าค่าที่ยอมรับได้ตามเกณฑ์ AOAC [18]

ค่าร้อยละการได้กลับคืน (%R) ทำโดยใช้ตัวอย่างที่มีปริมาณปรอทน้อยมากกับปานกลางมาเติมปรอทเข้มข้น 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตรปริมาตรตามที่ต้องการลงไปเพื่อให้ได้น้ำหนักปรอทตามที่ต้องการดังรายละเอียดในตารางที่ 3 และนำไปตรวจวัดด้วยเครื่อง MA-3000 นำข้อมูลที่ได้มาคำนวณค่าร้อยละการได้

กลับคืนดังสมการที่ (2)

$$\%R = \frac{C_3 - C_2}{C_1} \times 100 \quad (2)$$

โดยที่

C_1 = ความเข้มข้นของปรอทที่เติมลงไปในตัวอย่าง

C_2 = ความเข้มข้นของปรอทที่มีอยู่ก่อนในตัวอย่าง

C_3 = ความเข้มข้นของปรอททั้งหมดที่ตรวจพบในตัวอย่าง

ค่าร้อยละการได้กลับคืนที่ได้แสดงดังในตารางที่

3 ซึ่งพบว่าค่าที่ได้เป็นไปตามเกณฑ์ AOAC [18]

ตารางที่ 3 ร้อยละการได้กลับคืนของปรอทที่เติมในตัวอย่างครีม

ตัวอย่างที่	ปรอท (ng) (n=3)		%R
	ที่เติม	ที่พบ	
L1	0	0.12	-
	1	1.22	110
L2	0	0.18	-
	1	1.22	104
L3	0	0.16	-
	1	1.24	108
M9	0	4.60	-
	5	9.10	90
M10	0	4.34	-
	5	8.74	88

3.2. ปริมาณปรอทในตัวอย่างครีมหน้าขาว

เนื่องจากมีตัวอย่างครีมหน้าขาวที่อาจมีปริมาณปรอทสูงถึงระดับร้อยละ เช่น ถ้าตัวอย่างครีมมีปรอทร้อยละ 1 หรือ 10000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เมื่อชั่งตัวอย่างมาเพียง 1 มิลลิกรัม จะมีปรอทถึง 10 ไมโครกรัม ซึ่งจะทำให้หลังการตรวจวัดตัวอย่างนี้ ปรอทจะตกค้างอยู่ในเครื่องมาก ต้องมีการทำความสะอาดไล่ปรอทออกมาจากเครื่อง ด้วยการเปิดเครื่อง ไล่โบ๊ทเปล่านั้น

โปรแกรม Purge อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส 4 นาที เพื่อไล่ปรอทที่ตกค้างในเครื่องออก โดยดูจากสัญญาณของโบ๊ทเปล่านั้น ต้องเข้าใกล้ศูนย์มากที่สุด (<0.0002) เท่ากับที่เคยตรวจวัดได้ก่อนวัดตัวอย่างนี้ ซึ่งเท่ากับเป็นการทำความสะอาดโบ๊ทก่อนใช้ไปด้วย แต่จะเสียเวลาในการทำความสะอาดค่อนข้างนาน การตรวจสอบเบื้องต้นโดยการ Screening ด้วยเครื่อง MA-3000 จึงถูกใช้เพื่อเป็นการป้องกันการปนเปื้อนของปรอทปริมาณมากในเครื่อง การ Screening ตัวอย่างครีมหน้าขาวทั้งหมด 12 ตัวอย่าง ได้ผลดังในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการ Screening ปรอทในตัวอย่าง

ตัวอย่าง	ความสูงพีค
L1	0.00039
L2	0.00044
L3	0.00031
L4	0.00056
L5	0.00047
L6	0.00068
L7	0.00128
L8	0.00041
M9	0.0035
M10	0.0020
H11	1.0621
H12	1.1707

จะพบว่าตัวอย่าง H11 และ H12 มีค่าความสูงพีคเกิน 1 ซึ่งจัดว่าสูงมาก ดังนั้นตัวอย่าง 2 ตัวนี้มีปรอทเกินเกณฑ์มาตรฐานที่กระทรวงสาธารณสุขอนุญาตให้ปนเปื้อนได้ในเครื่องสำอางแน่นอน และตัวอย่างที่มีปรอทสูงแบบนี้จะไม่สามารถตรวจวัดโดยตรงได้ด้วยเครื่อง MA-3000 ต้องมีการเจือจางความเข้มข้นของปรอทในตัวอย่างก่อนการตรวจวัด ส่วนตัวอย่าง L1-L8 และ M9-M10 มีค่าความสูงพีค ใกล้เคียงค่าของโบ๊ทเปล่านั้น จึงนำไปซึ่งให้น้ำหนักแน่นอนและตรวจวัด

การตรวจวัดปรอทในครีมตัวอย่าง เมื่อชั่งครีมตัวอย่าง L1-L8 และ M9-M10 มาตัวอย่างละ 20 มิลลิกรัม นำไปตรวจวัดด้วยเครื่อง MA-3000 ปรากฏว่า L1-L8 ได้ความสูงพีคอยู่ระหว่าง 0.0010-0.0020 จึงได้ชั่งน้ำหนัก L1-L8 เพิ่มขึ้น 5 เท่า เป็น 100 มิลลิกรัม นำไปตรวจวัดได้สัญญาณ ได้ความสูงพีคอยู่ระหว่าง 0.0010-0.0030 ซึ่งไม่ต่างจากสัญญาณที่ได้จากการชั่ง 20 มิลลิกรัมมากนัก น่าจะเป็นปรอทที่ปนเปื้อนมาในวัตถุดิบหรือกระบวนการผลิต มากกว่าที่จะเป็นปรอทที่ผู้ผลิตตั้งใจใส่ลงไป ในครีมตัวอย่าง ความเข้มข้นของปรอทที่คำนวณจากความสูงพีคที่ได้จากตัวอย่างครีม 100 มิลลิกรัม จะอยู่ระหว่าง 1.2-2.0 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ดังในตารางที่ 5 ส่วนตัวอย่าง M9-M10 ได้ความสูงพีคสูงมากจนเกินกราฟมาตรฐาน จึงนำมาชั่งน้ำหนักลดลงเหลือ 5 มิลลิกรัม ได้ค่าปรอทประมาณ 0.9 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานปริมาณปรอทที่อนุญาตให้ปนเปื้อนในผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปได้ไม่เกิน 1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ปรอทในตัวอย่าง

ตัวอย่าง	ความสูงพีค		Hg ($\mu\text{g kg}^{-1}$)
	20 mg (n=1)	100 mg (n=3)	
L1	0.00129	0.00187	1.2 ± 0.2
L2	0.00175	0.00317	1.8 ± 0.1
L3	0.00116	0.00262	1.6 ± 0.2
L4	0.00168	0.00184	1.2 ± 0.2
L5	0.00130	0.00355	2.0 ± 0.3
L6	0.00138	0.00210	1.3 ± 0.2
L7	0.00108	0.00238	1.4 ± 0.2
L8	0.00126	0.00313	1.8 ± 0.2
M9	0.37749	0.09148*	920 ± 51
M10	0.33672	0.08628*	868 ± 51

*น้ำหนัก 5 มิลลิกรัม

การตรวจวัดปรอทในครีมตัวอย่างที่มีปรอทปริมาณสูงมาก ซึ่งตามตารางที่ 5 คือ ตัวอย่าง H11 และ H12 โดยปกติหากสามารถตรวจสอบด้วยชุดทดสอบปรอทได้ว่ามีปรอทปนเปื้อนแสดงว่ามีปรอทสูงมาก ระดับเปอร์เซ็นต์ จะไม่จำเป็นต้องนำมาตรวจวัด หากต้องการตรวจวัดทำโดยนำตัวอย่างมาเตรียมเป็นสารละลายด้วยเอทานอล และเจือจางก่อนการตรวจวัด ในกรณีนี้ได้เลือกทำตัวอย่างเดียวโดยชั่งตัวอย่าง H12 มา 5 มิลลิกรัม ละลายในเอทานอลเป็น 25 มิลลิลิตร และปิเปตสารละลายนี้ 10 ไมโครลิตร ปรับปริมาตรเป็น 10 มิลลิลิตร ด้วยสารละลาย L-Cysteine ในกรดไนตริก และปิเปตไป 200 ไมโครลิตร นำไปตรวจวัดด้วยเครื่อง MA-3000 ได้ผลดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์ปรอทตัวอย่าง H12 ด้วย

การเจือจางก่อนตรวจวัด		
ข้อมูล	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
ปริมาตรที่ตรวจวัด (μL)	200	200
ความสูงพีค	0.00463	0.00378
ปรอทจากกราฟ (ng)	0.213	0.170
ปรอทในตัวอย่าง (mg kg^{-1})	5325	4250

ปริมาณปรอทที่ตรวจพบในตัวอย่าง H12 นี้มีค่า 4250-5325 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม หรือร้อยละ 0.4-0.5 ซึ่งเกินเกณฑ์มาตรฐานไปมาก แสดงว่ามีการเติมสารปรอทลงไป ในผลิตภัณฑ์โดยตั้งใจจากผู้ผลิต เมื่อดูข้อมูลของครีมตัวอย่าง H12 จากตารางที่ 1 จะพบว่า เป็นครีมที่มีราคาต่อกรัมสูงที่สุด รวมทั้งมีเลขที่จดแจ้ง ที่ยังคงสถานะมีอยู่ในเว็บไซต์การตรวจสอบของ คณะกรรมการอาหารและยา กระทรวงสาธารณสุข จึงอาจเป็นไปได้ว่า ตัวอย่างนี้เป็นของปลอมจึงได้มีการเติมปรอทลงไป ปริมาณมากขนาดนี้

4. สรุป

เทคนิคการวิเคราะห์ปรอทโดยตรงด้วยการสลายตัวด้วยความร้อน สามารถตรวจวัดได้รวดเร็ว มี

ของเสียแคปซูลของปรอทซึ่งจะถูกดูดซับเพื่อเก็บไปกำจัด เป็นของเสียอันตราย แต่เทคนิคนี้จะไม่เหมาะสมสำหรับ ตรวจวัดปรอทปริมาณมากระดับเปอร์เซ็นต์ ที่น่าจะใช้ ชุดทดสอบเพื่อตรวจสอบเบื้องต้น หรือถ้าต้องการลด ของเสียจากการตรวจวัดจากการใช้ชุดทดสอบ อาจใช้ เทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ ที่เรียกว่าเครื่องเอกซเรย์ ฟลูออเรสเซนส์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์แบบพกพา ซึ่ง สามารถตรวจวัดปรอทในครีมหน้าขาวได้ตั้งแต่ 200 มิลลิกรัมเมอคิวรคลอไรด์ต่อกิโลกรัมตัวอย่างขึ้นไป [19] จัดเป็นเทคนิคที่ไม่ต้องเตรียมตัวอย่างเช่นกัน มาทดสอบ เบื้องต้นก่อน จากนั้นจึงนำตัวอย่างที่ตรวจไม่พบ มา ตรวจวัดด้วยเทคนิคการสลายตัวด้วยความร้อน ข้อจำกัด ของเทคนิคการวิเคราะห์ปรอทโดยตรงด้วยการสลายตัว ด้วยความร้อนนี้อาจอยู่ที่การที่ต้องใช้เวลานานในการ ทำความสะอาดโบบ์ ซึ่งถ้ามีจำนวนโบบ์มากพออาจช่วย ได้โดยการนำโบบ์ไปทำความสะอาดในเตาเผาอุณหภูมิ สูงที่ตั้งอยู่ในตู้ดูดควันเพื่อกำจัดไอปรอท นอกจากนี้ผู้ วิเคราะห์ต้องมีความชำนาญในการใช้อุปกรณ์พื้นฐาน อย่างเครื่องชั่งทศนิยม 5 ตำแหน่ง และไม่โครปิเปตที่ คุณภาพดีสามารถดูดสารที่ปริมาตรต่ำกว่า 10 ไมโครลิตรได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณบริษัท โคแอ็กซ์ กรุ๊ป คอร์ปอเรชั่น จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือ วิเคราะห์ปรอท MA-3000 ของบริษัท Nippon Instruments Corporation; NIC ประเทศญี่ปุ่น

6. เอกสารอ้างอิง

[1] R. D. Barr, B. A. Woodger and P. H. Rees, "Levels of mercury in urine correlated with the use of skin lightening creams," *The American Journal of Clinical Pathology*, vol. 59, pp. 36-40, Feb. 1973.

[2] C. C. Sun, "Allergic contact dermatitis of the face from contact with nickel and ammoniated mercury in spectacle frames and skin-lightening creams," *Contact Dermatitis*, vol. 17, pp. 306-309, Jul. 1987.

[3] M. M. Weldon, M. S. Smolinski, A. Maroufi and B. W. Hasty, "Mercury poisoning associated with a Mexican beauty cream," *The Western Journal of Medicine*, vol. 173, no. 1, pp. 15-18, Jul. 2000.

[4] T. Y. Chan, "Inorganic mercury poisoning associated with skin-lightening cosmetic products," *Clinical Toxicology*, vol. 49, no. 10, pp. 886-891, Sep. 2011.

[5] A. Boonprachom, N. Yukittichai, N. Ekkabut, N. Pongnimitprasert and N. Nuntharatanapong, "Investigation of ammoniated mercury and hydroquinone in whitening creams distributed in amphur muangnakhon pathom province," *Thai Bulletin of Pharmaceutical Sciences*, vol. 8, no. 1, pp. 1-8, Jan. 2013.

[6] P. Kongseeree. (2015, Mar 27). Mercury Test Kit-Cosmetics, Department of Chemistry Faculty of Science Mahidol University. [Online]. Available: https://old.mahidol.ac.th/th/latest_news58/DMSc-Award.html

[7] S. S. Agrawal and M. Mazhar, "Adulteration of mercury in skin whitening creams – A nephrotoxic agent," *Current Medicine Research and Practice*, vol. 5, pp. 172-175, Aug. 2015.

[8] Y. B. Ho, N. H. Abdullah, H. Hamsan and E. S. S. Tan, "Mercury contamination in facial

- skin lightening creams and its health risks to user,” *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, vol. 88, pp. 72-76, May 2017.
- [9] C. P. Peregrino, M. V. Moreno, S. V. Miranda, A. D. Rubio and L. O. Leal, “Mercury Levels in Locally Manufactured Mexican Skin-Lightening Creams,” *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 8, no. 6, pp. 2516-2523, Jun. 2011.
- [10] S. S. Agrawal and P. Sharma, “Current status of mercury level in skin whitening creams,” *Current Medicine Research and Practice*, vol. 7, no. 2, pp. 47-50, Apr. 2017.
- [11] S. Y. Ng, F. Dewi, J. Wang, L. P. Sim, R. Y. C. Shin, and T. K. Lee, “Development of a cosmetic cream certified reference material: Certification of lead, mercury and arsenic mass fractions in cosmetic cream,” *International Journal of Mass Spectrometry*, vol. 389, pp. 59-65, Oct. 2015.
- [12] J. V. Cizdziel and S. Gerstenberger, “Determination of total mercury in human hair and animal fur by combustion atomic absorption spectrometry,” *Talanta*, vol. 64, pp. 918-921, Jun. 2004.
- [13] D. Saniewsk and M. Beldowska, “Mercury fractionation in soil and sediment samples using thermo-desorption method,” *Talanta*, vol. 168, pp. 152-161, Mar. 2017.
- [14] A. Luippold and M. S. Gustin, “Mercury concentrations in wet and dry cat and dog food,” *Animal Feed Science and Technology*, vol. 222, pp. 190-193, Oct. 2016.
- [15] L. Makedonski, K. Peycheva and M. Stancheva, “Determination of heavy metals in selected black sea fish species,” *Food Control*, vol. 72, pp. 313-318, Aug. 2017.
- [16] F. Jalilehvand, B. O. Leung, M. Izadifard and E. Damian, “Mercury(II) Cysteine Complexes in Alkaline Aqueous Solution,” *Inorganic Chemistry*, vol. 45, no. 1, pp. 66-73, Jan. 2006.
- [17] G. D. Long and J. D. Winefordner, “Limit of detection, A closer look at the IUPAC definition,” *Analytical Chemistry*, vol. 55, no. 7, pp. 712A-724A, Jun. 1983.
- [18] AOAC, “Guidelines for standard method performance requirements: Appendix F,” Arlington, VA, 2012, pp. 9.
- [19] C. R. Hamann *et al.*, “Spectrometric analysis of mercury content in 549 skin-lightening products: Is mercury toxicity a hidden global health hazard?,” *Journal of the American Academy of Dermatology*, vol. 70, no. 2, pp. 281-287, Feb. 2014.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

สมบัติทางเคมีกายภาพ ทางกล และทางความร้อนของฟิล์มบริโภาคได้ จากแป้งมันเลือด

น้ำฝน สามสาลี* นิสา ร่มสัมช่า และ สุมาลี มุสิกกา

คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

744 ถนนสุรนารายณ์ อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

รับบทความ 8 กันยายน 2563 แก้ไขบทความ 4 มกราคม 2564 ตอรับบทความ 17 กุมภาพันธ์ 2564

บทคัดย่อ

แป้งจากมันเลือดเป็นวัสดุพอลิเมอร์ชีวภาพที่สามารถนำมาขึ้นรูปเป็นฟิล์มบริโภาคได้ ซึ่งสามารถสัมผัสอาหารได้โดยตรง บริโภาคได้ และย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้เพื่อศึกษาผลของสมบัติทางเคมีกายภาพ ทางกล และทางความร้อนของฟิล์มบริโภาคได้จากแป้งมันเลือด สารละลายฟิล์มถูกเตรียมที่ความเข้มข้นของแป้งมันเลือดร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก ใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ โดยศึกษาที่ปริมาณแตกต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ร้อยละ 30 40 และ 50 โดยน้ำหนักของแป้งมันเลือด การขึ้นรูปฟิล์มโดยวิธีการเทหล่อขึ้นรูปและทำแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง จากผลการทดลองพบว่า ปริมาณกลีเซอรอลที่ระดับแตกต่างกันของฟิล์มบริโภาคได้จากแป้งมันเลือดไม่มีผลต่อความหนา สี ความโปร่งใส และการยึดตัวของฟิล์ม แต่พบว่าปริมาณความชื้น ความสามารถในการละลายน้ำ ความสามารถในการพองตัว และความสามารถในการแพร่ผ่านไอน้ำของฟิล์มมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นและการต้านทานแรงดึงของฟิล์มมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น สมบัติทางความร้อนพบว่าอุณหภูมิการสลายตัวของฟิล์มมี 2 ชั้น ได้แก่ ชั้นแรกที่ 50 ถึง 130 องศาเซลเซียส และชั้นที่สองที่ 263 ถึง 315 องศาเซลเซียส จากการวิเคราะห์ FT-IR พบว่าปริมาณกลีเซอรอลที่ระดับแตกต่างกันมีผลต่อโครงสร้างของฟิล์ม (3278 cm^{-1}) ดังนั้นจากการศึกษาฟิล์มบริโภาคได้จากแป้งมันเลือดสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุสำหรับบรรจุภัณฑ์อาหารเพื่อปกป้องคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารได้

คำสำคัญ : ฟิล์มบริโภาคได้; มันเลือด; สมบัติทางเคมีกายภาพ; สมบัติทางกล; สมบัติทางความร้อน

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +669 3416 3541, ไลน์อีเมลล์: namfon.sm@rmuti.ac.th

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Physicochemical, Mechanical and Thermal Properties of Edible Film from Man Lueat (*Dioscorea alata*) Flour

Namfon Samsalee* Nisa Romsomsa and Sumalee Musika

Faculty of Sciences and Liberal Arts, Rajamangala University of Technology Isan
744 Sura Narai Road, Muang District, Nakhon Ratchasima 30000

Received 8 September 2020; Revised 4 January 2021 ; Accepted 17 February 2021

Abstract

Man Lueat (*Dioscorea alata*) flour is a biopolymer material that can be formed into an edible film. It can be contacted directly with food, consumed and naturally biodegraded. The aims of this research were to study the effect of physicochemical, mechanical and thermal properties of edible film from Man Lueat flour. The film forming solution was prepared by Man Lueat flour at 4% w/w. The glycerol was used as a plasticizer. It was studied at 3 different levels; 30 40 and 50% w/w of Man Lueat flour. The film forming solutions were formed using the solution casting method and dried at 50 °C for 16 h. Results showed that the glycerol content at different levels of the edible film from Man Lueat flour had no effect on the thickness, color, transparency and elongation at break. However, the moisture content, water solubility, swelling property and water vapor permeability of the film tended to increase when increasing the glycerol content. In contrast, the Young's modulus and tensile strength of films tended to decrease significantly, when the glycerol content increased. Thermal properties were found that decomposition temperature of films occurred 2 stage; the first stage occurs between 50 to 130 °C and the second stage occurs between 263 to 315 °C. The analysis of FT-IR showed that the different levels of glycerol affected the structure of the film (3278 cm⁻¹). Therefore, the edible film from Man Lueat flour can be applied as a food packaging material to protect the quality of food products.

Keywords : Edible Film; Man Lueat; Physicochemical Properties; Mechanical Properties; Thermal Properties

* Corresponding Author. Tel.: +669 3416 3541, E-mail Address: namfon.sm@rmuti.ac.th

1. บทนำ

มันเลื้อย (*Dioscorea alata* L.) เป็นมันพื้นบ้าน (Yam) จำพวกพืชหัว จัดเป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตที่สำคัญ พบมากในภูมิภาคเขตร้อน จัดอยู่ในวงศ์ Dioscoreaceae มีหัวอยู่ใต้ดินเป็นก้อนกลม ๆ รูปร่างไม่แน่นอน มีผิวสีน้ำตาล เนื้อในหัวมีสี เช่น มีจุดม่วงกระจายในเนื้อสีขาว (White with Purple Dots) เนื้อสีขาวปนม่วง (Light Purple) หรือเนื้อสีม่วงเข้ม (Dark Purple) มีรากฝอยกระจายทั่วหัว ลำต้นสีเหลี่ยม ไม่มีหนาม ใบเป็นใบเดี่ยวที่โคนเรียงสลับกัน [1], [2] มันเลื้อยนิยมนำมาบริโภคเป็นอาหารได้หลายรูปแบบ เช่น ขนมหวาน และไอศกรีม เป็นต้น นอกจากนั้นสามารถนำไปแปรรูปเป็นแป้งได้ เช่นเดียวกับแป้งจากข้าวสาลี และแป้งจากมันสำปะหลัง จากงานวิจัยของ S. Promdang et al. [2] รายงานว่า *D. alata* มีปริมาณโปรตีนร้อยละ 8.09-11.42 เส้นใยร้อยละ 0.06-0.12 คาร์โบไฮเดรตร้อยละ 67.23-79.06 และปริมาณน้ำตาลร้อยละ 1.2-3.1 S. Jantathai et al. [3] รายงานองค์ประกอบของแป้งมันเลื้อย พบว่า มีปริมาณโปรตีนร้อยละ 3.24 ไขมันร้อยละ 0.56 เถ้าร้อยละ 3.73 เส้นใยร้อยละ 0.10 และคาร์โบไฮเดรตร้อยละ 81.63 F. D. Wireko-Manu et al. [4] ได้รายงานองค์ประกอบของแป้ง *D. alata* (Flour) พบว่ามีปริมาณโปรตีนร้อยละ 5.07-9.05 คาร์โบไฮเดรตร้อยละ 60.42-77.56 ปริมาณน้ำตาลร้อยละ 2.43-6.91 และปริมาณอะไมโลสอยู่ในช่วงร้อยละ 21.69-31.56 จากข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบทางเคมีของมันเลื้อยมีค่าแตกต่างกันทั้งนี้อาจเนื่องมาจากแหล่งที่มา รวมถึงพื้นที่ในการเจริญเติบโตของมันเลื้อยที่ต่างกัน มันเลื้อยเป็นมันพื้นบ้านที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง และมีธาตุอาหารที่มีประโยชน์ เช่น แคลเซียม แมกนีเซียม โพแทสเซียม แอนโทไซยานิน และแคโรทีนอยด์ [2] แป้งจากมันเลื้อยถูกนำไปใช้ร่วมกับแป้งข้าวเหนียวในการทำมันพินซึ่งพบว่าสามารถใช้ทดแทนการใช้แป้งสาลีได้และผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค [3] ในปัจจุบันการใช้ประโยชน์จากมันเลื้อยในอุตสาหกรรม

อาหารพบว่ายังค่อนข้างน้อย ทั้งที่ในประเทศไทยมีการบริโภคมันดังกล่าวมาเป็นเวลานาน

ฟิล์มบรรจุภัณฑ์บริโภคได้สามารถผลิตได้จากวัสดุพอลิเมอร์ เช่น โปรตีน ลิพิด และแป้ง โดยแป้งจัดเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) ที่สามารถนำมาเป็นองค์ประกอบในการขึ้นรูปฟิล์มบริโภคได้ทั้งในรูปของฟลาวัวร์ (Flour) และ สตาร์ช (Starch) ฟิล์มจากแป้งมีสมบัติในการป้องกันการแพร่ผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดี อย่างไรก็ตามแป้งธรรมชาติ (Native) มีความเปราะและไม่สามารถขึ้นรูปได้ การเติมพลาสติกไซเซอร์สามารถช่วยปรับปรุงให้ฟิล์มมีความยืดหยุ่นและสามารถใช้งานได้ [5] พลาสติกไซเซอร์ที่ใช้เติมในฟิล์มบริโภคได้ เช่น กลีเซอรอล (Glycerol) ซอร์บิทอล (Sorbitol) และพอลิเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene Glycol) เป็นต้น ซึ่งพลาสติกไซเซอร์แต่ละชนิดส่งผลต่อสมบัติของฟิล์มบริโภคได้ที่แตกต่างกัน จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าฟิล์มบริโภคได้หลายชนิดที่ใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ [5]-[13] นอกจากนั้นมีการรายงานว่าการเติมกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ที่เหมาะสมในการขึ้นรูปฟิล์มจากแป้ง [10]-[13] โดยพลาสติกไซเซอร์ทำหน้าที่ในการลดแรงระหว่างโมเลกุล (Intermolecular Interactions) ของสายโซ่พอลิเมอร์ การลดแรงระหว่างโมเลกุลเป็นการเพิ่มการเคลื่อนตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ ส่งผลทำให้ปรับปรุงความยืดหยุ่น (Flexibility) ความยืดตัว (Elongation) และความเหนียว (Toughness) ของฟิล์ม [5] นอกจากนั้นฟิล์มจากแป้งสามารถรับประทานคราได้ ย่อยสลายได้ ราคาถูก และหาได้ง่าย โดยแป้งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคสที่มีองค์ประกอบหลัก 2 ส่วน คือ อะไมโลส (Amylose) และอะไมโลเพคติน (Amylopectin) โมเลกุลของอะไมโลสสามารถเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation) ได้ดี ซึ่งเป็นสมบัติที่เหมาะสมในการขึ้นรูปฟิล์มที่มีความแข็งแรง [6], [12] S. Mali et al. [12] ได้รายงานว่าการเติมสตาร์ชแยม (Yam Starch) เป็นพอลิเมอร์ที่สามารถนำมาขึ้นรูปผลิตฟิล์มชีวภาพได้ เนื่องจากมีปริมาณอะไมโลสประมาณ

ร้อยละ 30 ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในการขึ้นรูปฟิล์ม นอกจากนั้นปริมาณอะไมโลสที่สูงขึ้นทำให้ฟิล์มมีความแข็งแรงมากขึ้นด้วย [12] มันแกวเป็นพืชที่มีหัวอยู่ใต้ดิน เช่นเดียวกับมันเลือด โดยมีปริมาณของอะไมโลสอยู่ที่ประมาณร้อยละ 23 และพบว่าแป้งจากมันแกวสามารถขึ้นรูปฟิล์มได้ [11]

จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ามีการศึกษาฟิล์มสตาร์ชแยมจาก *D. trifida* ซึ่งฟิล์มที่ได้มีค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นและความเค้นสูงสุดของฟิล์มมากกว่าฟิล์มสตาร์ชจากมันสำปะหลัง ซึ่งสมบัติดังกล่าวบ่งบอกถึงความสามารถในการใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหารได้ดี [14] งานวิจัยของ S. Mali et al. [13] ได้ศึกษาการขึ้นรูปฟิล์มสตาร์ชแยมจาก *D. alata* พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปคือใช้ปริมาณสตาร์ชแยมความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก และปริมาณกลีเซอรอลที่ร้อยละ 1.3 โดยน้ำหนักของสารละลายฟิล์ม โดยฟิล์มมีความหนา 0.11 มิลลิเมตร ทำให้มีความต้านทานแรงเจาะทะลุ (Puncture Strength) ที่สูงที่สุดและมีสมบัติการป้องกันการแพร่ผ่านไอน้ำและก๊าซออกซิเจนของฟิล์มที่ดี [13] นอกจากนี้มีงานวิจัยฟิล์มสตาร์ชแยมร่วมกับไคโตซานซึ่งพบว่าฟิล์มที่ได้มีฤทธิ์ในการต้านแบคทีเรีย *Salmonella enteritidis* [15] อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า การใช้ประโยชน์จาก *D. alata* หรือแยม เป็นการนำสตาร์ชมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตฟิล์มบริโภคได้ โดยทั่วไปสตาร์ชเป็นวัตถุดิบที่มีราคาที่สูงกว่าแป้งพลาว์ และมีกรรมวิธีการเตรียมที่ยุ่งยากกว่า ดังนั้น แป้งจากมันเลือดในรูปแป้งพลาว์จึงมีความน่าสนใจในการนำมาศึกษาการผลิตเป็นแผ่นฟิล์มบริโภคได้ โดยงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการนำแป้งพลาว์จากมันเลือดนำมาเป็นองค์ประกอบในการขึ้นรูปฟิล์มบริโภคได้ โดยศึกษาปริมาณกลีเซอรอลที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ที่เหมาะสมในการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มจากแป้งมันเลือด และศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพ สมบัติทางกล และสมบัติทางความร้อนของฟิล์มที่ได้ โดยฟิล์มจากแป้งมันเลือดที่ได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับผลิตภัณฑ์

อาหารได้ในอนาคต รวมทั้งเป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการใช้ประโยชน์และเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับมันเลือดที่เป็นมันพื้นบ้านด้วย

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 การเตรียมแป้ง

การเตรียมแป้งมันเลือด โดยนำมันเลือดที่ซื้อมาจากเกษตรกร ในตำบลท่ามะไฟหวาน อำเภอแก่งคร้อ จังหวัดชัยภูมิ ซึ่งฤดูกาลที่เก็บเกี่ยวช่วงเดือนพฤศจิกายน ถึงเดือนธันวาคม 2562 นำมันเลือดมาล้างทำความสะอาดเพื่อขจัดสิ่งสกปรก ปอกเปลือก และล้างด้วยน้ำอีกครั้ง หั่นให้เป็นแผ่นบาง ๆ นำไปแช่ในสารละลาย Ascorbic Acid ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 [16] เป็นเวลา 5 นาที นำไปต้มในน้ำเดือดเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นนำใส่ถาดเพื่อเข้าตู้อบลมร้อน (Hot Air Oven, รุ่น ED53, Binder, Germany) ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (ดัดแปลงจาก [17]) นำมันเลือดที่อบแห้งมาบดและร่อนผ่านตะแกรกร่อนขนาด 150 Mesh ซึ่งแป้งมันเลือดที่ได้มีความชื้นร้อยละ 5 มีค่า $L^* = 51.33$, $a^* = 5.91$ และ $b^* = 10.62$ ผงแป้งมันเลือดที่ได้ถูกบรรจุในถุงสุญญากาศ เก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อนำไปใช้ในการขึ้นรูปฟิล์มต่อไป

2.2 การขึ้นรูปฟิล์ม

การเตรียมสารละลายฟิล์ม โดยนำแป้งมันเลือดละลายในน้ำกลั่นที่ความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก [13] ให้ความร้อนสารละลายน้ำแป้งที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที พร้อมกับกวนตลอดเวลาด้วยเครื่องกวนสารให้ความร้อน (Hotplate Stirrer, รุ่น C-MAG-HS7, IKA, Germany) จนสารละลายเกิดลักษณะเจลาติโนส เติมกลีเซอรอลซึ่งเป็นพลาสติกไซเซอร์ลงไปร้อยละ 30 40 และ 50 โดยน้ำหนักของแป้งมันเลือด กวนผสมจนเป็นเนื้อเดียวกันเป็นเวลา 10 นาที ขึ้นรูปฟิล์มโดยเทสารละลายฟิล์มลงเพลท Petri Dish ที่

เคลือบด้วยเทปลอน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 140 มิลลิเมตร โดยคำนวณปริมาณของแข็งของสารละลายแต่ละสูตรให้มีปริมาณ 3 กรัม เท่ากันทุกเพลท การทำแห้งสารละลายฟิล์มโดยนำไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง จากนั้นลอกฟิล์มออกจากเพลทและเก็บที่อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส ที่ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity, RH) $50 \pm 2\%$ เป็นเวลาอย่างน้อย 2 วัน ในโถควบคุมความชื้นเพื่อรอการวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของฟิล์มต่อไป

2.3 การทดสอบสมบัติของฟิล์ม

2.3.1 ค่าสี

ค่าสีของฟิล์มทำการวัดด้วยเครื่องวัดสี Colorimeter (Chroma Meter, CR 400, Konica Minolta, Inc., Osaka, Japan) ตามระบบ CIE Lab System ในรูปของ L^* , a^* , b^* และ Gloss โดยใช้ White Standard Plate ($L_0^* = 91.04$, $a_0^* = -0.20$, $b_0^* = 2.37$ และ Gloss = 98.60 GU) คำนวณค่าความแตกต่างของสีโดยรวมตามสมการ [18]:

$$\Delta E^* = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad (1)$$

2.3.2 ความโปร่งใสของฟิล์ม

ความโปร่งใสของฟิล์ม (Transparency Value) [19] โดยตัดตัวอย่างฟิล์มขนาด 10 มิลลิเมตร x 40 มิลลิเมตร บรรจุฟิล์มลงในคิวเวทท์ นำไปวัดค่าร้อยละของแสงส่องผ่าน (% Transmittance) ที่ความยาวคลื่น 600 nm โดยใช้เครื่อง Spectrophotometer (รุ่น V-770 UV/VIS/NIR, Jasco Corporation, Tokyo, Japan) ใช้คิวเวทท์เปล่าเป็นแบล็กและคำนวณค่าความโปร่งใสของฟิล์มตามสมการ:

$$\text{Transparency value} = \frac{-\log T_{600}}{X} \quad (2)$$

โดยที่

T_{600} = Fractional Transmittance ที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร

X = ความหนาของแผ่นฟิล์ม (มิลลิเมตร)

2.3.3 ความหนา

นำตัวอย่างฟิล์มมาวัดความหนาของฟิล์ม ด้วยเครื่องวัดไมโครมิเตอร์ (รุ่น 7301, Mitutoyo, Kanagawa, Japan) โดยวัดความหนาของฟิล์มแต่ละสูตรจำนวนสูตรละ 12 ชิ้น ตัวอย่างแต่ละชิ้นวัดความหนาจำนวน 3 จุดนับเป็น 1 ซ้ำ เพื่อคำนวณหาค่าเฉลี่ยของแผ่นฟิล์ม

2.3.4 ปริมาณความชื้น

ปริมาณความชื้น ดัดแปลงวิธีของ AOAC [20] ตัดตัวอย่างฟิล์มขนาด 20 มิลลิเมตร x 20 มิลลิเมตร ซึ่งน้ำหนักตัวอย่างฟิล์มก่อนอบ นำตัวอย่างใส่ถ้วยอะลูมิเนียม อบที่ 105 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นตัวอย่างถูกนำออกจากตู้อบลมร้อน ทั้งให้เย็นในโถดูดความชื้น โดยให้น้ำหนักตัวอย่างคงที่ ทำการชั่งน้ำหนักหลังอบ และคำนวณหาความชื้นของตัวอย่าง

2.3.5 ความสามารถในการละลายน้ำ

ความสามารถในการละลายน้ำ (Water Solubility) ตามวิธี N. Samsalee และ R. Sothornvit [8] โดยตัดตัวอย่างฟิล์มขนาด 20 มิลลิเมตร x 20 มิลลิเมตร ซึ่งน้ำหนักตัวอย่างฟิล์มก่อนละลาย อบที่ 105 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง โดยให้น้ำหนักตัวอย่างคงที่ (dm_1) จากนั้นใส่ตัวอย่างลงในน้ำกลั่นปริมาตร 10 มิลลิลิตร นำไปเขย่าในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นเทสารละลายออก เพื่อแยกฟิล์มที่เหลืออยู่ นำตัวอย่างไปอบที่ 105 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ ทำการชั่งน้ำหนัก (dm_2) และคำนวณความสามารถในการละลายของฟิล์มตามสมการ

$$\text{Solubility (\%)} = \frac{dm_1 - dm_2}{dm_1} \times 100 \quad (3)$$

โดยที่

dm_1 = เป็นน้ำหนักของตัวอย่างแห้งเริ่มต้น

dm_2 = เป็นน้ำหนักตัวอย่างแห้งที่ไม่ละลายน้ำ

2.3.6 ความสามารถในการพองตัว

ความสามารถในการพองตัวของฟิล์ม (Swelling Property) ตามวิธี N. Cao et al. [21] โดยตัดตัวอย่างฟิล์มขนาด 25 มิลลิเมตร x 25 มิลลิเมตร และทำการชั่งน้ำหนักของฟิล์มเริ่มต้น (w_1) นำแผ่นฟิล์มจุ่มในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที จากนั้นนำมากรอง ซับน้ำส่วนที่เกินออกจากตัวอย่าง และนำตัวอย่างที่เปียก (Wet Sample) ชั่งน้ำหนัก (w_2) คำนวณความสามารถในการพองตัวของฟิล์ม [21]

$$\text{Swelling (\%)} = \frac{w_2 - w_1}{w_1} \times 100 \quad (4)$$

โดยที่

w_1 = น้ำหนักของตัวอย่างเริ่มต้น

w_2 = น้ำหนักของตัวอย่างที่เปียก

2.3.7 ความสามารถในการแพร่ผ่านของไอน้ำ

ความสามารถในการแพร่ผ่านของไอน้ำ (Water Vapor Permeability: WVP) โดยทำการตัดตัวอย่างฟิล์มเป็นวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 52 มิลลิเมตร โดยตัวอย่างฟิล์มปราศจากรอยขีดข่วน ฟองอากาศ และรูรั่วที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า นำตัวอย่างฟิล์มที่ทดสอบวางบนปากถ้วยอะคริลิก ที่ทาด้วยซิลิโคนกรีส (High Vacuum Grease) ที่ภายในถ้วยทดสอบบรรจุน้ำกลั่นปริมาณ 6 มิลลิลิตร นำถ้วยทดสอบที่ปิดผนึกด้วยฟิล์มไปชั่งน้ำหนักที่เวลา 0 ชั่วโมง จากนั้นนำถ้วยทดสอบใส่ในตู้ควบคุมที่อุณหภูมิ 27 ± 3 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ที่ร้อยละ 50 ± 5 จากนั้นทำการ

บันทึกน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงทุกๆ 1 ชั่วโมง เป็นเวลา 6 ชั่วโมง [8] นำค่าที่ได้คำนวณหาอัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม (Water Vapor Transmission Rate, WVTR) และคำนวณค่าความสามารถในการแพร่ผ่านของไอน้ำ (WVP) ตามสมการ

$$\text{WVP} = \frac{\text{WVTR} \times \text{thickness}}{P_{A1} - P_{A2}} \quad (5)$$

โดยที่

WVTR = ความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียไปกับเวลา (กรัมต่อชั่วโมง) ต่อพื้นที่ของแผ่นฟิล์มที่ไอน้ำซึมผ่าน (ตารางเมตร) (กรัมต่อชั่วโมงตารางเมตร)

thickness = ความหนาของแผ่นฟิล์ม (มิลลิเมตร)

$P_{A1} - P_{A2}$ = ความแตกต่างของความดันไอน้ำภายในและภายนอกถ้วยทดสอบของแผ่นฟิล์ม (กิโลปาสคาล)

2.3.8 สมบัติทางกล

สมบัติทางกล (Mechanical Properties) ได้แก่ ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น (Young's Modulus) การยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at Break) และความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) ตามมาตรฐาน ASTM D882-97 Standard [22] โดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine (Instron Model 5569, Massachusetts, USA) โดยตัดชิ้นตัวอย่างของฟิล์มขนาด 8 มิลลิเมตร x 50 มิลลิเมตร ยึดปลายทั้ง 2 ข้างของฟิล์มเข้ากับหัวหนีบ (Grip) อัตราเร็วในการดึงเท่ากับ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที และค่าขนาด Load Cell 50 นิวตัน ในการทดสอบสมบัติทางกลของฟิล์มใช้ตัวอย่างสูตรละ 12 ชิ้น การคำนวณค่าการต้านทานแรงดึงและการยืดตัว ณ จุดขาด ตามสมการดังนี้

$$\text{Tensile strength (TS)} = \frac{F_{\max}}{A} \quad (6)$$

$$\text{Elongation at break (EAB)} = \frac{L}{L_0} \times 100 \quad (7)$$

โดยที่

$F_{\max}$ = ค่าแรงสูงสุดที่ทำให้ฟิล์มขาด (นิวตัน)

A = พื้นที่หน้าตัดของฟิล์ม (ตารางมิลลิเมตร)

L_0 = ความยาวเริ่มต้นของฟิล์ม (มิลลิเมตร)

L = ระยะความยาวที่ฟิล์มยืดออก (มิลลิเมตร)

2.3.9 สมบัติทางความร้อน

สมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric Analysis; TGA) ของฟิล์มจากแป้งมันเลือด โดยใช้เครื่อง TA Instruments (SDT 2960 Simultaneous DSC-TGA, TA Instruments Inc., Woodland, CA, USA) เพื่อวิเคราะห์ความเสถียรทางความร้อนและอุณหภูมิการสลายตัว โดยทำการชั่งน้ำหนักตัวอย่างที่ใช้ทดสอบให้มีน้ำหนักประมาณ 10 มิลลิกรัม บรรจุตัวอย่างลงในภาชนะบรรจุตัวอย่าง ทำการทดสอบโดยการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ตัวอย่างที่อัตราเร็ว 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 800 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะก๊าซไนโตรเจน 20 มิลลิลิตรต่อนาที

2.3.10 ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

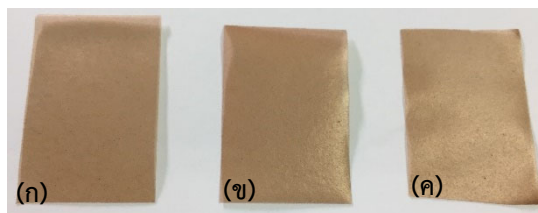
ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy: FT-IR) ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างของแป้งจากมันเลือดและฟิล์มบริโกลได้จากแป้งมันเลือด ด้วยเครื่อง ALPHA-E FT-IR Spectrophotometer (Bruker, Ettlingen, Germany) โดยวัดค่า Transmittance ของรังสีที่อยู่ในช่วงอินฟราเรด ช่วงเลขคลื่น (Wavenumber) $4000-600 \text{ cm}^{-1}$ โดย Scan Setting ที่ 16 Scans และ Resolution ที่ 4 cm^{-1}

2.4 วางแผนการทดลอง

วางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design รวบรวมผลการทดลอง และการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยของข้อมูลและเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$) ข้อมูลที่วิเคราะห์มาจากข้อมูลดิบอย่างน้อย 3 ซ้ำ

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

จากการศึกษาปริมาณกลีเซอรอลซึ่งเป็นพลาสติกไซเซอร์ที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ (ร้อยละ 30 40 และ 50) พบว่าลักษณะปรากฏของฟิล์มบริโกลได้จากแป้งมันเลือดมีลักษณะสีน้ำตาลอมม่วง (รูปที่ 1) โดยฟิล์มที่ได้มีค่า L^* (ความสว่าง) a^* (สีแดง) และ b^* (สีเหลือง) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 1) ซึ่งบ่งบอกได้ว่าการเติมปริมาณกลีเซอรอลที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อค่าสีของฟิล์มบริโกลได้จากแป้งมันเลือด โดยมีค่าความสว่างอยู่ในช่วง 60.55 ถึง 62.15 ค่าสีแดงอยู่ในช่วง 9.98 ถึง 10.76 และค่าสีเหลืองอยู่ในช่วง 21.40 ถึง 22.00 นอกจากนั้นพบว่าค่าความแตกต่างของสีโดยรวม (ΔE^*) ของฟิล์มทั้งสามสูตรมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ปริมาณกลีเซอรอลมีผลต่อค่าความเงาของฟิล์ม โดยปริมาณกลีเซอรอลที่เติมมากขึ้นส่งผลให้ค่าความเงาของฟิล์มมีแนวโน้มที่มากขึ้น อย่างไรก็ตาม พบว่าการเติมปริมาณกลีเซอรอลที่ระดับร้อยละ 50 มีค่าความเงามากที่สุดไม่แตกต่างกับการเติมกลีเซอรอลที่ระดับร้อยละ 40



รูปที่ 1 ลักษณะของฟิล์มบริโกลได้จากแป้งมันเลือดที่ระดับกลีเซอรอลร้อยละ 30 (ก) 40 (ข) และ 50 (ค)

อย่างไรก็ตามฟิล์มแป้งมันเลือดที่ไม่เติมกลีเซอรอล (ร้อยละ 0) ไม่ได้ถูกนำมาทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มเพื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่เติมกลีเซอรอลที่

ระดับต่าง ๆ เนื่องจากฟิล์มที่ได้มีลักษณะเปราะและแตกหักง่าย ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มที่สมบูรณ์ได้ จึงไม่สามารถนำไปใช้งานและทดสอบสมบัติต่าง ๆ ได้

ตารางที่ 1 ค่าสี ความเงา และความแตกต่างของสีโดยรวมของฟิล์มบริโคได้จากแป้งมันเลือดที่กลีเซอรอลระดับความเข้มข้นต่าง ๆ

Films	Color parameters				
	L* ^{ns}	a* ^{ns}	b* ^{ns}	Gloss (GU)	ΔE^{*ns}
30% Glycerol	60.55±4.46	9.98±2.04	22.00±1.82	26.92±2.11 ^a	37.68±5.11
40% Glycerol	62.15±0.74	9.74±0.43	21.99±0.48	29.25±1.97 ^{ab}	36.31±0.96
50% Glycerol	61.25±0.57	10.76±0.78	21.40±1.41	32.70±5.45 ^b	37.04±0.91

หมายเหตุ a-b ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวนอน มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95; ns ไม่แตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ

ความโปร่งใสของฟิล์มเป็นสมบัติที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งซึ่งมีผลต่อการนำไปใช้ประโยชน์ เนื่องจากความโปร่งใสของฟิล์มทำให้เห็นลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ถูกบรรจุภายในฟิล์มบรรจุภัณฑ์ได้ จากการวิเคราะห์ค่าความโปร่งใสของฟิล์มจากแป้งมันเลือด พบว่าปริมาณกลีเซอรอลที่ต่างกันไม่มีผลต่อค่าความโปร่งใสอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 2) ซึ่งสอดคล้องกับค่าสี (L* a* และ b*) และค่าความหนาของฟิล์มที่ไม่แตกต่างกัน เนื่องจากความหนาของฟิล์มมีผลต่อความโปร่งแสง (Translucency) หรือการส่องผ่านแสงของฟิล์ม โดยหากฟิล์มมีความหนาที่มากทำให้ลดการส่องผ่านแสงส่งผลทำให้ค่าความโปร่งใสของฟิล์มลดลง [23] โดยฟิล์มบริโคได้จากแป้งมันเลือดพบว่ามีค่าความโปร่งใสอยู่ในช่วง 5.49 ถึง 5.70 หากค่าความโปร่งใสของฟิล์มต่ำบ่งบอกได้ว่าฟิล์มนั้นมีความโปร่งใสมากหรือมีความทึบแสงน้อย [9] ความทึบแสงของฟิล์มช่วยป้องกันผลิตภัณฑ์ที่อยู่ภายในบรรจุภัณฑ์ที่มีความไวต่อแสงได้ เนื่องจากแสงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้ผลิตภัณฑ์อาหารเกิดกลิ่นหืน ที่ไม่พึงประสงค์ได้

ค่าความหนาของฟิล์มพบว่าเมื่อมีปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อความหนาของแผ่นฟิล์ม

(ตารางที่ 2) โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.190 ถึง 0.192 มิลลิเมตร ทั้งนี้เนื่องมาจากในขั้นตอนการขึ้นรูปฟิล์มได้ทำการควบคุมปริมาณของแข็งในแต่ละเพลทที่ใช้ในการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มจึงทำให้มีค่าความหนาไม่แตกต่างกัน

ปริมาณความชื้นของฟิล์มพบว่าเมื่อปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้นมีแนวโน้มที่มีค่ามากขึ้น (ตารางที่ 2) โดยฟิล์มบริโคได้จากแป้งมันเลือดที่มีปริมาณกลีเซอรอลร้อยละ 50 พบว่ามีปริมาณความชื้นสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่เติมกลีเซอรอลร้อยละ 30 และ 40 สอดคล้องกับงานวิจัยของ S. Pitiphatharaworachot และ B. Puangsin [24] ที่ได้ทำการศึกษาปริมาณกลีเซอรอล (ร้อยละ 20 ถึง 35) ร่วมกับแป้งมันสำปะหลังในการเตรียมฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช โดยพบว่าเมื่อมีการเติมกลีเซอรอลเพิ่มมากขึ้นมีผลทำให้แผ่นฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมีค่าความชื้นมากขึ้น (ร้อยละ 8.53 เป็น 25.32) ผลดังกล่าวเนื่องมาจากกลีเซอรอลเป็นพอลิออล (Polyol) ที่มีหมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุล เกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของน้ำได้ดี ทำให้กลีเซอรอลเป็นสารที่อุ้มน้ำไว้ในเมทริกซ์ของฟิล์มได้ [24] รวมถึงทำให้ฟิล์มไวต่อความชื้นได้ง่ายเมื่อสัมผัสอากาศ

ตารางที่ 2 ค่าความโปร่งใส ความหนา และความชื้นของฟิล์มบริโภาคได้จากแป้งมันเลือดที่กลีเซอรอลระดับความเข้มข้นต่าง ๆ

Films	Transparency value ^{ns}	Thickness (mm) ^{ns}	Moisture content (%)
30% Glycerol	5.70±0.91	0.190±0.009	10.88±0.50 ^a
40% Glycerol	5.57±0.11	0.192±0.013	11.94±1.19 ^a
50% Glycerol	5.49±0.28	0.190±0.006	16.35±1.90 ^b

หมายเหตุ a-b ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวนอน มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95; ns ไม่แตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ

ความสามารถในการละลายน้ำได้แสดงถึงลักษณะการต้านทานน้ำของแผ่นฟิล์ม ซึ่งมีอิทธิพลต่อความเหมาะสมในการนำฟิล์มไปประยุกต์ใช้งานทางด้านอาหาร จากการศึกษาพบว่าฟิล์มบริโภาคได้จากแป้งมันเลือดที่ระดับกลีเซอรอลร้อยละ 30 มีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยที่สุดแตกต่างกับการใช้กลีเซอรอลที่ระดับร้อยละ 40 และ 50 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 3) นอกจากนั้นพบว่าที่กลีเซอรอลที่ระดับร้อยละ 40 และ 50 มีค่าความสามารถในการละลายน้ำที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับปริมาณความชื้นของแผ่นฟิล์ม เนื่องจากกลีเซอรอลมีสมบัติความชอบน้ำ (Hydrophilic) จึงทำให้ฟิล์มละลายน้ำได้เมื่อมีปริมาณกลีเซอรอลมากขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ R. Chindapan และ W. Faiphet [25] ที่ได้รายงานว่า ความสามารถในการละลายน้ำของฟิล์มโปรตีนจากถั่วเขียวมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น (กลีเซอรอลร้อยละ 30 ถึง 50)

ความสามารถในการพองตัวของฟิล์มบ่งบอกถึงการรักษาคุณภาพในระหว่างการบรรจุและการเก็บรักษาอาหาร [10] จากการศึกษาพบว่า การเติมปริมาณกลีเซอรอลที่ระดับความเข้มข้นต่างกันมีผลต่อความสามารถในการพองตัวของฟิล์มอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 3) การเติมกลีเซอรอลที่ระดับร้อยละ 40 พบว่าฟิล์มบริโภาคได้จากแป้งมันเลือดมีความสามารถในการพองตัวในน้ำของฟิล์มสูงที่สุดถึงร้อยละ 183.82 ซึ่งพบว่ามีค่าความสามารถในการพอง

ตัวในน้ำที่สูงกว่าการเติมกลีเซอรอลที่ร้อยละ 50 โดยทั่วไปค่าความสามารถในการพองตัวของฟิล์มมากเกี่ยวข้องกับปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลของกลีเซอรอลที่มีปริมาณมาก ทำให้ฟิล์มมีความสามารถในการดูดซับน้ำได้ดี งานวิจัยของ M. Nouraddini et al. [10] รายงานว่าฟิล์มจากแป้งข้าวโพดและฟิล์มจากแป้งมะเขือยาวมีค่าความสามารถในการพองตัวที่ร้อยละ 103 และ 406 ตามลำดับ

สมบัติการแพร่ผ่านของไอน้ำเป็นหนึ่งในสมบัติที่สำคัญของฟิล์มไบโอพอลิเมอร์ที่ถูกนำมาใช้ในงานด้านบรรจุภัณฑ์อาหาร โดยค่าความสามารถในการแพร่ผ่านของไอน้ำของฟิล์มที่ต่ำช่วยป้องกันการแพร่ของความชื้นที่ผ่านอาหารได้ [8] โดยทั่วไปฟิล์มพอลิแซ็กคาไรด์และฟิล์มโปรตีนช่วยป้องกันก๊าซออกซิเจน กลิ่น และน้ำมันได้ดี (โมเลกุลที่ไม่มีขั้ว) แต่มีความสามารถในการป้องกันน้ำได้ต่ำ (โมเลกุลที่มีขั้ว) [26] จากการศึกษาความสามารถในการแพร่ผ่านไอน้ำของแผ่นฟิล์มพบว่าเมื่อปริมาณกลีเซอรอลมากขึ้นมีผลทำให้ฟิล์มมีค่าความสามารถในการแพร่ผ่านไอน้ำเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย (ตารางที่ 3) โดยการเติมกลีเซอรอลที่ร้อยละ 30 มีค่าความสามารถในการแพร่ผ่านไอน้ำน้อยที่สุดแตกต่างกับที่ร้อยละ 40 และ 50 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และพบว่าที่ร้อยละ 40 และ 50 มีค่าความสามารถในการแพร่ผ่านไอน้ำที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งสอดคล้องกับค่าความสามารถในการละลายน้ำได้และความชื้นของแผ่นฟิล์ม การเพิ่มขึ้นของค่าความสามารถ

ในการแพร่ผ่านไอน้ำของแผ่นฟิล์มอาจเกี่ยวข้องกับ ความชอบน้ำ (Hydrophilic) ของกลีเซอรอลที่มากขึ้น เมื่อมีการเติมในปริมาณที่มากขึ้น โดยที่กลีเซอรอลเข้าไปแทรกตัวและสร้างพันธะกับโมเลกุลของแป้งทำให้ พันธะไฮโดรเจนเกิดการอ่อนตัวลง [27]

เมื่อเปรียบเทียบสมบัติของฟิล์มจากแป้งมันเลือด กับพอลิเมอร์สังเคราะห์ เช่น พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene, LDPE) พบว่าฟิล์ม LDPE มีความสามารถในการแพร่ผ่านไอน้ำเท่ากับ 0.0013 กรัม มิลลิเมตรต่อตารางเมตร ชั่วโมง

กิโลปาสกาล [28] ซึ่งมีสมบัติในการป้องกันที่ดีกว่าฟิล์มจากแป้งมันเลือด เช่นเดียวกับฟิล์มจากแป้งพลวาร์ข้าวแดงและฟิล์มจากสตาร์ชข้าวแดงที่พบว่ามีความสามารถในการแพร่ผ่านไอน้ำที่น้อยกว่าฟิล์มจากแป้งมันเลือด (1.56 และ 1.25 กรัม มิลลิเมตรต่อตารางเมตร ชั่วโมง กิโลปาสกาล ตามลำดับ) [29] อย่างไรก็ตามฟิล์มจากแป้งมันเลือดมีค่าความสามารถในการแพร่ผ่านไอน้ำที่ดีกว่าฟิล์มจากเปลือกแอปเปิ้ล (4.20-7.56 กรัม มิลลิเมตรต่อตารางเมตร ชั่วโมง กิโลปาสกาล) [30]

ตารางที่ 3 ความสามารถในการการละลายน้ำ ความสามารถในการพองตัว และความสามารถในการแพร่ผ่านของไอน้ำของฟิล์มบริโกลได้จากแป้งมันเลือดที่กลีเซอรอลระดับความเข้มข้นต่าง ๆ

Films	Water solubility (%)	Swelling (%)	WVP (g. mm./m ² . h. kPa)
30% Glycerol	16.91±1.24 ^a	134.36±8.43 ^a	2.71±0.13 ^a
40% Glycerol	19.15±1.09 ^b	183.82±21.80 ^c	3.38±0.32 ^b
50% Glycerol	19.63±0.38 ^b	155.61±5.60 ^b	3.51±0.34 ^b

หมายเหตุ a-c ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95; ns ไม่แตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4 สมบัติทางกลของฟิล์มบริโกลได้จากแป้งมันเลือดที่กลีเซอรอลระดับความเข้มข้นต่าง ๆ

Films	Mechanical properties		
	Young's modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%) ^{ns}
30% Glycerol	113.75±17.47 ^c	6.17±0.72 ^c	25.42±3.97
40% Glycerol	56.95±9.44 ^b	4.22±0.37 ^b	23.13±2.80
50% Glycerol	26.95±2.47 ^a	2.70±0.26 ^a	22.83±2.40

หมายเหตุ a-c ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95; ns ไม่แตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ

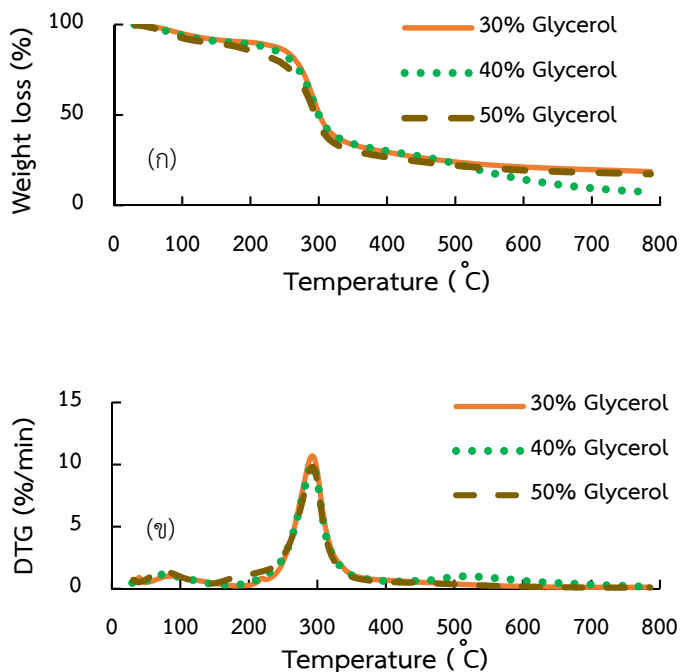
โดยทั่วไปค่าความต้านทานแรงดึงของแผ่นฟิล์มมีผลต่อความทนทานของฟิล์มต่อความเค้นตึงฉาก (Normal Stress) ของฟิล์มในระหว่างการใช้งาน การขนส่ง และการจัดการอาหาร ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของฟิล์มเกี่ยวข้องกับความยืดหยุ่นของฟิล์มสำหรับบรรจุภัณฑ์อาหาร ส่วนค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นบ่งบอกถึงความแข็งของฟิล์ม (Stiffness) [9] จาก

การศึกษาพบว่าเมื่อปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงและค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของแผ่นฟิล์มมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จาก 6.17 เป็น 2.70 เมกกะปาสกาล และจาก 113.75 เป็น 26.95 เมกกะปาสกาล ตามลำดับ (ตารางที่ 4) ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะโมเลกุลของกลีเซอรอลเข้าไปแทรกสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ ส่งผลให้มีการลดลงของแรง

ระหว่างโมเลกุล เกิดการเพิ่มปริมาตรอิสระ และเพิ่มการเคลื่อนตัวของสายโซ่ของพอลิเมอร์ ทำให้ความแข็งแรงของฟิล์มลดลง [11], [24] ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดพบว่ากลีเซอรอลทั้งสามความเข้มข้นมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 22.83 ถึง 25.42 อย่างไรก็ตามที่ปริมาณกลีเซอรอลร้อยละ 30 อาจเป็นข้อจำกัดในการนำไปใช้งาน เนื่องจากฟิล์มที่ได้มีค่าความแข็ง (Stiffness) มาก เท่ากับ 2 ถึง 4 เท่าของฟิล์มที่เติมกลีเซอรอลที่ร้อยละ 40 และ 50 งานวิจัยของ P. Theamdee และ K. Sooksamran [11] ได้รายงานว่าฟิล์มแป้งมันแกวที่มีการเติมกลีเซอรอลเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0 ถึง ร้อยละ 60 พบว่ามีค่าความต้านทานแรงดึงลดลงและค่าการยืดตัวของฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้น

สมบัติทางกลของฟิล์ม LDPE ซึ่งเป็นฟิล์มพอลิเมอร์สังเคราะห์ พบว่า มีค่าการต้านทานแรงดึงอยู่

ในช่วง 9-17 เมกกะปาสคาล [31] ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดประมาณร้อยละ 500 [31] และมีค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นอยู่ในช่วง 100-240 เมกกะปาสคาล [32] ซึ่งจากค่าดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์สังเคราะห์มีสมบัติทางกลที่ดีกว่าฟิล์มจากแป้งมันเลือดที่เป็นพอลิเมอร์ชีวภาพ อย่างไรก็ตามฟิล์มจากแป้งมันเลือดมีค่าการต้านทานแรงดึงและค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นมากกว่าฟิล์มจากแป้งพลาร์ข้าวแดง (0.55 เมกกะปาสคาล และ 12.71 เมกกะปาสคาล ตามลำดับ) [29] และฟิล์มจากสตาร์ชข้าวแดง (1.29 เมกกะปาสคาล และ 19.08 เมกกะปาสคาล ตามลำดับ) [29] ส่วนค่าการยืดตัว ณ จุดขาด พบว่าฟิล์มจากแป้งมันเลือดมีค่าน้อยกว่าฟิล์มจากแป้งพลาร์ข้าวแดง (ร้อยละ 28.29) [29] และฟิล์มจากสตาร์ชข้าวแดง (ร้อยละ 49.73) [29]



รูปที่ 2 กราฟ TGA ของฟิล์มบริโภคน้ำได้จากแป้งมันเลือดที่กลีเซอรอลความเข้มข้นร้อยละ 30 40 และ 50

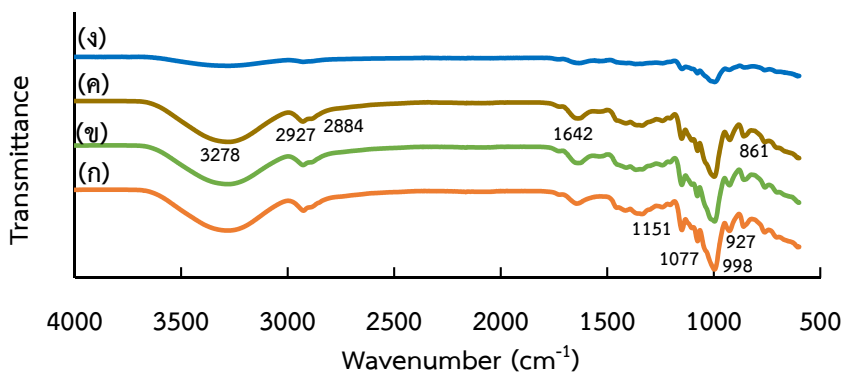
ความเสถียรทางความร้อนและอุณหภูมิการสลายตัวของฟิล์มบริโภคน้ำได้จากแป้งมันเลือดที่ความ

เข้มข้นของกลีเซอรอลที่ร้อยละ 30 40 และ 50 โดยการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA แสดงดังรูปที่ 2 โดยอุณหภูมิ

การสลายตัวของฟิล์มพบว่า มี 2 ชั้น คือชั้นแรกจะเกี่ยวข้องกับการระเหยของน้ำในตัวอย่าง และชั้นที่สองเกี่ยวข้องกับการสลายตัวของแป้งและกลีเซอรอล [5], [33] ซึ่งจากการศึกษาพบว่าอุณหภูมิการสลายตัวชั้นแรกที่อุณหภูมิอยู่ในช่วง 50 ถึง 130 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับช่วงอุณหภูมิที่พบในพีคแรกๆ ของกราฟ DTG อุณหภูมิชั้นที่สองมีค่าอยู่ในช่วง 263 ถึง 315 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณาจากกราฟ DTG จะพบว่าคือพีคที่สองที่มียอดสูงสุด บ่งบอกถึงการสลายตัวมากที่สุดในช่วงนี้ ซึ่งมีความใกล้เคียงกับงานวิจัยของ C. Yokesahachart et al. [34] ที่ได้รายงานว่ามีฟิล์มบริโกลได้จากสตาร์ชมันสำปะหลังดัดแปรเสริมโปรตีนซินมีอุณหภูมิการสลายตัวชั้นแรกอยู่ในช่วง 30-150

องศาเซลเซียส และชั้นที่สองอยู่ในช่วง 150-390 องศาเซลเซียส

ฟิล์มบริโกลได้จากแป้งมันเลือดที่ระดับความเข้มข้นของกลีเซอรอลที่ร้อยละ 30 และ 40 พบว่ามีความเสถียรทางความร้อนมากกว่าการเติมกลีเซอรอลที่ร้อยละ 50 เพียงเล็กน้อย (ในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 500 องศาเซลเซียส) อย่างไรก็ตามฟิล์มที่เติมกลีเซอรอลที่ร้อยละ 40 ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 600 องศาเซลเซียส พบว่าร้อยละของน้ำหนักที่สูญเสียไปมากกว่าฟิล์มบริโกลได้จากแป้งมันเลือดที่เติมกลีเซอรอลที่ร้อยละ 30 และ 50 (รูปที่ 2) อย่างไรก็ตาม S. Pitiphatharaworachot และ B. Puangsin [24] ได้รายงานว่าการเพิ่มความเข้มข้นของกลีเซอรอลที่มากขึ้นส่งผลให้ความเสถียรทางความร้อนของฟิล์มมีค่าต่ำลง



รูปที่ 3 เส้นสเปกตรัมของฟิล์มบริโกลได้จากแป้งมันเลือดที่กลีเซอรอลความเข้มข้นร้อยละ 30 (ก) 40 (ข) 50 (ค) และแป้งมันเลือด (ง)

จากการศึกษาฟิล์มบริโกลได้จากแป้งมันเลือดที่กลีเซอรอลความเข้มข้นร้อยละ 30 40 และ 50 พบว่าสเปกตรัมที่ได้มีพีคที่ตำแหน่งคล้ายกัน (รูปที่ 3) โดยพบที่ตำแหน่งเลขคลื่น 3278 2927 2884 1642 1353 1151 1077 998 927 และ 861 cm^{-1} อย่างไรก็ตามพบว่าแป้งจากมันเลือดพบพีคที่ตำแหน่งคล้ายกันกับฟิล์ม แต่พีคของฟิล์มมี Amplitude ที่เด่นชัดมากกว่า

ของแป้ง โดยตำแหน่งเลขคลื่นที่ 3278 cm^{-1} เกี่ยวข้องกับหมู่ไฮดรอกซิล หรือการยืด-หด (Stretching) ของพันธะ O-H ตำแหน่งเลขคลื่นที่ 2927 cm^{-1} และ 2884 cm^{-1} เกี่ยวข้องกับการยืด-หด (Stretching) ของพันธะ C-H ในหมู่ CH_2 ส่วนเลขคลื่นที่ 1642 cm^{-1} แสดงการงอ (Bending) ของพันธะ O-H พีคที่เลขคลื่น 1353 cm^{-1} แสดงการงอ (Bending) ของพันธะ C-H ตำแหน่ง

เลขคลื่นที่ 1151 cm^{-1} แสดงการยืด-หด (Stretching) ของพันธะ C-O พิกที่เลขคลื่น 1077 cm^{-1} และ 861 cm^{-1} แสดงการยืด-หดแบบสมมาตร (Symmetric Stretching) ของ C-O-C พิกที่เลขคลื่น 998 cm^{-1} และ 927 cm^{-1} แสดงการอ (Blending) ของ C-O-H [35], [36] จากการศึกษาพบว่าพิกที่ 2884 cm^{-1} เป็นพิกใหม่ที่เกิดขึ้นที่ถูกพบในตัวอย่างฟิล์มทั้งสามความเข้มข้นของกลีเซอรอลเมื่อเทียบกับสเปกตรัมของแป้งจากมันเลือด ซึ่งตำแหน่งดังกล่าวเป็นเลขคลื่นที่พบในกลีเซอรอล [33] และพบว่าที่ตำแหน่งเลขคลื่นที่ 3278 cm^{-1} มีค่าการดูดกลืนของปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลเพิ่มมากขึ้น เมื่อปริมาณกลีเซอรอลในฟิล์มมากขึ้น เนื่องจากกลีเซอรอลมีโมเลกุลของหมู่ไฮดรอกซิลเป็นองค์ประกอบ [11], [36] ทำให้การเติมในปริมาณมากส่งผลให้ในโครงสร้างของฟิล์มมีปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลเพิ่มมากขึ้นด้วย นอกจากนี้ที่ตำแหน่งดังกล่าวยังเกี่ยวข้องกับปริมาณความชื้นของฟิล์มด้วย

4. สรุป

จากการศึกษาปริมาณกลีเซอรอลที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ของฟิล์มบริโกลได้จากแป้งมันเลือด พบว่าปริมาณกลีเซอรอลไม่มีผลต่อค่าสี ความหนา ความโปร่งใส และค่าการยืดตัวของฟิล์ม แต่พบว่ามีผลต่อปริมาณความชื้น ความสามารถในการละลายน้ำ ความสามารถในการพองตัว ความสามารถในการแพร่ผ่านไอน้ำ โมดูลัสของความยืดหยุ่น และค่าการต้านทานแรงดึงของฟิล์ม สมบัติทางความร้อนของฟิล์มบริโกลได้จากแป้งมันเลือด พบว่ามีอุณหภูมิการสลายตัว 2 ชั้น ได้แก่ ชั้นแรกที่ 50 ถึง 130 องศาเซลเซียส และชั้นที่สองที่ 263 ถึง 315 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ พบว่าปริมาณกลีเซอรอลมีผลต่อโครงสร้างของฟิล์มที่ตำแหน่งเลขคลื่น 3278 cm^{-1} ซึ่งเป็นตำแหน่งการดูดกลืนของหมู่ไฮดรอกซิล ฟิล์มบริโกลได้จากแป้งมันเลือดที่เติมปริมาณกลีเซอรอลร้อยละ 30 พบว่า ฟิล์มมี

ความสามารถในการป้องกันการแพร่ผ่านไอน้ำที่ดีที่สุด แต่พบว่าฟิล์มมีความแข็ง (Stiffness) มากกว่าการเติมกลีเซอรอลที่ปริมาณร้อยละ 40 และ 50 ดังนั้น จากการศึกษาสมบัติต่างๆ ของฟิล์มบริโกลได้จากแป้งมันเลือดในงานวิจัยนี้ พบว่า ฟิล์มที่เติมกลีเซอรอลที่ร้อยละ 40 และ 50 มีสมบัติของฟิล์มโดยรวมที่ดี ซึ่งมีศักยภาพในการนำไปใช้เป็นวัสดุสำหรับบรรจุภัณฑ์อาหารเพื่อปกป้องและช่วยรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาชีววิทยาประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ที่ให้การสนับสนุนสถานที่ และอุปกรณ์ในการวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ที่ให้ความอนุเคราะห์ให้เครื่องมือในการวิเคราะห์การแพร่ผ่านไอน้ำของฟิล์ม

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Saraphi, P. Meekaew, Y. Tokeeree and C. Saraphi, "Species diversity of native edible tuber crop in Surin province," *PSRU Journal of Science and Technology*, vol. 4, no. 2, pp. 43-53, 2019.
- [2] S. Promdang, R. Homhual, M. Wongmaneeroj, R. Agarum and S. Jamjumrus, "Nutritional Constituents of Man Lueat (*Dioscorea alata*)" in *Proceeding of the 14th KU KPS Conference*, Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus, Nakhon Pathom, 2017, pp. 19-27.
- [3] S. Jantathai, N. Toontom, P. klintach and C. Poking, "Effects of wheat flour

- replacement with taro, yam and purple sweet potato flours incorporated with black glutinous rice on qualities of muffin and consumer acceptance,” *The 13th Mahasarakham University Research Conference*, Mahasarakham University, Mahasarakham, 2017, pp. 650-656.
- [4] F. D. Wireko-Manu, W. O. Ellis, I. Oduro, R. Asiedu and B. Maziya-Dixon, “Physicochemical and pasting characteristics of water yam (*D. alata*) in comparison with pona (*D. rotundata*) from Ghana,” *European Journal of Food Research & Review*, vol. 1, no. 3, pp. 149-158, 2011.
- [5] M. L. Sanyang, S. M. Sapuan, M. Jawaid, M. R. Ishak and J. Sahari, “Effect of plasticizer type and concentration on tensile, thermal and barrier properties of biodegradable films based on sugar palm (*Arenga pinnata*) starch,” *Polymers*, vol. 7, no. 6, pp. 1106-1124, 2015.
- [6] P. Noiduang, L. Thawla and O. Pa-ai, “Study on Edible Film Production from Chinese Water Chestnuts Starch,” *Agricultural Science Journal*, vol. 46, no. 3, pp. 665-668, 2015.
- [7] A. Gennadios, C. L. Weller, M. A. Hanna and G. W. J. Froning, “Mechanical and barrier properties of egg albumen films,” *Food Science*, vol. 61, pp. 585-589, 1996.
- [8] N. Samsalee and R. Sothornvit, “Characterization of Food Application and Quality of Porcine Plasma Protein-Based Films Incorporated with Chitosan or Encapsulated Turmeric Oil,” *Food and Bioprocess Technology*, vol. 13, pp. 488-500, 2020.
- [9] N. Samsalee and R. Sothornvit, “Development and characterization of porcine plasma protein-chitosan blended films,” *Food Packaging and Shelf Life*, vol. 22, pp. 100406, 2019.
- [10] M. Nouraddini, M. Esmaili and F. Mohtarami, “Development and characterization of edible films based on eggplant flour and corn starch,” *International journal of biological macromolecules*, vol. 120, pp.1639-1645, 2018.
- [11] P. Theamdee and K. Sooksamran, “Development of a Biodegradable Film from Jicama Starch (*Pachyrhizus erosus* (L.) Urban) for Plant Bag Application,” *RMUTP Research Journal*, vol. 14, no. 1, 2020.
- [12] S. Mali, M. V. E. Grossmann, M. A. García, M. N. Martino and N. E. Zaritzky, “Mechanical and thermal properties of yam starch films,” *Food Hydrocolloids*, vol. 19, no. 1, pp. 157-164, 2015.
- [13] S. Mali, M. V. E. Grossmann, M. A. García, M. N. Martino and N. E. Zaritzky, “Barrier, mechanical and optical properties of plasticized yam starch films,” *Carbohydrate Polymers*, vol. 56, no. 2, pp. 129-135, 2004.
- [14] T. J. Gutiérrez, M. S. Tapia, E. Pérez and L. Famá, “Structural and mechanical properties of edible films made from

- native and modified cush-cush yam and cassava starch,” *Food Hydrocolloids*, vol. 45, pp. 211-217, 2015.
- [15] A. M. Durango, N. F. F. Soares, S. Benevides, J. Teixeira, M. Carvalho, C. Wobeto and N. J. Andrade, “Development and evaluation of an edible antimicrobial film based on yam starch and chitosan,” *Packaging Technology and Science: An International Journal*, vol. 19, no. 1, pp. 55-59, 2006.
- [16] R. Ratnaningsih, N. Richana, S. Suzuki and Y. Fujii, “Effect of Soaking Treatment on Anthocyanin, Flavonoid, Phenolic Content and Antioxidant Activities of *Dioscorea alata* Flour,” *Indonesian Journal of Chemistry*, vol. 18, no. 4, pp. 656-663, 2018.
- [17] N. Charoenphun, “Development of Cookie Products from Sweet Potato,” *Journal of Food Technology, Siam University*, vol. 13, no. 1, pp. 32-43, 2018.
- [18] A. Gennadios, C. L. Weller, M. A. Hanna and G. W. J. Froning, “Mechanical and barrier properties of egg albumen films,” *Food Science*, vol. 61, pp. 585-589, 1996.
- [19] J. H. Han and J. D. Floros, “Casting antimicrobial packaging films and measuring their physical properties and antimicrobial activity,” *Journal of Plastic Film and Sheeting*, vol. 13, pp. 287-298, 1997.
- [20] Association of Official Analytical Chemists (AOAC), *Official Methods of Analysis*, 16th ed. Virginia: Association of Official Analytical Chemists, 2000.
- [21] N. Cao, Y. Fu and J. He, “Preparation and physical properties of soy protein isolate and gelatin composite films,” *Food Hydrocolloids*, vol. 21, no. 7, pp.1153-1162, 2007.
- [22] ASTM, Designations D882. Standard test method for tensile properties of thin plastic sheeting, Annual book of ASTM standards. Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials, 1997.
- [23] S. Khairunnisa, J. Junianto, Z. Zahidah and I. Rostini, “The effect of glycerol concentration as a plasticizer on edible films made from alginate towards its physical characteristic,” *World Scientific News*, vol. 112, pp. 130-141, 2018.
- [24] S. Pitiphatharaworachot and B. Puangsin, “Effect of Glycerol on Physical and Thermal Properties of Tapioca Starch Films,” in *Proceeding of the 55th Kasetsart University Annual Conference*, Kasetsart University, Bangkok, 2017, pp. 786-793.
- [25] R. Chindapan and W. Faiphet, “Effects of Plasticizers on Tensile Strength, Oil Resistance and Solubility of Mung Bean Protein Films,” *Journal of Food Technology, Siam University*, vol. 2, no. 1, pp. 36-44, 2006.
- [26] R. Sothornvit and J. M. Krochta, “Plasticizers in edible films and coatings,” in *Innovations in food packaging*, J. H. Han, 1st ed. London: Academic Press, 2005, pp. 403-433.

- [27] T. Sukkasem, K. Buranachokpaisan and K. Anukulwattana, "Mechanical and physical properties of edible film from corn husk waste (*Zea mays* Linn.)," *Khon Kaen Agriculture Journal*, vol. 45, pp. 1222-1228, 2017.
- [28] T. H. Shellhammer and J. M. Krochta, "Whey protein emulsion film performance as affected by lipid type and amount," *Journal of Food Science*, vol. 62, no. 2, pp. 390-394, 1997.
- [29] C. G. Vargas, T. M. H. Costa, A. O. Rios and S. H. Flôres, "Comparative study on the properties of films based on red rice (*Oryza glaberrima*) flour and starch," *Food Hydrocolloids*, vol. 65, pp. 96-106, 2017.
- [30] S. S. Sablani, F. Dasse, L. Bastarrachea, S. Dhawan, K. M. Hendrix and S. C. Min, "Apple peel-based edible film development using a high-pressure homogenization," *Journal of food science*, vol. 74, no. 7, pp. 372-381, 2009.
- [31] J. H. Briston, *Plastics Films*, 3rd ed. England: Longman Scientific & Technical, 1989.
- [32] K. W. Doak, "Ethylene polymers," in *Encyclopedia of Polymer Science and Engineering*, J. I. Kroschwitz, Ed. New York, MA: John Wiley and Sons, 1986, pp. 413-414.
- [33] H. M. Wilhelm, M. R. Sierakowski, G. P. Souza and F. Wypych, "Starch films reinforced with mineral clay," *Carbohydrate Polymers*, vol. 52, no. 2, pp. 101-110, 2003.
- [34] C. Yokesahachart, B. Chardchopowpong, S. Niramitmahapanja, S. Pajareon and P. Yokesahachart, "Study on Physical and Thermal Properties of Edible Films from Modified Cassava Starch Incorporated with Zein Protein," *Journal of Food Technology, Siam University*, vol. 14, no. 1, pp. 58-68, 2019.
- [35] G. M. Raghavendra, J. Jung and J. Seo, "Step-reduced synthesis of starch-silver nanoparticles," *International journal of biological macromolecules*, vol. 86, pp. 126-128, 2016.
- [36] G. Abera, B. Woldeyes, H. D. Demash and G. Miyake, "The effect of plasticizers on thermoplastic starch films developed from the indigenous Ethiopian tuber crop Anchote (*Coccinia abyssinica*) starch," *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 155, pp. 581-587, 2020.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

การประยุกต์ใช้หม้อแปลงฟลายแบคสำเร็จรูปสำหรับแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง

ยุทธนา กันทะพะเยา และ เฉลิมพล เรืองพัฒนาวิวัฒน์*

คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
217 ถนนนนทบุรี ตำบลสวนใหญ่ อำเภอเมืองนนทบุรี จังหวัดนนทบุรี 11000

รับบทความ 7 กันยายน 2563 แก้ไขบทความ 16 กุมภาพันธ์ 2564 ตอรับบทความ 5 พฤษภาคม 2564

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการสร้างไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง โดยใช้หม้อแปลงฟลายแบคสำเร็จรูปเป็นแหล่งจ่ายด้านอินพุตให้หม้อแปลงเทสลา เพื่อเป็นชุดสวิตติงการเบรกดาวนผ่านอากาศของอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อยืนยันวิธีการที่นำเสนอจึงออกแบบการควบคุมวงจรแปลงผันแบบฟลายแบค โดยใช้หม้อแปลงฟลายแบคสำเร็จรูปพิกัดแรงดันเอาต์พุต 10-15 กิโลโวลต์ จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับวงจรหม้อแปลงเทสลาขนาด 30 กิโลโวลต์ 120 กิโลเฮิรตซ์ การทดสอบการเบรกดาวนด้านเอาต์พุต ได้ออกแบบอิเล็กทรอนิกส์กำหนดระยะแกป 1 เซนติเมตร ประกอบด้วยอิเล็กทรอนิกส์ ทรงแกลม-ทรงกลม ระนาบ-ระนาบ ทรงแกลม-ระนาบ และปลายแหลม-ระนาบ พบว่าการเบรกดาวนที่อิเล็กทรอนิกส์ด้านเอาต์พุตทุกกรณีสำหรับกรณีเกิดการเบรกดาวนที่อิเล็กทรอนิกส์ทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร เมื่ออ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60052-2002 เทียบกับตารางมาตรฐานและปรับเปลี่ยนค่าบรรยากาศและอุณหภูมิ ณ ห้องทดลองได้แรงดันเอาต์พุตเท่ากับ 31.5 กิโลโวลต์

คำสำคัญ : หม้อแปลงฟลายแบคสำเร็จรูป; หม้อแปลงเทสลา; เบรกดาวน; อิเล็กทรอนิกส์; แกปทรงกลม

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 7977 9032, อีเมล: chalermopol.r@rmutsb.ac.th

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Application of a Commercial Flyback Transformer for a High Frequency High Voltage Source

Yutthana Kanthaphayao and Chalernpol Rueangepattanawiwat*

Faculty of Engineering and Achitecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi
217 Nonthaburi Road, Suanyai, District Nonthaburi, Nonthaburi 11000

Received 7 September 2020; Revised 16 February 2021; Accepted 5 May 2021

Abstract

In this article, the construction of a high-frequency, high-voltage commercial flyback transformer to supply an input voltage for a tesla transformer is proposed. The purpose of a demonstration is a breakdown through the air gap of electrode. To confirm the proposed method, the design of control of a flyback converter by using a commercial flyback transformer is rated with a 10 to 15 kV output voltage to supply a tesla transformer at a rated 30 kV and 120 kHz. The experimental results of an output breakdown, design of the electrode, and the setting for a 1 cm space are constructed. The electrodes consisted of the following: sphere–sphere electrode, plane–plane electrode, sphere–plane electrode, and rod–plane electrode. It was found that there was a breakdown at the output electrode in all cases. Accordingly, there was a breakdown with a 2 cm sphere diameter with reference to the IEC 60052-2002 standard; after that, it was compared with the standard table, and the atmospheric and temperature at the laboratory were adjusted, resulting to a high voltage equal to 31.5 kV.

Keywords : Commercial Flyback Transformer; Breakdown; Tesla Transformer; Electrode; Sphere Gap

* Corresponding Author. Tel.: +668 7977 9032, E-mail Address: chalernpol.r@rmutsb.ac.th

1. บทนำ

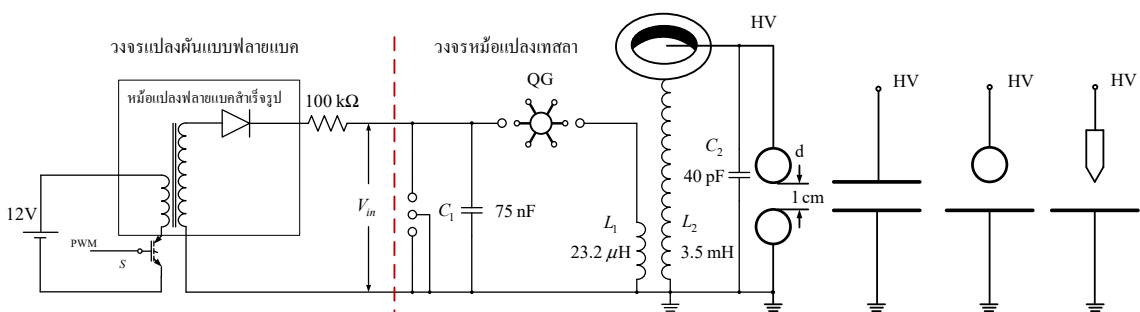
แหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ใช้หลักการเรโซแนนซ์เพื่อสร้างไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงถูกพัฒนามาตั้งแต่ในอดีตถึงปัจจุบัน [1]-[7] และถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย ยกตัวอย่างเช่น การทดสอบปรากฏการณ์ดิสชาร์จของฉนวน การสร้างโอโซน กระบวนการฆ่าเชื้อในอาหาร เป็นต้น ใน [1] ได้ศึกษาผลกระทบของตัวเก็บประจุที่แฝงอยู่ในขดลวดแรงต่ำและแรงสูง ใน [2], [3] ได้นำเสนอหลักการควบคุมสวิตช์แทนสปาร์กแก๊ปสำหรับการสร้างแรงดันสูงความถี่สูง ในการวิเคราะห์การตอบสนองด้านเอาต์พุต เกี่ยวกับไฟฟ้าสถิตย์และการตอบสนองภาวะชั่วคราวได้อธิบายไว้ใน [4], [5] ส่วนใน [6] ได้ออกแบบขดลวดด้านแรงต่ำและแรงสูงรวมถึงการวิเคราะห์การรั่วของความเหนียวและตัวเก็บประจุแฝงทั้งด้านอินพุตและเอาต์พุต และใน [7] ได้อธิบายข้อดีของหม้อแปลงเตสลาเมื่อเทียบกับการสร้างแรงดันสูงด้วยวิธีของมาร์ก สำหรับการวิเคราะห์การเบรกดาวนของอิเล็กทรอนิกส์ได้นำเสนอไว้ใน [8], [9] ประเด็นที่นำเสนอการเกิดเบรกดาวนของอิเล็กทรอนิกส์รูปทรงต่างๆ เช่น ทรงกลม-ทรงกลม ปลายแหลม-ระนาบ เป็นต้น

ในบทความนี้ได้ศึกษาและนำเสนอแหล่งจ่ายด้านอินพุตของวงจรหม้อแปลงเตสลา โดยใช้วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงเป็นตัวสร้างแรงดันสูงให้กับวงจร ซึ่งแรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันใช้แบตเตอรี่ขนาดแรงดัน 12 โวลต์ ผลลัพธ์ที่ได้ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงโดยใช้หลักการของ

วงจรหม้อแปลงเตสลาสามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวกและเป็นต้นแบบขนาดเล็กสำหรับการศึกษาการเกิดเบรกดาวนของอิเล็กทรอนิกส์ และมีต้นทุนการสร้างต่ำ รวมถึงวงจรการสร้างไม่ยุ่งยากและซับซ้อน สำหรับการสร้างวงจรการสร้างไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงด้วยหลักการของวงจรหม้อแปลงเตสลาประกอบด้วย 2 ส่วน คือ วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบฟลายแบค [10] ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายด้านอินพุตของวงจรหม้อแปลงเตสลา และการออกแบบอิเล็กทรอนิกส์สำหรับทดสอบการเกิดเบรกดาวนของสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ไม่สม่ำเสมอ เล็กน้อย และไม่สม่ำเสมอสูง เพื่อยืนยันความถูกต้องการสร้างแรงดันสูงมีรายละเอียดดังหัวข้อต่อไปนี้

2. วิธีดำเนินการวิจัย

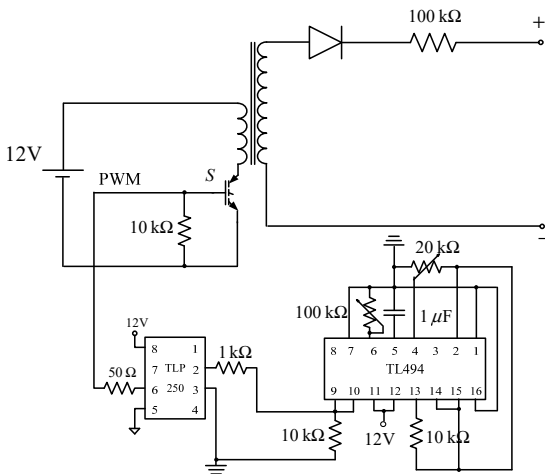
หลักการออกแบบการสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง ด้วยการนำหม้อแปลงฟลายแบคสำเร็จรูปมาทำหน้าที่แทนหม้อแปลงในวงจรแปลงผันแบบฟลายแบค ซึ่งแรงดันเอาต์พุตสามารถนำมาทำหน้าที่สำหรับเป็นแหล่งจ่ายให้กับวงจรหม้อแปลงเตสลา ซึ่งต้องการแรงดันอินพุตประมาณ 10-15 กิโลโวลต์ ในบทความนี้ได้ทดสอบการเบรกดาวนผ่านอากาศของอิเล็กทรอนิกส์โดยกำหนดตำแหน่งของอิเล็กทรอนิกส์มีระยะห่างกัน 1 เซนติเมตร สำหรับการทดสอบการเบรกดาวน ประกอบด้วยอิเล็กทรอนิกส์ ทรงกลม-ทรงกลม ทรงกลม-ระนาบ และปลายแหลม-ระนาบ สำหรับรายละเอียดการออกแบบจะแสดงดังหัวข้อต่อไปนี้



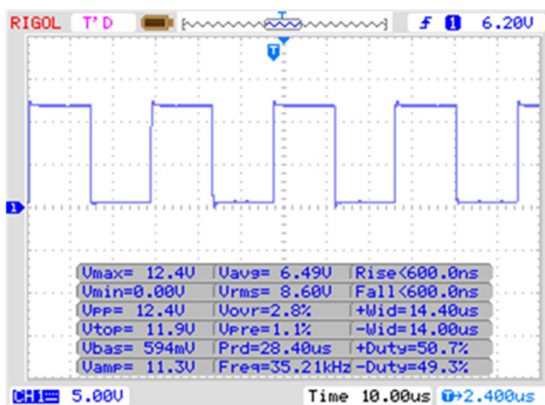
รูปที่ 1 วงจรแปลงผันแบบฟลายแบคและวงจรหม้อแปลงเตสลาที่นำเสนอ

2.1 การออกแบบวงจรแปลงผันแบบฟลายแบค

ในรูปที่ 1 แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือวงจรแปลงผันแบบฟลายแบค [10] และวงจรหม้อแปลงเทสลา ออกแบบที่พิกัดแรงดัน 30 กิโลโวลต์ ความถี่ 120 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งทำหน้าที่สร้างแรงดันสูงความถี่สูงสำหรับการทดสอบการเบรกดาวน สำหรับรายละเอียดการออกแบบของแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 2 วงจรแปลงผันแบบฟลายแบค



รูปที่ 3 รูปคลื่นสัญญาณวัฏจักรงานเท่ากับร้อยละ 50

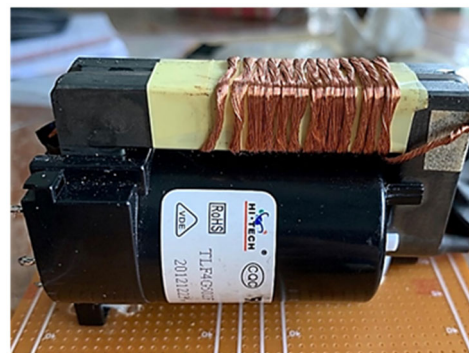
ในรูปที่ 2 แสดงวงจรแปลงผันแบบฟลายแบค รายละเอียดการออกแบบในงานวิจัยนี้ใช้หม้อแปลงฟลายแบคสำเร็จรูป รุ่น TLF4G502F กำหนดให้แรงดัน

อินพุต 12 โวลต์ ความถี่การสวิตช์ 35 กิโลเฮิร์ตซ์ และแรงดันเอาต์พุต เพื่อเป็นแหล่งจ่ายให้กับวงจรหม้อแปลงเทสลาซึ่งต้องการไฟฟ้าแรงดันสูงประมาณ 10-15 กิโลโวลต์ [11] สำหรับการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบฟลายแบคเป็นระบบควบคุมแบบวงรอบเปิดโดยการสร้างสัญญาณควบคุมการทำงานด้วยไอซีสำเร็จรูป TL494 ซึ่งแรงดันเอาต์พุต (V_o) เป็นไปตามสมการที่ 1 เมื่อ D คือ วัฏจักรงาน N_1 คือ จำนวนรอบขดลวดด้านปฐมภูมิ N_2 คือ จำนวนรอบขดลวดด้านทุติยภูมิ และ V_{in} คือ แรงดันอินพุตใช้แบตเตอรี่ 12 โวลต์

$$V_o = V_{in} \frac{D}{1-D} \left(\frac{N_2}{N_1} \right) \quad (1)$$

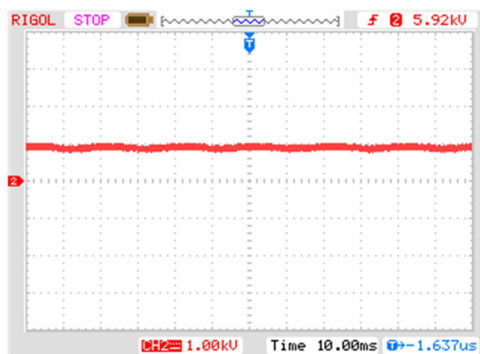
$$F_{sw} = \frac{1.1}{R_T C_T} \quad (2)$$

การสร้างความถี่การสวิตช์ออกแบบด้วยการปรับค่าความต้านทานที่ขา 6 ของไอซี TL494 ซึ่งความถี่ที่ได้รับเป็นไปตามสมการที่ 2 เมื่อกำหนดให้ตัวเก็บประจุ C_T เท่ากับ $1 \mu F$ และสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลชันสามารถปรับค่าวัฏจักรงานที่ความต้านทานที่ขา 4 ของไอซี TL494 และเมื่อปรับวัฏจักรงานไปที่ร้อยละ 50 แสดงดังรูปที่ 3 ถูกนำมาใช้สำหรับการขับสวิตช์กำลังของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า เมื่อได้สัญญาณควบคุมจากไอซี TL494 จะผ่านการแยกโดดด้วยไอซี TLP250 แสดงดังรูปที่ 2

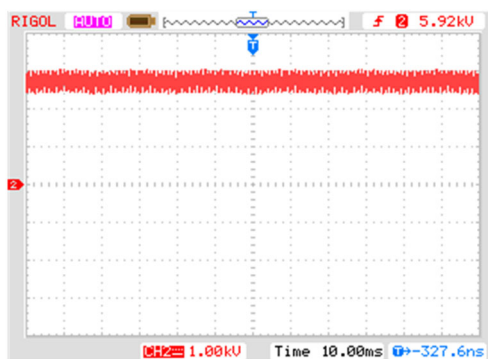


รูปที่ 4 หม้อแปลงฟลายแบคสำเร็จรูป

เนื่องจากการใช้หม้อแปลงฟลายแบคสำเร็จรูป ไม่ทราบจำนวนรอบขดลวดทั้งด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ ดังนั้นจึงทดสอบด้วยการพันขดลวดด้านปฐมภูมิจำนวน 13 รอบ ด้วยตัวนำแบบเส้นตัวนำตีขนานแบบลิตซ์วาย (Litz wire) แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 5 แรงดันด้านเอาต์พุตเมื่อกำหนดให้วัฏจักรงาน เท่ากับร้อยละ 10



รูปที่ 6 แรงดันด้านเอาต์พุตเมื่อกำหนดให้วัฏจักรงาน เท่ากับร้อยละ 80

ทดสอบป้อนแรงดันอินพุตไฟฟ้ากระแสตรง เท่ากับ 1 โวลต์ ให้กับวงจรแปลงผันแบบฟลายแบคและ กำหนดให้ค่าวัฏจักรงาน เท่ากับร้อยละ 10 ไปจนถึง ร้อยละ 80 เพื่อประเมินแรงดันเอาต์พุตให้ได้ตามเงื่อนไข ประมาณ 10-15 กิโลโวลต์ บันทึกผลแสดงดังตารางที่ 1 สำหรับ เครื่องมือ การ วัด ผล ทด สอบ ใช้ ออสซิลโลสโคป RIGOL โมเดล DS 1102E และดิจิทัล

มัลติมิเตอร์ PROTEK ผ่าน โพรบ X 1000 PINTEK รุ่น HVP 40 มีอัตราส่วน 1 โวลต์ : 1000 โวลต์ ผลการวัด แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ค่าวัฏจักรงานร้อยละ 50 เท่ากับ 2.1 กิโลโวลต์ ขณะไม่มีโหลด ดังนั้น จะได้ความสัมพันธ์ ระหว่างแรงดันอินพุตกับเอาต์พุต มีค่าเท่ากับ 1 โวลต์ : 2.1 กิโลโวลต์ และตัวอย่างแรงดันด้านเอาต์พุตของ วัฏจักรงานร้อยละ 10 และ 80 แสดงดังรูปที่ 5 และ 6 ตามลำดับ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า เมื่อป้อนแรงดันอินพุตของ วงจรแปลงผันเท่ากับ 12 โวลต์ และกำหนดวัฏจักรงาน เท่ากับร้อยละ 50 จะได้แรงดันเอาต์พุตเพื่อป้อนให้กับ หม้อแปลงเทสลาประมาณ 25.2 กิโลโวลต์ จากผลที่ ได้รับการควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันแบบ ฟลายแบคจึงออกแบบให้สามารถปรับค่าวัฏจักรงานที่ ขา 4 ของไอซี TL494 ได้โดยการปรับความต้านทาน เพื่อควบคุมแรงดันเอาต์พุต สำหรับการทดสอบการ เบรกดาวน์ด้านเอาต์พุตของวงจรหม้อแปลงเทสลา

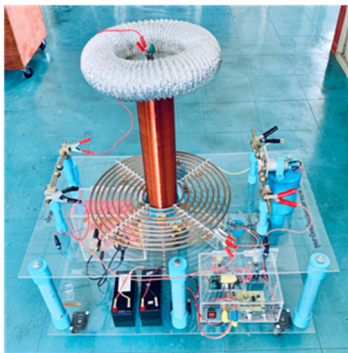
ตารางที่ 1 ผลการทดสอบการทำงานของวงจรแปลงผัน แบบฟลายแบคเมื่อป้อนแรงดันอินพุตเท่ากับ 1 โวลต์

ที่	วัฏจักรงาน (%)	แรงดันเอาต์พุต (kV)
1	10	1
2	20	1.5
3	30	1.6
4	40	1.9
5	50	2.1
6	60	2.1
7	70	2.2
8	80	2.9

2.2 วงจรหม้อแปลงเทสลา

จากรูปที่ 1 ในส่วนของวงจรหม้อแปลงเทสลา [11] เป็นวงจรสำหรับการสร้างไฟฟ้าแรงสูงความถี่สูง ในห้องทดสอบ ใช้หลักการทำงานของวงจรหม้อแปลง เทสลาใช้แรงดันอินพุตประมาณ 10-15 กิโลโวลต์ การ

ทำงานของวงจรหม้อแปลงเตสลาเมื่อป้อนแรงดันอินพุตผ่านตัวความต้านทานเพื่อจำกัดกระแส ตัวเก็บประจุ C_1 จะทำหน้าที่อัดประจุซึ่งขนาดแรงดันจะถูกจำกัดด้วยระยะห่างของสปาร์กแกปและการดับอาร์คที่สปาร์กแกปจะอาศัยหลักการยึดล่ออาร์คให้ห่างออกจากกันด้วยการดับอาร์ก แบบกึ่งตัน เมื่อเกิดที่สปาร์กที่แกป แรงดันที่ตัวเก็บประจุ C_1 จะถูกป้อนให้กับขดลวดด้านปฐมภูมิ (L_1) จึงทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงานระหว่างตัวเก็บประจุ L_1 กับ C_1 ซึ่งมีลักษณะเกิดการแกว่งกวัดด้วยความถี่สูงและเกิดการถ่ายเทพลังงานทางสนามแม่เหล็กผ่านแกนอากาศไปขดลวดด้านทุติยภูมิ (L_2) ซึ่งถูกต่อขนานด้วยตัวเก็บประจุ C_2 ซึ่งเป็นค่าความจุไฟฟ้ารวมของขดลวดแรงสูง อุปกรณ์การวัด และวัสดุทดสอบสำหรับความถี่การแกว่งกวัดด้านปฐมภูมิ (f_{01}) และด้านทุติยภูมิ (f_{02}) ของวงจรหม้อแปลงเตสลาแสดงดังสมการที่ 3 และ 4 และในกรณีที่ปรับวงจรให้ $L_1 C_1 = L_2 C_2$ จะเป็นผลให้ความถี่ด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิเท่ากันขนาดของวงจรหม้อแปลงเตสลาที่ออกแบบมีขนาดแรงดันเอาต์พุต 30 กิโลโวลต์ ความถี่ 120 กิโลเฮิร์ตซ์ รายละเอียดการออกแบบสามารถพิจารณาได้จาก [11], [12]



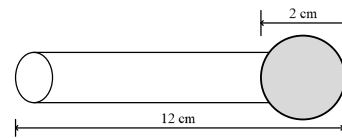
รูปที่ 7 ต้นแบบวงจรหม้อแปลงเตสลา

สำหรับภาพถ่ายวงจรหม้อแปลงเตสลาแสดงดังรูปที่ 7 มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบการเบรกดาวน์ผ่านอากาศของอิเล็กโทรดที่มีความเข้มสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย และไม่สม่ำเสมอสูง ซึ่งความเครียด

สนามไฟฟ้าประมาณ 30 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร จะเกิดไอออนไนเซชัน ดังนั้นการทดสอบการเบรกดาวน์จะกำหนดระยะแกปของอิเล็กโทรด 1 เซนติเมตร สำหรับทดสอบการเบรกดาวน์

$$f_{01} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} \quad (3)$$

$$f_{02} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C_2}} \quad (4)$$

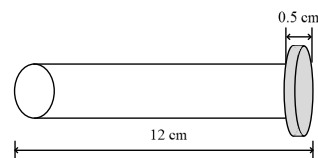


ก) แบบอิเล็กโทรดแบบทรงกลม



ข) ภาพถ่ายอิเล็กโทรดแบบทรงกลม

รูปที่ 8 อิเล็กโทรดแบบทรงกลม

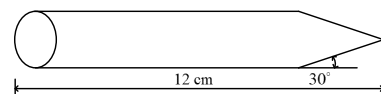


ก) แบบอิเล็กโทรดแบบระนาบ



ข) ภาพถ่ายอิเล็กโทรดแบบระนาบ

รูปที่ 9 อิเล็กโทรดแบบระนาบ



ก) แบบอิเล็กโทรดแบบปลายแหลม



ข) ภาพถ่ายอิเล็กโทรดแบบปลายแหลม

รูปที่ 10 อิเล็กโทรดแบบปลายแหลม

3. การออกแบบอิเล็กทรอนิกส์

สำหรับอิเล็กทรอนิกส์เพื่อวัดขนาดแรงดันด้านเอาต์พุตของวงจรหม้อแปลงเตสลาตามมาตรฐานของ IEC 600052-2002 [13] ในบทความนี้ได้ออกแบบเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกลมขนาด 2 เซนติเมตร ส่วนการทดสอบการเบรกดาวนผ่านอากาศของอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความเข้มสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย และไม่สม่ำเสมอสูง [11] ได้ออกแบบอิเล็กทรอนิกส์ดังต่อไปนี้ ทรงกลม ระบาย และปลายแหลม แสดงดังรูปที่ 8 ถึง 10

4. ผลการวิจัย

4.1 การวัดแรงดันสูงด้วยอิเล็กทรอนิกส์ทรงกลม – ทรงกลม ที่ระยะแกป 1 เซนติเมตร

สำหรับการวัดไฟฟ้าแรงสูงด้วยแกปทรงกลมตามมาตรฐาน IEC60052-2002 โดยออกแบบให้แกปทรงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร และวางระยะแกปห่าง 1 เซนติเมตร มีค่าแรงดันที่ทำให้เกิดการสปาร์กที่แกปทรงกลมเท่ากับ 30.7 กิโลโวลต์ เมื่อปรับค่าแรงดันเบรกดาวนให้ตรงกับสภาพแวดล้อมขณะวัด ดังนั้นสามารถคำนวณค่าแรงดันเบรกดาวนที่แท้จริงได้ดังสมการที่ 5 ถึง 7

$$U_b = U_{bn} \times k_h \quad (5)$$

$$k_h = 1 + \left[0.002 \left(\frac{h}{\delta} - 8.5 \right) \right] \quad (6)$$

$$\delta = \frac{b}{b_n} \frac{273 + t_n}{273 + t} \quad (7)$$

โดยที่

U_b คือ แรงดันที่ทำให้เกิดการสปาร์กที่แกปทรงกลม

U_{bn} คือ ค่าแรงดันเบรกดาวนที่สภาวะมาตรฐาน

h คือ ความชื้นสัมบูรณ์เป็น (กรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

t_n คือ อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

t คือ อุณหภูมิของห้องในขณะที่วัด (องศาเซลเซียส)

b คือ ความดันบรรยากาศ 1013 mbar

b_n คือ ความดันของอากาศอ่านจากบาโรมิเตอร์ (bar)

จากข้อมูลที่ได้รับขณะทำการวัดแรงดันด้วยแกปทรงกลม สถานที่ทดสอบวัดอุณหภูมิได้เท่ากับ 26 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศเท่ากับ 1014 mbar ความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศในเทอมอุณหภูมิเทอร์โมมิเตอร์กระเปาะแห้งมีค่าอุณหภูมิเท่ากับ 26 องศาเซลเซียส และกระเปาะเปียกมีค่าอุณหภูมิเท่ากับ 24 องศาเซลเซียส และสามารถอ่านค่าจากกราฟความชื้นสัมบูรณ์อากาศได้เท่ากับ 21 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ดังนั้นค่าแรงดันเบรกดาวนที่แท้จริงมีค่าเท่ากับ 31.5 กิโลโวลต์ มีรายละเอียดการคำนวณดังนี้

$$\delta = \frac{1013}{1014} \frac{273 + 20}{273 + 26} = 0.98 \quad (8)$$

$$k_h = 1 + \left[0.002 \left(\frac{21}{0.98} - 8.5 \right) \right] = 1.026 \quad (9)$$

$$U_b = 30.7 \times 1.026 = 31.5 \text{ kV} \quad (10)$$

และรูปที่ 11 แสดงภาพถ่ายขณะเกิดการสปาร์กที่แกปทรงกลม



รูปที่ 11 ปรากฏการณ์ขณะเกิดสปาร์กที่แกปทรงกลม

4.2 การทดสอบการเบรกดาวนของสนามไฟฟ้า

สำหรับการทดสอบการเบรกดาวนของสนามไฟฟ้ากำหนดระยะแกประหว่างอิเล็กโทรดห่างกัน 1 เซนติเมตร ตามเงื่อนไขของอิเล็กโทรดทรงกลมและวัฏจักรงานเท่ากับร้อยละ 60 เพื่อให้ได้แรงดันสูงเป็นแหล่งจ่ายให้กับหม้อแปลงเตสลา การทดสอบการเบรกดาวนของสนามไฟฟ้า กรณีสนามไฟฟ้ามีความเข้มสม่ำเสมอ ไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย และไม่สม่ำเสมอสูง ถูกแทนด้วยรูปทรงอิเล็กโทรด [11] ดังต่อไปนี้

4.2.1 อิเล็กโทรดแบบระนาบ-ระนาบ

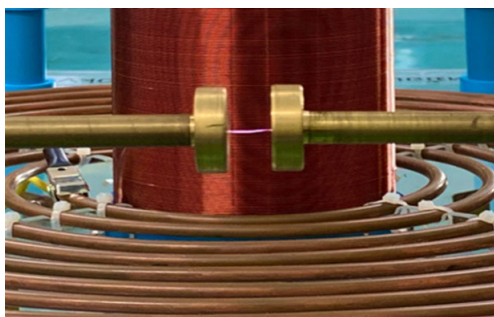
ในกรณีที่สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอจะแทนด้วยอิเล็กโทรดแบบระนาบ-ระนาบ ผลการทดสอบการเกิดเบรกดาวนแสดงปรากฏการณ์ขณะเกิดการสปาร์กที่แกปแสดงดังรูปที่ 12

4.2.2 อิเล็กโทรดแบบทรงกลม-ระนาบ

ในกรณีที่สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยจะแทนด้วยอิเล็กโทรดทรงกลม-ระนาบ ผลการทดสอบการเกิดเบรกดาวนขณะเกิดการสปาร์กที่แกปแสดงดังรูปที่ 13

4.2.3 อิเล็กโทรดแบบปลายแหลม-ระนาบ

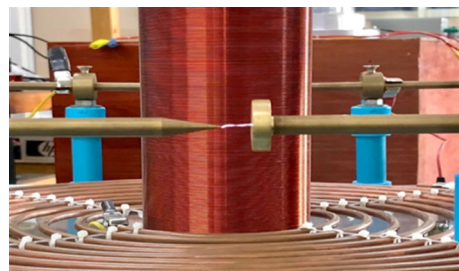
ในกรณีที่สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง จะแทนด้วยอิเล็กโทรดปลายแหลม-ระนาบ ผลการทดสอบการเกิดเบรกดาวนขณะเกิดการสปาร์กที่แกป ดังรูปที่ 14



รูปที่ 12 ปรากฏการณ์ขณะเกิดการสปาร์กที่อิเล็กโทรดระนาบ-ระนาบ



รูปที่ 13 ปรากฏการณ์ขณะเกิดการสปาร์กที่อิเล็กโทรดทรงกลม-ระนาบ



รูปที่ 14 ปรากฏการณ์ขณะเกิดการสปาร์กที่อิเล็กโทรดปลายแหลม-ระนาบ

5. สรุปผล

บทความนี้นำเสนอการสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง สำหรับทดสอบการเบรกดาวนระหว่างอิเล็กโทรด ประกอบด้วยวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบฟลายแบค สำหรับเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงให้วงจรหม้อแปลงเตสลา ผลการทดสอบเมื่อกำหนดให้วัฏจักรงานเท่ากับร้อยละ 60 เพื่อควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันแบบฟลายแบค และใช้แกปทรงกลมขนาด 2 เซนติเมตร กำหนดระยะแกปเท่ากับ 1 เซนติเมตร เพื่อวัดขนาดไฟฟ้าแรงสูงตามมาตรฐาน IEC60052-2002 พบว่าขณะเกิดการสปาร์กมีไฟฟ้าแรงสูงเมื่อปรับเทียบตามมาตรฐานได้แรงดันเท่ากับ 31.5 กิโลโวลต์ ในกรณีทดสอบการเกิดเบรกดาวนที่อิเล็กโทรดกำหนดระยะแกป 1 เซนติเมตร ประกอบด้วยอิเล็กโทรดระนาบ-ระนาบ ทรงกลม-

ระนาบ และปลายแหลม-ระนาบ เกิดการสปาร์กที่แกป ทุกกรณี ยิ่งกว่านั้นวงจรหม้อแปลงเทสลาที่สร้างขึ้นมี ต้นทุนต่ำ และยังสามารถนำมาสาธิตการเกิดเบรกดาวน์ สำหรับการเรียนการสอนในรายวิชาวิศวกรรม ไฟฟ้าแรงสูง เพื่อให้นักศึกษาเห็นภาพกระบวนการเบรก ดาวน์ผ่านอากาศ ของสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ไม่สม่ำเสมอ เล็กน้อย และไม่สม่ำเสมอสูง

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ นายธงชัย พันธุ์เลิศสกุล นายธนา รัชก์ ฤทธิ์นาคา และนายธีรภัทร์ ศุภมณี ที่ประกอบชุด การทดสอบ

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Eduard M. M. Costa, “Resonance on Coils Excited by Square Waves: Explaining Tesla Transformer,” *IEEE Transactions on Magnetism*, vol. 46, no. 5, pp. 1186-1192, May 2010.
- [2] Y. Liu, L. Lee, Y. Bing, Y. Ge, W. Hu and F. Lin, “Resonant Charging Performance of Spiral Tesla Transformer Applied in Compact High-Voltage Repetitive Nanosecond Pulse Generator,” *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 41, no. 12, pp. 3651-3658, Dec. 2013.
- [3] L. Li, M. Ning, C. Dehuai, L. Lun, K. Qiang, L. Mingjia, C. Yong and P. Yuan, “Study on Double Resonant Performance of Air-core Spiral Tesla Transformer Applied in Repetitive Pulsed Operation,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 22, no. 4, pp. 1916-1923, Aug. 2015.
- [4] R. M. Craven, I. R. Smith and B. M. Novac, “Optimizing the Secondary Coil of a Tesla Transformer to Improve Spectral Purity,” *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 42, no. 1, pp. 1-4 Jan. 2014.
- [5] B. M. Novac, M. Wang, I. R. Smith and P. Senior, “A 10 GW Tesla-Driven Blumlein Pulsed Power Generator,” *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 42, no. 10, pp. 2876-2885, Oct. 2014.
- [6] L. Pécastaing, M. Rivaletto, A. S. de Ferron, R. Pecquois and B. M. Novac, “Development of a 0.6-MV Ultracompact Magnetic Core Pulsed Transformer for High-Power Applications,” *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 46, no. 1, pp. 156-166, Jan. 2018.
- [7] Y. Z h a o, W. Xie, J. Jiang, L. Chen, S. Feng, M. Wang and Z. Wang, “Replacement of Marx Generator by Tesla Transformer for Pulsed Power System Reliability Improvement,” *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 47, no. 1, pp. 574-580, Jan. 2019.
- [8] A. Denat, O. Lesaint and F. M. Cluskey, “Breakdown of Liquids in Long Gaps: Influence of Distance, Impulse Shape, Liquid Nature, and Interpretation of Measurements,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 22, no. 5, pp. 2581-2591, Oct. 2015.
- [9] T. Namhormchan, “Field Utilization Factor of Electrode for Breakdown Voltage Test for Liquid Insulation According to IEC 60156

- Standard,” *The Journal of KMUTNB*, vol. 21, no. 3, pp. 541-548, Sep. - Dec. 2011.
- [10] A. Yawootti and P. Wimonthanasit, “High Voltage Power Supply from Commercial Flyback Transformer,” *Journal of Engineering RMUTT*, vol. 16, no. 2, pp. 107-118, Jul. – Dec. 2018.
- [11] Samruay Sangkasaad, *High Voltage Engineering*, 3rd edition, 2006.
- [12] M. Tilbury, *The ultimate Tesla Coil Design and Construction Guide*, United States of America: McGraw-Hill Companies, 2008.
- [13] *Voltage measurement by means of standard air gap*, IEC 2002-60052.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

การพัฒนาต้นแบบเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลและแอลพีจีเป็นเชื้อเพลิง สำหรับการเกษตร

ชัยยง ศิริพรมงคลชัย*

คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
217 ถนนนนทบุรี ตำบลสวนใหญ่ อำเภอเมือง จังหวัดนนทบุรี 11000

รับบทความ 4 ตุลาคม 2563 แก้ไขบทความ 27 กุมภาพันธ์ 2564 ตอรับบทความ 5 พฤษภาคม 2564

บทคัดย่อ

จากการวิจัยเรื่อง นวัตกรรมต้นแบบเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลและแอลพีจีเป็นเชื้อเพลิงสำหรับการเกษตร ที่ผู้วิจัยจัดทำไว้เมื่อปี พ.ศ. 2562 พบปัญหาที่เกิดขึ้นขณะใช้งานเครื่องยนต์ คือ เมื่อใช้งานในแบบเครื่องยนต์แก๊สโซลีน พบว่าความร้อนสะสมที่ห้องเผาไหม้เสริมจนมีอุณหภูมิสูงประมาณ 300 องศาเซลเซียส และเมื่อใช้งานในแบบเครื่องยนต์ดีเซล พบว่าเกิดโอเลียมควันสีดำมากที่ความเร็วรอบสูงเกินกว่า 1,800 รอบต่อนาที เพื่อต่อยอดงานวิจัยและแก้ปัญหาสองประการข้างต้น งานวิจัยครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) พัฒนาห้องเผาไหม้เสริมในด้านการระบายความร้อน 2) พัฒนาอุปกรณ์ผสมก๊าซกับอากาศให้ปรับขนาดได้ และ 3) เปรียบเทียบอัตราการใช้เชื้อเพลิงน้ำมันดีเซลและแอลพีจี โดยการนำเครื่องยนต์เล็กดีเซล ยี่ห้อ Yanmar รุ่น TF120DI มาดัดแปลงติดตั้งระบบเชื้อเพลิงแอลพีจี ระบบจุดระเบิด ดัดแปลงและพัฒนาอุปกรณ์ผสมก๊าซกับอากาศ สร้างและพัฒนาห้องเผาไหม้เสริมทำหน้าที่ลดอัตราส่วนการอัดลงมาเท่ากับเครื่องยนต์แก๊สโซลีน สำหรับติดตั้งเข้าแทนที่ในตำแหน่งของหัวฉีดน้ำมันดีเซลเดิม ทำให้สามารถรองรับการใช้แอลพีจีเป็นเชื้อเพลิงอย่างเดียวได้ ซึ่งเป็นลักษณะการทำงานในแบบเครื่องยนต์แก๊สโซลีน การกลับไปใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิงนั้นสามารถทำได้โดยการถอดห้องเผาไหม้เสริมออกแล้วติดตั้งหัวฉีดน้ำมันดีเซลแทนที่ห้องเผาไหม้เสริม ซึ่งเป็นลักษณะการทำงานในแบบเครื่องยนต์ดีเซล จากการทดลองเปรียบเทียบเครื่องยนต์ดัดแปลงขณะทำงานแบบเครื่องยนต์แก๊สโซลีนพบว่าอุณหภูมิของห้องเผาไหม้เสริมและอุณหภูมิของฝาสูบเครื่องยนต์เล็กแก๊สโซลีน Honda GX160 ตรวจวัดที่ความเร็วรอบสูงสุด ได้ 182 และ 186 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และพบว่าในโอเลียมปริมาณคาร์บอนนอกโซ่ร้อยละ 0.41 ไฮโดรคาร์บอน 1,315 ส่วนในล้านส่วน เมื่อใช้งานในแบบเครื่องยนต์ดีเซล พบว่ามีค่าควันดำร้อยละ 1.5 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับเครื่องยนต์ดีเซลก่อนดัดแปลง จากการทดลองใช้เป็นเครื่องยนต์ต้นกำลังในการสูบน้ำด้วยท่อพญานาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 8 นิ้ว ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์คงที่ 1,000 รอบต่อนาที พบว่าใช้น้ำมันดีเซลเฉลี่ย 0.65 กิโลกรัมต่อชั่วโมง หรือประมาณ 0.77 ลิตรต่อชั่วโมง คิดเป็นค่าใช้จ่าย 21.00 บาทต่อชั่วโมง และหากใช้แอลพีจีเป็นเชื้อเพลิงจะใช้แอลพีจีเฉลี่ย 0.57 กิโลกรัมต่อชั่วโมง คิดเป็นค่าใช้จ่าย 13.71 บาทต่อชั่วโมง ซึ่งสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้ถึงร้อยละ 34.71

คำสำคัญ : เครื่องยนต์ดีเซล; เครื่องยนต์แก๊สโซลีน; ห้องเผาไหม้เสริม; อุปกรณ์ผสมก๊าซกับอากาศ; แอลพีจี

<http://journal.rmutp.ac.th/>

The Development of Engine Prototype Powered by Diesel and LPG as Fuel for Agriculture

Chaiyong Siripornmongkolchai*

Faculty of Industrial Education, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi
217 Nonthaburi Road, Suan Yai Sub-district, Mueang District, Nonthaburi Province 11000

Received 4 October 2020; Revised 27 February 2021; Accepted 5 May 2021

Abstract

According to the research entitled “the innovative engine prototype powered by diesel and LPG as fuel for agricultural” in 2019, the problems found while using the engine were as follows: the accumulated heat in the auxiliary combustion chamber reached 300 °C in case of gasoline engine use and a lot of black smoke in the exhaust was found at the speed higher than 1,800 rpm in case of a diesel engine use. In order to extend the research and solve two foresaid problems, the objectives of this study were 1) to develop an auxiliary combustion chamber for cooling, 2) to develop a scalable gas-air mixing device, and 3) to compare diesel and LPG consumption rates, by modifying a small diesel engine, Yanmar version TF120DI to install LPG fuel systems and ignition system. In addition, a gas-air mixing device was modified while an auxiliary combustion chamber was developed to reduce the compression ratio to the same level as the gasoline engine for replacing the position of the original diesel fuel injector. This method could support LPG fueling only whose function was characterized by the function of a gasoline engine. The auxiliary combustion chamber could be removed and then installed a diesel injector to return using diesel fuel. From an experiment to compare the modified engine operating as a gasoline engine, it was found that the temperature of the auxiliary combustion chamber and the temperature of the engine cylinder head of Honda GX160 were measured at the maximum speed of 182 °C and 186 °C respectively. It was found that carbon monoxide content was 0.41 % and 1,315 ppm hydrocarbons. When used as a diesel engine, it was found that the black smoke was exhausted at 1.5 %, which was similar to the diesel engine before the modification. From the experiment of using the power engine for pumping water with an Irrigation propeller pump with the diameter of 8 inch at a constant engine speed of 1,000 rpm, it was found that the average diesel usage was 0.65 kg/hr or about 0.77 L/hr with the cost of 21.00 Baht/hr, and if using LPG as fuel, the average LPG consumption was 0.57 kg/hr with the cost of 13.71 Baht/hr, which could save up to 34.71 % of costs.

Keywords : Diesel Engine; Gasoline Engine; Auxiliary Combustion Chamber; Gas-air Mixing Device; LPG

* *Corresponding Author. Tel.: +668 9789 3709, E-mail Address: chaiyong_mp@hotmail.com*

1. บทนำ

ปัจจุบันภาคเกษตรกรรมของไทยมีบทบาทและความสำคัญต่อเศรษฐกิจเป็นอย่างมาก โดยการประกอบอาชีพเกษตรกรรมของเกษตรกรไทยมีวิวัฒนาการที่เปลี่ยนไปจากเดิม อันเนื่องจากการนำเทคโนโลยีเข้ามาช่วยทุนแรงและเพิ่มความสามารถในการดำเนินการ การนำเครื่องยนต์เล็กดีเซลเพื่อการเกษตรมาใช้ในงานเกษตรกรรมจึงพบเห็นได้ทั่วไป ทั้งนี้กรณีที่น้ำมันดีเซลมีราคาสูงขึ้น เกษตรกรต้องการลดต้นทุนค่าเชื้อเพลิงจึงมักดัดแปลงชิ้นส่วนภายในของเครื่องยนต์เล็กดีเซลเพื่อการเกษตรให้รองรับการใช้แอลพีจีเป็นเชื้อเพลิงอย่างเดียว ซึ่งแอลพีจีเป็นที่นิยมใช้ทดแทนเชื้อเพลิงเหลวประเภทน้ำมันเบนซิน เนื่องจากในเชิงพาณิชย์มีราคาต่ำกว่าน้ำมันเบนซินและค่าความร้อนใกล้เคียงกับน้ำมันเบนซิน [1] ทั้งนี้เครื่องยนต์ที่ดัดแปลงแล้วไม่สามารถกลับไปใช้น้ำมันดีเซลได้อีกต่อไป [2] ประกอบกับผู้วิจัยได้ศึกษาข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องยนต์ดัดแปลงใช้แอลพีจี พบว่ากลุ่มเกษตรกรมีข้อเสนอแนะว่าควรพัฒนาให้เครื่องยนต์สามารถใช้เชื้อเพลิงได้หลากหลายชนิดในเครื่องยนต์เดียว [3] จึงกล่าวได้ว่ากลุ่มเกษตรกรยังคงมีความต้องการเครื่องยนต์ประเภทนี้

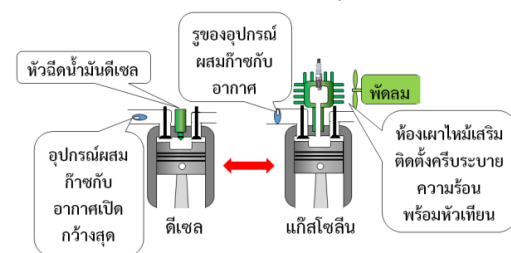
ในปี พ.ศ. 2562 ผู้วิจัยได้ทำวิจัยเรื่อง นวัตกรรมต้นแบบเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลและแอลพีจีเป็นเชื้อเพลิงสำหรับการเกษตร โดยดัดแปลงเครื่องยนต์เล็กเพื่อการเกษตรให้สามารถรองรับการใช้เชื้อเพลิงทั้งน้ำมันดีเซลและแอลพีจีในลักษณะการใช้เชื้อเพลิงทั้งสองชนิดที่แยกเป็นอิสระต่อกัน ซึ่งทำให้เครื่องยนต์เครื่องเดียวกันนี้สามารถใช้น้ำมันดีเซลอย่างเดียวเป็นเชื้อเพลิงและสามารถใช้แอลพีจีอย่างเดียวเป็นเชื้อเพลิงได้ นั่นคือสามารถปรับเปลี่ยนสลับให้เครื่องยนต์เครื่องเดียวกันนี้ทำงานได้ในแบบเครื่องยนต์ดีเซลและทำงานได้ในแบบเครื่องยนต์แก๊สโซลีน ทั้งนี้เพื่อเป็นทางเลือกแก่เกษตรกรในการเลือกใช้เชื้อเพลิงที่มีราคาต่ำตามภาวะความผันผวนของราคาเชื้อเพลิงทั้งสองชนิด [2]

อย่างไรก็ตาม จากการวิจัยเรื่อง นวัตกรรมต้นแบบเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลและแอลพีจีเป็นเชื้อเพลิงสำหรับการเกษตร ยังพบปัญหาที่เกิดขึ้นขณะใช้งานเครื่องยนต์ ดังนี้

1) เมื่อใช้งานในแบบเครื่องยนต์แก๊สโซลีนไปได้ช่วงระยะเวลาหนึ่ง ตรวจสอบพบว่าความร้อนสะสมที่ห้องเผาไหม้เสริมจนมีอุณหภูมิสูงประมาณ 300 องศาเซลเซียส ซึ่งอาจส่งผลต่อการเผาไหม้ที่ผิดปกติ [4]

2) เมื่อใช้งานในแบบเครื่องยนต์ดีเซล พบว่าเกิดไอเสียมีควันสีดำมากที่ความเร็วรอบสูงเกินกว่า 1,800 รอบต่อนาที ทั้งนี้เป็นเพราะอุปกรณ์ผสมก๊าซกับอากาศมีรูขนาดเล็ก ส่งผลให้ประสิทธิภาพเชิงปริมาตรต่ำลง อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงต่ำเกินไปที่ความเร็วรอบสูงเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ จึงเกิดควันดำและสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงน้ำมันดีเซลมาก

ดังนั้น ในการวิจัยครั้งนี้เรื่อง การพัฒนาต้นแบบเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลและแอลพีจีเป็นเชื้อเพลิงสำหรับการเกษตร จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) พัฒนาห้องเผาไหม้เสริมในด้านการระบายความร้อน 2) พัฒนาอุปกรณ์ผสมก๊าซกับอากาศให้ปรับขนาดได้ และ 3) เปรียบเทียบอัตราการใช้เชื้อเพลิงน้ำมันดีเซลและแอลพีจี ซึ่งเป็นการต่อยอดงานวิจัยและแก้ปัญหาทั้งสองประการที่กล่าวมา ตามแนวคิดดังรูปที่ 1

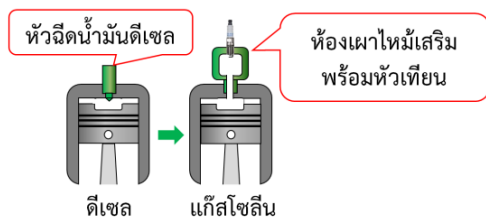


รูปที่ 1 แนวคิดการพัฒนาต้นแบบเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลและแอลพีจีเป็นเชื้อเพลิงสำหรับการเกษตร

2. ระเบียบวิธีวิจัย

ในการวิจัยนี้ใช้เครื่องยนต์เล็กดีเซล ยี่ห้อ Yanmar รุ่น TF120 DI สูบเดียว 4 จังหวะ ปริมาตร

กระบอกสูบ 638 มิลลิเมตร อัตราส่วนการอัด 16.1 ต่อ 1 เป็นเครื่องยนต์ระบบฉีดเชื้อเพลิงเข้าห้องเผาไหม้โดยตรง (Direct Injection) [5] เมื่อจะทำการดัดแปลงเป็นเครื่องยนต์แก๊สโซลีนโดยใช้แอลพีจีเป็นเชื้อเพลิง จึงต้องลดอัตราส่วนการอัดลงเหลือประมาณ 8 ถึง 12 ต่อ 1 โดยการสร้างและติดตั้งห้องเผาไหม้เสริมพร้อมหัวเทียนเข้าแทนที่ในตำแหน่งของหัวฉีดน้ำมันดีเซลเดิม ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ลดอัตราส่วนการอัดโดยการติดตั้งห้องเผาไหม้เสริม

2.1 ดัดแปลงและติดตั้งอุปกรณ์ระบบจุดระเบิด

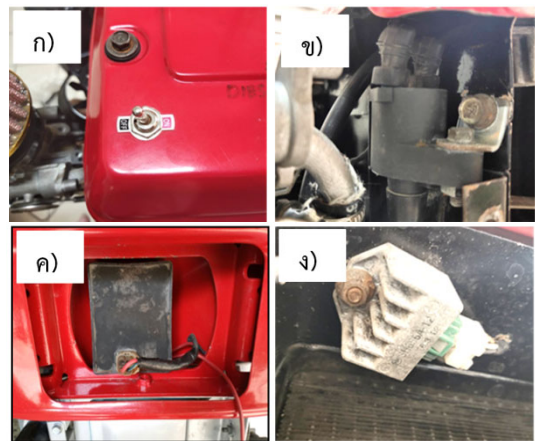
1) ติดตั้งอุปกรณ์กำเนิดสัญญาณจุดระเบิด โดยใช้ขดลวดฟลักเซอร์ของรถจักรยานยนต์ Honda รุ่น Dash125 และเชื่อมต่อแผ่นเหล็กติดกับล้อช่วยแรง โดยการหมุนล้อช่วยแรงตามทิศทางหมุนของเครื่องยนต์ ให้ลูกสูบอยู่ที่ตำแหน่งศูนย์ตายบน จากนั้นหมุนล้อช่วยแรงย้อนกลับประมาณ 10 องศา ก่อนศูนย์ตายบน แล้วเชื่อมต่อแผ่นเหล็กขนาดกว้างประมาณ 1 เซนติเมตร ยาว 3 เซนติเมตร ติดกับล้อช่วยแรง ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 อุปกรณ์กำเนิดสัญญาณจุดระเบิด

2) ติดตั้งอุปกรณ์ระบบจุดระเบิด ได้แก่ เติ้นวงจรไฟจุดระเบิดผ่านสวิทช์ ร่วมกับการใช้คอยล์จุด

ระเบิดและวงจรควบคุมการจุดระเบิดของรถจักรยานยนต์ Honda รุ่น Dash125 ดังรูปที่ 4 ก), 4 ข), 4 ค) ซึ่งเป็นวงจรควบคุมการจุดระเบิดแบบ Alternating Current Capacitor Discharge Ignition (AC-CDI) สามารถทำงานได้ด้วยการใช้กระแสไฟจากอัลเทอร์เนเตอร์ของเครื่องยนต์โดยไม่ต้องใช้กระแสไฟจากแบตเตอรี่ และติดตั้งอุปกรณ์เรียงกระแสไฟ (Rectifier) ของรถจักรยานยนต์ Yamaha รุ่น Mio115 เข้ากับเครื่องยนต์ ดังรูปที่ 4 ง) สำหรับใช้งานกับพัดลมระบายความร้อน



รูปที่ 4 ก) สวิตช์จุดระเบิด ข) คอยล์จุดระเบิด
ค) วงจรควบคุมการจุดระเบิด ง) อุปกรณ์เรียงกระแสไฟ

2.2 ติดตั้งระบบเชื้อเพลิง

1) ติดตั้งหม้อต้มเข้ากับเครื่องยนต์ ดังรูปที่ 5 โดยใช้หม้อต้มสำหรับเครื่องยนต์เล็ก และต่อท่อส่งก๊าซไปยังเรือนลิ้นเร่ง



รูปที่ 5 หม้อต้ม

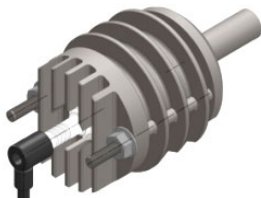
2) ติดตั้งท่อน้ำมันไหลกลับจากปั๊มฉีดเชื้อเพลิง ไปยังถังน้ำมันเชื้อเพลิง ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ท่อน้ำมันไหลกลับ

2.3 ออกแบบ สร้างและพัฒนาชุดห้องเผาไหม้เสริมในด้านการระบายความร้อน

ออกแบบห้องเผาไหม้เสริมเป็นลักษณะ ทรงกระบอกที่มีครีบริบายความร้อน ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ห้องเผาไหม้เสริมทรงกระบอกที่มีครีบริบายความร้อน

สร้างและพัฒนาชุดห้องเผาไหม้เสริมด้วยวัสดุ เหล็ก SNCM 439 ที่มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงถึง 980 เมกกะปาสคาล ซึ่งวัสดุดังกล่าวใช้ในการผลิต สกรู เกียร์ เพลาข้อเหวี่ยง เพลาลูกเบี้ยว ลูกสูบ ชิ้นส่วนของ เครื่องยนต์ที่ต้องการความเหนียวสูง [6] ค่าแนวความหนาของผนังห้องเผาไหม้เสริมโดยใช้ทฤษฎีเกี่ยวกับ ทรงกระบอกบางอยู่ภายใต้ความดันภายใน [7] ดังสมการที่ (1) และ (2)

$$\sigma_H = \frac{Pr}{t} \quad (1)$$

$$\sigma_L = \frac{Pr}{2t} \quad (2)$$

โดยที่

σ_H = ความเค้นตามแนวเส้นรอบวง (ปาสคาล)

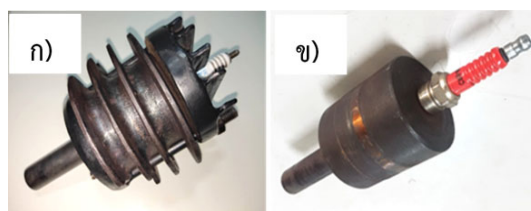
σ_L = ความเค้นตามแนวยาว (ปาสคาล)

t = ความหนาของผนังทรงกระบอกบาง (เมตร)

r = รัศมีเฉลี่ยของทรงกระบอกบาง (เมตร)

P = ความดันที่เกิดขึ้นในทรงกระบอกบาง (ปาสคาล)

โดยกำหนดปริมาตรห้องเผาไหม้เสริมเป็น 26.51 มิลลิลิตร ซึ่งเมื่อนำห้องเผาไหม้เสริมไปติดตั้งแทนที่ในตำแหน่งของหัวฉีดน้ำมันดีเซลเดิม จะได้ค่าอัตราส่วนการอัด 10.28 ต่อ 1 สามารถรองรับการใช้แอลพีจีเป็นเชื้อเพลิงได้ และกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในห้องเผาไหม้เสริม 31 มิลลิเมตร คำนวณและออกแบบให้ห้องเผาไหม้เสริมมีผนังหนา 12 มิลลิเมตร สามารถรองรับความดันได้มากกว่า 6 เมกกะปาสคาล ซึ่งเป็นค่าระดับความดันสูงสุดที่เป็นไปได้ในเครื่องยนต์แก๊สโซลีน [8] พัฒนาห้องเผาไหม้เสริมในด้านการระบายความร้อน ด้วยการติดตั้งครีบริบายความร้อน จะได้ชุดห้องเผาไหม้เสริม ดังรูปที่ 8 ก) ซึ่งแสดงเปรียบเทียบกับห้องเผาไหม้เสริมของการวิจัยครั้งที่ผ่านมามาในปี พ.ศ. 2562 ดังรูปที่ 8 ข)



รูปที่ 8 ก) ห้องเผาไหม้เสริมที่ติดตั้งครีบริบายความร้อน ข) ห้องเผาไหม้เสริมของการวิจัยในปี พ.ศ. 2562

ติดตั้งห้องเผาไหม้เสริมติดตั้งเข้าแทนที่ในตำแหน่งของหัวฉีดน้ำมันดีเซลเดิม ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 ห้องเผาไหม้เสริมติดตั้งเข้าแทนที่ในตำแหน่งของหัวฉีดน้ำมันดีเซลเดิม

ติดตั้งพัฒนาระบายความร้อนของรถจักรยานยนต์ Honda รุ่น CBR150 เข้ากับเครื่องยนต์เพื่อระบายความร้อนของห้องเผาไหม้เสริม ดังรูปที่ 10 ทั้งนี้พัฒนาระบายความร้อนจะทำงานพร้อมกับระบบจุดระเบิดเมื่อสวิตช์จุดระเบิดอยู่ในตำแหน่ง ON



รูปที่ 10 พัฒนาระบายความร้อน

2.4 ออกแบบ สร้างและพัฒนาอุปกรณ์ผสมก๊าซกับอากาศ

อากาศที่ไหลผ่านรูของอุปกรณ์ผสมก๊าซกับอากาศ จะเป็นลักษณะการไหลผ่านคอขวดนั่นเอง ในกรณีนี้จึงมีสมมุติฐานที่ใช้ในการออกแบบ ดังนี้

- ประสิทธิภาพเชิงปริมาตร (Volumetric Efficiency) ของเครื่องยนต์เผาไหม้ภายในแบบประจุไอดีเข้าสู่กระบอกสูบโดยธรรมชาติ (Naturally Aspirated ; NA) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.8 ถึง 0.9 [9] ดังนั้นจึงกำหนดให้ประสิทธิภาพเชิงปริมาตรมีค่า 0.85

- ความเร็วอากาศ ณ จุดคอขวดควรจะอยู่ในช่วง 100 ถึง 150 เมตรต่อวินาที ทั้งนี้เพื่อทำให้ความ

ดันอากาศ ณ จุดคอขวดต่ำลง อันจะเป็นผลทำให้เกิดการดึงเชื้อเพลิงมาผสมกับอากาศได้ดี [10] ดังนั้นจึงกำหนดให้ความเร็วอากาศผ่านรูของอุปกรณ์ผสมก๊าซกับอากาศ มีค่า 125 เมตรต่อวินาที

คำนวณหาอัตราการไหลของอากาศที่เข้าสู่กระบอกสูบ จากสมการที่ (3)

$$\dot{V}_i = \left(\frac{V_h \times n}{2,000 \times 60} \right) \eta_v \quad (3)$$

โดยที่

$\dot{V}_i$ = อัตราการไหลของอากาศที่เข้าสู่กระบอกสูบ (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)

V_h = ปริมาตรกระบอกสูบ = 0.638 ลิตร

n = ความเร็วรอบเครื่องยนต์ = 2,400 รอบต่อวินาที (ที่ความเร็วรอบสูงสุด)

η_v = ประสิทธิภาพเชิงปริมาตร = 0.85

จะได้ $\dot{V}_i = 0.010846$ ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที

และคำนวณความเร็วของอากาศที่เข้าห้องเผาไหม้ จากสมการที่ (4) และ (5)

$$A_i = \frac{\pi d_i^2}{4} \quad (4)$$

$$c_i = \frac{\dot{V}_i}{A_i} \quad (5)$$

โดยที่

c_i = ความเร็วของอากาศที่เข้าห้องเผาไหม้ (เมตรต่อวินาที)

A_i = พื้นที่หน้าตัดช่องทางเข้าสู่ห้องเผาไหม้ (ตารางเมตร)

d_i = เส้นผ่านศูนย์กลางช่องทางเข้าสู่ห้องเผาไหม้ = 0.038 เมตร (จากการวัดขนาดที่เครื่องยนต์)

$$\text{จะได้ } A_i = \frac{\pi 0.038^2}{4}$$

$$A_i = 0.001134 \text{ ตารางเมตร}$$

$$\text{และ } c_i = \frac{0.010846}{0.001134}$$

$$c_i = 9.564 \text{ เมตรต่อวินาที}$$

คำนวณขนาดรูของอุปกรณ์ผสมก๊าซกับอากาศ
จากสมการที่ (6) และ (7)

$$A_v = \frac{A_i c_i}{c_v} \quad (6)$$

$$d_v = \sqrt{\frac{4A_v}{\pi}} \quad (7)$$

โดยที่

d_v = เส้นผ่านศูนย์กลางรูของอุปกรณ์ผสมก๊าซกับอากาศ (เมตร)

A_v = พื้นที่หน้าตัดรูของอุปกรณ์ผสมก๊าซกับอากาศ (ตารางเมตร)

c_v = ความเร็วอากาศผ่านรูของอุปกรณ์ผสมก๊าซกับอากาศ = 125 เมตรต่อวินาที

จะได้

$$A_v = \frac{0.001134 \times 9.564}{125}$$

$$A_v = 0.00008677 \text{ ตารางเมตร}$$

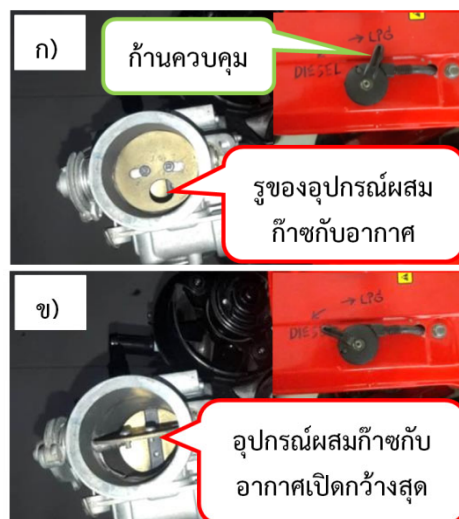
และ

$$d_v = \sqrt{\frac{4 \times 0.00008677}{\pi}}$$

$$d_v = 0.01051 \text{ เมตร}$$

ดังนั้นเลือกใช้ขนาดรูของอุปกรณ์ผสมก๊าซกับอากาศ 11 มิลลิเมตร

พัฒนาอุปกรณ์ผสมก๊าซกับอากาศ โดยใช้ชุดเรือนลิ้นแรงของรถจักรยานยนต์ Honda รุ่น CBR300 ติดตั้งเข้ากับท่อไอเสีย ต่อสายคันเร่งจากลิ้นแรงไปยังคันเร่ง และสร้างลิ้นปีกผีเสื้ออีกหนึ่งอันติดตั้งไว้เหนือลิ้นแรงเพื่อพัฒนาเป็นอุปกรณ์ผสมก๊าซกับอากาศให้สามารถเปิดกว้างสุดได้เมื่อใช้งานในแบบเครื่องยนต์ดีเซล ดังรูปที่ 11 ทั้งนี้โดยการดัดแปลงใช้สายคันเร่งของรถจักรยานยนต์ 2 จังหวะ ซึ่งที่ปลายสายคันเร่งด้านหนึ่งจะต่อเข้ากับก้านควบคุม ส่วนที่ปลายสายอีกด้านหนึ่งแยกเป็นสองจุด จุดหนึ่งต่อเข้ากับอุปกรณ์ผสมก๊าซกับอากาศและอีกจุดหนึ่งต่อเข้ากับลิ้นแรง ดังนั้นเมื่อใช้งานในแบบเครื่องยนต์ดีเซลจะปรับก้านควบคุมให้อุปกรณ์ผสมก๊าซกับอากาศและลิ้นแรงเปิดกว้างสุดได้



รูปที่ 11 ก) อุปกรณ์ผสมก๊าซกับอากาศ เมื่อใช้แอลพีจี

ข) อุปกรณ์ผสมก๊าซกับอากาศเปิดกว้างสุด



รูปที่ 12 เครื่องยนต์ที่ดัดแปลงและติดตั้งอุปกรณ์ที่เสร็จสมบูรณ์

ติดตั้งเรกกูเลเตอร์ (หัววาล์วก๊าซ) เข้ากับถังก๊าซ จึงได้เครื่องยนต์ที่ดัดแปลงและติดตั้งอุปกรณ์ที่เสร็จสมบูรณ์ ดังรูปที่ 12

สตาร์ทเครื่องยนต์และทำการปรับตั้งองค์การจุดระเบิดโดยการเลื่อนตำแหน่งของขดลวดฟลลเซอร์ ซึ่งจะต้องทำการจุดระเบิดที่เหมาะสมประมาณ 11 องศา ก่อนศูนย์ตายบน ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 600 รอบต่อนาที และปรับปริมาณการจ่ายก๊าซให้เหมาะสม

2.5 ดำเนินการทดลอง

ทดลองการทำงานของเครื่องยนต์ในแบบเครื่องยนต์แก๊สโซลีน ทำการตรวจวัดอุณหภูมิห้องเผาไหม้เสริมด้วยเครื่องมืออินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์ รุ่น Benetech GM320 ดังรูปที่ 13 ทำการตรวจวัดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และไฮโดรคาร์บอน (HC) ด้วยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย รุ่น Koeng KEG-200 ดังรูปที่ 14



รูปที่ 13 อินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์ รุ่น Benetech GM320



รูปที่ 14 เครื่องวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย รุ่น Koeng KEG-200

จากนั้นทดลองการทำงานของเครื่องยนต์ในแบบเครื่องยนต์ดีเซล ทำการตรวจวัดค่าควันดำด้วยเครื่องวัดควันดำระบบความทึบแสง รุ่น Koeng OP-201T ดังรูป

ที่ 15 แล้วจึงใช้เครื่องยนต์เป็นต้นกำลังในการสูบน้ำด้วยท่อพญานาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 8 นิ้ว ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์คงที่ 1,000 รอบต่อนาที ซึ่งเป็นระดับความเร็วรอบเครื่องยนต์โดยประมาณที่เกษตรกรส่วนใหญ่ใช้ในการสูบน้ำ บันทึกผลระยะเวลาและปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ โดยเปรียบเทียบในลักษณะการทำงานแบบเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิงและในลักษณะการทำงานแบบเครื่องยนต์แก๊สโซลีนที่ใช้แอลพีจีเป็นเชื้อเพลิง ดังรูปที่ 16 ทั้งนี้ทำการทดลองแบบสลับไป-มา ระหว่างลักษณะการทำงานแบบเครื่องยนต์ดีเซลและลักษณะการทำงานแบบเครื่องยนต์แก๊สโซลีน จนครบลักษณะการทำงานแบบละ 3 ครั้ง



รูปที่ 15 เครื่องวัดควันดำระบบความทึบแสง รุ่น Koeng OP-201T



รูปที่ 16 ก) ขณะใช้งานแบบเครื่องยนต์ดีเซล
ข) ขณะใช้งานแบบเครื่องยนต์แก๊สโซลีน

สำหรับคุณลักษณะของเครื่องยนต์ที่นำมาทดลอง แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณลักษณะของเครื่องยนต์ที่นำมาทดลอง

เครื่องยนต์	คุณลักษณะ
A	เครื่องยนต์เล็กดีเซล Yanmar TF120DI ดัดแปลงแล้ว ความเร็วรอบเดินเบา 600 รอบต่อนาที ความเร็วรอบสูงสุด 2,400 รอบต่อนาที สามารถสลับให้ทำงานได้ในแบบเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง และทำงานได้ในแบบเครื่องยนต์แก๊สโซลีนที่ใช้แอลพีจีเป็นเชื้อเพลิง
B	เครื่องยนต์เล็กแก๊สโซลีน Honda GX160 ใช้น้ำมันเบนซินเป็นเชื้อเพลิง ความเร็วรอบเดินเบา 1,200 รอบต่อนาที ความเร็วรอบสูงสุด 3,600 รอบต่อนาที
C	เครื่องยนต์เล็กดีเซล Yanmar TF120DI ก่อนดัดแปลง ใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง ความเร็วรอบเดินเบา 600 รอบต่อนาที ความเร็วรอบสูงสุด 2,400 รอบต่อนาที

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

จากการพัฒนาห้องเผาไหม้เสริมในด้านการระบายความร้อน ด้วยการติดตั้งครีระบายความร้อน และพัดลมระบายความร้อน ได้ทำการตรวจวัดอุณหภูมิของห้องเผาไหม้เสริมในขณะเครื่องยนต์ที่ดัดแปลงทำงานแบบเครื่องยนต์แก๊สโซลีนเปรียบเทียบกับอุณหภูมิของฝาสอบเครื่องยนต์เล็กแก๊สโซลีน Honda GX160 ได้ผลดังตารางที่ 2

จากตารางที่ 2 พบว่าอุณหภูมิของห้องเผาไหม้เสริมในขณะทำงานแบบเครื่องยนต์แก๊สโซลีนกับอุณหภูมิของฝาสอบเครื่องยนต์เล็กแก๊สโซลีน เมื่อขณะอุณหภูมิคงที่ ที่ความเร็วรอบสูงสุด มีอุณหภูมิ 182 และ 186 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกัน ทั้งนี้ยังคงมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิลุกติดไฟได้เอง (Auto Ignition Temperature) ของแอลพีจี โดยแอลพีจีมีค่าอุณหภูมิลุกติดไฟได้เองที่ประมาณ 481 องศาเซลเซียส [11], [12] และมีค่าออกเทนสูงกว่าน้ำมันเบนซิน [4] เครื่องยนต์จึงทำงานได้โดยไม่เกิดการน็อก

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบอุณหภูมิของห้องเผาไหม้เสริมกับอุณหภูมิของฝาสอบเครื่องยนต์เล็กแก๊สโซลีน เมื่อขณะอุณหภูมิคงที่

ความเร็วรอบเครื่องยนต์ (RPM)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	
	เครื่องยนต์ A	เครื่องยนต์ B
600	127	-
1,200	149	117
1,800	164	128
2,400	182	148
3,000	-	163
3,600	-	186

หมายเหตุ

- เครื่องยนต์ A คือ เครื่องยนต์เล็กดีเซล Yanmar TF120DI ดัดแปลงแล้ว, ทำงานในแบบเครื่องยนต์แก๊สโซลีน ใช้แอลพีจีเป็นเชื้อเพลิง
- เครื่องยนต์ B คือ เครื่องยนต์เล็กแก๊สโซลีน Honda GX160 ใช้น้ำมันเบนซินเป็นเชื้อเพลิง

ทำการตรวจวัดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรคาร์บอนในไอเสีย ได้ผลดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ปริมาณ CO และ HC ในไอเสีย ตรวจวัดค่าโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย รุ่น Koeng KEG-200

ความเร็วรอบเครื่องยนต์ (RPM)	CO(%)	HC(ppm)
600	0.08	1,088
1,200	0.22	1,186
1,800	0.41	1,315
2,400	0.41	1,255

จากตารางที่ 3 พบว่าในไอเสียมีปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ร้อยละ 0.41 เป็นไปตามมาตรฐานของประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2550) เรื่อง กำหนดมาตรฐานค่าก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และก๊าซ

ไฮโดรคาร์บอนจากท่อไอเสียของรถจักรยานยนต์ ซึ่งกำหนดค่าก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ไม่เกินร้อยละ 2.5 และกำหนดค่าก๊าซไฮโดรคาร์บอนไม่เกิน 1,000 ส่วนในล้านส่วน [13] ทั้งนี้มีปริมาณไฮโดรคาร์บอนในไอเสีย 1,315 ส่วนในล้านส่วน อาจเป็นผลจากการที่ห้องเผาไหม้เสริมมีลักษณะเป็นกระเปาะที่มีช่องทางเข้าออกขนาดเล็ก คล้ายกับห้องเผาไหม้ล่วงหน้าในเครื่องยนต์ดีเซล [14], [15] ส่งผลให้อากาศเข้าห้องเผาไหม้เสริมได้ไม่สม่ำเสมอ ทำให้เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ดังนั้นจึงควรศึกษาพัฒนาและทดลองห้องเผาไหม้เสริมให้มีช่องทางเข้าออกขนาดใหญ่ ซึ่งอาจส่งผลให้ปริมาณไฮโดรคาร์บอนในไอเสียลดลง

ในส่วนของการพัฒนาอุปกรณ์ผสมก๊าซกับอากาศให้ปรับขนาดได้กว้างสุดและสิ้นเร่งเปิดกว้างสุดเมื่อใช้งานในแบบเครื่องยนต์ดีเซล ทำการตรวจวัดค่าควันดำ ได้ผลดังตารางที่ 4

จากตารางที่ 4 เครื่องยนต์เล็กดีเซลที่ดัดแปลงแล้ว ติดตั้งอุปกรณ์ผสมก๊าซกับอากาศที่เปิดได้กว้างสุดและสิ้นเร่งเปิดกว้างสุด เมื่อใช้งานในแบบเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง จะมีค่าควันดำสูงสุดร้อยละ 1.5 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับเครื่องยนต์เล็กดีเซลก่อน

ดัดแปลง ทั้งนี้เป็นเพราะอุปกรณ์ผสมก๊าซกับอากาศที่เปิดได้กว้างสุดและสิ้นเร่งเปิดกว้างสุด อากาศสามารถไหลผ่านเข้าสู่กระบอกสูบได้มากขึ้น ส่งผลให้อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงอยู่ในระดับที่เหมาะสม

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบค่าควันดำเมื่อใช้งานในแบบเครื่องยนต์ดีเซล ตรวจวัดค่าโดยใช้เครื่องวัดควันดำระบบความทึบแสง รุ่น Koeng OP-201T

ความเร็วรอบเครื่องยนต์ (RPM)	ค่าควันดำ (%)	
	เครื่องยนต์ A	เครื่องยนต์ C
600	1.4	1.6
1,200	0.9	0.7
1,800	0.9	1.0
2,400	1.5	1.4

หมายเหตุ

- เครื่องยนต์ A คือ เครื่องยนต์เล็กดีเซล Yanmar TF120DI ดัดแปลงแล้ว, ใช้งานในแบบเครื่องยนต์ดีเซล เมื่ออุปกรณ์ผสมก๊าซกับอากาศที่เปิดได้กว้างสุดและสิ้นเร่งเปิดกว้างสุด, ใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง
- เครื่องยนต์ C คือ เครื่องยนต์เล็กดีเซล Yanmar TF120DI ก่อนดัดแปลง, ใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบปริมาณและค่าใช้จ่ายเชื้อเพลิงน้ำมันดีเซลและแอลพีจี ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1,000 รอบต่อนาที โดยใช้เป็นเครื่องยนต์ต้นกำลังในการสูบน้ำด้วยท่อพญานาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 8 นิ้ว

ครั้งที่	เวลา (ชั่วโมง)	เมื่อใช้น้ำมันดีเซล		เมื่อใช้แอลพีจี	
		ปริมาณการใช้; กิโลกรัม (ลิตร)	ค่าใช้จ่าย; บาทต่อชั่วโมง	ปริมาณการใช้; กิโลกรัม	ค่าใช้จ่าย; บาทต่อชั่วโมง
1	1	0.63 (0.75)	20.54	0.60	14.52
2	1	0.63 (0.75)	20.54	0.50	12.10
3	1	0.68 (0.80)	21.91	0.60	14.52
ค่าเฉลี่ย	1	0.65 (0.77)	21.00	0.57	13.71

หมายเหตุ อ้างอิงราคาเชื้อเพลิง ณ วันที่ทำการทดลอง (24 มกราคม พ.ศ. 2563)

- แอลพีจีภาคครัวเรือน ปตท. ถึงขนาด 15 กิโลกรัม ราคา 363 บาทต่อถัง = 24.20 บาทต่อกิโลกรัม [16]
- น้ำมันดีเซล ปตท. ราคา 27.39 บาทต่อลิตร [17]
- น้ำมันดีเซล มีค่าความหนาแน่น 0.845 กรัมต่อมิลลิกรัม ซึ่งได้จากการวัดค่าก่อนการทดลอง
- จากประกาศกรมธุรกิจพลังงาน ได้กำหนดชื่อน้ำมันดีเซลในประเทศไทยเป็น “น้ำมันดีเซลหมุนเร็วบี 7” ตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม พ.ศ. 2563 เป็นต้นไป [18]

จากการทดลองใช้เครื่องยนต์เป็นต้นกำลังในการสูบน้ำด้วยท่อพญานาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 8 นิ้ว โดยใช้ความเร็วรอบเครื่องยนต์คงที่ 1,000 รอบต่อนาที เปรียบเทียบในลักษณะการทำงานแบบเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิงและในลักษณะการทำงานแบบเครื่องยนต์แก๊สโซลีนที่ใช้แอลพีจีเป็นเชื้อเพลิง บันทึกผลระยะเวลา ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ และค่าใช้จ่ายเชื้อเพลิง ดังตารางที่ 5

จากตารางที่ 5 การทดลองใช้งานเป็นเครื่องยนต์ต้นกำลังในการสูบน้ำด้วยท่อพญานาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 8 นิ้ว ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์คงที่ 1,000 รอบต่อนาที ในลักษณะการทำงานแบบเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง พบว่าใช้น้ำมันดีเซลเฉลี่ย 0.65 กิโลกรัมต่อชั่วโมง หรือประมาณ 0.77 ลิตรต่อชั่วโมง คิดเป็นค่าใช้จ่าย 21.00 บาทต่อชั่วโมง และหากใช้งานในลักษณะการทำงานแบบเครื่องยนต์แก๊สโซลีนที่ใช้แอลพีจีเป็นเชื้อเพลิง จะใช้แอลพีจีเฉลี่ย 0.57 กิโลกรัมต่อชั่วโมง คิดเป็นค่าใช้จ่าย 13.71 บาทต่อชั่วโมง ซึ่งสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้ถึงร้อยละ 34.71

ทั้งนี้จากการทดลองใช้งานเป็นเครื่องยนต์ต้นกำลังในการสูบน้ำด้วยท่อพญานาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 8 นิ้ว อัตราทดพูลเลย์เครื่องยนต์ต่อพูลเลย์ท่อพญานาคเป็น 1 ต่อ 1 ในลักษณะการทำงานแบบเครื่องยนต์ดีเซลและเครื่องยนต์แก๊สโซลีนที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์คงที่ 1,000 รอบต่อนาทีเท่ากัน สูบน้ำความสูง (Head) 3 เมตร ย่อมจะได้ปริมาณการสูบน้ำที่เท่ากันคือประมาณ 2.4 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที หรือ 144 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง เมื่อเทียบจากข้อมูลทางเทคนิคของท่อพญานาค [19]

ในส่วนของการดัดแปลงเครื่องยนต์ครั้งนี้ใช้งบประมาณ 7,000 บาท หากเกษตรกรทำนาพื้นที่ 10 ถึง 20 ไร่ จะต้องมีการสูบน้ำเข้าและออกจากนาโดยประมาณ 8 ชั่วโมงต่อวัน สามารถประหยัดค่าใช้จ่าย

เชื้อเพลิงได้ 58.32 บาทต่อวัน ซึ่งจะถึงจุดคุ้มทุนที่เวลา 120 วัน

อย่างไรก็ตาม การวิจัยครั้งนี้มุ่งเน้นให้เกษตรกรมีทางเลือกในการใช้เครื่องยนต์ดัดแปลงที่สามารถใช้เชื้อเพลิงราคาถูกได้ ซึ่งเมื่อเครื่องยนต์ดัดแปลงทำงานในแบบเครื่องยนต์แก๊สโซลีนโดยใช้แอลพีจีเป็นเชื้อเพลิงที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ผสมก๊าซกับอากาศ เครื่องยนต์จะมีอัตราส่วนการอัด, ประสิทธิภาพเชิงความร้อน และประสิทธิภาพเชิงปริมาตรต่ำกว่าเครื่องยนต์ดีเซล ส่งผลให้แรงบิดต่ำลง จึงไม่เหมาะกับการใช้งานที่มีภาระมาก เช่น ขับเคลื่อนรถไถนาเดินตาม แต่ใช้งานได้กับงานประเภทที่มีภาระไม่มากและความเร็วรอบคงที่ เช่น ใช้งานเป็นเครื่องยนต์ต้นกำลังในการสูบน้ำด้วยท่อพญานาคขนาดเล็ก เป็นต้น

4. สรุป

จากการพัฒนาห้องเผาไหม้เสริมในด้านการระบายความร้อน พบว่าอุณหภูมิของห้องเผาไหม้เสริมในขณะเครื่องยนต์ที่ดัดแปลงทำงานแบบเครื่องยนต์แก๊สโซลีนกับอุณหภูมิของฝาสูบเครื่องยนต์เล็กแก๊สโซลีน Honda GX160 ตรวจวัดเมื่อขณะอุณหภูมิคงที่ ที่ความเร็วรอบสูงสุด มีอุณหภูมิ 182 และ 186 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งมีอุณหภูมิใกล้เคียงกัน และพบว่าในไอเสียมีปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ร้อยละ 0.41 และไฮโดรคาร์บอน 1,315 ส่วนในล้านส่วน สำหรับการพัฒนาอุปกรณ์ผสมก๊าซกับอากาศให้ปรับขนาดได้กว้างสุดและลิ้นเร่งเปิดกว้างสุดนั้น เมื่อใช้งานในแบบเครื่องยนต์ดีเซล พบว่ามีค่าควันทาสูงสุดร้อยละ 1.5 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับเครื่องยนต์ดีเซลก่อนดัดแปลงเมื่อนำเครื่องยนต์ที่ดัดแปลงไปใช้งานเป็นเครื่องยนต์ต้นกำลังในการสูบน้ำด้วยท่อพญานาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 8 นิ้ว ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์คงที่ 1,000 รอบต่อนาที ในขณะทำงานแบบเครื่องยนต์ดีเซลพบว่าใช้น้ำมันดีเซลเฉลี่ย 0.65 กิโลกรัมต่อชั่วโมง หรือ

ประมาณ 0.77 ลิตรต่อชั่วโมง คิดเป็นค่าใช้จ่าย 21.00 บาทต่อชั่วโมง และในขณะที่ทำงานแบบเครื่องยนต์แก๊สโซลีน พบว่าใช้แอลพีจีเฉลี่ย 0.57 กิโลกรัมต่อชั่วโมง คิดเป็นค่าใช้จ่าย 13.71 บาทต่อชั่วโมง สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้ร้อยละ 34.71 โดยมีปริมาณการสูบน้ำประมาณ 2.4 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที่ หรือ 144 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง และถึงจุดคุ้มทุนที่เวลา 120 วัน

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณในการดำเนินการวิจัยครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] W. Sittiwong, T. Homchampa and V. Paratanavong, "Performance of LPG and biogas fueled engine," in *Proceeding of 8th National Academic Conference Rajamangala University of Technology Surin*, Surin, Thailand, December 22-23, 2016, pp. 434-440.
- [2] C. Siripornmongkolchai, "Innovative Engine Prototype Powered by Diesel and LPG as Fuel for Agriculture," Research report, Dept. Faculty of industrial education, Rajamangala University of Technology Suvarnabumi, Nonthaburi, Thailand, 2019.
- [3] C. Siripornmongkolchai, "Evaluation of agriculturist's satisfaction on 6 districts of Nonthaburi province, using the agricultural small engine modified for LPG gas instead of diesel," *Thaksin University Journal*, vol. 18, no. 3, pp. 72-80, 2015.
- [4] S. Saisin, "The difference of LPG and NGV gas," *HCU Journal*, vol. 17, no. 34, pp. 139-154, Jun. 2014.
- [5] *Yanmar TF-DI Series Data Manual*, Yanmar S.P. Co., Bangkok, Thailand, 2008.
- [6] H. Chandler, *Heat Treater's Guide Practices and Procedures for Irons and Steels*. USA: ASM International, 1995.
- [7] C. Kasiphar, *Strength of materials*, Bangkok: Chuan Pim, 1985.
- [8] M. Bohner, H. Gerschler, H. Gobweiler, S. Leyer, W. Pichler, W. Saier, H. Schmidt and H. Zwickel, *Technology for the Automotive Trade Volume 2*, Germany: Vollmer GmbH&Co, 1989.
- [9] J.B. Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamentals*, Singapore: McGraw-Hill, 1988.
- [10] K.V. Mitzlaff, *Engines for biogas*, Federal Republic of Germany, 1988.
- [11] Energy Policy and Planning Office Ministry of Energy, "NGV and LPG," *Eppo Journal*, Special Issue, pp. 23-32, 2014.
- [12] S. Termchokkasem, "Choosing to use gas as an alternative energy," *Executive Journal*, vol. 28, no. 1, pp. 74-77, Mar. 2008.
- [13] Announcement of the Ministry of Natural Resources and Environment. (2007). *Government Gazette*, 124 (Special Part 29 d), 9-10.
- [14] K. Wattanavichien, W. Kuakittiwong, A. Sathavarinthu and W. Tangpitsityothin, "Prototype development of a CI spray combustion observation equipment by

- modification of an existing IDI engine,” in *Proceeding of 23rd Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand*, Chiang Mai, Thailand, November 4-7, 2009, pp. AEC-014348.
- [15] K. Tippaha, R. Kumwan, P. Krudnak, C. Lowefin, P. Mahawannam, T. Deethayat and T. Kiatsiroat, “Quality upgrading of biodiesel from refined palm oil by catalytic cracking with HZSM-5 and small diesel engine testing,” *Engineering Journal Chiang Mai University*, vol. 25, no. 1, pp. 214-225, Apr. 2018.
- [16] RYT9. (2020, January 26). LPG prices on 24 January 2020 [Online]. Available: <https://www.ryt9.com/s/nepo/3088408>
- [17] PTT Oil and Retail Business Public Company Limited. (2020, January 26). Retail prices in Bangkok and vicinity for the year 2020 [Online]. Available: <https://www.pttor.com/oilprice-capital.aspx>
- [18] Announcement of the Department of Energy Business. (2020). *Government Gazette*, 137 (Special Part 135 d), 11-14.
- [19] Pattanakarnkol. (2020, January 26). Whale pump [Online]. Available: <https://www.whalepump.com/propellerpump>

<http://journal.rmutp.ac.th/>

การวิเคราะห์โครงการผลิตหมึกพิมพ์ร่องพื้นสีขาวฐานตัวทำละลาย สำหรับผลิตบรรจุภัณฑ์อ่อนตัว

พิชิต ขจรเดชะ^{1*} และ อนันต์ ตันวิไลศิริ²

¹คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

²คณะเทคโนโลยีสื่อสารมวลชน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

¹126 ถนนประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร 10140

²39 หมู่ที่ 1 ตำบลคลองหก อำเภอลำลูกเกด จังหวัดปทุมธานี 12110

รับบทความ 6 มิถุนายน 2563 แก้ไขบทความ 21 มีนาคม 2564 ตอรับบทความ 5 พฤษภาคม 2564

บทคัดย่อ

การวิเคราะห์โครงการผลิตหมึกพิมพ์ร่องพื้นสีขาวฐานตัวทำละลายสำหรับการผลิตบรรจุภัณฑ์อ่อนตัว มีวัตถุประสงค์เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการผลิตหมึกพิมพ์สีขาวทดแทนของเดิมที่ใช้ในงานในปัจจุบัน โดยการศึกษาและเปรียบเทียบคุณสมบัติและคุณภาพทางการพิมพ์ของหมึกพิมพ์สีขาวที่สร้างขึ้นสำหรับการพิมพ์บนบรรจุภัณฑ์ประเภทฟิล์มพลาสติก มีวิธีการดำเนินการได้แก่ การหาสมอัตราส่วนของหมึกพิมพ์สีขาวของกลุ่มตัวอย่างจำนวน 7 กลุ่ม ทำการทดสอบคุณสมบัติของหมึกพิมพ์ในด้านค่าปริมาณของแข็งในหมึกพิมพ์ (Solid Content) ค่าความละเอียดของอนุภาคหมึกพิมพ์ (Grinding) แล้วนำหมึกพิมพ์ตัวอย่างไปพิมพ์แล้วทำการทดสอบคุณภาพงานพิมพ์ โดยตรวจสอบคุณภาพด้านค่าความแตกต่างสี (ΔE^*_{ab}) ค่าความทึบแสง (Opacity) บนฟิล์มพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีน เทเรฟทาเรต (PET) และฟิล์มพลาสติกชนิดโอเร็นเทต โพลีโพลีลีน (OPP) แล้วนำไปทำการตรวจสอบค่าการยึดติด (Bond Strength) โดยการนำไปทำการเคลือบแบบรีดร้อน (Extrusion) ผลการศึกษาพบว่า คุณสมบัติของหมึกพิมพ์และคุณภาพงานพิมพ์ของหมึกตัวอย่างที่ 5 ได้ผลการทดลองผ่านมาตรฐานในทุกด้าน หลังจากนั้น ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ทางการเงินและผลตอบแทนการลงทุน ผลการศึกษาพบว่า หมึกพิมพ์ที่ได้จากการทดลองจะสามารถลดต้นทุนของการซื้อหมึกพิมพ์ได้ 25 บาทต่อกิโลกรัม โครงการนี้มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิของผลตอบแทน (NPV) เท่ากับ 5,053,593 บาท อัตราผลตอบแทน (IRR) เท่ากับร้อยละ 54.79 ระยะเวลาคืนทุนอยู่ที่ 1 ปี 8 เดือน อัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุน (B/C ratio) เท่ากับ 1.25 จากผลการศึกษาทั้งหมด สรุปได้ว่าโครงการผลิตหมึกพิมพ์ร่องพื้นสีขาวฐานตัวทำละลายสำหรับการผลิตบรรจุภัณฑ์ สามารถผลิตหมึกพิมพ์ที่มีคุณสมบัติเหมาะสมกับการใช้งาน และมีความเหมาะสมต่อการลงทุน

คำสำคัญ : การผลิตหมึกพิมพ์ร่องพื้นสีขาว; คุณภาพหมึกพิมพ์; การศึกษาความเป็นไปได้ของโครงการ

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +669 5252 4799, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: phichit.kaj@kmutt.ac.th

<http://journal.rmutp.ac.th/>

The Feasibility Study for Solvent Based White Ink for Flexible Packaging

Phichit Kajondecha^{1*} and Anan Tanwilaisiri²

¹Faculty of Industrial Education and Technology, King Mongkut's University of Technology Thonburi

²Faculty of Mass Communication Technology, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

¹126 Pracha Uthit Rd., Bang Mod, Thung Khru, Bangkok 10140 Thailand

²39 Moo. 1, Klong 6 Klong luang Pathum Thani 12110 Thailand

Received 6 June 2020; Revised 21 March 2021; Accepted 5 May 2021

Abstract

The research proposes to find an optimum ratio of solvent based white ink for flexible package development by studying and comparing the qualification of white ink on plastic film. The process consists of separating the white ink ratio into 5 sampling group ratios and then examining ink quality by its' solid content and grinding. The viscosity is controlled in 16 second and then measured by Zahn's cup no. 3. The sampling ink is printed and inspected printing quality by (1) ΔE^*_{ab} and opacity on polyethylene terephthalate (PET) plastic film and oriented polypropylene (OPP) and (2) bond strength by extrusion. The result shows that sampling ink with hardener substances and ink and varnish ratio is at 90:10 certifies in all aspects compare with other sample. Indicators are the net present value (NPV), Benefit/Cost Ratio: B/C Ratio, Pay Back Period and internal rate of return of investment (IRR). The Feasibility Study found that the projects are the net present value (NPV) of 5,053,593 baht, payback period of 1 year 8 month and rate of return on investment (IRR) was 54.79 %. B/C ratio = 1.25

Keywords : Solvent Based Ink; Ink Development; Feasibility Analysis

* Corresponding Author. Tel.: +669 5252 4799, E-mail Address: phichit.kaj@kmutt.ac.th

1. บทนำ

อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ในประเทศไทยได้มีการเติบโตต่อเนื่อง ข้อมูลจากกรมส่งเสริมอุตสาหกรรมพบว่ามีการเติบโตโดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 3-4 ต่อปี ในปี 2559 [1] มีมูลค่าอุตสาหกรรมประมาณ 3.85 แสนล้านบาท ผู้ผลิตสินค้าจึงมีความจำเป็นที่จะต้องพัฒนาคุณภาพของสินค้าเพื่อให้ตอบสนองต่อความต้องการของผู้บริโภค จากสถานการณ์ที่ผ่านมา พบว่าการแข่งขันทางธุรกิจที่รุนแรงขึ้น ผู้ประกอบการจำเป็นต้องปรับตัว เพื่อสร้างขีดความสามารถในการแข่งขัน ไม่ว่าจะเป็นด้านการพัฒนาผลิตภัณฑ์ การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต การส่งเสริมการตลาดในรูปแบบต่างๆ ผู้ผลิตแต่ละรายก็ได้สร้างกลยุทธ์ต่าง ๆ ให้เหมาะสมและเข้ากับสถานการณ์ของบริษัทนั้น ๆ [2], [3] แต่วิธีการที่เป็นที่นิยมและมีประสิทธิภาพมากที่สุด คือ การเพิ่มยอดขายและการลดต้นทุน

การลดต้นทุนการผลิตภายในโรงงานเป็นเรื่องที่ผู้ผลิตมีความคิดที่จะพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งในการลดต้นทุนนั้นจะต้องไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของสินค้า ภาพแบบของการลดต้นทุนสามารถทำได้หลายภาพแบบทั้งในด้านลดเวลาการสูญเสีย (Down Time) การเพิ่มความเร็วในการทำงาน (Speed) การลดเวลาการตั้งเครื่อง (Set Up) การเพิ่มกำลังการผลิต (Productivity) การลดของเสีย (Waste) [4] รวมถึงการผลิตวัตถุดิบขึ้นใช้เองก็เป็นอีกแนวทางหนึ่งที่ผู้ผลิตเลือกใช้ บริษัทผลิตบรรจุภัณฑ์พลาสติก A มีความต้องการใช้หมึกพิมพ์สีขาว่า ทั้งในการพิมพ์บนฟิล์ม (Surface Printing) หรือการพิมพ์สีขาว่าเพื่อทับสำหรับการพิมพ์ด้านหลังฟิล์ม (Reverse Printing) ในการผลิตบรรจุภัณฑ์ประเภทพลาสติก เช่น ซอง ถุง บรรจุภัณฑ์อ่อนตัวต่าง ๆ ในขั้นตอนการผลิตมีการใช้หมึกพิมพ์สีขาว่าเป็นจำนวนมาก ซึ่งปกติผู้ผลิตจะต้องทำการสั่งซื้อหมึกพิมพ์จากผู้จัดจำหน่ายวัตถุดิบส่งผลให้มีต้นทุนในการผลิตที่สูง อีกทั้งในขั้นตอนการขนส่งหมึกพิมพ์จะต้องใช้ระยะเวลาใน

การทำงานซึ่งอาจก่อให้เกิดปัญหาความล่าช้า หรือไม่ทันต่อความต้องการทำให้เกิดปัญหาในการผลิต

ผู้วิจัยจึงมีความคิดที่จะหาแนวทางในการลดต้นทุนโดยการผลิตหมึกพิมพ์สีขาว่าฐานตัวทำละลายสำหรับพิมพ์บนบรรจุภัณฑ์พลาสติกขึ้นใช้เอง ทดแทนการใช้หมึกพิมพ์สำเร็จที่ต้องสั่งซื้อจากผู้จัดจำหน่ายวัตถุดิบ และลดปัญหาความล่าช้าในการขนส่ง รวมถึงยังเป็นการควบคุมบริหารจัดการปริมาณหมึกพิมพ์ในคลังจัดเก็บวัตถุดิบให้เพียงพอต่อความต้องการในการใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ หมึกพิมพ์สีขาว่าที่ผลิตขึ้นจะมีการตรวจสอบและควบคุมคุณภาพ โดยเปรียบเทียบกับคุณภาพกับหมึกพิมพ์สำเร็จที่ใช้ในปัจจุบัน เพื่อให้ได้หมึกพิมพ์สีขาว่าที่มีคุณสมบัติที่ดีกว่าหรือเทียบเท่ากับหมึกพิมพ์สำเร็จ รวมถึงการศึกษาความเป็นไปได้ของโครงการ โดยวิเคราะห์จาก มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) อัตราส่วนผลตอบแทนของโครงการ (Internal Rate of Return: IRR) อัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุน (B/C ratio) และระยะเวลาคืนทุน (Payback Period: PB) [5] โดยมีเป้าหมายเพื่อสร้างแนวทางในการพัฒนาหมึกพิมพ์ของกลุ่มอุตสาหกรรม การพิมพ์บรรจุภัณฑ์พลาสติกภายในประเทศ อีกทั้งยังเป็นการลดต้นทุนในการผลิต การสร้างนวัตกรรมและสามารถพึ่งพาตนเองได้ต่อไปในอนาคต

2. ระเบียบวิธีวิจัย

การวิเคราะห์โครงการผลิตหมึกพิมพ์รองพื้นสีขาว่าฐานตัวทำละลายสำหรับผลิตบรรจุภัณฑ์ จะมีการศึกษาหลักอยู่ 3 ขั้นตอน คือ การผลิตหมึกพิมพ์สีขาว่า การทดสอบสมบัติของหมึกพิมพ์ และการศึกษาความเป็นไปได้ทางการเงินและผลตอบแทนการลงทุน โดยมีขั้นตอนและวิธีการวิจัยดังต่อไปนี้

2.1 เครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

แสดงข้อมูลตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้

เครื่องมือและอุปกรณ์	
1. เครื่องจำลองการพิมพ์ (gravo mini proof)	
2. เครื่องลูกกลิ้งจำลองการพิมพ์ (cylinder proof)	ยี่ห้อ J.M. Heaford Limited
3. เครื่องเคลือบแบบรีดร่วม (extrusion machine)	ยี่ห้อ Sumitomo
4. เครื่องเคลือบแบบประกบแห้ง (dry lamination machine) ยี่ห้อ SUNG AN MACHINERY	
5. เครื่องวัดค่าความเปรียบต่างสี (spectrophotometer) ยี่ห้อ x-rite	
6. เครื่องวัดค่าความละเอียดอนุภาคหมึกพิมพ์ (grind-o-meter)	
7. เครื่องวัดค่าความทึบแสง (optical density)	
8. ตู้อบ ยี่ห้อ ecocell	
9. เครื่องวัดค่าความหนืดของหมึกพิมพ์ เบอร์ 3 (Zahn's cup)	
10. เครื่องวัดค่าการยึดติดของชั้นฟิล์ม (tensile strength)	
11. เครื่องชั่งน้ำหนัก	
12. ปากกาตรวจการระเบิดผิว เบอร์ 38	
13. เทปทดสอบการยึดติด 3M เบอร์ 500	
วัสดุ	
1. ฟิล์มพลาสติก โอเร็นเทต โพลีโพรพิลีน (OPP) 20 ไมครอน	
2. ฟิล์มพลาสติก โพลีเอทิลีน เทเรฟทาเลต (PET) 10 ไมครอน	
สารเคมีที่ใช้	
1. สารให้สี	
2. วาร์นิช	
3. ตัวทำละลาย Nontol	
4. เมทิล เอทิล คีโตน (MEK)	
5. เอทิลอะซิเตท (EA)	
6. เอ็น-โพรพิล อาซิเตท (NPAC)	

2.2 การผลิตหมึกพิมพ์

การผลิตหมึกพิมพ์จะแบ่งขั้นตอนการผลิตออกเป็น 2 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนการเตรียมตัวทำละลายและขั้นตอนการผลิตหมึกพิมพ์ โดยจะมีการผลิตหมึกพิมพ์สีขาวทั้งหมด 7 ตัวอย่าง โดยใช้สารให้สีจาก 3 บริษัท ได้แก่ บริษัท A, B, C โดยกำหนดเป็นหมึกพิมพ์ตัวอย่างที่ 1, 2, 3 คือ หมึกพิมพ์ที่ใช้สารให้สีจากบริษัท A หมึกพิมพ์ตัวอย่างที่ 4, 5 คือ หมึกที่ใช้สารให้สีจากบริษัท B หมึกพิมพ์ตัวอย่างที่ 6, 7 คือหมึกที่ใช้สารให้สีจากบริษัท C

ตารางที่ 2 แสดงอัตราส่วนตัวทำละลาย

ตัวทำละลาย	ร้อยละของอัตราส่วนตัวทำละลาย						
	แต่ละตัวอย่าง						
	A	B	C				
หมึกพิมพ์ตัวอย่าง	1	2	3	4	5	6	7
IPA	-	10	-	-	-	-	-
NPAC	-	40	-	20	20	-	-
NPA	-	20	-	-	-	-	-
MEK	-	-	30	30	30	-	-
EA	-	30	20	50	50	-	-
Toluene	-	-	50	-	-	-	-
solvent	-	-	-	-	-	100	100
PV 184							
no.2							
solvent	100	-	-	-	-	-	-
smart - NT no.2							
ทั้งหมด	100	100	100	100	100	100	100

2.2.1 ขั้นตอนการเตรียมตัวทำละลาย

เนื่องจากตัวทำละลายที่ใช้สำหรับหมึกพิมพ์ในแต่ละตัวอย่างมีความแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับ ต้นทุน ข้อจำกัดของวัสดุและประเภทของบรรจุภัณฑ์ที่จะผลิต ส่งผลให้อัตราส่วนตัวของสารประกอบมีความ

หลายหลาก และจากการศึกษาถึงอัตราส่วนตัวของสารประกอบที่ส่งผลต่อคุณภาพงานพิมพ์ [6], [7] ได้นำข้อมูลดังกล่าวมาเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการผสมตัวทำละลายของหมึกพิมพ์สีขาว โดยทำการซึ่งส่วนประกอบของตัวทำละลายแต่ละตัวอย่างด้วยเครื่องซึ่ง ทำการผสมตัวทำละลายภายในภาชนะแล้วทำการปั่นให้เข้ากัน จากนั้นนำไปเก็บไว้ในภาชนะปิด โดยอัตราส่วนตัวของสารประกอบมีอัตราส่วนที่กำหนดดังตารางที่ 2

2.2.2 ขั้นตอนการผลิตหมึกพิมพ์

ในขั้นตอนการผลิตหมึกพิมพ์ การเตรียมหมึกพิมพ์สีขาวแต่ละตัวอย่างจะต้องทำการผสม สารให้สี, วาร์นิช, สารช่วยการยึดติดและตัวทำละลายเข้าด้วยกัน นำส่วนประกอบตามอัตราส่วนที่เหมาะสมของหมึกพิมพ์ตัวอย่างมาผสมให้เข้ากัน สังเกตเนื้อหมึกไม่จับตัวเป็นก้อน มีความเป็นเนื้อเดียวกันแล้วนำไปเก็บไว้ในภาชนะปิด [7] โดยส่วนประกอบสำหรับหมึกพิมพ์สีขาวแต่ละตัวอย่างมีอัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงอัตราส่วนประกอบสำหรับผลิตหมึกพิมพ์

ส่วนประกอบ	ร้อยละของอัตราส่วนของส่วนประกอบสำหรับหมึกพิมพ์แต่ละตัวอย่าง						
	A			B		C	
	1	2	3	4	5	6	7
หมึกพิมพ์ตัวอย่าง							
สารให้สี	50	50	50	90	87	50	50
วาร์นิช	50	50	50	10	10	40	40
EA	0	0	0	0	0	10	10
สารช่วยการยึดติด	0	0	0	0	3	0	0
ทั้งหมด	100	100	100	100	100	100	100

2.2.3 การปรับความหนืดของหมึกพิมพ์

ทำการปรับค่าความหนืด ให้มีความความหนืดเท่ากับ 16 วินาที วัดโดย Zahn's cup เบอร์ 3 (ASTM

D4212) เมื่อได้ความหนืดที่ต้องการ จึงนำไปทำการจำลองการพิมพ์โดยเครื่องจำลองการพิมพ์ (Gravo Mini Proof) ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยใช้ความเร็ว 80 เมตรต่อนาที พิมพ์ลงบนฟิล์มพลาสติกทั้ง 2 ชนิด หลังจากนั้นทำการเคลือบฟิล์มตัวอย่าง โดยการเคลือบแบบรีดร่วม (Extrusion) ด้วยเครื่องเคลือบแบบรีดร่วม (Extrusion Machine) ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยใช้โครงสร้าง PE/ALU



รูปที่ 1 เครื่องจำลองการพิมพ์ (Gravo Mini Proof)



รูปที่ 2 เครื่องเคลือบแบบรีดร่วม (Extrusion Machine)

2.3 ทดสอบคุณภาพของหมึกพิมพ์ตัวอย่าง

2.3.1 ทดสอบคุณสมบัติของหมึกพิมพ์สีขาว

(1) วัดค่า ค่าปริมาณของแข็ง (Solid Content) นำหมึกพิมพ์สีขาวตัวอย่างที่ผลิต และหมึกพิมพ์สีขาวที่ใช้อยู่ปัจจุบัน ปริมาตร 10 กรัม มาใส่ในภาชนะที่ทำนำไปเข้าตู้อบ ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที (TP-N01302) จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักและจด

บันทึก นำค่าน้ำหนักที่ซึ่งได้มาห้กลับกับน้ำหนักของ
ภาชนะจะได้ค่าน้ำหนักของแข็งที่เหลืออยู่

(2) วัดค่าความละเอียดอนุภาคหมีกพิมพ์
(Grinding) นำหมีกพิมพ์สีขาวตัวอย่างที่ผลิตและหมีก
พิมพ์ที่ใช้อยู่ปัจจุบันมาวัดค่าความละเอียดอนุภาคหมีก
พิมพ์ ด้วยเครื่องวัดค่าความละเอียดอนุภาคหมีกพิมพ์
(Grind-o-meter) (ASTM STP 234)

2.3.2 ทดสอบคุณภาพทางการพิมพ์

(1) วัดค่าความทึบ (Opacity) นำฟิล์ม
พลาสติกที่ผ่านการจำลองการพิมพ์ด้วยเครื่อง
จำลองการพิมพ์ ไปวัดค่าความทึบด้วย เครื่องวัดค่า
ความทึบแสง (Optical Density) (TAPPIT425)

(2) ทดสอบการยึดติดของหมีกพิมพ์บน
ฟิล์ม (Adhesion) นำฟิล์มพลาสติกที่ผ่านการจำลอง
การพิมพ์ด้วยเครื่องจำลองการพิมพ์ ไปทดสอบการ
ยึดติดโดยใช้เทป 3M เบอร์ 500 (ASTM D3359-
90) การหลุดลอก

(3) วัดค่าความแตกต่างสี (ΔE^*_{ab}) นำฟิล์ม
พลาสติกที่ผ่านการจำลองการพิมพ์ด้วยเครื่องจำลอง
การพิมพ์ มาวัดค่าความแตกต่างสี (ΔE^*_{ab}) โดยวัดค่า
บริเวณที่มีการพิมพ์ไล่ระดับ 0 ถึง 100 ด้วยเครื่องวัด
ค่าสี (Spectrophotometer) (ASTM D2244)

(4) วัดค่าการยึดติดของชั้นฟิล์มแบบการเคลือบ
รีดร่วม (Bond Strength Extrusion) นำฟิล์มพลาสติก
ที่ผ่านการเคลือบแบบรีดร่วม มาทำการลอกชั้นให้ได้ชั้น
หมีกและนำไปทดสอบด้วยเครื่องวัดค่าการยึดติดของชั้น
ฟิล์ม (Tensile Strength) (ASTM F904 - 98)

2.4 การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของโครงการ

ทำการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของโครงการ
โดยใช้ข้อมูล ได้แก่ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present
Value: NPV) อัตราส่วนผลตอบแทนของโครงการ
(Internal Rate of Return: IRR) อัตราส่วนผลตอบแทน

ต่อต้นทุน (B/C ratio) และระยะเวลาคืนทุน [8]-[11]
โดยมีวิธีการศึกษาดังต่อไปนี้

2.4.1 การวิเคราะห์มูลค่าปัจจุบันสุทธิของผลตอบ แทน (Net Present Value: NPV)

มูลค่าปัจจุบันสุทธิของผลตอบแทน (Net
Present Value: NPV) คือ หลักการตัดสินใจที่แสดงว่า
โครงการมีความเหมาะสมทางการเงินหรือไม่นั้น ให้ดูที่
ค่า NPV กล่าวคือ เมื่อค่า NPV มากกว่าศูนย์หรือมีค่า
เป็นบวกแสดงว่ากิจการนั้น ๆ มีความเหมาะสมที่จะ
ลงทุนได้แสดงดังสมการที่ (1)

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{CF_t}{(1+k)^t} - I \quad (1)$$

โดยที่

I = เงินสดจ่ายลงทุนของโครงการ

CF_t = กระแสเงินสดสุทธิในปีที่ t

k = ต้นทุนของเงินทุนของโครงการ
(ใช้เป็นอัตราส่วน)

t = ระยะเวลาโครงการ (0, 1,..., n)

n = อายุของโครงการเป็นปี

2.4.2 การวิเคราะห์อัตราผลตอบแทนภายในของ โครงการ (Internal Rate of Return: IRR)

อัตราผลตอบแทนภายในของโครงการ
(Internal Rate of Return: IRR) คือ ผลตอบแทนเฉลี่ย
ต่อปีเป็นร้อยละ ของโครงการแสดงดังสมการที่ (2)

$$IRR = \sum_{t=0}^n \frac{CF_t}{(1-IRR)^t} \quad (2)$$

โดยที่

CF_t = กระแสเงินสดสุทธิในปีที่ t

IRR = อัตราผลตอบแทน

t = ระยะเวลาโครงการ (0, 1,..., n)

n = อายุของโครงการเป็นปี

2.4.3 การวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุน

ระยะเวลาคืนทุน คือ ระยะเวลา (จำนวนปี) ที่ใช้ในการรอคอยให้ได้เงินลงทุนกลับคืนมา แสดงดังสมการที่ (3)

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน} = \frac{\text{เงินสดที่ใช้ในการลงทุน}}{\text{กระแสเงินสดรับสุทธิรายปี}} \quad (3)$$

2.4.4 อัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุน (B/C ratio)

อัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุน คือ อัตราส่วนระหว่างมูลค่าปัจจุบันของผลตอบแทนกับมูลค่าปัจจุบันของค่าใช้จ่ายตลอดอายุของโครงการ ค่าใช้จ่ายคือค่าใช้จ่ายทางด้านทุนและค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานและบำรุงรักษา แสดงดังสมการที่ (4)

$$B/C \text{ ratio} = \frac{\text{มูลค่าปัจจุบันของผลตอบแทนทั้งหมด}}{\text{มูลค่าปัจจุบันของค่าใช้จ่ายทั้งหมด}} \quad (4)$$

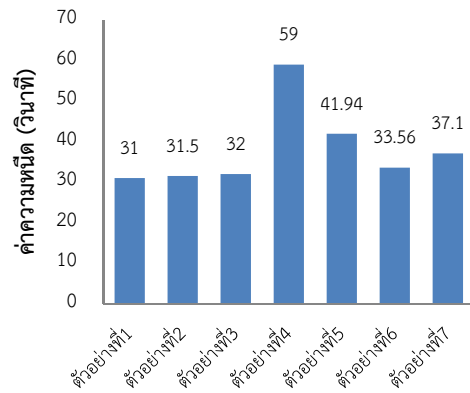
3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

การวิเคราะห์โครงการผลิตหมึกพิมพ์ร่องพื้นสีขาวฐานตัวทำละลายสำหรับผลิตบรรจุภัณฑ์ ได้ผลการวิจัยดังต่อไปนี้

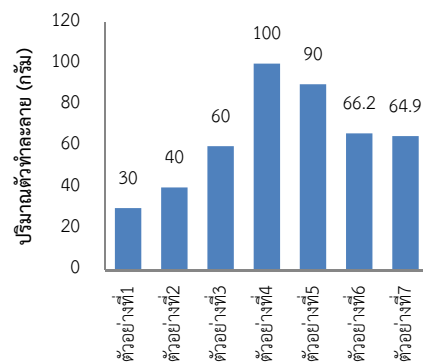
3.1 ผลการศึกษาจากการผลิตหมึกพิมพ์

พบว่าจากการหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของหมึกพิมพ์ฐานตัวทำละลายจากกลุ่มตัวอย่างต่าง ๆ แล้วนำมาทำการทดสอบคุณสมบัติของหมึกพิมพ์ในด้านต่าง ๆ ได้แก่ การทดลองหาค่าปริมาณของแข็งในหมึกพิมพ์ (Solid Content) ค่าความละเอียดของอนุภาคหมึกพิมพ์ (Grinding) ซึ่งในการทดสอบคุณภาพหมึกพิมพ์นั้น จะทำการควบคุม ค่าความหนืด (Viscosity) ให้เหมาะสมสำหรับงานพิมพ์ จากการทดลองได้ค่าความหนืดดังรูปที่ 3

จากข้อมูลค่าความหนืดเริ่มต้น เมื่อทำการปรับค่าความหนืดโดยการเติมตัวทำละลายพบว่าปริมาณของตัวทำละลายที่เติมเพื่อปรับค่าความหนืดให้ได้ตามมาตรฐาน แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 3 แสดงค่าความหนืดเริ่มต้นของหมึกพิมพ์ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 4 แสดงน้ำหนักตัวทำละลายที่ใช้เติมเพื่อปรับความหนืดเท่ากับ 16 วินาที เมื่อวัดด้วย Zahn's cup เบอร์ 3

ค่าความหนืดเป็นคุณสมบัติที่สำคัญเป็นอย่างมากของหมึกพิมพ์ ค่าความหนืดที่ไม่เหมาะสมตามมาตรฐาน จะทำให้สมบัติการไหลของหมึกพิมพ์เปลี่ยนไป และทำให้เกิดปัญหาทางการพิมพ์ ในการผสมตัวทำละลายในหมึกพิมพ์ มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ในการกำหนดค่าความหนืดของหมึกพิมพ์ จากรูปที่ 4 จะสามารถสังเกตได้ว่า ปริมาณของตัวทำละลายที่นำมาผสมให้กับหมึกพิมพ์แต่ละตัวอย่าง จะมีค่าน้อย

แตกต่างกัน เนื่องจากสารให้สี วารนิช และสารยึดติด มีความหนืดที่แตกต่างกัน ส่งผลต่อปริมาณของตัวทำละลายที่นำมาผสม เพื่อให้ได้ค่าความหนืดที่ 16 วินาที มีปริมาณที่แตกต่างกัน

3.2 ผลของการทดสอบสมบัติหมีกพิมพ์ ตัวอย่าง

ทำการทดสอบสมบัติหมีกพิมพ์ด้าน ปริมาณของแข็งในหมีกพิมพ์ และค่าความละเอียดของอนุภาคผงสี ซึ่งผลจากการทดสอบหาค่าปริมาณของแข็งในหมีกพิมพ์ [10] แสดงข้อมูลดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การหาค่าปริมาณของแข็งในหมีกพิมพ์

หมีกพิมพ์ ตัวอย่าง	ร้อยละปริมาณ ของแข็งในหมีกพิมพ์		ค่าความแตกต่างสีเทียบ กับหมีกมาตรฐาน	
	หมีกพิมพ์ เริ่มต้น	หมีกพิมพ์ที่ ควบคุมค่า ความหนืด	หมีกพิมพ์ เริ่มต้น	หมีกพิมพ์ที่ ควบคุมค่า ความหนืด
หมีกพิมพ์ มาตรฐาน	56.93	35.95	0	0
ตัวอย่างที่ 1	52.34	33.77	-4.59	-2.18
ตัวอย่างที่ 2	52.34	33.87	-4.59	-2.08
ตัวอย่างที่ 3	52.34	32.74	-4.59	-3.12
ตัวอย่างที่ 4	51.31	36.18	-5.62	-0.23
ตัวอย่างที่ 5	46.52	35.09	-11.34	-0.86
ตัวอย่างที่ 6	51.97	31.75	-4.96	-4.20
ตัวอย่างที่ 7	48.38	32.03	-8.55	-3.92

หมีกพิมพ์มีค่าปริมาณของแข็งมากหรือน้อยนั้น จะมีผลต่อคุณภาพงานพิมพ์ โดยหมีกที่ค่าปริมาณของแข็งในหมีกพิมพ์ มากแสดงว่ามีปริมาณของผงสีมาก ผลพบว่าตัวอย่างที่ 4 ได้ค่าใกล้เคียงกับหมีกพิมพ์ ตัวอย่างมากที่สุดผลการทดสอบค่าความละเอียดของอนุภาคหมีกพิมพ์ พบว่าทั้ง 7 ตัวอย่างมีค่าความละเอียดผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่ตั้งขึ้น (มีขนาดเล็กกว่าหรือเท่ากับ 3 ไมครอน) เนื่องจากค่าความละเอียดของ

หมีกพิมพ์มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง เพราะมีผลต่อการถ่ายทอดหมีกพิมพ์ลงสู่วัสดุพิมพ์

3.3 ผลการทดสอบคุณภาพงานพิมพ์ของหมีกพิมพ์ตัวอย่าง

ทำการตรวจสอบคุณภาพงานพิมพ์ ด้านค่าการยึดติด (Adhesion) ค่าความเปรียบต่างสี (ΔE_{ab}) ค่าความทึบแสง (Opacity) การยึดติดของชั้นฟิล์มแบบรัดรวม (Bond Strength Extrusion) และค่าการยึดติดของชั้นฟิล์มแบบการประกบแห้ง (Bond Strength Dry Lamination)

3.3.1 ผลการทดสอบการยึดติด

ใช้แถบทดสอบการยึดติด ทำการทดสอบค่าการยึดติดของหมีกพิมพ์ ผลพบว่าหมีกพิมพ์ตัวอย่างทุกชนิด มีระดับการยึดติดบนพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีน เทเรพทาเรต (PET) อยู่ในช่วง 4-5 แสดงว่าสามารถนำมาใช้พิมพ์ลงบนพลาสติกชนิดนั้นได้จริง แต่การยึดติดของหมีกพิมพ์บนพลาสติกชนิดโอเร็นเทต โพลีโลฟีน (OPP) มีหมีกพิมพ์ตัวอย่างที่ 2 และ 3 ที่ไม่ผ่านค่ามาตรฐานการยึดติด ข้อมูลแสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ระดับการยึดติด (Adhesion) ของหมีกพิมพ์ตัวอย่างบนพลาสติกชนิด พอลิเอทิลีน เทเรพทาเรต (PET) และฟิล์มพลาสติกชนิดโอเร็นเทต โพลีโลฟีน (OPP)

หมีกพิมพ์ ตัวอย่าง	ระดับการยึดติดของหมีกพิมพ์บน พลาสติก	
	OPP	PET
หมีกพิมพ์ มาตรฐาน	5	5
ตัวอย่างที่ 1	4	5
ตัวอย่างที่ 2	2	5
ตัวอย่างที่ 3	1	5
ตัวอย่างที่ 4	5	5

ตารางที่ 5 ระดับการยึดติด (Adhesion) ของหมึกพิมพ์ตัวอย่างบนพลาสติกชนิด พอลิเอทิลีนเทเรพทาเรต (PET) และฟิล์มพลาสติกชนิดโอเร็นเทต โพลีโพลีลีน (OPP) (ต่อ)

หมึกพิมพ์ ตัวอย่าง	ระดับการยึดติดของหมึกพิมพ์บน พลาสติก	
	OPP	PET
ตัวอย่างที่ 5	5	5
ตัวอย่างที่ 6	4	4
ตัวอย่างที่ 7	-	4

หมายเหตุ :

5 คือ หมึกพิมพ์ยึดติดดีมากไม่มีหมึกพิมพ์ติดแถบทดสอบการยึดติดขึ้นมา

4 คือ หมึกพิมพ์ยึดติดดีมีหมึกพิมพ์ติดแถบทดสอบการยึดติดขึ้นมาไม่เกินร้อยละ 5

3 คือ หมึกพิมพ์ยึดติดปานกลางมีหมึกพิมพ์ติดแถบทดสอบการยึดติดขึ้นมาไม่เกินร้อยละ 15

2 คือ หมึกพิมพ์ยึดติดพอใช้ มีหมึกพิมพ์ติดแถบทดสอบการยึดติดขึ้นมาไม่เกินร้อยละ 35

1 คือ หมึกพิมพ์ยึดติดไม่ดี มีหมึกพิมพ์ติดแถบทดสอบการยึดติดขึ้นมาไม่เกินร้อยละ 65

0 คือ หมึกพิมพ์ยึดติดไม่ดีมาก มีหมึกพิมพ์ติดแถบทดสอบการยึดติดขึ้นมาเกินร้อยละ 65

- คือ ไม่มีการทดลองเนื่องจากหมึกพิมพ์ตัวอย่างที่ 7 เหมาะสำหรับพิมพ์บนฟิล์ม PET

3.3.2 ผลการทดสอบความทึบแสง

การทดสอบความทึบแสง พบว่า หมึกพิมพ์ตัวอย่างทุกกลุ่มตัวอย่าง มีค่าความทึบแสง (Opacity) อยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกัน สามารถนำไปใช้งานได้จริง

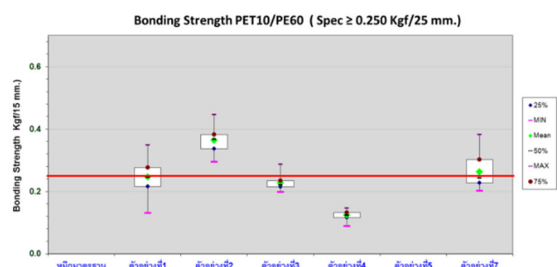
3.3.3 ผลการทดสอบค่าความแตกต่างสี

ค่าความแตกต่างสี (ΔE^*_{ab}) คือ การนำตัวอย่างสี 2 ตัวอย่างมาเปรียบเทียบกับกัน จะมีการกำหนดค่าความแตกต่างสีมาตรฐานที่ไม่เกิน 1 ซึ่งเป็นค่าความ

แตกต่างสีที่สายตาของมนุษย์ไม่สามารถแยกได้ (12) ค่าความแตกต่างสีที่ได้จากการเปรียบเทียบสีของหมึกพิมพ์ 7 ตัวอย่าง ที่พิมพ์บนพลาสติกชนิด PET และบนพลาสติกชนิด OPP จะพบว่าหมึกพิมพ์ทั้ง 7 ตัวอย่างมีค่าความแตกต่างสี อยู่ที่ 0.17 – 0.98 ซึ่งไม่เกินค่ามาตรฐาน

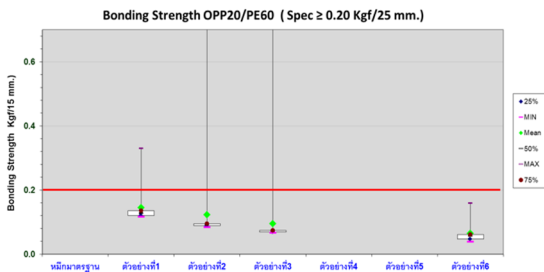
3.3.4 ผลการทดสอบการยึดติด

ค่าการยึดติดของชั้นฟิล์มแบบการเคลือบรีดร่วมจากผลการทดสอบพบว่า หมึกมาตรฐานมีค่าการยึดติดที่ต่ำมากเพราะเมื่อทำการทดสอบแล้วฟิล์มขาดทำให้ไม่ได้ค่าที่แท้จริง ซึ่งหมึกตัวอย่างที่ 5 ก็เป็นเช่นเดียวกัน ส่วนหมึก ตัวอย่างที่ 2, 6 และ 7 มีค่าผ่านมาตรฐานซึ่งอยู่ที่ 0.25 กิโลกรัมในหน่วยของแรง (kilogram-force) มีหมึกตัวอย่างที่ 1, 3 และ 4 ที่ไม่ผ่านการทดสอบ แสดงข้อมูลดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 แสดงการยึดติดของชั้นฟิล์มแบบการเคลือบรีดร่วมของหมึกตัวอย่างที่พิมพ์ลงบนพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีน เทเรพทาเรต (PET)

เมื่อทดสอบการยึดติดของชั้นฟิล์มแบบการเคลือบรีดร่วม ของหมึกตัวอย่างที่พิมพ์ลงบนพลาสติกชนิดโอเร็นเทต โพลีโพลีลีน (OPP) จะพบว่าหมึกตัวอย่างที่ 4 และ 5 มีค่าการยึดติดที่ต่ำมากเพราะเมื่อทำการทดสอบแล้วฟิล์มขาดทำให้ไม่ได้ค่าที่แท้จริง ส่วนหมึกตัวอย่างที่ 1, 2, 3 และ 6 มีค่าไม่ผ่านมาตรฐานซึ่งอยู่ที่ 0.20 กิโลกรัมในหน่วยของแรง (kilogram-force) แสดงดังรูปที่ 6

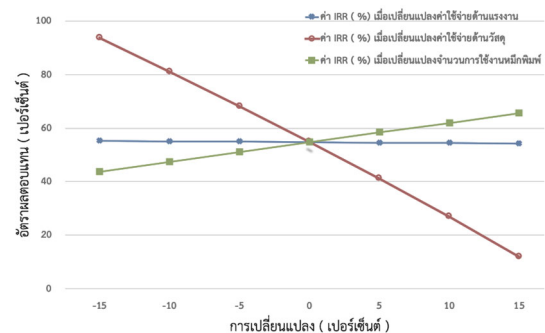


รูปที่ 6 แสดงการยึดติดของชั้นฟิล์มแบบการเคลือบรีด
รวมของหมึกตัวอย่างที่พิมพ์ลงบนพลาสติก
ชนิดโอเร็นเทต โพลีโลฟีสีน (OPP)

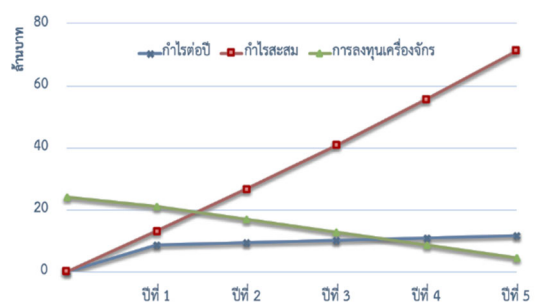
3.4 ผลการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของ โครงการ

โดยทำการพิจารณาจากหมึกตัวอย่างที่ผ่านค่าการทดสอบด้านสมบัติ และคุณภาพงานพิมพ์บนพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีน เทเรพทาเรต (PET) และพลาสติกชนิดโอเร็นเทตโพลีโลฟีสีน (OPP) คือ หมึกตัวอย่างที่ 5 มาทำการวิเคราะห์ โดยการประมาณการลงทุนของโครงการมีมูลค่าการลงทุนแรกเริ่มอยู่ที่ 21,000,000 บาท (เครื่องจักรในการผลิตหมึก 20,000,000 บาท และการปรับปรุงสถานที่ 1,000,000 บาท) อายุโครงการ 5 ปี มีต้นทุนได้แก่ เงินเดือน ค่าสาธารณูปโภค ค่าซ่อมบำรุง ฯลฯ เฉลี่ยอยู่ที่เดือนละ 50,000 บาท และมีต้นทุนผันแปรได้แก่ ค่าวัตถุดิบในการผลิตหมึก ค่าไฟ อยู่ที่ 93 บาทต่อกิโลกรัม กำหนดให้มีค่าเสื่อมราคาของเครื่องจักรร้อยละ 20 ต่อปี ไม่มีมูลค่าซาก โดยมีการกำหนดให้อัตราผลตอบแทนต่ำสุดที่ยอมรับได้ (Minimum Attractive Rate of Return) เท่ากับร้อยละ 10 จากเดิมโรงงานได้ซื้อหมึกราคากิโลกรัมละ 118 บาท สามารถช่วยลดต้นทุนของหมึกลงได้ กิโลกรัมละ 25 บาท ในแต่ละเดือนใช้หมึก 45,000 กิโลกรัม โดยมีผลการศึกษาดังนี้ (1) มูลค่าปัจจุบันสุทธิของผลตอบแทน (NPV) เท่ากับ 5,053,593 บาท (2) อัตราผลตอบแทน (IRR) เท่ากับร้อยละ 54.79 ยังมีค่ามากกว่าค่าอัตราผลตอบแทน

ต่ำสุดที่ยอมรับได้ (MARR) ของโครงการที่ได้กำหนดเอาไว้ (3) ระยะเวลาคืนทุนอยู่ที่ 1 ปี 8 เดือน (4) อัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุน (B/C ratio) เท่ากับ 1.25 (5) ผลการวิเคราะห์ความไว (Sensitivity) ของเปอร์เซ็นต์อัตราผลตอบแทน (IRR) ของตัวแปรด้านค่าใช้จ่ายแรงงาน, ค่าใช้จ่ายด้านวัสดุ และการเปลี่ยนแปลงจำนวนการใช้งาน ในช่วง +/- ร้อยละ 15 (ต่อปี) ยังให้อัตราผลตอบแทนยังมีค่าเป็นบวกและมีค่าเกินกว่าอัตราผลตอบแทนต่ำสุดที่ยอมรับได้ของโครงการที่ได้กำหนดเอาไว้แสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 แสดงผลการศึกษา Sensitivity ของเปอร์เซ็นต์
อัตราผลตอบแทน (IRR) เทียบกับตัวแปรต่าง ๆ



รูปที่ 8 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างมูลค่าการลงทุน
รายได้ และกำไรสะสม เทียบกับระยะเวลาที่ดำเนินการ

โดยตัวแปรด้านค่าใช้จ่ายด้านวัสดุที่สูงเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อัตราผลตอบแทนลดลง เนื่องจากเป็นค่าใช้จ่ายทางด้านต้นทุนที่สำคัญในการผลิตหมึกและ

ส่งผลกระทบต่อความเป็นไปได้ของโครงการ จึงควรให้ความสำคัญเป็นพิเศษกับต้นทุนด้านนี้ และได้มีการแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างมูลค่าการลงทุน รายได้ และกำไรสะสม เทียบกับระยะเวลาที่ดำเนินการ ตลอดอายุการลงทุน แสดงดังรูปที่ 8 พบว่าเมื่อโครงการได้ดำเนินการผลิตอย่างต่อเนื่องจะมีกำไรสะสมเพิ่มสูงขึ้นตลอดอายุโครงการ เนื่องจากการคิดค่าเสื่อมราคาของเครื่องจักร และมีจุดคุ้มทุนของโครงการ (กำไรสะสม/การลงทุน) ตรงตามที่ได้คำนวณเอาไว้ จากผลการศึกษาต่าง ๆ ที่ได้ดำเนินการมา สรุปได้ว่าโครงการนี้มีความคุ้มค่าในการลงทุน

4. สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัยพบว่า หมึกสีขาวที่ถูกสร้างขึ้นในแต่ละสูตรจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน จากการวิเคราะห์ค่าความหนืด วัดค่าปริมาณของแข็งในหมึกพิมพ์ ค่าความละเอียดของอนุภาค การทดสอบการยึดติด ค่าความทึบแสง ค่าความเปรียบต่างสี ค่าการยึดติดของชั้นฟิล์มแบบการประกบแห้ง จากผลการศึกษาทั้งหมดพบว่าหมึกพิมพ์ตัวอย่างที่ 5 มีคุณสมบัติที่เหมาะสมและผ่านตามาตรฐานของโรงงานที่ได้ตั้งเอาไว้ และผลการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของโครงการพบว่า มูลค่าปัจจุบันสุทธิของผลตอบแทน (NPV) เท่ากับ 5,053,593 บาท อัตราผลตอบแทน (IRR) เท่ากับร้อยละ 54.79 ยังมีค่ามากกว่าค่าอัตราผลตอบแทนต่ำสุดที่ยอมรับได้ (MARR) ของโครงการที่ได้กำหนดเอาไว้ (ร้อยละ 10) ระยะเวลาคืนทุนอยู่ที่ 1 ปี 8 เดือน อัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุน (B/C ratio) เท่ากับ 1.25 การวิเคราะห์ความไว (Sensitivity) ของเปอร์เซ็นต์อัตราผลตอบแทน (IRR) ของตัวแปรด้านค่าใช้จ่ายแรงงาน, ค่าใช้จ่ายด้านวัสดุ และการเปลี่ยนแปลงจำนวนการใช้งาน ในช่วง +/- ร้อยละ 15 ยังให้อัตราผลตอบแทนยังมีค่าเป็นบวกและมีค่าเกินกว่าอัตราผลตอบแทนต่ำสุดที่ยอมรับได้ของโครงการ จากผลดังกล่าวแปลผลว่า

โครงการมีความคุ้มค่าในการลงทุน และจากข้อมูลทั้งเรื่องคุณภาพและคุณสมบัติของหมึก จึงสรุปได้ว่าหมึกตัวอย่างที่ 5 สามารถนำมาผลิตและใช้งานได้ของบริษัท โดยมีคุณสมบัติเทียบเท่าหมึกพิมพ์สำเร็จรูปที่ใช้ในปัจจุบัน มีความคุ้มค่าและช่วยลดต้นทุนการผลิต อีกทั้งยังช่วยสร้างความได้เปรียบในการแข่งขันของบริษัทได้

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] T. Srithongterm (2019, June 8) Plastic packaging industry. [Online] . Available: <https://www.lhbank.co.th/>
- [2] A. Hansuebsia, Advances in printing technology, 1st ed. Bangkok. Chulalongkorn University Press, 1999.
- [3] M. Paklamjeak, CONSUMER PACKAGING, 1st ed. Bangkok. E Hing Printing Press, 2013.
- [4] P. Amornpinit, Recess screen and non-impact printing processes, 1st ed. Nonthaburi. University Press Sukhothai Thammathirat Open University ,1994 pp. 22.
- [5] D. Khamraksa and A. Themmathurapoj, “Studying about a Payback Period of Using the Automatic Offset Printing Ink Pumps Instead of the Traditional Offset Printing Ink Cans,” Project, Dept. Printing Tech., King Mongkut’s Univ Thonburi, Bangkok, Thailand, 2011.
- [6] W. Janjomsuke, “Modification of a single-solvent- based gravure ink for enhance wettability and substrate adhesion,” Thesis. Rochester Institute of Technology, New York, USA , 2005.
- [7] T. Ongwong and P. Lhongsomboon, “Mixing of Gravure Printing Ink to Improve Color

- Matching between Proof and Actual Print,” Project, Dept. Printing Tech., King Mongkut’s Univ Thonburi., Bangkok, Thailand, 2008.
- [8] T. Nantarat and C. Papusson, “Economic Feasibility Evaluation of Government Investment Project by Using Cost Benefit Analysis: A Case Study of Domestic Port Port A),” in *Procedia Economics and Finance Laem- Chabang Port, Chonburi Province*, 2012, pp. 307-314.
- [9] C. Piputsitee, *Economics of project analysis*, 3st ed. . Bangkok. Office of Promotion and Training Kasetsart University, 1997
- [10] C. Chantaro and S. Thongprasert, *Engineering Statistics*, 1st ed. Bangkok. Chulalongkorn University Press, 1993.
- [11] A. E. Boardman, D.H. Greenberg, A. R. Vining and D. L. Weimer, *Cost-Benefit analysis: Concepts and practice* (2nd ed.). UpperSaddle River, NJ: Prentice-Hall., 2001.
- [12] R. Xu, A. Pekarovicova, P. D. Fleming, Y. J. Wu and M. X. Wang, “A method for evaluating ink mileage in gravure printing,” *Tappi Journal*, vol. 6, no. 12, pp. 27-32, Dec. 2007.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

การพัฒนาแบบจำลองและการพยากรณ์ดัชนีรังสีอัลตราไวโอเล็ตรายชั่วโมง โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมในจังหวัดสงขลา

ประนอมกร ชูศรี^{1*} สราวุธ นิยมเนียร² วรพันธุ์ การชนะชาติ³ และ สนิธดา เทียนสี⁴

¹ คณะวิทยาศาสตร์สุขภาพ มหาวิทยาลัยคริสเตียน

^{2, 3, 4} คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

¹ 144 ตำบลดอนยายหอม อำเภอเมืองนครปฐม จังหวัดนครปฐม 73000

^{2, 3, 4} 321 ตำบลทะเลชุบศร อำเภอเมืองลพบุรี จังหวัดลพบุรี 15000

รับบทความ 16 กันยายน 2563; แก้ไขบทความ 30 มีนาคม 2564; ตอรับบทความ 5 พฤษภาคม 2564

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตซึ่งเป็นรังสีที่มีผลต่อผิวหนังมนุษย์และเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดโรคมะเร็งผิวหนัง โดยผู้วิจัยได้รวบรวมข้อมูลความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ได้จากการวัดภาคพื้นดินในจังหวัดสงขลาและนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาดัชนีรังสีอัลตราไวโอเล็ต จากนั้นผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาแบบจำลองและวิธีการพยากรณ์ดัชนีรังสีอัลตราไวโอเล็ตโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้จะประกอบด้วยชั้นอินพุต (Input Layer) ชั้นซ่อน (Hidden Layer) 2 ชั้น และชั้นเอาต์พุต (Output Layer) ซึ่งข้อมูลที่เป็นอินพุต ทั้งหมดมี 4 ตัวแปร ได้แก่ ความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่มีผลต่อผิวหนังมนุษย์นอกชั้นบรรยากาศโลก มุมเซนซิของดวงอาทิตย์ ค่าความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง และดัชนีเมฆ ซึ่งตัวแปรดังกล่าวมีผลต่อการเพิ่มและลดลงของดัชนีรังสีอัลตราไวโอเล็ต โดยโครงข่ายประสาทเทียมที่ได้นั้นสามารถคำนวณดัชนีรังสีอัลตราไวโอเล็ตรายชั่วโมงได้เป็นอย่างดี โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในรูปของรากที่สองของค่าเบี่ยงเบนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Difference, RMSD) และค่าเบี่ยงเบนจากความเอนเอียงเฉลี่ย (Mean Bias Difference, MBD) เท่ากับร้อยละ 12.8 และร้อยละ -2.4 ตามลำดับ จากนั้นผู้วิจัยได้ใช้ข้อมูลดัชนีรังสีอัลตราไวโอเล็ตรายชั่วโมงย้อนหลัง 7 วัน เพื่อพยากรณ์ดัชนีรังสีอัลตราไวโอเล็ตใน 1 วันหรือ 9 ชั่วโมงถัดไป (ตั้งแต่ 08:00 น.-16:00 น.) ใช้โดยอัลกอริทึมในโครงข่ายประสาทเทียมแบบเพอร์เซพตรอนหลายชั้นและการเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับ (Back Propagation Algorithm) ซึ่งพบว่าโครงข่ายประสาทเทียมสามารถพยากรณ์ได้ค่อนข้างแม่นยำ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนในรูป RMSD เท่ากับร้อยละ 17 และ MBD เท่ากับร้อยละ 0.3

คำสำคัญ : โครงข่ายประสาทเทียม; การพยากรณ์; ดัชนีรังสีอัลตราไวโอเล็ต; มะเร็งผิวหนัง

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Development of a Model and Forecasting of Hourly UV Index Using Artificial Neural Network (ANN) at Songkhla

Pranomkorn Choosri^{1*} Sarawut Nabnean² Worapan Kanchanachat³
and Sanitta Teansri⁴

¹ College of Health Sciences, Christian University of Thailand

^{2,3,4} Faculty of Science and Technology, Thepsatri Rajabhat University

¹ 144 Donyahom, Muang Nakhon Pathom, Nakhon Pathom 73000

^{2,3,4} 321 Thale Chupson, Muang Lopburi, Lopburi 15000

Received 16 September 2020; Revised 30 March 2021; Accepted 5 May 2021

Abstract

In this work, solar erythemal ultraviolet radiation (EUV) which affects human skin and skin cancer was investigated at Songkhla province (7.2°N, 100.6°E). EUV was converted to UV index, then the data was used for model development and forecasting of hourly UV index using Artificial Neural Network (ANN). The ANN model has one input layer, two hidden layers and one output layer. This input layer consists of extraterrestrial erythemal ultraviolet radiation, solar zenith angle, aerosol optical depth and cloud index which affect ultraviolet radiation, and the output layer is hourly UV index. The results show that hourly UV index obtained from ANN and that from the measurement are in reasonable agreement, with root mean square difference of 12.8% and mean bias difference of -2.4%. For forecasting of the hourly UV index, the data for 7 days earlier was used for forecasting the next UV index for one day or nine-hour (08:00 am.-16:00 pm.). Multi-layer perceptron and back propagation algorithm were used in the model forecasting. The results show that the UV index from the model forecasting is reasonable agrees with UV index from measurement with root mean square difference of 17.0% and mean bias difference of 0.3%.

Keywords : Artificial Neural Network; Forecasting; UV Index; Carcinoma

** Corresponding Author. Tel.: +668 2722 7601, E-mail Address: pranomkorn.aum@gmail.com*

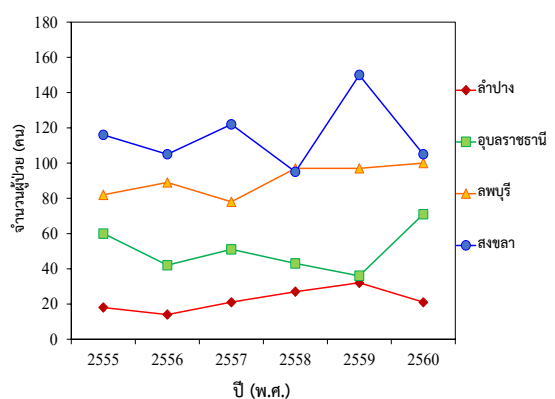
1. บทนำ

รังสีอัลตราไวโอเล็ตเป็นส่วนหนึ่งของสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ที่มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 100-400 นาโนเมตร โดยสามารถแบ่งตามผลกระทบทางชีววิทยาได้ 3 ช่วง คือ รังสีอัลตราไวโอเล็ตเอ (315-400 นาโนเมตร) รังสีอัลตราไวโอเล็ตบี (280-315 นาโนเมตร) และรังสีอัลตราไวโอเล็ตซี (100-280 นาโนเมตร) [1] โดยรังสีอัลตราไวโอเล็ตซีไม่สามารถส่งผ่านมายังพื้นผิวโลกได้เนื่องจากถูกดูดกลืนด้วยโอโซนในชั้นสตราโตสเฟียร์ไปจนหมด[2] มีเพียงรังสีอัลตราไวโอเล็ตเอและบีเท่านั้นที่สามารถผ่านเข้ามาในชั้นบรรยากาศโลกได้ และคิดเป็นเพียงร้อยละ 1.5 ของพลังงานทั้งหมดที่แผ่ออกมาจากดวงอาทิตย์ [3] ถึงแม้ว่าจะมีปริมาณที่ไม่มาก แต่ในด้านพลังงานโฟตอน รังสีอัลตราไวโอเล็ตเป็นรังสีที่มีพลังงานโฟตอนสูง ซึ่งจะมีผลกระทบต่อมนุษย์เป็นอย่างมาก อาทิเช่น หากร่างกายได้รับในปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้ผิวหนังแดง แสบร้อน เป็นผดผื่น เกิดริ้วรอยก่อนวัยอันควร และอาจส่งผลทำให้เกิดเป็นโรคมะเร็งผิวหนังได้ นอกจากนี้รังสีอัลตราไวโอเล็ตยังส่งผลกระทบต่อดวงตา [4] โดยจะส่งผลทำให้จอประสาทตาและเยื่อตาขาวอักเสบ ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดต้อเนื้อและต้อกระจก

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่า รังสีอัลตราไวโอเล็ตมีความสำคัญต่อสิ่งมีชีวิต ดังนั้นเพื่อให้เกิดความเข้าใจง่ายขึ้นถึงระดับความรุนแรงของรังสีอัลตราไวโอเล็ต องค์การอนามัยโลก (World Health Organization, WHO) จึงได้กำหนดค่าดัชนีรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV index) เพื่อใช้เป็นมาตรฐานในการบอกระดับความรุนแรงของรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่มีผลต่อผิวหนังมนุษย์ โดยค่าดัชนีรังสีอัลตราไวโอเล็ตจะมีค่าตั้งแต่ 0 เป็นต้นไป ซึ่งค่าดัชนีน้อย ๆ จะแสดงถึงปริมาณความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตนั้นมีค่าต่ำไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ และถ้าค่าดัชนีมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 11 จะแสดงถึงปริมาณความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตมีค่าสูงจัดและอยู่ในระดับที่รุนแรง โดยที่ประชาชนหรือนักท่องเที่ยวควร

หลีกเลี่ยงจากการออกไปอยู่ที่โล่งแจ้งหรือควรที่จะมีวิธีการเตรียมตัวเพื่อป้องกันอย่างถูกวิธี เช่น การทาครีมกันแดด และการใส่เสื้อผ้าที่มิดชิด เป็นต้น

ดัชนีรังสีอัลตราไวโอเล็ตจะมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะทางภูมิศาสตร์ [5], [6] และตัวแปรต่างๆ ในบรรยากาศ เช่น โอโซน ไอน้ำ ฝุ่นละออง เมฆ และก๊าซต่างๆ เป็นต้น [7]-[9] ดังนั้นจึงมีนักวิจัยจำนวนมากสนใจที่จะทำการวัดและวิเคราะห์การแปรค่าของดัชนีรังสีอัลตราไวโอเล็ต แต่เนื่องจากเครื่องมือในการตรวจวัดและค่าบำรุงดูแลรักษาค่อนข้างสูง จึงทำให้มีการพัฒนาวิธีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อคำนวณหรือพยากรณ์ดัชนีรังสีอัลตราไวโอเล็ตในพื้นที่ที่ต้องการศึกษาให้มีความแม่นยำมากที่สุด โดยส่วนใหญ่แบบจำลองที่ได้จะมีทั้งแบบจำลองเชิงฟิสิกส์ [10] แบบจำลองแบบเคมีเอมไพริคัล [11] และแบบเอมไพริคัล [12] นอกจากนี้ยังอัลกอริทึมจากโปรแกรมต่างๆ เนื่องจากมีความสะดวกและง่ายต่อการใช้งาน อีกทั้งที่มาของโปรแกรมได้รับการพัฒนาจากนักวิจัยหลายๆ สถาบัน เช่น โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network) [13], [14] แบบจำลองการส่งผ่านรังสี (Radiative Transfer Model) เป็นต้น



รูปที่ 1 จำนวนผู้ป่วยโรคมะเร็งผิวหนังของจังหวัด

ลำปาง อุบลราชธานี ลพบุรี และสงขลา
ตั้งแต่ปี 2555-2560 ข้อมูลจากงานทะเบียนโรคมะเร็งที่
โรงพยาบาลดังกล่าว

สำหรับประเทศไทยเป็นประเทศที่ตั้งอยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตร ทำให้ได้รับรังสีอาทิตย์สูงตลอดทั้งปี โดยเฉพาะบริเวณภาคใต้ของประเทศไทย รังสีอาทิตย์ที่มีความเข้มสูงจะมีผลทำให้รังสีอัลตราไวโอเล็ตเพิ่มสูงขึ้นไปด้วย หากดูสถิติจำนวนผู้ป่วยที่เป็นโรคมะเร็งผิวหนังของแต่ละภาคของประเทศไทย (รูปที่ 1) ซึ่งให้จังหวัดลำปาง อุบลราชธานี ลพบุรี และสงขลา เป็นตัวแทนภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคกลางและภาคใต้ ตามลำดับ

จากรูปที่ 1 จะเห็นได้ว่าข้อมูลจำนวนผู้ป่วยโรคมะเร็งผิวหนังของจังหวัดสงขลา มีจำนวนสูงกว่าจังหวัดอื่นๆ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาลักษณะการแปรค่าของดัชนีรังสีอัลตราไวโอเล็ตในพื้นที่จังหวัดสงขลา รวมทั้งพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการพยากรณ์ดัชนีรังสีอัลตราไวโอเล็ตรายชั่วโมงโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

2. ระเบียบวิธีวิจัย

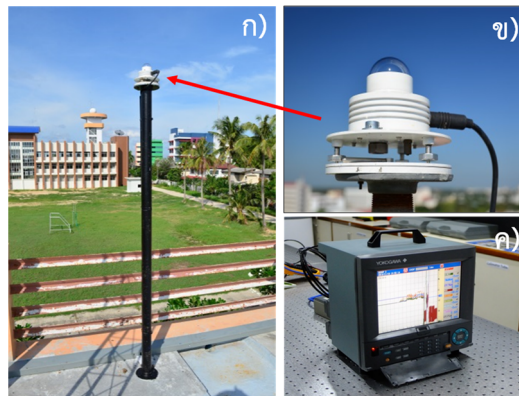
การแปรค่าดัชนีรังสีอัลตราไวโอเล็ตขึ้นอยู่กับลักษณะทางภูมิศาสตร์และตัวแปรต่างๆ ในบรรยากาศ ดังนั้นผู้วิจัยจะต้องทำการรวบรวมข้อมูลต่างๆ ที่เกี่ยวข้องและทำการศึกษางานของโครงข่ายประสาทเทียมที่เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองและการพยากรณ์ในงานวิจัยนี้ โดยระเบียบวิธีวิจัยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 ข้อมูลดัชนีรังสีอัลตราไวโอเล็ต

ผู้วิจัยได้ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลปริมาณความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่มีผลต่อผิวหนังมนุษย์ (Erythmal Ultraviolet Radiation, EUV) โดยใช้เครื่องวัดที่มีชื่อว่า ยูวีไบโอมิเตอร์ (UV Biometer) รุ่น 501A ผลิตโดยบริษัทโซลาร์ไลท์ (Solar Light)

เครื่อง UV Biometer ได้ถูกติดตั้งที่ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออก อำเภอเมือง จังหวัด

สงขลา (7.2°N, 100.6°E) โดยติดตั้งไว้บนดาดฟ้าของอาคารที่มีเสาสูงประมาณ 150 เซนติเมตร เพื่อให้เงาของสิ่งปลูกสร้างหรือต้นไม้บังสัญญาณ ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ก) ลักษณะการติดตั้งของเครื่องวัด ข) ลักษณะของเครื่องวัดรังสีอัลตราไวโอเล็ต ค) เครื่องบันทึกข้อมูลของบริษัท Yokogawa รุ่น DX2000

เครื่องวัด UV Biometer สามารถวัดปริมาณความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตในช่วงความยาวคลื่น 280-400 นาโนเมตร ซึ่งเครื่องวัดมีค่าการตอบสนองที่ใกล้เคียงกับการตอบสนองของผิวหนังมนุษย์ (Erythmal Response) [15]

เครื่องมือวัดจะให้สัญญาณออกมาในรูปของศักย์ไฟฟ้า จากนั้นทำการแปลงค่าโดยใช้สมการที่ 1 เพื่อให้ได้ค่าความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่มีผลต่อผิวหนังมนุษย์

$$I_{EUV} = \frac{V}{S} \quad (1)$$

โดยที่

I_{EUV} = ปริมาณความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่มีผลต่อผิวหนังมนุษย์ (วัตต์ต่อตารางเมตร)

V = ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องวัด (โวลต์)

S = ค่าการตอบสนองของเครื่องวัด (โวลต์ต่อวัตต์ต่อตารางเมตร)

เมื่อทำการแปลงข้อมูลเป็นปริมาณความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตแล้ว ผู้วิจัยนำข้อมูลที่เป็นรายชั่วโมงมาทำการคำนวณดัชนีรังสีอัลตราไวโอเล็ตดังสมการต่อไปนี [1]

$$UV\ index = k_{er} I_{EUV} \quad (2)$$

โดยที่

k_{er} = ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 40 (ตารางเมตรต่อวัตต์)

I_{EUV} = ปริมาณความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่มีผลต่อผิวหนังมนุษย์ (วัตต์ต่อตารางเมตร)

ผู้วิจัยได้ทำการรวบรวมข้อมูลดัชนีรังสีอัลตราไวโอเล็ตตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2559 ถึง 31 ธันวาคม พ.ศ. 2560 เป็นระยะเวลาทั้งหมด 2 ปี เพื่อทำการวิเคราะห์และสร้างแบบจำลองในลำดับต่อไป

2.2 ข้อมูลตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง

การสร้างแบบจำลองเพื่อคำนวณและพยากรณ์ดัชนีรังสีอัลตราไวโอเล็ตรายชั่วโมงในพื้นที่จังหวัดสงขลานั้น นอกจากข้อมูลดัชนีรังสีอัลตราไวโอเล็ตแล้ว ผู้วิจัยยังได้ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลอื่น ๆ ได้แก่ ปริมาณความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่มีผลต่อผิวหนังมนุษย์นอกชั้นบรรยากาศโลก มุมเซนธิของดวงอาทิตย์ ค่าความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง และดัชนีเมฆในบรรยากาศ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.2.1 ความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตนอกบรรยากาศโลก

ในการคำนวณหาปริมาณความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่มีผลต่อผิวหนังมนุษย์นอกชั้นบรรยากาศโลก เพื่อนำมาใช้สร้างแบบจำลองนั้น สามารถคำนวณหาได้ดังสมการต่อไปนี้ [16]

$$I_o = I_{sc} E_o \cos \theta_z \quad (3)$$

โดยที่

I_o = ค่าความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตนอกชั้นบรรยากาศโลก (วัตต์ต่อตารางเมตร)

I_{sc} = ค่าคงที่ของรังสีอัลตราไวโอเล็ตนอกชั้นบรรยากาศโลก (วัตต์ต่อตารางเมตร)

E_o = ค่าแฟกเตอร์สำหรับแก้ผลความรีของวงโคจรของโลกกับดวงอาทิตย์ (-)

θ_z = มุมเซนธิของดวงอาทิตย์ (องศา)

2.2.2 มุมเซนธิของดวงอาทิตย์

ดัชนีรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ส่งผ่านมายังพื้นผิวโลกจะมีปริมาณมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับตำแหน่งปรากฏของดวงอาทิตย์ เช่น ตอนเช้าในช่วงเวลาที่ดวงอาทิตย์ขึ้นค่าดัชนีรังสีอัลตราไวโอเล็ตจะมีค่าน้อย และถ้าตอนเที่ยงวันหรือช่วงเวลาที่ดวงอาทิตย์ขึ้นตรงกับศีรษะมากที่สุดดัชนีรังสีอัลตราไวโอเล็ตจะมีค่าสูง ซึ่งเป็นผลจากระยะทางที่แสงถูกลดทอนด้วยตัวแปรทางบรรยากาศ (Optical Path Length) โดยมุมเซนธิของดวงอาทิตย์สามารถคำนวณหาได้ดังสมการ [16]

$$\cos \theta_z = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega \quad (4)$$

โดยที่

ω = มุมชั่วโมงของดวงอาทิตย์ (องศา)

φ = ละติจูด (องศา)

δ = มุมเดคลิเนชัน (องศา)

2.2.3 ความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง

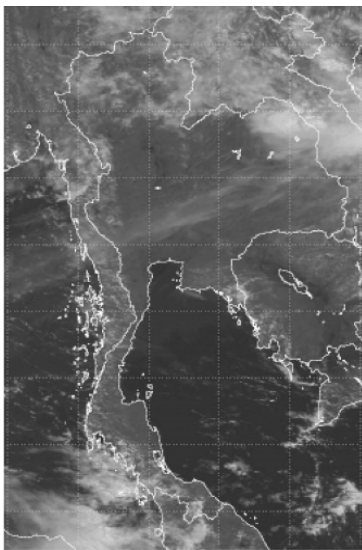
ฝุ่นละอองในบรรยากาศมีผลต่อการดูดกลืนและกระเจิงรังสีอัลตราไวโอเล็ตจากดวงอาทิตย์ที่แต่ละความยาวคลื่นแตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นกับชนิดและปริมาณของฝุ่นละออง ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ข้อมูลความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง (Aerosol Optical Depth) ที่ได้จากเครื่องวัดรังสีตรงหรือซันโฟโตมิเตอร์

เครื่องซันโฟโตมิเตอร์สามารถวัดรังสีอาทิตย์ที่ความยาวคลื่น 1020, 870, 675, 500, 440, 380 และ

340 นาโนเมตร ข้อมูลที่ได้จะถูกนำไปคำนวณหาค่าความลึกเชิงแสงของฝุ่นละอองที่ความยาวคลื่นต่างๆ โดยเครือข่ายการวัดสมบัติเชิงแสงของฝุ่นละอองแอโรโซลเน็ต (Aerosol Robotic Network, AERONET) ขององค์การนาซ่าและทำการเผยแพร่ข้อมูลทางเว็บไซต์ <https://aeronet.gsfc.nasa.gov> จากนั้นผู้วิจัยทำการดาวน์โหลดข้อมูลความลึกเชิงแสงของฝุ่นละอองที่ความยาวคลื่น 340 นาโนเมตร ซึ่งเป็นความยาวคลื่นในช่วงของรังสีอัลตราไวโอเล็ต ตั้งแต่ 08:00 น.-16:00 น.

2.2.4 ดัชนีเมฆ

เมฆเป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงดัชนีรังสีอัลตราไวโอเล็ต เนื่องจากเมฆสามารถดูดกลืนและสะท้อนรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้



รูปที่ 3 ตัวอย่างภาพถ่ายจากดาวเทียมที่ได้อยู่ในรูปภาพฉายแบบผิวทรงกระบอก

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ข้อมูลเมฆจากดาวเทียม MTSAT (ข้อมูลปี พ.ศ. 2559) และ Himawari (ข้อมูลปี พ.ศ. 2560) ซึ่งเป็นดาวเทียมค้างฟ้าที่ถูกพัฒนาขึ้นโดยกรมอุตุนิยมวิทยาประเทศญี่ปุ่น (The Japan Meteorological Agency, JMA) ซึ่งดาวเทียมจะทำการ

บันทึกภาพทุก ๆ 1 ชั่วโมงตลอดทั้งวัน โดยภาพถ่ายดาวเทียมที่ได้จะเป็นข้อมูลดิจิทัล 8 บิต โดยแต่ละภาพจะประกอบด้วยหน่วยเล็ก ๆ เรียกว่า พิกเซล (Pixel) ที่มีค่าเป็นระดับความเทา (Gray Level) ตั้งแต่ 0-255 ซึ่งเป็นสัดส่วนการสะท้อนของพื้นผิวโลก บรรยากาศ และเมฆในบรรยากาศ ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมดังกล่าวจะเห็นเป็นส่วนโค้งของพื้นผิวโลก (Satellite Projection) ทำให้ระยะทางภาพไม่แปรโดยตรงกับระยะบนพื้นผิวโลก ซึ่งไม่สะดวกในการใช้งาน ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการแปลงภาพดังกล่าวให้อยู่ในรูปภาพฉายแบบผิวทรงกระบอก (Cylindrical Projection) ซึ่งระยะบนภาพจะแปรโดยตรงกับระยะบนพื้นดินและนำแผนที่ประเทศไทยมาซ้อนทับเพื่อหาพิกัดของพิกเซลในข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม ดังรูปที่ 3

เนื่องจากค่าระดับความเทาไม่สามารถนำมาใช้ในการคำนวณหาดัชนีเมฆในบรรยากาศได้ เราต้องแปลงค่าระดับความเทาดังกล่าวให้อยู่ในรูปของสัมประสิทธิ์การสะท้อนของเมฆ บรรยากาศ และพื้นผิวโลก โดยอาศัยตารางสอบเทียบ สำหรับการคำนวณดัชนีเมฆ (Cloud Index) สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้ [17]

$$n = \frac{\rho_{SAT} - \rho_{min}}{\rho_{max} - \rho_{min}} \quad (5)$$

โดยที่

n = ดัชนีเมฆในบรรยากาศ มีค่าอยู่ระหว่าง 0-1 (-)

ρ_{SAT} = สัมประสิทธิ์การสะท้อนของเมฆ บรรยากาศ และพื้นผิวโลก (-)

ρ_{min} = สัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นผิวโลก (-)

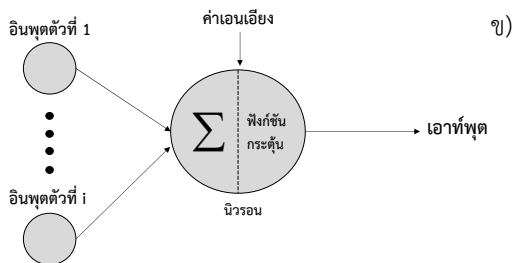
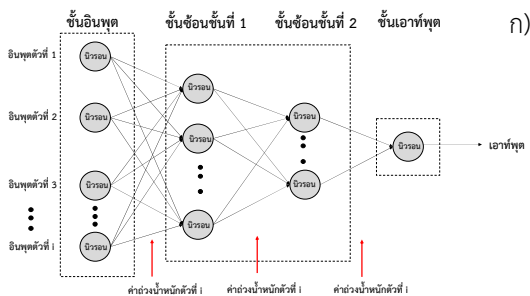
ρ_{max} = สัมประสิทธิ์การสะท้อนสูงสุดของเมฆ (-)

จากสมการที่ 5 จะเห็นได้ว่า ในกรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆค่า ρ_{SAT} จะเท่ากับค่า ρ_{min} ทำให้ค่า n เท่ากับ 0 และกรณีที่พิกเซลนั้นถูกปกคลุมด้วยเมฆ

ทั้งหมด ค่า p_{SAT} จะเท่ากับค่า p_{max} ทำให้ค่า n เป็น 1 ดังนั้นค่า n จึงเป็นดัชนีชี้บอกปริมาณเมฆในบรรยากาศ

2.3 โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network, ANN)

โครงข่ายประสาทเทียม เป็นระบบทางคณิตศาสตร์ที่เขียนในรูปของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งสามารถจำลองการทำงานของระบบต่าง ๆ โดยเลียนแบบการทำงานของสมองมนุษย์และสามารถนำมาใช้ในการคำนวณและพยากรณ์ดัชนีรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้ ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้เลือกใช้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมจากโปรแกรม เวก้า (Weka) ซึ่งเป็นโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นโดยมหาวิทยาลัยไวคาโต (Waikato) ประเทศนิวซีแลนด์ [18]



รูปที่ 4 ก) ตัวอย่างโครงข่ายประสาทเทียมที่ประกอบด้วยชั้นอินพุต ชั้นซ่อน 2 ชั้นและชั้นเอาต์พุต
ข) แผนภูมิการทำงานของประสาทเทียม 1 หน่วย

โครงข่ายประสาทเทียมที่นิยมใช้งานด้านรังสีอาทิตย์ คือ แบบเพอร์เซปตรอนหลายชั้น (Multi-layer

Perceptron) [19] โดยโครงข่ายประสาทเทียมประกอบด้วย ชั้นอินพุต (Input Layer) ชั้นซ่อน (Hidden Layer) และชั้นเอาต์พุต (Output Layer) โดยชั้นซ่อนอาจมีได้หลายชั้น ดังตัวอย่างในรูปที่ 4 ก)

จากรูปที่ 4 ข) ประสาทเทียม 1 หน่วยหรือนิวรอนจะรับข้อมูลอินพุตต่าง ๆ เข้ามา จากนั้นจะคูณด้วยตัวถ่วงน้ำหนัก (Weight) และทำการหาผลบวกของผลคูณของอินพุตกับตัวถ่วงน้ำหนักพร้อมกับบวกด้วยตัวแปรบอกความเอนเอียง (Bias Parameter) หลังจากนั้นจะส่งผลเข้าไปเป็นตัวแปรอิสระของฟังก์ชันกระตุ้น (Activate Function) และให้เอาต์พุตออกมา เพื่อส่งไปให้ประสาทเทียมอื่น ๆ โดยเอาต์พุตที่ได้จากประสาทเทียมสามารถเขียนในรูปสมการได้ดังนี้ [20]

$$y = f(b + \sum_i w_i x_i) \quad (6)$$

โดยที่

y = เอาต์พุตของประสาทเทียม

b = ตัวแปรบอกความเอนเอียง

w_i = ค่าตัวถ่วงน้ำหนักสำหรับตัวแปรอินพุตที่ i

x_i = ตัวแปรอินพุตที่ i , ($i=1, 2, 3, \dots, n$)

สำหรับฟังก์ชันกระตุ้นอาจมีได้หลายรูปแบบทั้งแบบเชิงเส้น และแบบไม่เชิงเส้น ตัวอย่างของฟังก์ชันกระตุ้นที่ใช้ในงานด้านโครงข่ายประสาทเทียม เช่น แบบเชิงเส้น แบบเกาเซียนและแบบซิกมอยด์

2.4 การสร้างและทดสอบแบบจำลองสำหรับคำนวณดัชนีรังสีอัลตราไวโอเล็ต

ผู้วิจัยได้ใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบเพอร์เซปตรอนหลายชั้น (Multi-Layer Perceptron) และใช้การเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับ (Back Propagation Algorithm) พร้อมกับเลือกใช้ฟังก์ชันแบบซิกมอยด์ในการสร้างแบบจำลอง เนื่องจากอัลกอริทึมและฟังก์ชันดังกล่าวมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในด้านฟิสิกส์

บรรยากาศ [13], [14] และสามารถคำนวณและทำนายรังสีอาทิตย์ที่มีความซับซ้อนได้ค่อนข้างแม่นยำ

สำหรับขั้นตอนในการสร้างและทดสอบแบบจำลองมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 ผู้วิจัยได้คัดเลือกตัวแปรทางบรรยากาศที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงดัชนีรังสีอัลตราไวโอเลต ได้แก่ ปริมาณความชื้นรังสีอัลตราไวโอเลตที่มีผลต่อผิวหนังมนุษย์นอกชั้นบรรยากาศโลก (EUV_0) มุมเซนิตของดวงอาทิตย์ (θ_z) ค่าความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง (AOD) และดัชนีเมฆ (n)

ขั้นตอนที่ 2 ผู้วิจัยได้รวบรวมข้อมูลทั้งหมด 2 ปี (2559-2560) และทำการแบ่งข้อมูลที่ได้ออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มแรกใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม (ข้อมูลปี 2559) กลุ่มที่สองใช้ในการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (ข้อมูลปี 2560)

ขั้นตอนที่ 3 ทำการสุ่มเพื่อหาจำนวนชั้นซ่อน (Hidden) และจำนวนรอบในการฝึกสอน (Training time) ที่เหมาะสมกับแบบจำลองมากที่สุด

ขั้นตอนที่ 4 นำแบบจำลองที่ได้มาทำการทดสอบกับข้อมูลกลุ่มที่สอง เพื่อดูความแม่นยำในการคำนวณดัชนีรังสีอัลตราไวโอเลตรายชั่วโมง

2.5 การพยากรณ์ดัชนีรังสีอัลตราไวโอเลต

ผู้วิจัยได้ใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบเพอร์เซพตรอนหลายชั้นและใช้การเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับเพื่อพยากรณ์ดัชนีรังสีอัลตราไวโอเลตรายชั่วโมงในจังหวัดสงขลา โดยมีขั้นตอนและรายละเอียดดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 ผู้วิจัยได้ใช้ข้อมูลปี 2559 ในการพยากรณ์ดัชนีรังสีอัลตราไวโอเลตรายชั่วโมง โดยข้อมูลที่ใช้ในการพยากรณ์นั้น ผู้วิจัยใช้ข้อมูลในช่วงที่ท้องฟ้าปราศจากเมฆรายชั่วโมงย้อนหลัง 7 วัน (08:00 น. – 16:00 น.) เพื่อพยากรณ์ดัชนีรังสีอัลตราไวโอเลตในอีก 9 ชั่วโมงข้างหน้า ยกตัวอย่างเช่น ใช้ข้อมูลวันที่ 1-7 มกราคม 2559 ตั้งแต่เวลา 08:00 น. – 16:00 น. ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม จากนั้นพยากรณ์

ดัชนีรังสีอัลตราไวโอเลตในวันที่ 8 มกราคม 2559 ในช่วงเวลา 08:00 น. – 16:00 น. (รวม 9 ชั่วโมง) เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 2 ผู้วิจัยได้ทำการพยากรณ์ดัชนีรังสีอัลตราไวโอเลตในแต่ละเดือน จากนั้นทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการพยากรณ์กับค่าที่ได้จากการวัดภาคพื้นดิน

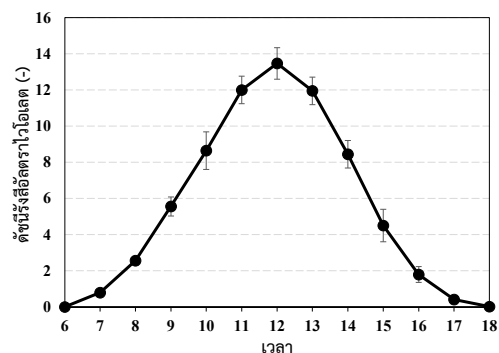
ขั้นตอนที่ 3 เพื่อตรวจสอบว่าวิธีการพยากรณ์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมนั้นสามารถคำนวณได้แม่นยำ ผู้วิจัยจึงได้เลือกวิธีการพยากรณ์แบบอื่น คือ การใช้สมการเชิงเส้นและสมการเกาเซียน [18] ในการพยากรณ์ดัชนีรังสีอัลตราไวโอเลต และนำค่าที่ได้จาก 3 แบบจำลองมาเปรียบเทียบว่า แบบจำลองใดพยากรณ์ได้แม่นยำที่สุด

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 การแปรค่าดัชนีรังสีอัลตราไวโอเลตที่ได้

จากการวัดภาคพื้นดิน

ผู้วิจัยได้นำข้อมูลดัชนีรังสีอัลตราไวโอเลตรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนในช่วงระยะเวลา 2 ปี (พ.ศ. 2559-2560) มาเขียนกราฟการแปรค่าตามเวลาในรอบวัน พร้อมทั้งแสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation, SD) ตัวอย่างการแปรค่าแสดงดังรูปที่ 5

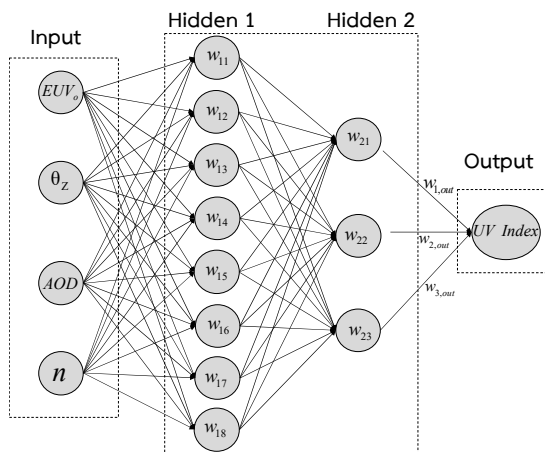


รูปที่ 5 ตัวอย่างการแปรค่าตามเวลาในรอบวันของดัชนีรังสีอัลตราไวโอเลตของเดือนเมษายน พ.ศ. 2559 ตั้งแต่เวลา 06:00 น. -18:00 น.

จากกราฟเห็นได้ว่า ค่าดัชนีรังสีอัลตราไวโอเลตรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจากช่วงเช้า และจะมีค่าสูงสุดที่ประมาณเที่ยงวัน จากนั้นค่าดัชนีรังสีอัลตราไวโอเลตจะค่อย ๆ ลดลงจนถึงช่วงเย็น นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าดัชนีรังสีอัลตราไวโอเลตรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนของแต่ละปีสูงสุดอยู่ในเดือนมีนาคมและเมษายน โดยการแปรค่าดัชนีรังสีอัลตราไวโอเลตรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนหรือตามเวลาในรอบวันนี้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งปรากฏของดวงอาทิตย์ ซึ่งจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงมุมเซนธิของดวงอาทิตย์ ทำให้ค่าดัชนีรังสีอัลตราไวโอเลตในแต่ละรอบวันมีค่าที่แตกต่างกัน

3.2 แบบจำลองและการทดสอบแบบจำลอง

จากวิธีการสร้างแบบจำลองในหัวข้อที่ 2.4 ผลที่ได้พบว่า จำนวนชั้นซ่อน จำนวนโหนดและรอบของการฝึกสอนที่เหมาะสมสำหรับแบบจำลองในงานวิจัยนี้ คือ จำนวนชั้นซ่อน 2 ชั้น โดยที่ชั้นซ่อนชั้นแรกมี 8 โหนด และชั้นซ่อนที่ 2 มี 3 โหนด และจำนวนการฝึกสอนทั้งหมด 10,000 รอบ ซึ่งแบบจำลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 แบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณดัชนีรังสีอัลตราไวโอเลตรายชั่วโมงในจังหวัดสงขลา

หลักการคำนวณในชั้นซ่อนที่ 1

$$L_{11} = \text{sigmoid}(EUV_o w_{11} + \theta_z w_{11} + AOD w_{11} + n w_{11} + \beta_{11})$$

$$L_{12} = \text{sigmoid}(EUV_o w_{12} + \theta_z w_{12} + AOD w_{12} + n w_{12} + \beta_{12})$$

⋮

$$L_{18} = \text{sigmoid}(EUV_o w_{18} + \theta_z w_{18} + AOD w_{18} + n w_{18} + \beta_{18})$$

(7)

หลักการคำนวณในชั้นซ่อนที่ 2

$$L_{21} = \text{sigmoid}(L_{11} w_{21} + L_{12} w_{21} + L_{13} w_{21} + L_{14} w_{21} + L_{15} w_{21} + L_{16} w_{21} + L_{17} w_{21} + L_{18} w_{21} + \beta_{21})$$

$$L_{22} = \text{sigmoid}(L_{11} w_{22} + L_{12} w_{22} + L_{13} w_{22} + L_{14} w_{22} + L_{15} w_{22} + L_{16} w_{22} + L_{17} w_{22} + L_{18} w_{22} + \beta_{22})$$

$$L_{23} = \text{sigmoid}(L_{11} w_{23} + L_{12} w_{23} + L_{13} w_{23} + L_{14} w_{23} + L_{15} w_{23} + L_{16} w_{23} + L_{17} w_{23} + L_{18} w_{23} + \beta_{23})$$

(8)

หลักการคำนวณในชั้นเอาต์พุต

$$UV \text{ index} = \text{linear}(L_{21} w_{3,out} + L_{22} w_{3,out} + L_{23} w_{3,out} + \beta)$$

(9)

โดยที่

L_{ij} = ลำดับชั้นที่ i โหนดที่ j (-)

w_{ij} = ค่าถ่วงน้ำหนัก ชั้นที่ i โหนดที่ j (-)

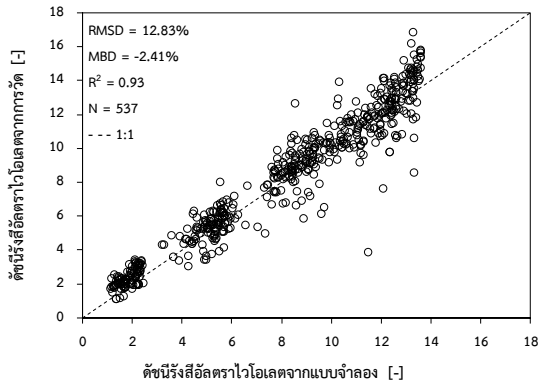
β_{ij} = ค่าความเอนเอียง ชั้นที่ i โหนดที่ j (-)

โดยค่าถ่วงน้ำหนักและค่าความเอนเอียง ในสมการที่ 7-9 แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าสัมประสิทธิ์ในแต่ละชั้นที่ได้จากโปรแกรม Weka

ตัวแปร	ค่าสัมประสิทธิ์ชั้นซ่อนที่ 1					β			
	E	Z	A	C					
W_{11}	7.975	1.059	-1.618	-11.012	-14.923				
W_{12}	1.624	3.743	-0.230	-3.831	-7.385				
W_{13}	4.297	1.301	-0.540	0.114	-4.087				
W_{14}	2.501	-12.281	-12.608	-5.909	-14.845				
W_{15}	5.576	-7.516	-3.913	4.043	-7.334				
W_{16}	3.181	-4.210	2.968	3.704	-4.202				
W_{17}	3.696	0.101	-0.464	0.350	-3.876				
W_{18}	2.663	-0.693	-0.664	-0.694	-0.639				
ตัวแปร	ค่าสัมประสิทธิ์ชั้นซ่อนที่ 2								β
	L_{11}	L_{12}	L_{13}	L_{14}	L_{15}	L_{16}	L_{17}	L_{18}	
W_{21}	-0.652	-1.264	-1.777	-2.016	-6.059	-0.550	-1.632	0.536	-2.167
W_{22}	-0.307	1.274	-1.811	-1.799	-1.227	0.470	-1.837	-0.902	0.040
W_{23}	-8.072	-1.073	-0.681	-9.716	8.143	-4.354	-0.372	-4.111	-1.912
ตัวแปร	ค่าสัมประสิทธิ์ชั้นเอาต์พุต				β				
	$W_{1,out}$	$W_{2,out}$	$W_{3,out}$						
UVindex	-2.593	-1.712	-5.305	0.734					

จากนั้นผู้วิจัยนำแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่ได้มาคำนวณหาดัชนีรังสีอัลตราไวโอเล็ต ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการคำนวณดัชนีรังสีอัลตราไวโอเล็ตรายชั่วโมงที่ได้จากการวัดและแบบจำลอง

จากกราฟการเปรียบเทียบดัชนีรังสีอัลตราไวโอเล็ตรายชั่วโมงจะเห็นได้ว่า ค่าที่ได้จากการวัดและค่าที่ได้จากแบบจำลองมีความสอดคล้องกันดี โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในรูป Root Mean Square Difference (RMSD) และ Mean Bias Difference (MBD) เท่ากับร้อยละ 12.8 และ -2.4 ตามลำดับ ซึ่งค่าดัชนีรังสีอัลตราไวโอเล็ตรายชั่วโมงได้จากการวัดมากกว่าที่ได้จากแบบจำลอง สาเหตุอาจเป็นเพราะสภาพภูมิอากาศของจังหวัดสงขลา เนื่องจากสงขลาเป็นจังหวัดที่มีฝนตกชุกตลอดทั้งปี และได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ ที่พัดพาเมฆและฝุ่นละอองเข้ามาที่จังหวัดสงขลา ซึ่งเมฆและฝุ่นละอองสามารถกระเจิงรังสีในช่วงความยาวคลื่นรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้ดี ทำให้รังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ได้จากภาคพื้นดินมีค่าสูงขึ้น อีกทั้งยังเป็นจังหวัดที่อยู่ใกล้เส้นศูนย์ ทำให้ความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตมีค่าสูงเกือบตลอดทั้งปีเช่นกัน

3.3 ผลการพยากรณ์ดัชนีรังสีอัลตราไวโอเล็ต

ผู้วิจัยได้ทำการพยากรณ์ดัชนีรังสีอัลตราไวโอเล็ตรายชั่วโมง จากทั้ง 3 วิธี คือ โครงข่ายประสาทเทียมแบบจำลองเชิงเส้นและแบบฟังก์ชันเกาเซียน ซึ่งเป็นอัลกอริทึมที่อยู่ในโปรแกรม Weka ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบความแม่นยำในการพยากรณ์ดัชนีรังสีอัลตราไวโอเล็ตวิธีต่าง ๆ

เดือน	ดัชนีรังสีอัลตราไวโอเล็ตรายชั่วโมงจากการพยากรณ์โดยวิธี					
	โครงข่ายประสาทเทียม		เชิงเส้น		เกาเซียน	
	RMSD	MBD	RMSD	MBD	RMSD	MBD
มกราคม	10.9228	2.8269	15.2755	-4.4226	10.1421	4.7608
กุมภาพันธ์	18.0369	-11.4624	37.26996	-24.5227	16.08026	12.11768
มีนาคม	12.7911	7.9586	17.6765	-1.1923	4.8939	-1.0418
เมษายน	8.5512	-1.7258	12.4785	4.6979	19.0876	13.1441
พฤษภาคม	9.7143	1.6597	12.7084	5.6386	7.6034	-2.7284
มิถุนายน	29.3260	12.1249	36.8915	-10.2373	36.2017	17.0723
กรกฎาคม	14.9207	-1.0552	18.3000	-15.8197	31.2863	-28.5439
สิงหาคม	19.8329	11.6128	10.6306	7.3030	11.6835	7.7586
กันยายน	22.6534	-11.3544	43.9624	-26.7833	27.8976	-24.0238
ตุลาคม	23.6631	4.0360	27.0625	17.3888	22.3802	8.9629
พฤศจิกายน	13.3237	-0.4156	23.1408	9.2289	31.8342	14.1591
ธันวาคม	20.3580	-11.2153	46.5136	-9.3108	10.5802	-2.1495
เฉลี่ย	17.0078	0.2492	25.1592	-4.0026	19.1392	1.6240

ผลการพยากรณ์ดัชนีรังสีอัลตราไวโอเล็ตรายชั่วโมงในพื้นที่จังหวัดสงขลาในตารางที่ 2 พบว่า การพยากรณ์นั้นมีความแม่นยำในช่วงเดือนมกราคมถึงเดือนพฤษภาคม ซึ่งเป็นช่วงฤดูร้อนทำให้ไม่มีผลของเมฆเข้ามาเกี่ยวข้อง แต่ในเดือนมิถุนายนถึงเดือนตุลาคมเป็นช่วงเดือนที่ได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ที่พัดผ่านเข้ามาในประเทศไทยเกิดเป็นแนวปะทะอากาศมวลอากาศลอยตัวสูงขึ้นแล้วกลั่นตัวเป็นเมฆและเกิดเป็นฝนตกลงมา ส่งผลทำให้การพยากรณ์มีความคลาดเคลื่อนมากกว่าช่วงฤดูร้อน

จากการเปรียบเทียบความแม่นยำในการพยากรณ์ดัชนีรังสีอัลตราไวโอเล็ตโดยวิธีต่าง ๆ พบว่าแบบจำลองการพยากรณ์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบฟังก์ชันซิกมอยด์มีความแม่นยำในการพยากรณ์มากที่สุด และให้ค่าดัชนีรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้ใกล้เคียงกับ

การวัดมากที่สุด โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในรูป RMSD และ MBD เท่ากับร้อยละ 17.0 และ 0.3

4. สรุป

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาแบบจำลองสำหรับคำนวณดัชนีรังสีอัลตราไวโอเล็ตและวิธีการพยากรณ์ดัชนีรังสีอัลตราไวโอเล็ตอย่างง่ายของจังหวัดสงขลา โดยผู้วิจัยได้เก็บรวบรวมข้อมูลดัชนีรังสีอัลตราไวโอเล็ตภาคพื้นดินและตัวแปรทางบรรยากาศที่เกี่ยวข้องที่สถานีวัดอุตุนิยมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออก จังหวัดสงขลา ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2559 ถึงวันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2560

จากข้อมูลในงานวิจัยจะเห็นได้ว่า ค่าดัชนีรังสีอัลตราไวโอเล็ตจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจากช่วงเช้า (มีค่าเฉลี่ยประมาณ 3.70 อยู่ในระดับปานกลาง) และจะมีค่าสูงสุดที่ประมาณเที่ยงวัน (มีค่าเฉลี่ยประมาณ 9.86 อยู่ในระดับสูงมาก) จากนั้นค่าดัชนีรังสีอัลตราไวโอเล็ตจะค่อย ๆ ลดลงจนถึงช่วงเย็น (มีค่าเฉลี่ยประมาณ 2.40 อยู่ในระดับต่ำ) ซึ่งเป็นผลมาจากทางเดินของดวงอาทิตย์และปริมาณตัวแปรทางบรรยากาศที่เกี่ยวข้อง

สำหรับแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดในการคำนวณดัชนีรังสีอัลตราไวโอเล็ตรายชั่วโมงในพื้นที่จังหวัดสงขลา นั้นประกอบด้วยจำนวนชั้นทั้งหมด 4 ชั้น ชั้นแรกเป็นชั้นของข้อมูลอินพุต มีข้อมูลทั้งหมด 4 ตัวแปร ได้แก่ ปริมาณความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่มีผลต่อผิวหนังมนุษย์นอกชั้นบรรยากาศโลก มุมเซนซิธของดวงอาทิตย์ ความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง และดัชนีเมฆ ชั้นที่สองและสามเป็นชั้นซ่อน มีโหนดหรือเซลล์ประสาททั้งหมด 8 โหนด และ 3 โหนด ตามลำดับ ส่วนชั้นที่สุดท้ายเป็นชั้นเอาต์พุต ผลการทดสอบแบบจำลองพบว่า แบบจำลองที่ได้สามารถคำนวณดัชนีรังสีอัลตราไวโอเล็ตรายชั่วโมงในพื้นที่จังหวัดสงขลาได้เป็นอย่างดี โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนในรูป RMSD และ MBD เท่ากับร้อยละ 12.8 และ -2.4 ตามลำดับ

สำหรับการพยากรณ์ดัชนีรังสีอัลตราไวโอเล็ตรายชั่วโมง ผู้วิจัยได้ใช้โครงข่ายประสาทเทียมเช่นเดียวกับการคำนวณดัชนีรังสีอัลตราไวโอเล็ต โดยใช้ข้อมูลดัชนีรังสีอัลตราไวโอเล็ตรายชั่วโมงย้อนหลัง 1 สัปดาห์ เพื่อพยากรณ์ดัชนีรังสีอัลตราไวโอเล็ตชั่วโมงล่วงหน้า 9 ชั่วโมง (08:00 น.-16:00 น.) ผลวิจัยพบว่าแบบจำลองสามารถพยากรณ์ดัชนีรังสีอัลตราไวโอเล็ตรายชั่วโมงค่อนข้างดี โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในรูป RMSD และ MBD เท่ากับร้อยละ 17.0 และ 0.3 ตามลำดับ

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ให้ความอนุเคราะห์ทางด้านข้อมูลปริมาณความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตและตัวแปรต่างๆ ในบรรยากาศ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] WHO, O.M.d.l Santé, Global Solar UV Index: A Practical Guide, A joint recommendation of World Health Organization, World Meteorological Organization, United Nations Environment Programme, International Commission on Non- Ionizing Radiation Protection, WHO, Geneva, 2002.
- [2] A. A. Ghoneim, I.M. Kadad and M.S. Altouq, "Statistical analysis of solar UVB and global radiation in Kuwait," *Energy*, vol. 60, pp. 23-34, 2013.
- [3] G.W. Petty, *A First Course in Atmospheric Radiation*, Sundog Publishing, Madison, Wisconsin, 2004.

- [4] L. Wang, W. Gong, Y. Ma, B. Hu, W. Wang and M. Zhang, "Analysis of ultraviolet radiation in Central China from observation and estimation," *Energy*, vol. 5, pp. 764-774, 2013.
- [5] P. Koronakis, G. Sfantos, A. Paliatsos, J. Kaldellis, J. Garofalakis and I. Koronaki, "Interrelations of UV global/global/diffuse solar irradiance components and UV-global attenuation on air pollution episode days in Athens, Greece," *Atmospheric Environment*, vol. 36, no.19, pp. 3173-3181, 2002.
- [6] A. Kylling, A. Dahlback and B. Mayer, "The effect of clouds and surface albedo on UV irradiances at a high latitude site," *Geophysical Research Letters*, vol. 27, no. 9, pp. 1411-1414, 2000.
- [7] J. Calbó and J. A. González, "Empirical studies of cloud effects on UV radiation: A review," *Review of Geophysics*, vol. 43, no. 2, Jun. 2005.
- [8] A. Lindfors and A. Arola, "On the wavelength dependent attenuation of UV radiation by clouds," *Geophysical Research Letters*, vol. 35 no. 5, 2008.
- [9] B. Wenny, V. Saxena and J. Frederick, "Aerosol optical depth measurements and their impact on surface levels of ultraviolet-B radiation," *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, vol. 106, pp. 17311-17319, 2001.
- [10] S. Janjai, S. Buntung, R. Wattan and I. Masiri, "Mapping solar ultraviolet radiation from satellite data in a tropical environment," *Remote Sensing*, vol. 114, pp. 682-691, 2010.
- [11] S. Buntoung, S. Janjai, M. Nunez, P. Choosri, N. Pratummasoot and K. Chiwpreecha, "Sensitivity of erythema UV/ global irradiance ratios to atmospheric parameters: application for estimating erythema radiation at four sites in Thailand," *Atmospheric Research*, vol. 148, pp. 24-34, 2014.
- [12] L. Wang, W. Gong, Y. Ma, B. Hu, W. Wang and M. Zhang, "Analysis of ultraviolet radiation in Central China from observation and estimation," *Energy*, vol. 59, pp. 764-774, 2013.
- [13] S.S. Leal, C. Tiba and R. Piacentini, "Daily UV radiation modeling with the usage of statistical correlations and artificial neural networks," *Renewable Energy*, vol. 36, pp. 3337-3344, 2011.
- [14] J. N. Latosinsk, M. Latosinska and J. Bielak, "Towards analysis and predicting maps of ultraviolet index from experimental astronomical parameters (solar elevation, total ozone level, aerosol index, reflectivity. Artificial neural networks global scale approach," *Aerospace Science and Technology*, vol. 43, pp. 301-313, 2015.
- [15] A.F. McKinlay and B.L. Diffey, "A Reference Action Spectrum for Ultraviolet Induced

- Erythema in Human Skin,” *CIE Journal*, vol. 6, pp. 17-22, 1987.
- [16] M. Iqbal, *An introduction to solar radiation*, New York, Academic Press, 1983.
- [17] D. Cano, J. M. Monget, M. Albuissou, H. Guillard, N. Regas and L. Wald, “A method for the determination of the global solar radiation from meteorological satellite data,” *Solar Energy*, vol. 37, pp. 31–39, 1986.
- [18] E. Frank, M. A. Hall and I. H. Witten, *The WEKA Workbench. Online Appendix for “Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques,”* Morgan Kaufmann Publishers Inc, 4th ed, 2016.
- [19] F. S. Tymvios, S. C. Michealides and C. Skouteli, *Estimation of surface solar radiation with artificial neural networks, In.V. Badeacu (Ed.) Modeling Solar Radiation at the Earth Surface*, Springer, Berlin, 2008.
- [20] M.T. Hagan, H.B. Demuth and M.H. Beale, “Applying the artificial neural network to estimate the drag force for an autonomous underwater vehicle,” *Open Journal of Fluid Dynamics*, vol. 4, no. 3, pp. 334-346, 1996.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Flexural Performance of Corroded Reinforced Concrete Beams Repaired with CFRP Sheets

Arnon Wongkaew*

Faculty of Engineering, Burapha University
169 Longhard Bangsaen, T. Saensuk, A. Maung, Chon-Buri 20131

Received 27 September 2020; Revised 30 March 2021; Accepted 5 May 2021

Abstract

Corrosion of steel reinforcements in concrete is one of the main causes of early deterioration and reduction of service loads of reinforced concrete (RC) structures. This paper reports the results of an experimental program that was carried out to evaluate the effect of reinforcement corrosion on the flexural performance of RC beams, and to investigate the efficiency of externally bonded carbon fiber reinforced polymer (CFRP) sheets to repair the corrosion-damaged RC beams. Seven RC beams with the same cross section and reinforcement details were prepared, including the control beam (B0). First, tension reinforcements of six RC beams were corroded by using an accelerated impress-current process to obtain corrosion levels of 15%, 30%, and 50% of weight loss, according to Faraday's law. Then, three beams were repaired using CFRP sheets attached to the bottom surface, leaving the other three unrepaired. All beams were subjected to the four-point bending load test. The experimental results show that the corrosion specimens demonstrated a significant deterioration on the structural performance and the integrity by decreasing in their ultimate load capacity, stiffness, and ductility. The deterioration by corrosion of tension reinforcements can be successfully overcome using CFRP sheets as the repair material. The technique can restore the beam strength to its original design strength, except specimen B50F2 having severe steel-corrosion damage of 50%. A conservative value of the ultimate bending capacity of the beams with low corruptions (15%-30%) can be predicted by using RC conventional models, as suggested in ACI 318. However, the opposite trend is obtained for the high corrosion beam (50%). Applying ACI 440.2R provision to predict the ultimate flexural capacity of corroded beams repaired with CFRP sheets shows rather fair values for low corruptions (15%-30%), but significantly overestimates the strength of the high corrosion beam (50%).

Keywords: Externally Bonded Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Sheets; Corrosion; Reinforced Concrete Beam; Repair; Flexural Strength

* Corresponding Author. Tel.: +668 4892 3773, E-mail Address: arnonw@eng.buu.ac.th

1. Introduction

One of the main problems of reinforced concrete (RC) structures is the deterioration of concrete material due to corrosion of steel reinforcements induced by chloride, especially under severe marine environments. This corrosion problem has been well recognized by many researchers affecting the mechanical behavior of RC structures, such as stiffness, serviceability, ductility, and load-carrying capacity. It can lead to further structural distress due to the loss of the reinforcing steel cross-sectional area as well as their bond strength [1]. As a result, the RC structures damaged by corrosion may have inadequate strength up to their service loads, otherwise to unexpected loading such as strong wind, wave, even small ground movement. Nowadays, there are many innovative materials and techniques introduced for the RC structural rehabilitation. Externally bonded fiber reinforced polymer (FRP) sheets is one of the most efficient new materials among those rehabilitation materials for RC structures. Initially, the FRP sheet was introduced to the solution for strengthening RC columns, mainly. It has been examined in many literatures to improve strength, ductility, and even energy absorption capacity of the RC columns. Later on, since its effectiveness, there also are many applications to strengthen other RC members such as beam, slab, joint, etc.

Many studies were concentrated on the effects of corrosion and its degree on the flexural, shear strength, and mechanical behavior of RC beams. Researchers [1-7] showed their results from the experiments

that the corroded RC beams with either the laboratory-accelerated corrosion process or under a chloride environment demonstrated significant loss of their yield, ultimate, shear, and ductility capacity depending on the level of corrosion in their reinforcement steels. One of the main reasons of those reductions caused from the deterioration of the bond strength between steel and concrete [1]. The deflection of control RC beams subjected to 30 days of accelerated corrosion increased by 40%-70% with 6% of the mass loss of their reinforcements [2]. The ultimate moment capacity of corroded beams was reduced linearly by approximately 0.7% with respect to every 1% of the corrosion increment [3]. The load carrying capacity and the stiffness of the beams decreased with the increase of the corrosion level [4, 6]. Long term corrosion process done under 26-years chloride environment showed a shift failure mode from shear to flexural failure due to the large effect of corrosion [5].

On the other side, there have been some studies on the rehabilitation technique of using the externally bonded CFRP sheets to restore the load carrying capacity of the corroded RC beams. Al-Saidy et al. [7] used CFRP sheets to repair the corroded beams. Results showed the repaired RC beams was capable of reaching their original designed load capacities. U-wrap CFRP sheets were utilized to retrofit RC beams with corrosion damage [8]. The flexural load and stiffness capacity of the corroded beams were successfully increased.

To elaborate the use of externally bonded FRP sheets as a rehabilitation

technique for corrosion-damaged RC beams available to engineers and owners in order to confidently select this method for such a work, this study is aimed with the objectives of 1) to investigate the electrochemical process on corrosion of tensile reinforcing steel of RC beams with 3 three different levels of weight loss 15%, 30%, and 50% of steel reinforcements, 2) to experimentally determine the structural behavior and ultimate strength of defected and repaired RC beams, 3) to evaluate the use of externally bonded CFRP sheets as a repair methodology of the corrosion-damaged RC beams.

2. Experimental Program

2.1 Accelerated Corrosion Process

An electrochemical process was used to accelerate the corrosion of steel reinforcements of RC beams [1]-[9]. First, the RC beams with 28-day concrete strength were partially submerged in a cement tank with 5% concentrate of sodium chloride solution. A power supply with a direct current (DC) of a maximum output of 35 amperes (A) at 12 volts (V) was used for this process. The tensile reinforcements were connected to the positive side (Anode) and the stainless steel rod was connected to the negative side (Cathode) of the DC power supply. The desired degrees of corrosion were set to 15%, 30%, and 50% of their original weights. A common method to determine targeted levels of corrosion employed in this study is based on Faraday's Law. The theoretical mass of rust produced per unit of surface area could be determined using

Faraday's law [2] as illustrated in equation (1)

$$\Delta W = \frac{I \cdot t \cdot A_m}{Z \cdot F} \quad (1)$$

where

ΔW = weight loss of steel bar (g)

I = electrical current applied (Ampere)

t = time for desired weight loss
(Second)

A_m = atomic weight of steel 55.85 g/mol

Z = the valence of the reaction equal 2

F = Faraday's constant
(96,500 Coulomb/mol)

A schematic diagram and experimental setup of the accelerated corrosion process is shown in **Fig.1**. In order to successfully obtain the different levels of reinforcement corrosion of 15%, 30%, and 50%, the relationship between duration of the impressed current (t) and the applied current (I) was regularly monitored within 6 hours a day. It is important to note that the current can't be kept constant, therefore, weight loss of steel need to be recalculated daily. **Fig.1** also demonstrates an example of applied current (I) plotted against time (t). The areas under the curve were calculated using a graphical analysis software. The acceleration process was terminated when the targeted corrosion levels reached.

During a corrosion process of steel, a swelling of steel bars can be expected because of increasing of their volumes. This can lead to significant expansive forces generated in concrete as shown in **Fig.2**. Then, further spalling and cracking

of concrete cover can be projected and speeding acceleration of reinforcement deterioration, even more.

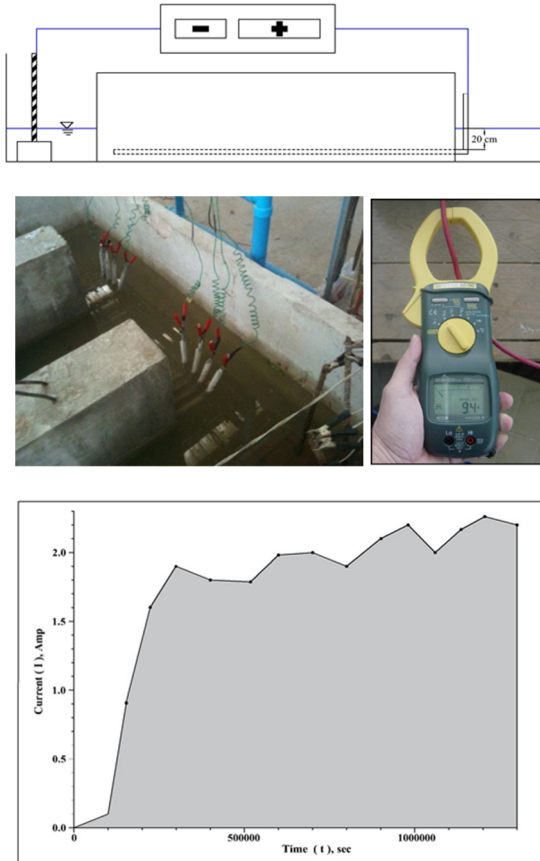


Fig. 1 Acceleration corrosion process

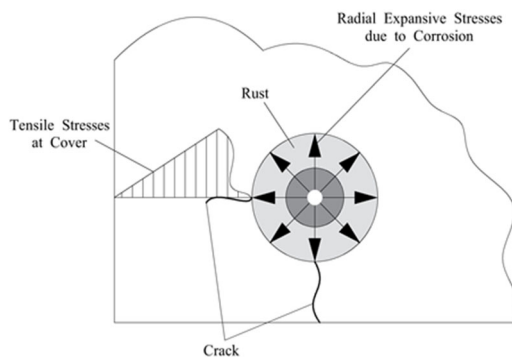


Fig. 2 Tensile stresses and crack at concrete cover due to corrosion

2.2 Repair Technique

The externally bonded carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composite sheet was utilized as a rehabilitation technique for this study. The repair processes were classified depending on the levels of corrosion as a low level of 15% and 30%, and a high level of 50%. For the low corrosion level, there was nothing additionally applied to the beams, except cleaning the remaining undamaged concrete surface by using a grinder and air blower. Then, the CFRP sheets were directly attached to those bottom beam surfaces. On the other hand, for the high corrosion level beam, the deteriorated concrete was removed and replaced using the high strength cement, SikaMicro SCC. As well as, the corroded reinforcing steels were replaced with new steel bars of the same diameter. **Fig. 3** illustrates CFRP sheets were applied to the bottom surfaces of beams as shown in **Fig. 4**. Electrical strain gauges were also attached to the top and bottom surface of concrete, as well as the outer surface of CFRP sheets at the middle span length of beam as shown in **Fig. 4**. It should be noted that all repair processes were done by specialists from SIKI product.

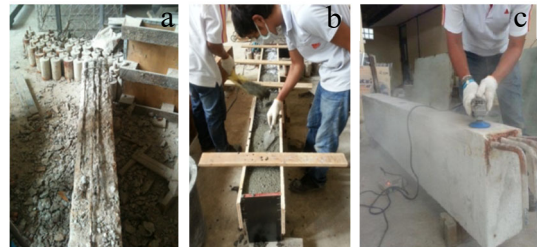


Fig. 3 Repair of specimens group 2

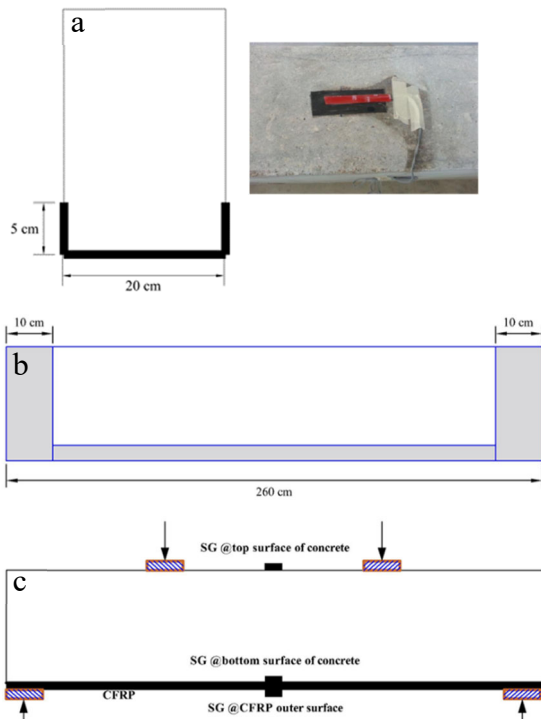


Fig. 4 CFRP sheet and strain gauge locations

2.3 Test Setup

A flexural test was performed for all beam specimens supported over a span of 2400 mm under the displacement control of the four-point transverse load scheme up to failure. The test was performed using an Universal Testing Machine with the maximum load capacity of 1500 kN. The beams were simply supported on top of a custom-made steel H-beam. The four-point loading scheme was applied by a hydraulic actuator through a load cell of 500 kN placed at the center of the other custom-made loading steel H-beam. The vertical displacement of the beams was monitored using LVDT attached at the bottom of the middle span of the beams, directly in line with the load cell. All test

data from the load cell, LVDT, and actuator were stored automatically in a data logger connected to those instruments. All specimens were painted with a white color to observe crack development and marking. **Fig. 5** illustrates the test setup sketch along with a photo picture in the laboratory.

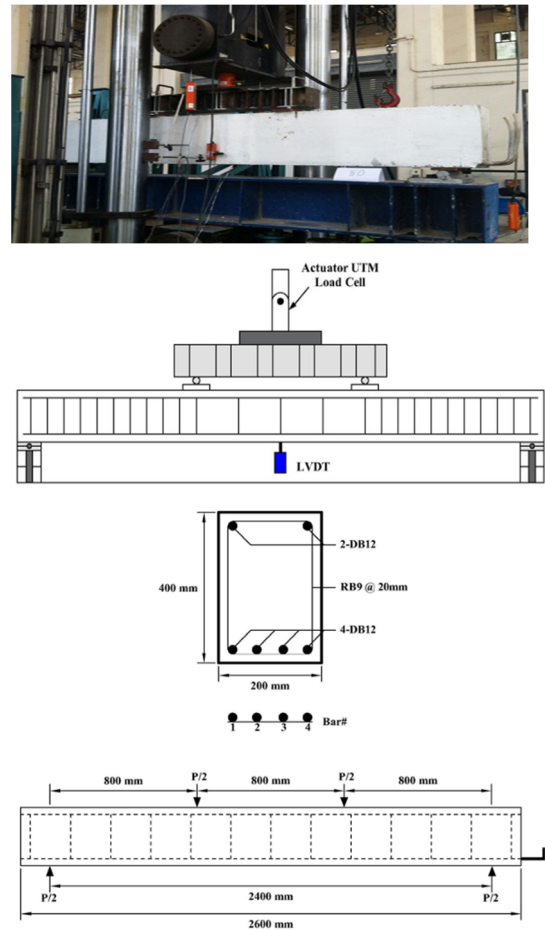


Fig. 5 Experimental and instrumentation setup

2.4 Material Properties

A ready mixed concrete with normal cylinder strength of 24 MPa was used to cast all RC beam specimens. Deformed

steel bars used as a main reinforcement have a nominal yield stress of 400 MPa and ultimate tensile stress of 600 MPa. Rounded steel bars with a nominal yield stress of 240 MPa and ultimate tensile stress of 400 MPa was used as stirrup bars. All repair materials SIKA products was selected as the repair materials for this study. SikaWrap300C, SikaDur330, and SikaMicro SCC were used as CFRP sheets, epoxy, and cement grout, respectively. The mechanical properties of materials used in this study such as concrete, steel, CFRP sheets (SikaWrap300C), SikaMicro SCC, and Sikadur330 can be seen from **Table 1**. The mechanical properties of all Sika products are also available online.

Table 1 Mechanical properties of materials used in this study

Material	Yield Strength (MPa)	Ultimate Strength (MPa)	Elastic Modulus (MPa)
Steel (DB)	400	600	200,000
Steel (RB)	240	400	200,000
Concrete	-	24	-
SikaWrap 300C	-	3500	220,000
SikaDur 330	-	30	3800 ¹
SikaMicro SCC	-	26 ² 380 ³	-

(¹ in flexural, ² 3 days, ³ 7 days)

2.5 Specimen Details

The experimental work was conducted at the structural laboratory of civil engineering department, Burapha University. Seven RC beams with a cross-section of 200×400 mm with a supported span length of 2400 mm were tested under

the four-point transverse load up to failure. Dimensions and reinforcement details of beam specimens are shown in **Fig. 5**. Four 12 mm diameters deformed bars and two other bars with same diameters were used as longitudinal tension and compression reinforcements, respectively. For stirrups, 9 mm diameters rounded bar was placed at a spacing of 20 mm along the span length. The experiments were categorized into two groups as presented in **Table 2**. Group1 consists of the control (Undamaged) specimen and the corrosion-damaged specimens with weight loss of tension steels by 15%, 30%, and 50% of their original weights, named as B0, B15, B30, B50. Group2 represents the same set of repaired specimens by using a technique of the externally bonded CFRP composite sheets, given as B15F1, B30F1, B50F2.

Table 2 Repair details of specimens

Group	Beam	Desired Weight Loss (%)	CFRP Layer
1*	B0	0	No
	B15	15	No
	B30	30	No
	B50	50	No
2**	B15F1	15	1
	B30F1	30	1
2***	B50F2	50	2

* No repair of concrete and steel

** and *** label the low and high corrosion levels, respectively. Their repaired methodologies are described in topic 2.2.

3. Experimental Results and Discussion

3.1 Actual Weight Loss of Steel Bar

The electrical current (I) applied to each steel bar as shown in **Fig. 1** and time

Table 3 Area under $I-t$ curves of steels

Beam	Area Under Curves $I-t$ (Amp. x Sec.) $\times 10^6$				
	Bar#	Bar#	Bar#	Bar#	Sum
	1	2	3	4	#1-4
B0	NA	NA	NA	NA	NA
B15-1	2.30	1.14	0.34	2.24	6.03
B15-2	0.91	1.72	0.99	2.30	5.93
B30-1	2.60	3.30	3.40	2.73	12.1
B30-2	0.42	2.40	4.26	3.06	15.4
B50-1	3.97	6.40	3.37	5.74	19.5
B50-2	12.8	3.97	2.32	7.01	26.1

Table 4 Desired and actual weight loss of steel for beam specimens

Beam	Initial Weight W_i (g)	Loss Weight ΔW (g)	Desired Weight Loss (%)	Actual Weight Loss (%)
B0	9413	0	0	0
B15-1	9413	1743.21	15	18.52
B15-2	9413	1715.14	15	18.22
B30-1	9413	3480.35	30	36.97
B30-2	9413	4443.11	30	47.20
B50-1	9413	5635.64	50	59.87
B50-2	9413	7553.35	50	80.24

(t) for desired weight loss are presented in **Table 3**. To calculate the actual weight loss of steel bar, the corroded reinforcement bars were removed from all tested specimens after the flexural tests, and labeled. Then, the steel bars were cleaned and re-weighted without any dust. Since the initial weights of each steel bars were recorded before casting. Therefore, the actual weight loss of steels from the corrosion process can be computed according to equation (1). As can be seen from **Table 4**, the actual weight losses are higher than the desired corrosion values predicted from equation (1) with average discrepancy under 10%, except B50-2 with 30.24%. Since the applied current

was not switched off on the schedule; therefore, it led to more weight loss than original anticipation.

3.2 Load-Deflection Responses

A comparison of load-displacement responses at the middle span of specimens for each group is given in **Fig. 6a**. The load-displacement was obtained from LVDT and the load cell attached to test specimens as presented in **Fig. 5**. As seen, three response regions can be clearly identified, corresponding to the moment-curvature diagram of a typical reinforced beam subjected to a bending moment [13]. The control beam (B0) prematurely failed with a maximum load of 209 kN at a displacement of 9.1 mm. This failure load was rather different from an ultimate load calculated by the designed equation from ACI 318 [11] without a strength reduction factor (ϕ) as shown in **Table 5** (152 kN). The specimens B15 and B30 have almost identical responses including crack, yield, and ultimate loads, except values of B15 slightly higher shown in **Fig. 6b**. Also, the stiffness in the service stage of B15 was somewhat similar to B30. Therefore, it leads to conclude that no significant loss of the flexural capacity of beams B15 and B30 was detected from this experiment. Nevertheless, the beam B50, the specimen with the highest corrosion, displayed a significant reduction in all loading stages. It failed prematurely due to a rupture of the corroded tensile steel reinforcements.

As shown in **Fig. 6c**, after repairing of B15 and B30 by externally applied CFRP sheets to the surface of the bottom concrete, significant increment of the

yield and ultimate loads were observed. Besides, the deflections at the yield and ultimate loads of these two specimens also occurred at the same value. The stiffness

and the load responses at the yield and ultimate points of B15F1 were much higher than those of B30F1, clearly causing from the lower corrosion levels in the steel reinforcements of B15F1. For B50F2, major enhancement of the yield and ultimate loads were noticed from the test result, but in contrast of deflection. Although F50F2 with two layers of CFRP sheets initially showed higher stiffness than B30F1, its stiffness started to decay until reaching the ultimate load, resulting from debonding of the epoxy material.

The experimental and theoretical comparison of the ultimate load, along with the relative load capacity ratios between the test and computed results based on the flexural capacity of beam cross sections are listed in **Table 5**. The ultimate loads of beams, B0, B15, B30, and B50 are computed by ACI 318 [11]. The corresponding values for beams B15F1, B30F1, and B50F2 are calculated from ACI 440.2R [12]. These ultimate values are computed without the strength reduction factor (ϕ). All theoretical ultimate loads were calculated using material properties available from **Table 1** with the assumption of bond-perfect RC beams by neglecting the actual bond characteristic, the corrosion damage in the longitudinal reinforcements and the contacted stirrups, and damage in the surrounding concrete. The effect of weight loss of longitudinal reinforcements is incorporated to calculation by reducing in the steel diameters, equivalently to 85%, 70%, 50% of their original sizes, with respect to B15-B15F1, B30-B30F1, B50-B50F2. The mechanical properties of

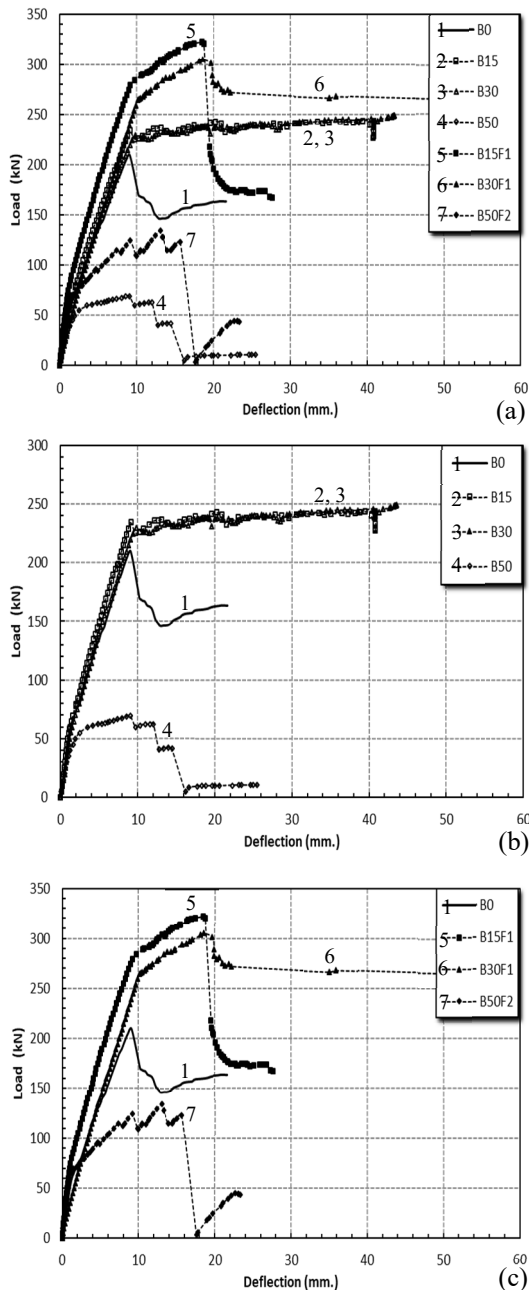


Fig. 6 Comparison of load-displacement responses (a) overall, (b) group1, (c) group2

Sika products are available online. Some necessary parameters of SikaWrap 300C for computing the flexural moment capacity are available in Table 1. Also, its thickness of 0.167 mm per one layer and the laminate elongation at break in tension of 1.59% are obtained from the product data sheet.

Table 5 Ultimate load comparison between experiment and ACI code

Beam	Ultimate Load (ACI) P_n kN	Ultimate Load (Exp.) P_u kN	Relative Load Capacity Ratio P_n/P_u
B0	152	NA*	NA*
B15	129	238	0.54
B30	107	245	0.44
B50	78	70	1.11
B15F1	302	323	0.93
B30F1	285	305	0.93
B50F2	271	134	2.02

Exp. = Experiment

NA* = Test data is either unavailable.

As seen from **Table 5**, theoretical ultimate loads of B15 and B30 are in the range of 44%-54% of measured from the experiments. It shows that ACI 318 design provision predicts quite conservative values of the ultimate load capacity (P_n) for the low corrosion beams. Oppositely observed with the high corrosion beam, B50, the ultimate load computed by ACI gives about 11.1% higher than the result from the experiment. ACI 440.2R design provision slightly underestimates the ultimate loads by margin of 7% for both B15F1 and B30F1, and significantly overestimates the ultimate capacity of B50F2 by 102%.

Comparison of load increment between non-repaired corroded beams and those repaired with CFRP sheets are shown in **Table 6**. It can be concluded that the reduction of the yield and ultimate load is clearly detected with the increasing corrosion. Moreover, the externally bonded CFRP sheets efficiently enhance the stiffness and strength of corroded beams.

Table 6 Load increments

Beam	Load Increments (%)	
	Yield	Ultimate
B15	235	238
B15F1	279	323
%	18.72	35.71
B30	230	245
B30F1	260	305
%	13.04	24.49
B50	55	70
B50F2	60	134
%	9.10	91.94

The crack, yield, and ultimate loads from the experiment are summarized in **Table 7**. Since the control beam (non-corroded beam), B0, tested data was unavailable, the comparison made within the different levels of corrosion are discussed instead. For the low corroded beams, B15 and B30, the results on yield, and ultimate loads are almost the same, with less than 3% discrepancy, and 10% difference for the crack load. However, significant reduction of those loads can be detected with the high corroded beam, B50, comparing to average values of B15 and B30, by approximation of 50%, 74%, and 72% for the crack, yield, and ultimate loads, correspondingly. The ratio of

ultimate to yield capacity of the corroded beams shows increment of the load capacity ranging from 1%, 7%, and 27% with respect to 15%, 30%, and 50% corrosion. This post-yielding performance of corroded beams was caused from the tensile behavior of the corroded steel bars suggested by the pervious literature [5].

Table 7 Loads from the experiment

Beam	Crack Load (kN)	Yield Load P_y (kN)	Ultimate Load P_u (kN)	P_u/P_y
B0	60	NA*	NA*	NA*
B15	50	235	238	1.01
B30	55	230	245	1.07
B50	20	55	70	1.27
B15F1	NA*	279	323	1.16
B30F1	NA*	260	305	1.17
B50F2	NA*	60	134	2.23

NA* = Test data is either unavailable.

For the corroded beams with CFRP sheets, B15F1 and B30F1 exhibited almost the same yield and ultimate load capacity with less than 8% and 6% difference. During the post-yielding behavior, B15F1 and B30F1 showed 16% and 17% increasing in the load capacity. Moreover, the strong post-yielding behavior was observed from B50F2 with 123% load increment. However, after the ultimate loads, sharp drop of the load capacity was noticed for all three CFRP beams, corresponding to the delamination failure of the fiber material. For B50F2, two load jumps were observed during the post-yielding period resulting from redistribution of the load capacity from concrete to CFRP sheets at the support.

3.3 Ductility

The impact of corrosion on the mechanical behavior of the beams was reported using the ductility index. The ratios of displacements at the yield and ultimate load extracted from Fig. 6 were calculated and shown in Table 8. Since the control beam (B0) prematurely failed, a comparison with B0 was unavailable from this study. The results clearly indicate that ductility decreases from 4.39 to 3.64 when the corrosion levels increased from 15% to 50%. Especially, B50 has ductility decreasing by 17%, and 11% with respect to B15 and B30. The beams with CFRP sheets, B15F1 and B30F1 display ductility of 2.01. Much higher ductility of 8.73 can be founded from B50F2. Nevertheless, no clear conclusion can be made on the effect of CFRP sheets to improve ductility of the corroded beams. It seems that CFRP sheets has no effect to ductility improvement for the low corrosion beams, B15 and B30. On the other hand, significant ductility enhancement of 140% can be detected for the high corrosion beam, B50.

Table 8 Deflection, and ductility of the experiment specimens

Beam	Deflection at Yield (Δ_y) mm	Deflection at Ultimate (Δ_u) mm	Ductility (Δ_u/Δ_y)
B0	NA*	NA*	NA*
B15	9.1	40	4.39
B30	9.8	40	4.08
B50	2.5	9.1	3.64
B15F1	9.2	18.5	2.01
B30F1	9.9	18.5	2.01
B50F2	1.5	13.1	8.73

NA* = Test data is either unavailable

3.4 Failure Mode

A typical failure pattern of a beam subjected to a fourth-point load test was illustrated in **Fig. 7**, described as follows. Type 1 fails by flexural failure of the bottom tensile reinforcement in which a ratio of the tensile reinforcement is low. Type 2 fails by crushing of top concrete where a ratio of the tensile reinforcement is high. Type 3 is shear failure which significantly induces from insufficient or high spacing of the stirrup reinforcement. Type 4 fails by a combination of flexural failure of the bottom tensile reinforcement and shear failure.

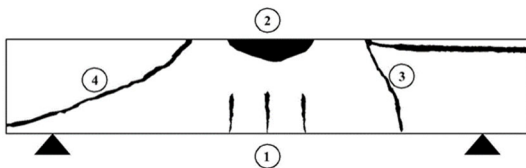


Fig. 7 Typical failure pattern of a beam subjected to a fourth-point load test [9]

Fig. 8 is the photos of tested specimens, B0, B15, B30, B50, B15F1, B30F1, B50F2, relatively. For group1, when the load was gradually applied to the beams, multiple flexural cracks appeared perpendicular to the bottom surface in the middle third span of the tension zone, and started to propagate and widen. Flexural yielding followed by concrete crushing occurred for all specimens in this group, except B0 and B50. The flexural-shear crack of B0 was so severe leading to failure before crushing of compression surface of the beam. On the other hand, B50 failed by significantly widen of the vertical crack perpendicular to the bottom surface and following with a rupture of the

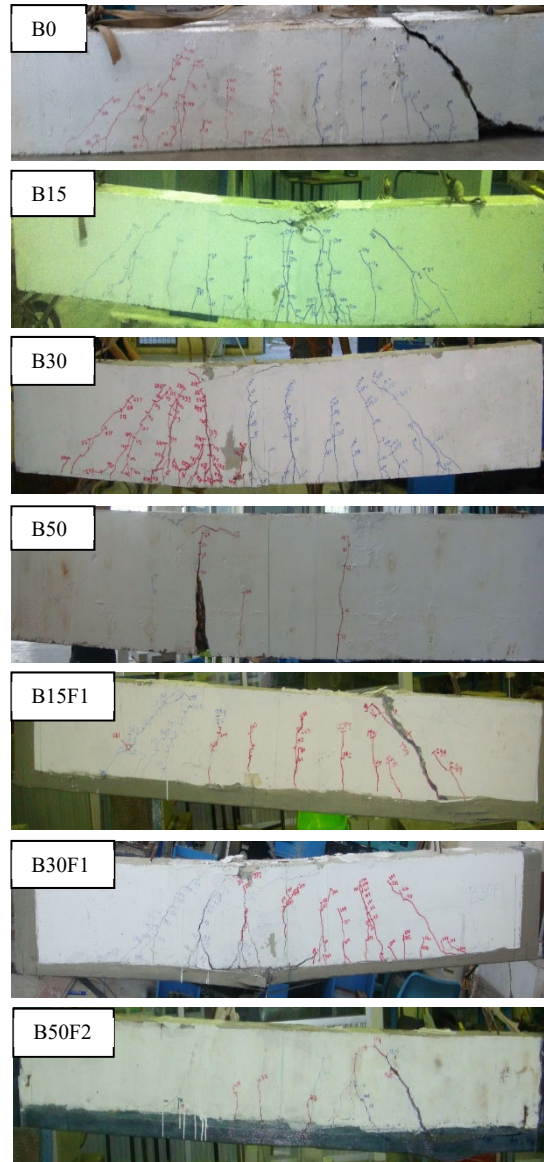


Fig. 8 Crack patterns and failure modes of test specimens

corroded tensile bars. Specimens B15F1, B30F1, and B50F2 have the crack patterns similar to those of the previous group. The failure mode B15F1 and B50F2 can be described as Type 4 which failed by a combination of flexural failure of the bottom tensile reinforcement and shear failure with fracture of CFRP sheets at the support. However, B30F1 can be

pronounced as Type 1 which failed by flexural failure of the bottom tensile reinforcement and fracture of CFRP sheets at the middle of the beam span. It should be noted that there is no failure in epoxy material obviously noticed from the test. This maybe results from the additional CFRP sheets wrapped around the beam cross section at the supports.

Considering the load response, ductility, and failure modes together, it can be concluded that corrosion results to large corrosion cracks and spalling, which reduce the bond between steel reinforcement and concrete, thus decreasing the bending stiffness of the beams. Nevertheless, this effect is not so obvious as the loss of ductility and capacity.

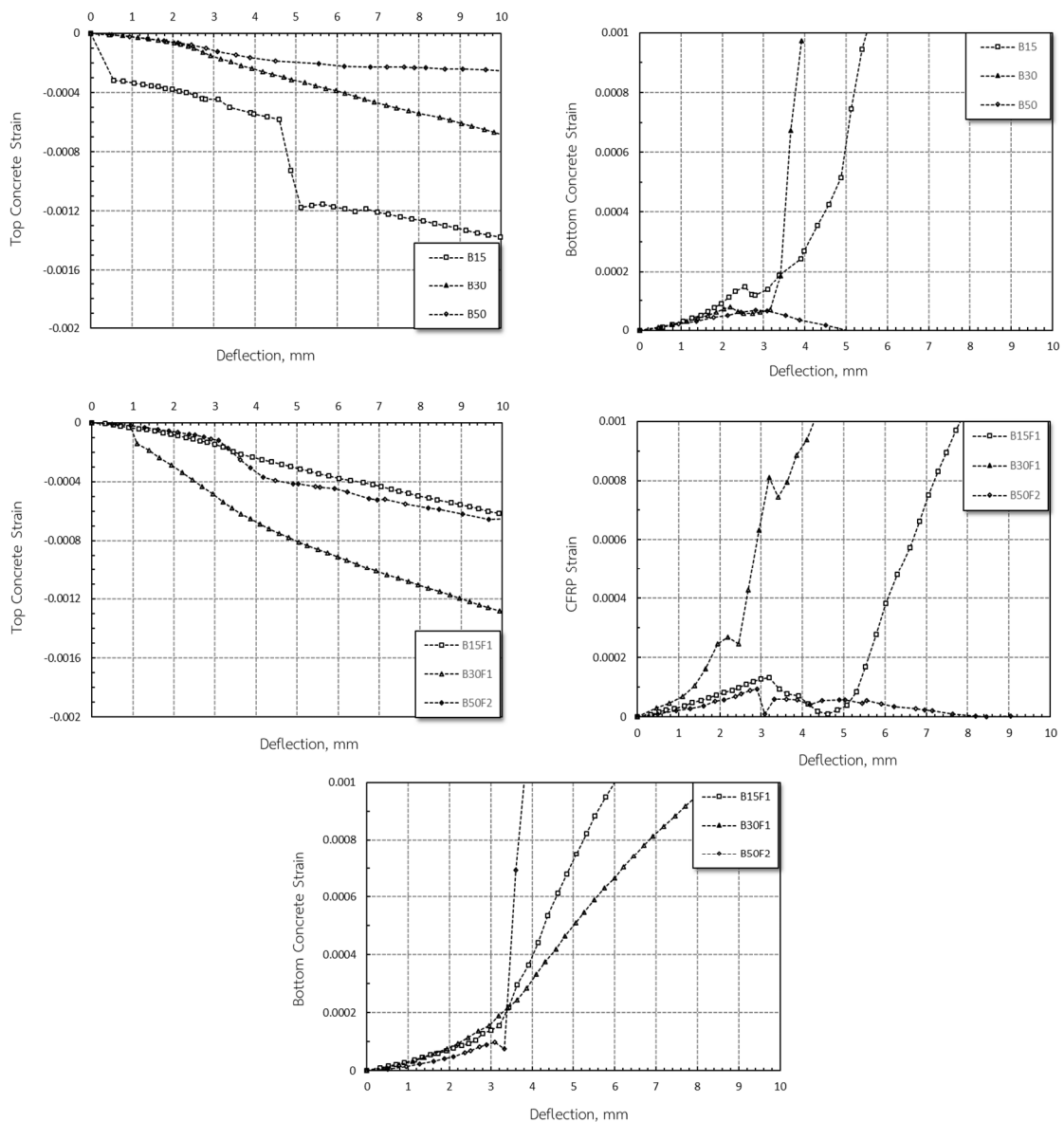


Fig. 9 Concrete and fiber strains for specimens

3.5 Concrete and CFRP Sheet Strains

In order to determine effectiveness of concrete and CFRP sheets, electrical strain gauges were attached to the top and bottom surface of concrete and also outer surface of the CFRP sheet as shown. **Fig. 9** illustrated variation of concrete and CFRP sheet strains against beam deflection. The results showed that concrete strain at the top surface of beams subjected to compressive loads clearly declined with increasing of the corrosion levels. The reversed behavior was detected for the bottom surface of beams, where concrete was in the tension zone. It was also noticed that higher degree of corrosion, lower activity of concrete was detected. This behavior caused from increasing of micro-crack inside the concrete with higher degrees of corrosion. When those specimens subjected to loads, the tension force quickly transferred to the tensile steels. This phenomenal led to sharply drop of the concrete strain with progress of the deflection. For the repaired specimens with CFRP sheets attached to the bottom surface of the beams, the gauges on CFRP sheets obviously confirmed the activity in tensile stress of the CFRP sheet. However, the study showed an inconclusive result to relate the levels of corrosion and activity of concrete strains causing from CFRP sheets. Therefore, the future study on this topic needs to be conducted.

4. Conclusion

The main conclusions drawn from the experiment are as follows:

1) The electrochemical process to accelerate corrosion in steel reinforcements of the RC beams successfully represents the corrosion behavior to the RC beams in the nature environments such as cracking of concrete, etc.

2) The corrosion levels predicted by Faraday's law well agree with results from the experiment.

3) Significant deteriorations in the yield capacity, ultimate capacity, and ductility are recorded due to the corrosion.

4) The test results indicate that significant gain in the flexural strength can be achieved by the bonding CFRP sheets to the tension surface of the corroded beams by up to 92%.

5) The use of CFRP sheets as an externally bonded to the bottom surface of the repaired RC beams proves to be efficient and provides sufficient in terms of strength and ductility for the low corrosion beams.

6) ACI 318 design provision underestimates the ultimate loads from the experiment by 44%-54% with the low corrosion beams, B15 and B30, and overestimates by 11% with the high corrosion beam, B50.

7) ACI 440.2R design provision slightly underestimates the ultimate loads by margin of 7% for beams B15F1 and B30F1, and significantly overestimates the ultimate capacity of B50F2 by 102%.

Finally, the future study needs to be carried on evaluation of the ultimate flexural and shear capacity of the corroded steel reinforcement beams repaired with the externally bonded CFRP sheets,

especially with the high degree of corrosion-damaged RC beams.

5. Acknowledgement

Authors would like to thank all former students and technician staffs of department of civil engineering, Burapha University, who made contribution in anyways to this study. Also, sincerely thank would be extended to the research and innovation administration division at Burapha University for all supports. This study is financially supported by a grant from engineering school, Burapha University, (Contract no. 62/2552).

6. References

- [1] P. Mangat and M. Elgarf, "Flexural Strength of concrete beams with corroding reinforcement," *ACI Struct. J.*, vol. 96, pp. 149-158, 1999.
- [2] Y. Ballim and J. Reid, "Reinforcement corrosion and the deflection of RC beams-an experimental critique of current test methods," *Cem. Concr. Compos. J.*, vol. 25, pp. 625-632, 2003.
- [3] M. Goitseone, A. Mark and M. Pilate, "Variation of steel loss and its effect on the ultimate flexural capacity of RC beams corroded and repaired under load," *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, pp. 1051-1059, 2010.
- [4] X. Gu, W. Zhang and D. Shang, "Flexural Behavior of Corroded Reinforced Concrete Beams," in *Proceedings of the 12th Biennial International Conference on Engineering, Construction, and Operations in Challenging Environments*, Honolulu, HI, USA, 2010.
- [5] W. Zhu, R. François, D. Coronelli and D. Cleland, "Effect of corrosion of reinforcement on the mechanical behavior of highly corroded RC beams," *Eng. Struct. J.*, vol. 56, pp. 544-554, 2013.
- [6] A. Torres-Acosta, M. Fabela-Gallegos, A. Munoz-Noval, D. Vazquez-Vega, T. Hernandez-Jimenez and M. Martinez-Madrid, "Influence of corrosion on the structural performance of reinforced concrete beams," *Corrosion*, vol. 60, pp. 862-872, 2004.
- [7] A. Al-Saidyn and K. Al-Jabri, "Effect of damaged concrete cover on the behavior of corroded concrete beams repaired with CFRP sheets," *Compos. Struct.*, vol. 93, pp. 1775-1786, 2011.
- [8] R. Haddad, "Hybrid repair configurations with CFRP composites for recovering structural performance of steel-corroded beams," *Construction and Building Materials*, vol. 124, pp. 508-518, 2016.
- [9] J. Rodriguez, L. Ortega and J. Casal, "Load Carrying Capacity of Concrete Structures with Corroded Reinforcement," *Constr. Build. Mater.*, vol. 11, pp. 239-248, 1997.
- [10] *ASTM G1.*, "Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens," *American Society for Testing and Materials: West Conshohocken*, PA, USA, 2003.
- [11] *ACI Committee 318-14.*, "Building Code Requirements for Structural

- Concrete,” American Concrete Institute: Farmington Hills, MI, USA, 2014.
- [12] *ACI Committee 440.2R-17.*, “Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures,” American Concrete Institute: Farmington Hills, MI, USA, 2017.
- [13] J. MacGregor and J. Wight, “*Reinforced Concrete Mechanics and Design*,” 4th ed. Boston: Pearson, 2005.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

การควบคุมคุณภาพและลดการสูญเสียในกระบวนการประกอบชิ้นส่วน บังโคลนหน้าแก้มข้างรถยนต์ด้วยวิธีโพคา-โยเกะ

อภิชาติ เสมศรี^{1*} เอกรัตน์ สุขสุคนธ์² สำรวย สีสมุท³ และ ธนิตศักดิ์ พุฒิพัฒน์โมะชิด⁴

^{1,2,3} คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี วิทยาลัยเซาธ์อีสท์บางกอก

⁴ คณะโลจิสติกส์และเทคโนโลยีการบิน วิทยาลัยเซาธ์อีสท์บางกอก

^{1,2,3,4} 298 ถนนสรรรพารุช แขวงบางนา เขตบางนา กรุงเทพฯ 10260

รับบทความ 19 ธันวาคม 2563 แก้ไขบทความ 13 เมษายน 2564 ตอรับบทความ 4 มิถุนายน 2564

บทคัดย่อ

งานวิจัยครั้งนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อนำวิธีโพคา-โยเกะช่วยป้องกันความผิดพลาดและลดการสูญเสียในกระบวนการประกอบชิ้นส่วนบังโคลนหน้าแก้มข้างรถยนต์ โดยใช้เครื่องมือควบคุมคุณภาพ 7 อย่าง (7QC Tools) ได้แก่ ใบตรวจสอบ ผังแสดงเหตุและผล และกราฟ ในการค้นหาสาเหตุและหาแนวทางการแก้ไข การหาความสัมพันธ์เหตุและผล และเทคนิค ECRS จากการศึกษาพบว่าปัญหาที่เกิดขึ้นมีการประกอบชิ้นส่วนบังโคลนหน้าแก้มข้างผิดพลาดไปยังอีกแผนก ซึ่งมีผลทำให้เกิดความเสียหายด้านเวลาในการซ่อมงาน ด้านกำลังคน รวมถึงเสียค่าใช้จ่ายที่จะจ่ายเพิ่มมากขึ้น จากการวิเคราะห์ข้อมูลมีสาเหตุหลักมาจากขาดอุปกรณ์เครื่องมือในการตรวจจับชิ้นงาน ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ใช้วิธีโพคา-โยเกะเพื่อลดความผิดพลาด จากการออกแบบระบบเซ็นเซอร์ควบคุมการตรวจจับชิ้นงาน เพื่อตรวจสอบการเคลื่อนที่ของชิ้นงาน ผลการวิจัยและการรวบรวมข้อมูลพบว่าข้อมูลก่อนการปรับปรุงในเดือนมกราคม-สิงหาคม พ.ศ.2562 จำนวนปัญหาที่เกิดจากกระบวนการ จากเดิมคิดเป็นร้อยละ 0.093 เมื่อเปรียบเทียบข้อมูลหลังจากการปรับปรุง จากการเก็บรวบรวมข้อมูลในเดือน กันยายน-ธันวาคม พ.ศ.2562 จำนวนของเสียลดลงเหลือร้อยละ 0 ทำให้เห็นว่าการปรับปรุงในครั้งนี้มีผลทำให้ปัญหาที่เกิดขึ้นจากกระบวนการประกอบชิ้นส่วนบังโคลนหน้าแก้มข้างรถยนต์ลดลงถึงร้อยละ 100

คำสำคัญ : การควบคุมคุณภาพ; การสูญเสีย; กระบวนการประกอบ; เครื่องมือคุณภาพ 7 QC Tools;
ชิ้นส่วนรถยนต์; โพคา-โยเกะ

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +666 4536 9415, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: aphichit@southeast.ac.th

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Quality Control and Loss Reduction in the Front Side Fender Model Assembly Process Using Poka-Yoke Techniques

Aphichit Semsri^{1*} Aekkarat Suksukont² Samruai Sisamut³ and Thanitsak Pudtipatkosit⁴

^{1, 2, 3} Faculty of Science and Technology, Southeast Bangkok College

⁴ Faculty of Logistics and Aviation Technology, Southeast Bangkok College

^{1, 2, 3, 4} 298 Sanphawut Rd., Bangna, Bangna, Bangkok 10260

Received 19 December 2020; Revised 13 April 2021; Accepted 4 June 2021

Abstract

This study aimed to use Poka-Yoke techniques to help prevent errors and reduce loss in Front Side Fender Model assembly process. The researchers used four tools in the 7QC tools which were Check Sheet, Cause-and-Effect Diagram and Graphs to search for causes and ways to solve problems and Cause and Effect Matrix and ECRS Techniques. The study revealed that the main cause of the problems was that the incorrect assembled side fenders were submitted to another department. This mistake had bad effects on time and workforce spent for correcting work including more expenses. The mistakes occurred because there was no tool for detecting errors in the work piece. Therefore, the researchers use Poka-Yoke techniques in order to decrease errors by designing a control system for target detection while it was moving through the process. After collecting data, the study showed that before the improvement during January to August 2019, the number of problems caused by the process were 0.093. However, the number of problems after the improvement during September to December 2019 reduced to 0. It was obvious that this improvement reduced the loss from the front side fender assembly process up to 100.

Keywords : Quality Control; Loss; Assembly Process; 7QC Tools; Car Parts; Poka-Yoke Techniques

* Corresponding Author. Tel.: +666 4536 9415, E-mail Address: aphichit@southeast.ac.th

1. บทนำ

คุณภาพของผลิตภัณฑ์เป็นสิ่งสำคัญในระบบการผลิตซึ่งในปัจจุบัน ถ้าผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพลดลง ความพึงพอใจของลูกค้าก็จะลดลง สิ่งที่สำคัญคือต้องค้นหาสาเหตุที่แท้จริงและกำจัดความแปรปรวนในสายการผลิต เทคนิคโพคา-โยเกะ ได้รับการพัฒนาโดย Dr. Shigeo Shingo ในปี 1961 ซึ่งเป็นผู้พัฒนาระบบการผลิต Toyota Production System (TPS) และ ระบบการผลิตแบบ Just-In-Time (JIT) โพคา-โยเกะที่ใช้ในกระบวนการผลิตเพื่อป้องกันสาเหตุที่ทำให้เกิดข้อบกพร่อง เป็นหนึ่งในฐานของแนวคิด Zero Quality Control (ZQC) ซึ่งหมายความว่าอัตราความบกพร่องในระบบการผลิตต้องเป็นศูนย์ [1] การออกแบบโพคา-โยเกะ สามารถลดความเสี่ยงในการผลิตและเพิ่มประสิทธิภาพให้สูงขึ้น [2] ในช่วงเวลาไม่กี่ปีที่ผ่านมาการแข่งขันที่มีความรุนแรงขึ้นในระบบเศรษฐกิจ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงครั้งใหญ่ในแนวทางการจัดการคุณภาพ องค์กรต่าง ๆ จึงมุ่งเน้นแนวทางการควบคุมคุณภาพ การปรับปรุงระบบ การจัดการคุณภาพให้เป็นไปตามกระบวนการที่กำหนดไว้ในแต่ละผลิตภัณฑ์ของตนเอง โดยการใช้ปรัชญาที่มีอยู่ (Kaizen, TQM, Zero Quality Deficiency) เป็นเครื่องมือที่มีคุณภาพและเป็นวิธีการจัดการคุณภาพที่ดี [3] “แนวทางการกระบวนการ” ในการบริหารจัดการองค์กรเป็นสิ่งที่จะต้องมีการพัฒนาอย่างไม่หยุดนิ่ง แนวคิดนี้สามารถนำมาใช้ได้กับทุกบริษัท เพราะเป็นการรวมกลไกที่มีความสำคัญทั้งหมด ซึ่งเป็นผลมาจากข้อกำหนดสำหรับระบบบริหารคุณภาพและกระบวนการคุณภาพ [4] ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเพิ่มผลผลิตในงานอุตสาหกรรมอย่างหนึ่งก็คือ ต้นทุนการผลิต [5] ซึ่งผู้ประกอบการจะต้องควบคุมและหาแนวทางในการลดต้นทุนอย่างต่อเนื่องเพื่อให้สามารถแข่งขันได้ในระยะยาว และสำหรับอุตสาหกรรมการผลิตนั้น ของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตต่าง ๆ จะถือเป็นความสูญเสียเปล่า [6] ซึ่งทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้นโดย

ไม่จำเป็นและจะส่งผลให้ผลผลิตลดลงด้วย [7] เทคนิคโพคา-โยเกะ สามารถช่วยลดปัญหาที่เกิดจากความผิดพลาดของพนักงานในการทำงานให้เป็นศูนย์ได้ ขึ้นอยู่กับปัญหาของงานที่แตกต่างกันออกไป จากกรณีศึกษาบริษัทแห่งหนึ่งเป็นผู้ประกอบการด้านประกอบชิ้นส่วนรถยนต์ ผู้วิจัยได้มีส่วนร่วมการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ ซึ่งในปัจจุบันผู้ประกอบการพบปัญหาจากการประกอบชิ้นส่วนรถยนต์ที่เกิดความผิดพลาดจากการทำงานของพนักงาน มีผลทำให้เกิดความเสียหายด้านเวลาในการซ่อมงาน ด้านกำลังคน รวมถึงเสียค่าใช้จ่ายที่จะต้องจ่ายเพิ่มมากขึ้น ผู้ประกอบการจึงได้มีนโยบายหลักที่ต้องการแก้ปัญหาและการสูญเสียที่เกิดจากความผิดพลาดในการทำงานของพนักงาน

จากปัญหาดังที่กล่าวมานี้ ทางผู้วิจัยจึงได้เห็นความสำคัญของการลดปัญหาที่เกิดจากความผิดพลาดในการประกอบชิ้นส่วนรถยนต์ โดยนำเทคนิคโพคา-โยเกะ ช่วยในแก้ปัญหาที่เกิดความผิดพลาด โดยศึกษาปัจจัยสาเหตุต่าง ๆ ที่มีผลทำให้เกิดปัญหาและได้นำปัญหาของการทำงานในกระบวนการทำงานมาวิเคราะห์เพื่อหาสาเหตุของปัญหา โดยใช้เครื่องมือ 7 QC Tools นำมาเป็นเครื่องมือในการแก้ไขปัญหา ใช้หลักการ 4 M การหาความสัมพันธ์เหตุและผลและเทคนิค ECRS กำหนดแนวทางวิธีการแก้ไขที่สาเหตุดังกล่าวเพื่อลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นให้เป็นศูนย์ ทำให้สามารถลดต้นทุนการผลิตลงได้อย่างมีประสิทธิภาพ และถือเป็นการเพิ่มผลผลิตและเพิ่มศักยภาพในการแข่งขันให้กับองค์กร

2. ระเบียบวิธีวิจัย

ผู้วิจัยได้มีการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทำให้สามารถหาแนวทางมาแก้ไขปัญหาที่เกิดจากความผิดพลาดในกระบวนการประกอบชิ้นส่วนรถยนต์ ด้วยวิธีโพคา-โยเกะ เพื่อแก้ปัญหาที่เกิดจากความผิดพลาด และใช้เครื่องมือ 7 QC Tools เพื่อนำมาใช้เป็นเครื่องมือในการแก้ไขปัญหา [8]-[10] โดยมีขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย 6 ขั้นตอนดังนี้

2.1 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 โฟคา-โยเกะ

เป็นเทคนิคในการหลีกเลี่ยงข้อผิดพลาดของมนุษย์ในการทำงาน ข้อบกพร่องมีอยู่ในสองสถานะคือ ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นแล้วต้องการให้มีการตรวจหา ข้อบกพร่องหรือกำลังจะเกิดขึ้นแล้วต้องการให้มีการคาดคะเนข้อบกพร่อง [11], [12] ซึ่งมีฟังก์ชันพื้นฐานสามอย่างในการป้องกันหรือลดข้อบกพร่อง ได้แก่ การปิดระบบ การควบคุม และการเตือน [11]-[13] เทคนิคนี้จะเริ่มต้นด้วยการวิเคราะห์กระบวนการ สำหรับปัญหาที่อาจเกิดขึ้นให้ระบุขึ้นส่วนตามลักษณะของรูปร่างมิติและน้ำหนักตรวจจับความเบี่ยงเบนของกระบวนการจากขั้นตอนและบรรทัดฐานที่ระบุ [14] มีสองวิธีในการใช้เทคนิคโฟคา-โยเกะ คือวิธีการควบคุมและวิธีการเตือน

2.1.2 เครื่องมือคุณภาพ 7 QC Tools

เครื่องมือคุณภาพที่ใช้ในการแก้ปัญหา เพื่อช่วยศึกษาสภาพทั่วไปของปัญหา, คัดเลือกปัญหา, ค้นหาและวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาที่แท้จริง เพื่อทำการแก้ไขอย่างถูกต้องและป้องกันไม่ให้เกิดซ้ำโดยมีส่วนประกอบดังนี้

1) แผ่นตรวจสอบ (Check Sheet) คือ แบบฟอร์มที่มีการออกแบบเพื่อจะใช้ในการบันทึก ข้อมูล

2) ผังพาเรโต (Pareto Diagram) คือ เป็นแผนภูมิที่ใช้แสดงให้เห็นถึงความสำคัญระหว่างสาเหตุ ข้อบกพร่องกับปริมาณความสูญเสียที่เกิดขึ้น

3) กราฟ (Graphs) คือ กราฟภาพที่แสดงถึงตัวเลขหรือข้อมูลทางสถิติที่ใช้เมื่อต้องการนำเสนอข้อมูลและวิเคราะห์ผลของข้อมูล

4) ผังเหตุและผล (Cause and Effect Diagram) คือ ผังที่แสดงความสำคัญระหว่าง คุณลักษณะ ทางคุณภาพกับปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง

5) ฮิสโตแกรม (Histogram) คือ กราฟที่แสดงถึงความผันแปรของข้อมูลที่ได้มาจากการวัด สำหรับข้อมูลกลุ่มย่อยเดียวกัน

6) ผังการกระจาย (Scatter Diagram) คือ ผังที่ใช้แสดงค่าของข้อมูลที่เกิดจากความสำคัญที่เกิด จากตัวแปรสองตัวว่ามีแนวโน้มไปในทางใดเพื่อใช้หาความสำคัญที่แท้จริง

7) แผนภูมิควบคุม (Control Chart) คือ แผนภูมิที่การเขียนขอบเขตที่ยอมรับได้เพื่อนำไปเป็น แนวทางในการควบคุมกระบวนการ [15]

2.1.3 ความสูญเสียเปล่าด้วยหลัก ECRS

หลักการ ECRS เป็นหลักการที่ประกอบด้วย การกำจัด (Eliminate) การรวมกัน (Combine) การจัดใหม่ (Rearrange) และ การทำให้ง่าย (Simplify) ซึ่งเป็นหลักการที่สามารถใช้ในการเริ่มต้นลดความสูญเสียเปล่าลงได้เป็นอย่างดี

1) Eliminate หมายถึง การพิจารณาการทำงานปัจจุบันและทำการกำจัดความสูญเสียเปล่าทั้ง 7 ที่พบในการผลิตออกไป

2) Combine หมายถึง ความสามารถลดการทำงานที่ไม่จำเป็นลงได้โดยการพิจารณาว่าสามารถรวมขั้นตอนการทำงานให้ลดลงได้หรือไม่

3) Rearrange หมายถึง การจัดการขั้นตอนการผลิตใหม่เพื่อให้ลดการเคลื่อนที่ ที่ไม่จำเป็นออกไป หรือการรอคอย

4) Simplify หมายถึง การปรับปรุงการทำงานให้ง่ายและสะดวกขึ้น [16]

2.1.4 เมทริกซ์เหตุและผล (Cause and Effect Matrix)

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการจัดลำดับความสำคัญของตัวแปรหรือปัจจัยหลักในกระบวนการผลิต โดยการให้คะแนนความสำคัญของแต่ละตัวแปร หรือปัจจัยจากการระดมความรู้ หรือประสบการณ์ของผู้ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการผลิต ซึ่ง Cause and Effect Matrix จะช่วยคัดเลือกตัวแปรหรือปัจจัยใดควรได้รับการตรวจสอบ เพื่อระบุว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างเหตุ (Cause) และผล (Effect) ที่เกิดขึ้นสามารถบ่งบอกได้ว่าตัวแปรหรือปัจจัยเหล่านั้นมีความจำเป็นที่ควรได้รับการควบคุม

2.1.5 กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์

กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytic Hierarchy Process) เป็นเทคนิคหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในกระบวนการตัดสินใจซึ่งได้รับความนิยมอย่างมากและเป็นที่ยอมรับกันในระดับสากลอย่างแพร่หลายเป็นเทคนิคที่ใช้การแบ่งองค์ประกอบของปัญหาออกเป็นส่วนๆ ในรูปของแผนภูมิตามลำดับชั้นแล้วมีการให้ค่าน้ำหนักของแต่ละองค์ประกอบแล้วนำมาคำนวณค่าน้ำหนักเพื่อนำไปสู่ค่าลำดับความสำคัญของแต่ละทางเลือกกว่าทางเลือกใดมีค่าสูงสุดแล้วนำมาประกอบการตัดสินใจ ดังนั้นเทคนิคนี้จึงเหมาะสำหรับการตัดสินใจที่เป็นรายบุคคลและเป็นกลุ่มโดยมีจุดเด่นดังนี้ คือง่ายในการสร้าง และสามารถนำเอาปัจจัยที่เป็นทั้งนามธรรมและรูปธรรมมาวินิจฉัยได้อย่างมีความสอดคล้องกันของเหตุผล อาศัยเกณฑ์ประเมินมาตรฐานที่ใช้ในการเปรียบเทียบความสำคัญโดยมีคะแนน 1-9 ตามตารางที่ 1 [17]

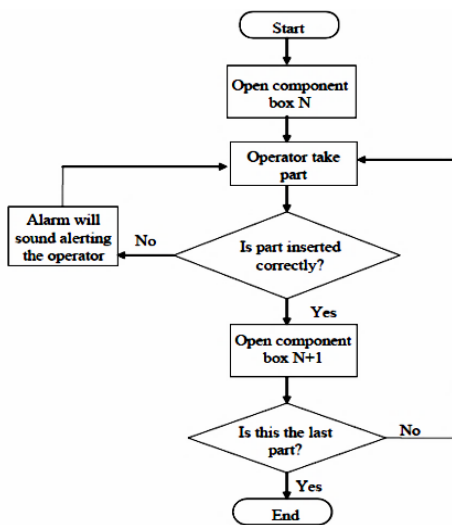
ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบทางเลือกเป็นคู่ๆ โดยอาศัยเกณฑ์ประเมินมาตรฐาน

ระดับความเข้มข้น		
ของ ความสำคัญ	ความหมาย	คำอธิบาย
1	สำคัญเท่ากัน	ทั้ง 2 เกณฑ์ส่งผลกระทบต่อ วัตถุประสงค์เท่าๆ กัน
3	สำคัญกว่าปาน กลาง	เกณฑ์หนึ่งสำคัญกว่าอีก เกณฑ์หนึ่งอยู่ในระดับปาน กลาง
5	สำคัญกว่ามาก	เกณฑ์หนึ่งสำคัญกว่าอีก เกณฑ์หนึ่งอยู่ในระดับมาก
7	สำคัญกว่ามาก ที่สุด	เกณฑ์หนึ่งสำคัญกว่าอีก เกณฑ์หนึ่งอยู่ในระดับมาก ที่สุด
9	สำคัญกว่ามาก สูงที่สุด	เกณฑ์หนึ่งสำคัญกว่าอีก เกณฑ์หนึ่งอยู่ในระดับสูงสุด
2,4,6,8	อยู่ระหว่าง ระดับที่ได้	อยู่ระหว่างระดับที่ได้อธิบาย มาแล้วข้างต้น
	อธิบายมาแล้ว ข้างต้น	

2.1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

M. Dudek-Burlikowska [12] ได้ศึกษาเกี่ยวกับวิธีโพคา-โยเกะ เพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการปรับปรุงคุณภาพของกระบวนการในการทำงาน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอแนวทางสำหรับการควบคุมคุณภาพและข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นต้องเป็นศูนย์ ภายในองค์กรของโปแลนด์ ด้วยการออกแบบ การกำหนดวิธีการและการกำหนดแนวทาง ความเป็นไปได้ของการใช้อุปกรณ์เพื่อตรวจสอบความผิดพลาดเชื่อมต่อกับระบบการตรวจสอบและช่วยในการปรับปรุงการดำเนินการในกระบวนการ จากการศึกษาพบว่าได้มีการนำเสนอแนวทางดังนี้ องค์กรควรใช้เครื่องมือทางเทคนิคที่มีวิธีการอย่างมีคุณภาพ มีการสนับสนุนทางด้านกลยุทธ์และให้ความสำคัญกับการปรับปรุง การดำเนินงานในกระบวนการที่มีข้อจำกัดและผลกระทบที่เกิดขึ้น การทำกิจกรรมมีจุดมุ่งหมายเพื่อป้องกันข้อบกพร่อง ได้มีการนำเสนอวิธีการป้องกันข้อผิดพลาดของโพคา-โยเกะ โดยมีข้อจำกัด ด้วยวิธีการดำเนินการเพื่อควบคุมการทำงานให้เสร็จสิ้นอย่างถูกต้อง วิธีการโพคา-โยเกะ ในตัวอย่างที่ใช้สามารถใช้ได้จริงคือการกำจัดหรือลดข้อผิดพลาดของมนุษย์ในกระบวนการผลิตและการจัดการอันเป็นผลมาจากความไม่สมบูรณ์ของร่างกายและจิตใจ Lee Ing Yi, Sha'ri Mohd Yusof [18] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงคุณภาพผลิตภัณฑ์ด้วยเทคนิคโพคา-โยเกะ การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำแนวคิด โพคา-โยเกะ ในการปรับปรุงสำหรับปัญหาที่มีอยู่ที่แผนกประกอบ สำหรับผลิตภัณฑ์ D73A ปัญหาหลักของข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นคือการประกอบชิ้นส่วนไม่ตรงตำแหน่งมีชิ้นส่วนประกอบบางอย่างขาดหายไปและชิ้นส่วนบางอย่างประกอบเข้าไปได้แค่ครั้งเดียวสาเหตุที่เป็นไปได้ คือพนักงานไม่สามารถปฏิบัติตามขั้นตอนการปฏิบัติงานตามมาตรฐาน เกิดข้อผิดพลาดโดยไม่ตั้งใจด้วยความประมาท และไม่มีการตรวจสอบจับชิ้นงาน แนวทางการแก้ไขกับปัญหาที่เกิดขึ้นคือการติดตั้งอุปกรณ์โพคา-โยเกะ เพื่อช่วยการทำงาน

แทนคนในกรณีที่พนักงานอาจจะลืมทำในบางส่วน อุปกรณ์จะส่งสัญญาณให้รับรู้เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดข้อบกพร่อง ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่เร็วที่สุดเพื่อให้การสูญเสียเป็นศูนย์ จากรูปที่ 1 การออกแบบ โฟคา-โยเกะ โดยใช้เซ็นเซอร์ จากบทความนี้ได้นำเสนอข้อคิดเห็นของการปรับปรุงคุณภาพโดยใช้เทคนิคโฟคา-โยเกะ สำหรับกระบวนการประกอบชิ้นส่วนยานยนต์ ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยใช้อุปกรณ์ตรวจจับเพื่อลดความผิดพลาดจากการทำงานของพนักงาน



รูปที่ 1 การออกแบบ โฟคา-โยเกะ โดยใช้เซ็นเซอร์

P. Nanjundaraj [19] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการนำเทคนิค โฟคา-โยเกะ ใช้ในการปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานโดยการลดอัตราการเกิดของเสียของชิ้นงานในสายการประกอบชิ้นส่วนโดยมีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาผลกระทบของการนำโฟคา-โยเกะ ไปใช้ในการปรับปรุงประสิทธิภาพการปฏิบัติงานในการประกอบชิ้นส่วนและการลดการเกิดของเสีย จากการศึกษาพบว่า ปัญหาที่เกิดขึ้นเกิดจากพนักงานไม่ดำเนินการตัดข้อต่อเทอร์มินัล จึงไม่สามารถดำเนินการประกอบขั้วยึดในกระบวนการต่อไปได้ แนวทางการแก้ไขกับปัญหาที่เกิดขึ้น การใช้ โฟคา-โยเกะ ด้วยการติดตั้งเซ็นเซอร์รวมอยู่ในอุปกรณ์จับยึด ทำหน้าที่ในการตรวจจับ

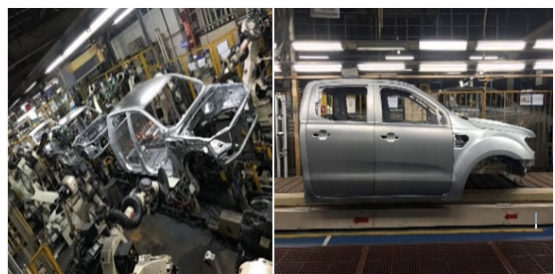
อุปกรณ์ที่พนักงานไม่ได้ทำการตัด ผลที่ได้จากการใช้เทคนิคโฟคา-โยเกะ สามารถลดการสูญเสียเป็นศูนย์ได้

จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าเทคนิคโฟคา-โยเกะ มีด้วยกัน 2 วิธี ได้แก่ วิธีการควบคุมและวิธีการเตือน บทสรุปพบว่าเทคนิคโฟคา-โยเกะ สามารถแก้ปัญหาค่าความสูญเสียที่เกิดจากความผิดพลาดให้เป็นศูนย์ได้ ผู้วิจัยจึงได้นำแนวความคิดเทคนิคโฟคา-โยเกะ ควบคุมการตรวจสอบความผิดพลาดจากระบบด้วยวิธีการเตือน ด้วยการออกแบบระบบควบคุมโดยใช้เซ็นเซอร์ นำมาศึกษาวิจัยเพื่อลดความผิดพลาดจากการประกอบชิ้นส่วนรถยนต์ของพนักงานภายในบริษัทของผู้ประกอบการ

2.2 ศึกษากระบวนการประกอบชิ้นส่วนรถยนต์

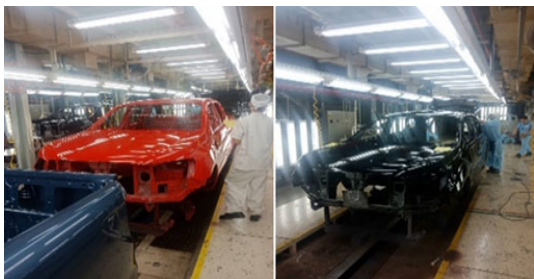
จากการศึกษากระบวนการประกอบชิ้นส่วนรถยนต์เพื่อหาสาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้นในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการนำไปสู่การปรับปรุงแก้ไขต่อไป ในกระบวนการประกอบชิ้นส่วนรถยนต์แบ่งออกเป็น 3 แผนก ได้แก่

1) แผนก Body Shop เป็นแผนกที่มีการประกอบชิ้นส่วนของรถยนต์บริเวณส่วนหัวรถยนต์ ดังรูปที่ 2 กระบวนการประกอบชิ้นส่วนบริเวณส่วนหัวรถยนต์



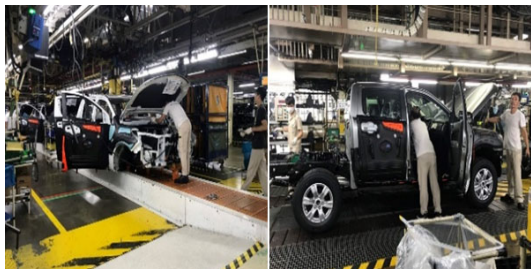
รูปที่ 2 กระบวนการประกอบชิ้นส่วนบริเวณหัวรถยนต์

2) แผนก Paint Shop เป็นแผนกพ่นสี หลังจากการประกอบชิ้นส่วนต่าง ๆ ในส่วนของหัวแก๊งเสร็จเรียบร้อยแล้ว จะผ่านมายังกระบวนการพ่นสีซึ่งจะเป็นกระบวนการลำดับต่อไป ดังรูปที่ 3 กระบวนการพ่นสี



รูปที่ 3 กระบวนการพ่นสี

3) แผนก TRIM and FINAL เป็นแผนกประกอบชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่ไม่เกี่ยวข้องกับการทำสีประกอบเข้ากับตัวรถยนต์ ดังรูปที่ 4 กระบวนการประกอบชิ้นส่วนต่าง ๆ เข้ากับตัวรถ



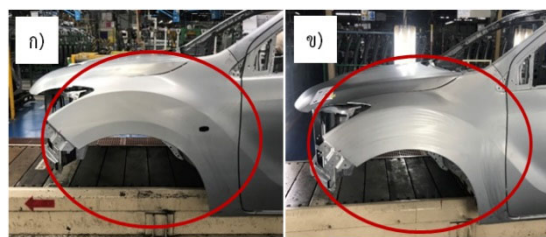
รูปที่ 4 กระบวนการประกอบชิ้นส่วนเข้ากับตัวรถยนต์

ตารางที่ 2 ข้อมูลจำนวนการเกิดปัญหา ก่อนการปรับปรุง

เดือน	ปริมาณการผลิต (คัน)	จำนวนการเกิดปัญหา (คัน)
ม.ค.	3,256	3
ก.พ.	2,976	2
มี.ค.	2,552	2
เม.ย.	2,135	3
พ.ค.	2,982	2
มิ.ย.	2,531	3
ก.ค.	2,915	3
ส.ค.	3,105	3
รวม	22,452	21
ร้อยละของปัญหาเฉลี่ย		0.093

2.3 การเก็บข้อมูลปัญหาในกระบวนการประกอบชิ้นส่วนรถยนต์

ผู้วิจัยได้รวบรวมเก็บข้อมูลปริมาณการผลิต และจำนวนปัญหาที่เกิดขึ้น ก่อนการปรับปรุงในช่วงเดือน ม.ค.-ส.ค. 2562 ได้ผลดังตารางที่ 2 ข้อมูลปริมาณของปัญหาที่เกิดขึ้นก่อนการปรับปรุง โดยเก็บรวบรวมจากใบตรวจสอบ บันทึกปัญหาในระหว่างช่วงที่มีการทำงานในแต่ละกระบวนการประกอบชิ้นส่วนรถยนต์ ยอดการผลิตรวม 22,452 คัน พบว่ามีปัญหาเกิดขึ้นจำนวน 21 คัน คิดเป็นร้อยละ 0.093



รูปที่ 5 ก) ชิ้นส่วนบังโคลนหน้าแก้มข้างรถยนต์รุ่นแบบมีไฟเลียว ข) ชิ้นส่วนบังโคลนหน้าแก้มข้างรถยนต์รุ่นแบบไม่มีไฟเลียว



รูปที่ 6 การประกอบชิ้นส่วนบังโคลนหน้าแก้มข้างรถยนต์ที่ผิดรุ่น

จากตารางที่ 2 ข้อมูลจำนวนการเกิดปัญหา ก่อนการปรับปรุง การเกิดปัญหาพบว่าปัญหาทั้งหมดเกิดขึ้นที่แผนก Body Shop ในส่วนของกระบวนการประกอบชิ้นส่วนบังโคลนหน้าแก้มข้างรถยนต์ ปัญหาที่พบคือการประกอบชิ้นส่วนบังโคลนหน้าแก้มข้างรถยนต์ผิดรุ่น เช่น รุ่นที่ต้องการมีไฟเลียวติดด้านข้างแต่

พนักงานประกอบชิ้นส่วนบังโคลนหน้าแก้มข้างรถยนต์ที่ไม่มีไฟเลี้ยวและรุ่นที่ไม่ต้องการมีไฟเลี้ยว แต่พนักงานประกอบแบบมีไฟเลี้ยว ดังรูปที่ 5 ก) ชิ้นส่วนบังโคลนหน้าแก้มข้างรถยนต์รุ่นแบบมีไฟเลี้ยว ข) ชิ้นส่วนบังโคลนหน้าแก้มข้างรถยนต์รุ่นแบบไม่มีไฟเลี้ยว และดังรูปที่ 6 การประกอบชิ้นส่วนบังโคลนหน้าแก้มข้างรถยนต์ที่ผิดรุ่น

2.4 การวิเคราะห์ข้อมูลและสาเหตุ

คณะผู้วิจัยได้พบปัญหาเกิดขึ้นที่แผนก Body Shop เป็นแผนกที่มีการประกอบชิ้นส่วนของรถยนต์บริเวณส่วนหัวแก้ม ในกระบวนการประกอบชิ้นส่วนบังโคลนหน้าแก้มข้างรถยนต์ที่เกิดความผิดพลาดจากการประกอบผิดรุ่น จึงได้สรุปปัญหาที่เกิดจากกระบวนการประกอบชิ้นส่วนบังโคลนหน้าแก้มข้างรถยนต์ นำมาวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา โดยใช้หลักการ 4 M คือ

คน เครื่องจักร วิธีการ และวัตถุดิบ [20] ดังรูปที่ 7 แผนภูมิแก๊งปลาเพื่อวิเคราะห์สาเหตุการเกิดปัญหา

จากการวิเคราะห์ถึงสาเหตุที่ทำให้เกิดปัญหาในแต่ละด้านจากแผนภูมิแก๊งปลา และนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างเหตุและผล (Cause & Effect Metric) ด้วยวิธีการระดมสมอง [21] ดังตารางที่ 3 โดยมีการกำหนดค่าการให้คะแนนตามกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytic Hierarchy Process) ตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ [17] ได้แก่

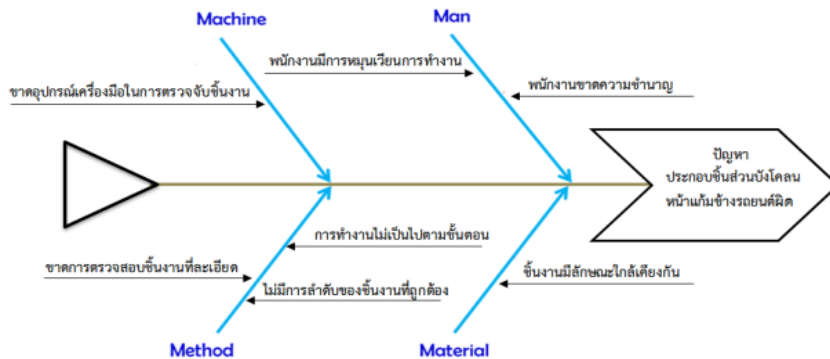
9 คะแนน หมายถึง ส่งผลโดยตรงมากที่สุดร้อยละ 100

7 คะแนน หมายถึง ส่งผลโดยตรงมากที่สุดร้อยละ 80,

5 คะแนน หมายถึง ส่งผลโดยตรงมากร้อยละ 60,

3 คะแนน หมายถึง ส่งผลโดยตรงปานกลางร้อยละ 40,

1 คะแนน หมายถึง ส่งผลโดยตรงต่อปัญหาน้อยกว่าร้อยละ 20



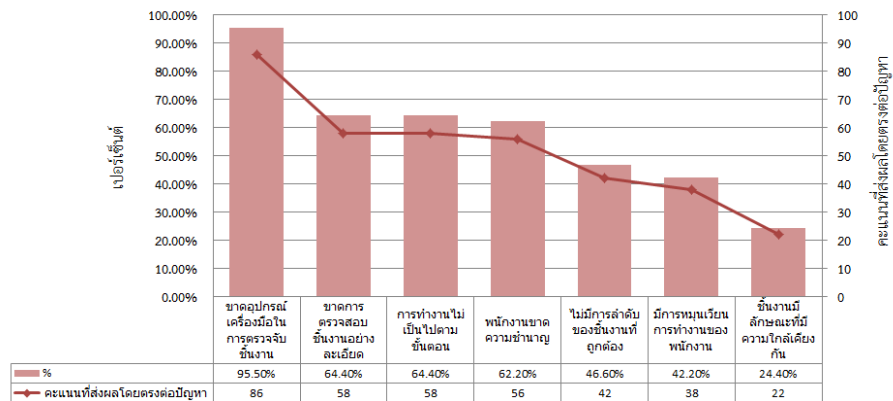
รูปที่ 7 แผนภูมิแก๊งปลาเพื่อวิเคราะห์สาเหตุ

ตารางที่ 3 ความสัมพันธ์ ระหว่างเหตุและผล (Cause & Effect Metric)

คณะทำงานที่เกี่ยวข้อง โดยใช้เทคนิคการระดมสมอง													
ลำดับที่	ปัจจัยของปัญหา	ผจก. ฝ่ายผลิต	ผจก. แผนก	หัวหน้างาน	หัวหน้าควบคุมคุณภาพ	วิศวกร ฝ่ายผลิต คนที่ 1	วิศวกร ฝ่ายผลิต คนที่ 2	ผู้เชี่ยวชาญ คนที่ 1	ผู้เชี่ยวชาญ คนที่ 2	พนักงาน คนที่ 1	พนักงาน คนที่ 2	คะแนนรวม (90 คะแนน)	%
1	เครื่องจักร												
	- ขาดอุปกรณ์เครื่องมือในการตรวจจับชิ้นงาน	9	9	7	7	9	9	9	9	9	9	86	95.5
2	คน												
	- พนักงานขาดความชำนาญ	5	7	5	5	5	5	7	7	5	5	56	62.2
	- มีการหมุนเวียนการทำงานของพนักงาน	3	3	5	3	3	5	3	3	5	5	38	42.2

ตารางที่ 3 ความสัมพันธ์ ระหว่างเหตุและผล (Cause & Effect Metric) (ต่อ)

ลำดับที่	ปัจจัยของปัญหา	คะแนนที่เกี่ยวกับ โดยใช้เทคนิคการระดมสมอง										คะแนนรวม (90 คะแนน)	%
		ผจก. ฝ่ายผลิต	ผจก. แผนก	หัวหน้า งาน	หัวหน้า ควบคุม คุณภาพ	วิศวกร ฝ่ายผลิต คนที่ 1	วิศวกร ฝ่ายผลิต คนที่ 2	ผู้เชี่ยวชาญ ขาย คนที่ 1	ผู้เชี่ยวชาญ ขาย คนที่ 2	พนักงาน คนที่ 1	พนักงาน คนที่ 2		
3	วิธีการ												
	- ขาดการตรวจสอบชิ้นงานอย่างละเอียด	5	5	5	5	7	7	7	7	5	5	58	64.4
	- การทำงานไม่เป็นไปตามขั้นตอน	5	5	5	3	7	9	9	9	3	3	58	64.4
4	วัตถุดิบ												
	- ไม่มีการลำดับของชิ้นงานที่ถูกต้อง	5	3	5	3	5	5	5	5	3	3	42	46.6
	- ชิ้นงานมีลักษณะที่มีความใกล้เคียงกัน	3	3	3	3	1	1	1	1	3	3	22	24.4



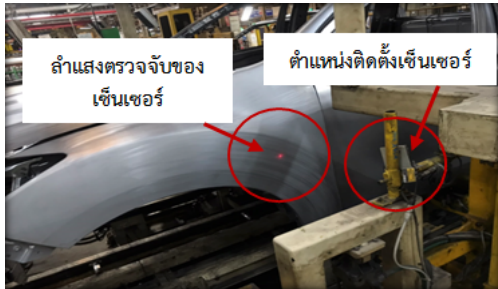
รูปที่ 8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุของปัญหา กับคะแนนที่ส่งผลโดยตรงต่อปัญหา

ผลการวิเคราะห์จากการลำดับสาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้น พบว่าสาเหตุเกิดจากการขาดอุปกรณ์เครื่องมือในการตรวจจับชิ้นงานมากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 95.5 ลงลงมาได้แก่ ขาดการตรวจสอบชิ้นงานอย่างละเอียด/การทำงานไม่เป็นไปตามขั้นตอน คิดเป็นร้อยละ 64.4 และพนักงานขาดความชำนาญ คิดเป็นร้อยละ 62.2 ความหมายระดับการให้คะแนน จากการลงมติในที่ประชุม ถ้าสาเหตุของปัญหาใด ที่มีค่าน้ำหนักมากกว่าร้อยละ 80 ขึ้นไป จะส่งผลโดยตรงกับปัญหามากที่สุด เป็นสาเหตุที่จะต้องได้รับการแก้ไข จากข้อสรุปสาเหตุที่จะต้องได้รับการแก้ไขได้แก่ สาเหตุที่เกิดจากขาดอุปกรณ์เครื่องมือในการตรวจจับชิ้นงาน ดังตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ลำดับสาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้น และดัง

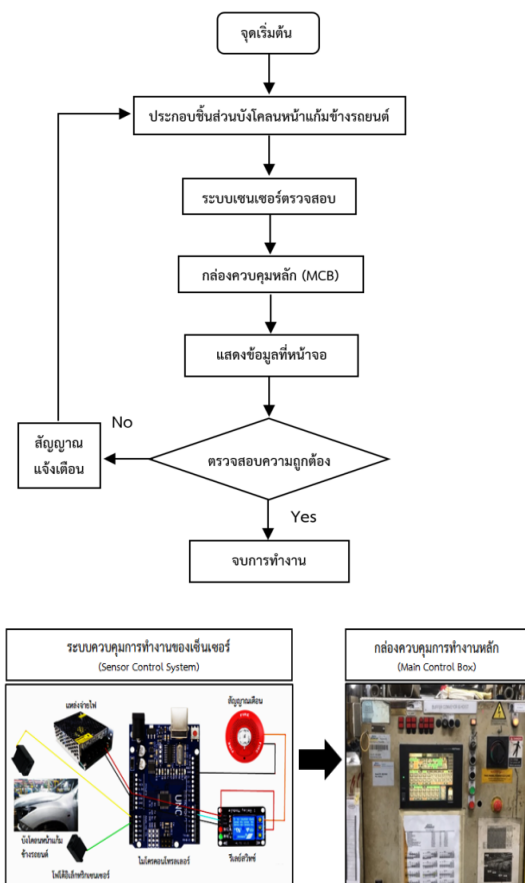
รูปที่ 8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุของปัญหา กับคะแนนที่ส่งผลโดยตรงต่อปัญหา

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ลำดับสาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้น

ลำดับที่	สาเหตุปัญหา	คะแนนที่ส่งผลโดยตรงต่อปัญหา	ร้อยละ
1	ขาดอุปกรณ์เครื่องมือในการตรวจจับชิ้นงาน	86	95.5
2	ขาดการตรวจสอบชิ้นงานอย่างละเอียด	58	64.4
3	การทำงานไม่เป็นไปตามขั้นตอน	58	64.4
4	พนักงานขาดความชำนาญ	56	62.2



รูปที่ 10 ตำแหน่งการติดตั้งเซ็นเซอร์



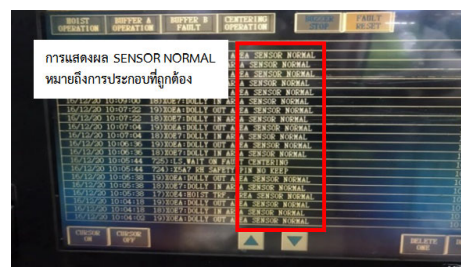
รูปที่ 11 ไคอะแกรมการทำงานของเซ็นเซอร์เพื่อส่งข้อมูลให้กับกล่องควบคุมการทำงานหลัก

อิเล็กทรอนิกส์เซ็นเซอร์บริเวณตำแหน่งในส่วนของหัวแก้มที่มีการเคลื่อนของชิ้นส่วนแล้วหยุดอยู่กับที่ เพื่อให้เซ็นเซอร์สามารถตรวจจับวัตถุหรือชิ้นส่วนที่มาหยุดในตำแหน่งที่กำหนดไว้ รวมถึงติดตั้งอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องทั้งหมด ดังรูปที่ 10 ตำแหน่งการติดตั้งเซ็นเซอร์ หลังจากการติดตั้ง

เสร็จให้ทำการลงโปรแกรมด้วยการเขียนโปรแกรมคำสั่งต่าง ๆ ที่กล่องควบคุมการทำงานหลัก (Main Control Box) เพื่อควบคุมการทำงานของระบบ ในการประกอบชิ้นส่วนที่ถูกต้องหรือไม่ ถ้ามีการประกอบชิ้นส่วนที่ผิดจะแสดงค่าความผิดพลาดส่งมาที่กล่องควบคุมการทำงานหลัก และจะมีเสียงดังแจ้งเตือนเพื่อให้พนักงานรับรู้ เพื่อทำการแก้ไขต่อไป

2.5.3 หลักการทำงานของระบบควบคุมการตรวจจับชิ้นงาน

จากรูปที่ 11 ไคอะแกรมการทำงานของเซ็นเซอร์เพื่อส่งข้อมูลให้กับกล่องควบคุมการทำงานหลัก ใช้ในการประมวลผลจากการตรวจจับชิ้นงาน การทำงานเริ่มต้น เมื่อหัวแก้มเคลื่อนที่มายังจุดที่กำหนดไว้ พนักงานก็จะทำการประกอบชิ้นส่วนบังคับหน้าแก้มข้างรถยนต์ จากนั้นเซ็นเซอร์จะตรวจสอบชิ้นส่วนบังคับหน้าแก้มข้างรถยนต์ที่พนักงานประกอบถูกหรือผิด โดยจะมีแสงเลเซอร์จากเซ็นเซอร์ ส่งไปที่ชิ้นส่วนบังคับหน้าแก้มข้าง กำหนดให้เป็นระยะเซนติเมตรในการบ่งบอกถึงความถูกต้อง ถ้าทั้ง 2 ข้าง มีระยะในการส่งของแสงเลเซอร์ ที่เท่ากันแสดงว่ามีการประกอบบังคับหน้าแก้มข้างที่ถูกต้อง แต่ถ้าระยะการส่งของแสงเลเซอร์ ทั้ง 2 ข้างไม่เท่ากัน แสดงว่าการประกอบบังคับหน้าแก้มข้างที่ประกอบมาผิด กล่องควบคุมหลัก (Main Control Box) จะแสดงค่าความผิดพลาดและมีเสียงดังแจ้งเตือนว่ามีประกอบบังคับหน้าแก้มข้างผิด ดังรูปที่ 12 การแสดงผลการประกอบชิ้นส่วนถูกต้องหรือไม่ถูกต้องที่หน้าจอกล่องควบคุมหลัก



รูปที่ 12 การแสดงผลการประกอบชิ้นส่วนถูกต้องหรือไม่ถูกต้องที่หน้าจอกล่องควบคุมหลัก

2.6 การทดสอบการทำงานระบบควบคุมการตรวจจับความผิดพลาดของชิ้นงาน

จากการออกแบบระบบควบคุมการทำงานของเซ็นเซอร์เพื่อตรวจสอบการทำงานในกระบวนการการประกอบชิ้นส่วนบังโคลนหน้าแก้มข้างรถยนต์ ได้นำมาทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพการทำงานของระบบ ดังตารางที่ 7 ผลจากการทดสอบระบบควบคุมการทำงาน

ของเซ็นเซอร์ตรวจจับความผิดพลาดการประกอบชิ้นส่วนบังโคลนหน้าแก้มข้างรถยนต์

จากการเก็บรวบรวมข้อมูลในการทดสอบช่วงเดือนกันยายนมีปริมาณการผลิตเท่ากับ 2,940 คัน โดยการทดสอบจะพิจารณาการผลิตในแต่ละวัน จากจำนวนวันทำงาน 20 วัน เฉลี่ยการผลิตเท่ากับ 147 คันต่อวัน การทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ช่วง ช่วงแรกเป็นการทดสอบเพื่อหาปัญหาที่เกิดขึ้น พร้อมการแก้ไข ช่วงที่สองเป็นช่วงหลังที่มีการปรับปรุงและแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นจากช่วงแรกที่มีการทดสอบ

จากการทดสอบระบบควบคุมการทำงานการตรวจจับความผิดพลาดของเซ็นเซอร์ ในการทดสอบช่วงที่ 1 จำนวนวันทำงานที่มีการประกอบชิ้นส่วน 7 วันทำงาน ปริมาณการผลิตเท่ากับ 1,029 คัน พบปัญหาเกิดขึ้นจำนวน 50 ครั้ง ปัญหาที่พบได้แก่

1) ปัญหาจากลำแสงของเซ็นเซอร์ไม่ตรงตำแหน่ง

แนวทางการแก้ไข

1. ปรับตั้งตำแหน่งของเซ็นเซอร์ให้ตรงจุด
2. ปรับตำแหน่งการหยุดของชิ้นงาน

2) ไม่แสดงผลที่หน้าของกล่องควบคุมหลัก

แนวทางการแก้ไข

1. ตรวจสอบอุปกรณ์ในระบบ
2. ตรวจสอบระบบการส่งสัญญาณ

3) แสดงผลที่หน้าจอกกล่องควบคุมหลักเป็นบางครั้ง

แนวทางการแก้ไข

1. ตรวจสอบอุปกรณ์ในระบบ
2. ตรวจสอบระบบการส่งสัญญาณ

ตารางที่ 7 ผลจากการทดสอบระบบควบคุมการทำงาน

ของเซ็นเซอร์ตรวจจับความผิดพลาดการประกอบชิ้นส่วนบังโคลนหน้าแก้มข้างรถยนต์

วันในการผลิต	การประกอบชิ้นส่วน (คัน)	เกิดปัญหาจากการทำงานของเซ็นเซอร์ (คัน)	ปัญหาที่เกิดขึ้น	แนวทางการแก้ไข
การทดสอบช่วงที่ 1 (ตั้งแต่วันที่ 1-7 ของวันทำงาน)				
วันที่ 1	147	17	- ลำแสงเซ็นเซอร์ไม่ตรงตำแหน่ง	- ปรับตำแหน่งเซ็นเซอร์ - ปรับตำแหน่งการหยุดของชิ้นงาน
วันที่ 2	147	15	- ลำแสงเซ็นเซอร์ไม่ตรงตำแหน่ง	- ปรับตำแหน่งเซ็นเซอร์ - ปรับตำแหน่งการหยุดของชิ้นงาน
วันที่ 3	147	7	- ไม่แสดงผลที่หน้าจอกกล่องควบคุม	- ตรวจสอบอุปกรณ์ - ตรวจสอบระบบการส่งสัญญาณ
วันที่ 4	147	5	- ไม่แสดงผลที่หน้าจอกกล่องควบคุม	- ตรวจสอบอุปกรณ์ - ตรวจสอบระบบการส่งสัญญาณ
วันที่ 5	147	3	- แสดงผลที่หน้าจอกกล่องควบคุมเป็นบางครั้ง	- ตรวจสอบอุปกรณ์ - ตรวจสอบระบบการส่งสัญญาณ
วันที่ 6	147	3	- แสดงผลที่หน้าจอกกล่องควบคุมเป็นบางครั้ง	- ตรวจสอบอุปกรณ์ - ตรวจสอบระบบการส่งสัญญาณ
วันที่ 7	147	0	ไม่พบปัญหา	-
รวม	1,029	50	-	-
ร้อยละค่าเฉลี่ยของปัญหาที่เกิดขึ้น		4.85		
การทดสอบช่วงที่ 2 (ตั้งแต่วันที่ 8-20 ของวันทำงาน) หลังการปรับปรุงระบบ				
วันที่ 8	147	0	ไม่พบปัญหา	-
วันที่ 9	147	0	ไม่พบปัญหา	-
วันที่ 10	147	0	ไม่พบปัญหา	-
วันที่ 11	147	0	ไม่พบปัญหา	-
วันที่ 12	147	0	ไม่พบปัญหา	-
วันที่ 13	147	0	ไม่พบปัญหา	-
วันที่ 14	147	0	ไม่พบปัญหา	-
วันที่ 15	147	0	ไม่พบปัญหา	-
วันที่ 16	147	0	ไม่พบปัญหา	-
วันที่ 17	147	0	ไม่พบปัญหา	-
วันที่ 18	147	0	ไม่พบปัญหา	-
วันที่ 19	147	0	ไม่พบปัญหา	-
วันที่ 20	147	0	ไม่พบปัญหา	-
รวม	1,911	0	ไม่พบปัญหา	-
ร้อยละค่าเฉลี่ยของปัญหาที่เกิดขึ้น		0	ไม่พบปัญหา	-

หลังจากการปรับปรุง ในการทดสอบช่วงที่ 2 จำนวนวันทำงานที่ 13 วัน ปริมาณการผลิตเท่ากับ 1,911 คัน ไม่พบปัญหาที่เกิดขึ้น ผลที่ได้จากการทดสอบพบว่าระบบสามารถตรวจจับชิ้นส่วนที่ประกอบได้อย่างแม่นยำหลังจากที่มีการปรับปรุงปัญหาที่เกิดขึ้น ดังรูปที่ 13 การประกอบชิ้นส่วนบังโคลนหน้าแก้มข้างรถยนต์ทั้ง 2 ข้าง ที่ไม่มีรูไฟเลี้ยวเหมือนกันอย่างถูกต้อง รูปที่ 14 การประกอบชิ้นส่วนบังโคลนหน้าแก้มข้างรถยนต์ทั้ง 2 ข้าง ที่มีรูไฟเลี้ยวเหมือนกันอย่างถูกต้อง



รูปที่ 13 การประกอบชิ้นส่วนบังโคลนหน้าแก้มข้างรถยนต์ทั้ง 2 ข้าง ที่ไม่มีรูไฟเลี้ยวเหมือนกันอย่างถูกต้อง



รูปที่ 14 การประกอบชิ้นส่วนบังโคลนหน้าแก้มข้างรถยนต์ทั้ง 2 ข้าง ที่มีรูไฟเลี้ยวเหมือนกันอย่างถูกต้อง

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

ผลจากการปรับปรุงและแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น ในการประกอบชิ้นส่วนบังโคลนหน้าแก้มข้างรถยนต์ที่เกิดความผิดพลาดจากการประกอบชิ้นส่วนที่ผิดและไม่ถูกต้อง ด้วยการออกแบบระบบควบคุมการทำงานของเซ็นเซอร์เพื่อการใช้งานโพคา-โยเกะ จากการนำไปทดสอบซึ่งได้ผลจากการทดสอบ ดังตารางที่ 8 ข้อมูลปริมาณปัญหาที่เกิดขึ้นหลังการปรับปรุงจากเก็บข้อมูลช่วงเดือนกันยายน-ธันวาคม พบว่า ยอดรวมปริมาณการ

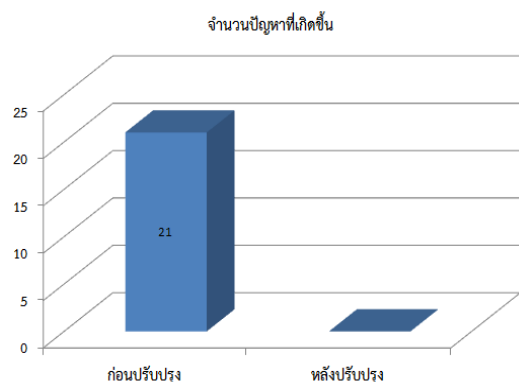
ผลิต เท่ากับ 9,384 คัน ร้อยละของปัญหาที่เกิดขึ้นหลังการปรับปรุงเท่ากับร้อยละ 0 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับ การปรับปรุงก่อนและหลัง ดังตารางที่ 9 เปรียบเทียบจำนวนของปัญหา ก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุง พบว่าปัญหาที่เกิดขึ้นก่อนการปรับปรุงเท่ากับ ร้อยละ 0.093 หลังจากการปรับปรุง ปริมาณปัญหาที่เกิดขึ้นเท่ากับร้อยละ 0 ดังรูปที่ 15 และรูปที่ 16 กราฟเปรียบเทียบปริมาณปัญหาที่เกิดขึ้นในแต่ละเดือน

ตารางที่ 8 ข้อมูลปริมาณของปัญหาที่เกิดขึ้น หลังการปรับปรุง

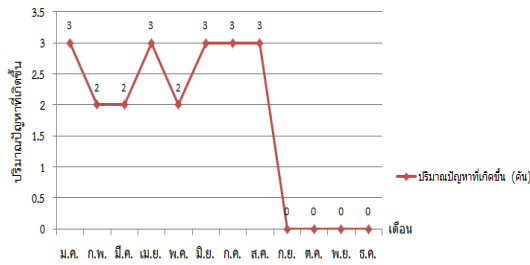
เดือน	ปริมาณการผลิต (คัน)	ปริมาณปัญหาที่เกิดขึ้น (คัน)
ก.ย.	2,940	0
ต.ค.	2,459	0
พ.ย.	2,089	0
ธ.ค.	1,895	0
รวม	9,383	0

ตารางที่ 9 เปรียบเทียบปัญหาที่เกิดขึ้นก่อนการปรับปรุง และหลังการปรับปรุง

การปรับปรุง	ปริมาณการผลิต (คัน)	ปริมาณปัญหาที่เกิดขึ้น (คัน)
ก่อนการปรับปรุง	22,452	21
หลังการปรับปรุง	9,383	0



รูปที่ 15 กราฟเปรียบเทียบร้อยละของปัญหาก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุง



รูปที่ 16 กราฟเปรียบเทียบปริมาณปัญหาที่เกิดขึ้นในแต่ละเดือน

4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาและวิจัยการควบคุมคุณภาพและลดการสูญเสียในกระบวนการประกอบชิ้นส่วนบังโคลนหน้าแก้มข้างรถยนต์ด้วยวิธีโพคา-โยเกะ ผู้วิจัยได้ค้นหาสาเหตุโดยใช้เครื่องมือคุณภาพ 7 อย่าง (7QC Tools) การหาความสัมพันธ์เหตุและผล และแนวคิด ECRS

ผลจากการวิจัยพบว่า การนำเทคนิคโพคา-โยเกะจากการออกแบบและทำการติดตั้งระบบเซ็นเซอร์ ผลที่ได้จากการทดสอบระบบควบคุมการทำงานการตรวจจับความผิดพลาดของเซ็นเซอร์แบ่งออกเป็น 2 ช่วง ในการทดสอบช่วงที่ 1 พบปัญหาเกิดขึ้นจากระบบเซ็นเซอร์ได้แก่ ปัญหาจากลำแสงของเซ็นเซอร์ไม่ตรงตำแหน่ง ไม่แสดงผลที่กล่องควบคุมหลัก และแสดงผลที่หน้าจอกล่องควบคุมหลักเป็นบางครั้ง หลังจากปรับปรุงแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น ทำการทดสอบช่วงที่ 2 ผลที่ได้จากการทดสอบ ระบบเซ็นเซอร์สามารถตรวจจับชิ้นส่วนที่ประกอบได้อย่างแม่นยำ ผลของการประกอบชิ้นส่วนถูกต้องหรือไม่ จะประมวลผลไปยังกล่องควบคุมหลัก (Main Control Box) จากข้อมูลก่อนการปรับปรุง จำนวนปัญหาที่เกิดขึ้นจากกระบวนการ จากเดิมคิดเป็นร้อยละ 0.093 หลังการปรับปรุง จำนวนของเสียลดลงเหลือร้อยละ 0 การปรับปรุงในครั้งนี้มีผลทำให้การสูญเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการประกอบชิ้นส่วนตัวถังลดลงถึงร้อยละ 100 ผลของการใช้วิธีโพคา-โยเกะเพื่อแก้ปัญหาสามารถลดความผิดพลาดได้เป็นอย่างดี

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบริษัทกรณีศึกษาและบุคลากรทุกท่านที่ได้ร่วมกันเก็บข้อมูล ระดมสมอง ช่วยกันคิดวิเคราะห์เพื่อหาสาเหตุและการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น จนทำงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] J.-C. Tsou and J.-M. Chen, "Dynamic model for a defective production system with Poka-Yoke," *Journal of the Operational Research Society*, vol. 56, no. 7, pp. 799–803, Jul. 2005.
- [2] S. Shingo and A. P. Dillon, *Zero Quality Control: Source Inspection and the Poka-Yoke System*, Productivity Press, 1986.
- [3] S. Tkaczyk and M. Dudek, "Quality continuous improvement of production process in aspect of usage quality researches and estimation methods," in *Proceedings of 11th Scientific International Conference Achievements in Mechanical and Materials Engineering*, AMME, Gliwice-Zakopane, 2002, pp. 567-570.
- [4] S. Tkaczyk and M. Dudek, "Methodology research of quality in industry," in *Proceedings of 7th Scientific International Conference Achievements in Mechanical and Materials Engineering*, AMME, Gliwice-Zakopane, 1998, pp. 513-516.
- [5] C. Khunponkaew, *Productivity Improvement Principle*, 1st ed. Bangkok: Prachachon Publisher, Thailand Productivity Institute, 2001.

- [6] S. Tangphaitoon, *Waste Reduction by Kaizen for Production Improvement*, 1st ed. Nonthaburi, 2004.
- [7] R. B. Chase, *Production and Operations Management*, 7th ed. McGraw-Hill, 1995.
- [8] K. Pipatpanyanukul, *Quality Control*, Top Textbook, 2014.
- [9] S. Nataphan, *Quality Control*, SE-ED Textbook, 2008.
- [10] C. Chakrad, S. Nattakorn and D. Phattharaphong, "Waste reduction in welding process of automotive suspension," *RMUTL Journal*, vol. 7, no. 1, pp. 28-141, Jun. 2014.
- [11] H. Lachajczyk and M. Dudek-Burlikowska, "Quality continuous improvement of company with usage the Poka-Yoke methods," *PSKN* 7, pp. 57-64, 2006.
- [12] M. Dudek-Burlikowska and D. Szewieczek, "The Poka-Yoke method as an improving quality tool of operations in the process," *Journal of Achievement in Materials and Manufacturing Engineering*, vol. 36, pp. 95-102, Sep. 2009.
- [13] N. K. Shimbun, *Improving Product Quality by Preventing Defects*, Productivity Press, Cambridge, Massachusetts, 1998.
- [14] S. Patel, B. G. Dale and P. Shaw, "Set-up time reduction and mistake proofing methods: an examination in precision component manufacturing," *The TQM Magazine*, vol. 13, no. 3, pp. 175-179, 2001.
- [15] M. Kittiyakajon, "Application of Analytic Hierarchy Process to Select Quality Improvement for Defect Reduction Projects: A Case Study of Air Tank Manufacturer," *Journal of Engineering RMUTT*, vol. 2, pp. 71-83, Aug. 2018.
- [16] P. Akarathompongse, *Waste Reduction with ECRS principles*. Institute for small and Medium Enterprises Development, 2005.
- [17] T. L. Satty, *The Analytic Hierarchy Process*, New York: McGraw-Hill, 1980.
- [18] Lee Ing Yi, Sha'ri Mohd Yusof, "Product quality improvement through poka-yoke technique" *Journal Mekanikal*, no. 23, pp. 74-82, Jun. 2007.
- [19] P.Nanjundaraj, V.Kannan, P.Sangeetha and S.Umamaheswari, "A Study on implementation of POKA-YOKE technique in improving the operational performance by reducing the rejection rate in the assembly Line" *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, vol. 119, no. 17, pp. 2177-2191, 2018.
- [20] K. Ploypanichcharoen, *Principle of quality control*, Technology Promotion Association (Thailand-japan), 2007.
- [21] C. Surasak and K. Rapee, "Product quality improvement in plastic injection process by statistical quality control," in *Proceeding of 15th RSU National Graduate Research Conference*, Rangsit Univesity, 2020, pp. 2369-2381.
- [22] W. Jirawat et al., "Waste reduction in a manufacturing process: A Case Study of dadear Ceramics Factory in lampang provice," *RMUTP Research Journal*, vol. 10, no. 2, pp. 43-53, Sep. 2016.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

การวิเคราะห์ปริมาณสารสำคัญและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดใบ กะเปียดเครือ

หวันฐิตา ปะดุกา¹ ปัญจพร สันทัดเลขา^{1, 2} ทวีภรณ์ ศิริคช^{1, 2} และ นางลักษณ กุลวรรธต์^{1, 2*}

¹ คณะการแพทย์แผนไทย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

² ศูนย์วิจัยและนวัตกรรมเวชศาสตร์แผนไทย คณะการแพทย์แผนไทย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

^{1, 2} 15 ถนนกาญจนาภิเษย์ ตำบลคอหงส์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110

รับบทความ 15 ธันวาคม 2563 แก้ไขบทความ 1 พฤษภาคม 2564 ตอรับบทความ 4 มิถุนายน 2564

บทคัดย่อ

กะเปียดเครือ (*Premna trichostoma* Miq.) จัดอยู่ในวงศ์ Lamiaceae มีการกระจายพันธุ์ในแถบเอเชีย รวมถึงประเทศไทย หมอพื้นบ้านใช้ใบ คั้นน้ำดื่ม ชโลม และอาบ รักษาอาการไข้ ตัวร้อน การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณสารสำคัญ และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดน้ำจากใบกะเปียดเครือ โดยวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวมด้วยวิธี Folin-Ciocalteu Method วิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์รวมด้วยวิธี Aluminium Chloride Method วิเคราะห์หาปริมาณสาร Apigenin และ Kaempferol ด้วยเทคนิคโครมาโตกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง และทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH และ ABTS ผลการศึกษาพบว่า สารสกัดใบกะเปียดเครือมีปริมาณฟีนอลิกรวม ปริมาณฟลาโวนอยด์รวม ปริมาณสาร Apigenin และ Kaempferol เท่ากับ 46.45 ± 15.30 มิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อน้ำหนักสารสกัด 1 กรัม 25.48 ± 2.02 มิลลิกรัมสมมูลของเคทาซินต่อน้ำหนักสารสกัด 1 กรัม 11.16 ± 0.04 ไมโครกรัมต่อน้ำหนักสารสกัด 1 กรัม และ 4.54 ± 0.08 ไมโครกรัมต่อน้ำหนักสารสกัด 1 กรัม ตามลำดับ ค่า IC_{50} จากการทดสอบด้วยวิธี DPPH และ ABTS เท่ากับ 117.50 ± 1.22 และ 36.14 ± 1.53 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ การศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าสารสกัดใบกะเปียดเครือมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ โดยมีสารออกฤทธิ์ในกลุ่มฟีนอลิก และฟลาโวนอยด์ ซึ่งแสดงให้เห็นศักยภาพของสารสกัดใบกะเปียดเครือในการนำไปพัฒนาเป็นยาต่อไป

คำสำคัญ : ใบกะเปียดเครือ; ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวม; ปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์รวม;
ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Determination of Active Constituents and Antioxidant Activity of *Premna trichostoma* Miq. Leaf Extract

Wanhuda Paduka¹ Punjaporn Sunthudlakhar^{1,2} Thaweepon Keereekoch^{1,2} and Nongluk Kunworarath^{1,2*}

¹ Faculty of Traditional Thai Medicine, Prince of Songkla University, Hat Yai Campus

² Traditional Thai Medical Research and Innovation Center, Faculty of Traditional Thai Medicine, Prince of Songkla University

^{1,2} 15 Kanchanawanit Road, Kho Hong sub-district, Hat Yai district, Songkhla 90110

Received 15 December 2020; Revised 1 May 2021; Accepted 4 June 2021

Abstract

Premna trichostoma Miq. (Lamiaceae) mainly distribute in Asia including Thailand. Folk healers use this plant to treat fever as a juice, splash, and bathe. The aims of this study are to evaluate the quantity of active constituents and antioxidant activity of *P. trichostoma* leaf extract. Total phenolic compounds were determined using Folin-Ciocalteu method. Total flavonoid contents were determined by Aluminum chloride method. The amount of apigenin and kaempferol contents were analyzed by high performance liquid chromatography (HPLC). In addition, the antioxidant activity was evaluated by DPPH and ABTS assay. The results showed that total phenolic contents, total flavonoid contents, and the amount of apigenin and kaempferol of *P. trichostoma* leaf extract was 46.45 ± 15.30 mg GAE/g extract, 25.48 ± 2.02 mg CE/g extract, 11.16 ± 0.04 and 4.54 ± 0.08 $\mu\text{g/g}$ extract, respectively. The IC_{50} values from the DPPH and ABTS assay was 117.50 ± 1.22 and 36.14 ± 1.53 $\mu\text{g/ml}$, respectively. This study shows the antioxidant properties and active constituents of *P. trichostoma* leaf extract which indicates the potentials for further development of this plant.

Keywords : *Premna trichostoma*; Total Phenolic Content; Total Flavonoid Content; Antioxidant Activity

* Corresponding Author. Tel.: +66 7428 2722, E-mail Address: nonglukkunworarath@gmail.com

1. บทนำ

พืชสมุนไพรเป็นแหล่งของสารพฤกษเคมี (Phytochemicals) ที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพ ตัวอย่างของสารพฤกษเคมีที่สำคัญ ได้แก่ แอลคาลอยด์ (Alkaloids) มีฤทธิ์ด้านการอักเสบ และใช้เป็นยาระงับปวด [1] สารประกอบฟีนอลิก (Phenolic Compound) มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ [3] ด้านการอักเสบ ระงับปวด [2] และลดไข้ [4] สารประกอบฟลาโวนอยด์ (Flavonoid Compound) มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ด้านการอักเสบ ระงับปวด [5] และลดไข้ [6] ดังนั้นการศึกษารองคูปะกอบทางพฤกษเคมี และฤทธิ์ทางชีวภาพของสารสกัดจากพืชสมุนไพรจึงมีความสำคัญต่อการนำสมุนไพรไปใช้รักษาโรค โดยเฉพาะอย่างยิ่งฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าอนุมูลอิสระ คืออะตอมหรือโมเลกุลของสารที่มีอิเล็กตรอนโดดเดี่ยว 1 อิเล็กตรอนขาดคู่ทำให้อะตอมหรือโมเลกุลนั้นดึงเอาอิเล็กตรอนจากอะตอมหรือโมเลกุลอื่นมาเข้าคู่เพื่อให้อะตอมหรือโมเลกุลนั้นเสถียรมากขึ้น ส่งผลให้อะตอมหรือโมเลกุลที่ถูกดึงอิเล็กตรอนไป กลายเป็นอนุมูลอิสระ เกิดเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเชิงเคมีหรือเชิงกายภาพของเซลล์ ทำให้เซลล์เสียหาย สูญเสียหน้าที่ และส่งผลให้เป็นโรคที่เกิดจากความเสื่อมสภาพของร่างกาย (Degenerative Disease) ดังนั้นอนุมูลอิสระที่มีมากเกินไปจะทำให้เพิ่มความเสี่ยงต่อการเกิดโรคหลายชนิด เช่น โรคมะเร็ง โรคหลอดเลือดตีบ อีกทั้งยังมีผลทำให้เกิดไข้ [7], [8] และการอักเสบในส่วนต่าง ๆ ของร่างกาย [9]

กะเปียดเครือ (*Premna trichostoma* Miq.) จัดอยู่ในวงศ์ Lamiaceae มีการกระจายพันธุ์ในแถบเอเชียรวมถึงในประเทศไทย ซึ่งพบได้ในป่าดิบชื้นบริเวณโขดหิน และพื้นที่ชื้นโดยเฉพาะบริเวณน้ำตก [10] หมอพื้นบ้านในอำเภอควนโดน และอำเภอควนกาหลง จังหวัดสตูล เรียกพืชชนิดนี้ว่า “กาลูหมุด” ซึ่งมีรสยา คือ รสจืดเย็น จึงมีการนำใบกะเปียดเครือสดคั้นน้ำดื่ม

ขโลม และอาบ เพื่อรักษาอาการไข้ ตัวร้อน อีกทั้งยังพบรายงานการใช้สมุนไพรในสกุล *Premna* ในคนท้องถิ่นแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้และแอฟริกาตะวันออกเพื่อรักษาไข้หวัด อาการปวดหัว ปวดท้อง แก้อาการรักษาโรคมะเร็ง จากรายงานการวิจัยพบว่าพืชในสกุล *Premna* 20 ชนิด มีสารพฤกษเคมีที่หลากหลาย ได้แก่ Glyceroglycolipids, Flavonoid, Ceramides, Iridoid Glycosides, Megastigmane, Diterpenoids, Sesquiterpene, Phenylthanoid และ Lignans ซึ่งสารประกอบดังกล่าวมีฤทธิ์ต้านจุลชีพ ต้านอนุมูลอิสระ ด้านการอักเสบ และมีฤทธิ์เสริมสร้างภูมิคุ้มกัน [11] นอกจากนี้ยังมีรายงานพบว่า *Premna foetida* Reinw. ex Blume ซึ่งเป็นพืชสกุลเดียวกับกะเปียดเครือ มีสาร Quercetin, Apigenin และ Kaempferol ซึ่งสารดังกล่าวมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ [12] แต่ยังไม่พบการศึกษาสารพฤกษเคมีและฤทธิ์ทางชีวภาพของกะเปียดเครือ ดังนั้นการศึกษารังนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณสารสำคัญและทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดน้ำจากใบกะเปียดเครือ เพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการศึกษาฤทธิ์ทางชีวภาพอื่น ๆ และเพื่อเป็นข้อมูลสนับสนุนการใช้สมุนไพรชนิดนี้ของหมอพื้นบ้าน

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 ตัวอย่างพืชและวิธีเตรียมสารสกัด

สมุนไพรที่ใช้ในการศึกษา คือ ใบกะเปียดเครือที่เก็บจากตำบลทุ่งนุ้ย อำเภอควนกาหลง จังหวัดสตูล ทำการตรวจสอบเอกลักษณ์พืชโดย รศ.ดร.จรัส สิริตวงศ์ (Voucher Specimen W. Paduka 1) และเก็บตัวอย่างพรรณไม้แห้งไว้ที่พิพิธภัณฑ์พืช ภาควิชาชีววิทยา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ นำใบกะเปียดเครือสดมาล้างทำความสะอาด ผึ่งให้แห้ง หั่นเป็นชิ้นเล็ก ๆ ต้มให้ละเอียด ผสมน้ำกลั่นในอัตราส่วน 2:1 (w/v) คั้นเอาแต่น้ำ กรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 1 ด้วยเครื่อง Buchner Suction Filter นำสารละลายที่ได้มาทำให้

แห้งโดยใช้เครื่อง Freeze Dry คำนวณหาร้อยละของสารสกัดหยาบ (% Yield Crude Extract) ตามสูตรคำนวณ และเก็บสารสกัดไว้ที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส ก่อนทำการทดสอบต่อไป

$$\% \text{ Yield} = \frac{\text{น้ำหนักของสารสกัดหยาบ}}{\text{น้ำหนักของสมุนไพรสดที่ใช้}} \times 100$$

2.2 การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก (Total Phenolic Content)

วิเคราะห์หาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวมด้วยวิธี Folin-Ciocalteu Method ซึ่งดัดแปลงจาก Hsieh และคณะ [13] โดยใช้กรดแกลลิกเป็นสารมาตรฐาน ทำการทดสอบโดยผสมสารละลายมาตรฐานกรดแกลลิก (ความเข้มข้น 0.05-0.8 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) หรือสารสกัดใบกะปิเยดเคือ (ความเข้มข้น 0.0312-10 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร กับสารละลาย Folin-Ciocalteu Reagent ปริมาตร 0.25 มิลลิลิตร และน้ำกลั่น ปริมาตร 3.9 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน บ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 นาที จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 20 ปริมาตร 0.75 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน บ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 760 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง Spectrophotometer Plate Reader ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง และหาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวมของสารตัวอย่างจากกราฟมาตรฐานกรดแกลลิก ในหน่วยมิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อน้ำหนักสารสกัด 1 กรัม (mg GAE/g Extract)

2.3 การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์ (Total Flavonoid Content)

วิเคราะห์หาปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์รวมด้วยวิธี Aluminium Chloride Method [14] โดยใช้เคาซินเป็นสารมาตรฐาน

ทำการทดสอบโดยนำสารละลายมาตรฐานเคาซิน (ความเข้มข้น 0.05-0.8 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) หรือสารสกัดใบกะปิเยดเคือ (ความเข้มข้น 1.25-40 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) ปริมาตร 200 ไมโครลิตร ผสมกับสารละลายโซเดียมไนไตร (NaNO_2) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 ปริมาตร 75 ไมโครลิตร บ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 นาที และเติมสารละลายอะลูมิเนียมคลอไรด์ (AlCl_3) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 ปริมาตร 150 ไมโครลิตร ผสมให้เข้ากัน บ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 6 นาที หลังจากนั้นเติม 1 โมลาร์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ปริมาตร 5 ไมโครลิตร ผสมให้เข้ากัน วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง Spectrophotometer Plate Reader ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง และหาปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์รวมของสารตัวอย่างจากกราฟมาตรฐานเคาซิน ในหน่วยมิลลิกรัมสมมูลของเคาซินต่อน้ำหนักสารสกัด 1 กรัม (mg CE/g Extract)

2.4 การวิเคราะห์ปริมาณสาร Quercetin, Apigenin และ Kaempferol

การวิเคราะห์ปริมาณ Quercetin, Apigenin และ Kaempferol จากสารสกัดใบกะปิเยดเคือโดยวิธี High Performance Liquid Chromatography (HPLC) ซึ่งดัดแปลงจาก Dianita และ Jantan [12] โดยใช้คอลัมน์ Hypersil ODS C18 (250 × 4.0 มิลลิเมตร 5 ไมโครเมตร) วัฏภาคเคลื่อนที่ประกอบด้วย วัฏภาคเคลื่อนที่ A คือ 0.1% Phosphoric Acid และ B คือ Acetonitrile ใช้การวิเคราะห์แบบ Gradient Elution โดยมีอัตราส่วนของวัฏภาคเคลื่อนที่ A:B ที่เวลาต่าง ๆ ดังนี้ นาทีที่ 0 อัตราส่วน 85:15 นาทีที่ 20 อัตราส่วน 15:85 นาทีที่ 22-25 อัตราส่วน 0:100 และนาทีที่ 28-30 อัตราส่วน 85:15 อัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิคอลัมน์ 25 องศาเซลเซียส ปริมาตรฉีด 20 ไมโครลิตร และตรวจวัดที่ความยาวคลื่น 360 นาโนเมตร

วิเคราะห์ปริมาณ Quercetin, Apigenin และ Kaempferol โดยเตรียมสารละลายมาตรฐาน Quercetin (Sigma Aldrich, Singapore), Apigenin (Sigma Aldrich, Singapore) และ Kaempferol (Sigma Aldrich, Singapore) ในเมทานอล ที่ความเข้มข้น 0.1, 0.5, 1, 2 และ 5 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร และเตรียมตัวอย่างโดยชั่งสารสกัดใบกะเพียดเครื่อง 0.5 กรัม ละลายในเมทานอล 3 มิลลิลิตร ผสมสารละลายโดยใช้เครื่องเขย่าสารแบบสั่น (Vortex) 1 นาที เขย่าอีก 6 ชั่วโมง หลังจากนั้น Ultrasonication 30 นาที และหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) เพื่อนำส่วนใสกรองผ่านเมมเบรน ขนาด 0.22 ไมโครเมตร และฉีดเข้าเครื่อง HPLC แต่ละตัวอย่างทำการวิเคราะห์ซ้ำ 3 ครั้ง จากนั้นสร้างกราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของสารมาตรฐานกับพื้นที่ใต้กราฟ (Peak Area) ของสารมาตรฐาน และคำนวณหาปริมาณสาร Quercetin, Apigenin และ Kaempferol ในสารสกัดใบกะเพียดเครื่องจากกราฟมาตรฐาน

2.5 การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ

2.5.1 การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH (2,2-diphenyl-1 picrylhydrazyl) Assay

ทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH [13] โดยเตรียมสารละลาย DPPH ความเข้มข้น 80 ไมโครโมลาร์ ในเมทานอล นำสารละลาย DPPH ปริมาตร 200 ไมโครลิตร และสารละลายใบกะเพียดเครื่องปริมาตร 20 ไมโครลิตร มาผสมให้เข้ากัน บ่มในที่มืด ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 520 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง Spectrophotometer Plate Reader ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้มาคำนวณค่าร้อยละความสามารถในการทำลายอนุมูลอิสระ (% Radical Scavenging) จากนั้นหาค่าความเข้มข้นของสารสกัดสมุนไพรที่ทำให้ความเข้มข้น

DPPH ลดลงร้อยละ 50 (IC_{50}) โดยคำนวณจากสมการเส้นตรงของความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ต้านอนุมูลอิสระ และความเข้มข้นของสารสกัดสมุนไพร ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ซึ่งสารสกัดที่ให้ค่า IC_{50} ต่ำ แสดงว่ามีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระดี เนื่องจากสามารถยับยั้งอนุมูลอิสระ DPPH ได้ดี โดยการทดลองนี้ใช้ Trolox (ความเข้มข้น 10-0.3125 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร) เป็นสารมาตรฐาน และใช้เมทานอลเป็น Blank

$$\% \text{ Radical Scavenging} = \frac{OD_{\text{control}} - OD_{\text{sample}}}{OD_{\text{control}}} \times 100$$

โดยที่

OD_{control} คือ ค่าดูดกลืนแสงของ Blank

OD_{sample} คือ ค่าดูดกลืนแสงของสารสกัด

2.5.2 การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี ABTS (2-2'- azinobis (3-ethyl-benzothiazoline-6-sulfonic acid)) Assay

ทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี ABTS Assay [16] โดยสารละลาย $ABTS^{+}$ ได้จากการนำ ABTS ละลายด้วยน้ำ ให้ได้ความเข้มข้น 7 มิลลิโมลาร์ แล้วนำสารละลาย $ABTS^{+}$ มาผสมกับสารละลาย 2.45 มิลลิโมลาร์ $K_2S_2O_8$ ในอัตราส่วน 1:0.5 บ่มในที่มืด ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 12-16 ชั่วโมง จากนั้นนำสารละลาย $ABTS^{+}$ มาเจือจางด้วยเอทานอล และนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 734 นาโนเมตร ให้ได้ค่าการดูดกลืนแสง เท่ากับ 0.70 ± 0.02

ในการทดสอบให้นำสารละลาย $ABTS^{+}$ ที่เตรียมไว้ปริมาตร 200 ไมโครลิตร และสารสกัดกะเพียดเครื่องปริมาตร 20 ไมโครลิตร ผสมให้เข้ากัน บ่มสารละลายในที่มืดที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 6 นาที จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 734 นาโนเมตร รายงานผลเป็นค่าความเข้มข้นที่สามารถยับยั้งอนุมูลอิสระได้ร้อยละ 50 (IC_{50}) โดยการทดลองนี้ใช้

Trolox (ความเข้มข้น 20-0.3125 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร) เป็นสารมาตรฐาน และเอทานอลเป็น Blank

$$\% \text{Radical Scavenging} = \frac{\text{OD}_{\text{control}} - \text{OD}_{\text{sample}}}{\text{OD}_{\text{control}}} \times 100$$

โดยที่

$\text{OD}_{\text{control}}$ คือ ค่าดูดกลืนแสงของ Blank

$\text{OD}_{\text{sample}}$ คือ ค่าดูดกลืนแสงของสารสกัด

วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้สถิติพื้นฐาน ได้แก่ การหาค่าเฉลี่ย (Mean) และการหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ด้วยโปรแกรมไมโครซอฟต์เอ็กเซล (Microsoft Excel)

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 การเตรียมสารสกัด

การเตรียมสารสกัดใบกะเพราโดยใช้ใบสดสกัดด้วยน้ำ เป็นการอ้างอิงตามการใช้ของหมอพื้นบ้านที่นำใบสดคั้นน้ำดื่ม ชโลมและอาบ รักษาอาการไข้ตัวร้อน โดยสารสกัดใบกะเพราที่สกัดด้วยวิธีคั้นน้ำมีลักษณะเป็นผงสีน้ำตาลเข้ม ได้น้ำหนักสารสกัดเท่ากับ 29.54 กรัม คิดเป็นร้อยละของสารสกัดหยาบเท่ากับร้อยละ 1.52

3.2 ปริมาณโดยรวมของสารประกอบฟีนอลิกและสารประกอบฟลาโวนอยด์

ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวมของสารสกัดใบกะเพราเมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธี Folin-Ciocalteu โดยใช้กรดแกลลิกเป็นสารมาตรฐาน พบว่า สารสกัดใบกะเพรา มีปริมาณฟีนอลิกรวมเท่ากับ 46.45 ± 15.30 มิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อน้ำหนักสารสกัด 1 กรัม และจากการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์รวมด้วยวิธี Aluminium Chloride โดยใช้เคทาซินเป็นสารมาตรฐาน พบว่า สารสกัดใบกะเพรา มีปริมาณฟลาโวนอยด์รวม

เท่ากับ 25.48 ± 2.02 มิลลิกรัมสมมูลของเคทาซินต่อน้ำหนักสารสกัด 1 กรัม (ตารางที่ 1)

จากการศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าสารสกัดใบกะเพรา มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิก และสารประกอบฟลาโวนอยด์ จากรายงานวิจัยก่อนหน้านี้พบว่าสารในกลุ่มฟีนอลิกเป็นสารกลุ่มใหญ่ที่พบมากในพืช และมีความสัมพันธ์กับความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ [17] เมื่อสารประกอบฟีนอลิกให้อะตอมไฮโดรเจนแก่อนุมูลอิสระไปแล้ว อนุมูลอิสระของสารประกอบฟีนอลิกค่อนข้างเสถียร ดังนั้นจึงไม่ทำปฏิกิริยาอื่นต่อไป ยิ่งไปกว่านั้นอนุมูลอิสระของสารประกอบฟีนอลิกบางชนิดยังสามารถรวมตัวกับอนุมูลอิสระอื่นได้ด้วย จึงทำให้สารประกอบฟีนอลิกมีคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระโดยการลดจำนวนอนุมูลอิสระลง [18], [19] และสารฟลาโวนอยด์จัดเป็นสารประกอบในกลุ่มฟีนอลิกที่มีบทบาทสำคัญในการต้านอนุมูลอิสระหรือต้านออกซิเดชัน โดยประสิทธิภาพของการต้านออกซิเดชันขึ้นอยู่กับโครงสร้าง และหมู่ที่เข้ามาแทนที่ [18] นอกจากนี้ยังพบว่าสารประกอบฟีนอลิก และฟลาโวนอยด์มีฤทธิ์ทางชีวภาพอื่น ๆ อีก เช่น ฤทธิ์ต้านการอักเสบ ฤทธิ์ระงับปวด [5], [19] และฤทธิ์ลดไขมัน [4], [6]

ตารางที่ 1 ปริมาณสารสำคัญที่พบในสารสกัดใบกะเพรา (n=3)

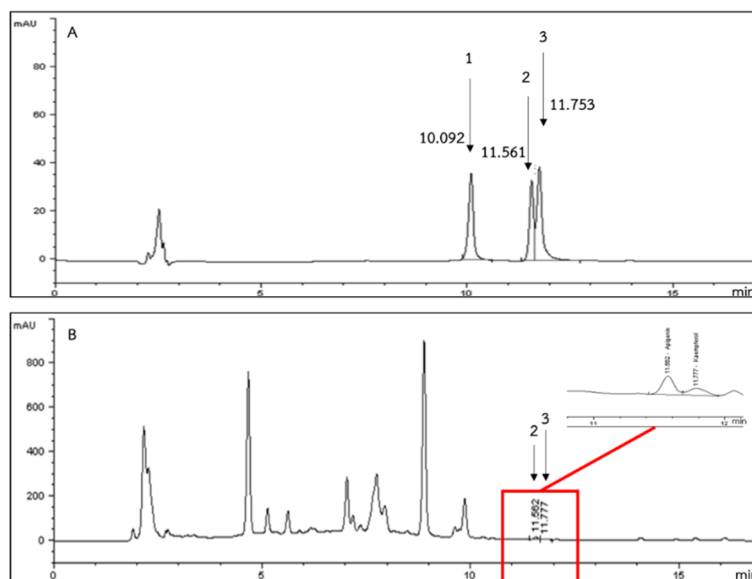
สารสำคัญ	ปริมาณสารสำคัญ
Total Phenolic Content	46.45 ± 15.30 mg GAE/g Extract
Total Flavonoid Content	25.48 ± 2.02 mg CE/g Extract
Quercetin	ND
Apigenin	11.16 ± 0.04 µg/g Extract
Kaempferol	4.54 ± 0.08 µg/g Extract

**ND ตรวจไม่พบ

3.3 ปริมาณสาร Quercetin, Apigenin และ Kaempferol

การวิเคราะห์ปริมาณ Quercetin, Apigenin และ Kaempferol โดยวิธี HPLC จากโครมาโตแกรมของสารมาตรฐาน พบ Peak ของ Quercetin, Apigenin และ Kaempferol ที่ Retention Time 10.0, 11.5 และ 11.7 นาที ตามลำดับ (รูปที่ 1A) และโครมาโตแกรมของสารสกัดใบกะเพียดเครื่อง พบ Peak ที่มี Retention Time ตำแหน่งเดียวกับ Peak ของ Apigenin และ Kaempferol แยกออกจากกราฟรบกวนอื่น ๆ อย่างชัดเจน แต่ไม่พบ Peak ของ Quercetin (รูปที่ 1B) และเพื่อยืนยันว่าเป็น Peak ของสารมาตรฐาน จึงทำการใส่สารมาตรฐานทั้ง 3 ในสาร

สกัดใบกะเพียดเครื่องและวิเคราะห์ปริมาณสารทั้ง 3 ซ้ำอีกครั้ง พบ Peak ที่ตำแหน่งเดิม และมีพื้นที่ใต้กราฟเพิ่มขึ้น แสดงว่า Peak ที่พบในโครมาโตแกรมของสารสกัดสมุนไพร Retention Time ที่ 11.5 นาที คือ Peak ของ Apigenin และที่ 11.7 นาที คือ Peak ของ Kaempferol ผลการวิเคราะห์ปริมาณ Quercetin, Apigenin และ Kaempferol ของสารสกัดใบกะเพียดเครื่อง พบว่า มีปริมาณสาร Apigenin เท่ากับ 11.16 ± 0.04 ไมโครกรัมต่อน้ำหนักสารสกัด 1 กรัม และมีปริมาณสาร Kaempferol เท่ากับ 4.54 ± 0.08 ไมโครกรัมต่อน้ำหนักสารสกัด 1 กรัม แต่ไม่พบปริมาณของสาร Quercetin (ตารางที่ 1)



รูปที่ 1 (A) แสดง HPLC โครมาโตแกรมของสารละลายมาตรฐาน และ (B) โครมาโตแกรมของสารสกัดใบกะเพียดเครื่อง (1) Quercetin, (2) Apigenin และ (3) Kaempferol ที่ความยาวคลื่น 360 นาโนเมตร

การศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าสารสกัดใบกะเพียดเครื่องมีปริมาณสาร Apigenin และ Kaempferol ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้านี้ที่ทำการแยกสารประกอบฟลาโวนอยด์ใน *P. foetida* ซึ่งเป็นพืชสกุลเดียวกันกับกะเพียดเครื่อง ด้วยวิธี RP-HPLC

Analysis พบว่า มีสาร Quercetin, Apigenin และ Kaempferol เป็นองค์ประกอบ ซึ่งสารดังกล่าวสามารถต้านอนุมูลอิสระได้ [12] สาร Apigenin เป็นสารประกอบในกลุ่มฟลาโวนอยด์ที่พบในพืชทั่วไป มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ [20] ต้านการอักเสบ [21] และ

ระจับปวต [22] โดย Apigenin ทำให้ปริมาณ $\text{TNF-}\alpha$ และ $\text{IL-1}\beta$ ลดลง สาร Kaempferol เป็นสารประกอบฟลาโวนอยด์ในธรรมชาติ พบในผลไม้ ผักและสมุนไพร [23] สาร Kaempferol มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ โดยการให้ไฮโดรเจนและเปลี่ยนเป็น Phenoxyl Radical ซึ่ง Phenoxyl Radical สามารถทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระอื่นได้อีก [24] นอกจากนี้สาร Kaempferol ยังมีฤทธิ์ต้านการอักเสบ [23] ต้านจุลชีพ [25] และสามารถลดปวดได้ [26] จากฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดใบกะเพียดเครือ (ตารางที่ 2) พบว่ามีความสอดคล้องกับฤทธิ์ของ Apigenin และ Kaempferol สารประกอบดังกล่าวจึงอาจเป็นสารสำคัญออกฤทธิ์ของสารสกัดใบกะเพียดเครือ การทำปริมาณวิเคราะห์ด้วย HPLC ของ Apigenin และ Kaempferol และการหาวิธีวิเคราะห์ที่เหมาะสมโดยวิธี System Suitability และ Method Validation จึงมีความสำคัญต่อการศึกษาต่อไปในอนาคต

จากลักษณะ HPLC chromatogram ของสารสกัดใบกะเพียดเครือ (รูปที่ 1B) แสดงให้เห็นว่าสารสกัดใบกะเพียดเครือยังประกอบด้วยพหุองค์ประกอบหลายชนิด ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักในใบกะเพียดเครือ เมื่อพิจารณาจากปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวมและปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์รวม ซึ่งพบปริมาณสูงในใบกะเพียดเครือ สารประกอบหลัก ดังแสดงผลที่ Retention Time ในช่วง 5-10 นาที อาจเป็นสารกลุ่มฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ ใบกะเพียดเครือจึงมีความน่าสนใจในการศึกษาถึงสารสำคัญออกฤทธิ์ และการหากลไกการออกฤทธิ์ด้านต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องต่อไป

3.4 ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ

3.4.1 ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH

การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH รายงานค่าเป็น IC_{50} ที่แสดงถึงความเข้มข้นของสารสกัดที่ทำให้ความเข้มข้นของอนุมูลอิสระ DPPH ลดลงร้อยละ 50 จากการทดสอบพบว่า สารสกัดใบกะเพียด

เครือมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระโดยมีค่า IC_{50} เท่ากับ 117.50 ± 1.22 ไมโครกรัมต่อมิลลิตร (ตารางที่ 2) โดยวิธี DPPH เป็นการทดสอบทางเคมีด้วยสารที่มีสมบัติเป็นอนุมูลอิสระซึ่งในการทดลองจะใช้ออนุมูลอิสระ DPPH ซึ่งเป็นสารอนุมูลอิสระสังเคราะห์ที่คงตัวและมีสีม่วงสามารถดูดกลืนแสงได้ที่ความยาวคลื่น 520 นาโนเมตร เมื่อ DPPH ทำปฏิกิริยากับสารต้านอนุมูลอิสระจะทำให้สีม่วงค่อย ๆ จางลง จึงสามารถนำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้จากการทดลองมาคำนวณหาค่าความเป็นสารต้านอนุมูลอิสระของสารตัวอย่างได้ [27]

3.4.2 ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี ABTS

การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี ABTS รายงานค่าเป็น IC_{50} ที่แสดงถึงความเข้มข้นของสารสกัดที่ทำให้ความเข้มข้นของอนุมูลอิสระ ABTS ลดลงร้อยละ 50 จากการทดสอบพบว่า สารสกัดใบกะเพียดเครือมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ โดยมีความ IC_{50} เท่ากับ 36.14 ± 1.53 ไมโครกรัมต่อมิลลิตร (ตารางที่ 2) โดยวิธี ABTS เป็นวิธีการวัดความสามารถในการฟอกสีอนุมูลอิสระ $\text{ABTS}^{+\cdot}$ ซึ่งเป็นสารสังเคราะห์ที่มีสีเขียวน้ำเงิน มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 734 นาโนเมตร เมื่อ $\text{ABTS}^{+\cdot}$ ทำปฏิกิริยากับสารตัวอย่างจะทำให้สีจางลงจึงสามารถหาความเป็นสารต้านอนุมูลอิสระของสารตัวอย่างได้จากการคำนวณค่าการดูดกลืนแสงของการยับยั้งอนุมูลอิสระ $\text{ABTS}^{+\cdot}$ [27]

ตารางที่ 2 แสดงฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดใบกะเพียดเครือ ($n=3$)

ตัวอย่าง	IC_{50} ($\mu\text{g/ml}$)	
	DPPH assay	ABTS assay
สารสกัดใบกะเพียดเครือ	117.50 ± 1.22	36.14 ± 1.53
Trolox	4.07 ± 0.06	4.12 ± 0.50

จะเห็นได้ว่าวิธี DPPH และ ABTS เป็นการทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ที่มีความจำเพาะแตกต่างกัน

จึงมักใช้ทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในตัวอย่างร่วมกัน ทั้งนี้เพื่อให้ผลการทดสอบมีความไว้วางใจ ถูกต้องเที่ยงตรง และแม่นยำ [27] โดยวิธี ABTS สามารถทำปฏิกิริยากับสารต้านอนุมูลอิสระได้ทั้งกลุ่มที่ละลายได้ดีในไขมัน (Lipophilic) และละลายได้ดีในน้ำ (Hydrophilic) ในขณะที่วิธี DPPH ซึ่งมีความจำเพาะต่อสารต้านอนุมูลอิสระในกลุ่มที่ละลายได้ดีในสารละลายขั้วปานกลาง เช่น สารละลายกลุ่มแอลกอฮอล์ เป็นต้น [28], [29] จากผลการทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระพบว่า เมื่อทำการทดสอบด้วยวิธี ABTS สารสกัดใบกะปิเยดเคี้ยวแสดงฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระได้ดีกว่าการทดสอบด้วยวิธี DPPH จึงอาจสรุปได้ว่า สารต้านอนุมูลอิสระจากสารสกัดใบกะปิเยดเคี้ยวเป็นสารกลุ่มที่ละลายได้ดีในน้ำ ซึ่งผลการทดสอบนี้สอดคล้องกับลักษณะ HPLC Chromatogram (Retention Time ที่ 5 ถึง 10 นาที) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสารสำคัญจากสารสกัดใบกะปิเยดเคี้ยวส่วนใหญ่เป็นสารกลุ่มที่ละลายได้ดีในน้ำ อีกทั้งยังมีความสอดคล้องกับลักษณะการใช้งานของหมอยาน้ำดื่ม ที่มีการนำใบกะปิเยดเคี้ยวมาคั้นด้วยน้ำเพื่อใช้ในการรักษาโรคต่าง ๆ [11]

จากการศึกษาก่อนหน้านี้ พบว่าอนุมูลอิสระที่เพิ่มขึ้นในสมองส่วนไฮโปทาลามัสมีผลทำให้เกิดไข้ [8], [30] การศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าสารสกัดใบกะปิเยดเคี้ยวมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ โดยมีสารออกฤทธิ์ในกลุ่มฟีนอลิก และฟลาโวนอยด์ ดังนั้นกะปิเยดเคี้ยวอาจจะมีฤทธิ์ลดไข้โดยผ่านกลไกการต้านอนุมูลอิสระ ทั้งนี้ควรมีการศึกษาฤทธิ์ลดไข้ของสารสกัดใบกะปิเยดเคี้ยวเพื่อยืนยันสรรพคุณตามการใช้งานของหมอยาน้ำดื่มต่อไปในอนาคต

4. สรุป

จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าสารสกัดใบกะปิเยดเคี้ยวมีสารฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ Apigenin

และ Kaempferol และมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ดังนั้นฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดใบกะปิเยดเคี้ยวอาจจะเป็นผลมาจากสารดังกล่าว ทั้งนี้ควรมีการทดสอบฤทธิ์ทางเภสัชวิทยา และสารสำคัญออกฤทธิ์ของสารสกัดใบกะปิเยดเคี้ยวเพิ่มเติม

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ ได้รับทุนสนับสนุนงบประมาณจากทุนวิจัยองค์ความรู้ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ (รหัสโครงการ TTM6302062S) และขอขอบคุณนายหย่า มาลินี นายอดิพันธ์ ปะตุกา และนางฮาดี เป้งทอง หมอยาน้ำดื่มในอำเภอกวนโดน ที่ให้ข้อมูลภูมิปัญญาพื้นบ้านเกี่ยวกับการใช้พืชชนิดนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Noppamas. *Diagnostic Pharmacy Medicines and natural products*, 3rd ed. Bangkok: Sengtian printing, 2011.
- [2] W. E. M. Lands and A. M. Hanel, "Phenolic anticyclooxygenase agents in antiinflammatory and analgesic therapy," *Prostaglandins*, vol. 24, no. 2, pp. 271-277, 1982.
- [3] F. P. R. de Moraes, T. B. Pessato, E. Rodrigues, L. Peixoto Mallmann, L. R. B. Mariutti and F. M. Netto, "Whey protein and phenolic compound complexation: Effects on antioxidant capacity before and after *in vitro* digestion," *Food Research International*, vol. 133, p. 109104, 2020.
- [4] F. Pope, "Phenol in enteric fever.1," *The Lancet*, vol. 133, no. 3424, pp. 728-729, 1889.
- [5] S. S. El-Hawary, M. F. Yousif, A. A. Abdel Motaal and L. M. Abd-Hameed, "Bioactivities, phenolic compounds and *in-vitro* propagation of

- Lippia citriodora* Kunth cultivated in Egypt,” *Bulletin of Faculty of Pharmacy, Cairo University*, vol. 50, no. 1, pp. 1-6, 2012.
- [6] H.-J. Zhi, H.-Y. Zhu, Y.-Y. Zhang, Y. Lu, H. Li and D.-F. Chen, “In vivo effect of quantified flavonoids-enriched extract of *Scutellaria baicalensis* root on acute lung injury induced by influenza A virus,” *Phytomedicine*, vol. 57, pp. 105-116, 2019.
- [7] S. Wrotek, J. Sobocinska, H.M. Kozłowski, M. Pawlikowska, T. Jedrzejewski and A. Działuk, “New Insights into the Role of Glutathione in the Mechanism of Fever,” *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 21, no. 4, 2020.
- [8] T. Y. Kao, W. T. Huang, C. P. Chang and M. T. Lin, “Aspirin may exert its antipyresis by inhibiting the N-methyl-D-aspartate receptor-dependent hydroxyl radical pathways in the hypothalamus,” *Journal of Pharmacological Sciences*, vol. 103, no. 3, pp. 293-298, 2007.
- [9] S. Jutharat, “Phytochemical screening and biological activities of *Dolichandrone serrulata*,” M.S. thesis, Dept. M.Sc., BUU Univ., Chon Buri, Thailand, 2016.
- [10] L. Charan, “Systematics and conservation of the genera *Premna* L. and *Callicarpa* L. (LAMIACEAE) in Thailand and Indo-China,” Ph.D. dissertation, Dept. Biology. KUU Univ., Khon kaen, Thailand, 2008.
- [11] R. Dianita and I. Jantan, “Ethnomedicinal uses, phytochemistry and pharmacological aspects of the genus *Premna*: a review,” *Pharm Biol*, vol. 55, no. 1, pp. 1715-1739, 2017.
- [12] R. Dianita and I. Jantan, “Inhibition of Human Platelet Aggregation and Low-Density Lipoprotein Oxidation by *Premna foetida* Extract and Its Major Compounds,” *Molecules*, vol. 24, no. 8, 2019.
- [13] M. C. Hsieh, Y. J. Shen, Y. H. Kuo and L. S. Hwang, “Antioxidative activity and active components of longan (*Dimocarpus longan* Lour.) flower extracts,” *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 56, no. 16, pp. 7010-7016, 2008.
- [14] J. Zhishen, T. Mengcheng and W. Jianming, “The determination of flavonoid contents in mulberry and their scavenging effects on superoxide radicals,” *Food Chemistry*, vol. 64, no. 4, pp. 555-559, 1999.
- [15] W. Chanthasri, N. Puangkeaw, N. Kunworarath, P. Jaisamut, S. Limsuwan, K. Maneenoon, P. Choochana and S. Chusri, “Antioxidant capacities and total phenolic contents of 20 polyherbal remedies used as tonics by folk healers in Phatthalung and Songkhla provinces, Thailand,” *BMC Complementary and Alternative Medicine*, vol. 18, no. 1, p. 73, 2018.
- [16] R. Re, N. Pellegrini, A. Proteggente, A. Pannala, M. Yang and C. Rice-Evans, “Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay,” *Free Radical Biology and Medicine*, vol. 26, no. 9, pp. 1231-1237, 1999.

- [17] M. Kurzawa, A. Filipiak-Szok, E. Kłodzinska and E. Sztyk, "Determination of phytochemicals, antioxidant activity and total phenolic content in *Andrographis paniculata* using chromatographic methods," *Journal of Chromatography B*, vol. 995-996, pp. 101-106, 2015.
- [18] J. Nisa, "Phytochemical screening and biological activities of *Dendrobium* spp.," M.S. thesis, Dept. M.Sc. (Chemical education), BUU Univ., Chon Buri, Thailand, 2016.
- [19] A. S. Oliveira, L. M. Cercato, M. T. D. S. Souza, A. J. O. Melo, B. D. S. Lima, M. C. Duarte, A. S. Araujo, A. M. O. Silva and E. A. Camargo, "The ethanol extract of *Leonurus sibiricus* L. induces antioxidant, antinociceptive and topical anti-inflammatory effects," *Journal of Ethnopharmacology*, vol. 206, pp. 144-151, 2017.
- [20] D. Tang, K. Chen, L. Huang and J. Li, "Pharmacokinetic properties and drug interactions of apigenin, a natural flavone," *Expert Opinion on Drug Metabolism and Toxicology*, vol. 13, no. 3, pp. 323-330, 2017.
- [21] P.-Y. Jiang, X.-J. Zhu, Y.-N. Zhang, F.-F. Zhou and X.-F. Yang, "Protective effects of apigenin on LPS-induced endometritis via activating Nrf2 signaling pathway," *Microbial Pathogenesis*, vol. 123, pp. 139-143, 2018.
- [22] M. M. G. Pinheiro, F. Boylan and P. D. Fernandes, "Antinociceptive effect of the *Orbignya speciosa* Mart. (Babassu) leaves: Evidence for the involvement of apigenin," *Life Sciences*, vol. 91, no. 9, pp. 293-300, 2012.
- [23] M. Shields, "Chapter 14 - Chemotherapeutics," in *Pharmacognosy*, S. Badal and R. Delgoda, Eds. Boston: Academic Press, 2017, pp. 295-313.
- [24] K. P. Devi, D. S. Malar, S. F. Nabavi, A. Sureda, J. Xiao, S. M. Nabavi and M. Daglia, "Kaempferol and inflammation: from chemistry to medicine," *Pharmacological Research*, vol. 99, pp. 1-10, 2015.
- [25] A. M. Potshangbam, R. S. Rathore, and P. Nongdam, "Discovery of sulfone-resistant dihydropteroate synthase (DHPS) as a target enzyme for kaempferol, a natural flavanoid," *Heliyon*, vol. 6, no. 2, p. e03378, 2020.
- [26] J. E. T. do Nascimento, S. M. de Moraes, D. S. de Lisboa, M. D. O. Sousa, S. A. A. R. Santos, F. E. A. Magalhaes and A. R. Campos, "The orofacial antinociceptive effect of Kaempferol-3-O-rutinoside, isolated from the plant *Ouratea fieldingiana*, on adult zebrafish (*Danio rerio*)," *Biomedicine and Pharmacotherapy*, vol. 107, pp. 1030-1036, 2018.
- [27] Ph. Burun, "Free radicals, antioxidants and antioxidant activity determination," *Thai Journal of Science and Technology*, vol. 21, no. 3, pp. 275-286, 2013.
- [28] R. Apak, M. Ozyurek, K. Guclu and E. Capanoglu, "Antioxidant activity/capacity measurement. 1. Classification, physiochemical principles, mechanisms, and electron transfer (ET)-based assays," *Journal of*

Agricultural and Food Chemistry, vol. 64, no. 5, pp. 997-1027, 2016.

- [29] R. Apak, M. Ozyurek, K. Guclu and E. Capanoglu, "Antioxidant activity/capacity measurement. 2. Hydrogen atom transfer (HAT)-based, mixed-mode (electron transfer (ET)/HAT), and lipid peroxidation assays,"

Journal of Agricultural and Food Chemistry, vol. 64, no. 5, pp. 102, 2016.

- [30] W. T. Huang, M. T. Lin and C. P. Chang, "An NMDA receptor-dependent hydroxyl radical pathway in the rabbit hypothalamus may mediate lipopolysaccharide fever," *Neuropharmacology*, vol. 50, no. 4, pp. 504-511, 2006.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

ความสามารถในการดัดขึ้นรูปและกลไกความเสียหายของโลหะแผ่น อลูมิเนียม AA6016

ณัฐศักดิ์ พรพุดศิริ*

คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ถนนเพชรเกษม ตำบลหนองแขก อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ 77110

รับบทความ 28 กันยายน 2563 แก้ไขบทความ 6 พฤษภาคม 2564 ตอรับบทความ 4 มิถุนายน 2564

บทคัดย่อ

อลูมิเนียมผสมถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์เพื่อทดแทนวัสดุประเภทเหล็กกล้าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากมีพื้นผิวที่สวยงาม น้ำหนักเบา ด้วยอลูมิเนียมผสมมีคุณสมบัติทางกลหรือความแข็งแรงค่อนข้างต่ำ แม้จะสามารถทำการขึ้นรูปได้ง่าย แต่มีข้อจำกัดด้านความสามารถในการขึ้นรูปที่ค่อนข้างต่ำ โดยเฉพาะในการขึ้นรูปชิ้นส่วนที่มีรัศมีขนาดเล็กซึ่งมักจะเกิดการแตกร้าวเสียหายได้ง่าย ในงานวิจัยนี้จึงได้กำหนดอัตราส่วนของความหนาขึ้นทดสอบและรัศมีของพื้นที่ 5 ระดับ เพื่อศึกษาความสามารถในการดัดขึ้นรูปของอลูมิเนียมผสมชนิดรีดเย็นเกรด AA6016 ที่รัศมีการดัดขึ้นรูปต่ำ ทำการทดสอบด้วยวิธีการดัดขึ้นรูปแบบอสิระ (Air-bending) ตามมาตรฐาน ISO7438/2010 เพื่อวิเคราะห์อิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างความหนาของแผ่นวัสดุและรัศมีการดัดที่ส่งผลต่อความสามารถในการดัดขึ้นรูป โดยทำการดัดขึ้นรูปและเปรียบเทียบผลทุก 15 องศา ทำการวิเคราะห์และประเมินจากพฤติกรรมทางกล ลักษณะพื้นผิวการดัด การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคและวิวัฒนาการความเสียหายจากการดัดขึ้นรูป ผลการทดลองแสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่าขนาดมุมดัดตัวกลับและความสามารถในการดัดขึ้นรูป จะมีแนวโน้มลดลงเมื่อขนาดมุมการดัดและอัตราส่วนระหว่างความหนาและรัศมีการดัด (t/r) เพิ่มขึ้น เนื่องจากผลของค่าความเค้นดึงที่เกิดขึ้นสูงบริเวณพื้นผิวด้านนอกของมุมดัดซึ่งส่งผลให้ค่าความหยาบผิวเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและนำไปสู่การแตกร้าวเสียหายของชิ้นทดสอบ โดยรอยแตกร้าวจะเริ่มก่อตัวในตำแหน่งกึ่งกลางของส่วนโค้งผิวด้านนอกสุดของมุมดัดและขยายตัวไปตามระนาบการเฉือนตามแนวรอยต่อขอบเกรนในทิศทางสู่กึ่งกลางของชิ้นความหนาขึ้นงาน ซึ่งเป็นผลกระทบเนื่องจากพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปถาวรของวัสดุระหว่างการดัดขึ้นรูป

คำสำคัญ : ความสามารถในการดัด; อลูมิเนียมผสม; การดัดขึ้นรูปแบบอสิระ; กลไกความเสียหาย

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Bendability and Damage Mechanisms of Aluminium Sheet AA6016

Natthasak Pornputsiri*

Faculty of Industry and Technology Rajamangala University of Technology Rattanakosin
Phetchakaseam Road, Nong-keo, Hua-Hin, Prachuapkhiri Khan 77110

Received 30 September 2020; Revised 6 May 2021; Accepted 4 June 2021

Abstract

Aluminium alloys were used in the automotive parts industry increased, for compensate steel parts material, due to its lightweight and good surface. Since, aluminium alloys are there relatively low mechanical properties, although they can be deformed easily, but the major limitation is their low formability. Especially, the less bending radius, which is often bending surface damaged easily. In the present work, five-difference ratio of sheet thickness and bending radius for study to the bendability of cold rolled aluminum alloys AA6016 at low bending radius. The bending test by Air-bending method, according to ISO 7438: 2010. To compare the results every 15 degrees. The mechanical behaviour, surface roughness, microstructure and damage evolution in the fillet region were analysed by experimental research. The experiment clearly showed that the Spring-back angle and bendability tend to decrease as the bending angle and material thickness increase. Due to the high tensile stress on the bending surface, it effected to the surface roughness increases rapidly and led to the damage on the specimen bending surface. The initial cracks occur on the middle of the outer surface curvature and propagation in the shear plane pattern to the middle of the sheet thickness along the grain boundary. This is the consequence of plastic deformation by bending test.

Keywords : Bendability; Aluminium Alloy; Air Bending; Damage Mechanisms

*Corresponding Author. Tel; +668 6667 6802, Email Address: natthasak_idt@hotmail.com

1. บทนำ

กรรมวิธีการดัดขึ้นรูป (Bending) มีความสำคัญและเป็นส่วนหนึ่งในอุตสาหกรรมการขึ้นรูปโลหะแผ่น เช่น การผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ เครื่องใช้ไฟฟ้า เครื่องใช้สำนักงานและเครื่องใช้ในครัวเรือน เป็นต้น เนื่องจากการดัดขึ้นรูปเป็นกระบวนการพื้นฐานในการขึ้นรูปโลหะแผ่น โดยเฉพาะกรรมวิธีการดัดขึ้นรูปแบบอิสระ (Air-Bending) ซึ่งเป็นกรรมวิธีการดัดที่เกิดแรงเสียดทานด้านข้างต่ำ อีกทั้งการดัดขึ้นรูปแบบอิสระยังสามารถออกแบบการพับได้หลากหลายรูปแบบจากแม่พิมพ์เพียงชุดเดียวทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการจัดสร้างแม่พิมพ์ สามารถใช้ขึ้นรูปวัตถุดิบที่มีรูปร่างหลากหลาย เช่น โลหะแผ่น ท่อ เหล็กกลม และเหล็กรูปพรรณเป็นต้น ทั้งนี้ปัญหาสำคัญที่มักพบในชิ้นงานที่ผ่านการดัดขึ้นรูป คือ พฤติกรรมการดีดตัวกลับ (Spring-Back) การเกิดรอยย่น (Wrinkle) และการแตกร้าว (Crack) ที่พื้นผิวเป็นต้น โดยเฉพาะวัสดุประเภทอลูมิเนียมผสมที่มักจะมีปัญหาดังกล่าวอยู่บ่อยครั้ง [1] ด้วยปัจจุบันวัสดุประเภทอลูมิเนียมผสมถูกนำมาใช้ในงานอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนต่างๆ เพื่อทดแทนวัสดุประเภทเหล็กกล้าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากน้ำหนักเบา มีลักษณะพื้นผิวที่สวยงาม ทนต่อการกัดกร่อนได้ดี และสามารถขึ้นรูปได้ง่าย ด้วยโครงสร้างจุลภาคของอลูมิเนียมมีผลึกแบบ Face Center Cubic (FCC) มีสมบัติทางด้านการไหลตัว (Fluidity) ที่ดีและมีอุณหภูมิจุดหลอมเหลวต่ำ (660 องศาเซลเซียส) [2] จากคุณสมบัติที่โดดเด่นดังกล่าวทำให้อลูมิเนียมถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอย่างหลากหลาย ผลิตภัณฑ์อลูมิเนียมโดยส่วนใหญ่จะได้จากการผลิตโดยกรรมวิธีการขึ้นรูปเย็น เนื่องจากสามารถขึ้นรูปได้ง่าย ทั้งนี้ความสามารถในการขึ้นรูป (Formability) มีความสำคัญอย่างมากสำหรับขั้นตอนของการผลิตหรือขึ้นรูปเป็นชิ้นส่วน เช่นเดียวกับการใช้งานซึ่งต้องการคุณสมบัติด้านความเหนียวสูงเพื่อการดูดซับพลังงาน ซึ่งโดยส่วนใหญ่การ

ทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุจะนิยมใช้วิธีการทดสอบแรงดึงแบบแนวแกนเพื่อตรวจสอบคุณสมบัติเชิงกลและความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุประเภทโลหะ อย่างไรก็ตามการทดสอบลักษณะนี้ยังไม่สามารถใช้อธิบายถึงความสามารถในการขึ้นรูปได้อย่างชัดเจน การทดสอบการดัดแบบอิสระจึงเป็นอีกวิธีการที่มีความเหมาะสมสำหรับใช้อธิบายถึงความสามารถในการขึ้นรูปโลหะแผ่นได้ดี [3]–[5] เนื่องจากปัญหาสำคัญในการดัดขึ้นรูปคือ ชิ้นงานมักมีรอยแตกร้าวตามแนวการพับและพฤติกรรมการดีดตัวกลับภายหลังการดัดขึ้นรูป จากการกำหนดรัศมีการดัดที่ไม่สอดคล้องกับค่าความหนาและขนาดมุมในการดัดขึ้นรูปชิ้นงาน

ความสามารถในการดัดขึ้นรูป (Bendability) คือคุณสมบัติของวัสดุที่สามารถดัดโค้งด้วยรัศมีการดัดน้อยที่สุด (Minimum Bend Radius) โดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายหรือรอยแตกร้าวบนพื้นผิวชิ้นงาน การกำหนดรัศมีการดัดขึ้นรูปจะถูกกำหนดเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความหนาของวัสดุ [6] ดังนั้นความสามารถในการดัดโค้งจึงใช้บอกเป็นจำนวนเท่าของความหนาของชิ้นงาน เช่น 3t คือ สามารถทำการดัดโค้งได้ด้วยรัศมีต่ำสุดเป็น 3 เท่าของความหนาชิ้นงานโดยไม่เกิดรอยแตก โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากการดัดขึ้นรูปเป็นกระบวนการสุดท้ายของการผลิตชิ้นงานซึ่งต้องการความสวยงามของพื้นผิว ความแข็งแรง และมุมชิ้นงานที่ต้องการ การออกแบบแม่พิมพ์ดัดขึ้นรูปจึงจำเป็นต้องทราบถึงขีดจำกัดในการเปลี่ยนรูปของวัสดุ การกำหนดรัศมีมุมดัดที่สัมพันธ์กับค่าความหนาของแผ่นวัสดุที่เหมาะสม รวมไปถึงผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ที่อาจส่งผลต่อความเสียหายหรือคุณภาพของชิ้นงานสำเร็จ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ เพื่อศึกษาถึงความสามารถในการดัดขึ้นรูปแผ่นอลูมิเนียมผสม โดยมุ่งเน้นศึกษาอิทธิพลของตัวแปรด้านกระบวนการออกแบบแม่พิมพ์ดัดขึ้นรูป ด้วยวิธีการทดสอบการดัดขึ้นรูปแบบอิสระ (Air-Bending) ตามมาตรฐาน ISO

7438:2010 [7] โดยเลือกศึกษาทดลองกับแผ่นวัสดุชนิดอลูมิเนียมผสมเกรด AA6016 ซึ่งเป็นวัสดุที่นิยมนำไปใช้ในการผลิตเป็นชิ้นส่วนยานยนต์และผลิตภัณฑ์อย่างแพร่หลาย [8] เพื่อศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนความหนาชิ้นงานและรัศมีพื้นที่ส่งผลต่อลักษณะและคุณภาพชิ้นงานที่ได้ รวมทั้งรูปแบบความเสียหายหรือข้อบกพร่องที่เกิดขึ้น โดยทำการทดสอบการดัดในลักษณะการเปลี่ยนรูปที่รุนแรง จากการเลือกใช้รัศมีการดัดต่ำและตรวจสอบผลการดัดทุกๆ 15 องศา เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบพฤติกรรมการดัดตัวกลับ (Spring-Back) ค่าความเรียบผิว (Surface Roughness) แรงดัดขึ้นรูป (Bending Force) ลักษณะความเสียหายที่พื้นผิว และ รูปแบบความเสียหายที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างจุลภาคของวัสดุชิ้นงาน เพื่อใช้ผลการวิจัยนี้เป็นแนวทางในการเลือกใช้ข้อกำหนดของอัตราส่วนระหว่างค่าความหนาชิ้นงานและรัศมีการดัดขึ้นรูปที่เหมาะสม ในการดัดขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรัศมีการดัดต่ำ เพื่อการผลิตชิ้นงานที่มีคุณภาพและหลีกเลี่ยงความเสียหายหรือข้อบกพร่องที่จะเกิดกับชิ้นงานในอุตสาหกรรมการขึ้นรูปโลหะแผ่นต่อไป

2. ทฤษฎีการดัดขึ้นรูป

2.1 การดัดตัวกลับ (Spring-Back)

การดัดขึ้นรูปเป็นกรรมวิธีที่ทำให้ชิ้นงานมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างโดยชิ้นงานจะมีความโค้งและมุมเกิดขึ้นหลังการดัด ซึ่งขนาดของมุมขึ้นงานภายหลังการดัดขึ้นรูปหากมีค่ามากกว่ามุมการดัดจะเรียกว่าการดัดตัวกลับหรือสปริงแบค (Spring-Back) และหากค่ามุมขึ้นงานน้อยกว่ามุมการดัดจะเรียกว่าสปริงโก (Spring-Go) ซึ่งตัวแปรหลักที่ส่งผลต่อของขนาดมุมขึ้นงานหลังการดัดขึ้นรูปจะประกอบไปด้วยปัจจัยหลายประการเช่น คุณสมบัติทางกลของวัสดุ ขนาดความหนาชิ้นงาน และรัศมีการดัดขึ้นรูป เป็นต้น [9] ทั้งนี้ขนาดมุมดัดตัวกลับ

โดยประมาณสามารถหาค่าได้ด้วยวิธีการคำนวณและการวัดเชิงเปรียบเทียบ โดยขนาดมุมการดัดสามารถกำหนดได้จากระยะการกดของพินซ์ โดยการคำนวณจากสมการตามมาตรฐานของทฤษฎีการทดสอบการดัดขึ้นรูป [10] ดังนั้นในเบื้องต้นจึงต้องทำความเข้าใจเกี่ยวกับผลกระทบหลักที่ส่งผลต่อการดัดตัวกลับของวัสดุในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์

ในกระบวนการดัดขึ้นรูปแบบอิสระ ค่าความเค้นดัดจะมีลักษณะการกระจายแบบเชิงเส้น ซึ่งจะมีค่าสูงสุดที่ปลายของพินซ์และค่าความเค้นเป็นศูนย์ที่จุดสัมผัสของด้าย ส่งผลทำให้พื้นที่การดัดมีรูปแบบของความยืดหยุ่นสมบูรณ์ (Fully Elastic) และการเปลี่ยนรูปถาวรบางส่วน (Elastic-Plastic Deformation) ทั้งนี้เพื่อลดความซับซ้อนเกี่ยวกับการเปลี่ยนรูปทรงของชิ้นงาน การประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติจึงมักกำหนดให้มีรัศมีการดัดมีค่าคงที่ ซึ่งยังคงให้ผลที่มีความเที่ยงตรงและเชื่อถือได้ โดย Hosford and Caddell [11] ได้นำเสนอสมการเพื่อใช้ประมาณค่ามุมดัดตัวกลับสำหรับวัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูงดังสมการที่ (1)

$$\frac{1}{R} - \frac{1}{r} = \frac{2\sqrt{3}Y(1-\nu^2)}{ET} \quad (1)$$

โดยที่ R คือรัศมีภายในของชิ้นงานขณะกดดัด r คือ รัศมีชิ้นงานภายหลังการกดดัดหรือเมื่อมีการดัดตัวกลับ Y คือค่าความเค้นคลาก E คือ ค่ายังส์โมดูลัส ν คือ ค่าอัตราส่วนปัวส์ซอง และ T คือค่าความหนาของแผ่นวัสดุ

สำหรับวัสดุที่มีคุณสมบัติด้านความเครียดเชิงสูง การคำนวณขนาดมุมดัดตัวกลับจะแสดงดังสมการที่ (2) และ (3)

$$\frac{1}{R} - \frac{1}{r} = \left(\frac{6}{2-n}\right) \left[\frac{K(1-\nu^2)}{ET}\right] \left(\frac{T}{2R}\right)^n \quad (2)$$

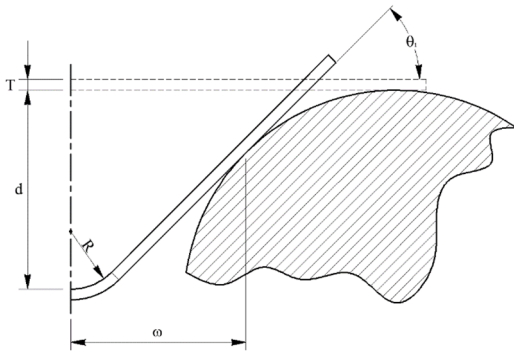
$$K' = K \left(\frac{4}{3}\right)^{(n+1)/2} \quad (3)$$

เมื่อ K คือ สัมประสิทธิ์ความแข็งแรงของวัสดุ และ n คือ ค่ายกกำลังของความเครียดแข็ง

ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาโดย Gardiner [12] เพื่อให้สามารถคำนวณมุมดัดตัวกลับให้มากยิ่งขึ้น แสดงดังสมการที่ (4)

$$\frac{R}{r} = 4 \left(\frac{RY}{ET} \right)^3 - 3 \left(\frac{RY}{ET} \right) + 1 \quad (4)$$

สมมติให้ส่วนโค้งของรัศมีการดัดมีการสัมผัสกับส่วนรองรับที่เป็นเส้นตรง, รัศมีส่วนโค้งจากการดัดเริ่มต้น (R) ประมาณได้จากขนาดของรัศมีพื้นผิว ความหนาแผ่นวัสดุ และจากการวัดขนาดของมุมการดัดดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การประมาณการรัศมีการดัดโค้ง

$$R = \frac{\omega \tan \theta_1 + \frac{T}{2} - d}{\sec \theta_1 - 1} \quad (5)$$

เมื่อ ω คือขนาดความกว้างโดยประมาณของครึ่งมุมดัด θ_1 คือ ขนาดมุมดัด และ d คือ ระยะการกดของพื้นที่ที่มีการชดเชยค่าความหนาแผ่นวัสดุ

หลักการพื้นฐานของสมการที่ (1)–(5) เป็นการประเมินผลของการดัดตัวกลับที่ได้รับผลกระทบจากค่าความหนาและคุณสมบัติของวัสดุ (E , Y , และ n) มุมการดัดตัวกลับจะแสดงในรูปของ $(1/R) - (1/r)$ และนำมาพล็อตเปรียบเทียบกับค่าร้อยละของตัวแปร แม้ว่าจะมี

ความสัมพันธ์ไม่เป็นแบบเชิงเส้น แต่ผลการศึกษาพบว่าผลกระทบของตัวแปรข้างต้นมีค่าเข้าใกล้เชิงเส้น ซึ่งมีช่วงของความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ ± 20

2.2 ความสามารถในการดัดขึ้นรูป (Bendability)

ความสามารถในการดัดขึ้นรูปหมายถึง การที่วัสดุสามารถถูกดัดขึ้นรูปด้วยรัศมีการดัดน้อยที่สุดหรือขนาดมุมการดัดสูงสุดได้ โดยไม่ก่อให้เกิดรอยแตกหรือความเสียหายเกิดขึ้นภายหลังการดัด ทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์ความเสียหายระหว่างการดัดขึ้นรูป โดยส่วนใหญ่จะพิจารณาจากพัฒนาการของความหยาบผิวและค่าความเครียดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงาน ซึ่งมีนักวิจัยหลายท่านได้สรุปไว้ว่า การเริ่มต้นของรอยแตกและพัฒนาการของระนาบการฉีกเกิดจากขนาดความหนาที่ไม่สม่ำเสมอและการเปลี่ยนแปลงค่าความหยาบผิวของชิ้นทดสอบที่เกิดจากการดัดขึ้นรูป [13]–[15] และใช้วิธีการจำลองการเปลี่ยนรูปถาวรบริเวณมุมการดัดเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิว ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อความสามารถในการขึ้นรูปและความสามารถในการตัดของโลหะแผ่น [16]–[18] สรุปได้ว่าปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความสามารถในการดัดขึ้นรูป คือความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของค่าความหยาบผิวและค่าความเครียดบริเวณมุมการดัด เนื่องจากการอธิบายถึงตำแหน่งการเกิดความเครียดสูงสุดด้วยวิธีการทดลองจะทำได้ยาก ดังนั้นการทดลองส่วนใหญ่จะเลือกใช้วิธีการเปรียบเทียบความแตกต่างจากลักษณะของเฟสในโครงสร้างจุลภาคที่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมุมการดัดเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นทฤษฎีการวิเคราะห์ความเสียหายที่มุ่งเน้นศึกษาถึงพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปเฉพาะจุดที่มีแนวโน้มของการเกิดรอยแตกในรูปแบบของระนาบการฉีก ซึ่งการแตกหักในกระบวนการขึ้นรูปโลหะสามารถจำแนกได้ 2 ลักษณะ คือ การแตกหักแบบเปราะ (Brittle Fracture) และการแตกหักแบบเหนียว (Ductile Fracture) [19]

จากงานวิจัยที่ผ่านมาโดยส่วนใหญ่จะอ้างอิงเกณฑ์การแตกหักแบบเหนียวสำหรับการประเมินความสามารถในดัดขึ้นรูปและรูปแบบของความเครียดระนาบ (Plane Strain) จะถูกใช้เพื่อทำนายพฤติกรรมของการเกิดรอยแตกเนื่องจากความเค้นดัดที่เกิดจากการดัดขึ้นรูปของโลหะแผ่นบาง โดยคณะผู้วิจัยได้นำเสนอรูปแบบของเกณฑ์การแตกหักแบบเหนียว เช่น Clift และคณะ [20] และ Bao และ Wierzbicki [21] เป็นต้น ซึ่งเกณฑ์ที่นิยมใช้อ้างอิงจะอยู่ในรูปของ

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} g([\sigma]) d\bar{\epsilon} = C_0 \quad (6)$$

เมื่อ g คือ ฟังก์ชันขององค์ประกอบหรือค่าคงที่ของเมทริกซ์ความเครียด ($[\sigma]$), $\bar{\epsilon}$ คือ ค่าประสิทธิภาพความเครียดโดยเฉลี่ย และ $\bar{\epsilon}_f$ คือ ค่าประสิทธิภาพความเครียดวิกฤต ณ จุดแตกหัก ในขณะที่ C_0 เป็นเกณฑ์ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ ดังนั้นค่าประสิทธิภาพความเครียดโดยเฉลี่ยจึงถูกกำหนดเป็นเกณฑ์การแตกหักสำหรับการประเมินค่าความสามารถในการดัดขึ้นรูป

3. วัสดุการทดลอง

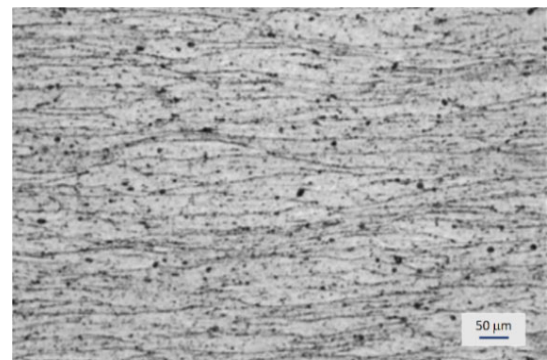
ในงานวิจัยนี้เลือกศึกษาความสามารถในการดัดขึ้นรูปของวัสดุอลูมิเนียมผสมแบบแผ่น เกรด AA6016 ที่ได้จากกระบวนการรีดเย็นที่มีขนาดความหนาต่างกัน 5 ขนาดคือ 1, 2, 3, 4, และ 5 มิลลิเมตร โดยทำการตัดเตรียมชิ้นทดสอบตามมาตรฐานซึ่งมีขนาดความกว้าง $\times$ ยาว = 12 $\times$ 30 มิลลิเมตร และลักษณะโครงสร้างจุลภาคในภาคตัดขวางของแผ่นวัสดุก่อนการทดสอบการดัด จากการตรวจสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ทางโลหะวิทยาดังรูปที่ 2 พบว่าโครงสร้างจุลภาคมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันตลอดความหนาของแผ่นวัสดุ ซึ่งอลูมิเนียมเกรด AA6016 เป็นอลูมิเนียมชนิดที่มีส่วนผสมของอนุภาคโลหะ และ Mg_2Si ขนาดเล็ก

กระจายตัวสม่ำเสมอตลอดพื้นที่ในโครงสร้างจุลภาคโดยมีปริมาณโดยเฉลี่ยร้อยละ 1.16 ซึ่งแสดงไว้ในงานวิจัยที่ผ่านมา [22]

คุณสมบัติทางกลของแผ่นอลูมิเนียม AA6016 ซึ่งได้จากการทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิห้อง ตามมาตรฐาน ASTM E8M-92a ด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ขนาด 2 ตัน รุ่น Zwick Z20 แสดงดังตารางที่ 1 ซึ่งประกอบไปด้วย ค่าความเค้นคราก (Yield Stress, YS) ค่าความเค้นดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Stress, UTS) ค่าการยืดตัวสม่ำเสมอ (Uniform Elongation, UE) ค่าการยืดตัวโดยรวม (Total Elongation, TE) และ เลขยกกำลังของความเครียดแข็ง (strain hardening exponent, n)

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกลของวัสดุอลูมิเนียมผสมเกรด AA6016

Material	YS (MPa)	UTS (MPa)	UE (MPa)	TE (%)	n (at 5%)
AA6016	124	241	22.5	26	0.26



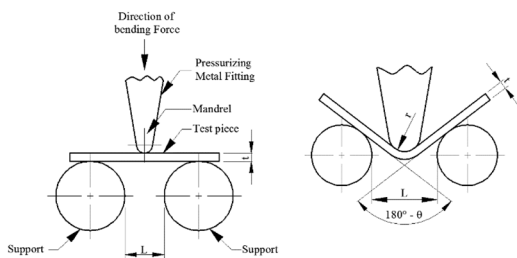
รูปที่ 2 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคก่อนการดัดของวัสดุ AA6016

4. ข้อกำหนดการทดลอง

4.1 มาตรฐานการทดสอบ

งานวิจัยนี้ดำเนินการทดสอบการดัดแบบอิสระตามมาตรฐาน ISO7438 : 2010 [7] ซึ่งใช้สำหรับ

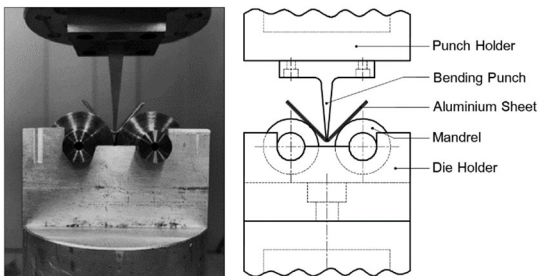
ทดสอบผลิตภัณฑ์ประเภทโลหะแผ่น โดยลักษณะของการทดสอบการดัดแบบอิสระแสดงดังรูปที่ 3 ส่วนขั้นตอนในการทดสอบจะดำเนินการโดยนำชิ้นทดสอบวางบนฐานรองรับรูปทรงกระบอกที่มีรัศมี 10 มิลลิเมตร และให้แรงกดที่จุดกึ่งกลางของชิ้นทดสอบ โดยใช้พื้นที่ที่มีรัศมีหัวกดเท่ากับ 0.25 มิลลิเมตร กำหนดระยะห่างระหว่างผิวทรงกระบอกที่ใช้ในการทดสอบ (L) $L = 2r + 3t$ โดยที่ r คือรัศมีการดัดโค้งหรือรัศมีส่วนปลายของพื้นที่ และ t คือ ขนาดความหนาของชิ้นทดสอบ



รูปที่ 3 รูปแบบการทดสอบการดัดตามมาตรฐาน ISO 7438 : 2010 [7]

4.2 แม่พิมพ์ดัดขึ้นรูปแบบอิสระ

ออกแบบชุดแม่พิมพ์สำหรับทดสอบการดัดขึ้นรูปแบบอิสระตามมาตรฐาน ISO7438: 2010 ตามข้อกำหนดของวัตถุประสงค์การวิจัย ขอบเขตการวิจัย และมาตรฐานการทดสอบดังรูปที่ 4 โดยติดตั้งชุดแม่พิมพ์เพื่อทดสอบการดัดขึ้นรูปบนเครื่องทดสอบแบบอเนกประสงค์ รุ่น Zwick / 2020



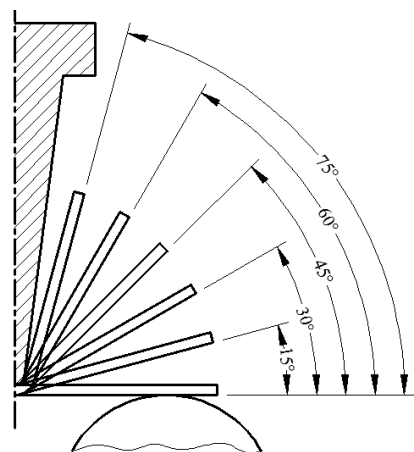
รูปที่ 4 เครื่องมือทดสอบการดัดขึ้นรูปแบบอิสระ

4.3 เงื่อนไขการทดลอง

การทดลองเพื่อศึกษาความสามารถในการดัดขึ้นรูปและกลไกความเสียหายของโลหะแผ่นอลูมิเนียมผสม AA6016 ด้วยวิธีการดัดขึ้นรูปแบบอิสระ โดยกำหนดอัตราส่วนระหว่างความหนาชิ้นงานและรัศมีพื้นที่ (t/r) 5 ระดับ คือ 4(1/0.25), 8(2/0.25), 12(3/0.25), 16(4/0.25) และ 20(5/0.25) ตามลำดับ ซึ่งการคำนวณค่าอัตราส่วนระหว่างความหนาชิ้นงานและรัศมีพื้นที่ (t/r) แสดงดังตารางที่ 2 ทำการทดสอบการดัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิห้อง ด้วยความเร็วในการกดดัด 120 มิลลิเมตร/นาที และไม่ใช่สารหล่อลื่น บันทึกผลการทดลองเพื่อวิเคราะห์ความสามารถในการดัดขึ้นรูปและวิวัฒนาการความเสียหาย ที่มุมการดัดทุก 15 องศา คือ 15, 30, 45, 60 และ 75 องศา ตามลำดับ ดังรูปที่ 5

ตารางที่ 2 การคำนวณค่าอัตราส่วนระหว่างความหนาชิ้นงานและรัศมีพื้นที่ (t/r)

ชั้นที่	ความหนา (t) (มิลลิเมตร)	รัศมีพื้นที่ (r) (มิลลิเมตร)	อัตราส่วน t/r
1	1	0.25	4
2	2	0.25	8
3	3	0.25	12
4	4	0.25	16
5	5	0.25	20



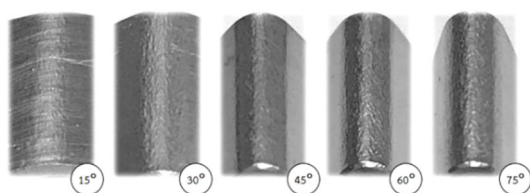
รูปที่ 5 ขนาดช่วงของมุมในการทดสอบการดัด

5. ผลการทดลอง

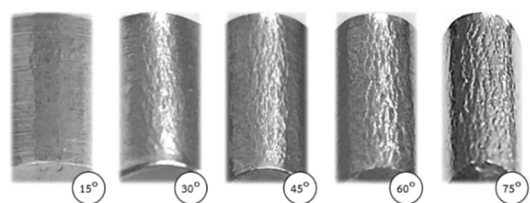
บันทึกผลการทดลองเพื่อศึกษาเปรียบเทียบผลกระทบของอัตราส่วน t/r ที่ส่งผลต่อความสามารถในการดัดขึ้นรูปของอลูมิเนียมผสมที่ขนาดมุมการดัดเพิ่มขึ้นทุก 15 องศา ซึ่งรายละเอียดผลการทดลองเพื่อใช้ในการวิเคราะห์และประเมินผลประกอบด้วย ลักษณะพื้นผิวการดัด แรงดัดขึ้นรูป มุมดัดตัวกลับ ค่าความเรียบผิว และการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคของวัสดุ ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

5.1 ลักษณะของพื้นผิวการดัด

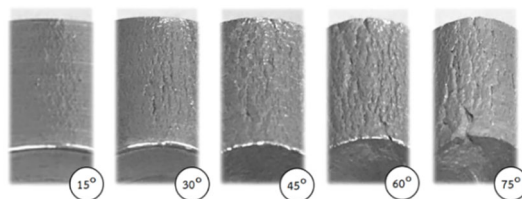
พื้นผิวด้านนอกของมุมขึ้นงานจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อทำการดัดขึ้นรูปเนื่องจากเป็นส่วนที่ได้รับความเค้นแรงดึงสูงสุดและเป็นส่วนเริ่มต้นของความเสียหายที่เกิดขึ้นในงานดัดขึ้นรูป หลังการดัดขึ้นรูปได้ทำการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายต่ำ (Optical Microscope) ลักษณะพื้นผิวการดัดของขึ้นททดสอบที่ผ่านการดัดขึ้นรูปด้วยมุมการดัดเพิ่มขึ้นทุก 15 องศา ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 6-10



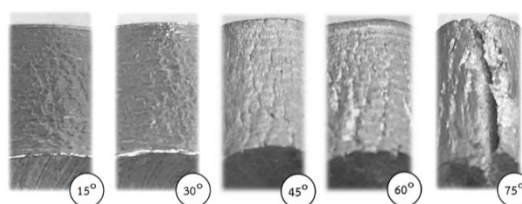
รูปที่ 6 วิวัฒนาการของพื้นผิวขึ้นททดสอบที่ได้รับความเค้นแรงดึงจากการดัดขึ้นรูป กรณี $t/r = 4$



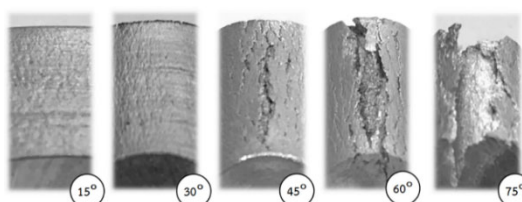
รูปที่ 7 วิวัฒนาการของพื้นผิวขึ้นททดสอบที่ได้รับความเค้นแรงดึงจากการดัดขึ้นรูป กรณี $t/r = 8$



รูปที่ 8 วิวัฒนาการของพื้นผิวขึ้นททดสอบที่ได้รับความเค้นแรงดึงจากการดัดขึ้นรูป กรณี $t/r = 12$



รูปที่ 9 วิวัฒนาการของพื้นผิวขึ้นททดสอบที่ได้รับความเค้นแรงดึงจากการดัดขึ้นรูป กรณี $t/r = 16$



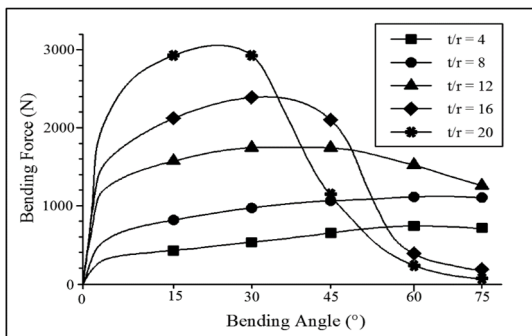
รูปที่ 10 วิวัฒนาการของพื้นผิวขึ้นททดสอบที่ได้รับความเค้นแรงดึงจากการดัดขึ้นรูป กรณี $t/r = 20$

จากผลการดัดด้วยอัตราส่วน $t/r = 4$ (ดังรูปที่ 6) พบว่าพื้นผิวขึ้นททดสอบจะมีความขรุขระเพิ่มมากขึ้นเล็กน้อยเมื่อมุมการดัดเพิ่มสูงขึ้น การดัดด้วยอัตราส่วน $t/r = 8$ (ดังรูปที่ 7) พบว่าลักษณะพื้นผิวจะมีความขรุขระเพิ่มมากขึ้นเมื่อมุมการดัดเพิ่มขึ้น โดยที่มุมการดัด 45 องศา จะปรากฏริ้วรอยขนาดเล็กบนพื้นผิว และที่มุมดัด 75 องศา ขนาดของรอยแตกบนพื้นผิวจะมีความลึกที่ชัดเจนมากขึ้น ขึ้นททดสอบที่ผ่านการดัดด้วยอัตราส่วน $t/r = 12$ (ดังรูปที่ 8) พบว่าที่มุมการดัด 45 องศา จะปรากฏร่องลึกที่ชัดเจนบนพื้นผิวขึ้นและที่มุม

การตัด 75 องศา รอยแตกขยายตัวกว้างและเกิดตลอดแนวความกว้างของชิ้นทดสอบ ลักษณะพื้นผิวชิ้นทดสอบที่ผ่านการตัดขึ้นรูปด้วยอัตราส่วน $t/r = 16$ (ดังรูปที่ 9) พบว่าที่มุมการตัด 45 และ 75 องศา พบว่ารอยแตกกว้างเกิดการขยายตัวมากขึ้นจนเป็นรอยฉีกขาดขนาดใหญ่เกิดขึ้นตลอดแนวความกว้างของชิ้นทดสอบ และลักษณะของพื้นผิวชิ้นทดสอบที่ผ่านการตัดขึ้นรูปด้วยอัตราส่วน $t/r = 20$ ดังรูปที่ 10 พบว่าที่มุมการตัด 45 องศา จะปรากฏรอยแตกกว้างตลอดแนวความกว้างของพื้นผิวชิ้นทดสอบ เมื่อมุมการตัดเพิ่มขึ้นเป็น 60 องศา รอยแตกกว้างจะขยายตัวเกิดเป็นรอยแตกขนาดใหญ่ และเมื่อมุมการตัดเพิ่มขึ้นเป็น 75 องศา รอยแตกจะขยายตัวมากขึ้นทั้งในแนวความกว้างและความหนาของชิ้นทดสอบ ปรากฏเป็นรอยฉีกขาดที่รุนแรงให้เห็นอย่างชัดเจน

5.2 แรงดัดขึ้นรูปชิ้นงาน

จากการทดลองดัดขึ้นรูปชิ้นทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ โดยไม่ใช้สารหล่อลื่น ที่อัตราส่วนความหนาชิ้นงานและรัศมีการดัด 5 ระดับ



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัดขึ้นรูปและขนาดมุมการดัด

จากกราฟผลการทดลองรูปที่ 11 พบว่าขนาดแรงดัดขึ้นรูปจะแปรผันตามอัตราส่วน t/r และขนาดมุมการดัดที่เพิ่มขึ้น โดยการดัดขึ้นรูปด้วยอัตราส่วน $t/r =$

20 ใช้แรงในการดัดขึ้นรูปสูงสุด ค่าแรงดัดจะเพิ่มขึ้นสูงสุดที่มุมดัด 30 องศา หลังจากนั้นแรงดัดจะมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วซึ่งสัมพันธ์กับการการเกิดรอยแตกกว้างบนพื้นผิวการดัดที่ปรากฏตลอดแนวความกว้างของชิ้นทดสอบ ส่วนการดัดขึ้นรูปด้วยอัตราส่วน $t/r = 12$ ใช้แรงดัดจะสูงสุดที่มุมดัด 45 องศา จากนั้นแรงดัดจะมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็ว ส่วนการดัดขึ้นรูปด้วยอัตราส่วน $t/r = 12$ ใช้แรงดัดจะสูงสุดที่มุมดัด 45 องศา จากนั้นแรงดัดจะมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ส่วนเงื่อนไขการดัดด้วยอัตราส่วน $t/r = 4$ และ 8 ค่าแรงดัดจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อยจนถึงขนาดมุมการดัดที่ 75 องศา เนื่องจากไม่ปรากฏรอยแตกกว้างบนพื้นผิว

5.3 พฤติกรรมการดัดตัวกลับ

การตรวจสอบขนาดมุมดัดตัวกลับของชิ้นทดสอบจะใช้วิธีการถ่ายภาพด้วยกล้อง DSLR และวัดค่ามุมชิ้นงานด้วยโปรแกรม Auto CAD โดยการสร้างเส้นอ้างอิงตามแนวขอบชิ้นทดสอบและวัดขนาดมุมด้วยคำสั่งบอกขนาด เพื่อเปรียบเทียบหาค่ามุมดัดตัวกลับของชิ้นทดสอบดังรูปที่ 12 ซึ่งวิธีการคำนวณขนาดมุมดัดตัวกลับแสดงดังสมการที่ (7)

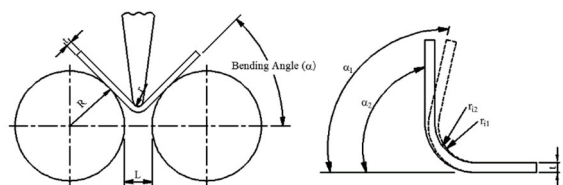
$$\Delta\theta = \alpha_2 - \alpha_1 \quad (7)$$

เมื่อ

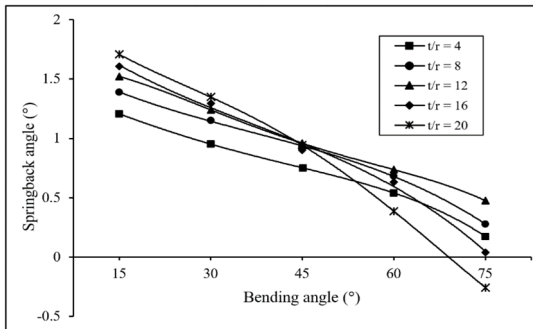
$\Delta\theta$ คือ มุมดัดตัวกลับ

α_2 คือ ขนาดมุมชิ้นงาน

α_1 คือ ขนาดมุมการดัด



รูปที่ 12 รูปแบบการดัดขึ้นรูปแบบอิสระ



รูปที่ 13 อัตราส่วนของ t/r ที่ส่งผลต่อขนาดมุมดัดตัวกลับหลังการดัดขึ้นรูป

จากกราฟผลการทดลองรูปที่ 13 พบว่าขนาดมุมดัดตัวกลับจะเกิดขึ้นสูงเมื่อทำการดัดขึ้นรูปด้วยอัตราส่วน t/r ที่สูงขึ้น โดยขนาดมุมดัดตัวกลับจะมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อขนาดมุมการดัดเพิ่มสูงขึ้นซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยที่ผ่านมา [23] ดังรายละเอียดผลการทดลองซึ่งพบว่า การดัดขึ้นรูปด้วยอัตราส่วน t/r ต่ำสุด ($t/r = 4$) มีขนาดมุมดัดตัวกลับต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วน t/r ขนาดอื่นๆ โดยที่มุมดัด 15 องศา มีมุมดัดตัวกลับ 1.208 องศา และมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงมุมดัดที่ 75 องศา ซึ่งมีมุมดัดตัวกลับ 0.175 องศา การดัดขึ้นรูปด้วยอัตราส่วน $t/r = 8$ พบว่าที่มุมดัด 15 องศา มีค่ามุมดัดตัวกลับ 1.390 องศา และที่มุมการดัด 75 องศา มีมุมดัดตัวกลับ 0.279 องศา การดัดขึ้นรูปด้วยอัตราส่วน $t/r = 12$ พบว่าที่มุมดัด 15 องศา มีมุมดัดตัวกลับ 1.522 องศา และค่ามุมดัดตัวกลับลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงการดัด 75 องศา มีมุมดัดตัวกลับ 0.476 องศา ผลการดัดขึ้นรูปด้วยอัตราส่วน $t/r = 16$ พบว่าที่มุมการดัด 15 องศา มีมุมดัดตัวกลับ 1.609 องศา และที่มุมการดัด 75 องศา มีมุมดัดตัวกลับ 0.040 องศา และการดัดขึ้นรูปด้วยอัตราส่วน $t/r = 20$ ซึ่งมีค่าสูงสุด พบว่าค่ามุมดัดตัวกลับเกิดขึ้นสูงที่สุดในช่วงมุมการดัด 15-45 องศา และมุมดัดตัวกลับมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อมุมการ

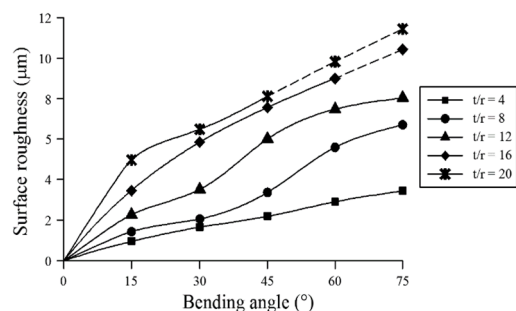
ดัดเพิ่มมากขึ้น โดยพบว่าที่มุมการดัด 15 องศา มีค่ามุมดัดตัวกลับ 1.7088 องศา หลังจากนั้นเมื่อมุมการดัดเพิ่มขึ้นค่ามุมดัดตัวกลับจะมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อมุมการดัดเพิ่มสูงกว่า 30 องศา พบว่าขนาดมุมดัดตัวกลับจะลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากผลของการแตกร้าวนบนพื้นผิว โดยพบว่าที่มุมการดัด 75 องศา มีค่ามุมดัดตัวกลับที่ -0.226 องศา

5.4 การเปลี่ยนแปลงค่าความเรียบผิว

ในการเปรียบเทียบอิทธิพลของอัตราส่วน t/r และขนาดมุมการดัด ที่ส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงค่าความเรียบผิวเฉลี่ย (R_a) ของชิ้นทดสอบ โดยทำการวัดค่าความเรียบผิวบริเวณพื้นผิวด้านนอกของมุมการดัด ซึ่งเป็นส่วนที่ได้รับผลกระทบจากความเค้นดึงสูงสุดและเป็นส่วนเริ่มต้นของการแตกร้าและความเสียหายของชิ้นงาน โดยจะทำการวัดค่าความเรียบผิวในทิศทางตามแนวความกว้างของชิ้นทดสอบดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 ทิศทางการวัดค่าความเรียบพื้นผิว



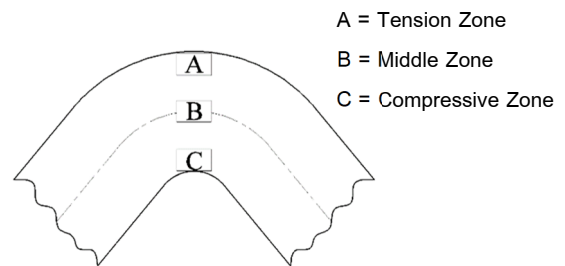
รูปที่ 15 อิทธิพลของอัตราส่วน t/r และขนาดมุมการดัดที่ส่งผลต่อความเรียบพื้นผิว (R_a)

ผลการวัดค่าความเรียบผิวเฉลี่ย (Ra) บริเวณพื้นผิวการตัดของชิ้นทดสอบที่ผ่านการตัดขึ้นรูปด้วยอัตราส่วน t/r และขนาดมุมการตัดที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 15 พบว่าค่าความเรียบผิวเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น (ผิวหยาบขึ้น) อย่างต่อเนื่องเมื่อขนาดของมุมการตัดเพิ่มขึ้น และพบว่าเมื่ออัตราส่วน t/r เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความเรียบผิวมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจนดังรายละเอียดผลการทดลอง ซึ่งพบว่าการตัดขึ้นรูปด้วยอัตราส่วน $t/r = 4$ มีค่าความเรียบผิวโดยเฉลี่ยต่ำสุด (เรียบที่สุด) เมื่อเริ่มต้นการตัดที่มุมการตัด 15 องศา มีค่าความเรียบผิวเฉลี่ย 0.97 ไมโครเมตร และเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงมุมการตัดที่ 75 องศา มีค่าความเรียบผิวเฉลี่ย 3.455 ไมโครเมตร ในการตัดขึ้นรูปด้วยอัตราส่วน $t/r = 8$ ที่มุมตัด 15 องศา มีค่าความเรียบผิวเฉลี่ย 1.43 ไมโครเมตร และที่มุมการตัด 75 องศา มีค่าความเรียบผิวเฉลี่ย 6.72 ไมโครเมตร ในส่วนของการตัดขึ้นรูปด้วยอัตราส่วน $t/r = 12$ พบว่าค่าความเรียบผิวเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วมากขึ้น โดยพบว่าที่มุมการตัด 15 องศา มีค่าความเรียบผิวเฉลี่ย 2.29 ไมโครเมตร และค่าความเรียบผิวเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงมุมการตัดที่ 45 องศา จากนั้นพบว่าค่าความเรียบผิวเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากการขยายตัวของรอยแตกที่ชัดเจนขึ้นและที่มุมการตัด 75 องศา มีค่าความเรียบผิวเฉลี่ย 8.085 ไมโครเมตร ในส่วนของการตัดขึ้นรูปด้วยอัตราส่วน $t/r = 16$ พบว่าค่าความเรียบผิวเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วตั้งแต่เริ่มต้นการตัดจนถึงมุมการตัด 60 องศา ซึ่งมีความเรียบผิวเฉลี่ย 8.975 ไมโครเมตร ส่วนที่มุมตัด 75 องศา ไม่สามารถวัดค่าความเรียบผิวได้เนื่องจากพื้นผิวการตัดมีการฉีกขาดที่รุนแรงเกิดเป็นร่องลึกขนาดใหญ่ และจากการตัดขึ้นรูปด้วยอัตราส่วน $t/r = 20$ ซึ่งมีค่าสูงสุด พบว่ามีค่าความเรียบผิวเฉลี่ยสูงสุด (หยาบที่สุด) ตั้งแต่เริ่มต้นการตัดที่ 15 องศา ซึ่งมีค่าความเรียบผิวเฉลี่ย 5.04 ไมโครเมตร และค่าความเรียบผิวจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงมุมการตัด 45 องศา ซึ่งมีค่า

ความเรียบผิวเฉลี่ย 8.075 ไมโครเมตร หลังจากนั้นเมื่อมุมการตัดเพิ่มขึ้นที่ 60 และ 75 องศา ซึ่งไม่สามารถวัดค่าความเรียบผิวที่มุมการตัดนี้ได้เนื่องจากการขยายตัวของรอยแตกจนเกิดการฉีกขาดของพื้นผิวที่รุนแรง

5.5 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของวัสดุ ภายหลังการตัดขึ้นรูป

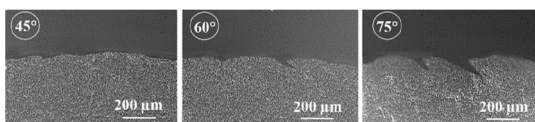
ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคและลักษณะการแตกร้าวของชิ้นทดสอบ ในตำแหน่ง A ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดความเค้นดึงสูงสุดและเป็นส่วนเริ่มต้นของความเสียหายที่เกิดขึ้นกับชิ้นงาน ดังรูปที่ 16



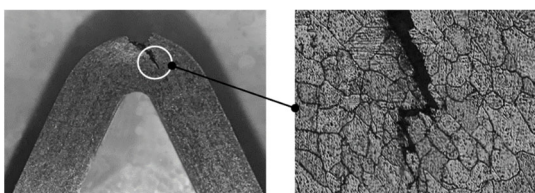
รูปที่ 16 ตำแหน่งการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบหลังการตัดขึ้นรูปแบบอิสระ

ผลการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคในแนวภาคตัดขวางของชิ้นทดสอบที่มุมการตัดตั้งแต่ 15–75 องศา พบว่าลักษณะของเกรนที่ชั้นผิวด้านนอก (A) ซึ่งเป็นส่วนที่ได้รับความเค้นดึงจากการตัดขึ้นรูป เกรนมีลักษณะยึดตัวหนาแน่นกับแนวขอบผิวยานนอกชิ้นทดสอบ ส่วนบริเวณกึ่งกลางความหนาชิ้นงาน (B) ลักษณะเกรนมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยและบริเวณพื้นผิวด้านใน (C) ซึ่งส่วนนี้เป็นส่วนที่ได้รับความเค้นอัด เกรนมีลักษณะเป็นแถบบางยึดตัวไปในแนวเดียวกับการกดของพันธ์ จากผลการทดลองของงานวิจัยนี้และงานวิจัยเกี่ยวข้องที่ผ่านมา ซึ่งพบว่าจุดเริ่มต้นของความเสียหายหรือการก่อตัวของรอยแตกร้าวจะเริ่มเกิดขึ้นบนพื้นผิวยานนอกของชิ้นทดสอบ

(บริเวณจุด A) ดังนั้นเพื่อการเปรียบเทียบผลกระทบของอัตราส่วนความหนาขึ้นทดสอบต่อรัศมีการดัด (t/r) ที่ส่งผลต่อความสามารถในการดัดขึ้นรูปและวิวัฒนาการความเสียหายที่เกิดขึ้นในงานวิจัยนี้ จึงเลือกเปรียบเทียบจากโครงสร้างจุลภาคของภาคตัดขวางบริเวณพื้นผิวด้านนอก (A) ซึ่งเป็นส่วนที่เกิดความเค้นดึงสูงสุดและเป็นบริเวณเริ่มต้นของการเกิดรอยแตกร้าวภายหลังการดัด



รูปที่ 17 วิวัฒนาการของรอยแตกร้าวในโครงสร้างจุลภาค กรณีทำการดัดขึ้นรูปด้วยอัตราส่วน $t/r = 12$



รูปที่ 18 ลักษณะของรอยแตกในแนวภาคตัดขวาง หลังการดัดด้วยมุมดัด 60 องศา กรณี $t/r = 20$

จากผลการทดลองการดัดขึ้นรูปโดยการกำหนดอัตราส่วน t/r ต่ำ ($t/r=4$) พบว่าเมื่อมุมการดัดเพิ่มสูงขึ้นเกรนจะมีลักษณะยืดตัวยาวขนานกับขอบผิวด้านนอกของขึ้นทดสอบและขอบผิวจะมีลักษณะผิวคลื่น เมื่ออัตราส่วน t/r เพิ่มมากขึ้นพบว่าขนาดของผิวคลื่นและความลึกของร่องผิวจะมีความลึกมากขึ้น และเมื่อมุมการดัดเพิ่มสูงขึ้นพบว่าขอบผิวด้านนอกจะปรากฏรอยแตกขนาดเล็กในตำแหน่งกึ่งกลางของส่วนโค้ง เมื่อมุมการดัดเพิ่มขึ้นที่ 75 องศา พบว่ารอยแตกร้าวเกิดการขยายตัวกว้างขึ้นดังรูปที่ 17 และจากการดัดขึ้นรูปใช้อัตราส่วน t/r สูง ($t/r=20$) พบว่าจำนวนเส้นของการแตกร้าวจะเพิ่มมากขึ้น (ดังรูปที่ 9) ซึ่งรอยแตกร้าวจะเริ่มต้นเกิดขึ้นที่มุมการดัด 30 องศา และเมื่อมุมการดัดเพิ่มสูงขึ้นรอยแตกร้าวดังกล่าวจะขยายตัวไปตามแนวขอบเกรน ในทิศ

ทางเข้าสู่กึ่งกลางขึ้นทดสอบอย่างต่อเนื่องจนถึงที่มุมการดัด 75 องศา พบว่ารอยแตกร้าวมีการขยายตัวผ่านส่วนกึ่งกลางความหนาเข้าสู่พื้นผิวด้านในของขึ้นทดสอบและรอยแตกที่ขอบผิวด้านนอกเกิดการขยายตัวกว้างมากขึ้น ดังรูปที่ 18

6. การวิเคราะห์ผลการทดลอง

6.1 แรงดัดขึ้นรูปและการดัดตัวกลับ

จากผลการทดลองซึ่งพบว่าแรงดัดขึ้นรูปมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออัตราส่วนของความหนาขึ้นงานและรัศมีการดัดเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้รัศมีการดัดคงที่และเลือกการเปลี่ยนแปลงขนาดความหนาของแผ่นวัสดุเพื่อให้ได้อัตราส่วน t/r ตามข้อกำหนดการทดลอง เมื่ออัตราส่วน t/r เพิ่มสูงขึ้นจึงต้องใช้แรงในการดัดขึ้นรูปเพิ่มมากขึ้น เพื่อเอาชนะค่าความเค้นครากของวัสดุ ดังนั้นการขึ้นรูปขึ้นงานเพื่อให้ได้ขนาดมุมเพิ่มขึ้นจึงต้องเพิ่มแรงเพื่อให้วัสดุขึ้นงานเกิดการเปลี่ยนรูปถาวรมากขึ้นและชดเชยพฤติกรรมความเครียดแข็งซึ่งทำให้วัสดุมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นรวมทั้งผลกระทบจากแรงกดด้านข้างและความเสียหายจากลูกกลิ้งรองรับทั้งสองด้าน เมื่อขึ้นงานถูกกดให้ไหลตัวลึกมากขึ้นจึงส่งผลให้เกิดพื้นที่สัมผัสระหว่างพื้นผิวขึ้นงานและผิวลูกกลิ้งรองรับเพิ่มมากขึ้น ซึ่งส่งผลโดยตรงทำให้มีค่าความเสียหายเพิ่มขึ้น

ผลการศึกษาพฤติกรรมการดัดตัวกลับของวัสดุพบว่าขนาดของมุมดัดตัวกลับมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วน t/r เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากที่ผ่านมามีนักวิจัยหลายท่าน [24]–[26] ได้รายงานผลการศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการดัดตัวกลับของวัสดุ กล่าวโดยสรุปคือขนาดการดัดตัวกลับของแผ่นวัสดุจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อขนาดของการเปลี่ยนรูปถาวรเพิ่มขึ้น ซึ่งการดัดขึ้นรูปโดยใช้รัศมีพันซ์ขนาดเล็กหรืออัตราส่วนระหว่างความหนาของแผ่นขึ้นงานและขนาดของรัศมีพันซ์ (t/r) มีค่าเพิ่มมากขึ้น จะเป็นลักษณะของการขึ้น

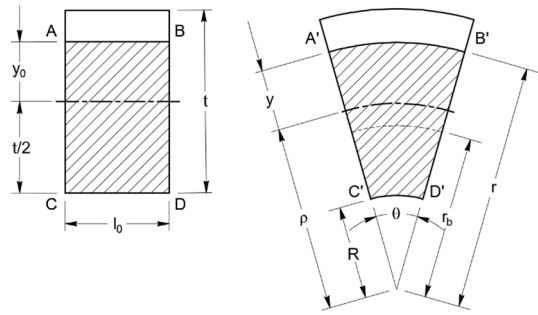
รูปชิ้นงานในพื้นที่แคบ ทำให้ค่าความเค้นบริเวณดังกล่าวเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ร่วมกับเมื่อมีแรงกดเพิ่มขึ้นเพื่อการเพิ่มขนาดมุมชิ้นงาน ทำให้ขนาดของการเปลี่ยนรูปถาวรบริเวณดังกล่าวเพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลทำให้ขนาดของมุมติดตัวกลับน้อยลง

6.2 การเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวและวิวัฒนาการ

ความเสียหาย

จากผลการทดลองซึ่งพบว่ากรณีใช้อัตราส่วน t/r มีค่าต่ำชิ้นงานจะมีคุณภาพพื้นผิวที่ดีกว่า และกรณีทำการตัดด้วยอัตราส่วน t/r สูง เมื่อมุมการตัดเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้พื้นผิวมีค่าความหยาบเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนปรากฏเป็นรอยแตก และเกิดการขยายตัวของรอยแตกเข้าสู่กึ่งกลางความหนาชิ้นงานมากขึ้น เนื่องจากกรณีอัตราส่วน t/r สูงหรือเมื่อมุมการตัดชิ้นรูปเพิ่มสูงขึ้น จะส่งผลต่อโมเมนต์การตัด ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความเค้นดึงบริเวณพื้นผิวภายนอกของมุมตัด ดังนั้นบริเวณพื้นผิวการตัดที่ถูกขึ้นรูปด้วยพันธขนาดเล็กหรือมีอัตราส่วน t/r สูง รวมทั้งเมื่อมุมการตัดเพิ่มสูงขึ้นทำให้พื้นผิวด้านนอกเกิดการยึดตัวในลักษณะของความเครียดแนวแกน (Biaxial Stress) [27] ซึ่งสันนิษฐานได้ว่าค่าความเครียดจากการตัดเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นของระยะห่างจากพื้นผิวการตัดถึงกึ่งกลางของความหนาแผ่นชิ้นงาน ส่วนขึ้นทดสอบที่มีค่าความหนาน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับรัศมีการตัดหรือมีอัตราส่วน t/r ต่ำ การเปลี่ยนรูปที่เกิดขึ้นจากการตัดจะอยู่ภายใต้ความเครียดแบบระนาบ (Plane Strain) และอยู่ภายใต้เงื่อนไขของความหนาและความยาวของเส้นแกนกลาง (Neutral Axis) คงที่ ซึ่งรูปแบบการเปลี่ยนรูปภายใต้ความเค้นแบบระนาบดังรูปที่ 19

โดยระยะจากจุดศูนย์กลางการตัดถึงเส้นแกนกลางจะถูกแทนด้วย p เมื่อขนาดของมุมการตัดเพิ่มสูงขึ้นและแผ่นชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนรูปในลักษณะของการเปลี่ยนแปลงค่าความยาวที่พื้นผิวภายนอก ($A' - B'$) หรือ l_a ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (7)



รูปที่ 19 ตัวแปรของกลไกการเปลี่ยนรูปจากการตัดชิ้น

รูป [11]

$$l_a = \rho \theta \quad (7)$$

และ ปริมาณการเปลี่ยนรูปจากการตัด สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (8)

$$\frac{\theta}{2} (R_0^2 - R^2) \cdot 1 \quad (8)$$

ดังนั้นจากทฤษฎีของความเครียดระนาบ ซึ่งกำหนดให้ขนาดความหนาชิ้นงานมีค่าคงที่ ทำให้ขนาดความยาว y (ระยะจากพื้นผิวด้านนอกถึงเส้นแกนกลาง) จึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงภายหลังการตัดชิ้นรูป ส่วนการตัดชิ้นรูปด้วยรัศมีพันธขนาดเล็กหรือแผ่นชิ้นงานมีค่าความหนาสูง (ค่า t/r สูง) เมื่อมุมการตัดเพิ่มสูงขึ้นจึงส่งผลให้พื้นผิวภายนอกเกิดการยึดตัวอย่างต่อเนื่องและมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนา เมื่อค่าความเค้นที่เกิดขึ้นสูงกว่าค่าความแข็งแรงของวัสดุ ส่งผลให้เกรนภายในโครงสร้างของวัสดุบริเวณดังกล่าวมีการเลื่อนตัวในลักษณะของระนาบการเฉือน [28] ทำให้พื้นผิวภายนอกมีลักษณะเป็นผิวคลื่น พื้นผิวมีความหยาบมากขึ้น จากนั้นจะปรากฏเป็นรอยแตกขนาดเล็กและขยายตัวไปตามแนวขอบเกรนซึ่งเป็นส่วนที่มีความแข็งแรงน้อยกว่า จนเกิดเป็นรอยฉีกขาดขนาดใหญ่เมื่อมุมการตัดเพิ่มสูงขึ้น

ดังนั้นในการประยุกต์ใช้สำหรับงานอุตสาหกรรม หากต้องการตัดชิ้นรูปโลหะแผ่นอลูมิเนียมเกรด

AA6016 ด้วยรัศมีการดัดต่ำ (0.25 มิลลิเมตร) ที่มุมการดัดสูงสุด 75 องศา จึงไม่ควรให้แผ่นวัสดุมีความหนาเกิน 1 มิลลิเมตร หรืออัตราส่วน $t/r \leq 4$ หรือหากต้องใช้แผ่นวัสดุที่มีค่าความหนามากกว่า 1 มิลลิเมตร จะต้องเพิ่มขนาดของรัศมีพันซ์ เพื่อควบคุมไม่ให้ค่าความหนามากกว่าค่ารัศมีพันซ์เกิน 4 เท่า หรือใช้วิธีการลดขนาดมุมการดัดลง ทั้งนี้เพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายของชิ้นงานหลังการดัดขึ้นรูป

7. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองเพื่อศึกษาและเปรียบเทียบความสามารถในการดัดขึ้นรูปวัสดุ ด้วยวิธีการทดสอบการดัดขึ้นรูปแบบอิสระจากผลการทดลองสรุปได้ว่า

1. เมื่ออัตราส่วนของความหนาชิ้นงานและรัศมีการดัด (t/r) เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลทำให้ความสามารถในการดัดขึ้นรูปของวัสดุลดลง

2. อัตราส่วน t/r ที่เพิ่มสูงขึ้นหรือเมื่อมุมการดัดเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้พื้นผิวการดัดของชิ้นทดสอบมีความหยวบมากขึ้นและชิ้นทดสอบมีแนวโน้มเกิดรอยแตกร้าวและฉีกขาดได้ง่ายขึ้น

3. มุมดัดตัวกลับจะแปรผกผันกับอัตราส่วน (t/r) กล่าวคือเมื่ออัตราส่วน (t/r) สูงขึ้นจะส่งผลให้ขนาดมุมการดัดตัวกลับลดลง

4. รอยแตกร้าวจะเริ่มก่อตัวที่บริเวณกึ่งกลางของพื้นผิวภายนอกมุมดัดเมื่อมุมการดัดเพิ่มขึ้น และเมื่ออัตราส่วน t/r เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลทำให้จำนวนของรอยแตกร้าวบนพื้นผิวมีปริมาณมากขึ้น

5. รอยแตกร้าวจะขยายตัวอย่างต่อเนื่องในรูปแบบระนาบการเฉือนไปตามแนวขอบเกรนในทิศทางเข้าสู่กึ่งกลางความหนาของชิ้นทดสอบเมื่อมุมการดัดเพิ่มขึ้น

8. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ที่ให้การสนับสนุน

งบประมาณในการดำเนินการวิจัย งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Sarkar, T.R.G. Kutty, D. S. Wilkinson, J. D. Embury and D. J. Lloyd, "Tensile properties and bendability of T4 treated AA6111 aluminum alloys," *Materials Science and Engineering A*, vol. 369, pp. 258–266, 2004.
- [2] J. R. Davis, "Aluminum and aluminum alloys," *ASM specialty handbook*. Metals Park, Ohio USA. 1994.
- [3] N. Nargundkar, "Bend allowance and springback in air bending," *Stamping Journal*, 2005.
- [4] J. Wang, S. Verma, R. Alexander and J.T. Gau, "Springback control of sheet metal air bending process," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 10, pp. 21–27, 2008.
- [5] E. Saric, M. Mehmedovic and M. Butkovic, "Analysis of springback in air bending process," *Journal for Technology of Plasticity*, vol. 41, pp. 35–43, 2016.
- [6] M. Gedeon, "Formability and bend testing," *Technical Tidbits*, no. 9, 2009.
- [7] ISO 7438:2010, "Metallic materials Bend test," *The Government Gazette*, vol. 129, pp. 7–14, 2010.
- [8] A. Davidkov, R. H. Petrov and P. D. Smet, "Microstructure controlled bending response in AA6016 Al alloys," *Materials Science and Engineering A*, vol. 528, pp. 7068–76, 2011.

- [9] L. J. Vin, "Curvature prediction in air bending of metal sheet," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 100, pp. 257-261, 2000.
- [10] Bending Test, Steel Institute of Thailand, <https://www.mtec.or.th/mcu/phml/index.php/th/2014-09-12-03-39-42/18-bending-test>.
- [11] W. F. Hosford, and R. M. Caddell, *Metal Forming Mechanics and Metallurgy*, (3rd ed.), pp. 195-205, 2007.
- [12] F.J. Gardiner, "The Spring Back of Metals," *Trans. ASME*, vol. 79, 1975.
- [13] W. Y. Chien, J. Pan and S. C. Tang, "A combined necking and shear localization analysis for aluminum sheets under biaxial stretching conditions," *International Journal of Plasticity*, vol. 20, pp. 1953-1981, 2010.
- [14] J. Steninger and A. Melander, "The roles of sulphides, oxides and pearlite in the ductile fracture of a niobium micro alloyed steel," *Materials Science and Engineering*, vol. 52, pp. 239-248, 1982.
- [15] J. Sarkar, T. R. G. Kutty, K. T. Conlon, D. S. Wilkinson, J. D. Embury and D. J. Lloyd, "Tensile and bending properties of AA5754 aluminum alloys," *Materials Science and Engineering A*, vol. 316, pp. 52-59, 2001.
- [16] A. Davidkov, M. K. Jain and R. H. Petrov, "Strain localization and damage development during bending of Al-Mg alloy sheets," *Materials Science and Engineering A*, vol. 550, pp. 395-407, 2012.
- [17] L. Mattei, D. Daniel, G. Guiglionda, H. Klocker and J. Driver, "Strain localization and damage mechanisms during bending of AA6016 sheet," *Materials Science & Engineering A*, vol. 559, pp. 812-821, 2013.
- [18] K. Markus and M. Marion, "Bendability of advanced high strength steels-A new evaluation procedure," *Manufacturing Technology*, vol. 62, pp. 247-250, 2013.
- [19] B. Silva, K. Isik, A. E. Tekkaya, A. G. Atkins and P. A. F. Martins, "Fracture toughness and failure limits in sheet metal forming," *Materials Processing Technology*, vol. 234, pp. 249-258, 2016.
- [20] S. E. Clift, P. Hartley, C. E. Sturgess and G. W. Rawe, "Fracture prediction in plastic deformation processes," *Int. Mechanical Science*, vol. 32, no. 1, pp. 1-17, 1990.
- [21] Y. B. Bao and T. Wierzbicki, "On cut-off value of negative triaxiality for fracture," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 72, pp. 1049-1069, 2005.
- [22] P. Castany, F. Despois, C. Bezençon and A. Mortensena, "Influence of quench rate and microstructure on bendability of AA6016 aluminum alloys," *Materials Science and Engineering A*, vol. 559, pp. 558-565, 2013.
- [23] N. Pornputsiri, "Effect of process parameters on springback behaviour during air bending of aluminum alloy sheet AA6016," *RMUTP Research Journal*, vol. 11, no. 2, pp. 155-166, 2017.
- [24] M. S. Buang, S. A. Abdullah and J. Saedon, "Effect of Die and Punch Radius on

- Springback of Stainless Steel Sheet Metal in the Air V-Die Bending Process,” *Mechanical Engineering and Sciences*, vol. 8, pp. 1322-1331, 2015.
- [25] K. K. Dilip, K. K. Appukuttan, V. L. Neelakantha and P. S. Naik, “Experimental determination of spring back and thinning effect of aluminum sheet metal during L-bending operation,” *Materials & Design*, vol. 56, pp. 613-619, 2014.
- [26] D. Vasudevan, R. Srinivasan and P. Padmanabhan, “Effect of process parameters on springback behavior during air bending of electrogalvanised steel sheet,” *Journal of Zhejiang University Science A*, vol. 12, pp. 183-189, 2011.
- [27] F. Yoshida, T. Okada and M. Itoh, “Bendability of Aluminium and Steel Clad Chromium Plates,” *Metals and material*, vol. 4, no. 3, pp. 426-431, 1998.
- [28] L. Mattei, D. Daniel, G. Guiglionda, H. Klocker and J. Driver, “Strain localization and damage mechanisms during bending of AA6016 sheet,” *Materials Science & Engineering A*, vol. 559, pp. 812-821, 2013.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

ผลของแรงต้านอากาศต่อการตกของกรวยกระดาษด้วยเทคนิคการวิเคราะห์วิถีโออัตรเร็วสูง

จิราภรณ์ ปุณยวัจน์พรกุล* และ วิไลพร ลักษมีวาณิชย์

ภาควิชาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่
202 ถนนโชตนา ตำบลช้างเผือก อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300

รับบทความ 17 มกราคม 2564 แก้ไขบทความ 7 พฤษภาคม 2564 ตอรับบทความ 4 มิถุนายน 2564

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของแรงต้านอากาศต่อการตกของกรวยกระดาษด้วยเทคนิคการวิเคราะห์วิถีโออัตรเร็วสูง การดำเนินงานวิจัยได้ใช้กล้องวิดีโออัตราเร็วสูงบันทึกการเคลื่อนที่ ด้วยอัตรา 240 ภาพต่อวินาที และใช้โปรแกรมแทรกเกอร์ ในการวิเคราะห์การตกแบบมีแรงต้านของกรวยกระดาษสี่ขนาด (มวลเท่ากันที่ 12 กรัม) และปล่อยที่ระดับความสูง 2.50 เมตร ผลจากการศึกษาพบว่า 1) กรวยกระดาษทั้งสี่ขนาดไม่ได้ตกอย่างอิสระตามแรงโน้มถ่วงของโลก เนื่องจากอัตราเร็วของกรวยกระดาษไม่ได้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับเวลา และพบว่ากรวยกระดาษขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.00 และ 5.70 เซนติเมตร มีการเข้าสู่อัตราเร็วปลายคงที่ ที่ 4.42 ± 0.03 และ 3.97 ± 0.04 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ มีร้อยละความแตกต่างเฉลี่ยจากค่าทางทฤษฎีร้อยละ 0.87 2) เมื่อศึกษาเส้นทางการเคลื่อนที่ของกรวยกระดาษด้วยนำค่าอัตราเร็วปลายที่เข้าสู่ค่าคงที่จากการทดลองไปแทนค่าในสมการตำแหน่งที่เป็นฟังก์ชันของเวลา พบว่ามีเส้นทางใกล้เคียงกับเส้นทางจริงซึ่งได้จากการติดตามการเคลื่อนที่ของกรวยกระดาษ 3) การทดลองนี้ทำให้เห็นว่าแรงต้านอากาศที่กระทำต่อกรวยกระดาษแปรผันตามอัตราเร็วกำลังสองโดยพบว่าแรงต้านที่คงที่ในช่วงความเร่งเข้าสู่ศูนย์ มีค่าใกล้เคียงน้ำหนักของกรวยกระดาษ มีร้อยละความแตกต่างอยู่ที่ร้อยละ 2.51 ดังนั้นการศึกษาการตกแบบมีแรงต้านของกรวยกระดาษด้วยเทคนิคการวิเคราะห์วิถีโออัตรเร็วสูงนี้สามารถพิสูจน์ทฤษฎี เป็นแนวทางให้ผู้สอนนำไปอธิบายเพื่อเชื่อมโยงเนื้อหาการตกแบบมีแรงต้านในห้องเรียนกับสถานการณ์จริง

คำสำคัญ : การตกแบบมีแรงต้าน; กรวยกระดาษ; เทคนิคการวิเคราะห์วิถีโออัตรเร็วสูง; อัตราเร็วปลาย; แรงต้านการเคลื่อนที่

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 6919 3366, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: jiraporn.poon@g.cmru.ac.th

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Effect of Dragging Force on Paper Cone Falling Using High-Speed Video Analysis Technique

Jiraporn Poonyawatpornkul* and Vilaiporn Luksameevanish

Department of Physics and General Science, Faculty of Science and Technology, Chiang Mai
Rajabhat University
202 Chotana road, Chang Puak, Maung, Chiangmai 50300

Received 17 January 2021; Revised 7 May 2021; Accepted 4 June 2021

Abstract

This research was aimed to study of the effect of dragging force on paper cone falling by using the high-speed video analysis technique. Four different sizes of paper cones, ranged from 3.00-5.70 centimeter were used. The cones, having the same mass of 12 g and falling from 2.50 meters height, were recorded for 240 frames per second and then were analyzed using the Tracker Video Analysis software. The results showed that (1) all four different sizes of paper cones were not freely fall with the Earth's gravity, due to indirect proportion with time of theirs speeds. The terminal speed of two large cones having diameter of 5.00 and 5.70 centimeters were 4.42 ± 0.03 and 3.97 ± 0.04 meters per second, respectively. Only 0.87% of these experimental values were different from the theoretical ones. (2) The theoretical trajectory of these cones falling, using the terminal speed from the experimental, agrees with the theoretical ones. (3) The experimental drag force showed a second order function of the paper cone's speed. The evaluated drag force, during terminal area, is approximately equal to the cone weight. Thus, this technique can help students and teachers to visualize simple physics phenomena and relate them to the physics principles learnt in the classroom.

Keywords : Falling with Drag; Paper Cone; High-speed Video Analysis Technique; Terminal Speed; Drag Force

* Corresponding Author. Tel.: +668 6919 3366, E-mail Address: jiraporn.poon@g.cmru.ac.th

1. บทนำ

การออกแบบมีแรงต้านของวัตถุเป็นหัวข้อหนึ่งในรายวิชาฟิสิกส์ที่มีความสำคัญและเป็นพื้นฐานสำหรับการประยุกต์ใช้ในกลศาสตร์ขั้นสูงเพื่อเข้าใจและสามารถอธิบายปรากฏการณ์ธรรมชาติ เช่นการกระโดดร่ม การตกของวัตถุหรือเม็ดฝนผ่านอากาศ หรือการตกของวัตถุในของเหลว เป็นต้น เมื่อผู้เรียนเข้าใจลักษณะการเคลื่อนที่ของวัตถุอย่างลึกซึ้งจะนำไปสู่การพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อเกิดประโยชน์และอำนวยความสะดวกแก่มวลมนุษย์ เช่นการออกแบบร่มชูชีพ (Parachute) บอลลูน (Hot Air Balloon) หรือ อากาศยาน (Aircraft) เป็นต้น การเรียนรู้วิทยาศาสตร์ผ่านการทดลองช่วยให้ผู้เรียนเข้าใจเนื้อหาและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องอย่างลึกซึ้ง ดังคำกล่าวที่ว่า “Learning by Doing” [1] เนื่องจากทักษะการทดลองเป็นการผสมผสานเอาทักษะกระบวนการหลายทักษะไว้รวมกัน เช่นการกำหนดตัวแปร การออกแบบการทดลอง การสังเกตและบันทึกผลการทดลอง รวมถึงการแปลความหมายข้อมูลอย่างถูกต้องและตรงไปตรงมา ทำให้ผู้เรียนสามารถเชื่อมโยงและอธิบายปรากฏการณ์ธรรมชาติได้อย่างถูกต้อง [2] ดังงานวิจัยของ A. Mooldijk, T. V. D. Valk และ J. Wooning [3] ที่ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างมุมของกรวยกระดาศกับสัมประสิทธิ์ของแรงต้าน ซึ่งส่งผลต่ออัตราเร็วสูงสุดในการตกของกรวยกระดาศ โดยใช้เซนเซอร์ตรวจจับตำแหน่งกับเวลาเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์และวิเคราะห์การเคลื่อนที่ด้วยโปรแกรม Coach 5 ผลการทดลองพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงต้านขึ้นอยู่กับมุมของกรวยกระดาศ และเป็นไปตามทฤษฎี นอกจากนี้คณะวิจัยได้ใช้การทดลองนี้ควบคู่กับการสืบเสาะหาความรู้ของนักเรียนเพื่อศึกษาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจากการตกของกรวยกระดาศ ทำให้นักเรียนสามารถต่อยอดความรู้จากการทดลองสำหรับหาค่าความเร็วสูงสุดในการตกของกรวยกระดาศได้ แต่อย่างไรก็ตามการทดลองที่เหมาะสมกับการเรียน

การสอนลักษณะนี้ค่อนข้างมีน้อย บางครั้งก่อให้เกิดความเข้าใจคลาดเคลื่อน โดยผู้เรียนบางคนเข้าใจว่าวัตถุที่อยู่ภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลกต่างก็ตกลงบนพื้นโลกในลักษณะเดียวกันคือตกด้วยความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก เช่น ผู้เรียนอธิบายว่า “เมื่อปล่อยวัตถุที่มาจากโลหะและสำล้อย่างละ 1 กิโลกรัมพร้อมกัน วัตถุทั้งสองตกลงมาด้วยความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกตลอดการเคลื่อนที่เหมือนกัน ส่งผลให้วัตถุทั้งสองตกถึงพื้นพร้อมกัน” [4] จากการให้เหตุผลดังกล่าวทำให้เห็นว่าผู้เรียนขาดความเข้าใจเกี่ยวกับแรงต้านที่กระทำต่อวัตถุ จึงไม่สามารถอธิบายและเชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่างปรากฏการณ์ทางธรรมชาติจริงกับทฤษฎีทางฟิสิกส์ได้ สาเหตุอาจเป็นเพราะความขาดแคลนสื่อการสอนหรือกิจกรรมการทดลองที่เหมาะสม สำหรับเชื่อมโยงหลักการทางทฤษฎีกับปรากฏการณ์ธรรมชาติของการออกแบบมีแรงต้านของวัตถุ จากตัวอย่างงานวิจัยที่พบความเข้าใจคลาดเคลื่อนในลักษณะดังกล่าว จึงมีนักวิจัยทางฟิสิกส์ศึกษาได้หาแนวทางในการแก้ไขปัญหานี้ โดยนำเทคนิคการถ่ายภาพวิดีโออัตราเร็วสูงเข้ามามีบทบาทในวงการการศึกษามากขึ้นเนื่องจากสามารถติดตามการเคลื่อนที่จริงของวัตถุ สามารถวิเคราะห์การเคลื่อนที่ได้อย่างละเอียด อีกทั้งยังช่วยให้ประหยัดเวลาในการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง [5] ดังตัวอย่างการศึกษาต่อไปนี้ S. Phommarach และ P. Wattanakasiwich [6] ได้ใช้เทคนิคการวิเคราะห์วิดีโออัตราเร็วสูงในการศึกษาการกลิ้งของทรงกระบอกตันและกลวงเพื่อใช้ประกอบการเรียนการสอนในชั้นเรียนและช่วยอธิบายผลของความเข้าใจที่คลาดเคลื่อนเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของทรงกระบอกทั้งสองลักษณะ ส่งผลให้สามารถหามุมวิกฤตที่ทำให้ทรงกระบอกทั้งสองกลิ้งโดยไม่ไถลได้ โดยค่าจากการคำนวณทางทฤษฎีของมุมวิกฤตมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง ผลจากการวิจัยนี้ถูกนำไปอธิบายประกอบการสัมภาษณ์ นักศึกษาชั้นปีที่ 1 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัย

เชียงใหม่ และพบว่านักศึกษาส่วนใหญ่มีความเข้าใจที่คลาดเคลื่อนเกี่ยวกับเรื่องโมเมนต์ความเฉื่อย บทบาทของแรงเสียดทานที่มีต่อการกลิ้ง งานในการกลิ้งรวมถึงความเร่งของจุดศูนย์กลางมวลของทรงกระบอกแบบต่าง ๆ เป็นต้น การศึกษาอีกด้านหนึ่งของงานวิจัยนี้เป็นการนำข้อมูลจากการสัมภาษณ์ไปออกแบบชุดอุปกรณ์สาธิตการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง วิดีโอการสาธิตและใบกิจกรรม เพื่อประกอบการบรรยายเชิงมีปฏิสัมพันธ์ ผลจากการวิจัยพบว่าการสอนโดยใช้สื่อสาธิตประกอบการบรรยายมีประสิทธิภาพมากกว่าการสอนแบบบรรยายเพียงอย่างเดียว L. K. Wee et al. [7] ได้รายงานเกี่ยวกับการใช้โปรแกรมแทรกเกอร์วิเคราะห์วิดีโอการเคลื่อนที่สำหรับการเรียนการสอนเรื่องการเคลื่อนที่แบบโปรเจกไทล์ในวิชาฟิสิกส์อย่างมีประสิทธิภาพ กระบวนการเรียนรู้ที่เปิดโอกาสให้นักเรียนมีส่วนร่วมในการเรียนรู้แบบสืบเสาะหาความรู้ ร่วมกับการใช้โปรแกรมแทรกเกอร์ในการแก้ไขความเข้าใจคลาดเคลื่อนที่พบทั่วไปเกี่ยวกับการเคลื่อนที่แบบโปรเจกไทล์ โดยกิจกรรมได้กำหนดให้นักเรียนทดสอบสมมติฐานของพวกเขาโดยการสร้างแบบจำลองและเปรียบเทียบกับการวิเคราะห์วิถีโอยของการเคลื่อนที่จริง ผลการวิจัยเบื้องต้นชี้ให้เห็นว่าผู้เรียนสามารถเชื่อมโยงแนวคิดทางฟิสิกส์เชิงนามธรรมกับชีวิตจริงผ่านการสร้างแบบจำลองคอมพิวเตอร์ร่วมกับการวิเคราะห์วิถีโอย เป็นวิธีที่สร้างสรรค์และมีประสิทธิภาพในการเรียนรู้เรื่องการเคลื่อนที่แบบโปรเจกไทล์ J. Poonyawatpornkul และ P. Wattanakasiwich [8] ได้ใช้เทคนิคการวิเคราะห์วิดีโออัตราเร็วสูง ในการศึกษาการเคลื่อนที่แบบสั้นของวัตถุติดสปริงในกลีเซอริน พบว่าเทคนิคนี้สามารถทำให้เห็นภาพการสั้นของวัตถุติดสปริงในกลีเซอรินที่อุณหภูมิต่างกัน มีสามลักษณะสำคัญคือ การเคลื่อนที่แบบหน่วงด้อย (Underdamping) การหน่วงวิกฤต (Critical Damping) และการหน่วงเกิน (Overdamping) นอกจากนี้เมื่อนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับค่า

ทางทฤษฎีของตัวแปรที่เกี่ยวข้องพบว่ามีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย J. Poonyawatpornkul และ V. Luksameevanish [9] ได้ศึกษาการไถลลงพื้นเอียงของแผ่นไม้ มวล 46.3 กรัม ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์วิดีโออัตราเร็วสูง ด้วยอัตราการบันทึกภาพ 120 ภาพต่อวินาที การศึกษาพบว่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจลน์และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิตมีค่า 0.40 และ 0.48 ตามลำดับ มุมวิกฤตที่ทำให้แผ่นไม้เริ่มไถลลงพื้นเอียงมีค่าประมาณ 25.66 ± 0.23 องศา โดยพลังงานกลรวมในระบบของมีค่าลดลง เนื่องจากมีแรงเสียดทาน เมื่อแผ่นไม้เกิดการไถลพงานเนื่องจากแรงเสียดทานมีค่าเพิ่ม และเมื่อรวมค่างานเนื่องจากแรงเสียดทานกับพลังงาน จะได้ค่าพลังงานรวมค่อนข้างคงที่แสดงให้เห็นว่า ระบบนี้สอดคล้องกับทฤษฎีการอนุรักษ์พลังงาน การใช้เทคโนโลยีวิดีโออัตราเร็วสูงสามารถใช้เป็นเครื่องมือในการทดลองในห้องปฏิบัติการ อีกทั้งสามารถเชื่อมโยงหลักการทางทฤษฎีกับสถานการณ์จริง ทำให้ผู้เรียนสามารถมองเห็นภาพการเคลื่อนที่ที่เป็นนามธรรมได้ และสามารถต่อยอดประยุกต์ใช้ทฤษฎีทางฟิสิกส์เพื่อพัฒนาเป็นเทคโนโลยีขั้นสูงต่อไป ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจใช้เทคนิคการวิเคราะห์วิถีโอยอัตราเร็วสูงเพื่อศึกษาการตกแบบมีแรงต้านของกรวยกระดาษ พร้อมทั้งเปรียบเทียบผลทางทฤษฎีกับผลการทดลองสำหรับการเชื่อมโยงทฤษฎีกับการเคลื่อนที่จริง

2. ระเบียบวิธีวิจัย

การศึกษาผลของแรงต้านอากาศต่อการตกของกรวยกระดาษ เป็นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการถ่ายภาพวิดีโออัตราเร็วสูง หรือที่เรียกว่าเทคนิคการวิเคราะห์วิถีโอยอัตราเร็วสูงมาศึกษาลักษณะการตกแบบมีแรงต้านของกรวยกระดาษขนาดที่แตกต่างกัน พร้อมทั้งเปรียบเทียบผลทางทฤษฎีกับผลการทดลอง เพื่อให้เห็นถึงความแม่นยำในการใช้เทคนิคนี้ในการศึกษาทดลองทางฟิสิกส์ การดำเนินงานวิจัยประกอบด้วยขั้นตอนสำคัญดังต่อไปนี้

2.1 ขั้นตอนการวิจัย

การจัดเตรียมวัสดุและอุปกรณ์เพื่อบันทึกภาพวิดีโอการเคลื่อนที่เป็นขั้นตอนสำคัญ ต้องระมัดระวังในการจัดเตรียมเพื่อลดความคลาดเคลื่อนที่จะส่งผลต่อการวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยรายละเอียดการจัดเตรียมอุปกรณ์และการบันทึกวิดีโอการเคลื่อนที่มีดังนี้

2.1.1 การเตรียมวัสดุที่ใช้ในการศึกษาการเคลื่อนที่

จัดเตรียมลูกบอลเหล็ก มวล 39.5 กรัม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.00 เซนติเมตร และกรวยกระดาษมวลเท่ากัน (12 กรัม) ขนาดต่างกัน 4 ขนาด โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.00 3.60 5.00 และ 5.70 เซนติเมตร กำหนดชื่อเงื่อนไขเป็น C30 C36 C50 และ C57

2.1.2 การเตรียมอุปกรณ์การบันทึกวิดีโอ

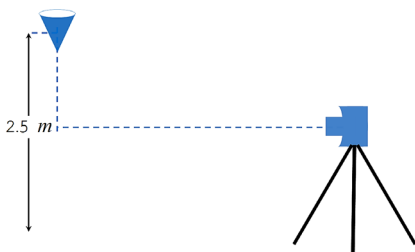
1) กำหนดจุดปล่อยกรวยกระดาษ โดยวัดระยะความสูงจากพื้นถึงจุดศูนย์กลางมวลประมาณ 2.50 เมตร

2) ติดตั้งกล้องให้สูงจากพื้นเป็นระยะครึ่งหนึ่งของระยะความสูงการปล่อยกรวยกระดาษ และให้กล้องอยู่ห่างจากฉากในระยะที่กล้องสามารถถ่ายได้ครอบคลุมการตกของกรวย ตั้งแต่จุดปล่อยถึงพื้น

3) ตั้งค่าอัตราเร็วการบันทึกภาพ 240 ภาพต่อวินาที จากกล้องวิดีโออัตราเร็วสูง (Casio EX-FH100)

4) ทำการบันทึกวิดีโอการเคลื่อนที่ของกรวยกระดาษและลูกบอล

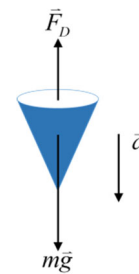
ภาพจำลองติดตั้งอุปกรณ์และการบันทึกภาพวิดีโอการตกของกรวยกระดาษแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ภาพจำลองติดตั้งอุปกรณ์และการบันทึกภาพวิดีโอการตกของกรวยกระดาษ

2.2 การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลจากการเคลื่อนที่ของกรวยกระดาษ โดยพิจารณาจากทฤษฎีการตกแบบมีแรงต้าน ดังนี้ เมื่อวัตถุตกจากที่สูงในอากาศหนึ่งด้วยอัตราเร็วต้นเป็นศูนย์และมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งทำให้เกิดแรงต้านอากาศที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราเร็วกำลังสอง ($F_D = kv^2$) แต่มีทิศทางตรงข้าม เมื่อมีแรงต้านอากาศมากระทำต่อวัตถุจะทำให้วัตถุเคลื่อนที่ช้าลงจนกระทั่งแรงต้านมีค่าเท่ากับน้ำหนักของวัตถุ ขณะนี้วัตถุจะเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วคงที่ หรืออัตราเร็วของวัตถุมีค่าเป็นศูนย์ ($a = 0$) เรียกว่า อัตราเร็วที่เข้าสู่ค่าคงที่นี้ว่าอัตราเร็วปลาย (terminal speed, v_t) จากหลักการดังกล่าวสามารถพิจารณาการตกของวัตถุภายใต้แรงต้านอากาศ ดังรูปที่ 2 โดยใช้กฎข้อสองของนิวตัน



รูปที่ 2 แรงกระทำต่อวัตถุขณะวัตถุตกลงสู่พื้น

จากรูปที่ 2 จะได้แรงลัพธ์กระทำต่อกรวยกระดาษ แสดงดังสมการที่ (1)

$$mg - F_D = m \frac{dv}{dt} \quad (1)$$

ขณะที่วัตถุเข้าสู่อัตราเร็วปลายคงที่ นั่นคือ $\frac{dv}{dt} = 0$

$$\text{จะได้} \quad v_t^2 = \frac{mg}{\kappa}$$

$$\text{กำหนดให้ ค่าคงที่} \quad \kappa = \frac{1}{2} C_D \rho A$$

ดังนั้น

$$v_t = \sqrt{\frac{2mg}{C_D \rho A}} \quad (2)$$

จากสมการที่ (1) และ (2) สามารถอินทิเกรตหาสมการอัตราเร็วที่เป็นฟังก์ชันของเวลาจะได้

$$v(t) = v_t \left(\frac{1 - e^{-2v_t \left(\frac{kt}{m}\right)}}{1 + e^{-2v_t \left(\frac{kt}{m}\right)}} \right) = \tanh\left(\frac{gt}{v_t}\right) \quad (3)$$

เมื่ออินทิเกรตสมการที่ (3) จะได้สมการตำแหน่งที่เป็นฟังก์ชันของเวลา ดังสมการ (4)

$$y(t) = \frac{v_t^2}{g} \ln \left[\cosh\left(\frac{gt}{v_t}\right) \right] \quad (4)$$

โดยที่

m = มวลของวัตถุ (กิโลกรัม)

g = ค่าอัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (เมตร

ต่อวินาทีกำลังสอง)

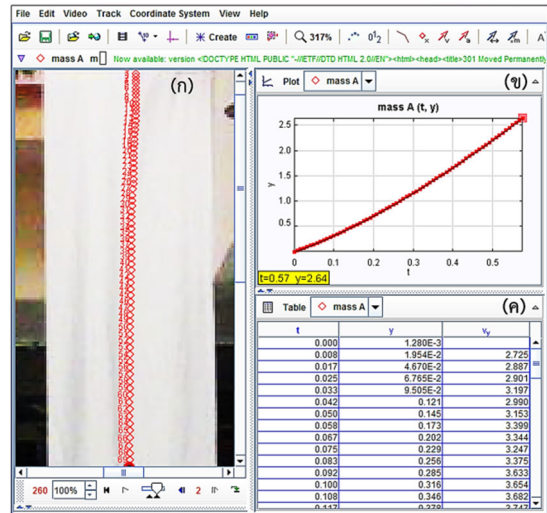
C_D = ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ (นิวตันต่อตารางเมตร)

ρ = ความหนาแน่นของอากาศ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

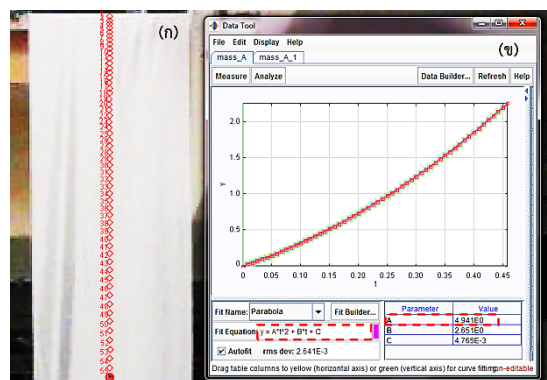
A = พื้นที่หน้าตัดของวัตถุ (ตารางเมตร)

การวิเคราะห์ข้อมูลจากการเคลื่อนที่จริงของกรวยกระดาษทั้งสี่ขนาดและลูกบอลด้วยเทคนิคการวิเคราะห์วิดีโออัตราเร็วสูง จะได้เส้นทางการเคลื่อนที่ที่ได้จากติดตามตำแหน่งด้วยโปรแกรมแทรกเกอร์ (Tracker) แสดงดังรูปที่ 3 และรูปที่ 4

การติดตามการเคลื่อนที่ของกรวยกระดาษแสดงดังรูปที่ 3(ก) จะเห็นว่าตำแหน่งกรวยกระดาษติดกันในช่วงแรกและห่างกันมากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป



รูปที่ 3 การติดตามการเคลื่อนที่ของกรวยกระดาษ



รูปที่ 4 การติดตามและวิเคราะห์หาอัตราเร่งของลูกบอล

นั่นคือกรวยกระดาษเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วมากขึ้น และช่วงปลายของการเคลื่อนที่แต่ละตำแหน่งมีระยะห่างใกล้เคียงกัน แสดงว่าช่วงปลายของการเคลื่อนที่อัตราเร็วของกรวยกระดาษมีค่าใกล้เคียงกัน เส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งตามแนวดิ่งกับเวลาดังรูปที่ 3(ข) จะทำให้เห็นภาพการเคลื่อนที่ชัดเจนมากขึ้น และนอกจากนี้การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมแทรกเกอร์สามารถได้ชุดข้อมูลเป็นเวลา (t) ตำแหน่งตามแนวดิ่ง (y) และอัตราเร็วตามแนวดิ่ง (v_y) ดังรูปที่ 3(ค) โดยสามารถคัดลอกชุดข้อมูลนี้แล้วนำไปวิเคราะห์ในโปรแกรมอื่น ๆ ได้เช่น Microsoft excel สามารถวิเคราะห์และเปรียบเทียบลักษณะการเคลื่อนที่ของ

กรวยกระดาชเื่อนไขอื่น ๆ เพื่อหาอัตราเร็วปลาย (Terminal speed, v_t) เชื่อมโยงเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นจริงนี้กับค่าทางทฤษฎีโดยใช้สมการที่ (2) ถึง (4)

ตัวอย่างเส้นทางการเคลื่อนที่ของลูกบอล แสดงดังรูปที่ 4(ก) จะเห็นว่าระยะระหว่างตำแหน่งของลูกบอลห่างกันมากขึ้นตลอดการเคลื่อนที่ นั่นแสดงว่าลูกบอลเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วเพิ่มขึ้นตลอดเวลาหรือเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร่งนั่นเอง ชุดข้อมูลที่ได้เป็นตำแหน่งกับเวลา แสดงเป็นสัญลักษณ์ □□□ ในหน้าต่างใหม่ ดังรูปที่ 4(ข) ซึ่งเป็นชุดข้อมูลตำแหน่งตามแนวดิ่งกับเวลาของลูกบอล การวิเคราะห์ข้อมูลตำแหน่งกับเวลาด้วยโปรแกรมแทรกเกอร์นี้ สามารถหาค่าอัตราเร่งของลูกบอล ได้ด้วยการเลือกสมการในโปรแกรมแทรกเกอร์ ให้ตรงกับลักษณะการเคลื่อนที่ จากกราฟข้อมูลตำแหน่งกับเวลาของลูกบอล มีลักษณะเป็นเส้นโค้งพาราโบลา ดังนั้นแบบจำลองสมการที่เลือกใช้ คือ $y = A*t^2 + B*t + C$ จะเกิดเส้นกราฟที่เหมาะสม (fit) ทั้กับข้อมูลการทดลองตำแหน่งกับเวลาพอดี (เส้นกราฟทึบ) เมื่อเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองกับสมการการเคลื่อนที่ $s = ut + (1/2)at^2 + s_0$ พบว่าค่าอัตราเร่ง (a) มีค่าเท่ากับ $2A$ และ A ในรูปที่ 4(ข) มีค่าเท่ากับ 4.94 ดังนั้นอัตราเร่งของลูกบอลมีค่าเท่ากับ 9.88 m s^{-2} และพบค่า rms. dev. (Root Mean Square Deviation) เท่ากับ 2.64×10^{-3} ซึ่งเป็นค่าที่น้อยมาก แสดงว่าการ fit ข้อมูลการทดลองด้วยแบบจำลองดังกล่าวมีความเบี่ยงเบนน้อยมาก [10]

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 อัตราเร็วปลายเข้าสู่ค่าคงที่

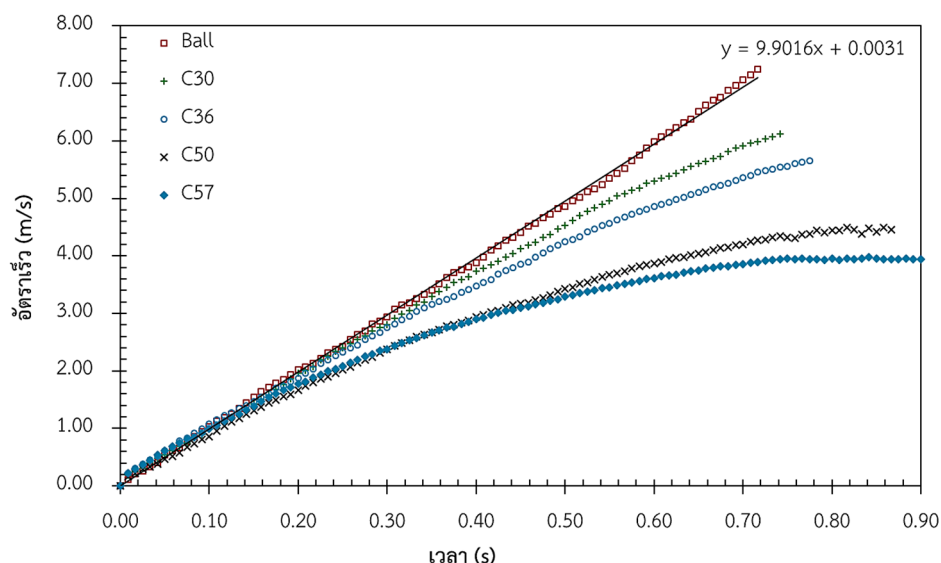
จากการติดตามการเคลื่อนที่ของลูกบอลและกรวยกระดาชทั้งสี่ขนาด ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์วิดีโอ อัตราเร็วสูงที่บันทึกการเคลื่อนที่เื่อนไขละ 3 วิดีโอ และนำค่าเฉลี่ยของชุดข้อมูลแต่ละเื่อนไขมาวิเคราะห์ พบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วกับเวลาการเคลื่อนที่ของ

ลูกบอลเปรียบเทียบกับกรวยกระดาช มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวของลูกบอลมีลักษณะเป็นเส้นตรง แสดงให้เห็นว่าอัตราเร็วเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับเวลา อัตราการเปลี่ยนแปลงของอัตราเร็วคือ อัตราเร่งของลูกบอลซึ่งได้ค่าคงที่เท่ากับ 9.90 เมตรต่อวินาทีกำลังสอง (ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมแทรกเกอร์ 3 ไฟล์) เป็นค่าที่ใกล้เคียงกับอัตราเร่งโน้มถ่วงของโลก (9.81 เมตรต่อวินาทีกำลังสอง) หรือมีร้อยละความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.91 แสดงว่า “ลูกบอลตกอย่างอิสระภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก” หรือกล่าวได้ว่า “แรงต้านอากาศกระทำต่อลูกบอลน้อยมาก จนอาจประมาณได้ว่าเท่ากับศูนย์” การเปลี่ยนแปลงของอัตราเร็วกับเวลาของลูกบอลดังกล่าวแตกต่างกรณีการเคลื่อนที่ของกรวยกระดาชที่อัตราเร็วไม่ได้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับเวลา โดยเฉพาะในช่วงเวลาหลังจาก 0.20 วินาทีของการเคลื่อนที่ แสดงให้เห็นว่าอัตราเร่งของกรวยกระดาชไม่ได้คงที่เช่นเดียวกับลูกบอล นั่นคือแรงที่กระทำต่อกรวยกระดาชมีทั้งแรงโน้มถ่วงของโลกและแรงต้านอากาศ จึงส่งผลให้ลักษณะกราฟไม่เป็นเส้นตรงและใช้เวลาในการเคลื่อนที่จากจุดปล่อยถึงพื้น (2.50 เมตร) มากกว่าหรือเท่ากับ 0.75 วินาที ซึ่งนานกว่าการเคลื่อนที่ของลูกบอลที่ใช้เวลาเพียง 0.7 นอกจากนี้ยังพบอัตราเร็วของกรวย C50 และ C57 เข้าสู่ค่าคงตัวที่ประมาณ 4.42 ± 0.03 และ 3.97 ± 0.04 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ โดยกรวย C57 ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่ามีการเข้าสู่อัตราเร็วคงที่ก่อนกรวย C50 ในขณะที่กรวยกระดาช C30 และ C36 ที่มีขนาดเล็กกว่าใช้เวลาในการตกลงถึงพื้นก่อนกรวย C50 และ C57 ไม่ปรากฏระนาบของอัตราเร็วคงตัว นั่นหมายความว่าความต้องการเห็นช่วงอัตราเร็วปลายคงที่ของกรวยกระดาชทั้งสองควรจัดให้มีระยะการเคลื่อนที่ที่มากกว่าระยะ 2.50 เมตร

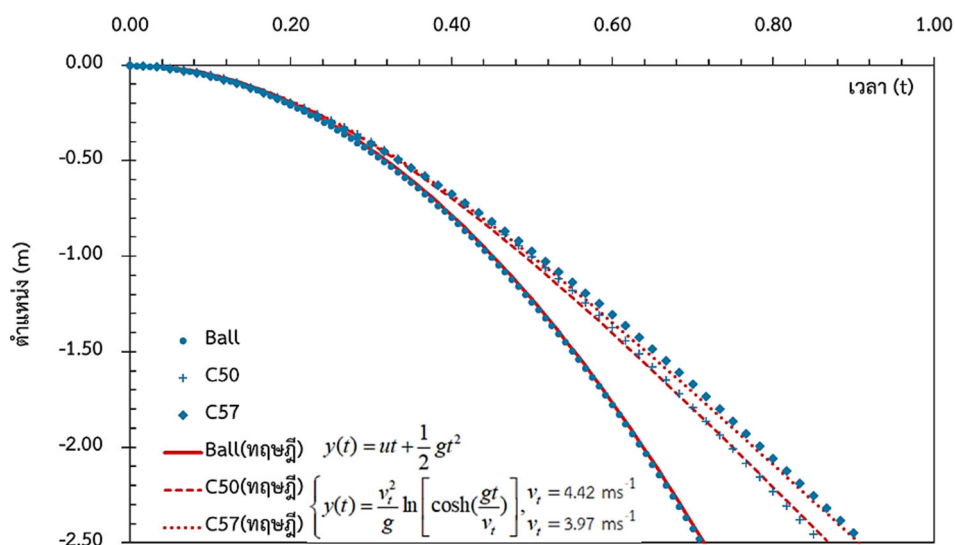
งานวิจัยนี้ได้เปรียบเทียบอัตราเร็วปลายคงที่ของกรวยกระดาช C50 และ C57 จากการเคลื่อนที่จริงกับ

ค่าได้จากการคำนวณจากสมการอัตราเร็วที่เป็นฟังก์ชันของเวลาในสมการที่ (2) เมื่อกำหนดให้สัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ (C_D) ของทรงกรวย มีค่าเท่ากับ 0.5 [11] ความหนาแน่นของอากาศ (ρ) ขณะทดลองที่ 30 องศาเซลเซียสมีค่าเท่ากับ 1.164 kg/m^3 และพื้นที่หน้าตัด

ของแต่ละกรวยที่เคลื่อนที่ผ่านอากาศมีค่าเท่ากับ 2.00×10^{-3} และ 2.55×10^{-3} ตารางเมตร ส่งผลให้อัตราเร็วปลายเชิงทฤษฎีของกรวยทั้งสองมีค่าเท่ากับ 4.49 และ 3.98 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ หรือค่าร้อยละของความแตกต่างเฉลี่ยเทียบกับผลการทดลองเท่ากับ 0.87



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วกับเวลาของลูกบอลและกรวยกระดาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.00 3.60 5.00 และ 5.70 เซนติเมตร ด้วยชื่อ Ball C30 C36 C50 และ C57 ตามลำดับ



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งกับเวลาจากการทดลองและทางทฤษฎีของลูกบอล กรวยกระดาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.00 และ 5.70 เซนติเมตร

3.2 เส้นทางการเคลื่อนที่ของกรวยกระดาศที่เข้าสู่อัตราเร็วปลายคงที่

จากการติดตามการเคลื่อนที่ของลูกบอล และกรวยกระดาศกรวยกระดาศ C50 และ C57 ซึ่งพบตำแหน่งที่กรวยกระดาศเข้าสู่ค่าคงที่ ไปวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับค่าคำนวณทางทฤษฎี พบความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งกับเวลาแสดงดังรูปที่ 6

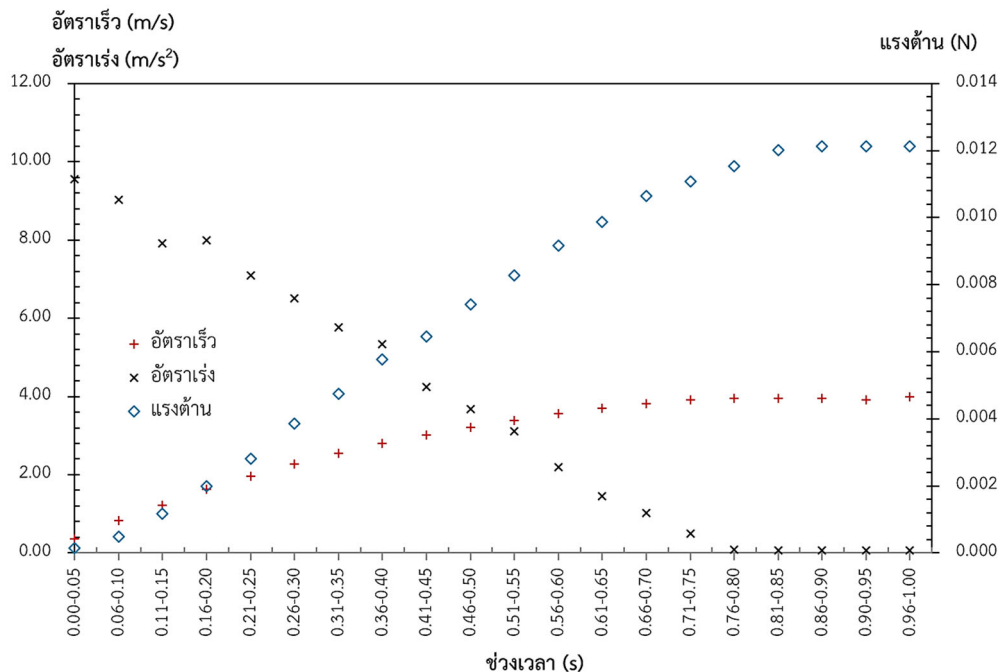
จากรูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งกับเวลาของลูกบอล กรวยกระดาศ C50 และ C57 จะเห็นว่าช่วงแรกของการเคลื่อนที่ของลูกบอลซึ่งตกอย่างอิสระและกรวยกระดาศที่มีผลจากแรงต้านอากาศแต่ละตำแหน่งค่อนข้างติดกัน แสดงว่าช่วงแรกวัตถุทั้งสองชนิดมีอัตราเร็วต่ำ และตำแหน่งของลูกบอลจะค่อย ๆ ห่างกันมากขึ้นตลอดการเคลื่อนที่ที่แสดงว่าลูกบอลเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วเพิ่มขึ้น (เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง) แต่สำหรับกรวยกระดาศช่วงปลายของการเคลื่อนที่ระยะห่างของแต่ละตำแหน่งใกล้เคียงกัน นั่นคือ ช่วงปลายของการเคลื่อนที่กรวยกระดาศมีอัตราเร็วที่ค่อนข้างคงที่ โดยกรวยกระดาศทั้งสองขนาดมีลักษณะการเคลื่อนที่คล้ายคลึงกัน เพียงแต่เข้าสู่อัตราเร็วปลายคงที่ที่เวลาและค่าที่แตกต่างกัน

เมื่อนำค่าตำแหน่งที่เป็นฟังก์ชันของเวลาซึ่งคำนวณได้จากทฤษฎีการเคลื่อนที่สำหรับการตกอย่างอิสระ ($y(t) = ut + (1/2)gt^2$) ได้กราฟที่แทนด้วยสัญลักษณ์ — และแทนค่าอัตราเร็วปลายที่เข้าสู่ค่าคงที่ที่ได้จากการทดลองของกรวย C50 และ C57 (4.42 ± 0.03 และ 3.97 ± 0.04 เมตรต่อวินาที) แทนค่าลงในสมการที่ (4) $y(t) = \frac{v_t^2}{g} \ln \left[\cosh \left(\frac{gt}{v_t} \right) \right]$ ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งตามแนวตั้ง ณ เวลาใด ๆ ซึ่งเป็นค่าทางทฤษฎี แสดงด้วยสัญลักษณ์ — และ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 6 จะเห็นว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งตามแนวตั้ง ณ เวลาใด ๆ ที่ได้จากการติดตามการเคลื่อนที่จริงกับค่าทางทฤษฎีมีค่าและลักษณะใกล้เคียงกันทั้งลูกบอลและกรวย

กระดาศ แสดงให้เห็นว่าการศึกษาอัตราเร็วปลายคงที่ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์วิดีโออัตราเร็วสูงสามารถพิสูจน์ทฤษฎีได้อย่างชัดเจน

3.3 การวิเคราะห์ อัตราเร็ว อัตราเร่ง และแรงต้านของกรวยกระดาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.70 เซนติเมตร

เพื่อให้เห็นความสัมพันธ์ของอัตราเร่ง อัตราเร็ว และแรงต้านอากาศ ที่กระทำต่อระบบการตกแบบมีแรงต้านได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ข้อมูลดังกล่าวของกรวยกระดาศ C57 จึงถูกนำมาวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยทุก ๆ ช่วงเวลา 0.05 วินาที ตลอดการเคลื่อนที่ ดังแสดงรูปที่ 7 โดยข้อมูลอัตราเร็วและอัตราเร่งได้จากการตำแหน่งการติดตามการเคลื่อนที่อย่างละเอียดจากการวิเคราะห์วิดีโอ ส่วนขนาดของแรงต้านการเคลื่อนที่วิเคราะห์จากสมการ $F_D = (1/2)C_D\rho Av^2$ จากแผนภาพดังกล่าวพบว่า ในช่วง 0.05 วินาทีแรกของการเคลื่อนที่กรวยกระดาศเริ่มตกด้วยอัตราเร่งโน้มถ่วงของโลก (มีค่าประมาณ 9.81 เมตรต่อวินาทีกำลังสอง) และมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องจนมีค่าเท่ากับศูนย์หลังจากวินาทีที่ 0.76 ไปจนถึงสิ้นสุดการเคลื่อนที่ ในขณะที่อัตราเร็วของกรวยกระดาศมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วง 0.20 วินาทีแรก และหลังจากนั้นอัตราเร็วมีการเปลี่ยนแปลงน้อยลงและที่วินาทีที่ 0.80 วินาที กรวยกระดาศจะเข้าสู่อัตราเร็วคงตัว (อัตราเร็วไม่เปลี่ยนแปลง) ด้วยค่าประมาณ 3.97 m/s เช่นเดียวกับแรงต้านอากาศที่กระทำต่อกรวยกระดาศในช่วงแรกมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนเข้าสู่ค่าคงตัวที่ประมาณ 0.0121 นิวตัน ที่วินาทีที่ 0.80 วินาทีเช่นกัน แรงต้านอากาศที่วิเคราะห์ได้แตกต่างจากน้ำหนักของกรวยกระดาศร้อยละ 2.51 (น้ำหนักของกรวยกระดาศมีค่าเท่ากับ 0.0118 นิวตัน พิจารณาจากมวล 12 กรัมและอัตราเร่งโน้มถ่วงของโลก 9.81 เมตรต่อวินาทีกำลังสอง) นั้นแสดงให้เห็นว่าผลการวิจัยสอดคล้องกับการวิเคราะห์หลักการเคลื่อนที่ที่มีแรงต้านตามกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน



รูปที่ 7 อัตราเร่ง อัตราเร็ว และแรงต้านการเคลื่อนที่ ของการตกกรวยกระดาษ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.70 เซนติเมตร ณ ช่วงเวลาทุก ๆ 0.05 วินาที

4. สรุป

การศึกษาการตกของกรวยกระดาษด้วยเทคนิคการวิเคราะห์วิดีโออัตราเร็วสูง ที่บันทึกภาพการเคลื่อนที่ ในอัตรา 240 ภาพต่อวินาที บันทึกการเคลื่อนที่ของลูกบอลและกรวยกระดาษขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกันสี่ขนาด คือ 3.00 3.60 5.00 และ 5.70 เซนติเมตร ปลอยที่ระยะความสูงประมาณ 2.50 เมตร แล้วนำไปวิเคราะห์หาตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง และจากผลการวิจัยพบว่า

กรวยกระดาษทั้งสี่ขนาด เคลื่อนที่ตกลงมาด้วยอัตราเร่งเฉลี่ยน้อยกว่าอัตราเร่งโน้มถ่วงของโลก เนื่องจากมีแรงต้านอากาศมากระทำต่อกรวยกระดาษตลอดการเคลื่อนที่ เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ของกรวยกระดาษขนาดเล็กที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.00 และ 3.60 เซนติเมตร พบว่าไม่ปรากฏตำแหน่งที่ทำให้กรวยทั้งสองเข้าสู่อัตราเร็วปลายคงที่ นั่นแสดงว่าความสูงของตำแหน่งปล่อยไม่เพียงพอสำหรับการสังเกตช่วงท้ายที่

กรวยเข้าสู่อัตราเร็วปลายคงที่ แต่กรวยขนาดใหญ่ขึ้นมาได้แก่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.00 และ 5.70 เซนติเมตร พบว่ามีการเข้าสู่อัตราเร็วปลายคงที่ด้วยค่าที่แตกต่างกัน กล่าวคือ กรวยกระดาษขนาดใหญ่ที่สุดจะเข้าสู่ตำแหน่งที่มีอัตราเร็วคงที่ก่อนขนาดรองลงมา ซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจน และการเข้าสู่อัตราเร็วปลายคงที่ของกรวยที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจะมีอัตราเร็วปลายคงที่ ที่มีค่าน้อยลงทั้งวิธีที่ได้จากทฤษฎีและจากการทดลอง โดยร้อยละความแตกต่างเฉลี่ยของทั้งสองวิธีเท่ากับร้อยละ 0.87 และเมื่อนำค่าอัตราเร็วปลายที่เข้าสู่ค่าคงที่ของกรวยกระดาษทั้งสองขนาดที่ได้จากการทดลอง (4.42 ± 0.03 และ 3.97 ± 0.04 เมตรต่อวินาที) แทนค่าในสมการของตำแหน่งที่เป็นฟังก์ชันของเวลา พบว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งตามแนวดิ่ง ณ เวลาใด ๆ ที่ได้จากการติดตามการเคลื่อนที่จริงกับค่าทางทฤษฎีมีค่าและลักษณะใกล้เคียงกัน ในการศึกษาการตกแบบมีแรงต้านของกรวยกระดาษกรณีศึกษาขนาดเส้นผ่าน

ศูนย์กลาง 5.70 เซนติเมตร พบว่าในขณะที่กรวย กระดาษตกลงมาช่วงแรกของการเคลื่อนที่อัตราเร่งของ กรวยกระดาษมีค่าลดลง แต่อัตราเร็วและแรงต้านมีค่า เพิ่มขึ้น จนกระทั่งเข้าสู่ค่าคงที่เมื่ออัตราเร่งเข้าสู่ศูนย์ ซึ่ง แรงต้านที่คงที่นั้นมีค่าใกล้เคียงน้ำหนักของกรวย กระดาษ โดยพบร้อยละความแตกต่างของแรงทั้งสองอยู่ที่ ร้อยละ 2.51 สอดคล้องกับทฤษฎีการตกแบบมีแรง ด้านของวัตถุ

การศึกษาการตกแบบมีแรงต้านของกรวย กระดาษด้วยเทคนิคการวิเคราะห์วิดีโออัตราเร็วสูงใน ครั้งนี้ ทำให้สามารถสังเกตเห็นเส้นทางการเคลื่อนที่ของ กรวยกระดาษแต่ละตำแหน่งได้อย่างชัดเจน นำไปสู่การ วิเคราะห์หาแรงต้านอากาศที่กระทำต่อกรวยกระดาษ ซึ่งแตกต่างจากการเคลื่อนที่ของลูกบอลที่ปราศจากผล ของแรงต้านอากาศ ตลอดจนสามารถวิเคราะห์หาค่า อัตราเร็วปลายได้อย่างชัดเจน ซึ่งต่างจากการใช้ เซนเซอร์เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ ที่ได้ข้อมูลเฉพาะค่า ตำแหน่งกับเวลา ดังการศึกษาของ A. Mooldijk, T. V. D. Valk และ J. Wooning [3] อีกทั้งแตกต่างจาก การศึกษาก่อนหน้านี้ที่ได้ใช้เทคนิคนี้กับสถานการณ์อื่น ๆ เช่น การศึกษาการกลิ้งของทรงกระบอกตันและกลวง เคลื่อนที่แบบโปรเจกไทล์ การเคลื่อนที่แบบสั่นของวัตถุ ดัดสปริง การไถลลงพื้นเอียง เป็นต้น

ดังนั้นการศึกษากการตกแบบมีแรงต้านของกรวย กระดาษด้วยเทคนิคการวิเคราะห์วิดีโออัตราเร็วสูงนี้ สามารถวิเคราะห์สถานการณ์จริง ในการพิสูจน์ทฤษฎี และเป็นแนวทางให้ผู้สอนนำไปอธิบายเพื่อเชื่อมโยง เนื้อหาการตกแบบมีแรงต้านในห้องเรียนกับสถานการณ์ จริง และสามารถช่วยผู้เรียนให้เข้าใจเนื้อหาได้อย่าง ลึกซึ้ง

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์ ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัย ราชภัฏเชียงใหม่ที่ให้การสนับสนุน และขอขอบคุณ

นางสาวมาริษา ขาวสำน สำหรับข้อมูลพื้นฐานที่เป็น ประโยชน์

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] C. A. Jara, F. A. Candelas, S. T. Puente and F. Torres, "Hands-on experiences of undergraduate students in Automatics and Robotics using a virtual and remote laboratory," *Computers & Education*, vol. 57, no. 4, pp. 2451-2461, 2011.
- [2] N. Hırça, "The influence of hands on Physics experiments on scientific process skills according to prospective teachers' experiences," *European Journal of Physics Education*, vol. 4, no. 1, pp. 1-9, 2013.
- [3] A. Mooldijk, T. V. D. Valk and J. Wooning, "Top angle and the maximum speed of falling cones," *Science education international*, vol. 17, no. 3, pp. 161-169, 2006.
- [4] Y. J. Chiu and F. Y. Chen, "Students' misunderstanding of Galileo's experiment on the leaning tower of Pisa," in *Proceeding of The International Conference New Perspectives in Science Education*, Italy, 2012. pp. 1-5.
- [5] P. Wattanakasiwich and J. Poonyawatpornkul, "High-speed video analysis in Mechanics," *Srinakharinwirot Science Journal*, vol. 28, no. 2, pp. 211-232, 2012.
- [6] S. Phommarach and P. Wattanakasiwich and I. D. S. Johnston, "Video analysis of rolling cylinders," *Physics Education*, vol. 47, no. 2, pp. 189-196, 2012.

- [7] L. K. Wee, C. Charles, G. H. Goh, S. Tan and T. L. Lee "Using Tracker as a pedagogical tool for understanding projectile motion," *Physics Education*, vol. 47, no. 4, pp. 448-455, 2012.
- [8] J. Poonyawatpornkul and P. Wattanakasiwich, "High- speed video analysis of damped harmonic motion," *Physics Education*, vol. 48, no. 6, pp. 782-789, 2013.
- [9] J. Poonyawatpornkul and V. Luksameevanish, "High speed video technique analysis of an object moving on an inclined plane," *Naresuan University International Journal of Science*, vol. 15, no. 2, pp. 16-24, 2018.
- [10] G. R. Kneller, "Using quaternions to calculate RMSD," *Journal of Computational Chemistry*, vol. 25, no. 16, pp. 1-9, 2004.
- [11] A. Ahmad and R. M. Mourya, "Testing and Analysis of Spherical and Aerodynamic Helmet in open Circuit Low Speed Wind Tunnel," *International Journal of Engineering Research and Technology*, vol. 9, no. 1, pp. 233-238, 2020.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

การตรึงอะโซโตแบคทีเรียที่เรียตรึงไนโตรเจนในอากาศด้วยวัสดุธรรมชาติและผลต่อการเจริญเติบโตของผักกวางตุ้งในดิน

พิชญ์ ตั้งสมบัติวิจิตร^{1*} อิศารัตน์ เทียมมงคล² และ นาริรัตน์ คงอนันต์³

^{1,2,3} คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

¹ 450 ถนนสุพรรณบุรี-ชัยนาท ตำบลยานยาว อำเภอสามชุก จังหวัดสุพรรณบุรี 72130

^{2,3} 60 หมู่ 3 ถนนสายเอเชีย ตำบลหันตรา อำเภอพระนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา 13000

รับบทความ 20 ตุลาคม 2563 แก้ไขบทความ 7 พฤษภาคม 2564 ตอรับบทความ 4 มิถุนายน 2564

บทคัดย่อ

ไนโตรเจนเป็นธาตุอาหารจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช เมื่อมีการปลูกพืชติดต่อกันเป็นระยะเวลายาวนานส่งผลให้ไนโตรเจนในดินลดลงและไม่เพียงพอต่อความต้องการของพืช วิธีการทางชีวภาพในการเพิ่มปริมาณไนโตรเจนในดินวิธีหนึ่ง คือการใช้แบคทีเรียอะโซโตแบคทีเรียซึ่งเป็นจุลินทรีย์ตรึงไนโตรเจนอิสระในอากาศให้อยู่ในดิน ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อค้นหาวัสดุธรรมชาติที่เหมาะสมสำหรับตรึงอะโซโตแบคทีเรีย เมื่อนำวัสดุธรรมชาติ 10 ชนิดมาตรวจสอบโครงสร้างทางกายภาพ และศึกษาความสามารถของวัสดุธรรมชาติในการตรึงอะโซโตแบคทีเรีย ผลการทดลองพบว่า ก้านผักตบชวาและขาน้อยสามารถตรึงอะโซโตแบคทีเรียได้ 2.43×10^8 และ 1.94×10^8 CFU ต่อกรัม วัสดุธรรมชาติตามลำดับ จากนั้นนำอะโซโตแบคทีเรียที่ถูกตรึงในผักตบชวาและขาน้อย มาทดสอบการเจริญเติบโตของผักกวางตุ้ง โดยแบ่งชุดการทดลองออกเป็น 4 ชุด คือ 1) ชุดที่ผสมก้านผักตบชวาที่ตรึงอะโซโตแบคทีเรีย 2) ชุดที่ผสมขาน้อยที่ตรึงอะโซโตแบคทีเรีย 3) ชุดที่ใส่อะโซโตแบคทีเรียอย่างเดียว และ 4) ชุดควบคุม (ดินอย่างเดียว) ผลการทดลองพบว่า ค่าเฉลี่ยของความสูงต้น จำนวนใบ ความยาวราก น้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง จากชุดที่ผสมก้านผักตบชวาที่ตรึงอะโซโตแบคทีเรีย มีค่าเฉลี่ยสูงกว่าชุดการทดลองอื่นอย่างมีนัยสำคัญ รวมทั้งไนโตรเจนทั้งหมดที่ตรวจพบในดินเพิ่มขึ้น 1.4 เท่า ดังนั้น ก้านผักตบชวาจึงเป็นวัสดุธรรมชาติทางเลือกสำหรับตรึงอะโซโตแบคทีเรียที่เรียตรึงไนโตรเจนในอากาศเพื่อเพิ่มธาตุไนโตรเจนในดินและส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช

คำสำคัญ : อะโซโตแบคทีเรีย; แบคทีเรียตรึงไนโตรเจนในอากาศ; ผักตบชวา; การตรึงแบคทีเรีย; ผักกวางตุ้ง

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Immobilized Free Nitrogen-Fixing Bacteria *Azotobacter* in Natural Materials and Its Effect on Growth of *Brassica Chinensis* in Soil

Pitchya Tangsombatvichit^{1*} Thidarat Tiammongkol² and Nareerat Konganan³

^{1,2,3} Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi

¹ 450 Suphanburi-Chainat Road, Yanyaw, Samchook, Suphanburi 72130

^{2,3} 60 Moo. 3 Asian Highway, Huntra, Phranakhon Si Ayutthaya 13000

Received 20 October 2020; Revised 7 May 2021; Accepted 4 June 2021

Abstract

Nitrogen is an essential nutrient for plant growth. When the plants have been grown for a long-term, effect to decreased nitrogen in soil and insufficiency of the plant growth. One biological method for increasing the nitrogen content in soil is utilize of free nitrogen-fixing bacteria *Azotobacter*. Therefore, the objective of this research was to search natural material suitable for *Azotobacter* fixation. The 10 natural materials were observed physical structure and investigated the ability of natural materials for *Azotobacter* fixation. The results showed that water hyacinth and bagasse stalks were fixed the *Azotobacter* of 2.43×10^8 and 1.94×10^8 CFU per gram of each natural material, respectively. After that, the selected fixed *Azotobacter* of water hyacinth and bagasse stalks were studied the growth of *Brassica Chinensis*. This experiment was designed to 4 treatments. The first treatment was mixed of water hyacinth stalks and the *Azotobacter*. Second treatment was mixed of bagasse stalks and the *Azotobacter*. The third treatment was the *Azotobacter* only. The last treatment was soil only. The results indicated that the average of plant growth include height, leaf number, root length, fresh weight and dry weight of the mixed of water hyacinth stalks and the *Azotobacter* had significantly higher growth rates than other treatments. The total nitrogen was also increased 1.4 fold in the soil. All results suggest that the water hyacinth stalk is alternative for the fixation of the free nitrogen-fixing bacteria *Azotobacter* as induce nitrogen in the soil and plant growth promotion.

Keywords : *Azotobacter*; Free Nitrogen-fixing Bacteria; Water Hyacinth; Immobilized Bacteria; *Brassica Chinensis*

* Corresponding Author. Tel.: +668 0459 2479, E-mail Address: pitchya.t@rmutsb.ac.th

1. บทนำ

ธาตุไนโตรเจน เป็นธาตุอาหารหลักที่สำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืช ไนโตรเจนมีบทบาทสำคัญในทุกระยะการเจริญเติบโตของพืช ตั้งแต่การงอกของเมล็ดจนถึงผลิดอกออกผล ถ้าพืชขาดไนโตรเจนจะทำให้ใบเหลืองหรือการเจริญเติบโตของพืชจะหยุดชะงักลง เกษตรกรที่ปลูกพืชจึงหาวิธีแก้ไขและปรับปรุงคุณภาพดิน โดยการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนในรูปแบบปุ๋ยเคมี แต่การใช้ปุ๋ยเคมีทำให้เกิดปัญหาดินเสีย ดินเค็ม ทำให้การระบายน้ำในดินไม่ดี [1], [2] นอกจากการใช้ปุ๋ยเคมีแล้ว การเพิ่มไนโตรเจนให้กับดินอีกวิธีหนึ่ง คือ การใช้จุลินทรีย์ที่มีประโยชน์ส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช เป็นจุลินทรีย์ทางการเกษตร จึงเป็นอีกแนวทางหนึ่งสำหรับการทำเกษตรปลอดภัยในปัจจุบัน การคัดเลือกจุลินทรีย์ที่มีประโยชน์ต่อการเกษตรได้รับความสนใจศึกษาค้นคว้า และพัฒนาสายพันธุ์จุลินทรีย์ที่ผลิตสารส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช (Plant Growth Promoting Rhizobacteria: PGPR) เพิ่มขึ้น จนสามารถนำไปใช้เพิ่มผลผลิตทางการเกษตรได้ผลดีและเป็นที่ยอมรับของเกษตรกรในปัจจุบัน โดยทั่วไปจุลินทรีย์ถูกนำไปใช้ในรูปแบบของปุ๋ยชีวภาพ จุลินทรีย์ที่ช่วยเพิ่มธาตุอาหารพืชในดินได้แก่ กลุ่มจุลินทรีย์แพรสสภาพไนโตรเจน ผลิตเอนไซม์โปรตีเอส ย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบที่สะสมอยู่ในดิน ให้อยู่ในรูปของไนโตรเจนที่พืชนำไปใช้ได้ จุลินทรีย์ในดินที่มีบทบาทในการย่อยได้แก่ กลุ่ม *Bacillus* *Streptomyces* *Nitrobacter* และ *Nitrosomonas* นอกจากนี้จุลินทรีย์ในดินบางชนิดสามารถตรึงไนโตรเจนจากอากาศเปลี่ยนให้เป็นสารประกอบไนโตรเจนที่มีประโยชน์ต่อพืชได้ จุลินทรีย์กลุ่มนี้แบ่งได้เป็น 3 ประเภทตามลักษณะความสัมพันธ์กับพืช ได้แก่ 1) แบคทีเรียตรึงไนโตรเจนที่อยู่ร่วมกับพืชแบบพึ่งพาอาศัยกัน (Symbiotic N-fixing Bacteria) เช่น *Rhizobium* sp. กับพืชตระกูลถั่ว 2) แบคทีเรียตรึงไนโตรเจนที่อาศัยอยู่ร่วมกับพืชแบบอิสระ (N_2 -fixing

Associated Bacteria) เช่น *Azospirillum* พบในพืชตระกูลหญ้า อ้อย ข้าวฟ่าง และข้าวโพด 3) แบคทีเรียที่อาศัยอยู่อย่างอิสระในดินและบริเวณรากพืช (Free-living N_2 -fixing bacteria) เช่น *Azotobacter* และ *Beijerinckia* [3]-[5] มีงานวิจัยรายงานว่า แบคทีเรีย *Azotobacter vinelandii* และ *Azotobacter chroococcum* สามารถผลิตฮอร์โมนออกซินส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช และเพิ่มผลผลิตโดยผ่านกลไกซับซ้อน ต่างๆ เช่น กระบวนการตรึงไนโตรเจน (Nitrogen Fixation) จากชั้นบรรยากาศ เปลี่ยนไนโตรเจนเป็นรูปเป็นประโยชน์ต่อพืช [6] การใช้ประโยชน์จากจุลินทรีย์ตรึงไนโตรเจนในอากาศ *A. chroococcum* มาเติมลงในดินเพื่อสนับสนุนการเจริญของพืช หลังจากเติมเชื้อแบคทีเรีย 4 สัปดาห์พบว่าขนาดและน้ำหนักของพืชเพิ่มขึ้น รวมทั้งมีผลต่อการลดความเค็มของดินได้ด้วย [7] แบคทีเรียที่มีประสิทธิภาพในการตรึงไนโตรเจนในจีนัสต่าง ๆ สามารถคัดแยกได้จากแหล่งดินที่เพาะปลูกพืชผลทางการเกษตร เช่น ไร่อ้อย โดยเฉพาะดินบริเวณรอบรากพืช (Rhizosphere) และคัดแยกได้จากโครงสร้างต่างๆ ของพืช เช่น รากและลำต้นพืช เป็นต้น แบคทีเรียที่คัดแยกได้เหล่านี้ถูกนำมาใช้เป็นปุ๋ยชีวภาพ แทนการใช้ปุ๋ยเคมีไนโตรเจนได้ [5], [8] อย่างไรก็ตามการใช้จุลินทรีย์ตรึงไนโตรเจนที่ดำรงชีวิตอยู่แบบอิสระในดินนั้น มีปัจจัยเข้ามาเกี่ยวข้องที่สำคัญ คือ เมื่อฝนตกทำให้จุลินทรีย์ตรึงไนโตรเจนในดินดำรงชีวิตอยู่ได้ไม่นาน ถูกชะไปตามน้ำ ในปัจจุบัน จึงมีการศึกษาวิธีการที่จะช่วยให้จุลินทรีย์ตรึงไนโตรเจนดำรงชีวิตรอดอยู่ได้ในดิน ด้วยการใช้วัสดุธรรมชาติ เช่น วัสดุพืช หรือขยะธรรมชาติ มาเป็นตัวกลางให้จุลินทรีย์ยึดเกาะอาศัยอยู่ เพื่อเพิ่มธาตุไนโตรเจนในดิน ส่งเสริมการเจริญเติบโตและแข็งแรงของต้นพืช [9] แต่ยังมีงานวิจัยที่ศึกษาเรื่องนี้อยู่น้อย วัสดุตรึงเซลล์ที่ถูกนำมาใช้มีทั้งวัสดุจากธรรมชาติและวัสดุที่สังเคราะห์ขึ้น ซึ่งมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกัน แต่

อย่างไรก็ตาม มีงานวิจัยที่สนับสนุนว่า การใช้วัสดุธรรมชาติ มีข้อดีคือ มีปริมาณสารอาหารในวัสดุที่ช่วยส่งเสริมการเจริญของเซลล์จุลินทรีย์ที่ตรง รวมทั้งวัสดุธรรมชาติไม่เป็นพิษต่อเซลล์ สามารถย่อยสลายได้ตามกลไกทางกายภาพ-เคมีอีกด้วย [10]

ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงสนใจนำวัสดุธรรมชาติ คือ ใบธูปฤาษี, ก้านบัวหลวง, กาบกล้วย, ชานอ้อย, กาบมะพร้าว, เปลือกส้ม, ก้านบัวเมซอน, ก้านมะละกอ, ลำต้นผักตบชวา และ ลำต้นพุทธรักษา วัสดุเหล่านี้เป็นวัสดุอินทรีย์เหลือทิ้ง ที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ ไม่เป็นพิษต่อดินและสิ่งแวดล้อม วัสดุตัวกลางชีวภาพเหล่านี้จึงถูกนำมาทดสอบความสามารถในการตรึงอะซิโตแบคเตอร์แบคทีเรียตรึงไนโตรเจนในอากาศ เริ่มต้นศึกษาโครงสร้างทางกายภาพของวัสดุธรรมชาติทั้ง 10 ชนิด ภายใต้กล้องจุลทรรศน์สเตอริโอ จากนั้นศึกษาความสามารถในการยึดเกาะวัสดุธรรมชาติแต่ละชนิดของแบคทีเรียอะซิโตแบคเตอร์ โดยตรวจสอบการมีอยู่ของแบคทีเรียอะซิโตแบคเตอร์ ในวัสดุธรรมชาติ และทำการตรึงเซลล์แบคทีเรียกับวัสดุธรรมชาติแต่ละชนิด จากนั้นตรวจสอบการคงอยู่ของแบคทีเรียอะซิโตแบคเตอร์ ที่ตรึงเซลล์ไว้กับวัสดุธรรมชาติแต่ละชนิด ทำการทดลอง 3 ซ้ำ แล้วคัดเลือกวัสดุธรรมชาติที่แบคทีเรียอะซิโตแบคเตอร์ ยึดเกาะได้ดี 2 อันดับ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการตรึงแบคทีเรียอะซิโตแบคเตอร์ในวัสดุธรรมชาตินั้นต่อการเจริญเติบโตของผักกวางตุ้ง รวมทั้งตรวจวิเคราะห์ไนโตรเจนทั้งหมดในดิน ก่อนปลูกและหลังปลูกผัก

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 การเตรียมหัวเชื้ออะซิโตแบคเตอร์

แบคทีเรียตรึงไนโตรเจนในอากาศ

การศึกษาสัณฐานวิทยาและคุณสมบัติ

ชีวเคมีบางประการของแบคทีเรีย

นำแบคทีเรียอะซิโตแบคเตอร์ มาเพาะเลี้ยงลงในอาหารเหลว Berk'N Free จากนั้น Cross Streak เชื้อแบคทีเรีย บนอาหารวุ้นแข็ง Berk'N Free นำแบคทีเรียอะซิโตแบคเตอร์ที่บริสุทธิ์แล้ว จำนวน 1 หลอด มาใส่ในขวดรูปชมพู่ปริมาตร 250 มิลลิลิตร ที่บรรจุอาหารเหลว Berk'N Free 150 มิลลิลิตร แล้วนำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5-7 วัน จากนั้นนำแบคทีเรียอะซิโตแบคเตอร์ มาศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา สรีรวิทยา และคุณสมบัติทางชีวเคมีบางประการ คือ การเคลื่อนที่ เอนไซม์คะตะเลส (Catalase Test) เอนไซม์ออกซิเดส (Oxidase Test) ปฏิกริยา IMViC test ได้แก่ Indole Test, Methyl Red Test, Voges-Proskauer Test และ Citrate Test ดัดแปลงจาก Bisen *et al.* [11] และ Holt *et al.* [12]

2.2 การศึกษาโครงสร้างทางกายภาพของวัสดุธรรมชาติ

วัสดุธรรมชาติ 10 ชนิดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ ใบธูปฤาษี (Cattail Leaf Stalk), ก้านบัวหลวง (Lotus Stalk), กาบกล้วย (Banana Stalk), ชานอ้อย (Sugarcane Bagasse), กาบมะพร้าว (Coconut Bract), เปลือกส้ม (Orange Peel), ก้านบัวเมซอน (Texas Mud Baby Stalk), ก้านมะละกอ (Papaya Leaf Stalk), ลำต้นผักตบชวา (water Hyacinth Stalk) และ ลำต้นพุทธรักษา (Canna Stalk) มาล้างด้วยน้ำสะอาด จากนั้นตัดวัสดุธรรมชาติแต่ละชนิดให้มีขนาด 10×10 มิลลิเมตร แบ่งการทดลองเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 วัสดุธรรมชาติแต่ละชนิด นำมาศึกษาโครงสร้างภายในโดยใช้กล้องจุลทรรศน์สเตอริโอกำลังขยาย 40 เท่า อีกส่วนหนึ่ง วัสดุธรรมชาติแต่ละชนิด นำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน แบ่งชิ้นส่วนของวัสดุธรรมชาติแต่ละชนิดที่อบแห้งแล้ว มาศึกษาโครงสร้างภายในโดยใช้กล้องจุลทรรศน์สเตอริโอ

กำลังขยาย 40 เท่า อีกครั้ง จากนั้น วัสดุธรรมชาติที่อบแห้งแล้ว จะถูกเก็บไว้ในโถดูดความชื้น เพื่อใช้ในการศึกษาในขั้นตอนการตรึงเซลล์แบคทีเรียอะซิโตนแบคเตอร์ต่อไป [13]-[15]

2.3 การตรึงเซลล์แบคทีเรียอะซิโตนแบคเตอร์บนวัสดุธรรมชาติ

เริ่มจากนำวัสดุธรรมชาติที่อบแห้งแล้ว มาตรวจนับการมีอยู่ของแบคทีเรียก่อนการตรึงเซลล์ โดยนำชิ้นส่วนของวัสดุธรรมชาติที่อบแห้งแล้ว 10 กรัม มาเจือจางใน 0.85% NaCl จากนั้นเลือกที่ระดับความเจือจาง 10 เท่าที่ 10^{-2} ถึง 10^{-5} นำมาเกลี่ยลงบนอาหารร่วนแข็ง Berk'N free บ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน ขั้นตอนการตรึงเซลล์แบคทีเรียอะซิโตนแบคเตอร์ ทำโดยชั่งวัสดุธรรมชาติปริมาณ 5 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ ที่มีอาหารเหลว Berk'N Free ปริมาณ 100 มิลลิลิตร จากนั้นเติมหัวเชื้อแบคทีเรียปริมาณ 10 มิลลิลิตร นำไปบ่มแบบเขย่าความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นเทส่วนของสารละลายออกเบาๆจนเกือบหมด เพื่อนำไปตรวจนับจำนวนแบคทีเรียที่ยึดเกาะบนวัสดุธรรมชาติแต่ละชนิด [9]

2.4 การตรวจนับการคงอยู่ของแบคทีเรียอะซิโตนแบคเตอร์หลังการตรึงเซลล์ของบนวัสดุธรรมชาติ

ชั่งชิ้นส่วนของวัสดุธรรมชาติแต่ละชนิดจำนวน 10 กรัม ใส่ลงในถุงสำหรับต้บดที่มี สารละลายร้อยละ 0.85 NaCl ปริมาตร 90 มิลลิลิตร แล้วนำไปต้บดด้วยเครื่อง stomacher ทำการเจือจาง 10 เท่า จนถึงความเจือจาง 10^{-5} เลือกความเจือจางที่ 10^{-3} ถึง 10^{-5} มา spread plate ความเจือจางละ 3 ซ้ำ ลงบนอาหารร่วนแข็ง Berk'N Free บ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน เปรียบเทียบกับชิ้นส่วนของวัสดุธรรมชาติที่ไม่มีการตรึงเซลล์แบคทีเรีย นับจำนวนแบคทีเรียตรึงในโตรเจนที่ตรึงเซลล์บนวัสดุชีวภาพแต่ละชนิด จากนั้น

คัดเลือกวัสดุธรรมชาติที่แบคทีเรียสามารถยึดเกาะได้ดีที่สุด 2 อันดับ เพื่อใช้ในการศึกษาขั้นตอนต่อไป [9]

2.5 การทดสอบวัสดุธรรมชาติตรึงเซลล์แบคทีเรียต่อการเจริญเติบโตของผักกวางตุ้ง

การทดสอบวัสดุธรรมชาติที่มีความสามารถตรึงเซลล์แบคทีเรียอะซิโตนแบคเตอร์ต่อการเจริญเติบโตของผักกวางตุ้งที่ปลูกลงดิน มีชุดการทดลองดังนี้ คือ ชุดทดลองที่ 1 ชุดควบคุม บรรจุน้ำ 500 กรัม ที่ผ่านการนึ่งฆ่าเชื้อ ลงในกระถาง ไม่มีการเติมแบคทีเรีย ชุดทดลองที่ 2 บรรจุน้ำ 500 กรัม ที่ผ่านการนึ่งฆ่าเชื้อ ผสมแบคทีเรียอะซิโตนแบคเตอร์อิสระ ปริมาตร 20 มิลลิลิตร ลงในกระถาง ชุดทดลองที่ 3 บรรจุน้ำ 500 กรัม ที่ผ่านการนึ่งฆ่าเชื้อ ผสมแบคทีเรียอะซิโตนแบคเตอร์ที่ตรึงกับวัสดุธรรมชาติที่สามารถยึดเกาะได้ดีอันดับ 1 ปริมาณ 10 กรัม ลงในกระถาง ชุดทดลองที่ 4 บรรจุน้ำ 500 กรัม ที่ผ่านการนึ่งฆ่าเชื้อ ผสมแบคทีเรียอะซิโตนแบคเตอร์ที่ตรึงกับวัสดุธรรมชาติที่สามารถยึดเกาะได้ดีอันดับ 2 ปริมาณ 10 กรัม ลงในกระถาง วางแผนการทดลองแบบ Randomized Complete Block Design (RCBD) เริ่มจากการเพาะเมล็ดกวางตุ้งในฟิทมอส เป็นเวลา 7 วันก่อน แล้วย้ายปลูกต้นกล้าที่มีอายุ ขนาดต้น ความสูง จำนวนใบ ใกล้เคียงกัน มาใส่ในกระถาง กระถางละ 3 ต้น ชุดการทดลองละ 5 กระถาง จำนวน 5 ซ้ำ แล้วรดน้ำ ทุกวัน วัดการเจริญเติบโตของต้นกวางตุ้งในแต่ละชุดการทดลองโดย วัดความสูงต้น และจำนวนใบ ทุก 7 วัน เป็นเวลา 5 สัปดาห์ และในสัปดาห์ที่ 5 ทำการวัดความยาวราก น้ำหนักสดทั้งต้น น้ำหนักแห้งทั้งต้น [16]

2.6 การตรวจสอบปริมาณไนโตรเจนในดินก่อนปลูกและหลังปลูกผักกวางตุ้ง

ก่อนปลูกนำดินที่ผ่านการนึ่งฆ่าเชื้อที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ มาวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด หลังการปลูกผักกวางตุ้งแล้วนำดินแต่ละชุดการทดลอง

มาวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดอีกครั้ง ด้วยวิธี Kjeldahl method ทำการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ

2.7 การวิเคราะห์ผลข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ข้อมูลโดย วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ในแผนการทดลองแบบ RCBD และ เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 95 ($p < 0.05$)

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 สันฐานวิทยาและคุณสมบัติชีวเคมีบางประการของแบคทีเรียอะซิโตแบคเตอร์

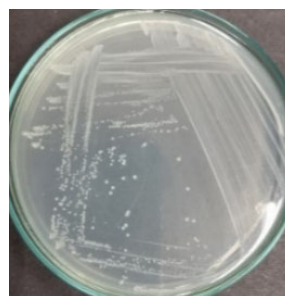
แบคทีเรียอะซิโตแบคเตอร์ที่ใช้ในการทดลองนี้ ลักษณะโคโลนีรูปร่างกลม ขอบและผิวหน้าโคโลนีเรียบ ทึบแสง โคโลนีขึ้นโค้งจากผิวหน้าของอาหารเล็กน้อย (รูปที่ 1) เซลล์แบคทีเรีย มีรูปร่างท่อน ดิดส์แกรมลบ ภายใต้กล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 1000 เท่า และมีคุณสมบัติทางชีวเคมีบางประการ แสดงให้เห็นว่าแบคทีเรียอยู่ในกลุ่มแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนในอากาศ (ตารางที่ 1) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ สุทธรธรรม และคณะ [9] และการระบุแบคทีเรียอะซิโตแบคเตอร์ [11], [12]

3.2 ผลการศึกษาโครงสร้างทางกายภาพของวัสดุธรรมชาติ

วัสดุธรรมชาติแต่ละชนิด คือ ใบธูปฤาษี, ก้านบัวหลวง, กาบกล้วย, ขานอ้อย, กาบมะพร้าว, เปลือกส้ม, ก้านบัวเมฆอน, ก้านมะละกอ, ลำต้นผักตบชวา และ ลำต้นพุทธรักษา เมื่อนำมาศึกษาโครงสร้างทางกายภาพภายใต้กล้องสเตอริโอที่กำลังขยาย 40 เท่า ก่อนอบแห้งแสดงดังรูปที่ 2 และหลังอบ แสดงดังรูปที่ 3 พบว่า วัสดุธรรมชาติแต่ละชนิดมีช่องว่างรูพรุนภายในโครงสร้างที่แตกต่างกัน มีพื้นที่ผิวที่แตกต่างกัน

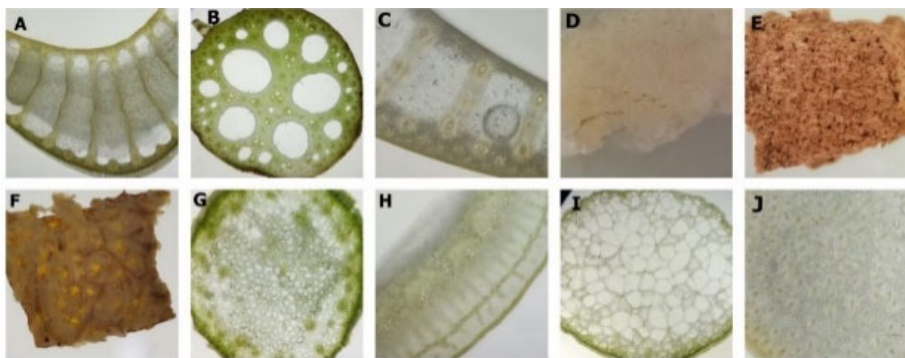
ตารางที่ 1 Biochemical characteristics of free nitrogen-fixing bacteria *Azotobacter*, in triplicate

Biochemical test	<i>Azotobacter</i> In this experiment	<i>Azotobacter</i> Holt <i>et al.</i> [12]
Gram's stain	negative	negative
Indole	-	-
Production		
Methyl Red	-	-
Voges	-	-
Proskauer		
Citrate	+	+
Utilization		
Motility	+	+
Catalase	+	+

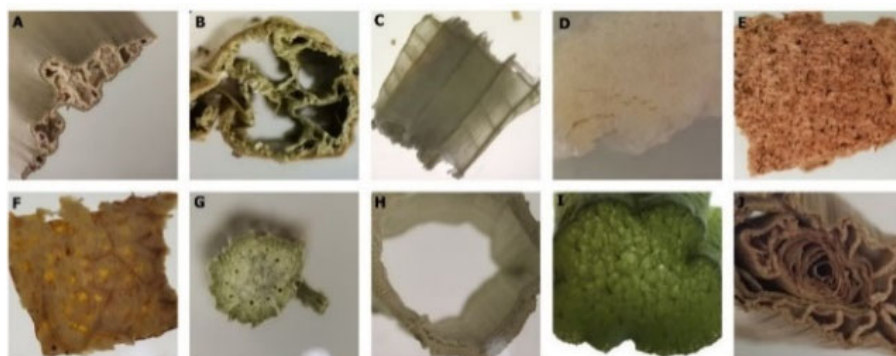


รูปที่ 1 Morphology of free nitrogen-fixing bacteria *Azotobacter* on Berk N'free agar

มีงานวิจัยที่ทำการศึกษาคโครงสร้างทางกายภาพของวัสดุพุงจากขยะธรรมชาติสำหรับตรึงเซลล์จุลินทรีย์ คือ ธูปฤาษี ชังข้าวโพด ขานอ้อย และซีเลื่อย พบว่าโครงสร้างทางกายภาพของเส้นใยภายในวัสดุธรรมชาติมีแตกต่างกัน มีขนาดช่องว่างและพื้นที่หน้าตัดแตกต่างกัน โดยวัสดุที่จุลินทรีย์แทรกตัวอยู่ภายในโครงสร้างได้ดีที่สุดคือ ขานอ้อย [15] ซึ่งวัสดุตรึงเซลล์ที่ดีควรมีความเป็นรูพรุนสูง มีพื้นที่ผิวมากเพื่อใช้ในการเกาะยึด ไม่ละลายน้ำ หรือละลายน้ำได้ช้า ทนต่อสภาวะการทำปฏิกิริยาได้ดี ทนต่ออุณหภูมิสูงได้ถึง 121 องศาเซลเซียส และทนต่อความดันสูงได้ ที่สำคัญวัสดุตรึงเซลล์ที่ใช้ต้องไม่เป็นอันตรายต่อเซลล์จุลินทรีย์ที่มาเกาะยึดและสิ่งแวดล้อมด้วย [17]



รูปที่ 2 Structure of natural materials under stereo microscope (magnification 40X) before dried (A) Cattail leaf stalk, (B) Lotus stalk, (C) Banana stalk, (D) Sugarcane bagasse, (E) Coconut bract, (F) orange peel, (G) Texas mud baby stalk, (H) Papaya leaf stalk, (I) Water hyacinth stalk, (J) Canna stalk



รูปที่ 3 Structure of natural materials under stereo microscope (magnification 40X) dried (A) Cattail leaf stalk, (B) Lotus stalk, (C) Banana stalk, (D) Sugarcane bagasse, (E) Coconut bract, (F) orange peel, (G) Texas mud baby stalk, (H) Papaya leaf stalk, (I) Water hyacinth stalk, (J) Canna stalk

3.3 ผลการตรึงเซลล์แบคทีเรียอะซิโตแบคเตอร์บนวัสดุธรรมชาติ

เมื่อตรวจนับการมีอยู่ของจุลินทรีย์ก่อนตรึงเซลล์แบคทีเรีย และหลังตรึงเซลล์แบคทีเรียตรึงไนโตรเจนบนวัสดุธรรมชาติแต่ละชนิด ผลการทดลองพบว่า ก่อนตรึงเซลล์แบคทีเรีย ไม่พบแบคทีเรียอะซิโตแบคเตอร์ บนอาหารวุ้นแข็ง Berk N'free (ตารางที่ 2)

3.4 ผลการคงอยู่ของแบคทีเรียอะซิโตแบคเตอร์ หลังการตรึงเซลล์ของบนวัสดุธรรมชาติ

เมื่อตรึงเซลล์แบคทีเรียแล้ว ทำการตรวจนับจำนวนโคโลนีของแบคทีเรียอะซิโตแบคเตอร์ หลังตรึง

เซลล์ พบว่า แบคทีเรียอะซิโตแบคเตอร์ สามารถเกาะยึดบนวัสดุธรรมชาติในช่วง $10^5 - 10^8$ CFU/กรัมของวัสดุธรรมชาติ แสดงในตารางที่ 2 วัสดุธรรมชาติที่แบคทีเรียสามารถเกาะยึดได้ดีที่สุดคือ ลำต้นผักตบชวา โดยตรึงเซลล์แบคทีเรียได้เท่ากับ 2.43×10^8 CFU/กรัมของวัสดุธรรมชาติ อันดับที่ 2 คือ ชานอ้อย โดยตรึงเซลล์แบคทีเรียได้เท่ากับ 1.86×10^8 CFU/กรัมของวัสดุธรรมชาติ ในขณะที่วัสดุธรรมชาติที่ไม่สามารถตรึงเซลล์แบคทีเรียได้ คือ เปลือกส้ม (ตารางที่ 2) เช่นเดียวกับ งานวิจัยของ สุทธวรรณ และคณะ [9] พบว่า ผักตบชวาซึ่งเป็นวัสดุตัวกลางชีวภาพมีคุณสมบัติในการตรึงเซลล์แบคทีเรียตรึงไนโตรเจนในอากาศได้ดีเท่ากับ 5.4×10^4 CFU/mL โดยงานวิจัยนี้ก้านผักตบชวา

ตารางที่ 2 The total of *Azotobacter* bacteria immobilized in natural material on Berk's N-free agar

Natural materials	<i>Azotobacter</i> immobilized in natural materials (CFU/g)	
	Before	After
Water hyacinth stalk	0	2.43×10^8
Sugarcane bagasse	0	1.94×10^8
Canna stalk	0	9.40×10^7
Lotus stalk	0	8.97×10^7
Cattail leaf stalk	0	8.90×10^7
Coconut bract	0	8.13×10^7
Papaya leaf stalk	0	4.27×10^7
Texas mud baby stalk	0	8.33×10^6
Banana stalk	0	6.60×10^5
Orange peel	0	ND

ND = Not detected

ตารางที่ 3 The average of growth of *Brassica chinensis* under different treatments at 35 days planting

Treatment	Height (cm)	Leave number	Root length (cm)
T1	3.87 ± 1.66^d	3.73 ± 1.48^d	2.27 ± 0.89^d
T2	5.80 ± 0.18^c	5.00 ± 0.0^c	4.67 ± 0.24^c
T3	9.83 ± 0.20^a	6.60 ± 0.37^a	7.93 ± 0.55^a
T4	6.73 ± 0.28^b	5.49 ± 0.28^b	6.00 ± 0.41^b

Mean value $\pm$ standard deviation

^{abcd} different letters in a column are significantly different ($p < 0.05$) according to DMRT

Remark: T1 is Soil (control), T2 is Soil + *Azotobacter*, T3 is Soil + immobilized *Azotobacter* in water hyacinth and T4 is Soil + immobilized *Azotobacter* in sugarcane bagasse

มีความสามารถตรึงเซลล์แบคทีเรียตรึงไนโตรเจนได้มากกว่า งานวิจัยของสุทธวรรณ และคณะ [9] เมื่อพิจารณาโครงสร้างทางกายภาพของ ผักตบชวาและชานอ้อย ก่อนอบแห้งและหลังอบแห้ง ยังคงมีโครงสร้างไม่แตกต่างกันมาก แสดงว่าพืชทั้ง 2 ชนิดนี้มีความสามารถทนต่อสภาวะการทำปอดเชื้อได้ [17]

ตารางที่ 4 The average of fresh weight and dry weight of *Brassica chinensis* under different treatments at 35 days planting

Treatment	Fresh weight (g)	Dry weight (g)
T1	3.14 ± 0.61^d	0.36 ± 0.04^d
T2	4.47 ± 0.44^c	0.57 ± 0.03^c
T3	14.60 ± 0.39^a	3.06 ± 0.30^a
T4	7.68 ± 0.54^b	1.56 ± 0.30^b

Mean value $\pm$ standard deviation

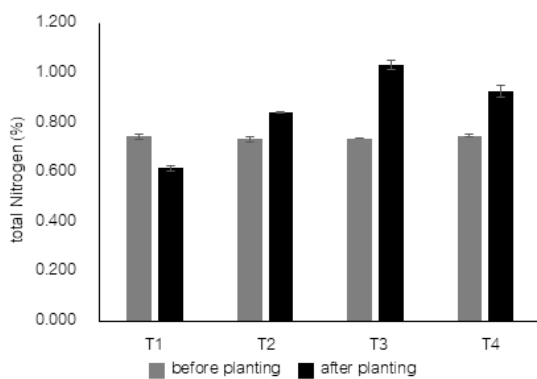
^{abcd} different letters in a column are significantly different ($p < 0.05$) according to DMRT

Remark: T1 is Soil (control), T2 is Soil + *Azotobacter*, T3 is Soil + immobilized *Azotobacter* in water hyacinth and T4 is Soil + immobilized *Azotobacter* in sugarcane bagasse

3.5 ผลการทดสอบวัสดุธรรมชาติตรึงเซลล์แบคทีเรียต่อการเจริญเติบโตของผักกวางตุ้ง

เมื่อนำวัสดุธรรมชาติที่มีความสามารถตรึงอะซิโตแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนได้ดีที่สุด 2 อันดับ คือ ก้านผักตบชวา และ ชานอ้อย มาทดสอบการเจริญเติบโตของผักกวางตุ้งและทำการวิเคราะห์ไนโตรเจนทั้งหมดในดินก่อนและหลังปลูกพืช ผลการทดลอง พบว่า ชุดการทดลองที่ 3 คือ ดินผสมแบคทีเรียอะซิโตแบคทีเรียที่ตรึงกับก้านผักตบชวาแห้ง มีค่าเฉลี่ยของความสูงต้น จำนวนใบ ความยาวราก

น้ำหนักสด และ น้ำหนักแห้งดีที่สุด เมื่อเทียบกับชุดการทดลองอื่น อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (ตารางที่ 3 และ ตารางที่ 4) ในขณะที่ ชุดการทดลองที่ 4 คือ ดินผสมแบคทีเรียอะซิโตแบคเตอร์ที่ตรึงกับขานอ้อยแห้ง มีค่าเฉลี่ยของความสูงต้นจำนวนใบ ความยาวราก น้ำหนักสด และ น้ำหนักแห้งดี มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ กับชุดการทดลองที่ 2 คือ ดินผสมแบคทีเรียอะซิโตแบคเตอร์อิสระ และชุดควบคุม (ตารางที่ 3 และ ตารางที่ 4)



รูปที่ 4 The average of percentage of total nitrogen in soil before and after planting in each of treatment following T1 is Soil (control), T2 is Soil + *Azotobacter*, T3 is Soil + immobilized *Azotobacter* in water hyacinth and T4 is Soil + immobilized *Azotobacter* in sugarcane bagasse, in duplicate

3.6 การตรวจสอบปริมาณไนโตรเจนในดินก่อน

ปลูกและหลังปลูกผักกวางตุ้ง

เมื่อวัดไนโตรเจนทั้งหมด พบว่า หลังผสมแบคทีเรียอะซิโตแบคเตอร์ที่ตรึงกับก้านผักตบชวาแห้งในดิน และ แบคทีเรียอะซิโตแบคเตอร์ที่ตรึงกับขานอ้อยแห้งในดิน พบว่า มีไนโตรเจนทั้งหมดเฉลี่ยเพิ่มขึ้นมากกว่า แบคทีเรียอะซิโตแบคเตอร์อิสระในดิน (รูปที่ 4) สอดคล้องกับ การศึกษาแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนร่วมกับวัสดุตัวกลางชีวภาพคือผักตบชวาผสมดิน ต่อการ

ปลูกผักคะน้า ส่งเสริมการเจริญเติบโตของผักคะน้า ทำให้ความสูงของต้น ความยาวของใบผักคะน้าเจริญเติบโตได้ดีกว่า ที่เติมเฉพาะแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนในดิน [4], [9]

4. สรุป

แบคทีเรียอะซิโตแบคเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาค้างนี้มีลักษณะสัณฐานวิทยา สรีรวิทยา และคุณสมบัติทางชีวเคมีบางประการ จัดอยู่ในแบคทีเรียในดินกลุ่มแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนในอากาศได้ดี สำหรับโครงสร้างทางกายภาพของวัสดุธรรมชาติพบว่า วัสดุธรรมชาติแต่ละชนิดมีพื้นที่ผิวภายในและขนาดช่องว่างในการเกาะยึดของแบคทีเรียที่แตกต่างกัน สามารถเรียงลำดับการตรึงแบคทีเรียจากดีที่สุด ไปจนถึงไม่สามารถตรึงแบคทีเรียได้ ดังนี้คือ ลำต้นผักตบชวา ขานอ้อย ลำต้นพุทธรักษา ก้านบัวหลวง ใบธูปฤาษี กาบมะพร้าว ก้านมะละกอ ก้านบัวเมฆอน กาบกล้วย และเปลือกส้มตามลำดับ ดังนั้นลำต้นผักตบชวา และขานอ้อย ที่ตรึงแบคทีเรียอะซิโตแบคเตอร์ จึงถูกเลือกมาศึกษาการเจริญเติบโตของผักกวางตุ้งจะเห็นได้ว่า อะซิโตแบคเตอร์ที่เกาะยึดอยู่กับลำต้นผักตบชวามีประสิทธิภาพในการส่งเสริมการเจริญเติบโตของผักกวางตุ้งได้ดีที่สุด รองลงมาคือ อะซิโตแบคเตอร์ที่เกาะยึดอยู่กับขานอ้อย ซึ่งวัสดุธรรมชาติทั้ง 2 ชนิดนี้ ส่งเสริมการเจริญเติบโตของผักกวางตุ้งได้ดีกว่า ที่เติมเฉพาะแบคทีเรียอะซิโตแบคเตอร์อิสระ ดังนั้นการทดลองนี้เป็นแนวทางที่น่าสนใจในการนำไปใช้ประโยชน์ทางด้านการเกษตรสำหรับต้นแบบการเพิ่มธาตุไนโตรเจนในดิน ใช้วัสดุธรรมชาติที่มีอยู่ให้เกิดประโยชน์ ลดต้นทุนการผลิต เพราะการใช้วัสดุธรรมชาติเกาะยึดแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนในอากาศช่วยเก็บรักษาจุลินทรีย์ที่มีประโยชน์ในดินให้อยู่ได้นาน และไม่ถูกชะออกจากดิน ข้อเสนอแนะในการศึกษาต่อไปควรศึกษาโครงสร้างทางกายภาพภายในของผักตบชวาและขานอ้อยสำหรับอะซิโตแบคเตอร์ยึดเกาะด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน หรือศึกษา

องค์ประกอบทางชีวเคมีเพื่อสนับสนุนผลการตรึงแบคทีเรียไว้ในโครงสร้างพืชได้ต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณทุนอุดหนุนวิจัย ประเภททุนวิจัย เพื่อยกระดับปริญญาโทสู่งานวิจัย เงินกองทุนส่งเสริมงานวิจัย ประจำปีงบประมาณ 2563 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ขอขอบพระคุณ ดร.ชัยบัณฑิต ลือลาภ ที่ให้อำนาจและเชื้อแบคทีเรีย *Azotobacter vinelandii* เป็นแบคทีเรียที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ ขอขอบคุณหลักสูตรจุลชีววิทยา สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.สุวรรณภูมิ ที่ให้อำนาจความสะดวกในการวิเคราะห์ผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ ขอขอบคุณคุณดาวดี โนชัย ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำทดลองทางจุลชีววิทยา

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Y. Osotspa, A. Wongmaneeroj and Ch. Hongprayoon, *Fertilizers for sustainable agriculture*, 2 nd ed. Bangkok: Kasetsart University Press, 2011.
- [2] Y. Osotspa, *Plant nutrition*, 4 th ed. Bangkok: Kasetsart University Press, 2015.
- [3] S. Torpee, "Selection of free living aerobic nitrogen fixing bacteria and *Bacillus* sp. to use as inoculums for nitrogen and phosphorus fertilizer in straw medium," Prince of Songkla University Thesis, 2009.
- [4] A. Chanchaichaovivat, S. Kirdtabtim and S. Phornphisutthimas, "Application of microorganisms in sustainable agriculture," *Journal of Research Unit on Science, Technology and Environment for Learning*, vol. 7, no. 2, pp. 398-413, Dec. 2016.
- [5] S. Mahdi, H. Mukhtar, H. Bashir and A. Nawaz, "Optimization of growth conditions for *Azotobacter* species and their use as biofertilizer," *Journal of Bacteriology & Mycology*, vol. 6, no. 5, pp. 274-278, Sep. 2013.
- [6] N.A. Thazin, S. Nourmohammadi, E.M. Sunitha and M. Myint, "Isolation of endophytic bacteria from green gram and study on their plant growth promoting activities," *International Journal of Applied Biology and Pharmaceutical Technology*, vol. 2, no. 3, pp. 525-537, Jul. 2011.
- [7] D. Rojas-Tapias, A. Moreno-Galvan, S. Pardo-Diaz, M. Obando, D. Rivera and R. Bonilla, "Effect of inoculation with plant growth-promoting bacteria (PGPB) on amelioration of saline stress in maize (*Zea mays*)," *Applied Soil Ecology*, vol. 61, pp. 264 – 272, Oct. 2012.
- [8] A. Beneduzia, F. Moreirab, P. B. Costa, L. K. Vargas, B. B. Lisboa, R. Favreto, J. I. Baldani and L. M. P. Passaglia, "Diversity and plant growth promoting evaluation abilities of bacteria isolated from sugarcane cultivated in the South of Brazil," *Applied Soil Ecology*, vol. 63, pp. 94 – 104, Jan. 2013.
- [9] S. Suphan, P. Prajankett and S. Pongsawat, "Using Nitrogen Fixing Bacteria with Biological Supporting Media for Promoting the Plant Growth," *Science and Technology RMUTT Journal*, vol. 6, no. 2, pp. 17-28, Dec. 2016.

- [10] J. C. Santos, S. I. Mussatto, G. Dragone, A. Converti and S. S. Siva, "Evaluation of porous glass and zeolite as cells carriers for xylitol production from sugarcane bagasse hydrolysate," *Biochemistry Engineer Journal*, vol. 23, no. 1, pp. 1-9, Mar. 2005.
- [11] P. S. Bisen, M. Debnath and G. B. K. S. Prasad, *Microbes: Concepts and Applications*. 1 st ed. Malden: Wiley-Blackwell Publishing, 716 p., 2012.
- [12] J. G. Holt, N. R. Krieg, P. H. A. Sneath, J. T. Staley, and S.T. Williams, *Bergey's Manual of Determinative Bacteriology*, 9 th ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, PA., 2000.
- [13] C. Kaewkrajay and P. Sinthunawa, "Immobilization of *Saccharomyces cerevisiae* to Sugarcane Bagasse for Fuel Ethanol Production," *Burapha Science Journal*, vol. 20, no. 2, pp. 96-111, Aug. 2015.
- [14] O. Suttinun, W. Kaewtip and E. Luepromchai, *Phenol degradation by mixed culture of Methylobacterium sp.NP3 and Acinetobacter sp. PK1 immobilized on oil palm residues*, Prince of Songkla University, 2010.
- [15] W. Soontornchaiboon and R. Pawongrat, "Utilization of natural wastes as supporting materials for cell immobilization and Its application for ethanol production," *Veridian E-Journal, SU*, vol. 6, no. 1, pp. 795-807, Jan.-Apr. 2013.
- [16] P. Tangsombatvichit and D. Ketrot, "The quality of vermicompost from sweet potato crop wastes and its impact on growth promotion of *Brassica chinensis*," *RMUTSB Academic Journal*, vol. 6, no. 2, pp. 124-133, Sep. 2018.
- [17] Y. Kourkoutas, A. Bekatorou, I. M. Banat, R. Marchant and A. A. Koutinas, "Immobilization technologies and support materials suitable in alcohol beverages production: a review," *Food Microbiology*, vol. 21, no. 4, pp. 377-397, Aug. 2004.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

การวิเคราะห์ศักยภาพพลังงานลมและข้อมูลลมรายปีบริเวณพื้นที่ อำเภอสะเมิง จังหวัดเชียงใหม่

กิตติกร สาสุจิตต์* และ นิกราน หอมดวง

วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้

63 หมู่ที่ 4 ตำบลหนองหาร อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 50290

รับบทความ 26 พฤศจิกายน 2563 แก้ไขบทความ 9 พฤษภาคม 2564 ตอรับบทความ 7 มิถุนายน 2564

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษาคุณลักษณะข้อมูลลมและศักยภาพการผลิตไฟฟ้าจากกังหันลมพื้นที่อำเภอสะเมิง จังหวัดเชียงใหม่ ตรวจวัดข้อมูลอัตราเร็วลม และทิศทางลม ช่วงระยะเวลา 1 ปี เริ่มตั้งแต่ มกราคม พ.ศ. 2554 ถึง ธันวาคม พ.ศ.2554 ที่ระดับความสูงการตรวจวัดข้อมูล 20 40 และ 80 เมตรเหนือพื้นดิน จากผลการศึกษาพบว่าค่าอัตราเร็วลมเฉลี่ยเท่ากับ 3.88 3.92 และ 4.30 เมตรต่อวินาที โดยทิศทางลมเฉลี่ยเคลื่อนที่ทางทิศตะวันตกเฉียงใต้เฉลี่ยร้อยละ 20.73 กำลังลมต่อพื้นที่เฉลี่ยเท่ากับ 107 วัตต์ต่อตารางเมตร ซึ่งจากการแจกแจงไวบูลส์ พบว่าค่าพารามิเตอร์รูปร่างเฉลี่ย 1.715 1.633 และ 1.783 พารามิเตอร์ระดับ 3.649 3.651 และ 4.092 เมตรต่อวินาทีตามลำดับ โดยค่าสัมประสิทธิ์แรงเฉือนลมเฉลี่ยเท่ากับ 0.19 เมื่อประเมินศักยภาพการผลิตไฟฟ้าจากกังหันลม Nordex N50-800 kW และ Vestas V90-3 MW พบว่ามีศักยภาพการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 1,761,379 และ 3,772,400 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี โดยมีค่าปาคีตี้แฟกเตอร์เฉลี่ยร้อยละ 25.13 และร้อยละ 14.35 ตามลำดับ ซึ่งจากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทยมีศักยภาพด้านพลังงานลมเพียงพอสำหรับการพัฒนาแหล่งพลังงานลมในอนาคต

คำสำคัญ : ศักยภาพพลังงานลม; การผลิตไฟฟ้า; เชียงใหม่; ประเทศไทย

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 9998 8203, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: k.sasujit@yahoo.com

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Analysis of Wind Speed Data and Annual Energy Potential at Samoeng District in Thailand

Kittikorn Sasujit* and Nigran Homdoun

School of Renewable Energy, Maejo University
63 Moo. 4 Nongharn, Sansai, Chiang Mai, Thailand 50290

Received 26 November 2020; Revised 9 May 2021; Accepted 7 June 2021

Abstract

In this study, the wind speed characteristic and evaluation of wind power generation at Samoeng district, Chiang Mai were investigated using wind speed data and wind direction data, during time of January 2011 to December 2011 and measured at a height of 20, 40 and 80 m above ground level. It was found that the mean wind speed of 3.8, 3.92 and 4.30 m/s. While the mean wind direction of 20.73% and indicating from the southwest. The mean of power density of 107 W/m², the shape parameter (k) was 1.715 1.633 and 1.783, scale parameter (c) of 3.649, 3.651 and 4.092 m/s, the mean of wind shear coefficient was 0.19. The evaluation of wind energy for electricity generation by install the wind turbine of Nordex N50 from Germany and Vestas V90 from Denmark were capacity of 800 kW and 3 MW. It could produce annual electricity of 1,761,379 kWh and 3,772,400 kWh, and the capacity factor show 25.13% and 14.35%, respectively. Finally, the results showed the northern area of Thailand was suitable for wind power development in further.

Keywords : Wind Energy Potential; Electricity Generation; Chiang Mai; Thailand

* Corresponding Author. Tel.: +668 9998 8203, E-mail Address: k.sasujit@yahoo.com

1. บทนำ

จากสถานการณ์พลังงานปัจจุบันมีการใช้พลังงานฟอสซิลจำนวนมากสอดคล้องกับการเจริญเติบโตด้านอุตสาหกรรม เศรษฐกิจ และสังคม ส่งผลทำให้การใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้น ปัจจุบันได้มีการส่งเสริมในการแสวงหาแหล่งพลังงานหมุนเวียนทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานน้ำ พลังงานลม เป็นต้น สอดคล้องกับแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกของประเทศไทย พ.ศ. 2558-2579 ได้รายงานแผนเป้าหมายการเพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทนต่อการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายร้อยละ 30 ในปี พ.ศ.2579 โดยเป้าหมายการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมปี พ.ศ.2557 กำหนดเป้าหมายที่ 224.47 เมกกะวัตต์ และในปี พ.ศ. 2579 กำหนดเป้าหมายเพิ่มขึ้นที่กำลังการผลิต 3,002 เมกกะวัตต์ [1] พลังงานลมถือว่าเป็นพลังงานหนึ่งที่น่าสนใจเนื่องจากปัจจุบันเทคโนโลยีกังหันลมผลิตไฟฟ้ามีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็วทั้งภายในและต่างประเทศ นอกจากนี้ยังคงเป็นพลังงานรูปแบบหนึ่งสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าโดยตรงปราศจากมลภาวะที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมช่วงการผลิตกระแสไฟฟ้าซึ่งแตกต่างจากพลังงานอื่น ๆ แต่ทั้งนี้ในการนำพลังงานลมมาผลิตกระแสไฟฟ้านั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องศึกษาถึงลักษณะภูมิประเทศ อัตราเร็วลม ทิศทางลม และปัจจัยอื่น ๆ เช่น การใช้ประโยชน์ของพื้นที่ เป็นต้น พื้นที่ภาคเหนือตอนบนของประเทศไทยโดยเฉพาะอย่างยิ่งจังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งมีลักษณะภูมิประเทศเป็นภูเขาสูงสลับด้วยช่องเขา ซึ่งถือว่าได้รับอิทธิพลจากลมหุบเขา และลมภูเขาเป็นส่วนใหญ่ ประกอบกับการได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมบางส่วนตามช่วงฤดูกาล อย่างไรก็ตามการนำเทคโนโลยีกังหันลมผลิตไฟฟ้ามาใช้งานจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องศึกษาถึงคุณลักษณะข้อมูลลมในพื้นที่เสียก่อน เพื่อยืนยันถึงศักยภาพด้านพลังงานลม โดยทั่วไปแล้วจะทำการติดตั้งเสาตรวจวัดข้อมูลลมที่มีความสูงอย่างน้อย 40 เมตร

เหนือพื้นดินขึ้นไป จากนั้นนำข้อมูลลมที่ตรวจวัดในพื้นที่วิเคราะห์คุณลักษณะข้อมูลลม และประเมินศักยภาพด้านการผลิตไฟฟ้าจากกังหันลม จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าอัตราเร็วลมพื้นที่ภาคเหนือตอนบนของประเทศไทย ณ บริเวณดอยอินทนนท์ จังหวัดเชียงใหม่ พบว่ามีศักยภาพอัตราเร็วลมเฉลี่ยทั้งปีอยู่ในช่วง 7.00-7.50 เมตรต่อวินาที [2] ขณะเดียวกันพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือบริเวณจังหวัดหนองคาย พบว่ามีอัตราเร็วลมเฉลี่ย 2.84 3.41 และ 3.96 เมตรต่อวินาทีที่ระดับความสูง 60 90 และ 120 เมตรเหนือพื้นดิน [3] นอกจากนั้นพื้นที่ภาคใต้ จังหวัดสงขลาของประเทศไทย พบว่ามีศักยภาพพลังงานลมสูง โดยมีอัตราเร็วลมเฉลี่ย 3.39 – 5.06 เมตรต่อวินาที คิดเป็นกำลังลมเฉลี่ย 81 วัตต์ต่อตารางเมตร [4] จากข้อมูลงานวิจัยที่ผ่านมาเห็นได้ว่าพื้นที่บริเวณภาคใต้ของประเทศไทยมีศักยภาพพลังงานลมสูง ซึ่งได้รับอิทธิพลจากลมบกลมทะเลเช่นเดียวกันพื้นที่ภูเขาสูงในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทยนั้น พบว่ามีศักยภาพด้านอัตราเร็วลมที่ดีเช่นกันซึ่งได้รับผลจากอิทธิพลของลมหุบเขา และลมภูเขา

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษาและประเมินศักยภาพด้านพลังงานลมในพื้นที่อำเภอสะเมิง จังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งมีลักษณะภูมิประเทศเป็นภูเขาสูงและลมพัดผ่านตลอดทั้งปี โดยทำการตรวจวัดข้อมูลอัตราเร็วลม ทิศทางลม บนเสาสูง 80 เมตรเหนือพื้นดิน จากนั้นนำข้อมูลลมมาทำการวิเคราะห์ข้อมูลลมโดยวิธีการทางสถิติ การแจกแจงข้อมูลลมในรอบปี นำเสนอข้อมูลในรูปแบบของอัตราเร็วลมเฉลี่ยในรอบเดือน นอกจากนั้นวิเคราะห์หาค่าไวบูลล์ด้วยระเบียบวิธีทางกราฟ และวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงเฉือนลมเพื่อใช้ในการประมาณค่าอัตราเร็วลมสูงเหนือพื้นดินขึ้นไป การวิเคราะห์หาค่ากำลังลมต่อพื้นที่ และทำการประเมินศักยภาพการผลิตไฟฟ้าจากกังหันลมผลิตไฟฟ้าเฉพาะพื้นที่ต่อไป

2. ระเบียบวิธีวิจัย

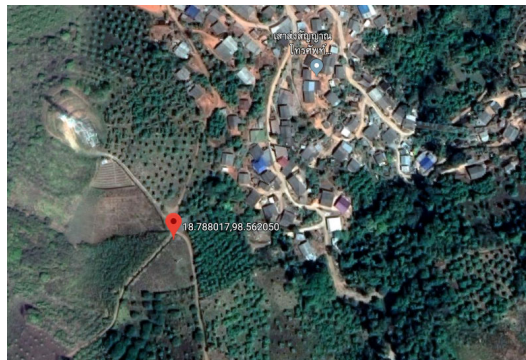
งานวิจัยนี้ทำการศึกษาวิเคราะห์หาค่าศักยภาพพลังงานลมในพื้นที่เฉพาะแหล่ง โดยเก็บข้อมูลลมจากสถานีตรวจวัดข้อมูลลมในรอบ 1 ปี ตั้งแต่เดือน 1 มกราคม พ.ศ.2554 ถึง 31 ธันวาคม พ.ศ. 2554 ที่ระดับความสูงของเสาตรวจวัดข้อมูลลม 80 เมตรเหนือพื้นดิน โดยคัดเลือกพื้นที่ดังกล่าวโดยใช้วิธีการสำรวจและตรวจวัดข้อมูลลมในภาคสนามที่ระดับความสูง 6 เมตรเหนือพื้นดิน พบว่ามีอัตราเร็วลมเฉลี่ย 2.61 เมตรต่อวินาที และประเมินอัตราเร็วลมที่ระดับ 30 เมตรเหนือพื้นดิน พบว่ามีค่าเฉลี่ย 3.77 เมตรต่อวินาที นอกเหนือวิธีการดังกล่าวนี้ได้สอบถามชุมชนในพื้นที่พบว่าความต้องการเคลื่อนที่ของลมในพื้นที่ดังกล่าวมีอย่างต่อเนื่องในรอบปี ประกอบไปด้วยความเป็นไปได้ในการเคลื่อนย้ายอุปกรณ์ติดตั้งกังหันลมในอนาคต ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงเลือกพื้นที่ดังกล่าวในการติดตั้งเสาตรวจวัดข้อมูลลม ได้แก่ อัตราเร็วลม และทิศทางลม ดังมีรายละเอียดผลการศึกษาต่อไปนี้

2.1 ขั้นตอนการวิจัย

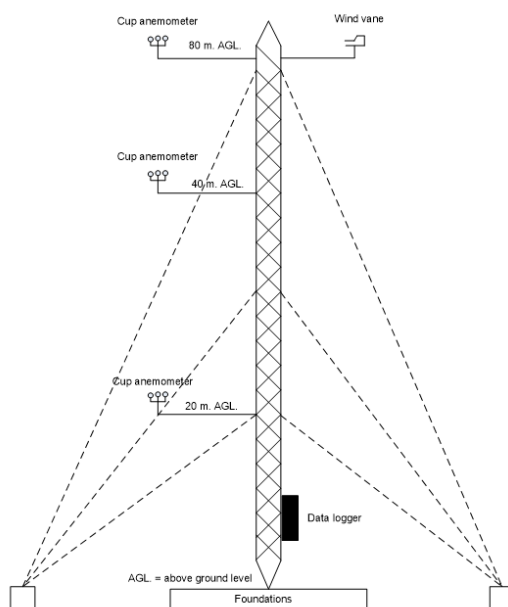
2.1.1 สถานีตรวจวัดและอุปกรณ์ตรวจวัดข้อมูลลม

สถานีตรวจวัดข้อมูลลมติดตั้งบนพื้นที่เชิงเขาเหนือจากระดับน้ำทะเลปานกลาง 1,391 เมตร พิกัดภูมิศาสตร์ $18^{\circ}47'16.9''\text{N}$ $98^{\circ}33'43.4''\text{E}$ พื้นที่หมู่บ้านห้วยน้ำจาง อำเภอสะเมิง จังหวัดเชียงใหม่ ดังรูปที่ 1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดข้อมูลลมประกอบไปด้วยเซนเซอร์ตรวจวัดอัตราเร็วลมแบบลูกถ้วย ยี่ห้อ NRG #40C, USA ติดตั้งบนเสาโครงถักเหล็กยึดสลึงที่ระดับความสูง 20 40 และ 80 เมตรเหนือพื้นดิน ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยที่ระดับความสูง 80 เมตรเหนือพื้นดิน จะทำการติดตั้งเซนเซอร์ตรวจวัดทิศทางลม ยี่ห้อ NRG #200P, USA ข้อมูลลมจะถูกบันทึกเก็บไว้ที่หน่วยความจำสำรองผ่านเครื่องบันทึกข้อมูลลม (Data Logger) ยี่ห้อ NRG model: SymphoniePRO, USA ซึ่งสามารถเก็บข้อมูล

ต่อเนื่องยาวนาน 1 ปี โดยทำการบันทึกข้อมูลเฉลี่ยทุก ๆ 10 นาที ข้อมูลจะถูกจัดเตรียมไฟล์เพื่อนำไปวิเคราะห์การแจกแจงความถี่ของข้อมูลลมต่อไป



รูปที่ 1 สถานีตรวจวัดข้อมูลลมพื้นที่อำเภอสะเมิง จังหวัดเชียงใหม่



รูปที่ 2 อุปกรณ์ตรวจวัดข้อมูลลมบนเสาโครงถัก

2.1.2 การแจกแจงอัตราเร็วลมเฉลี่ย

จากการตรวจวัดข้อมูลลมตามช่วงเวลาสามารถวิเคราะห์หาอัตราเร็วลมเฉลี่ยโดยการแจกแจงความถี่ข้อมูลลม [5] ตามสมการที่ (1)

$$V_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{\infty} n_i v_i \quad (1)$$

โดยที่

V_m = อัตราเร็วลมเฉลี่ยตามช่วงเวลา (เมตรต่อวินาที)

v_i = ค่าช่วงกึ่งกลางอัตราเร็วลม (เมตรต่อวินาที)

n_i = จำนวนชั่วโมง (ชั่วโมง)

N = จำนวนชั่วโมงรวมทั้งหมด (ชั่วโมง)

2.1.3 การวิเคราะห์ทิศทางลมเฉลี่ย

การวิเคราะห์ทิศทางลมเฉลี่ยใช้วิธีการแจกแจงความถี่ของข้อมูลทิศทางลมเช่นเดียวกับวิธีการข้างต้น ทั้งนี้ทิศทางลมจะบอกเป็นค่ามุมทิศทางเคลื่อนที่ของลม โดยสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2)

$$WD_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{\infty} n_i d_i \quad (2)$$

โดยที่

WD_m = ทิศทางลมเฉลี่ยตามช่วงเวลา (มุมมองศา)

d_i = ค่าช่วงกึ่งกลางทิศทางลม (มุมมองศา)

2.1.4 การแจกแจงไวบูลล์พารามิเตอร์

ไวบูลล์เป็นพารามิเตอร์ประกอบไปด้วย 2 พารามิเตอร์ได้แก่ พารามิเตอร์ระดับ (c-scale) พารามิเตอร์รูปร่าง (k-shape) โดยสมการไวบูลล์สามารถวิเคราะห์ได้ตามสมการที่ (3) [5-7]

$$f(V) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right] \quad (3)$$

ฟังก์ชันการแจกแจงสะสม ตามสมการที่ (4)

$$F(V) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right] \quad (4)$$

โดยที่

V = อัตราเร็วลม (เมตรต่อวินาที)

k = ค่าพารามิเตอร์รูปร่าง

c = ค่าพารามิเตอร์ระดับ (เมตรต่อวินาที)

จากสมการที่ (4) จัดรูปสมการใหม่ได้สมการที่ (5) [5]

$$\ln[-\ln(1 - F(V))] = k \ln V - k \ln c \quad (5)$$

จัดรูปสมการที่ (5) ให้อยู่ในรูปแบบสมการเส้นตรง จะได้สมการ $Y_i = kX_i + k \ln c$ โดยที่ $Y_i = \ln[-\ln(1 - F(V))]$ และ $X_i = \ln V$ ทั้งนี้สามารถวิเคราะห์ข้อมูลการแจกแจงอัตราเร็วลมจากค่า $i=1$ ถึง n จะได้ตามสมการที่ (6) และจัดรูปแบบสมการหาค่า k และ c ได้ตามสมการที่ (7) และ (8)

$$\sum_{i=1}^n Y_i X_i = k \sum_{i=1}^n X_i^2 - k \sum_{i=1}^n X_i \ln c \quad (6)$$

$$k = \frac{n \sum_{i=1}^n X_i Y_i - \sum_{i=1}^n X_i \sum_{i=1}^n Y_i}{n \sum_{i=1}^n X_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n X_i\right)^2} \quad (7)$$

$$c = \exp\left[- \frac{\sum_{i=1}^n X_i^2 \sum_{i=1}^n Y_i - \sum_{i=1}^n X_i \sum_{i=1}^n X_i Y_i}{n \sum_{i=1}^n X_i Y_i - \sum_{i=1}^n X_i \sum_{i=1}^n Y_i} \right] \quad (8)$$

2.1.5 กำลังลมต่อพื้นที่

กำลังลมต่อพื้นที่เป็นค่าที่บ่งบอกถึงศักยภาพกำลังลม โดยวิเคราะห์ได้ตามสมการที่ (9) [3], [7]

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \rho V_m^3 \quad (9)$$

โดยที่

ρ = ความหนาแน่นของอากาศ เลือกใช้ค่าเท่ากับ 1.225 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

2.1.6 สัมประสิทธิ์แรงเฉือนลม (α)

ค่าสัมประสิทธิ์แรงเฉือนลมเป็นค่าที่ใช้สำหรับการประเมินอัตราเร็วลมที่ระดับความสูงเหนือจากจุดตำแหน่งที่ตรวจวัด โดยใช้กฎเพาเวอร์ (Power Law Exponent) ตามสมการที่ (10) [5-7]

$$V_z = V_r \left(\frac{z}{z_r} \right)^\alpha \quad (10)$$

ทั้งนี้สามารถเขียนเป็นสมการเพื่อประเมินหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเฉือนลม ได้ตามสมการที่ (11) [5]

$$\alpha = \frac{\ln\left(\frac{V_z}{V_r}\right)}{\ln\left(\frac{z}{z_r}\right)} \quad (11)$$

โดยที่

V_z = อัตราเร็วลมที่ระดับความสูง z (เมตร)

V_r = อัตราเร็วลมที่อ้างอิงที่ระดับความสูง z_r (เมตร)

2.1.7 คาปาซิตีแฟคเตอร์

คาปาซิตีแฟคเตอร์จะบ่งบอกถึงสมรรถนะของกังหันลมผลิตไฟฟ้า โดยสามารถคำนวณตามสมการที่ (12) [5], [7]

$$C_f = \frac{E_{out}}{E_r} \times 100 \quad (12)$$

โดยที่

C_f = คาปาซิตีแฟคเตอร์ (ร้อยละ)

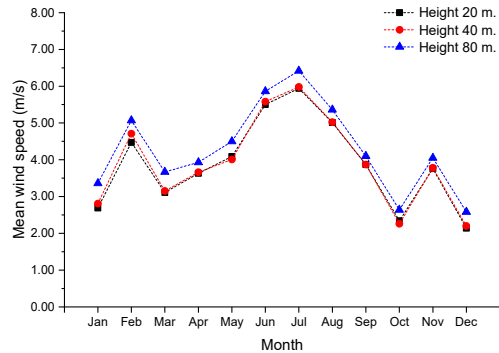
P_r = กำลังการผลิตไฟฟ้าของกังหันลม (กิโลวัตต์)

E_{out} = พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้รายปี (กิโลวัตต์ชั่วโมง)

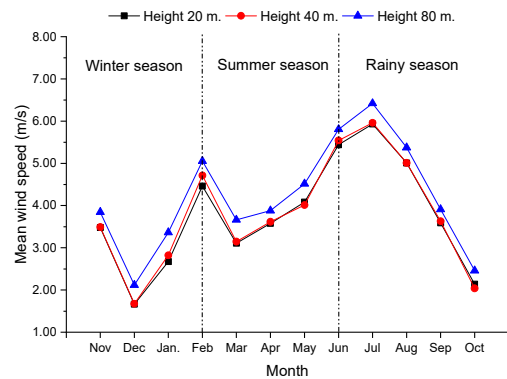
โดยที่ $E_r = 8760 P_r$

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

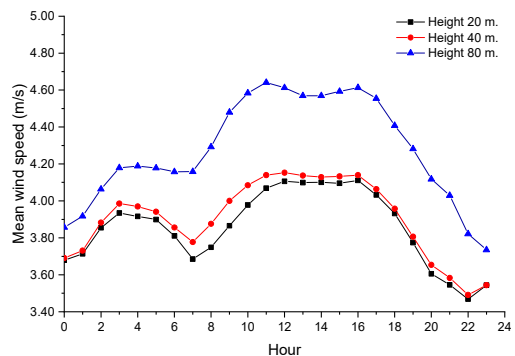
การประเมินศักยภาพพลังงานลมเลื้อยวิเคราะห์ข้อมูลในรอบปี ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2554 ถึง 31 ธันวาคม พ.ศ.2554 โดยผลการศึกษาที่มีดังต่อไปนี้



รูปที่ 3 อัตราเร็วลมเฉลี่ยรายเดือนในรอบปี



รูปที่ 4 อัตราเร็วลมเฉลี่ยรายฤดูกาลในรอบปี



รูปที่ 5 อัตราเร็วลมเฉลี่ยรายชั่วโมงในรอบปี

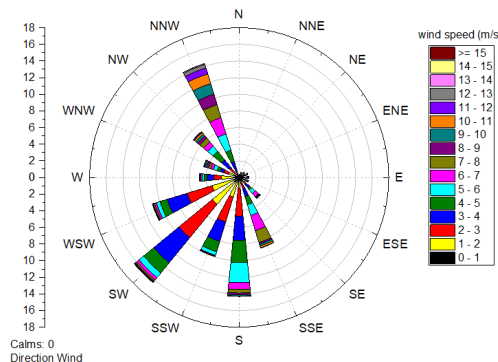
3.1 ผลของอัตราเร็วลมเฉลี่ย

ผลการแจกแจงอัตราเร็วลมเฉลี่ยที่ระดับความสูง 20 40 และ 80 เมตรเหนือพื้นดิน พบว่ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.88 3.92 และ 4.30 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ ดังรูปที่ 3 ทั้งนี้พบว่าอัตราเร็วลมมีแนวโน้มเพิ่มช่วงเดือนมิถุนายนถึงเดือนสิงหาคม เนื่องจากช่วงนี้เป็นช่วงฤดูฝนทำให้ได้รับอิทธิพลของลมมรสุมต่าง ๆ ที่พัดผ่าน

ประเทศไทย และมีแนวโน้มลดลงช่วงฤดูหนาว ในเดือนกันยายนจนถึงเดือนมกราคม ขณะเดียวกันพบว่าเดือนกุมภาพันธ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นซึ่งอาจเป็นเพราะได้รับอิทธิพลจากมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือส่งผลให้อัตราเร็วลมเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเข้าสู่ฤดูร้อนช่วงเดือนมีนาคมจนถึงพฤษภาคม พบว่าอัตราเร็วลมเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นกัน ดังรูปที่ 4 แต่เมื่อพิจารณาอัตราเร็วลมรายชั่วโมงพบว่าช่วงเวลา 10.00–16.00 น. อัตราเร็วลมเฉลี่ยมีค่าสูงกว่า 4.30 เมตรต่อวินาที ที่ระดับความสูง 80 เมตรเหนือพื้นดิน ขณะเดียวกันที่ระดับความสูง 20 และ 40 เมตรเหนือพื้นดิน พบว่าช่วงเวลาดังกล่าวอัตราเร็วลมเฉลี่ย 4.0-4.10 เมตรต่อวินาที ซึ่งเห็นได้ว่าอัตราเร็วลมมีค่าเพิ่มขึ้นตามระดับความสูง ดังรูปที่ 5

3.2 ผลของการแจกแจงทิศทางลมเฉลี่ย

การแจกแจงความถี่ทิศทางลมที่ของลมที่พบว่ามีค่าเฉลี่ยการเคลื่อนที่ของลมเฉลี่ยในรอบปีที่ผ่านมาทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ โดยมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 20.73 ดังแสดงแผนผังการเคลื่อนที่ของลม ดังรูปที่ 6

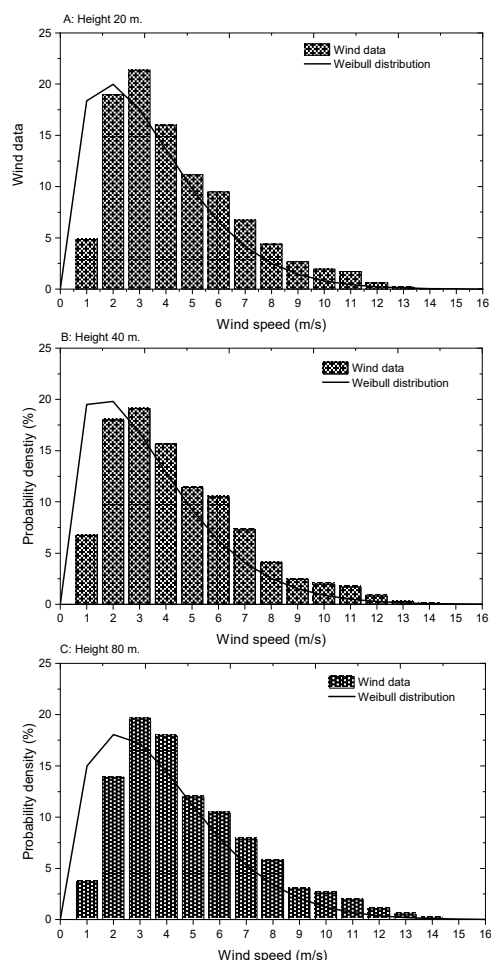


รูปที่ 6 แผนผังการแจกแจงทิศทางลมในรอบปี

3.3 ผลของการแจกแจงไวบูลล์พารามิเตอร์

ผลการแจกแจงไวบูลล์พารามิเตอร์ พบว่าการกระจายของข้อมูลในรอบปีมีค่าพารามิเตอร์รูปร่างใกล้เคียงกันในแต่ละเดือน โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.715, 1.633 และ 1.783 ส่วนค่าพารามิเตอร์ระดับในรอบปีพบว่ามีค่าสอดคล้องกับอัตราเร็วลมเฉลี่ยดังแสดงไว้ใน

รูปที่ 7 โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.649, 3.651 และ 4.092 เมตรต่อวินาที ทั้งนี้วิเคราะห์การกระจายข้อมูลลมที่ได้จากการตรวจวัดจริงกับการแจกแจงความน่าจะเป็นโดยใช้สมการไวบูลล์ พบว่าค่าที่ได้จากการประเมินโดยวิธีแจกแจงไวบูลล์ให้ผลการวิเคราะห์ที่ดีโดยมีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลจากการตรวจวัดจริงที่ความสูง 20, 40 และ 80 เมตรเหนือพื้นดิน ตามลำดับ สอดคล้องกับการศึกษาของ J. N. Touafio et al. [8]



รูปที่ 7 การแจกแจงไวบูลล์กับข้อมูลลมที่ตรวจวัดจริง

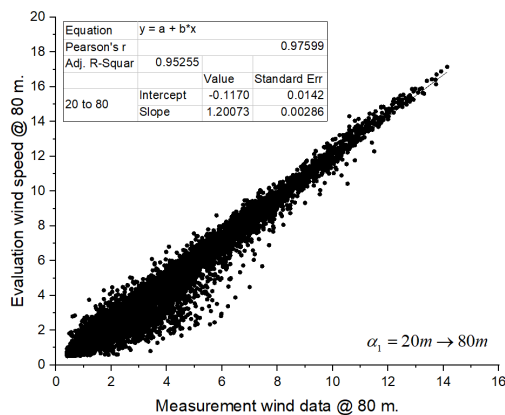
3.4 ผลการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์แรงเฉือนลม

ผลวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงเฉือนลม (α) ซึ่งเป็นค่าสำหรับการประเมินอัตราเร็วลมที่สูงขึ้นไปในกรณี que ที่ทราบค่าอัตราเร็วลม 2 ระดับความสูง ผลการวิเคราะห์

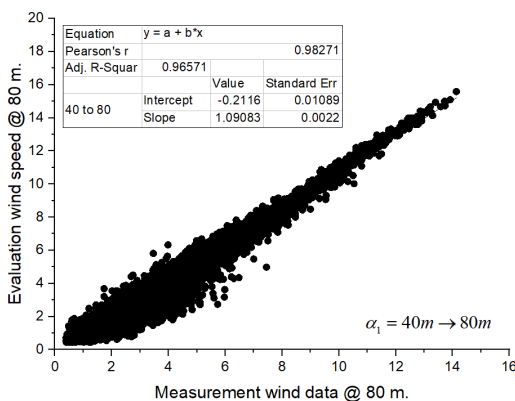
พบว่ามีความเฉลี่ยสัมประสิทธิ์แรงเฉือนลมของพื้นที่นี้เท่ากับ 0.190 ดังตารางที่ 1 นอกจากนั้นเมื่อนำข้อมูลอัตราเร็วลมตรวจวัด 20 เมตร ประเมินไปที่ 80 เมตรเหนือพื้นดิน พร้อมเปรียบเทียบกับข้อมูลการตรวจวัดจริง พบว่ามีค่าระดับความเชื่อมั่นของข้อมูลมากกว่าร้อยละ 95 ดังรูปที่ 8 (ก) เช่นเดียวกันกับกราฟที่ 8 (ข)

ตารางที่ 1 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเฉือนของลม

Details	Height of wind speed (m.)		
	20&40 m.	20&80 m.	40&80 m.
Data	1,653	2,248	3,012
α	0.182	0.194	0.193
S.D.	0.072	0.082	0.082



ก) การประเมินอัตราเร็วลมระดับความสูง 20 เมตรไปที่ระดับความสูง 80 เมตรเหนือพื้นดิน

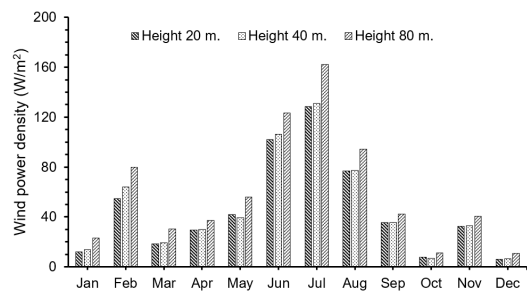


ข) การประเมินอัตราเร็วลมระดับความสูง 40 เมตรไปที่ระดับความสูง 80 เมตรเหนือพื้นดิน

รูปที่ 8 ผลการเปรียบเทียบอัตราเร็วลมที่ประเมินได้กับค่าตรวจวัดจริงที่ระดับความสูง 80 เมตรเหนือพื้นดิน

3.5 ผลของกำลังลมต่อพื้นที่

จากข้อมูลอัตราเร็วลมที่ทำการตรวจวัดรายชั่วโมงในรอบปีพบว่าประเมินเป็นกำลังลมต่อพื้นที่เฉลี่ยเท่ากับ 83.78 88.39 และ 106.99 วัตต์ต่อตารางเมตร ซึ่งประเมินการผลิตไฟฟ้าเฉลี่ย 734 774 และ 937 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อปี ที่ระดับความสูงการตรวจวัดข้อมูลลม 20 40 และ 80 เมตรเหนือพื้นดินตามลำดับ ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 กำลังลมต่อพื้นที่รายเดือนในรอบปี

3.6 ศักยภาพการผลิตไฟฟ้าจากกังหันลม

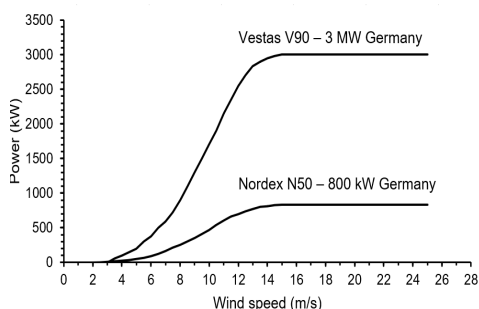
การประเมินศักยภาพการผลิตไฟฟ้าจากกังหันลมผลิตไฟฟ้านั้น งานวิจัยนี้เลือกที่กำลัการผลิตแตกต่างกันเพื่อเปรียบเทียบศักยภาพ โดยใช้กังหันลม Nordex N50 กำลัการผลิตไฟฟ้าสูงสุด 800 กิโลวัตต์จากประเทศเยอรมนี มีค่าเริ่มต้นการหมุน (Cut-in) เท่ากับ 2.50 เมตรต่อวินาที จุดส่วนหมุนกังหันลม (Hub. Height) เท่ากับ 70 เมตรเหนือพื้นดิน โดยเป็นกังหันลมที่มีใบพัดจำนวน 3 ใบพัด พื้นที่โรเตอร์เท่ากับ 1,964 ตารางเมตร [9] สำหรับกังหันลมขนาดใหญ่ที่มีการใช้งานในปัจจุบันซึ่งมีขนาดกำลัการผลิตที่สูงโดยงานวิจัยนี้เลือกกังหันลม Vestas V90 กำลัการผลิต 3 เมกกะวัตต์ จากประเทศเดนมาร์ก มีจุดเริ่มต้นการหมุนเท่ากับ 3.5 เมตรต่อวินาที ที่ระดับจุดส่วนหมุนกังหันลมเท่ากับ 80 เมตรเหนือพื้นดิน [10] โดยการประเมินค่าพลังงานใช้วิธีทางสถิติในการแจกแจงอัตราเร็วลมสอดคล้องกับกังหันลมและเส้นโค้งกำลัการผลิตไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 10-12



รูปที่ 10 กังหันลมผลิตไฟฟ้ายี่ห้อ Nordex N50 ขนาด
กำลังการผลิต 800 กิโลวัตต์ [9]



รูปที่ 11 กังหันลมผลิตไฟฟ้ายี่ห้อ Vestas V90 ขนาด
กำลังการผลิต 3 เมกกะวัตต์ [10]



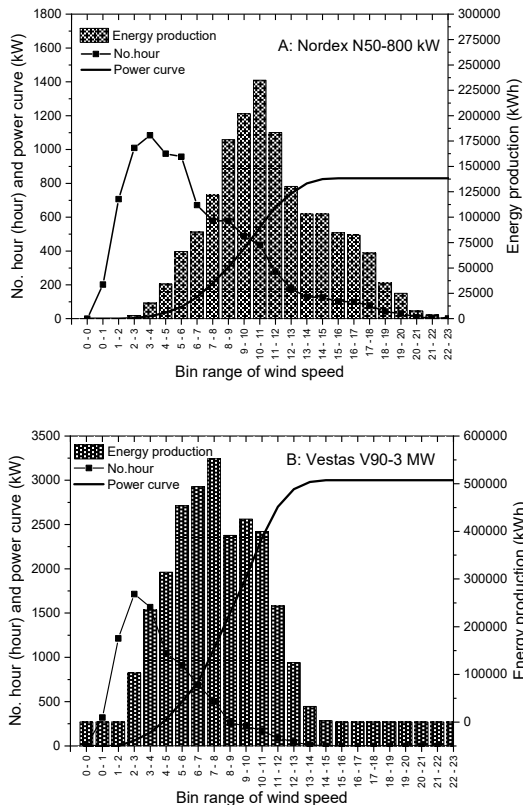
รูปที่ 12 เส้นโค้งกำลังกังหันลม Nordex N50 ขนาด
กำลังการผลิต 800 กิโลวัตต์ [10], [11]

ผลการวิเคราะห์ศักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้า
จากกังหันลม พบว่ากังหันลมผลิตไฟฟ้า Nordex N50
และ Vestas V90 ให้ศักยภาพการผลิตไฟฟ้ารวม

แตกต่างกันเนื่องจากมีกำลังการผลิตที่ต่างกัน โดย
ให้พลังงานไฟฟ้ารวม 1,761,379 และ 3,772,400
กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี แต่เมื่อพิจารณาค่าค่าปาซีตีแฟค
เตอร์ของการเปลี่ยนรูปพลังงานไฟฟ้าของกังหันลม
พบว่ามีความร้อยละ 25.13 และร้อยละ 14.35 ตามลำดับ
ดังตารางที่ 2 ซึ่งค่าดังกล่าวแสดงให้เห็นว่ากังหันลม
Nordex N50 นั้นให้ผลการเปลี่ยนรูปพลังงานเมื่อเทียบ
กับกำลังการผลิตสูงสุดของกังหันลมดีกว่า กังหันลม
ขนาดใหญ่ของ Vestas V90 อย่างไรก็ตามกังหันลม
ขนาดใหญ่จะเหมาะสมสำหรับพื้นที่ที่มีค่ากำลังลมที่สูง
กว่าพื้นที่งานวิจัยนี้ สอดคล้องกับการศึกษาการผลิต
ไฟฟ้า จากกังหันลมขนาดใหญ่ตามแนวชายฝั่งทะเล ที่มี
กำลังการผลิตสูงกว่า 1 เมกกะวัตต์ โดยมีค่าอัตราเร็ว
เฉลี่ยมากกว่า 9 เมตรต่อวินาที [11] ดังนั้นจากผลการ
วิเคราะห์ศักยภาพการผลิตไฟฟ้าจากกังหันลมข้างต้น
แสดงให้เห็นว่าพื้นที่ภาคเหนือตอนบนของประเทศไทย
การใช้กังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดไม่เกิน 1 เมกกะวัตต์ จะ
เหมาะสมกับพื้นที่ดังกล่าว เนื่องจากให้ค่าค่าปาซีตีแฟค
เตอร์ที่ดี นอกเหนือจากปัจจัยราคาต้นทุนของกังหันลม
ผลิตไฟฟ้าที่ต่ำกว่า และปัจจัยในเรื่องการขนส่งอุปกรณ์
ติดตั้งในพื้นที่ที่เป็นพื้นที่เชิงเขาและมีขนาดถนนที่ไม่
เหมาะสมกับการเคลื่อนย้ายอุปกรณ์กังหันลมผลิตไฟฟ้า
ซึ่งผลการผลิตไฟฟ้าจากกังหันลมตามช่วงของอัตราเร็ว
ลมต่าง ๆ กับค่าเส้นโค้งกำลังกังหันลมผลิตไฟฟ้า และ
จำนวนชั่วโมงที่ลมพัดผ่านมาตามช่วงอัตราเร็วลมต่าง ๆ
ของงานวิจัยนี้ แสดงได้ดังรูปที่ 13

ตารางที่ 2 พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้รายปีจากกังหันลม

Wind Turbine	Nordex N50	Vestas V90
Capacity	800 kW	3 MW
Annual energy production (kWh/year)		
- Gross energy production	1,761,379	3,772,400
- Net. energy production	442,702	541,515
Capacity factor (%C _f)	25.13%	14.35%



รูปที่ 13 การแจกแจงอัตราเร็วลมต่อจำนวนชั่วโมงลมที่พัดผ่านและพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้

4. สรุป

จากการประเมินศักยภาพการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม และการวิเคราะห์คุณลักษณะข้อมูลลมในรอบปี พ.ศ. 2554 พบว่ามีอัตราเร็วลมเฉลี่ยในรอบปีมีค่าเท่ากับ 3.88 3.92 และ 4.30 เมตรต่อวินาที ที่ระดับความสูง 20 40 และ 80 เมตรเหนือพื้นดิน ตามลำดับ โดยทิศทางลมเฉลี่ยพัดผ่านมาทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ เป็นส่วนใหญ่คิดเป็นร้อยละ 20.73 กำลังลมต่อพื้นที่เฉลี่ย 107 วัตต์ต่อตารางเมตร ค่าไวบูลล์พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์สามารถนำไปคำนวณหาความหนาแน่นพลังงานและศักยภาพการผลิตไฟฟ้าได้ รวมไปถึงการแจกแจงความถี่ของข้อมูลลม ขณะเดียวกันค่าสัมประสิทธิ์แรงเฉือนลมของพื้นที่งานวิจัยนี้ พบว่ามีค่าเฉลี่ย 0.19 สามารถนำไปคำนวณหาอัตราเร็วลม

สูงขึ้นในพื้นที่นี้ได้ และจากการวิเคราะห์ศักยภาพการผลิตไฟฟ้าจากกังหันลม Nordex N50 เปรียบเทียบกังหันลมขนาดใหญ่ Vestas V90 พบสามารถผลิตไฟฟ้ารวม 1,761,379 และ 3,772,400 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี ทั้งนี้เมื่อพิจารณาค่าการเปลี่ยนรูปพลังงานเทียบกับกำลังการผลิตไฟฟ้าของกังหันลม พบว่ากังหันลม Nordex N50 นั้นจะให้ผลที่ดีกว่าโดยมีค่าร้อยละ 25.13 ซึ่งบ่งบอกถึงพื้นที่ภาคเหนือที่มีลักษณะเป็นภูเขาสูงพื้นที่เชิงเขาลาดชัน ในจังหวัดเชียงใหม่ มีศักยภาพพลังงานลมเพียงพอที่จะนำเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อทดแทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลของประเทศได้อย่างไรก็ตามควรจะนำข้อมูลลมอย่างน้อย 3-5 ปี มาทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบเพื่อผลการเปลี่ยนแปลงข้อมูลลมตามช่วงเวลา และเพื่อยืนยันถึงศักยภาพที่เป็นไปได้ รวมถึงการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพื้นที่ การใช้ประโยชน์ในพื้นที่ คมนาคมด้านการขนส่งอุปกรณ์ แนวทางการสร้างความเข้าใจของชุมชน และการจัดทำแผนที่กังหันลมโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อวิเคราะห์ความเหมาะสมทั้งตำแหน่ง ขนาดกังหันลมผลิตไฟฟ้า และความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และวิทยาลัยพลังงานทดแทนมหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Energy Policy and Planning Office. (2015). Alternative Energy Development Plan: AEDP 2015. [Online]. Available: https://www.dede.go.th/download/files/AEDP2015_Final_version.pdf
- [2] D. Thakur and N. Mithulananthan. "Wind Energy in Thailand to Enhance Energy

- Security: Potential, Status and Barriers,” *International Energy Journal*, vol. 11, pp. 203-212, Dec. 2010.
- [3] S. Polnumtiang and K. Tangchaichit, “Wind Energy Data Analysis in Nong Khai, Thailand,” *Ladkrabang Engineering Journal*, vol. 34, pp. 29-36, Jun. 2017.
- [4] S. Luankaeo and Y. Tirawanichakul, “Assessment of Wind Energy Potential in Prince of Songkla University (South Part of Thailand): Hatyai campus,” *Energy Procedia*, vol. 138, pp. 704-709, Oct. 2017.
- [5] K. Sasujit and N. Dussadee, “Evaluation of Wind Energy Potential and Electricity Generation in Northern of Thailand,” *Naresuan University Journal: Science and Technology*, vol. 24, pp. 41-54, Oct. 2016.
- [6] F. Arefi, J. Moshtagh and M. Moradi, “The Wind Energy Potential of Kurdistan, Iran,” *International Scholarly Research Notices*, Article ID 323620, pp. 1-9, Oct. 2014.
- [7] S. O. Oyedepo, M. S. Adaramola and S. S. Paul, “Analysis of wind speed data and wind energy potential in three selected locations in south-east Nigeria,” *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, vol. 3, no. 7, pp. 1-11, May. 2012.
- [8] J. N. Touafio, O. Sanda, S. Malenguinza, J. M. Boliguipa and R. M. Mouangue, “Analysis of a wind turbine project in the city of Bouar (Central African Republic),” *Scientific African*, vol. 8, pp. 1-15.
- [9] Wind-turbine-models.com. (2011). Nordex N50. [Online]. Available: <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/392-nordex-n50>
- [10] wind-turbine.com. (2020). Vestas V90 3 MW Brochure. [Online]. Available: <https://wind-turbine.com/download/46782/v90brochn-everusedvestasv903mwbrochure.pdf>
- [11] S. M. Boudia and O. Guerri, “Investigation of Wind Power Potential at Oran, Northwest of Algeria,” *Energy Conversion and Management*, vol. 105, pp. 81-92, Nov. 2015.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

ลักษณะรูปแบบหัวพ่นอะตอมไมซ์ในกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ

มนตรี ขาวสุข^{1*} สุรัตน์ วรรณศรี² และ ศิริชัย ต่อสกุล³

^{1,3} ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

² สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

^{1,3} 39 หมู่ 1 ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12000

² 744 ถนนสุรนารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

รับบทความ 20 ธันวาคม 2563 แก้ไขบทความ 14 พฤษภาคม 2564 ตอรับบทความ 7 มิถุนายน 2564

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้ศึกษาลักษณะรูปแบบหัวพ่นอะตอมไมซ์ในกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ กรรมวิธีการผลิตผงโลหะด้วยกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ เป็นกระบวนการที่ได้รับความนิยมมากที่สุด โดยได้มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องทางด้านวิศวกรรม แต่ยังคงขาดการศึกษาเกี่ยวกับการผลิตอนุภาคผงโลหะมีค่าที่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องประดับออกมาเผยแพร่ทั้งในประเทศและต่างประเทศ เป็นเหตุผลหลักที่ทำให้คณะผู้วิจัยสนใจที่ศึกษาวิจัยเพื่อนำไปประยุกต์ใช้สำหรับอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องประดับของไทยที่กำลังอยู่ในช่วงของการเปลี่ยนผ่านเทคโนโลยีการผลิตที่ผู้ประกอบการหันมาให้ความสำคัญกับเทคโนโลยีโลหะผงมากขึ้นในปัจจุบัน ซึ่งกระบวนการกรรมวิธีการผลิตผงโลหะด้วยกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ได้แก่ การหลอม การทำให้น้ำโลหะเกิดการแตกตัวเป็นละออง เย็นตัวและการแข็งตัวกลายเป็นอนุภาคของแข็งภายใต้บรรยากาศก๊าซควบคุม ปัจจัยที่มีผลต่อรูปร่าง ขนาดและการกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงโลหะ ประกอบด้วย ชนิดของก๊าซเฉื่อย อุณหภูมิของน้ำโลหะ และรูปแบบของหัวพ่นที่มีลักษณะแตกต่างกัน ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าหัวพ่นอะตอมไมซ์ แบบ Close-Coupled เป็นหัวพ่นที่ให้ประสิทธิภาพการผลิตสูงสุด ขนาดของอนุภาคที่ผลิตได้มีขนาดเล็กที่สุดและมีรูปร่างเป็นเม็ดอนุภาคทรงกลม จากการศึกษางานวิจัยข้อมูลที่ได้จะส่งเสริมการผลิตเครื่องประดับในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

คำสำคัญ : กระบวนการอะตอมไมเซชัน; กระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ ; หัวพ่นอะตอมไมซ์

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 5709 7884, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: montri.k@mail.rmutt.ac.th

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Characteristics of Atomizer Nozzle in Gas Atomization

Montri Kawsuk^{1*} Surat Wannasri² and Sirichai Torsakul³

^{1,3}Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi Patumtani

² Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan

^{1,3}39 Moo. 1, Rangsit-Nakhon Nayok Road, Klong6, Khlong Luang Pathum Thani 12000

²744 Suranarai Road, Muang, Nakhon Ratchasima 30000

Received 20 December 2020; Revised 14 May 2021; Accepted 7 June 2021

Abstract

This research article aims to study of the atomizer nozzle pattern in the gas atomization process. The production of metal powder by using a gas atomization process. It is the most popular process. This process is used in various industry and engineering application. However, there is lack of information on the production of various precious metal powders in the jewelry manufacturing industry both in the country and abroad. For this reasons, the research team is interested in applying this process for the Thai jewelry manufacturing industry. Currently, the jewelry industry is in a transitional period of manufacturing technology with an increased focus on powder metallurgy technology. The production of metal powder by using a gas atomization process consisting of the following 3 steps: melting, making of atomized molten metal, cooling and solidifying for solid particles under a controlled gas atmosphere. Factors affecting particle shape, particle size, and particle size distribution are consisting of inert gas type, molten metal temperature, and the configuration or pattern of the nozzle that are different characteristics. The results can be concluded that Close-Coupled Nozzle is the most suitable nozzle for production due to the highest productivity providing the smallest particle size and spherical granular shape. The information from this study will be useful for the Thai jewelry manufacturing industry.

Keywords : Atomization Processes; Atomization Processes with Gases; Atomizer Nozzle

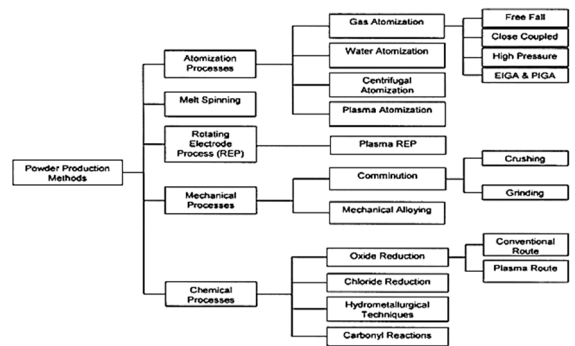
* Corresponding Author. Tel.: +668 5709 7884, E-mail Address: montri.k@mail.rmutt.ac.th

1. บทนำ

เทคโนโลยีทางด้านโลหะผงวิทยา (Powder Metallurgy Technology) เป็นเทคโนโลยีโลหะผงที่มีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรม มีการนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมยานยนต์ และอุตสาหกรรมประเภทอื่นๆ การผลิตโลหะผงด้วยกระบวนการอะตอมไมเซชัน เป็นกระบวนการที่มีการใช้อย่างกว้างขวาง ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการอะตอมไมเซชันมีกำลังผลิตสูง สามารถผลิตได้ทั้งโลหะบริสุทธิ์และโลหะผสม นอกจากนั้นโลหะผงที่ได้ยังมีการแข็งตัวอย่างรวดเร็วส่งผลให้โลหะผงมีโครงสร้างละเอียด เมื่อนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานจะได้ชิ้นงานมีความแข็งแรงสูง สำหรับการผลิตโลหะผงด้วยกระบวนการอะตอมไมเซชันในประเทศไทยยังอยู่ในระหว่างการศึกษาเพื่อทำการผลิต เนื่องจากยังขาดองค์ความรู้เชิงบูรณาการ ในการออกแบบและสร้างเครื่องมือ รวมถึงการจัดหาอุปกรณ์ที่จำเป็นในการผลิตโลหะผงด้วยกระบวนการอะตอมไมเซชัน จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตโลหะผงและการวิจัยทางด้านโลหะผงวิทยา [1] อีกทั้งยังขาดการศึกษาการผลิตอนุภาคผงโลหะมีค่าด้วยกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ เพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องประดับทั้งในประเทศและต่างประเทศ

กระบวนการทางด้านโลหะผงวิทยา เป็นกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานโดยมีวัสดุตั้งต้นเป็นผงนำมาอัด ให้ได้รูปทรงที่ต้องการแล้วนำไปให้ความร้อนโดยไม่มีการหลอมเหลว เพื่อให้ผงโลหะและส่วนผสมอื่นประสานติดกันเป็นชิ้นงาน เทคนิคการขึ้นรูปโลหะ (Powder Metallurgy) มีอยู่ 3 ขั้นตอน คือ การจำแนกคุณลักษณะของผงโลหะ (The Characterization of Metal Powders) การขึ้นรูปผงโลหะ (The Forming of Metal Powders) และการเผาผนึก (Sintering) [2] การที่จะเลือกใช้เทคนิคหรือกรรมวิธีการใดเป็นการเฉพาะสำหรับการผลิตผงโลหะขึ้นอยู่กับขนาด รูปร่าง

ของอนุภาค โครงสร้าง และสมบัติเคมีของผงโลหะที่ต้องการ นอกจากนี้ยังต้องพิจารณาถึงค่าใช้จ่ายของกรรมวิธีการผลิต [3] กรรมวิธีการผลิตผงโลหะ สามารถแบ่งได้เป็น 5 กลุ่มคือ กระบวนการอะตอมไมเซชัน (Atomization Processes) การปั่นหลอม (Melt Spinning) การใช้แรงเหวี่ยง (Rotating Electrode Process (REP)) กระบวนการทางกล (Mechanical Processes) และ กระบวนการทางเคมี (Chemical Processes) [4] ดังแผนแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 กระบวนการผลิตโลหะผง [4]

ลักษณะรูปแบบหัวพ่นอะตอมไมเซชันในกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ ถูกนำมาเป็นวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษาในครั้งนี้ ซึ่งกรรมวิธีการผลิตผงโลหะด้วยกระบวนการอะตอมไมเซชันที่นิยมใช้มากที่สุดสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 วิธี จำแนกตามวิธีการทำให้โลหะเหลวแตกตัว คือ อะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ (Gas Atomization) อะตอมไมเซชันด้วยน้ำ (Water Atomization) อะตอมไมเซชันด้วยแรงหมุนเหวี่ยง (Centrifugal Atomization) อะตอมไมเซชันด้วยพลาสมา (Plasma Atomization)

หลักการทั่วไปของกระบวนการอะตอมไมเซชันประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ได้แก่ การหลอมก้อนโลหะให้เป็นของเหลว (Melting) การทำให้น้ำโลหะแตกตัวเป็นละออง (Disintegration or Atomization) และการเย็นตัวและแข็งตัวของละอองน้ำโลหะกลายเป็นอนุภาคผง

โลหะ (Cooling and Solidification) อีกทั้งยังสามารถแยกรายละเอียดปลีกย่อยตามวิธีการที่ทำให้น้ำโลหะเหลวแตกตัวเป็นละออง [5]

1.1 อะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ

กระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซทำได้โดยใช้ก๊าซเป็นตัวทำให้น้ำโลหะเหลวเกิดการแตกตัว โดยลำกระแส น้ำโลหะเหลวถูกปะทะด้วยก๊าซเฉื่อย เช่น ไนโตรเจน อาร์กอน หรือฮีเลียม ที่พ่นจากหัวพ่นอะตอมไมซ์ ทำให้เกิดการแตกตัวที่มีลักษณะเป็นละอองอนุภาคผง และเกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็ว แสดงในรูปที่ 2 ก) อนุภาคผงโลหะที่ผลิตได้มีรูปร่างเป็นทรงกลมขนาดเล็ก ขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยอยู่ในช่วง 50 ถึง 300 ไมโครเมตร

1.2 อะตอมไมเซชันด้วยน้ำ

กระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยน้ำ เป็นกระบวนการที่ใช้น้ำแรงดันสูงสำหรับการทำให้น้ำโลหะเกิดการแตกตัว กระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยน้ำจะมีอัตราการเย็นตัวที่สูงกว่ากระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ สำหรับหัวพ่นน้ำอาจมีเพียงหัวพ่นเดียวหรือหลายหัวพ่น โดยน้ำจะถูกฉีดเข้าปะทะกับลำกระแส น้ำโลหะเหลวโดยตรงทำให้เกิดการแตกตัว และทำให้เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็วเป็นอนุภาคผงด้วยแรงดันของน้ำ ดังรูปที่ 2 ข) ผงโลหะที่ได้มีรูปร่างแบบไม่แน่นอน (Irregular) มีผิวขรุขระ ขนาดอนุภาคผงโลหะที่ผลิตได้มีขนาดเล็กประมาณ 100 ไมโครเมตร นอกจากนี้ ผงโลหะที่ผลิตได้อาจเกิดการออกซิเดชัน (Oxidation) ได้บ้าง ซึ่งการเปลี่ยนของเหลวจากน้ำเป็นน้ำมันอาจมีส่วนช่วยในการควบคุมรูปร่างของผงโลหะและช่วยลดการเกิดออกซิเดชัน

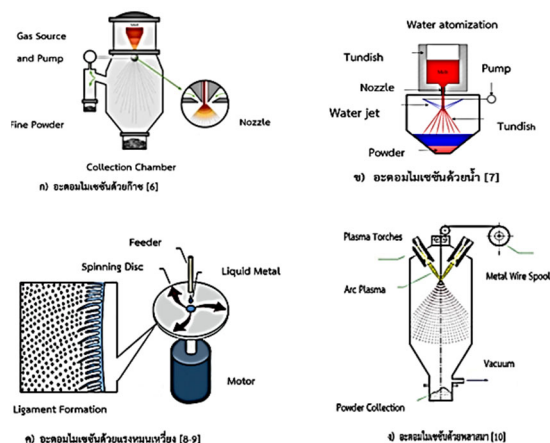
1.3 อะตอมไมเซชันด้วยแรงหมุนเหวี่ยง

กระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยแรงหมุนเหวี่ยง เป็นกระบวนการที่ใช้หลักการแรงเหวี่ยงสลัดน้ำโลหะที่อยู่บนผิวจานหมุนเพื่อทำให้น้ำโลหะเกิดการแตกตัวเป็นละอองน้ำขนาดเล็กและเย็นตัวกลายเป็นผงโลหะ วิธีการ

นี้จะได้ผงโลหะที่สะอาด และมีขนาดค่อนข้างสม่ำเสมอ แต่มีกำลังการผลิตที่ต่ำ ดังรูปที่ 2 ค) รวมทั้งอุปกรณ์มีราคาแพงและได้ขนาดผงอนุภาคค่อนข้างหยาบเมื่อเทียบกับกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยน้ำ ขนาดอนุภาคผงโลหะที่ผลิตได้มีขนาดเล็กประมาณ 200 ไมโครเมตร ซึ่งขึ้นอยู่กับความเร็วรอบ ขนาดและรูปทรงของจานหมุน อัตราการป้อนน้ำโลหะและอุณหภูมิ น้ำโลหะที่ถูกหมุนเหวี่ยงด้วยแรงหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง [8-9]

1.4 อะตอมไมเซชันด้วยพลาสมา

กระบวนการนี้เกี่ยวข้องกับการแปลงพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับพลาสมาไปเป็นพลังงานความร้อนสูง ซึ่งจะสร้างไอพ่นของก๊าซเฉื่อยที่แตกตัวเป็นไอออนที่ร้อนจัดด้วยความเร็วสูง ดังรูปที่ 2 ง) ทำให้น้ำโลหะแตกตัวเป็นละอองอนุภาคผงในขณะที่ไอพ่นอุณหภูมิสูงที่ขยายออกไปช่วยให้เกิดกระบวนการอบเพื่อให้ได้โครงสร้างเม็ดอนุภาคทรงกลมอย่างสมบูรณ์ และขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยสำหรับการผลิตผงไทเทเนียมประมาณ 125 ไมโครเมตร [10]



รูปที่ 2 กระบวนการอะตอมไมเซชัน

2. กระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ

กระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ เป็นกระบวนการที่น้ำโลหะเหลวถูกทำให้แตกตัวเป็นละอองด้วยก๊าซที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง ซึ่งขั้นตอนแรก

โลหะจะถูกหลอมภายในเบ้าหลอม และถูกทำให้ไหลผ่านช่องเล็กๆ ด้วยแรงแคพิลลารี (Capillary Force) หรือแรงโน้มถ่วงขึ้นอยู่กับกรอกแบบหัวพ่น จากนั้นก๊าซจะถูกพ่นออกจากหัวพ่นด้วยความเร็วสูง โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงความดันทำให้ก๊าซมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรอย่างรวดเร็ว เมื่อก๊าซปะทะกับลำกระแส น้ำโลหะเหลวจะทำให้เกิดการแตกออกเป็นละอองน้ำโลหะตามมาด้วยการเย็นตัวและแข็งตัวอย่างรวดเร็ว และตกลงถึงพักหรือภาชนะรองรับ สำหรับการทำอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซที่อุณหภูมิสูง (สำหรับโลหะที่มีอุณหภูมิหลอมละลายสูง) ต้องมีการออกแบบถึงพักหรือภาชนะรองรับให้มีระยะห่างมากพอที่จะทำให้ น้ำโลหะเกิดการแข็งตัวอย่างสมบูรณ์ก่อนกระทบผนังหรือกันถัง [5]

2.1 การทำให้น้ำโลหะเหลวแตกตัวเป็นละอองน้ำโลหะและผงโลหะ (Mechanism of gas atomization)

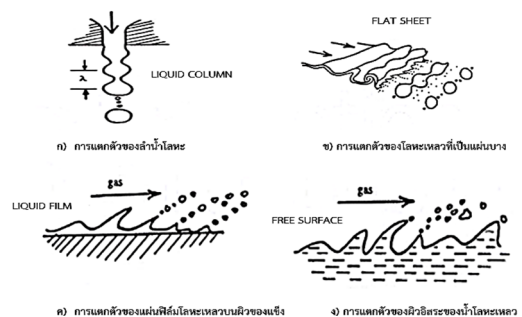
กลไกการแตกตัวเป็นละอองของน้ำโลหะเหลวของกระบวนการอะตอมไมเซชัน ใช้หลักการของการทำให้น้ำโลหะเหลว (Molten Metal) แตกตัวเป็นหยดหรือละอองที่มีขนาดเล็กหรือละเอียดมากๆ แล้วทำให้เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็วจนละอองน้ำโลหะเหลวแข็งตัวกลายเป็นเม็ดอนุภาคของแข็งหรือผงโลหะที่มีขนาดต่างๆ ซึ่งการทำให้น้ำโลหะเหลวเป็นละอองนั้นต้องมีแรงมากกระทำต่อน้ำโลหะเหลว การแตกตัวของน้ำโลหะเหลวด้วยแรงกระแทกให้ของไหลที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง ซึ่งก๊าซ หรือของเหลวที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง หรือมีพลังงานจลน์สูง โดยที่น้ำโลหะเหลวและของไหลที่ใช้เป็นตัวกลางในการทำให้เกิดการแตกตัวต่างเป็นของไหลทั้งคู่ แรงกระแทกจากของไหลมีผลทำให้ลำกระแส น้ำโลหะเหลว (Melt Stream) ไม่เสถียร และเกิดการแตกตัว ในการแตกตัวของน้ำโลหะเหลวไม่ได้เกิดจากกลไกใดกลไกหนึ่งเพียงกลไกเดียวซึ่งกลไกที่กล่าวถึงนี้ประกอบด้วย [11]

1. การแตกตัวของลำกระแส น้ำโลหะเหลวที่ไหลออกจากรูเล็กๆ (Orifice) ดังรูปที่ 3 ก) ซึ่งการแตกตัวด้วยกลไกนี้เกิดจาก 2 ปัจจัยที่เกี่ยวข้อง คือ น้ำหนักของหยดน้ำโลหะเหลวและแรงตึงผิว (Surface Tension) ของน้ำโลหะเหลว

2. การแตกตัวของโลหะเหลวที่เป็นแผ่นบาง ดังรูปที่ 3 ข) ในกลไกนี้แรงกระแทกจากของไหล ซึ่งมีความเร็วสูงจะทำให้ น้ำโลหะเหลวที่เป็นแผ่นบางเรียบก่อตัวเป็นคลื่นที่ไม่เสถียร และแตกตัวต่อไปเป็นรูปร่างคล้ายไส้กรอก หรือที่นิยมเรียกว่า “ลิกาเมนต์ (Ligaments)” และแรงกระแทกที่มีอยู่อย่างต่อเนื่องมีผลทำให้ลิกาเมนต์ถูกกระแทกต่อไปอีกและมีผลทำให้เกิดการแตกตัวเป็นหยดหรือละอองที่ละเอียดต่อไป

3. การแตกตัวของแผ่นฟิล์มโลหะเหลวบนผิวของแข็ง ดังรูปที่ 3 ค) กลไกนี้แรงกระทำจากก๊าซที่มีความเร็วสูงจะเฉือนให้แผ่นฟิล์มบนผิวของแข็งฉีกขาดออกเป็นชิ้นเล็กๆ และก่อตัวเป็นทรงกลมเนื่องจากแรงตึงผิวของน้ำโลหะเหลว

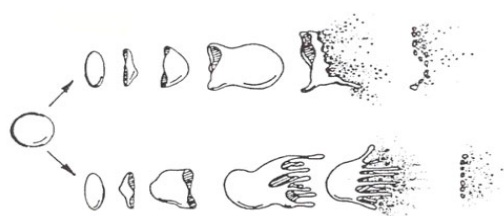
4. การแตกตัวของผิวอิสระของน้ำโลหะเหลว ดังรูปที่ 3 ง) โดยกลไกการแตกตัวแบบนี้จะมีลักษณะที่คล้ายกับแบบที่ 3 และคล้ายกับกรณีของการเกิดละอองน้ำบนผิวน้ำที่ลมพัดด้วยความเร็วที่เพียงพอ



รูปที่ 3 กลไกการแตกตัวของน้ำโลหะเหลวด้วยวิธีอะตอมไมเซชัน [11]

หลังจากที่น้ำโลหะเหลวแตกตัวเป็นหยดหรือละอองเล็กๆ แล้วหากแรงกระแทกยังคงมีอยู่อย่าง

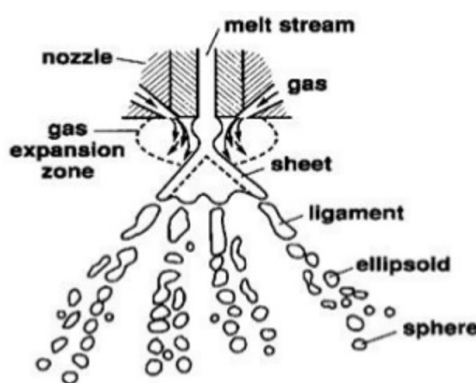
ต่อเนื่องจะมีผลทำให้หยดหรือละอองน้ำโลหะเหลวสามารถเกิดการแตกตัวต่อไปได้อีก และเรียกการแตกตัวที่เกิดขึ้นอีกครั้งในขั้นนี้ว่า “การแตกตัวครั้งที่สอง (Secondary Breakup)” ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ทั้ง 2 ลักษณะ ขึ้นอยู่กับค่า Gas Phase Weber Number ($We_g = \rho_g \Delta U^2 D / \sigma$) โดยค่า Gas Phase Weber Number นี้จะมีความสัมพันธ์แปรผกผันกับแรงตึงผิวของน้ำโลหะเหลว ดังนั้น หากน้ำโลหะเหลวมีแรงตึงผิวสูง หยดของเหลวจะถูกแรงกระทำและมีรูปร่างเป็นถุงที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจนท้ายที่สุด ถุงทนแรงกระทำไม่ไหวเกิดการแตกตัวเป็นละอองที่มีขนาดเล็กและละเอียดยิ่งขึ้น ลักษณะของกลไกการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นแสดงในรูปที่ 4 แถวบน และในทำนองเดียวกันในทางตรงกันข้าม หากน้ำโลหะเหลวมีแรงตึงผิวต่ำ หยดของเหลวเมื่ออยู่ภายใต้แรงกระทำจะฟอร์มตัวเป็นรูปแมงกะพรุน และต่อมาท้ายที่สุดจะแตกตัวเป็นหยดหรือละอองขนาดเล็กและละเอียดเช่นกัน ลักษณะของกลไกการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นแสดงในรูปที่ 4 แถวล่าง



รูปที่ 4 กลไกการแตกตัวของน้ำโลหะครั้งที่สอง [11]

กระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ ถ้ามีการใส่พลังงานให้กระแทกกับลำกระแสน้ำโลหะมาก ผงโลหะที่ได้จะยิ่งมีขนาดเล็กและละเอียดยิ่งขึ้น การปะทะกันระหว่างก๊าซกับน้ำโลหะเหลวที่บริเวณทางออกของหัวพ่นมีผลทำให้ลักษณะทางกายภาพของการอะตอมไมเซชันเกิดการเปลี่ยนแปลง ดังรูปที่ 5 โดยก๊าซที่แผ่รอบๆ น้ำโลหะเหลวจะมีความดันลดลงและทำให้น้ำโลหะเหลวเกิดการแตกกระจายกลายเป็นละอองน้ำโลหะ การลดลงของความดันของก๊าซทำให้น้ำโลหะ

เหลวกระจายเป็นรูปทรงกรวยกลวงหลังจากออกมาจากหัวพ่น ซึ่งกรวยบางลักษณะจะไม่มีความเสี่ยงเนื่องจากมีสัดส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงและส่งผลให้ละอองน้ำโลหะเกิดการแตกตัวออกไปได้อีกอย่างต่อเนื่องซึ่งเกี่ยวข้องกับการแตกตัวแยกขาดออกจากกันของน้ำโลหะเหลวจากการขยายตัวของก๊าซอย่างรวดเร็ว โดยแรงดูดที่เกิดขึ้นในบริเวณที่มีการขยายตัวของก๊าซมีผลทำให้น้ำโลหะเหลวก่อตัวเป็นแผ่นกลวงบางกลายเป็นลิแกเมนต์ รูปร่าง และทรงกลมในท้ายที่สุด [3]-[12]



รูปที่ 5 การฟอร์มตัวของผงโลหะในกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ [3]-[12]

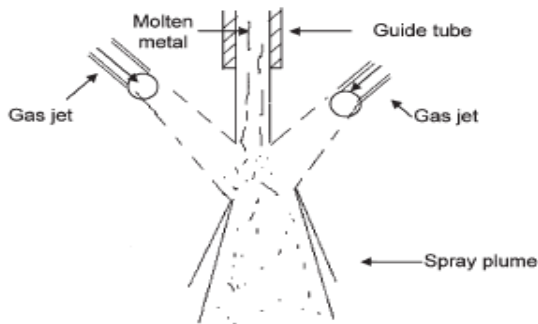
2.2 หัวพ่นอะตอมไมซ์

รูปแบบของหัวพ่นอะตอมไมซ์ที่ทำให้น้ำโลหะเหลวแตกตัวเป็นละอองในกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ โดยส่วนใหญ่แล้ว หัวพ่นอะตอมไมซ์ที่นิยมใช้โดยทั่วไปมี 2 รูปแบบหลักๆ คือ หัวพ่นอะตอมไมซ์แบบ Free-Fall และ Close-Coupled ซึ่งหัวพ่นแต่ละแบบจะมีกลไกการทำงานที่แตกต่างกัน ดังนี้

2.2.1 หัวพ่นแบบ Free-Fall Gas Atomizer

หัวพ่นแบบ Free-Fall ใช้หลักการของการให้ก๊าซพุ่งผ่านหัวพ่นเข้าชนกระแทกลำกระแสน้ำโลหะเหลวตรงบริเวณที่อยู่ห่างจากปลายท่อเลี้ยงน้ำโลหะ (Guide Tube) เป็นระยะทางหนึ่ง ดังรูปที่ 6 ข้อดีคือ ไม่เกิดปัญหาเรื่องการหล่อเย็นและการเกิด Thermal

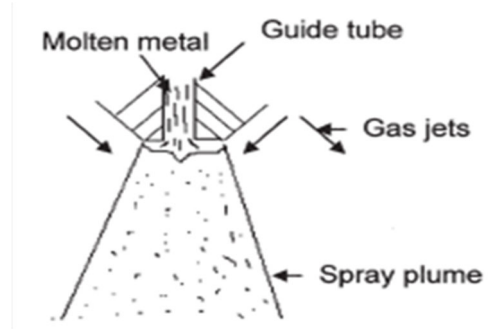
Shock กับอุปกรณ์ลำเลียงน้ำโลหะ แต่มีข้อเสียคือ การสูญเสียพลังงานจลน์และความเร็วของก๊าซก่อนที่จะพุ่งเข้าชนกระแทกลำกระแสน้ำโลหะ เนื่องจากระยะห่างระหว่างช่องพ่นก๊าซกับลำกระแสน้ำโลหะ ทำให้อนุภาคผงโลหะที่ผลิตได้มีขนาดที่ค่อนข้างใหญ่และหยาบกว่าการใช้หัวพ่นแบบ Close-Coupled [13], [14]



รูปที่ 6 ลักษณะของหัวพ่นอะตอมไมซ์แบบ Free-Fall [13]

2.2.2 หัวพ่นแบบ Close-Coupled Gas Atomizer

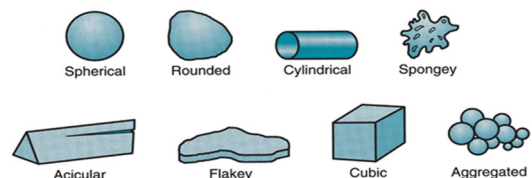
หัวพ่นแบบ Close-Coupled ใช้หลักการของการทำให้ก๊าซพุ่งผ่านหัวพ่นเข้าชนกระแทกลำกระแสน้ำโลหะเหลวตรงบริเวณที่อยู่ห่างจากปลายท่อเลียงน้ำโลหะ (Guide Tube) ด้วยระยะทางที่สั้นกว่าหัวพ่นแบบ Free-Fall ซึ่งช่องพ่นก๊าซของหัวพ่นกับท่อลำเลียงน้ำโลหะถูกสร้างให้เป็นชิ้นเดียวกันหรืออยู่ชิดกันมากกว่า ดังรูปที่ 7 [14] ซึ่งมีข้อดีคือ ลดการสูญเสียพลังงานจลน์และความเร็วของก๊าซที่ใช้ในการทำให้น้ำโลหะแตกตัวสามารถผลิตอนุภาคผงโลหะที่มีขนาดเล็กและละเอียดกว่า แต่มีข้อเสียคือ ก๊าซที่ใช้ทำให้น้ำโลหะเหลวแตกตัวเป็นละอองจะหล่อเย็นอุปกรณ์ลำเลียงน้ำโลหะที่ร้อนกว่า ทำให้เกิดปัญหา Thermal Shock ได้ การไหลของก๊าซบริเวณปลายเปิดของอุปกรณ์ลำเลียงน้ำโลหะอาจก่อให้เกิด Back Pressure หรือ Suction Effect อย่างใดอย่างหนึ่ง ซึ่ง Back Pressure เป็นอุปสรรคต่อการไหลของน้ำโลหะ



รูปที่ 7 ลักษณะของหัวพ่นอะตอมไมซ์แบบ Close-Coupled [14]

2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อรูปร่าง ขนาดและการกระจายตัวของขนาดอนุภาคผง

ปัจจัยที่มีผลต่อรูปร่าง ขนาดและการกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงโลหะที่ผลิตด้วยกระบวนการอะตอมไมซ์ด้วยก๊าซที่สำคัญได้แก่ 1) ชนิดก๊าซเฉื่อย ได้แก่ ไนโตรเจน อาร์กอน หรือฮีเลียม 2) น้ำโลหะเหลว ได้แก่ ชนิดของโลหะ อุณหภูมิ ความหนืด และอัตราการไหลของน้ำโลหะ 3) หัวพ่น ได้แก่ ชนิดของหัวพ่น ขนาดของท่อลำเลียงน้ำโลหะ มุมกระทำการระหว่างก๊าซที่พุ่งชนกระแทกลำกระแสน้ำโลหะ และระยะห่างของการพุ่งชนกระแทกลำน้ำโลหะหรือระยะห่างระหว่างช่องพ่นก๊าซกับลำกระแสน้ำโลหะ ซึ่งการแปรเปลี่ยนค่าของตัวแปรหรือปัจจัยต่างๆ เหล่านี้จะส่งผลให้อนุภาคผงโลหะมีขนาดและรูปร่างที่แตกต่างกันออกไป [15-16] ดังตัวอย่างลักษณะรูปร่างอนุภาคผงโลหะที่มีความแตกต่างกันที่แสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 รูปร่างอนุภาคผงโลหะที่อาจเกิดขึ้นได้จากกระบวนการผลิตและตัวแปรต่าง ๆ [14]

จากการศึกษาของ B. Zheng, Y. และคณะ [17] ได้อธิบายปัจจัยที่มีผลต่อรูปร่างและขนาดและการกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงไว้ดังนี้

1. ชนิดของก๊าซ ที่นิยมนำมาใช้ในกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซโดยส่วนใหญ่จะใช้ก๊าซเฉื่อย เช่น อาร์กอน หรือฮีเลียม ซึ่งทำให้ไม่มีปัญหาในเรื่องการเกิดออกซิเดชัน แต่เนื่องจากก๊าซดังกล่าวมีราคาค่อนข้างสูง ซึ่งจะมีผลทำให้ต้นทุนการผลิตสูง จึงมีการออกแบบห้องพ่นโลหะเหลว (Atomizing Chamber) ให้เป็นระบบที่สามารถนำก๊าซเฉื่อยที่พ่นออกไปแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ได้ [17]

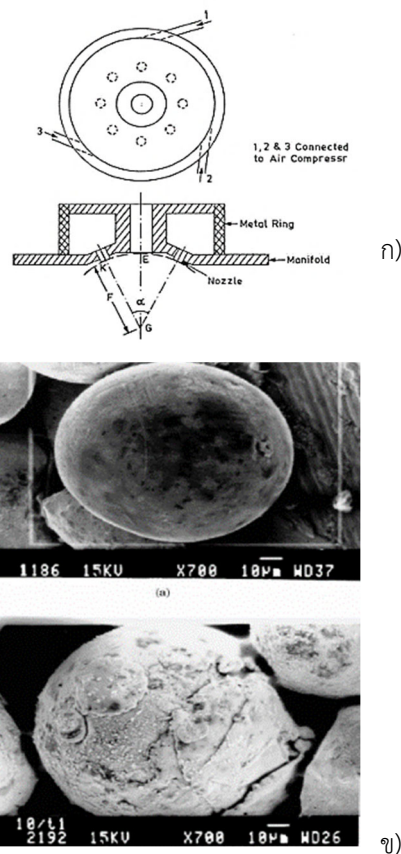
2. อัตราการไหลของก๊าซและความเร็วของก๊าซ ที่ใช้ในกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ เป็นปัจจัยสำคัญอย่างมาก สำหรับการออกแบบหัวพ่นที่กำหนด หากมีการใช้อุณหภูมิ น้ำโลหะที่เหมาะสมจะช่วยลดขนาดของอนุภาคโดยการเพิ่มความเร็วมัธยสัมพันธ์กับขนาดของอนุภาคและความดันก๊าซ [18]

3. อุณหภูมิและความหนืดของน้ำโลหะเหลว อุณหภูมิ น้ำโลหะมีผลต่อความหนาแน่น ความหนืด และแรงตึงผิวของน้ำโลหะ การเพิ่มอุณหภูมิ น้ำโลหะให้สูงขึ้นมีผลทำให้ความหนาแน่น ความหนืดและแรงตึงผิวของน้ำโลหะลดต่ำลง ซึ่งมีผลต่อการแตกตัวของน้ำโลหะเหลวไปเป็นละออง เมื่อถูกพ่นกระทบด้วยก๊าซความเร็วสูง หรืออาจกล่าวได้ว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ น้ำโลหะให้สูงขึ้นความสามารถในการแตกตัวเพิ่มขึ้น และมีผลทำให้ได้อนุภาคผงโลหะที่มีขนาดเล็กลง [19]

2.4 งานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตผงโลหะและหัวพ่น

Singh และคณะ [20] ได้ศึกษาการผลิตอนุภาคผงโลหะของดีบุก อลูมิเนียมและสังกะสี ด้วยกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ โดยใช้หัวพ่นแบบ Free-Fall ดังรูปที่ 9 ก) และ มีการกำหนดตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา ซึ่งประกอบด้วย อุณหภูมิ น้ำโลหะและมุมองศาของหัวพ่น พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิ น้ำโลหะให้สูง

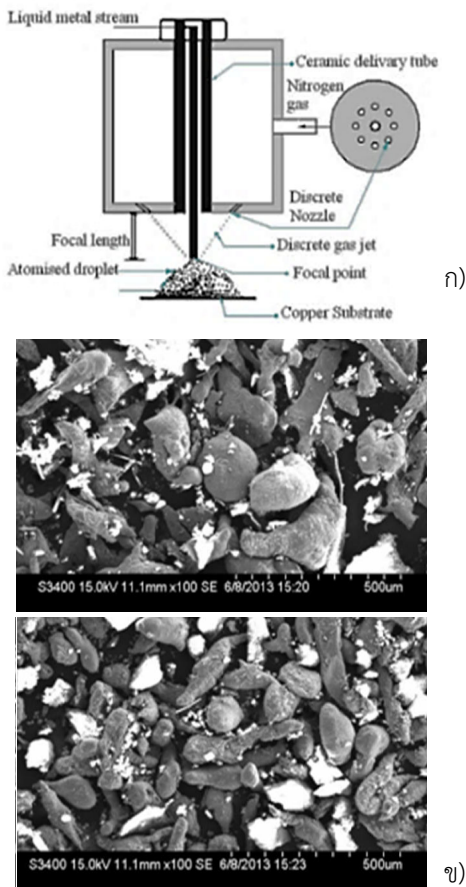
เกิน 150 เคลวิน และการเพิ่มมุมมององศาของหัวพ่นจะให้นขนาดอนุภาคผงลดลง อนุภาคผงของดีบุกและสังกะสีมีลักษณะรูปร่างโค้งมนขนาดใหญ่ผิดปกติ ส่วนอนุภาคผงของอลูมิเนียม พบว่า ไม่เป็นทรงกลมมีรอยแตกตรงพื้นผิวแสดงดังในรูปที่ 9 ข)



รูปที่ 9 ก) หัวพ่นเป็นแบบ Free-Fall ข) รูปร่างอนุภาคผงโลหะ[20]

Dayanand และคณะ [21] ได้ศึกษาการผลิตอนุภาคผงโลหะผสมของ Al-17Si ที่ผลิตด้วยกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ โดยใช้หัวพ่นแบบ Free-Fall ที่มีรูปล้อยก๊าซสำหรับพ่นกระทบลำกระแสน้ำโลหะจำนวน 6 รู ที่อยู่รอบลำกระแสน้ำโลหะ ดังรูปที่ 10 ก) และมีการกำหนดตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วย ระยะห่างแต่ละรูของหัวพ่น มุมกระทำการระหว่างรูปล้อยก๊าซกับลำกระแสน้ำโลหะ และอุณหภูมิ น้ำโลหะ ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ลักษณะ

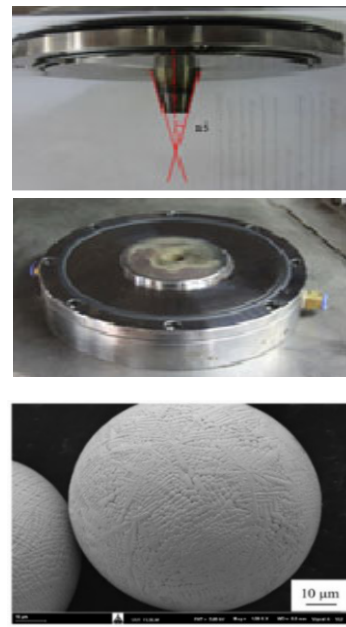
ทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคผงโลหะโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า มุมองศาที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ความเร็วของก๊าซลดลงตามแนวแกนการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ น้ำโลหะจาก 100 เป็น 200 องศาเซลเซียส ส่งผลได้อนุภาคผงโลหะที่มีขนาดเล็กและมีรูปร่างไม่สมมาตร ดังรูปที่ 10 ข)



รูปที่ 10 ก) หัวพ่นอะตอมไมซ์ ข) ภาพ SEM ของอนุภาคผง 100 องศาเซลเซียส และ 150 องศาเซลเซียส [21]

สมหมาย และคณะ [22] ได้ทำการศึกษาการผลิตอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 ด้วยกระบวนการอะตอมไมซ์ชันด้วยก๊าซ โดยใช้หัวพ่นแบบ Free-Fall ดังแสดงในรูปที่ 11 ก) ที่มีการกำหนดตัวแปรที่ทำการศึกษา ซึ่งประกอบไปด้วย อุณหภูมิเหนืน้ำโลหะ

และอัตราการไหลของก๊าซ พบว่า อุณหภูมิเหนืน้ำโลหะและอัตราการไหลของก๊าซที่แตกต่างกันมีผลทำให้ขนาดรูปร่างและการกระจายตัวของอนุภาคผงโลหะเงินสเตอร์ลิง 925 มีค่าแตกต่างกัน ซึ่งรูปร่างของอนุภาคผงโลหะที่ได้มีลักษณะรูปร่างเป็นเม็ดอนุภาคทรงกลม ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 11 ข) พื้นผิวของอนุภาคมีลักษณะเป็นโครงสร้างเดนไดรต์ ที่เกิดจากการที่ละอองน้ำโลหะมีสถานะการเย็นตัวที่เร็วกว่าสถานะสมดุล ภายใต้สภาวะของการทดลองที่แตกต่างกัน



รูปที่ 11 ก) หัวพ่นแบบ Free-fall nozzle ข) รูปร่างของอนุภาคผงโลหะ[22]

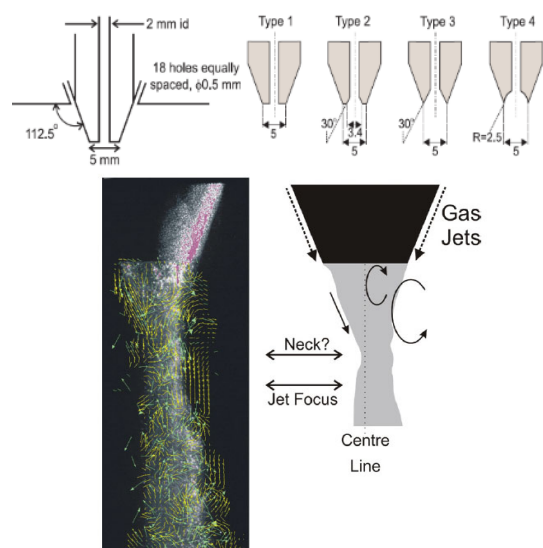
Sedat O' zbilien [23] ศึกษาอิทธิพลของแรงดันของแก๊สที่มีผลต่อรูปทรงอนุภาคของผงอะลูมิเนียมและแมกนีเซียม หัวพ่นที่ใช้ในการทดลองเป็นแบบ Close-Coupled ก๊าซอาร์กอนเป็นตัวกลางใช้แรงดัน 1.05-1.85 เมกกะปาสคาล และก๊าซฮีเลียมใช้แรงดัน 1.03-1.77 เมกกะปาสคาล ทำการตรวจสอบของผงโลหะโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางผงแมกนีเซียมมีการกระจายตัวของขนาดผงระหว่าง 12.97 ถึง 24.13

ไมโครเมตร และผงอลูมิเนียมมีการกระจายตัวของขนาดความแตกต่างกันระหว่าง จาก 9.2 ถึง 20.7 ไมโครเมตร พบว่า อนุภาคมีขนาดเล็กจะมีลักษณะทรงกลม ในขณะที่อนุภาคขนาดใหญ่จะมีลักษณะที่เป็นรูปทรงเหลี่ยม และแรงดันก๊าซอาร์กอนสูงอนุภาคผงโลหะแมกนีเซียมเป็นทรงกลม ก๊าซที่มีแรงดันต่ำทำให้เกิดการผลิตที่ไม่สมบูรณ์ของผงแมกนีเซียม มีช่วงของผงที่มีความหยาบมากขึ้นพื้นผิวขรุขระไม่สม่ำเสมอ เมื่อเทียบกับความดันก๊าซสูง ทั้งนี้เกิดจากการแตกตัวที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น ในกระบวนการของอลูมิเนียมเปรียบเทียบกับแมกนีเซียม

Lydia Achelis และคณะ [24] ศึกษาความดันก๊าซที่ใช้ในการผลิตผงโลหะด้วยกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ ในการศึกษาเป็นการรวมหลักการอะตอมไมเซชันสองชั้น ชั้นแรกให้ Pressure Swirl Atomizer จากนั้นพ่นด้วยหัวพ่นแบบมีศูนย์กลางเพื่อสร้างหยดทรงกลมละเอียดของโลหะ ปกติในการผลิตผงโลหะด้วยกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ จะมีเม็ดโลหะขนาดเล็กเกาะที่ผิวของอนุภาคของผง เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหานี้จำเป็นต้องลดการหมุนวนของก๊าซภายในห้องอะตอมไม ในการศึกษาครั้งนี้ใช้ดีบุกบริสุทธิ์เพื่อศึกษาลักษณะของการหลอมละลาย ผงที่ได้มาวิเคราะห์โดยเลนส์เลเซอร์และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนสแกน ผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงผลกระทบระหว่างอัตราส่วนก๊าซกับโลหะหลอมเหลว รวมถึงการหมุนวนของก๊าซใจกลางการเกิดปฏิกิริยาอะตอมไมเซชัน และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของรูปร่างอนุภาคผงโลหะดีบุก

A. M. Mullis และคณะ [25] ได้ทำการศึกษการผลิตอนุภาคผงโลหะอลูมิเนียม โดยใช้หัวพ่นแบบ Close-Coupled ที่มีลักษณะแตกต่างกัน 4 รูปแบบ ดังรูปที่ 12) ซึ่งทำการเก็บข้อมูลพฤติกรรมของการแตกตัวเป็นละอองน้ำโลหะโดยการประยุกต์ใช้เทคนิคการถ่ายภาพนิ่งความเร็วสูงเพื่อให้เห็นภาพพฤติกรรมการไหล

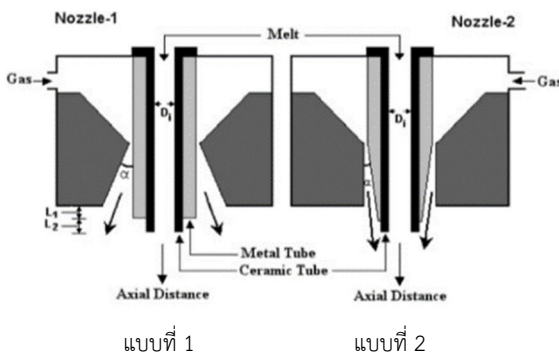
และการแตกตัวเป็นละอองของอนุภาค ซึ่งบริเวณปลายท่อลำเลียงน้ำโลหะมีลักษณะเว้าเข้ามารับการปะทะหรือกระแทก พบว่าหัวพ่นรูปแบบที่ 4 มีความเร็วของการไหลปะทะหรือกระแทกของก๊าซกับลำกระแสลำน้ำโลหะ เพื่อให้เกิดการแตกตัวเป็นละออง ลดการสูญเสียพลังงานจลน์และความเร็วของก๊าซที่ใช้ในการทำให้น้ำโลหะแตกตัวสามารถผลิตอนุภาคผงโลหะที่มีขนาดเล็กและละเอียดกว่า



รูปที่ 12 หัวพ่นแบบ Close-Coupled ที่มีลักษณะแตกต่างกัน 4 รูปแบบ และภาพถ่ายการปะทะของก๊าซกับของลำกระแสลำน้ำโลหะ[25]

V. C. Srivastava และคณะ [26] ได้ศึกษาการผลิตอนุภาคผงโลหะผสม Al-6.5Si โดยใช้หัวพ่นแบบ Close-Coupled ที่มีการติดตั้งท่อเซรามิกเพื่อทำหน้าที่เป็นท่อลำเลียงน้ำโลหะ ซึ่งท่อเซรามิกนี้ถูกติดตั้งอยู่ในท่อโลหะอีกชั้นหนึ่ง แสดงในรูปที่ 13 ที่มีลักษณะแตกต่างกัน 2 แบบ โดยการทำให้บริเวณทางออกของก๊าซมีลักษณะแตกต่างกัน เพื่อศึกษาอิทธิพลของรูปแบบการขยายตัวของก๊าซที่ออกจากหัวพ่นที่มีผลต่อประสิทธิภาพการผลิตอนุภาคผงโลหะ โดยมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาคือ เปลี่ยนมุมการไหลของก๊าซที่

กระทำกับกระแสน้ำโลหะ (15, 30 และ 50 องศา) ระยะของท่อเซรามิกที่ยื่นพ้นท่อโลหะ (0, 2 และ 4 มิลลิเมตร) และแรงดันน้ำโลหะ (1.0 และ 1.2 เมกะปาสคาล) โดยกำหนดตัวแปรของการทดลองคงที่ ซึ่งประกอบด้วย ขนาดท่อลำเลียงหรือลำกระแสน้ำโลหะ (D) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร อุณหภูมิน้ำโลหะ 800 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนที่ทำหน้าที่เป็นตัวกลาง 24.5 กรัมต่อวินาที พบว่า หัวพ่นแบบที่ 2 มีประสิทธิภาพในผลิตหรือการทำให้โลหะแตกตัวเป็นละอองได้ดีกว่า โดยขนาดอนุภาคผงโลหะที่ผลิตได้มีขนาดเล็กกว่าและ มีการกระจายตัวของขนาดดีกว่าหัวพ่นแบบที่ 1

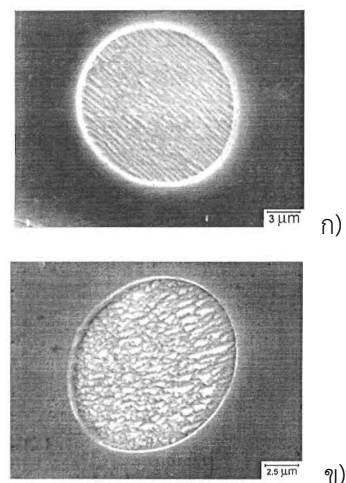


รูปที่ 13 หัวพ่น 2 แบบที่แตกต่างกัน [26]

Chaorun Si และคณะ [27] ได้ทดลองวิธีการทำอะตอมไมเซชัน แบบสองเฟส (Gas Solid Two Phase) สำหรับการผลิตผงโลหะ วัสดุที่ใช้ในการทดลองคือ 7055Al ผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงข้อดีและคุณลักษณะเฉพาะของการทดลอง เมื่อความดันแก๊สอาร์กอน 0.6 เมกะปาสคาล และอัตราการไหลอนุภาคเหล็ก 235.6 กรัมต่อนาที พบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของการกระจายตัว (d_{50}) ที่ผลิตได้มีขนาด 22.8 ไมโครเมตร ซึ่งลดลงร้อยละ 52.7 เมื่อเทียบกับการพ่นก๊าซแบบเดิมภายใต้พารามิเตอร์การทดลองเดียวกัน ($d_{50} = 48.2$ ไมโครเมตร) ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นถึงรูปร่างที่ผิดปกติมากกว่า อัตราการระบายความร้อนของผงส่วนใหญ่อยู่ในช่วงของ 104-105 กิโลกรัมต่อ

วินาที และสำหรับผงที่ละเอียดจะได้รับการตรวจสอบเป็นพิเศษด้านอัตราการระบายความร้อน พบว่าสามารถทำได้ถึง 106 เคลวิน/วินาที จะเห็นได้ว่ามีอัตราการระบายความร้อนได้ดีทำให้อนุภาคแข็งตัวเร็วกว่าผงโลหะที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเดียวกัน การศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าเฟส Gas Solid Two Phase อาจเป็นเทคโนโลยีการเตรียมโลหะที่มีคุณภาพสูงแต่ราคาไม่แพง

กิตติชัย พักพันธ์ [1] ได้ศึกษาการผลิตผงอนุภาคตีบด้วยกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซโดยใช้ตีบกับวัสดุที่ร้อยละ 99.6 เป็นสารตั้งต้นในการผลิต ก๊าซที่ใช้พ่นเป็นไนโตรเจน ตัวแปรที่ได้ทำการศึกษาในที่นี้คือความดันก๊าซ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อลำเลียงน้ำโลหะ และน้ำโลหะอุณหภูมิเหนือจุดหลอมละลายของตีบ เพื่อการออกแบบหัวพ่น พบว่า การพ่นด้วยแรงดันก๊าซที่ต่ำกว่า 2 เมกะปาสคาล หัวพ่นแบบ Close-Coupled จะให้สัดส่วนน้ำหนักของอนุภาคผงตีบที่มีขนาด 180 ไมโครเมตร ปริมาณมากกว่าการใช้หัวพ่นแบบ Free-Fall ในขณะที่การพ่นด้วยแรงดันก๊าซที่มากกว่า 2 เมกะปาสคาล หัวพ่นทั้งสองแบบให้ปริมาณอนุภาคผงตีบที่มีขนาด 180 ไมโครเมตร เฉลี่ยใกล้เคียงกัน แต่ลักษณะรูปร่างที่ได้มีความแตกต่างกัน ดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 ลักษณะรูปร่างของอนุภาคผงตีบที่มีขนาดต่ำกว่า 20 ไมโครเมตร ซึ่งผลิตจากหัวพ่นแบบ[1]
ก) Close-Coupled ข) Free-Fall

3. สรุป

คณะผู้วิจัยมีความสนใจที่จะทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการผลิตอนุภาคผงโลหะมีค่า ด้วยกระบวนการทางด้านโลหะผงวิทยา ศึกษาพฤติกรรมและการแตกตัวของน้ำโลหะกลายเป็นละอองอนุภาคผงโลหะ ชนิดหรือรูปแบบของหัวพ่นอะตอมไมซ์ และปัจจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตอนุภาคผงโลหะที่มีผลต่อประสิทธิภาพการผลิตประกอบไปด้วย รูปร่าง ขนาด และการกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงโลหะ กระบวนการผลิตผงโลหะโดยเน้นกระบวนการอะตอมไมซ์เช่นด้วยก๊าซ หัวพ่นอะตอมไมซ์ที่นิยมใช้โดยทั่วไปมี 2 รูปแบบหลักๆ คือ หัวพ่นอะตอมไมซ์แบบ Free-Fall และ Close-Coupled พบว่า หัวพ่นอะตอมไมซ์ด้วยก๊าซ แบบ Close-Coupled ให้ประสิทธิภาพการผลิตดีที่สุด สามารถผลิตอนุภาคผงโลหะได้รูปทรงกลมที่มีขนาดเล็ก ประกอบด้วยโลหะชนิดต่างๆ ที่ใช้อุณหภูมิหลอมเหลว มีมุมของการปะทะต่างกัน และจากการรวบรวมงานวิจัย พบว่าไม่มีการศึกษาเกี่ยวกับการผลิตอนุภาคผงโลหะมีค่าที่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องประดับซึ่งประเทศไทย เป็นผู้ส่งออกเครื่องประดับแท้ อัญมณี โลหะมีค่าและของที่หุ้มด้วยโลหะมีค่าอื่นๆ เครื่องประดับอัญมณีเทียม และอัญมณีสังเคราะห์[28] แต่ขาดเทคโนโลยีใหม่ๆ ในการผลิตเครื่องประดับทดแทนการนำเข้าอนุภาคผงโลหะเงิน ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ตั้งต้นสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับต่อไป

4. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Fakpan, "Production of Tin Powder by Gas Atomization Process", M.S. thesis, Depart. Materials Technology, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thailand, 2007.
- [2] Thermal Spray Technology. (2020, september 18), Thermal Spray Technology.mov, [Online] Available: <https://www.youtube.com/watch?v=ah9kLdUFDQY,2563>
- [3] N. Meemongkol, "Powder metallurgy," University textbook, Songkla: Department of industrial engineering, Faculty of engineering Prince of Songkla University, 2005.
- [4] V.M. Leo Antony and Ramana G, Reddy. "Processes for Production of High-Purity Metal Powders," JOM, vol. 55, pp. 14–18, 2003.
- [5] S. Boonme. "Teaching Publications 431328 Powder Metallurgy," School of Metallurgical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, 2020.
- [6] Material Technology Innovations Co., Ltd. (2020, September 18). Gas Atomization. [Online]. Available: <http://www.mtinov.com/index.php?ac=article&at=list&tid=14>
- [7] D. Kopeliovich. (2020, September 18). Water atomization. [Online]. Available: https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=powder_preparation

- [8] P. Sungkhaphaitoon, S. Wisutmethangoon and T. Plookpho, "Influence of Process Parameters on Zinc Powder Produced by Centrifugal Atomisation," *Materials Research*, pp. 718-724, 2017.
- [9] P. Sungkhaphaitoon, "Production of Lead-Free Solder Powder by Atomization Process," *Burapha Science Journal*, vol. 21 Jan.-Apr. 2016.
- [10] A. S. Baskoro, S. Supriadi and Dharmanto, "Review on plasma atomizer technology for metal powder," in *Proceeding of MATEC web of conferences 269*, 05004, 2019.
- [11] P. Bunnaul, S. Wisutmethangoon and L. Sikong, "Design and construction of gas atomizer for making metal powder," Research, Prince of Songkla University, 2545.
- [12] R. M. German. *Powder metallurgy sciences*. 2nd ed. New Jersey: MPIF; 1994.
- [13] D. Singh, S. C. Koria and R. K. Dube, "Study of Free-Fall Gas Atomization of Liquid Metal to Produce Powder," *Powder Metallurgy*, vol. 44, no. 2, pp. 177-184, 2001.
- [14] W. G. Hopkins, "Fine Powder, Close or Open Die Atomization," *Metal Powder Report*, vol. 45, no. 1, pp. 41-42, 1990.
- [15] Powder metallurgy is the manufacturing, (2563, October 28). Networks. [Online]. Available:http://thelibraryofmanufacturing.com/powder_processes.html
- [16] G. G. Nasr, A. J. Yule and L. Bendig, *Industrial Sprays and Atomization: Design, Analysis and Applications*. New York, 2002.
- [17] B. Zheng, Y. Lin, Y. Zhou and E. J. Lavernia, "Gas atomization of amorphous aluminum powder: Part II," *Metallurgical and Materials Transactions B.*, vol. 40, no. 6, pp. 995-1004, 2003.
- [18] O. Hong-wu, C. Xin and H. Bai-yun, "Influence of melt superheat on breakup process of close-coupled gas atomization," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 17, no. 5, 967-973, Oct. 2007,
- [19] J. B. See and G. H. Johnston, "Interactions Between Nitrogen Jets and Liquid Lead and Tin Streams," *Powder Technology*, vol. 21, pp. 119-133, 1978.
- [20] D. Singh and S. Dangwal, "Effects of process parameters on surface morphology of metal powders produced by Free-Fall gas atomization," *J. MATER SCI.*, vol. 41, pp. 3853-3860, 2006.
- [21] M. D. Goudar, V. C. Srivastava and G. B. Rudrakshi, "Effect of Atomization Parameters on Size and Morphology of Al-17 Si Alloy Powder Produced by Free-Fall Atomizer," *Engineering Journal*, vol. 21, no. 1, pp. 155-168, 2016.
- [22] S. Thamprakon, S. Torsakul and S. Wannasri, "Influence of Melt Metal Pouring Temperature and Gas Flow Rate affecting 925 Sterling Silver Powder Particles," in

- Proceedings of the 9nd National and International research conference on Local & Global Sustainability: Meeting the Challenges & Sharing the Solutions.* March 20, 2018, Suan Sunandha Rajabhat University.
- [23] S. Ozbilen, "Influence of atomising gas pressure on particle shape of Al and Mg Powders," *Powder Technology*, vol. 102, pp. 109–119, 1999.
- [24] L. Achelis and V. Uhlenwinkel, "Characterisation of metal powders generated by a pressure gas atomizer," *Materials Science and Engineering A*, vol. 477, pp. 15–20, 2008.
- [25] A. M. Mullis, I. N. McCarthy and R. F. Cochrane, "High Speed imaging of the flow during Close-Coupled gas atomization: Effect of melt delivery nozzle geometry," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 211, pp. 1471–1477, 2011.
- [26] V. C. Srivastava and S. N. Ojha, "Effect of aspiration and gas–melt configuration in close coupled nozzle on powder productivity," *Powder Metallurgy*, vol. 49, no. 3, pp. 211–218, 2014.
- [27] C. Si, "Characteristics of 7055Al alloy powders manufactured by gas-solid two-phase atomization A comparison with gas atomization process," *Materials and Design*, vol. 118, pp. 66–74, 2017.
- [28] Department of International Trade Promotion Ministry of Commerce. (2021, May 10). Information about the export situation of gems and jewelry. (January - December 2020). [Online]. Available: <https://www.ditp.go.com>

<http://journal.rmutp.ac.th/>

การจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบกับการปฏิบัติการโรงไฟฟ้า พลังงานแสงอาทิตย์ขนาดเล็กแบบกระจายตัวในระบบจำหน่าย

มนัส บุญเที่ยรทอง ปพน งามประเสริฐ และ นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ*

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
1381 ถนนประชากรราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

รับบทความ 5 กุมภาพันธ์ 2564 แก้ไขบทความ 11 มิถุนายน 2564 ตอบรับบทความ 21 มิถุนายน 2564

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอการจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบกับการปฏิบัติการโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดเล็กแบบกระจายตัวในระบบจำหน่าย ซึ่งการส่งกำลังไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดเล็กแบบกระจายตัวด้วยโปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ PVSyst และ IEC 61724 โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อศึกษาร้อยละอัตราส่วนประสิทธิภาพโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดเล็กกำลังผลิตสูงสุด 5.95 เมกกะวัตต์ ที่เชื่อมต่อในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ระดับแรงดันไฟฟ้า 22 เควี ดังนั้นจึงเสนอบทความนี้เพื่อเป็นการจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบกับการปฏิบัติการโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดเล็กแบบกระจายตัว ผลจากการศึกษาพบว่า การปฏิบัติการโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดเล็กแบบกระจายตัวเพิ่มประสิทธิภาพมีความสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้สูงสุดและมีความต่อเนื่อง โดยระบบสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 8,954.9 เมกกะวัตต์ชั่วโมงต่อปี และมีร้อยละอัตราส่วนสมรรถนะเฉลี่ยรายปีเท่ากับ 77.84 ได้รับความเข้มรังสีแสงอาทิตย์สูงสุดและได้ปริมาณพลังงานรวมรายปีมากที่สุดประมาณ 1,837 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตารางเมตร

คำสำคัญ : โฟโตโวลตาอิก; ความเข้มแสง; ร้อยละอัตราส่วนประสิทธิภาพ; กำลังการผลิตกระแสไฟฟ้า

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +666 1353 6426, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: nattachote.r@rmutp.ac.th

<http://journal.rmutp.ac.th/>

The Mathematical Simulation Compared to Operations a Small Distributed Photovoltaic Power Plant in a Distribution System

Manat Boonthienthong Papon Ngamprasert and Nattachote Rugthaicharoencheep*

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology
Phra Nakhon
1381 Pracharat 1 Road, Wong Sawang Subdistrict, Bang Sue District, Bangkok 10800

Received 5 February 2021; Revised 11 June 2021 ; Accepted 21 June 2021

Abstract

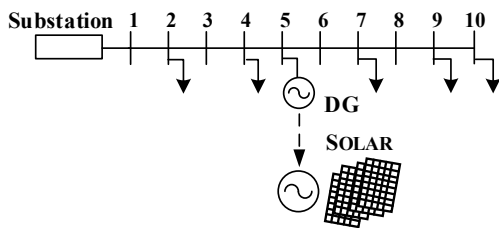
This paper presents a mathematical simulation to compared to operations a small distributed photovoltaic power plant in the distribution system. Practices transmission of electric power by small, distributed solar energy With the PVSyst and IEC 61724 mathematical modeling programs, the main objective was to study the % performance ratio photovoltaic power plants 5.95 MWp connected in the distribution system of the Provincial Electricity Authority, voltage level 22 kV. Therefore, this paper is presented as a mathematical simulation compared to operations a small distributed photovoltaic power plant in a distribution system. The results of the study show that the operation of small distributed solar power plants increases the efficiency to be able to produce the maximum electricity and continuously. The system was able to produce the highest power of 8,954.9 MWh/year and had an average annual efficiency ratio of 77.84%, receiving the highest solar radiation intensity and the highest annual total energy output of approximately 1,837 kWh/m².

Keywords : Photovoltaic; Irradiance; % Performance Ratio; Power Generation Capacity

* Corresponding Author. Tel.: +666 1353 6426, E-mail Address: nattachote.r@rmutp.ac.th

1. บทนำ

ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ประกอบด้วย แผงเซลล์แสงอาทิตย์มีหน้าที่การผลิตไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current หรือ DC) เมื่อได้รับความเข้มของแสงอาทิตย์จะเริ่มจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปยังอุปกรณ์แปลงผันไฟฟ้าก่อนเชื่อมต่อเข้ากับระบบจำหน่าย (Grid Connected Inverter) เพื่อเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternative Current หรือ AC) และเชื่อมต่อเข้ากับระบบของการไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 1 [1]



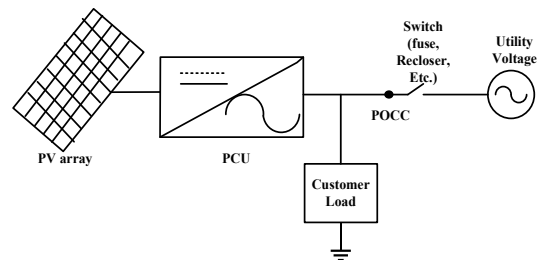
รูปที่ 1 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบกระจายตัวด้วย

เพื่อผลิตไฟฟ้าใช้เอง ลดค่าไฟ ประหยัดค่าไฟ หรือใช้ไฟฟ้าการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจำลองพฤติกรรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Photovoltaic: PV) เพื่อรวมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นแบบเหล่านี้เข้ากับระบบสาธารณูปโภคทั่วไปและเพื่อกำหนดพฤติกรรมของระบบที่เกิดขึ้น [2] ผลจากการศึกษาเหล่านี้แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการใช้เซลล์แสงอาทิตย์สามารถรวมเข้ากับพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าระบบสาธารณูปโภคในปริมาณมากโดยไม่ต้องสร้างปัญหาที่ผิดปกติในการทำงานและการควบคุมระบบ มีการศึกษามาตรการควบคุมเพื่อลดผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงโหลดขนาดใหญ่ [3]

ในอดีตจนถึงปัจจุบันระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ได้นำมาใช้กับระบบกระจายตัวขนาดเล็ก โดยมีการออกแบบมาเป็นทฤษฎีของโครงการสาธิตโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 1 เมกะวัตต์ที่สถานี

ย้อยในประเทศสหรัฐอเมริกา ได้แก่ สถานี Lugo ใน Hesperia, California จากนั้นได้รับการออกแบบและดำเนินการเป็นโรงไฟฟ้ากลาง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ ซึ่งได้รับการตรวจสอบครั้งแรกตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน พ.ศ.2525 [4]

การเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าโซลาร์เซลล์กับโครงข่าย ดังแสดงในรูปที่ 2 [5]



รูปที่ 2 การเชื่อมต่อ PV กับโหลด

การปฏิบัติการโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดเล็กแบบกระจายตัวอาจเป็นอันตรายต่อบุคคลและอุปกรณ์ จำเป็นต้องได้รับการป้องกัน ตามแผนการป้องกันที่มีอยู่ ซึ่งได้รับผลกระทบจากภายนอกหรือภายในที่ทำให้การผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ล้มเหลวหรือหยุดชั่วคราว [5]

เมื่อมีระบบไฟฟ้าโซลาร์เซลล์มากกว่าหนึ่งโมดูล ระบบการควบคุมคุณภาพไฟฟ้า PV จะมีความซับซ้อนของระบบเพิ่มขึ้น ปัญหาเหล่านี้สามารถแก้ไขได้โดยใช้ระบบการส่งการระยะไกล สำหรับการป้องกันแบบโหมคอิสระ (Islanding) รวมถึงการพิจารณาประสิทธิภาพในการป้องกันสูงสุด แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ของการป้องกันแบบโหมคอิสระบน Power Line Carrier Communications (PLCC). [6]

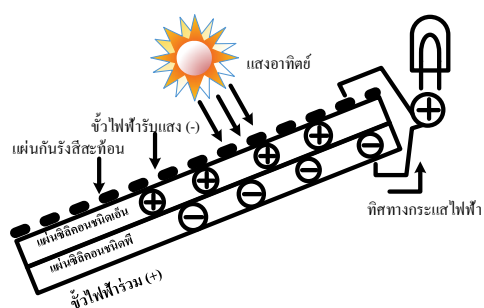
ดังนั้นบทความวิจัยนี้นำเสนอการจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบกับปฏิบัติการโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดเล็กแบบกระจายตัวในระบบจำหน่าย [7] ซึ่งการส่งกำลังไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดเล็กแบบกระจายตัว ด้วยโปรแกรม

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ PVSystem และ IEC 61724. [8] โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อศึกษาอัตราการสูญเสียประสิทธิภาพของการจ่ายกำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดเล็ก

2. เปรียบวิธีวิจัย

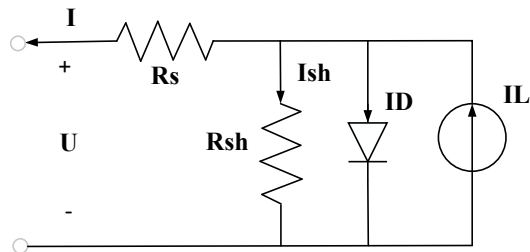
2.1 โฟโตโวลตาอิก

ในปี ค.ศ.1954 แดริลชาแป็ง (Daryl Chapin) แคลวินฟูลเลอร์ (Calvin Fuller) และเจอร์ราร์ด เพียร์สัน (Gerald Pearson) นักวิทยาศาสตร์จากห้องปฏิบัติการเบลล์ สหรัฐอเมริกาประสบความสำเร็จในการนำปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิกมาประยุกต์ใช้ประดิษฐ์เซลล์โฟโตโวลตาอิก ด้วยสารซิลิคอน (Si) เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประกอบขึ้นจากสารกึ่งตัวนำ 2 ชนิด คือ P และ N สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ โดยอาศัยปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก ดังแสดงในรูปที่ 3 [5]



รูปที่ 3 ลักษณะการทำงานของโฟโตโวลตาอิก

โฟโตโวลตาอิกเป็นวิธีผลิตกระแสไฟฟ้าโดยตรงจากพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยการกระตุ้นสารกึ่งตัวนำด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความยาวคลื่นแสง โดยอาศัยปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก เทคโนโลยีโฟโตโวลตาอิกผลิตแสงอาทิตย์ (Solar Photovoltaics) เป็นทางเลือกหนึ่งที่มีบทบาทสำคัญในการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นไฟฟ้าซึ่งจะทดแทนการผลิตกระแสไฟฟ้าจากถ่านหิน ปิโตรเลียม และแก๊สธรรมชาติ ดังแสดงในรูปที่ 4 [9]



รูปที่ 4 แบบจำลองไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุต U และกระแสไหลสามารถกำหนดได้ดังนี้ [10]

$$I = I_L - I_D = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{U + RI_s}{\alpha}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

โดยที่

I คือ กระแสไหล (A)

I_L คือ กระแสเซลล์แสงอาทิตย์ (A)

I_D คือ กระแสไดโอด (A)

I_0 คือ กระแสอิ่มตัว (A)

U คือ แรงดันเอาต์พุต (V)

R_s คือ ตัวต้านทานแบบอนุกรม (Ω)

α คือ ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิแรงดันไฟฟ้า

เนื่องจากเซลล์โฟโตโวลตาอิกเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยอาศัยปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก เรียกแบบย่อว่า “แผงพีวี เซลล์” หรือ “Solar PV cell” ที่เซลล์แสงอาทิตย์ใช้แสงจากแหล่งอื่นนอกเหนือจากแสงอาทิตย์ เช่น หลอดไฟหรือแสงเทียมเรียกว่าเซลล์โฟโตโวลตาอิก เซลล์แสงอาทิตย์มีหลายชนิด ชนิดที่ใช้งานอยู่มากที่สุดในปัจจุบัน คือเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตโดยใช้ [5] เทคโนโลยีซิลิคอน (Silicon-Based Solar Cell) นอกจากนั้นยังมีเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง (Thin Film Solar Cell) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารอินทรีย์ (Organic Solar Cell) และเซลล์แสงอาทิตย์

ชนิดสีย้อมไวแสง (Dye-Sensitized Solar Cell) ดังแสดงในรูปที่ 5 [11]



รูปที่ 5 เซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic)

2.2 ความเข้มแสง

ความเข้มแสงจากพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy) สามารถนำมาใช้ได้อย่างไม่สิ้นสุด และมีลักษณะกระจายไปถึงผู้ใช้โดยตรง อีกทั้งยังเป็นแหล่งพลังงานที่สะอาดปราศจากมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ตามปกติมนุษย์ใช้พลังงานแสงอาทิตย์จากธรรมชาติในกิจวัตรประจำวัน เมื่อสังคมมนุษย์มีการพัฒนาไปสู่ยุคเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ความต้องการพลังงานมีเพิ่มขึ้นจึงมีการใช้พลังงานจากแหล่งอื่นๆ [12] เพิ่มขึ้นด้วยที่สำคัญ ได้แก่ พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล (Fossil) ในรูปของน้ำมัน ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ การใช้พลังงานเหล่านี้ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังเป็นแหล่งพลังงานที่มีปริมาณจำกัดซึ่งถ้าใช้อย่างต่อเนื่องก็จะหมดไปในอนาคต นับตั้งแต่เกิดวิกฤตการณ์พลังงานตั้งแต่ปี ค.ศ.1973 เป็นต้นมา [13] นักวิทยาศาสตร์จึงได้ทำการในการวิจัยและพัฒนาเพื่อนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ทดแทนพลังงาน

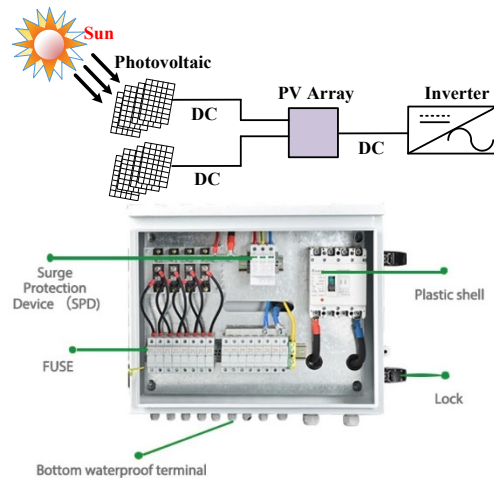
นอกจากนี้ยังมีเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์อีกหลายชนิดที่อยู่ระหว่างการดำเนินการวิจัยและพัฒนา โดยคาดว่าจะสามารถนำมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพในอนาคต อย่างไรก็ตามการนำอุปกรณ์พลังงาน

แสงอาทิตย์เหล่านี้มาใช้ต้องมีประสิทธิภาพ [14] จึงจำเป็นต้องทราบศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของบริเวณที่จะใช้งานด้วย

โดยทั่วไปศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของพื้นที่แห่งหนึ่งจะสูงหรือต่ำขึ้นกับปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นที่นั้นโดยบริเวณที่ได้รับรังสีดวงอาทิตย์มากก็จะมีศักยภาพในการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้งานสูงสำหรับการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ที่ต้องใช้อุปกรณ์รวมแสง จึงมีความจำเป็นต้องทราบสัดส่วนของรังสีรวมต่อรังสีกระจายด้วย

2.3 ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์

ในระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ PV Cell อุปกรณ์พื้นฐานที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า รวมถึง PV Array ดังแสดงในรูปที่ 6 [11]



รูปที่ 6 วงจรและรูปแบบทั่วไปของ PV Array

ภายใน PV Array ได้แก่ ชุดประกอบของ PV Module, PV String หรือ PV Sub-Array ที่เชื่อมต่อกันทางไฟฟ้าและส่วนประกอบอื่นๆ จนถึงขั้วต่อสายด้านเข้าไฟฟ้ากระแสตรงของอินเวอร์เตอร์ หรืออุปกรณ์แปลงผันกำลังไฟฟ้า หรือโหลดไฟฟ้ากระแสตรง มีพฤติกรรมเสมือนเป็นแหล่งกำเนิดกระแสภายใต้ค่า

อิมพีแดนซ์ต่ำ กระแสผิดพลาดจึงอาจมีค่ามากกว่าค่ากระแสโหลดสูงสุดปกติไม่มากนัก แม้จะเกิดการลัดวงจรไฟฟ้า กระแสผิดพลาดขึ้นอยู่กับจำนวนของแถวตำแหน่งความผิดพลาด และความเข้มแสงอาทิตย์ สิ่งเหล่านี้ทำให้การตรวจจับการลัดวงจรภายใน PV Array เป็นไปได้ยาก กระแสผิดพลาดจากอาร์กทางไฟฟ้าใน PV Array อาจไม่ทำให้อุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินทำงาน

ดังนั้นการออกแบบ PV Array ควรเพิ่มความความระมัดระวังในเรื่องต่อไปนี้ [15]

ก. ในการติดตั้งต้องป้องกันการเกิดความผิดพลาดระหว่างสาย (Phase-to-Phase Fault) ความผิดพลาดลงดิน (Earth Fault) และสายหลุดหลวมโดยไม่ได้ตั้งใจใน PV Array ใน้อยที่สุด

ข. การตรวจจับและการเตือนความผิดพลาดลงดิน และการหยุดจ่ายไฟ ต้องเป็นส่วนหนึ่งของฟังก์ชันระบบป้องกันเพื่อลดความเสี่ยงในการเกิดอัคคีภัย

การติดตั้งต้องไม่ก่อให้เกิดความร้อนเกินปกติ อุณหภูมิการทำงานสูงสุดขององค์ประกอบใดๆ ของระบบพลังงานแสงอาทิตย์

ค่าพิกัดของ PV Module จากผู้ผลิต คือ ค่าที่ได้จากการทดสอบตามสภาวะทดสอบมาตรฐาน [9]

ในการติดตั้งโดยทั่วไปจะทำให้ PV Module มีอุณหภูมิสูงขึ้น โดยคาดการณ์ว่า PV Module จะทำงานที่อุณหภูมิสูงขึ้นมากกว่าอุณหภูมิแวดล้อมประมาณ 25 องศาเซลเซียส ในสภาวะที่มีการระบายอากาศที่ดี ภายใต้ความเข้มแสงที่ 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร (Full Sun) หากระดับความเข้มแสงมากกว่า 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร และมีการระบายอากาศที่ไม่ดี อุณหภูมิของ PV Module จะเพิ่มขึ้นเกินกว่านี้มาก (มีความเป็นไปได้ที่อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอาจเพิ่มขึ้นอีก 40-50 องศาเซลเซียส จากอุณหภูมิแวดล้อม)

สำหรับการออกแบบ PV Array จากคุณลักษณะของการทำงานของ PV Module ดังแสดงในตารางที่ 1 [15]

ตารางที่ 1 ค่าปรับแก้แรงดันสำหรับ PV Module ชนิดผลึกซิลิกอนและชนิดหลายผลึก

อุณหภูมิที่คาดว่าจะต่ำสุด (องศาเซลเซียส)	ค่าปรับแก้
25 (T_{STC})	1.00
24 ถึง 20	1.02
19 ถึง 15	1.04
14 ถึง 10	1.06
9 ถึง 5	1.08
4 ถึง 0	1.10
-1 ถึง -5	1.12
-6 ถึง -10	1.14
-11 ถึง -15	1.16
-16 ถึง -20	1.18
-21 ถึง -25	1.20
-26 ถึง -30	1.21
-31 ถึง -35	1.23
-36 ถึง -40	1.25

ก. สำหรับเทคโนโลยี PV ส่วนใหญ่ ประสิทธิภาพจะลดลงเมื่ออุณหภูมิใช้งาน (Operating Temperature) สูงขึ้น (สำหรับ PV Cell แบบผลึกซิลิกอน (Crystalline Silicon) กำลังสูงสุดลดลงระหว่างร้อยละ 0.4-0.5 ต่อทุกๆ องศาเซลเซียสที่เพิ่มขึ้นในอุณหภูมิใช้งานเหนือกว่าอุณหภูมิแวดล้อม) ดังนั้นเป้าหมายหนึ่งในการออกแบบคือ ให้มีการถ่ายเทอากาศที่เพียงพอสำหรับ PV Array เพื่อให้แน่ใจว่าได้สมรรถนะการทำงานที่ดีที่สุดของทั้ง PV Module และส่วนประกอบอื่นที่เกี่ยวข้อง

ข. บริภัณฑ์และส่วนประกอบอื่นๆ ทุกตัวที่อาจจะสัมผัสโดยตรง หรือใกล้กับ PV Array (สายตัวนำอุปกรณ์แปลงผันกำลังไฟฟ้า ตัวเชื่อมต่อและอื่นๆ) ต้องสามารถทนต่ออุณหภูมิสูงสุดที่คาดว่าจะเกิดขึ้นจากการทำงานของ PV Array

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 ร้อยละอัตราส่วนประสิทธิภาพ

ร้อยละอัตราส่วนประสิทธิภาพจากการจำลองทางคณิตศาสตร์ (PVSyst) ดังแสดงในตารางที่ 2 การสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ ดังแสดงในรูปที่ 7 ร้อยละของพลังงาน PV แบบ On-Grid

และ Off-Grid ในประเทศที่รายงาน IEA ดังแสดงในรูปที่ 8

ร้อยละอัตราส่วนประสิทธิภาพดังสมการที่ (1) และ (2) [12]

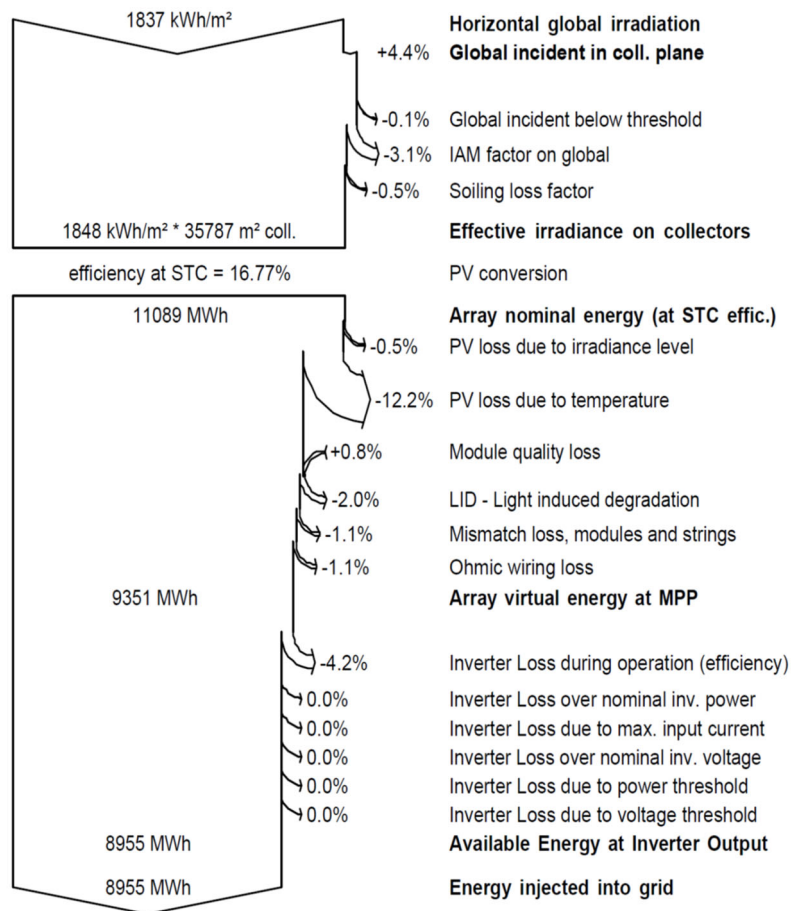
$$PR = \frac{E_{Grid}}{(GlobInc \times P_{nomPV})} \quad (1)$$

$$PR_{(corr)} = \frac{E_{Grid}}{\left(P_{nomPV} \times \sum hours \left(\frac{GlobInc}{G_{ref} \times (1 - \mu P_{mp} \times (T_{array} - T_{arrayAver}))} \right) \right)} \quad (2)$$

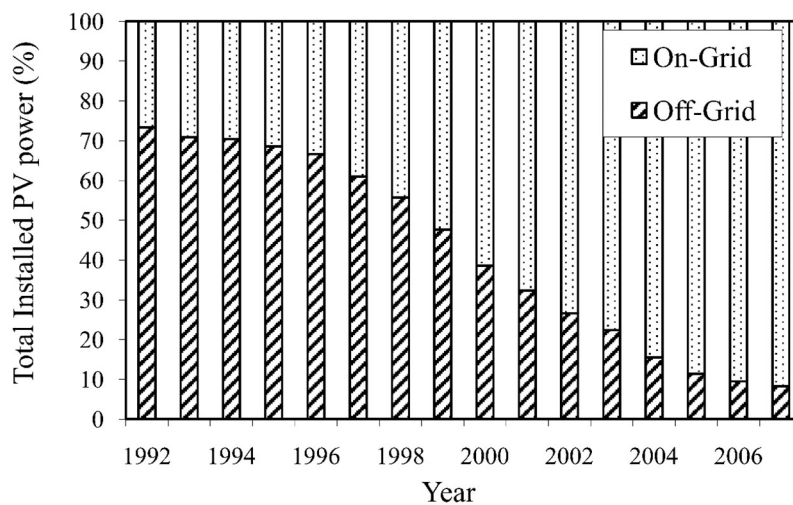
ตารางที่ 2 ผลลัพธ์ของร้อยละอัตราส่วนประสิทธิภาพจากการจำลองทางคณิตศาสตร์ (PVSyst)

	GlobHor	DiffHor	T Amb	GlobInc	GlobEff	EArray	E_Grid	%PR
	kWh/m ²	kWh/m ²	°C	kWh/m ²	kWh/m ²	MWh	MWh	
January	145.5	55.20	23.39	170.1	164.3	837.3	803.2	0.787
February	144.6	56.44	25.97	161.3	155.9	780.7	748.8	0.773
March	172.2	72.70	28.66	181.3	175.1	863.1	827.7	0.761
April	170.7	79.93	29.93	169.6	163.5	806.7	773.2	0.760
May	179.9	86.65	28.20	171.6	165.1	834.0	798.4	0.775
June	158.4	83.28	27.19	148.0	141.9	728.3	695.9	0.784
July	175.5	84.58	27.37	165.5	159.1	811.0	775.5	0.781
August	127.0	88.13	27.29	124.0	118.8	614.7	587.0	0.789
September	135.0	74.43	26.69	137.2	132.0	673.1	643.3	0.782
October	144.2	69.44	26.70	155.7	150.2	760.0	727.9	0.779
November	131.4	58.49	24.56	149.2	144.0	737.2	707.0	0.790
December	152.5	41.35	23.25	183.8	177.9	904.1	867.0	0.786
Year	1836.9	850.60	26.60	1917.4	1847.7	9350.1	8954.9	0.778

Legends:	GlobHor	Horizontal global irradiation	GlobEff	Effective Global, corr. for IAM and shadings
	DiffHor	Horizontal diffuse irradiation	EArray	Effective energy at the output of the array
	T Amb	Ambient Temperature	E_Grid	Energy injected into grid
	GlobInc	Global incident in coll. plane	PR	Performance Ratio



รูปที่ 7 การสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์



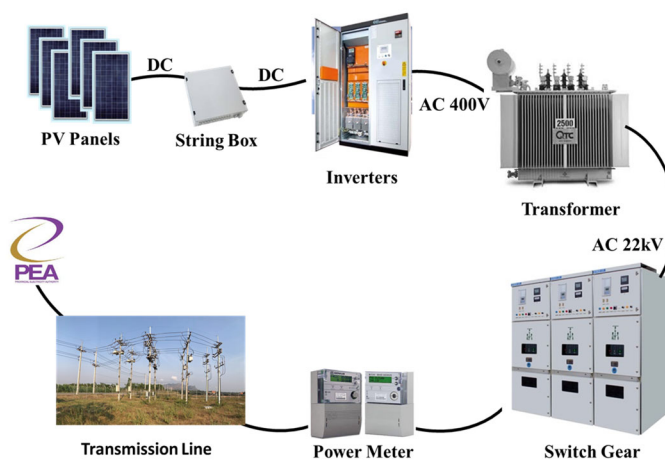
รูปที่ 8 ร้อยละของพลังงาน PV แบบ On-Grid และ Off-Grid ในประเทศที่รายงาน IEA

3.2 กำลังการผลิตกระแสไฟฟ้า

การผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ถือเป็นระบบการผลิตไฟฟ้าที่ได้รับความนิยมอย่างยิ่ง ด้วยความที่การผลิตไฟฟ้าในยุคนี้จำเป็นต้องอาศัยหลักการหลายอย่าง แต่ด้วยความที่ขั้นตอนการผลิตต่างๆ หากยิ่งนานวันเข้าสิ่งที่ใช้ก็ย่อมหมดไป ดังนั้นการใช้พลังงานแสงอาทิตย์จึงเป็นทางเลือกที่ดีที่จะช่วยให้การผลิตกระแสไฟฟ้าเป็นสิ่งที่ทำได้ต่อเนื่อง เพราะพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานที่ไม่มีวันหมดไปจากโลกนี้อย่างแน่นอน

เซลล์แสงอาทิตย์หรือที่เราเรียกว่า โซลาร์เซลล์ เป็นสิ่งประดิษฐ์แบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์

ให้กลายเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ทำมาจากสารกึ่งตัวนำ มีการดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์แล้วมีการเปลี่ยนให้กลายเป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งไฟฟ้าที่ได้นี้จะ เป็นไฟฟ้าในระบบกระแสตรง เซลล์แสงอาทิตย์ถือเป็นอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าที่ไม่จำเป็นต้องเลือกใช้เชื้อเพลิงอื่นๆ นอกจากแสงอาทิตย์ ถือว่าพลังงานเหล่านี้เป็นพลังงานที่สะอาดไม่มีของเสียที่จะก่อให้เกิดมลพิษในระหว่างการใช้งาน ถือเป็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่กับที่ ไม่มีการเคลื่อนที่ขณะที่กำลังทำงาน ทำให้ไม่ต้องเป็นกังวลเรื่องปัญหาการสึกหรอหรือต้องมีการบำรุงรักษาอยู่บ่อยๆ เหมือนกับอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าประเภทอื่นๆ [16] ซึ่งระบบไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ดังแสดงรูปที่ 9

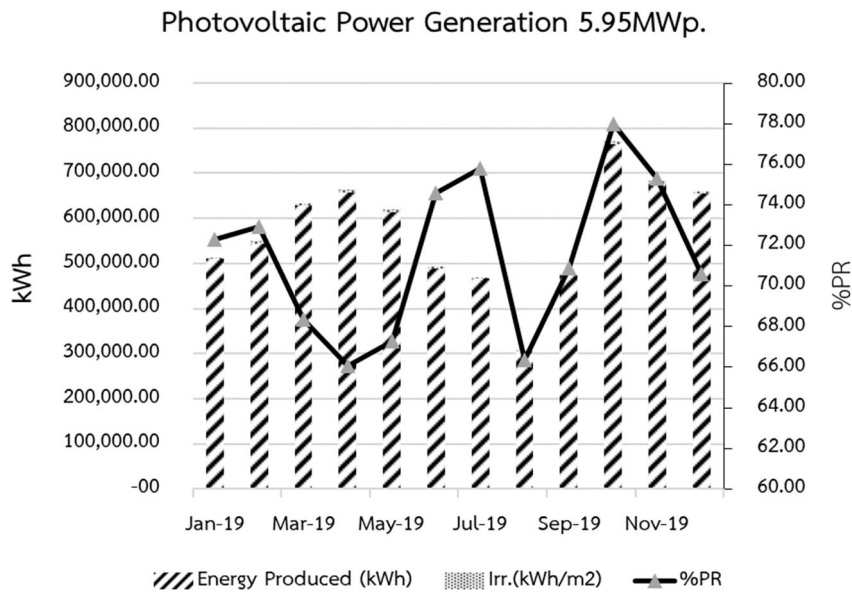


รูปที่ 9 ระบบการผลิตกระแสไฟฟ้า (Power Generation System)

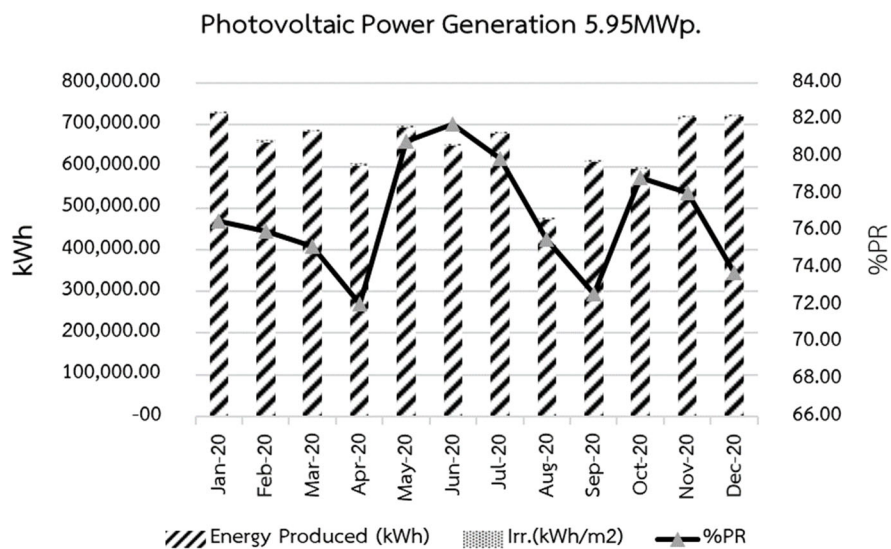
โดยมีหลักการการทำงานของตัวระบบดังนี้

1. พอลแสงอาทิตย์ตกกระทบกับแผงโซลาร์เซลล์ แผงโซลาร์เซลล์ทั้งหมดจะทำการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยตรงผ่านระบบควบคุมเข้าสู่อินเวอร์เตอร์
2. อินเวอร์เตอร์นี้จะทำการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงให้กลายเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อจ่ายเข้าสู่ระบบไฟฟ้า

3. หากช่วงเวลาที่ความเข้มข้นของแสงอาทิตย์มีไม่มากพอหรือการใช้อุปกรณ์ที่มีกำลังการใช้ไฟฟ้าสูงมากกว่ากำลังที่ผลิตขึ้นมาได้จากโซลาร์เซลล์ ระบบจะมีการนำกำลังไฟฟ้าส่วนที่ขาดจากระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบปกติของการไฟฟ้าออกมาใช้ เพื่อให้อุปกรณ์ไฟฟ้าสามารถใช้งานได้ตามปกติ



รูปที่ 9 ผลการผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาด 5.95MWp. ปี 2562



รูปที่ 10 ผลการผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาด 5.95MWp. ปี 2563

ผลลัพธ์ของร้อยละอัตราส่วนประสิทธิภาพจากการผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาด 5.95MWp. ปี 2562-2563 ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลลัพธ์ของร้อยละอัตราส่วนประสิทธิภาพจากการผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาด 5.95MWp. ปี 2562-2563

Energy				Energy			
Month	Produced (kWh)	Irr.(kWh/m ²)	%PR	Month	Produced (kWh)	Irr.(kWh/m ²)	%PR
Jan-19	509,840.00	3,965.83	72.28	Jan-20	726,422.00	5,586.88	76.58
Feb-19	544,480.00	4,673.86	72.93	Feb-20	658,146.00	5,485.77	76.01
Mar-19	628,480.00	4,846.79	68.37	Mar-20	683,528.00	5,458.04	75.20
Apr-19	657,920.00	5,916.67	66.08	Apr-20	602,438.00	5,184.13	72.08
May-19	614,400.00	5,251.55	67.27	May-20	693,880.00	5,129.04	80.86
Jun-19	489,298.00	4,048.53	74.59	Jun-20	648,862.00	4,943.94	81.82
Jul-19	466,506.00	2,935.13	75.79	Jul-20	678,318.00	5,030.66	79.96
Aug-19	305,975.00	2,756.90	66.35	Aug-20	473,050.00	3,745.84	75.57
Sep-19	472,676.00	4,257.05	70.91	Sep-20	610,954.00	5,233.79	72.65
Oct-19	765,362.00	5,940.93	77.99	Oct-20	593,340.00	4,479.13	78.91
Nov-19	677,803.00	6,207.27	75.33	Nov-20	717,602.00	5,580.45	78.08
Dec-19	654,809.00	5,510.19	70.58	Dec-20	719,834.00	5,719.20	73.77
Sum	6,787,549.00	4,692.56	71.54	Sum	7,806,374.00	5,131.41	76.79

จากการศึกษาพบว่าร้อยละอัตราส่วนประสิทธิภาพการปฏิบัติการโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดเล็กมีค่าต่ำกว่าการจำลองทางคณิตศาสตร์ จากตารางที่ 3 เปรียบเทียบกับตารางที่ 2 ผลลัพธ์ของร้อยละอัตราส่วนประสิทธิภาพจากการจำลองทางคณิตศาสตร์ (PV Syst) ตลอดทั้งปีที่ค่า 77.8% ซึ่งผลลัพธ์ของร้อยละอัตราส่วนประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาด 5.95MWp. ปี 2562 และ ปี 2563 ตลอดทั้งปีมีค่า 71.54% และ 76.79% ดังแสดงในรูปที่ 9 ผลการผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาด 5.95MWp. ปี 2562 และรูปที่ 10 ผลการผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาด 5.95MWp. ปี 2563 ตามลำดับ

4. สรุป

การติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนพื้นดินและเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายขนาด

กำลัง 5.95 กิโลวัตต์ (kWp.) [17] ในพื้นที่อำเภอท่าสองยาง จังหวัดตาก มีความเหมาะสมและให้ประสิทธิภาพสูง ระบบสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าสูงสุด เท่ากับ 8,954.9 เมกกะวัตต์-ชั่วโมงต่อปี โดยมีอุณหภูมิเฉลี่ยทั้งปีอยู่ที่ 26.60 องศาเซลเซียส และมีอัตราส่วนสมรรถนะเฉลี่ยรายปีร้อยละ 77.84 ควรเลือกใช้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Poly-Crystalline Si และรองรับกำลังการผลิตไฟฟ้าด้วยกริดอินเวอร์เตอร์ขนาด 330 กิโลวัตต์ จำนวน 15 เครื่อง ที่เหมาะสมและการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ควรหันไปทางทิศตะวันออกเฉียงใต้ (SE) จึงจะได้รับความเข้ม รังสีแสงอาทิตย์สูงสุดและได้ปริมาณพลังงานรวมรายปีมากที่สุด ประมาณ 1,837 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตารางเมตร รวมทั้งการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มุมเอียง 15 องศา จะให้พลังงานไฟฟ้าและปริมาณพลังงานรวมรายปีมากที่สุด

บทความนี้นำเสนอการจำลองทางคณิตศาสตร์ เปรียบเทียบกับการปฏิบัติการโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดเล็กแบบกระจายตัวในระบบจำหน่ายด้วยโปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ PVSyst และ IEC 61724 เพื่อวิเคราะห์และเพิ่มประสิทธิภาพการปฏิบัติการโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดเล็กแบบกระจายตัวให้มีความสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้สูงสุดและมีความต่อเนื่อง

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่สนับสนุนในการทำวิจัยนี้ให้สำเร็จตามเป้าหมายอย่างสมบูรณ์

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Ngamprasert, P. Wannakarn and N. Rugthaicharoencheep, "Enhance Power Loss in Distribution System Synergy Photovoltaic Power Plant," *2020 International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI)*, pp. 173-176, May 2021.
- [2] P. Ngamprasert, N. Rugthaicharoencheep and S. Woothipatanapan, "Application Improvement of Voltage Profile by Photovoltaic Farm on Distribution System," in *Proceeding of 2019 International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI)*, 2019, pp. 98-101.
- [3] S. Chalmers, M. Hitt, J. Underhill, P. Anderson, P. Vogt and R. Ingersoll, "The Effect of Photovoltaic Power Generation on Utility Operation," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-104, no. 3, pp. 524-530, 1985.
- [4] N. Patapoff and D. Mattijetz, "Utility Interconnection Experience with an Operating Central Station MW-Sized Photovoltaic Plant," *IEEE Transactions on Power Systems and Apparatus*, vol. PAS-104, no. 8, pp. 2020-2024, 1985.
- [5] N. Rugthaicharoencheep, M. Boonthienthong, S. Netphokaew and P. Ngamprasert, "A Case Study of the Operation of a Small Photovoltaic in a Distribution System," in *Proceeding of the 42nd Electrical Engineering Conference (EECON-42)*, 2019, pp. 17-20.
- [6] M. E. Ropp, K. Aaker, J. Haigh and N. Sabbah, "Using Power Line Carrier Communications to Prevent Islanding," in *Proceedings of the 28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 2000, pp. 1675-1678.
- [7] J. S. Savier and D. Das, "Impact of network reconfiguration on loss allocation of radial distribution systems," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 22, no. 4, pp. 2473-2480, 2007.
- [8] P. Ngamprasert, P. Wannakarn and N. Rugthaicharoencheep, "Assessing the Power Generation Potential DC from Photovoltaic Power Plants in the Power Distribution System," *UTK Research Journal*, vol. 14, no. 2, pp. 38-49, 2020.
- [9] P. Ngamprasert, S. Woothipatanapan, P. Wannakarn and N. Rugthaicharoencheep, "Improvement for Voltage Sag with Photovoltaic Performance on Distribution System," *IEET-International Electrical*

- Engineering Transactions*, vol. 6, no. 10, pp. 28-33, 2020.
- [10] M. Cortés-Carmona, J. Vega, and M. Cortés-Olivares, "Power flow algorithm for analysis of distribution networks including distributed generation," *IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exhibition - Latin America (T&D-LA)*, Lima, Perú, pp.1-5, 2018.
- [11] P. Ngamprasert, P. Wannakarn and N. Rugthaicharoencheep, "Assessing the Power Distribution Potential DC from Photovoltaic Power Plants in Distribution Systems," in *Proceeding of the 43rd Electrical Engineering Conference (EECON-43)*, 2020. pp. 37-40.
- [12] P. Ngamprasert, M. Boonthienthong, T. Langthathong and N. Rugthaicharoencheep, "The Sustainable Application of Photovoltaic Power Systems to the Foundational Communities," in *Proceeding of the 13th Conference on Application Research and Development (ECTI-CARD 2021)*, April 2021.
- [13] F. Sarkar and R. Ramya, "Voltage sag and distortion mitigation in a hybrid power system using FACTS device," *International Journal of Science and Research*, vol. 4, no. 5, pp. 311-317, 2015.
- [14] S. Aarif and Er. R. K. Randhawa, "Improvement of power quality using photovoltaic dynamic voltage restorer," *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*, vol. 5, no. 9, pp. 703-708, 2017.
- [15] The Engineering Institute of Thailand Under H.M. The King's Patronage. Thailand Electrical Installation Standard: Solar Rooftop Power Supply Installations. 1st edit. EIT Standard 022013-16. Bangkok, THAILAND: EIT. 2013.
- [16] A. Kiswantono, E. Prasetyo and A. Amirullah, "Comparative Performance of Mitigation Voltage Sag/Swell and Harmonics Using DVR-BES-PV System with MPPT-Fuzzy Mamdani/MPPT-Fuzzy Sugeno," *International Journal of Intelligent Engineering and Systems*, vol. 12, no. 2, pp. 222-235, 2019.
- [17] M. Cortés-Carmona, J. Vega and M. Cortés-Olivares, "Power flow algorithm for analysis of distribution networks including distributed generation," *IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exhibition - Latin America (T&D-LA)*, Lima, Perú, pp. 1-5, 2018.

วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร

RMUTP RESEARCH JOURNAL

วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร เป็นวารสารสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่และถ่ายทอดผลงานวิจัยและผลงานวิชาการทั้งภายในและภายนอกมหาวิทยาลัย ซึ่งอยู่ในฐานข้อมูลของศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (Thai Journal Citation Index Centre, TCI Centre) กำหนดการตีพิมพ์เผยแพร่ ปีละ 2 ฉบับ (ราย 6 เดือน) ฉบับที่ 1 มกราคม-มิถุนายน และฉบับที่ 2 กรกฎาคม-ธันวาคม โดยรับพิจารณาบทความทั้งที่เป็นภาษาไทยและภาษาอังกฤษ โดยมีกรอบของวารสารที่ครอบคลุมในสาขาวิชาต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี วิทยาศาสตร์ประยุกต์ และวิศวกรรมศาสตร์ ทั้งนี้บทความดังกล่าวผู้เขียนต้องไม่เสนอบทความฉบับเดียวกันกับที่เคยตีพิมพ์ในวารสารอื่นมาก่อน เว้นแต่ผ่านการเรียบเรียงและเพิ่มเนื้อหาใหม่ บทความแต่ละบทความต้องผ่านการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิที่ตรงตามสาขาของบทความนั้นอย่างน้อย 2 ท่าน และผู้ทรงคุณวุฒิต้องมาจากหน่วยงานที่ต่างกันกับผู้เขียน อีกทั้งผู้ทรงคุณวุฒิที่ประเมินบทความเดียวกันนั้นจะต้องมาจากหน่วยงานที่ต่างกันด้วย ซึ่งจัดประเภทของการ Peer Review เป็นแบบ Double Blinded หมายถึง ผู้ทรงคุณวุฒิจะไม่ทราบชื่อผู้เขียน และผู้เขียนจะไม่ทราบชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ

1. ประเภทของบทความที่ตีพิมพ์

1.1 บทความวิจัย (Research article) เป็นบทความที่ได้จากงานวิจัย มีเนื้อหาสำคัญที่อธิบายถึงระเบียบวิธีวิจัย ผลการทดลอง การวิเคราะห์ผล และการสรุปผลที่ชัดเจน

1.2 บทความวิชาการ (Academic article) เป็นบทความที่มีลักษณะดังนี้

1. Literature review เป็นบทความจากการทบทวนเอกสาร ซึ่งเป็นผลมาจากการวิจัยหลายๆ ครั้ง ถือเป็นบทความที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง
2. Technical paper เป็นบทความนำเสนอกระบวนการในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ การทดสอบภาคสนาม รวมไปถึงเทคนิคการวิเคราะห์ใหม่ๆ
3. Professional practice เป็นบทความที่มาจากประสบการณ์ หรือความชำนาญของผู้เขียน
4. Policy paper เป็นบทความเกี่ยวกับนโยบายด้านต่างๆ ของหน่วยงาน

2. ส่วนประกอบของบทความแต่ละประเภท

2.1 บทความวิจัย

ก. ส่วนปก ให้แยกออกเป็น 2 หน้า โดยปกหน้าแรกเป็นภาษาไทย และปกหน้าที่สองเป็นภาษาอังกฤษ โดยแต่ละปกหน้าต้องจบในหน้าหนึ่งของตัวเอง ประกอบด้วย

1. ชื่อบทความ (Title) ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ควรสั้นกะทัดรัด ชี้ถึงเป้าหมายหลักของการวิจัย
2. ชื่อผู้เขียนทุกท่าน (Authors) ให้ระบุเฉพาะชื่อ และ นามสกุล โดยไม่ต้องมีคำนำหน้านาม
3. หน่วยงาน/สังกัด และที่อยู่ สำหรับการติดต่อทางไปรษณีย์ ของผู้เขียนทุกท่าน
4. ตัวเลขยก ให้เขียนไว้บนนามสกุล เพื่อระบุว่าเป็นตำแหน่งทางวิชาการและที่อยู่ของผู้เขียนท่านใด

5. **บทคัดย่อ (Abstract) ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ** ควรสั้นตรงประเด็น ครอบคลุมสาระสำคัญของการศึกษา ได้แก่ วัตถุประสงค์ วิธีการ ผลและการวิจารณ์ เป็นต้น
6. **คำสำคัญ (Keywords) ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ** เป็นการกำหนดคำสำคัญที่สามารถนำไปใช้เป็นคำสืบค้นในระบบฐานข้อมูล ประมาณ 3-5 คำ
7. **ผู้พิมพ์ประสานงาน (Corresponding Author)** ให้ทำเครื่องหมาย * ไว้บนนามสกุล และระบุหมายเลขโทรศัพท์ และไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (E-mail)

ข. ส่วนเนื้อหา ประกอบด้วย

1. **บทนำ (Introduction)** เป็นส่วนของความสำคัญและมูลเหตุที่นำไปสู่การวิจัย พร้อมวัตถุประสงค์และการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง
2. **ระเบียบวิธีวิจัย (Research Methodology) หรือ วิธีการทดลอง (Experimental Methods)** เป็นการอธิบายวิธีการดำเนินการวิจัย การทดลอง อุปกรณ์ เครื่องมือ การติดตั้งและการวัดค่าต่างๆ
3. **ผลการทดลองและวิจารณ์ผล หรือ ผลการศึกษาและอภิปรายผล (Results and Discussion)** ควรเสนอผลอย่างชัดเจน ตรงประเด็น เป็นผลที่ค้นพบโดยลำดับตามหัวข้อที่ศึกษาพร้อมการวิจารณ์ผล
4. **สรุป (Conclusion)** สรุปสาระสำคัญที่ได้จากการศึกษา
5. **กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements)** เป็นการระบุแหล่งทุนสนับสนุนการวิจัย (ถ้ามี) และการระบุหน่วยงานหรือบุคคลที่ให้การสนับสนุน ช่วยเหลือการทำวิจัย
6. **เอกสารอ้างอิง (References)** ต้องใช้ตามแบบที่วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร กำหนดอย่างเคร่งครัดและเขียนเอกสารอ้างอิง เฉพาะเอกสารที่นำมาอ้างอิงในเนื้อหาเท่านั้น

2.2 บทความวิชาการ

ก. ส่วนปก มีส่วนประกอบเหมือนบทความวิจัย

ข. ส่วนเนื้อหา ประกอบด้วย

1. **บทนำ (Introduction)** เป็นส่วนของที่มาและมูลเหตุของการเขียนบทความ
2. **ผลการศึกษา/ผลการดำเนินการ (Results)** เป็นการเสนอผลอย่างชัดเจน ตามประเด็นโดยลำดับตามหัวข้อที่ศึกษาหรือดำเนินการ
3. **สรุป (Conclusion)** สรุปสาระสำคัญที่ได้จากการศึกษา
4. **กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements)** เป็นการระบุแหล่งทุนสนับสนุนการวิจัย (ถ้ามี) และการระบุหน่วยงานหรือบุคคลที่ให้การสนับสนุน ช่วยเหลือการทำวิจัย
5. **เอกสารอ้างอิง (References)** ใช้รูปแบบที่วารสารฯ กำหนดอย่างเคร่งครัดและเขียนอ้างอิงเฉพาะเอกสารที่ปรากฏในบทความเท่านั้น

3. รูปแบบการพิมพ์บทความ

ให้ใช้ไฟล์รูปแบบบทความ (Template Form) ซึ่งสามารถดาวน์โหลดได้จาก <http://journal.rmutp.ac.th/> โดยไฟล์รูปแบบบทความมีการตั้งค่านำกระดาษแล้ว ดังนี้

รายการ	บทความภาษาไทย	บทความภาษาอังกฤษ
ระยะขอบ	ขอบบน (Top Margin) 2.50 ซม. ขอบล่าง (Bottom Margin) 2.00 ซม. ขอบซ้าย (Left Margin) 2.00 ซม. ขอบขวา (Right Margin) 2.00 ซม.	ขอบบน (Top Margin) 2.50 ซม. ขอบล่าง (Bottom Margin) 2.00 ซม. ขอบซ้าย (Left Margin) 2.00 ซม. ขอบขวา (Right Margin) 2.00 ซม.
ขนาดกระดาษ	ขนาดกระดาษ A4 (กำหนดเอง) ความกว้าง 19 ซม. ความสูง 27 ซม.	ขนาดกระดาษ A4 (กำหนดเอง) ความกว้าง 19 ซม. ความสูง 27 ซม.
เค้าโครง	หัวกระดาษและท้ายกระดาษ เลือกหน้าคู่และหน้าคี่ต่างกัน หน้าแรกต่างกัน จากขอบหัวกระดาษ และ ท้ายกระดาษ ตั้งค่า 1.25	หัวกระดาษและท้ายกระดาษ เลือกหน้าคู่และหน้าคี่ต่างกัน หน้าแรกต่างกัน จากขอบหัวกระดาษ และ ท้ายกระดาษ ตั้งค่า 1.25
รูปแบบตัวอักษร	TH SarabunPSK	Times New Roman
หมายเลขหน้า	ตำแหน่ง ด้านบน ไม่แสดงหมายเลขหน้าในหน้าแรก หน้าคี่ ใส่หมายเลขหน้า ตำแหน่งบนขวา หน้าคู่ ใส่หมายเลขหน้า ตำแหน่งบนซ้าย ขนาดตัวอักษร 14	ตำแหน่ง ด้านบน ไม่แสดงหมายเลขหน้าในหน้าแรก หน้าคี่ ใส่หมายเลขหน้า ตำแหน่งบนขวา หน้าคู่ ใส่หมายเลขหน้า ตำแหน่งบนซ้าย ขนาดตัวอักษร 14
การย่อหน้า	ส่วนปก ย่อ 1.00 ซม. ส่วนเนื้อหา ย่อ 1.00 ซม.	ส่วนปก ย่อ 1.00 ซม. ส่วนเนื้อหา ย่อ 1.00 ซม.
จำนวนหน้าทั้งหมด	8-12 หน้า	8-12 หน้า
ชื่อวารสาร (ภาษาไทย)	อยู่ตำแหน่งกึ่งกลางของหัวกระดาษ หน้าคู่ ขนาดตัวอักษร 14 (ตัวหนา เอียง) “วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร ปีที่ x ฉบับที่ x...xxxx-xxxx,xxx”	อยู่ตำแหน่งกึ่งกลางของหัวกระดาษ หน้าคู่ ขนาดตัวอักษร 14 (ตัวหนา เอียง) “วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร ปีที่ x ฉบับที่ x...xxxx-xxxx,xxx”
ชื่อวารสาร (ภาษาอังกฤษ)	อยู่ตำแหน่งกึ่งกลางของหัวกระดาษ หน้าคี่ ขนาด ตัวอักษร 14 (ตัวหนา) “RMUTP Research Journal, Vol., No.,xxxx-xxxx,xxx”	อยู่ตำแหน่งกึ่งกลางของหัวกระดาษ หน้าคี่ ขนาด ตัวอักษร 14 (ตัวหนา) “RMUTP Research Journal, Vol., No.,xxxx-xxxx,xxx”
การพิมพ์ส่วนปก	พิมพ์เต็มหน้ากระดาษ (พิมพ์ 1 คอลัมน์)	พิมพ์เต็มหน้ากระดาษ (พิมพ์ 1 คอลัมน์)
การพิมพ์ส่วนเนื้อหา	พิมพ์ 2 คอลัมน์ แต่ละคอลัมน์กว้าง 7.1 ซม. ระยะห่างระหว่างคอลัมน์ 0.8 ซม.	พิมพ์ 2 คอลัมน์ แต่ละคอลัมน์กว้าง 7.1 ซม. ระยะห่างระหว่างคอลัมน์ 0.8 ซม.
ชื่อบทความ	ทั้งชื่อภาษาไทยและภาษาอังกฤษพิมพ์ด้วย TH SarabunPSK ขนาด 22 ตัวตรงหนา จัดชิดขอบ ซ้ายหน้ากระดาษ	ชื่อภาษาอังกฤษ พิมพ์ด้วย Times New Roman ขนาด 16 ตัวตรงหนา จัดชิดขอบซ้าย หน้ากระดาษ
ชื่อผู้เขียน	ทั้งชื่อภาษาไทยและภาษาอังกฤษ พิมพ์ด้วย TH SarabunPSK ขนาด 18 ตัวตรงไม่หนา จัดชิด ขอบซ้ายหน้ากระดาษ	ชื่อภาษาอังกฤษ พิมพ์ด้วย Times New Roman ขนาด 12 ตัวตรง ไม่หนา จัดชิดขอบซ้าย หน้ากระดาษ
ตัวเลขยกบนนามสกุล	ขนาดตัวอักษรเท่ากับชื่อและนามสกุล แต่ทำเป็น ตัวยก	ขนาดตัวอักษรเท่ากับชื่อและนามสกุล แต่ทำเป็น ตัวยก
หน่วยงาน/สังกัด และที่อยู่	ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ พิมพ์ด้วย TH SarabunPSK ขนาดตัวอักษร 14	พิมพ์ด้วย Times New Roman ขนาดตัวอักษร 11

รายการ	บทความภาษาไทย	บทความภาษาอังกฤษ
ชื่อบทคัดย่อภาษาไทยและภาษาอังกฤษ	พิมพ์ด้วย TH SarabunPSK ขนาด 20 (ตัวตรง หนา) จัดชิดขอบซ้ายหน้ากระดาษ	พิมพ์ด้วย Times New Roman ขนาด 14 (ตัวตรง หนา) จัดชิดขอบซ้ายหน้ากระดาษ
เนื้อหาบทคัดย่อภาษาไทยและภาษาอังกฤษ	พิมพ์ด้วย TH SarabunPSK ขนาดตัวอักษร 14	พิมพ์ด้วย Times New Roman ขนาดตัวอักษร 12
ชื่อคำสำคัญ	ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ด้วย TH SarabunPSK ขนาด 14 (ตัวหนา)	ภาษาอังกฤษ ด้วย Times New Roman ขนาด 12 (ตัวหนา)
คำสำคัญ	ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ขนาดตัวอักษร 14 ตัวตรง บาง ใส่เครื่องหมาย Semicolon (;) ระหว่างคำ	ด้วย Times New Roman ขนาด 12 ตัวตรง บาง ใส่เครื่องหมาย Semicolon (;) ระหว่างคำ
ชื่อผู้สนับสนุนประสานงาน หมายเลขโทรศัพท์ และไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์	ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ด้วย TH SarabunPSK ขนาด 13 (ตัวเอียง หนา)	ด้วย Times New Roman ขนาด 10 (ตัวเอียง หนา)
ชื่อหัวเรื่องใหญ่	พิมพ์ด้วย TH SarabunPSK ขนาด 18 (ตัวตรง หนา) จัดชิดซ้าย ประกอบด้วย 1.บทนำ 2.วิธีการทดลอง หรือ วิธีการศึกษา 3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลหรือ ผลการศึกษาและอภิปรายผล 4. สรุป 5. กิตติกรรมประกาศ และ 6. เอกสารอ้างอิง	พิมพ์ด้วย Times New Roman ขนาด 14 (ตัวตรง หนา) จัดชิดซ้าย ประกอบด้วย 1.Introduction 2. Research Methodology 3. Results and Discussion 4. Conclusion 5. Acknowledgement and 6. References
ชื่อหัวเรื่องรอง	TH SarabunPSK ขนาด 16 (ตัวตรง หนา) จัดชิดซ้าย	Times New Roman ขนาด 12 (ตัวตรง หนา) จัดชิดซ้าย
ชื่อหัวเรื่องย่อย	TH SarabunPSK ขนาด 14 (ตัวตรง หนา) จัดชิดซ้าย	Times New Roman ขนาด 12 (ตัวตรง หนา) จัดชิดซ้าย
เนื้อหาบทความ	TH SarabunPSK ขนาด 14	Times New Roman ขนาด 12
ชื่อตาราง	TH SarabunPSK 14 ตัวบาง แต่เฉพาะคำว่า “ตารางที่” ต้องเป็นตัวหนา จัดชิดขอบซ้าย	Times New Roman 12 ตัวบาง แต่เฉพาะคำว่า “Table 1” ต้องเป็นตัวหนา จัดชิดขอบซ้าย
ชื่อรูป	TH SarabunPSK 14 ตัวบาง แต่เฉพาะคำว่า “รูปที่” ต้องเป็นตัวหนา จัดกึ่งกลางคอลัมน์	Times New Roman 12 ตัวบาง แต่เฉพาะคำว่า “Fig.1.” ต้องเป็นตัวหนา จัดกึ่งกลางคอลัมน์
สมการ	ใช้โปรแกรม MathType ด้วยรูปแบบอักษร Times New Roman ขนาด 12 สัญลักษณ์หรือตัวแปรที่เขียนในสมการ จะต้องมีรูปแบบเดียวกันกับสัญลักษณ์หรือตัวแปรที่อยู่ในคำอธิบายหรือในเนื้อหา และให้จัดชิดขอบซ้ายสุดเสมอ ส่วนเลขบอกลำดับสมการ ให้เขียนลำดับเลขไว้ในวงเล็บ และจัดชิดขวาสุด	ใช้โปรแกรม MathType ด้วยรูปแบบอักษร Times New Roman ขนาด 12 สัญลักษณ์หรือตัวแปรที่เขียนในสมการ จะต้องมีรูปแบบเดียวกันกับสัญลักษณ์หรือตัวแปรที่อยู่ในคำอธิบายหรือในเนื้อหา และให้จัดชิดขอบซ้ายสุดเสมอ ส่วนเลขบอกลำดับสมการ ให้เขียนลำดับเลขไว้ในวงเล็บ และจัดชิดขวาสุด
คำอธิบายตัวแปรจากสมการ	ใช้โปรแกรม MathType ด้วยรูปแบบอักษร Times New Roman ขนาด 12 จัดชิดขอบซ้ายสุด เครื่องหมาย “=” ของตัวแปรในแต่ละบรรทัด ต้องตรงกันในแนวดิ่ง	ใช้โปรแกรม MathType ด้วยรูปแบบอักษร Times New Roman ขนาด 12 จัดชิดขอบซ้ายสุด เครื่องหมาย “=” ของตัวแปรในแต่ละบรรทัด ต้องตรงกันในแนวดิ่ง

รายการ	บทความภาษาไทย	บทความภาษาอังกฤษ
เนื้อหาในตาราง / แผนภูมิ	TH SarabunPSK 12 ตัวบาง	Times New Roman 10 ตัวบาง
การอ้างอิงในเนื้อเรื่องและการอ้างอิงท้ายเรื่อง	ให้ดูจากข้อที่ 5. การอ้างอิง	ให้ดูจากข้อที่ 5. การอ้างอิง

4. การส่งต้นฉบับบทความ

การส่งต้นฉบับบทความ ผู้เขียนสามารถส่งบทความออนไลน์ ได้ที่ <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/RMUTP/index> หรือสอบถามข้อมูลได้ที่ กองบรรณาธิการวารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร 399 ถนนสามเสน แขวงวชิรพยาบาล เขตดุสิต กรุงเทพฯ 10300 โทรศัพท์ 0 2665 3777 ต่อ 6645 โทรสาร 0 2665 3860

5. จริยธรรม บทบาท และหน้าที่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จัดทำวารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ภายใต้หลักธรรมาภิบาลและเคร่งครัดในด้านจริยธรรม บทบาท และหน้าที่ต่อสังคมอย่างแท้จริง มีการ แต่งตั้งกองบรรณาธิการภายในและภายนอกโดยผู้บริหารสูงสุดของมหาวิทยาลัย กำหนดหน้าที่และความรับผิดชอบอย่างชัดเจน สามารถปฏิบัติงานได้อย่างโปร่งใสและมีความเป็นอิสระในการพัฒนาวารสารให้ก้าวหน้าและมีคุณภาพ การจัดทำวารสารเป็นการเชื่อมต่อบุคคลหรือกลุ่มบุคคล 3 ส่วน ประกอบด้วย 1) ผู้เขียน 2) บรรณาธิการและกองบรรณาธิการวารสาร และ 3) ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ ภายใต้การตรวจสอบ คุณภาพวารสารโดยศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (TCI) ทั้งนี้เพื่อให้วารสารมีคุณภาพเป็นไปตามหลักสากล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จึงได้กำหนดจริยธรรม บทบาท และหน้าที่ของผู้เขียน บรรณาธิการ และกองบรรณาธิการวารสาร และผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ ไว้ดังต่อไปนี้

5.1 จริยธรรม บทบาท และหน้าที่ของผู้เขียน

5.1.1 บทความที่ผู้เขียนยื่นเข้ามายังวารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร เพื่อให้พิจารณานั้น จะต้องไม่ไปยื่นต่อวารสารอื่นใดในคราวหรือเวลาเดียวกัน เว้นแต่ไม่ผ่านการพิจารณาและได้รับเอกสารยืนยันผลการพิจารณาจากกองบรรณาธิการแล้ว จึงจะสามารถดำเนินการยื่นต่อวารสารอื่นใดได้

5.1.2 ผู้เขียนต้องไม่ทำการคัดลอกผลงานทางวิชาการของผู้เขียนอื่น และไม่ตีพิมพ์ซ้ำผลงานของตนเอง (Self-Plagiarism) ไม่ลักลอกผลงานของตนเอง สำหรับข้อมูลอื่นใดของผู้เขียนอื่นที่ผู้เขียนนำมาใช้ในบทความจะต้องทำการเขียนอ้างอิงในส่วนเนื้อหาของเนื้อหาและอ้างอิงส่วนท้ายให้ถูกต้องตามหลักวิชาการ

5.1.3 ผู้เขียนจะต้องนำเสนอผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง การวิเคราะห์ หรือการคำนวณอย่างตรงไปตรงมา ไม่บิดเบือนข้อมูล (Fabrication or Misrepresentation) จากความเป็นจริงและไม่สร้างหลักฐานเท็จเพื่อรองรับผลลัพธ์ของตนเอง

5.1.4 ผู้เขียนจำเป็นต้องกล่าวคำขอบคุณบุคคลหรือหน่วยงานไว้ในกิตติกรรมประกาศ หากผู้เขียนได้รับทุนวิจัยความอนุเคราะห์ด้านเครื่องมือ เครื่องจักร อุปกรณ์ หรือช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ เพื่อให้ได้มาซึ่งความสำเร็จของบทความฉบับนั้น ๆ

5.1.5 วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร ไม่อนุญาตให้เพิ่มเติมบุคคลอื่นใดที่ไม่มีส่วนเกี่ยวข้อง เข้ามา

ชื่ออยู่ในบทความ เช่น ไม่มีส่วนร่วมในการทำวิจัย หรือไม่มีส่วนร่วมในการเขียนบทความนั้น ๆ โดยผู้เขียนทุกท่านที่มีชื่อในบทความจะต้องมีส่วนร่วมรับผิดชอบ

5.2 จริยธรรม บทบาท และหน้าที่ของบรรณาธิการและกองบรรณาธิการวารสาร

5.2.1 บรรณาธิการและกองบรรณาธิการวารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร มีบทบาทและหน้าที่ในการพิจารณาบทความเบื้องต้นก่อนรับเข้าสู่กระบวนการของวารสาร ประกอบด้วย การพิจารณาเนื้อหาบทความกับกรอบของวารสาร การพิจารณารูปแบบการเขียนบทความ การพิจารณาความเข้มข้นของบทความ การลบลอกผลงานทางวิชาการ การเลือกและกำหนดผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ และพิจารณาคุณภาพโดยรวมของบทความ ก่อนเข้าสู่กระบวนการประเมินบทความต่อไป

5.2.2 บรรณาธิการและกองบรรณาธิการวารสารต้องพิจารณาบทความเบื้องต้นบนพื้นฐานคุณธรรมและจริยธรรม โดยไม่เอนเอียงหรือใช้ความรู้สึกส่วนตัวพิจารณาบทความนั้น ต้องไม่มีอคติต่อผู้เขียนหรือต่อหน่วยงาน ของผู้เขียน

5.2.3 บรรณาธิการและกองบรรณาธิการวารสารต้องกำหนดหรือเลือกผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความที่มีความเชี่ยวชาญตรงตามสาขาของบทความนั้น ๆ โดยผู้ทรงคุณวุฒิที่กำหนดนั้นจะต้องไม่มาจากหน่วยงานเดียวกันกับผู้เขียนและผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความทุกท่านที่ประเมินบทความเดียวกันจะต้องไม่มาจากหน่วยงานเดียวกันด้วย ทั้งนี้เพื่อป้องกันผลประโยชน์ทับซ้อนที่อาจเกิดขึ้น

5.2.4 บรรณาธิการและกองบรรณาธิการวารสารต้องเก็บรักษาความลับเกี่ยวกับผู้เขียนและผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ ไม่ให้ทราบข้อมูลซึ่งกันและกัน หมายความว่า ผู้ทรงคุณวุฒิที่เป็นผู้ประเมินบทความจะต้องไม่ทราบชื่อผู้เขียนและชื่อหน่วยงาน และผู้เขียนจะต้องไม่ทราบชื่อและหน่วยงานผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ (ประเภทของ Peer Review เป็นแบบ Double Blinded) เพื่อป้องกันปัญหาความขัดแย้งที่อาจเกิดขึ้นได้

5.2.5 บรรณาธิการ กองบรรณาธิการ ที่ปรึกษาวารสาร รวมทั้งผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการจัดทำวารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร ต้องไม่ตีพิมพ์บทความของตนเองลงในวารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร ที่กำกับดูแลอยู่โดยไม่มีข้อยกเว้น

5.2.6 บรรณาธิการและกองบรรณาธิการวารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ต้องไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อนใด ๆ อันไม่ชอบธรรมและผิดหลักจริยธรรมกับผู้เขียน และกับผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ โดยต้องไม่มีการเรียกรับผลประโยชน์ใด ๆ ทั้งสิ้น

5.2.7 บรรณาธิการและกองบรรณาธิการวารสารต้องควบคุมและกำกับกระบวนการต่าง ๆ ของวารสารอย่างตรงไปตรงมา ไม่เข้าข้างผู้เขียนใด หรือให้ความช่วยเหลือที่ไม่ถูกต้อง ผิดหลักคุณธรรม จริยธรรมและขาดธรรมาภิบาล

5.2.8 บรรณาธิการและกองบรรณาธิการวารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มีหน้าที่ต้องให้ความร่วมมือ ควบคุมและกำกับให้วารสารมีความถูกต้องและมีคุณภาพเป็นไปตามที่ศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทยกำหนดตามมาตรฐาน

5.3 จริยธรรม บทบาท และหน้าที่ของผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ

5.3.1 ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความมีหน้าที่ประเมินบทความในด้านต่าง ๆ ตามรูปแบบที่วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร กำหนดด้วยความเข้มข้นและให้ข้อเสนอแนะหรือเหตุผลเชิงวิชาการอันเป็นประโยชน์ต่อผู้เขียน

5.3.2 ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความต้องประเมินบทความที่ได้รับมอบหมายจากบรรณาธิการและกองบรรณาธิการวารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร ให้แล้วเสร็จในช่วงระยะเวลาที่กำหนด เพื่อประโยชน์สูงสุดของผู้เขียนบทความ

5.3.3 ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความต้องพิจารณาบทความที่ได้รับจากบรรณาธิการหรือกองบรรณาธิการถึงความเชี่ยวชาญของตนเองกับเนื้อหาในบทความ หากเห็นว่าบทความที่ได้รับมีเนื้อหาไม่ตรงตามความเชี่ยวชาญที่แท้จริงจะต้องแจ้งกองบรรณาธิการวารสารให้รับทราบโดยเร็วและปฏิเสธการประเมิน

5.3.4 ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความต้องมีหลักจริยธรรมในการประเมินบทความ ไม่เอนเอียงหรือมีอคติต่อเนื้อหาบทความ ต้องไม่ใช้ความคิดเห็นส่วนตัวที่ไม่เป็นไปตามหลักทฤษฎีเชิงวิชาการ ปราศจากหลักฐานที่น่าเชื่อถือได้มาเป็นเกณฑ์ในการตัดสินบทความนั้น ๆ

5.3.5 ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความต้องเก็บรักษาความลับ ด้วยการไม่เปิดเผยข้อมูลเนื้อหาในบทความของผู้เขียนแก่บุคคลอื่นใดในช่วงระยะเวลาของการประเมินบทความนั้น

6. การอ้างอิง

การอ้างอิงในบทความวิจัยและบทความวิชาการสำหรับวารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กำหนดการอ้างอิงให้เป็นไปตามรูปแบบ IEEE (อ้างอิงจาก <https://www.ieee.org/documents/ieeecitationref.pdf> หรือที่ http://www.ieee.org/documents/style_manual.pdf) โดยต้องเขียนเป็นภาษาอังกฤษเท่านั้น หากบทความที่อ้างอิงมาจากบทความภาษาไทย ต้องแปลเป็นภาษาอังกฤษให้ถูกต้อง สำหรับการใส่อ้างอิงในเนื้อเรื่อง (In-text citations) ให้ใช้เครื่องหมาย [] โดยมีตัวอย่างการเขียน เช่น [1] หรือ [2] หรือ [1], [2] หรือ [1]-[3] หรือ [1], [3]-[8] หรือ [9], [10], [15], [16] หากมีการอ้างอิงซ้ำบทความเดิมให้ใช้หมายเลขเดิม

ในกรณีมีการอ้างอิงในเนื้อหาด้วยการกำหนดชื่อผู้แต่งบทความให้เขียนตามตัวอย่าง ดังนี้ K. S. Karukanan [1] หรือ L. A. Hoi and S. D. Woo [2] หรือ P. A. Abarwale et al. [3]

ในส่วนของการอ้างอิงส่วนท้าย (Reference List) จะต้องเรียงตามลำดับบทความที่เขียนอ้างอิงในเนื้อเรื่อง ซึ่งจำแนกรูปแบบการเขียนอ้างอิงส่วนท้ายได้ดังต่อไปนี้

1) การอ้างอิงจากบทความในวารสาร (Journal Articles)

รูปแบบ: [1] Author, "Title of Article," *Title of Journal*, Volume, Issue, Pages. Year.

ตัวอย่าง:

- [1] H. Li, Z. Huang, L. Cheng, S. Kong and S. Liu, "Structure and dielectric properties of novel low temperature co-fired Bi₂O₃-RE₂O₃-MoO₃ (RE=Pr, Nd, Sm, and Yb) based microwave ceramics," *Ceramics International Journal*, vol. 43, no. 5, pp. 4570-4575, Apr. 2017.

2) การอ้างอิงจากการนำเสนอผลงานในการประชุมทางวิชาการ (Conference Technical Articles)

รูปแบบ: [1] Author, "Title of paper," in *Title of Conference*, Conference date, Editor, Ed.

Location: Publisher, Year, Pages.

ตัวอย่าง:

- [2] T. Fedushchak, M. Uimin, S. Zhuravkov and A. Vosmerikov, "Nanopowder hydrogenation catalysts of diesel fraction components," in *Proceeding of 7th International Forum on Strategic Technology (IFOST)*, Tomsk Polytechnic University Tomsk, Russia, 2012, pp. 1–4.
- [3] W. Herz, M. Süßer, A. Ulbricht and F. Wüchner, "The operation experience with the dual cooling system of the polo coil (two phase-supercritical He)," in *Proceedings of the Sixteenth International Cryogenic Engineering Conference/International Cryogenic Materials Conference*, Germany, 1997, pp. 469–472.

3) การอ้างอิงจากหนังสือ (Books)

รูปแบบ: [1] Author. *Title of Book*, Editor, ed. Location: Publisher, Year, Pages.

ตัวอย่าง:

- [4] R. C. Hibbeler, *Mechanics of Materials*, 9th ed. Boston: Pearson, 2013.
- [5] R. M. Burton, B. Obel and G. DeSanctis, *Organizational Design: A Step-by-Step Approach*, 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 2011.

4) การอ้างอิงจากบทในหนังสือ

รูปแบบ: [1] J. K. Author, "Title of chapter in the book," in *Title of His Published Book*, xth ed. City of Publisher, Country if not USA: Abbrev. of Publisher, year, ch. x, sec. x, pp. xxx–xxx.

ตัวอย่าง:

- [6] L. Stein, "Random patterns," in *Computers and You*, J. S. Brake, Ed. New York: Wiley, 1994, pp. 55-70.
- [7] R. L. Myer, "Parametric oscillators and nonlinear materials," in *Nonlinear Optics*, vol. 4, P. G. Harper and B. S. Wherret, 1st ed. San Francisco, CA: Academic, 1977, pp. 47-160.

5) การอ้างอิงจากวิทยานิพนธ์ (Theses and Dissertations)

รูปแบบ:

- [1] J. K. Author, "Title of dissertation," Ph.D. dissertation, Abbrev. Dept., Abbrev. Univ., City of Univ., Abbrev. State, year.
- [2] J. K. Author, "Title of thesis," M.S. thesis, Abbrev. Dept., Abbrev. Univ., City of Univ., Abbrev. State, year.

ตัวอย่าง:

- [8] J. O. Williams, "Narrow-band analyzer," Ph.D. dissertation, Dept. Elect. Eng., Harvard Univ., Cambridge, MA, 1993.
- [9] N. Kawasaki, "Parametric study of thermal and chemical nonequilibrium nozzle flow," M.S. thesis, Dept. Electron. Eng., Osaka Univ., Osaka, Japan, 1993.

6) การอ้างอิงจากสิทธิบัตร (Patents)

รูปแบบ: [1] J. K. Author, "Title of patent," U.S. Patent x xxx xxx, Abbrev. Month, day, year.

ตัวอย่าง:

[10] J. P. Wilkinson, "Nonlinear resonant circuit devices," U.S. Patent 3 624 125, July 16, 1990.

7) การอ้างอิงจากมาตรฐาน (Standards)

รูปแบบ: [1] *Title of Standard*, Standard number, date.

ตัวอย่าง:

[11] *IEEE Criteria for Class IE Electric Systems*, IEEE Standard 308, 1969.

[12] *Letter Symbols for Quantities*, ANSI Standard Y10.5-1968.

8) การอ้างอิงจากคู่มือ (Handbooks)

รูปแบบ: [1] *Name of Manual/Handbook*, x Ed., Abbrev. Name of Co., City of Co., Abbrev.
State, year, pp. xx-xx.

ตัวอย่าง:

[13] *Transmission Systems for Communications*, 3rd Ed., Western Electric Co., Winston-Salem, NC, 1985, pp. 44–60.

[14] *Motorola Semiconductor Data Manual*, Motorola Semiconductor Products Inc., Phoenix, AZ, 1989.

Research Articles

- ◆ **An Experimental Study of Solar Panel Efficiency with Water Cooling**
Yuttana Sriudom Anurat Tewata Sangkom Sapso and Niwat Pratumchai
- ◆ **Determination of Mercury Contents in Facial Whitening Cream Samples by Direct Thermal Decomposition Mercury Analyzer**
Napaporn Bunnaranurak and Napa Tangtreamjitmun
- ◆ **Physicochemical, mechanical and thermal properties of edible film from Man Lueat (*Dioscorea alata*) flour**
Namfon Samsalee Nisa Romsomsa and Sumalee Musika
- ◆ **Application of a Commercial Flyback Transformer for a High Frequency High Voltage Source**
Yutthana Kanthaphayao and Chalernpol Rueangepattanawiwat
- ◆ **The Development of Engine Prototype Powered by Diesel and LPG as Fuel for Agriculture**
Chaiyong Siripornmongkolchai
- ◆ **The Feasibility Study For Solvent Based White Ink For Flexible Packaging**
Phichit Kajondecha and Anan Tanwilaisiri
- ◆ **Development of a Model and Forecasting of hourly UV Index using Artificial Neural Network (ANN) at Songkhla**
Pranomkorn Choosri Sarawut Nabnean Worapan Kanchanachat and Sanitta Teansri
- ◆ **Flexural Performance of Corroded Reinforced Concrete Beams Repaired with CFRP Sheets**
Anon Wongkaew
- ◆ **Quality Control and Loss Reduction in the Front Side Fender Model Assembly Process Using Poka-Yoke Techniques**
Aphichit Semsri Aekkarat Suksukont Samruai Sisamut and Thanitsak Pudtipatkosit
- ◆ **Determination of Active Constituents and Antioxidant Activity of *Premna trichostoma* Miq. Leaf Extract**
Wanhuda Paduka Punjaporn Sunthudlakhar Thaweepon Keereekoch and Nongluk Kunworarath
- ◆ **Bendability and Damage Mechanisms of Aluminium Sheet AA6016**
Natthasak Pornputsiri
- ◆ **Effect of Dragging Force on Paper Cone Falling Using High-Speed Video Analysis Technique**
Jiraporn Poonyawatpornkul and Vilaiporn Luksameevanish
- ◆ **Immobilized Free Nitrogen-Fixing Bacteria *Azotobacter* in Natural Materials and Its Effect on Growth of *Brassica Chinensis* in Soil**
Pitchya Tangsombatvichit Thidarat Tiammongkol and Nareerat Konganan
- ◆ **Analysis of Wind Speed Data and Annual Energy Potential at Samoeng District in Thailand**
Kittikorn Sasujit and Nigran Homdoun
- ◆ **Characteristics of Atomizer Nozzle In Gas Atomization**
Montri Kawsuk Surat Wannasri and Sirichai Torsakul
- ◆ **The Mathematical Simulation Compared to Operations a Small Distributed Photovoltaic Power Plant in a Distribution System**
Manat Boonthienthong Papon Ngamprasert and Nattachote Rugthaicharoencheep