



# RMUTL Engineering Journal

ปีที่ 8 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม 2566

ISSN 2465-4248  
ISSN(Online) 2697-3839

## วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

Solar Battery Charger By Monitoring Via Smartphone Application

Thammakorn Krongtripop Putthiphong Kirdpipat Jessada Konpang Nattapong Intarawiset and Kobkhun Chaiyawong 1

การพัฒนาโปรแกรมจำลองผลตอบสนองทางความถี่สำหรับการออกแบบวงจรกรองความถี่  
ณัฐพงษ์ อินทวิเศษ ศักดิ์ชัย ตันติวิวัฒน์ อภิรัฐ จันทร์ทอง และ เจษฎา ก้อนแพง

12

การศึกษาการตรวจวัดอุณหภูมิผ่านเส้นใยนำแสงด้วยไอทีทีอาร์  
ศุภเศรษฐ จันทร์อ่อน และ อธิคม ฤกษ์บุตร

21

ระบบรดน้ำ ใสปุย และพ่นยาฆ่าแมลงอัตโนมัติสำหรับแปลงกุหลาบโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ อีเอสพี 8266 และ บลิ้งค์ ไอโอที แพลตฟอร์ม  
ณัฐชาติ ชูเกียรติขจร ชัชวาลย์ ถาคำ ปณต พุกกะพันธุ์ ปรัชญ์ ปิยะวงศ์วิศาล อนันท์ ทับเกิด และ ขวัญชัย เอื้อวิริยานุกูล

30

การใช้กากมูลโคเป็นส่วนผสมคอนกรีตเพื่อเป็นแนวทางผลิตอิฐบล็อกประสาน  
ประชุม คำพุด

42

สมบัติเชิงกลของชิ้นงานจากการพิมพ์สามมิติด้วยวิธีการอบอ่อนทางความร้อน  
ศิวศิษฐ์ ปิจมิตร ไกรสร วงษ์ปู่ ปรีดา จีวปัญญา ภาคภูมิ ใจชมพู และ พินิจ เนื่องภิรมย์

52

การฟื้นฟูเหมืองแร่ร้างและหลักเกณฑ์พิจารณาเพื่อใช้ประโยชน์  
ศิวโรจน์ ศิริลักษณ์ และ พิพัฒน์ ชื่นใจ

63



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 วิศวกรรมอุตสาหกรรม 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](mailto: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	อัครเอกมลิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร.ประดิษฐ์	เทอดทูล	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศาสตราจารย์ ดร.สุเชษฐ์	ลิขิตเลอสรวง	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.ชาคริต	สิริสิงห์	มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.กฤษณชนม์	ภูมิภิตติพิชญ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.บุญยัง	ปลั่งกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.กานต์	เกิดขึ้น	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์	ชื่นแขก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญรัตน์	สายสิริรัตน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.วราวุฒ	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	โสภาคแสง	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.นิวิธ	เจริญใจ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.อนุชา	วัชรภาสกร	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.อภินิธิ	โชติสังกาศ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.พลฤทธิ์	สกุลช่างสัจจะทัย	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.ชวโรจน์	ใจสิน	มหาวิทยาลัยแม่โจ้





ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงษ์	คงประเสริฐ	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมภาพ	รอดอัมพร	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฐปน	ชื่นบาล	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริภรณ์	ชื่นบาล	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยวัฒน์	สากุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พุทธิพล	ดำรงชัย	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิวา	แก้วปลั่ง	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยรส	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	จีนะวงศ์	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 8 ฉบับที่ 2 ประจำเดือนกรกฎาคม - ธันวาคม 2566 อยู่ในฐานข้อมูลศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (TCI) กลุ่มที่ 1 บทความวิจัยที่ส่งผ่านระบบได้รับการได้ผ่านการประเมินคุณภาพจากกองบรรณาธิการ และผู้ทรงคุณวุฒิ (Peer Review) จากภายในและภายนอกมหาวิทยาลัย กองบรรณาธิการจะรักษาคุณภาพของวารสารให้ได้มาตรฐาน เพื่อให้วารสารวิศวกรรมศาสตร์ (RMUTL Eng. J.) เป็นที่ยอมรับและเกิดการแบ่งปันองค์ความรู้ทางวิชาการที่มีคุณภาพและทันสมัยอย่างต่อเนื่อง

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา (RMUTL Eng. J.) ฉบับนี้ได้รวบรวมบทความทางวิชาการที่ผ่านการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิ จำนวน 6 บทความ ประกอบด้วยบทความวิชาการด้านวิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมอุตสาหการ และบทความปริทัศน์ ด้านวิศวกรรมเหมืองแร่ จำนวน 1 บทความ สำหรับผู้ที่สนใจสามารถอ่านบทความฉบับปัจจุบันหรือฉบับย้อนหลังแบบออนไลน์เพิ่มเติมได้ทางเว็บไซต์ <https://www.tci-thaijo.org/index.php/RMUTLEngJ>

ในนามของกองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา (RMUTL Eng. J.) ขอขอบพระคุณนักวิจัยทุกท่านเป็นอย่างสูง ที่ส่งบทความมาพิจารณาเพื่อตีพิมพ์ ผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่เสียสละเวลาในการประเมินบทความ และให้คำแนะนำในการปรับปรุงเนื้อหาบทความให้มีคุณภาพ คณะผู้บริหารมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ผู้สนับสนุน รวมทั้งคณะทำงานในกองบรรณาธิการวารสาร (RMUTL Eng. J.) และในโอกาสนี้ขอเชิญชวนผู้อ่านที่สนใจ ส่งบทความทางด้านวิชาการหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้องทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ เพื่อตีพิมพ์ในวารสาร (RMUTL Eng. J.) ในฉบับต่อ ๆ ไป

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษฎา ยิ่งขยัน)

บรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา



# สารบัญ

ปีที่ 8 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม 2566

## บทความวิชาการ

Solar Battery Charger By Monitoring Via Smartphone Application

1

Thammakorn Krongtripop, Putthiphong Kirdpipat, Jessada Konpang, Nattapong Intarawiset and  
Kobkhun Chaiyawong

การพัฒนาโปรแกรมจำลองผลตอบสนองทางความถี่สำหรับการออกแบบวงจรกรองความถี่

12

ณัฐพงษ์ อินทวิเศษ ศักดิ์ชัย ตันติวิวัฒน์ อภิรัฐ จันทร์ทอง และ เจษฎา ก้อนแพง

การศึกษาการตรวจวัดอุณหภูมิผ่านเส้นใยนำแสงด้วยไอทีดีอาร์

21

ศุภเศรษฐ์ จันทร์อ่อน และ อธิคม ฤกษ์บุตร

ระบบรดน้ำ ใสปุย และพ่นยาฆ่าแมลงอัตโนมัติสำหรับแปลงกุหลาบโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ อีเอสพี 8266 และ  
บลูทูธ ไอโอที แพลตฟอร์ม

30

ณัฐชาติ หิรัญชูเกียรติจิร ชัชวาลย์ ถาคำ ปณต พุกกะพันธุ์ ปรัชญ์ ปิยะวงศวิศาล อนันต์ ทับเกิด และ  
ขวัญชัย เอื้อวิริยานุกูล

การใช้กากมูลโคเป็นส่วนผสมคอนกรีตเพื่อเป็นแนวทางผลิตอิฐบล็อกประสาน

42

ประชุม คำพุด

สมบัติเชิงกลของชิ้นงานจากการพิมพ์สามมิติด้วยวิธีการบออ่อนทางความร้อน

52

ศิวิชัย ปิยะมิตร ไกรสร วงษ์ปู้ ปริดา จิ๋วปัญญา ภาคภูมิ ใจชมภู และ พินิจ เนื่องภิรมย์

## บทความปริทัศน์

การฟื้นฟูเหมืองแร่ร้างและหลักเกณฑ์พิจารณาเพื่อใช้ประโยชน์

63

ศิวโรดม ศิริลักษณ์ และ พิพัฒน์ ชื่นใจ





## Solar Battery Charger By Monitoring Via Smartphone Application

Thammakorn Krongtripop<sup>1</sup>, Putthiphong Kirdpipat<sup>2\*</sup>, Jessada Konpang<sup>2</sup>, Nattapong Intarawiset<sup>3</sup> and Kobkhun Chaiyawong<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima

744 Nai Mueang, Mueang Nakhon Ratchasima, Nakhon Ratchasima, Thailand, 30000

<sup>2</sup>Department of Electrical and Telecommunication Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Krungthep

2 Nanglinchee Road, Tungmahamek, Sathorn, Bangkok, Thailand, 10120

<sup>3</sup> Department of Industrial Education and Technology, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna

128 Huay Kaew Road, Muang, Chiang Mai, Thailand, 50300

<sup>4</sup>Department of Electrical Engineering, Faculty of Industry and Technology, Rajamangala University of Technology Isan, Sakhon Nakhon Campus

199 Phang Khon-Waritchaphum Road, Phang Khon District, Sakhon Nakhon, Thailand, 47160

\*Corresponding Author: putthiphong.k@mail.rmuk.ac.th. Phone Number: 09-2615-2695

*Received: 1 December 2022, Revised: 27 April 2023, Accepted: 27 April 2023*

### Abstract

Solar cell monitoring system using the Blynk application has some restrictions in crossing platforms for Android and iOS. Because the widget boxes of the Blynk application are limited in the energy usage to only 2,000 joules, the web dashboard also has complexity for the application. This paper proposes a solar battery charger monitoring mobile application for Android and iOS platforms with Firebase, which can operate cross-platform by using Ionic Framework. Cordova is mainly the management of Ionic Framework, which will be getting commands to form HTML, CSS, and Angular JS to each application of Android and iOS. We implement solar battery charger by using simple buck converter interfaces with Arduino board under Pulse Width Modulation to control the battery charger, and using ACS712 module and voltage divider circuit interface with Arduino to measure the current and battery's voltage while charging the battery. NodeMCU is interfaced with an Arduino module for transferring all data via WiFi to Android and iOS Smartphones. Those data will be transferred for the record on Firebase at Cloud Server. For the experimental results, the solar charger can fully charge the battery in 10-12 hours which may depend on the sun's irradiation each day. The average battery voltage after fully charged is 13.8V. On Smartphones of Android and iOS, our applications can control and display the operation correctly. In addition, the application displays the history of battery charging as well. Our research indicates that Firebase has a significant and necessary crossing platform capability on Smartphones that can operate for Android and iOS.

**Keywords:** Solar Cell, Monitoring System, Blynk Application, Solar Battery Charger



## 1. Introduction

Recently, the advance of Radio Frequency (RF)/ Solar energy is a significant subset of renewable energy. It is the fastest-growing source in every country, including THAILAND [1]. Solar energy may replace electrical power usage and help save electricity bills. Traditionally, electrical production may be caused by fossil fuel exhaustion and environmental pollution problems. However, solar energy has become clean energy for all environments. Many organizations in THAILAND have applied photovoltaic cells in their work, like at hospitals, office buildings, factories, etc. A photovoltaic cell, typically known as a solar cell, is a device that converts solar energy to electric power directly. The solar cell is usually made from semiconductor materials like Silicon (Si) [2], Gallium Arsenide (GaAs) [3], and Cadmium Telluride (CdTe) [4]. The efficiency of solar panels may depend on various factors, i.e., sun position, irradiation, temperature and humidity, dust and shade effect. Currently, several groups of researchers have been presented, such as solar panel tracking [5]-[9], the impact of the environment [10]-[14], solar application [15]-[19], solar battery charger [20]-[23] and solar monitoring system [24]. Solar panel tracking [5]-[7] applied LDR to detect and follow the sun's position to adjust the solar panel's tilt. The moving of the sun's position is caused by low voltage and low current in the solar cell during the daytime. The next research group is impacting the environment for the solar cell, which causes by temperature and humidity [10]-[11], [13], dust [11]-[12], and shade [11]-[12], [14]. Those of all factors may cause decreasing efficiency. Solar application [15]-[19] is hardware implementation using the photovoltaic power supply. Solar battery charger

[20]-[23] charges the battery by photovoltaic during the day to support any application. The solar monitor system [24] monitors solar panels' voltage, current, and power during the day. For instance, the paper in [20] proposed a design of a battery charger that fed from two solar panels for an E-rickshaw. All authors used one solar panel mounted on the top and another at the backside of the E-rickshaw. Both solar panels can track the sun's position by an elevation angle of about 10-15 degrees with Maximum Power Point Tracking (MPPT). This method has more efficiency than a single solar panel. All authors in [21] proposed the designing and implementation of portable chargers for lithium-ion using the solar panel. Because the lithium-ion battery is widely used in electronic components, Arduino Nano is applied to process and control this battery charger. In the paper, [22] proposed the hybrid electric charging station by monitoring the voltage, current, and power via an IoT system. Wind and solar cells are combined to charge the electric vehicle's battery. A Monitor system has been proposed under the Blynk platform, which is managed by Raspberry Pi. The article in [23] proposed a portable solar mobile system with an IoT application. This prototype comprises many features such as the monitoring of battery charger, temperature, and humidity of power distribution box by showing via LCD and Blynk application on Smartphone. The research in [24] has also proposed a monitor system of solar panels which displays through the Blynk application on smartphones. The voltage, current, and temperature are monitored in this project. Therefore, Arduino Mega2560 is used for controlling the operation. The authors have proposed a monitor system for solar cells only without battery charging.



However, those previous papers have proposed solar battery chargers [20]-[23]. Some of the papers may be applied the monitor system under an IoT platform such as a Blynk application [22]-[23]. The Blynk platform still has some restrictions as follows: 1) Blynk application has many devices in widget boxes which are limited by energy usage at 2,000 joules only. For this reason, if we need more devices or the energy usage is over 2,000 joules, we must buy this option. 2) Blynk application can't transfer variable value to the other platforms. This application means that it is difficult for cross-platform applications, and 3) the web dashboard in the Blynk application is not easy to use.

So, our paper presents a simple solar battery charger that monitors Mobile Applications without using Blynk, but we developed Mobile Application based on Firebase, which is more flexible. Firebase can cross-platform for both Android and iOS. We have several features, such as a battery charger, controlling and displaying, warning, and battery charging history. The battery charger is the initial voltage and current setting for solar cells and battery charging. Controlling and displaying are setting and showing the status of charging the battery via Smartphone, such as date and time in the present, voltage and current from the solar cell, voltage and current at the battery, status of battery charging, and quality of WiFi system. The warning alerts the battery charging fault if the voltage and current of the solar cell are different from the setting values. The history of battery charging shows all the information for the past month. Our work indicates that Firebase is significant in crossing platforms on Mobile Applications in Android and iOS.

## 2. Materials and Methods

### 2.1 General description of proposed system

Blynk application is a platform of IoT system for monitoring and controlling via Smartphone. Several articles have proposed this platform for Mobile Applications like smart farms [15]-[17] and smart homes [18], including solar battery chargers [22]-[23]. This platform can easily develop the hardware application if the user primarily knows the Arduino program. However, some options may be limited if we require many devices in widget boxes or if there are various Smartphones for each user. For this reason, we decided to cross-platform Smartphones by using Firebase to monitor solar battery chargers. Our proposed paper may help motivation for other applications. The solar battery charger system comprises a simple buck converter that adjusts the voltage to match each battery. Pulse Width Modulation (PWM) signal from the Arduino board will control the operation of the buck converter by switching ON and OFF continuously while charging the battery. The PWM method has OFF status for a short time in battery charging. This method may reduce the overcharge, improving the better chemical action in the battery. Our work comprises an Arduino board that controls all operations by measuring the voltage and current of solar cells and battery using the ACS712 module and display on LCD. To transfer all data to Mobile Application, we used NodeMCU to connect via the WiFi system by interfacing with the Arduino module. We implemented our work to monitor the solar battery charger using Firebase, which is more flexible than the Blynk platform. We also apply Ionic Framework for displaying on iOS.





## 2.2 Background and motivation

In this section, we explain the hardware components in our work that consists of several devices such as NodeMCU, Firebase, and Ionic Framework, respectively.

### 2.2.1 NodeMCU

NodeMCU is a microcontroller module that can transfer all data to a Smartphone application via a WiFi system. This node is more flexible than the Arduino board by supporting the Internet of Things. Several features are supported, i.e., 32 bits processor, memory flash 4 Mbs, low voltage operation, USB port, SPI port for SD card, and one analog to a digital channel, as shown in Fig. 1.

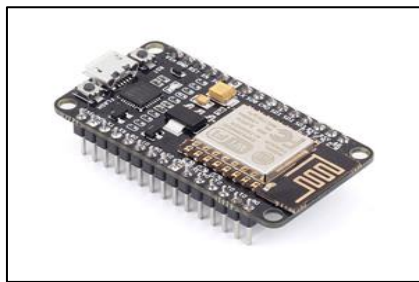


Figure 1 NodeMCU [15]

### 2.2.2 Firebase

Firebase [25] is a real-time database for any application, web application, and Mobile Application based on a Google platform service for IoT systems. This database is mainly core for interfacing and transferring all data between NodeMCU and Raspberry Pi to Android and iOS. It may support both Python and JavaScript languages. Firebase is a database in the form of NoSQL, which keeps all data in JSON form. There is rapid real-time synchronization with each device, and it supports an offline system. This real-time means that all data can keep in the locally until. After the system becomes

online again, the synchronization will continuously update. There is also a security rule in which the user can assign the condition of accessing the data for reading and writing in Android and iOS. Firebase has a logo, as shown in Fig. 2. There are many tools and services, as follows:



Figure 2 Firebase Logo [25]

Cloud Firestore: This feature is saving and synchronizing of data between the user and device based on NoSQL at the host on the Cloud Server. This synchronization is a real-time operation that may support offline systems, including investigating all data.

Authentication: This is managing the safety of Firebase authentication. There are various methods to confirm by using email and password. It may also combine with the third applications like Google, Facebook, and Twitter.

Hosting: This function is reducing the complexity of web hosting. When the user uploads all web application content, this service automatically sends all content to CDN worldwide. The user will get a certificate of SSL for safety and reliability.

Crashlytics: It is management and real-time reporting of each problem on Firebase, respectively, which helps the user to reduce the overall times of solving.

Performance Monitoring: This feature is an analysis of the problem on the application in the device and improves the performance of that application.



**Test Lab:** This function automatically tests the application on the device by Google, which uses the Firebase test lab during development to find the defect.

### 2.2.3 Ionic Framework

Ionic Framework [26] is a tool for developing Mobile Applications by applying for the basic program, i.e., HTML, CSS, and JavaScript languages for development which will send out the command code in the form of each application to Android, iOS, and Windows Mobile. There are many advantages, such as open source, community, one application to many platforms, component creation, comprehensive browser support, UI design, Web technology, and simplicity. In addition, it can use Angular Framework, which can support Web Applications by using Cordova for management. The structure of the Ionic Framework is shown in Fig. 3.

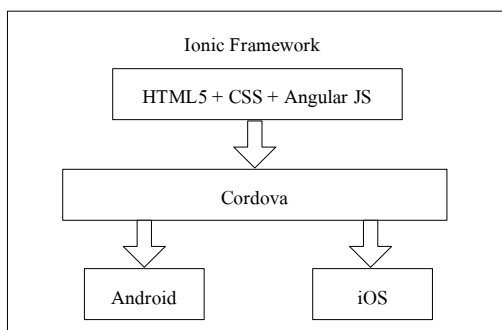


Figure 3 Ionic Framework [26]

### 2.3 Hardware implementation

Our proposed system is managed by an Arduino module which interfaces with several devices. We divide our circuit into many parts, i.e., battery charger by solar energy, voltage, and current measurements for battery and solar cell and Mobile Application, as shown in Fig. 4. Our concept supports Mobile Applications by transferring all data to Internet Network via a WiFi

system using NodeMCU interfaces with an Arduino module. We consider that Firebase may be cross-platform for Android and iOS, which is more flexible than using the Blynk application for the monitoring system.

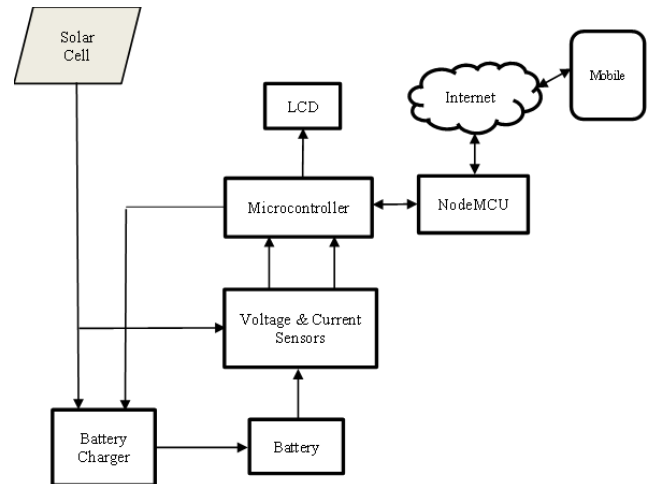


Figure 4 Block Diagram of Proposed System

Fig. 5 is illustrated all our circuits. The voltage and current of the battery and solar cell are measured by ACS712 modules and sent those values to the Arduino board for adjusting the duty cycle of Pulse Width Modulation (PWM), which corresponds with the voltage and current as user setting for each battery. PWM signal will be transferred to the buck converter circuit [27] to reduce the voltage and current for each suitable battery. This is because the voltage and current from the solar cell are commonly more than the voltage and current of the battery, which is improper for the charger. This is also a cause of degradation and provides a short lifetime. Arduino module will display the voltage and current while charging on LCD and transferring all information via WiFi by NodeMCU for Mobile Application.

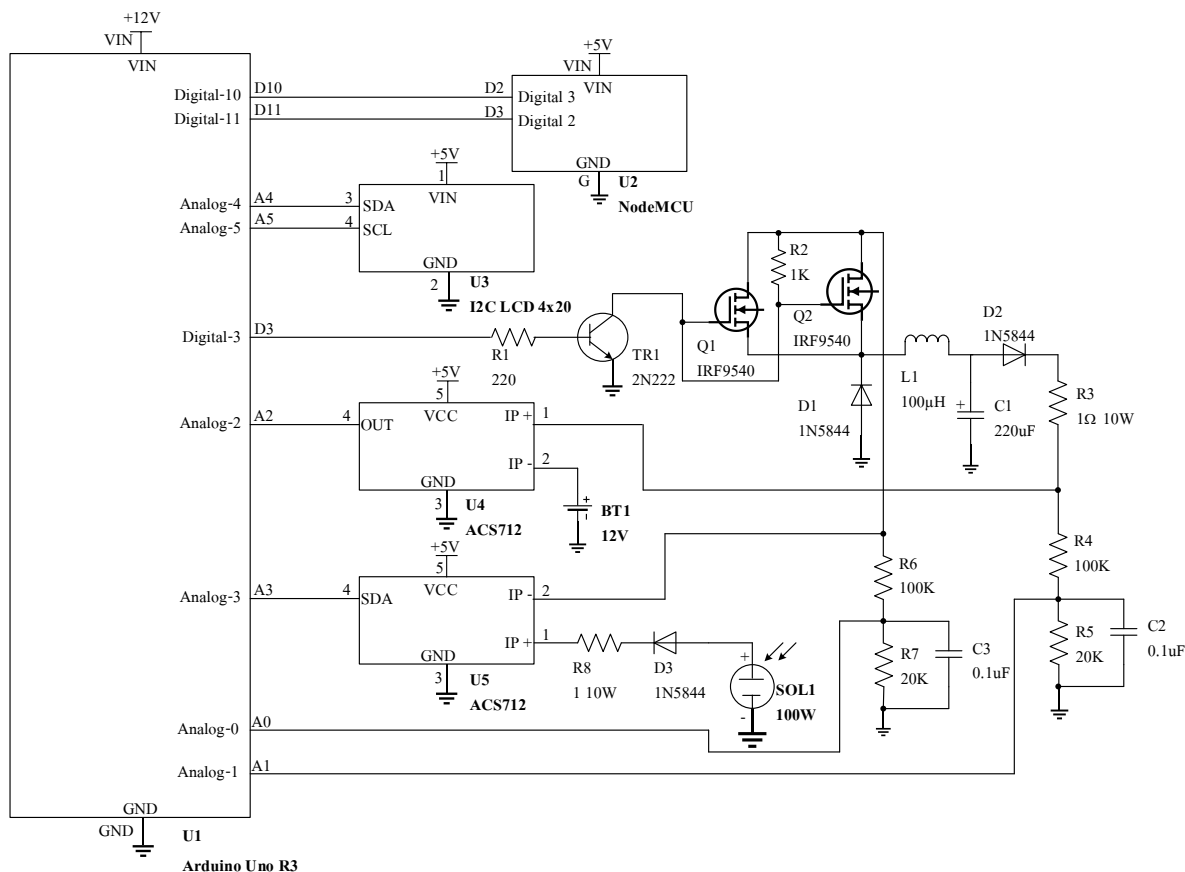


Figure 5 All Circuits of Solar Battery Charge

The buck converter comprises two MOSFETs, a capacitor, inductor, resistor, and diode, which get PWM signal from the Arduino board via pin-3 by using transistor 2N222 to drive the PWM signal. This signal will be sent to MOSFETs, switching to the discontinuous mode for charging the battery. Our circuit's limited voltage and current can be received at 12 V and 10 A, respectively.

Our program is divided into 3 parts. The first is a battery charging controller, the second transmits all data via NodeMCU, and the last displays the battery status on Mobile Application. The battery charger program has cooperated with voltage and current sensors, which composes of several functions, i.e., checking and displaying the sensor status, initial setting of voltage and current before battery charging, setting the time for charger, battery charging, and transferring

all data to NodeMCU. Transmitting all data via NodeMCU is composed of several functions, such as connection to the Firebase function, getting data from the application, getting data from Arduino, transmitting all data to the application on Firebase, and so on. The last program shows the battery status on the Mobile Application, which consists of getting the battery status from Firebase and displaying functions, ON-OFF function, setting the voltage and current functions, displaying the history of battery charging function and fault of charging function, etc.

### 3. Results and Discussion

Our experiments are divided into 3 parts: battery charging, controlling and displaying via Mobile Application, and recording and showing the history of battery chargers, respectively.



This first experiment is battery charging. We have many parameters, i.e., deep cycle battery is 12 V at 7 A and solar panel is 100 W. We use the light meter model of TM-202, and the multimeter model is Amprobe AM-250. We test our battery charging under total experiments are 3 times by measuring the voltage and current 3 times to calculate the average values versus the average light intensity. The battery is 3 sets, and we use 1 set per 1 time experiment for 2 days. Each day's experiment is 6 hours, starting at 9 A.M. until 3 P.M. This is because the sun has less light intensity after 3 P.M., which may not be enough for battery charging. The total days of all experiments cover 6 days. We depict the details of the fully charged battery experiment in Table 1. Our work also implements the abnormal notification that may occur while charging the battery and will alert the application. However, the user must find out the possible cause: 1) Solar cell voltage is less than battery voltage which means no charge. 2) The battery's voltage is over 14.1 V, which means an overcharge. 3) Solar cell voltage is less than 15 V, charging in lower charge mode. In addition, we also record all information in Firebase on Cloud Server, which will be depicted in the history part.

Table 1 The details of charging the battery

No.	Day	Time	Status
1.	1-2	9 A.M. to 3 P.M. of each day	fully charged battery in 2 days
2.	3-4	9 A.M. to 3 P.M. of each day	fully charged battery in 2 days
3.	5-6	9 A.M. to 3 P.M. of each day	fully charged battery in 2 days
Average days of 3 times			2 days

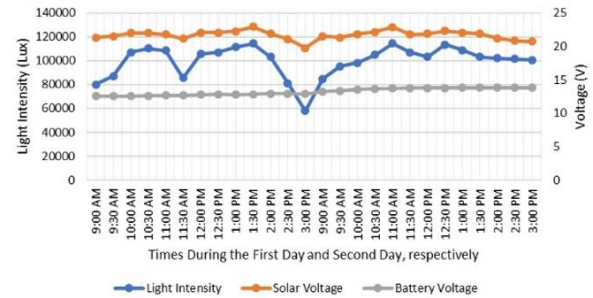


Figure 6 Average Voltages of Solar Cell and Battery versus Light Intensity during 2 Days

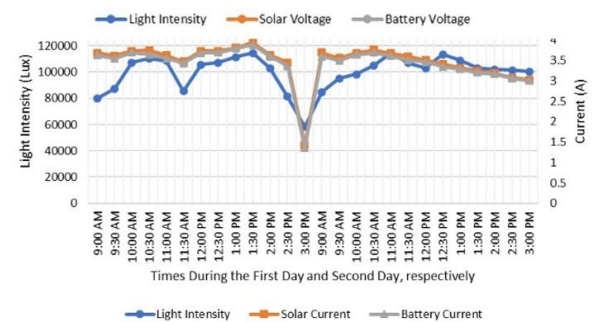


Figure 7 Average Currents of Solar Cell and Battery versus Light Intensity during 2 Days

Figs. 6 and 7 are depicted the average voltage and current versus the average light intensity. We observe that the increase in light intensity will provide the average voltage and current of the solar cell are changed as well. However, the voltage of the battery is still fixed for charging. During the experiment, we can see that the average of current is dramatically low at 1.354 A of 58200 luxs because the radiation of the sun decreases after 3 P.M. on the first day, and we start our experiment continuously at 9 A.M. on the second day, which we got 84700 luxs for beginning at 3.595 A. We found that the time of fully charged approximately 10-12 hours which covers 2 days of each experiment. The total of experiments are 3 times in 6 days which will be considered in terms of average value as described previously. Typically, the fully charged time of the battery may also depend on the other parameters, i.e., humidity, temperature, and the moving of the

sun's position each day. At the fully charged, we got a voltage equal to 13.8V.

The following experiment is controlling and displaying via Mobile Applications for Android and iOS. This experiment is based on a WiFi connection. We consider the function of ON/OFF controlling and setting the initial voltage and current values, including the other parameters, before charging. We test the function of each point 25 times so that it can operate and display correctly. Displaying fault means the user may set the voltage and current or some parameters incorrectly. All of the experiments are shown in Fig. 8.

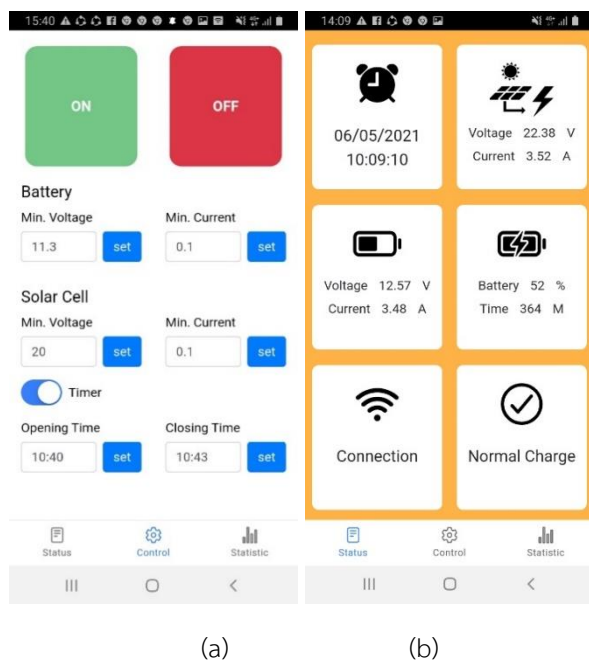
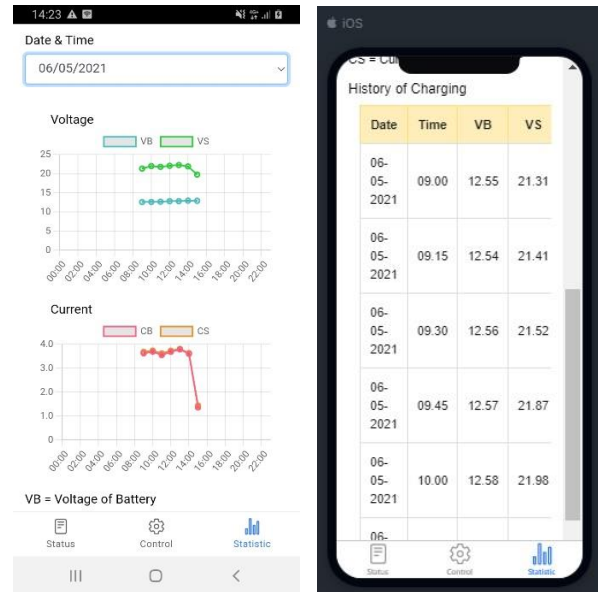


Figure 8 The Parameters Based on Android Smartphone, (a) Initial Setting, (b) Operation and Display



(a) (b)

Figure 9 History of Battery Charging, (c) Graph under Android, (d) Table under iOS

The last experiment is recording and displaying the history of the battery charger. The recording is done during battery charging in the first step. We test battery charging and also record the voltage and current every 15 minutes on the Firebase platform. The total results can plot the graph and table for displaying via Smartphone as shown in Fig. 9 (c) under Android and Fig. 9 (d) under iOS, respectively. As previous mention, we proposed the cross-platform based on firebase. We applied Ionic Framework for testing on the iOS platform. Our proposed technique can operate on both Android and iOS.

#### 4. Conclusions

We have proposed a solar battery charger by monitoring both Android and iOS. This is because the solar cell monitoring system under the blynk application is limited for several items. It is difficult to monitor on various platforms, such as Android and



iOS. Our work has implemented a solar battery charger system, thereby using the cross-platform method for a monitoring system. We have applied Firebase and Ionic Framework in crossing platform. Cordova is a significant core in Ionic Framework, which can manage by getting commands from HTML, CSS, and Angular JS for transferring and displaying on various platforms, i.e., Android and iOS. We applied Arduino and NodeMCU boards to process the simple buck convertor in the solar battery charger under the PWM controller. ACS712 module and voltage divider circuit are interfaced with Arduino to measure the current and voltage while charging the battery. NodeMCU is applied for relaying all information to Firebase on the Cloud Server, which is a database of this system. As the experimental results, we found that a solar battery charger can charge the battery for 10-12 hours during 2 days continuously. The fully charged battery can be achieved at 13.8 V. We have also recorded the battery charging history. In future work, we will apply the machine learning method to learn the abnormal light intensity each day to predict the time of fully charging the battery. The advantage of this technique is that it may help the user to plan battery usage correctly.

## 5. Acknowledgment

We thank Mr. Chittisan Wichito, Mr. Kritsanapong Phonok, and Miss. Supattra Chitsom from the Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala, University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima, Thailand, which helps support and provide experiments of this research, has finished successfully.

## 6. References

- [1] Yoomak S, Patcharoen T, Ngaopitakkul A. Performance and economic evaluation of solar rooftop systems in different regions of Thailand. *Sustainability*. 2019 Nov 25;11(23):6647.
- [2] Siddula S, Gleeson CD. Solar Panel Position Control and Monitoring System For Maximum Power Generation. In 2020 International Conference on Smart Technologies in Computing, Electrical and Electronics (ICSTCEE) 2020 Oct 9. pp. 169-174.
- [3] Outes C, Seoane N, Almonacid F, Fernández EF, García-Loureiro AJ. Study of GaAs vertical solar cells at high concentration levels. In 2018 Spanish Conference on Electron Devices (CDE) 2018 Nov 14. pp. 1-3.
- [4] Pandey R, Drayton J, Gregory C, Kumar NM, Tyler K, King R, Sites J. Cadmium Telluride Cells on Silicon as Precursors for Two-Junction Tandem Cells. In 2020 47th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC) 2020 Jun 15. pp. 1326-1329.
- [5] Hassan R, Abubakar B. Intelligent arduino based automatic solar tracking system using light dependent resistors (LDRs) and servo motor. *Optics*. 2020;9(2):13.
- [6] Rosma IH, Putra IM, Sukma DY, Safrianti E, Zakri AA, Abdulkarim A. Analysis of single axis sun tracker system to increase solar photovoltaic energy production in the tropics. In 2018 2nd International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICon EEI) 2018 Oct 16. pp. 183-186.





- [7] Ghosh J, Dey N, Das P. Active solar tracking system using node mcu. In 2019 International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON) 2019 Sep 27. pp. 924-928.
- [8] Jurj SL, Rotar R, Opritoiu F, Vladutiu M. White-box testing strategy for a solar tracking device using nodemcu lua esp8266 wi-fi network development board module. In 2018 IEEE 24th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME) 2018 Oct 25. pp. 53-60.
- [9] Surendhar PS, Tamilselvan S. Efficient solar tracking system using GPS. International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology (IJRASET), 2018, 6(4): 3842-3849.
- [10] Samal KB, Bisoyi A. Investigation of environmental effects on the performance of solar PV modules. International Conference on Emerging Frontiers in Electrical and Electronic Technologies (ICEFEET), 2020 July 10-11; Patna, India: p. 1-5.
- [11] Mughees M, Sadaf M, Khan S, Rasheed A, Daniel K, Gelani HE. Impact of Shading, Dust Accumulation and Temperature rise on the Performance of Solar PV: The Case of Pakistan. In 2020 International Symposium on Recent Advances in Electrical Engineering & Computer Sciences (RAEE & CS) 2020 Oct 20. Vol. 5, pp. 1-6.
- [12] Phoolwani UK, Sharma T, Singh A, Gawre SK. IoT based solar panel analysis using thermal imaging. In 2020 IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS) 2020 Feb 22. pp. 1-5.
- [13] Yoomak S, Jettanasen C, Ngaopitakkul A. Design of solar charger challenging various solar irradiance and temperature levels for energy storage. IJICIC. 2018 Dec 1;14(6):2071-90.
- [14] Sunanda W, Gusa RF, Tiandho Y, Pratama EA. Impact of shading net on photovoltaic cells performance. Jurnal Teknik Elektro. 2019;11(2):56-60.
- [15] Chieochan O, Saokaew A, Boonchieng E. Internet of things (IOT) for smart solar energy: A case study of the smart farm at Maejo University. In 2017 international conference on control, automation and information sciences (ICCAIS) 2017 Oct 31. pp. 262-267.
- [16] Shukla A, Jain A. Smart Automated Farming System using IOT and Solar Panel. Science and Technology Journal. 2019;7(2):22-32.
- [17] Udutalapally V, Mohanty SP, Pallagani V, Khandelwal V. sCrop: A Internet-of-Agro-Things (IoAT) enabled solar powered smart device for automatic plant disease prediction. arXiv preprint arXiv:2005.06342. 2020 May 9.
- [18] Manur A, Marathe M, Manur A, Ramachandra A, Subbarao S, Venkataramanan G. Smart solar home system with solar forecasting. In 2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid and Renewable Energy (PESGRE2020) 2020 Jan 2. pp. 1-6.
- [19] Tabassum Z, Shylaja V. An IoT based garbage collection system with solar powered smart trash bin using NodeMCU. International Journal of Engineering Science and Computing (IJESC), 2021, 11(7): 28490-28494.





- [20] Halder I, Debnath D, Choudhury TR. Design of a battery charger fed from two solar panels arranged at different inclination for e-rickshaw and dc microgrid applications. In 2021 1st International Conference on Power Electronics and Energy (ICPEE) 2021 Jan 2. pp. 1-6.
- [21] Hudy W, Matviikiv O, Pytel K, Gumula S, Koziol M, Bilski K. Experimental Solar-Based Rechargeable Battery Charger as an Example of Engineering Education. In 2021 IEEE XVIIth International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH) 2021 May 12. pp. 86-89.
- [22] Madharshan A, Aravinth, Dheneshraajan, Gokul, Praveena P, Hybrid electric charging station using raspberry Pi. International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT), 2020, 10(1): 1-3.
- [23] Mariadass SP, Al-Humairi SN, Daud RJ. Design a portable solar mobile system with an IoT integration-based. In 2021 IEEE 12th Control and System Graduate Research Colloquium (ICSGRC) 2021 Aug 7. pp. 40-45.
- [24] Gusa RF, Sunanda W, Dinata I, Handayani TP. Monitoring system for solar panel using smartphone based on microcontroller. In 2018 2nd international conference on green energy and applications (ICGEA) 2018 Mar 24. pp. 79-82.
- [25] Firebase Logo. Available from: <https://firebase.google.com>.
- [26] Waranashiwar J, Ukey M. Ionic framework with angular for hybrid app development. International Journal of New Technology and Research. 2018 May;4(5):263068.
- [27] Arduino PWM Solar Charger. Available from: <https://www.instructables.com/arduino-solar-charge-controller-pwm>.





## การพัฒนาโปรแกรมจำลองผลตอบสนองทางความถี่สำหรับการออกแบบวงจรกรองความถี่ Development of Frequency Response Simulation Program for Filter Circuit Design

ณัฐพงษ์ อินทวิเศษ<sup>1</sup> ศักดิ์ชัย ตันติวิวัฒน์<sup>2\*</sup> อภิรัฐ จันทร์ทอง<sup>3</sup> และ เจษฎา ก้อนแพ่ง<sup>4</sup>

<sup>1</sup> สาขาวิศวกรรมอุตสาหการและเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา  
128 ถนนห้วยแก้ว อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300

<sup>2</sup> สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย  
1 ถนนราชดำเนินนอก อำเภอเมืองสงขลา จังหวัดสงขลา 90000

<sup>3</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย  
99 ตำบลท้องเนียน อำเภอขนอม จังหวัดนครศรีธรรมราช 80210

<sup>4</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ  
2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพมหานคร 10120

Nattapong Intarawiset<sup>1</sup>, Sugchai Tantiviwat<sup>2\*</sup>, Apirun Chanthong<sup>3</sup> and Jessada Konpang<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Department of Industrial Education and Technology, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna

128 Huay Kaew Road, Muang District, Chiang Mai, Thailand, 50300

<sup>2</sup> Department of Mechanical Engineering Faculty of Industrial Education and Technology, Rajamangala University of Technology Srivijaya

1 Ratchadamnoennok Road, Muang District, Songkhla, Thailand, 90000

<sup>3</sup> Department of Electrical Engineering College of Industrial Technology and Management, Rajamangala University of Technology Srivijaya

99 Tongnien, Khanom District, Nokhon Si Thammarat, Thailand, 80210

<sup>4</sup> Department of Electrical and Telecommunication Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Krungthep

2 Nanglingee Road, Thungmahamek, Sathorn, Bangkok, Thailand, 10120

\*ผู้รับผิดชอบบทความ: sugchai.t@mutsv.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 08-8782-6442

Received: 13 November 2022, Revised: 28 April 2023, Accepted: 28 April 2023

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบโปรแกรมจำลองด้วยการใช้ MATLAB GUI สำหรับการคำนวณค่าองค์ประกอบของวงจรและแสดงผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองความถี่สำหรับระบบการสื่อสารไร้สาย การจำลองสามารถใช้ทฤษฎีการคำนวณแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ ประกอบด้วย การคำนวณด้วยวงจรแบบ T วงจรแบบ Pi และ วงจร K-Inverter ซึ่งผู้ใช้งานสามารถเลือกรูปแบบการคำนวณผลตอบสนองทางความถี่ รูปแบบวงจรกรองความถี่ รูปแบบผลตอบสนอง รวมถึงสามารถกำหนดค่าการกระเพื่อม และ ลำดับของผลตอบสนองได้ ผลจากการใช้งานโปรแกรมจำลองสามารถช่วยให้ลดเวลาในการคำนวณค่าองค์ประกอบ



ต่าง ๆ ของวงจร เนื่องจากการคำนวณค่าอุปกรณ์และค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบวงจรมีการใช้สมการที่ค่อนข้างซับซ้อน สามารถแสดงผลการเปรียบเทียบกราฟตอบสนองทางความถี่เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถวิเคราะห์และออกแบบผลตอบสนองทางความถี่ตามความต้องการได้ โดยผลการทดลองโปรแกรมจำลอง มีการเปรียบเทียบผลการจำลองทั้ง 3 รูปแบบ มีผลลัพธ์ที่สอดคล้องกันและมีความถูกต้องตามหลักทฤษฎี สำหรับย่านความถี่ระบบสื่อสารไร้สาย นอกจากนี้การใช้งานโปรแกรมจำลองไม่เพียงแต่สามารถประยุกต์ใช้กับการเรียนการสอนเพื่อให้ผู้เรียนเข้าใจพื้นฐานด้านผลตอบสนองทางความถี่แล้ว ผู้ใช้งานสามารถใช้ผลลัพธ์ในการหาค่าองค์ประกอบของวงจรองความถี่เพื่อประยุกต์ใช้สำหรับการออกแบบวงจรขั้นสูงต่อไปได้ตามลำดับ

**คำสำคัญ** โปรแกรมจำลอง วงจรองความถี่ การสื่อสารไร้สาย

## Abstract

This paper presents a simulation program that utilizes the MATLAB GUI interface to calculate part values and display frequency responses for wireless communication systems filters. The simulation supports computational theory with three circuit models: T-model, Pi-model, and K-inverter. Users have the flexibility to choose their desired filter response type, schematic, filter type, passband ripple configuration, and response order. The simulation's complex equations enable accurate element value calculation and circuit design. Additionally, users can compare frequency response graphs to facilitate on-demand analysis and design. The simulation results are in agreement with filter theory, making it an effective tool for teaching and learning the fundamentals of frequency response in wireless communication. Furthermore, the filter element values derived from the simulation can be employed in advanced circuit design.

**Keywords:** Simulation program, Filters, Wireless communications

## 1. บทนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีของการสื่อสารไร้สายได้มีการนำไปประยุกต์ใช้ในด้านธุรกิจอุตสาหกรรมในหลายภาคส่วน เช่น ระบบหุ่นยนต์ในงานอุตสาหกรรม อุปกรณ์เซ็นเซอร์ในระบบอุตสาหกรรมการเกษตร เทคโนโลยียานยนต์ไร้คนขับ รวมถึงอุปกรณ์ IoT สำหรับระบบควบคุม ทำให้การใช้งานมีประสิทธิภาพมากขึ้น ทั้งทางด้านธุรกิจสื่อและบันเทิง อุตสาหกรรมการผลิต บริการทางสาธารณสุข และการขนส่ง เป็นต้น ซึ่งการวิเคราะห์และออกแบบวงจรและผลตอบสนองที่เกี่ยวข้องกับการสร้างวงจรความถี่สูง (High Frequency) เพื่อให้รองรับกับระบบสื่อสาร ในภาคส่วนที่สำคัญของวงจรรวม (Integrated Circuits) ที่จะต้องพิจารณาถึงผลตอบสนองทางความถี่ เช่น สายอากาศ (Antenna) [1-3] วงจรแบ่งกำลัง (Power Divider) [4-5] วงจรองความถี่ (Filters) [6], [7] และวงจรที่แยกความถี่ตามช่องสัญญาณ (Multiplexer) ล้วนเป็นวงจรไฟฟ้าความถี่สูงที่สำคัญทั้งสิ้น ที่กล่าวมาข้างต้น

วงจรองความถี่ (Filters) จะเป็นวงจรที่นักวิจัย ให้ความสนใจเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากเป็นวงจรที่สามารถแยกสัญญาณที่ไม่ต้องการออกจากระบบได้ ตลอดจนสามารถประยุกต์ในการออกแบบได้หลากหลายและได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อให้วงจรนั้นมีคุณสมบัติที่โดดเด่นขึ้น เช่น ขนาดของโครงสร้างที่มีขนาดกะทัดรัด (Compact Size) การตอบสนองได้หลายๆ แถบความถี่ (Multiband Application) วงจรที่ควบคุมความถี่และแบนด์วิดท์ได้ง่าย (High Selectivity and Flexible Control) หรือวงจรที่มีผลตอบสนองที่มีแถบหยุด แถบความถี่กว้าง (Wide- Stopband) ดังนั้นเพื่อให้รองรับกับเทคโนโลยีหรือนวัตกรรมใหม่ ที่เกี่ยวข้องกับระบบการสื่อสารไร้สาย 5G โดยสำหรับการเรียนการสอนที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบวงจรองความถี่ เป็นหัวข้อหรือประเด็นที่สำคัญเนื่องด้วยวงจรดังกล่าวสามารถคัดแยกและกรองย่านความถี่ที่ไม่ต้องการออกจากระบบในการสื่อสารไร้สาย [8]



การจัดการเรียนการสอนในปัจจุบันของนักศึกษาระดับปริญญาตรีในสาขาทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้า-โทรคมนาคมได้มีการจัดการเรียนการสอนด้วยรายวิชาพื้นฐานต่าง ๆ สำหรับประยุกต์ใช้งานเทคโนโลยีสื่อสารไร้สาย เช่น คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า วิศวกรรมสายส่งและวิศวกรรมสายอากาศ เป็นต้น [9], [10] จากรายวิชาที่ยกตัวอย่างมาข้างต้น พบว่า เนื้อหามีความซับซ้อนเนื่องจากการคำนวณค่อนข้างเยอะ ไม่สามารถทำให้ผู้เรียนเข้าใจเนื้อหาภายในเวลาจำกัด เป็นการจัดการเรียนผู้สอนมุ่งเน้นการสอนตามตำรา การวัดผลสัมฤทธิ์ด้วยวิธีการการสอบโดยที่ผู้เรียนเป็นเพียงแค่ผู้รับเพียงอย่างเดียว [11] จะเห็นว่าสื่อที่สามารถทำให้ผู้เรียนคิดวิเคราะห์ถึงความสัมพันธ์ของการคำนวณหาค่าอุปกรณ์ การหาผลตอบสนองทางความถี่ [12] ตลอดจนการออกแบบและสร้างวงจรที่สามารถรองรับกับย่านความถี่ในเทคโนโลยีสื่อสารไร้สายเป็นสิ่งสำคัญ

ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงมีแนวคิดสำหรับการสร้างสื่อโปรแกรมจำลองเพื่อเสริมทักษะการเรียนรู้ในการออกแบบวงจรความถี่ สำหรับการประยุกต์ใช้งานระบบสื่อสารไร้สาย ตลอดจนการสร้างสื่อโปรแกรมที่สามารถเรียนรู้ได้ด้วยตนเอง โดยถูกพัฒนามาจากงานวิจัยของ [13] ที่นำทฤษฎี K-Inverter มาประยุกต์ในการสร้างเป็นโปรแกรมจำลองวงจรกรองผ่านแถบความถี่ เพื่อให้ครอบคลุมกับการเรียนการสอนทางด้านการออกแบบวงจรความถี่สูง ประกอบด้วย การสร้างโปรแกรมจำลองจากสมการเงื่อนไขของวงจรกรองความถี่ต่ำ วงจรกรองผ่านแถบความถี่เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจร การเปรียบเทียบผลตอบสนองทางความถี่ซึ่งสามารถทำให้ผู้ใช้งานสามารถวิเคราะห์สมการที่ค่อนข้างซับซ้อนได้ง่ายขึ้นประยุกต์ใช้เป็นสื่อการเรียนการสอน โดยสามารถเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมจำลองที่สอดคล้องกับทฤษฎีและสามารถนำมาใช้ในการประยุกต์ใช้งานระบบสื่อสารไร้สายในยุคปัจจุบันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

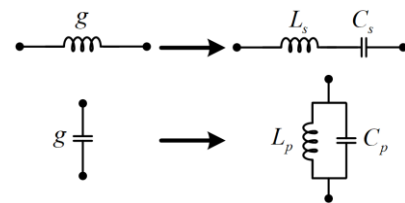
## 2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

การออกแบบวงจรกรองความถี่มีทฤษฎีที่เกี่ยวข้องสำหรับการออกแบบหลายวิธี โดยส่วนใหญ่การออกแบบเป็นการใช้ทฤษฎีด้วยการประมาณค่าของ Butterworth และ

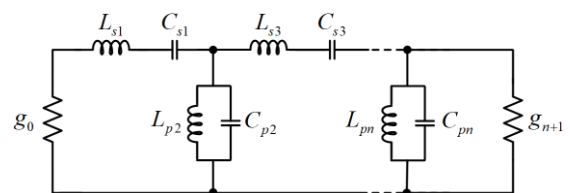
Chebyshev เพื่อออกแบบวงจรกรองความถี่ด้วยอุปกรณ์ Lump-Element ได้ตามหลักการดังต่อไปนี้

### 2.1 หลักการพื้นฐานของการออกแบบวงจรกรองความถี่

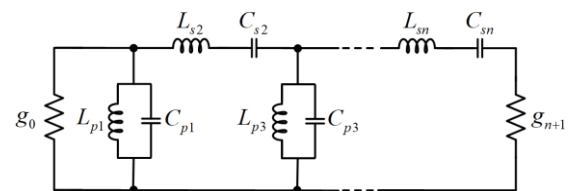
การพิจารณาหลักการของการออกแบบวงจรกรองความถี่ที่มีการนำมาประยุกต์ใช้งานในปัจจุบัน สามารถแบ่งออกเป็น 4 ชนิด ได้แก่ วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน วงจรกรองความถี่สูงผ่าน วงจรกรองผ่านแถบความถี่ และวงจรกรองหยุดแถบความถี่ โดยปกติแล้วมีการใช้โครงสร้างวงจรไฟฟ้าสำหรับการออกแบบ 2 รูปแบบ ได้แก่ Pi-Model และ T-Model โดยอาศัยการสร้างวงจรกรองความถี่ต่ำต้นแบบเป็นวงจรตั้งต้น จากนั้นจึงสามารถแปลงวงจรกรองความถี่ตามที่ต้องการและสามารถคำนวณหาค่าองค์ประกอบต่าง ๆ ได้ [14] ดังเช่นตัวอย่างของการออกแบบวงจรกรองผ่านแถบความถี่โดยใช้ 2 โครงสร้างในการออกแบบดังแสดงรูปที่ 1



(ก) วงจรต้นแบบของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแปลงเป็นวงจรกรองผ่านแถบความถี่



(ข) วงจรกรองผ่านแถบความถี่ แบบ Pi-Model



(ค) วงจรกรองผ่านแถบความถี่ แบบ T-Model

รูปที่ 1 การแปลงวงจรสมมูลของวงจรกรองผ่านแถบความถี่

การหาพารามิเตอร์การส่งผ่านของการออกแบบวงจรกรองผ่านแถบความถี่ (Transmission Parameters) สามารถ



หาค่าอุปกรณ์ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุได้ผลตอบสนองความถี่จากการแปลงเป็นวงจรกรองผ่านแถบความถี่สามารถเขียนเป็นพารามิเตอร์การส่งผ่านด้วยวงจรแบบ Pi-Model และ T- Model ที่มีองค์ประกอบ Reactance ( $X_s$ ) และ Susceptance ( $B_p$ ) ได้ดังสมการที่ (1) และสมการที่ (2) ตามลำดับ

$$[T_{T-Model}] = \begin{bmatrix} jX_s & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ jB_p & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & jX_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$[T_{Pi-Model}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ jB_p & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & jX_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ jB_p & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

## 2.2. การวิเคราะห์วงจรกรองความถี่ด้วยวิธี K-Inverter

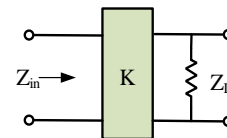
การแปลงวงจรโดยใช้อิมมิแดนซ์อินเวอร์เตอร์ (Immittance Inverters) ที่สามารถเปลี่ยนค่าอิมพีแดนซ์  $K$  พารามิเตอร์ หรือค่าแอตมิแดนซ์  $J$  พารามิเตอร์ ซึ่งคุณลักษณะเหล่านี้เป็นการเปลี่ยนวงจรกรองความถี่ให้อยู่ในรูปของวงจรเทียบเคียงที่สามารถนำไปดำเนินการสร้างวงจรไมโครเวฟบนโครงสร้างวงจรไมโครสตริปและท่อนำคลื่นได้อย่างไรก็ตามเนื่องจากการหาค่าของอุปกรณ์พาสซีฟที่มีการเชื่อมต่อแบบขนานและแบบอนุกรมที่ใช้ในการจูนความถี่นั้นทำได้ค่อนข้างยาก ดังนั้นการวิเคราะห์ส่วนใหญ่จึงนิยามอาศัยวงจรต้นแบบในรูปแบบของวงจรอิมพีแดนซ์อินเวอร์เตอร์ (Impedance Inverters) [13] โดยในทางอุดมคติการทำงานของอิมพีแดนซ์อินเวอร์เตอร์ ( $K$  พารามิเตอร์) คล้ายกับการใช้งานสายส่งที่มีความยาว  $\lambda/4$  เพื่อนำไปใช้ในแต่ละย่านความถี่ ดังนั้นในการหาความสัมพันธ์ของอินพุตอิมพีแดนซ์เมื่อมีการต่อโหลด ( $Z_L$ ) เข้าที่ปลายสายส่ง ( $Z_{in}$ ) แสดงดังรูปที่ 2(ก) สามารถคำนวณหาโดยใช้ ABCD พารามิเตอร์ได้จากสมการที่ (3) และเมื่อเขียนให้อยู่ในรูปแบบสมการการส่งผ่าน ( $T_K$ ) ได้ดังสมการที่ (4) ตามลำดับ

$$Z_{in} = \frac{AZ_L + B}{CZ_L + D} = \frac{jK}{jZ_L / K} = \frac{K^2}{Z_L} \quad (3)$$

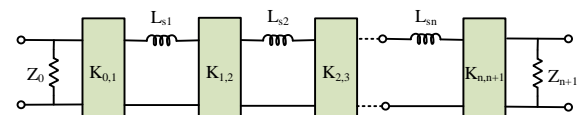
$$T_K = \begin{bmatrix} 0 & jK \\ j/K & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

การออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำด้วยวิธีของ K-Inverter สามารถทำได้โดยอาศัยพื้นฐานหลักการแปลงองค์ประกอบ

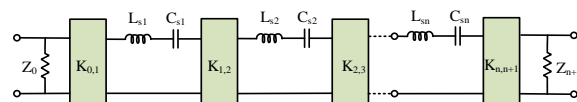
ความถี่ด้วยอุปกรณ์แบบกลุ่มก้อน (Lump Element) ที่มีส่วนประกอบการต่อตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุแบบขั้นบันไดซึ่งจะให้การต่อแบบอนุกรมและขนาน ดังนั้นเมื่อใช้วิธีการแปลงของวิธี K-Inverter เราจะสามารถแปลงวงจรให้อยู่ในรูปแบบของวงจรอนุกรมเพียงอย่างเดียวได้และสามารถแสดงวงจรเทียบเคียงได้ดังรูปที่ 2(ข) การออกแบบวงจรกรองผ่านแถบความถี่ด้วยวิธีของ K-Inverter สามารถทำได้โดยใช้หลักการแปลงองค์ประกอบความถี่จากการแปลงอุปกรณ์ให้อยู่ในรูปของวงจรเรโซแนนซ์ด้วยที่ใช้ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ จากนั้นใช้สมการของ K-Inverter เพื่อปรับเปลี่ยนรูปแบบลักษณะของวงจรให้อยู่ในรูปแบบวงจรแบบอนุกรมโดยสามารถวงจรเทียบเคียงได้ดังรูปที่ 2(ค) สามารถเขียนเป็นพารามิเตอร์การส่งผ่านทั้ง 2 โครงสร้างได้ดังสมการที่ (5) และสมการที่ (6) โดยที่ค่าองค์ประกอบที่เกี่ยวข้องประกอบด้วยค่าของตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ และการหาค่าพารามิเตอร์ของ K-Inverter ของวงจรกรองผ่านแถบความถี่สามารถหาได้จากสมการที่ (5) และ (6)



(ก) การเชื่อมต่ออิมพีแดนซ์ที่มีโหลด



(ข) วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านโดยใช้วิธี K-Inverter



(ค) วงจรกรองผ่านแถบความถี่โดยใช้วิธี K-Inverter

รูปที่ 2 วงจรสมมูลของวงจรกรองความถี่โดยใช้ K-Inverter

$$[T_{LPF}] = \begin{bmatrix} jK_{01} & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} jL_{01} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} j/K_{12} & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} j\omega L_{12} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \dots \times \begin{bmatrix} jK_{n,n+1} & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} jL_{n,n+1} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} j/K_{n+1,n+2} & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} j\omega L_{n+1,n+2} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$



$$[T_{BPF}] = \begin{bmatrix} 0 & j/K_{01} \\ jK_{01} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & j\omega L_{s1} + 1/j\omega C_{s1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & j/K_{12} \\ jK_{12} & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & j\omega L_{s2} + 1/j\omega C_{s2} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & j/K_{23} \\ jK_{23} & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & j\omega L_{s3} + 1/j\omega C_{s3} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & j/K_{34} \\ jK_{34} & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

การหาค่าของตัวเหนี่ยวนำ  $L_{si}$  และตัวเก็บประจุ  $C_{si}$  โดยใช้วิธีการแปลงจากวงจรกรองความถี่ต่ำต้นแบบเป็นวงจรกรองผ่านแถบความถี่ สามารถเขียนสมการ (7) และ (8)

$$L_{si} = \left( \frac{\Omega_c}{FBW \omega_0} \right) \left( L_i \times Z_0 / Z_{n+1} \right) \Big|_{i=1 \text{ to } n} \quad (7)$$

$$C_{si} = \left( \frac{FBW}{\omega_0 \Omega_c} \right) \frac{1}{C_i (Z_0 / Z_{n+1})} \Big|_{i=1 \text{ to } n} \quad (8)$$

การหาค่าพารามิเตอร์ของ K-Inverter ในแต่ละส่วนของวงจรกรองผ่านแถบความถี่โดยใช้องค์ประกอบวงจรกรองความถี่ต่ำ ( $g_i$ ) สามารถหาได้จากสมการ (9) (10) และ (11)

$$K_{0,1} = \sqrt{\frac{Z_0 FBW \omega_0 L_{s1}}{g_0 g_1}} \quad (9)$$

$$K_{i,i+1} = \frac{FBW \omega_0}{\Omega_c} \sqrt{\frac{L_{si} L_{s(i+1)}}{g_i g_{i+1}}} \Big|_{i=1 \text{ to } n-1} \quad (10)$$

$$K_{n,n+1} = \sqrt{\frac{FBW \omega_0 L_{sn} Z_{n+1}}{\Omega_c g_n g_{n+1}}} \quad (11)$$

จากสมการข้างต้นจะเห็นว่า เป็นสมการที่ค่อนข้างซับซ้อน และในกรณีที่จะต้องมีการคำนวณ ส่งผลให้เกิดความล่าช้าในการวิเคราะห์เพื่อหาค่าตอบของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบวงจรกรองผ่านแถบความถี่ ดังนั้นในส่วนถัดไปเป็นการประยุกต์ใช้สมการต่าง ๆ เพื่อแปลงรูปสมการให้อยู่ส่วนของ GUI ทำให้ผู้เขียนหรือผู้ใช้งานในการออกแบบวงจรสามารถวิเคราะห์ค่าของอุปกรณ์ได้ง่ายและสะดวกยิ่งขึ้น

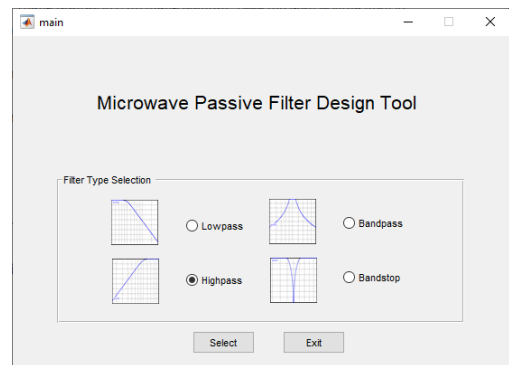
### 2.3 การออกแบบโปรแกรมจำลองวงจรกรองความถี่

การออกแบบโปรแกรมจำลองวงจรกรองความถี่ในงานวิจัยนี้ได้นำทฤษฎีของการออกแบบวงจรกรองความถี่พื้นฐานจากอุปกรณ์กลุ่มก้อน (Lumped Element) เทคนิคการแปลงวงจรด้วยวิธีเคอเนเตอร์ (K-Inverter) และวิธีการประมาณค่าแบบ Butterworth และ Chebyshev ที่สามารถกำหนดค่า Ripple รวมถึงการวิเคราะห์จำนวนอันดับของวงจรที่ใช้ในการออกแบบวงจรกรองผ่านแถบความถี่

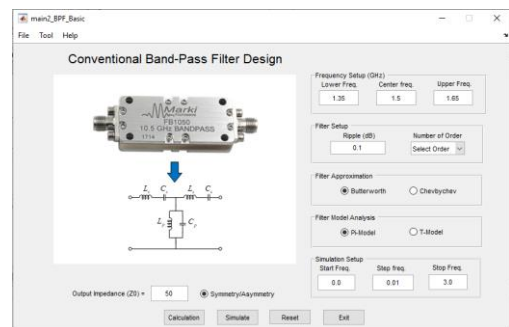
สำหรับการหาผลตอบสนองทางความถี่ได้โดยใช้การแปลงกลับของพารามิเตอร์การส่งผ่าน (ABCD) ให้เป็นพารามิเตอร์กระจาย (S-Parameters) เพื่อหาค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ( $S_{11}$ ) และค่าสูญเสียจากการใส่แทรก ( $S_{21}$ ) ดังสมการที่ (12) และสมการที่ (13) เมื่อ ( $Z_{01}$ ) คืออิมพีแดนซ์ขาเข้าและ ( $Z_{02}$ ) คืออิมพีแดนซ์ขาออก สามารถสร้างเป็นโปรแกรมจำลองโดยใช้ฟังก์ชัน GUI ของ MATLAB Version 2022a [15] โดยหน้าต่างโปรแกรมหลักและหน้าต่างโปรแกรมย่อยสำหรับการใส่ค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องสำหรับการออกแบบวงจรแสดงดังรูปที่ 3 และมีผังการทำงานดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งผู้ใช้งานสามารถเลือกชนิดของวงจรกรองความถี่ กำหนดความถี่เริ่มต้น ความถี่สิ้นสุด ความละเอียดของการจำลอง รวมถึงสามารถกำหนดค่าการกระเพื่อม และลำดับของผลตอบสนองค่า Output Impedance ได้ ตามลำดับ

$$S_{11} = \frac{(A \times Z_{02} + B - C \times Z_{01} \times Z_{02} - D \times Z_{01})}{(A \times Z_{02} + B + C \times Z_{01} \times Z_{02} + D \times Z_{01})} \quad (12)$$

$$S_{21} = \frac{(2 \times (A \times D) - (B \times C) \times \sqrt{Z_{01} \times Z_{02}})}{(A \times Z_{02} + B + C \times Z_{01} \times Z_{02} + D \times Z_{01})} \quad (13)$$



(ก) หน้าต่างโปรแกรมหลัก



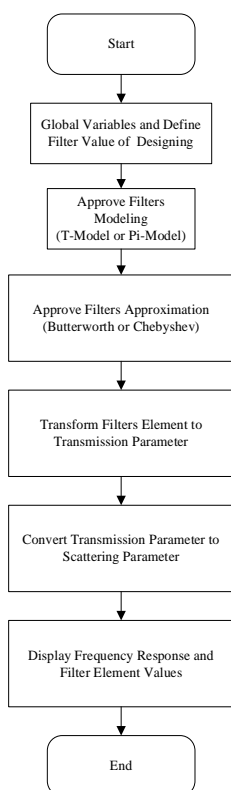
(ข) หน้าต่างโปรแกรมย่อย

รูปที่ 3 หน้าต่างโปรแกรมการออกแบบวงจรกรองความถี่





การทดสอบการทำงานของโปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้นสามารถนำมาออกแบบวงจรกรองผ่านแถบความถี่โดยใช้วิธีการแบบดั้งเดิมและวิธีของ K-Inverter ตามลำดับ ในส่วนแรกจะเป็นการทดสอบสำหรับการออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำที่กำหนดความถี่ตัดเท่ากับ 1.5 GHz โดยใช้การประมาณค่าแบบ Chebyshev จำนวนอันดับเท่ากับ 3 ค่า Ripple เท่ากับ 0.1 ส่วนที่สองเป็นการออกแบบวงจรกรองผ่านแถบความถี่ที่กำหนดเงื่อนไขการใช้งานที่ความถี่กลางเท่ากับ 1.5 GHz ความกว้างของแถบความถี่เท่ากับ 300 MHz จำนวนอันดับเท่ากับ 3 ค่า Ripple เท่ากับ 0.1 จากนั้นกำหนดความถี่ที่ใช้ในการจำลองการทำงานตั้งแต่ 0-3 GHz ผลการจำลองการทำงานในการหาผลตอบสนองทางความถี่แสดงดังรูปที่ 5(ก) และ 5(ข) โดยผลของการคำนวณหาค่าอุปกรณ์ในการออกแบบแสดงดังรูปที่ 5(ค) และ 5(ง) ตามลำดับ



รูปที่ 4 ขั้นตอนการใช้งานโปรแกรมจำลองสำหรับการวิเคราะห์หาค่าประกอบวงจรกรองผ่านแถบความถี่

ขั้นตอนการกำหนดค่าในการใช้งานโปรแกรมออกแบบวงจรกรองความถี่โดยใช้โปรแกรมจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถแสดงดังรูปที่ 5 มีรายละเอียดดังนี้

1) กำหนดความถี่ตัดตามเงื่อนไขในการออกแบบวงจรกรองความถี่ ความถี่ตัด หรือช่วงแถบผ่านความถี่ (ย่านความถี่ GHz)

2) กำหนดค่าของวงจรกรองความถี่ได้แก่ จำนวนอันดับ ( $n=1$  ถึง  $n=5$ ) และค่า Ripple

3) เลือกชนิดของการประมาณค่าโดยเลือกเป็นแบบ Chebyshev หรือ Butterworth

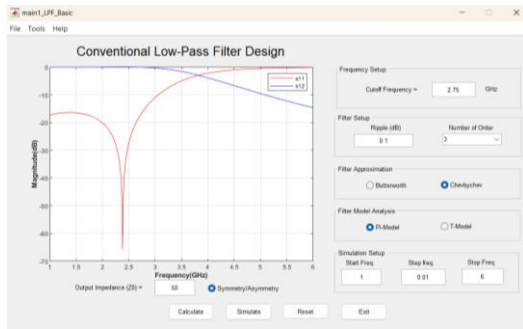
4) กำหนดค่าในการจำลองการทำงานโดยกำหนดความถี่เริ่มต้น ความถี่สิ้นสุด และจำนวนจุดในการ sampling

5) กำหนดค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์

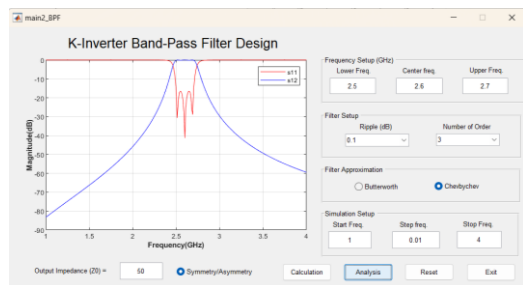
6) กำหนดค่าชนิดของวงจรเป็น Symmetry หรือ Asymmetry นอกจากนี้ผู้วิจัยได้พัฒนาฟังก์ชันของโปรแกรมเพิ่มเติมเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกราฟผลตอบสนองทางความถี่ของการออกแบบวงจรกรองความถี่ ผู้ใช้งานสามารถเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของการออกแบบวงจรที่ใช้วิธีการประมาณค่า โดยผลตอบสนองแบบ Chebyshev หรือ Butterworth จำนวนอันดับ ค่าการกระเพื่อม ที่แตกต่างกัน ส่งผลให้ผู้ใช้งานเข้าใจผลตอบสนองของค่าตัวแปรพารามิเตอร์การส่งผ่าน และพารามิเตอร์ค่าการสูญเสียจากการย้อนกลับ แสดงดังรูปที่ 6 ทำให้เห็นถึงลักษณะของผลตอบสนองทางความถี่ที่แตกต่างกันและสามารถเข้าใจถึงผลตอบสนองทางความถี่ เพื่อนำองค์ความรู้ออกแบบวงจรได้ง่ายขึ้น

### 3. ผลการวิจัยและอภิปราย

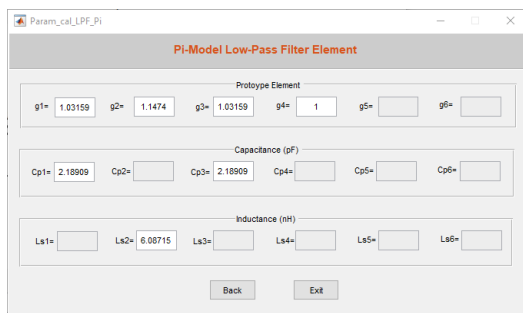
การพัฒนาโปรแกรมจำลองที่พัฒนาขึ้นสำหรับใช้ในการออกแบบวงจรกรองความถี่ในการประยุกต์ใช้งานกับระบบสื่อสารไร้สาย จุดเด่นของโปรแกรมจำลองที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยการวิเคราะห์วงจรที่หลากหลายทั้งโครงสร้างแบบ Pi-Model วงจรแบบ T-Model และวิธีของ K-Inverter โปรแกรมเปรียบเทียบผลตอบสนองการออกแบบวงจรกรองความถี่ด้วยการเพิ่มกราฟเปรียบเทียบผลตอบสนองที่แตกต่างกันและสามารถบันทึกผลตอบสนองทางความถี่ที่ได้จากการจำลอง โดยทดสอบการออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำและวงจรกรองผ่านแถบความถี่ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้



(ก) ผลตอบสนองวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน



(ข) ผลตอบสนองวงจรกรองผ่านแถบความถี่

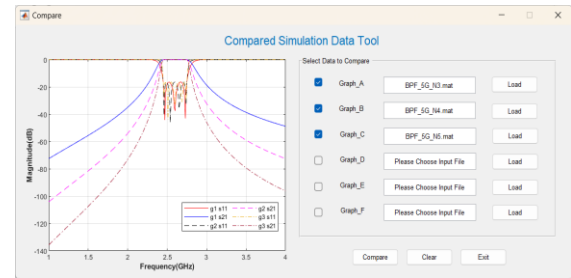


(ค) ค่าอุปกรณ์ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

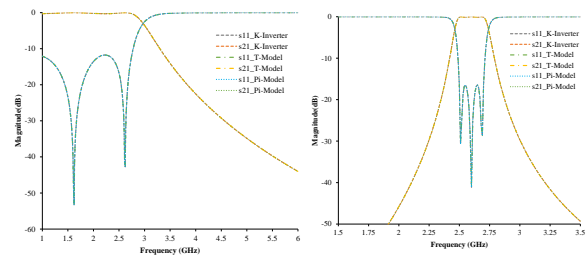


(ง) ค่าอุปกรณ์ของวงจรกรองผ่านแถบความถี่

รูปที่ 5 ผลตอบสนองทางความถี่และผลการคำนวณค่าอุปกรณ์ที่ได้จากโปรแกรมจำลอง



รูปที่ 6 ฟังก์ชันการเปรียบเทียบผลตอบสนองทางความถี่ที่ได้จากการจำลองผลตอบสนองของวงจร



(ก) Lowpass Filter

(ข) Bandpass Filter

รูปที่ 7 ผลการเปรียบเทียบการตอบสนองทางความถี่ของวงจรจากโปรแกรมจำลองที่พัฒนาขึ้น

#### 4. บทสรุป

บทความวิจัยครั้งนี้ได้นำเสนอการพัฒนาสื่อโปรแกรมจำลองเพื่อเสริมทักษะการเรียนรู้พื้นฐานในการออกแบบวงจรกรองความถี่สำหรับการประยุกต์ใช้งานระบบสื่อสารไร้สายที่สังเคราะห์จากวงจรกรองความถี่ต้นแบบที่มีโครงสร้าง Pi-Model และ T-Model รวมถึงเทคนิควิธีแปลงวงจรให้อยู่ในรูปแบบโครงสร้างของ K-Inverter โดยออกแบบโปรแกรมจำลองนั้น สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ และจำลองการทำงานของวงจรกรองความถี่ได้ด้วยฟังก์ชัน GUI ของ MATLAB® พบว่าสามารถให้ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองผลตอบสนองทางความถี่ และค่าองค์ประกอบของอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องได้อย่างถูกต้อง ช่วยลดเวลา และความยุ่งยากในการคำนวณ เป็นไปตามความต้องการของผู้ใช้งาน อย่างไรก็ตาม ผลของงานวิจัยนี้ใช้สำหรับใช้เป็นสื่อในการประกอบการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้า-โทรคมนาคม ช่วยส่งเสริมให้ผู้เรียนสามารถเข้าใจถึงแนวทางในการคำนวณและการออกแบบวงจรกรองความถี่ สำหรับประยุกต์ที่รองรับกับการใช้งานระบบสื่อสารไร้สายได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป



## 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณงบประมาณจากแหล่งทุนวิจัย งบประมาณ  
ด้าน ววน. Full Proposal ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2564  
รหัสโครงการ 50072 รหัสข้อเสนอการวิจัย 64A171000001

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Zhang W, Weng Z, Wang L. Design of a dual-band MIMO antenna for 5G smartphone application. In 2018 International Workshop on Antenna Technology (IWAT) 2018 Mar 5. pp. 1-3.
- [2] Fernandez-Martinez P, Martin-Anton S, Segovia-Vargas D. Design of a wideband Vivaldi antenna for 5G base stations. In 2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting 2019 Jul 7. pp. 149-150.
- [3] Parchin NO, Abd-Alhameed RA, Shen M. Design of low cost FR4 wide-band antenna arrays for future 5G mobile communications. In 2019 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP) 2019 Oct 27. pp. 1-3.
- [4] Adya S, Jain A, Sharma D, Gupta A, Bhalla V. Design and fabrication of microstrip equal Wilkinson RF power divider at 650MHz using MWO. In 2017 IEEE Applied Electromagnetics Conference (AEMC) 2017 Dec 19. pp. 1-2.
- [5] Lu J, Shi J, Xu K, Cao Q. A microstrip differential power divider. In 2016 IEEE International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition (IWEM) 2016 May 16. pp. 1-3.
- [6] Haddi SB, Zugari A, Zakriti A, Achraou S. A compact microstrip T-shaped resonator band pass filter for 5G applications. In 2020 International Conference on Intelligent Systems and Computer Vision (ISCV) 2020 Jun 9. pp. 1-5.
- [7] Al-Yasir YI, Parchin NO, Alabdallah A, Abdulkhaleq AM, Abd-Alhameed RA, Noras JM. Design of bandpass tunable filter for green flexible RF for 5G. In 2019 IEEE 2nd 5G World Forum (5GWF) 2019 Sep 30. pp. 194-198.
- [8] Cameron RJ, Kudsia CM, Mansour RR. Microwave filters for communication systems: fundamentals, design, and applications. John Wiley & Sons; 2018 Apr 17.
- [9] Liu Y, Cheng Q S. Microwave engineering course for engineering education accreditation: exploration and practice in SUSTech. In 2019 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Education (TALE); 2019 Dec 10-13; Yogyakarta, Indonesia. 2019. p. 1-4.
- [10] Yang Z, Lili S. Application of electromagnetic simulation in the course of “Microwave technology and antenna”. In 2020 International Conference on Computers, Information Processing and Advanced Education (CIPAE); 2020 Oct 16-18; Ottawa, ON, Canada. 2020. p. 161-163.
- [11] Wang SC, Li MJ, Tong MS. Incorporation of Modeling and Simulation Techniques with the Education on Electromagnetics and Microwave Technology. In 2019 Photonics & Electromagnetics Research Symposium-Fall (PIERS-Fall) 2019 Dec 17. pp. 1058-1062.
- [12] Klinbumrung K, Tansriwong S, Akatimagool S. The development of instructional package on high-frequency transmission line engineering using REPEA learning model. In 2015 The 3rd International Conference on Technical Education 2015 (pp. 19-22).



- [13] Intarawiset N, Akatimagool S, Narongkul S. Analysis of microwave filter based on LC chips in microstrip circuitry using K-inverter approach. In 2019 6th International Conference on Technical Education (ICTechEd6) 2019 Mar 19. pp. 1-4.
- [14] Hong JS, Lancaster MJ. Microstrip filters for RF/microwave applications. John Wiley & Sons; 2004 Apr 7.
- [15] MATLAB version: 9.12 (R2022a), Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc.; 2022.





## การศึกษาการตรวจวัดอุณหภูมิผ่านเส้นใยนำแสงด้วยโอทีดีอาร์

### Study of the Temperature Optical Fiber Sensor using OTDR

ศุภเศรษฐ์ จันทร์อ่อน\* และ อธิคม ฤกษ์บุตร

สถาบันวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

140 ถนนเชื่อมสัมพันธ์ แขวงกระทุ่มราย เขตหนองจอก กรุงเทพฯ 10530

Supaset Junon\* and Athikom Roeksabutr

School of Electrical and Electronic Engineering, Mahanakorn University of Technology

140 Cheum-Sampan Rd., Nong Chok, Bangkok, Thailand, 10530

\*ผู้รับผิดชอบบทความ: 6419220002@mut.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 09-8284-8176

Received: 22 March 2023, Revised: 11 June 2023, Accepted: 11 June 2023

#### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการตรวจวัดอุณหภูมิผ่านเส้นใยนำแสงด้วยโอทีดีอาร์ (OTDR) โดยใช้เส้นใยนำแสงที่ใช้ในระบบสื่อสารโทรคมนาคมมาประยุกต์เป็นเซ็นเซอร์ แล้วใช้เครื่องมือวัดทางแสงโอทีดีอาร์ทำการวิเคราะห์สัญญาณการสูญเสียของการกระเจิงย้อนกลับแบบเรย์ลี ของสัญญาณแสง ณ ตำแหน่งของเซ็นเซอร์เส้นใยนำแสง เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียสัญญาณแสงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเซ็นเซอร์เส้นใยนำแสง รวมทั้งวิเคราะห์ผลกระทบของเส้นใยนำแสงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ การสร้างเซ็นเซอร์จะทำการพันเส้นใยนำแสงบนแผ่นทองแดงทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 เซนติเมตร ในการตรวจวัดอุณหภูมิจะป้อนความร้อนด้วยเครื่องเป่าลมร้อนผ่านเข้าไปในเซ็นเซอร์ สัญญาณที่วัดได้จากโอทีดีอาร์มาจากการที่โอทีดีอาร์ส่งพัลส์แสงที่มีความกว้างพัลส์ 30 นาโนวินาที ที่ความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร ระยะทางในการทดสอบประมาณ 5 กิโลเมตร รอบเวลาในการทดสอบแต่ละพัลส์คือ 60 วินาที ทำการทดสอบในช่วงอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ถึง 130 องศาเซลเซียส ผลการทดสอบพบว่าค่าการสูญเสียสัญญาณแสง ณ ตำแหน่งของเซ็นเซอร์เส้นใยนำแสงมีการเปลี่ยนแปลงตามค่าอุณหภูมิ ระบบที่นำเสนอสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นระบบเซ็นเซอร์ในการตรวจวัดอุณหภูมิได้

**คำสำคัญ** เส้นใยนำแสง, การกระเจิงย้อนกลับแบบเรย์ลี, โอทีดีอาร์

#### Abstract

This paper demonstrates the optical fiber sensor for temperature sensing using OTDR (Optical Time Domain Reflectometer) with the application of telecommunication optical fiber. OTDR measures the Rayleigh back scattering optical power signal at the part of fiber sensing for the analysis of the relationship between optical signal attenuation and the variation of temperature change. Sensor device composes of the optical fiber wrapped around the thin copper-plated cylindrical shape with diameter about 10 cm. To observe the temperature effect, hot air will be blown by the hot air blower through the cylindrical fiber sensor. OTDR signature results from the sending of the optical signal with pulse width 30 ns at wavelength 1550 nm. The experiment was carried out for a duration of 60s for each optical pulse in the temperature range of 25-130 °C. The experimental results show that the attenuation of the optical signal at the part of fiber sensor varies as the temperature changes. The proposed system expresses potential applications for a temperature sensor.

**Keywords:** Optical Fiber, Rayleigh Scattering, OTD



## 1. บทนำ

ที่ผ่านมาเส้นใยนำแสง (Optic Fiber) ถูกนำมาใช้งานในด้านการสื่อสารโทรคมนาคมที่มีประสิทธิภาพสูงในการรับส่งข้อมูลอย่างแพร่หลาย ในขณะเดียวกันในปัจจุบันได้มีการนำเส้นใยนำแสงมาประยุกต์ใช้ในงานด้านของระบบตรวจวัด หรือเซนเซอร์เส้นใยนำแสง (Fiber Optic Sensor) ด้วยเช่นกัน แม้จะยังไม่แพร่หลายเมื่อเทียบกับการใช้งานด้านระบบสื่อสารโทรคมนาคม การประยุกต์ใช้เส้นใยนำแสงสามารถใช้ในการตรวจวัดค่าต่าง ๆ ได้หลากหลาย เช่น อุณหภูมิ ความชื้น แรงดันการสั่นสะเทือน พีเอช ปริมาณสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก เป็นต้น [1-2] เนื่องจากมีความน่าเชื่อถือ มีความยืดหยุ่นในการตรวจวัด มีต้นทุนต่ำ อีกทั้งสามารถตรวจวัดได้หลายตำแหน่งและหลายพารามิเตอร์ภายในระบบเดียว ข้อดีของเส้นใยนำแสงที่มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ปราศจากการรบกวนสัญญาณจากคลื่นวิทยุและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ทำให้เหมาะสำหรับการตรวจวัดในระยะไกลได้ [3-5] ที่ผ่านมามีการนำเสนอเซนเซอร์เส้นใยนำแสงแบบกระจาย (Distributed Sensor Fiber) ที่ใช้หลักการของรามาน (Raman) โดยนำเสนอระบบที่ใช้วิธีการเปรียบเทียบอัตราส่วนของ Stoke Raman และ Anti- Stoke Raman [4] และยังมีการนำเสนอระบบตรวจจับแบบกระจายในตรวจจับการสั่นสะเทือนและอุณหภูมิพร้อมกันโดยใช้หลักการของ Rayleigh Scattering ในการตรวจจับการสั่นสะเทือนและหลักการของ Raman Scattering ในการตรวจวัดอุณหภูมิ [5] แม้ว่าเซนเซอร์เส้นใยนำแสงแบบกระจายที่ใช้เทคนิคในการตรวจจับอุณหภูมิแบบรามานจะมีประสิทธิภาพสูงและเป็นที่ยอมรับในปัจจุบัน [1] แต่ก็ยังมีข้อจำกัดในเรื่องอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณการรบกวน (SNR - Signal-to-Noise Ratio) ที่ต่ำที่เป็นผลมาจากกำลังของสัญญาณย้อนกลับของ Anti-Stoke Backscattering Signal ที่ต่ำมาก [6] ทำให้ต้องมีการเพิ่มอุปกรณ์ในการขยายสัญญาณในระบบ ซึ่งเป็นการเพิ่มต้นทุนและทำให้ระบบมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ได้มีการนำเสนอการศึกษาการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของเครื่องมือวัดทางแสงที่เรียกว่า โอทีดีอาร์ (OTDR - Optical Time Domain Reflectometer) ต่อการตอบสนองของเส้นใยนำแสงเมื่อนำมาใช้เป็นเซนเซอร์ร่วมกับ

อุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสง (Erbium Doped Fiber Amplifier) และฟิลเตอร์แสง (Optical Filter) เพื่อกรองเฉพาะสัญญาณย้อนกลับของ Anti- Stoke Backscattering Signal ที่มีความไวต่ออุณหภูมิ [7] เพื่อศึกษาความละเอียดความแม่นยำ และการเสื่อมสภาพของเส้นใยนำแสงในส่วนที่เป็นเซนเซอร์ภายใต้อุณหภูมิสูงหรือต่ำสุดในการตรวจวัด รวมถึงการใช้เซนเซอร์เส้นใยนำแสงชนิดที่เคลือบด้วยอะลูมิเนียมในการทดสอบที่อุณหภูมิสูง [8] โดยใช้เครื่องมือวัดโอทีดีอาร์ มาตรวจสอบผลกระทบของเส้นใยนำแสงในระบบเซนเซอร์แบบหลายจุด [9] และนอกจากนี้ได้มีการนำเสนอระบบเซนเซอร์ตรวจวัดแรงดันโดยใช้หลักการโค้งงอ (Macro Bending) ในการวิเคราะห์ค่าการสูญเสียของเส้นใยนำแสง [10]

จากที่มาและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้น งานวิจัยส่วนใหญ่นำเสนอระบบที่มีความซับซ้อน ต้นทุนสูง และต้องใช้เส้นใยนำแสงชนิดพิเศษ หรือการดัดแปลงโครงสร้างของเส้นใยนำแสงให้เหมาะกับการตรวจวัด ซึ่งจากการศึกษาข้อมูลพบว่าเครื่องมือวัดทางแสงโอทีดีอาร์เป็นเครื่องมือที่จะช่วยลดความซับซ้อนของระบบตลอดทั้งสามารถใช้ร่วมกับเส้นใยนำแสงที่ใช้ในการสื่อสารโดยทั่วไปได้

บทความนี้ นำเสนอการตรวจวัดอุณหภูมิผ่านเส้นใยนำแสงด้วยโอทีดีอาร์ ร่วมกับเส้นใยนำแสงมาตรฐานในระบบสื่อสารโทรคมนาคม โดยการนำเครื่องมือวัดโอทีดีอาร์ในเชิงพาณิชย์มาช่วยในการวิเคราะห์เพื่อลดความซับซ้อนของระบบ ซึ่งสามารถใช้ในการตรวจวัดเส้นใยนำแสงที่ใช้ในการสื่อสารและใช้เป็นเซนเซอร์ในการตรวจวัดได้ โดยในการตรวจวัดจะวิเคราะห์คุณสมบัติการลดทอนกำลังแสงเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเซนเซอร์เส้นใยนำแสงที่พันอยู่รอบแผ่นทองแดงทรงกระบอก ที่ได้รับความร้อนจากเครื่องเป่าลมร้อน โดยใช้โอทีดีอาร์ในการตรวจวัดสัญญาณการกระเจิงย้อนกลับเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียกำลังแสงกับอุณหภูมิ รวมทั้งพิจารณาผลกระทบของเส้นใยนำแสงในส่วนที่เป็นเซนเซอร์หลังการทดสอบในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 25 องศาเซลเซียส ถึง 130 องศาเซลเซียส





## 2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

### 2.1 ทฤษฎี

#### 2.1.1 การกระเจิงที่เกิดขึ้นในเส้นใยนำแสง

เมื่อแสงเดินทางในเส้นใยนำแสง สัญญาณแสงส่วนใหญ่จะเดินทางไปปลายทางข้างหน้า ในขณะที่เดียวกันจะมีแสงส่วนหนึ่งที่เดินทางย้อนกลับในทุก ๆ ตำแหน่งของเส้นใยนำแสงอันเนื่องมาจากการกระเจิงของแสงเรียกว่าการกระเจิงย้อนกลับแบบเรย์ลี (Rayleigh Back Scattering) ซึ่งกลไกส่วนหนึ่งเกิดจากการที่แสงกระทบโมเลกุลของตัวกลางและการไม่เป็นเนื้อเดียวกันของเส้นใยนำแสง ทำให้เกิดการแปรผันของค่าดัชนีหักเหของแสง ส่งผลให้ค่าดัชนีการหักเหของแสงเปลี่ยนไปตามเส้นใยนำแสง ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียสัญญาณของเส้นใยนำแสงเนื่องจากการกระเจิงของเรย์ลี [11] แสดงดังสมการที่ (1)

$$\alpha_R = \frac{A}{\lambda^4} \quad (1)$$

เมื่อ

$\alpha$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียสัญญาณของแสงในเส้นใยนำแสงเนื่องจากการกระเจิงของเรย์ลี (dB/km)

$A$  คือ ความเข้มข้นของสารเจือปนในแก้วบริสุทธิ์ (ppm)

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่นแสง (m)

การสูญเสียสัญญาณทำให้กำลังแสงลดลงตามฟังก์ชันของระยะทางดังสมการที่ (2)

$$P(z) = P_0 e^{-2\alpha z} \quad (2)$$

เมื่อ

$P_0$  คือ กำลังแสงที่จุดเริ่มต้น (W)

$P(z)$  คือ กำลังงานแสงที่ห่างจากจุดเริ่มต้น ณ ตำแหน่งที่มีระยะทาง  $z$  (W)

การกระเจิงย้อนกลับแบบเรย์ลี เป็นการกระเจิงแบบยืดหยุ่น ความถี่ของแสงที่กระเจิงเท่ากับความถี่แสงที่ตกกระทบ การสังเกตเห็นการกระเจิงที่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีความผันผวนของอุณหภูมิหรือความเครียด (Strain) ในเส้นใยนำแสง ทำให้สามารถใช้ในการตรวจจับการสั่นสะเทือน อุณหภูมิ หรือความเครียดได้

#### 2.1.2 เซนเซอร์แบบกระจายตามการกระเจิงของเรย์ลี

เส้นใยนำแสงสามารถประยุกต์ใช้งานเป็นเซนเซอร์แบบกระจายตามการกระเจิงของเรย์ลี (Distributed Fiber Sensors Based on Rayleigh Scattering) ได้เมื่อมีการเคลื่อนตัวของคลื่นแสงไปตามเส้นใยนำแสง กำลังแสงจะลดลงอย่างต่อเนื่องตลอดความยาวของเส้นใยนำแสงดังสมการที่ (3) เนื่องจากความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของดรรชนีการหักเหในระหว่างกระบวนการผลิต [12] โดยอัตราส่วนของการกระเจิงแบบเรย์ลีแสดงดังสมการที่ (4)

$$\frac{dP_R}{dz} = C_b \alpha_R P_0 e^{-2\alpha z} \quad (3)$$

$$C_b = \left( \frac{NA}{n_1} \right)^2 \times \frac{1}{m} = \left( \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_1} \right) \times \frac{1}{m} \quad (4)$$

เมื่อ

$\alpha$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนสัญญาณของแสงในเส้นใยนำแสง (dB/km)

$z$  คือ ระยะทางตามแนวความยาวเส้นใยนำแสง (m)

$C_b$  คือ อัตราส่วนของการกระเจิงแบบเรย์ลี

$NA$  คือ ช่องรับแสง (Numerical Aperture)

$n_1, n_2$  คือ ดรรชนีหักเหของแสงของของคอร์และแคลดดิ้งตามลำดับ

$m$  คือ จำนวนโหมดทั้งหมดของแสงที่เดินทางในเส้นใยนำแสง

#### 2.1.3 ผลกระทบทางความร้อนในเส้นใยนำแสง

กระบวนการทางความร้อนในเส้นใยนำแสงเป็นผลทำให้เกิดความไม่เป็นเชิงเส้นเนื่องจากทำให้กำลังแสงบางส่วนที่ตกกระทบภายในเส้นใยนำแสงถูกดูดซับ ซึ่งเป็นการนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีหักเหของเส้นใยนำแสง โดยส่วนใหญ่ค่าดัชนีหักเหของแสงจะลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิซึ่งจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างภายในของเส้นใยนำแสง [13] ผลกระทบทางความร้อนสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ (5)

$$n = n_0 + (dn/dT)T_1 \quad (5)$$

เมื่อ



$(dn/dT)$  คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงระหว่างอุณหภูมิของดรรชนีหักเหของแสงสำหรับวัสดุที่กำหนด

$T_1$  คือ การกำหนดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

โดยสมการดังกล่าวเป็นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ทำให้เกิดผลกระทบทางแสงที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ขึ้นกับเวลาและทำให้ค่าดรรชนีหักเหของเส้นใยนำแสงในส่วนของคอร์ (Core) และแคลดดิ้ง (Cladding) มีการเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิดังสมการที่ (6)

$$n(r) = n_{o1} - \Delta n(r/r_c)^{\alpha_o} \quad (6)$$

เมื่อ

$n_{o1}$  คือ ดรรชนีหักเหของคอร์

$\alpha_o$  คือ พารามิเตอร์หน้าตัดของเส้นใยนำแสง

$\Delta n$  คือ ค่าความแตกต่างของดรรชนีหักเหระหว่างคอร์และแคลดดิ้ง

$r$  คือ ระยะรัศมีห่างจากจุดศูนย์กลางของเส้นใยนำแสง (m)

$r_c$  คือ รัศมีของคอร์ (m)

#### 2.1.4 โอทีดีอาร์ (Optical Time Domain Reflectometer)

โอทีดีอาร์ เป็นเครื่องมือวัดที่ใช้หลักการวัดสัญญาณการกระเจิงย้อนกลับ (Back Scattering) ที่เกิดขึ้นในเส้นใยนำแสง โดยจะพิจารณาจากค่าดรรชนีหักเหของเส้นใยนำแสงและความแตกต่างของเวลาระหว่างพัลส์ที่ส่งเข้าไปรวมถึงพัลส์ที่สะท้อนกลับมามาดังสมการที่ (7)

$$L = \frac{ct}{2n} \quad (7)$$

เมื่อ

$L$  คือ ความยาวของเส้นใยนำแสง (km)

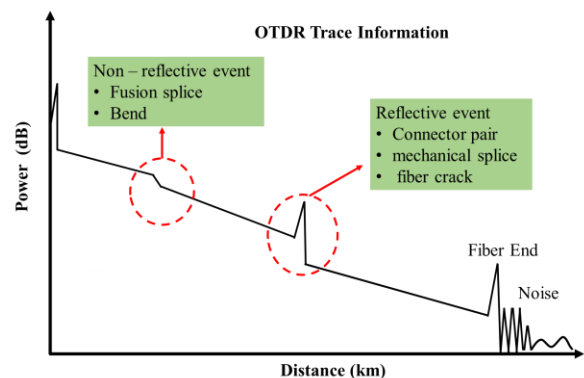
$c$  คือ ความเร็วแสงในอากาศ (m/s)

$t$  คือ ช่วงเวลาที่พัลส์แสงเดินทางไปและกลับมายังโอทีดีอาร์

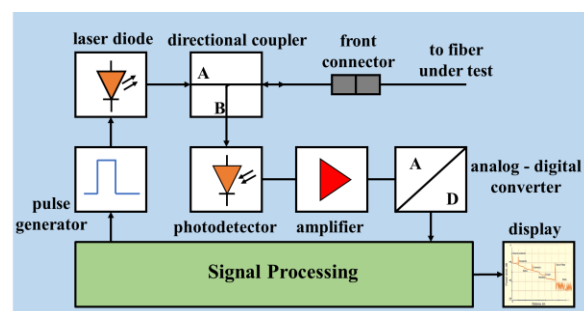
$n$  คือ ดรรชนีหักเหของแสงในเส้นใยนำแสง

โดยพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับเส้นใยนำแสง ได้แก่ ค่าการสูญเสียสัญญาณแสง ระยะทาง ตำแหน่งของเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในเส้นใยนำแสง ซึ่งจะแสดงด้วยกราฟ

ความสัมพันธ์ในรูปแบบ Non-Reflective Events ที่แสดงถึงความหมายของเหตุการณ์ที่ตำแหน่งนั้น เช่น การเชื่อมต่อเส้นใยนำแสงด้วยวิธี Fusion Splice หรือ การโค้งงอของเส้นใยนำแสง (Bend) และรูปแบบ Reflective Events สำหรับเหตุการณ์ที่ตำแหน่งนั้นเป็นการเชื่อมต่อเส้นใยนำแสงด้วยคอนเน็กเตอร์ (Connector Pair) การเชื่อมต่อแบบเชิงกล (Mechanical Splice) สัญญาณตอนปลายของเส้นใยนำแสง (Fiber End) และการเกิดรอยแตกร้าวของเส้นใยนำแสง (Fiber Crack) ดังแสดงในรูปที่ 1 ส่วนของบล็อกไดอะแกรมของเครื่องมือวัดโอทีดีอาร์ประกอบด้วย ส่วนกำเนิดสัญญาณพัลส์แสง ส่วนตรวจจับสัญญาณแสง และส่วนประมวลผลดังแสดงในรูปที่ 2 [14]



รูปที่ 1 รูปแบบการแสดงผลของโอทีดีอาร์

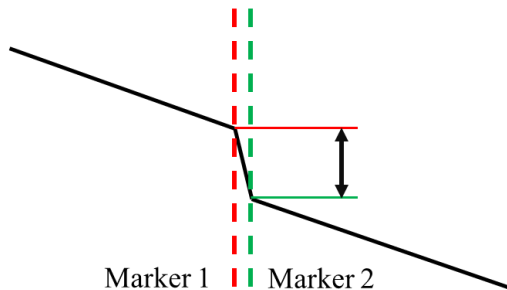


รูปที่ 2 ไดอะแกรมของเครื่องมือวัดโอทีดีอาร์

โดยระบบเซนเซอร์ในบทความนี้จะใช้การหาค่าการสูญเสียกำลังงานแบบ Non-Reflective Events ที่อาศัยหลักการการสูญเสียกำลังงานเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเส้นใยนำแสง โดยทำการหาค่าการสูญเสียกำลังงานแบบ Non-Reflective Events ที่ตำแหน่งของเซนเซอร์เส้นใยนำแสง โดยใช้วิธีการประมาณสองจุด (2-Point Loss)

ที่ใช้ความแตกต่างระหว่างระดับของจุดสองจุดที่ระบุ เพื่อมาทำการคำนวณค่าการสูญเสียกำลังงาน [15] แสดงดังรูปที่ 3

#### Fiber Attenuation by Two Point Method



รูปที่ 3 การหาค่าสูญเสียแบบการประมาณสองจุด

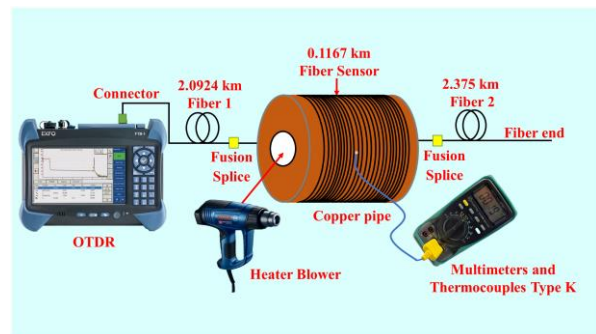
### 2.2 วิธีการดำเนินการวิจัย

#### 2.2.1 การออกแบบระบบการตรวจวัดอุณหภูมิด้วยเส้นใยนำแสงและโอทีดีอาร์

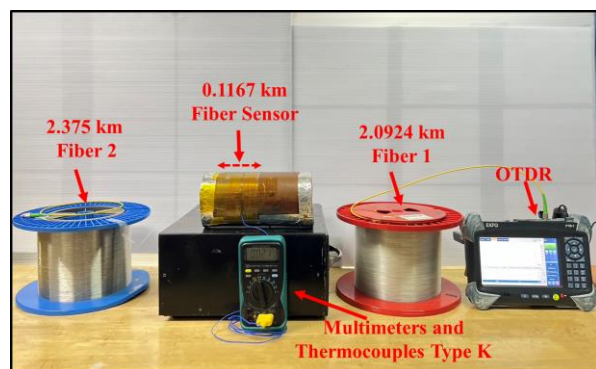
ระบบตรวจจับอุณหภูมิบนเส้นใยนำแสงอาศัยหลักการกระเจิงแบบย้อนกลับแบบเรย์ลี ด้วยเทคนิคโอทีดีอาร์ ซึ่งประกอบไปด้วยโอทีดีอาร์รุ่น EXFO FTB – 730 ซึ่งเป็นเครื่องวัดมาตรฐานที่ใช้ในอุตสาหกรรมโทรคมนาคม เครื่องโอทีดีอาร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ผ่านการสอบเทียบเป็นระยะอย่างสม่ำเสมอ เส้นใยนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวแบบเปลือย (Single Mode Fiber) ขนาด 9/125 ไมครอน มาตรฐาน ITU – T G.653 มีค่าการลดทอน 0.192 dB/km ที่ความยาวคลื่น 1550 นาโนเมตร ในส่วนของการเชื่อมต่อเส้นใยนำแสงส่วนที่เป็นเซนเซอร์กับเส้นใยนำแสงในระบบจะใช้วิธีการหลอมด้วยความร้อนหรือฟิวชั่นสปไลซ์ (Fusion Splice) เพื่อให้ค่าการสูญเสียสัญญาณน้อยที่สุด โดยความยาวของเส้นใยนำแสงระยะแรกและระยะที่สอง มีความยาว 2.0924 กิโลเมตร และ 2.375 กิโลเมตร ตามลำดับ สำหรับเส้นใยนำแสงตำแหน่งที่เป็นเซนเซอร์มีความยาว 0.1167 กิโลเมตร ซึ่งเส้นใยนำแสงส่วนที่เป็นเซนเซอร์นี้ตลอดช่วงความยาวของมันจะพันอยู่รอบแผ่นทองแดงทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.5 เซนติเมตร ความยาว 20.5 เซนติเมตร โดยได้ปิดภาคตัดขวางเข้าแผ่นทองแดงทรงกระบอกแล้วสร้างรูตรงกลางสำหรับใช้เป็นช่องเป่าลมร้อนเพื่อทำให้อุณหภูมิของแผ่นทองแดงเปลี่ยนแปลงแล้วส่งผ่านไปยังเส้นใยนำแสงส่วนที่เป็นเซนเซอร์ ในการตรวจสอบอุณหภูมิของแผ่นทองแดง (เซนเซอร์) ใช้ มัลติมิเตอร์ที่มี Thermocouples Type K ใน

การตรวจสอบอุณหภูมิของแผ่นทองแดง โดยไดอะแกรมของระบบเซนเซอร์และการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 4 และ 5 ตามลำดับ

การทำงานของระบบนั้นโอทีดีอาร์จะส่งสัญญาณพัลส์แสงเข้าไปในระบบผ่านเส้นใยนำแสง และเมื่อสัญญาณพัลส์แสงผ่านระยะทางตลอดทั้งระบบเข้าสู่เซนเซอร์เส้นใยนำแสงไปจนถึงปลายทางของระบบ จะเกิดการกระเจิงย้อนกลับมาผ่านเข้าสู่เครื่องมือวัดโอทีดีอาร์ จากนั้นทำการบันทึกข้อมูลที่ได้จากโอทีดีอาร์บันทึกเป็นไฟล์ .sor และนำข้อมูลที่ได้มาทำการแสดงในโปรแกรม OTDR Viewer เพื่อนำข้อมูลในการวัดแต่ละครั้งมาวิเคราะห์เพื่อทำการเปรียบเทียบการสูญเสียของสัญญาณแสง ณ ตำแหน่งของเซนเซอร์กับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของเส้นใยนำแสง



รูปที่ 4 ไดอะแกรมระบบเซนเซอร์ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 5 การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

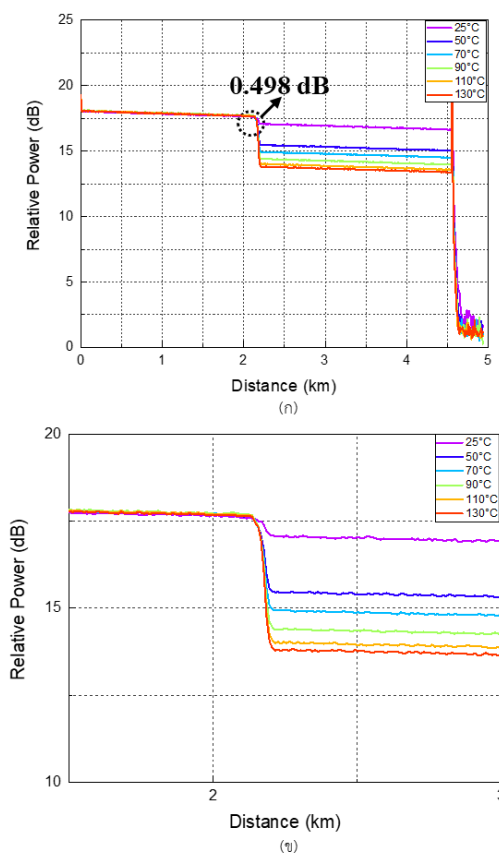
### 3. ผลการวิจัยและอภิปราย

#### 3.1 การทดสอบผลกระทบของเซนเซอร์เส้นใยนำแสง

ในการทดสอบระบบเซนเซอร์เส้นใยนำแสงนี้โอทีดีอาร์จะส่งแสงที่มีความยาวคลื่น (Wavelength) 1550 นาโนเมตร ในลักษณะของพัลส์แสงที่มีความกว้างพัลส์ (Pulse Width) 30 นาโนวินาที เข้าสู่เส้นใยนำแสง ช่วงเวลาในการเดินทาง

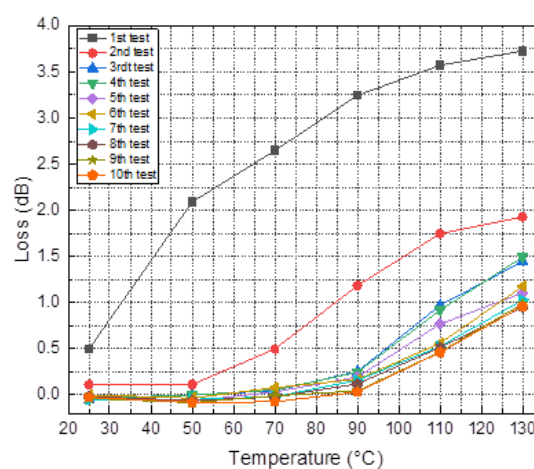


ของพัลส์แสงกำหนดรอบละ 60 วินาที ระยะทางในการทดสอบ (Distance) ตลอดความยาวเส้นใยนำแสงประมาณ 5 กิโลเมตร อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบมีความแตกต่างกันเริ่มตั้งแต่ 25 องศาเซลเซียส ไปจนถึง 130 องศาเซลเซียส โดยการให้ความร้อนด้วยเครื่องเป่าลมร้อนเข้าไปยังแผ่นทองแดงทรงกระบอกที่พันด้วยเส้นใยนำแสง ซึ่งจะทำให้เส้นใยนำแสงได้รับการถ่ายเทความร้อนมาจากแผ่นทองแดง อุณหภูมิเริ่มต้นในการทดสอบเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิห้อง) เหตุการณ์ (Event) ที่โอทีดีอาร์แสดงเกิดขึ้นที่ตำแหน่งของเซนเซอร์ที่เกิดการโค้งงอของเส้นใยนำแสงเนื่องจากการนำเส้นใยนำแสงพันเข้ากับแผ่นทองแดง ทรงกระบอกแสดงดังรูปที่ 6(ก) ซึ่งตำแหน่งของเซนเซอร์เส้นใยนำแสงเริ่มต้นที่ระยะ 2.0924 กิโลเมตร ถึง 2.2091 กิโลเมตร ความยาวเท่ากับ 0.1167 กิโลเมตร ผลการทดสอบพบว่าที่อุณหภูมิเริ่มต้นนั้นมีการสูญเสียกำลังแสงเนื่องจากการโค้งงออยู่ที่ 0.498 dB



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบการสูญเสียกำลังงานแสงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเส้นใยนำแสง ณ ตำแหน่งของเซนเซอร์ (ก) แสดงความยาวทั้งหมด (ข) กราฟขยายตำแหน่งของเซนเซอร์ที่เกิดการสูญเสียกำลังงานแสง

ต่อมาทำการเพิ่มอุณหภูมิจาก 25 องศาเซลเซียสเป็น 50 องศาเซลเซียสและเพิ่มครั้งละ 20 องศาเซลเซียส ไปจนถึง 130 องศาเซลเซียส เพื่อวิเคราะห์ค่าการสูญเสียกำลังแสงที่ได้จากเครื่องมือโอทีดีอาร์ ณ ตำแหน่งเซนเซอร์ ซึ่งจากการทดสอบพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้เกิดการสูญเสียกำลังแสงเพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ถึง 130 องศาเซลเซียส มีการสูญเสียกำลังแสง 0.498 dB 2.091 dB 2.648 dB 3.247 dB 3.572 dB และ 3.728 dB ตามลำดับ จากรูปที่ 6(ข) ซึ่งจะเห็นว่าการสูญเสียกำลังแสงเกิดการเปลี่ยนแปลงตามค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปของเส้นใยนำแสง



รูปที่ 7 การสูญเสียของเซนเซอร์เส้นใยนำแสง

รูปที่ 7 แสดงการสูญเสียสัญญาณแสงของเซนเซอร์เส้นใยนำแสงจากการทดสอบซ้ำทั้งหมด 10 ครั้งเพื่อทำการทดสอบระบบเซนเซอร์เส้นใยนำแสงและการเปลี่ยนแปลงของเส้นใยนำแสงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ จากการทดสอบพบว่าสัญญาณการกระเจิงย้อนกลับที่ตรวจวัดได้จากโอทีดีอาร์ในตำแหน่งของเซนเซอร์เส้นใยนำแสงที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิ มีค่าการสูญเสียของกำลังแสงลดลงเมื่อเทียบกับการทดสอบในครั้งแรก โดยเมื่อทำการทดสอบซ้ำหลาย ๆ ครั้ง โอทีดีอาร์จะแสดงเหตุการณ์เป็น Positive Event ในระยะของเซนเซอร์ในช่วงอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสถึง 70 องศาเซลเซียสแสดงดังรูปที่ 8 อนึ่งค่าการสูญเสียสัญญาณ (Loss) ที่วัดได้จากโอทีดีอาร์มีทั้งกรณีที่เป็น Positive Event และ Non - Reflective Event โดยโอทีดีอาร์จะแสดงค่าเป็นลบสำหรับ Positive Event และค่าเป็นบวกสำหรับ Non - Reflective Event



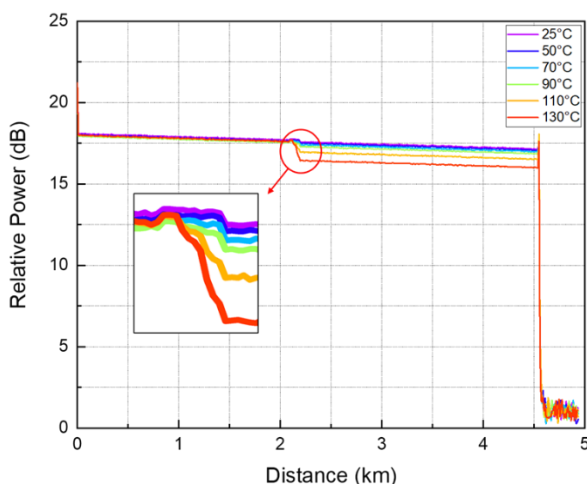


No.	Pos./Length (km)	Loss (dB)
1	0.0000	---
2	2.0936	-0.068
3	2.1936	0.175
4	4.5492	---

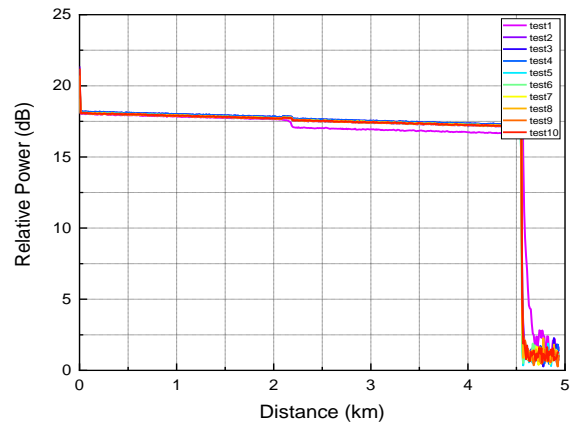
รูปที่ 8 เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นกับเซนเซอร์เส้นใยนำแสง

และเมื่อทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส จนถึง 130 องศาเซลเซียส โอทีดีอาร์จะแสดงเหตุการณ์ ในระยะของเซนเซอร์เป็น Non – Reflective Event ซึ่งหมายความว่าขนาดคอร์ของเส้นใยนำแสงส่วนที่เป็นเซนเซอร์ เกิดการหดตัวลงทำให้ขนาดคอร์ของเส้นใยนำแสงในระยะแรกนั้นมีขนาดที่ใหญ่กว่า ซึ่งเป็นผลจากหดตัวของ เส้นใยนำแสงเมื่ออุณหภูมิของเส้นใยนำแสงเย็นตัวลงและมี การขยายตัวของเส้นใยนำแสงเมื่ออุณหภูมิของเส้นใยนำแสง สูงขึ้น [16] แสดงดังรูปที่ 9

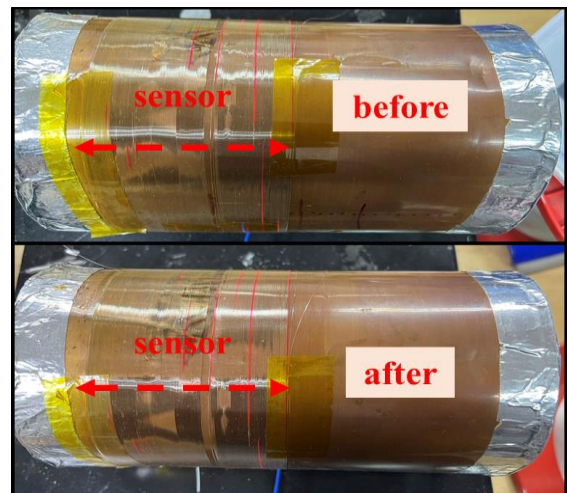
รูปที่ 10 แสดงถึงการเปรียบเทียบสัญญาณการกระเจิง ย้อนกลับของเส้นใยนำแสงที่ทำการทดสอบที่อุณหภูมิเริ่มต้น 25 องศาเซลเซียส ของการทดสอบทั้งหมด 10 ครั้ง ซึ่งปรากฏ ว่าค่าสัญญาณการกระเจิงย้อนกลับของเส้นใยนำแสงที่ผ่าน การทดสอบการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมีความชันของ สัญญาณลดลงซึ่งเป็นผลมาจากการทดสอบที่อุณหภูมิสูงและ ปล่อยให้เส้นใยนำแสงเย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 9 สัญญาณเหตุการณ์การขยายและหดตัวของ เส้นใยนำแสงจากโอทีดีอาร์



รูปที่ 10 การเปรียบเทียบสัญญาณการสะท้อนกลับที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสของการทดสอบในแต่ละครั้ง



รูปที่ 11 ภาพเส้นใยนำแสงก่อนและหลังการทดสอบ

รูปที่ 11 แสดงถึงเส้นใยนำแสงส่วนที่เป็นเซนเซอร์ ก่อน และหลังการทดสอบ โดยเส้นใยนำแสงในบริเวณที่ได้รับความ ร้อนในช่วงอุณหภูมิที่ทำการทดสอบไม่มีการเปลี่ยนแปลง สภาพหรือการละลายของโค้ดดิ้ง (Coating) ซึ่งจากการ ทดสอบแสดงให้เห็นว่าเส้นใยนำแสงมาตรฐานที่ใช้ในการ สื่อสารโทรคมนาคมสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์ ในช่วงอุณหภูมิที่นำเสนอในบทความนี้ได้



#### 4. บทสรุป

บทความนี้นำเสนอระบบการตรวจวัดอุณหภูมิบนเส้นใยนำแสงด้วยโอทีดีอาร์ โดยใช้เส้นใยนำแสงและเครื่องมือวัดทางแสงโอทีดีอาร์ที่ใช้ในระบบสื่อสารโทรคมนาคม โครงสร้างของเซนเซอร์ประกอบด้วยการพันเส้นใยนำแสงบนแผ่นทองแดงบางที่มีลักษณะทรงกระบอก เพื่อใช้ทองแดงเป็นตัวกลางถ่ายเทความร้อนมายังเส้นใยนำแสง สัญญาณแสงที่เดินทางในเส้นใยนำแสงที่วัดได้จากโอทีดีอาร์ แสดงให้เห็นถึงค่าการลดทอนสัญญาณแสง ณ ตำแหน่งที่ตรวจวัดอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงไป เนื่องมาจากการโค้งงอของเส้นใยนำแสงภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงไปเช่นกันในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 25 องศาเซลเซียส ถึง 130 องศาเซลเซียส ระบบที่นำเสนอสามารถประยุกต์ใช้เป็นระบบเซนเซอร์เส้นใยนำแสงในช่วงอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงรวมถึงการพัฒนาเป็นระบบการตรวจวัดทางด้านอุตสาหกรรมร่วมกับเส้นใยนำแสงที่ใช้ในงานสื่อสารโทรคมนาคมได้

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ภูเบศ แสงมะฮะหมัด และ ดร.วิสิทธิ์ ล้อธรรมจักร อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ต่าง ๆ เพิ่มเติมสำหรับใช้ในการวิจัย

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Bolognini G, Hartog A. Raman-based fibre sensors: Trends and applications. Optical Fiber Technology. 2013 Dec 1; 19(6):678-88.
- [2] Park J, Bolognini G, Lee D, Kim P, Cho P, Di Pasquale F, Park N. Raman-based distributed temperature sensor with simplex coding and link optimization. IEEE Photonics Technology Letters. 2006 Sep;18(17):1879-81.
- [3] Zhang J, Zhu T, Zhou H, Huang S, Liu M, Huang W. High spatial resolution distributed fiber system for multi-parameter sensing based on modulated pulses. Optics Express. 2016 Nov 28;24(24):27482-93.
- [4] Wang Z, Sun X, Xue Q, Wang Y, Qi Y, Wang X. An optical fiber-folded distributed temperature sensor based on Raman backscattering. Optics & Laser Technology. 2017 Aug 1; 93:224-7.
- [5] Zhou Z, Tian L, Han Y, Yang X, Liao F, Zhang D, Sha Y, Feng X, Zhu J, Zheng X, Cui Z. Distributed vibration and temperature simultaneous sensing using one optical fiber. Optics Communications. 2021 May 15;4 87:126801.
- [6] Baronti F, Lazzeri A, Roncella R, Saletti R, Signorini A, Soto MA, Bolognini G, Di Pasquale F. SNR enhancement of Raman-based long-range distributed temperature sensors using cyclic Simplex codes. Electronics Letters. 2010;46(ARTICLE):1221.
- [7] Silva MS, Alves HP, Nascimento JF, Martins-Filho JF. Impact of pulse width on the sensitivity and range of a Raman-based distributed fiberoptic temperature sensor. Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications. 2018;17:539-51.
- [8] e Silva MS, de Barros TH, Alves HP, do Nascimento JF, Martins Filho JF. Evaluation of fiber optic Raman scattering distributed temperature sensor between -196 and 400° C. IEEE Sensors Journal. 2020 Aug 13; 21(2):1527-33.
- [9] Martins-Filho JF, Fontana E, Guimaraes J, Pizzato DF, Coelho IS. Fiber-optic-based Corrosion Sensor using OTDR. In SENSORS, 2007 IEEE 2007 Oct 28. pp. 1172-1174.



- [10] Ribeiro LA, Rosolem JB, Dini DC, Florida C, Hortencio CA, da Costa EF, Bezerra EW, de Oliveira RB, Loichate MD, Durelli AS. Fiber optic bending loss sensor for application on monitoring of embankment dams. In 2011 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC 2011) 2011 Oct 29. pp. 637-641.
- [11] Agrawal GP. Fiber-optic communication systems. John Wiley & Sons; 2012 Feb 23.
- [12] Bao X, Wang Y. Recent advancements in Rayleigh scattering-based distributed fiber sensors. Advanced devices & instrumentation. 2021.
- [13] Saleh MB, Aly MH. Thermal Effects in optical Fibers 11. Arab Academy for Science and Technology & Maritime Transport College of Engineering & Technology Electronics and Communications Engineering Department, 2009.
- [14] Ko SC, Lai TH. Calibration of Optical Fiber Time Domain Reflectometers in Accordance with IEC 61746-1: 2009. NCSLI Measure. 2018 Apr 3; 12(1): 54-63.
- [15] User Guide. EXFO Optical Time Domain Reflectometer Analyzing the Results Manually OTDR. Getting Section Loss and Attenuation. 2015. pp. 87-96.
- [16] Alarabi A, Wang J, WANG D, YUa QI, GAOa SH, JIAO S, ZHANG Y, TABAN J, ABDELLAH A, ZHAO X, LIUc LI. Effect of temperature on the transmission loss of large-core optical fiber. Optoelectronics and Advanced Materials-Rapid Communications. 2018 May 1; 12(5-6): 258-63.







## ระบบรดน้ำ ใส่ปุ๋ย และพ่นยาฆ่าแมลงอัตโนมัติสำหรับแปลงกุหลาบโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ อีเอสพี 8266 และบลิงค์ ไอโอที แพลตฟอร์ม

### Automatic Water, Fertilizer and Insecticide Dispenser System for Rose Garden using ESP8266 and Blynk IoT Platform

ณัฐชาสิทธิ์ ชูเกียรติขจร ชัชวาลย์ ถาคำ ปณต พุกกะพันธุ์ ปรัชญ์ ปิยะวงศ์วิศาล อนันท์ ทับเกิด และ  
ขวัญชัย เอื้อวิริยานุกูล\*

สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

128 ถนนห้วยแก้ว อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300

Natchasit Chukiatkhajorn, Chatchawan Takum, Pranote Pookkapund, Pratch Piyawongwisal, Anan Tubkerd<sup>1</sup>  
and Kwanchai Euaviriyankul\*

Computer Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna

128 Huay Kaew Road, Muang, Chiang Mai, Thailand, 50300

ผู้รับผิดชอบบทความ: kwanchai@rmutl.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 08-3762-5128

Received: 6 December 2022, Revised: 4 May 2023, Accepted: 12 May 2023

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบในการช่วยดูแลจัดการสวนกุหลาบ ช่วยลดระยะเวลาในการทำงาน ซึ่งระบบจะทำหน้าที่อัตโนมัติตามการตั้งเวลาด้วยโทรศัพท์มือถือผ่านบลิงค์ ไอโอที แพลตฟอร์มในการควบคุมการจ่ายน้ำ ปุ๋ยชนิดน้ำและยาฆ่าแมลงจำนวน 3 ถัง ผ่านทาง โมดูลรีเลย์ ที่ต่อเข้ากับ โซลินอยด์วาล์ว เพื่อควบคุมการจ่ายน้ำ ปุ๋ยและยาฆ่าแมลง ที่อยู่ในแต่ละถังผ่านท่อพีวีซีและท่อพีอี เข้าสู่แปลงสวนกุหลาบ ขนาด 1 เมตร x 4.5 เมตร โดยจะติดตั้งหัวน้ำหยดไว้ที่โคนของต้นกุหลาบในแต่ละต้นเพื่อใช้ในการจ่ายน้ำและปุ๋ยชนิดน้ำ ส่วนยาฆ่าแมลงจะใช้หัวสเปรย์จำนวน 5 หัวติดกับท่อที่อยู่ด้านบนของแปลง และในระบบจะมีเซ็นเซอร์วัดความชื้นในดิน ความชื้นในอากาศและอุณหภูมิเพื่อนำมาบันทึกข้อมูล ซึ่งจะแสดงผลและสั่งการทำงานผ่านบลิงค์แอปพลิเคชัน ได้โดยใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ อีเอสพี 8266 เป็นตัวควบคุมการทำงานของระบบและส่งข้อมูลไปยังบลิงค์เซิร์ฟเวอร์ นอกจากนี้ระบบสามารถทำการแจ้งเตือนสถานะการรดน้ำ ผ่านทางไลน์โนติฟาย เพื่อให้ผู้ใช้สามารถตรวจสอบการทำงานของระบบได้ จากการทดลองการทำงานของระบบเป็นระยะเวลา 1 เดือน ณ สวนกุหลาบพรพิมล อำเภอแม่ริม จังหวัดเชียงใหม่ พบว่าระบบสามารถทำงานได้อย่างสมบูรณ์ ไม่มีความผิดพลาดเกิดขึ้น และมีการแจ้งเตือนการทำงานผ่านทางไลน์โนติฟาย ระบบสามารถควบคุมโซลินอยด์วาล์วได้ทั้ง 3 ตัว ในการรดน้ำใส่ปุ๋ยและพ่นยาฆ่าแมลงสำหรับต้นกุหลาบที่มีความสูงเฉลี่ย 30 – 50 ซม. ได้ 1 แปลง หรือ 45 ต้น พร้อมกัน ในการรดน้ำหรือใส่ปุ๋ยชนิดน้ำหนึ่งครั้งจะใช้ปริมาณ 42.75 ลิตร และการพ่นยาฆ่าแมลงหนึ่งครั้งจะใช้ปริมาณน้ำยา 2.26 ลิตร จากผลการวิจัย ระบบสามารถช่วยลดเวลาในการทำงานของการใช้แรงงานคนลงได้ 52% และมีจุดคุ้มทุนจากค่าใช้จ่ายทางด้านอุปกรณ์ของระบบอยู่ภายใน 94 วัน

**คำสำคัญ** ระบบรดน้ำ ใส่ปุ๋ย พ่นยาฆ่าแมลง อัตโนมัติแบบตั้งเวลา สวนกุหลาบ โมดูลรีเลย์ โซลินอยด์วาล์ว ไลน์โนติฟาย อีเอสพี8266 บลิงค์ ไอโอที แพลตฟอร์ม

#### Abstract

The purpose of this work is to develop an automatic water, fertilizer, insecticide dispenser system for rose garden based on timers set via a smartphone and Blynk IoT platform. With the aim to reduce manual labor and save resources, the system is able to control the water supply, fertilizer, and insecticide amount through a relay



module connected to the solenoid valve. Fertilizer and pesticide mixture stored in separated tanks are dispensed into the rose garden plot of size 1m x 4.5m via PVC and PE pipes. A dropper is installed above the base of each rose plant for water and fertilizer distribution. As for dispensing of the pesticide, five spray nozzles are attached to the pipe at the top of the plot. To monitor the condition of the plot, soil moisture, air humidity and temperature sensors are installed and the sensor data are collected and displayed on the application. All control and data transmission are handled by an ESP8266 module in conjunction with a Blynk IoT platform. In addition, the system is able to send alert messages about the solenoid valve operations via Line Notify. The proposed control system and application were deployed and tested at Ponpimol Rose Garden in Chiang Mai, Thailand for a period of one month. Throughout this period, the system was able to continuously operate without any errors or downtime, and all LINE notifications were correctly sent. The target rose plot carried 45 rose plants which were between 30 – 50 cm in height. The amount of water, fertilizer, and insecticide dispensed at each instance were 42.75 l, 453 ml, 2.26 l, respectively. According to the cost analysis, the proposed system can help reduce the labor cost by 52%, and after considering the cost of equipment and installation, the break-even point is around 94 days.

**Keywords:** Automatic Plant Watering and Fertilization System, Pesticide Dispenser, Rose Garden, Relay Module, Solenoid Valves, Line Notify, ESP8266, Blynk IoT Platform

## 1. บทนำ

เกษตรกรรมนั้นถือเป็นอาชีพหลักของคนในประเทศไทย โดยประเทศไทยนั้นมีพื้นที่เกษตรกรรมมากถึง 149 ล้านไร่ ในปี 2560 มีประชากรที่ขึ้นทะเบียนเป็นเกษตรกรกว่า 9.2 ล้านรายในปี 2565 [1] โดยในปัจจุบันได้ สมาร์ทฟาร์ม หรือ เกษตรอัจฉริยะ เป็นรูปแบบการทำเกษตรแบบใหม่ โดยนำเทคโนโลยีเข้ามาช่วยในการเกษตร เช่น [2] การใช้เครื่องใส่ปุ๋ยเคมีกึ่งอัตโนมัติ สำหรับทุเรียน และ [3] ใช้ระบบในการผสมธาตุอาหารให้กับพืชในตระกูลเมล่อน รวมถึง ยังสามารถ [4] พัฒนาระบบโดยใช้เซนเซอร์ Soil NPK ในการติดตามธาตุอาหาร ไนโตรเจน(N) ฟอสฟอรัส(P) และโพแทสเซียม(K) ในดิน เพื่อวางแผนการให้ปุ๋ยให้ถูกวิธี อีกทั้งยังมี [5] การใช้ อินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่ง (Internet of Things - IoT) ในการเพาะเลี้ยงปลานิล โดยใช้เซนเซอร์ 3 ตัว ในการวัดปริมาณออกซิเจน ค่าอุณหภูมิของน้ำและค่าความเป็นกรดเป็นเบสของน้ำ เชื่อมต่อไมโครคอนโทรลเลอร์ในการประมวลผลใช้ในการแสดงสถานะและควบคุมการเติมอากาศและให้อาหารปลา ในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่และภาคเหนือตอนบน หนึ่งในเกษตรกรรมที่ได้รับความนิยมคือ การทำสวนกุหลาบ เนื่องจากกุหลาบสามารถนำไปใช้ได้หลายสถานการณ์และโอกาส โดยการทำสวนกุหลาบนั้นต้องได้รับการดูแลที่ดี มีการ

รดน้ำ ใส่ปุ๋ย สม่ำเสมอและในปริมาณมาก อีกทั้งกุหลาบเป็นไม้ตัดดอกชนิดหนึ่งที่มีศัตรูพืชมาก จึงจำเป็นต้องมีการพ่นยาฆ่าแมลงเป็นประจำ ทางคณะผู้วิจัยจึงได้จัดทำ ระบบรดน้ำ ใส่ปุ๋ยและพ่นยาฆ่าแมลงอัตโนมัติสำหรับสวนกุหลาบ เพื่อลดเวลาและจำนวนคนงานในการดูแลผลผลิตและประหยัดทรัพยากรที่ใช้ในการดูแลมากขึ้น โดยมีระบบรดน้ำอัตโนมัติตามเวลาที่กำหนดไว้ และมีระบบใส่ปุ๋ยและพ่นยาฆ่าแมลงอัตโนมัติตามเวลาที่ได้กำหนดไว้พร้อมทั้งแสดงค่าอุณหภูมิและค่าความชื้นในดินผ่านทางแอปพลิเคชัน ซึ่งคณะผู้วิจัยจึงได้ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการพัฒนาระบบ รดน้ำใส่ปุ๋ยและพ่นยาฆ่าแมลงให้กับสวนกุหลาบ โดยมีรายละเอียดดังนี้

## 2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

### 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการควบคุมอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ต่างๆ จากระยะไกลหรือผ่านทางอินเทอร์เน็ต สำหรับงาน IoT ปัจจุบันได้มีแพลตฟอร์ม เช่น บลิ้งค์แพลตฟอร์ม (Blynk Platform) ที่จะทำให้สามารถควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ ผ่านทางแอปพลิเคชันบนสมาร์ตโฟนได้ โดยจะมี องค์ประกอบในแพลตฟอร์มอยู่ 3 ส่วนได้แก่ 1.บลิ้งค์แอปพลิเคชัน (Blynk Application) คือ แอปพลิเคชันที่ใช้ในการแสดงผลและควบคุมอุปกรณ์ 2.บลิ้งค์เซิร์ฟเวอร์ (Blynk Server) คือตัวกลางในการสื่อสารระหว่าง



อุปกรณ์ต่าง ๆ กับแอปพลิเคชัน 3.บลิงค์ไลบรารี (Blynk Libraries) คือ ชุดคำสั่งสำหรับพัฒนาโปรแกรม ระบบเทคโนโลยีอัจฉริยะเกษตรอินทรีย์ [6] มีการใช้ บลิ่งค์แพลตฟอร์มในการควบคุมการปิดเปิดปั๊มในการพ่นน้ำฝอย และพัดลมระบายอากาศสำหรับลดอุณหภูมิเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าค่าที่ตั้งไว้ โดยมีการใช้ NodeMCU ในการวัดอุณหภูมิและความชื้นในอากาศและใช้ Arduino UNO สำหรับควบคุมพัดลมและการพ่นน้ำฝอยแต่งงานวิจัยไม่ได้ระบุชนิดของพืชที่ใช้ในการปลูก การพัฒนาระบบเกษตรอัจฉริยะ [7] จะคล้ายกับงานวิจัย [6] ที่มีการพ่นน้ำในการลดอุณหภูมิเช่นกัน นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์แพลตฟอร์มอื่น ๆ ที่มีลักษณะเช่นเดียวกับ บลิ่งค์ เช่น NETPIE [8] หรือ Firebase [9] มาใช้ในการแสดงผลและควบคุมอุปกรณ์ในการตรวจวัดความชื้นในดินและการรดน้ำเช่นเดียวกัน

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังกล่าว พบว่าในปัจจุบันยังไม่มีระบบใดที่ถูกออกแบบและใช้สำหรับการดูแลแปลงกุหลาบเพื่อการ รดน้ำ ใส่ปุ๋ย และพ่นยาฆ่าแมลงแบบตั้งเวลาอัตโนมัติ โดยเฉพาะ ทางคณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการออกแบบและพัฒนาาระบบให้สามารถ ให้ปุ๋ย และพ่นยาฆ่าแมลงแบบอัตโนมัติ เพิ่มเติมจากการให้น้ำผ่านการตั้งค่าด้วย บลิ่งค์แอปพลิเคชันบนสมาร์ตโฟน สำหรับสวนกุหลาบขึ้น คณะผู้วิจัยเชื่อว่าระบบดังกล่าวจะมีความเหมาะสมในการใช้งานในสวนกุหลาบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## 2.2 การออกแบบระบบ

อ้างอิงจากรูปที่ 1 หลักการทำงานของระบบ คือ ระบบสามารถรดน้ำ ใส่ปุ๋ยและพ่นยาฆ่าแมลง ให้กับแปลงกุหลาบขนาด 1 x 4.5 m ได้อัตโนมัติ (ระยะห่างระหว่างกระถาง จะห่างกันประมาณ 15-20 ซม. ตามมาตรฐานของสวน ดังนั้นในการทดลอง จะใช้กุหลาบจำนวน 45 ต้น แถวละ 15 ต้น จำนวน 3 แถว จึงได้ความกว้างและความยาวตามขนาดดังกล่าว) โดยการใช้รีเลย์โมดูล (4 Channel DC 12V) ในการควบคุมการจ่ายน้ำ ปุ๋ยชนิดน้ำและยาฆ่าแมลง ผ่านทางโซลินอยด์วาล์ว 12V ขนาด 6 หุน (โมดูลรีเลย์ ใช้งานจริง 3 Channel และสำรอง 1 Channel) เมื่อมีการเปิดทำงานของโซลินอยด์วาล์วใด ๆ แรงดันจากของเหลวจะไปกระตุ้นการทำงานของปั๊มน้ำโดยอัตโนมัติ และมีเซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิ ความชื้นในอากาศ (DHT22) และความชื้นในดิน (Soil Moisture Sensor) ที่ประกอบด้วย Sensing Probes

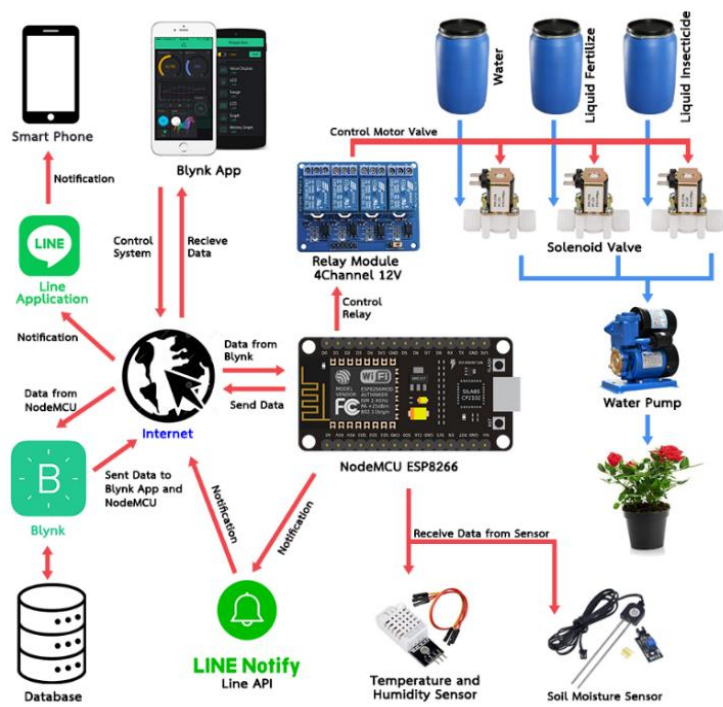
และ LML393 (Comparator) เพื่อแสดงค่าสถานะต่าง ๆ ของระบบผ่านแอปพลิเคชัน โดยระบบสามารถตั้งค่าการทำงานในแต่ละวันแต่ละช่วงเวลาได้ เพื่อให้สอดคล้องกับความต้องการของสวนกุหลาบ โดยโครงสร้างของระบบการให้น้ำและปุ๋ยจะเป็นต่อท่อด้านข้างของแปลงดอกกุหลาบโดยใช้หัวน้ำหยดในการให้น้ำและปุ๋ย และต่อท่อพาดผ่านด้านบนใช้หัวฉีดพ่นในการพ่นยาฆ่าแมลง พร้อมทั้งมีระบบการแจ้งเตือนการทำงานผ่านไลน์โนติฟาย

ซึ่งองค์ประกอบในรูปที่ 2 จะสามารถเขียนขั้นตอนในการทำงานได้ตามแผนภาพดังรูปที่ 3 และ 4 โดยการทำงานในภาพรวม ระบบจะทำการอ่านค่าจากเซนเซอร์อุณหภูมิ ความชื้นในอากาศและความชื้นในดิน นำไปแสดงผลผ่าน บลิ่งค์ ไอโอที แอปพลิเคชัน (Blynk IoT Application) ที่สามารถแสดงผลได้ทั้งบนสมาร์ตโฟนและเว็บเพจ หลังจากนั้นจะทำการตั้งเวลาในการรดน้ำ 2 ครั้งในแต่ละวัน ในเวลา 9.00 น. และ 14.00 น. ส่วน ยาฆ่าแมลง และ ปุ๋ย จะให้สัปดาห์ละหนึ่งครั้งในวันพุธ เวลา 12.00 น. และ 14.00 น. ตามลำดับ โดยวันที่ให้ปุ๋ย จะได้ไม่รดน้ำในช่วงเวลาบ่าย

จากรูปที่ 5 ส่วนของ S1 Switch-Tact เป็นสวิตช์ที่ใช้ในการเข้าสู่ Boot Loader ของ ไอเอสพี 8266 เมื่อสถานะเป็น 0 (ต่อ Ground) เพื่อใช้ในการเปลี่ยนการเชื่อมต่อของ Wi-Fi (ยกตัวอย่างเช่น เมื่อย้ายระบบจากสถานที่ทดลองไปยังแปลงปลูกจริง ต้องมีการรีเซ็ตการเชื่อมต่อ Wi-Fi และอัปโหลดโปรแกรมใหม่) โปรแกรมจะตรวจสอบเวลาจากข้อมูลการตั้งค่า เมื่อถึงเวลาที่กำหนดไอเอสพี 8266 จะส่งลอจิก 1 เพื่อให้รีเลย์โมดูลทำงานและเปิดโซลินอยด์วาล์ว ส่วน Dip Switch ใช้สำหรับในการตัดสัญญาณ ที่จะส่งไปยังรีเลย์โมดูล ในกรณีที่บอร์ดมีปัญหาส่งลอจิก 1 มาตลอดเวลาโดยจะใช้โปรแกรมจาก <https://easyseda.com> ในการออกแบบวงจร และได้ไฟล์นามสกุล pdf หลังจากนั้นจะส่งไฟล์ดังกล่าว ไปยัง <https://jlcpcb.com> เพื่อดำเนินการจัดทำแผ่นวงจรและประกอบอุปกรณ์ลงบนแผ่น PCB โดยใช้ระยะเวลาประมาณ 2 สัปดาห์ ในการจัดทำแผ่นวงจร จาก Schematic Diagram ในรูปที่ 5 เราทำการประกอบกล่องควบคุมระบบ ซึ่งประกอบไปด้วย แผงวงจร PCB, Terminal Block 6-p, Soil Moisture Sensor, DHT22, Adapter จ่ายไฟ 12V 2A, ปลั๊กไฟ, เต้าเสียบปั๊มน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 6

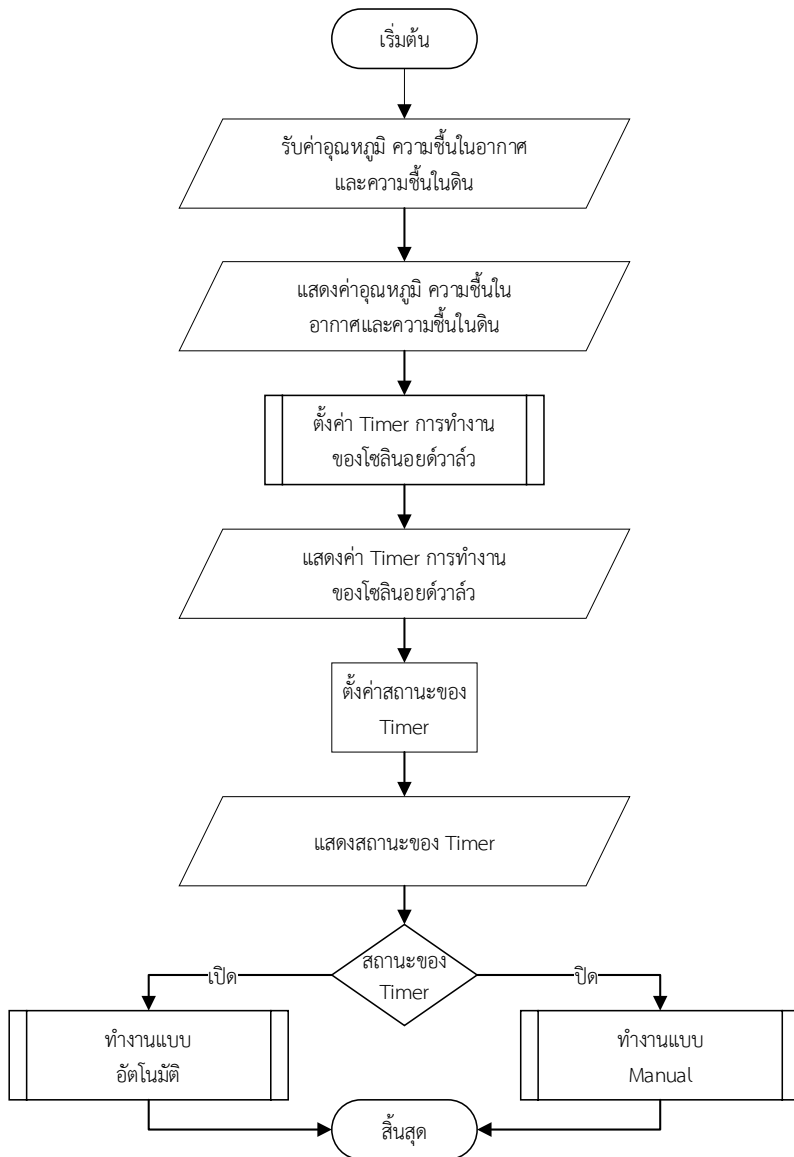


รูปที่ 1 ภาพรวมผลงานวิจัย

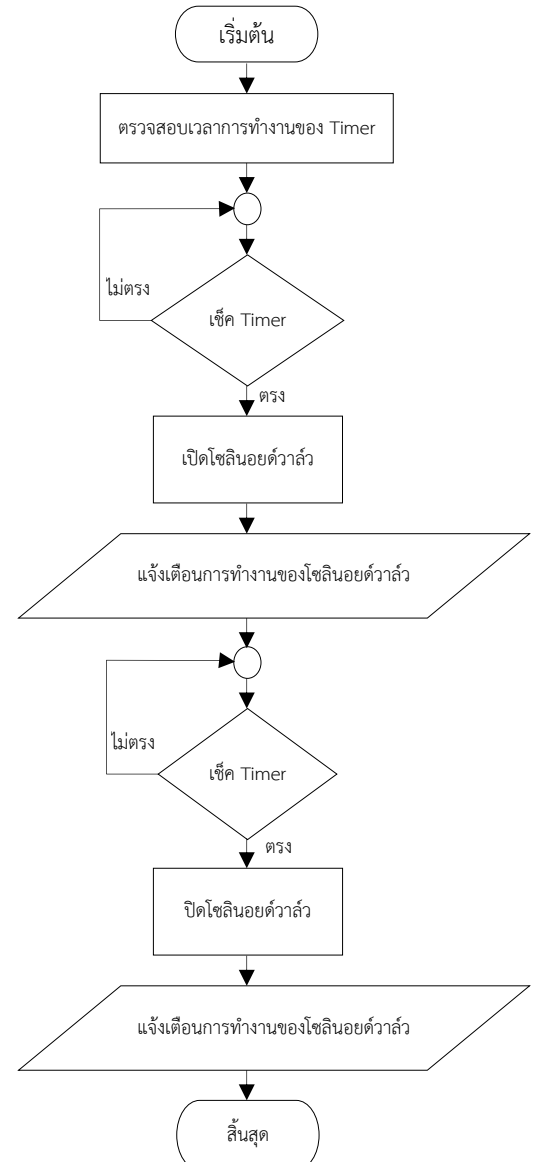


รูปที่ 2 หลักการทำงานของระบบ

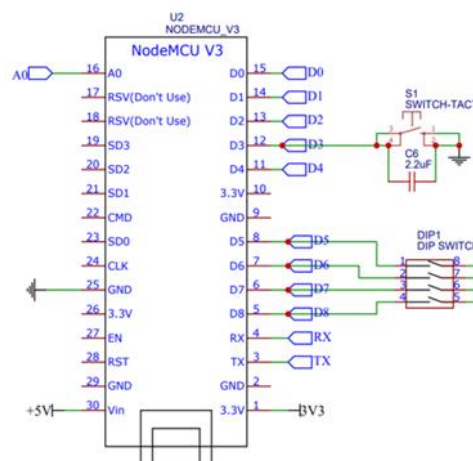




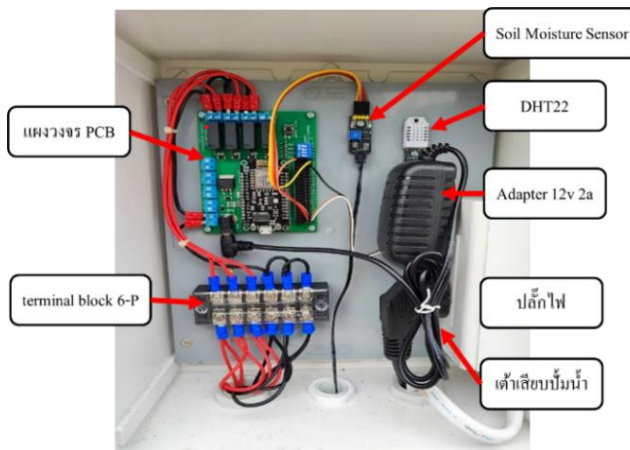
รูปที่ 3 ผังงานการทำงานของระบบ



รูปที่ 4 ผังงานการทำงานแบบอัตโนมัติ



รูปที่ 5 แบบไดอะแกรมแผนผัง (Schematic diagram)ของ อีเอสพี 8266 (NodeMCU)



รูปที่ 6 กล่องควบคุมระบบ

ในแผงวงจร PCB จะมีวงจร Regulator 5V ที่ใช้ IC 7805 ในการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงจาก Adapter 12V เป็นไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5V เพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ อีเอสพี 8266 ในส่วนของโมดูลรีเลย์และโซลินอยด์วาล์วจะยังคงใช้ไฟฟ้ากระแสตรง 12V จาก Adapter ในส่วนของตัวเซนเซอร์จะต่อเข้ากับขาของ Pin Header A0 (Soil Moisture Sensor) และ D0 (DHT22) ขา GND ทั้งสองขาสำหรับเป็นขาGNDของโซลินอยด์วาล์ว และ รีเลย์โมดูล

การเชื่อมต่อระหว่าง บลิ๊คเชิร์ฟเวอร์ และ อีเอสพี 8266 (NodeMCU) โดยทำการสร้าง Device ใน บลิ๊คเชิร์ฟเวอร์ เพื่อใช้สำหรับการเชื่อมต่อข้อมูลกับ บอร์ดอีเอสพี 8266 โดยจะทำการเพิ่มอุปกรณ์เข้าสู่ระบบด้วยการกำหนดชื่อ Device Name เช่น MyProject หลังจากนั้นระบบจะทำการสร้าง BLYNK\_TEMPLATE\_ID เป็นอักขระจำนวน 12 ตัว เช่น TEMPLHHLxxxx ซึ่งจะนำไปใส่โปรแกรม ใช้เป็น ID สำหรับอุปกรณ์ที่จะใช้ในระบบ และ BLYNK AUTH TOKEN จะใช้เป็นการยืนยันตัวตน เช่น "CLZJIQv-MOEYJcxxxx4-nyuXQK"

การเชื่อมต่อระหว่าง บลิ๊คเชิร์ฟเวอร์ กับ อีเอสพี 8266 จะใช้โปรแกรม Arduino ในการเขียนโปรแกรมเพื่อเชื่อมต่อ การรับและส่งข้อมูลต่าง ๆ ระหว่าง Software กับ Hardware

โดยจะใช้ Library BlynkSimpleEsp8266 ในการรับส่ง ข้อมูลระหว่างบอร์ดและบลีคเชิร์ฟเวอร์ และจะต้องระบุSSID และรหัสผ่านของ WiFi เพื่อใช้ในการเชื่อมต่อระหว่าง อีเอสพี 8266 และ WiFi

การรับและการส่งข้อมูลของบอร์ด อีเอสพี 8266 กับ บลิ๊คเชิร์ฟเวอร์ ในการเชื่อมต่อกันของขาบอร์ด อีเอสพี 8266 กับตัวเซนเซอร์ต่างๆ สามารถกำหนดได้ในส่วนของโปรแกรมเพื่อที่จะอ่านค่าจากเซนเซอร์ต่าง ๆ โดยกำหนดตามขาของบอร์ด อีเอสพี 8266 ที่ได้เชื่อมต่อกับเซนเซอร์ตัวนั้น ๆ ตามขาของ Pin โดยจะกำหนดให้ขา D5-D8 ของ อีเอสพี 8266 จะใช้ในการส่งสัญญาณให้รีเลย์โมดูลในการควบคุมโซลินอยด์วาล์วทั้ง 3 ตัว และใช้ในการสำรองในกรณีที่รีเลย์เสียไว้ 1 ขา

หลังจากรับข้อมูลจากเซนเซอร์แล้ว ก็จะนำมาเก็บในตัวแปรที่สร้างขึ้นมา โดยการที่จะส่งข้อมูลต่าง ๆ ไปยัง บลิ๊คเชิร์ฟเวอร์ นั้นจะต้องสร้างตัวแปรจากฝั่งของเชิร์ฟเวอร์ ด้วยเช่นกัน เพื่อที่จะรับข้อมูลจากฝั่งของบอร์ด อีเอสพี 8266 และการรับและส่งข้อมูลไปยัง บลิ๊คเชิร์ฟเวอร์ นั้นต้องกำหนดขาที่ใช้รับข้อมูลด้วย โดยจะทำการกำหนดขาที่เรียกว่า Virtual Pin ซึ่งจะแบ่งได้เป็น 4กลุ่ม กลุ่มขา V0-V2 ใช้ในการรับค่าจะเซนเซอร์ กลุ่มที่ 2 ขาV3-V7 ใช้ในการรับค่าจากรีเลย์โมดูลในการควบคุมโซลินอยด์วาล์ว กลุ่มที่ 3 ขา V8-V15 ใช้ในการรับค่าเวลาเริ่มต้นในการเปิดโซลินอยด์วาล์ว และกลุ่มที่ 4 ขา V16-V23 ใช้ในการรับค่าเวลาสิ้นสุดในการปิดโซลินอยด์วาล์ว

ในโปรแกรมได้ตั้งตัวแปรสำหรับ Timer เพื่อใช้ในการควบคุมการเปิดปิดโซลินอยด์วาล์วผ่านรีเลย์โมดูลไว้ทั้งหมด 4 กลุ่ม ดังแสดงในรูปที่ 8 ได้แก่ Timer1 ใช้ในการควบคุมการรดน้ำ Timer2 ใช้ในการให้ปุ๋ย Timer3 ใช้ในการควบคุมการพ่นยาฆ่าแมลง และ Timer4 ใช้สำหรับเป็นกลุ่มสำรองในการใช้งาน และในแต่ละกลุ่มจะสามารถทำงานได้สูงสุด 4 ตัวแปร ใช้สำหรับเก็บเวลาเริ่มต้นในการทำงาน 2 ตัวแปรและเวลาสิ้นสุดในการทำงาน 2 ตัวแปร ซึ่งหลักการในการทำงานของโปรแกรมในการตั้งเวลา คือ ในทุก ๆ 1 วินาที โปรแกรมจะทำการเรียกข้อมูลการตั้งค่าเวลาจากบลิ๊คเชิร์ฟเวอร์ และจัดเก็บในตัวแปร Timer ต่างๆ จากนั้นจะทำการตรวจสอบเวลาปัจจุบันบน อีเอสพี 8266 หากเวลาแตกต่างกับ บลิ๊คเชิร์ฟเวอร์ เกินค่าที่กำหนด เช่น 30 วินาที โปรแกรมจะทำการประสานเวลาให้บอร์ดเป็นเวลาเดียวกับบลิ๊คเชิร์ฟเวอร์ หากเวลาปัจจุบันตรงกับค่าในตัวแปรของการทำงานใด ๆ โปรแกรมก็จะส่งสัญญาณไปยังขาของรีเลย์โมดูล



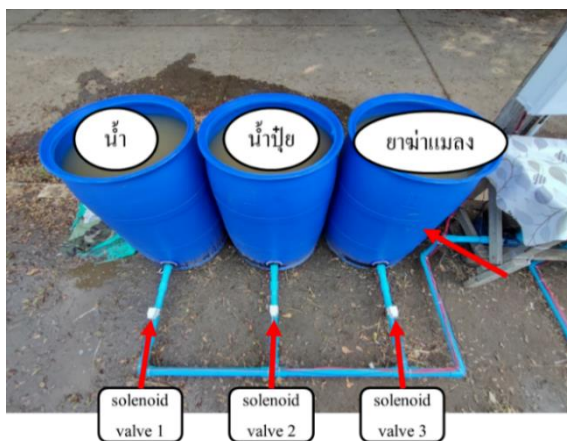
เช่น หากตรงกับเวลาในการเปิดวาล์วในการรดน้ำช่วงเช้า บอร์ดจะส่งสัญญาณ 1 ไปยังรีเลย์โมดูลผ่านขา D5 เพื่อให้โซลินอยด์วาล์วเปิดวาล์วน้ำ และจะนำค่าสถานะไปทำการปรับปรุงข้อมูลในบล็อกเชิร์ฟเวอร์ ผ่าน Virtual Pin ตามที่ได้กำหนดไว้ตอนต้น ยกตัวอย่างเช่น ขา V3 (BLYNK\_VALVE1) เป็นสถานะของโซลินอยด์วาล์วตัวที่ 1 ที่ใช้ในการควบคุมการรดน้ำ และสามารถกำหนดค่าที่เราได้ส่งข้อมูลไปเก็บใน Alias ต่าง ๆ เพื่อนำข้อมูลเหล่านั้นส่งไปแสดงค่าบนบล็อกไอโอทีแอปพลิเคชัน

การติดตั้งถังน้ำและปั้มน้ำอัตโนมัติใช้ถังน้ำขนาด 200 ลิตร จำนวน 3 ถัง ในการเก็บ น้ำ น้ำปุ๋ยและยาฆ่าแมลง โดยมีการต่อท่อ PVC ออกจากถังทั้ง 3 ผ่านโซลินอยด์วาล์ว 3 ตัว เข้าปั้มน้ำอัตโนมัติ ดังแสดงในรูปที่ 9 และ 10

การวางท่อ ใช้ท่อ PVC แยกออกเป็น 3 ทาง ใช้โซลินอยด์วาล์ว 3 ตัว เพื่อควบคุมของเหลวเข้าสู่ปั้มน้ำอัตโนมัติ ในการเพิ่มแรงดันน้ำ จากนั้นจะมีโซลินอยด์วาล์วอีก 3 ตัว ในการบังคับทิศทางของเหลวไปยังหัวหยดน้ำหรือหัวฉีดพ่น ก่อนจะเข้าสู่แปลงสวนกุหลาบ ดังรูปที่ 11



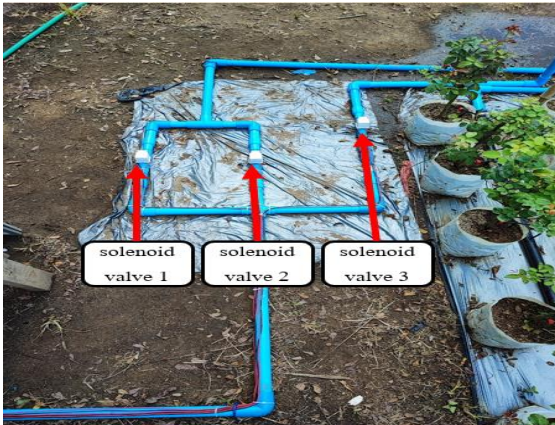
รูปที่ 8 ตัวอย่างกลุ่มของ Timer



รูปที่ 9 การต่อท่อ PVC เข้าถังน้ำ



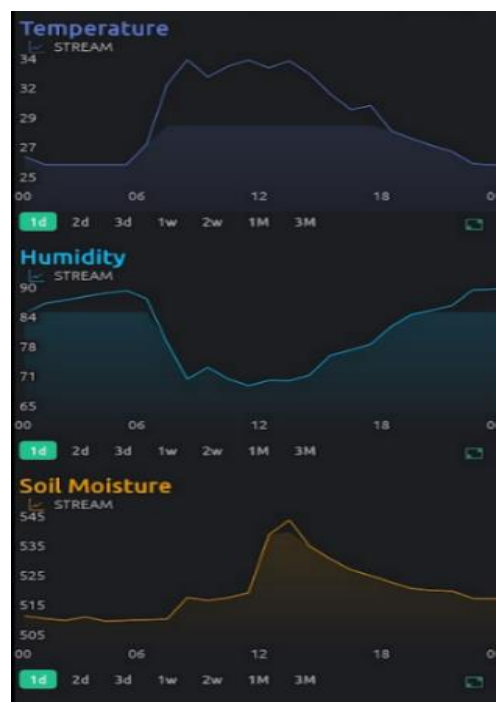
รูปที่ 10 การต่อท่อ PVC เข้าปั้มน้ำอัตโนมัติ



รูปที่ 11 การวางท่อ PVC



รูปที่ 12 การต่อหัวน้ำหยด และ หัวฉีดพ่น



รูปที่ 13 ค่าอุณหภูมิความชื้นในอากาศและดิน

การต่อท่อเข้าแปลงสวนกุหลาบจะใช้ท่อ PE แทนท่อ PVC เนื่องจากสะดวกต่อการเจาะและนำมาใส่สายไมโครพร้อมหัวน้ำหยดสำหรับการรดน้ำและใส่ปุ๋ยน้ำของต้นกุหลาบไว้ที่โคนของต้นกุหลาบ และใส่หัวฉีดพ่นตรงท่อ PE ด้านบนของแปลงสวนกุหลาบ เพื่อใช้สำหรับฉีดพ่นยาฆ่าแมลงให้ครอบคลุมต้นกุหลาบที่อยู่ด้านล่าง ดังรูปที่ 12

ในส่วนของการออกแบบแอปพลิเคชันได้ใช้บล็อก ไอโอที แอปพลิเคชัน ในการออกแบบ ซึ่งเป็นแอปพลิเคชันสำเร็จรูปที่เหมาะสมสำหรับโครงงานทางด้านไอโอที และมีรูปแบบในการ

ผลลัพธ์หลากหลาย และทำการเลือก Data Stream ที่เก็บข้อมูลไว้ในลิงค์เซิร์ฟเวอร์ มาแสดงตามรูปแบบต่าง ๆ ที่ได้กำหนดไว้

ระบบมีการเก็บค่าสถานะ อุณหภูมิ ความชื้นในอากาศ และความชื้นในดินมาแสดงเป็นกราฟ ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 13 เพื่อดูสภาวะแวดล้อมภายในแปลงสวนกุหลาบ สามารถดูข้อมูลย้อนหลังได้ และหลังจากที่โซลินอยด์วาล์วมีการทำงานจะมีข้อความจาก โลนโนติฟายส่งไปยังไลน์แอปพลิเคชัน เพื่อแจ้งสถานะการทำงานของโซลินอยด์วาล์วที่มีการ เปิด-ปิด การทำงาน



### 3. ผลการศึกษา

หลังจากที่ได้ทำการติดตั้งและทดลองระบบรดน้ำ ใส่ปุ๋ย และพ่นยาฆ่าแมลงอัตโนมัติสำหรับสวนกุหลาบแล้ว คณะผู้วิจัยได้ทำการสอบถามข้อมูลจากเจ้าของสวนกุหลาบในด้านการดูแลสวนกุหลาบและได้นำข้อมูลนั้นมาตั้งเป็นหัวข้อในการทดสอบโครงการโดยอ้างอิงตามข้อมูลการดูแลสวนกุหลาบที่เจ้าของสวนได้ให้ข้อมูลมาเป็นระยะเวลา 1 เดือน ได้สรุปผลเป็นตารางดังนี้

ตารางที่ 1 ผลการทดลองเมื่อสั่งให้ระบบทำงานตาม TIMER ที่ตั้งไว้ใน 1 สัปดาห์

วันในสัปดาห์	VALVE 1 (น้ำ)		VALVE 2 (น้ำปุ๋ย)	VALVE 3 (ยาฆ่าแมลง)	ร้อยละความผิดพลาด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2			
	09:00 - 09:02	14:00 - 14:02	14:00 - 14:02	12:00 - 12:02	
Sun	✓	✓	-	-	0.00
Mon	✓	✓	-	-	0.00
Tue	✓	✓	-	-	0.00
Wed	✓	-	✓	✓	0.00
Thu	✓	✓	-	-	0.00
Fri	✓	✓	-	-	0.00
Sat	✓	✓	-	-	0.00

ตารางที่ 2 ผลการทดลองการแจ้งเตือนการทำงานผ่าน Line Notify ใน 1 สัปดาห์

วันใน สัปดาห์	VALVE 1 (น้ำ)				VALVE 2 (น้ำปุ๋ย)		VALVE 3 (ยาฆ่าแมลง)		จำนวน การแจ้ง เตือน  ข้อความ	ร้อยละ ความ ผิดพลาด
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2							
	09:00 เปิด	09:02 ปิด	14:00 เปิด	14:02 ปิด	14:00 เปิด	14:02 ปิด	12:00 เปิด	12:02 ปิด		
Sun	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-	4	0.00
Mon	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-	4	0.00
Tue	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-	4	0.00
Wed	✓	✓	-	-	✓	✓	✓	✓	6	0.00
Thu	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-	4	0.00
Fri	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-	4	0.00
Sat	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-	4	0.00

ตารางที่ 3 ผลการทดลองของระบบในเวลา 1 เดือน

Week of Month	วันในสัปดาห์							ร้อยละความผิดพลาด
	Sun	Mon	Tue	Wed	Thu	Fri	Sat	
Week 1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	0.00
Week 2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	0.00
Week 3	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	0.00
Week 4	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	0.00

ตารางที่ 1-3 แสดงผลการทดลองการทำงานของระบบรดน้ำ ใส่ปุ๋ย พ่นยาฆ่าแมลง โดยระบบสามารถทำงานได้อย่างถูกต้องตามที่เรารตั้งเวลาไว้ ในเวลา 1 เดือน แต่อย่างไรก็ตาม

หาก ในช่วงเวลาดังกล่าวมีไฟฟ้าดับ หรือ ระบบอินเทอร์เน็ต ขัดข้องระบบก็จะส่งข้อความผ่าน Line โนติฟาย มายัง คณะผู้วิจัย ว่าขาดการเชื่อมต่อแต่ในระหว่างที่ทดลอง ไม่มี เหตุการณ์ดังกล่าวเกิดขึ้น ทำให้ระบบสามารถทำงานรดน้ำ ใส่ปุ๋ยและ พ่นยาฆ่าแมลงได้ถูกต้องตามที่ผู้ใช้งานกำหนด

จากการทดลองรดน้ำ ใส่ปุ๋ย และยาฆ่าแมลงโดยการจับ เวลาและชั่งตวงปริมาณน้ำที่ใช้ต่อการทำงานหนึ่งครั้ง เพื่อให้ เหมาะสมต่อการทำงาน คณะผู้วิจัยได้เวลาที่เหมาะสมในการ ทำงาน คือ 2 นาที จากการคำนวณดังนี้



รูปที่ 14 การตวงและชั่งวัดปริมาณน้ำและยาฆ่าแมลง

การให้น้ำหรือน้ำปุ๋ยหนึ่งครั้งจะใช้ปริมาณน้ำ ต่อ 1 ต้น คือ 950 มล.ดังรูปที่ 14 ดังนั้นต่อ 1 แปลง จะใช้น้ำ  $950 \times 45 = 42,750$  มล. หรือ 42.75 ลิตร การพ่นยาฆ่าแมลงหนึ่ง ครั้งจะใช้ปริมาณน้ำ ต่อ 1 หัว คือ 453 มล. ต่อ 1 แปลงคือ  $453 \times 5 = 2,260$  มล. หรือ 2.26 ลิตร

ในการทำการทดลองคณะผู้วิจัยได้ให้คนงานเป็นผู้เติมน้ำ ปุ๋ย และยาฆ่าแมลง โดยจะเติมทุก ๆ 2-3 วัน จะสอดคล้อง กับการคำนวณดังนี้ น้ำที่ใช้ในการรด  $0.95 \text{ ลิตร} \times 45 \text{ ต้น} \times 2 \text{ ครั้งต่อวัน} = 85.5 \text{ ลิตร}$  ถังบรรจุน้ำขนาด 200 ลิตร ดังนั้น จะ ใช้ได้ประมาณ  $200/85.5 = 2.33$  วัน สำหรับการเติมน้ำ 1 ครั้ง

ส่วนปุ๋ย  $0.95 \text{ ลิตร} \times 45 \text{ ต้น} = 42.75 \text{ ลิตร}$  ต่อสัปดาห์ ดังนั้น จะต้องเติมทุก ๆ  $200/42.75 = 4.7$  สัปดาห์ ทำให้ สามารถเพียงพอต่อการใช้งานประมาณ 1 เดือน และยาฆ่า



แมลง มีหัวพัน 5 หัว หัวละ 0.453 ลิตร สามารถคำนวณได้ดังนี้  $0.453 \text{ ลิตร} \times 5 \text{ หัว} = 2.27 \text{ ลิตรต่อสัปดาห์}$  ดังนั้นจะต้องเติมน้ำแมลง 200 ลิตร/2.27 ลิตรต่อสัปดาห์ = 88 สัปดาห์ ในทางปฏิบัติจะใส่เพียงครึ่งถึงเพื่อไม่ให้ น้ำยาแมลงเน่าเสีย และประหยัดยาฆ่าแมลง

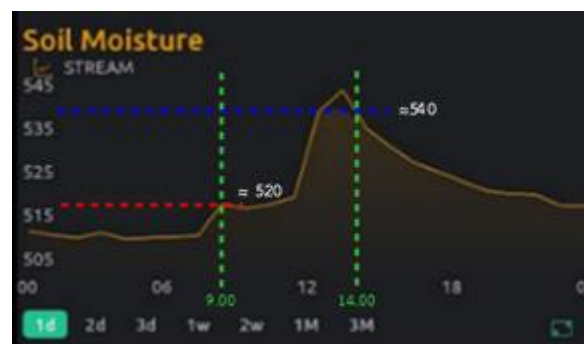
ใน 1 แปลงใหญ่ขนาด 1 ไร่ จะมีต้นกุหลาบ 700 - 1,000 ต้น หากใช้คนงานจะใช้เวลา 1 ชั่วโมง (60 นาที) การรดน้ำ โดยจะใช้เวลารดน้ำต้นละ 3-5 วินาที วิธีการรดน้ำคือ จะใช้สายยางต่อหัวฝักบัวแล้วรดบริเวณ โคนต้นกุหลาบ เพื่อไม่ให้ดอกกุหลาบเสียหาย ซึ่งโดยปกติก่อนดำเนินการวิจัย จะจ้างคนงาน 300-400 บาท/วัน/คน ใช้เวลาในการรดน้ำ 2 นาที ต่อพื้นที่ต้นกุหลาบ 45 ต้น โดยจะมีสูตรในการคำนวณดังนี้ กำหนดให้  $T_e$  = เวลาในการรดน้ำโดยคนงานปกติ  $N_e$  = จำนวนต้นกุหลาบที่ใช้ในการทดลอง  $T_r$  = เวลาที่ใช้ ในการรดน้ำต่อ 1 ไร่ และ  $N_r$  = จำนวนต้นกุหลาบต่อ 1 ไร่ และจะได้สูตรการคำนวณ ดังแสดงในสมการที่ (1)

$$T_e = N_e \times \left( \frac{T_r}{N_r} \right) \quad (1)$$

ในการคำนวณจากข้อมูลที่ได้รับมาจากการสัมภาษณ์ สามารถแทนค่าเพื่อคำนวณเวลาที่ในการรดน้ำโดยคนงานตามปกติ เพื่อใช้เปรียบเทียบกับเวลาที่ใช้งาน โดยระบบที่คณะผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้น ดังนี้  $N_e = 45$  ต้น,  $T_r = 60$  นาที และ  $N_r = 700$  ต้น จะได้เวลาเป็น 3.85 นาที และเมื่อนำเวลาที่ระบบใช้ในการรดน้ำ (2 นาที) มาคำนวณเปรียบเทียบจะเห็นได้ว่า การรดน้ำโดยใช้ระบบ จะใช้น้ำน้อยกว่า คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้  $(2/3.85) \times 100 = 52\%$  ซึ่งเวลาที่ใช้ในการให้น้ำและยาฆ่าแมลง โดยคนงานปกติ จะใช้เวลา ประมาณ 1 ชั่วโมงต่อ 1 ไร่เช่นกัน ดังนั้น เนื่องจากทุกกิจกรรม คนงานใช้เวลาในการดำเนินกิจกรรม ทุกกิจกรรม มีระยะเวลาใกล้เคียงกัน ดังนั้นคณะผู้วิจัย จึงสรุปได้ว่า ระบบสามารถประหยัดเวลา จากการ ดำเนินกิจกรรม โดยคนงานปกติ ลดลงได้ประมาณ 52%



รูปที่ 15 ตำแหน่งการติดตั้งเซนเซอร์วัดความชื้นในดิน



รูปที่ 16 ค่าความชื้นในดินในแต่ละช่วงเวลา

ในการวิจัยครั้งนี้ ทางคณะผู้วิจัยไม่ได้นำค่าความชื้นในดินมา ใช้เป็นเงื่อนไขในการทดลอง เนื่องจากค่าความชื้นที่วัดได้มีค่าไม่เสถียร และไม่ได้มีการสอบเทียบตัวเซนเซอร์ก่อนนำมาทดลอง ซึ่งในการทดลอง คณะผู้วิจัยใช้ตัวเซนเซอร์วัดความชื้นในดินเพียงตัวเดียว สำหรับทั้งแปลงปลูก 45 ต้น ติดตั้งไว้ตรงข้างกระถาง ส่วนหัวรดน้ำและปุ๋ย ติดตั้งไว้ตำแหน่งตรงกันข้าม ดังรูปที่ 15 จากกราฟความชื้นในดิน ในรูปที่ 16 เห็นได้ว่า เมื่อทำการรดน้ำ ในเวลา 9.00 น. ค่าความชื้นในดิน จะยังไม่ขึ้น ในทันที เนื่องจากความชื้นจะใช้เวลาแพร่ มายังบริเวณเซนเซอร์ ดังนั้น ในการพัฒนาระบบครั้งต่อไป คณะผู้วิจัยจะนำข้อมูลเวลาและความชื้นเฉลี่ยรายชั่วโมงมาใช้เป็นเงื่อนไขในการรดน้ำ ตามรูปที่ 16 ดังนี้ 1) ช่วงเวลา 9.00 และความชื้นมีค่าน้อยกว่า  $520+5\%$  2) ช่วงเวลา 14.00 และความชื้นมีค่าน้อยกว่า  $540+5\%$  โดยสามารถเขียนรหัสเทียม (Pseudo Code) ได้ดังรูปที่ 17



```

1  #define firstWateringTime 09:00
2  #define secondWateringTime 14:00
3  #define firstMoistureThreshold 520
4  #define secondMoistureThreshold 540
5  #define adjustThreshold 1.05
6
7  roseGardenWateringDecision()
8  BEGIN
9      soil_moisture = get_average_soil_moisture_in_one_hour()
10     time = currentTime()
11     IF time == firstWateringTime
12     IF soil_moisture < firstMoistureThreshold * adjustThreshold
13         water_relay_valve = "ON"
14     ELSE
15         water_relay_valve = "OFF"
16     ELSE IF time == secondWateringTime
17     IF soil_moisture < secondMoistureThreshold * adjustThreshold
18         water_relay_valve = "ON"
19     ELSE
20         water_relay_valve = "OFF"
21     END IF
22 END

```

รูปที่ 17 รหัสเทียมเงื่อนไขในการทำงานของระบบ

ในการทดลองคณะผู้วิจัยได้ทำการทดลองระบบเป็นระยะเวลา 1 เดือน ระหว่างช่วงเดือน สิงหาคม 2565 โดยความสูงของต้นกุหลาบที่ใช้ในการทดลองจะมีความสูงระหว่าง 30-50 ซม ซึ่งเป็นต้นกล้ากุหลาบที่ถูกติดตามแล้ว (ต่อจะเป็นกุหลาบป่าและตาจะเป็นของกุหลาบพันธุ์) แต่คณะผู้ทดลองไม่ได้วัดความสูงของต้นกุหลาบเมื่อผ่านไปแล้ว 1 เดือน ส่วนจำนวนดอกต้นกุหลาบจะยังไม่ออกดอก โดยจะใช้เวลา 4-5 เดือนหลังจากติดตามถึงจะออกดอก ในการทดลองในอนาคต ทางคณะผู้วิจัยจะทำการขยายระยะเวลาในการทดลอง เพื่อทำการวัดการเจริญเติบโตของต้นกุหลาบ สำหรับใช้ในการวัดประสิทธิภาพของระบบต่อไป โดยเทียบกับการรดน้ำโดยคนงาน รวมถึงทำการสอบเทียบเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นในดิน กับเทอร์โมมิเตอร์และอุปกรณ์วัดความชื้นในดินที่มีมาตรฐานกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องต่อไป

ในการคำนวณหาจุดคุ้มทุน ค่าอุปกรณ์ในการทดลอง ซึ่งประกอบไปด้วย บิมน้ำขนาด 370 วัตต์ (3,000 บาท) ถังน้ำขนาด 200 ลิตร จำนวน 3 ถัง ท่อพีวีซี 12 เมตร ท่อพีวี 13.5 เมตร วงจรควบคุม หัวเจาะและสายไมโคร ราคารวมประมาณ 10,000 บาท สามารถใช้รดน้ำได้ 2 แปลง (90ต้น) เนื่องจากการดูแลพื้นที่ 2 แปลงต้องใช้ค่าแรงคนงานต่อวันอยู่ที่ 106.67 ต่อวัน ดังนั้นจะต้องใช้เวลา  $10000/106.67 = 93.75$  วันจึงจะคุ้มทุน

ค่าแรงคนงาน 106.67 บาทต่อวัน สามารถคำนวณได้จาก ค่าแรงคนงานต่อวันจำนวน 6 คน คนละ 400บาทต่อวันทำงานในพื้นที่สวนกุหลาบขนาด 3 ไร่ ( 1 ไร่ 700ต้น/45ต้น

ต่อแปลง จะได้ 15 แปลงต่อ 1 ไร่) จะสามารถคำนวณค่าแรงคนงานต่อ 2 แปลงต่อวันได้ดังนี้  $((6 \text{ คน} \times 400 \text{ บาท}) / (3 \text{ ไร่} \times 15 \text{ แปลงต่อไร่})) \times 2 \text{ แปลง} = (2400/45) \times 2 = 106.67$  บาทต่อวัน

#### 4. บทสรุป

จากผลการทดลอง ระบบที่คณะผู้วิจัยได้ออกแบบ และพัฒนาขึ้นมา สามารถจัดการการให้น้ำ ใส่ปุ๋ย และพ่นยาฆ่าแมลงสำหรับแปลงกุหลาบได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพถูกต้องตามเวลาที่กำหนดไว้ผ่านโปรแกรม บล็อก ไอโอที แอปพลิเคชันบนสมาร์ตโฟน รวมไปถึงระบบมีความสามารถในการวัด บันทึก และแสดง อุณหภูมิและความชื้นของสวนกุหลาบได้ จากการทดลอง ระบบสามารถลดเวลาในการทำงานเมื่อเทียบกับการใช้แรงงานคนปกติ ได้ถึง 52% และจากการคำนวณการใช้งานระบบนี้ จะมีจุดคุ้มทุนภายในระยะเวลา 94 วัน อย่างไรก็ตาม สำหรับการวัดความชื้นในดินของแปลงกุหลาบนั้น คณะผู้วิจัยวิเคราะห์ว่าเนื่องจากอุปกรณ์วัดค่าความชื้นในดินที่ใช้ อาจจะมีประสิทธิภาพไม่ดีและอุปกรณ์ไม่นำไปสอบเทียบมาตรฐานก่อนนำมาทดลองในการวัดค่าความชื้นในดิน ซึ่งควรที่จะพิจารณาใช้อุปกรณ์ประเภทอื่นหรือทำการสอบเทียบมาตรฐานของอุปกรณ์ เพื่อใช้วัดความชื้นในดินสำหรับปลูกกุหลาบในโอกาสต่อไป นอกจากนี้ในอนาคตควรที่จะเพิ่มเงื่อนไขสำหรับการรดน้ำในกรณีที่ฝนตกซึ่งทำให้ไม่มีความจำเป็นต้องรดน้ำในวันดังกล่าวตามรหัสเทียม ดังรูปที่ 17 จากการวิจัยครั้งนี้ ความรู้ใหม่และการเรียนรู้ที่คณะผู้วิจัยได้รับคือ เกษตรกรสามารถประยุกต์ใช้ระบบอินเทอร์เน็ตในทุกสรรพสิ่ง (Internet of Things) สำหรับการรดน้ำ ใส่ปุ๋ยและพ่นยาฆ่าแมลงในสวนกุหลาบได้เป็นอย่างดี โดยสามารถลดระยะเวลาการใช้แรงงานคนได้อย่างมีนัยยะสำคัญและมีจุดคุ้มทุนในระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับผู้สนใจสามารถศึกษาโปรแกรมเพิ่มเติมได้จาก <https://github.com/RosinanteX/Project>

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณครอบครัว ผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่าน และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ที่มีส่วนสนับสนุนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงด้วยดี



## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Alarabi A, Wang J, Wang D, Yua Qi, Gaoa Sh, Jiao S, Zhang Y, Taban J, Abdellah A, Zhao X, Liuc Li. Effect of temperature on the transmission loss of large-core optical fiber. Optoelectronics and Advanced Materials -Rapid Communications. 2018 May 1;12 (5-6):258-63.
- [2] Sutthiwaree P, Kitirat K, Chompoo P, Khaehanchanpong Y, Wanarong K, Siripong K, Seela T. Canopy wide semi-Auto fertilizer spreader applicator for durian. Thai Agricultural Research Journal. 2022; 40(2): 200-212. Thai.
- [3] Seeod K, Wongsom T, Sonachai W, Wangngon B, Jittham V, Hanvongsa S. Development of automated plant nutrient control systems by arduino program. Journal of Innovative Technology Research. 2019; 3(1): 27-32. Thai.
- [4] Sawasdee V, Haosagul S, Pisutpaisal N. Smart agriculture system for paddy field environmentally friendly management. The Journal of Industrial Technology. 2022 Aug 16;18(2):217-29.Thai.
- [5] Ardarsa P, Apinantanakon W, Srichaiwong P, Chansanam W. Development of smart agricultural technology for tilapia farming by using the internet of things. Journal of MCU Ubon Review. 2021; 6(3): 531-543. Thai.
- [6] Bophimai U, Lonkunthos N, Wannakayont A, Sittichantasen T. Development of organic intelligent technology system. Journal of MCU Nakhondhat. 2020 Nov 30;7(11):63-78.
- [7] Kanya P, Seesman T, Jeamkoh K, Seekhamsaen P, Chaisongkhram P, Klaimanee P, et al. Smart agriculture system development. Industrial Technology Journal Surindra Rajabhat University. 2022; 7(1): 33-45. Thai.
- [8] Moolpho K. Automatic plant watering system based on NETPIE via smartphone. Engineering Transactions: A Research Publication of Mahanakorn University of Technology. 2020 Jun 29;23(1):58-66.
- [9] Pothong T, Mekarun P, Choosumrong S. Development of Smart Farming Service System for Smart Farmer using FOSS4G and IoT. Naresuan Agriculture Journal. 2019;16(2):10-7.





## การใช้กากมูลโคเป็นส่วนผสมคอนกรีตเพื่อเป็นแนวทางผลิตอิฐบล็อกประสาน

### Using Cow Feces as a Concrete Mix as a Guideline For the Production of Interlocking Bricks

ประชุม คำพุ่ม\*

<sup>1</sup> หน่วยงานวิจัยวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 39 หมู่ 1 ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12110

Prachoom Khamput\*

<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi 39 Moo 1, Rangsit-Nakorn Nayok Road, Khlong Hok, Khlong Luang, Pathum Thani, Thailand, 12110

\*ผู้รับผิดชอบบทความ: prachoom\_k@rmutt.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 08-1665-4755

Received: 25 October 2022, Revised: 11 March 2023, Accepted: 11 March 2023

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ใช้กากมูลโคของฟาร์มโคนมที่ได้จากเครื่องแยกกากไปตากแห้งแล้วเข้าเครื่องบดละเอียดขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 4 มาใช้เป็นส่วนผสมในคอนกรีตเพื่อเป็นแนวทางการผลิตอิฐบล็อกประสานสำหรับเป็นสินค้าชุมชน กำหนดส่วนผสมโดยปริมาตร คือ ปูนซีเมนต์ต่อทรายละเอียดเท่ากับ 1 : 7 แทนที่ทรายละเอียดด้วยกากมูลโคนม 0 0.5 1 1.5 2 2.5 3 3.5 4 4.5 และ 5 ส่วน ตามลำดับ ใช้ปริมาณน้ำเท่ากับ 350 มิลลิลิตร ผสมและขึ้นรูปเป็นก้อนตัวอย่างคอนกรีตขนาด 10 x 10 x 10 ซม. ทดสอบความชื้น การดูดซึมน้ำ และความหนาแน่น ที่อายุ 28 วัน ความต้านทานแรงอัดที่อายุ 7 14 21 และ 28 วัน พบว่าการผสมกากมูลโคมากขึ้นส่งผลให้ความต้านทานแรงอัดและความหนาแน่นมีแนวโน้มลดลง ปริมาณความชื้นและการดูดซึมน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เลือกอัตราส่วนที่เป็นไปได้นำไปขึ้นรูปเป็นอิฐบล็อกประสานขนาด 22.5 x 11.5 x 6 ซม. ทำการทดสอบความชื้น การดูดซึมน้ำ และความหนาแน่น ที่อายุ 28 วัน ความต้านทานแรงอัดที่อายุ 14 และ 28 วัน พบว่าอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทรายละเอียดต่อกากมูลโคเท่ากับ 1 : 6.5 : 0.5 มีสมบัติผ่านเกณฑ์มาตรฐาน มผช.602 สามารถนำไปใช้งานได้

**คำสำคัญ** กากมูลโค คอนกรีต ฟาร์มโคนม อิฐบล็อกประสาน

#### Abstract

This research aims to use cow feces from dairy farms as an aggregate of interlocking bricks. The cow feces were obtained from the separator process. The dry cow feces passing sieve No 4 were among the ingredients in concrete which serves as a guideline in producing interlocking bricks as community products. The mixture consisted of concrete and fine sand in a ratio of 1: 7 by volume. Fine sand has been replaced by 0, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5 and 5 parts of dairy waste, respectively. All the mixing used 350 ml of water. A concrete cube specimen was 10 x 10 x 10 cm in dimension. The moisture content, water absorption, and density were investigated at 28 days. The compression strength was studied at 7, 14, 21 and 28 days. The results showed that the compressive strength and density reduces with increasing cow feces. The moisture content and



absorption of the sample tend to increase. The interlocking bricks with size 22.5 x 11.5 x 6 cm were chosen from the concrete mix proportion as fine sand to cow feces waste equals 1: 6.5 : 0.5 The moisture content, water absorption and density of interlocking bricks were also investigated within 28 days. The interlocking brick is in accordance with TCPS 602, and can be used as building materials.

**Keywords:** Cow Feces, Concrete, Dairy Farm, Interlocking Bricks

## 1. บทนำ

ข้อมูลจากกรมปศุสัตว์ ในปี 2563 (ข้อมูล ณ มกราคม 63) ประเทศไทยมีจำนวนโคนมทั้งหมด 681,100 ตัว เป็นแม่โคนมจำนวน 312,800 ตัว มีน้ำนมดิบที่ผลิตได้ 3,547 ตันต่อวัน [1] โดยโคนม 1 ตัวถ่ายมูลประมาณ 6 กิโลกรัม (กก.) ต่อวัน (รูปที่ 1) ดังนั้นจะมีมูลโคทั่วประเทศประมาณ 4,000 ตันต่อวัน ราคาขายตันละ 600 บาท ส่วนมากนำไปทำเป็นปุ๋ยหรือเลี้ยงไส้เดือน จากปริมาณมูลโคที่มีอยู่เป็นจำนวนมาก หากทำการแยกกากออกแล้วจะมีความสะอาดและมีเส้นใยเป็นจำนวนมาก จึงสามารถนำไปเพิ่มมูลค่าได้อีกหลากหลาย เช่น ทำเป็นกระดาด ทำเป็นกระถางต้นไม้ที่ย่อยสลายได้ [2] เป็นต้น อีกทั้งยังมีความเป็นไปได้ที่จะนำไปเป็นเส้นใยธรรมชาติในการผสมผลิตภัณฑ์คอนกรีตที่มีต้นทุนต่ำสำหรับใช้ในพื้นที่ชุมชนที่มีอาชีพในการทำปศุสัตว์เลี้ยงโคนม



รูปที่ 1 กองมูลโคภายในฟาร์มโคนม จังหวัดสระบุรี

โดยงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาสูตรผสมกากมูลโคในคอนกรีตเพื่อเป็นแนวทางการผลิตอิฐบล็อกประสาน เนื่องจากอิฐบล็อกประสานมีความแข็งแรงสูงกว่าคอนกรีตบล็อก รูปทรงสวยงาม หลากหลาย มีกระบวนการผลิตที่ไม่ยุ่งยาก ต้นทุนต่ำ ใช้เครื่องจักรที่เหมาะสมสำหรับชุมชน ใช้พลังงานในการผลิตน้อย ชุมชนจึงมีศักยภาพในการ

ดำเนินงานและเป็นสินค้าสร้างรายได้ โดยการผลิตอิฐบล็อกประสานปกติทำได้โดยการนำปูนซีเมนต์ 1 ส่วน ผสมกับดินลูกรัง 5-7 ส่วน โดยน้ำหนัก ผสมกับน้ำให้เข้ากันในเครื่องผสมแบบกระทะ แล้วนำไปอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดอิฐบล็อกประสานซึ่งมีทั้งแบบมือโยกหรือเป็นแบบอัตโนมัติ นำก้อนอิฐบล็อกประสานออกจากเครื่องมาผึ่งในที่ร่มประมาณ 14 วันก็นำไปจำหน่ายได้ จุดเด่นของอิฐบล็อกประสาน คือ สามารถใช้วัสดุเหลือทิ้งมาเป็นส่วนผสมเพื่อเสริมแรงหรือลดต้นทุนในการผลิตได้ ทั้งวัสดุเหลือทิ้งจากภาคอุตสาหกรรมจำพวกขี้เถ้าเหลือทิ้งต่าง ๆ [3-4] หรือเศษหินฝุ่นที่เหลือทิ้งจากเหมืองแร่ต่าง ๆ ทั่วประเทศ [5-12] ซึ่งผลจากการวิจัยพบว่าส่วนผสมที่พอเหมาะจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความแข็งแรงและผ่านมาตรฐาน มพข.602-2547 เรื่องอิฐบล็อกประสาน [13] ส่วนผสมจากภาคเกษตรนั้นยังไม่มีงานวิจัยเท่าใดนัก โดยอิฐบล็อกประสานที่ผสมเส้นใยธรรมชาติจะช่วยในเรื่องของการรับแรงดึง แรงดัด และช่วยในเรื่องของการลดการแตกร้าวที่ผิวหน้า เช่นอิฐบล็อกประสานที่ผสมแกนกล้วย [14] และอิฐบล็อกประสานที่ผสมเศษก้านใบยาสูบเป็นต้น [15] ดังนั้นการนำกากมูลโคมาทำการผสมกับวัสดุหลักในการผลิตอิฐบล็อกประสานจึงมีความเป็นไปได้ภายใต้แนวคิดระบบเศรษฐกิจหมุนเวียน หรือ Circular economy ที่ได้รับความนิยมในปัจจุบันอย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

## 2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

### 2.1 วัสดุและอุปกรณ์

วัสดุและอุปกรณ์ในการดำเนินงานประกอบด้วย

1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 จากร้านค้าวัสดุก่อสร้างทั่วไป ตามมาตรฐาน มอก.15-2555 เรื่องปูนซีเมนต์เล่ม 1 ข้อกำหนดเกณฑ์คุณภาพ [16]

2) ทรายละเอียด จากร้านจำหน่ายวัสดุก่อสร้างทั่วไป ตามมาตรฐาน มอก.566-2562 เรืองมวลรวมผสมคอนกรีต [17] (ที่ใช้ทรายละเอียดเนื่องจากหาได้ง่ายและต้องการสีของผลิตภัณฑ์ใกล้เคียงกับกากมูลโค) มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.56

3) กากมูลโคนมแห้ง ขององค์การส่งเสริมกิจการโคนมแห่งประเทศไทย (อ.ส.ค.) ที่ได้จากการใช้เทคโนโลยีเครื่องแยกกากมีความชื้นร้อยละ 45 (วิธีการคำนวณความชื้นโดยนำกากมูลโคมาอบให้แห้ง แล้วเปรียบเทียบน้ำหนักที่หายไปหลังการอบจากน้ำหนักเริ่มต้น คำนวณเป็นร้อยละ) นำกากมูลโคมาอบให้แห้งจนกระทั่งไม่เหลือความชื้น แล้วทำการบดย่อยผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (รูปที่ 2) มีค่าความถ่วงจำเพาะ 0.35-0.5



รูปที่ 2 กากมูลโคอบแห้งแล้วบดย่อยผ่านตะแกรงเบอร์ 4



รูปที่ 3 เครื่องบดย่อยกากมูลโคพร้อมตะแกรงคัดขนาด

4) น้ำประปา

5) เครื่องบดย่อยกากมูลโคพร้อมตะแกรงคัดขนาด (รูปที่ 3)

6) เครื่องชั่งน้ำหนัก

7) เครื่องผสมคอนกรีต

8) แบบหล่อคอนกรีตทรงลูกบาศก์แบบด้ามมือ 10 x 10 x 10 ซม. (ซึ่งจะมีตัวแปรใกล้เคียงกับอิฐบล็อกประสานมากที่สุด) (รูปที่ 4)

9) เครื่องอัดอิฐบล็อกประสานแบบมือโยกพร้อมติดตั้งแบบหล่อ ขนาด 22.5 x 11.5 x 6 ซม. (รูปที่ 5)

10) อุปกรณ์ทดสอบความหนาแน่น และการดูดซึมน้ำ

11) เครื่องทดสอบแรงกด (UTM)



รูปที่ 4 แบบหล่อคอนกรีตทรงลูกบาศก์แบบด้ามมือ ขนาด 10 x 10 x 10 ซม.



รูปที่ 5 เครื่องอัดอิฐบล็อกประสานแบบมือโยกพร้อมติดตั้งแบบหล่อขนาด 22.5 x 11.5 x 6 ซม.



## 2.2. วิธีการดำเนินงาน

### 2.2.1 การกำหนดส่วนผสมเบื้องต้น

ทำการกำหนดส่วนผสมโดยปริมาตรเพื่อทดสอบสมบัติเบื้องต้นของก้อนตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ เริ่มจากการใช้อัตราส่วนควบคุม คือ ปูนซีเมนต์ต่อทรายละเอียดเท่ากับ 1 : 7 จากนั้นใช้กากมูลโคแทนที่ทรายละเอียดครั้งละ 0.5 ตามลำดับ จนกระทั่งขึ้นรูปไม่ได้จึงหยุด โดยทุกอัตราส่วนใช้ปริมาณน้ำเท่ากับ 350 มิลลิลิตร รายละเอียดส่วนผสมแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ส่วนผสมโดยปริมาตรของก้อนตัวอย่างคอนกรีตทดสอบ

สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์	ทรายละเอียด	กากมูลโค
CD0	1	7	0
CD0.5	1	6.5	0.5
CD1	1	6	1
CD1.5	1	5.5	1.5
CD2	1	5	2
CD2.5	1	4.5	2.5
CD3	1	4	3
CD3.5	1	3.5	3.5
CD4	1	3	4
CD4.5	1	2.5	4.5
CD5	1	2	5

หมายเหตุ ทุกอัตราส่วนใช้ปริมาณน้ำเท่ากับ 350 มิลลิลิตร

### 2.2.2 การขึ้นรูปตัวอย่างและการทดสอบ

การขึ้นรูปก้อนตัวอย่างแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนด้วยกัน คือ ขั้นตอนที่ 1 ขึ้นรูปตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด  $10 \times 10 \times 10$  ซม. เพื่อทดสอบความต้านทานแรงอัดตามมาตรฐาน BS 1881 Pat 108 [18] และการดูดซึมน้ำ ตามมาตรฐาน มอก.109-2517 [19] ของส่วนผสมคอนกรีตในตารางที่ 1 และ ขั้นตอนที่ 2 เลือกตัวอย่างที่ดีที่สุดในขั้นตอนที่ 1 มาทำการขึ้นรูปตัวอย่างอิฐบล็อกประสานขนาดขนาด  $22.5 \times 11.5 \times 6$  ซม. เพื่อทดสอบตามมาตรฐาน มผช.602-2547 เรื่องอิฐบล็อกประสาน [13] โดยการขึ้นรูปตัวอย่างของขั้นตอนที่ 1 และ 2 มีวิธีการดำเนินงานเริ่มจากการตวงส่วนผสมประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ ทรายละเอียด กากมูลโค และน้ำ (รูปที่ 6) ตามสัดส่วนในตารางที่ 1 แล้วนำมาผสมคลุกเคล้าให้เข้ากัน จากนั้นนำส่วนผสมเทลงแบบหล่อ กรณี

ขั้นตอนที่ 1 แบบหล่อทรงลูกบาศก์ขนาด  $10 \times 10 \times 10$  ซม. ทำการอัดกระทุ้งส่วนผสมให้แน่นจำนวน 3 ชั้น ชั้นละ 15 ครั้งและเกลี่ยหน้าให้เรียบโดยเกรียงขัดมัน (รูปที่ 7) ทำการถอดแบบนำก้อนตัวอย่างคอนกรีตออกจากแบบหล่อแม่พิมพ์ (รูปที่ 8) จากนั้นนำไปบ่มในที่ร่มตามระยะเวลาที่กำหนดทดสอบ (รูปที่ 9) กรณีขั้นตอนที่ 2 ตัวอย่างอิฐบล็อกประสานขนาดขนาด  $22.5 \times 11.5 \times 6$  ซม. ให้ทำการอัดส่วนผสมลงในแบบของเครื่องอัดอิฐประสาน (รูปที่ 10) หลังจากอัดลงในแบบหล่อจนแน่นดีแล้วทำการถอดแบบนำก้อนตัวอย่างออกจากแบบ แล้วนำไปบ่มในที่ร่มตามเวลาทดสอบ (รูปที่ 11)

วิธีการทดสอบค่าความชื้น การดูดซึมน้ำ และความหนาแน่น ทำโดยการวัดปริมาตรก้อนตัวอย่าง ซึ่งน้ำหนักปกติ ซึ่งน้ำหนักหลังแช่น้ำ และซึ่งน้ำหนักหลังอบแห้ง โดยวิธีการคำนวณค่าความหนาแน่นให้นำมวลของก้อนตัวอย่างหารด้วยปริมาตร ค่าความชื้นให้นำน้ำหนักปกติหารด้วยน้ำหนักหลังอบแห้ง และค่าการดูดซึมน้ำให้นำน้ำหนักหลังแช่น้ำลบออกด้วยน้ำหนักหลังอบแห้งแล้วหารด้วยน้ำหนักหลังอบแห้ง เมื่อทำการคูณด้วยร้อยจะได้ค่าเป็นร้อยละ ส่วนการคำนวณค่าความต้านทานแรงอัดทำได้โดยนำแรงอัดสูงสุดที่กระทำหารด้วยพื้นที่หน้าตัดที่รับแรง

การทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกเป็นการทดสอบก้อนตัวอย่างคอนกรีตผสมกากมูลโคทรงลูกบาศก์ขนาด  $10 \times 10 \times 10$  ซม. ทำการทดสอบการดูดซึมน้ำ ความหนาแน่น ที่อายุ 28 วัน ตามมาตรฐาน มอก.109-2517 และความต้านทานแรงอัดที่อายุ 7 14 21 และ 28 วัน ตามมาตรฐาน BS 1881 Pat 108 (รูปที่ 12) เพื่อเลือกอัตราส่วนในช่วงที่ดีที่สุด 4 อัตราส่วน มาทำการทดสอบในขั้นตอนที่ 2 เป็นการทดสอบก้อนตัวอย่างอิฐบล็อกประสานผสมกากมูลโคขนาด  $22.5 \times 11.5 \times 6$  ซม. ประกอบด้วย การดูดซึมน้ำ ความหนาแน่น ที่อายุ 28 วัน และความต้านทานแรงอัดที่อายุ 14 และ 28 วัน ตามมาตรฐาน มผช.602-2547 เรื่องอิฐบล็อกประสาน (รูปที่ 13)

ซึ่งทุกการทดสอบแต่ละคุณสมบัติใช้ตัวอย่างทดสอบจำนวน 10 ตัวอย่าง และกำหนดให้ผลการทดสอบโดยเฉลี่ยมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D) ไม่เกิน 0.50

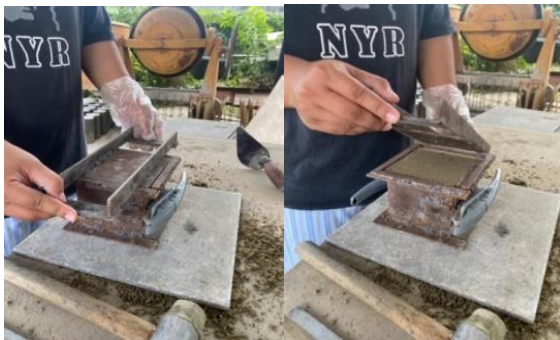




รูปที่ 6 มวลโคแห้ง ปูนซีเมนต์ และทรายละเอียด ตามลำดับ



รูปที่ 7 อัดส่วนผสมลงในแบบหล่อ ขนาด  $10 \times 10 \times 10$  ซม.



รูปที่ 8 ถอดแบบนำก้อนตัวอย่างออกจากแม่พิมพ์



รูปที่ 9 นำก้อนตัวอย่างไปผึ่งในที่อากาศปกติเตรียมทดสอบ



รูปที่ 10 การอัดส่วนผสมลงในแบบอิฐบล็อกประสาน



รูปที่ 11 การถอดแบบอิฐบล็อกประสานและบ่มในอากาศ



รูปที่ 12 ทดสอบความต้านทานแรงอัดของก้อนตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์



รูปที่ 13 ทดสอบความต้านทานแรงอัดของก้อนตัวอย่างอิฐบล็อกประสาน

### 3. ผลการวิจัยและอภิปราย

ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 1 ก้อนตัวอย่างคอนกรีตผสมกากมูลโคทรงลูกบาศก์ขนาด  $10 \times 10 \times 10$  ซม. ประกอบด้วย ปริมาณความชื้น การดูดซึมน้ำ และความหนาแน่น ที่อายุ 28 วัน ดังตารางที่ 2 และความต้านทานแรงอัดที่อายุ 7, 14, 21 และ 28 วัน ดังรูปที่ 14

ผลการทดสอบขั้นตอนที่ 2 ก้อนตัวอย่างอิฐบล็อกประสานผสมกากมูลโคขนาด  $22.5 \times 11.5 \times 6$  ซม.



ประกอบด้วย ปริมาณความชื้น การดูดซึมน้ำ และความหนาแน่น ที่อายุ 28 วัน ดังตารางที่ 3 และความต้านทานแรงอัดที่อายุ 14 และ 28 วัน ดังรูปที่ 15

3.1 ปริมาณความชื้น การดูดซึมน้ำ และความหนาแน่น ของคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด  $10 \times 10 \times 10$  ซม.

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบความหนาแน่น ปริมาณความชื้น และการดูดซึมน้ำ ของคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด  $10 \times 10 \times 10$  ซม. ที่อายุ 28 วัน

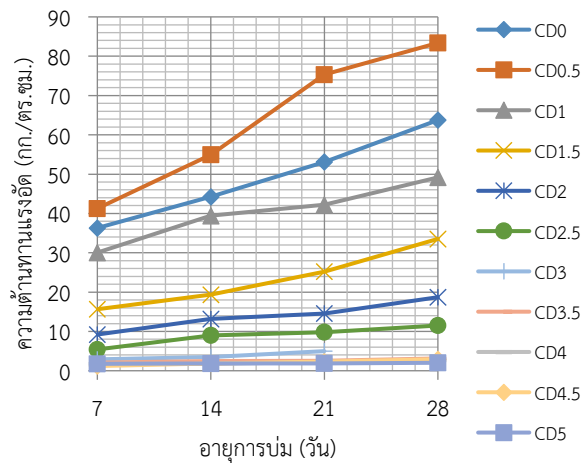
สัญลักษณ์	ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)	ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)
CD0	1.34	28.28	1596.07
CD0.5	1.44	29.05	1845.87
CD1	1.52	23.49	1632.57
CD1.5	1.16	27.12	1526.77
CD2	1.36	29.48	1484.52
CD2.5	2.50	33.51	1399.12
CD3	3.37	38.19	1292.37
CD3.5	5.11	46.03	1228.2
CD4	6.43	54.68	1139.17
CD4.5	7.09	51.67	1132.13
CD5	12.51	55.50	952.17

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบความชื้น การดูดซึมน้ำ และความหนาแน่น ที่อายุ 28 วัน ของก้อนตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด  $10 \times 10 \times 10$  ซม. ผสมกากมูลโคแทนที่ทรายละเอียดด้วยกากมูลโค 0 0.5 1 1.5 2 2.5 3 3.5 4 4.5 และ 5 ส่วน โดยปริมาตรตามลำดับ พบว่าเมื่อผสมกากมูลโคหนึ่งในก้อนตัวอย่างคอนกรีตในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้ปริมาณความชื้น การดูดซึมน้ำ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากกากมูลโคเป็นวัสดุชีวภาพมีเส้นใยพืชจำนวนมากจึงดูดซึมน้ำและความชื้นได้ดีกว่ามวลรวมปกติซึ่งเป็นทราย [14-15] ดังนั้นเมื่อผสมกากมูลโคในคอนกรีตในปริมาณที่มากและเมื่อคอนกรีตสัมผัสกับความชื้นหรือแช่น้ำโดยตรงจึงส่งผลให้ก้อนตัวอย่างคอนกรีตมีค่าร้อยละความชื้นและการดูดซึมน้ำสูงมากขึ้นตามไปด้วย ในทางกลับกันความหนาแน่นมีค่าลดลงตามลำดับเนื่องจากกากมูลโคมีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าหรือมีน้ำหนักเบากว่ามวลรวมปกติคือทราย จึงทำให้ก้อนตัวอย่างคอนกรีตมีความหนาแน่น

ลดลง มีน้ำหนักที่เบาลง ยกเว้นอัตราส่วน CD0.5 และ CD1 ที่ผสมกากมูลโคในปริมาณที่ไม่มากมีค่าความหนาแน่นสูงกว่าอัตราส่วน CD0 ที่ไม่ผสมกากมูลโค เนื่องจากเป็นอัตราส่วนพอเหมาะที่ปริมาณกากมูลโคสามารถเข้าไปแทรกในเนื้อของก้อนตัวอย่างคอนกรีตได้ดี ซึ่งสอดคล้องกับค่าความต้านทานแรงอัดที่สูงมากขึ้นเช่นเดียวกัน ทั้งนี้เมื่อพิจารณาจากค่าความหนาแน่นที่ได้อัตราส่วน CD1.5-CD5 ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 1526.77 - 952.17 กก./ลบ.ม. พบว่าอยู่ในช่วงของคอนกรีตมวลเบาตามมาตรฐาน มอก. 2601-2556 เรื่องผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ [20] จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำไปพัฒนาต่อเป็นคอนกรีตมวลเบาได้อีกด้วย

3.2 ความต้านทานแรงอัดของคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด  $10 \times 10 \times 10$  ซม.

รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงอัดและอายุการบ่มของก้อนตัวอย่างคอนกรีต ขนาด  $10 \times 10 \times 10$  ซม. ที่อัตราส่วนต่าง ๆ พบว่าเมื่ออายุการบ่มเพิ่มมากขึ้นค่าความต้านทานแรงอัดจะมีค่าสูงขึ้นตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำจะสามารถรับกำลังได้เต็มที่เมื่ออายุ 28 วัน [21] และเมื่อผสมกากมูลโคในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อผสมในปริมาณที่น้อยและจะลดลงตามลำดับเมื่อผสมในปริมาณที่มากขึ้น โดยพบว่าในช่วงการแทนที่ทรายด้วยกากมูลโค 0.5 มีค่าความต้านทานแรงอัดสูงกว่าการอัตราส่วนปกติที่ไม่ผสมกากมูลโค (ผสมทรายทั้งหมด) เนื่องจากกากมูลโคช่วยให้ขนาดคละของมวลรวมดีขึ้นและกากมูลโคเป็นเส้นใยที่ช่วยยึดเหนี่ยวเนื้อคอนกรีตได้ดี แต่เมื่อผสมกากมูลโคในปริมาณที่มากเกินไปนั้นก้อนตัวอย่างคอนกรีตจะรับแรงได้ลดลงจนไม่สามารถรับแรงได้ สอดคล้องกับงานวิจัยที่ใช้วัสดุชีวภาพในการผสมเป็นมวลรวมบางส่วนในคอนกรีต [14-15, 22-23] ซึ่งปริมาณกากมูลโคที่มีความเป็นไปได้ในการนำไปทดลองขึ้นรูปเป็นอิฐบล็อกประสานในขั้นตอนต่อไป คือ ปริมาณการแทนที่ทรายด้วยกากมูลโค 0.5 ส่วน



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงอัดและอายุการบ่มของก้อนตัวอย่างคอนกรีตที่อัตราส่วนต่าง ๆ

3.3 ปริมาณความชื้น การดูดซึมน้ำ ความหนาแน่น และความต้านทานแรงอัดของอิฐบล็อกประสานขนาด 22.5 x 11.5 x 6 ซม.

จากผลการทดสอบในขั้นตอนแรก สามารถเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสม 3 อัตราส่วน มาขึ้นรูปเป็นอิฐบล็อกประสาน ได้ผลการทดสอบดังต่อไปนี้

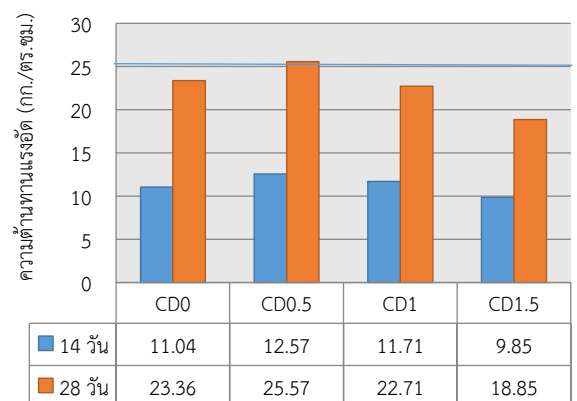
ตารางที่ 3 ปริมาณความชื้น การดูดซึมน้ำ และความหนาแน่น ที่อายุ 28 วัน ก้อนตัวอย่างอิฐบล็อกประสานผสมกาบมูลโค ขนาด 22.5 x 11.5 x 6 ซม. พบว่าปริมาณความชื้น การดูดซึมน้ำ และความหนาแน่นเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับก้อนตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 10 x 10 x 10 ซม. (ตารางที่ 2) โดยปริมาณความชื้นและการดูดซึมน้ำของก้อนตัวอย่างอิฐบล็อกประสานผสมกาบมูลโคจะต่ำกว่าก้อนตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ผสมกาบมูลโค เนื่องจากการอัดอิฐบล็อกประสานด้วยเครื่องอัดทำให้เนื้อคอนกรีตมีความแน่นมากกว่าการอัดขึ้นรูปด้วยมือ ซึ่งแสดงให้เห็นชัดเจนในส่วนของค่าความหนาแน่นของตัวอย่างอิฐบล็อกประสานสูงกว่าตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์เช่นเดียวกันในทุกอัตราส่วน

รูปที่ 15 ผลการทดสอบความต้านทานแรงอัดของตัวอย่างอิฐบล็อกประสานขนาด 22.5 x 11.5 x 6 ซม. ที่อายุ 14 และ 28 วัน โดยแทนที่ทรายด้วยกาบมูลโคเท่ากับ 0, 0.5, 1 และ 1.5 ส่วน โดยปริมาตร ตามลำดับ และใช้ปริมาณน้ำเท่ากับ 350 มิลลิลิตร เท่ากันในทุกอัตราส่วน พบว่าเมื่ออายุการบ่มเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงอัดมากขึ้น

ตามไปด้วย [21] การผสมกาบมูลโคแทนที่ทรายในปริมาณ 0.5 ส่วน (CD0.5) ทำให้ความต้านทานแรงอัดมีค่าสูงกว่าอิฐบล็อกประสานที่ไม่ผสมกาบมูลโค (CD0) เนื่องจากตัวอย่างมีเนื้อแน่นมากกว่าจากการที่มีเส้นใยจากกาบมูลโคเป็นส่วนผสมในปริมาณที่เหมาะสม และเมื่อผสมกาบมูลโคในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้ความต้านทานแรงอัดมีแนวโน้มลดลงตามลำดับ เนื่องจากปริมาณเส้นใยของกาบมูลโคมีปริมาณมากเกินไปจนทำให้ความสามารถในการยึดเกาะตัวของเนื้อคอนกรีตลดลง มีช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่าความหนาแน่นของตัวอย่างอิฐบล็อกประสานที่ลดลงตามลำดับ ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับงานวิจัยที่ใช้เส้นใยธรรมชาติในการผสมคอนกรีต [22-24] อีกทั้งการผสมกาบมูลโคในปริมาณที่มากขึ้นในขณะที่ปริมาณน้ำยังเท่าเดิมนั้น ทำให้เส้นใยของกาบมูลโคไปดูดซึมน้ำจากซีเมนต์เพสต์ส่งผลให้ปริมาณน้ำในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง ความต้านทานแรงอัดจึงลดลง เช่นเดียวกับงานวิจัยที่ผ่านมาที่ใช้เส้นใยธรรมชาติผสมในคอนกรีต [25-27] ดังที่กล่าวมาแล้ว

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบปริมาณความชื้น การดูดซึมน้ำ และความหนาแน่น ของอิฐบล็อกประสานขนาด 22.5 x 11.5 x 6 ซม. ที่อายุ 28 วัน

สัญลักษณ์	ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)	ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)
CD0	0.67	8.484	1915.28
CD0.5	0.72	8.715	2215.04
CD1	0.76	7.047	1959.08
CD1.5	0.58	8.136	1832.12



รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงอัดและอายุการบ่มของอิฐบล็อกประสาน อายุ 14 และ 28 วัน ที่อัตราส่วนต่าง ๆ





ในงานวิจัยครั้งนี้ได้ทำการทดสอบเปรียบเทียบกับมาตรฐานอิฐบล็อกประสาน มผช.602-2547 ชนิดไม่รับน้ำหนัก (ซึ่งไม่ต้องนำค่าการดัดกลืนน้ำมาพิจารณา) โดยกำหนดค่าความต้านทานแรงอัดเฉลี่ยจาก 5 ตัวอย่าง ต้องไม่น้อยกว่า 2.5 เมกะปาสกาล (25.49 กก./ตร.ซม.) นั้น พบว่ามีเพียงอัตราส่วน CD0.5 เท่านั้นที่สามารถผ่านเกณฑ์มาตรฐานคือ เป็นส่วนผสมโดยปริมาตรใช้ปูนซีเมนต์ 1 ส่วน ทรายละเอียด 6.5 ส่วน กากมูลโค 1.5 ส่วน และน้ำ 350 มิลลิลิตร สามารถใช้เป็นแนวทางในการผลิตอิฐบล็อกประสานผสมกากมูลโคต่อไป

#### 4. บทสรุป

การใช้กากมูลโคเป็นส่วนผสมคอนกรีตเพื่อเป็นแนวทางผลิตอิฐบล็อกประสาน มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการหาปริมาณที่เหมาะสมของกากมูลโคที่ผ่านกระบวนการแยกกากแล้วจากโรงงาน สำหรับใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตอิฐบล็อกประสาน โดยทำการออกแบบการวิจัยเป็น 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกกำหนดส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทรายละเอียดเท่ากับ 1 : 7 ส่วน โดยปริมาตร ปริมาณน้ำคงที่เท่ากับ 350 มิลลิลิตร ทำการแทนที่ทรายละเอียดด้วยกากมูลโค 0 0.5 1 1.5 2 2.5 3 3.5 4 4.5 และ 5 ส่วน ตามลำดับ รวมเป็น 11 อัตราส่วน ขึ้นรูปเป็นก้อนตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ ขนาด 10 x 10 x 10 ซม. ทดสอบสมบัติปริมาณความชื้น การดูดซึมน้ำ ความหนาแน่น และความต้านทานแรงอัด แล้วเลือกอัตราส่วนที่ใช้กากมูลโคแทนที่ทรายละเอียด 3 อัตราส่วน ที่มีความเป็นไปได้มาทำการทดลองในขั้นตอนที่ 2 โดยทำการขึ้นรูปเป็นอิฐบล็อกประสานขนาด 22.5 x 11.5 x 6 ซม. ประกอบด้วย การดูดซึมน้ำ ความหนาแน่น และความต้านทานแรงอัด ตามมาตรฐาน มผช.602-2547 เรื่องอิฐบล็อกประสาน สามารถได้อัตราส่วนที่มีปริมาณกากมูลโคมากที่สุดที่นำไปใช้ผลิตอิฐบล็อกประสาน เป็นสัดส่วนโดยปริมาตร คือ ปูนซีเมนต์ 1 ส่วน ทรายละเอียด 6.5 ส่วน กากมูลโค 0.5 ส่วน และน้ำ 350 มิลลิลิตร มีปริมาณความชื้นร้อยละ 0.72 การดูดซึมน้ำร้อยละ 8.715 ความหนาแน่น 2215.04 กก./ลบ.ม. และความต้านทานแรงอัดเท่ากับ 25.57 กก./ตร.ซม. จัดอยู่ในประเภทอิฐบล็อกประสานแบบไม่รับน้ำหนัก

งานวิจัยในครั้งต่อไปควรใช้วัสดุอื่นมาเป็นวัสดุหลักในการผลิตอิฐบล็อกประสานเพื่อทำการเปรียบเทียบ เช่น ดินลูกรังที่นิยมผลิตเป็นอิฐบล็อกประสานเนื่องจากมีสีสวยงามเป็นธรรมชาติและมีความแข็งแรงยึดเกาะตัวกันดี หรือหินฝุ่นที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งเป็นจำนวนมากในพื้นที่จังหวัดสระบุรี ซึ่งเป็นพื้นที่ใกล้กับแหล่งกากมูลโค จะช่วยให้ลดต้นทุนในการผลิตลงได้ อีกทั้งผู้ประกอบการที่เกี่ยวข้องยังสามารถนำผลงานวิจัยไปส่งเสริมให้เกิดเป็นสินค้าชุมชนเพื่อสร้างรายได้ให้กับชุมชนในพื้นที่ได้อีกด้วย ทั้งนี้หากผู้ประกอบการต้องการนำไปผลิตและจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ ต้องใช้เครื่องอัดอิฐบล็อกประสานแบบไฮดรอลิก เพื่อให้ก้อนอิฐบล็อกประสานสามารถรับแรงได้มากขึ้นและทำการผลิตได้รวดเร็ว

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณจาก หน่วยวิจัยวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ประจำปี 2565

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Dairy cattle and dairy development strategy subcommittee. Dairy cattle and dairy action plan, Phase 1 (2021-2027). Bureau of Agricultural Economic Research, Department of livestock development; 2021.Thai.
- [2] Surtia G, Panchal P, Patel M, Ravikumar RK, Kumar V. Improving livelihood initiatives through environmental friendly solutions derived from livestock by-product. Int. J. Sci. Environ. Technol. 2016;5(2):658-65.
- [3] Khamput P. Utilization of coconut shell ash as aggregate in concrete blocks products. Thai Environmental Engineering Journal. 2018;32(1):9-16.Thai.
- [4] Charoennatkul C. Interlocking blocks containing oil palm ash and shells waste. Journal of Community Development and Life Quality. 2014;2(1):103-112.Thai.



- [5] Kokkamhaeng W, Rattanawong N. Interlocking blocks from kaolin. The 13th National Civil Engineering Conference, 2008 May 14-16; Chonburi; 2008. p. MAT021.Thai.
- [6] Hirun Y, Kreepala W, Nokkeaw K. Improving the quality of interlocking blocks made from Sakon Nakhon laterite soil with duck manure. The 16th National Civil Engineering Conference, 2011 May 18-20; Chonburi; 2011. p. MAT032.Thai.
- [7] Khamput P, Suweero K, Boksuwan A, Panlai N. The use of volcanic rock dust in interlocking block products. Journal of Community Development and Life Quality. 2015;3(2):239-247.Thai.
- [8] Khamput P. Using waste rock of mining andesite for development of interlocking block product. Thai Environmental Engineering Journal. 2017;31(3):13-19.Thai.
- [9] Luangsod S, Khamput P, Namarak C, Pradmali S. Community technology for development of interlocking block product from basalt fragments.
- [10] Khamput P, Suweero K. Effect on compressive strength of replacing sand by dolomite in concrete. The 10th Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symposium, 2012 December 5-8; Sunee Grand Hotel; Ubon-Ratchathani; 2012. p. 88.Thai.
- [11] Boksuwan A, Khamput P. Interlocking block product for community enterprises from anhydrite rock fragments. The 3<sup>rd</sup> National RMUTR Conference, 2018 July 18-20; Rajamangala University of Technology Rattanakosin Wang Klai Kangwon Campus; 2018. p. 19-26.Thai.
- [12] Khamput P. A study of compressive strength of quarry dust concrete mixed water reducing and accelerating admixture (W/C = 0.5). Abstract 31<sup>st</sup> Congress on Science and Technology of Thailand, 2005 October 18-20; Technopolis, Suranaree University of Technology; Nakhon Ratchasima; 2005. P. 313.Thai.
- [13] Thai Industrial Standards Institute. TCPS 602-2547. Community product standards on interlocking bricks. Ministry of Industry. Bangkok; 2004.Thai.
- [14] Khamput P. Interlocking brick products from hemp core. Annual Concrete Conference 14, 2019 March 6-8; Prachuap Khiri Khan; 2019. p. ENV-008.Thai.
- [15] Khamput P. Interlocking block products from tobacco stem waste. National Academic Conference Rangsit University 2019, 2019 May 4; Pathum Thani; 2019. p. 231-240.Thai.
- [16] Thai Industrial Standards Institute. TIS.15 part 1-2555. Standard for Portland cement part 1 specification. Ministry of industry. Bangkok; 2012.Thai.
- [17] Thai Industrial Standards Institute. TIS. 566-2562. Standard for concrete aggregate. Ministry of industry. Bangkok; 2019.Thai.
- [18] British Standards Institution. BS 1881 : Part 108. Method for making test cubes from fresh concrete: code of testing concrete part 108. London: BSI; 1983.
- [19] Thai Industrial Standards Institute. TIS. 109-2517. Standard for sampling and testing concrete masonry unit. Ministry of industry. Bangkok; 1974.Thai.



- [20] Thai Industrial Standards Institute. TIS.2601-2556. Standard for cellular lightweight concrete blocks using preformed foam. Ministry of industry. Bangkok; 2013.Thai.
- [21] Chindaprasirt P, Jaturapitakkul C. Cement Pozzolanic and concrete 7<sup>th</sup> edition. Bangkok: Thailand Concrete Association;2012.Thai.
- [22] Khamput P, Somna K. Production of cement-bonded fiberboard from oil palm fiber. Thai Environmental Engineering Journal. 2018;32(3):29-34.Thai.
- [23] Panlai N, Khamput P, Suweero K. Product of cement-bonded bagasse fiber board. Journal of Innovative Technology Research. 2019;3(2):59-67.Thai.
- [24] Khamput P. Hempcrete using cement and gypsum plaster as a binder. Journal of Engineering, RMUTT. 2022;20(1):117-125.Thai.
- [25] Khamput P. Hollow Non-load-bearing concrete block products from hemp core. Thailand Research Expo: Symposium 2019 Proceedings, 2019 April 7-10; Central World Bangkok; 2019. p. 434-445.Thai.
- [26] Khamput P. Hollow non-load-bearing concrete block products from tobacco stem waste. The 11<sup>th</sup> Rajamangala University of Technology National Conference. 2019 July 24-26; Chiang Mai; 2019. p. 374-387.Thai.
- [27] Pramali S, Khamput P. Developing a white clay concreteblock mixed with the residue of rice and coconut. The 20<sup>th</sup> National Environment Conference. 2021 May 12-13; Khon Kaen; p. 139-145.Thai.



## สมบัติเชิงกลของชิ้นงานจากการพิมพ์สามมิติด้วยวิธีการอบอ่อนทางความร้อน

### Mechanical Properties of 3D Printed Parts with Thermal Annealing

ศิวัศ พิภพมิตร<sup>1,3</sup>, ไกรสร วงษ์ปู้<sup>1,\*</sup>, ปรีดา จิวปัญญา<sup>1,3</sup>, ภาคภูมิ ใจชมภู<sup>1,3</sup> และพินิจ เนื่องภิรมย์<sup>2,4</sup>

<sup>1</sup> สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก

41/1 ถนนพหลโยธิน ตำบลไม้งาม อำเภอเมือง จังหวัดตาก 63000

<sup>2</sup> สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่

128 ถนนห้วยแก้ว ตำบลช้างเผือก อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 53000

<sup>3</sup> หน่วยวิจัยการพัฒนากำลังคนด้านเทคโนโลยีและนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก

41/1 ถนนพหลโยธิน ตำบลไม้งาม อำเภอเมือง จังหวัดตาก 63000

<sup>4</sup> ศูนย์ความเป็นเลิศทางวิชาชีพและเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

128 ถนนห้วยแก้ว ตำบลช้างเผือก อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 53000

Siwasit Pitjamit<sup>1,3</sup>, Kraisorn Wongpoo<sup>1,\*</sup>, Parida Jewpanya<sup>1,3</sup>, Pakpoom Jaichompoo<sup>1,3</sup>

and Pinit Nuangpirom<sup>2,4</sup>

<sup>1</sup> Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Tak

41/1 Paholayothin Road, Mai Ngam, Muang, Tak, Thailand, 63000

<sup>2</sup> Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Chiang Mai

128 Huay Kaew Road, Muang, Chiang Mai, Thailand, 50300

<sup>3</sup> Innovation and Technology Manpower Development Center, Rajamangala University of Technology Lanna Tak

41/1 Paholayothin Road, Mai Ngam, Muang, Tak, Thailand, 63000

<sup>4</sup> Center of Excellence for Professional and Technological, Rajamangala University of Technology Lanna

128 Huay Kaew Road, Muang, Chiang Mai, Thailand, 50300

\*ผู้รับผิดชอบบทความ: wongpoo.k@rmutl.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 08-9855-6789

Received: 1 November 2022, Revised: 30 April 2023, Accepted: 30 April 2023

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลของชิ้นงานจากการพิมพ์สามมิติในระบบ Fused Deposition Modeling: (FDM) ด้วยวิธีอบอ่อนทางความร้อน เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้เงื่อนไขทางความร้อนในการพิมพ์สามมิติที่เหมาะสมในภาคอุตสาหกรรมด้วยการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลหลายระดับ กำหนดปัจจัยในการศึกษาได้แก่ อุณหภูมิในการอบอ่อน เวลาในการอบอ่อน และประเภทของการให้ความร้อน โดยกำหนดอุณหภูมิในการอบอ่อนช่วง 60 ถึง 70 องศาเซลเซียส เวลาในการอบอ่อน 30 ถึง 50 นาที และประเภทของการให้ความร้อน ระหว่างการอบอ่อน และหลังการอบอ่อน ในงานวิจัยนี้ใช้วัสดุพอลิแลกติกแอซิดในการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติร่วมกับเครื่องอบอ่อนทางความร้อนสำหรับผลตอบในการศึกษาเป็นการวัดค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงเอนกประสงค์ และใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Minitab สำหรับวิเคราะห์และประมวลผลทางสถิติ จากการดำเนินงานวิจัยพบว่า ผลการทดลองเงื่อนไขทางความร้อนในการพิมพ์สามมิติที่เหมาะสมที่สุดคือ อุณหภูมิในการอบอ่อนทางความร้อน 60 องศาเซลเซียส เวลาในการอบอ่อน 30 นาที และประเภทของการให้ความร้อนเป็นระหว่างการอบอ่อน โดยให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 52.41 เมกะปาสกาล

**คำสำคัญ** การออกแบบการทดลอง การพิมพ์สามมิติ การอบอ่อนทางความร้อน สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน



## Abstract

This research aims to study the mechanical properties of the Fused Deposition Modeling (FDM) 3D printing by thermal annealing method, and to provide a recommendation for the selection of suitable industrial 3D printing thermal conditions by the multi-level factorial experiments. In this research, the parameters in the study were annealing temperature, annealing hold time, and type of heating. The annealing temperature was set in the range of 60 to 70 °C, the annealing hold time was 30 to 50 minutes, and the type of heating was during annealing and post annealing. In this investigation, polylactic acid was used to print the specimens with the FDM 3D printer with a heat annealing machine. As for the results, the tensile strength was measured with a universal testing machine using Minitab software for statistical analysis and processing. From the experiments, it was found that the most suitable 3D printing thermal conditions were the annealing temperature of 60°C, the annealing hold time of 30 minutes, and during annealing. The ultimate tensile strength was 52.41 MPa.

**Keywords:** Design of Experiment; 3D Printing; Thermal Annealing; Mechanical Property; Thermal Property

## 1. บทนำ

ในปัจจุบันการออกแบบชิ้นส่วนมีการพัฒนาและสามารถขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ (3D Printing) หรือ การผลิตแบบเพิ่มเนื้อวัสดุ (Additive Manufacturing, AM) กันอย่างแพร่หลาย โดยเทคโนโลยีนี้มีบทบาทเป็นอย่างมากในวงการอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ อุตสาหกรรมทางการแพทย์ การจัดการศึกษาที่บูรณาการวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี วิศวกรรมศาสตร์ และคณิตศาสตร์ (Science, Technology, Engineering and Mathematics, STEM) และการวิจัย สำหรับการช่วยสร้างชิ้นงานต้นแบบ ชิ้นส่วนทดแทนต่าง ๆ วัสดุที่นิยมนำมาใช้มากที่สุดในการพิมพ์ได้แก่ พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic Acid, PLA) [1, 2]

PLA เป็นพอลิเมอร์ชีวภาพชนิดหนึ่งจัดอยู่ในกลุ่มพอลิเอสเทอร์ที่มีสายโซ่ตรง (Aliphatic Polyester) สังเคราะห์ได้จากกรดแลคติก (Lactic Acid) ซึ่งกรดแลคติกสามารถผลิตได้จากการหมัก แป้งหรือน้ำตาล ดังนั้นพืชที่มีแป้งหรือน้ำตาล เป็นองค์ประกอบหลัก เช่น ข้าวโพด มันสำปะหลัง ข้าวสาลีหรืออ้อย จึงสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตได้ซึ่งทรัพยากรเหล่านี้สามารถสร้างชิ้นทดแทนใหม่ได้อย่างต่อเนื่อง [3] พอลิแลคติกแอซิดจัดเป็นเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) สามารถขึ้นรูปได้ด้วยกระบวนการผลิตที่ใช้กันทั่วไป เช่น การฉีดขึ้นรูป (Injection Molding) การขึ้นรูปด้วยความร้อน (Thermoforming) การอัดขึ้นรูป

(Compression Molding) การอัดรีด (Extrusion) การเป่าขึ้นรูป (Blow Molding) และการพิมพ์สามมิติ [4]

สำหรับสมบัติเชิงกลและเชิงกายภาพเฉพาะของวัสดุแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันสามารถจำแนกได้ตามความง่ายในการพิมพ์ขึ้นรูป ความซับซ้อนของรูปลักษณะของชิ้นงาน ความแข็งแรงของชิ้นงาน ความยืดหยุ่น การทนต่อแรงกระแทก การทนความร้อนและการเชื่อมประสานกันระหว่างชิ้น ในขณะการขึ้นรูป เป็นต้น [5] จากการพิมพ์สามมิติพบว่าชิ้นงานที่พิมพ์จากวัสดุประเภทเทอร์โมพลาสติกที่ได้จะคุณสมบัติเชิงกลและเชิงกายภาพค่อนข้างต่ำกว่าการขึ้นรูปด้วยวิธีการอื่น ๆ เนื่องจากการพิมพ์ขึ้นรูปในอุณหภูมิห้องหรืออุณหภูมิปกติทำให้การจัดเรียงสายโซ่โมเลกุลของโครงสร้างไม่เป็นระเบียบ พลาสติกเกือบทุกชนิดจะหลอมเหลวเมื่อถูกความร้อน และจะแข็งตัวเมื่อถูกทำให้เย็นลง หรือปล่อยให้คายความร้อนออกไป ทั้งนี้คุณสมบัติทางเคมีจะไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเปลี่ยนรูปร่าง โดยคุณสมบัติโดยทั่วไปของ PLA คือ มีความเหนียว น้ำหนักเบา และจุดหลอมเหลวไม่สูงมาก แต่มีความแข็งแรงน้อย ดังนั้นการเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงาน PLA ด้วยวิธีการอบอ่อนทางความร้อน (Thermal Annealing) เป็นกระบวนการปรับปรุงคุณสมบัติของพลาสติกที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีการต่าง ๆ มาเป็นกระบวนการหนึ่ง ที่นิยมใช้กับวัสดุพลาสติก เนื่องจากการให้ความร้อนกับโครงสร้างอณูฐานที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวเพียงเล็กน้อยจะสามารถกระตุ้น





ให้โมเลกุลจัดเรียงตัวขึ้นมาใหม่อย่างเป็นระเบียบและเกิดเป็นผลึกได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้พลาสติกมีคุณภาพ และความแข็งแรงพอที่จะใช้งานด้านวิศวกรรม และอุตสาหกรรมได้มากขึ้น [6,7]

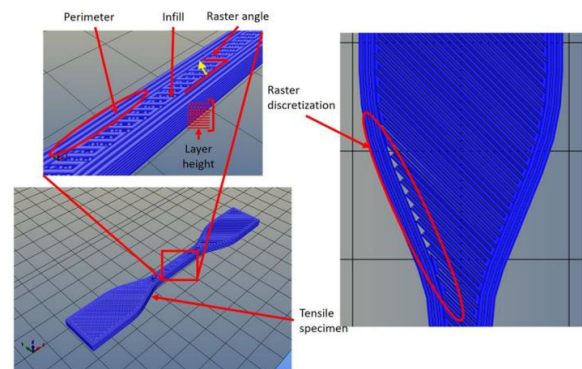
งานวิจัยที่แสดงคุณสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นภายหลังจากอบอ่อนทางความร้อน ตัวอย่างเช่น [8,9] รายงานว่า ค่าความแข็งแรงดัดโค้ง (Flexural Strength) และค่าความแข็งแรงกด (Compressive Strength) เพิ่มขึ้นจากการอบอ่อนทางความร้อนของชิ้นส่วน PLA ตัวอย่างหลังการทำอบอ่อนทางความร้อนที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 300 วินาที จะมีค่าความแข็งแรงดัดโค้ง (Flexural Strength) สูงกว่า PLA แบบที่ไม่ได้อบอ่อนถึง 58.3% ในขณะที่ค่าความแข็งแรงกดที่ทำการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 140 องศาเป็นเวลา 600 วินาที เพิ่มขึ้น 39.8% จากค่าความแข็งแรงกดที่ไม่ได้ทำการอบอ่อนทางความร้อน สอดคล้องกับงานวิจัย [10] ที่ศึกษาความแข็งแรงดึง (Tensile Strength) ของวัสดุคอมโพสิตที่มี PLA และ PETG ซึ่งเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนสายสั้น (CF) จากการศึกษพบว่าทั้งวัสดุ PLA และ PETG มีความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นตามลำดับ 2 และ 3 เท่าภายหลังจากการอบอ่อนทางความร้อน มีงานวิจัย [11] ทำการศึกษาที่คล้ายกันโดยศึกษาผลของการอบอ่อนทางความร้อนบนวัสดุผสมของ PLA ABS และ PETG ที่เสริมด้วยเส้นใยคาร์บอน อุณหภูมิในการอบอ่อนทางความร้อนทั้ง 3 อุณหภูมิ ได้แก่ 65 °C 110 °C และ 85 °C และใช้เวลาในการอบอ่อนทางความร้อนเท่ากับ 60 นาที ผลการทดลองพบว่าค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นจากชิ้นงานที่ไม่ได้ทำการอบอ่อนทางความร้อน 16.8% 3.34% และ 12.4% ตามลำดับ

ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาการอบอ่อนทางความร้อนเพื่อหากระบวนการปรับปรุงสมบัติของ PLA ที่ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกล สมบัติเชิงกายภาพ และทางสัณฐานวิทยา (Morphology) เพื่อให้โครงสร้างของพลาสติกชนิดนี้ดีขึ้นจาก 1) อุณหภูมิ 2) เวลา และ 3) ประเภทของการให้ความร้อนที่ได้รับอย่างเหมาะสม ส่งผลให้ชิ้นงานพลาสติกสามารถเพิ่มความแข็งแรงขึ้นได้

## 2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

### 2.1 เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ

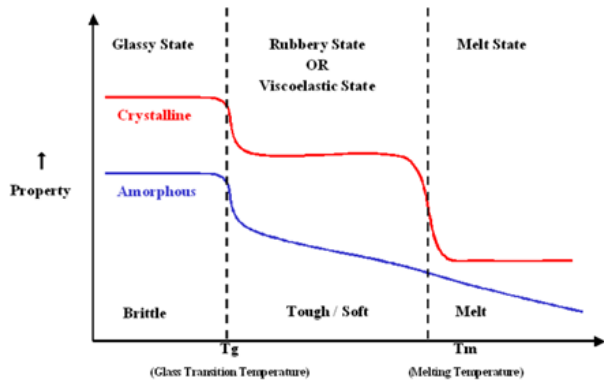
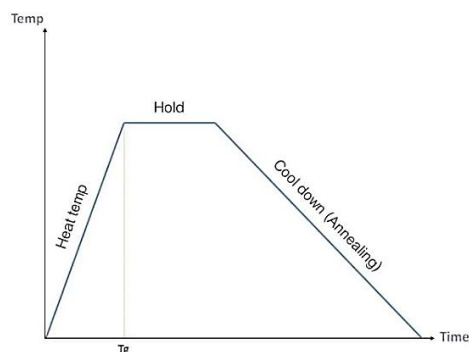
การพิมพ์สามมิติเป็นกระบวนการสร้างชิ้นงานสามมิติโดยการเติมชั้นของวัสดุต่อ ๆ กันภายใต้การควบคุมของคอมพิวเตอร์โดยชิ้นงานสามมิติจะถูกสร้างขึ้นโดยมีขั้นตอนในการร่างรูปภาพของชิ้นงานหรือที่เรียกว่า CAD (Computer-Aided Design) โดยใช้ซอฟต์แวร์ CAD ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะได้โมเดลสามมิติ หลังจากนั้นนำไฟล์ที่ได้จาก CAD ซึ่งเป็นไฟล์ stereolithography CAD หรือ .STL เข้าสู่โปรแกรมแบ่งชิ้นวัตถุ (Slicing Software) เพื่อแบ่งวัตถุเป็นชั้นๆ ดังรูปที่ 1 แล้วส่งต่อไปยังเครื่องพิมพ์ในการพิมพ์ชิ้นงานออกมา ซึ่งใช้วัสดุประเภทเส้น (Filament) พลาสติกชนิด PLA



รูปที่ 1 การแบ่งวัตถุเป็นชั้น ๆ ใช้ซอฟต์แวร์ Slicing [12]

### 2.2. การอบอ่อนทางความร้อน (Thermal Annealing) ของชิ้นงานที่พิมพ์ขึ้นรูปจากเครื่องพิมพ์สามมิติ

การพิมพ์ขึ้นรูปชิ้นงานจากเครื่องพิมพ์สามมิติจะต้องใช้อุณหภูมิความร้อนที่จุดหลอมเหลว (Melting Temperature,  $T_m$ ) ของพลาสติกชนิดนั้น ๆ จึงจะสามารถไหลผ่านหัวฉีดได้ ดังรูปที่ 2 แต่การเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงานพลาสติกจะใช้แค่อุณหภูมิที่ทำให้วัสดุอ่อนตัว (Glass Transition Temperature,  $T_g$ ) เท่านั้น เนื่องจากที่อุณหภูมิ  $T_g$  นี้พลาสติกที่มีการจัดเรียงสายโซ่โมเลกุลแบบไม่เป็นระเบียบ (Non-Crystalline) รวมถึงลักษณะกึ่งผลึก (Semicrystalline) มีทั้งส่วนที่เป็นผลึกและส่วนเป็น ออสัณฐาน (Amorphous) ปนกันอยู่ จะเป็นการเปลี่ยนสถานะโครงสร้างใหม่ และสายโซ่โมเลกุลจะจัดเรียงตัวได้ดีกว่าแบบเดิม ด้วยอัตราการเย็นตัว (Cooling Rate) อย่างช้า ๆ ทำให้โมเลกุลของพลาสติกมีเวลาจัดเรียงตัวมากขึ้น ทำให้ความแข็งแรงของพลาสติกเพิ่มขึ้นได้ ดังรูปที่ 3

รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ  $T_g$  และ  $T_m$  [13]รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ  $T_g$  กับเวลาของอัตราการเย็นตัวในระหว่างกระบวนการอบอ่อนทางความร้อน [14]

### 2.3 วัสดุพลาสติกกับการอบอ่อนทางความร้อน

พลาสติกวิศวกรรมและเกรดอุตสาหกรรมอาจทำการอบอ่อนทางความร้อนได้ยากในบางครั้ง เนื่องจากความเค้นที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติเมื่อวัสดุถูกผลิตหรือพัฒนาในระหว่างกระบวนการตัด หรือการเชื่อมส่วนประกอบที่ใช้เวลานาน อาจแตกหักหรือบิดงอได้ง่ายหากความเค้นภายในเกินความแข็งแรงของวัสดุ ซึ่งเป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่าความร้อน จะส่งผลกระทบต่อการจัดเรียงตัวของสายโซ่และปริมาณผลึก (Crystallinity) ของพลาสติกและนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพ ซึ่งส่งผลต่อความแข็งแรงประสิทธิภาพ และอายุการใช้งานของชิ้นส่วนอย่างมาก [15,16] ดังนั้นการอบพลาสติกจึงมีหลักการไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น อุณหภูมิ เวลาในการอบอ่อน เวลาในการเย็นตัว สภาพแวดล้อมในการพิมพ์ เป็นต้น วัสดุพลาสติกที่นิยมพิมพ์สามมิติในระบบ FDM ในปัจจุบัน ได้แก่ PLA PETG และ ABS มีค่าอุณหภูมิ  $T_g$  และอุณหภูมิในการพิมพ์สามมิติแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อุณหภูมิ  $T_g$  และอุณหภูมิในการพิมพ์สามมิติ ของวัสดุพลาสติก PLA PETG และ ABS [17]

วัสดุในการพิมพ์สามมิติ	อุณหภูมิ $T_g$	อุณหภูมิในการพิมพ์
Polylactic Acid (PLA)	65 °C	215 °C
Polyethylene terephthalate Glycol-modified (PETG)	75 °C	230 °C
Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)	105 °C	255 °C

ในการดำเนินงานวิจัยได้ทำการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการหาปัจจัยที่สำคัญในการพิมพ์ขึ้นรูป ชนิดและหลักการทำงานของเครื่องพิมพ์สามมิตินิยามและความรู้เกี่ยวกับพลาสติกที่ใช้ในการพิมพ์ ชนิดและหลักการทำงานของตู้อบอ่อนทางความร้อน การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลและทางกายภาพของชิ้นงานทดสอบ และการออกแบบการทดลอง

### 2.4 การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลที่จุดกึ่งกลาง

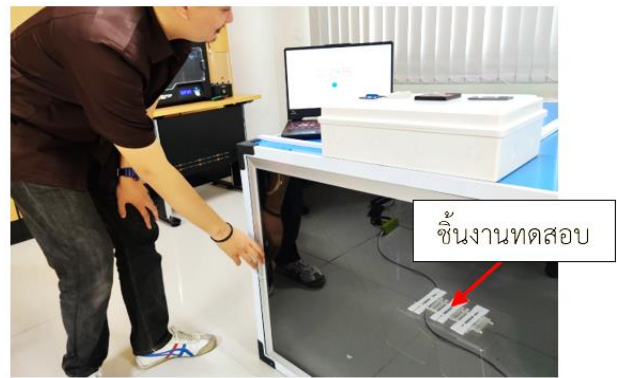
งานวิจัยนี้ใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลหลายระดับ ด้วยโปรแกรม Minitab 19 ทำการศึกษาทั้งหมด 3 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิในการอบอ่อน (Annealing Temperature) 3 ระดับ เวลาในการอบอ่อน (Annealing Hold Time) 3 ระดับ อ้างอิงจากอุณหภูมิในการอบอ่อนที่ทำให้ค่าความแข็งแรงดีที่สุดจากงานวิจัย 11 และประเภทของการให้ความร้อน (Type of Heating) 2 ระดับ และทำการทดลองทำซ้ำ 1 ครั้ง ดังตารางที่ 2 เพื่อหาเงื่อนไขสภาวะทางความร้อนที่เหมาะสมที่ทำให้สมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบมีค่าที่มากที่สุด

ตารางที่ 2 การออกแบบการทดลองหาเงื่อนไขทางความร้อนที่เหมาะสมที่ทำให้ชิ้นงานทดสอบมีค่าความแข็งแรงสูงที่สุด

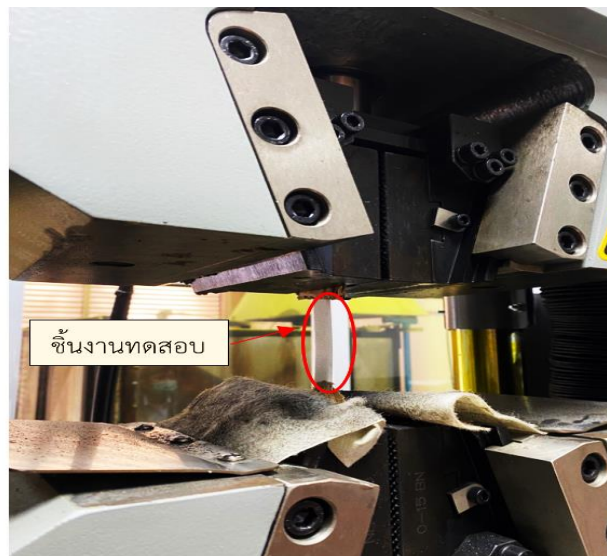
ปัจจัย	ระดับ		
	ต่ำ (-1)	กลาง (0)	สูง (+1)
A.อุณหภูมิในการอบอ่อน (°C)	60	65	70
B.เวลาในการอบอ่อน (นาท)	30	40	50
C.ประเภทของการให้ความร้อน	ระหว่างการพิมพ์	-	หลังการพิมพ์



รูปที่ 4 เครื่องอบอ่อนทางความร้อนกับการใช้งานร่วมกับเครื่องพิมพ์สามมิติ



รูปที่ 5 ชิ้นงานทดสอบจากการพิมพ์สามมิติร่วมกับการอบอ่อนทางความร้อน



รูปที่ 6 การทดสอบความแข็งแรงดึงด้วยเครื่อง UTM

## 2.5 วัสดุเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องพิมพ์สามมิติที่ใช้ในการทดลอง เครื่องพิมพ์สามมิติระบบ FDM ยี่ห้อ Flashforge รุ่น Creator Pro เครื่องพิมพ์สามมิติเป็นระบบ 2 หัวฉีด ขนาดของรูหัวฉีด 0.4 มิลลิเมตร อุณหภูมิในการพิมพ์สูงสุด 240 °C อุณหภูมิฐานพิมพ์สูงสุด 120 °C ความหนาของชั้น 0.4 มิลลิเมตร เส้นพลาสติกที่ใช้พิมพ์ได้ PLA, PETG, ABS ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นพลาสติก 1.75 มิลลิเมตร ความเร็วในการพิมพ์ 30 ถึง 100 มิลลิเมตรต่อวินาที ขนาดของฐานพิมพ์ 227×148×150 มิลลิเมตร วัสดุที่ใช้ในการพิมพ์สามมิติในการทดลอง เส้นพลาสติก PLA ยี่ห้อ X3D Filament ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.75 มิลลิเมตร อุณหภูมิที่สามารถพิมพ์ได้ 190 ถึง 220 °C อุณหภูมิฐานพิมพ์ 50 °C

ตู้อบอ่อนทางความร้อนแบบฮีตเตอร์ ใช้สำหรับในการให้ความร้อนโดยนำเครื่องพิมพ์สามมิติติดตั้งในตู้อบเพื่อควบคุมสภาวะทางความร้อน ตู้อบแบบฮีตเตอร์ รุ่น Over Heat Protection ดังรูปที่ 4 และขนาดภายในตู้อบกว้าง 90 เซนติเมตร ยาว 100 เซนติเมตร สูง 70 เซนติเมตร สามารถควบคุมช่วงอุณหภูมิได้ 30 ถึง 100 °C ที่ค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิไม่เกิน  $\pm 5$  °C และใช้อัตราการเย็นตัวในระหว่างกระบวนการอบอ่อนทางความร้อนคงที่ 10 °C ต่อชั่วโมง

## 2.6 การพิมพ์สามมิติสำหรับชิ้นงานทดสอบ

ทำการออกแบบชิ้นงานสำหรับการทดสอบความแข็งแรงดึงและการเปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นงานทดสอบในแกน x แกน y และแกน โดยใช้โปรแกรม Solid Work 2020 ทำการบันทึกไฟล์เป็นนามสกุล .STL และนำเข้าไฟล์เข้าสู่



โปรแกรมสำเร็จรูป Cura Slicer ทำการปรับตำแหน่ง และ กำหนดปัจจัยในการพิมพ์ให้แก่ชิ้นงาน ได้แก่ ขนาดของเนื้อพลาสติกที่ฉีด (Infill) เป็น 100% รูปแบบของเนื้อพลาสติกที่ฉีดเป็น Rectilinear เพราะเป็น Infill Pattern ที่จะทำให้ค่าความแข็งแรงตึงมากที่สุดจากงานวิจัย [18] อุณหภูมิในการพิมพ์ 200 °C ความเร็วในการพิมพ์ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที อุณหภูมิของฐานพิมพ์ 60 °C บันทึกลงไฟล์เป็นนามสกุล .Gcode ก่อนการใช้งานเครื่องพิมพ์สามมิติทำการให้ความร้อนเบื้องต้น (Preheat) ให้กับฐานพิมพ์และหัวพิมพ์ก่อนเพื่อลดความเสียหายของชิ้นงานในขณะพิมพ์ และทำการพิมพ์ชิ้นงานตามการออกแบบการทดลองในตารางที่ 2 จะได้รูปชิ้นงานทดสอบ ดังรูปที่ 5

### 2.7 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกล

การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลความเค้นแรงดึงชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D 638 [19] ทดสอบทุกเงื่อนไขการทดลองโดยเครื่องทดสอบความเค้นแรงดึงอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine: UTM) ยี่ห้อ MATEST รุ่น H001B ได้แก่ การทดสอบความเค้นแรงดึงโดยใช้โหลดเซลล์ 10 กิโลนิวตัน ความเร็วโหลดในการทดสอบ 5 มิลลิเมตร ต่อ นาที ดังรูปที่ 6

### 2.8 การตรวจสอบโครงสร้างสัณฐานวิทยา (Morphology)

นำชิ้นงานทดสอบตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure Analysis) ของด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงยี่ห้อ SOPTOP Microscope กำลังขยาย 5 เท่า บริเวณด้านข้างเพื่อดูความหนาของชั้น (Layer) เพื่อเปรียบเทียบผลของการให้ความร้อนด้วยการอบอ่อนในรูปแบบต่าง ๆ

## 3. ผลการวิจัยและอภิปราย

### 3.1 ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของความแข็งแรงตึง

ผลจากการวิจัยได้จากการทดลอง โดยนำปัจจัยทั้งหมด 3 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิในการอบอ่อน เวลาในการอบอ่อน และประเภทของการให้ความร้อน ทำการทดสอบค่าความแข็งแรงตึงตามเงื่อนไขจากการออกแบบการทดลองได้ทั้งหมด 36 การทดลอง เพื่อหาปัจจัยหลักที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความแข็งแรงตึงซึ่งลำดับการทดลองและผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 3 จากการวิเคราะห์ทางสถิติของปัจจัย อุณหภูมิในการอบอ่อน (A) เวลาในการอบอ่อน (B) ประเภทของการให้ความร้อน (C) ที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ พบว่า ปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าตอบสนองในการ

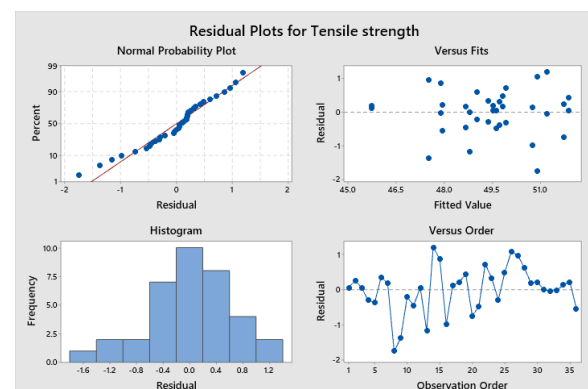
ทดลองหรือค่าความเค้นสูงสุด ได้แก่ ปัจจัย A B และ C เนื่องจากมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 และเมื่อวิเคราะห์ผลของปัจจัยร่วม พบว่าปัจจัย A\*C, A\*C มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 แสดงว่าปัจจัยร่วมเหล่านี้มีผลต่อค่าความแข็งแรงตึงในการทดลอง แสดงค่าวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความแข็งแรงตึงที่วิเคราะห์จากโปรแกรม Minitab 19 สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเป็นการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนที่เกิดขึ้นกับค่าตอบสนองในการทดลอง โดยในการทดลองมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ เท่ากับ 84.92 เปอร์เซ็นต์ และหลังทำการปรับค่า มีค่าเท่ากับ 76.02 เปอร์เซ็นต์ แสดงดังรูปที่ 7 ซึ่งเป็นการอธิบายถึงความน่าเชื่อถือของค่าตอบสนองที่มีผลมาจากปัจจัยในการทดลอง หากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจยิ่งเข้าใกล้ 100 เปอร์เซ็นต์ ยิ่งแสดงถึงความน่าเชื่อถือของการทดลองที่มากขึ้น

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	13	84.3909	6.4916	9.53	0.000
Linear	5	61.9310	12.3862	18.19	0.000
Annealing Temp	2	17.3606	8.6803	12.75	0.000
Hold Time	2	31.7898	15.8949	23.34	0.000
Type of heating	1	12.7806	12.7806	18.77	0.000
2-Way Interactions	8	22.4599	2.8075	4.12	0.004
Annealing Temp*Hold Time	4	11.8444	2.9611	4.35	0.010
Annealing Temp*Type of heating	2	9.9134	4.9567	7.28	0.004
Hold Time*Type of heating	2	0.7020	0.3510	0.52	0.604
Error	22	14.9811	0.6810		
Lack-of-Fit	4	3.2604	0.8151	1.25	0.325
Pure Error	18	11.7206	0.6511		
Total	35	99.3720			

Model Summary			
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.825202	84.92%	76.02%	59.63%

รูปที่ 7 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความแข็งแรงตึงของชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 8 แผนภูมิการกระจายตัวของค่าความแข็งแรงตึง





ตารางที่ 3 ผลการทดสอบความแข็งแรงดึงของชิ้นงานทดสอบ  
ทั้งหมด 36 การทดลอง

StdOrder	A	B	C	Tensile Strength (MPa)
1	60	30	ระหว่าง	51.95
2	60	30	หลัง	52.01
3	60	40	ระหว่าง	49.68
4	60	40	หลัง	49.63
5	60	50	ระหว่าง	49.37
6	60	50	หลัง	49.72
7	65	30	ระหว่าง	50.01
8	65	30	หลัง	49.16
9	65	40	ระหว่าง	46.14
10	65	40	หลัง	48.83
11	65	50	ระหว่าง	48.22
12	65	50	หลัง	49.59
13	70	30	ระหว่าง	47.63
14	70	30	หลัง	52.34
15	70	40	ระหว่าง	48.76
16	70	40	หลัง	49.79
17	70	50	ระหว่าง	45.86
18	70	50	หลัง	48.15
19	60	30	ระหว่าง	52.41
20	60	30	หลัง	51.01
21	60	40	ระหว่าง	49.15
22	60	40	หลัง	50.65
23	60	50	ระหว่าง	50.06
24	60	50	หลัง	49.08
25	65	30	ระหว่าง	50.32
26	65	30	หลัง	51.98
27	65	40	ระหว่าง	48.47
28	65	40	หลัง	49.65
29	65	50	ระหว่าง	48.86
30	65	50	หลัง	49.74
31	70	30	ระหว่าง	48.79
32	70	30	หลัง	51.17
33	70	40	ระหว่าง	47.87
34	70	40	หลัง	50.91
35	70	50	ระหว่าง	45.95
36	70	50	หลัง	47.40

### 3.2 การตรวจสอบความถูกต้องของการออกแบบการทดลอง

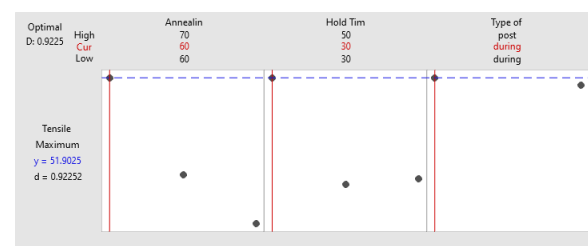
ความถูกต้องของการออกแบบการทดลองสามารถตรวจสอบได้จากแผนภูมิการกระจายตัวของค่าความเค้นสูงสุดทั้ง 4 แบบ ดังรูปที่ 8 ซึ่งอธิบายได้ดังนี้

แผนภาพความน่าจะเป็นปกติ (Normal Probability Plot) แสดงถึงข้อมูลที่กระจายตัวโดยมีแนวโน้มเป็น เส้นตรง แสดงว่า ข้อมูลทั้งหมดที่วิเคราะห์มีกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) ฮิสโตแกรม (Histogram) แสดงถึง

ข้อมูลที่กระจายตัวในลักษณะของระฆังคว่ำ แสดงว่าข้อมูลทั้งหมดที่วิเคราะห์มีกระจายตัวแบบปกติ การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Versus Fits) แสดงถึงความแปรปรวนของข้อมูลที่กระจายตัวในลักษณะไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจน แสดงว่า ความแปรปรวนของข้อมูลทั้งหมดที่วิเคราะห์ไม่แตกต่างกัน การตรวจสอบความเป็นอิสระของ Residual (Versus Order) แสดงถึงข้อมูลที่กระจายตัวในลักษณะไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจน แสดงว่า ข้อมูลทั้งหมดที่วิเคราะห์ไม่แปรผันตามลำดับการทดลอง

### 3.3 การหาเงื่อนไขที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดที่เหมาะสม

การศึกษาเงื่อนไขที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดที่เหมาะสมจากการทำ Response Optimization ซึ่งอธิบายถึงการวิเคราะห์ระดับของปัจจัยที่ทำให้ได้ผลตอบมีค่ามากที่สุด (Maximum) โดยในการวิเคราะห์ค่าความเค้นสูงสุดจะทำการกำหนดค่าเป้าหมาย (Target) เท่ากับ 52.41 MPa เนื่องจากเป็นค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดที่ชิ้นงานทดสอบสามารถรับได้ และกำหนดค่าน้อยสุด (Lower) เท่ากับ 45.86 MPa เนื่องจากเป็นค่าความแข็งแรงดึงน้อยที่สุดที่เกิดขึ้นจากการทดลองจริง รวมถึงการกำหนดค่าน้ำหนักผลตอบ (Weight) และค่าความสำคัญ (Importance) เท่ากับ 1 เนื่องจากต้องการให้ค่าผลตอบ เข้าใกล้ค่ามากที่สุด (Maximize) จากรูปที่ 9 อธิบายได้ว่า การกำหนดค่าที่เหมาะสมดังที่กล่าวมาข้างต้น จะทำให้ได้เงื่อนไขของการอบอ่อนทางความร้อนที่จะส่งผลให้เกิดค่าความแข็งแรงดึงที่เหมาะสมที่สุด จากผลการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดคือ อุณหภูมิในการอบอ่อนเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส เวลาในการอบอ่อนเท่ากับ 30 นาที และประเภทของการให้ความร้อนระหว่างการพิมพ์ ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดจากการทำนายผลเท่ากับ 51.90 MPa และมีค่า Desirability เท่ากับ 0.9225

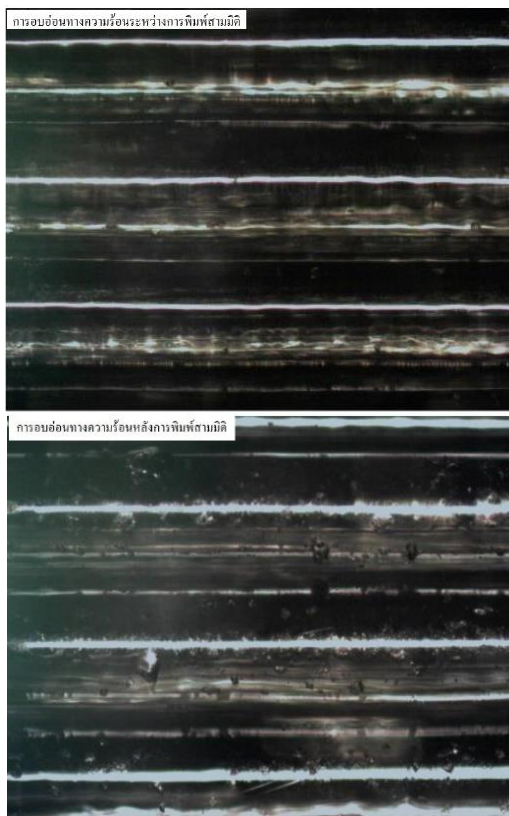


รูปที่ 9 ค่าของปัจจัยทางความร้อนที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงที่เหมาะสมที่สุด



### 3.4 ผลการตรวจสอบโครงสร้างพื้นฐานวิทยา

จากการใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 5 เท่า เพื่อเปรียบเทียบความหนาของชั้น (Layer) จากการพิมพ์ ขึ้นงานโดยเปรียบเทียบชิ้นงานทดสอบการอบอ่อนทางความร้อนระหว่างการพิมพ์สามมิติ และหลังการพิมพ์สามมิติ ดังรูปที่ 10 พบว่าชิ้นงานทดสอบที่ทำการอบอ่อนระหว่างการพิมพ์ มีชั้นในการพิมพ์ที่ชิดกันมากกว่า สอดคล้องกับงานวิจัยของ Amza และคณะ [20] ที่ทำการศึกษากลไกในการอบอ่อนทางความร้อนที่ส่งผลให้โครงสร้างของเทอร์โมพลาสติกที่ดีขึ้นจากเงื่อนไขของอุณหภูมิ เวลา ประเภทของการให้ความร้อนที่ได้รับอย่างเหมาะสมกับประเภทของวัสดุ ผลทำให้พลาสติกมีความเหนียวเพิ่มขึ้นจากเดิมซึ่งเป็นกลไกในการเพิ่มความแข็งแรง



รูปที่ 10 รูปถ่ายความหนาของชั้นของชิ้นงานทดสอบการอบอ่อนทางความร้อนระหว่างการพิมพ์สามมิติ (บน) และหลังการพิมพ์สามมิติ (ล่าง)

### 3.5 อภิปรายผลการทดลอง

ผลทดลองสมบัติเชิงกลจากการทดสอบความแข็งแรงดึงของชิ้นงานทั้ง 3 ปัจจัย เมื่อได้ทดสอบชิ้นงานถึงจุดแรงดึงสูงสุดแล้วได้นำมาเปรียบเทียบกับระหว่างชิ้นงานที่ไม่ได้ทำ

การอบอ่อนทางความร้อน ชิ้นงานที่พิมพ์ระหว่างการอบอ่อนทางความร้อน และหลังทำการอบอ่อนทางความร้อน พบว่าชิ้นงานที่ทำการอบอ่อนทางความร้อนมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นจากชิ้นงานที่ไม่ได้ทำการอบอ่อนทางความร้อน การเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงานจะใช้แค่อุณหภูมิที่ทำให้วัสดุอ่อนตัว (Tg) เท่านั้น เนื่องจากที่อุณหภูมิอ่อนตัวของพลาสติกนี้ที่มีการจัดเรียงสายโซ่โมเลกุลแบบไม่เป็นระเบียบรวมถึงลักษณะกิ่งผลึกจะเป็นการเปลี่ยนสถานะโครงสร้างใหม่ และสายโซ่โมเลกุลจะจัดเรียงตัวได้ดีกว่าแบบเดิมด้วยอัตราการเย็นตัวอย่างช้า ๆ ทำให้โมเลกุลของพลาสติกมีเวลาจัดเรียงตัวมากขึ้นทำให้ความแข็งแรงของพลาสติกเพิ่มขึ้น

จากผลการทดลองมีค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด เท่ากับ 52.41 MPa เปรียบเทียบกับชิ้นงานทดสอบจากการขึ้นรูปแบบฉีดขึ้นรูป (Injection Molding) และจากการพิมพ์สามมิติตามเอกสารทางเทคนิค (Technical Datasheet) พบว่าค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดจากการทดลองมีค่าไม่แตกต่างจากการพิมพ์สามมิติด้วยเทคนิคการพิมพ์แบบเดียวกัน มีค่าไม่ต่างจากการขึ้นรูปแบบฉีดขึ้นรูป (52.00 MPa) และเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Vukasovic และงานวิจัยของ Wang ที่พิมพ์สามมิติขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ และทดสอบได้ค่าความแข็งแรงดึงเท่ากับ 69.80 MPa และ 60.30 MPa ตามลำดับ ซึ่งค่าความแข็งแรงดึงจากการทดลองมีค่าน้อยกว่าแสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบค่าความความแข็งแรงดึงจากการทดลองกับเอกสารทางเทคนิคและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผลการเปรียบเทียบชิ้นงานจากวัสดุ PLA จากการขึ้นรูปแบบต่างๆ	Tensile Strength (MPa)
ชิ้นงานทดสอบจากการทดลอง	52.41
ชิ้นงานทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยการฉีดขึ้นรูปจากเอกสารทางเทคนิค [20]	52.00
ชิ้นงานทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยการพิมพ์สามมิติจากเอกสารทางเทคนิค [21]	50.00
ชิ้นงานทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยการพิมพ์สามมิติจากงานวิจัย Vukasovic และคณะ [23]	69.80
ชิ้นงานทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยการพิมพ์สามมิติจากงานวิจัย Wang และคณะ [22]	60.30



จากงานวิจัยของ Wach และคณะ [8] ศึกษาถึงประโยชน์ของการอบอ่อนทางความร้อนให้กับพลาสติกจากการพิมพ์สามมิติจะขึ้นกระบวนการและขั้นตอนที่ถูกต้องอย่างเหมาะสม ซึ่งมีข้อดีหลายประการทั้งในระยะสั้นและระยะยาว ได้แก่ ขนาดของชิ้นงานมีความเสถียร สามารถนำไปตัดแต่งเพิ่มเติมได้ ชิ้นงานมีความแข็งแรงและความสมบูรณ์ เหมาะสมใช้เป็นชิ้นส่วนประกอบต่าง ๆ ลดการหดตัวและการขยายตัว ความทนทานต่อสารเคมีได้ดีขึ้น ความต้านทานการสึกหรอ ดีจากเดิม มีประสิทธิภาพที่จะใช้งานได้มากขึ้น

#### 4. บทสรุป

งานวิจัยนี้เป็นการการศึกษาผลของการอบอ่อนทางความร้อนที่ส่งผลต่อความแข็งแรงดึงของชิ้นงานจากการพิมพ์สามมิติเพื่อหาเงื่อนไขของปัจจัยที่เหมาะสมประกอบด้วย อุณหภูมิในการอบอ่อน เวลาในการอบอ่อน และประเภทของการให้ความร้อน จากการออกแบบการทดลองสามารถสรุปได้ว่า

จากผลการทดลองการทดสอบความแข็งแรงดึง พบว่า อุณหภูมิในการอบอ่อนทางความร้อน 60 องศาเซลเซียส เวลาในการอบอ่อน 30 นาที และประเภทของการให้ความร้อนเป็นระหว่างการอบอ่อน ให้ค่าความแข็งแรงดึงที่สูงที่สุด เท่ากับ 52.41 MPa

จากผลการทำนายเพื่อหาเงื่อนไขที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดที่เหมาะสม พบว่า อุณหภูมิในการอบอ่อนทางความร้อน 60 องศาเซลเซียส เวลาในการอบอ่อน 30 นาที และประเภทของการให้ความร้อนเป็นระหว่างการอบอ่อน ให้ค่าทำนายความแข็งแรงดึงที่สูงที่สุดเท่ากับ 51.90 MPa ซึ่งผลการทดลองจริงและผลการทดลองจากการทำนายมีค่าไม่แตกต่างกัน

ทั้งนี้งานวิจัยถัดไปผู้เขียนจะทำการทดสอบความสามารถในการคงขนาด (Dimensional Stability) ตามมาตรฐาน ASTM D1204 และปริมาณความเป็นผลึก (%Crystallinity) ด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimeter (DSC) ต่อไปในอนาคต

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้ดำเนินการดำเนินงานวิจัยขอขอบคุณ คุณณัฐพล หมีไพรพุกษ์ คุณนรินทร์ เอี่ยมสอาด คุณอภิสิทธิ์ กลิ่นบัว สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย

เทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก ที่ช่วยในการจัดหาข้อมูล และทำการทดลอง

ขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือทดสอบในการดำเนินงานวิจัย

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Dilberoglu UM, Gharehpapagh B, Yaman U, Dolen M. The role of additive manufacturing in the era of industry 4.0. *Procedia manufacturing*. 2017 Jan 1;11:545-54.
- [2] Farré-Guasch E, Wolff J, Helder MN, Schulten EA, Forouzanfar T, Klein-Nulend J. Application of additive manufacturing in oral and maxillofacial surgery. *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*. 2015 Dec 1;73(12):2408-18.
- [3] Davachi SM, Kaffashi B. Polylactic acid in medicine. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*. 2015 Jun 23;54(9):944-67.
- [4] Ilyas RA, Sapuan SM, Harussani MM, Hakimi MY, Haziq MZ, Atikah MS, Asyraf MR, Ishak MR, Razman MR, Nurazzi NM, Norrrahim MN. Polylactic acid (PLA) biocomposite: Processing, additive manufacturing and advanced applications. *Polymers*. 2021 Apr 18;13(8):1326.
- [5] Liu Z, Wang Y, Wu B, Cui C, Guo Y, Yan C. A critical review of fused deposition modeling 3D printing technology in manufacturing polylactic acid parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019 Jun 19;102:2877-89.
- [6] Yang C, Tian X, Li D, Cao Y, Zhao F, Shi C. Influence of thermal processing conditions in 3D printing on the crystallinity and mechanical properties of PEEK material. *Journal of Materials Processing Technology*. 2017 Oct 1;248:1-7.





- [7] Lluch-Cerezo J, Meseguer MD, García-Manrique JA, Benavente R. Influence of thermal annealing temperatures on powder mould effectiveness to avoid deformations in ABS and PLA 3D-printed parts. *Polymers*. 2022 Jun 27;14(13):2607.
- [8] Wach RA, Wolszczak P, Adamus - Włodarczyk A. Enhancement of mechanical properties of FDM - PLA parts via thermal annealing. *Macromolecular Materials and Engineering*. 2018 Sep;303(9):1800169.
- [9] Valvez S, Silva AP, Reis PN, Berto F. Annealing effect on mechanical properties of 3D printed composites. *Procedia Structural Integrity*. 2022 Jan 1;37:738-45.
- [10] Bhandari S, Lopez-Anido RA, Gardner DJ. Enhancing the interlayer tensile strength of 3D printed short carbon fiber reinforced PETG and PLA composites via annealing. *Additive Manufacturing*. 2019 Dec 1;30:100922.
- [11] Rangisetty S, Peel LD. The effect of infill patterns and annealing on mechanical properties of additively manufactured thermoplastic composites. *InSmart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems* 2017 Sep 18 (Vol. 58257, p. V001T08A017). American Society of Mechanical Engineers.
- [12] Popescu D, Zapciu A, Amza C, Baci F, Marinescu R. FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review. *Polymer Testing*. 2018 Aug 1;69:157-66.
- [13] Injection Molding Online. What are the typical thermal transitions in polymers. Available from: <http://injectionmoldingonline.com/Molding101/Polymers.aspx/> [Accessed 30th March 2023].
- [14] Hsueh MH, Lai CJ, Wang SH, Zeng YS, Hsieh CH, Pan CY, Huang WC. Effect of printing parameters on the thermal and mechanical properties of 3d-printed pla and petg, using fused deposition modeling. *Polymers*. 2021 May 27;13(11):1758.
- [15] Lee J, Lee H, Cheon KH, Park C, Jang TS, Kim HE, Jung HD. Fabrication of poly (lactic acid)/Ti composite scaffolds with enhanced mechanical properties and biocompatibility via fused filament fabrication (FFF)-based 3D printing. *Additive Manufacturing*. 2019 Dec 1;30:100883.
- [16] Pastorek M, Kovalcik A. Effects of thermal annealing as polymer processing step on poly (lactic acid). *Materials and Manufacturing Processes*. 2018 Nov 18;33(15):1674-80.
- [17] Pitjarnit S, Thunsiri K, Nakkiew W, Wongwichai T, Pothacharoen P, Wattanutchariya W. The possibility of interlocking nail fabrication from FFF 3D printing PLA/PCL/HA composites coated by local silk fibroin for canine bone fracture treatment. *Materials*. 2020 Mar 28;13(7):1564.
- [18] Dave HK, Patadiya NH, Prajapati AR, Rajpurohit SR. Effect of infill pattern and infill density at varying part orientation on tensile properties of fused deposition modeling-printed poly-lactic acid part. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2021 May;235(10):1811-27.
- [19] Amza CG, Zapciu A, Constantin G, Baci F, Vasile MI. Enhancing mechanical properties of polymer 3D printed parts. *Polymers*. 2021 Feb 13;13(4):562.



- [20] Kaynak C, Varsavas SD. Performance comparison of the 3D-printed and injection-molded PLA and its elastomer blend and fiber composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 2019 Apr;32(4):501-20.
- [21] Stoica CR, Maier R, Istrate A, Mandoc AC. Assessment of Static Mechanical Properties of Additively Manufactured Polylactic Acid (PLA) on Entry-Level FDM 3D Printer. *Mater. Plast*. 2021 Jun 1;58(2).
- [22] Vukasovic T, Vivanco JF, Celentano D, García-Herrera C. Characterization of the mechanical response of thermoplastic parts fabricated with 3D printing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019 Oct;104:4207-18.
- [23] Wang X, Jiang M, Zhou Z, Gou J, Hui D. 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. *Composites Part B: Engineering*. 2017 Feb 1;110:442-58.

## การฟื้นฟูเหมืองแร่ร้างและหลักเกณฑ์พิจารณาเพื่อใช้ประโยชน์

### Abandoned Mine Reclamation and Principal Considerations on Utilization

ศิริโรจน์ ศิริลักษณ์\* และ พิพัฒน์ ชื่นใจ

สาขาวิชาวิศวกรรมเหมืองแร่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

128 ถนนห้วยแก้ว อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300

Mr.Siwarote Siriluck\* and Mr.Pipatt Chuenjai

Mining Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna

128 Huaykaew , Muang, Chiangmai, 50300, Thailand

\*ผู้รับผิดชอบบทความ: siwarote@hotmail.com เบอร์โทรศัพท์ 082-766-6695

Received: 20 June 2022, Revised: 15 February 2023, Accepted: 15 February 2023

#### บทคัดย่อ

การใช้ประโยชน์ในพื้นที่เหมืองแร่ร้าง 7 โครงการในต่างประเทศ ถูกเลือกเสนอเฉพาะโครงการที่ประสบความสำเร็จมีผลกำไรงบประมาณในธุรกิจถูกนำมาใช้เพื่อพัฒนาสถานที่ บำรุงรักษาสภาพเหมืองให้อยู่ในสภาพที่ปลอดภัยโดยเจ้าของธุรกิจตลอดช่วงเวลาทำธุรกิจได้แก่ สวนสนุกใต้ดินซาลินาเทอร์ดาร์ โบสถ์ใต้ดินเวียร์ลิชการ์ แหล่งดำน้ำชมการเรืองแสงของกัมมันตภาพรังสี สนามแข่งรถวิบากใต้ดิน สนามแข่งรถวิบากขนาดใหญ่ สวนพฤกษศาสตร์ระบบปิด และโรงแรมอินเตอร์คอนติเนนตัล เชียงไฮ้ วันเดอร์แลนด์ วัตถุประสงค์ของบทความนี้เพื่อเป็นแนวทางของการพัฒนาโครงการธุรกิจในพื้นที่เหมืองร้างในอนาคต เนื้อหาส่วนต่อมาได้สร้างหลักพิจารณาเพื่อพัฒนาการใช้ประโยชน์จากเหมืองร้างที่เกี่ยวข้องทางด้านธรณีวิทยา ปัจจัยของการออกแบบเหมืองแร่ และสิ่งแวดล้อมเหมืองแร่ซึ่งแสดงไว้ 17 หลักเกณฑ์ คือ ประเภทของเหมืองแร่ ผู้ถือครองพื้นที่ สภาพใช้งานปัจจุบัน เส้นทางเข้าถึงโครงการ ที่ตั้งของพื้นที่โครงการ รายละเอียดของแผนที่ส่วนบนดินและใต้ดิน ลักษณะทางธรณีวิทยา ความเสี่ยงภัยด้านธรณีเทคนิค ส่วนขยายพื้นที่สนับสนุน ทิศทางการไหลของน้ำและพื้นที่น้ำท่วมถึงตามฤดูกาล แผนที่ลม แผนที่น้ำเสีย แผนที่น้ำใต้ดิน ความสัมพันธ์ในโครงการ ระดับความดังของเสียง และความหลากหลายทางชีวภาพ ในส่วนท้ายเป็นแนวทางการวิเคราะห์โดยสังเขปของเหมืองร้างในประเทศไทยเพื่อการใช้ประโยชน์ ท้ายนี้หวังว่าจะมีการพัฒนาหลักเกณฑ์ให้ดียิ่งขึ้นและเหมาะสมกับการพัฒนาเหมืองร้างต่อไป

**คำสำคัญ** เหมืองแร่ เหมืองร้าง การฟื้นฟู ท่องเที่ยว

#### Abstract

The utilization has been presented for the seven abandoned mines as the successful projects. The development and maintenance expenditure have been used for the safety mine place throughout the time by the business owners. The projects are the Salina turda amusement park, Wieliczka underground church, the glow radioactive scuba diving, the underground mine ATV riding resort, the dirt racetracks, the Eden project and the intercontinental Shanghai wonderland hotel. The article objective is to provide the guidance of a business development for the abandoned mine location in the future. A subsequent section has established the guidelines for the utilization from abandoned mine which related with the geological information, the

constraints of mine design and mine environment conditions. The seventeen principles are the types of mines, a mine owner, the present actual conditions, a route access, a location, a description of mapping surface-underground area, a geological deformation, the geotechnical risks with abandoned mining, a support of the expanded area, the water flow direction and the seasonal flooding area, a wind map, a sewage map, an interactive underground water map, the vibration level, the noise level and the biodiversity. The final section is the analytical guidelines of the domestic abandoned mines utilization. It is hoped that to future this principles can be better developed and it will be a suitable guidelines for the local abandoned mines.

**Keywords:** Mining, Abandoned Mine, Reclamation, Utilization

## 1. บทนำ

เหมืองร้าง (Abandoned Mine) หรือ เหมืองที่ปิดกิจการเป็นปัญหาที่สำคัญที่จะสามารถสร้างอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์และสัตว์ ความปลอดภัยทางกายภาพ และความเสียหายต่อระบบนิเวศวิทยาท้องถิ่นได้ พื้นที่เหล่านั้นจะเป็นพื้นที่ที่มีการผลิตแล้วหยุดลงหากไม่มีแผนการฟื้นฟู หรือ ขาดการติดตามการเปลี่ยนแปลงของสภาพเหมืองร้าง นอกเหนือจากการติดตามแล้วนั้น เมื่อพบปัญหาในบริเวณ ต้องมีเงินทุนเพียงพอที่จะนำมาใช้แก้ปัญหาของเหมืองร้างนั้นด้วย [1]

พระราชบัญญัติแร่ พ.ศ.2560 ให้ความสำคัญต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของประชาชนมากขึ้น ผู้ประกอบการเหมืองแร่ในอนาคตจะได้รับผลกระทบต่อการพิจารณาอนุญาต ประทานบัตร หรือใบอนุญาตที่ออกตาม พ.ร.บ. แร่ พ.ศ.2510 แต่แนวโน้มของยุทธศาสตร์แร่ และแผนแม่บทบริหารจัดการแร่ พ.ศ. 2561 – 2564 ที่เป็นกฎหมายลูกก็สามารถออกช้อยกเว้นได้ใน พรบ.แร่ 2560 เช่นกัน แต่ภาคประชาชนที่คัดค้านมีความเข้มแข็งก็จะเป็นปัจจัยให้หลายกิจการเหมืองแร่มีแนวโน้มปิดกิจการในอนาคต [2]

ปัจจัยทางภูมิศาสตร์ประเทศที่ไทยล้อมรอบด้วยเพื่อนบ้านที่แร่อุดมสมบูรณ์อย่างประเทศเมียนมาร์ และสาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว ทั้งยังมีระบบโลจิสติกส์ที่ดีไปสู่ยุโรป ญี่ปุ่น ออสเตรเลีย และสหรัฐอเมริกา ก็เป็นแนวโน้มของการนำเข้าแร่จากเพื่อนบ้านและปรับปรุงคุณภาพเพื่อการส่งออก แม้จะไม่สร้างกำไรมากเมื่อเทียบกับการทำเหมืองแร่ในประเทศแต่สามารถหลีกเลี่ยงการเกิดปัญหากับภาค

ประชาชน อาจเป็นปัจจัยให้กิจการเหมืองแร่จะปิดกิจการเพิ่มมากขึ้นในอนาคตเช่นเดียวกัน [3]

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอตัวอย่างการใช้ประโยชน์พื้นที่เหมืองร้าง และแนวทางการประเมินความเป็นไปได้ของพื้นที่เหมืองร้าง เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในรูปแบบต่าง ๆ ในประเทศไทย

## 2. ปัญหาของเหมืองร้าง

การดำเนินการฟื้นฟูเหมืองเล็กกิจการตามรายงานประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม มีประเด็นพิจารณา คือ ความมั่นคงด้านการเงินของบริษัทเหมืองแร่ ผู้รับเหมาฟื้นฟูสภาพแวดล้อมของบริษัท ขอบเขตอำนาจของกฎหมายที่บังคับใช้ที่เปลี่ยนแปลงจากตอนต้นจนถึงเวลาการทำเหมืองสิ้นสุด ดังกรณีของบริษัทแบล็คคลีเวลล์ ที่ประกาศล้มละลาย เพราะหลังจากเหมืองถ่านหินปิดตัวลง มาตรฐานของสิ่งแวดล้อมที่สูงขึ้นถูกบังคับใช้ ทำให้บริษัทไม่สามารถจัดการค่าใช้จ่ายเรื่องสิ่งแวดล้อมในพื้นที่หน้าเหมืองประมาณ 200 ไร่ ในพื้นที่สัมปทานของรัฐเวอร์จิเนียและไวโอมิงได้ ปัญหาเกิดจาก ดินถล่ม ดินปลูกต้นไม้ไม่ได้ น้ำรอบบริเวณมีฤทธิ์เป็นกรด ดังนั้นค่าใช้จ่ายและงบประมาณการดูแลสิ่งแวดล้อมเพื่อประชาชนทุกคนจึงเป็นหน้าที่ของรัฐต่อไป [4]

วิธีการระดมทุนเพื่อใช้ในการแก้ไขปัญหาเพื่อการฟื้นฟูนั้นไม่เพียงพอเหมือนปัญหาเล็ก ในบางประเทศการพัฒนากฎหมายเพื่อบังคับใช้เพื่อการสนับสนุนการฟื้นฟูเหมืองทำควบคู่ไปพร้อมกับการเกิดรายได้ของเหมืองแร่เพื่อเป็นกองทุนในการพัฒนาชุมชนและสิ่งแวดล้อม และ พื้นที่หลังการทำเหมืองโดยมีการถ่ายทอดเทคโนโลยีร่วมไปกันกับชุมชน [5]

หากไม่มีงบประมาณและทอดทิ้งเหมืองร้างอาจเกิดปัญหาที่มีหลายประการเช่น กรณีของเหมืองถ่านหินใต้ดินจะมีการสะสมของก๊าซที่สามารถระเบิดได้ซึ่งเกิดจากการไม่มีอากาศหมุนเวียนในเหมืองใต้ดินนั้น [6] ปัญหาของเหมืองตะกั่วสังกะสีซัลไฟด์ใต้ดินซึ่งเมื่อเวลาผ่านไปโครงสร้างใต้ดินที่เปลี่ยนแปลงไปทำให้เกิดการสั่นไหวในส่วนของโครงสร้างรับแรง แล้วจะทำให้เกิดสภาพการที่ไม่ปลอดภัยและทำให้เกิดภัยพิบัติหลุมยุบ [7] บริเวณเหนือพื้นที่นั้นซึ่งส่งผลให้เกิดอุบัติเหตุหลายครั้ง หรือกรณีเดียวกันของเหมืองเกลือใต้ดินร้าง ที่เกิดหลุมยุบ (Sink Hole) [8] เหมืองเปิดของแร่ถ่านหินที่มีการกักเก็บทางแร่ซัลไฟด์เอาไว้แล้วถูกชะละลายจากน้ำฝนและการย่อยของแบคทีเรียซึ่งทำให้เกิดปัญหาน้ำมีฤทธิ์เป็นกรด หรือเหมืองหินที่ไม่มีการปลูกพืชคลุมดินแล้วกักเก็บฝุ่นหินกองเก็บ แล้วทำให้สภาพแวดล้อมใกล้เคียงบริเวณต้องอยู่ในสภาพ กลิ่นฝุ่นเมื่อมีลมพัด หรือหากตะกอนพัดพากับกระแสน้ำหลังฝนตกซึ่งส่งผลเสียต่อสุขภาพของสิ่งมีชีวิตในพื้นที่ดังกล่าว [9] หรือการพังทลายของลาดดินและลาดหินที่ถูกออกแบบไว้แต่มีการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยแวดล้อมซึ่งทำให้เกิดการกีดขวางของร่องน้ำในขณะที่ไหลไปสู่ลำธารที่อยู่ใกล้เคียง เป็นเหตุให้ที่อยู่อาศัยของปลาตกลงและเกิดการรบกวนรูปแบบการไหลของธรรมชาติ [10] มากไปกว่านั้นหากกากแร่และน้ำที่ปนเปื้อนด้วยโลหะหนักจะทำให้เกิดความเสียหายอย่างมากต่อสัตว์ป่าและสัตว์น้ำ แล้วสัตว์ที่อยู่สูงขึ้นไปในห่วงโซ่อาหารจะบริโภคซึ่งสัตว์เหล่านั้นอาจทำให้ตายได้ หรืออาจไม่สามารถแพร่พันธุ์ได้ หรือปัญหาโดยตรงจากมนุษย์ซึ่งเป็นสัตว์ห่วงโซ่อาหารสูงสุดจะได้รับการสะสมของโลหะหนักทางอ้อมจากสัตว์เหล่านั้น [11] ในท้ายที่สุดความเสื่อมโทรมของสภาพเหมืองร้างในข้างต้นได้เกิดแล้วในต่างประเทศ [12]

หากมีระบบการติดตามผลการเปลี่ยนแปลงอย่างเป็นระบบแล้ว ทราบขอบเขตที่แท้จริงของปัญหา แล้วเข้าดำเนินการแก้ไขและป้องกันโดยรัฐบาลก็สามารถทำได้ อย่างไรก็ตามค่าใช้จ่ายเหล่านั้นก็จะเกิดขึ้นและรับผิดชอบด้วยภาษีของประชาชน [13] ดังนั้นการที่จะแก้ปัญหาและป้องกันปัญหาดังกล่าวแล้วยังให้เกิดผลกำไรด้วยก็สามารถใช้แนวคิดของการใช้ประโยชน์จากเหมืองร้างเพื่อประกอบกิจการธุรกิจ แล้วได้ผลกำไรเป็นอย่างดี และเจ้าของธุรกิจ

เหล่านั้นยินดีพร้อมเป็นเจ้าของในการนำส่วนหนึ่งของการกำไรที่ได้มาปรับปรุงสภาพของเหมืองให้อยู่ในระดับความปลอดภัยที่ได้อยู่ตลอดเวลาที่ทำธุรกิจอยู่ [14]

### 3. เจ็ดกรณีศึกษาในการใช้ประโยชน์จากเหมืองร้างในต่างประเทศ

การใช้ประโยชน์พื้นที่เหมืองร้างที่น่าสนใจในที่นี้เป็นตัวอย่างโครงการที่ประสบความสำเร็จทางธุรกิจแล้วและมีความหลากหลายทางธุรกิจโดยเป็นเหมืองใต้ดิน (Underground Mine) สามโครงการได้แก่ สวนสนุกใต้ดินชาลินาเทอร์ดาร์ โบสถ์ใต้ดินเวียร์ลิชการ์ แหล่งดำน้ำโคเวิร์เหมืองเปิด (Open Pit Mine) สามโครงการได้แก่ สนามแข่งรถวิบากขนาดเล็กและขนาดใหญ่ สวนพฤกษศาสตร์ระบบปิด และเหมืองหิน (Quarry) หนึ่งโครงการที่ถูกปรับปรุงเป็นโรงแรมอินเตอร์คอนติเนนตัล เชียงไฮ้ วันเดอร์แลนด์ ดังนี้

#### 3.1 สวนสนุกใต้ดิน ชาลินา เทอร์ดาร์, ประเทศโรมาเนีย

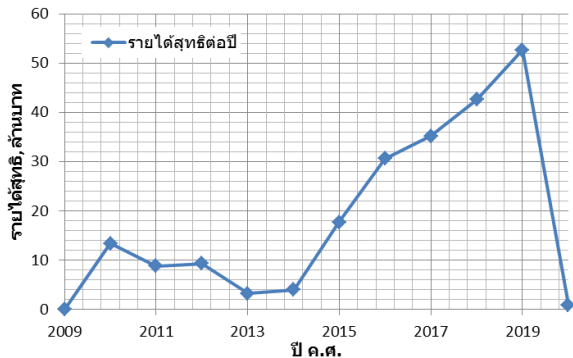
เหมืองเกลือหิน (Halite) ที่ปิดกิจการปี ค.ศ. 1932 [15] หลังจากใช้เงินลงทุนเพื่อปรับปรุงและพัฒนาให้กลายเป็นสวนสนุกได้ใช้เงินลงทุน 5.88 ล้านยูโร (214 ล้านบาท) [16] ความลึกของเหมืองจากผิวดินอยู่ที่ 112 เมตร โดยทางเดินประกอบไปด้วย ทะเลสาบใต้ดิน น้ำตกเกลือ หินงอก หินย้อย ผลึกเกลือที่มีความระยิบระยับเมื่อมีแสงตกกระทบ จนกระทั่งไปสู่จุดสำคัญคือ ห้องว่างใต้ดินรูประฆังคว่ำ (Bell Pit) ซึ่งมีความสูง 90 เมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 87 เมตร [15] โดยบริเวณนี้จะมีเครื่องเล่น และ เรือพายรอบทะเลสาบภายใต้แสงไฟสุดตระการตา ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 สวนสนุกใต้ดิน ชาลินา เทอร์ดาร์ ประเทศโรมาเนีย [17]

สวนสนุกเปิดกิจการในปี ค.ศ. 2010 มีแนวโน้มของรายได้สุทธิที่ดีอย่างต่อเนื่อง โดยรายได้สุทธิสูงสุดคือปี ค.ศ.

2019 มีรายได้สุทธิประมาณ 52.6 ล้านบาท แต่ในสถานการณ์การระบาดของโรคโควิด 19 ก็กระทบกระเทือนการท่องเที่ยว โดยทำให้รายได้สุทธิในปี 2020 ตกลงดังแผนผังรายได้สุทธิ [18] ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 รายได้สุทธิของสวนสนุกต๋องปี ในช่วงปีค.ศ. 2009 ถึง ค.ศ. 2022 [18]

### 3.2 โบสถ์ใต้ดินเวียร์ลิชการ์, ประเทศโปแลนด์

เหมืองเกลือหินที่มีความลึก 327 เมตรจากผิวดิน โดยพื้นที่ที่มีความเข้มข้นของแร่ร้อยละ 100 ไม่คุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในการผลิตแร่ได้ถูกพัฒนาให้กลายเป็นโบสถ์ ศาสนสถาน แต่ในส่วนที่มีศักยภาพแร่ไฮโดรที่ถูกละทิ้งก็ยังคงทำเหมืองเกลือใต้ดินอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน ศักยภาพของการท่องเที่ยวเชิงศาสนา มีจำนวนนักท่องเที่ยวประมาณ 1.2 ล้านคนต่อปี ซึ่งเมื่อเทียบกับอุตสาหกรรมการทำเหมืองเกลือที่มีพนักงานของบริษัทเหมืองแร่เพียง 400 คน ที่ทำการผลิตเกลือ 7,000 -8,000 ตันต่อปี [19] จึงเห็นได้ว่าเป็นความน่าทึ่งของรายได้ที่มาจากการท่องเที่ยวมากเพียงพอที่จะทำให้การทำเหมืองแร่ในปัจจุบัน ดำเนินไปเพื่อแสดงวิถีชีวิตในการทำงานของเหมืองให้นักท่องเที่ยวชมเหมืองแร่เสียมากกว่ารายได้ที่เกิดจากการขายแร่เกลือหิน ความสนใจทางสิ่งแวดล้อมและประวัติศาสตร์ความยาวนานตั้งแต่คริสต์ศตวรรษที่ 13 ทำให้ในปี ค.ศ. 1978 องค์การยูเนสโกรับรองส่วนของห้องใต้ดินที่มีศักยภาพแร่ต่ำที่เป็นโบสถ์กลายเป็นสถานที่แสดงให้เห็นถึงวัฒนธรรมที่เป็นมรดกโลก [20] ดังรูปที่ 3

### 3.3 แหล่งท่องเที่ยวค้ำน้ำชมการเรืองแสงของกัมมันตภาพรังสีแร่ยูเรเนียม, ประเทศโปแลนด์

ในช่วงสงครามโลกครั้งที่สองวิศวกรชาวรัสเซียได้สำรวจเหมืองแร่และทำการผลิตแร่ยูเรเนียมในเหมืองแร่ที่โควารี

(Kowary) ประเทศโปแลนด์ โดยการทำเหมืองใต้ดินที่ยาวนานได้รอดพ้นความเสียหายจากสงครามโลกครั้งที่สอง จนกระทั่งเหมืองปิดตัวในปี ค.ศ. 1993 ปล่องแนวตั้ง (Shaft) ถูกน้ำท่วมเต็มจนถึงบริเวณผิวดิน โดยบริเวณเหมืองใต้ดินที่ถูกน้ำท่วมอยู่นั้น ยังคงมี เครื่องแก้ว อุปกรณ์การทำเหมืองแร่ เครื่องจักรเครื่องมือที่เปื้อนกับกัมมันตภาพรังสีของแร่ยูเรเนียมทิ้งไว้อยู่ใต้ดิน ซึ่งนั่นเป็นสิ่งดึงดูดของนักดำน้ำที่ต้องการความท้าทายเพื่อดำน้ำในความมืดชมวัตถุเรืองแสงเหล่านั้นภายใต้ความมืด ดังรูปที่ 4

โดยแก้วเรืองแสงจากยูเรเนียมนี้มีการแผ่กัมมันตภาพรังสีในปริมาณที่มีความปลอดภัยต่อมนุษย์ผู้เข้าชม โดยข้อมูลจาก OARU พบว่า ที่ระยะ 1.8 เมตรห่างจากแก้วเรืองแสงนี้พบว่าร่างกายจะได้รับกัมมันตภาพรังสีจากรังสีแกมมา  $2.0 \times 10^{-4}$  mrem/hr และ อนุภาคเบต้า  $4.7 \times 10^{-4}$  mrem/hr ดังนั้นแล้วจะได้รับกัมมันตภาพรังสีรวมประมาณ  $6.7 \times 10^{-4}$  mrem/hr [23]

จากข้อเสนอแนะของ U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC) ได้ให้มาตรฐานการรับกัมมันตภาพรังสีต่อมนุษย์ที่ทำงานเกี่ยวข้องกับกัมมันตภาพรังสียอมรับได้ที่ไม่เกิน 5,000 mrem/year ส่วนบุคคลทั่วไปนั้น จะได้รับกัมมันตภาพรังสีในชีวิตประจำวันอยู่แล้วที่ 100 mrem/year [24] นักดำน้ำขึ้นขอการดำน้ำในที่มืด และไม่ได้เรียกร้องให้มีการปรับปรุงพื้นที่เพราะความรบกวนมีมิดนั้นเป็นสิ่งที่ท้าทายของนักกีฬาดำน้ำ [25]

### 3.4 สนามแข่งรถวิบากและสนามแข่งรถในอุโมงค์ใต้ดิน, เพนซิลวาเนีย ประเทศสหรัฐอเมริกา

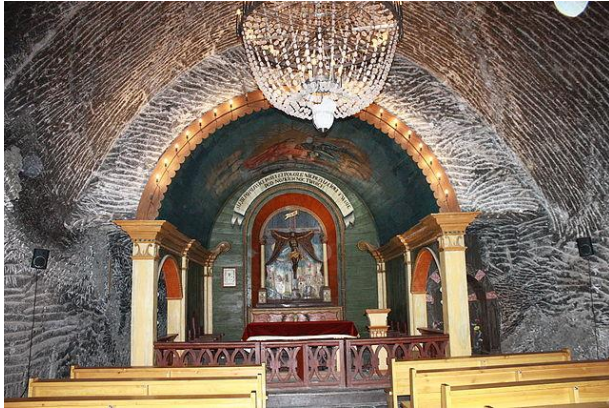
ตัวอย่างของธุรกิจขนาดเล็กที่ยืนหยัดเข้มแข็งมานานมากกว่า 10 ปี ของกิจการสนามแข่งรถวิบากในเหมืองแร่เงิน (Silver Mine) ที่ อวาลันเชอร์ การเติบโตและพัฒนาจนถึงทุกวันนี้ การใช้พื้นที่ส่วนหนึ่งของเหมืองประมาณ 2,200 ไร่ที่ทาง บริษัท Mines & Meadows เป็นผู้สนับสนุน [27],[28]

### 3.5 สนามแข่งของรถออฟโรด, เหลียวหนิง ประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน

เหมืองเปิดแร่ถ่านหินที่ปิดกิจการในปี ค.ศ. 2016 สาเหตุมาจาก เหมืองได้มีความลึกลงไปจากผิวดิน กว่า 100 เมตร ระยะทางในการวิ่งรถบรรทุกน้ำหนักถ่านเต็มระวางได้วนรอบบ่อเหมืองแบบกันหอย ยาว 5 กิโลเมตร กว้าง 3



กิโลเมตร ถูกคำนวณความคุ้มค่าแล้วจะต้องเลิกกิจการ ซึ่งทางบริษัทได้ผันตัวเหมือนมาเป็นสนามแข่งรถออฟโรดในปี ค.ศ. 2018 ที่ผู้จีน เหลียวหนิง ซึ่งปัจจุบันนี้กลายเป็น สนามที่มีแปดลู่วิ่ง



a) บริเวณโบสถ์ [21]



b) ส่วนห้องโถงใต้ดิน [22]

รูปที่ 3 เมืองแร่ใต้ดินเวียร์ลิชการ์



รูปที่ 4 เครื่องแก้วที่เรืองแสงจากกัมมันตภาพรังสี [26]

โดยมีระยะทาง 1300 เมตรต่อรอบ ซึ่งการเปลี่ยนเมืองให้กลายเป็นสนามแข่งรถนี้ได้ทำการรายงานการควบคุมสภาพสิ่งแวดล้อมเกี่ยวกับฝุ่นแขวนลอยในอากาศ มลภาวะทาง

อากาศ และการวางแผนเพิ่มพื้นที่สีเขียวซึ่งจากปี ค.ศ. 2018 จนมาถึงปี ค.ศ. 2021 สามารถเพิ่มพื้นที่สีเขียวได้ถึง 70,000 ตารางเมตร และมีแผนที่จะปรับปรุงพื้นที่เพื่อทำเป็นสวนสนุกในพื้นที่ใกล้สนามแข่งรถนี้ในอนาคตอีกด้วย [29],[30]

### 3.6 อีเดนส์โปรเจกต์ สวนพฤกษศาสตร์ระบบปิด, ประเทศอังกฤษ

เมืองเปิดเพื่อการผลิตแร่ดินขาวในงานเซรามิกส์อย่างยาวนานมา 160 ปี ที่คอร์นวอลล์ อังกฤษ เมื่อต้องปิดตัวลงได้ถูกพัฒนาและเปิดอย่างเป็นทางการในปี ค.ศ. 2001 เพื่อเป็นโครงการสวนอีเดน สวนปิดเพื่อควบคุมอุณหภูมิความชื้นและเงื่อนไขที่ทำให้พืชจากทั่วโลกสามารถปลูกได้ ไม่เว้นแม้แต่พืชในแถบร้อนอย่างประเทศไทย หรือในป่าฝนเขตร้อนแบบอินโดนีเซีย หรือ พืชในแถบทะเลทรายในตะวันออกกลาง และทุ่งหญ้า savanna ในทวีปแอฟริกา พืชหลายพันชนิด ได้ถูกเพาะพันธุ์ขึ้นใน โดมที่สามารถควบคุมเงื่อนไขที่เหมาะสมได้เพื่อระบบชีวนิเวศวิทยาตามธรรมชาติ นอกจากนั้นภายนอก โดมยังทำให้กลายเป็นสวนพฤกษศาสตร์ด้านนอกซึ่งเป็นที่ตั้งของพืชที่ต้องการรักษาพันธุ์ และสัตว์ป่าหลายชนิดในท้องถิ่นของ ทางคอร์นวอลล์ ความสำเร็จของโครงการนี้โดยมีนักท่องเที่ยว เข้าชมโครงการนี้เฉลี่ยปีละ 1.1 ล้านคนต่อปี [31] ดังรูปที่ 5

เจ้าของโครงการยังมีแนวคิดที่จะสร้างโครงการที่ติดชายทะเลเพื่อทำโครงการอีเดนที่เป็นสวนพฤกษศาสตร์นิเวศทางทะเลอีกด้วย ที่แคว้นแลงก์คาเชียร์ อังกฤษ ซึ่งจากการประเมินของความคุ้มค่าเพื่อการท่องเที่ยว นั้น มีความคุ้มค่าที่จะซื้อประทานบัตรเหมืองแร่ทรายแก้วเพื่อที่จะขอรหัสสิทธิ์ในการทำเหมืองแร่ทรายแก้วออกไป แล้วก็สร้างโครงการสวนพฤกษศาสตร์ทางทะเลแทนที่กิจการเหมืองแร่ทรายแก้วที่ยังมีศักยภาพในการผลิตอยู่ [32],[33]

การวางแผนพัฒนาเมืองร้างที่มีศักยภาพกลับมาเป็นตัวเร่งให้เมืองต้องเลิกกิจการเร็วขึ้นอีกด้วย จากโครงการนี้การนำสถาปนิกโครงการพัฒนาอสังหาริมทรัพย์และผู้เชี่ยวชาญด้านชีววิทยามาร่วมพัฒนาเป็นกลไกสำคัญของความสำเร็จในครั้งนี้

### 3.7 โรงแรมอินเตอร์คอนติเนนทัล เชียงไฮ้ วันเดอร์แลนด์, ประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน

เหมืองหินเทียนหม่าเล็กกิจการผลิตหินปูน ได้ถูกปรับปรุง จากหน้าผาหิน 60 เมตร กลายเป็นโรงแรม 5 ดาวที่มีความสูง 19 ชั้น ที่มีห้องพัก 339 ห้อง ราคาของห้องต่อคืนปกติที่ 23,495 บาท แม้ช่วงสถานการณ์การระบาดของโรคโควิด 19 นี้ราคาจะลดลงมาเป็น 11,703 บาท พร้อมทั้ง หน้าผากิจกรรมปีนหน้าผา (Rock Climbing) ที่ไม่ต้องสร้าง น้ำตกสูง ไหลไปยังสระว่ายน้ำในร่ม สวนน้ำภายในตกแต่งให้เป็นสวนหิมะ และสวนน้ำแข็ง โดยที่ห้องพักชั้นล่างยังถูกออกแบบให้เป็นห้องพักได้ระดับน้ำเมื่อเปิดหน้าต่างจะเห็นวิวเหมือนอยู่ในอควอเรียม [34-35] ดังรูปที่ 6



รูปที่ 5 สวนพฤกษศาสตร์ระบบปิดจากเหมืองเก่า[33]

#### 4. หลักในการพิจารณาเพื่อพัฒนาเมืองร้างเพื่อเป็นการใช้ประโยชน์

การพิจารณาพัฒนาเมืองร้างนอกจากการพิจารณาตามแผนความเป็นไปได้ของธุรกิจแล้ว ในส่วนของปัจจัยด้านธรณีวิทยาและสิ่งแวดล้อมเหมืองร้างนั้น ตัวผู้เขียนได้พัฒนาหลักในการพิจารณาเพิ่มเติมจากประสบการณ์ที่จากการทำงานด้านวิศวกรรมเหมืองแร่และกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิด้านการเหมืองแร่ในคณะกรรมการแร่จังหวัด กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ การทำงานที่ผ่านมาเป็นการหาทางออกร่วมกันกับหน่วยงานอื่นในประเด็นสิ่งแวดล้อม สาธารณสุข ทรัพยากรธรรมชาติ โบราณคดีและศิลปากร การเจ้าท่า การปกครองท้องถิ่น สังคมศาสตร์ ชุมชน การศึกษา ศาสนา องค์กรอิสระภาคประชาชน และด้านอื่นๆ ความรู้และประสบการณ์ดังกล่าวจึงนำมาประยุกต์กับประเด็นเดิมของ Barbosa V. et al., 2019 โดยมีเงื่อนไข 17 หลักเกณฑ์แสดงได้ดังนี้ [37]



รูปที่ 6 พื้นที่โครงการโรงแรมอินเตอร์คอนติเนนตัล เชียงไฮวันเดอร์แลนด์เมื่อสร้างเสร็จ [36]

##### 4.1 ประเภทของเหมืองแร่

เหมืองเปิด เหมืองหิน เหมืองใต้ดิน เหมืองดินขาว เหมืองทรายสามารถใช้ประโยชน์เป็นมวลกักเก็บพลังงานความร้อนแบบ Sand Battery ที่ เมือง Kankaanpää, ประเทศฟินแลนด์ ที่เป็นเทคโนโลยีใหม่ในการสู้กับปัญหาวิกฤตพลังงานท่ามกลางวิกฤตปฏิบัติการทางทหารรัสเซีย-ยูเครน [38] เหมืองแร่ชายหาดทะเลสามารถใช้เป็นแหล่งท่องเที่ยว ศูนย์ทดลองและพิพิธภัณฑ์พีช-สัตว์ทะเลแบบเหมืองแร่ Thiorichia, ประเทศกรีซ [39] เหมืองแร่ในทะเลสามารถใช้ประโยชน์เพื่อเป็นฐานการสูบน้ำหรือใช้ประโยชน์ของทางแร่หลังการแต่งแร่เพื่อถมทะเล เช่นในกรณีของการขยายสนามบินซางจี สิงคโปร์ ที่นำทรายและทางแร่ด้อยค่าจากการแต่งแร่ดีบุกในทะเลมาจากมาเลเซียและอินโดนีเซียมาใช้งานถม [40] เหมืองแร่นอกชายฝั่งสามารถใช้เป็นฐานติดตั้งกังหันลมเพื่อผลิตไฟฟ้า [41] โรงแรมในทะเล [42] พื้นที่ทุนลอยเพื่อใช้พลังงานจากคลื่นทะเลในการผลิตกระแสไฟฟ้า [43] เพื่อเป็นฐานในการฉีดอัดกักเก็บคาร์บอนกลับคืน (Carbon Capture Storage) [44]

##### 4.2 ผู้ถือครองพื้นที่

ผู้ถือครองพื้นที่ หมายถึง ผู้มีสิทธิในพื้นที่ตามกฎหมายแบ่งเป็น เอกชน รัฐวิสาหกิจและราชการ หรือเป็นที่สาธารณะที่หากไม่มีผู้ครอบครองพื้นที่หลังประทานบัตรหมดอายุนั้น รัฐควรสนับสนุนโครงการเพื่อประมูลการเช่าช่วงในระยะยาวสำหรับการลงทุนที่มีความเป็นไปได้ทางธุรกิจโดยในสปีแรกควร เอื้อประโยชน์ให้เจ้าของโครงการ เช่น อัตราการคิดภาษีจากกำไร ดอกเบี้ยเงินกู้ การนำเข้าเครื่องจักร การนำเข้า





วัตถุดิบ การนำเข้าวัสดุเพื่อการวิจัยและพัฒนาโครงการ สักส่วนการจ้างแรงงานไทยต่อแรงงานต่างชาติ เพื่อให้โครงการตั้งตัวได้

#### 4.3 สภาพใช้งานตามจริงในปัจจุบัน

สภาพใช้งานตามจริงในปัจจุบัน ไม่มีการใช้ประโยชน์ เพื่อกักเก็บน้ำ เพื่อการท่องเที่ยว เพื่อศาสนา เพื่อการศึกษา เชิงประวัติศาสตร์ การพัฒนาทางวิทยาศาสตร์ เชิงการทหาร หรือความมั่นคงเช่น การใช้ประโยชน์เป็นฐานที่ตั้งของการ ทดลองของผลกระทบจากนิวเคลียร์พิชชันที่เหมืองแร่ใต้ดิน Climax Silver Mine [45] และ อื่น ๆ โดยต้องให้รายละเอียด ของการใช้งานจากชุมชนรอบ ๆ เหมืองแร่ตามจริง

#### 4.4 เส้นทาง การเข้าถึงพื้นที่โครงการ

เส้นทางเข้าถึงเหมืองแร่ด้วยรถยนต์ตลอดสาย ระบุ เข้าถึงสะดวก มีสิ่งกีดขวาง ไร้ซึ่งการเข้าถึง โดยให้ระบุเงื่อนไข การบำรุงรักษาดูแล ว่าเป็นงบประมาณส่วนตัว เทศบาล รพช. หรือ ทางหลวง ฯลฯ ให้ลงรายละเอียดของการใช้ถนน สาธารณะร่วมกับชาวบ้าน เรื่องระวางของถนนที่สามารถรับ น้ำหนักได้อย่างเหมาะสม เพราะการทำให้ถนนสาธารณะ เสียหายเป็นหลุมเป็นบ่อจะนำมาซึ่งการร้องเรียนอย่างไม่มีที่ สิ้นสุด แต่การจัดการที่ดีก็สามารถทำให้ชาวบ้านในพื้นที่มีส่วน ร่วมกับโครงการได้เช่น เดิมใช้รถบัสขนาดใหญ่เข้าออกใน พื้นที่ใช้ถนนร่วมกับหมู่บ้านเพื่อทัศนศึกษาเหมืองทองคำที่ Sovereign Hill, วิคตอเรีย, ออสเตรเลียสร้างปัญหา หาทาง ออกโดยทำจุดพักรถบัส เพื่อแวะซื้อของฝาก ของที่ระลึกใน ที่ดินติดถนนใหญ่ แล้วนำรถม้าของเหมืองแร่ และรถม้าร่วม บริการของชาวบ้านมารับนักท่องเที่ยว แล้วพาเข้าชมด้วย บรรยากาศของยุคตื่นทองกลับกลายเป็นการสร้างรายได้ของ ชุมชน [46]

#### 4.5 ที่ตั้งของพื้นที่โครงการ แบ่งเป็น พื้นที่เขตเมือง และพื้นที่ ชานเมือง

หากที่ตั้งของพื้นที่เหมืองแร่อยู่ในเขตเมืองอาจมี อุปสรรคด้านราคาที่ดินที่สูงกว่าเขตชานเมือง หากออกแบบ การใช้ประโยชน์ที่ดิน สร้างเป็นสวนสาธารณะหรือสวน พฤษศาสตร์ที่ช่วยเพิ่มพื้นที่สีเขียวในเขตเมือง อาจได้รับการ สนับสนุนมากกว่ารูปแบบอื่น ซึ่งสามารถขอทำเรื่องประเมิน ผลิตภาพที่ดินโครงการ ถ้าหากทิ้งร้างเป็นพื้นที่ว่างเปล่า อีก ประการหนึ่งสามารถชี้ชวนเพื่อนำเสนอโครงการการร่วมทุน

จากประเทศอุตสาหกรรม เช่น ญี่ปุ่น ประเทศเขตยุโรป ฯลฯ การมีผู้ถือหุ้นจากบริษัทที่ประเทศนั้น ๆ ให้สัตยาบัน ในการ ลดคาร์บอนเครดิตจะนำส่วนการมีพื้นที่สีเขียวนี้ ไปทำการ วางแผนเพิ่มการผลิตในโรงงานแม่ที่ประเทศตนเอง หรือการ จัดการการปลดปล่อยคาร์บอน (Carbon Emission) ในแต่ละ ปีได้อีกทางหนึ่งเพื่อลดภาษีในต่างประเทศด้วย

#### 4.6 แผนที่รายละเอียดของพื้นที่โครงการในสภาพปัจจุบัน

หากไม่มีรายละเอียดของแผนที่ต้องทำและนำข้อมูล เข้าถึงในระบบคอมพิวเตอร์ หรือระบบฐานข้อมูลกลาง เช่น ArcGIS เป็นต้น

#### 4.7 แผนที่รายละเอียดของโครงการเหมืองใต้ดินในสภาพ ปัจจุบัน

ส่วนอุโมงค์ และส่วนใต้ดิน ที่ไม่แสดงตามภาพถ่ายทาง อากาศ เป็นไปเพื่อการขนส่ง การทำเหมืองแร่ การสต็อกแร่ การทิ้งหางแร่มูลดิน หากไม่มีต้องทำแผนที่ใต้ดินโดยละเอียด ตลอดจนแผนผังโครงสร้างใต้ดินและส่วนประกอบอาคารคานวม เป็นส่วน ๆ อย่างชัดเจนและอ้างอิงอัตราส่วน เพื่อเป็นข้อมูล ด้านความปลอดภัย และอาจนำไปใช้ในการออกแบบโครงการ การใช้ประโยชน์ในอนาคต

#### 4.8 ลักษณะทางธรณีวิทยาของพื้นที่

รายงานภาคธรณีวิทยาเหมืองแร่ รายงานลักษณะทาง ธรณีวิทยาที่โดดเด่นเกี่ยวกับเหมืองแร่ รายงานลักษณะธรณี ของแร่ที่มีศักยภาพทางเศรษฐศาสตร์ และสภาพธรณีของ บริเวณใกล้เคียง เช่น การสำรวจแร่ของพื้นที่โดยรอบ ของ เหมืองตะกั่วและเงิน แล้วพบลักษณะธรณีวิทยาที่โดดเด่นของ ข้อมูลของแท่งผลึกยิปซัมขนาดใหญ่ 12 เมตรที่ถ้ำ la Cueva De Los Cristales [47] การยุติการทำเหมืองดินของ Ochre Mines, Provence, ฝรั่งเศสแล้วพบลักษณะของชั้นดินหลาย ชั้นที่เป็นริ้วสีแดงต่างเฉดสีกัน แล้วรายงานเป็นสถานที่ ท่องเที่ยวเชิงธรณีวิทยาที่โดดเด่น [48] ประเด็นการนำเสนอ สภาพทางธรณีวิทยาที่โดดเด่นของภูเขาไฟที่ชาวตะวันตกที่ เป็นเหมืองแร่กำมะถันที่สมบูร์น แล้วเมื่อเกิดเกิดเป็นลาวา สิ้นน้ำเงินเรืองแสงในที่มีตซึ่งเกิดจากการสันดาปของกำมะถัน ใน Kawah Ijen Volcano อินโดนีเซีย [49] การรวบรวม รายงานข้อมูลเหล่านี้สามารถทำเป็นประเด็นของการใช้ ประโยชน์เพื่อการท่องเที่ยว เป็นต้น

#### 4.9 ความเสี่ยงด้านธรณีเทคนิค

โครงการเหมืองแร่แต่ละประเภทหลังผ่านการดำเนินงานด้านธรณีเทคนิคที่แตกต่างกัน หรือคือนพื้นที่สัมปทานให้กับรัฐแล้ว ทำให้สภาพพื้นที่หลังยุติกิจกรรมการทำเหมืองของแต่ละเหมืองมีลักษณะเฉพาะ จึงควรประเมินความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้น โดยให้ระดับของความเสี่ยง 3 ระดับ น้อย ปานกลาง และมีความเสี่ยงสูง ซึ่งสามารถนำเงื่อนไขทางธรณีเทคนิคของสภาพเหมืองแร่มาประกอบ อาทิ หินหล่น เสถียรภาพของบ่อเหมือง หน้าผา การทรุดตัวของอุโมงค์ ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญด้านความปลอดภัยและการออกแบบการใช้ประโยชน์ในอนาคต โดยส่วนที่ถูกประเมินว่า มีความเสี่ยงมากนั้น ให้ประกอบการวิเคราะห์เพื่อจะนำไปใช้เพื่อแก้ไข ปรับปรุง ป้องกัน หรือหลีกเลี่ยงการใช้พื้นที่นั้น ส่วนจุดที่มีความเสี่ยงปานกลางและเล็กน้อยนั้น ก็ให้วิเคราะห์เพื่อจะนำหลักการแก้ไข ปรับปรุง หรือป้องกันต่อไป

##### 4.9.1 ส่วนพื้นที่ดินถล่ม

เสถียรภาพของหน้าผาชั้นที่ถล่มไปแล้ว ต้องทำแผนที่หลังเกิดเหตุการณ์ ประกอบลงไปในพื้นที่ด้วย การประเมินพื้นที่ได้รับผลกระทบควรใช้โปรแกรมจำลองสถานการณ์ เพื่อให้เห็นพื้นที่ในกรณีเลวร้ายที่สุดด้วย

##### 4.9.2 ส่วนพื้นที่หินร่วงหล่น

การอุบัติการณ์หินร่วงหล่น เกิดขึ้นได้หลายสาเหตุ เช่น ฝน รอยแตกของหิน ลม การเปลี่ยนสภาพการไหลของน้ำที่แตกต่างกันในแต่ละฤดูกาล เป็นต้น สามารถใช้ข้อมูลเดิมที่มีประวัติการเกิดมาช่วยประเมินได้ หากมีความเสี่ยงอาจติดป้ายเตือน หรือ ประเมินความเสี่ยงโดยใช้โปรแกรมจำลองสถานการณ์เพื่อให้เห็นพื้นที่ผลกระทบในกรณีเลวร้ายที่สุดด้วย

#### 4.10 พื้นที่สนับสนุนส่วนขยายนอกพื้นที่ทำเหมืองแร่

ในกรณีที่พื้นที่ประทานบัตรเดิมได้มีการทำเหมืองนอกเขตประทานบัตรอย่างไม่ตั้งใจ หรือจากการตีความที่ไม่ชัดเจนของการแผนที่ในมาตราส่วนที่หายากจากในอดีต หลังจากทำการรังวัดสำรวจละเอียดมากขึ้นดังเช่น ในปีก่อนพ.ศ. 2528 มีความละเอียดของแผนที่กรมทรัพยากรธรณีจาก 1:250,000 แล้วหลังจากพ.ศ. 2550 ได้มีการปรับความละเอียดเป็น 1:150,000 นั้นหมายความว่า การตีความของพื้นที่ 1 ตารางมิลลิเมตรในแผนที่ของกรมทรัพยากรธรณีดั้งกล่าวมีความ

แตกต่างกัน 62,500 ตารางเมตร และ 22,500 ตารางเมตร เช่นเดียวกันของกรมพัฒนาที่ดินแผนที่หน่วยที่ดินก่อนปีพ.ศ. 2543 และ หลังปีพ.ศ. 2546 มีการปรับรายละเอียดของมาตราส่วนแผนที่จาก 1:50,000 เป็น 1:15,000 ก็จะทำให้มีความแตกต่างกันของพื้นที่ 1 ตารางมิลลิเมตรของแผนที่ของกรมที่ดินดังกล่าวจาก 2,500 ตารางเมตร เป็น 225 ตารางเมตร ตามลำดับ การกองดินทิ้ง หรือแนวต้นไม้เดิมของกิจการเหมืองแร่ที่ยุติแล้วนั้น อาจต้องการพื้นที่เพื่อขยายออกไป เพื่อการปรับปรุงพื้นที่โครงการในการวางเครื่องจักร กลับริด วางเครนยกของ ก่อสร้างซ่อมบำรุง โดยให้ประเมินว่าต้องใช้พื้นที่นั้นในระดับเล็กน้อย คือน้อยกว่า 10 เมตร ปานกลาง คือ 10 - 50 เมตร หรือ มาก คือ มากกว่า 50 เมตรขึ้นไป โดยส่วนนี้ต้องทำรายงานการใช้พื้นที่เพื่อนำเสนอกับเจ้าของพื้นที่ใกล้ชิด แนวเขตเหมืองให้มีการยินยอมอย่างถูกต้องตามกฎหมาย [30]

#### 4.11 แผนที่ทิศทางการไหลของน้ำผิวดินและพื้นที่น้ำท่วม

แผนที่ทิศทางการไหลของน้ำผิวดินและพื้นที่น้ำท่วมถึงตามฤดูกาล ให้ทำลงในแผนที่ โดยใช้โปรแกรมจำลองสถานการณ์น้ำท่วมถึง กรณีปริมาณน้ำฝนประจำปี 10 ปี 50 ปี และ กรณีปริมาณน้ำฝน 100 ปี เพื่อให้เห็นขอบเขตพื้นที่ที่ปลอดภัยที่มีเงื่อนไขอ้างอิงกับเรื่องน้ำท่วมถึง ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญด้านความปลอดภัยจากอุทกภัยและการออกแบบการใช้ประโยชน์ของบ่อเหมืองร้างใช้เป็นแก้มลิงเพื่อเป็นพื้นที่ผันน้ำให้กับเขตเมืองเมื่อมีความจำเป็นในอนาคต

#### 4.12 แผนที่ลม (Wind map)

แผนที่ทางสารสนเทศภูมิศาสตร์จะสามารถใช้เพื่อวางแผนที่หลากหลายเช่น ปริมาณฝุ่น pm2.5 ในฤดูกาล และความเร็วกระแสลม เพื่อการทำแผนที่ลมในบริเวณ เพื่อป้องกันการรบกวนจากชาวบ้าน ชุมชน ซึ่งอาจเกิดจากสถานการณ์อากาศเป็นพิษ ฝุ่นพิษ ข้ามถิ่น โดยข้อมูลเหล่านี้ควรเก็บไว้เป็นสถิติก่อนเริ่มโครงการ ดำเนินโครงการ และประเมินเมื่อโครงการเกิดแล้ว โดยใช้โปรแกรมจำลองสถานการณ์สะสมของฝุ่น pm10 pm2.5 NO<sub>x</sub> SO<sub>x</sub> และข้อมูลสรุปรูปแบบ AQI

#### 4.13 แผนที่น้ำเสีย (Sewage Map)

แผนที่น้ำเสียในบริเวณและรอบบริเวณ ต้องทำการลงข้อมูลแผนที่น้ำเสีย (Mapping Sewage) และ แผนที่การ

ปล่อยน้ำ (Drainage Mapping) จากทางต้นน้ำ ขณะอยู่ในโครงการ หลังจากน้ำผ่านโครงการไปแล้ว เพื่อการประเมินสถานการณ์ว่าจะผันน้ำผ่านโครงการ หรือผันน้ำออกโครงการ แล้วใช้เป็นระบบปิด เพราะทางแร่ ดินกองทิ้ง หรือบ่อกากตกตะกอนน้ำยาแต่งแร่อาจมีโอกาสปนเปื้อนออกจากระบบได้ หลังการคืนพื้นที่สัมปทานต้องมีการชักตัวอย่างทดสอบคุณภาพน้ำเป็นประจำอย่างน้อยปีละ 1 ครั้ง หากพบผลของการวิเคราะห์ต่ำกว่าคุณภาพน้ำมาตรฐานให้ทำการแก้ไข

#### 4.14 แผนที่น้ำใต้ดิน

แผนที่น้ำใต้ดินสามารถใช้ประเมินระดับน้ำใต้ดินในฤดูกาลที่แตกต่างซึ่งมีความสัมพันธ์กับความเสี่ยงของการฝังกลบทางแร่ของเหมืองร้าง การประเมินระดับน้ำใต้ดินและการปนเปื้อนไปสู่บริเวณรอบโครงการ หลังการคืนพื้นที่สัมปทานต้องมีการเจาะหลุมให้พ้นความลึกที่ชาวบ้านใช้น้ำบาดาลเพื่อการอุปโภค หรือสามารถใช้หลุมสำรวจเดิมที่มีความลึกเพียงพอ แล้วใส่ปลอกเหล็ก (Cased Hole) เพื่อรักษาเสถียรภาพของหลุมเจาะพร้อมมีฝาปิด (Cap Hole) ในความระดับน้ำลึกของน้ำบาดาลนั้นให้เจาะรูเพื่อสามารถให้น้ำใต้ดินซึมผ่าน แล้วชักตัวอย่างทดสอบคุณภาพน้ำเป็นประจำอย่างน้อยปีละ 1 ครั้ง หากพบผลของการวิเคราะห์ต่ำกว่าคุณภาพน้ำมาตรฐานให้ทำการแก้ไข

#### 4.15 การสั่นสะเทือน

การวัดระดับความสั่นสะเทือนก่อนและหลังโครงการได้ก่อตั้งแล้ว ควรทำรอบบริเวณ เพื่อป้องกันการร้องเรียนจากชาวบ้าน ชุมชน กรณีนี้การสั่นสะเทือนสามารถเกิดได้จากการใช้รถที่มีน้ำหนักวิ่งผ่านแล้วเกิดความสั่นสะเทือนกับชาวบ้านได้และเรียกค่าเสียหายจากผลกระทบของที่อยู่อาศัยและโบราณสถานเช่นเจดีย์เก่า เพื่อป้องกันการร้องเรียนต้องมีการตรวจวัดและรายงานผลหากมีผลการสั่นสะเทือนในแนวตั้งมากกว่า 1.8 mm/s ต้องเฝ้าระวัง แล้วหากมีระดับความสั่นสะเทือนมากกว่า 7.1 mm/s ต้องหาการแก้ไขจากต้นเหตุของต้นกำเนิดการสั่นสะเทือน เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ฐานรองรับเสียมเสา เครื่องเล่นในสวนสนุกที่ใช้กำลังขับเคลื่อนเครื่องเล่นหรือการขนส่งที่ใช้ระบบราง เป็นต้น [50]

#### 4.16 มลพิษทางเสียง

การวัดระดับความดังของเสียงในโครงการสวนสนุก ลานกิจกรรม การแสดงคอนเสิร์ต ที่จะลงทุนสร้างที่มีการใช้

เครื่องขยายเสียง ควรทำการคำนวณจากระดับความดังของเสียงก่อนริเริ่มโครงการ หรือ ใช้เครื่องขยายเสียงจริง แล้วทำการวัดระดับความดังของเสียงในจุด ชุมชน ศาสนสถาน โรงเรียน โรงพยาบาล หรือแหล่งพักพิงผู้ป่วยที่ใกล้เคียงกับโครงการหากมีระดับความดังของเสียงมากกว่า 85 dB นั้นต้องหาวิธีการปรับปรุงหรือป้องกันกระบวนการจากแหล่งกำเนิดเสียงการทดสอบต้องทำทั้งในตอนกลางวันและกลางคืนเพราะเสียงในตอนกลางคืนจะสามารถหักเหตกกระทบไปจุดที่ไกลกว่าในตอนกลางวัน จากปัจจัยของอุณหภูมิที่ต่างกันของอากาศในชั้นบรรยากาศจะสูงกับภาคพื้นดินอุณหภูมิจะต่ำกว่า [51]

#### 4.17 ความหลากหลายทางชีวภาพ

การประเมินผลกระทบของสัตว์ท้องถิ่น สัตว์น้ำ นก ค้างคาว สัตว์ปีกอื่นที่ข้ามถิ่นเป็นฤดูกาล และพันธุ์พืชประจำถิ่น การเฝ้าระวัง การรุกรานของสัตว์ชนิดพันธุ์ต่างถิ่น (Alien Species) เป็นเรื่องที่ต้องวางแผนและทำการป้องกัน แก้ไข ควบคุม เพื่อไม่ให้ได้รับผลกระทบ เช่นการทำพิพิธภัณฑสถานสัตว์น้ำแล้วเกิดหลุดรอดออกไปขยายพันธุ์นอกบริเวณ หรือการทำอุทยานป่าเขตทุ่งหญ้าสะวันนาแล้วนกได้นำเมล็ดพันธุ์ออกนอกบริเวณ แล้วเกิดการกลายพันธุ์ของพืชประจำถิ่น หรือการให้ความร่วมมือของการทำแผนที่โรคระบาด จากสัตว์สู่คน หรือจากสัตว์สู่สัตว์ซึ่งสร้างความเสียหายในระบบนิเวศอย่างมาก เช่นกันความเป็นไปได้

### 5. แนวทางการวิเคราะห์ของเหมืองร้างในประเทศเพื่อการใช้ประโยชน์

การปล่อยให้เหมืองร้างฟื้นตัวเองตามธรรมชาตินั้นสามารถทำได้หากเหมืองนั้น มีปริมาณการผลิตที่ผ่านมาน้อย ลักษณะการทำเหมืองกระทบต่อน้ำดินน้อย เช่น เหมืองหินแกรนิตหรือเหมืองหินอ่อนใต้ดินพื้นที่หน้าดินด้านบนนั้นจะยังอยู่ในสภาพดีอยู่ รวมทั้งต้องพิจารณาปัจจัยอื่น เช่น ความสมบูรณ์ของพื้นที่โดยรอบ ทางเดินน้ำ และอื่น ๆ

ส่วนเหมืองแร่ที่ใช้สารเคมีในการแต่งแร่ หรือการแต่งแร่แล้วเกิดความเข้มข้นของทางแร่ที่ทิ้งไว้ในปริมาณสูง ตัวอย่างเช่น เหมืองแร่โลหะซัลไฟด์ เหมืองถ่านหินที่มีทางแร่ซัลไฟด์นั้น เหมืองแร่ที่มีทางแร่เป็นโลหะหนัก และอื่น ๆ เหมืองร้างเหล่านี้จะเป็นปัญหาหากไม่ทำการ ติดตาม ดูแล อย่างเป็นระบบ ซึ่งทำให้เกิดต้นทุนในการดูแลติดตาม การที่

นำความคิดที่สร้างสรรค์ร่วมพัฒนานอกจากจะทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการดูแลติดตาม มากไปกว่านั้นจะได้ผลกำไรและเกิดผลดีต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม

เหมืองแร่ได้ดินแห่งหนึ่งของประเทศไทย ที่ปิดตัวลงไป เป็นการทำให้เมืองในหินปูนแข็ง ภายในอุโมงค์บริเวณที่เป็นส่วนของผนังและเพดานไม่แข็งแรงแต่ได้มีการค้ำยันเพื่อให้เกิดความมั่นคงแข็งแรงและปลอดภัย ซึ่งนับแต่เหตุการณ์ทำเหมืองในประทานบัตรแปลงนี้ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2539 เป็นต้นมา ยังไม่เคยปรากฏว่า มีการพังถล่มหรือยุบตัวของพื้นดินเหนืออุโมงค์ผลิตแร่แต่อย่างใด [52] แม้ในปัจจุบันได้เปิดให้เข้าเยี่ยมชมบ้าง แต่หากมีการพัฒนาอย่างเป็นระบบในทุกมิติ เพื่อเป็นแหล่งท่องเที่ยวที่ปลอดภัย จะมีศักยภาพสูงด้านธุรกิจท่องเที่ยวหรือปฏิบัติธรรมเชิงศาสนาเนื่องจาก มีลักษณะตรงกับชุดควอเตอร์ 13 โดยเฉพาะในหมวดที่ 3 เกี่ยวกับที่อยู่อาศัยของภิกษุ ข้อที่ 8 มีชื่อว่า อารยัญญิกังคะ องค์แห่งผู้ถืออุปัชฌาย์อยู่ห่างจากบ้านคนอย่างน้อย 500 ชวรุณ คือ 25 เส้น (เทียบกับระบบเมตริกเท่ากับ 1 กิโลเมตร) ทั้งมีเงื้อมผา โคนไม้ใหญ่ ถ้า รวมถึงจะกลายเป็นเขตอุทยานต่อสัตว์ป่า สัตว์น้ำ ในรัศมีป่าไม้ล้อมรอบรัศมี 1 กิโลเมตร ตลอดจนประเด็นเรื่องของเงินบริจาคของพุทธศาสนิกชนในประเทศ [53] การพิจารณาด้านผลประโยชน์เชิงพื้นที่ต้นน้ำ ปลายน้ำ ทิศทางการไหลแม่น้ำเพื่อใช้ประโยชน์ และอุทยานการศึกษาทางธรณีวิทยาเนื่องจากมีการเปิดหน้าดินออกไปแล้ว ที่ผนังของส่วนเหมืองแร่ ได้แสดงแนวของแร่กาสิยาที่สัมผัสกับแคลไซต์ การแทรกตัวของสฟาเโรไรต์ที่อยู่ในสายแร่หลักที่จะมีประโยชน์ต่อไปในด้านการศึกษา

เหมืองดินเกาลินที่กำลังจะหมดสัมปทานในเขตจังหวัดลำปาง ซึ่งมีสภาพทางธรณีใกล้เคียงได้กับสวนพฤกษศาสตร์ระบบปิด สามารถเตรียมการเพื่อใช้ประโยชน์เป็นพื้นที่ปลูกพืชเฉพาะเพื่อควบคุมมาตรฐานผลิตภัณฑ์ระดับการส่งออกมากกว่าการวางแผนใช้เพื่อเป็นอ่างเก็บน้ำ หรือบริจาคให้กับหน่วยงานรัฐ ซึ่งเป็นประโยชน์กับประเทศในอนาคตด้านการท่องเที่ยวเชิงชีววิทยาและยุทธศาสตร์ของการส่งออกสินค้าเกษตรต่อไป หรือใช้เพื่อเป็นวิทยาเขตของมหาวิทยาลัยซึ่งมีประโยชน์ด้านการศึกษาในระยะยาว

เหมืองหินปูนและเหมืองหินแกรนิตในประเทศ มีแผนการฟื้นฟูคือ การปลูกต้นไม้บนผิวดินเป็นความยากลำบากและ

การลงทุนสูงสำหรับผู้ที่จะต้องปฏิบัติ กรณีศึกษาของการทำโรงแรมพร้อมสวนน้ำเป็นเรื่องที่เสนอแนะให้พิจารณาเพื่อการลงทุน เพราะจะมีรายได้จากลูกค้าโรงแรม และเป็นการส่งเสริมการลงทุนในชุมชน และเพิ่มการจ้างงานให้กับชุมชนในระยะยาว

ความได้เปรียบของพื้นที่เชิงภูมิศาสตร์นั้นเป็นประโยชน์ที่จะนำมาพัฒนาให้เป็นข้อเด่นได้ ซึ่งหลักในการพิจารณาเพื่อพัฒนาเหมืองร้างเพื่อเป็นการใช้ประโยชน์นั้นสามารถนำไปประยุกต์หรือเพิ่มเติมแนวความคิดการพัฒนาที่หลากหลายได้อีกตามความเหมาะสมในแต่ละพื้นที่ต่อไป

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา อาจารย์ และญาติพี่น้องทุกท่าน ที่ให้การสนับสนุนด้านต่าง ๆ ในการดำเนินโครงการ และให้กำลังใจจนโครงการนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีตามที่มุ่งหวังไว้

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Khalil A, Hanich L, Hakkou R, Lepage M. GIS-based environmental database for assessing the mine pollution: A case study of an abandoned mine site in Morocco. Journal of Geochemical Exploration. 2014 Sep 1;144:468-77.
- [2] ThaiPublica. What is the new in The Minerals Enactment and The Comparative Analysis 2017. ThaiPublica dot org. Published October 30, 2018. Accessed October 19, 2022. [https:// thaipublica.org/2018/11/comparative-analysis-mineral-law-2560/](https://thaipublica.org/2018/11/comparative-analysis-mineral-law-2560/)
- [3] Uabharadorn M. The Development of Multimodal Transport and Logistics in Thailand: Plan and Actions. In Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies Vol. 7 (The 8th International Conference of Eastern Asia Society for Transportation Studies, 2009) 2009 (pp. 69-69). Eastern Asia Society for Transportation Studies.



- [4] Radmacher D. In Appalachia, the Mine Cleanup System Has Collapsed. In These Times. Published March 23, 2022. Accessed October 19, 2022.<https://inthesetimes.com/article/appalachia-coal-mining-bankruptcy-cleanup-failure>
- [5] Morrison-Saunders A, McHenry MP, Rita Sequeira A, Gorey P, Mtegha H, Doepel D. Integrating mine closure planning with environmental impact assessment: challenges and opportunities drawn from African and Australian practice. *Impact Assessment and Project Appraisal*. 2016 Apr 2;34(2):117-28.
- [6] Karacan CÖ. Modeling and analysis of gas capture from sealed sections of abandoned coal mines. *International Journal of Coal Geology*. 2015 Jan 15;138:30-41.
- [7] Bretz JH. Origin of the filled sink-structures and circle deposits of Missouri. *Geological Society of America Bulletin*. 1950 Aug 1;61(8):789-834.
- [8] Stoeckl L, Banks V, Shekhunova S, Yakovlev Y. The hydrogeological situation after salt-mine collapses at Sotolvyno, Ukraine. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 2020 Aug 1;30:100701.
- [9] Siriluck, S. Bio Mineral Processing. *The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok*. 2017 Oct 2;27(4):883-92.
- [10] Petley D. Global patterns of loss of life from landslides. *Geology*. 2012 Oct 1;40(10):927-30.
- [11] Zhuang P, Li Z, Wang G, Zou B. Concentration of heavy metals in fish from a mine-affected area and potential health risk. *Fresenius Environmental Bulletin*. 2013 Jan 1;22(8):2402-8.
- [12] Amisah S, Cowx IG. Impacts of abandoned mine and industrial discharges on fish abundance and macroinvertebrate diversity of the upper River Don in South Yorkshire, UK. *Journal of Freshwater Ecology*. 2000 Jun 1;15(2):237-50.
- [13] Verga Matos P, Cardadeiro E, Amado da Silva J, Muylder C. The use of multi-criteria analysis in the recovery of abandoned mines: a study of intervention in Portugal. *RAUSP Management Journal*. 2018;53(2):214-224.
- [14] Koudelková J, Urbanec V, Korandová B, Hummel M. Geomontaneous tourism and the possibilities of utilizing abandoned mine workings in the Czech Republic. *Geoheritage*. 2022 Mar;14(1):29.
- [15] Kimic K, Smaniotto Costa C, Negulescu M. Creating tourism destinations of underground built heritage—The cases of salt mines in Poland, Portugal, and Romania. *Sustainability*. 2021 Aug 28;13(17):9676.
- [16] Salina Turda, spectacol pe bani europeni - Ziar Gazeta de Cluj. Ziar Gazeta de Cluj. 2022 [cited 7 June 2022]. Available from:<https://gazetadecluj.ro/salina-turda-spectacol-pe-bani-europeni/>
- [17] Romania's Salina Turda. Atlas Obscura. 2022 [cited 7 June 2022]. Available from: <https://www.atlasobscura.com/places/salina-turda>
- [18] Company SALINA TURDA SA tax code 26128977 from Romania. *Romanian-companies.eu*. 2022 [cited 7 June 2022]. Available from: <https://www.romanian-companies.eu/salina-turda-sa-26128977/>
- [19] History of mine - About the Salt Mines - Individual tourist - The “Wieliczka” Salt Mine. *Wieliczka-saltmine.com*. 2022 [cited 7 June 2022]. Available from:<https://www.wieliczka-saltmine.com/individual-tourist/about-the-mine/history-of-the-mine>

- [20] Centre U. Wieliczka and Bochnia Royal Salt Mines. Whc.unesco.org. 2022 [cited 7 June 2022]. Available from: <https://whc.unesco.org/en/list/32/>
- [21] Galus D. File : 620351 wieliczka kopalnia soli Z xiiw., Kaplica 07.JPG [Internet]. WIKIMEDIASCOMMONS; 2012 [cited 2023 Nov 21]. Available from: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:620351\\_Wieliczka\\_kopalnia\\_soli\\_z\\_XIIw.\\_,kaplica\\_07.JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:620351_Wieliczka_kopalnia_soli_z_XIIw._,kaplica_07.JPG)
- [22] p C. File:Wieliczka Salt mine.jpg - wikimedia commons [Internet]. 2007 [cited 2023 Nov 21]. Available from: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wieliczka\\_salt\\_mine.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wieliczka_salt_mine.jpg)
- [23] Frame P. Vaseline and Uranium glass. www.orau.org. Published April 18, 2022. Accessed October 19, 2022. <https://www.orau.org/health-physics-museum/collection/consumer/glass/vaseline-uranium-glass.html>
- [24] United States Nuclear Regulatory Commission. Doses in our daily lives. Available at: NRC. gov. Available at: <https://www.nrc.gov/about-nrc/radiation/around-us/doses-daily-lives.html>. Published. 2021.
- [25] Calvert 22. 2022 [cited 7 June 2022]. Available from: <https://www.calvertjournal.com/features/show/5763/landscape-memory-mining-sudeten-mountains-poland>
- [26] Moren J. Uranium Glass [Internet]. Yahoo!; 2006 [cited 2023 Nov 22]. Available from: <https://www.flickr.com/photos/jannem/291361813>
- [27] Wang F, Maidment G, Missenden J, Tozer R. The novel use of phase change materials in refrigeration plant. Part 1: Experimental investigation. Applied Thermal Engineering. 2007 Dec 1;27(17-18):2893-901.
- [28] Mines and Meadows ATV/RV Resort - Underground ATV Riding. Mines and Meadows ATV / RV Resort. 2022 [cited 7 June 2022]. Available from: <https://www.minesandmeadows.com/underground-riding.html>
- [29] Jiangnan X, Menéndez Y, Qingcheng W, Yuzhe Q. From dust to gold: NE Chinese coal city converts abandoned mine pit into racetrack - People's Daily Online. En.people.cn. 2022 [cited 7 June 2022]. Available from: <http://en.people.cn/n3/2020/0902/c90000-9744204.html>
- [30] China's old coal town full speed ahead on motorsport » Borneo Bulletin Online. China's old coal town full speed ahead on motorsport. 2022 [cited 7 June 2022]. Available from: <https://borneobulletin.com.bn/chinas-old-coal-town-full-speed-ahead-motorsport/>
- [31] Eden blossoming again as team prepares to welcome back visitors from Monday May 17. Eden Project. 2022 [cited 7 June 2022]. Available from: <https://www.edenproject.com/media-relations/eden-blossoming-again-as-team-prepares-to-welcome-back-visitors-from-monday-may-17>
- [32] Our origins. Eden Project. 2022 [cited 7 June 2022]. Available from: <https://www.edenproject.com/mission/our-origins>
- [33] Jon. The iconic bio-domes of the Eden Project, Cornwall, England. [Internet]. 2009 [cited 2023 Nov 21]. Available from: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Eden\\_Project,\\_Cornwall,\\_England-29May2009.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Eden_Project,_Cornwall,_England-29May2009.jpg)
- [34] www. Agoda.com. 2022 [cited 7 June 2022]. Available from: [https://www.agoda.com/search?cid=1844104&aid=130589&city=3987&checkIn=2022-06-02&checkOut=2022-06-02T00%3A00%3A00&los=0&rooms=1&adults=2&children=0&childages=&travellerType=-1&selectedproperty=5945299&utm\\_medium=&utm\\_source=&utm\\_campaign=&utm\\_content=&utm\\_term=](https://www.agoda.com/search?cid=1844104&aid=130589&city=3987&checkIn=2022-06-02&checkOut=2022-06-02T00%3A00%3A00&los=0&rooms=1&adults=2&children=0&childages=&travellerType=-1&selectedproperty=5945299&utm_medium=&utm_source=&utm_campaign=&utm_content=&utm_term=)

- [35] Engineering I, Papadopoulos L, McFadden C, Bergan B, Ozdemir D. Construction of an Incredible Underground Hotel in Songjiang Begins. Interestingengineering. com. 2022 [cited 7 June 2022]. Available from: <https://interestingengineering.com/construction-of-an-incredible-underground-hotel-in-songjiang-begins>
- [36] Jiang P, Yu S, Luan W, Chen X, Qin Y, Li Z. The Key Construction Technology Research on the Intercontinental Shanghai Wonderland. Advances in Civil Engineering. 2020 Oct 10;2020:1-6.
- [37] Barbosa VD, Lima HM, Laudares S, Fonseca BM. Mine closure in Ouro Preto: the remnants of the 18th century gold rush and the tourism as an economic opportunity. REM-International Engineering Journal. 2019 Jan;72:39-46.
- [38] Eronen T. Sand battery. [www.polarnightenergy.fi](http://www.polarnightenergy.fi). Published July 5, 2022. Accessed October 19, 2022. <https://polarnightenergy.fi/sand-battery>
- [39] Chrissy. The Abandoned Sulfur Mines (Thiorichia) of Milos. [grecetravelideas.com](http://grecetravelideas.com). Published October 24, 2021. Accessed October 19, 2022. <https://grecetravelideas.com/sulfur-mines-thiorichia-of-milos/>
- [40] Teng R. Sand and the land: Rethinking reclamation in land-scarce Singapore. [thehomeground.asia](http://thehomeground.asia). Published January 29, 2021. Accessed October 19, 2022. <https://thehomeground.asia/destinations/indonesia/sand-and-the-land-rethinking-reclamation-in-land-scarce-singapore/>
- [41] Matha D. Model development and loads analysis of an offshore wind turbine on a tension leg platform with a comparison to other floating turbine concepts: April 2009. National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States); 2010 Feb 1.
- [42] Lamas M, Carral L. OFFSHORE AND COASTAL FLOATING HOTELS: FLOTELS. International Journal of Maritime Engineering. 2011;153(A1).
- [43] Wahyudie A, Jama M, Susilo TB, Mon BF, Shaaref H, Noura H. Design and testing of a laboratory scale test rig for wave energy converters using a double-sided permanent magnet linear generator. IET Renewable power generation. 2017 Jun;11(7):922-30.
- [44] Alcalde J, Heinemann N, James A, Bond CE, Ghanbari S, Mackay EJ, Haszeldine RS, Faulkner DR, Worden RH, Allen MJ. A criteria-driven approach to the CO2 storage site selection of East Mey for the acorn project in the North Sea. Marine and Petroleum Geology. 2021 Nov 1;133:105309.
- [45] Xie H, Zhao JW, Zhou HW, Ren SH, Zhang RX. Secondary utilizations and perspectives of mined underground space. Tunnelling and Underground Space Technology. 2020 Feb 1;96:103129.
- [46] Official site for Melbourne. History & heritage, Sovereign Hill. [www.visitvictoria.com](http://www.visitvictoria.com). Published May 20, 2018. Accessed October 19, 2022. <https://www.visitvictoria.com/regions/goldfields/see-and-do/art-and-culture/history-and-heritage/sovereign-hill>
- [47] Garofalo PS, Fricker MB, Günther D, Forti P, Mercuri AM, Loreti M, Capaccioni B. Climatic control on the growth of gigantic gypsum crystals within hypogenic caves (Naica mine, Mexico)?. Earth and Planetary Science Letters. 2010 Jan 31;289(3-4):560-9.
- [48] Hradil D, Grygar T, Hradilová J, Bezdička P. Clay and iron oxide pigments in the history of painting. Applied clay science. 2003 Apr 1;22(5):223-36.

- [49] Delmelle P, Bernard A. Geochemistry, mineralogy, and chemical modeling of the acid crater lake of Kawah Ijen Volcano, Indonesia. *Geochimica et cosmochimica acta*. 1994 Jun 1;58(11):2445-60.
- [50] Robichaud JM, Eng P. Reference standards for vibration monitoring and analysis. Bretech Engineering Ltd. 2009;70.
- [51] Manwar VD, Mandal BB, Pal AK. Environmental propagation of noise in mines and nearby villages: A study through noise mapping. *Noise & Health*. 2016 Jul;18(83):185.
- [52] The Office of Environmental Restoration and Waste Management. To Clarify the facts of the newspaper news story: “Transfer school to escape from mine collapse disaster””. The Department of Primary Industries and Mines [cited 6 July 2022]. Available from: <http://www.dpim.go.th/service/download?articleid=414&F=511>
- [53] Chaisuwan P. & Charoonseang P. (2018). The Forest Monastery and Environment Preservation Inth Thaksin J. 13(2), 165-176.





# RMUTL Engineering Journal

Faculty of Engineering  
Rajamangala University of Technology Lanna



## วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา