



RMUTL Engineering Journal

ปีที่ 9 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม 2567

ISSN(Print) 3027-7426

ISSN(Online) 3027-7434

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

- Influence of Durian Rind Cellulose Microfiber as the Fillers on the Mechanical Properties of Polylactic Acid Bio-composites 1
Watcharin Sitticharoen Adirake Chainawakul and Chet Uthiyoung
- Adsorption characteristics of methylene blue onto low-cost dried and calcined water hyacinth: A batch and fixed-bed column study 10
Nakorn Suriyanon Pattra Wongpankamol Siraprapa Chainetr and Wanida Suriyanon
- Comparison of polypropylene flow index to increase injection efficiency In plastic injection mold, 2 cavities of different shapes Plastic (case study : pencil box) 21
Worapong Phongphattarawut Supatthra Muparang Noppharit Wasanbongngem Jittiwat Nithikarnjanatharn and Wannisa Nutkhum
- เครื่องวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดต่างและสารอาหารในดินเพื่อการเลือกปลูกพืชเศรษฐกิจที่เหมาะสม 30
ศุภฤกษ์ จันทรศุภเสน อิศราภรณ์ ออมรสวัสดิ์วัฒนา และชาคริต ปานแป้น
- การเพิ่มความพร้อมการใช้งานเครื่องจักรของกระบวนการกรองน้ำ ในกระบวนการผลิตน้ำประปา : กรณีศึกษาโรงงานผลิตน้ำมหาสวัสดิ์ 41
ศิริวิทย์ ปุสวิโร และศุภรัชชัย วรรัตน์
- อิทธิพลของค่าโมดูลัสความละเอียด ปริมาณเส้นใยโพลีพรพิลีน และปริมาณโพนต่อน้ำหนักแห้ง และกำลังของจีโอโพลีเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีพรพิลีน 53
ปิยธิดา อยู่สุข และเชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒน์พงศ์
- การประเมินสมรรถนะและความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ของระบบติดตามดวงอาทิตย์สำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองด้าน 64
จิรายุ แบ่งทิศ และสราวุธ พลวงษ์ศรี



วารสารวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

ได้รับการประเมินให้อยู่ในฐานข้อมูลของศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (TCI) กลุ่มที่ 1

F a c u l t y o f E n g i n e e r i n g



วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา RMUTL Engineering Journal

วัตถุประสงค์

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เป็นวารสารทางวิชาการจัดพิมพ์ฉบับแรกในเดือนมกราคม พ.ศ. 2559 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่ผลงานวิจัยและองค์ความรู้ทางที่น่าสนใจด้านวิจัยและงานบริการวิชาการ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการสร้างความก้าวหน้าทางวิชาการ และมาตรฐานการประกอบวิชาชีพ โดยสาขาวิชาที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ วิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์ วิศวกรรมระบบควบคุม วิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ วิศวกรรมโทรคมนาคม วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมเกษตร วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ วิศวกรรมขนถ่ายวัสดุ วิศวกรรมอุตสาหการ วิศวกรรมแม่พิมพ์ วิศวกรรมโลหการ วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม วิศวกรรมเหมืองแร่ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้อง

เจ้าของ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

เลขที่ : 128 ถนนห้วยแก้ว ตำบลช้างเผือก อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300

โทรศัพท์ : 0 5392 1444 ต่อ 2641, 1236

เว็บไซต์ : <https://engineering.rmutl.ac.th/journal> และ <https://www.tci-thaijo.org/index.php/RMUTLEngJ>

อีเมล : EngineeringJournal@rmutl.ac.th

ที่ปรึกษา

อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและกิจกรรมนักศึกษา

รองอธิการบดีฝ่ายวิจัยและพัฒนาระบบอย่างยั่งยืน

รองอธิการบดีฝ่ายแผนนโยบายและยุทธศาสตร์

รองอธิการบดีฝ่ายบริหาร

ผู้ช่วยอธิการบดี

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

คณบดีคณะศิลปกรรมและสถาปัตยกรรมศาสตร์

คณบดีคณะบริหารธุรกิจและศิลปศาสตร์

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร

ผู้อำนวยการสำนักส่งเสริมวิชาการและงานทะเบียน

ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยเทคโนโลยีเกษตร

ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา

ผู้อำนวยการสถาบันถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่ชุมชน



ผู้อำนวยการวิทยาลัยเทคโนโลยีและสหวิทยาการ
ผู้อำนวยการสำนักวิทยบริการและเทคโนโลยีสารสนเทศ
รองคณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

บรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษดา ยิ่งขยัน คณะวิศวกรรมศาสตร์

รองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.วัชรินทร์ สิทธิเจริญ คณะวิศวกรรมศาสตร์

กองบรรณาธิการ

กองบรรณาธิการจากหน่วยงานภายนอก

ศาสตราจารย์ ดร.โกสินทร์	จำนงไทย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.ลักกมณ	เทพหัสดิน ณ อยุธยา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.ดนัย	ต.รุ่งเรือง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ์	อัศวเอกผาลิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร.ประดิษฐ์	เทอดทูล	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศาสตราจารย์ ดร.สุเชษฐ์	ลิขิตเลอสรวง	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.ชาคริต	สิริสิงห์	มหาวิทยาลัยมหิดล
ศาสตราจารย์ ดร.อภินิติ	โชติสังกาศ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.กฤษณ์ชนม์	ภูมิภิตติพิชญ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.บุญยัง	ปลั่งกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.กานต์	เกิดขึ้น	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์	ชื่นแขก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญญารัตน์	สายสิริรัตน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.วารุณี	เปรมานนท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.พงศ์พันธ์	แก้วดาทิพย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.สันติรัฐ	นันทะอาจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.ปิยะนันท์	เจริญสุวรรณ	มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ ดร.ภูพงษ์	พงษ์เจริญ	มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ ดร.พิสิฐ	ศรีสุริยจันทร์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.วิชัย	ฉัตรทินวัฒน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ	โสภณแดง	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.นิวิท	เจริญใจ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.อนุชา	วัชรภาสกร	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.พฤกษ์	สกุลช่างสัจจะทัย	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.ชวโรจน์	ใจสิน	มหาวิทยาลัยแม่โจ้



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงษ์	คงประเสริฐ	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมภาพ	รอดอัมพร	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฐปน	ชื่นบาล	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิราภรณ์	ชื่นบาล	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยวัฒน์	สากุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พุทธิพล	ดำรงชัย	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิวา	แก้วปลั่ง	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยะรส	พรหมดิเรก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัลลภ	หาญณรงค์ชัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติศักดิ์	แพบัว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัฐพงษ์	สุวลักษณ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
นางสาวกฤตยา	ศักดิ์อมรสงวน	กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่

กองบรรณาธิการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

รองศาสตราจารย์ ดร.อุเทน	คำน่าน	คณะวิศวกรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.ประชา	เย็นยงกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.พินิจ	เนื่องภิรมย์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภกิต	แก้วดวงตา	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย	เดชธรรมรงค์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาคภูมิ	จารุภูมิ	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัฐพล	จันทวงศ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฐิติพร	พันธุ์ท่าช้าง	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิวโรดม	ศิริลักษณ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รณชาติ	มันศิลป์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยวัฒน์	กิตติเดชา	คณะวิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ภาณุ	อุทัยศรี	คณะวิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์โชคมงคล	นาดี	คณะวิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ณัฐชาติสิทธิ์	ชูเกียรติจักร	คณะวิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ปรัชญ์	ปิยะวงศ์วิศาล	คณะวิศวกรรมศาสตร์

ฝ่ายจัดพิมพ์และเผยแพร่

นางสาวจิราภรณ์	กันทะใจ	คณะวิศวกรรมศาสตร์
นายครรชิต	เงินคำคง	คณะวิศวกรรมศาสตร์
นางสาวอุไรวรรณ	สายยะนันท์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
นางสาวจุฑาทิพย์	สุวรรณ	คณะวิศวกรรมศาสตร์
นางสาววัลลภา	วงศ์ชายะ	คณะวิศวกรรมศาสตร์



จดหมายจากบรรณาธิการ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา (RMUTL Eng. J.) ปีที่ 9 ฉบับที่ 2 ประจำเดือนกรกฎาคม - ธันวาคม 2567 อยู่ในฐานข้อมูลศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (TCI) กลุ่มที่ 1 บทความวิจัยที่ส่งผ่านระบบได้รับการได้ผ่านการประเมินคุณภาพจากกองบรรณาธิการ และผู้ทรงคุณวุฒิ (Peer Review) จากภายในและภายนอกมหาวิทยาลัย กองบรรณาธิการจะรักษาคุณภาพของวารสารให้ได้มาตรฐาน เพื่อให้วารสารวิศวกรรมศาสตร์ (RMUTL Eng. J.) เป็นที่ยอมรับและเกิดการแบ่งปันองค์ความรู้ทางวิชาการที่มีคุณภาพและทันสมัยอย่างต่อเนื่อง

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา (RMUTL Eng. J.) ฉบับนี้ได้รวบรวมบทความทางวิชาการที่ผ่านการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิ จำนวน 7 บทความ ประกอบด้วยบทความวิชาการด้านวิศวกรรมอุตสาหการ วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม วิศวกรรมเครื่องมือวัดและอิเล็กทรอนิกส์ วิศวกรรมเทคโนโลยี และวิศวกรรมโยธา สำหรับผู้ที่สนใจสามารถอ่านบทความฉบับปัจจุบันหรือฉบับย้อนหลังแบบออนไลน์เพิ่มเติมได้ทางเว็บไซต์ <https://www.tci-thaijo.org/index.php/RMUTLEngJ>

ในนามของกองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา (RMUTL Eng. J.) ขอขอบพระคุณนักวิจัยทุกท่านเป็นอย่างสูง ที่ส่งบทความมาพิจารณาเพื่อตีพิมพ์ ผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่เสียสละเวลาในการประเมินบทความ และให้คำแนะนำในการปรับปรุงเนื้อหาบทความให้มีคุณภาพ คณะผู้บริหารมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ผู้สนับสนุน รวมทั้งคณะทำงานในกองบรรณาธิการวารสาร (RMUTL Eng. J.) และในโอกาสนี้ผมขอเชิญชวนอาจารย์ นักวิจัย และนักศึกษา ส่งบทความวิจัย บทความวิชาการ หรือบทความปริทัศน์ที่เกี่ยวข้องทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ในรูปแบบภาษาอังกฤษ เพื่อตีพิมพ์ในวารสาร (RMUTL Eng. J.) ในฉบับต่อ ๆ ไป

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษดา ยิ่งยวน)

บรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา



สารบัญ

ปีที่ 9 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม 2567

บทความวิชาการ

Influence of Durian Rind Cellulose Microfiber as the Fillers on the Mechanical Properties of Polylactic Acid Bio-composites 1

Watcharin Sitticharoen Adirake Chainawakul and Chet Uthiyoung

Adsorption characteristics of methylene blue onto low-cost dried and calcined water hyacinth: A batch and fixed-bed column study 10

Nakorn Suriyanon Pattra Wongpankamol Sirapapa Chainetr and Wanida Suriyanon

Comparison of polypropylene flow index to increase injection efficiency In plastic injection mold, 2 cavities of different shapes Plastic (case study : pencil box) 21

Worapong Phongphattarawut Supatthra Muparang Noppharit Wasanbongngem Jittiwat Nithikarnjanatharn and Wannisa Nutkhum

เครื่องวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดต่างและสารอาหารในดินเพื่อการเลือกปลูกพืชเศรษฐกิจที่เหมาะสม 30

ศุภฤกษ์ จันทร์ศุภเสน อิศราภรณ์ อมรสวัสดิ์วัฒนา และชาคริต ปานแป้น

การเพิ่มความพร้อมการใช้งานเครื่องจักรของกระบวนการกรองน้ำ ในกระบวนการผลิตน้ำประปา : กรณีศึกษา โรงงานผลิตน้ำมหาสวัสดิ์ 41

ศิริวิทย์ ปุสวโร และศุภรัชชัย วรรัตน์

อิทธิพลของค่าโมดูลัสความละเอียด ปริมาณเส้นใยโพลีโพรพิลีน และปริมาณโฟมต่อ หน่วยน้ำหนักแห้ง และกำลังของจีโอโพลีเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีน 53

ปิยธิดา อยู่สุข และเชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒน์พงศ์

การประเมินสมรรถนะและความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ของระบบติดตามดวงอาทิตย์สำหรับแผงเซลล์ แสงอาทิตย์แบบสองด้าน 64

จิรายุ แบ่งทิศ และสรารุธ พลวงษ์ศรี



Influence of Durian Rind Cellulose Microfiber as the Fillers on the Mechanical Properties of Polylactic Acid Bio-composites

Watcharin Sitticharoen^{1*} Adirake Chainawakul¹ and Chet Uthiyoung¹

¹Division of Tools and Die Engineering, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna
128 Huay Kaew Road, Muang, Chiang Mai, Thailand, 50300

*Corresponding Author: wsitticharoen@hotmail.com. Phone Number: 09-7921-3875

Received: 31 March 2024, Revised: 13 May 2024, Accepted: 13 May 2024

Abstract

This work aims to study the influence of durian rind cellulose (DRC) microfiber as a reinforcing filler on the mechanical properties of polylactic acid (PLA) bio-composites. Cellulose from durian rind will be extracted using sodium hydroxide solution and bleached treatment with hydrogen peroxide. X-Ray fluorescence technique was used to examine the chemical composition of durian rind cellulose, and functional groups were analyzed using FT-IR technique. PLA was mixed with DRC microfibers particle size of 300 μm by using a mixing apparatus, and then melt-blending by extruder in varying ratios of 100/0, 95/5, 93/7, 90/10, and 80/20 wt%. The results revealed that the mechanical properties of PLA/DRC composites in the tensile modulus, flexural modulus, and shore-D hardness of the composites at DRC microfibers of 20 wt% was increased a maximum of 64%, 21%, and 16%, respectively, as compared to the neat PLA. On the other hand, the tensile strength, and flexural strength of the composites at DRC microfibers of 20 wt% was depressed by 9%, and 23%, respectively, as compared to the neat PLA. Polymer composites reinforced with DRC microfiber had increased water absorption when increasing DRC microfiber particles. PLA biocomposites as a new eco-friendly alternative material, and can be used to as compostable chopsticks.

Keywords: Durian rind cellulose, Polylactic acid, Biocomposite, Mechanical properties

1. Introduction

Polymer biocomposites are green alternative materials that can be fabricated to replace the rare and expensive woods, and can also serve as environmentally friendly alternatives to petroleum-based plastics such as high-density polyethylene (HDPE), polypropylene (PP), etc. These plastics are durable and have a long lifespan, but they cannot be decomposed naturally. Consequently, the amount of plastic waste has increased worldwide along with the increasing population, leading to the greenhouse effect and global warming. Polymer composite materials have garnered attention from researchers due to their advantages in good mechanical properties and suitability for a wide range of applications in the automotive industry, agricultural industry, interior architecture, and various creative works that require durability and beauty.

Durian is another important economic fruit crop of Thailand, and it has important cultivation areas in the eastern and southern regions of the country. Durian production throughout the year in Thailand amounts to 1,537,000 tons. [1]. After consuming a durian fruit, the durian rind is

considered waste. Durian rind fibers have good mechanical properties, environmentally friendly, and biodegradable [2-4]. Xing et al. [5] studied preparation and extraction of cellulose nanofibers from durian peel using sodium carbonate, and found that cellulose nanofiber aerogel had the porosity high to 99%, and compressive strength of cellulose aerogel composite was highest when increased cellulose nanofibers of 5 wt%. Nadondu et al. [6] studied the mechanical of polylactic acid/glass-carbon/durian skin fiber hybrid composites, and found that tensile and impact strength, and hardness of PLA composites increased when a mixture content of E-glass fiber/carbon fiber/durian skin fiber was 5.05/10/10 wt%, respectively. Polypropylene hybrid-composites reinforced with cellulose nanofibers (CNFs)/Talc, and mix with a maleic-anhydride were investigated by Kinoshita et al. [7]. They found that the mechanical properties of the composites (elastic constant, and tensile strength) increased when increasing the cellulose nanofibers and maleic-anhydride. Zhao et al. [8] used an epoxy solution-modified pine-wood fibers as a reinforced on PLA composites. It was found that the PLA composites reinforced with

pine-wood, and add an epoxy solution an amount of 0.5-10 wt% increased in tensile strengths and elastic modulus of the composites up to 20% and 82%, as compared to pure PLA. In addition, also found that the PLA composites/pine-wood with an epoxy solution (1.0 wt%), had occurred fewer voids on the fracture surface of the composites, as comparing with PLA/pine-wood composites without surface-modified of pine-wood fibers by epoxy solution. Sitticharoen et al. [9] studied the mechanical and thermal properties of polylactic acid (PLA) hybrid biocomposites reinforced with hemp microfibers (Hf) and microcalc (Tc) were investigated. Young's modulus and hardness properties of biocomposites for chemical surface-modified Hf-Tc particles were higher, as comparing with non-modified particles, also found that the impact strength of biocomposites for modified Hf-Tc content at a ratio of 14:6 wt%, and 6:14 wt% were significantly increased. The crystallinity of PLA-Hf-Tc biocomposites for chemical surface modified Hf-Tc and non-modified Hf-Tc a little increased, but the melting temperatures of biocomposites were didn't different to pure PLA. Thermal stability of pure PLA was higher, as compared to PLA-Hf-Tc biocomposites. Rafiqah et al. [10] studied the miswak fibers treatment with a sodium hydroxide (NaOH) on the mechanical- thermal properties of polylactic acid composites, and found that the tensile strength of the composites significantly increased with increasing concentration of a chemical solution treatment the miswak fibers, but modulus of the composites tends to decline. The thermal stability of the composites slightly increased as comparing with the un-treated fiber composites. Jesus et al. [11] studied the mechanical and thermal properties of polylactic acid (PLA) reinforced with curaus microfibrillated cellulose, and found that the tensile and flexural strength, and flexural modulus of composites increased with 0.5 wt% of microfibrillated cellulose as compared to the neat PLA, and thermal stability of the composites lower than that the neat PLA.

This research aims to study cellulose microfibers from waste durian rind as reinforcements in polylactic acid (PLA) composites, and to use them in the production of biodegradable prototype chopsticks.

2. Materials and Methods

2.1 Materials

Polylactic acid (PLA) injection grade 3251D, with a melt flow rate (MFR) of 35 g/10 min (190

°C, 2.16 kg), and obtained in pellets form by Nature Works LLC, USA. Durian rind (DR) as waste, and obtained from Muang Mai Market in Chiang mai, Thailand, as displayed in Fig. 1(a). Durian rind cellulose microfibers (DRC) were an



Figure 1 (a) DR and (b) DRC microfibers.

average of particles size of 300 μm , as shown in Fig. 1(b). The chemical used in this work as sodium hydroxide (NaOH) solution, and hydrogen peroxide (H_2O_2) solution were purchased from Northern Chemicals and Glassware Ltd., Partnership (Chiang Mai, Thailand). The chemical constituent of DRC microfibers were investigated with X-ray fluorescence spectroscopy (XRF) technique, (Fischerscope X-RAY XUV 773), as displayed in Table 1.

2.2 Preparation of DRC Microfibers

DR was washed and cut into small, thin pieces. The small DR pieces were boiled in a sodium hydroxide solution with a concentration of 15 wt% at 90°C for 2 hours. Then, the DR was stirred to separate it into fibers. Finally, the DR fibers were rinsed with running tap water. A 35 wt% hydrogen peroxide solution of was bleached treatment the DR fibers, and rinsed the DR fibers



with running water from tap water until the pH value achieved 7.0. DRC microfibers were dried in an oven at 80 °C for 48 h [9, 24], and then grinded and sieved with ASTM E11 No.50 mesh (particles size: 300 µm).

Table 1 Examination of chemical constituent of DRC microfibers with XRF technique.

Chemical constituent of DRC microfibers	Content (%)
Iron (III) oxide (Fe_2O_3)	47.8
Calcium oxide (CaO)	18.3
Silicon dioxide (SiO_2)	16.9
Sulfur trioxide (SO_3)	6.28
Potassium oxide (K_2O)	3.39
Phosphorus pentoxide (P_2O_5)	3.05
Zinc oxide (ZnO)	1.67
Titanium (IV) oxide (TiO_2)	1.35
Manganese (IV) oxide (MnO_2)	1.26

2.3 Fourier Transform Infrared Spectroscopy

The functional groups of DR and DRC microfibers was examined with a Fourier transform infrared (FT-IR) instruments (Thermo Fisher Scientific, Nicolet 6700). The samples were scanned in the range of 4000 cm^{-1} to 500 cm^{-1} , and infrared spectra was used at a resolution of 4 cm^{-1} .

2.4 Scanning Electron Microscopy Analysis

Fracture surface of PLA/DRC biocomposite samples were performed in liquid nitrogen for 2 min, and then the top of the samples were coated with thin layer of gold by sputter coating apparatus. The fracture surface of biocomposites in this work were analyzed on scanning electron microscopy (SEM) apparatus (JEOL, JSM-5410LV), and conducted with an accelerating voltage of 15 kV.

2.5 Preparation of biocomposites

PLA were mixed with DRC microfibers using a mixer machine in varying ratios of 100/0, 95/5, 93/7, 90/10, and 80/20 wt%, and each compound ratio was mixed for 3 min. Then, melt-blend was done on a single screw extruder (SMC500) machine. The temperature profiles of melt-blend by extruder from hopper to melt-area zones (a capillary die) were 150 °C to 180 °C, and a screw rotation speed was set low at 40 rpm, and then cut into the bio-composite pellets with a pelletizer apparatus. PLA/DRC biocomposites were placed in an oven at 80 °C for 24 h [9, 24]. All the test specimens, and compostable chopsticks workpiece were performed using an injection molding (HYF - 1000) machine, with used an injection

temperature of 185 °C. The specimen dumbbell-shape of PLA/DRC biocomposites for different DRC ratio were done by mold, as shown in Fig. 2.

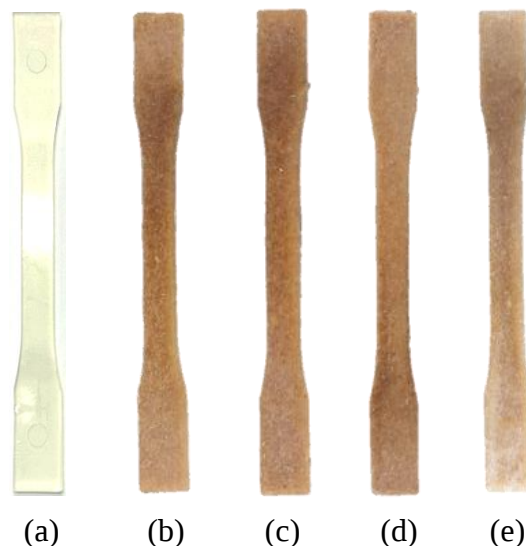


Figure 2 PLA/DRC biocomposites specimen images for different DRC ratio: (a) 100/0 wt%, (b) 95/5 wt%, (c) 93/7 wt%, (d) 90/10 wt%, and (e) 80/20 wt%.

2.6 Mechanical Properties

The Hounsfield50-KS tester machine was used to perform the tensile and flexural test of the PLA/DRC biocomposites. Tensile tests were conducted at running the speed of 50 mm/min, according to ASTM D638-2014, and flexural test was done at running the speed of 1 mm/min, according to ASTM D790-2007. Hardness (Shore-D) test was evaluated using a Durometer (HH-337-11) apparatus. All values of the mechanical properties of PLA/DRC biocomposites were evaluated using independent measurements to ensure data reliability. The averages were calculated from 5 replicate test samples in each mixing ratio, as illustrated in Fig. 2, and then the results were reported.

2.7 Water Absorption Measurement

Water absorption measurements of PLA/DRC biocomposites were conducted in accordance with ISO-62-2008, as a modified-standard. All the specimens were performed by immersion in water for 14 days, and then weighed. The water absorption of biocomposites was evaluated, and the results were reported based on the average of measurements from 5 independent testing replications in an experiment. The water absorption (W_{abs}) values

are reported as the percentage of water absorption ($\%W_{abs}$), as follows [9,12]:

$$\%W_{abs} = \frac{W_a - W_b}{W_b} \quad (1)$$

where W_a and W_b are the sample weight after immersion, and the sample weight prior immersion in water, respectively.

vibration of the hydroxyl groups, because of the hydrogen bonded between the molecules. In this work was used a sodium hydroxide on eliminate the lignin and hemicellulose from the DR microfibers, as shown in the curve of DR. The absorption band of DR microfibers at the wavenumber of 2919 cm^{-1} was assigned to the C-H stretching vibration in molecules from

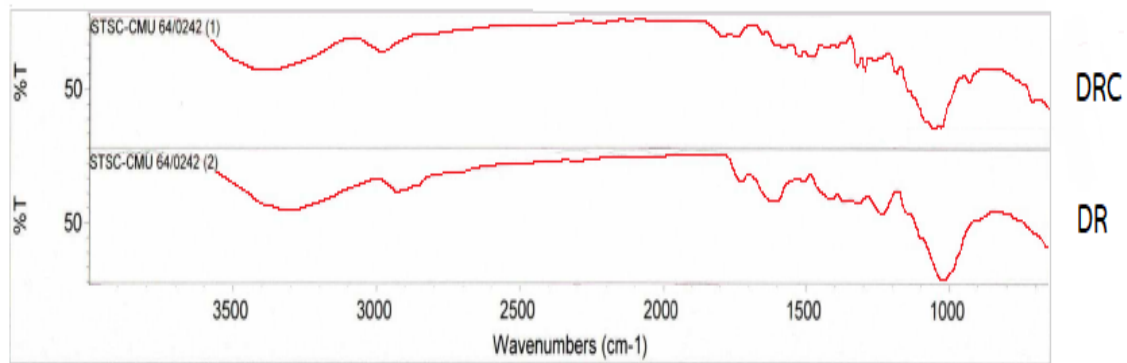


Figure 3 FT-IR spectroscopy of DR, and DRC.

3. Results and Discussion

3.1 Characterization of DRC Microfibers

An image of DRC microfibers, as shown in Fig. 1. It is clearly that DRC microfibers was fine white powder particles, as a result of bleached treatment with hydrogen peroxide used. The chemical constituent of DRC microfibers was examined by XRF instrument. It was obviously visible that the main composition of DRC microfibers, approximately 47.8% as ferric oxide, 18.3% of calcium oxide, 16.9% of silicon dioxide, and the rest composed of the sulfur trioxide, potassium oxide, phosphorus pentoxide, zinc oxide, etc., as depicted in Table 1.

3.2 Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) Analysis

The principle functional groups of DR and DRC microfibers were analyzed with FT-IR technique in the scanning range of 4000 cm^{-1} to 500 cm^{-1} , and the FT-IR spectra results of the samples at each range were recorded, and then reported, as displayed in Fig. 3. The FT-IR spectrum of the DR and DRC microfibers were exhibited severe peaks, which was indicated the presence of O-H stretching vibration in the DR and DRC microfibers at the wavenumber of 3283 cm^{-1} and 3329 cm^{-1} , respectively. This stretching peak in the DR and DRC microfibers indicated the hydrophilic of fibers surface. This view also supported by the works of Xing et al. [5], Zhao et al. [8], Jumaidin et al. [13], Edhirej et al. [14], and Kunthadong et al. [15] who stated that the peak in these range were attributed to the stretching

of CH_2 and/or CH_3 groups [13,14,16,17]. At the wavenumber of 1730 cm^{-1} of DR was indicated the presence of the stretching vibration of C=O, which was an ester group that presence in the hemicellulose, and had been widely found by the works [5,13,15,18]. The stretching vibration C=C bond of DR at the wavenumber of 1510 cm^{-1} , which was indicated the existence of the benzene ring of lignin [5,18,19]. It was found that at the wavenumber of 1420 cm^{-1} of DR was assigned to the aromatic-skeletal vibration of lignin. The C-O stretching vibration peak of lignin in the natural fibers was represented at 1235 cm^{-1} [5,18-21]. After used a sodium hydroxide treatment, those characteristic of the peaks invisible in the curve DRC. The results clearly shown that the lignin and hemicellulose in the DR microfibers had been successfully eliminated. The FT-IR spectra results of DRC microfiber appeared in curve DRC, it was obvious that the durian rind cellulose composed of the characteristic absorption peaks of O-H stretching vibration, C-H stretching vibration, C-H bending vibration, and C-O stretching vibration at a wavenumber of 3329 cm^{-1} , 2891 cm^{-1} , 1366 cm^{-1} , and 1157 cm^{-1} , respectively. It was also found that at a wavenumber of 894 cm^{-1} were defined to the β -glycosidic linkage [5,15-17,22].

3.3 Mechanical Properties

Elastic modulus and tensile strength results of PLA/DRC biocomposites for different DRC



ratio are presented in Table 2, and Fig. 4. It was found that when added the reinforcing filler into PLA biocomposites, the elastic modulus values of PLA/DRC biocomposites significantly increased. This was because of the effect of the rigidities of the silica and calcium-based DRC microfibers that can be inserted and dispersion within the PLA-matrix biocomposites [9,23,24]. The elastic modulus value of the biocomposites at DRC microfibers of 20 wt% was increased a maximum of 64% as comparing with the neat PLA. On the other hand, the tensile strength values of the biocomposites slightly decreased with the increasing in the DRC microfibers content loading. At the DRC microfibers of 20 wt%, the tensile strength value of the biocomposites was reduced by 9% as compared to the neat PLA. The decrease in tensile strength of the biocomposites also has been reported by other researchers [6,9,23-25].

Table 2 Experimental elastic modulus (E.M.) and tensile strength (T.S.) results.

PLA/ DRC (wt%)	100/0	95/5	93/7	90/10	80/20
E.M. (MPa)	1,273. 28	1,594. 68	1,767. 51	1,889. 14	2085. 60
T.S. (MPa)	68.92	61.80	59.84	56.75	62.52

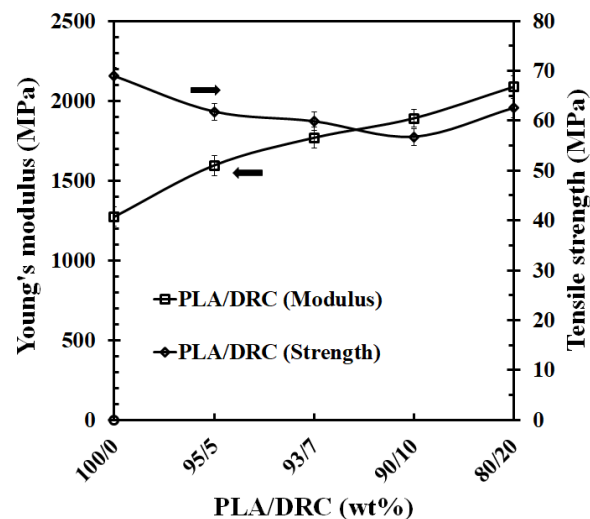


Figure 4 Elastic modulus and tensile strength of PLA/DRC biocomposites for different DRC ratio.

This may be attributed to an agglomeration of fibers to fibers, leading to the decline interfacial area between PLA-matrix surface and

DRC microfibers when the mixture of fiber increases up to 20wt%, resulted in a decrease in the tensile strength. As displayed in the SEM images of the biocomposites in Fig. 6(d), and Fig. 6(e), which was obviously appeared the voids, pore, crack-texture, and also the pull-out of the DRC fibers from the PLA matrix surface that indicate a weak of adhesion in the PLA biocomposites. The flexural modulus and flexural strength results of the PLA/DRC biocomposites for different ratio are shown in Table 3, and Fig. 5. It was observed that the flexural modulus gradually increased with increasing the DRC microfibers filler content. The flexural modulus value of the biocomposites at DRC microfibers of 20 wt% increased a maximum of 21% as compared to the neat PLA.

Table 3 Experimental flexural modulus (F.M.) and flexural strength (F.S.) results.

PLA/ DRC (wt%)	100/0	95/5	93/7	90/10	80/20
F.M (MPa)	1,896. 88	1,988. 45	2,148. 23	2,237. 14	2,288. 60
F.S. (MPa)	104. 12	98.75	94.70	86.46	80.37

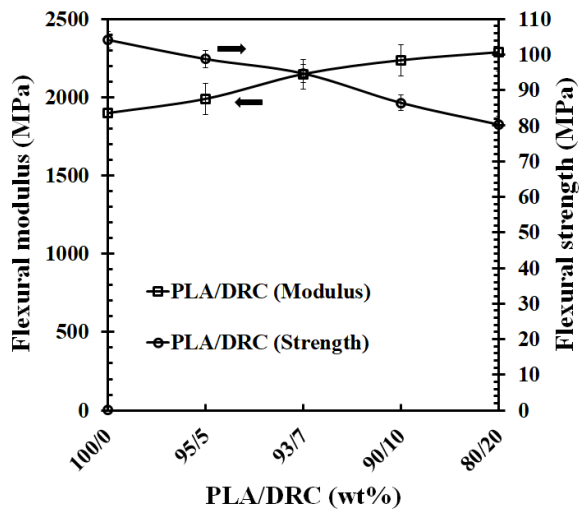


Figure 5 Flexural modulus and flexural strength of PLA/DRC biocomposites for different DRC ratio.

It was found that the flexural strength value of the biocomposites decreased as the increases the filler loading. At the DRC microfibers of 20wt%, the flexural strength value of the biocomposites was 23% reduced as compared to the neat PLA. When increased in filler concentrations the flexural modulus of the composites progressively increased but slightly decreased its flexural strength (intersection point at

mixing ratio: 93/7wt%) as displayed in Fig. 5. The decrease in flexural strength of the composites can be revealed by the SEM image in Fig. 6(c), due to

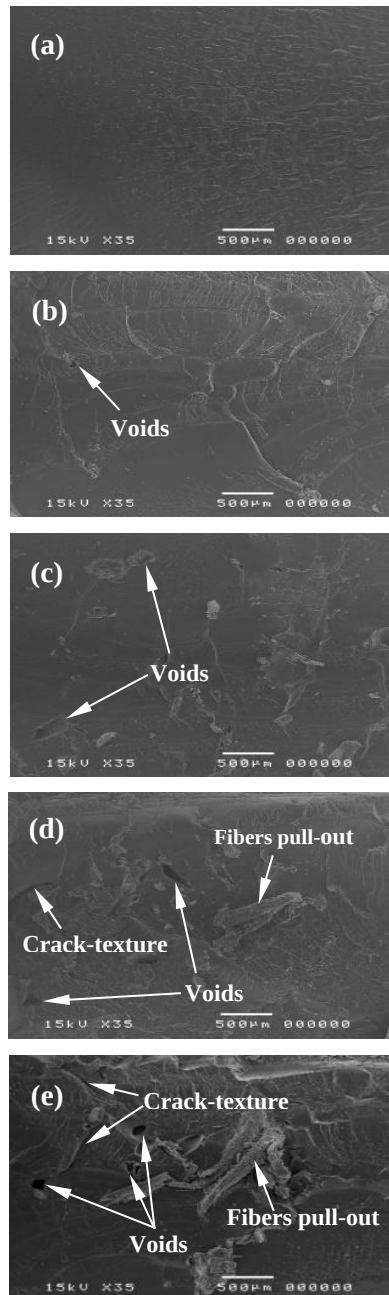


Figure 6 SEM images of PLA/DRC bio-Composites at different DRC ratio: (a) 100/0 wt%, (b) 95/5 wt%, (c) 93/7 wt%, (d) 90/10 wt%, and (e) 80/20 wt% (x35).

poor fiber dispersion. This may lead to the formation of voids and pores on the PLA matrix surface [3,9]. Fig. 6 demonstrated the SEM microstructure of the PLA/DRC biocomposite samples. Obviously, when increased the filler loading in the biocomposites, the microstructure gradually changes. This was led to

incompatibility between PLA-matrix and the DRC microfibers, and then the generate more the voids, pore, crack-texture and the fibers pull-out within the bio-composite samples, which was a reduced in the tensile and flexural strength. The results of shore-D hardness of PLA/DRC biocomposites are depicted in Table 4, and Fig. 7. It was obviously that when the DRC filler concentration was increased, the hardness values of the biocomposites progressively increased, because of these the DRC microfibers composed of the strong filler particles. The hardness values of the biocomposites with DRC microfibers of 20 wt% was 83.64 as compared to the neat PLA was 72.3.

Table 4 Experimental hardness results.

PLA/ DRC (wt%)	100/0	95/5	93/7	90/10	80/20
Shore-D	72.30	77.47	80.53	81.76	83.64

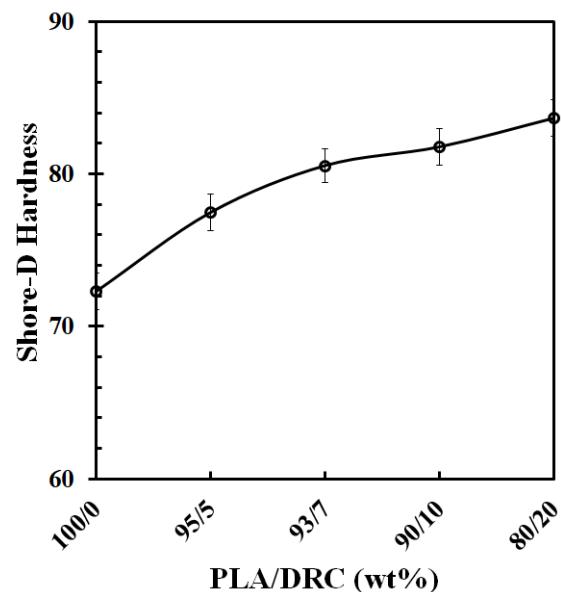


Figure 7 Hardness of PLA/DRC biocomposites for different DRC ratio.

3.4 Water Absorption Measurement

Water absorption measurement was one necessary properties of the biocomposites that must be performed, as presented in Table 5, and Fig. 8. It was found that the water absorption of PLA/DRC biocomposites properties gradually increased with increasing the DRC microfibers. It can be explained in two possible manners, as



follows: 1) Natural fibers loaded into biocomposites generally had hydrophilic properties, and it was affirmed from FT-IR results at 3329 cm^{-1} , indicated the O-H groups of the nature fibers as hydrophilic [8,13,14], and also confirmed this view from the literatures [9,25], who stated that the composites with high natural fibers content, the water absorption will also be high, 2) When natural fibers added to polymer-matrix composites, they encourage the formation

Table 5 Experimental water absorption (W_{abs}) results.

PLA/DRC (wt%)	100/0	95/5	93/7	90/10	80/20
W_{abs} (%)	0.0	0.29	1.15	4.14	5.50

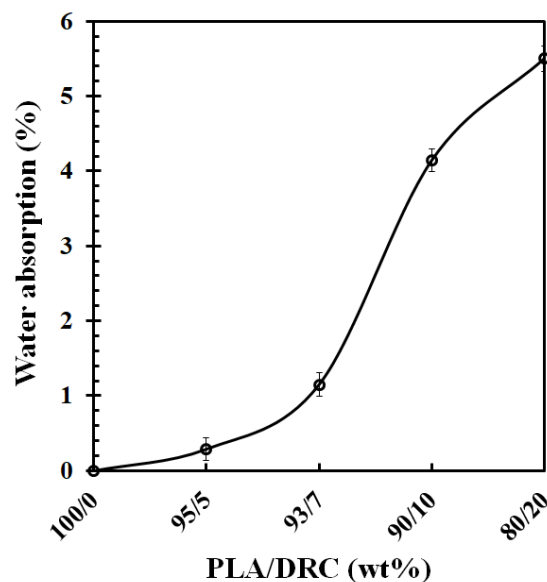


Figure 8 Water absorption of PLA/DRC biocomposites for different DRC ratio.

of voids, pores, and fiber debonding within the composite samples. Thus, the water can be easily inserted into the composites [9,25].

3.5 Application of the PLA/DRC Bio-composites

Fig. 9 shows the photograph of the compostable chopsticks sample made from PLA/DRC biocomposites with the ratio of PLA/DRC microfibers at 93/7 wt%. These compostable chopsticks were done by an injection molding method at the melting temperature of $185\text{ }^{\circ}\text{C}$, and had the dimension of a chopstick was 5 mm in diameter, and 206 mm in length.



Figure 9 Compostable chopsticks made from PLA/DRC biocomposites.

4. Conclusions

Durian rind cellulose microfibril is an alternative reinforcing filler used in polylactic acid bio-composite materials. The results showed that durian rind cellulose constitute approximately 18.3% of calcium oxide, and 16.9% of silicon dioxide which was potential as a reinforcing filler. It was found that the mechanical properties of the polylactic acid/durian rind cellulose biocomposite had the value of the tensile modulus, flexural modulus and hardness (shore-D) increased with increasing durian rind cellulose microfibril particles, but the value of the tensile strength and flexural strength depressed when the amount of durian rind cellulose particles increased. Polymer composites reinforced with durian rind cellulose microfibril particles was found to be increased water absorption when increased the durian rind cellulose. PLA can be mixed with 7 wt% DRC fibers, results in the tensile and flexural modulus, and hardness of composites clearly increased but slightly decreased its tensile and flexural strength. PLA/DRC biocomposites are eco-friendly, lightweight, non-toxic, and naturally biodegradable materials, its suitable for use in consumer products such as biodegradable spoons and chopsticks.

5. Acknowledgments

The authors thank the Division of Tools and Die Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna for kindly providing a place for the experiment, and support this research.

6. References

- [1] Office of Agricultural Economics. Available from: <http://oea.go.th/view/1> [Accessed 14th March 2023].
- [2] Jumaidin R, Whang LY, Ilyas RA, Hazrati KZ, Jamal T, Alia RA. Effect of durian peel fiber on thermal, mechanical, and biodegradation characteristics of thermoplastic cassava starch composites. *Int J Biol Macromol.* 2023;250:126295.
- [3] Manshor MR, Anuar H, Aimi MNN, Fitrie MIA, Nazri WBW, Sapuan SM, El-Shekeil YA, Wahit MU. Mechanical, thermal and morphological properties of durian skin fibre reinforced PLA biocomposites. *Mater Des.* 2014;59:279-86.



- [4] Lee MC, Koay SC, Chan MY, Choo HL, Pang MM, Chou PM, Tshai KY. Properties of poly (lactic acid)/durian husk fiber biocomposites: effects of fiber content and processing aid. *J Thermoplast Compos Mater.* 2019;33(11):1518-532.
- [5] Xing H, Fei Y, Cheng J, Wang C, Zhang J, Niu C, Fu Q, Cheng J, Lu L. Green preparation of durian rind-based cellulose nanofiber and its application in aerogel. *Molecules.* 2022;27(19):6507.
- [6] Nadondu B, Surin P, Deeying J. Multi-objective optimization on mechanical properties of glass-carbon and durian skin fiber reinforced poly(lactic acid) hybrid composites using the extreme mixture design response surface methodology. *Case Stud Constr Mater.* 2022;17:e01675.
- [7] Kinoshita T, Yamamoto T, Luo C, Ide K, Aoki K, Uetsuji Y. Mechanical characterization and design of hybrid reinforced polypropylene composites with talc fillers and cellulose fibers. *Compos B Eng.* 2023;226:110971.
- [8] Zhao X, Li K, Wang Y, Tekinalp H, Larsen G, Rasmussen D, Ginder RS, Wang L, Gardner DJ, Tajvidi M, Webb E, Ozcan S. High-strength polylactic acid (PLA) biocomposites reinforced by epoxy-modified pine fibers. *ACS Sustainable Chem Eng.* 2020;8:13236-247.
- [9] Sitticharoen W, Uthiyoung C, Wongkhumpun W, Chaitep S, Honghin T. Effect of hybrid ratio and surface-modifier hemp fiber/talc on PLA hybrid biocomposites. *Suranaree J Sci Tech.* 2022; 29(1):010093.
- [10] Rafiqah SA, Diyana AFN, Abdan K, Sapuan SM. Effect of alkaline treatment on mechanical and thermal properties of miswak (*salvadora persica*) fiber-reinforced polylactic acid. *Polymers.* 2023;15(9):2228.
- [11] Jesus LCC, Oliveira JM, Leaño RM, Beltrami LR, Zattera AJ, Anflor CTM, Doca TCR, Luz SM. Tensile behavior analysis combined with digital image correlation and mechanical and thermal properties of microfibrillated cellulose fiber/polylactic acid composites. *Polym Test.* 2022;113:107665.
- [12] Saenghirunwattana P, Noomhorm A, Rungsardthong V. Mechanical properties of soy protein based “green” composites reinforced with surface modified cornhusk fiber. *Ind Crops Prod.* 2014;60:144-50.
- [13] Jumaidin R, Sapuan SM, Jawaaid M, Ishak MR, Sahari J. Thermal, mechanical, and physical properties of seaweed/sugar palm fibre reinforced thermoplastic sugar palm starch/agar hybrid composites. *Int J Biol. Macromol.* 2017;97:606-15.
- [14] Edhirej A, Sapuan SM, Jawaaid M, Zahari NI. Cassava/sugar palm fiber reinforced cassava starch hybrid composites: physical, thermal and structural properties. *Int J Biol Macromol.* 2017;101:75-3.
- [15] Kunthadong P, Peekoh M, Sindanjark O. Bio-composite films based on cassava starch reinforced with durian rind cellulose fibers. *RMUTP Res J.* 2019;13(1):39-50.Thai.
- [16] Tang Y, Yang S, Zhang N, Zhang J. Preparation and characterization of nanocrystalline cellulose via low-intensity ultrasonic-assisted sulfuric acid hydrolysis. *Cellulose.* 2014;2:335-46.
- [17] Ratanasongtham P. Preparation of eco-friendly blended bioplastic film between blend of polyvinyl alcohol and cellulose extracted from *nelumbo nucifera gaertn* stalk. *J Appl Res Sci Tech.* 2022;21(2):26-38.Thai.
- [18] Bakar NFA, Rahman NA, Mahadi M, Zuki SAM, Amin KNM, Wahab MZ, Lenggoro IW. Nanocellulose from Oil palm mesocarp fiber using hydrothermal treatment with low concentration of oxalic acid. *Mater Today Proc.* 2022;48(6):1899-904.
- [19] Nematollahi R, Ziyadi H, Ghasemi E, Taheri H. Cinnamon nanocellulose as a novel catalyst to remove methyl orange from aqueous solution. *Inorg Chem Commun.* 2022; 137(5):109222.
- [20] Jiang H, Wang G, Chen F, Deng J, Chen X. Effect of accelerated aging on bamboo fiber lunch box and correlation with soil burial degradation. *Polymers.* 2022;14:4220.
- [21] Nadlene R, Sapuan SM, Jawaaid M, Ishak MR, Yusriah L. The effects of treatment on the structural and thermal, physical and mechanical and morphological properties of roselle fiber-reinforced vinyl ester composites. *Polym Compos.* 2016;39(1):1-14.



- [22] Reddy KO, Maheswari CU, Dhlamini MS, Mothudi BM, Zhang J, Zhang J, Nagarajan R, Rajali AV. Preparation and characterization of regenerated cellulose films using borassus fruit fibers and an ionic liquid. *Carbohydr Polym.* 2017;160:203-11.
- [23] Sitticharoen W, Aukaranarakul S, Kantalue K, Study of thermal and mechanical properties of LLDPE/sugarcane bagasse/eggshell hybrid biocomposites. *Walailak J Sci & Tech.* 2019;16(10):739-51.
- [24] Sitticharoen W, Uthiyoung C, Passadee N, WongpromC. Surface treated bagasse fiber ash on rheological, mechanical properties of PLA/BFA biocomposites. *Polímeros.* 2018; 28(3):187-95.
- [25] Awad S, Hamouda T, Midani M, Katsou E, Fan M. Polylactic acid (PLA) reinforced with date palm sheath fiber bio-composites: evaluation of fiber density, geometry, and content on the physical and mechanical properties. *J Nat Fibers.* 2022; 20(1):2143979.

Adsorption characteristics of methylene blue onto low-cost dried and calcined water hyacinth: A batch and fixed-bed column study

Nakorn Suriyanon ^{1*}, Pattra Wongpankamol ¹ Siraprapa Chainetr¹ and Wanida Suriyanon¹

¹ Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna, Chiangmai 50300, Thailand

*Corresponding Author: jamecu555@gmail.com Phone Number: 089-756-5410

Received: 23 November 2023, Revised: 23 May 2024, Accepted: 29 May 2024

Abstract

This study investigated the potential of using two types of water hyacinth as adsorbents for removing Methylene Blue (MB) from aqueous solutions. The Langmuir isotherm model best fits the adsorption isotherm data, with Dried Water Hyacinth (DWH) performing better than Calcined Water Hyacinth (CWH). The modeling data breakthrough curve indicated that DWH and CWH followed pseudo-second-order kinetics monolayer chemical sorption. Even though DWH has a lower adsorption capacity than activated carbon and other expensive adsorbents, it is comparable to, or performed better than other low-cost adsorbents.

Keywords: Adsorption, Methylene blue, Water hyacinth, Low-cost adsorbent, Fixed bed column

1. Introduction

Synthetic dyes are used in various industries to color products such as textiles, plastics, and leather. However, many of these dyes remain unconsumed and are discharged into effluent, which poses an ecological threat. Dye fixation during the dyeing process depends on the type of dye used. The presence of dyes in effluents reduces light penetration, which affects the metabolic activities of aquatic organisms, thereby threatening aquatic ecosystems and human health. Methylene blue (MB), a cationic dye used in the textile industry, can impair photosynthesis as well as cause skin irritation, cancer, nausea, vomiting, diarrhea, gastritis, eye burning, and mutagenicity in animals. Treatment of MB dye before discharge into freshwater ecosystems is essential.

Various methods are used for treating colored wastewater, including reverse osmosis, sedimentation, ultrafiltration, solvent extraction, adsorption, catalysis, coagulation, ion exchange, and photo-oxidation. Adsorption is a cost-effective way to remove dyes from water [1-2]. Various adsorbents have been studied for removing dyes, metals, pharmaceutical residues, and toxic substances from water [3-4]. Activated carbon is commonly used due to its high adsorption capacity, but it's expensive. Low-cost materials such as kudzu, coir pith, and sawdust are being

explored. Many adsorbents, including activated carbon, clay, and nanomaterials, are used for removing MB from water [5-6]. Water hyacinth is a free-floating aquatic plant that can remove pollutants from water. This study uses water hyacinth as an adsorbent to remove MB from water.

2. Materials and methods

2.1 Preparation of adsorbents

Water hyacinths were collected from a public pond in the Mae Rim district, Chiang Mai province. After washing them with tap water, the shoots were sun-dried and oven-dried at 100°C for 24 hours. The dried hyacinths were either ground (DWH) or heated in an incinerator at 600°C for 5 minutes to produce calcined water hyacinth (CWH).

2.2 Preparation of adsorbates

MB was bought from Merck and used as-is. Stock solutions were made in distilled water, and all study solutions were prepared by dissolving MB in distilled water.

2.3 Characterization of adsorbents

Adsorbent structures were examined using a JEOL-JSM5410LV scanning electron microscope. N₂ adsorption-desorption measured BET surface area, pore size distribution, and volume. FTIR confirmed organofunctional groups on the



adsorbents' surface. pH_{PZC} was determined using the solid addition method [7-8].

2.4 Batch equilibrium studies

Water hyacinth powder was mixed with MB solutions in conical flasks, and stirred in a rotary shaker (25°C, 200 rpm) until equilibrium was reached. The diameters of DWH and CWH were controlled at approximately 2 mm and 0.02 mm, respectively. Centrifugation separated the mixture. MB residual levels were measured by a Shimadzu double-beam UV-visible spectrophotometer (668 nm). Batch equilibrium tests studied MB adsorption onto water hyacinth based on MB initial concentration, contact time, pH, and temperature. The adsorption capacity of the adsorbent is determined from the mass balance equation. It can be expressed as Eq. (1)

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)}{M} \times V \quad (1)$$

Where q_e represents the adsorption capacity (mg/g), C_0 is the initial concentration of the adsorbate (mg/L), C_e is the equilibrium concentration of the adsorbate, V is the volume of the solution (liters), and M is the mass of the adsorbent (grams). To understand the mechanism, we analyzed data using five mathematical isotherm models. These models were used to model the adsorption of MB onto adsorbents prepared from water hyacinth. The linear form of the Langmuir isotherm [14] can be described as Eq. (2):

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_m} + \frac{1}{k_L q_m C_e} \quad (2)$$

where q_m is the maximum adsorption capacity (mg/g), and k_L is the Langmuir constant. The dimensionless separation factor R_L , which is used to predict the favorability of an adsorption system, can be described as Eq. (3):

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L C_0} \quad (3)$$

where C_0 is the initial concentration of pharmaceuticals (mg/l).

The Freundlich isotherm in its linear form can be represented by Equation (4) as described in reference [15].

$$\ln q_e = \ln k_F + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (4)$$

Where k_F is the Freundlich constant and n is the adsorption intensity (dimensionless).

The Dubinin-Radushkevich isotherm can be described by Eqs. (5) and (6) in linear form [15-16].

$$\ln q_e = \ln q_m - B \epsilon^2 \quad (5)$$

$$\epsilon = RT \ln \left(1 + \frac{1}{C_e} \right) \quad (6)$$

Where q_m is the maximum amount of adsorbate that can be adsorbed per unit mass of adsorbent, B is a constant related to the free energy of sorption per mole of adsorbate (J/mol), ϵ is the Polanyi potential and R is the gas constant (8.314 J/mol/K).

The linear form of the Temkin isotherm [15] can be described as Eq. (7):

$$q_e = \frac{RT}{b_T} \ln A_T + \frac{RT}{b_T} \ln C_e \quad (7)$$

Where A_T (L/g) and b_T (J/mol) are the Temkin constants.

The Linear isotherm [16] can be described as Eq. (8):

$$q_e = K_p C_e \quad (8)$$

where K_p is the linear constant (liters/grams).

2.4.1 Studies on the effect of initial dye concentration

To test the effects of MB concentration on its adsorption onto water hyacinth, four different MB solutions were used (50, 100, 150, and 200 mg/L). Each solution was placed in a 250 mL Erlenmeyer flask with pH adjusted to 7 using a 0.01 M phosphate buffer. A fixed ratio of 2 g/L of water hyacinth to MB solution was maintained throughout the experiment.

2.4.2 Studies on the effects of pH

The impact of solution pH on the adsorption process was examined by altering the initial pH of the solution within the range from 2 to 10. The pH was adjusted using 0.1 M HCl and/or 0.1 M NaOH. The initial concentration of MB was fixed at 100 mg/L. The ratio of water hyacinth to MB solution was fixed at two g/L.

2.4.3 Batch Kinetic Studies

The procedure of batch kinetic studies was identical to that of the batch equilibrium studies. The aqueous samples were collected at preset time intervals, and the concentrations of MB were

measured correspondingly. The concentration of MB was reduced to 100 mg/L, and the pH of the solution was controlled at 7 with the help of a 0.01 M phosphate buffer. The ratio of water hyacinth to MB solution was maintained at two g/L. The mixtures were agitated in a rotary shaker at 25°C, 150 rpm. To evaluate the adsorption kinetics, MB concentrations were measured at different time intervals. The liquid from the adsorption mixture was separated through centrifugation, and the concentrations of residual MB in the supernatant were measured. Sampling and measurements were conducted until the MB solution reached equilibrium.

2.5 Column adsorption studies

Experimental studies were conducted to investigate the adsorption of MB solutions using groundwater hyacinth in a Pyrex glass column with an inner diameter of 25.4mm, and a height of 30cm. A known amount of groundwater hyacinth was packed into the column, and 5mm sized glass beads were used to ensure uniform flow of the solution. The effects of various column parameters on MB adsorption were investigated.

2.5.1 Studies on the effect of flow rate

The flow rate varied between 5, 10, and 15 ml/min. Inlet MB concentration was held constant at 100 mg/l.

2.5.2 Studies on the effect of inlet dye concentration

Inlet MB concentration was varied between 50, 100, and 150 mg/L. The flow rate was held constant at 10 mL/min.

3. Results and discussion

3.1 Physico- chemical characteristics of the adsorbents

Table 1 displays the properties of the adsorbents. The nitrogen gas adsorption-desorption isotherms plots are shown in Figure 1.

CWH exhibited type IV isotherms, indicating that it is a mesoporous adsorbent, while DWH couldn't be classified. The average pore size of CWH was larger (81.89 Å) compared to DWH (26.65 Å). The specific surface area of CWH was higher (28.9 m²/g) than DWH (14.64 m²/g). The pore volume of CWH was also higher (0.1186 cm³/g) than DWH (0.0274 cm³/g). Calcination increased the pore size, specific surface area, and

pore volume of water hyacinth. The pH_{PZC} for DWH was about 6.4, whereas for CWH, it was approximately 10.5. Approximately 95% of dried samples yield, while only 25% of calcined samples yield.

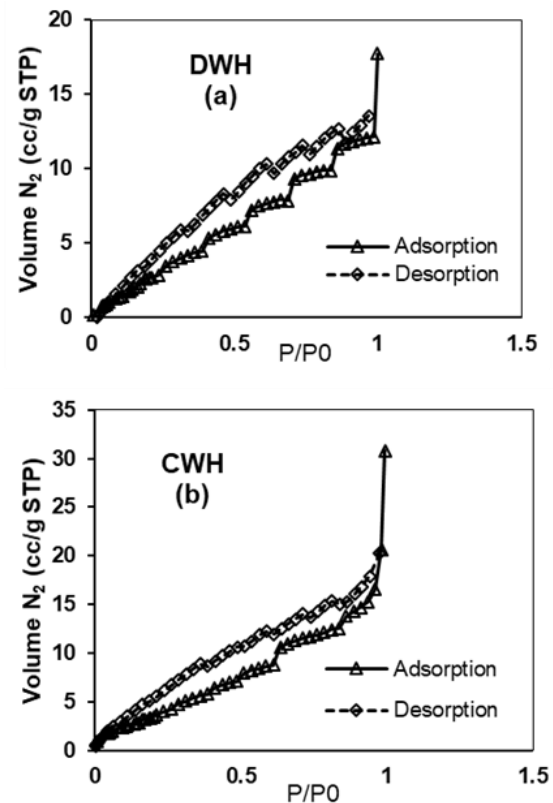


Figure1 Nitrogen gas adsorption- desorption isotherms of (a) DWH and (b) CWH.

Table 1. Physicochemical characteristics of DMH and CMH.

Adsorbents	Pore diameter (Å) ^a	BET surface area (m ² /g) ^a	Pore volume (cm ³ /g) ^a	pH _{PZC} ^b
DWH	26.6	14.64	0.0274	6.4
CWH	81.89	28.90	0.1186	10.5

^adetermined by BET analysis of N₂ adsorption-desorption

^bpH of net zero charge

The FTIR spectrum of DWH is compared with CWH, and this is shown in Figure 2. With DWH, peaks were found at 1318.1 cm⁻¹, 1371 cm⁻¹, 1384.6 cm⁻¹, 1421.3 cm⁻¹, 1622 cm⁻¹, 1734 cm⁻¹, 2292.6 cm⁻¹, 2925 cm⁻¹, and 3366 cm⁻¹. A peak at 1318.1 cm⁻¹ indicates the presence of CH [7], and at 1371 cm⁻¹, the presence of CH₂ [40]. Peaks at 1384.6 cm⁻¹ and

1421.3 cm^{-1} indicate the presence of OH phenolic and C-O of cellulose, respectively [9]. The presence of hemicellulose was seen at a peak of 1622 cm^{-1} [10]. Peaks observed at a 1734 cm^{-1} indicate the presence of acetyl and ester in the carboxyl group chain of the acid p-koumeril, as well as indicating the presence of lignin and hemicellulose [10]. This result agrees with previous work Thiripura and Ramesh presented [11]. Peaks observed at 2292.6 cm^{-1} , 2854-2952 cm^{-1} , and 3366-3400 cm^{-1} indicate the presence of CH_2 , CH, and OH respectively [8-9]. In CWH, FTIR spectrum findings were different. Peaks at 1318.1 cm^{-1} , 1384.6 cm^{-1} , 1421.3 cm^{-1} , and 2292.6 cm^{-1} indicated the presence of CH, CH_2 , OH phenolic, and C-O of cellulose, which were found in DWH, but were not observed in CWH. The four peaks disappeared. They were broadened and fused together. The peak at 1622 cm^{-1} indicated the presence of hemicellulose, and the peak at 1734 cm^{-1} indicated the presence of acetyl and ester in the carboxyl group chain, as well as the presence of lignin and hemicellulose which also disappeared. The peak at 2292.6 cm^{-1} , indicated the presence of CH_2 that still existed, and its peak was a little bit higher than in DWH. The peaks at 2854-2926 cm^{-1} , indicated the presence of CH, while the peaks at 3366-3400 cm^{-1} indicated the presence of OH; disappeared and became a linear plot. We analyzed the FTIR spectrum of DWH both before and after the adsorption of MB. Before adsorption, peaks were found at 1318.1 cm^{-1} , 1371 cm^{-1} , 1384.6 cm^{-1} , 1421.3 cm^{-1} , 1622 cm^{-1} , 1734 cm^{-1} , 2292.6 cm^{-1} , 2925 cm^{-1} , and 3366 cm^{-1} . After MB adsorption, new peaks were observed at 1593 cm^{-1} , 1714 cm^{-1} , and 1170 cm^{-1} . The peak at 1593 cm^{-1} was attributed to the C=N and C=C vibrations of MB [12]. The peak at 1714 cm^{-1} was assigned to the $\text{C}_{\text{het}} = \text{N}^+(\text{CH}_3)_2$ stretching vibrations of MB. A peak of 1170 cm^{-1} was attributed to the presence of MB [13]. The FTIR spectrum of CWH was analyzed before and after the adsorption of MB. Before adsorption, there was a peak at 2319.95 cm^{-1} , indicating the presence of N-H, and a peak at 2119.39 cm^{-1} , indicating the presence of C=C. Peaks which were found in DWH at 1318.1 cm^{-1} , 1384.6 cm^{-1} , 1421.3 cm^{-1} , 2292.6 cm^{-1} , 1622 cm^{-1} , 1734 cm^{-1} , 2854-2926 cm^{-1} , and 3366-3400 cm^{-1} disappeared. The peak at 2292.6 cm^{-1} indicated that the presence

of CH_2 still existed, and its peak was slightly higher than in the DWH. After MB adsorption, new peaks were found at 1390 cm^{-1} and 1170 cm^{-1} . The peak at 1390 cm^{-1} is attributed to the symmetrical and asymmetrical bending vibrations of the CH_3 functional groups of MB [12]. The peak at 1170 cm^{-1} was attributed to the presence of MB [13]. The study results indicated that MB was adsorbed onto DWH and CWH.

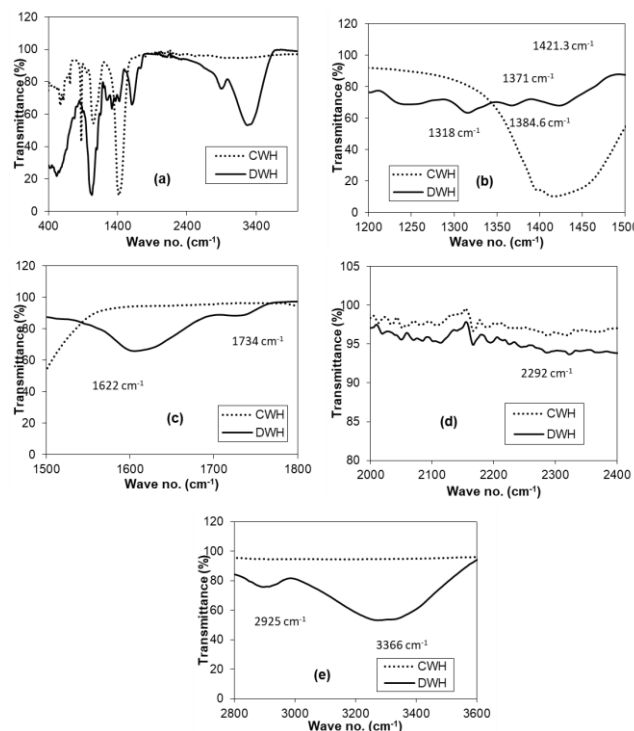


Figure 2 Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) spectra of DWH and CWH.

Figures 3 and 4 display EDX-SEM images of DWH and CWH surfaces, morphologies, and their energy-dispersive X-Ray spectrum.

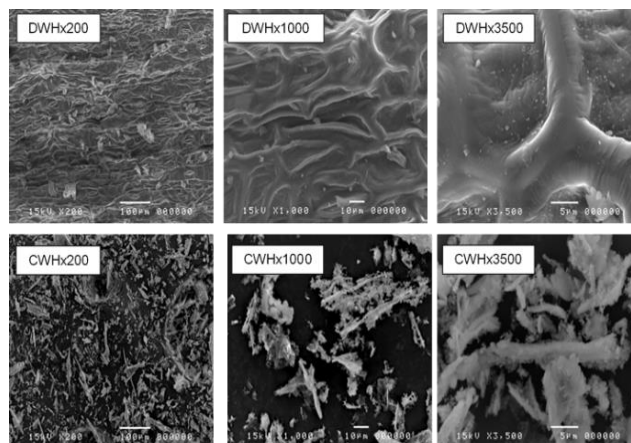


Figure 3 SEM images of DWH and CWH.

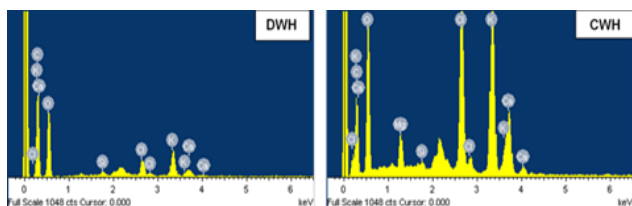


Figure 4 The energy dispersive X-ray spectrum of DWH and CWH.

SEM was used to examine the adsorbents at 200, 1000, and 3500 magnifications. DWH consisted of large particle agglomerates, while CWH consisted of smaller particle aggregates with variable shapes. The morphology of CWH was similar to heat-activated carbon. EDX revealed that DWH contained six elements, while CWH contained seven, including Mg.

3.2 Adsorption isotherm (Effect of initial dye concentration)

Figure 5 shows MB adsorption onto water hyacinth at various initial concentrations.

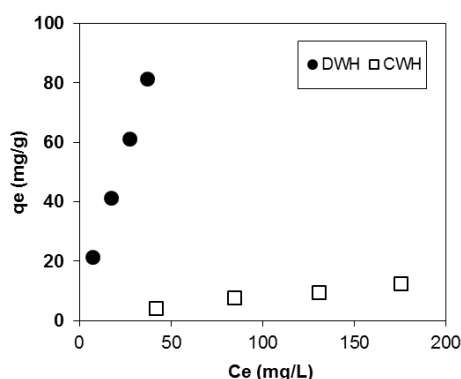


Figure 5 Adsorption capacity of DWH and CWH for MB.

DWH showed higher adsorption capacity than CWH for all MB concentrations. Adsorption capacity was higher at high MB concentration than at low MB concentration. This result agrees with previous research by Mridusmita Goswami [4]. A high initial dye concentration increases adsorption capacity by increasing the contact area and overcoming resistance to mass transfer. To understand the mechanism, we analyzed data using five mathematical isotherm models. These models were used to model the adsorption of MB onto adsorbents prepared from water hyacinth. The study found that the Langmuir isotherm model was the best fit for both DWH and CWH, as indicated by the calculated parameters and correlation coefficients (R^2). The MB adsorption isotherm data for MB

adsorption onto various adsorbents, including water hyacinth, in this study, fitted with the Langmuir isotherm model [17]. The sorption of MB on WH was found to follow a Langmuir isotherm, suggesting a monolayer sorption on homogeneous energetic; active sites on the surface of the adsorbent. The maximum adsorption capacity (q_m) of the adsorbent prepared from the dried shoot of water hyacinth for MB in this study was 156.25 mg/g. It was higher than the q_m in the previous research done by Murai and Uma [18] ($q_m = 17.58$ -46.35 mg/g). Compared with the adsorption capacity of the adsorbent prepared from dried root of water hyacinth, it was found that q_m for dried shoot in this study was lower than q_m for dried root in Syed Hadi Hasan's study [19] ($q_m = 187.00$ mg/g), but higher than in Soni et al., study [20] ($q_m = 8.04$ mg/g).

The adsorbents made from water hyacinth in this research had an adsorption capacity for MB of 156.25 mg/g, which is similar to picarab granular activated carbon (160 mg/g) [4]. It had a higher adsorption capacity than Ephedra strobilacea char (ESC) (31.1 mg/g) [21], phosphoric acid modified ESC (21.9 mg/g) [21], zinc chloride modified ESC (37.0 mg/g) [53], and cotton stalk (147 mg/g) [8]. However, its adsorption capacity for MB was lower than that of activated carbon from mature tea leaves (446.4 mg/g) [4], sulfonic acid modified activated carbon (714.3 mg/g) [4], sulfuric acid treated cotton stalk (555.5 mg/g) [22], and phosphoric acid treated cotton stalk (222.2 mg/g) [29]. Adsorbents other than activated carbon and sulfonic acid-modified activated carbon that had adsorption capacity for MB higher than water hyacinth were Filtrasorb400 ($q_m = 255$ mg/g), Fe_3O_4 graphene@mesoporous SiO_2 nanocomposite ($q_m = 178.4$ mg/g) [22] and CuS nanoparticle ($q_m = 208.3$ mg/g) [23]. Due to its impressive adsorption capacity, water hyacinth adsorbent is a cost-effective and easily available alternative for removing cationic dye like MB. It has a similar adsorption capacity as picarab granular activated carbon, it is higher than Ephedra strobilacea char, but lower than expensive adsorbents.

3.3 Effects of pH

The results of the study are shown in Figure 6. The study found that the adsorption capacity of DWH increased as the pH level became more

neutral or basic (pH 7-9), whereas the adsorption capacity of CWH increased as the pH level became more acidic (pH 3-5). The adsorption capacity of DWH was lowest at pH 3, and that of CWH was lowest at pH 8 and 9. These findings are in agreement with the findings in other literature reports using various adsorbents to adsorb MB [23,24]. The pH-dependent surface charge of the adsorbent and the adsorbate can explain the reason for the observed phenomenon. For the case of DWH, the pH at which the surface charge is zero (pH_{PZC}) is found to be 6.4. When the pH of the solution is in the range of 5 - 7, the surface of DWH becomes positively charged, which is the same as the charge of MB. This results in a decreased adsorption capacity due to the repulsion of electric charges. However, when the pH of the solution is higher than 6.4, the surface of DWH becomes negatively charged, which is opposite to the charge of MB. This results in an increased adsorption capacity due to the attraction of electric charges.

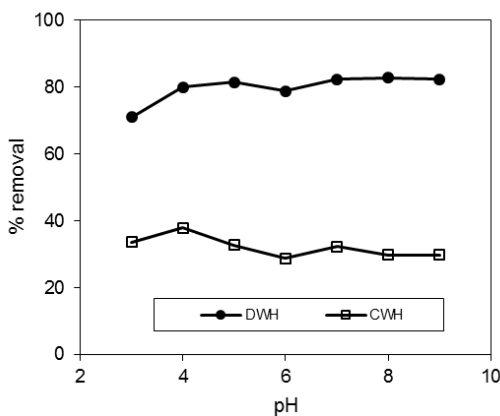


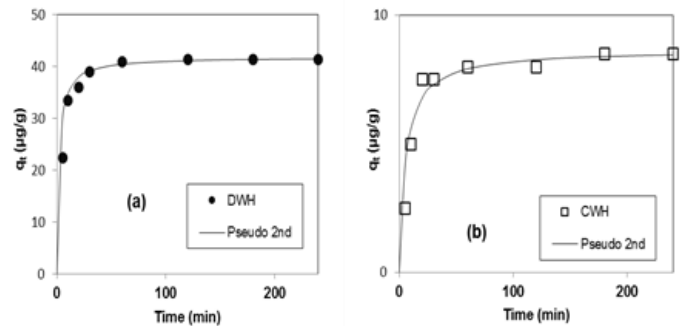
Figure 6 Effect of pH on MB adsorption by DWH and CWH.

Similarly, for CWH, the pH_{PZC} value is found to be 10.5. When the pH of the solution is greater than the pK_a value of MB (which is equal to 3.8), both the surface of CWH and the MB molecules become positively charged, resulting in a repulsive force between them. This leads to a decreased adsorption capacity. On the other hand, when the pH of the solution is less than 3.8, the MB molecules become negatively charged, which is opposite to the charge on the surface of CWH. This results in an attractive force between them, leading to an increased adsorption capacity.

At low pH levels, excess H^+ ions compete with MB for adsorption sites. As pH increases, negatively charged sites become more favorable for adsorption due to electrostatic attraction.

3.4 Adsorption kinetics

Figure 7 shows that the concentration of MB in the solution dropped quickly in the first 30 minutes for both adsorbents. After that, the concentration



continued to decrease until it reached equilibrium in approximately 3 hours.

Figure 7 Adsorption kinetics of MB adsorbed by (a) DWH and (b) CWH.

3.4.1. Adsorption kinetic models

To evaluate the efficiency of the adsorption process, the experimental data was interpreted using the pseudo-first-order, pseudo-second-order, and Ritchie kinetic models. The pseudo-first-order kinetic model, as defined in Eq. (9) [25], can be expressed as follows:

$$\frac{1}{q_t} = \frac{k_1}{q_e t} + \frac{1}{q_e} \quad (9)$$

The amount of adsorbate adsorbed at equilibrium q_e and at a specific time, q_t is measured in milligrams per gram. The pseudo-first-order rate constant k_1 is also calculated in terms of per minute. The values of q_e and k_1 are derived from the slope and intercept of the plots of $1/q_t$ versus $1/t$, respectively.

The pseudo-second-order equation [25] can be defined as in Eq. (10):

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (10)$$

Where k_2 is the pseudo- second- order rate constant, which is determined from the plots of t/q_t versus t . Furthermore, the initial adsorption rate (h) that is obtained from this model can be expressed as in Eq. (11):

$$h=k_2q_e^2 \quad (11)$$

The Ritchie kinetic model [26] can be expressed as in Eq. (12)

$$\frac{1}{q_t} = \frac{1}{k_r q_e t} + \frac{1}{q_e} \quad (12)$$

where k_r is the Ritchie rate constant and is derived from the plots of $1/q_t$ versus $1/t$.

The adsorption parameters and kinetic models are calculated for MB adsorption on each adsorbent, as shown in Table 2. The correlation coefficients suggest that pseudo- second- order kinetics represent the adsorption of MB onto DWH and CWH. These findings are consistent with previous studies [27]. It is assumed that chemisorption is involved in the adsorption process. The adsorption rate was 24.5 mg/g/min in DWH and 1.54 mg/g/min in CWH. In Khan's study, 85% of MB was removed in 10-15 min. Reduction in the removal rate suggests monolayer coverage on the outer surface of adsorbent and pore diffusion on the inner surface through continuous agitation [17].

Table 2. Kinetic parameters for the biosorption of Methylene blue onto DWH and CWH.

Adsorbent s	$q_{e,exp}$ (mg/g)	Pseudo-first order			R^2
		k_1 (L/min)	$q_{e,cal}$ (mg/g)		
DWH	43.02	0.0086	9.972		0.579
CWH	9.21	0.0081	3.317		0.677

Pseudo-second order			Ritchie			
k_2 (g/mg/ min)	$q_{e,cal}$ (mg/g)	R^2	h (mg/g/min)	k_r (L/min)	$q_{e,cal}$ (mg/g)	R^2
0.0117	41.84	0.999	20.45	0.235	43.29	0.960
0.0201	8.650	0.999	1.545	13.36	0.739	0.940

3.4.2 Intraparticle diffusion

The Boyd kinetic models were used to analyze the adsorption process, determining the diffusion mechanism and rate-limiting step. In solid-liquid adsorption, there are three steps: film diffusion, pore diffusion, and adsorption. The slowest step of the process limits the rate of adsorption. The Boyd kinetic model is a useful tool for analyzing these diffusion mechanisms [28]. The Boyd kinetic model can be expressed as Eqs. (13-16):

$$F = \frac{6}{\pi^2} \exp(-B_t) \quad (13)$$

$$F = \frac{q_t}{q_e} \quad (14)$$

$$Bt = -0.4977 - \ln(1-F) \quad (15)$$

At any given time, the fraction of MB adsorbed can be denoted by F in comparison to the equilibrium point. B represents the Boyd kinetic coefficient, while D_i is the diffusion coefficient in m^2/g . Additionally, the radius of the adsorbent particles is represented by r . You can calculate the effective diffusion coefficient of solute in the adsorbent phase (D_i in m^2/g) by using the values of B and the relationship described in the references [29].

$$B = \frac{\pi^2 D_i}{r^2} \quad (16)$$

The data analyzed by Boyd kinetic models showed that the D_i of DWH was $6.8 \times 10^{-9} m^2/g$ and the D_i of CWH was $7.3 \times 10^{-13} m^2/g$. DWH had much better adsorption for MB than CWH. Boyd equation was used to identify the rate-limiting step in adsorption. Boyd plots did not pass through the origin for both dried and CWH, indicating film diffusion as the rate-limiting step. This process was not controlled by pore diffusion, which is why CWH had inferior adsorption for MB compared to DWH.

3.5 Column studies

Water hyacinth adsorbent in the column removed MB in the mass transfer zone of the breakthrough curves. At first, high removal was observed, which gradually decreased until a breakthrough was established. Breakthrough curves were obtained by plotting effluent concentration against service time. Treated volume was used to calculate treated effluent volume.

$$V_t = Q t_e \quad (17)$$

Where Q is the volumetric flow rate (mL/min), and t_e is the time at exhaustion (min).

The maximum column capacity (q_{total} (mg)), for a given concentration of feed and flow rate, is a measure of the area under the plot of the concentration of MB adsorbed ($C_{ad} = C_0 - C_t$). This can be expressed as C_{ad} (mg/L) against affluent time t (min) and is obtained from Eq. (18) [30]:

$$q_{total} = \frac{Q}{1000} \int_{t=0}^{t=t_{total}} C_{ad} dt \quad (18)$$

Where q_{total} , Q , and C_{ad} are the total flow time (min), volumetric flow rate (mL/min), and concentration of MB adsorbed (mg/L) respectively. Equilibrium uptake ($q_{eq(exp)}$) (mg/g) is calculated as:

$$q_{eq(exp)} = \frac{q_{total}}{m} \quad (19)$$

The variable m represents the total amount of adsorbent (in grams) used in the column.

3.5.1 Effect of flow rate

The breakthrough curves for the effect of solution flow rates on the adsorption process are shown in Fig. 8.

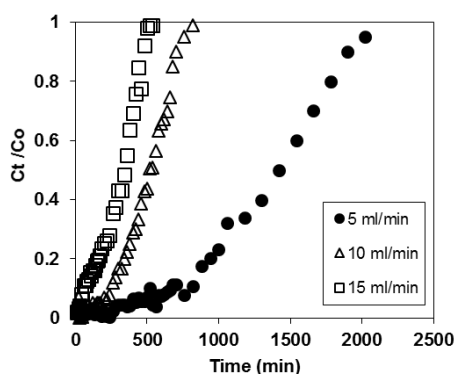


Figure 8 Breakthrough curves for MB adsorption by DWH at different flow rates.

The experiment tested the effect of varying flow rates on methylene blue adsorption at a fixed 100mg/L concentration. Higher flow rates led to faster breakthrough points due to an increased mass transfer. At 5 mL/min, the adsorption capacity was 127.89 mg/g, but at 10 and 15 mL/min, it decreased to 115.61 mg/g and 72.24 mg/g, respectively. Higher flow rates caused a decrease in breakthrough time and adsorption capacity. Table 3 shows the column data parameters at different flow rates.

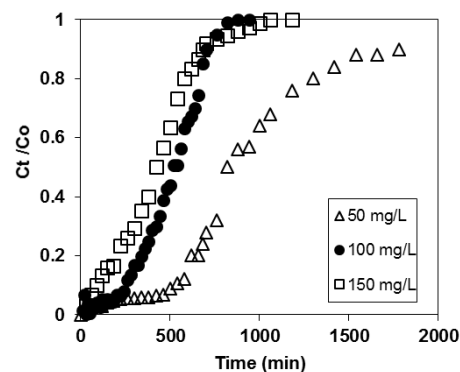
Table 3. Column data parameters were obtained at different flow rates and influent concentrations.

Flow rate (mL/min)	Influent concentration (mg/L)	q_{total} (mg)	$q_{eq(exp)}$ (mg/g)
5	100	639.46	127.89
10	100	578.05	115.61
15	100	361.22	72.24
10	50	475.14	95.03
10	150	601.95	120.39

3.5.2 Effect of inlet MB concentrations

We studied the effect of different inlet concentrations of MB (50 mg/L, 100 mg/L, and 150 mg/L) on fixed-bed column adsorption of MB by the water hyacinth plant at a constant flow rate of 10mL/min. Results showed that a lower concentration of 50mg/L resulted in extended breakthrough time and a greater volume of polluted water treated. However, a higher concentration of 150mg/L resulted in a shorter breakthrough time and only a small volume of treated wastewater. The adsorption capacity increased as the influent concentration increased. The adsorption capacities were 95.03 mg/g, 115.61 mg/g, and 120.39 mg/g for 50 mg/L, 100 mg/L, and 150 mg/L respectively, and this is in agreement with previous studies. Results suggest that water hyacinth is effective in removing MB from wastewater.

Figure 9 Breakthrough curves for MB adsorption



by DWH at different initial concentrations.

3.5.3 The breakthrough curves modeling

Various models are used to predict MB breakthrough in fixed bed columns. The Thomas model is one such model which can be used to calculate the adsorption rate constant. The model assumes that adsorption is limited by mass transfer and does not involve axial dispersion. Thomas's model can be described as:

$$\frac{C_t}{C_0} = \frac{1}{1 + e^{[q_0 m - C_0 v t] \frac{k_{th}}{v}}} \quad (20)$$

Where k_{th} is the Thomas rate constant (mL/min/mg), q_0 is the equilibrium adsorption capacity (mg/g). m is the mass of the adsorbent, C_0 and C_t are the concentration of MB in the

effluent and at time t (mg/L), and v is the flow rate (mL/min).

The Yoon-Nelson model assumes that the rate of decrease in the adsorption probability for each adsorbate molecule depends on the probability of adsorbate adsorption and the probability of an adsorbate breakthrough on the adsorbent [31]. The model can be expressed by Eq.(21)

The Yoon Nelson model can be expressed by Eq. (21)

$$\frac{C_t}{C_o} = \frac{1}{1 + e^{[k_{YN}(t-T)]}} \quad (21)$$

Where k_{YN} is the Yoon-Nelson rate constant (1/min), while T is the time required to reach 50% adsorbate breakthrough (min).

The Modified-dose-response model equation is expressed as:

$$\frac{C_t}{C_o} = 1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{vt}{b}\right)^a} \quad (22)$$

Where a and b are both the constant of the modified-dose-response model.

The Adam' s- Bohart model [32] can be expressed by Eq. (23)

$$\ln \frac{C_t}{C_o} = k_{AB} C_o t - k_{AB} N_o \frac{Z}{F} \quad (23)$$

Where k_{AB} represents the Adam' s- Bohart kinetic rate constant (L/mg/min), F is the linear velocity calculated by dividing the flow rate by the column section area, Z is the bed depth of the column, and N_o is the saturation concentration.

The data from both DWH and CWH matched well with Thomas' model as well as Yoon Nelson's model. The correlation coefficient values between the experimental and predicted values using the Thomas model and the Yoon Nelson model ranged from 0.9011 to 0.9962. It indicated that the MB adsorption mechanism by DWH and CWH was a Langmuir type of sorption, and followed pseudo second order kinetics monolayer chemical sorption [42].

4. Conclusions

Two adsorbents, DWH and CWH, were developed to adsorb MB. DWH had smaller porosity, but a higher adsorption capacity than CWH. Both adsorbents showed the presence of MB after adsorption. DWH had a pH_{PZC} of 6.4, and

CWH had a pH_{PZC} of 10.5. DWH is a good alternative for removing cationic dyes due to its high abundance and low cost. The adsorption isotherm data resembled that of the Langmuir model. In the kinetic study, the adsorption followed pseudo- second- order kinetics. In the column study, breakthrough points were observed to occur faster at higher flow rates. The data from both DWH and CWH matched up well with both Thomas and Yoon Nelson models.

6. Acknowledgment

The authors would like to acknowledge the financial support from the National Research Council of Thailand (NRCT) (fiscal year 2018) and Rajamangala University of Technology Lanna, Thailand

7. References

- [1] Al-Ghouti MA, Khraisheh MA, Ahmad MN, Allen S. Adsorption behaviour of methylene blue onto Jordanian diatomite: a kinetic study. *J Hazard Mater.* 2009;165(1-3):589-98.
- [2] Al-Ghouti MA, Al-Degs YS, Khraisheh MA, Ahmad MN, Allen SJ. Mechanisms and chemistry of dye adsorption on manganese oxides-modified diatomite. *J Environ Manage.* 2009;90(11):3520-7.
- [3] El Qada EN, Allen SJ, Walker GM. Influence of preparation conditions on the characteristics of activated carbons produced in laboratory and pilot scale systems. *Chem Eng J.* 2008;142(1):1-3.
- [4] Goswami M, Phukan P. Enhanced adsorption of cationic dyes using sulfonic acid modified activated carbon. *J Environ Chem Eng.* 2017;5(4):3508-17.
- [5] Albadarin AB, Mo J, Glocheux Y, Allen S, Walker G, Mangwandi C. Preliminary investigation of mixed adsorbents for the removal of copper and methylene blue from aqueous solutions. *Chem Eng J.* 2014;255:525-34.
- [6] Iakovleva E, Sillanpää M, Maydannik P, Liu JT, Allen S, Albadarin AB, Mangwandi C. Manufacturing of novel low-cost adsorbent: Co-granulation of limestone and coffee waste. *J Environ Manage.* 2017;203:853-60.



- [7] Ala'a H, Ibrahim KA, Albadarin AB, Ali-Khashman O, Walker GM, Ahmad MN. Remediation of phenol-contaminated water by adsorption using poly (methyl methacrylate) (PMMA). *Chem Eng J*. 2011;168(2):691-9.
- [8] Ibrahim M, Kühn O, Scheytt T. Molecular spectroscopic study of water hyacinth dry matter. *Open Chem Phys J*. 2009;2(1).
- [9] Ibrahim M, Osman O, Mahmoud AA, Elhaes H. Spectroscopic analyses of water hyacinth: FTIR and modeling approaches.
- [10] Istirokhatun T, Rokhati N, Rachmawaty R, Meriyani M, Priyanto S, Susanto H. Cellulose isolation from tropical water hyacinth for membrane preparation. *Procedia Environ Sci*. 2015;23:274-81.
- [11] Sundari MT, Ramesh A. Isolation and characterization of cellulose nanofibers from the aquatic weed water hyacinth *Eichhornia crassipes*. *Carbohydr Polym*. 2012;87(2):1701-5.
- [12] Bartošová A, Blinová L, Sirotiak M, Michalíková A. Usage of FTIR-ATR as non-destructive analysis of selected toxic dyes. *Res Pap Fac Mater Sci Technol Slovak Univ Technol*. 2017;25(40):103-11.
- [13] Pradhan AC, Paul A, Rao GR. Sol-gel-cum-hydrothermal synthesis of mesoporous Co-Fe@Al₂O₃-MCM-41 for methylene blue remediation. *J Chem Sci*. 2017;129:381-95.
- [14] Langmuir I. The constitution and fundamental properties of solids and liquids. Part I. Solids. *J Am Chem Soc*. 1916;38(11):2221-95.
- [15] Temkin MAP, V. Kinetics of Ammonia Synthesis on Promoted Iron Catalysts. *Acta Physicochim URSS*. 1940;12:217-22.
- [16] Faust SD, Aly OM. Batch Systems and Fixed and Fluidized Beds. In: *Adsorption Processes for Water Treatment*. 1st ed. New York: Butterworth-Heinemann; 1986. p. 123-165.
- [17] Khan MR, Mozumder SI, Islam A, Prasad DR, Alam MM. Methylene blue adsorption onto water hyacinth: batch and column study. *Water Air Soil Pollut*. 2012;223:2943-53.
- [18] Murali K, Uma RN. Removal of basic dye (methylene blue) using low cost biosorbent: Water hyacinth. *Int J Adv Engg Tech*. 2016;VII(II):386-91.
- [19] Hasan SH, Ranjan D, Talat M. Water hyacinth biomass (WHB) for the biosorption of hexavalent chromium: optimization of process parameters. *BioResources*. 2010;1.
- [20] Soni M, Sharma AK, Srivastava JK, Yadav JS. Adsorptive removal of methylene blue dye from an aqueous solution using water hyacinth root powder as a low cost adsorbent. *Int J Chem Sci Appl*. 2012;3(3):338-45.
- [21] Raposo F, De La Rubia MA, Borja R. Methylene blue number as useful indicator to evaluate the adsorptive capacity of granular activated carbon in batch mode: Influence of adsorbate/adsorbent mass ratio and particle size. *J Hazard Mater*. 2009; 165(1-3):291-9.
- [22] Wu XL, Shi Y, Zhong S, Lin H, Chen JR. Facile synthesis of Fe₃O₄-graphene@mesoporous SiO₂ nanocomposites for efficient removal of Methylene Blue. *Appl Surf Sci*. 2016; 378:80-6.
- [23] Mazaheri H, Ghaedi M, Asfaram A, Hajati S. Performance of CuS nanoparticle loaded on activated carbon in the adsorption of methylene blue and bromophenol blue dyes in binary aqueous solutions: using ultrasound power and optimization by central composite design. *J Mol Liq*. 2016; 219:667-76.
- [24] Qi C, Zhao L, Lin Y, Wu D. Graphene oxide/chitosan sponge as a novel filtering material for the removal of dye from water. *J Colloid Interface Sci*. 2018; 517:18-27.
- [25] Ho YS, McKay G. Pseudo-second order model for sorption processes. *Process Biochem*. 1999; 34(5):451-65.
- [26] Ritchie AG. Alternative to the Elovich equation for the kinetics of adsorption of gases on solids. *J Chem Soc, Faraday Trans 1: Phys Chem Condens Phases*. 1977; 73: 1650-3.
- [27] Yu X, Wei C, Wu H. Effect of molecular structure on the adsorption behavior of cationic dyes onto natural vermiculite. *Sep Purif Technol*. 2015;156:489-95.



- [28] Tong KS, Kassim MJ, Azraa A. Adsorption of copper ion from its aqueous solution by a novel biosorbent *Uncaria gambir*: Equilibrium, kinetics, and thermodynamic studies. *Chem Eng J*. 2011;170(1):145-53.
- [29] Gautam RK, Chattopadhyaya MC. Kinetics and equilibrium isotherm modeling: Graphene-based nanomaterials for the removal of heavy metals from water. In: *Nanomaterials for Wastewater Remediation*. 2016. p. 79-109.
- [30] Faust SD, Aly OM. Batch Systems and Fixed and Fluidized Beds. In: *Adsorption Processes for Water Treatment*. 1st ed. New York: Butterworth-Heinemann; 1986. p. 123-65.
- [31] Yoon YH, Nelson JH. Application of gas adsorption kinetics I. A theoretical model for respirator cartridge service life. *Am Ind Hyg Assoc J*. 1984;45(8):509-16.
- [32] Bohart GS, Adams EQ. Some aspects of the behavior of charcoal with respect to chlorine. *J Am Chem Soc*. 1920;42(3):523-44.
- [33] Demarci CA, Debrassi A, Dal Magro J, Nedelko N, Ślawska-Waniewska A, Dłużewski P, et al. Adsorption of Cr (VI) on crosslinked chitosan-Fe (III) complex in fixed-bed systems. *J Water Process Eng*. 2015;7:141-52.



Comparison of Polypropylene Flow Index to Increase Injection Efficiency In Plastic Injection Mold, 2 Cavities of Different Shapes Plastic (Case Study : Pencil Box)

Worapong Phongphattarawut¹, Supatthra Muparang², Noppharit Wasanbongngem³, Jittiwat Nithikarnjanatharn², and Wannisa Nutkhum^{2*}

¹ Department of Industrial Technology, Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Technology Isan, Khon Kaen Campus

123/2002 Village No. 16 Mitraphap Road, Muang Khon Kaen District, Khon Kaen, Thailand, 40002

² Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan, Nakorn Ratchasima

744 Suranarai Road, Nai Muang Subdistrict, Muang District, Nakhon Ratchasima, Thailand, 30000

³ Beamline Instrumentation Section, Beamline Division, Synchrotron Light Research Institute (Public Organization), Nakorn Ratchasima

111 Sirinthon Witchothai Building, University Road, Suranaree Subdistrict, Muang District, Nakhon Ratchasima, Thailand, 30000

*Corresponding Author: wannisa.nu@rmuti.ac.th. Phone Number: 09-2853-4148

Received: 11 June 2024, Revised: 2 July 2024, Accepted: 6 July 2024

Abstract

This research used a computer program to simulate the flow, experimental design and statistical analysis to find the right parameters and properties of polypropylene to fix the problem of the injection of molded plastic with two cavities, when the shape is different and the time to fill a minimum of two different indicators to the cavities. The results of the experiment; plastic polymer polypropylene grade RJ6420 is more suitable for forming injection molded plastic pencil boxes than grade RP348S due to the flow characteristics when observing and recording the time to fill the two cavities. And has filled different than 0.0097 seconds to molding. The real piece of work is complete.

Keywords: Melt flow index, Plastic injection molding, Taguchi

1. Introduction

The Injection molding process is a process of molding plastic into the desired shape. It is a very common process that produces complex plastic parts well so that the surface of the workpiece is smooth. It can produce large quantities of workpieces at a time and quickly [1-7], but the design of the mold must be suitable for the workpiece because it affects the quality of the completed work piece [8]. Various parameters used in the injection process include the temperature of the plastic melt before injection, the crimping pressure, and the cooling time. and appropriate injection speed, considered together with the properties of plastics used for injection

molding, such as flow index and Young's modulus [9-10]. Such factors affect waste in the process as a wasted expense, so it must be calculated and tested to find the value and optimal parameters of each type of plastic but trial and error take time and the cost of conducting many experiments to obtain appropriate parameter values [11-12]

Currently, computer aided design and computer aided engineering technologies are used to help design and produce injection molding parts [13-15], where manufacturers can simulate the flow of molten plastic in the injection molding process in a virtual computer graphics format to analyze the flow patterns that affect waste in the injection molding process Watchara S. [16-20]

uses recycled plastics such as recycled polypropylene and polyoxymethylene, which are industrial plastics and engineering plastics commonly used today. The flow pattern was studied using the flow index and modulus and also the plastic property value to determine the parameters for forming plastic cup products and injecting the complete specimen with real specimens. Yunus M. et al. [21] used an experimental design tool (DOE) to analyze the flow of polypropylene molten plastics to form the fan blade back cover with two cavities to optimize the parameters for injection molding to be complete, but the simulation of flow by retesting in the experimental design (DOE). If the same parameter value is used in repeated testing, the result of the original simulation is obtained. This reduces testing time. Noppharit W. [22-25] analyzed the flow pattern combined with the Taguchi simulation design to find the optimal parameters for injection molding of pencil boxes with two cavities of different shapes to increase the inlet size factor of the appropriate molten plastic. In this study, a single grade RP348S injection molding plastic was used. There is no comparison of other grades of injectable polypropylene plastics, which may affect the flow balance and different filling times of better two cavities mold Watchara S. [26] studied the flow properties of four recycled polypropylene plastics that affect the filling of a single cavity plastic injection mold.

The objective of this study was to study the flow of polypropylene injection molds to compare the flow characteristics, different filling times of two cavities molds and optimal parameters of RP348S grade and RJ6420 grade polypropylene plastics with different flow index values and modulus values using flow simulation and statistical finished programs to choose the right polypropylene plastic grade for pencil case molds with two cavities with different shapes.

2. Research operations

Flow simulation and comparison parameters to increase injection efficiency in two cavities injection molds of different shapes. The properties of polypropylene plastics of that grade must be referenced using the flow index and modulus

values obtained from the plastic manufacturer's data sheet, SPT brand injection molding machine model TR80EH2 is used to the workpiece, use Minitab software to make Taguchi, and use Solidwork for simulation.

Table 1 Factors for Taguchi Design.

	Grade	Melt flow index (g/10min)	Young's modulus (Mpa)
PP-H	RP348S	35	1030
PP-L	RJ6420	28	1177

2.1 Creating a molding model

Modeling of the two grades of polypropylene plastic uses the same shape model for comparison. By choosing a pencil box model with two cavities, the shape is different in the simulation because polypropylene plastic is a common plastic that is popular in industries, consumer products, and electronic products as well as automotive products. The pencil box model with two cavities can therefore be used in many products, such as the pencil box side being used for volumetric work, car wheel eyebrows or plastic drinking glasses. The side of the pencil case lid is used for flat items such as employee ID cards, coasters, etc. show in Figure 1

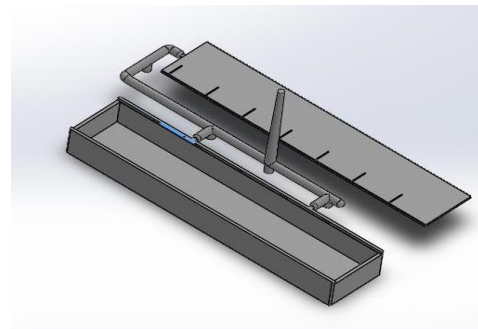


Figure 1 Pencil box model.

2.2. Creating Elements Simulate Forming

The flow simulation with the finished program requires the workpiece to be divided into several sub-elements for the program's analytical resolution, with both grades of polypropylene plastic using the number of elements in the simulation at 261446 elements for comparison. shown in Figure 2



Figure 2 Mesh model to element.

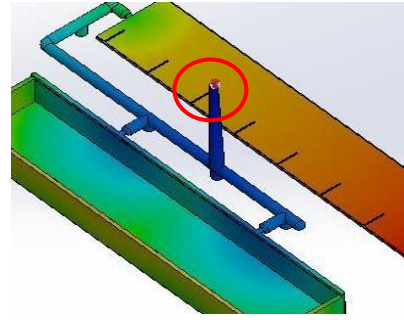


Figure 3 Temperature analysis of injection parts.

2.3. Configure parameters in the simulation

Determining the parameters in the injection process used in the simulation including melt/temperature, meltflow, Young's modulus, holding time, cooling time, injection pressure and adding the inlet size factor of the molten plastic because it affects the flow balance of two molds of different shapes [22-25], and determine the type of material used to make the mold for the accuracy of the simulated results. The type of mold used to simulate polypropylene plastic in both grades is 20P steel.

2.4. Results of flow analysis of plastic injection molds with basic ready-made programs

Using the Taguchi Design table in the statistical program to determine the smallest difference in filling time of the two cavities, the injection parameters were determined: the melting temperature is 160 – 240 degrees Celsius; The mold temperature is 30 – 70 degrees Celsius, the injection speed is 1.2 – 1.6 seconds, the entrance size of the workpiece is 2 – 6 millimeters, and the entrance size of the pencil case is 0.5 – 4.5 millimeters. [27-31,34-36,39-45]

2.5. Results of actual injection work from parameters obtained from preliminary plastic injection simulation analysis.

Determining the starting point of the inflow of molten plastic into the injection mold is determined in the middle of the starting point to balance the flow of molten plastic to the gravity of both cavities and run flow simulator to find the appropriate parameters and defects of the process for further analysis. [32-33,37] show in Figure 3

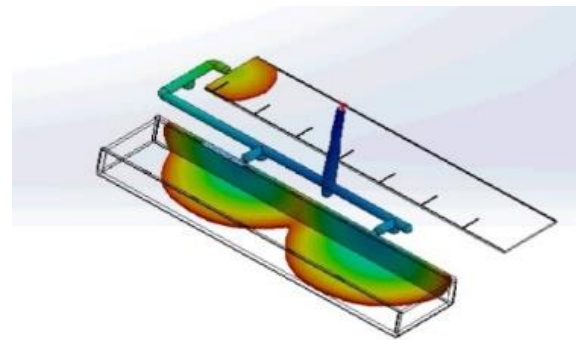


Figure 4 Run Program.

2.6. Flow characteristics and injection time to fill 2 grade 2 polypropylene plastic

Based on the results of the simulation of the flow of polypropylene plastics of both grades, it is observed from blue to red, indicating ascending filling time. It was found that the filling characteristics of PP-H plastic had a different filling time between the pencil case and the pencil case lid at 0.1332 seconds. Notice the orange-red color at the tip of the pencil case lid and a pencil case section with a volumetric shape appearance. It is characterized by non-simultaneous replenishment. The bottom pencil case floor area (blue area) is full before the top (green area), but around the corners and outer edges. The upper (greenish-yellow area) is full before the bottom (orange-yellow area), where the lower corners and outer edges (circled in red as Figure 4) are the areas that fill closest to the lid of the pencil case, but only a small part of the workpiece. This may cause the workpiece to be not fully injected. There is a difference in filling time between the pencil case and the lid of the pencil case at 0.1235 seconds. By observing the same color of the workpiece on both the top and bottom. The center area of the pencil case goes almost to the corner area and the outer edge. It has a yellowish-green color that corresponds to the

upper part of the pencil case lid. The corners and outer edges of the pencil case are orange-yellow, matching the central part to the bottom of the lid of the pencil case (circled in red as shown in Figure 6). The flow characteristics of PP-L plastics are balanced and have a similar filling chance of two cavities to PP-H plastics, reducing the risk of not filling at the same time, which is the cause of problems in injection molding of pencil boxes with two cavities with different shapes.

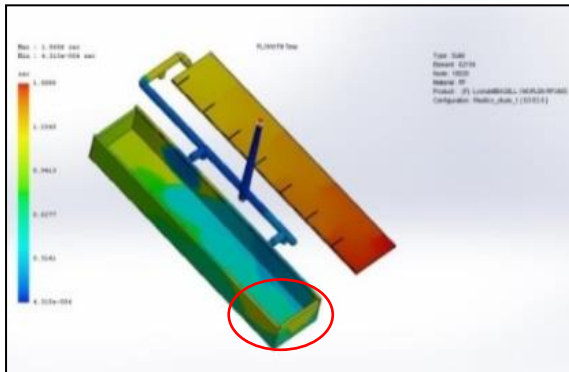


Figure 5 Flow characteristics and injection time value of PP-H plastic filling.

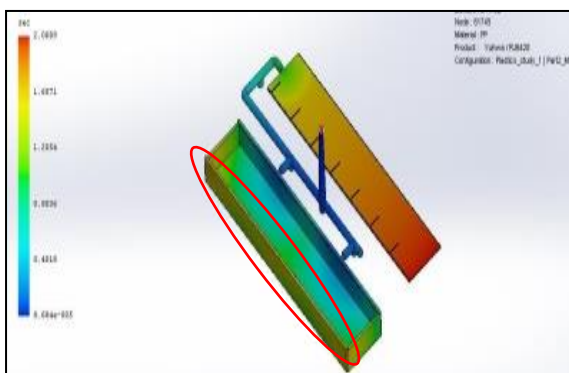


Figure 6 Flow characteristics and injection time value of PP-L plastic filling.

3. Experimental results

From the simulation results of the flow of molten plastic in the injection process. In addition to the results of the flow characteristics and obtaining basic parameters for adjusting the injection machine for that type of plastic to solve the problem of incomplete injection in the plastic injection mold process of two cavities with different shapes. Using the least difference in filling time of the two cavity molds as a measurement index. and using statistical analysis

programs to find appropriate parameters., Uses a right-angle array (Taguchi design) L25

3.1 The results of the analysis of the factors that affect the least different replenishment times of the two grades of polypropylene plastic.

The results were based on the Takushi experimental design and statistical analysis programs. It was found that the effect of the parameters that resulted in the least difference in filling time of the two cavities of PP-H plastic plastics, namely injection speed and the entrance size of the pencil case, had the same impact. When the injection speed is adjusted, it decreases, and the inlet size of the pencil case is larger. Different filling times are reduced, with other fixed parameters which cannot be increased or lowered because it will result in an increase in the different filling times of two cavities molds. Shown as the red square frame in Figure 7 (PP-H), where the level of the parameter that has the greatest impact on the least different filling time of two cavities molds, namely an injection speed of 1.2 seconds and a pencil case inlet size of 4.5 mm, is shown as Figure 8 (PP-H). When adjusting the melting temperature, the plastic decreases. Different filling times are reduced, with other fixed parameters which cannot be increased or lowered because it will result in an increase in the different filling times of the two cavities molds. This is shown in the red square frame in Figure 7 (PP-L). The level of parameters that affect the least different filling time of the two molds is the melting temperature of 220 degrees Celsius, but the level of the corresponding parameters of the two grades of polypropylene plastic is the entrance size of the pencil box souvenir at 4 millimeters. But if the size of the pencil case lid is adjusted more, it will cause the molten plastic to fill up faster, and as a result, the pencil case will not be full. This is shown as circled in red in Figure 7 (PP-H and PP-L).

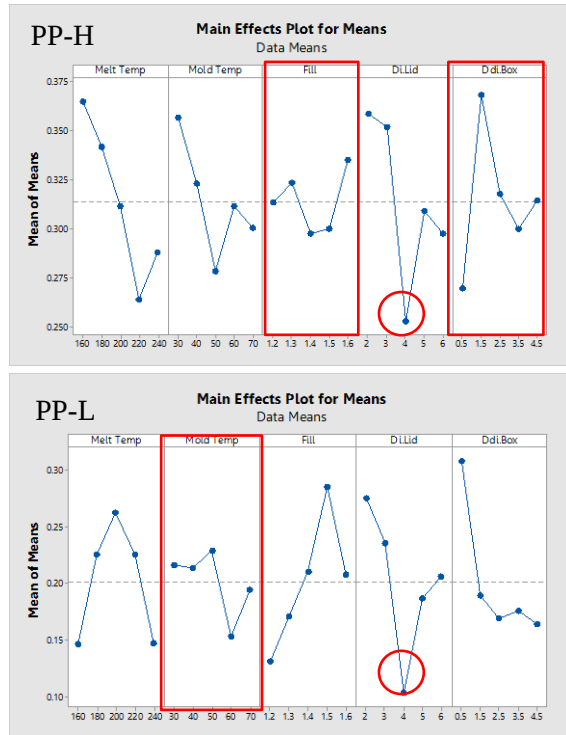


Figure 7 Main Effects Plot for Means.

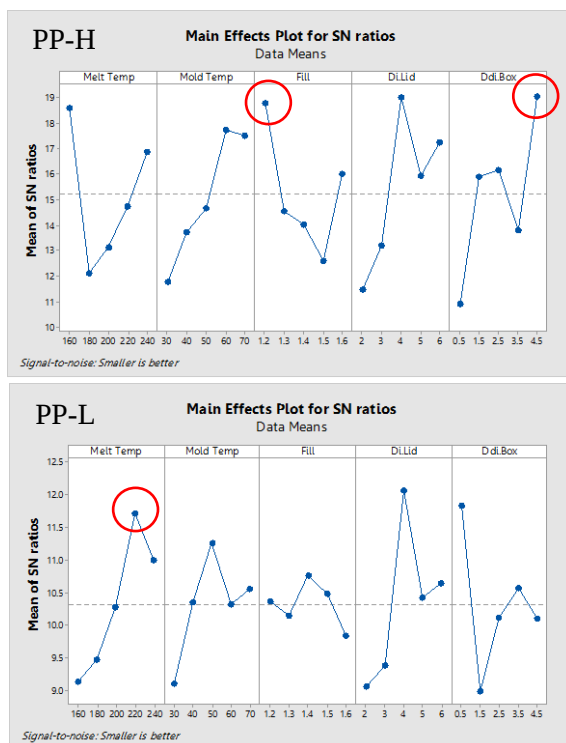


Figure 8 Main Effects Plot for SN ratios.

3.2 Actual workpiece molding results from parameters obtained from the experimental design Taguchi and Statistical Analysis Program of PP-L Plastic.

From section 2.6, it was found that the flow characteristics and injection time values of PP-L

plastics had a flow time balance and a similar chance of filling molten plastics of two cavities to PP-H plastics at 0.1235 seconds as shown in Figure 6. Mold temperature 50 degrees Celsius Injection speed 1.6 seconds, entrance size of pencil case lid It was found that the flow of molten plastic filled both workpieces as shown in Figure 9, and the actual workpiece was complete. This is shown in Figure 10., Which is obtained from the most suitable parameter values.

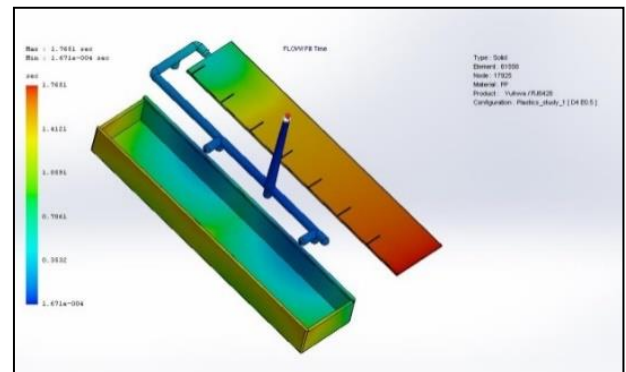


Figure 9 Flow characteristics and injection time value of PP-L plastic injection molded from parameters obtained from the experimental Taguchi design.



Figure 10 The actual specimen is injection molded from parameters obtained from the experimental design; Taguchi and Statistical Analysis Program of PP-L Plastic.

4. Discussion

When considering flow simulation in parameterization, it reduces trial and error time, and adjusting the inlet size will be a way of minimizing the cost of plastic injection mold improvement. In addition, the use of experimental design tools is combined with statistical programs to find the appropriate parameter value. The selection of grades based on the properties of



suitable polypropylene plastics will reduce the chance that the workpiece is not fully injected, which affects the quality of the workpiece and production efficiency. Results from such experiments, unlike Yunus M. et al. [21], an experimental design tool (DOE) was used to analyze the flow of polypropylene molten plastics forming the fan blade back cover. If the same parameter value is used in repeated testing, the result of the original simulation is obtained. This reduces testing time. The Takushi method has a smaller number of trials, reducing the trial time. Noppharit W. [22-25] analyzed the flow pattern combined with the Taguchi simulation design to find the optimal parameters for injection molding of pencil boxes with two cavities of different shapes. Increase the inlet size factor of the appropriate molten plastic. But grades are not selected based on the properties of suitable polypropylene plastics. and Watchara S. [26] studied the flow properties of recycled polypropylene plastics. It was found that the flow index affects the filling time in the injection molding process, but using a 1 cavity simulation piece, it is recycled plastic that is more difficult to control than new plastic resins with flow index control from the manufacturer. Flow simulation results show discrepancies in finding the best flow balance, because the flow simulation must observe the flow characteristics of the workpiece. The filling characteristics of PP-H plastic with a high flow index fill the pencil case almost completely, which is most of the space left in the lower corner of the pencil case, which is a small part of the space that fills with the movement of the liquid plastic moving to the entrance of the pencil case lid, unlike PP-L plastic with a low flow index. The molten plastic reaches the center area, which is half the area of the pencil case, so the plastic begins to move into the lid of the pencil case and fill in the final area of the pencil case lid and the edge of the pencil case. Due to the low flow index of PP-L plastics, there is a greater slowdown in the flow of molten plastics than in PP-H plastics with a high flow index, resulting in a faster full-capacity time near the main entrance than distant cavities. This causes problems in the infill injection of the injection molding of pencil box

workpieces with two cavities with different shapes.

5. Conclusions

A comparison of PP-H plastic and PP-L plastic with the flow simulation method, combining the Taguchi weaving design and analyzing the results with statistical programming. It was found that the comparison of the flow simulation results of PP-L plastics had a more balanced flow characteristic due to the color of the filling time of the two cavities that were similar and the difference in filling time was less than 0.0097 seconds, and the two plastics had different flow indexes, with PP-H plastic having a flow index of 35 g/10 min and PP-L plastic having a flow index of 28 g/10 min; parameters that affect them differently. The properties of polypropylene plastic in each grade are suitable for forming workpieces in different plastic mold injection processes. Therefore, before molding with the plastic mold injection process, the flow should be simulated to select the grade of plastic and use statistical programs to analyze the results to find the appropriate parameters to adjust the injection machine for that workpiece.

6. Acknowledgment

Thank you to the Department of Industrial Engineering. Rajamangala University of Technology Isan Nakhon Ratchasima Silk Innovation Research Unit, Polymer Forming Process and Industrial Development Foundation Plastic Institute for providing the tools to conduct this research.

7. Reference

- [1] Haddout A, Villoutreix G. An experimental study of fiber orientation in injection moulded short glass fiber reinforced polypropylene/polyacrylamide composites. *Composites*. 1994;25(2):147-153.
- [2] Bryce DM. *Troubleshooting: A guide for injection molders*. Karviná: Techtrax Publishers; 2001.
- [3] Huamin Z, Peng Z, Wei F. An integrated intelligent system for injection molding process determination. *Adv Polym Technol*. 2007;26(3):191-205.



- [4] Mok SL, Kwong CK, Lau WS. Review of research in the determination of process parameters for plastic injection molding. *Adv Polym Technol*. 1999; 18(3):225-236.
- [5] Chen ZB, Turng LS. A brief history of the filling simulation of injection moulding. *Adv Polym Technol*. 2005;24(3):165-182.
- [6] Zhao N, Zhao Z, Liao S, Cui SB. Probabilistic model combination for support vector machine using positive-definite kernel-based regularization path. *Adv Intell Soft Comput*. 2011;12(3):201-206.
- [7] Li D, Zhou H, Zhao P, Li Y. A real-time process optimization system for injection molding. *Polym Eng Sci*. 2009; 49(10): 2031-2040.
- [8] Unger P. *Gastrow Injection Molds 4E: 130 Proven Designs*. Munchen: Hanser Publications; 2006.
- [9] Kluwer Academic. *Injection molding handbook*. 3rd ed. Norwell: Dominick Publishers Group; 2000.
- [10] Saude N, Ibrahim M, Ibrahim MHI. Melt flow rate (MFR) of ABS-copper composite filament by fused deposition modeling (FDM). *ARPJ Eng Appl Sci*. 2016; 11(10):6562-6567.
- [11] Bryce DM. *Mold tryouts and optimizing the injection process*. Texas: IPLAS Publishers; 2016.
- [12] Somjate P. Defects in molded plastic parts: causes and solutions. *Kasetsart Eng J*. 2009; 22(69):93-104.
- [13] Santos JD, Fajardo JI, Cuji AR, Garcia JA, Garzon LE, Lopez LM. Experiment evaluation and simulation of volumetric shrinkage and warpage on polymetric composite reinforced with short natural fibers. *Front Mech Eng*. 2015; 10(3):287-293.
- [14] Jaeyoung K. Imbalance filling of multi-cavity tooling during powder injection molding. *Powder Technol*. 2014; 257:124-131.
- [15] Zhong Z, Hai-ou Z, Gui-lan W, Ying-ping Q. Finite element analysis on the injection molding and productivity of conformal cooling channel. *Adv Polym Technol*. 2011; 16(2):231-235.
- [16] Watchara S, Jittiwat N, Noppharit W. Analysis shrinkage of recycle plastic injection molding by using Taguchi methodology. *UBU*. 2017;12(2):123-134. Thai.
- [17] Watchara S. Flow analysis of plastic injection molds, case studies of used polymeric methylene plastics, presented at the 2017 Annual Conference on Engineering Science Technology and Architecture, Khon Kaen. 2017;21(7). Thai.
- [18] Watchara S. Flow analysis of plastic injection molds, case studies of used polypropylene plastics, presented at the 2017 Rajamangala Institute of Technology Production and Routine Management, Chonburi. 2017;8(12). Thai.
- [19] Watchara S. Flow Analysis and Parameters of Injection Molding of Recycled Plastics, Case Study of Recycled Polypropylene Plastics from Saline Bags, presented at the 2017 National Conference on Innovation and Academic Technology, Surin. 2017; 26(12). Thai.
- [20] Watchara S. The study of the proper plastic injection process of recycled plastics that affect shrinkage with finite element research methodology. Case study of recycled polypropylene plastic from the basket, presented at the 2017 Annual industrial engineering conference, Ubon Ratchathani. 2018; (7): 23-26. Thai.
- [21] Yunus M. Optimizing the die design parameters of a two cavity injection moulding tool for a fan blade back cover using mold flow analysis. *Int J IT Eng*. 2015; 3(6):92-103.
- [22] Noppharit W. Flow analysis of plastic injection molds, case studies of unused polypropylene plastics, presented at the 2017 National Conference on Innovation and Academic Technology, Surin. 2017; 26(12). Thai.
- [23] Noppharit W. Study of the flow behavior of plastic injection molds to find the appropriate parameters of the new 1088 P grade polypropylene pellets for forming a pencil box, presented at the 2017 Rajamangala Academic Conference on Production Technology and Management, Krabi. 2018; (5): 30-31. Thai.



- [24] Noppharit W. Determination of the process parameters of polypropylene plastic injection with simulation methods forming case studies, pencil box products, presented at the 2017 Annual industrial engineering conference, Ubon Ratchathani. 2018; (7): 23-26. Thai.
- [25] Noppharit W. Flow Simulation of injection from full time to fill up 2 different Cavite City in the injection molding process polypropylene case studies, product, presented at the 2019 Rajamangala Academic Conference on Production Technology and Management, Chiang Mai. 2019; (5): 30-31. Thai.
- [26] Watchara S. Design of an experiment to find the suitable injection parameters. Of recyclable plastic that affects the quality of injection by finite element method. M.S. thesis, Department of Master Engineering Faculty of Industrial Engineering Program. Rajamangala University of Technology Isan. Nakhon Ratchasima; 2019. Thai.
- [27] Wilczynski K, Narowski PA. Strategy for Problem Solving of Filling Imbalance in Geometrically Balanced Injection Molds. *Polymers*. 2020; 12:805.
- [28] Ryu Y, Sohn JS, Yun CS, Cha SW. Shrinkage and Warpage Minimization of Glass-Fiber-Reinforced Polyamide 6 Parts by Microcellular Foam Injection Molding. *Polymers*. 2020; 12(889).
- [29] Chen HW, Lin MF. Characterization Biocompatibility, and Optimization of Electrospun SF/PCL/CS Composite Nanofibers. *Polymers*. 2020; 12(1439).
- [30] Lin CM, Wu JJ, Tan CM. Processing Optimization for Metal Injection Molding of Orthodontic Braces Considering Powder Concentration Distribution of Feedstock. *Polymers*. 2020; 12(2635).
- [31] Mohamed EG, Ahmed M, Redouane M. A hybrid optimization approach for intelligent manufacturing in plastic injection molding by using artificial neural network and genetic algorithm. *Sci Rep*. 2023;13:21817.
- [32] Ryu Y, Sohn JS, Yun CS, Cha SW. Shrinkage and warpage minimization of glass-fiber-reinforced polyamide 6 parts by microcellular foam injection molding. *Polymers*. 2020; 12(889).
- [33] Wei TH, Chia LT, Wen HH, Jyh HC. Application of intelligent modeling method to optimize the multiple quality characteristics of the injection molding process of automobile lock parts. *Polymers*. 2021; 13:2515.
- [34] Gu F, Hall P, Miles NJ, Ding Q, Wu T. Improvement of mechanical properties of recycled plastic blends via optimizing processing parameters using the Taguchi method and principal component analysis. *Mater Des*. 2014; 62: 189-198.
- [35] Asfaram A, Ghaedi M, Hajati S. Screening and optimization of highly effective ultrasound-assisted simultaneous adsorption of cationic dyes onto Mn-doped Fe₃O₄-nanoparticle-loaded activated carbon. *Ultrason Sonochem*. 2016; 34: 1-12.
- [36] Zhao P, Zhang J, Dong Z, Huang J, Zhou H, Fu J, Turng LS. Intelligent Injection Molding on Sensing Optimization, and Control. *Adv Polym Technol*. 2020; 7023616(22).
- [37] Parka HS, Dang XP. Development of a smart plastic injection mold with conformal cooling channels. *Procedia Manuf*. 2017; 10:48-59.
- [38] Tossapol K, Sakon K. A hybrid neural network for predictive model in a plastic injection molding process. *Int J Intell Eng Syst*. 2022; 15(2).
- [39] Dowlathshahi S. An application of design of experiments for optimization of plastic injection molding processes. *J Manuf Technol Manag*. 2004; 15(6):445-454.
- [40] Mohan NS, Ramachandra A, Kulkarni SM. Influence of process parameters on cutting force and torque during drilling of glass-fiber polyester reinforced composites. *Compos Struct*. 2005; 71(3-4):407-413.
- [41] Ariffin MKAM, Ali MIM, Sapuan SM, Ismail N. An optimized drilling process for an aircraft composite structure using design of experiments. *Sci Res Essays*. 2009; 4(10):1109-1116.



- [42] Datta S, Bandyopadhyay A, Pal PK. Grey-based Taguchi method for optimization of bead geometry in submerged arc bead-on-plate welding. *Int J Adv Manuf Technol*. 2008; 11-12: 1136-1143.
- [43] Liu SJ, Chang JH. Application of the Taguchi method to optimize the surface quality of gas assist injection molded composites. *J Reinf Plast Compos*. 2000; 19(17): 1352-1362.
- [44] Ozcelik B, Ozbay A, Demirbas E. Influence of injection parameters and mold materials on mechanical properties of ABS in plastic injection molding. *Int Commun Heat Mass Transf*. 2010; 37(9): 1359-1365.
- [45] Fei NC, Mehat NM, Kamaruddin S. Practical Applications of Taguchi Method for Optimization of Processing Parameters for Plastic Injection Moulding: A Retrospective Review. *ISRN Ind Eng*. 2013; 462174(11).



เครื่องวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดต่างและสารอาหารในดินเพื่อการเลือกปลูกพืชเศรษฐกิจที่เหมาะสม Soil pH and Nutrient Analyzer for Selecting Suitable Economic Crops

ศุภฤกษ์ จันทรศุภเสน¹ อิศราภรณ์ อมรสวัสดิวัฒนา^{1*} และชาคริต ปานแป้น¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือวัดและอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย

1518 ถนนประชากรราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย 10800

Suparoek Junsupasen¹ Issaraporn Amornsawatwattana^{1*} and Chakrit Panpean¹

¹ Department of Instrument and Electronic Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand

1518 Pracharat 1 Road, Wongsawang, Bangsue, Bangkok, Thailand, 10800

*ผู้รับผิดชอบบทความ: issaraporn.a@eng.kmutnb.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 089-453-8344

Received: 3 October 2023, Revised: 9 January 2024, Accepted: 9 January 2024

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้มีมุ่งเน้นการจัดทำต้นแบบเครื่องวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดต่างและสารอาหารในดิน เพื่อการเลือกปลูกพืชเศรษฐกิจของประเทศไทยที่เหมาะสมด้วยการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) และสารอาหารหลักในดิน (NPK) เพื่อตรวจสอบคุณภาพของดินในการปลูกพืชเศรษฐกิจของประเทศไทย ประกอบด้วย ข้าว มันสำปะหลัง อ้อย ยางพารา และปาล์มน้ำมัน โดยมีวัตถุประสงค์ให้เกษตรกรมีเครื่องมือที่ช่วยเพิ่มสมรรถนะในการทำเกษตรกรรมในด้าน การเตรียมดินให้เหมาะสมก่อนเพาะปลูก หรือการเลือกเพาะปลูกพืชให้เหมาะสมกับดินบริเวณนั้น โดยใช้เซ็นเซอร์วัดค่าความเป็นกรดต่างและเซ็นเซอร์วัดสารอาหารหลักในดิน โดยมีการสอบเทียบความแม่นยำของเซ็นเซอร์ดังกล่าวเบื้องต้น ผลที่ได้จากการวัดถูกส่งไปยังบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อวิเคราะห์ค่า pH และ NPK ว่าเหมาะสมกับการปลูกพืชเศรษฐกิจในประเทศไทย จำนวน 5 ชนิด ได้แก่ ข้าว มันสำปะหลัง อ้อย ยางพารา และปาล์มน้ำมัน การใช้ชุดน้ำยาเทียบความเป็นกรดต่างและชุดตรวจแถบสี NPK ถูกใช้สำหรับการสอบเทียบเบื้องต้นสำหรับเซ็นเซอร์วัดค่า pH และ NPK ตามลำดับ ผลการสอบเทียบเบื้องต้น พบว่าค่าความผิดพลาดเฉลี่ยจากการสอบเทียบความเป็นกรดต่างมีค่าเท่ากับ 9.48% สำหรับการสอบเทียบค่าสารอาหารหลักในดินมีค่าเฉลี่ยของไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) และโพแทสเซียม (K) เท่ากับ 162.4 66 และ 61 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งค่าดังกล่าวอยู่ในช่วงของชุดน้ำยาเทียบความเป็นกรดต่างและชุดตรวจแถบสี NPK โดยค่า pH และ NPK ที่ได้จากการตรวจวัดจะถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์ความเหมาะสมของดินในการเพาะปลูกพืชเศรษฐกิจทั้ง 5 ชนิด ที่จะแสดงผลให้เกษตรกรผู้ใช้งานสามารถเตรียมดินให้เหมาะสมก่อนเพาะปลูก หรือการเลือกเพาะปลูกพืชให้เหมาะสมกับดินบริเวณนั้นได้อย่างสะดวก ดังนั้น เครื่องวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดต่างและสารอาหารในดินที่ได้นำเสนอขึ้นจะช่วยเพิ่มสมรรถนะให้กับเกษตรกรปลูกของเกษตรกรไทย

คำสำคัญ พืชเศรษฐกิจ ความเป็นกรดต่างในดิน สารอาหารหลักในดิน เกษตรกร

Abstract

This paper focuses on developing a soil pH and nutrient analyzer prototype designed to aid in the selection of economically viable crops in Thailand. The analysis includes assessing soil pH and the primary nutrients (NPK) to evaluate the soil quality for the cultivation of economically important crops in Thailand. These economic



crops consist of rice, cassava, sugarcane, rubber, and palm oil. This analyzer aims to provide farmers with tools that enhance efficiency in cultivation, specifically in soil preparation before planting or selecting crops that are suitable for the specific soil conditions in the area. The soil pH and NPK sensors that have undergone preliminary accuracy calibration are utilized for soil quality assessment. The measured results of sensors are sent to a microcontroller for analysis of soil pH and NPK values to determine their suitability for cultivating economically important crops in Thailand, including rice, cassava, sugarcane, rubber, and palm oil. A pH buffer solution and NPK colorimetric test strips are used for preliminary calibration of the sensors measuring pH and NPK, respectively. The preliminary calibration results indicated that the average error for pH calibration was 9.48%. For the calibration of soil NPK, the average values for nitrogen (N), phosphorus (P), and potassium (K) were 162.4 mg/kg, 66 mg/kg, and 60.6 mg/kg, respectively. These values were within the range of the pH buffer solution kit and the NPK colorimetric test strip. The soil pH and NPK values obtained from the measurements were analyzed the suitability of the soil for cultivating the five economically important crops. Consequently, farmers can conveniently prepare the soil before planting or select suitable crops for specific soil conditions using the proposed soil pH and nutrient analyzer. This analyzer tool enhances the efficiency of Thai farmers in cultivation.

Keywords: Economic Crops, Soil pH analyser, Soil NPK analyser.

1. บทนำ

การทำเกษตรกรรมเป็นอาชีพที่สำคัญอย่างหนึ่ง และเป็นอาชีพรากฐานของคนไทยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน ในยุคที่เทคโนโลยีเจริญก้าวหน้ายุคแห่งข้อมูลข่าวสาร การนำเทคโนโลยีที่ถูกพัฒนาขึ้นมาประยุกต์ใช้ให้เข้ากับการทำเกษตรกรรม จะทำให้การจัดการทางด้านเกษตรกรรมดีขึ้น โดยบทความนี้มุ่งเน้นพิจารณาพืชเศรษฐกิจของประเทศไทยที่นิยมในการปลูกกันในภูมิภาคต่าง ๆ ได้แก่ ข้าว มันสำปะหลัง อ้อย ยางพารา และปาล์มน้ำมัน ในปัจจุบันการปลูกพืชเศรษฐกิจดังกล่าว เกษตรกรต้องแบกรับภาระต้นทุนที่สูงขึ้นเนื่องจากราคาปุ๋ย ซึ่งช่วยให้สารอาหาร NPK ให้กับพืช หากเกษตรกรสามารถตรวจสอบ NPK ในดินจะทำให้วางแผนการเพาะปลูกพืชที่เหมาะสมกับดินบริเวณนั้น ๆ ได้ และสามารถลดภาระเรื่องการใส่ปุ๋ยในการให้สารอาหาร NPK ที่ไม่จำเป็นกับพืชได้ นอกจากนี้ ปัจจัยเรื่องความเป็นกรดต่างของดินมีผลต่อการเจริญเติบโตของพืชด้วย ดังนั้น บทความนี้จึงมุ่งเน้นออกแบบและสร้างเครื่องวิเคราะห์ค่า และสารหลักอาหารในดินเพื่อเลือกปลูกพืชเศรษฐกิจที่เหมาะสมและตรวจสอบ NPK ในดินเพื่อใส่ปุ๋ยสารอาหารเท่าที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช โดยมีวัตถุประสงค์ให้เกษตรกรลดต้นทุนทางการเกษตรจากการสำรวจปฐพีเคมีดินและงานวิจัยในอดีต [1-5] พบว่า ค่าความเป็นกรดต่างและสารอาหารในดินที่เหมาะสม

ของพืชเศรษฐกิจทั้ง 5 ชนิด แสดงได้ดังตารางที่ 1 ซึ่งค่าดังกล่าวจะถูก

ตารางที่ 1 ค่า pH และ NPK ที่เหมาะสมของพืชเศรษฐกิจ

พืชเศรษฐกิจ	ค่าสารอาหารหลัก (kg)			
	N	P	K	pH
ข้าว [1]	21-30	25-45	80-120	5.0-6.5
มันสำปะหลัง [2]	31-50	มากกว่า 7	มากกว่า 30	5.0-6.5
อ้อย [3]	31-50	มากกว่า 25	มากกว่า 90	5.6-7.3
ยางพารา [4]	11-20	11-30	มากกว่า 40	4.5-5.5
ปาล์มน้ำมัน [5]	21-30	9-25	100-120	4.0-6.0

นำไปใช้ในการกำหนดเงื่อนไขในการวิเคราะห์ข้อมูลค่าสารอาหารสำหรับพืชเศรษฐกิจของเครื่องวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดต่างและสารอาหารในดิน

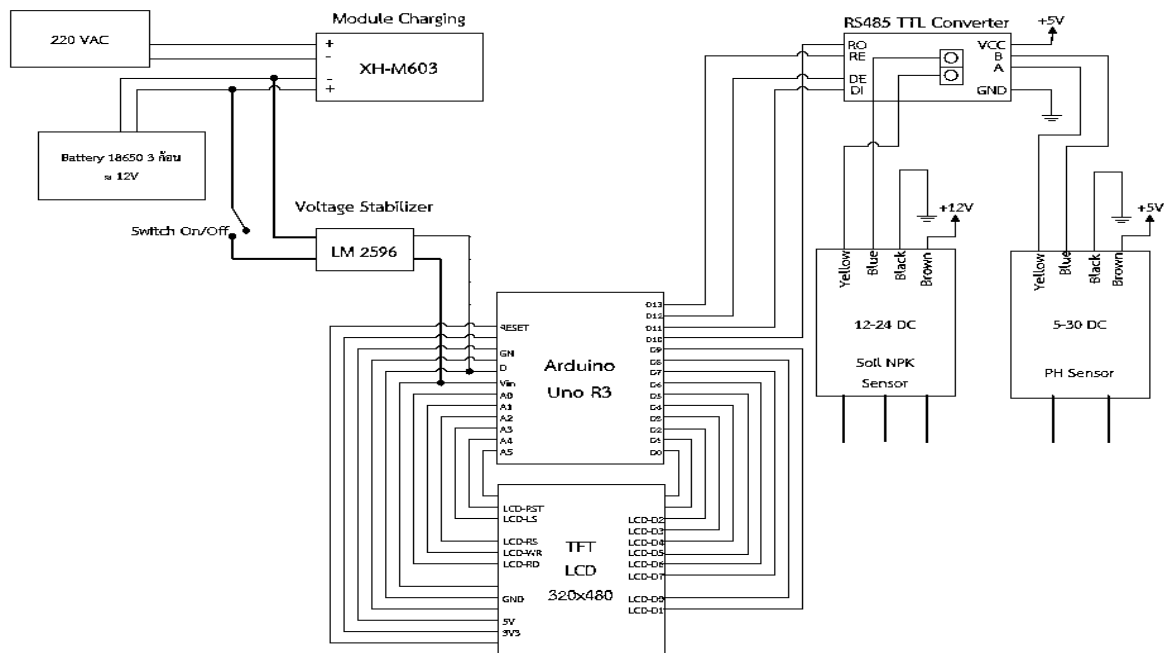
การทบทวนปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า ในปี 2014 Insorn และคณะ [6] ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับคุณภาพของดินที่ใช้ปุ๋ยอินทรีย์และปุ๋ยเคมีอย่างต่อเนื่องในการปลูกข้าวหอมมะลิที่อำเภอตระการพืชผล จังหวัดอุบลราชธานี ซึ่งดินตัวอย่างที่นำมาใช้ในการทดลองมีทั้งหมด 10 ตัวอย่าง ตัวอย่างทั้งหมดถูกนำมาตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี ได้แก่ ค่าความเป็นกรดด่าง ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน ค่าการนำไฟฟ้า ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก และปริมาณ NPK ในปี 2016 Rigor และคณะ [7] ได้นำเสนอการสร้างอุปกรณ์ที่ใช้การวัดค่าแถบสีเพื่อบ่งบอกปริมาณ NPK และค่า pH ของดิน และในปี 2017 Masrie และคณะ [8] ได้นำเสนอเกี่ยวกับเซ็นเซอร์แสง โดยถูกพัฒนาขึ้นเพื่อวัดและตรวจวัดค่า NPK ในดิน เซ็นเซอร์ดังกล่าวบ่งบอกถึงการวิเคราะห์ในการเพิ่มลดปริมาณ NPK ของดินลง เพื่อเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดิน เป็นการปรับปรุงคุณภาพของดินและลดการใช้ปุ๋ยที่ไม่จำเป็น กระบวนการตรวจสอบและวิเคราะห์ค่า NPK ในดิน ถูกประมวลผลบนบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino จากผลการสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้น สามารถนำทฤษฎีค่าคุณภาพของดิน การตรวจวัดค่า pH และ NPK การวิเคราะห์ข้อมูลบนบอร์ด

ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino มาใช้ในการออกแบบและสร้างเครื่องวิเคราะห์ค่า pH และ NPK สำหรับการเพาะปลูกพืชเศรษฐกิจที่เหมาะสม

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1) การออกแบบเครื่องวิเคราะห์ค่า pH และ NPK

บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น Arduino Uno R3 [9] ถูกนำมาใช้สำหรับการรับข้อมูล วิเคราะห์ผล และส่งออกข้อมูลเพื่อแสดงผล โดยแหล่งจ่ายพลังงานบอร์ด Arduino Uno R3 ต้องมีขนาดแรงดัน 7-12 V ดังนั้น การคงค่าระดับแรงดันให้เหมาะสมสำหรับจ่ายพลังงานบอร์ด Arduino Uno R3 จึงเป็นสิ่งหนึ่งที่สำคัญสำหรับการทำงานของอุปกรณ์ ตัวคงค่าระดับแรงดัน LM2596 [10] จึงถูกใช้สำหรับคงค่าแรงดันจากแบตเตอรี่เพื่อจ่ายให้กับบอร์ด Arduino Uno R3 ซึ่งแบตเตอรี่จะได้รับการประจุพลังงานโดยใช้วงจรโมดูลควบคุมการชาร์จ XH-M603 [11] การแสดงผลการตรวจวัดและวิเคราะห์ pH และ NPK จากบอร์ด Arduino Uno R3 จะถูกแสดงด้วยจอแสดงผลแบบดิจิตอล TFT LCD Display [12] โดยใช้การสื่อสารแบบขนาน 8 บิต ในส่วนของการตรวจวัดค่า pH และ NPK จะใช้เซ็นเซอร์ในการวัดค่าโดยตรง [13-14] จากนั้นส่งค่า



รูปที่ 1 การออกแบบการเชื่อมต่อเครื่องวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดด่างและสารอาหารในดิน

ไปยัง TTL RS485 Convertor เพื่อปรับปรุ้งค่าให้เหมาะสมสำหรับการอ่านค่าของบอร์ด Arduino Uno R3 [15] การเชื่อมต่อเครื่องวิเคราะห์ค่า pH และ NPK สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1 โดยการออกแบบการเชื่อมต่อดังกล่าวเป็นส่วนสำคัญสำหรับการสร้างเครื่องวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดด่างและสารอาหารในดินซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2 โดยทำการออกแบบการแสดงผลแบ่งออกเป็นค่าความเป็นกรดด่างและสารอาหารในดินที่วัดได้ ชนิดของพืชเศรษฐกิจ และผลการวิเคราะห์ค่าสารอาหารตามชนิดของพืชเศรษฐกิจ



รูปที่ 2 เครื่องวิเคราะห์ค่า pH และ NPK เพื่อการเลือกปลูกพืชเศรษฐกิจที่เหมาะสม

2.2) เงื่อนไขการวิเคราะห์ค่า pH และ NPK

ค่าที่ได้จากเซ็นเซอร์วัด NPK และเซ็นเซอร์วัดค่า pH จะถูกกำหนดให้เป็นตัวแปรหนึ่ง และถูกวิเคราะห์ความเหมาะสมบนบอร์ด Arduino Uno R3 โดยมีเงื่อนไขการวิเคราะห์ [16-21] ดังนี้

2.2.1) ข้าว มีเงื่อนไขเป็น

- ค่า $N < 21 = \text{Low}$, $\geq 21 = \text{OK}$
- ค่า $P < 25 = \text{Low}$, $\geq 25 = \text{OK}$
- ค่า $K < 80 = \text{Low}$, $\geq 80 = \text{OK}$
- ค่า $\text{pH} < 5.0 = \text{Low}$, $5.0 - 6.5 = \text{OK}$, $> 6.5 = \text{High}$

2.2.2) มันสำปะหลัง มีเงื่อนไขเป็น

- ค่า $N < 31 = \text{Low}$, $\geq 31 = \text{OK}$
- ค่า $P < 7 = \text{Low}$, $\geq 7 = \text{OK}$

- ค่า $K < 30 = \text{Low}$, $\geq 30 = \text{OK}$

- ค่า $\text{pH} < 5.0 = \text{Low}$, $5.0 - 6.5 = \text{OK}$, $> 6.5 = \text{High}$

2.2.3) อ้อย มีเงื่อนไขเป็น

- ค่า $N < 31 = \text{Low}$, $\geq 31 = \text{OK}$

- ค่า $P < 25 = \text{Low}$, $\geq 25 = \text{OK}$

- ค่า $K < 90 = \text{Low}$, $\geq 90 = \text{OK}$

- ค่า $\text{pH} < 5.6 = \text{Low}$, $5.6 - 7.3 = \text{OK}$, $> 7.3 = \text{High}$

2.2.4) ยางพารา มีเงื่อนไขเป็น

- ค่า $N < 11 = \text{Low}$, $\geq 11 = \text{OK}$

- ค่า $P < 11 = \text{Low}$, $\geq 11 = \text{OK}$

- ค่า $K < 40 = \text{Low}$, $\geq 40 = \text{OK}$

- ค่า $\text{pH} < 4.5 = \text{Low}$, $4.5 - 5.5 = \text{OK}$, $> 5.5 = \text{High}$

2.2.5) ปาล์มน้ำมัน มีเงื่อนไขเป็น

- ค่า $N < 21 = \text{Low}$, $\geq 21 = \text{OK}$

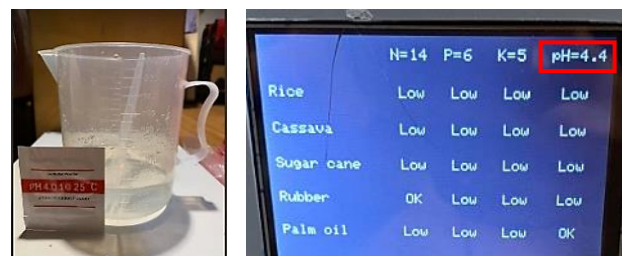
- ค่า $P < 9 = \text{Low}$, $\geq 9 = \text{OK}$

- ค่า $K < 100 = \text{Low}$, $\geq 100 = \text{OK}$

- ค่า $\text{pH} < 4.0 = \text{Low}$, $4.0 - 6.0 = \text{OK}$, $> 6.0 = \text{High}$

2.3 การสอบเทียบเซ็นเซอร์วัดค่า pH

บทความนี้พิจารณาการสอบเทียบเซ็นเซอร์วัดค่า pH เบื้องต้นสำหรับเป็นต้นแบบสำหรับเครื่องมือวิเคราะห์ค่าที่นำเสนอ จึงเลือกใช้ชุดน้ำยาเทียบค่าความเป็นกรดด่าง (pH Buffer Solution) โดยเตรียมน้ำเปล่าใส่บีกเกอร์ประมาณ 250 ml แล้วนำผงเทียบค่า pH ที่มีค่าเท่ากับ 4.01 เทใส่ลงไปในน้ำเปล่า 250 ml ที่ได้เตรียมเอาไว้ คนให้ผงเทียบค่า pH ละลายเข้ากับน้ำประมาณ 1-2 นาที จากนั้นนำเซ็นเซอร์วัดค่า pH มาวัดผลที่ได้ แสดงดังรูปที่ 3 และผลการสอบเทียบเซ็นเซอร์วัด pH กับชุดน้ำยาในน้ำ 250 ml แสดงดังได้ตารางที่ 2 ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นว่า เซ็นเซอร์วัดค่า pH มีค่าความถูกต้องเฉลี่ย 91.35%

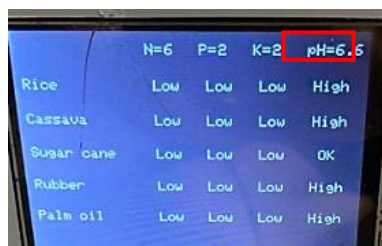


รูปที่ 3 ผลการวัดค่า pH ของเซ็นเซอร์

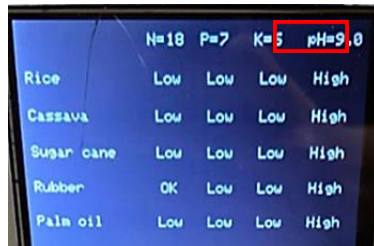
ตารางที่ 2 ผลการสอบเทียบเซ็นเซอร์วัดค่า pH

ครั้งที่	pH	ค่าความถูกต้อง (%)	ค่าความผิดพลาด (%)
1	4.30	93.26	7.23
2	4.40	91.14	9.73
3	4.40	91.14	9.73
4	4.40	91.14	9.73
5	4.40	91.14	9.73
6	4.40	91.14	9.73
7	4.40	91.14	9.73
8	4.40	91.14	9.73
9	4.40	91.14	9.73
10	4.40	91.14	9.73
เฉลี่ย	4.39	91.35	9.48

เพื่อยืนยันถึงสมรรถนะการวัดค่า pH ของเซ็นเซอร์ เบื้องต้นจึงนำเซ็นเซอร์วัดค่า pH ไปใช้ในการวัดน้ำที่มีความเป็นด่าง 6.86 และ 9.18 จากชุดน้ำยา ตามลำดับ โดยมีการทดสอบลักษณะเดียวกันจำนวน 10 ครั้ง ผลการทดสอบพบว่า เซ็นเซอร์วัดค่า pH มีค่าความถูกต้องเฉลี่ย 96.65 % และ 98.04 % ตามลำดับ ผลการทดสอบในหน้าจอสถิติแสดงผลดังรูปที่ 4 และรูปที่ 5 ตามลำดับ



รูปที่ 4 การวัดค่า pH ของชุดความเป็นด่าง 6.86



รูปที่ 4 การวัดค่า pH ของชุดความเป็นด่าง 9.18

2.4) การสอบเทียบเซ็นเซอร์วัดค่า NPK

ชุดตรวจสอบสาร NPK ในดินแบบอ่านค่าแถบสี ถูกนำมาใช้ในการสอบเทียบเซ็นเซอร์ NPK เบื้องต้น สำหรับการวิเคราะห์ค่า NPK ที่เหมาะสมสำหรับการปลูกพืชเศรษฐกิจของประเทศไทย โดยใช้กรณีศึกษาจากดินผสมปุ๋ยผงบดละเอียดสูตร 21-21-21 โดยนำดินมาประมาณ 1-2 กรัม ใส่ลงในหลอดทดลองพร้อมกับน้ำบริสุทธิ์ 10 ml ปิดฝาหลอดทดลองให้แน่น เขย่าประมาณ 1-2 นาที จากนั้นรอให้ดินตกตะกอนอีก 30 นาที ในการตรวจสอบค่า N ทำได้โดยการหยดสาร Ammonia Nitrogen activator ปริมาณ 2 ml ลงไปในหลอดทดลองอีกอัน นำหลอดดูดน้ำที่ตกตะกอน (ไม่เอาดิน) ใส่ลงในหลอดทดลองที่มีสาร Ammonia Nitrogen activator ปิดฝาหลอดทดลองให้แน่นแล้วเขย่าประมาณ 1-2 นาที จากนั้นเปิดฝาหลอดทดลองหยดสาร Ammonia Nitrogen Solution Soil Testing Reagent ลงไป ปิดฝาหลอดทดลองให้แน่นเขย่าอีกครั้งประมาณ 1-2 นาที จะได้สีของน้ำยาดังรูปที่ 6 ก) ดำเนินการตามขั้นตอนเดิมแต่ทำการเปลี่ยนเป็นสาร Phosphorus Extractant Solution Soil Testing Reagent เพื่อตรวจสอบค่า P จะได้สีของน้ำยาดังรูปที่ 6 ข) และใช้สาร Potassium Extractant Solution Soil Testing Reagent สำหรับตรวจสอบค่า K ซึ่งจะได้สีของน้ำยาดังรูปที่ 6 ค)



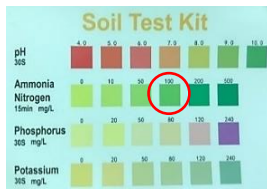
ก) สีน้ำยา N

ข) สีน้ำยา P

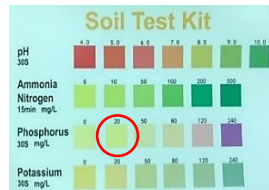
ค) สีน้ำยา K

รูปที่ 6 สีของน้ำยาทดสอบดินผสมปุ๋ยสูตร 21-21-21

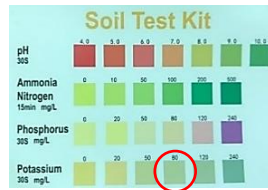
เมื่อได้สีของน้ำยาทดสอบค่า NPK จากนั้นนำไปเทียบกับสีที่ปรากฏในแผ่นชาร์ตเทียบสีที่แนบมากับชุดตรวจสอบสารอาหารในดิน ดังรูปที่ 7



ก) ผลการวัดค่า N ในดิน



ข) ผลการวัดค่า P ในดิน



ค) ผลการวัดค่า K ในดิน

รูปที่ 7 ผลการทดสอบค่า NPK ในดิน

ผลการทดสอบดินด้วยชุดตรวจสอบสารอาหารในดิน (ผสมปุ๋ยผงละลายน้ำสูตร 21-21-21 เพื่อวัดค่า NPK แสดงดังตารางที่ 3 ตารางที่ 3 ค่าแถบสีและผลการทดลองจากดินที่มีค่า NPK สูง

สารอาหาร	ค่าแถบสี
N	101 - 200
P	51 - 80
K	51 - 80

จากตารางที่ 3 สามารถชี้ให้เห็นว่า การทดสอบดินด้วยชุดตรวจสอบสารอาหารในดินผสมปุ๋ยผงละลายน้ำสูตร 21-21-21 มีค่า N อยู่ในช่วงระหว่าง 101-200, ค่า P อยู่ในช่วงระหว่าง 51-80 และค่า K อยู่ในช่วงระหว่าง 5-80

การสอบเทียบเซ็นเซอร์วัดค่า NPK เบื้องต้น ทำได้โดยการทดสอบกับดินผสมปุ๋ยผงละลายน้ำสูตร 21-21-21 ซึ่งทำการทดสอบ 10 ครั้ง พบว่า ผลการวัดค่า NPK มีค่าอยู่ในช่วงของการใช้ชุดตรวจสอบสารอาหารในดิน แสดงได้ดังรูปที่ 8 (นำเสนอการตรวจวัดครั้งที่ 6 และ 9) โดยมีผลการตรวจวัดทั้ง 10 ครั้งแสดงดังตารางที่ 4



ก) การวัดครั้งที่ 6



ข) การวัดครั้งที่ 9

รูปที่ 8 การวัดค่า NPK

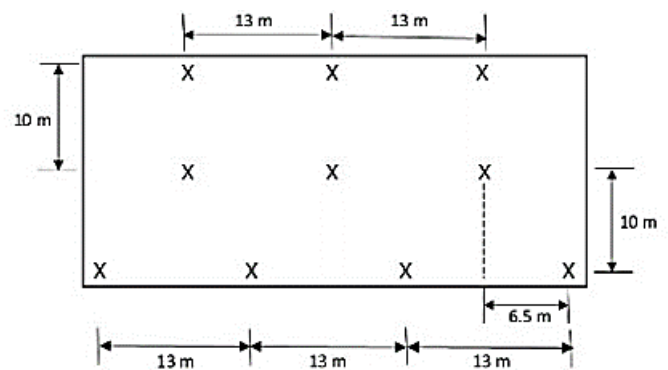
ตารางที่ 4 ผลการทดสอบเซ็นเซอร์วัดค่า NPK

ครั้งที่	N (mg/kg)	P (mg/kg)	K (mg/kg)
1	163	66	61
2	162	66	61
3	162	66	61
4	162	66	60
5	162	66	60
6	161	66	61
7	163	66	61
8	163	66	61
9	163	66	60
10	163	66	60
เฉลี่ย	162	66	61

จากตารางที่ 4 ผลการทดสอบเซ็นเซอร์วัดค่าสารอาหารในดินผสมปุ๋ยสูตร 21-21-21 จำนวน 10 ครั้ง พบว่า ค่า NPK มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 162mg/kg, 66 mg/kg, 61 mg/kg ตามลำดับ โดยค่าดังกล่าวเป็นไปตามผลจากการทดสอบดินด้วยชุดตรวจสอบสารอาหารในดิน

3. การทดลองและผลการทดลอง

การทดลองนำเครื่องวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดต่างและสารอาหารในดินไปใช้วัด ณ สถานที่จริง ดำเนินการกับพื้นที่กลุ่มตัวอย่างของพืชเศรษฐกิจ 5 ประเภท คือ นาข้าว ไร่มันสำปะหลัง ไร่ถั่วเหลือง สวนยางพารา และสวนปาล์มน้ำมัน โดยในแต่ละสถานที่ จะทำการวัด 10 จุด ซึ่งจุด X แสดงตำแหน่งที่ใช้วัด แสดงดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 ตำแหน่งที่ใช้วัด

3.1) การทดลองและผลการทดลองในนาข้าว

นำเครื่องวิเคราะห์ค่า pH และ NPK ในดินไปทดสอบที่คลังนาปลาข้าว หมู่ 5 ตำบลหนองตำลึง อำเภอบางทอง จังหวัดชลบุรี โดยสถานที่ทดลองจริงในนาข้าว แสดงดังรูปที่ 10 และหน้าจอแสดงการวัดค่าสารอาหารในดินและค่าความเป็นกรดด่างในนาข้าว แสดงดังรูปที่ 11



รูปที่ 10 สถานที่ทดลองจริงในนาข้าว

จากรูปที่ 10 ภายในนาข้าวมีน้ำขังอยู่ค่อนข้างมาก เนื่องจากเดือนพฤษภาคมถึงตุลาคมของทุกปีเป็นช่วงฤดูฝน จากการสอบถามผู้ดูแลสถานที่ให้ข้อมูลว่า ต้นอ่อนข้าวที่เห็นในภาพมีอายุประมาณ 15-20 วัน และยังไม่ได้ใส่ปุ๋ย โดยจะใส่ปุ๋ยครั้งแรกเมื่อต้นข้าวอายุได้ประมาณ 1 เดือน

	N=6	P=2	K=2	pH=1.3
Rice	Low	Low	Low	Low
Cassava	Low	Low	Low	Low
Sugar cane	Low	Low	Low	Low
Rubber	Low	Low	Low	Low
Palm oil	Low	Low	Low	Low

	N=20	P=8	K=7	pH=2.5
Rice	Low	Low	Low	Low
Cassava	Low	OK	Low	Low
Sugar cane	Low	Low	Low	Low
Rubber	OK	Low	Low	Low
Palm oil	Low	Low	Low	Low

ก) การวัดจุดที่ 2

ข) การวัดจุดที่ 3

รูปที่ 11 หน้าจอแสดงการวัดค่า pH และ NPK ในนาข้าว

จากตารางที่ 5 ผลการทดสอบจากเครื่องวิเคราะห์ค่า pH และ NPK จากการตรวจวัด 10 จุด ในนาข้าว พบว่าโดยเฉลี่ยดินในนาข้าวมีค่า N ที่เหมาะสม ส่วนค่า P กับค่า K มีค่าต่ำ และดินมีความเป็นกรดเกินไปสำหรับการปลูกข้าว

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบที่ได้จากการวัดในนาข้าว

จุดที่	N (mg/kg)		P (mg/kg)		K (mg/kg)		pH	
1	12	Low	4	Low	4	Low	1.2	Low
2	6	Low	2	Low	2	Low	1.3	Low
3	20	Low	8	Low	7	Low	2.5	Low
4	35	OK	14	Low	13	Low	9.6	High
5	8	Low	3	Low	3	Low	0.5	Low
6	12	Low	5	Low	4	Low	0.1	Low
7	26	OK	10	Low	9	Low	7.2	High
8	33	OK	19	Low	17	Low	9.7	High
9	39	OK	26	OK	24	Low	6.5	OK
10	24	OK	9	Low	8	Low	2.0	Low
เฉลี่ย	21	OK	10	Low	9	Low	4.0	Low

3.2) การทดลองและผลการทดลองในไร่มันสำปะหลัง

นำเครื่องวิเคราะห์ค่า pH และ NPK ของดินไปทดสอบที่ไร่มันสำปะหลัง หมู่ 1 ตำบลบ้านฉาง อำเภอบ้านฉาง จังหวัดระยอง โดยสถานที่ทดลองจริงไร่มันสำปะหลัง แสดงดังรูปที่ 12 และหน้าจอแสดงการวัดค่า pH และ NPK ในไร่มันสำปะหลัง แสดงดังรูปที่ 13



รูปที่ 12 สถานที่ทดลองจริงในไร่มันสำปะหลัง

จากรูปที่ 12 ณ สถานที่ทดสอบต้นมันสำปะหลังมีความสูง 150-160 cm มีอายุ 6 เดือน เจ้าของสวนได้ให้ข้อมูลว่าเพิ่งได้ทำการใส่ปุ๋ยไปเมื่อ 1-2 วันก่อน เป็นปุ๋ยชนิดเม็ดโรยใส่ไปบริเวณโคนต้น โดยจะสามารถทำการเก็บเกี่ยวผลผลิตได้ในอีก 4 เดือนข้างหน้า

	N=60	P=24	K=22	pH=3.6
Rice	OK	Low	Low	High
Cassava	OK	OK	Low	High
Sugar cane	OK	Low	Low	High
Rubber	OK	OK	Low	High
Palm oil	OK	OK	Low	High

ก) การวัดจุดที่ 2

	N=70	P=28	K=26	pH=4.9
Rice	OK	OK	Low	Low
Cassava	OK	OK	Low	Low
Sugar cane	OK	OK	Low	Low
Rubber	OK	OK	Low	OK
Palm oil	OK	OK	Low	OK

ข) การวัดจุดที่ 3

รูปที่ 13 หน้าจอแสดงการวัดค่า pH และ NPK ในไร่มันสำปะหลัง



ตารางที่ 6 ผลการทดสอบที่ได้จากการวัดไนโตรเจนสำปะหลัง

จุดวัด	N (mg/kg)		P (mg/kg)		K (mg/kg)		pH	
1	52	OK	21	OK	19	Low	2.0	Low
2	58	OK	23	OK	21	Low	8.9	High
3	46	OK	19	OK	17	Low	9.7	High
4	47	OK	19	OK	17	Low	6.9	High
5	70	OK	28	OK	26	Low	2.5	Low
6	70	OK	28	OK	26	Low	4.9	Low
7	99	OK	40	OK	37	OK	11	High
8	60	OK	24	OK	22	Low	9.6	High
9	81	OK	33	OK	30	Low	4.5	Low
10	64	OK	26	OK	24	Low	6.5	OK
ค่าเฉลี่ย	65	OK	26	OK	24	Low	6.7	High

จากตารางที่ 6 ผลการทดสอบจากเครื่องวิเคราะห์ค่า pH และ NPK จากการตรวจวัด 10 จุด ในไร่มันสำปะหลัง พบว่า โดยเฉลี่ย N และ P มีค่าเหมาะสม ส่วน P มีค่าต่ำ และดินมีความเป็นด่างเกินไปสำหรับการปลูกมันสำปะหลัง

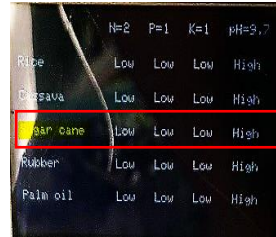
3.3) การทดลองและผลการทดลองในไร่อ้อย

นำเครื่องวิเคราะห์ค่า pH และ NPK ของดินไปทดสอบที่ไร่อ้อย หมู่ 2 ตำบลหนองซาก อำเภอบ้านบึง จังหวัดชลบุรี โดยสถานที่ทดลองจริงไร่อ้อย แสดงดังรูปที่ 14

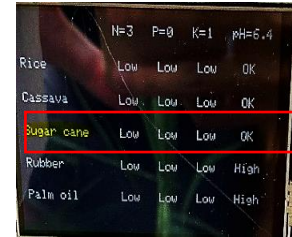


รูปที่ 14 สถานที่ทดลองจริงในไร่อ้อย

จากรูปที่ 14 ต้นอ้อยมีความสูงประมาณ 150-170 cm มีอายุประมาณ 3 เดือนการเจริญเติบโตของต้นอ้อยในช่วงระยะเวลานี้เรียกว่า “ระยะแตกกอ” จากการสอบถามชาวสวนในพื้นที่ได้ให้ข้อมูลเพิ่มเติมว่าได้มีการใส่ปุ๋ยครั้งแรกไปเมื่อ 3 เดือนก่อน ในส่วนหน้าจอแสดงการวัดค่าสารอาหารในดินและค่าความเป็นกรดต่างในไร่อ้อยสามารถแสดงดังรูปที่ 15



ก) การวัดจุดที่ 2



ข) การวัดจุดที่ 3

รูปที่ 15 หน้าจอแสดงการวัดค่า pH และ NPK ในไร่อ้อย

ตารางที่ 7 ผลการทดสอบที่ได้จากการวัดในไร่อ้อย

จุดวัด	N (mg/kg)		P (mg/kg)		K (mg/kg)		pH	
1	4	Low	1	Low	1	Low	6.2	OK
2	2	Low	1	Low	1	Low	9.7	High
3	3	Low	0	Low	1	Low	6.4	OK
4	12	Low	4	Low	4	Low	6.4	OK
5	7	Low	3	Low	2	Low	0.1	Low
6	19	Low	8	Low	7	Low	6.0	OK
7	10	Low	4	Low	3	Low	9.6	High
8	15	Low	6	Low	5	Low	1.2	Low
9	14	Low	6	Low	5	Low	3.7	Low
10	14	Low	5	Low	5	Low	1.6	Low
ค่าเฉลี่ย	10	Low	4	Low	3	Low	5.1	Low

จากตารางที่ 7 ผลการทดสอบจากเครื่องวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดด่างและสารอาหาร จากการตรวจวัด 10 จุดในไร่อ้อย พบว่า โดยเฉลี่ยค่า NPK มีค่าต่ำ และดินมีความเป็นกรดเกินไปสำหรับการปลูกอ้อย

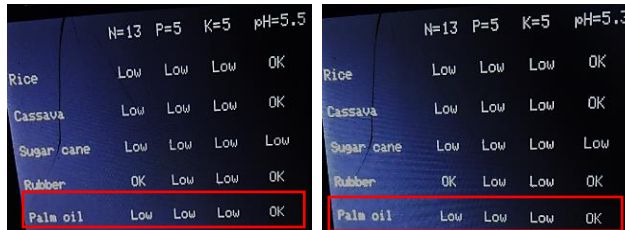
3.4) การทดลองและผลการทดลองในยางพารา

นำเครื่องวิเคราะห์ค่า pH และ NPK ไปทดสอบที่สวนยางพารา หมู่ 1 ตำบลเขาชก อำเภอนองใหญ่ จังหวัดชลบุรี โดยสถานที่ทดลองจริงในสวนยางพารา แสดงดังรูปที่ 16 และหน้าจอแสดงการวัดค่าสารอาหารในดินและค่าความเป็นกรดต่างในสวนยางพารา แสดงดังรูปที่ 17



รูปที่ 16 สถานที่ทดลองจริงในสวนยางพารา

จากรูปที่ 16 ต้นยางพารามีความสูงประมาณ 300-350 cm มีอายุประมาณ 7 ปี เจ้าของสวนได้ให้ข้อมูลเพิ่มเติมว่าเป็นพันธุ์ยางผลผลิตเนื้อไม้สูง เป็นพันธุ์ที่ให้ผลผลิตเนื้อไม้สูงเป็นหลัก มีการเจริญเติบโตดีมาก



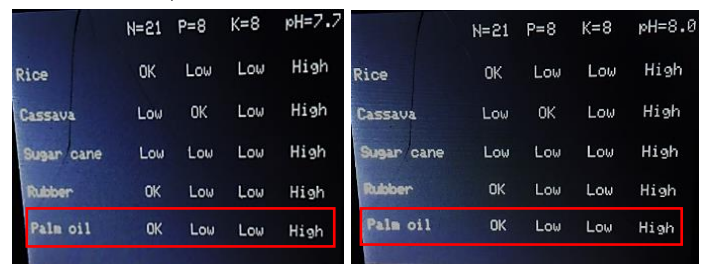
	N=13	P=5	K=5	pH=5.5
Rice	Low	Low	Low	OK
Cassava	Low	Low	Low	OK
Sugar cane	Low	Low	Low	Low
Rubber	OK	Low	Low	OK
Palm oil	Low	Low	Low	OK

	N=13	P=5	K=5	pH=5.3
Rice	Low	Low	Low	OK
Cassava	Low	Low	Low	OK
Sugar cane	Low	Low	Low	Low
Rubber	OK	Low	Low	OK
Palm oil	Low	Low	Low	OK



รูปที่ 18 สถานที่ทดลองจริงในสวนปาล์มน้ำมัน

จากรูปที่ 18 ต้นปาล์มน้ำมันมีความสูงประมาณ 200-300 cm มีอายุประมาณ 10 ปี เจ้าของสวนได้ให้ข้อมูลเพิ่มเติมว่าเพิ่งได้ทำการใส่ปุ๋ย N ไปเมื่อ 1 เดือนก่อน



	N=21	P=8	K=8	pH=7.7
Rice	OK	Low	Low	High
Cassava	Low	OK	Low	High
Sugar cane	Low	Low	Low	High
Rubber	OK	Low	Low	High
Palm oil	OK	Low	Low	High

	N=21	P=8	K=8	pH=8.0
Rice	OK	Low	Low	High
Cassava	Low	OK	Low	High
Sugar cane	Low	Low	Low	High
Rubber	OK	Low	Low	High
Palm oil	OK	Low	Low	High

ก) การวัดจุดที่ 2 ข) การวัดจุดที่ 3
รูปที่ 17 หน้าจอแสดงการวัดค่า pH และ NPK ในสวนยางพารา

ตารางที่ 8 ผลการทดสอบที่ได้จากการวัดในสวนยางพารา

จุดวัด	N (mg/kg)		P (mg/kg)		K (mg/kg)		pH	
1	13	OK	5	Low	6	Low	5.5	OK
2	13	OK	5	Low	7	Low	5.5	OK
3	13	OK	5	Low	5	Low	5.5	OK
4	16	OK	6	Low	5	Low	5.4	OK
5	17	OK	7	Low	5	Low	5.4	OK
6	15	OK	8	Low	8	Low	5.4	OK
7	14	OK	7	Low	9	Low	5.3	OK
8	18	OK	8	Low	7	Low	5.3	OK
9	19	OK	6	Low	5	Low	5.3	OK
10	17	OK	7	Low	5	Low	5.3	OK
ค่าเฉลี่ย	16	OK	6	Low	6	Low	5.4	OK

จากตารางที่ 8 ผลการทดสอบจากเครื่องวิเคราะห์ค่า pH และ NPK จากการตรวจวัด 10 จุด ในสวนยางพารา พบว่าโดยเฉลี่ยค่า N มีค่าเหมาะสม ส่วนค่า P และค่า K มีค่าต่ำ และดินมีความเป็นกรดต่ำเหมาะสมสำหรับการปลูกยางพารา

4.5) การทดลองและผลการทดลองในสวนปาล์มน้ำมัน

นำเครื่องวิเคราะห์ค่าวิเคราะห์ค่า pH และ NPK ไปทดสอบที่สวนปาล์มน้ำมัน หมู่ 1 ตำบลเขาก อำเภอนองใหญ่ จังหวัดชลบุรีโดยสถานที่ทดลองจริงในสวนปาล์มน้ำมันแสดงดังรูปที่ 18 และหน้าจอแสดงการวัดค่าวิเคราะห์ค่า pH และ NPK ในสวนปาล์มน้ำมัน แสดงดังรูปที่ 19

ก) การวัดครั้งที่ 2

ข) การวัดครั้งที่ 3

รูปที่ 19 หน้าจอแสดงการวัดค่า pH และ NPK ในสวนปาล์มน้ำมัน

ตารางที่ 9 ผลการทดสอบที่ได้จากการวัดในสวนปาล์มน้ำมัน

จุดวัด	N (mg/kg)		P (mg/kg)		K (mg/kg)		pH	
1	21	OK	8	Low	8	Low	7.7	High
2	21	OK	8	Low	9	Low	7.7	High
3	21	OK	8	Low	9	Low	7.7	High
4	24	OK	10	Low	8	Low	8.0	High
5	25	OK	7	Low	6	Low	8.0	High
6	22	OK	8	Low	8	Low	8.0	High
7	23	OK	7	Low	9	Low	8.0	High
8	24	OK	8	Low	7	Low	8.1	High
9	21	OK	6	Low	5	Low	8.1	High
10	21	OK	7	Low	5	Low	8.1	High
ค่าเฉลี่ย	22	OK	8	Low	7	Low	7.9	High

จากตารางที่ 9 ผลการทดสอบจากเครื่องวิเคราะห์ค่า pH และ NPK จากการตรวจวัด 10 จุดในสวนปาล์มน้ำมัน พบว่าโดยเฉลี่ยค่า N มีค่าเหมาะสม ส่วนค่า P และค่า K มีค่าต่ำ และดินมีความเป็นด่างสำหรับการปลูกปาล์มน้ำมัน



5. สรุปผลการวิจัย

บทความนี้ได้นำเสนอการออกแบบและสร้างต้นแบบเครื่องวัดค่า pH และ NPK เพื่อการเลือกปลูกพืชเศรษฐกิจของประเทศไทย ซึ่งประกอบด้วย ข้าว มันสำปะหลัง อ้อย ยางพารา และปาล์มน้ำมัน โดยทำการสอบเทียบเซ็นเซอร์ตรวจวัดค่า pH และ NPK เบื้องต้น เพื่อส่งค่าที่ตรวจวัดได้ให้กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Uno R3 สำหรับการวิเคราะห์ความเหมาะสมของค่า pH และ NPK ในดินสำหรับการปลูกพืชเศรษฐกิจทั้ง 5 ชนิด จากนั้น ทำการแสดงผลผ่านหน้าจอ LCD เพื่อให้เกษตรกรผู้ใช้งานสามารถเข้าใจและสะดวกในการใช้งาน โดยทำการทดสอบในพื้นที่จริงของการปลูกพืชเศรษฐกิจทั้ง 5 ชนิด ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า เครื่องต้นแบบสำหรับการวิเคราะห์ค่า pH และ NPK ในดิน ชี้ให้เห็นว่า ในนาข้าวมีค่า N ที่เหมาะสม ส่วนค่า P กับค่า K มีค่าต่ำ และดินมีความเป็นกรดเกินไปสำหรับการปลูกข้าว ดังนั้น เกษตรกรควรใส่ปุ๋ยที่ทำให้ค่า P และค่า K ในดินเพิ่มมากขึ้นและปรับค่าดินให้ค่าความเป็นกรดลดลงให้เหมาะสมต่อการปลูกข้าว ส่วนไร่มันสำปะหลัง ค่า N และค่า P มีค่าเหมาะสม ส่วนค่า K มีค่าต่ำ และดินมีความเป็นด่างเกินไปสำหรับการปลูกมันสำปะหลัง ดังนั้น เกษตรกรควรใส่ปุ๋ยที่ทำให้ค่า K เพิ่มมากขึ้นและปรับค่าดินให้ค่าความเป็นด่างลดลงให้เหมาะสมต่อการปลูกมันสำปะหลัง สำหรับไร่อ้อยมีค่า NPK ต่ำ และดินมีความเป็นกรดเกินไปสำหรับการปลูกอ้อย ดังนั้น เกษตรกรควรใส่ปุ๋ยที่ทำให้ค่า NPK เพิ่มมากขึ้นและปรับค่าดินให้ค่าความเป็นกรดลดลงจึงจะเหมาะสมต่อการปลูกอ้อย ในกรณีสวนยางพารามีค่า N ที่เหมาะสม ส่วนค่า P และค่า K มีค่าต่ำ และดินมีความเป็นกรดต่างเหมาะสมสำหรับการปลูกยางพารา ดังนั้น เกษตรกรควรใส่ปุ๋ยที่ทำให้ค่า P และ ค่า K เพิ่มมากขึ้นจึงจะเหมาะสมต่อการปลูกยางพารา และสุดท้ายเป็นกรณีสวนปาล์มน้ำมัน มีค่า N ที่เหมาะสม ส่วนค่า P และค่า K มีค่าต่ำ และดินมีความเป็นด่างสำหรับการปลูกปาล์มน้ำมัน ดังนั้น เกษตรกรควรใส่ปุ๋ยให้ค่าค่า P และค่า K เพิ่มมากขึ้นและปรับค่าดินให้ค่าความเป็นด่างลดลงจึงจะเหมาะสมต่อการปลูกปาล์มน้ำมัน จากผลการทดสอบพืชเศรษฐกิจทั้ง 5 ชนิด สามารถยืนยันได้ว่า เครื่องต้นแบบสำหรับการวิเคราะห์ค่า pH และ NPK ในดินสามารถให้ข้อมูลค่า pH และ NPK ต่อเกษตรกร ทำให้เกษตรกรสามารถเพิ่มหรือลดค่า pH และ NPK ให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช เป็นการ

เพิ่มสมรรถนะการเพาะปลูก อีกทั้งช่วยลดต้นทุนในการใส่ปุ๋ยที่เกินความจำเป็นต่อความต้องการของพืชเศรษฐกิจ

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมืวัดและอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ สถานที่ทดลอง และบุคคลผู้อำนวยความสะดวกในการวิจัยในครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Sukanya S, Auraporn B, Chuanpit J, Napaporn K, Prathip D. The Study of Paddy Soil Quality in Tha Tum District, Surin Province for Appropriately Fertilizers Use. Koch Cha Sam J Sci. 2014;36(1):42-49.
- [2] Agricultural Production Factors Research Group, Department of Agriculture. Fertilizer use based on soil analysis values in cassava production. Nakhon Sawan Field Crops Res Cent Newsl. 2018.
- [3] Yongyuth O. Nutrients and growth of sugarcane. Soil Fertil J. 2013;35(1-4):65-77.
- [4] Pompat S. The use of rubber fertilizers according to soil analysis. Rubber Production Research and Development Division, Rubber Research Institute, Rubber Authority of Thailand. 2021.
- [5] Surat Thani Oil Palm Research Center. Fertilizer use based on soil and leaf analysis in oil palm production. Agricultural Research and Development Office Region 7, Department of Agriculture, Ministry of Agriculture and Cooperatives. 2005.
- [6] Insorn P, Pajdee W, Nakorn B. A study of soil quality at using organic fertilizer and chemical fertilizer in planting. North Eastern Sci Technol Conf. 2014.
- [7] Rigor G, Regalado C, Cruz D. Soil pH and Nutrient (Nitrogen, Phosphorus and Potassium) Analyzer using Calorimetry. 2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON) – Proceeding of the International Conference. 2016; 21(1): 2387-2391.



- [8] Masrie M, Rosman MSA, Sam R, Janin Z. Detection of Nitrogen Phosphorus and Potassium (NPK) nutrients of soil using optical transducer. Proc 4th IEEE Int Conf Smart Instrum Meas Appl (ICSIMA). 2017 Nov 28-30; Putrajaya, Malaysia.
- [9] Siripong C. Basic use of Arduino. Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University, Ongkharak campus. 2019.
- [10] Panomsak M. SUT-E-Bike Solar Powered Electric Bicycle Station. Department of Physics, Faculty of Science, Suranaree University of Technology. 2020.
- [11] Chaithep R, Worawit S, Siwaporn S. Development of an automatic battery charger controlled by an Arduino board. The 4th National Academic Conference and Exhibition on Engineering and Technology Innovation Development towards Sufficiency Leadership for Sustainability Based on the Sufficiency Economy Philosophy (SEITS2022). 2022 Nov 5-6; Faculty of Engineering, Kasembundit University, Bangkok. 2022. p.42-46.
- [12] Susanne M, Axel B. After-effects of TFT-LCD display polarity and display colour on the detection of low-contrast objects. *Ergonomics*. 2010; 53(7): 914-925.
- [13] Rogovska N, Laird DA, Chiou CP, Bond LJ. Development of field mobile soil nitrate sensor technology to facilitate precision fertilizer management. *Precis Agric*. 2019;20(1):40-55.
- [14] Kittisak O, Phonbunyanon T. Monitoring and control of smart fish farming system. [dissertation]. Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University. 2021.
- [15] Kriangsak P, Nutthanon L. Sensor system for measuring electricity usage in the Faculty of Information Science. 2020.
- [16] Marianah M, Mohamad S, Aizuddin R. Detection of Nitrogen, Phosphorus, and Potassium (NPK) nutrients of soil using Optical Transducer. Proc 4th IEEE Int Conf Smart Instrum Meas Appl (ICSIMA). 2017 Nov 28-30; Putrajaya, Malaysia.
- [17] Gavade LC. Detection of N, P, using Fiber Optic Sensor and PIC Controller. *Int J Eng Sci*. 2017; 13787.
- [18] Filipe MS, Pedro ASJ, Rui CM. Optical Sensing of Nitrogen, Phosphorus and Potassium: A Spectrophotometrical Approach toward Smart Nutrient Deployment. *Chemosensors*. 2019; 7(51).
- [19] Jiangang S, Weiming Q, Huizhe C, Jun Z, Fei L. Application of Visible/Near Infrared Spectrometers to Quickly Detect the Nitrogen, Phosphorus, and Potassium Content of Chemical Fertilizers. *Appl Sci*. 2021; 11(5103).
- [20] Wang L, Wang R, Lu C, Wang J, Huang W, Jian Q, Wang Y, Lin L, Song L. Quantitative analysis of total nitrogen content in monoammonium phosphate fertilizer using visible-near infrared spectroscopy and least squares support vector machine. *J Appl Spectrosc*. 2019; 86: 465-469.
- [21] Sun XL. Errors induced by spectral measurement positions and instrument noise in soil organic carbon prediction using vis-NIR on intact soil. *Geoderma*. 2021; 382: 114731.



การเพิ่มความพร้อมการใช้งานเครื่องจักรของกระบวนการกรองน้ำ ในกระบวนการผลิตน้ำประปา : กรณีศึกษาโรงงานผลิตน้ำมหาสวัสดิ์

The increasing Machine Availability of the Water Filtration Process in the Water Production Process: A Case Study of Mahasawat Water Treatment Plant

ศิริวิทย์ ปุสสิโร¹ ศุภรัชชัย วรรัตน์^{1*}

¹วิทยาลัยนวัตกรรมด้านเทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต

110/1-4 ถนน ประชาชื่น แขวงทุ่งสองห้อง เขตหลักสี่ กรุงเทพมหานคร 10210

Sirawit Pussawiro¹, Suparatchai Vorarat^{1*}

College of Innovation Technology and Engineering, Dhurakij Pundit University

110/1-4 Prachachuen Road, Thung Song Hong, Lak Si, Bangkok, Thailand, 10210

*ผู้รับผิดชอบบทความ: vorarat@dpu.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 08-1304-2425

Received: 11 April 2023, Revised: 26 January 2024, Accepted: 26 January 2024

บทคัดย่อ

โครงข่ายของการผลิตน้ำเพื่อจ่ายให้พื้นที่ กรุงเทพมหานคร นนทบุรี และสมุทรปราการ วันละ 6,300,000 ลูกบาศก์เมตร พบปัญหาเชิงคุณภาพน้ำดิบ จากปัญหาน้ำเค็มรุกล้ำ น้ำด้อยคุณภาพ และสาหร่ายอุดตัน ทำให้โรงงานผลิตน้ำที่ได้รับผลกระทบจากปัญหาคุณภาพน้ำดิบไม่สามารถผลิตน้ำเต็มประสิทธิภาพตามที่ได้วางแผนไว้ โดยมีโรงงานผลิตน้ำมหาสวัสดิ์ที่ไม่พบปัญหาด้านคุณภาพน้ำดิบ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องรักษาเสถียรภาพของกระบวนการผลิตน้ำประปา แต่ปัจจุบันพบปัญหาความเสียหายของเครื่องจักรสูงขึ้น ทำให้ความพร้อมใช้งานของกระบวนการผลิตน้ำประปาลดลง ซึ่งงานวิจัยนี้ เป็นการนำเสนอการเพิ่มความพร้อมการใช้งานเครื่องจักรของกระบวนการกรองน้ำในกระบวนการผลิตน้ำประปา โดยพิจารณารูปแบบการทำงานแต่ละระบบของกระบวนการกรองน้ำ เพื่อหาสาเหตุของความเสียหายของเครื่องจักรและความสัมพันธ์ความเสียหายของเครื่องจักรกับความสูญเสียใหญ่ 6 ประการ นำเสนอสมการในการหาค่าความพร้อมใช้งาน และแนวทางวิธีการปรับปรุง ผลการศึกษา พบว่าความพร้อมใช้งานเครื่องจักรของกระบวนการกรองน้ำ เพิ่มขึ้น 0.30% 1.29% 1.97% และ 4.95% และกำลังการผลิตน้ำ เพิ่มขึ้น 9,401.55 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน 12,675.18 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน 15,041.94 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน และ 23,290.99 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน

คำสำคัญ ความสูญเสียใหญ่ 6 ประการ กระบวนการผลิตน้ำ กระบวนการกรองน้ำ

Abstract

The network of water production to supply Bangkok, Nonthaburi, and Samutprakarn; with 6,300,000 cubic meters per day; found raw water quality problems from saltwater encroachment, poor-quality water, and clogged algae. problems affected the water plants cannot produce water with total planned. The Mahasawat water treatment plant has no problems with raw water quality—that is necessary to maintain the stability of the water supply process. Recently, there is a growing issue of machinery damage that diminishes capacity of the water production process. This research demonstrated the improvement—of machinery availability for water filtration in the water production process. This research was investigated the cause of machine damage, the relationship between machine damage and the six big losses in each system of the water filtration and

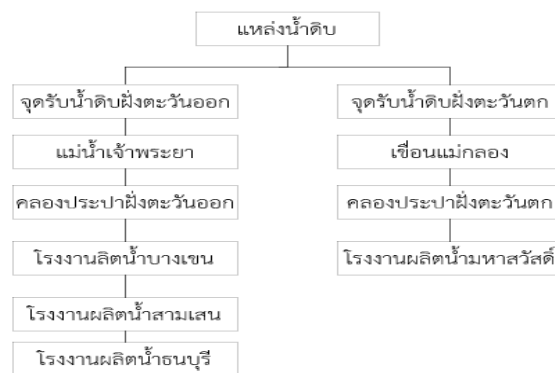


determined; the equation for the capacity and improved approach. The results showed that the machinery capacity of the water filtration process increased by 0.30%, 1.29%, 1.97%, and 4.95%, and the water production capacity increased by 9,401.55 cubic meters/day, 12,675.18 cubic meters/day, 15,041.94 cubic meters/day, and 23,290.99 cubic meters/day.

Keywords: Six Big Losses, The Water Production Process, Water filtration process

1. บทนำ

การผลิตน้ำประปาเพื่อใช้อุปโภค ตามแผนน้ำประปาปลอดภัย (Water Safety Plans : WSP) ตามแนวทางขององค์การอนามัยโลก (World Health Organization : WHO) และเป้าหมายของการพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable Development Goals : SDGs) เป้าหมายที่ 6 ของการบริหารจัดการน้ำสะอาดและสุขอนามัยอย่างยั่งยืน [1]-[2] ในพื้นที่กรุงเทพมหานคร นนทบุรี และสมุทรปราการ โดยโครงข่ายกำลังการผลิตน้ำประปารวม 6,300,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวันเพื่อรองรับปริมาณการใช้น้ำประปาของประชากรกว่า 12 ล้านคน [3] โครงข่ายของการผลิตน้ำประปาจากโรงงานผลิตน้ำจาก 4 แห่ง คือ 1.โรงงานลิตน้ำบางเขน 2.โรงงานผลิตน้ำสามเสน 3.โรงงานผลิตน้ำธนบุรี รับน้ำดิบจากแม่น้ำเจ้าพระยาลำเลียงผ่านคลองประปาระยะทาง 37 กิโลเมตร และ 4. โรงงานผลิตน้ำมหาสวัสดิ์ รับน้ำดิบจากเขื่อนแม่กลอง ลำเลียงผ่านคลองประปา ระยะทาง 107 กิโลเมตร ดังแสดงในรูปที่ 1 ปัจจุบันพบปัญหาเชิงคุณภาพของน้ำดิบจากแม่น้ำเจ้าพระยา [3]-[5] จากปัญหาน้ำเค็มรุกล้ำ น้ำด้อยคุณภาพ และสาหร่ายอุดตันของบ่อกรองสูง ส่งผลกระทบต่อกำลังการผลิตน้ำประปาของโรงงานลิตน้ำบางเขน โรงงานผลิตน้ำสามเสน โรงงานผลิตน้ำธนบุรี ไม่สามารถผลิตน้ำประปาน้ำได้เต็มประสิทธิภาพตามที่ได้วางแผนไว้ จากปัญหาคุณภาพน้ำดิบจำเป็นต้องอาศัยกำลังการผลิตน้ำประปาจากโรงงานผลิตน้ำมหาสวัสดิ์ เป็นโรงงานผลิตน้ำประปาที่ไม่ได้รับผลกระทบจากปัญหาเชิงคุณภาพของน้ำดิบเพื่อให้การผลิตน้ำประปาให้เพียงพอต่อปริมาณน้ำประปาที่ต้องการ ดังนั้น โรงงานผลิตน้ำมหาสวัสดิ์ จึงมีความสำคัญ และจำเป็นต้องรักษาเสถียรภาพของกระบวนการผลิตน้ำประปาแต่ในปัจจุบัน โรงงานผลิตน้ำมหาสวัสดิ์ ซึ่งมีกำลังการผลิตน้ำประปาสูงสุดวันละ 1,680,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน พบปัญหาเกี่ยวกับเสถียรภาพของกระบวนการผลิตน้ำประปาเนื่องจากความเสียหายของเครื่องจักรสูงขึ้น [6] ทำให้ความพร้อมใช้งาน



รูปที่ 1 แหล่งน้ำดิบของโครงข่ายกำลังการผลิตน้ำประปา

เครื่องจักรของกระบวนการผลิตน้ำลดลง ซึ่งในทุก ๆ 1% ของความพร้อมใช้งานเครื่องจักรของกระบวนการผลิตน้ำที่ลดลง ทำให้เกิดความสูญเสียของกำลังการผลิต 16,800 ลูกบาศก์เมตร หรือมูลค่าความสูญเสีย 201,600 บาท โดยโรงงานผลิตน้ำมหาสวัสดิ์ พบความเสียหายเครื่องจักรบ่อยครั้ง ในกระบวนการกรองน้ำ ทำให้เป็นกระบวนการคอขวดของกระบวนการผลิตน้ำประปา

งานวิจัยนี้ เป็นการนำเสนอการเพิ่มความพร้อมการใช้งานเครื่องจักรของกระบวนการกรองน้ำในกระบวนการผลิตน้ำประปา โดยพิจารณารูปแบบการทำงานแต่ละระบบของกระบวนการกรองน้ำ เพื่อหาสาเหตุของความเสียหายของเครื่องจักรและความสัมพันธ์ความเสียหายของเครื่องจักรกับความสูญเสียใหญ่ 6 ประการ (Six Big Losses) นำเสนอสมการในการหาค่าความพร้อมใช้งาน และแนวทางวิธีการปรับปรุง

2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 ความพร้อมใช้งาน (Availability : A)

ความพร้อมใช้งาน เป็นหนึ่งในหลักการของการวัดค่าประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องจักร (Overall Equipment Effectiveness : OEE) หลักการในการวัดความพร้อมใช้งานของเครื่องจักร เกี่ยวข้องกับเวลารับภาระงาน และเวลาสูญเสีย



เปล่าเครื่องจักร [7] สามารถคำนวณความพร้อมใช้งาน ดังแสดงในสมการที่ (1)

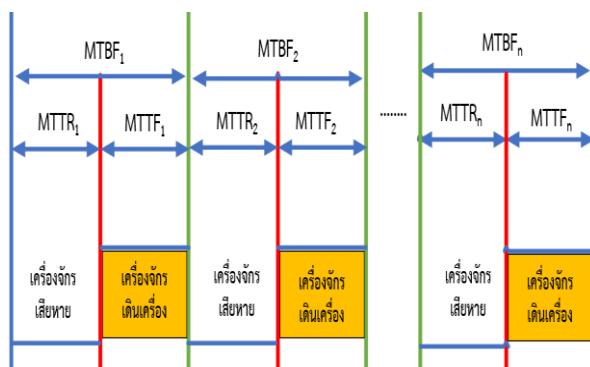
$$A = \frac{t_{it} - t_{mlt}}{t_{it}} \quad (1)$$

เมื่อ A คือ ความพร้อมใช้งาน

t_{it} คือ เวลาให้บริการงาน (Loading Time)

t_{mlt} คือ เวลาสูญเสียเปล่าของเครื่องจักร (Machine Losses Time)

ความพร้อมใช้งาน มีความสัมพันธ์กับตัวแปร 3 ตัวแปรในเชิงเวลา [8] คือ 1.เวลาเฉลี่ยระหว่างการเสียหาย (Mean Time Between Failure : MTBF) เป็นเวลาเฉลี่ยระหว่างการเสียหายของเครื่องจักรในแต่ละรอบของการทำงาน 2.เวลาเฉลี่ยก่อนการเสียหาย (Mean Time To Failure : MTTF) เป็นเวลาเฉลี่ยในการเดินเครื่องจักรตามหน้าที่ หลังจากการซ่อมบำรุง จนถึงเกิดการเสียหายของเครื่องจักรรอบใหม่ ในแต่ละรอบของการทำงาน และ 3.เวลาเฉลี่ยในการซ่อม (Mean Time To Repair : MTTR) เป็นเวลาเฉลี่ยในการซ่อมบำรุง เพื่อให้เครื่องจักรสามารถกลับมาใช้งานได้ตามหน้าที่ดั้งเดิม ในแต่ละรอบของการทำงาน ความสัมพันธ์ MTBF MTTF และ MTTR ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ MTBF MTTF และ MTTR [8]

2.2 ความพร้อมใช้งานของระบบ (System Availability : A_s)

ความพร้อมใช้งานของระบบ เป็นการพิจารณาความพร้อมใช้งานของระบบ โดยระบบที่ประกอบด้วยหลาย ๆ ระบบที่เป็นการทำงานร่วมกันแบบอนุกรม ผลรวมของความพร้อมใช้งานของระบบสามารถคำนวณจากผลคูณของทุก ๆ ระบบ [9]-[10] สามารถหาความพร้อมใช้งานของระบบอนุกรม ดังแสดงในสมการที่ (2)

$$A_s = \prod_{x=1}^n A_x \quad (2)$$

เมื่อ A_s คือ ความพร้อมใช้งานรวมของทุกระบบ

A_x คือ ความพร้อมใช้งานของแต่ละระบบ

s คือ สัญลักษณ์ตัวแปรของระบบ

x คือ สัญลักษณ์ตัวแปรจาก 1 ถึง n

n คือ สัญลักษณ์ตัวแปรของจำนวนระบบทั้งหมด

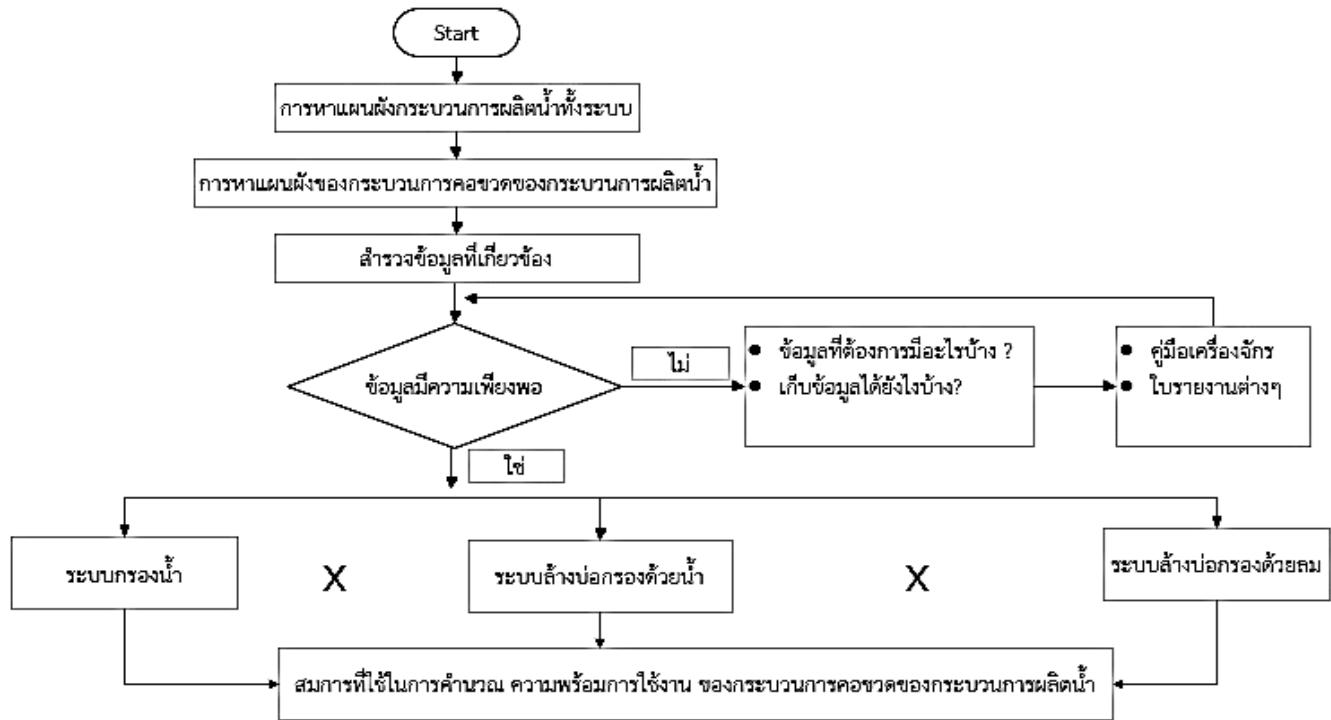
2.3 ความสูญเสียใหญ่ 6 ประการ

คำจำกัดความสูญเสียใหญ่ 6 ประการ [6] ที่เกิดขึ้นในโรงงานอุตสาหกรรม คือ 1.การสูญเสียเวลาจากความเสียหายของเครื่องจักร (Failure/Breakdown Losses) 2.การสูญเสียเวลาตั้งค่า หรือการปรับแต่ง (Set-up/Adjustment Time Losses) 3.การสูญเสียเวลาที่ไมทำงาน และสูญเสียเวลาหยุดเล็กน้อย (Tdling and Minor Stop Losses) 4.การสูญเสียเวลาจากการลดความเร็ว (Reduced Speed Losses) 5.การสูญเสียเวลาจากช่วงเริ่มต้นผลิต (Startup Losses) 6.การสูญเสียเวลาจากการผลิตของเสีย และการแก้ไข (Defects and Rework Losses)

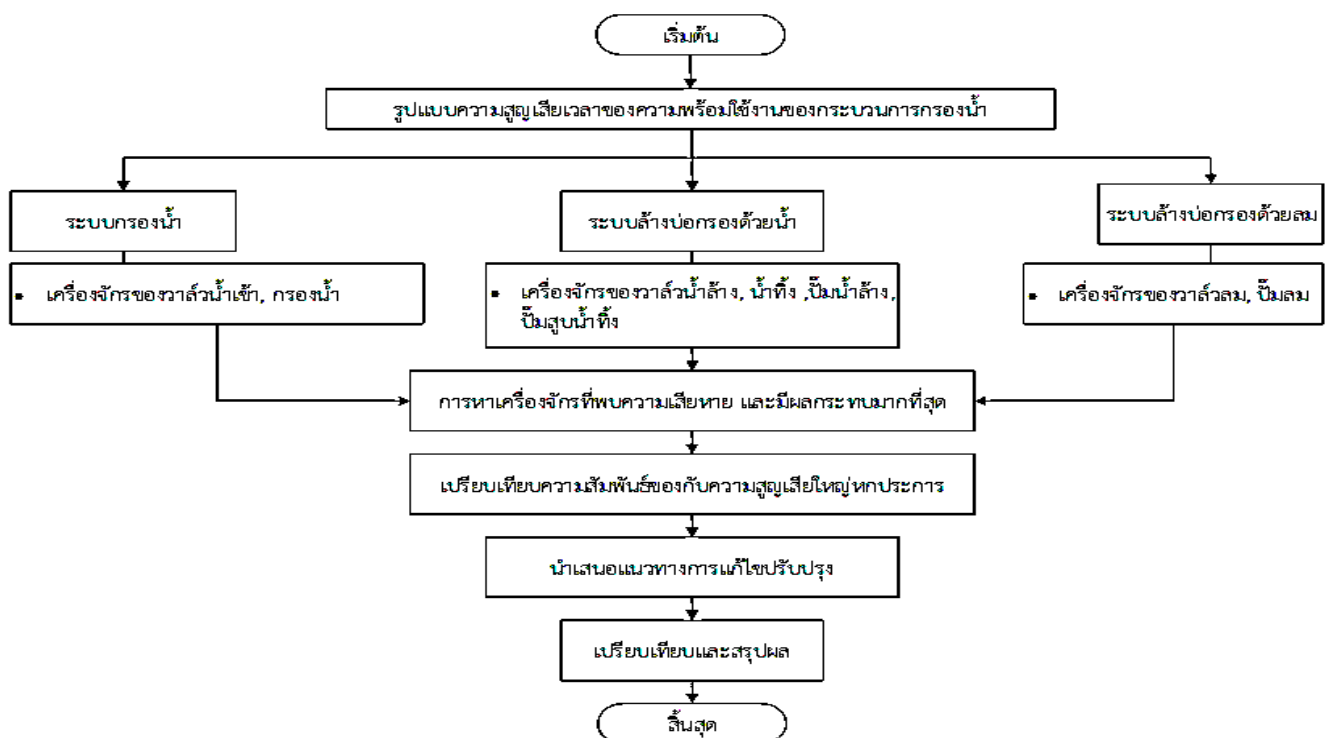
ในแต่ละภาคอุตสาหกรรม ค่าความพร้อมใช้งานจะมีค่าแตกต่างกันของแต่ละอุตสาหกรรม [11]-[14] ดังนั้นการวัดค่าความพร้อมใช้งานของกระบวนการ ต้องอาศัยข้อมูลต่าง ๆ ของกระบวนการผลิตและข้อมูลเกี่ยวกับความเสียหายของเครื่องจักร มาคำนวณค่าความพร้อมใช้งาน เพื่อที่สะท้อนค่าที่เป็นจริง จากการเก็บข้อมูล การวิเคราะห์ และการแยกแยะความสูญเสียที่เกิดขึ้นจริง เพื่อนำไปประยุกต์หาแนวทางในการปรับปรุงของกระบวนการผลิตของในแต่ละอุตสาหกรรม

2.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้ เพื่อเพิ่มความพร้อมใช้งานเครื่องจักรของกระบวนการกรองน้ำ ทำให้สามารถเพิ่มกำลังการผลิตน้ำประปาได้มากขึ้น ของโรงงานผลิตน้ำมหาสวัสดิ์ โดยแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรก เป็นการนำเสนอขั้นตอนในการสร้างแผนผังของกระบวนการผลิตน้ำ การสำรวจข้อมูลและสมการในการหาความพร้อมใช้งานของระบบที่ใช้ในงานวิจัย ดังแสดงในรูปที่ 3 ขั้นตอนที่สอง เป็นการนำเสนอขั้นตอนการหารูปแบบความสูญเสียเวลาของความพร้อมใช้งานเครื่องจักรของกระบวนการกรองน้ำ สาเหตุ การปรับปรุงและเปรียบเทียบสรุปผลการศึกษาวิจัย ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 3 ขั้นตอนการสร้างแผนผังของกระบวนการผลิตน้ำประปา และสมการในการหาความพร้อมการใช้งาน



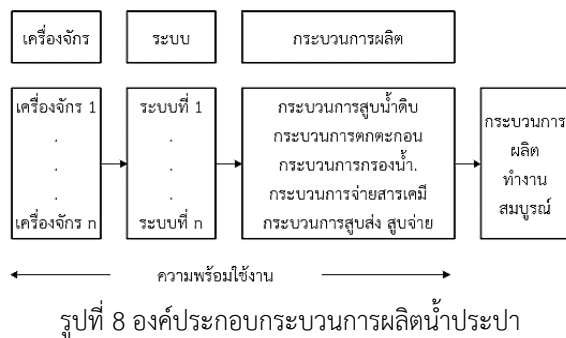
รูปที่ 4 ขั้นตอนการหารูปแบบความสูญเสีย การปรับปรุง และเปรียบเทียบสรุปผลการศึกษาวิจัย



2.5 โรงงานผลิตน้ำมหาสวัสดิ์

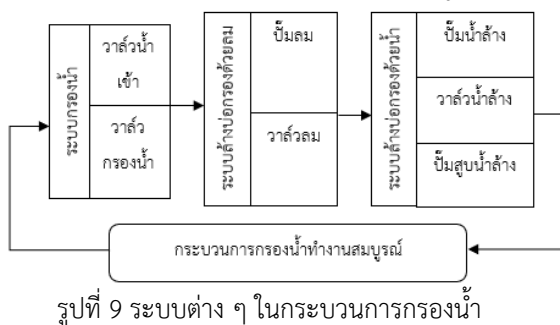
2.5.1 ระบบต่าง ๆ ของกระบวนการกรองน้ำ

โรงงานผลิตน้ำมหาสวัสดิ์ แบ่งสายการผลิตน้ำประปา เป็น 4 สายการผลิตน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยประกอบด้วย กระบวนการหลัก 5 กระบวนการ คือ 1. กระบวนการสูบน้ำดิบ 2. กระบวนการตกตะกอน 3. กระบวนการกรองน้ำ 4. กระบวนการจ่ายสารเคมี และ 5. กระบวนการสูบส่ง สูบจ่าย สามารถเขียนแผนผังกระบวนการผลิตน้ำประปา ดังแสดงในรูปที่ 6 และจำนวนระบบที่ต้องการในแต่ละ กระบวนการผลิตน้ำประปา ดังแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งแต่ละ กระบวนการผลิตน้ำประปามีองค์ประกอบของเครื่องจักร และ ระบบต่าง ๆ เพื่อให้การทำงานสมบูรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 8



2.5.2 กระบวนการผลิตน้ำประปา และการนิยามเครื่องจักร ของกระบวนการกรองน้ำ

กระบวนการกรองน้ำ เป็นกระบวนการคอกวดของ กระบวนการผลิตน้ำประปา เนื่องจากมีปัญหาจากความเสียหายของเครื่องจักรบ่อยครั้ง ทำให้ความพร้อมการใช้งาน เครื่องจักรของกระบวนการกรองน้ำลดลง โดยกระบวนการ กรองน้ำ มีระบบที่เกี่ยวข้อง 3 ระบบ คือ ระบบกรองน้ำ ระบบล้างบ่อกรองด้วยลม และระบบล้างบ่อกรองด้วยน้ำ วงรอบการทำงานประมาณ 48 ชั่วโมง สามารถเขียนแผนผัง ระบบต่าง ๆ ของกระบวนการกรองน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 9

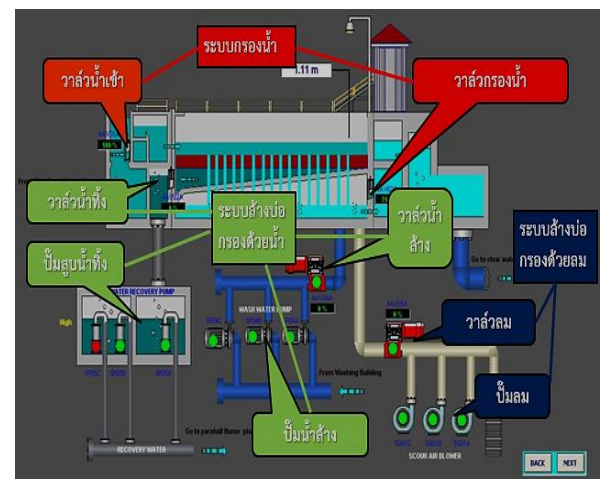


โดยกระบวนการกรองน้ำของโรงงานผลิตน้ำมหาสวัสดิ์ แต่ละสายการผลิตน้ำมีจำนวนกระบวนการกรองน้ำ และ กำลังการผลิต ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 กระบวนการกรองน้ำ ในแต่ละสายการผลิต

สายการผลิต	จำนวนกระบวนการกรองน้ำ (บ่อ)	การผลิตสูงสุด (ลบ.ม/วัน)
1	8	420,000
2	8	420,000
3	14	420,000
4	14	420,000

การทำงานสมบูรณ์ของแต่ละกระบวนการกรองน้ำ แต่ละบ่อกรอง ประกอบด้วยเครื่องจักรหลัก ดังแสดงในรูปที่ 10 และฟังก์ชันการทำงาน และค่าต่างๆ ในการควบคุม ทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 11 โดยมีงานที่เกี่ยวข้อง 4 ด้าน คือ งานด้านเครื่องวัด ไฟฟ้า เครื่องกล และระบบอัตโนมัติ ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกันในการทำงานให้สมบูรณ์



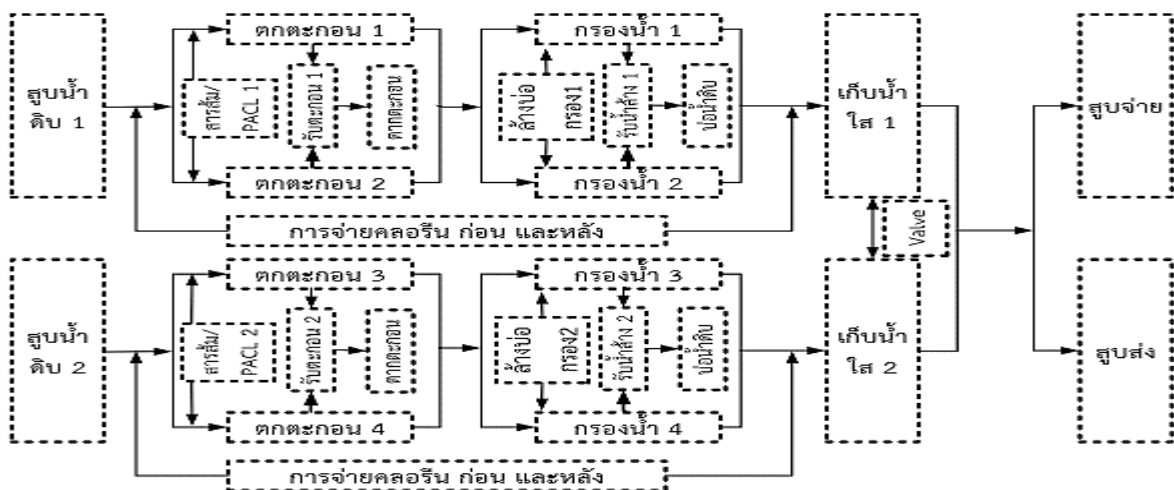
รูปที่ 10 เครื่องจักรหลักกระบวนการกรองน้ำ [15]



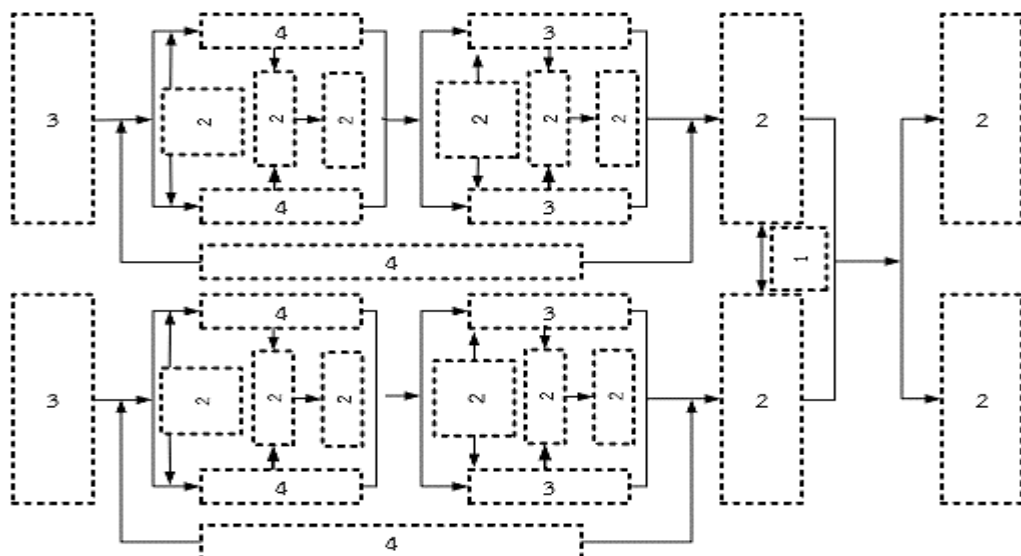
รูปที่ 11 ฟังก์ชันการทำงาน ในการควบคุมทำงานของ กระบวนการกรองน้ำ [15]



รูปที่ 5 กระบวนการผลิตน้ำประปา ของโรงงานผลิตน้ำมหาสวัสดิ์ [15]



รูปที่ 6 แผนผังกระบวนการผลิตน้ำประปา ของโรงงานผลิตน้ำมหาสวัสดิ์



รูปที่ 7 แผนผังจำนวนระบบที่ต้องการในแต่ละกระบวนการผลิตน้ำประปา



การนิยามเครื่องจักรแต่ละระบบของกระบวนการกรองน้ำ ประกอบด้วยเครื่องจักรหลักและอุปกรณ์สนับสนุนควบคุมต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 12-14 จำนวนเครื่องจักรในแต่ละระบบของกระบวนการกรองน้ำ ดังแสดงในตารางที่ 2 และหน้าที่การทำงานของเครื่องจักรแต่ละระบบของกระบวนการกรองน้ำ ดังแสดงในตารางที่ 3



(ก)



(ข)

รูปที่ 12 ตัวอย่างเครื่องจักรระบบล้างบ่อกรองด้วยน้ำ

(ก) เครื่องจักรหลัก (ข) อุปกรณ์สนับสนุนควบคุมต่าง ๆ [16]



(ก)



(ข)

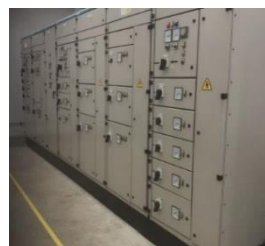


(ค)

รูปที่ 13 ตัวอย่างเครื่องจักรระบบกรองน้ำ (ก) เครื่องจักรหลัก (ข), (ค) อุปกรณ์สนับสนุนควบคุมต่าง ๆ [16]



(ก)



(ข)

รูปที่ 14 ตัวอย่างเครื่องจักรระบบล้างบ่อกรองด้วยลม

(ก) เครื่องจักรหลัก (ข) อุปกรณ์สนับสนุนควบคุมต่าง ๆ [16]

ตารางที่ 2 จำนวนเครื่องจักรทั้งหมด ของแต่ละระบบของกระบวนการกรองน้ำ ในแต่ละสายการผลิตน้ำ

สายการผลิต	กระบวนการกรองน้ำ (บ่อ)	ระบบกรองน้ำ (ชุด)	ระบบล้างบ่อด้วยน้ำ (ชุด)	ระบบล้างบ่อด้วยลม (ชุด)
1	8	108	57	60
2	8	108	57	60
3	14	162	87	78
4	14	162	87	78

ตารางที่ 3 หน้าที่การทำงานของเครื่องจักรในแต่ละระบบ

ประเภทของระบบ	หน้าที่
ระบบกรองน้ำ	เป็นระบบที่ใช้ในกรองน้ำ โดยมีเครื่องจักรหลัก และอุปกรณ์ประกอบที่สำคัญ คือ หัวขับไฟฟ้าและชุดเกียร์ขับของวาล์วน้ำเข้า-ออก และชุดควบคุมฟังก์ชันการใช้งาน
ระบบล้างบ่อกรองด้วยลม	เป็นระบบที่ใช้ในล้างบ่อกรองด้วยลม โดยมีเครื่องจักรหลัก และอุปกรณ์ประกอบที่สำคัญ คือ หัวขับไฟฟ้าและชุดเกียร์ขับของวาล์วลม บีมลม และชุดควบคุมฟังก์ชันการใช้งาน
ระบบล้างบ่อกรองด้วยน้ำ	เป็นระบบที่ใช้ในล้างบ่อกรองด้วยน้ำ โดยมีเครื่องจักรหลัก และอุปกรณ์ประกอบที่สำคัญ คือ หัวขับไฟฟ้าและชุดเกียร์ขับของวาล์วน้ำล้าง บีมสูบน้ำล้าง และชุดควบคุมฟังก์ชันการใช้งาน

2.6 การเปรียบเทียบผลการศึกษา และความพร้อมใช้งาน

การเปรียบเทียบผลการศึกษา และความพร้อมใช้งานของกระบวนการกรองน้ำ แบ่งเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้

2.6.1 กำลังการผลิตที่เพิ่มขึ้น

กำลังการผลิตที่เพิ่มขึ้น โดยเปรียบเทียบกำลังการผลิตของบ่อกรองน้ำ ก่อนและหลังการปรับปรุง ของแต่ละสายการผลิตน้ำ ดังแสดงในสมการ (3)

$$Q_{inc} = \sum_{i=1}^n Q_{out,i,after} - Q_{out,i,before} \quad (3)$$

เมื่อ Q_{inc} คือ กำลังการผลิตที่เพิ่มขึ้น (ลบ.ม./วัน)

Q_{out} คือ กำลังการผลิต (ลบ.ม./วัน)

i คือ จำนวนบ่อกรองน้ำ ในแต่ละสาย

การผลิต โดยที่ i=1-8 [สายการผลิต 1,2]

i = 1-14 [สายการผลิต 3,4]



2.6.2 ความพร้อมใช้งานของระบบในกระบวนการกรองน้ำ

กระบวนการกรองน้ำ สามารถแบ่งช่วงเวลานึ่งปีของการใช้งานของแต่ละระบบได้ ดังแสดงรูปที่ 15 จากสมการที่ (1) ความพร้อมใช้งานของแต่ละระบบ สามารถนิยามดังสมการที่ (4) - (10)

$$MTTR_x = T_{re,x} \quad (4)$$

$$T_{pm,x} = \sum_{i=1}^n (t_{pmpt,i,x} + t_{st,i,x}) \quad (5)$$

$$T_{re,x} = \sum_{i=1}^n (t_{rt,i,x} + t_{st,i,x}) \quad (6)$$

$$MTBF_x = T_{lt,x} - T_{pm,x} \quad (7)$$

$$MTTF_x = MTBF_x - MTTR_x \quad (8)$$

$$A_x = \frac{MTBF_x - MTTR_x}{MTBF_x} \times 100 \quad (9)$$

$$A_s = \prod_{x=1}^3 A_x \quad (10)$$

เมื่อ MTTR คือ เวลาเฉลี่ยในการซ่อม (นาท)

T_{pm} คือ เวลาเฉลี่ยบำรุงรักษาตามแผนของแต่ละระบบ (นาท)

t_{pmpt} คือ เวลาบำรุงรักษาเชิงป้องกันเฉลี่ยของแต่ละอุปกรณ์ (นาท)

t_{st} คือ เวลาตั้งค่าเฉลี่ยของแต่ละอุปกรณ์ (นาท)

T_{re} คือ เวลาเฉลี่ยซ่อมฉุกเฉินแต่ละระบบ (นาท)

t_{rt} คือ เวลาเฉลี่ยซ่อมของแต่ละอุปกรณ์ (นาท)

T_{lt} คือ เวลาเฉลี่ยนำระบบใช้งาน (นาท)

MTBF คือ เวลาเฉลี่ยระหว่างการเสียหาย (นาท)

MTTF คือ เวลาเฉลี่ยก่อนการเสียหาย (นาท)

A_x คือ ความพร้อมใช้งานของแต่ละระบบ (%)

A_s คือ ความพร้อมใช้งานของกระบวนการกรองน้ำในแต่ละสายการผลิต (%)

i, n คือ จำนวนเครื่องจักรในแต่ละระบบ แต่ละสายการผลิต ตามแสดงในตารางที่ 2

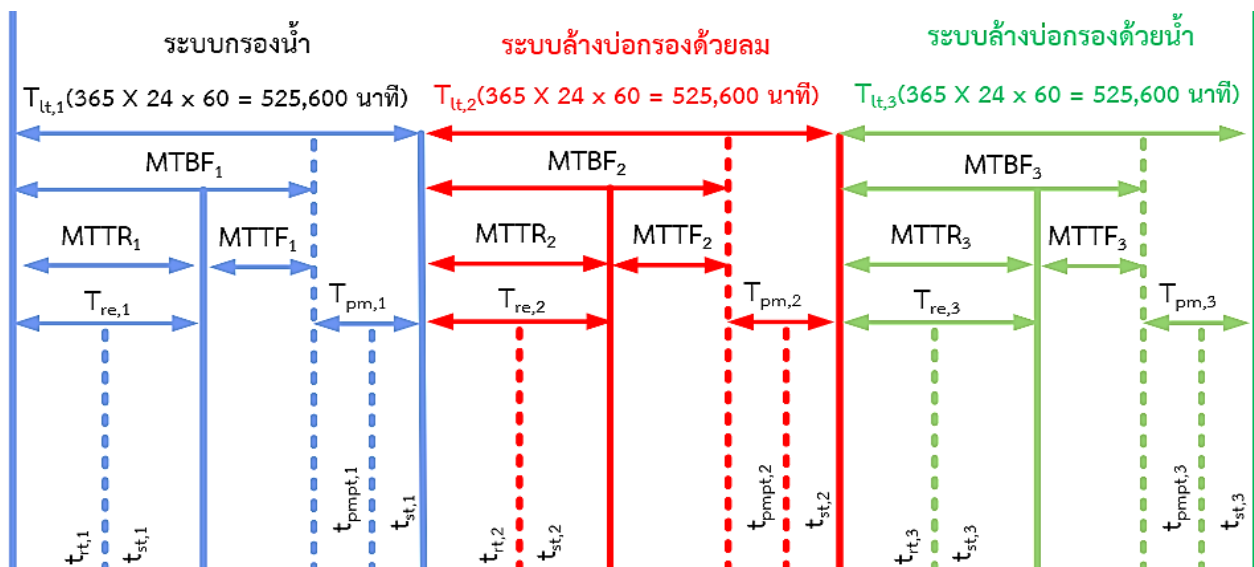
x คือ ระบบต่าง ๆ ในแต่ละกระบวนการกรองน้ำ โดยที่ $x = 1$ [ระบบกรองน้ำ]

2 [ระบบล้างบ่อกรองด้วยลม] และ

3 [ระบบล้างบ่อกรองด้วยน้ำ]

2.7 การเก็บข้อมูล

การเก็บข้อมูลของเครื่องจักรต่าง ๆ ตามตารางที่ 2 โดยแบ่งข้อมูล คือ 1. เวลาบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance: PM) 2. เวลาซ่อมฉุกเฉิน (Emergency repair) ประกอบด้วย 2.1 เวลาในการซ่อมฉุกเฉินของการบำรุงรักษาเชิงแก้ไขปรับปรุง (Corrective Maintenance: CM) 2.2 เวลาในการซ่อมฉุกเฉินของการบำรุงรักษาเชิงชำรุด (Breakdown Maintenance : BM) ข้อมูลที่ 1 จากแผนการบำรุงรักษา ข้อมูลที่ 2 จากระบบการจัดการงานบำรุงรักษาด้วยคอมพิวเตอร์ (Computer Maintenance Management System : CMMS) ระยะเวลาในการเก็บข้อมูล 1 ปีย้อนหลัง เพื่อหาค่าเฉลี่ยของข้อมูลต่าง ๆ และเก็บข้อมูล 1 ปี หลังจากการปรับปรุง เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลอง



รูปที่ 15 ช่วงเวลาหนึ่งปีของการใช้งานของแต่ละระบบ ในกระบวนการกรองน้ำ



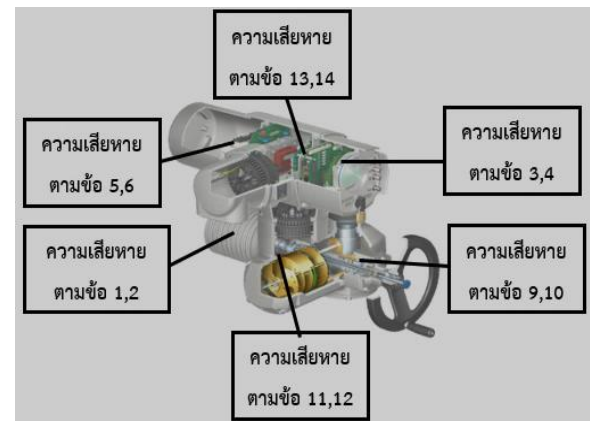
3. ผลการวิจัยและอภิปราย

จากศึกษาสามารถสรุปสาเหตุของการสูญเสียเวลาของเครื่องจักรของกระบวนการกรองน้ำ ดังแสดงในตารางที่ 4 เครื่องจักรที่พบความเสียหายมากที่สุด คือ หัวขับไฟฟ้า ซึ่งมีจำนวน 226 ชุด และเป็นเครื่องจักรที่ใช้ในทุกกระบวนการของกระบวนการกรองน้ำ

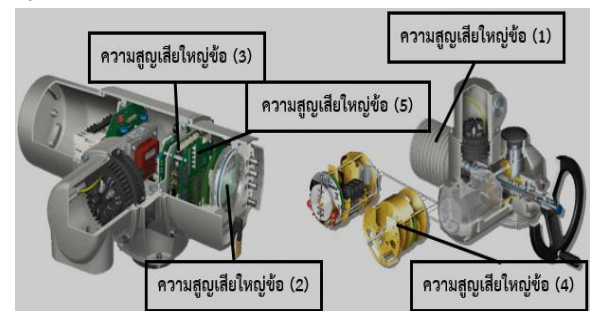
ตารางที่ 4 สาเหตุของการสูญเสียเวลาเนื่องจากความเสียหายของเครื่องจักร

ข้อ	รายละเอียด	งานด้าน
1	ชุดควบคุมมอเตอร์เสื่อมสภาพ	ไฟฟ้า
2	ชุดควบคุมมอเตอร์เสียหาย	
3	ชุดควบคุมอิเล็กทรอนิกส์เสื่อมสภาพ	
4	ชุดควบคุมอิเล็กทรอนิกส์เสียหาย	
5	ชุดอุปกรณ์ช่วยระบบไฟฟ้าเสื่อมสภาพ	
6	ชุดอุปกรณ์ช่วยระบบไฟฟ้าเสียหาย	
7	ชุดอุปกรณ์หลักระบบไฟฟ้าเสื่อมสภาพ	
8	ชุดอุปกรณ์หลักระบบไฟฟ้าเสียหาย	
9	ชุดอุปกรณ์หลักขับเคลื่อนทางกลเสื่อมสภาพ	เครื่องกล
10	ชุดอุปกรณ์หลักขับเคลื่อนทางกลเสียหาย	
11	สารหล่อลื่น ซีล เสื่อมสภาพ	ไฟฟ้า +
12	สารหล่อลื่น ซีล เสียหาย	
13	ระบบอัตโนมัติเสื่อมสภาพ	อัตโนมัติ
14	ระบบอัตโนมัติเสียหาย	

จากตารางที่ 4 สามารถสรุปความเสียหายของหัวขับไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 16 ความสูญเสียใหญ่ 6 ประการที่มีความสัมพันธ์กับหัวขับไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 17 และความสัมพันธ์ของการปรับปรุงกับความสูญเสีย ดังแสดงในตารางที่ 5



รูปที่ 16 ตัวอย่างความเสียหายของหัวขับไฟฟ้า [17]



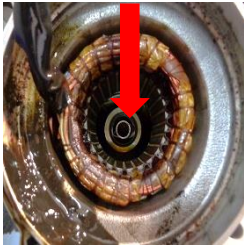
รูปที่ 17 ตัวอย่างของความสูญเสียใหญ่ 6 ประการที่มีความสัมพันธ์กับหัวขับไฟฟ้า [17]

ตารางที่ 5 ความสัมพันธ์ของการปรับปรุงกับความสูญเสีย รูปแบบปัญหา และแนวทางการปรับปรุง

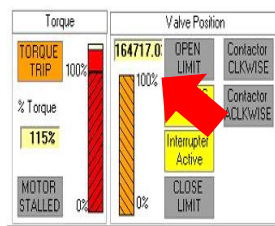
ความสูญเสียใหญ่ 6 ประการ	สาเหตุที่พบ	รูปแบบของ การแก้ไข	แนวทางการปรับปรุง
(1) การสูญเสียเวลาจากความเสียหายของเครื่องจักร	มอเตอร์ของหัวขับไฟฟ้าไหม้เนื่องจากซีลน้ำมันรั่ว เข้าไปห้องมอเตอร์	BM	ปรับแผนงาน กำหนดเวลาเปลี่ยนอุปกรณ์ ซีล ของมอเตอร์ของหัวขับไฟฟ้า
(2) การสูญเสียเวลาการตั้งค่าหรือ การปรับแต่ง	การตั้งค่าตำแหน่งของหัวขับไฟฟ้าหลังจากบำรุงรักษา	PM, CM,	จัดทำ เอกสารอธิบายรายละเอียดวิธีดำเนินงาน (Work Instruction)
(3) การสูญเสียเวลาที่ไม่ทำงาน และการสูญเสียเวลาหยุดเล็กน้อย	ฟั๊งก์ชันการทำงานของหัวขับไฟฟ้าเกิดผิดพลาด ทำให้ระบบอัตโนมัติ สั่งหยุดการทำงานของระบบ	PM, CM, BM	ปรับแผนงาน การตรวจสอบ ฟั๊งก์ชันการทำงานของหัวขับไฟฟ้า และจัดทำ เอกสารอธิบายรายละเอียดวิธีดำเนินงาน (Work Instruction)
(4) การสูญเสียเวลาจากการลดความเร็ว	% ของวาล์ว ไม่ตรงกับความเป็นจริงของกระบวนการผลิต	PM, CM	ปรับตั้งฟั๊งก์ชันควบคุม % ของวาล์วของชุดหัวขับไฟฟ้า ให้ตรงตามความเป็นจริง
(5) การสูญเสียเวลาจากช่วงเริ่มต้นผลิต	การผิดของชุดอุปกรณ์เครื่องกล ช่วงเริ่มต้นในแต่ละระบบ	PM, CM	ปรับแผนงาน กำหนดเวลาเปลี่ยนสารหล่อลื่น และการปรับตั้งตำแหน่ง
(6) การสูญเสียเวลาจากการผลิตของเสีย และการแก้ไข	ไม่มี เนื่องจากการผลิตน้ำ ไม่มีการเรียกคืนผลิตภัณฑ์	-	-



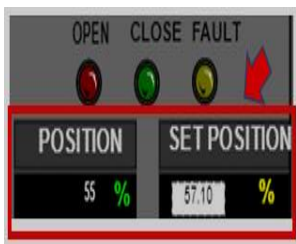
ผลการศึกษาของความสูญเสียใหญ่ 6 ประการที่พบกับ
หัวขับไฟฟ้าในระบบการกรองน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 18



(ก)



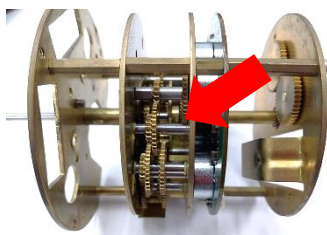
(ข)



(ค)



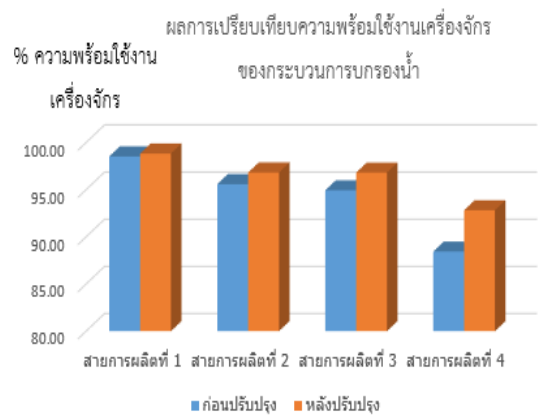
(ง)



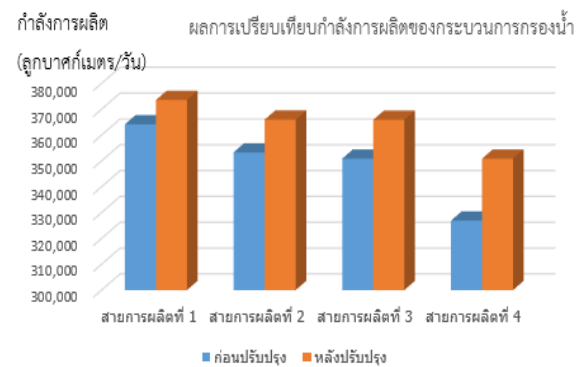
(จ)

รูปที่ 18 ตัวอย่างความสูญเสียใหญ่ 6 ประการที่พบกับหัวขับไฟฟ้าในระบบการกรองน้ำ (ก) การสูญเสียเวลาจากความเสียหายของเครื่องจักร (ข) การสูญเสียเวลาการตั้งค่าหรือ การปรับแต่ง (ค) การสูญเสียเวลาที่ไม่ทำงานและการสูญเสียเวลาหยุดเล็กน้อย (ง) การสูญเสียเวลาจากการลดความเร็ว (จ) การสูญเสียเวลาจากช่วงเริ่มต้นผลิต [17]

การคำนวณหาความพร้อมใช้งานเครื่องจักรของระบบต่าง ๆ ในระบบการกรองน้ำ ดังสมการที่ 4-10 และกำลังการผลิตที่เพิ่มขึ้น ดังสมการที่ 3 ผลการศึกษาการเปรียบเทียบความพร้อมใช้งานเครื่องจักรของระบบการกรองน้ำ แต่ละสายการผลิตน้ำประปา ก่อนและหลังจากการปรับปรุง ดังแสดงในรูปที่ 19 และกำลังการผลิตน้ำประปา ก่อนและหลังการปรับปรุง ดังแสดงในรูปที่ 20



รูปที่ 19 การเปรียบเทียบความพร้อมใช้งานเครื่องจักรของแต่ละสายการผลิต



รูปที่ 20 กำลังการผลิตน้ำ ก่อนและหลังการปรับปรุง

จากผลการศึกษา พบว่า ระบบการกรองน้ำ มีระบบที่เกี่ยวข้อง 3 ระบบ คือ ระบบกรองน้ำ ระบบล้างบ่อกรองด้วยลม และระบบล้างบ่อกรองด้วยน้ำ โดยระบบกรองน้ำพบความเสียหายของเครื่องจักรมากที่สุด คือ หัวขับไฟฟ้า ซึ่งองค์ประกอบของการทำงานจะเกี่ยวข้องกับงานด้านไฟฟ้า เครื่องกล และอัตโนมัติ เพื่อที่จะทำให้ระบบกรองน้ำทำงานได้อย่างสมบูรณ์ ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับหัวขับไฟฟ้าสามารถเปรียบเทียบกับความสูญเสียใหญ่ 6 ประการเพื่อหาแนวทางในการปรับปรุงความสูญเสียต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นสามารถสรุป ได้ดังนี้ คือ 1.การสูญเสียเวลาจากความเสียหายของเครื่องจักร เกี่ยวข้องกับการซ่อมฉุกเฉินของการบำรุงรักษาเชิงซำรุด สามารถใช้การปรับแผนงานกำหนดเวลาเปลี่ยนอุปกรณ์ ในการปรับปรุง 2. การสูญเสียเวลาการตั้งค่าหรือ การปรับแต่ง เกี่ยวข้องกับการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน และการบำรุงรักษาเชิงแก้ไขปรับปรุงสามารถใช้การจัดทำ เอกสารอธิบายรายละเอียดวิธีดำเนินงาน



ในการปรับปรุง 3.การสูญเสียเวลาที่ไม่ทำงานและการสูญเสียเวลาหยุดเล็กน้อยเกี่ยวข้องกับการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน การบำรุงรักษาเชิงแก้ไขปรับปรุง และ การซ่อมฉุกเฉินของการบำรุงรักษาเชิงชำรุด สามารถใช้การปรับแผนงาน การตรวจสอบ ฟังก์ชันการทำงานของหัวขับไฟฟ้า และจัดทำ เอกสารอธิบายรายละเอียดวิธีดำเนินงาน ในการปรับปรุง 4. การสูญเสียเวลาจากการลดความเร็วเกี่ยวข้องกับการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน และการบำรุงรักษาเชิงแก้ไขปรับปรุง สามารถใช้การปรับตั้งฟังก์ชันควบคุม % ของวาล์วของชุดหัวขับไฟฟ้า ให้ตรงตามความเป็นจริง 5. การสูญเสียเวลาจากช่วงเริ่มต้นผลิตเกี่ยวข้องกับการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน และการบำรุงรักษาเชิงแก้ไขปรับปรุง สามารถใช้การปรับแผนงาน กำหนดเวลาเปลี่ยนสารหล่อลื่น และการปรับตั้งตำแหน่ง และ 6. การสูญเสียเวลาจากการผลิตของเสีย และการแก้ไข ไม่พบความสูญเสีย เนื่องจากในกระบวนการผลิตน้ำประปาของโรงงานผลิตน้ำมหาสวัสดิ์ ผลิตน้ำประปาตามแผนน้ำประปาตลอดภัย ตามแนวทางขององค์การอนามัยโลก ไม่มีการเรียกคืนผลิตภัณฑ์

4. บทสรุป

การศึกษานี้ เป็นการนำเสนอการวิเคราะห์หาระบบต่าง ๆ ของกระบวนการผลิตน้ำประปาของโรงงานผลิตน้ำมหาสวัสดิ์ โดยศึกษากระบวนการคอกวด ของกระบวนการผลิตน้ำ คือ กระบวนการกรองน้ำ ซึ่งประกอบด้วย 3 ระบบ คือ ระบบกรองน้ำ ระบบล้างบ่อกรองด้วยลม ระบบล้างบ่อกรองด้วยน้ำ โดยมีเครื่องจักร ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง โดยการพิจารณารูปแบบช่วงเวลาการทำงานในแต่ละระบบ เพื่อใช้ในการนำเสนอสมการในการหาค่าความพร้อมใช้งาน เครื่องจักรของกระบวนการกรองน้ำในแต่ละสายการผลิตน้ำ และนำเสนอความสัมพันธ์ของความเสียหายของเครื่องจักร กับความสูญเสียใหญ่ 6 ประการ พร้อมทั้งนำเสนอแนวทางการปรับปรุง พบว่าในกระบวนการกรองน้ำ เครื่องจักรที่มีความเสียหายมากที่สุด คือ หัวขับไฟฟ้า ซึ่งมีหน้าที่ในการควบคุมการ เปิด-ปิด ของวาล์วต่าง ๆ ในระบบต่าง ๆ ของกระบวนการกรองน้ำ ความถี่ของความเสียหายที่พบจะแตกต่างกันกับความถี่ของการใช้งาน ซึ่งหัวขับไฟฟ้าที่มีความเสียหายมากที่สุด คือ หัวขับไฟฟ้าที่ควบคุมวาล์วกรองน้ำซึ่งอยู่ในระบบกรองน้ำ เนื่องจากมีความถี่ในการทำงาน

มากที่สุด เพื่อปรับปริมาณน้ำที่กรองในระบบกรองน้ำ ผลการศึกษาการเพิ่มความพร้อมการใช้งานเครื่องจักรและกำลังการผลิตน้ำ ของกระบวนการกรองน้ำ ดังแสดงในตารางที่ 6 และตารางที่ 7

ตารางที่ 6 ความพร้อมการใช้งานเครื่องจักรก่อน และหลังการปรับปรุงของกระบวนการกรองน้ำ

สายการผลิตที่	ความพร้อมใช้งานเครื่องจักร(%)		ความพร้อมใช้งานเครื่องจักรที่เพิ่มขึ้น(%)
	ก่อน	หลัง	
1	98.53	98.82	0.3
2	95.59	96.82	1.29
3	94.93	96.80	1.97
4	88.44	92.82	4.95

ตารางที่ 7 กำลังการผลิตน้ำก่อน และหลังการปรับปรุงของกระบวนการกรองน้ำ

สายการผลิตที่	กำลังการผลิตน้ำ (ลบ.ม/วัน)		กำลังการผลิตน้ำที่เพิ่มขึ้น(ลบ.ม/วัน)
	ก่อน	หลัง	
1	364,155	373,556	9,401.55
2	353,294	365,970	12,675.18
3	350,877	365,919	15,041.94
4	326,867	350,858	23,290.99

สำหรับการศึกษาในอนาคต ผู้เขียนมีแนวคิดในการศึกษาปัจจัยที่เป็นสาเหตุของความเสียหาย และความสัมพันธ์ของช่วงเวลาการใช้งานของหัวขับไฟฟ้า ในช่วงเวลาตลอดอายุการใช้จริงของหัวขับไฟฟ้า เพื่อเป็นแนวทางในการบริหารจัดการหัวขับไฟฟ้า ซึ่งเป็นเครื่องจักรที่ใช้งานกันอย่างแพร่หลายในหลาย ๆ อุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมปิโตรเคมี อุตสาหกรรมการผลิตไฟฟ้า อุตสาหกรรมอาหาร รวมถึงอุตสาหกรรมที่มีการควบคุมด้วยระบบอัตโนมัติ เป็นต้น

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอแสดงความขอบคุณเป็นพิเศษสำหรับ โรงงานผลิตน้ำมหาสวัสดิ์ ที่สนับสนุนข้อมูลในการวิจัยครั้งนี้



6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Hsu CC. The role of the core competence and core resource features of a sharing economy on the achievement of SDGs 2030. *J Innov Knowledge* 2023; 8(1): 100283-1-10.
- [2] Mulligan M, Soesbergen AV, Hole DG, Brooks TM, Burke S, Hutton J. Mapping nature's contribution to SDG 6 and implications for other SDGs at policy relevant scales. *J Remote Sens Environ.* 2020;239:111671-1-10.
- [3] Water Resource and Environment Department. The Crisis of Water Quality change to a real time Raw Water Quality Monitoring System. Metropolitan Waterworks Authority Report. 2021. p. 1-3. Thai.
- [4] Butsangdee W, Thaisiam W, Kanasut J. Salinity Intrusion Analysis in the Chao Phraya River. In: *Proceedings of the 14th THAICID National e-Symposium*. 2021. p. 72-3. Thai.
- [5] Lapnimitchai C, Thaisiam W, Kanasut J. Hourly Salinity Prediction at Sumlae Pumping Station Using Hourly Water Level Data. In: *Proceedings of the 14th THAICID National e-Symposium*. 2021. p. 95-6. Thai.
- [6] Kigsirisin S, Pussawiro S, Noohawm O. Approach for Total Productive Maintenance Evaluation in Water Productivity: A Case Study at Mahasawat Water Treatment Plant. *Procedia Eng.* 2016;154:260-7.
- [7] Chikwendu OC, Chima AS, Edith MC. The optimization of overall equipment effectiveness factors in a pharmaceutical company. *Heliyon J.* 2020; 6:e03796-1-10.
- [8] Colak AB, Sindhu TN, Lone SA, Shafiq A, Abushal TA. Reliability study of generalized Rayleigh distribution based on inverse power law using artificial neural network with Bayesian regularization. *Tribol Int J.* 2023; 185: 108544-1-16.
- [9] Simon DF, Teixeira M, Costa JP. Availability estimation in photovoltaic generation systems using Timed Petri Net simulation models. *Int J Electr Power Energy Syst.* 2022; 137: 106897-1-8.
- [10] Vidson JD. The reliability of mechanical systems. Mechanical Engineering Publications Limited for The Institution of Mechanical Engineers LONDON. 1988. p. 48-49.
- [11] Moreira A, Silva FJ, Correia AI, Pereira T, Ferreira LP, De Almeida F. Cost reduction and quality improvements in the printing industry. *Procedia Manuf.* 2018;17:623-30.
- [12] Chikwendu OC, Chima AS, Edith MC. The optimization of overall equipment effectiveness factors in a pharmaceutical company. *Heliyon J.* 2020; 6:e03796-1-10.
- [13] Relkar AS, Nandurkar KN. Optimizing & Analysing Overall Equipment Effectiveness (OEE) Through Design of Experiments (DOE). *ICMOC 2012: Procedia Eng.* 2012; 38:2973-80.
- [14] Hedman R, Subramaniyan M, Almström P. Analysis of Critical Factors for Automatic Measurement of OEE. *CIRP-CMS 2016: Procedia CIRP.* 2016; 57:128-133.
- [15] Production Department. The Procedure of Water Treatment Process. 2018.Thai
- [16] Maintenance Department. The Procedure of Machine Equipment Maintenance. 2017.Thai
- [17] Maintenance Department. The Root Cause of Electric Actuator Failure and Overhaul. Maintenance Report. 2019.Thai.

อิทธิพลของค่าโมดูลัสความละเอียด ปริมาณเส้นใยโพลิโพรพิลีน และปริมาณโฟมต่อ หน่วยน้ำหนักแห้ง และกำลังของจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลิโพรพิลีน

Influence of Fineness Modulus Values, Polypropylene Fibers Contents, and Air Foam Contents on Dry Unit Weight and Strengths of Lightweight Geopolymer Reinforced Polypropylene Fibers

ปิยธิดา อยู่สุข^{1*}, เชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒน์พงศ์¹

¹ วิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

744 ถนนสุรนารายณ์ อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา 30000

Piyathida Yoosuk^{1*}, Cherdsak Suksiripattanapong¹

¹ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan

744 Suranarai Road, Muang, Nakhon Ratchasima, Thailand, 30000

*ผู้รับผิดชอบบทความ: Piyathida.yo@rmu.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 08-7240-5300

Received: 23 November 2023, Revised: 1 February 2024, Accepted: 24 February 2024

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของโมดูลัสความละเอียดต่อหน่วยน้ำหนักแห้ง กำลังอัด และกำลังดัดของจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลิโพรพิลีน โดยใช้เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน กำหนดค่าโมดูลัสความละเอียดของทรายเท่ากับ 1.6, 1.45 และ 1.3, ปริมาณเส้นใยโพลิโพรพิลีนเท่ากับร้อยละ 0, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 และ 3 โดยน้ำหนักของเถ้าลอย, ปริมาณโฟมเท่ากับ ร้อยละ 0, 1 และ 2 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน, อัตราส่วนเถ้าลอยต่อทรายเท่ากับ 1, อัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.55 และอัตราส่วนระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เท่ากับ 50:50 ผลการทดสอบพบว่าหน่วยน้ำหนักแห้งมีค่าลดลงตามปริมาณเส้นใยโพลิโพรพิลีน และอัตราส่วนฟองโฟมที่เพิ่มขึ้น ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งต่ำสุดพบที่ค่าโมดูลัสความละเอียดที่ 1.6, ปริมาณเส้นใยโพลิโพรพิลีนเท่ากับร้อยละ 3 โดยน้ำหนักของเถ้าลอย ปริมาณโฟมเท่ากับร้อยละ 2 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ค่ากำลังอัดและกำลังดัดสูงสุดพบที่ค่าโมดูลัสความละเอียดของทราย เท่ากับ 1.45 กำลังดัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยโพลิโพรพิลีนที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเส้นใยควบคุมรอยแตกกว้าง และลดความกว้างของรอยแตก และกำลังดัดมีค่าลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยโพลิโพรพิลีนเพิ่มขึ้นจนถึงร้อยละ 3 เนื่องจากเส้นใยที่มากเกินไปจะเกิดการขัดกันภายในตัวอย่าง หน่วยน้ำหนักแห้ง และกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลิโพรพิลีนผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 2601-2556) โดยมีค่าหน่วยน้ำหนักแห้งอยู่ระหว่าง 701-1,600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และกำลังอัดมากกว่า 5 เมกะปาสกาล (51.0 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)

คำสำคัญ จีโอโพลิเมอร์มวลเบา โมดูลัสความละเอียด เถ้าลอย เส้นใยโพลิโพรพิลีน

Abstract

This paper investigated the influence of fineness modulus on dry weight, compressive strength and flexural strength of lightweight geopolymer reinforced polypropylene fibers. Geopolymer fly ash was used as a



cementitious material. The fineness modulus of sand was determined at 1.6, 1.45, and 1.3, polypropylene fibers contents of 0, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, and 3% by weight of fly ash, air foam contents (AF) of 0, 1, and 2% by weight of binder, fly ash to sand ratio was 1, the alkaline solution to binder ratio was 0.55, and the sodium silicate (Na_2SiO_3) to sodium hydroxide solution (NaOH) was 50:50. The results showed that the dry weight decreased with increasing polypropylene fiber contents and air foam contents. The lowest dry weight was found at a fineness modulus of 1.6, a polypropylene fiber content of 3% by weight of fly ash, and an air foam content of 2% by weight of binder. The maximum compressive strength and flexural strength were found at a fineness modulus of 1.45. The flexural strength increased by the enhancement of polypropylene fiber content due to fiber-controlling cracks and reduced crack width. The flexural strength decreased by increasing the polypropylene fiber contents up to 3% by weight of fly ash because the excess fibers induced the friction in sample. The dry weight and compressive strength of lightweight geopolymer reinforced polypropylene fibers was by the Thai Industrial Standards (TIS 2601-2013). The dry weight was between 701-1,600 kg/m^3 and the compressive strength was more than 5.0 MPa (51.0 kg/cm^2).

Keywords: Lightweight Geopolymer, Fineness Modulus, Fly Ash, Polypropylene Fibers

1. บทนำ

คอนกรีตมวลเบาเป็นหนึ่งในวัสดุก่อสร้างที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย คอนกรีตมวลเบาเป็นวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำ ซึ่งจะช่วยลดภาระน้ำหนักของโครงสร้าง เป็นฉนวนกันเสียง [1] และกันความร้อนได้ดี [2] โดยทั่วไปคอนกรีตมวลเบา มีหน่วยน้ำหนักแห้งประมาณ 320-1,920 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร [3] คอนกรีตมวลเบาแบ่งออกเป็น 3 ประเภทตามวัสดุผสม ได้แก่ คอนกรีตมวลรวมเบา (Lightweight Aggregate Concrete), คอนกรีตไม่มีส่วนละเอียด (No-fines Concrete) และคอนกรีตเติมฟองอากาศ (Aerated Concrete) โดยการผลิตคอนกรีตเติมฟองอากาศหรือโฟมคอนกรีต จำแนกออกเป็น 2 ระบบ คือคอนกรีตมวลเบาแบบบ่มด้วยไอน้ำ (Autoclaved Aerated Concrete, AAC) และคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส (Cellular Lightweight Concrete, CLC) ซึ่งมีกระบวนการผลิตที่ง่าย รวดเร็ว และใช้พลังงานน้อย [2]

ตัวแปรสำคัญที่มีบทบาทต่อคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบา คือ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ มวลรวมละเอียด และการเพิ่มปริมาณของมวลรวม การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของมวลรวม ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงขนาดคละ ลักษณะพื้นผิว ปริมาณ ขนาดใหญ่สุด และแร่ธาตุต่าง ๆ จะส่งผลต่อกำลังของคอนกรีตมวลเบา โดยคอนกรีตมวลเบาที่ใช้มวลรวมขนาด

ใหญ่มีความต้องการปริมาณน้ำน้อยกว่ามวลรวมขนาดเล็ก และมวลรวมละเอียดมีขนาดคละไม่เหมาะสม มีส่วนละเอียดมากเกินไป จะทำให้มีความต้องการน้ำมากกว่ามวลรวมที่มีขนาดคละดี โดยค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus, F.M.) จะบ่งบอกถึงลักษณะของทรายหยาบหรือละเอียด ค่าโมดูลัสความละเอียดต่ำของมวลรวมจะทำให้เกิดการยึดเกาะของพื้นที่ผิวสัมผัสของอนุภาคที่สูง [4] นอกจากนี้ขนาดของมวลรวมยังมีผลต่อความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบา เนื่องจากอนุภาคเล็กจะแทรกตัวในช่องว่างระหว่างวัสดุที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ ทำให้คอนกรีตมวลเบามีการอัดตัวแน่น [5]

อย่างไรก็ตามการผลิตคอนกรีตมวลเบามักใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นหลัก โดยอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ใช้พลังงานมาก และปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในปริมาณที่สูง โดยการผลิตเม็ดปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 1 ตัน ปล่อยก๊าซ CO_2 ประมาณ 0.9 ตัน คิดเป็นประมาณร้อยละ 5-8 ของการปล่อยก๊าซทั่วโลก [6] เนื่องจากการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปล่อยก๊าซเรือนกระจกจำนวนมากสู่ชั้นบรรยากาศ จึงทำให้การผลิตบล็อก CLC ไม่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

เพื่อลดการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จึงมีการใช้วัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม สำหรับเป็นวัสดุประสาน [2] ซึ่งเป็นสารตั้งต้นที่ได้จากแหล่งอะลูมิเนียมซิลิเกตที่เป็นของแข็ง

ประกอบด้วย ซิลิกาออกไซด์ อลูมินาออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์ ผสมเข้ากับสารอัลคาไลไฮดรอกไซด์/สารอัลคาไลซิลิเกต ส่งผลให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่เรียกว่า ‘จีโอโพลิเมอร์’ [7, 8] โดยจีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุอนินทรีย์ที่มีโครงสร้างสามมิติแบบอสัณฐาน ประกอบด้วยพันธะซิลอกโซ-เซียเลต (Si-O-Si-O-Si-O-Al) [9] แหล่งอะลูมิเนียมซิลิเกต ได้แก่ เมตาคาโอลินซึ่งเกิดจากการเผาดินขาวคาโอลินที่อุณหภูมิสูง, แก๊สลอยซึ่งเป็นผลพลอยได้ (By Product) จากโรงงานไฟฟ้าพลังงานความร้อน และตะกรันจากเตาหลอมเหล็กซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตเหล็ก เป็นต้น การใช้กากของเสียจากอุตสาหกรรมผลิตแก๊สลอยจีโอโพลิเมอร์ เพื่อทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แสดงคุณสมบัติที่ดี ได้แก่ กำลังรับแรงอัดสูง, ความหนาแน่นสูง, ความทนทานสูง, ความต้านทานการกัดกร่อนสูง และอื่น ๆ [10] แก๊สลอยสามารถจำแนกออกเป็น 2 ประเภทตามมาตรฐาน ASTM C618-19 ได้แก่ แก๊สลอยแคลเซียมต่ำ (Class F) และแก๊สลอยแคลเซียมสูง (Class C) โดยมีปริมาณ CaO มากกว่าร้อยละ 18 และมีผลรวมของ $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ มากกว่าร้อยละ 50 [11]

โดยทั่วไปจีโอโพลิเมอร์จะทนทานต่อการทำปฏิกิริยาจากสารเคมีและมีความเปราะ ทำให้เกิดรอยร้าว หากเสริมเส้นใย จีโอโพลิเมอร์จะต้านทานแรงดึงได้ดีกว่า และมีแนวโน้มลดการแตกร้าว ปัจจุบันมีการนำเส้นใยหลายประเภท ได้แก่ เส้นใยโพลิโพรพิลีน เส้นใยคาร์บอน เส้นใยหินบะซอลต์ เส้นใยโพลิไวนิลแอลกอฮอล์ และเส้นใยเหล็ก เป็นต้น มาปรับปรุงความแข็งแรงในการรับแรงดัด การดูดซับพลังงานและความทนทานได้อย่างมีประสิทธิภาพ [2] โดยเส้นใยโพลิโพรพิลีนถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากต้นทุนต่ำ ทนต่อการกัดกร่อน [12] การนำความร้อนต่ำ น้ำหนักเบา และทนต่อการทำปฏิกิริยาของกรดและด่าง [13]

2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของโมดูลัสความเค้นของทรายต่อหน่วยน้ำหนักแห้ง กำลังอัด และกำลังดัดของจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลิโพรพิลีน โดยใช้แก๊สลอยซึ่งเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมโรงงานไฟฟ้าพลังงานความร้อน นำมาผสมสารละลายอัลคาไลน์ (สารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์) โดยตัวแปรที่มีอิทธิพลใน

การศึกษาครั้งนี้คือ โมดูลัสความเค้นของทรายที่ 1.3 1.45 และ 1.6 ปริมาณเส้นใยโพลิโพรพิลีนที่ร้อยละ 0 0.5 1 1.5 2 2.5 และ 3 โดยน้ำหนักแก๊สลอย ปริมาณฟองโฟมที่ร้อยละ 0 1 และ 2 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน อัตราส่วนแก๊สลอยต่อทรายเท่ากับ 1 อัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 อัตราส่วนระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 50:50 โดยอัตราส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลิโพรพิลีนแสดงดังตารางที่ 1

วิเคราะห์หาขนาดผลของมวลรวมเค้นตามมาตรฐาน ASTM C33 [14] เริ่มจากนำตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 8 16 30 50 100 และรองด้วยตะแกรงมาวางซ้อนกัน วางตะแกรงมาตรฐานเบอร์ใหญ่อยู่ข้างบนสุด เรียงกันลงมาตามลำดับ เททรายลงบนตะแกรง และนำเข้าเครื่องร่อน โดยใช้เวลาประมาณ 10 นาที

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลิโพรพิลีน

ตัวแปร	อัตราส่วนผสม
โมดูลัสความเค้นของทราย	1.3 1.45 และ 1.6
ปริมาณเส้นใยโพลิโพรพิลีน	ร้อยละ 0 0.5 1 1.5 2 2.5 และ 3 โดยน้ำหนักแก๊สลอย
ปริมาณฟองโฟม	ร้อยละ 0 1 และ 2 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน
อัตราส่วนแก๊สลอยต่อทราย	1
อัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อวัสดุประสาน	0.55
อัตราส่วนผสมระหว่าง $Na_2SiO_3:NaOH$	50:50

งานวิจัยนี้นำผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักแห้ง และกำลังอัดตัวอย่างของจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลิโพรพิลีนมาเทียบเคียงกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 2601-2556) [15] เนื่องจากไม่มีมาตรฐานจีโอโพลิเมอร์มวลเบา โดย มอก. 2601-2556 กำหนดรายละเอียดของคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศสำหรับผนังที่ออกแบบไม่รับน้ำหนัก คอนกรีตบล็อกมวลเบาแบ่งตามหน่วย



น้ำหนักแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้ง และความต้านทานแรงอัดออกเป็น 8 ชนิด แสดงดังตารางที่ 2

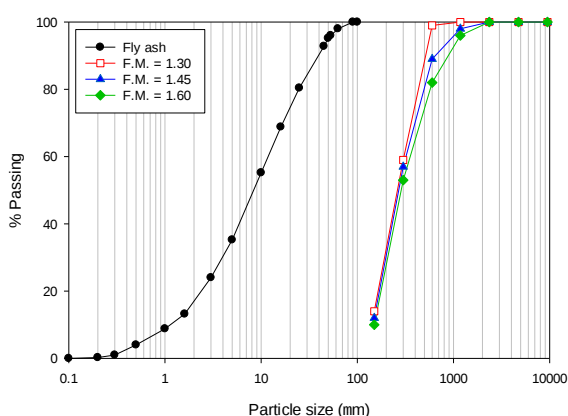
ตารางที่ 2 ชนิดของคอนกรีตบล็อกมวลเบา

ชนิด	หน่วยน้ำหนักแห้ง (กก./ลบ.ม.)	ความต้านทานแรงอัด ไม่น้อยกว่า
C6	500-600	2.0 เมกะปาสคาล (20.4 กก./ตร.ซม.)
C7	601-700	
C8	701-800	
C9	801-900	2.5 เมกะปาสคาล (25.5 กก./ตร.ซม.)
C10	901-1000	
C12	1001-1200	
C14	1201-1400	5.0 เมกะปาสคาล (51.0 กก./ตร.ซม.)
C16	1401-1600	

2.1 วัสดุ

เถ้าลอย (FA) เป็นผลพลอยได้จากโรงผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานความร้อน แม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.39 ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (D_{50}) เท่ากับ 8.41 ไมครอน ขนาดคละของเถ้าลอยแสดงดังรูปที่ 1 จำแนกเป็น Class C ตามมาตรฐาน ASTM C618-19 [4] (ปริมาณ SiO_2 , Al_2O_3 , และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 63.41, และ CaO เท่ากับร้อยละ 31.41) และองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแสดงดังตารางที่ 3

ทราย (S) มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.57 และค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 1.6 (ผ่านตะแกรงเบอร์ 8 ค้างตะแกรงเบอร์ 16), 1.45 (ผ่านตะแกรงเบอร์ 16 ค้างตะแกรงเบอร์ 30) และ 1.3 (ผ่านตะแกรงเบอร์ 30 ค้างตะแกรงเบอร์ 50) ตามลำดับ ขนาดคละของทรายแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขนาดคละของทราย และเถ้าลอย

เส้นใยโพลีโพรพิลีน (PPF) ได้รับความอนุเคราะห์จาก Ningyang Bangneng Engineering Materials Co., Ltd. มีลักษณะเป็นเส้นตรง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 30 ไมครอน, ความยาวเท่ากับ 10 มิลลิเมตร ค่า aspect ratio เท่ากับ 333.3 หน่วยน้ำหนักเท่ากับ 910 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และค่ากำลังรับแรงดึงเท่ากับ 500 เมกะปาสคาล

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมี

องค์ประกอบทางเคมี	เถ้าลอย (ร้อยละ)
SiO_2	45.44
Al_2O_3	10.53
Fe_2O_3	7.44
CaO	31.41
SO_3	2.02
K_2O	2.20
LOI*	0.96

*LOI, Loss of Ignition

สารอัลคาไลน์ (L) เป็นส่วนประกอบระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) มีอัตราส่วนระหว่าง Na_2O และ SiO_2 เท่ากับร้อยละ 9 และ 30 ตามลำดับ และงานวิจัยนี้เลือกใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 8 โมลาร์ เนื่องจากคำนึงถึงความปลอดภัยในการผสม ระหว่างการผสมอาจเกิดไอระเหยและการเดือดของสารละลายได้ [2] และอัตราส่วน $Na_2SiO_3:NaOH$ เท่ากับ 50:50 เนื่องจากหากใช้ Na_2SiO_3 ในปริมาณที่สูงจะทำให้ส่วนผสมมีความหนืด ซึ่งส่งผลให้ความสามารถในการทำงานลดลง [16]

ฟองโฟม (AF) อัตราส่วนสารเพิ่มฟองโฟมต่อน้ำเท่ากับ 1:40 มีความหนาแน่นอยู่ที่ 40-45 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

2.2 วิธีการดำเนินการวิจัย

นำเถ้าลอยกับทรายที่อัตราส่วนเท่ากับ 1 ผสมจนเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นเติมเส้นใยโพลีโพรพิลีนที่ร้อยละ 0, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 และ 3 โดยน้ำหนักของเถ้าลอย ผสมส่วนผสมแบบแห้งเป็นเวลา 5 นาที (รูปที่ 2(ก)) และนำมาผสมกับสารอัลคาไลน์ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่าง $Na_2SiO_3:NaOH$ เท่ากับ 50:50, ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 8 โมลาร์ และอัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อวัสดุประสาน

ที่ 0.55 สารอัลคาไลน์ผสมกับส่วนผสมแห้งเป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้ส่วนผสมเป็นเนื้อเดียวกัน (รูปที่ 2(ข)) จากนั้นเติมฟองโฟมลงในส่วนผสม โดยกำหนดอัตราส่วนผสมเพิ่มฟองโฟมต่อน้ำ 1:40 (รูปที่ 2(ค)) เติมนลงในเครื่องฉีดโฟมแบบอัดแรงดัน อัดแรงดันจนน้ำและสารเพิ่มฟองโฟมรวมตัวกัน เทฟองโฟมลงในส่วนผสม ผสมจนเป็นเนื้อเดียวกันเป็นเวลา 4 นาที เสร็จสิ้นกระบวนการผสม จากนั้นเทจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีนลงในแบบหล่อทรงลูกบาศก์ ที่มีขนาด $5 \times 5 \times 5$ เซนติเมตร และแบบหล่อทรงปริซึม ที่มีขนาด $4 \times 4 \times 16$ เซนติเมตร (รูปที่ 2(ง))



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 2 การผสมตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีน

หลังจากนั้นตัวอย่างพร้อมแบบหล่อจะถูกห่อด้วยพลาสติกจนครบ 24 ชั่วโมง จึงทำการถอดแบบ และห่อด้วยพลาสติก บ่มที่อุณหภูมิห้องที่อุณหภูมิประมาณ $27-30^{\circ}\text{C}$ เป็นระยะเวลา 7 วัน และทำการทดสอบหน่วยน้ำหนักแห้ง ตามมาตรฐาน ASTM C138 [17] ทดสอบกำลังอัด ตามมาตรฐาน ASTM C109 [18] และทดสอบกำลังดัด ตามมาตรฐาน ASTM C348 [19]

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

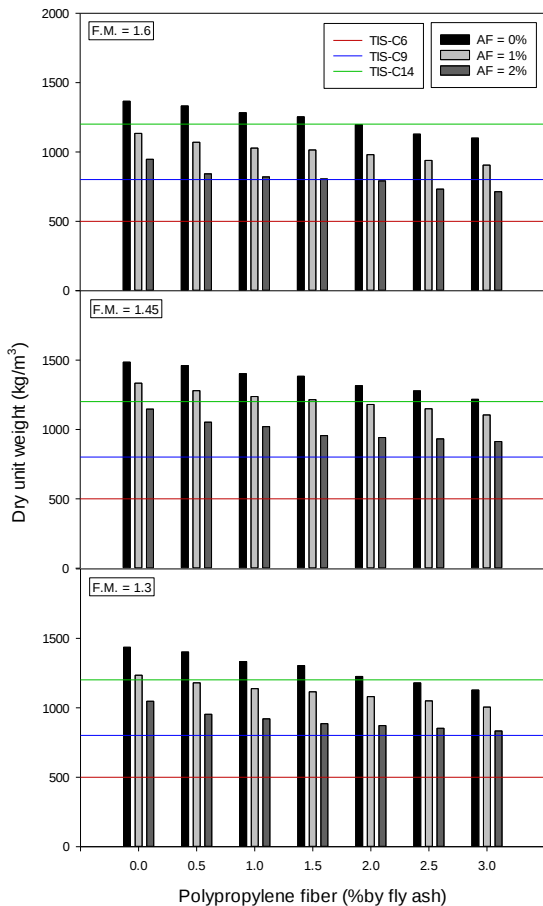
3.1 หน่วยน้ำหนักแห้ง ของจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีน

ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักแห้งของจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีน ที่อายุบ่ม 7 วัน แสดงดังรูปที่ 3 พบว่าหน่วยน้ำหนักแห้งมีค่าลดลงตามปริมาณเส้นใยโพลี โพรพิลีน และอัตราส่วนผสมฟองโฟมที่เพิ่มขึ้น โดยหน่วยน้ำหนักแห้งต่ำสุด พบที่ค่าโมดูลัสความละเอียดของทรายเท่ากับ 1.6 ปริมาณเส้นใยโพลีโพรพิลีนที่ร้อยละ 0 0.5 1 1.5 2 2.5 และ 3 โดยน้ำหนักแห้งลอย และปริมาณฟองโฟมที่ร้อยละ 2 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีค่าเท่ากับ 947.1 842.7 820.3 805.9 791.5 732.0 และ 713.2 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ เนื่องจากค่าโมดูลัสความละเอียดที่สูง มีอนุภาคขนาดใหญ่ เกิดช่องว่างภายในตัวอย่าง ส่งผลให้หน่วยน้ำหนักแห้งลดลง ในขณะที่โมดูลัสความละเอียดของทรายเท่ากับ 1.45 ให้ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด เนื่องจากค่าโมดูลัสความละเอียดที่เหมาะสม จะทำให้เกิดการยึดเกาะของพื้นที่ผิวสัมผัสที่ดี [4] อนุภาคเล็กจะแทรกตัวในช่องว่างระหว่างวัสดุที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ โดยค่าหน่วยน้ำหนักแห้ง ที่โมดูลัสความละเอียดของทรายที่ 1.3 และ 1.45 มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับโมดูลัสความละเอียดของทรายที่ 1.6 เท่ากับร้อยละ 5-17 และร้อยละ 8-28 ตามลำดับ

ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งมีค่าลดลง เนื่องจากค่าความถ่วงจำเพาะของเส้นใยโพลีโพรพิลีนที่ต่ำกว่า [20] และเกิดการก่อตัวของช่องว่างขนาดเล็กจำนวนมาก [21] ช่องว่างอากาศที่อยู่ติดกันจะรวมตัวกันและสร้างช่องว่างอากาศที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่ขึ้น [22] ส่งผลให้มีความพรุนเพิ่มขึ้น และค่าหน่วยน้ำหนักแห้งลดลงเมื่อปริมาณฟองโฟมเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณโฟมจะทำให้เกิดโครงสร้าง รูพรุนภายในตัวอย่าง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chung et al. (2019) ซึ่งมีหน่วยน้ำหนักแห้งเริ่มต้นประมาณ 500 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร [23] และค่าหน่วยน้ำหนักแห้งของจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีนอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 2601-2556) โดยค่าหน่วยน้ำหนักแห้งของจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลี โพรพิลีนที่โมดูลัสความละเอียดของทรายเท่ากับ 1.6 มีค่าหน่วยน้ำหนักอยู่ในช่วง C6-C12 โมดูลัสความละเอียดของทรายเท่ากับ 1.45 มีค่าหน่วยน้ำหนักอยู่ในช่วง C9-C14 และโมดูลัสความละเอียด



ของทรายเท่ากับ 1.3 มีค่าน้ำหนักแห้งอยู่ในช่วง C9-C14 ตามลำดับ

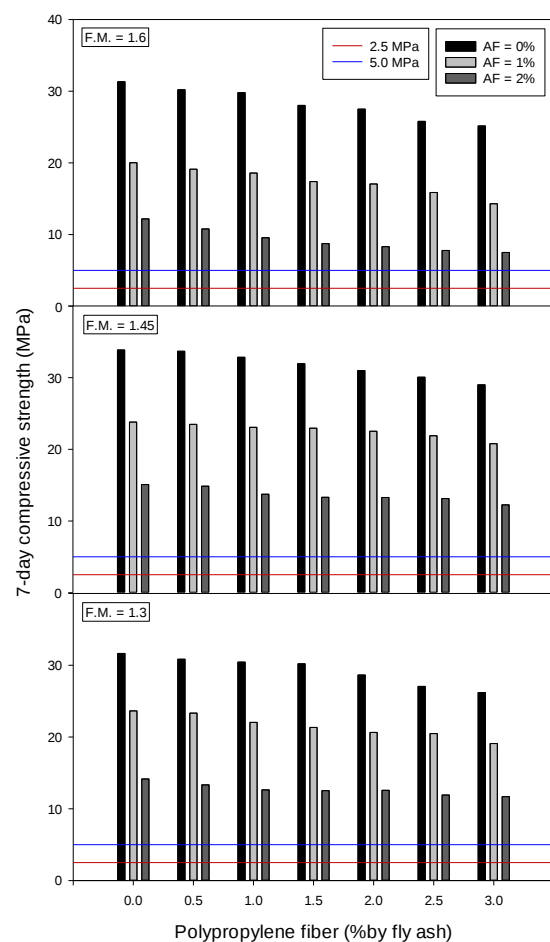


รูปที่ 3 หน่วยน้ำหนักแห้งของจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีน

3.2 กำลังอัด ของจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีน

ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีน ที่อายุบ่ม 7 วัน แสดงดังรูปที่ 4 โดยค่ากำลังอัดสูงสุดพบที่ค่าโมดูลัสความละเอียดของทรายเท่ากับ 1.45 ปริมาณเส้นใยโพลีโพรพิลีนที่ร้อยละ 0 0.5 1 1.5 2 2.5 และ 3 โดยน้ำหนักแก้วลอย และปริมาณฟองโฟมที่ร้อยละ 0 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีค่าเท่ากับ 33.87 33.69 32.85 31.96 31.00 30.08 และ 29.00 เมกะปาสคาล ตามลำดับ โดยค่ากำลังอัดมีค่าลดลงตามปริมาณเส้นใยโพลีโพรพิลีน และอัตราส่วนฟองโฟมที่เพิ่มขึ้น ยกตัวอย่างเช่น ที่ค่าโมดูลัสความละเอียดของทรายเท่ากับ 1.45 ปริมาณฟองโฟมที่ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีค่ากำลังอัด

ลดลงเท่ากับร้อยละ 27-30 เมื่อเปรียบเทียบกับที่ปริมาณฟองโฟมที่ร้อยละ 0 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน สำหรับทุกปริมาณเส้นใยโพลีโพรพิลีน และปริมาณเส้นใยโพลีโพรพิลีนที่มากเกินไปค่าที่เหมาะสม ทำให้ความสามารถในการทำงานลดลง ส่งผลให้ตัวอย่างมีความพรุนเพิ่มขึ้น และกำลังอัดลดลง [24] เนื่องจากเกิดความยากในการผสม และเกิดการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอของเส้นใยโพลีโพรพิลีนภายในตัวอย่าง [25] และเมื่อปริมาณฟองโฟมเพิ่มขึ้น จะทำให้เกิดรูพรุน และช่องว่างขนาดเล็กภายในตัวอย่าง [26] ส่งผลให้กำลังอัดมีค่าลดลง



รูปที่ 4 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพรพิลีน

ค่าโมดูลัสความละเอียดของทรายเท่ากับ 1.45 แสดงค่ากำลังอัดสูงสุด เนื่องจากค่าค่าโมดูลัสความละเอียดของมวลรวมละเอียดที่เหมาะสม ทำให้เกิดแรงยึดเกาะของพื้นผิวของอนุภาคที่ดี [4] และขนาดอนุภาคของมวลรวมยังส่งผลต่อความหนาแน่นของจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลีโพร



ฟิล์ม เนื่องจากมวลรวมขนาดเล็กจะเข้าไปแทรกระหว่างอนุภาคของมวลรวมขนาดใหญ่ [5] ทำให้จีโอโพลิเมอร์มวลเบามีความแน่นขึ้น ค่าโมดูลัสความเค้นเฉือนของทรายเท่ากับ 1.6 อนุภาคของมวลรวมละเอียดที่มีขนาดใหญ่ มีแนวโน้มขยายช่องว่างอากาศของฟองโฟม ทำให้ช่องว่างมีขนาดใหญ่ขึ้น และสูญเสียกำลัง [27] สังเกตได้ว่าที่ค่าโมดูลัสความเค้นเฉือนของทรายเท่ากับ 1.3 ค่ากำลังอัดมีค่าลดลง เนื่องจากอนุภาคที่มีความละเอียดมากเกินไป พื้นที่หน้าตัดมีขนาดเล็ก อาจทำให้เกิดการสูญเสียความสามารถในการรับน้ำหนัก และค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลิพรพิลีนอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 2601-2556) สำหรับทุกส่วนผสม ซึ่งมีค่ากำลังอัดมากกว่า 2.5 และ 5.0 เมกะปาสคาล

ตารางที่ 4 หน่วยน้ำหนักแห้งของจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลิพรพิลีน

โมดูลัสความเค้นเฉือน ของทราย	หน่วยน้ำหนักแห้ง (กก./ลบ.ม.)		
	ปริมาณฟองโฟม (ร้อยละ)		
	0	1	2
1.6	1100.0	905.0	713.2
1.45	1218.0	1105.0	913.2
1.3	1128.0	1005.0	833.2

ตารางที่ 5 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลิพรพิลีน

โมดูลัสความเค้นเฉือน ของทราย	กำลังอัด (เมกะปาสคาล)		
	ปริมาณฟองโฟม (ร้อยละ)		
	0	1	2
1.6	25.16	14.29	7.49
1.45	29.00	20.78	12.25
1.3	26.20	19.09	11.69

ค่าต่ำสุดเริ่มต้นของผลทดสอบหน่วยน้ำหนักแห้ง และกำลังอัดของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลิพรพิลีนแสดงในตารางที่ 4 และ 5 โดยค่าต่ำสุดพบที่ปริมาณเส้นใยโพลิพรพิลีนที่ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักเฉลี่ย

จากตารางที่ 4 และ 5 เมื่อนำผลทดสอบระหว่างหน่วยน้ำหนักแห้ง และกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลิพรพิลีนมาเปรียบเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 2601-2556) พบว่าที่ค่าโมดูลัสความเค้นเฉือนของทรายเท่ากับ 1.6 1.45 และ 1.3 สำหรับทุกส่วนผสม ผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 2601-2556) ดังแสดงในตารางที่ 6 โดยจำแนกชนิดของจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลิพรพิลีนตามปริมาณฟองโฟม ออกเป็น 5 ชนิด ได้แก่ C8 C9 C10 C12 และ C14 โดยมีค่าหน่วยน้ำหนักแห้งอยู่ระหว่าง 701-1,600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีค่ากำลังอัดมากกว่า 2.0 2.5 และ 5.1 เมกะปาสคาลตามลำดับ

ตารางที่ 6 ชนิดของจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลิพรพิลีน ตามมาตรฐาน มอก. 2601-2556

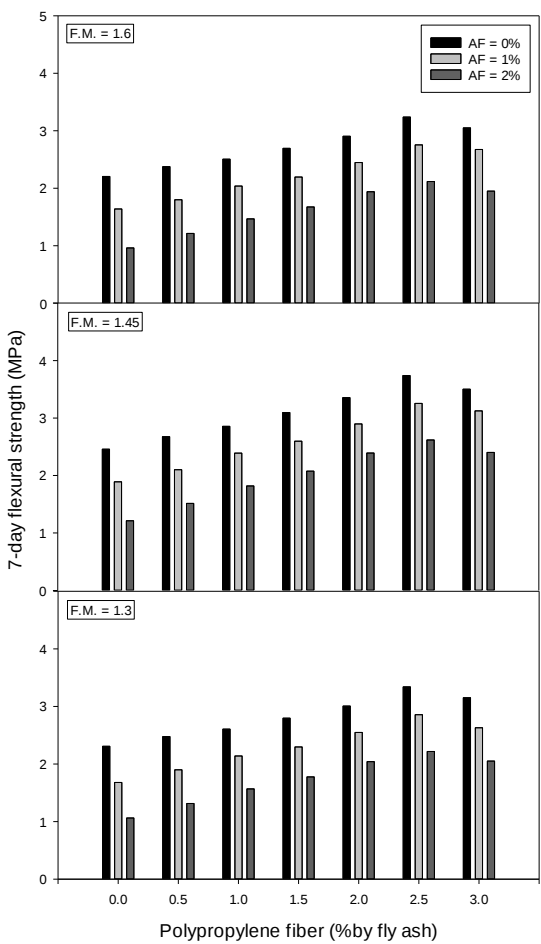
โมดูลัสความเค้นเฉือน ของทราย	ชนิด		
	ปริมาณฟองโฟม (ร้อยละ)		
	0	1	2
1.6	C12	C10	C8
1.45	C14	C12	C10
1.3	C12	C12	C9

3.3 กำลังอัด ของจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลิพรพิลีน

ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลิพรพิลีน ที่อายุบ่ม 7 วัน แสดงดังรูปที่ 5 พบว่ากำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยโพลิพรพิลีนที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเส้นใยควบคุมรอยแตกกว้าง เชื่อมข้ามรอยแตก ลดจำนวนรอยแตก และความกว้างของรอยแตก [25, 28] โดยค่ากำลังอัดสูงสุดพบที่ค่าโมดูลัสความเค้นเฉือนของทรายเท่ากับ 1.45 ที่ปริมาณฟองโฟมที่ร้อยละ 0 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีค่าเท่ากับ 2.46 2.68 2.86 3.10 3.36 3.74 และ 3.50 เมกะปาสคาล ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่าค่าโมดูลัสความเค้นเฉือนที่เหมาะสม จะทำให้เกิดการยึดเกาะของพื้นที่ผิวสัมผัสที่ดี [4] เนื่องจากอนุภาคเล็กจะแทรกตัวในช่องว่างระหว่างวัสดุที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ ทำให้จีโอโพลิเมอร์มวลเบามีการอัดตัวแน่น [5] ซึ่งมวลรวมที่มีความหยาบ



หรือละเอียดเกินความเหมาะสมจะทำให้ค่ากำลังอัด และกำลังดัดของตัวอย่างมีค่าลดลง [29] และพบว่ากำลังดัดมีค่าลดลงตามอัตราส่วนฟองโฟมที่เพิ่มขึ้น สำหรับทุกปริมาณเส้นใยโพลิพรพิลีน กำลังดัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยโพลิพรพิลีนที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเส้นใยโพลิพรพิลีนช่วยประสานรอยแตกภายในตัวอย่าง [25] ดังนั้นค่าโมดูลัสความละเอียดที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้ คือ ค่าโมดูลัสความละเอียดของทรายเท่ากับ 1.45 ซึ่งให้ค่ากำลังอัด และกำลังดัดสูงสุดสำหรับทุกสัดส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลิพรพิลีนผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 2601-2556) โดยมีค่าหน่วยน้ำหนักแห้งอยู่ระหว่าง 801-1,600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีค่ากำลังอัดมากกว่า 2.0, 2.5 และ 5.1 เมกะปาสคาล ตามลำดับ



รูปที่ 5 กำลังดัดของจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลิพรพิลีน

3.4 วิเคราะห์ผลทางสถิติ ของจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลิพรพิลีน

การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางสถิติ (Statistical Package for Social Science, SPSS) วิเคราะห์การถดถอยแบบพหุคูณเพื่อกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ เพื่อทำนายหน่วยน้ำหนักแห้ง กำลังอัด และกำลังดัดของจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลิพรพิลีนตัวแปรที่แตกต่างกัน 3 ตัวแปร ได้แก่ ค่าโมดูลัสความละเอียดของทราย ปริมาณเส้นใยโพลิพรพิลีน และปริมาณฟองโฟม โดยค่าการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณแสดงในตารางที่ 7 และ 8 ตามลำดับ

ค่าหน่วยน้ำหนักแห้ง และกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลิพรพิลีนพบค่า Sig (P-Value) เท่ากับ 0.000 (น้อยกว่า 0.01) หมายถึง มีนัยสำคัญทางสถิติโดยระบุนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับร้อยละ 99 พบว่าค่าโมดูลัสความละเอียดของทราย ปริมาณเส้นใยโพลิพรพิลีน และปริมาณฟองโฟมมีความสัมพันธ์โดยตรงกับ หน่วยน้ำหนักแห้ง และกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลิพรพิลีน แต่ในส่วนของค่ากำลังดัดไม่มีนัยสำคัญทางสถิติกับโมดูลัสความละเอียดของทราย โดยสามารถเขียนสมการทำนายดังนี้

หน่วยน้ำหนักแห้ง (U) โดยมีค่า $R^2 = 0.882$
$$U = 1829.675 - 283.810(FM) - 78.527(PPF) - 196.082(AF) \quad (1)$$

กำลังอัด (CS) โดยมีค่า $R^2 = 0.957$
$$CS = 45.498 - 9.416(FM) - 1.442(PPF) - 8.950(AF) \quad (2)$$

กำลังดัด (FS) โดยมีค่า $R^2 = 0.896$
$$FS = 2.741 - 0.301(FM) + 0.389(PPF) - 0.547(AF) \quad (3)$$

ตารางที่ 7 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ ของหน่วยน้ำหนักแห้งจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลิพรพิลีน

Model component	Coefficients	Sta. error	t value	Sig.
Constant	1829.675	104.267	17.548	0.000
FM	-283.810	70.720	-4.013	0.000
PPF	-78.527	8.661	-9.066	0.000
AF	-196.082	10.608	-18.484	0.000

FM, โมดูลัสความละเอียดของทราย
PPF, ปริมาณเส้นใยโพลิพรพิลีน
AF, ปริมาณฟองโฟม

ตารางที่ 8 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ ของกำลังอัด
จีโอโพลิเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลิโพรพิลีน

Model component	Coefficients	Sta. error	t value	Sig.
Constant	45.498	2.502	18.186	0.000
FM	-9.416	1.697	-5.549	0.000
PPF	-1.442	0.208	-6.940	0.000
AF	-8.950	0.255	-35.164	0.000

ตารางที่ 9 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ ของกำลังดัด
จีโอโพลิเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลิโพรพิลีน

Model component	Coefficients	Sta. error	t value	Sig.
Constant	2.741	0.317	8.650	0.000
FM	-0.301	0.215	-1.399	0.167
PPF	0.389	0.026	14.784	0.000
AF	-0.547	0.032	-16.953	0.000

4. บทสรุป

งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของโมดูลัสความเค้นของ
ทราย ปริมาณเส้นใยโพลิโพรพิลีน และปริมาณฟองโฟมต่อ
หน่วยน้ำหนักแห้ง กำลังอัด และกำลังดัดของจีโอโพลิเมอร์
มวลเบาเสริมเส้นใยโพลิโพรพิลีน สามารถสรุปผลการทดสอบ
ได้ดังนี้

1. หน่วยน้ำหนักแห้งมีค่าลดลงตามปริมาณเส้นใยโพลิโพรพิลีน และอัตราส่วนฟองโฟมที่เพิ่มขึ้น โดยหน่วยน้ำหนักแห้งต่ำสุด พบที่ค่าโมดูลัสความเค้นของทรายเท่ากับ 1.6 และปริมาณฟองโฟมที่ร้อยละ 2 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน
2. ค่ากำลังอัดสูงสุดพบที่ค่าโมดูลัสความเค้นของทรายเท่ากับ 1.45 และค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลิโพรพิลีนผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 2601-2556) สำหรับทุกส่วนผสม ซึ่งมีค่ากำลังอัดมากกว่า 2.5 และ 5.0 เมกะปาสคาล
3. กำลังดัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยโพลิโพรพิลีนที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเส้นใยควบคุมรอยแตกช้า เชื่อมข้ามรอยแตก ลดจำนวนรอยแตก และความกว้างของรอยแตก
4. ค่าหน่วยน้ำหนักแห้ง และกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 2601-2556) โดยมีค่าหน่วยน้ำหนักแห้งอยู่ระหว่าง 701-1,600

กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีค่ากำลังอัดมากกว่า 2.0 เมกะปาสคาล

5. การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพบว่าค่าโมดูลัสความเค้นของทราย ปริมาณเส้นใยโพลิโพรพิลีน และปริมาณฟองโฟม มีความสัมพันธ์โดยตรงกับหน่วยน้ำหนักแห้ง และกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเสริมเส้นใยโพลิโพรพิลีน แต่ในส่วนของการกำลังดัดไม่มีนัยสำคัญทางสถิติกับโมดูลัสความเค้น

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) สัญญาเลขที่ NRCT5-RRI63008 และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา สำหรับเครื่องมือในการดำเนินงานวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Masoule MS, Bahrami N, Karimzadeh M, Mohasanati B, Shoaee P, Ameri F, et al. Lightweight geopolymer concrete: A critical review on the feasibility, mixture design, durability properties, and microstructure. Ceram Int. 2022; 48(8):10347-71.
- [2] Yoosuk P, Suksiripattanapong C, Sukontasukkul P, Chindaprasirt P. Properties of polypropylene fiber reinforced cellular lightweight high calcium fly ash geopolymer mortar. Case Stud Constr Mater. 2021; 15:e00730.
- [3] Akers DJ, Gruber RD, Ramme BW, Boyle MJ, Grygar JG, Rowe SK, et al. Guide for structural lightweight-aggregate concrete. ACI 213R-03. American Concrete Institute (ACI), Michigan. 2003.
- [4] Zebua WS. The influence of PET plastic waste gradations as coarse aggregate towards compressive strength of light concrete. Procedia Eng. 2017; 171:614-9.



- [5] Chaitongrat C, Siwadamrongpong S. Recycling of melamine formaldehyde waste as fine aggregate in lightweight concrete. Songklanakarin J Sci Technol. 2018; 40(1).
- [6] Als Salman A, Assi LN, Kareem RS, Carter K, Ziehl P. Energy and CO₂ emission assessments of alkali-activated concrete and Ordinary Portland Cement concrete: A comparative analysis of different grades of concrete. Cleaner Environ Syst. 2021; 3:100047.
- [7] Duxson P, Fernández-Jiménez A, Provis JL, Lukey GC, Palomo A, van Deventer JS. Geopolymer technology: the current state of the art. J Mater Sci. 2007; 42:2917-33.
- [8] Davidovits J. Geopolymers: inorganic polymeric new materials. J Therm Anal Calorim. 1991; 37(8):1633-56.
- [9] Tchakouté HK, Rüschler CH, Kong S, Kamseu E, Leonelli C. Geopolymer binders from metakaolin using sodium waterglass from waste glass and rice husk ash as alternative activators: A comparative study. Constr Build Mater. 2016; 114:276-89.
- [10] Guo X, Xiong G. Resistance of fiber-reinforced fly ash-steel slag based geopolymer mortar to sulfate attack and drying-wetting cycles. Constr Build Mater. 2021; 269:121326.
- [11] ASTM International. ASTM C618-19, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2019.
- [12] Xin CL, Wang ZZ, Zhou JM, Gao B. Shaking table tests on seismic behavior of polypropylene fiber reinforced concrete tunnel lining. Tunn Undergr Space Technol. 2019; 88:1-5.
- [13] Das CS, Dey T, Dandapat R, Mukharjee BB, Kumar J. Performance evaluation of polypropylene fibre reinforced recycled aggregate concrete. Constr Build Mater. 2018; 189:649-59.
- [14] ASTM International. ASTM C33-18, Standard Specification for Concrete Aggregates. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2023.
- [15] Thai Industrial Standards Institute (TISI). TIS no. 2601-2556, Cellular lightweight concrete blocks using preformed foam. TIS; 2013. Thai.
- [16] Rattanasak U. Geopolymer. Thailand Concrete Association; 2019. Thai.
- [17] Standard AS. C138: Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air-Content (Gravimetric) of Concrete. Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA. 2013.
- [18] ASTM International. ASTM C109/109M-20, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens). West Conshohocken, PA: ASTM International; 2020.
- [19] ASTM International. ASTM C348-21, Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2021.
- [20] Bellum RR. Influence of steel and PP fibers on mechanical and microstructural properties of fly ash-GGBFS based geopolymer composites. Ceram Int. 2022; 48(5):6808-18.
- [21] Wongkvanklom A, Posi P, Kasemsiri P, Sata V, Cao T, Chindaprasit P. Strength, thermal conductivity and sound absorption of cellular lightweight high calcium fly ash geopolymer concrete. Eng Appl Sci Res. 2021; 48(4).



- [22] Wang Y, Zheng T, Zheng X, Liu Y, Darkwa J, Zhou G. Thermo-mechanical and moisture absorption properties of fly ash-based lightweight geopolymer concrete reinforced by polypropylene fibers. *Constr Build Mater.* 2020; 251:118960.
- [23] Chung SY, Abd Elrahman M, Kim JS, Han TS, Stephan D, Sikora P. Comparison of lightweight aggregate and foamed concrete with the same density level using image-based characterizations. *Constr Build Mater.* 2019; 211:988-99.
- [24] Ranjbar N, Talebian S, Mehrali M, Kuenzel C, Metselaar HS, Jumaat MZ. Mechanisms of interfacial bond in steel and polypropylene fiber reinforced geopolymer composites. *Compos Sci Technol.* 2016; 122:73-81.
- [25] Al-Mashhadani MM, Canpolat O, Aygörmüş Y, Uysal M, Erdem S. Mechanical and microstructural characterization of fiber reinforced fly ash based geopolymer composites. *Constr Build Mater.* 2018; 167:505-13.
- [26] Suksiripattanapong C, Krosoongnern K, Thumrongvut J, Sukontasukkul P, Horpibulsuk S, Chindaprasirt P. Properties of cellular lightweight high calcium bottom ash-portland cement geopolymer mortar. *Case Stud Constr Mater.* 2020; 12:e00337.
- [27] Song Y, Lange D. Influence of fine inclusions on the morphology and mechanical performance of lightweight foam concrete. *Cem Concr Compos.* 2021; 124:104264.
- [28] Mohseni E. Assessment of Na₂SiO₃ to NaOH ratio impact on the performance of polypropylene fiber-reinforced geopolymer composites. *Constr Build Mater.* 2018; 186:904-11.
- [29] Ammari MZ, Fowler R. Grading of fine crushed stone and its effect on concrete properties used in the United Arab Emirates. *Int J Civ Eng Technol.* 2017; 8:259-67.

การประเมินสมรรถนะและความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ของระบบติดตามดวงอาทิตย์สำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองด้าน

Evaluation of the Performance and Economics of Solar Tracking System for Bifacial Solar Panel

จิรายุ แบ่งทิต¹ และสรารวุธ พลวงษ์ศรี^{2*}

¹วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้

²หน่วยวิจัยด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมอัจฉริยะ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่

63 หมู่ 4 ตำบลหนองหาร อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 50290

Jirayu Baengthit¹ and Sarawut Polvongsri^{2*}

¹ School of Renewable Energy, Maejo University, Chiang Mai

² Smart Energy and Environmental Research Unit, School of Renewable Energy, Maejo University, Chiang Mai

63 No. 4, Nong Han, San Sai, Chiang Mai, Thailand, 50290

*Corresponding Author E-mail Address: sarawut-energy@hotmail.com เบอร์มือถือ 09-0330-2479

Received: 3 October 2023, Revised: 30 April 2024, Accepted: 30 April 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการประเมินสมรรถนะและความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ของระบบติดตามดวงอาทิตย์สำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองด้าน โดยใช้แผงขนาด 430 Wp ทำการออกแบบระบบติดตามดวงอาทิตย์โดยใช้การทำงานแบบวนซ้ำ เพื่อให้มอเตอร์หมุนปรับมุมเอียงของแผงตามเงื่อนไข ทำการทดสอบสมรรถนะของระบบติดตามดวงอาทิตย์สำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองด้าน และสร้างสมการเพื่อใช้ในการทำนายกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ จากการศึกษาพบว่าระบบติดตามดวงอาทิตย์ที่ออกแบบและติดตั้งใช้งานมีความผิดพลาด 2.31% โดยแผงที่ติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์สามารถผลิตไฟฟ้าได้สูงสุด 364.20 W ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า 13.01% สูงกว่าแผงที่ไม่ได้ติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์ที่ผลิตไฟฟ้าได้สูงสุด 360.42 W ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า 12.05% และเมื่อนำสมการทำนายกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ไปทำนายกรณีติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองด้านทั้ง 2 ระบบ ขนาด 1 MW พบว่าระบบติดตามดวงอาทิตย์จะสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้า 1,758.78 เมกะวัตต์ชั่วโมงต่อปี สูงกว่ากรณีไม่ติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์ที่ผลิตพลังงานไฟฟ้า 1,579.41 เมกะวัตต์ชั่วโมงต่อปี เมื่อพิจารณาความคุ้มค่าด้านเศรษฐศาสตร์พบว่าระบบติดตามดวงอาทิตย์มีระยะเวลาคืนทุน 7.01 ปี นานกว่าระบบที่ไม่ติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์ที่มีระยะเวลาคืนทุน 6.38 ปี ในขณะที่มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ 11,910,512.54 บาท และ 14,692,713.81 บาท ค่าอัตราผลตอบแทนภายใน 10.80% และ 12.80% ตามลำดับ

คำสำคัญ แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองด้าน ระบบติดตามดวงอาทิตย์ สมรรถนะ ความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์

Abstract

This research assessed the performance and economic viability of a bifacial solar tracking system for a 430 Wp solar panel. The system was designed and tested using an iterative process to adjust the panel tilt angle based on specified conditions. The performance evaluation of the solar tracking system for the bifacial solar panel



revealed a 2.31% error in the designed and installed systems. The tracked system achieved a maximum power output of 364.20 W with a power generation efficiency of 13.01%, compared to the non-tracked system that produced a maximum power of 360.42 W with an efficiency of 12.05%. The capacity of electric generation from the 1 MW two-side solar cell system was determined the established equations. From the result, the solar tracking system produced 1,758.78 MWh/year, higher than the without-tracking system with 1,579.41 MWh/year. In terms of economic viability, the solar tracking system provided a payback period of 7.01 years, longer than the without-tracking system with a payback period of 6.38 years. The net present values were 11,910,512.54 Baht and 14,692,713.81 Baht for the tracking and without-tracking systems, respectively, with internal rates of return of 10.80% and 12.80%, respectively.

Keywords: Bifacial Solar Panel, Solar Tracking System, Performance, Economic

1. บทนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic, PV) มีการพัฒนาและก้าวหน้ามาก ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ถูกลงอย่างต่อเนื่อง ในอดีตและปัจจุบันยังนิยมผลิตไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบด้านเดียว (Mono-facial, mPV) ที่มีประสิทธิภาพ 10% – 20% ใช้หลักการรับแสงอาทิตย์โดยตรงด้านเดียว แต่ปัจจุบันได้พัฒนาเทคโนโลยีการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีประสิทธิภาพ โดยการใช้เทคโนโลยี Passivated Emitter Rear Contact (PERC) ถูกนำมาผลิตโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองด้าน (Bifacial, bPV) ที่มีประสิทธิภาพ 18% – 21% ใช้หลักการรับแสงโดยตรงและการสะท้อนกลับ [1] มีการศึกษาแนวโน้มการใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองด้านได้จำลองการผลิตพลังงานต่อปี (AEY) พบว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองด้านผลิตพลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 30% เปรียบเทียบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้านเดียวที่หันหน้าไปทางทิศใต้ [2] แต่ปัจจัยบางอย่างส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองด้าน เช่น อัตราการสะท้อนแสงของพื้นผิว (Albedo) ความสูงพื้นผิวและมุมเอียง มหาวิทยาลัยเพอร์ดู (อเมริกา) มีการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ณ เส้นละติจูด 30°N (เมืองโคโร ประเทศอียิปต์และเมืองเซียงไฮ้ ประเทศจีน) โดยใช้ข้อมูลจาก NASA โดยเฉลี่ย 22 ปี พบว่าอัลเบโด 0.5 ระดับความสูง 1 เมตร และมุมเอียง 15° มีประสิทธิภาพมากที่สุด [3] ต่อมามีการศึกษา

ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้านเดียวเทียบกับสองด้าน ณ ที่ตั้งเมืองไทโจว โดยใช้โปรแกรม MATLAB พบว่ามุมติดตั้งของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองด้านแนะนำติดตั้งระยะห่างระหว่างแผงที่ 0.7 เมตร เพื่อลดการเกิดเงาบริเวณใต้แผง เนื่องจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองด้านสามารถรับแสงได้ทั้งด้านหน้าและด้านหลัง การติดตั้งที่ชิดเหมือนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้านเดียวจะเกิดเงาบริเวณใต้แผงปริมาณมาก [4] ยังมีการประเมินสมรรถนะและความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ของการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองด้านบนหลังคาอาคารศูนย์กีฬาจากงานวิจัยการที่ 9 มหาวิทยาลัยแม่โจ้ โดยทำการทดสอบที่พื้นผิวคอนกรีตสีขาว ความสูงของแผงจากพื้นระดับ 0.5 เมตร 1 เมตร และ 1.5 เมตร และปรับมุม 15° 18° และ 21° พบว่าความสูงแผง 1.5 เมตร และมุมเอียง 15° แผงสามารถผลิตไฟฟ้าได้สูงสุด มีประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า 21.82% และสามารถผลิตไฟฟ้าได้ 130,476.36 เมกะวัตต์ชั่วโมงต่อปี มีค่าเฉลี่ยของสมรรถนะของระบบ 1.15 ระยะเวลาคืนทุน 3.95 ปี มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) 1,601,144.48 บาท และอัตราผลตอบแทนภายในโครงการ (IRR) อยู่ที่ 16.26% [5]

ส่วนระบบติดตามดวงอาทิตย์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองด้านมีการศึกษาถึงผลที่มีต่อประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า พบว่าในกรณีแบบมุมติดตั้งคงที่ แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองด้านสามารถผลิตไฟฟ้าเพิ่มขึ้นประมาณ 10% [6] และพบว่าในกรณีที่ติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์ แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองด้านมี



ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นประมาณ 15% เนื่องจากการติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์ทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ตั้งฉากกับดวงอาทิตย์เกือบตลอดเวลา ทำให้ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองด้านสูงกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบด้านเดียว [7] ยังมีการศึกษาประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งระบบติดตามแสงอาทิตย์สองแกนเปรียบเทียบกับไม่ติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์ พบว่าประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 40.92% ขณะที่ติดตั้งระบบติดตามสองแกนเปรียบเทียบกับแกนเดียวเพิ่มขึ้น 4.07% โดยระบบติดตามแสงอาทิตย์แบบแกนเดียวยังมีความคุ้มค่าด้านการบำรุงรักษาและประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้ามากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแบบคงที่และแบบสองแกน [8],[9] และมีการศึกษาประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองด้านที่ติดตั้งและไม่ติดตั้งระบบติดตามแสงอาทิตย์ โดยทำการทดสอบภายใต้สภาวะเดียวกันคอนกรีตสีขาว ความสูงจากระดับพื้นผิว 1 เมตร และมุมเอียงทิศได้ 18° พบว่ากำลังไฟฟ้าของแผงที่ติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์เพิ่มขึ้น 22.22% พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 19.09% และประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 11.89% [10]

ในประเทศไทยมีการศึกษาและการใช้ระบบติดตามดวงอาทิตย์สำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองด้านยังมีน้อยสาเหตุเกิดจากข้อมูลด้านสมรรถนะและความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ยังมีน้อย ทำให้ยังไม่เกิดความเชื่อมั่นในการใช้งานและการลงทุน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงต้องการพัฒนาระบบติดตามดวงอาทิตย์และความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์สำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองด้าน โดยใช้การทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองด้านที่ติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์ ทำการประเมินสมรรถนะและความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์

2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่

2.1 การออกแบบระบบติดตามดวงอาทิตย์สำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองด้าน โดยมีเงื่อนไขการทำงานของระบบติดตามดวงอาทิตย์ ปรับมุมเพื่อให้ได้

ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์รวมสูงที่สุดในแต่ละช่วงเวลา ซึ่งใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการคำนวณมุมดังกล่าวแสดงในสมการที่ (1) และ (2) โดยสมการที่ (2) จะหาได้จากการค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ด้านหน้าและด้านหลังจากสมการที่ (3) และ (4) ตามลำดับ [11] และทำการคำนวณค่าความผิดพลาดระหว่างการจำลองและทดลองโดยใช้สมการที่ (5)

$$\omega = 15(12 - ST) \quad (1)$$

$$I_T = I_F + I_R \quad (2)$$

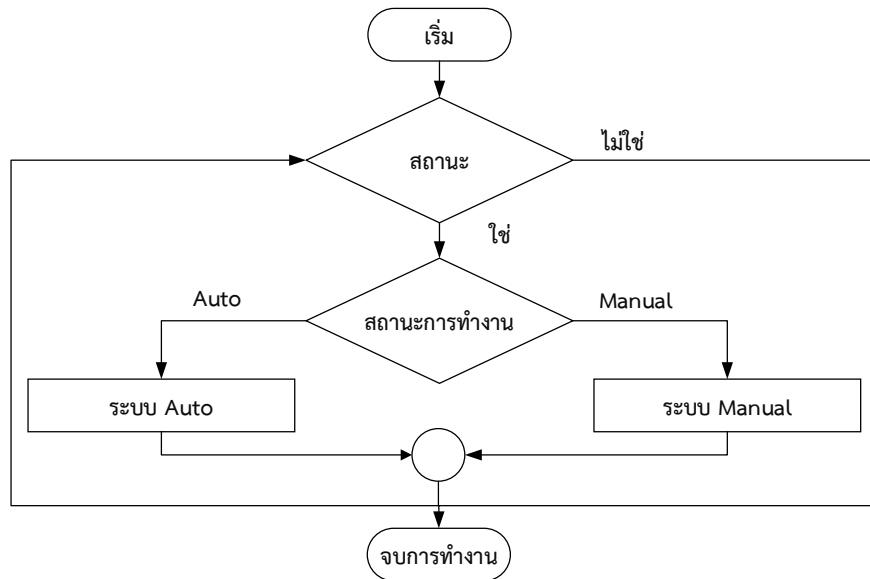
$$I_F = I_b R_{b,F} + I_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + p I_b + I_d \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (3)$$

$$I_R = I_b R_{b,R} + I_d \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) + pf(h) (I_b + I_d) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \quad (4)$$

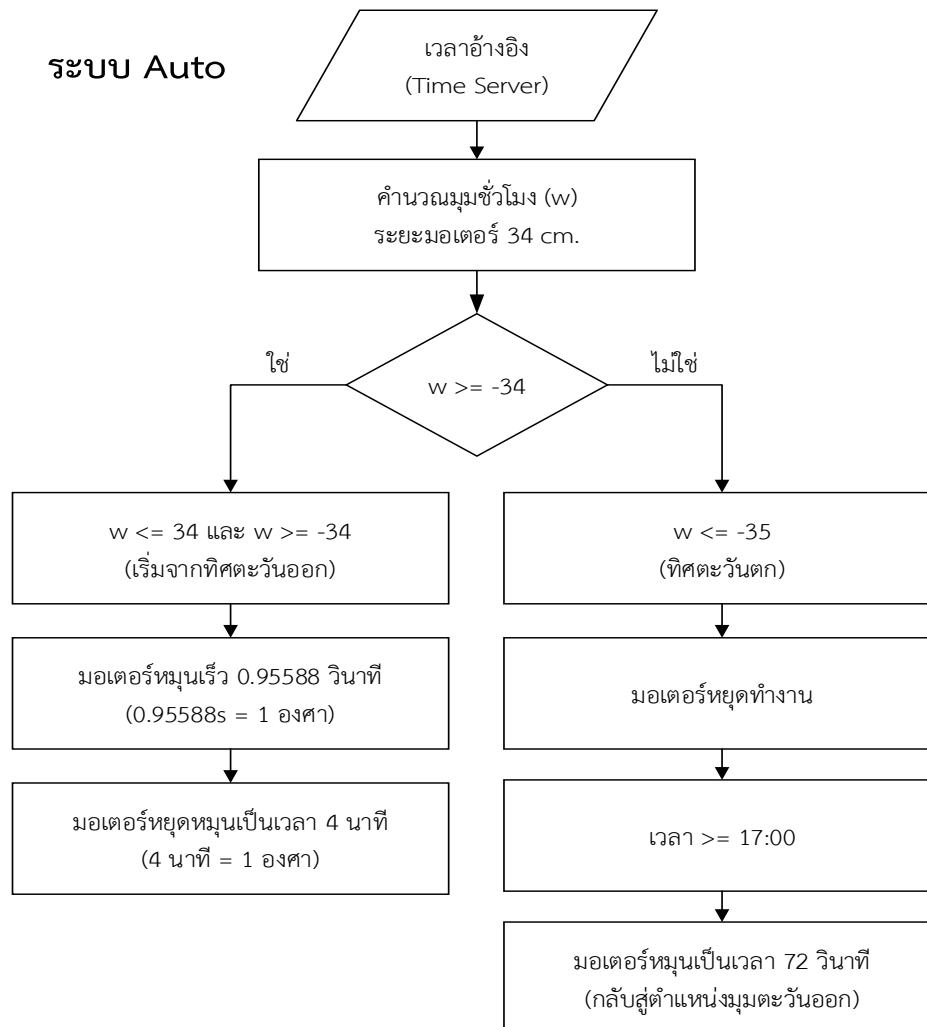
$$\text{Error} = \left| \frac{X_{\text{mea}} - X_t}{X_t} \right| \times 100 \quad (5)$$

เมื่อ ω คือ มุมชั่วโมงของดวงอาทิตย์ (°) [9] ST คือ เวลาดวงอาทิตย์ (hr) I_T I_F I_R I_b และ I_d คือ ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์รวม ด้านหน้า ด้านหลัง ค่ารังสีตรงรายชั่วโมงในแนวระดับ และค่ารังสีกระจายในแนวระดับ (W/m^2) ตามลำดับ $R_{b,F}$ และ $R_{b,R}$ คือ อัตราส่วนการฉายรังสีรายชั่วโมงบนพื้นผิวเอียงกับพื้นผิวระนาบด้านหน้า ด้านหลัง ตามลำดับ β คือ มุมเอียงทำมุมกับแนวระดับ p คือ ตัวประกอบการสะท้อนของรังสีอาทิตย์ $f(h)$ คือ ฟังก์ชันการกระจายระดับความสูง [12] X_{mea} คือ ค่าจริง และ X_t คือ ค่าที่ได้จากการวัด [13]

ระบบติดตามดวงอาทิตย์ที่ศึกษาได้ออกแบบโดยใช้การทำงานแบบวนซ้ำหรือแบบจำลองวงจรแบบปิด (Closed Loop) โดยมีหลักการทำงานตัวโมโครคอนโทรลเลอร์ (ESP32) เชื่อมต่อกับฐานข้อมูลเพื่อนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณและเปรียบเทียบสมการตำแหน่งดวงอาทิตย์ สั่งงานมอเตอร์ให้มอเตอร์ (Linear Motor) หมุนตามเงื่อนไข ดังแสดงในรูปที่ 1

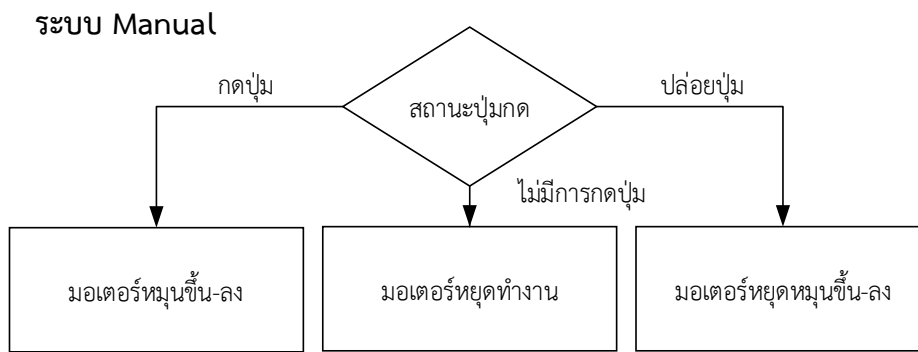


ระบบ Auto



ก. ขั้นตอนการทำงานในส่วนระบบอัตโนมัติ

รูปที่ 1 ขั้นตอนการทำงานของระบบติดตามดวงอาทิตย์

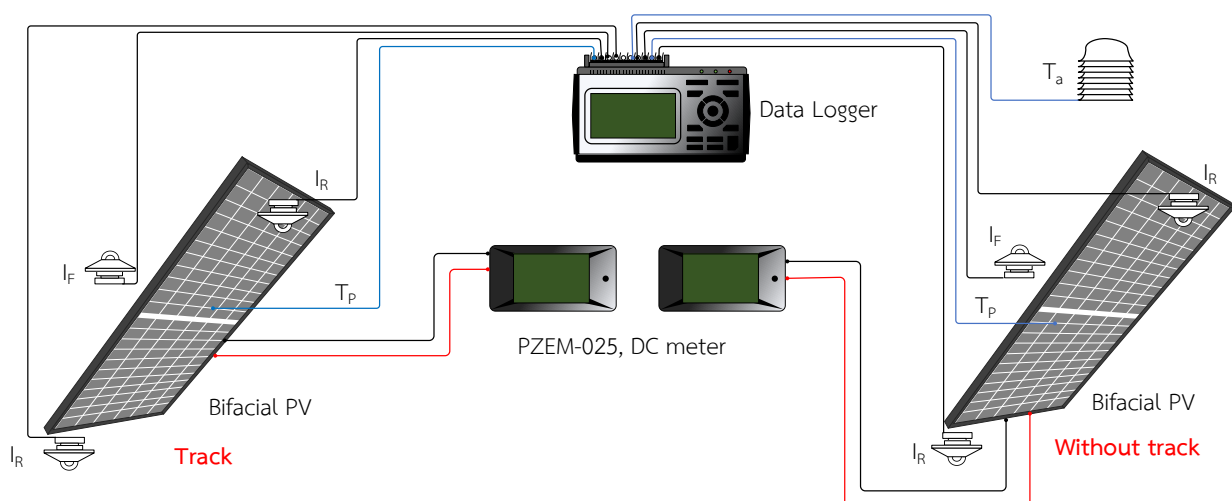


ข. ขั้นตอนการทำงานในส่วนระบบควบคุมตามผู้ใช้งาน

รูปที่ 1 ขั้นตอนการทำงานของระบบติดตามดวงอาทิตย์ (ต่อ)

2.2 เป็นการทดสอบสมรรถนะของระบบติดตามดวงอาทิตย์ โดยเมื่อออกแบบระบบติดตามดวงอาทิตย์เรียบร้อยแล้ว จะทำการติดตั้งระบบเข้ากับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองด้านขนาด 430 Wp จำนวน 1 แผง ดังรูปที่ 2 (Track) และทำการทดลองเปรียบเทียบกับแผงที่ไม่ติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์ (Fixed-Tilt) ดังรูปที่ 2 (Without Track) โดยทั้งสองแผงจะติดตั้งบนพื้นคอนกรีตทาสีขาว (Albedo 0.8) ด้านล่างแผงสูงจากพื้น 1 เมตร แผงเอียงหันหน้าไปทางทิศใต้เอียงทำมุม 18° ในการทดสอบทำการวัดค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ในแต่ละแผง 3 จุด ได้แก่ ด้านบนแผงเอียงตามแนวเอียงของแผง (I_F) ด้านล่างแผงตรงบริเวณส่วนล่างแผง (I_R) และด้านล่างแผงตรงบริเวณส่วนบนแผง (I_R) ด้วยเครื่องวัดค่า

ความเข้มรังสีอาทิตย์ (Pyranometer SP-110-SS, ความคลาดเคลื่อน $\pm 1\%$) วัดอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (T_p) และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (T_a) โดยใช้สายเทอร์โมคัปเปิลชนิด K (Thermocouple Type K, ความคลาดเคลื่อน $\pm 2^\circ\text{C}$) ต่อเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูล โดยทั้งค่าความเข้มรังสีอาทิตย์และอุณหภูมิต่อเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูล (GRAPHTEC midi LOGGER GL240) วัดกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้เครื่องวัดกำลังไฟฟ้า Peacefair PZEM-025 (ความคลาดเคลื่อน $\pm 1\%$) รายละเอียดแสดงในรูปที่ 2 การคำนวณประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองด้าน [14] คำนวณได้จากสมการต่อไปนี้



รูปที่ 2 แผนผังจุดการตรวจวัดระบบติดตามดวงอาทิตย์



$$\eta_{PV} = \frac{(I_{max} \times V_{max})}{(I_F + I_R) \times A} \times 100 \quad (6)$$

เมื่อ η_{PV} คือ ประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์, %

V_{max} คือ แรงดันไฟฟ้าสูงสุด, V

I_{max} คือ กระแสไฟฟ้าสูงสุด, A

I_F คือ ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ด้านหน้า, W/m^2

I_R คือ ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ด้านหลัง, W/m^2

A คือ พื้นที่รับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์, m^2

2.3 การประเมินสมรรถนะของระบบใช้ข้อมูลสมรรถนะของการผลิตไฟฟ้าจากหัวข้อที่ 2.1 และ 2.2 มาใช้ในการประเมินพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้กรณีศึกษาการจำลองการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองด้านพร้อมระบบติดตามดวงอาทิตย์ขนาดกำลังผลิต 1 MW ในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ และประเมินความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ตามสมการที่ (7) (8) และ (9)

การวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period, PB) เป็นการพิจารณามูลค่าการลงทุนเบื้องต้นทั้งหมดเปรียบเทียบกับมูลค่าผลตอบแทนที่ได้จากการลงทุนต่อปี [15] สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (7)

$$PB = \frac{Inv}{B} \quad (7)$$

เมื่อมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value, NPV) และอัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return, IRR) [16] สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (8) และสมการที่ (9) ตามลำดับ

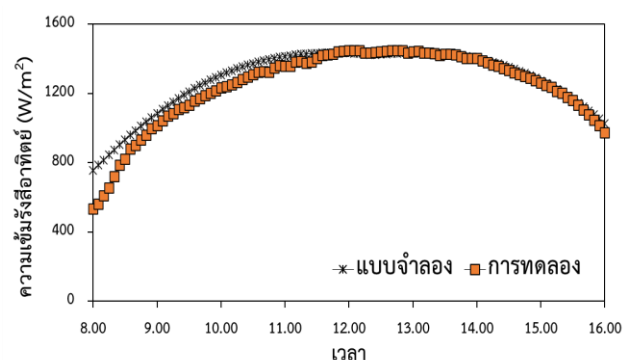
$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{(B_t - C_t)}{(1+r)^t} \quad (8)$$

$$\sum_{t=0}^n \frac{(B_t - C_t)}{(1+IRR)^t} = 0 \quad (9)$$

เมื่อ PB คือ ระยะเวลาคืนทุน (year) Inv คือ ค่าใช้จ่ายการลงทุนติดตั้งของโครงการ (Baht) B คือ มูลค่าผลตอบแทนต่อปี (Baht/year) NPV คือ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ B_t คือ ผลตอบแทนของโครงการในปีที่ t (Baht) C_t คือ ต้นทุนของโครงการในปี t (Baht) r คือ อัตราคิดลด (Discount Rate) (%) n คือ อายุโครงการ (year) และ t คือ ปีของโครงการ (year)

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

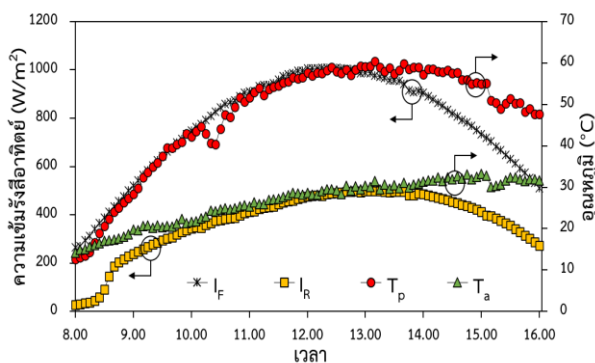
3.1 เป็นการออกแบบระบบติดตามดวงอาทิตย์สำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองด้าน เมื่อทำการออกแบบระบบติดตามดวงอาทิตย์แล้วได้ทำการทดสอบความแม่นยำของระบบติดตามดวงอาทิตย์โดยการติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์เข้ากับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองด้านและทำการวัดค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ เมื่อระบบติดตามดวงอาทิตย์ทำงานในแต่ละช่วงเวลาตั้งแต่เวลา 8:00 – 16:00 น. เพื่อเปรียบเทียบค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการ ผลการเปรียบเทียบดังรูปที่ 3 พบว่า ค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากสมการทางคณิตศาสตร์ แต่ในช่วงเวลาประมาณ 8:00 – 8:40 น. ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ที่วัดได้มีค่าต่ำกว่าสมการทางคณิตศาสตร์พอสมควรเนื่องจากช่วงเวลาดังกล่าวมีเงาจากเสาข้างหลังที่ติดตั้งบริเวณทดสอบทำให้เกิดเงาสะท้อนบริเวณหลังแผง โดยจากการทดลองพบว่าระบบติดตามดวงอาทิตย์ทำงานได้ดีส่งผลทำให้ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์มีค่าทั้งวันสูงเกิน $800 W/m^2$ ทุกช่วงเวลา โดยมีค่าสูงสุด $1,449 W/m^2$ ในเวลาประมาณ 12:00 น. ค่าต่ำสุด $532 W/m^2$ ที่เวลา 8:00 น. ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากสมการทางคณิตศาสตร์ที่มีสูงสุด $1,434 W/m^2$ ที่เวลา 11:45 น. และค่าต่ำสุด $754 W/m^2$ ที่เวลา 8:00 น. ซึ่งคิดเป็นค่าความผิดพลาดสูงสุด 6.84% ที่เวลา 10:10 น. และต่ำสุด 0.02% ที่ช่วงเวลา 10:45 น. โดยมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ย 2.31% ซึ่งสามารถยอมรับได้



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์จากการทดลองและจากแบบจำลอง

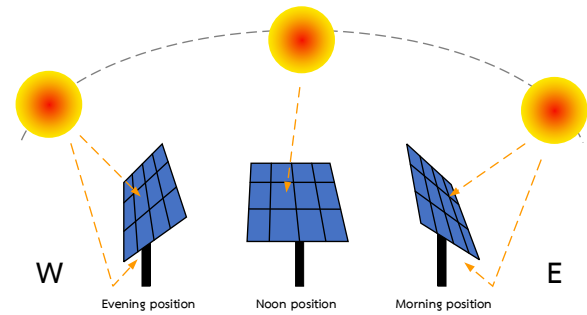
3.2 เป็นการทดสอบสมรรถนะของระบบติดตามดวงอาทิตย์ จากรูปที่ 4 เป็นผลการทดลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์

แบบสองด้านที่ไม่ได้ติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์ ทำการทดสอบในวันที่ 23 มกราคม พ.ศ.2566 เวลา 8:00 – 16:00 น. จากการทดสอบพบว่าค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ด้านหน้าและด้านหลังแผง จะมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงเช้าไปจนช่วงเวลาประมาณ 12:45 น. เหมือนกัน แต่ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ด้านหลังแผง ในช่วงเวลา 8:00 – 8:35 น. มีเงาจากกังหันลมทำให้เกิดเงาสะท้อนบริเวณหลังแผง จึงทำให้มีค่าน้อย โดยค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ด้านหลังมีค่าสูงสุด 489 W/m^2 เมื่อเวลา 13:05 น. และมีค่าเฉลี่ย 374 W/m^2 ในขณะที่ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ด้านหน้ามีค่าสูงสุด $1,008 \text{ W/m}^2$ ที่เวลา 12:15 น. และมีค่าเฉลี่ย 771 W/m^2 และเมื่อรวมค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ด้านหน้าและด้านหลัง ทำให้มีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์รวมสูงสุด $1,500 \text{ W/m}^2$ เฉลี่ย $1,149 \text{ W/m}^2$ โดยค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้อุณหภูมิแผงเพิ่มขึ้นตาม โดยมีค่าสูงสุด 60.2°C เวลา 13.10 น. เฉลี่ย 46.7°C ในขณะที่อุณหภูมิแวดล้อมสูงสุด 33.2°C เฉลี่ย 25.3°C



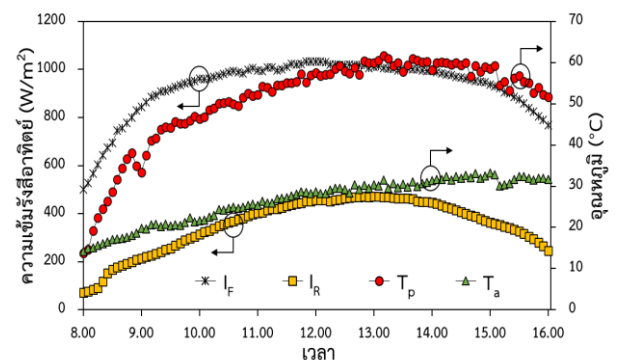
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มรังสีอาทิตย์และอุณหภูมิที่ไม่ติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์

เมื่อพิจารณาผลการทดลองในวันและเวลาเดียวกันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองด้านที่ติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์พบว่าลักษณะแนวโน้มค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ด้านหลังมีค่าใกล้เคียงกับกรณีที่ไม่ได้ติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์ เนื่องจากระยะความสูงและค่าอัตราการสะท้อนแสงของพื้นผิวคงที่ การสะท้อนของค่าความเข้มรังสีอาทิตย์เข้าด้านหลังแผงมีค่าใกล้เคียงกัน แต่กรณีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ด้านหน้าแผงที่ติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์จะมีค่าสูงกว่าแผงที่ไม่ได้ติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์อย่างชัดเจน เนื่องจากระบบติดตามดวงอาทิตย์ทำให้แผงตั้งฉากกับดวงอาทิตย์เกือบตลอดเวลา ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ตำแหน่งแผงของแต่ละช่วงเวลา

โดยค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ด้านหน้ามีค่าสูงสุด $1,033 \text{ W/m}^2$ ที่เวลา 12:00 น. และมีค่าเฉลี่ย 930 W/m^2 ในขณะที่อุณหภูมิแผงก็มีค่าใกล้เคียงกับแผงที่ไม่ได้ติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์ โดยมีอุณหภูมิแผงสูงสุด 61.7°C และเฉลี่ย 50.9°C ดังแสดงในรูปที่ 6

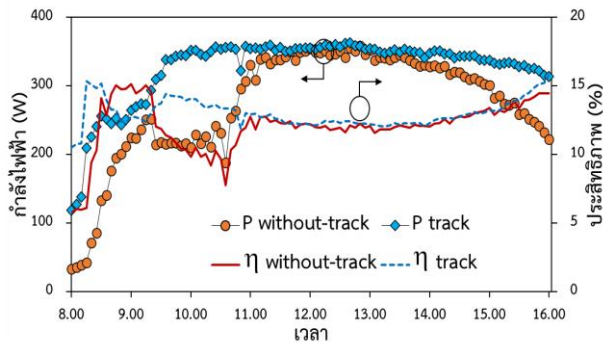


รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มรังสีอาทิตย์และอุณหภูมิที่ติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์

เมื่อพิจารณาค่ากำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของแผงทั้งสองระบบ จากรูปที่ 7 พบว่าแผงที่ติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์มีกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้สูงกว่าแผงที่ไม่ได้ติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์ตลอดเวลา จะมีแค่ช่วงเวลาประมาณ 11:55 – 12:40 น. ที่ทั้งสองแผงผลิตกำลังไฟฟ้าได้ใกล้เคียงกัน เนื่องจากเป็นช่วงที่แผงที่ไม่ได้ติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์ตั้งฉากกับดวงอาทิตย์มากที่สุด โดยกำลังไฟฟ้าที่สามารถผลิตได้ของแผงที่ติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์มีค่าสูงสุด 364.20 W ที่เวลา 12:40 น. (เฉลี่ย 325.82 W) สูงกว่าแผงที่ไม่ได้ติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์ที่สามารถผลิตไฟฟ้าได้สูงสุด 360.42 W ที่เวลา 12:50 น. (เฉลี่ย 272.95 W) และเมื่อพิจารณาทั้งวันพบว่า แผงที่ติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 2.62



kWh/day ซึ่งสูงกว่าแผงที่ไม่ได้ติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์ที่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้เพียง 2.20 kWh/day ในขณะที่เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของแผงทั้งสอง พบว่าประสิทธิภาพของแผงที่ติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์มีค่าสูงสุด 15.78% เฉลี่ย 13.01% สูงกว่าแผงที่ไม่ได้ติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงสุดที่ 15.13% เฉลี่ย 12.05%



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และประสิทธิภาพของแผงที่ไม่ติดตั้งและติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์

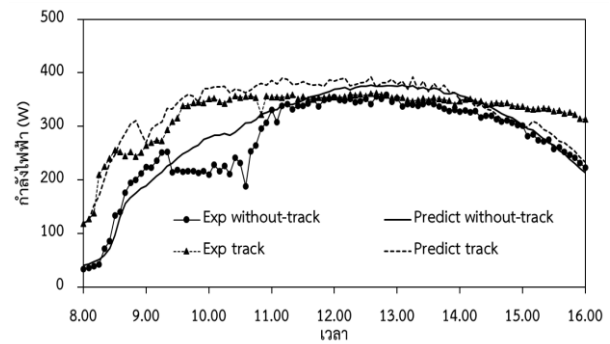
จากข้อมูลการทดลองสามารถนำมาสร้างสมการทำนายค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของทั้งสองระบบได้ดังสมการที่ (10) และ (11)

$$P_{\text{Without-track}} = 1.4321 \times I_F^{0.2258} \times I_R^{0.58201} \times T_a^{-0.21519} \times T_p^{0.27735} \quad (10)$$

$$P_{\text{Track}} = 25.701 \times I_F^{0.07403} \times I_R^{0.50123} \times T_a^{-1.0235} \times T_p^{0.63117} \quad (11)$$

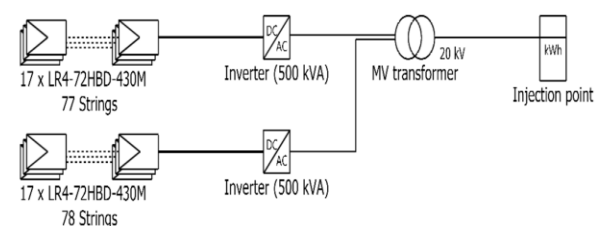
เมื่อ $P_{\text{Without-track}}$, P_{Track} คือ กำลังไฟฟ้าของแผงที่ไม่ได้ติดตั้งและติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์ ตามลำดับ I_F, I_R คือ ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ด้านหน้าและด้านหลัง (W/m^2) ตามลำดับ T_a, T_p คือ อุณหภูมิแวดล้อมและอุณหภูมิแผง ($^{\circ}C$) ตามลำดับ

โดยเมื่อทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากสมการทำนายและผลที่ได้จากการทดลองจริง พบว่า กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้โดยใช้สมการทำนายเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริงของแผงที่ติดตั้งและไม่ติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์มีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 0.02% และ 0.06% ตามลำดับ ใช้สมการที่ (5) ในการคำนวณ ดังแสดงในรูปที่ 8

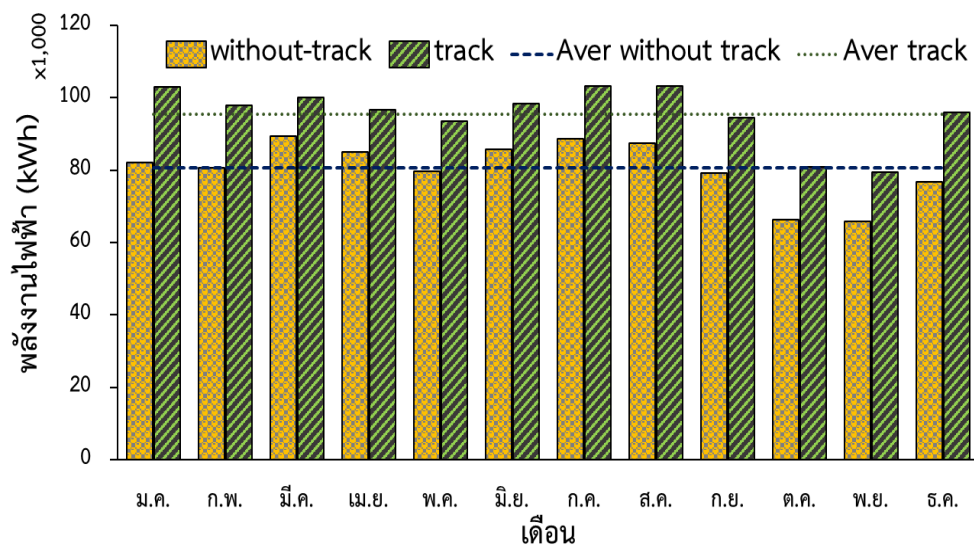


รูปที่ 8 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ระหว่างการทดลองและการใช้สมการทำนายของแผงที่ไม่ติดตั้งและติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์

ส่วนที่ 3 เป็นการประเมินสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบสองด้านทั้งที่ติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์และไม่ติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์ โดยใช้สมการทำนายที่ได้จากงานส่วนที่ 2 โดยจำลองกรณีศึกษาติดตั้งใช้งานในพื้นที่มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่ โดยนำไปติดตั้งบนพื้นคอนกรีตทาสีขาว ความสูงโครงสร้าง 1 เมตร ขนาดกำลังการติดตั้ง 1 MW ใกล้มหาวิทยาลัยแม่โจ้ (ละติจูดที่ 18.925 ลองจิจูดที่ 99.025) จำลองแผงขนาดและชนิดของอุปกรณ์ในระบบโดยใช้โปรแกรม PVsyst มีแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองด้าน (LONGI LR4-72HBD-430M) ขนาด 430 W จำนวน 2,635 แผง อินเวอร์เตอร์ (ABB PVS800-57-0500kW-A) ขนาด 500 kW 2 ตัว โดยอินเวอร์เตอร์ 1 ตัว ต่อแผงขนาน 77 สตริง นำมาอนุกรม 17 แผง และอินเวอร์เตอร์อีก 1 ตัว ต่อแผงขนาน 78 สตริง นำมาอนุกรม 17 แผง โดยวงจรไฟฟ้าขนาด 1 MW มีรูปแบบที่เหมือนกันทั้งระบบของแผงที่ไม่ได้ติดตั้งและติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์ ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 วงจรไฟฟ้าขนาดกำลังการติดตั้ง 1 MW



รูปที่ 10 พลังงานไฟฟ้าจากการทำนายทางคณิตศาสตร์ขนาดกำลังการติดตั้ง 1 MW

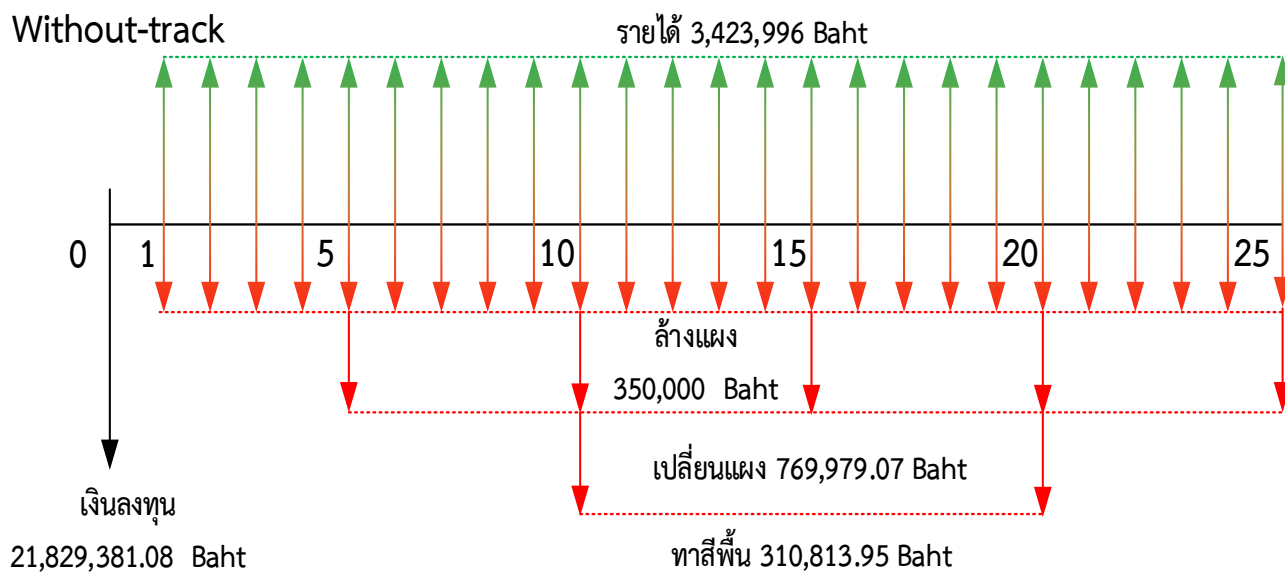
เมื่อพิจารณาค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ตลอดทั้งปี ใช้สมการที่ (10) และสมการที่ (11) ในการคำนวณ เนื่องจากเป็นสมการที่ได้จากเก็บข้อมูล ณ สถานที่ทดลองจริงจึงมีความเหมาะสมกว่าใช้ข้อมูลจากโปรแกรมอื่น ๆ พบว่า พลังงานไฟฟ้าตลอดทั้งปีจากแผงที่ติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์อยู่ที่ 1,758.78 เมกะวัตต์ชั่วโมงต่อปี สูงกว่าแผงที่ไม่ได้ติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์ 1,579.41 เมกะวัตต์ชั่วโมงต่อปี เมื่อคิดเป็นผลต่างพลังงานไฟฟ้าของแผงที่ติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์เพิ่มขึ้นถึง 179.37 เมกะวัตต์ชั่วโมงต่อปี หรือเพิ่มขึ้น 11.35% ดังแสดงในรูปที่ 10

ในกรณีทำการขายไฟฟ้าจะใช้ในสัญญาแบบ Feed-in Tariff (FiT) ที่รับซื้อไฟฟ้าในราคาหน่วยละ 2.1679 บาทต่อกิโลวัตต์ชั่วโมงและใช้อัตราดอกเบี้ย 6.22% [5] พบว่าในระยะเวลา 1 ปี รายได้จากการขายไฟฟ้าของแผงที่ไม่ได้ติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์ 3,423,996 บาทต่อปี แผงที่ได้ติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์ 3,790,415 บาทต่อปี ซึ่งเมื่อคิดระบบติดตามดวงอาทิตย์ทำให้มีรายรับเพิ่มขึ้น 366,419 บาทต่อปี ในขณะที่ระบบที่ไม่ได้ติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์มีเงินลงทุน 21,829,381.08 บาท ต่ำกว่าระบบที่ติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์ที่มีเงินลงทุนเพิ่มจากค่าที่ดินเนื่องจากต้องใช้

พื้นที่เยอะขึ้นและโครงสร้างรองรับแผงและระบบติดตามดวงอาทิตย์ ที่มีเงินลงทุน 26,559,208.64 บาท ซึ่งแต่ละระบบมีค่าใช้จ่ายด้านการบำรุงรักษาที่ต่างกันน้อยแตกต่างกันไปโดยระบบที่ติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์จะมีค่าใช้จ่ายเพิ่มในส่วนชุดควบคุมระบบติดตามดวงอาทิตย์ มีฝั่งกระแสเงินระบบที่ไม่ติดตั้ง (Without-Track) และติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์ (Track) ดังแสดงในรูปที่ 11 เมื่อพิจารณาความคุ้มค่าในการลงทุนจะพบว่า ระบบที่ติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์มีระยะเวลาคืนทุน 7.01 ปี นานกว่าระบบที่ไม่ติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์ที่มีระยะเวลาคืนทุน 6.38 ปี เนื่องจากระบบที่ติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์ทำมุมตั้งฉากกับดวงอาทิตย์ทำให้เกิดเงาบริเวณโครงสร้างของแถวถัดไป จึงต้องมีการเว้นระยะห่างของโครงสร้างการติดตั้งทำให้ใช้พื้นที่ติดตั้งที่มากกว่า ในส่วนของมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) ระบบที่ไม่ติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ 14,692,713.81 บาท สูงกว่าระบบที่ติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์ที่มีค่า (NPV) 11,910,512.54 บาท ในขณะที่อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) ของระบบที่ไม่ติดตั้งและติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์มีค่า 12.80% และ 10.80% ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่าอัตราดอกเบี้ยที่กำหนดไว้ 6.22% ดังนั้นทั้งสองระบบจึงคุ้มค่าต่อการลงทุน รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 1

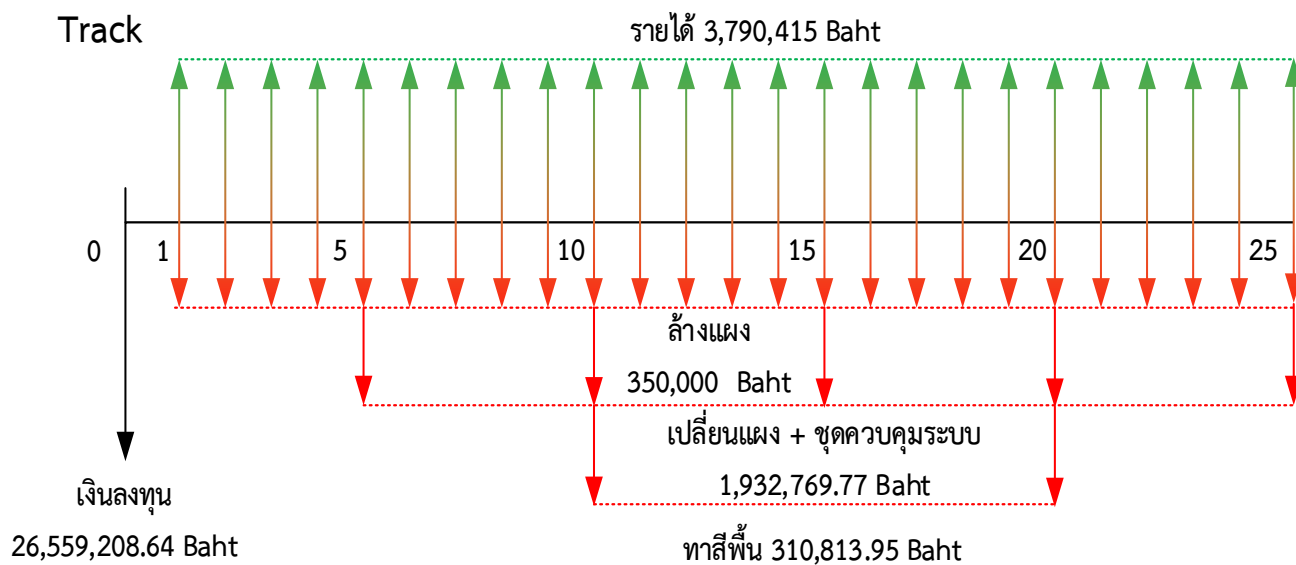


Without-track



ก. ผังกระแสเงินสดระบบที่ไม่ได้ติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์

Track



ข. ผังกระแสเงินสดระบบที่ติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์

รูปที่ 11 ผังกระแสเงินสด



ตารางที่ 1 การวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์ขนาดกำลังการผลิต 1 MW ในระยะเวลา 1 ปี

รายละเอียด	Without track	Track
พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ (kWh/year)	1,579,407	1,748,427
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (kWh/year)	-	10,354.91
รายได้จากการขายไฟฟ้า (Baht)	3,423,996	3,790,415
เงินลงทุน (Baht)	21,829,381.08	26,559,208.64
- ที่ดิน (Baht)	6,717,613.64	6,796,278.41
- แผงเซลล์แสงอาทิตย์สองด้าน (Baht)	7,699,790.70	7,699,790.70
- ล้างแผง (Baht)	350,000	350,000
- ทาสีพื้น (Baht)	310,813.95	310,813.95
- อินเวอร์เตอร์ (Baht)	2,100,000.00	2,100,000.00
- โครงสร้าง (Baht)	4,651,162.79	9,302,325.58
ระยะเวลาคืนทุน (year)	6.83	7.01
มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) (Baht)	14,692,713.81	11,910,512.54
อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) (%)	12.80	10.80

หมายเหตุ: สัญญาแบบ Feed-in Tariff (FIT) สำหรับปี 2565-2573 แสงอาทิตย์ (Solar Farm) แบบติดตั้งบนพื้นดิน 2.1679 Baht/kWh ระยะเวลา 25 ปี, ใช้อัตราดอกเบี้ย 6.22% [5], ราคาที่ดินเปล่าใกล้มหาวิทยาลัยแม่โจ้ 2.75 ไร่ ราคา 1,500,00 บาท (ไม่ติดตั้งระบบ 12.32 ไร่, ติดตั้งระบบ 12.46 ไร่) [17], แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองด้าน 430 W ราคา 3,311 บาท อินเวอร์เตอร์ (ABB PVS800-57-0500kW-A) 2 ตัว ราคา 2,100,000 บาท [18]

4. บทสรุป

งานวิจัยนี้ทำการประเมินสมรรถนะและความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ของระบบติดตามดวงอาทิตย์สำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองด้าน โดยทำการทดลอง 3 ส่วน ส่วนแรกทำการออกแบบระบบติดตามดวงอาทิตย์ พบว่าการจำลองค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ของระบบติดตามดวงอาทิตย์ มีความผิดพลาดอยู่ที่ 2.31% เมื่อได้สมการทำนายของระบบติดตามดวงอาทิตย์ที่ยอมรับได้แล้ว จากนั้นในส่วนที่ 2 จึงทำการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ติดตั้งและติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์ พบว่ากำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์เฉลี่ยอยู่ที่ 325.82 W ซึ่งมีความมากกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์ที่มีค่า

กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 272.95 W หรือเพิ่มขึ้นถึง 18.26% และพบว่าประสิทธิภาพของแผงที่ติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์เฉลี่ย 13.01% สูงกว่าแผงที่ไม่ได้ติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์เฉลี่ย 12.05% เมื่อทำการทดสอบในส่วนที่ 2 จึงได้นำข้อมูลที่ได้มาทำนายพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ตลอดทั้งปีจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในส่วนที่ 3 พบว่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผงที่ติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์ขนาดกำลังไฟฟ้าติดตั้ง 1 MW มีค่า 1,758.78 เมกะวัตต์ชั่วโมงต่อปี ซึ่งมีค่ามากกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์อยู่ที่ 1,579.41 เมกะวัตต์ชั่วโมงต่อปี เมื่อคิดกรณีขายไฟฟ้าที่ผลิตได้ในสัญญาแบบ Feed-in Tariff (FiT) พบว่าในระยะเวลา 1 ปี รายได้จากการขายไฟฟ้าของแผงที่ไม่ได้ติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์ 3,423,996 บาทต่อปี น้อยกว่าแผงที่ได้ติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์ 3,790,415 บาทต่อปี ผลต่างรายได้อยู่ที่ 366,419 บาทต่อปี ในขณะที่ความคุ้มค่าในการลงทุนพบว่า ระบบที่ติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์มีระยะเวลาคืนทุน 7.01 ปี นานกว่าระบบที่ไม่ติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์ที่มีระยะเวลาคืนทุน 6.83 ปี ในส่วนของมูลค่าปัจจุบันสุทธิระบบที่ติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ 14,692,713.81 บาท สูงกว่าระบบที่ติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์ที่มีค่า (NPV) 11,910,512.54 บาท ในขณะที่อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) ของระบบที่ไม่ติดตั้งและติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์มีค่า 12.80% และ 10.80% ตามลำดับ

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณโครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทนในกลุ่มประเทศอาเซียนสำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาของวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ในการสนับสนุนทุนการศึกษา รวมทั้งขอขอบคุณหน่วยวิจัยด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมอัจฉริยะ (SEEU) ที่ให้คำปรึกษา และให้ความช่วยเหลือเครื่องมืออุปกรณ์ในการวิจัยมา ณ ที่นี้



6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Wallapa T. Division of electrical engineering department of electrical engineering, auxiliary systems. Available from: <http://goc.egat.co.th/images/qcc-event/2560/articles/15-article.pdf>. [Accessed 18th July 2021].
- [2] Yusufoglu UA, Lee TH, Pletzer TM, Halm A, Koduvelikulathu LJ, Comparotto C, Kopecek R, Kurz H. Simulation of energy production by bifacial modules with revision of ground reflection. *Energy Procedia*. 2014; 55:389-95.
- [3] Sun X, Khan MR, Deline C, Alam MA. Optimization and performance of bifacial solar modules: A global perspective. *Applied energy*. 2018; 212:1601-10.
- [4] Tao Y, Bai J, Pachauri RK, Wang Y, Li J, Attaher HK. Parameterizing mismatch loss in bifacial photovoltaic modules with global deployment: A comprehensive study. *Applied Energy*. 2021; 303:117636.
- [5] Kantha N, Mongkon S, Polvongsri S. Performance and economic evaluation of bifacial solar panel installation on the roof of Kanchanaphisek King Rama 9th Sports Center Building (Maejo University). *RMUTL J Sci Technol*. 2023; 2023:51-61.
- [6] Patel MT, Ahmed MS, Imran H, Butt NZ, Khan MR, Alam MA. Global analysis of next-generation utility-scale PV: Tracking bifacial solar farms. *Appl Energy*. 2021; 290:116478.
- [7] Kilci O, Koklu M. Bifacial and monofacial photovoltaic modul with tracker system analysis. *J Amasya Univ Inst Sci Technol*. 2020;1(2):98-112.
- [8] Rao RR, Swetha HR, Srinivasan J, Ramasesha SK. Comparison of performance of solar photovoltaics on dual axis tracker with fixed axis at 13 N latitude. *Curr Sci*. 2015; 2087-94.
- [9] Bazyari S. A study on the effects of solar tracking systems on the performance of photovoltaic power plants. *J Power Energy Eng*. 201; 2(04):718.
- [10] Baengthit J, Polvongsri S. Performance study of bifacial solar panel with and without solar tracking system. *International Conference on Informatics, Agriculture, Engineering, Sciences and Technology (IAMBEST 2023)*; 2023 May 24-26; King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Prince of Chumphon Campus. 2023; 34-39.
- [11] Durusoy B, Ozden T, Akinoglu BG. Solar irradiation on the rear surface of bifacial solar modules: a modeling approach. *Sci Rep*. 2020; 10(1):13300.
- [12] Janjai S. *Solar Radiation*. Nakhon Pathom: Phetkasem Printing Group; 2017.
- [13] Nunak N, Suesut T. Measurement and Instrumentation. Available from: <http://foodnetworksolution.com/wiki/word/7240/error>, [Accessed 18th July 2021].
- [14] Chaiyat N. *Thermal Renewable Energy Technology*. Chiang Mai: Office of Academic Administration and Development, Maejo University; 2019.
- [15] Choowan T. A study of the economic value of the paperless system in the company P.C. Takashima (Thailand) Co., Ltd. Independent Study. National Institute of Development Administration, Bangkok; 2020; 102.
- [16] 9ASSET. Chiang Mai real estate. Available from: <https://www.9asset.com> [Accessed 18th July 2021].
- [17] Pimmeelai C. The comparing analysis of PV power plants performance between central inverters and string inverters. *Electrical Engineering*. Available from: <http://www.repository.mutt.ac.th/xmlui/bitstream/123456789/3334/1/RMUTT-158686.pdf>, [Accessed 18th July 2021].

RMUTL Engineering Journal

Faculty of Engineering
Rajamangala University of Technology Lanna



วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา