วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

RMUTL Engineering Journal

RMUTL. Eng. J.

ปีที่ 4 ฉบับที่ 1
มกราคม - มิถุนายน 2562

ISSN 2465-4248

วารสารวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
RMUTL Engineering Journal

วัตถุประสงค์

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

เจ้าของ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
เลขที่ : 128 ถนนห้วยแก้ว ตำบลช้างเผือก อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300
โทรศัพท์ : 0 5392 1444 ต่อ 2641, 1236
เวปไซด์ : https://engineering.rmutl.ac.th/journal และ https://www.tci-thaijo.org/index.php/RMUTLEngJ
อีเมล : EngineeringJournal@rmutl.ac.th

ที่ปรึกษากองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ศีลศิริ	สง่าจิตร	ผู้ปฏิบัติหน้าที่อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระศักดิ์	อุรัจนานนท์	รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและกิจการนักศึกษา
รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาติ	หาญวงษา	รองอธิการบดีฝ่ายกิจการพิเศษ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิวัตร	มูลปา	รองอธิการบดีฝ่ายนโยบายและพัฒนาระบบ
นางสาวสุรีย์พร	ใหญ่สง่า	รองอธิการบดีฝ่ายบริหารและสวัสดิการ
ดร.สุรพล	ใจวงศ์ษา	รองอธิการบดีฝ่ายวิจัยและบริการวิชาการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์เกรียงไกร	ธารพรศรี	ผู้ช่วยอธิการบดี
ดร.ปิยมาสฐ์	ตัณฑ์เจริญรัตน์	ผู้ช่วยอธิการบดี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชาติ	สุวัตถี	ผู้ช่วยอธิการบดี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมโภชน์	กูลศิริศรีตระกูล	รักษาราชการแทน คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์เอมอร	ไชยโรจน์	รักษาราชการแทน คณบดีคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร
รองศาสตราจารย์สุรพล	มโนวงศ์	รักษาราชการแทน คณบดีคณะศิลปกรรมและสถาปัตยกรรมศาสตร์
นางอุษามาศ	รัตนวงศ์	รักษาราชการแทน คณบดีคณะบริหารธุรกิจและศิลปศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมเกียรติ	วงษ์พานิช	ผู้อำนวยการสำนักส่งเสริมวิชาการและงานทะเบียน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรุณ	โสตถิกุล	ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยเทคโนโลยีเกษตร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุบงกช	โตไพบูลย์	ผู้อำนวยการวิทยาลัยเทคโนโลยีและสหวิทยาการ
นายอนันท์	ทับเกิด	ผู้อำนวยการสำนักวิทยบริการและเทคโนโลยีสารสนเทศ
ดร.ภาสวรรธน์	วัชรดำรงค์ศักดิ์	รักษาราชการแทน ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา
นายภฤศพงศ์	เพชรบุล	ผู้อำนวยการสถาบันถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่ชุมชน

รองศาสตราจารย์ ดร.โกศล	โอฬารไพโรจน์	รองคณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.อุเทน	คำน่าน	ผู้ช่วยคณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์นทีชัย	ผัสดี	ผู้ช่วยคณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
ดร.สามารถ	ยะเชียงคำ	ผู้ช่วยคณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
นายณรงค์	นันทกุศล	ผู้ช่วยคณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
นายชาคริต	ชูวฒยากร	ผู้ช่วยคณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วัชรินทร์	สิทธิเจริญ	หัวหน้าสาขาวิศวกรรมอุตสาหการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ว่าที่ร้อยตรี ดิเรก	มณีวรรณ	หัวหน้าสาขาครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี
นายประดิษฐ์	เจียรกุลประเสริฐ	หัวหน้าสาขาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม
นายสาคร	ปันตา	หัวหน้าสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
นายศรีธร	อุปคำ	หัวหน้าสาขาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ

ศาสตราจารย์ ดร.โกสินทร์	จำนงไทย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.สักกมน	เทพหัสดิน ณ อยุธยา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.ดนัย	ต.รุ่งเรือง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ	อัครเอกฒาลิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร.ประดิษฐ์	เทอดทูล	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศาสตราจารย์ ดร.กอบวุฒิ	รุจิจนากุล	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศาสตราจารย์ ดร.สุเชษฐ์	ลิขิตเลอสรวง	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Associate Professor Mark	Adom-Asamoah	Kwame Nkrumah University of Science & Technology
รองศาสตราจารย์ ดร.ชาคริต	สิริสิงห	มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.กฤษณ์ชนม์	ภูมิกิตติพิชญ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.บุญยัง	ปลั่งกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.กาณฑ์	เกิดชื่น	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์	ชื่นแขก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.สุเทพ	บุตรดี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.วารุณี	เปรมานนท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.พงศ์พันธ์	แก้วตาทิพย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.สันติรัฐ	นันสะอาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.ปิยะนันท์	เจริญสวรรค์	มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ ดร.วัสสนัย	วรรธนัจฉริยา	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.ขจรศักดิ์	โสภาจารีย์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.วิชัย	ฉัตรทินวัฒน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาต	โสภาแดง	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.นิวิท	เจริญใจ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงษ์	คงประเสริฐ	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมภพ	รอดอัมพร	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ฐปน	ชื่นบาล	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิราภรณ์	ชื่นบาล	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยวัฒน์	สากุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พุทธิพล	ดำรงชัย	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิวา	แก้วปลั่ง	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัลลภ	หาญณรงค์ชัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติศักดิ์	แพบัว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัฐพงษ์	สุวลักษณ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กลิ่นประทุม	ปัญญาปิง	คณะวิศวกรรมศาสตร์

รองบรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษดา	ยิ่งขยัน	คณะวิศวกรรมศาสตร์

กองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.อุเทน	คำน่าน	คณะวิศวกรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.โกศล	โอฬารไพโรจน์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัชรินทร์	สิทธิเจริญ	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย	เดชธรรมรงค์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นเรศ	อินต๊ะวงค์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิวัตร	มูลปา	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทวีชัย	กาฬสินธุ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาคภูมิ	จารุภูมิ	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภกิต	แก้วดวงตา	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กุลทรัพย์	ผ่องศรีสุข	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัฐพล	จีนะวงค์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ดร.บุปผเวช	พันธุ์ศรี	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ดร.ภาณุ	อุทัยศรี	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ดร.ศิวโรฒม์	ศิริลักษณ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ดร.ฐิติพร	พันธ์ท่าช้าง	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ดร.ชัยวัฒน์	กิตติเดชา	คณะวิศวกรรมศาสตร์
นายณัฐชาสิทธิ์	ชูเกียรติขจร	คณะวิศวกรรมศาสตร์
นายปรัชญ์	ปิยะวงศ์วิศาล	คณะวิศวกรรมศาสตร์
นายวิชาญ	จันที	คณะวิศวกรรมศาสตร์
นายเฉลิมชัย	พาราสุข	คณะบริหารธุรกิจและศิลปศาสตร์
นางสาวกวีภรณ์	วชิรรังสิมันต์	คณะบริหารธุรกิจและศิลปศาสตร์
นางวิภาวรรณ	ปลัดคุณ	คณะบริหารธุรกิจและศิลปศาสตร์
นางสาวปรียานุช	อนุสุเรนทร์	คณะบริหารธุรกิจและศิลปศาสตร์
นางสาวพิศาพิมพ์	จันทร์พรหม	คณะบริหารธุรกิจและศิลปศาสตร์

ฝ่ายจัดพิมพ์และเผยแพร่

นายครรชิต	เงินคำคง	คณะวิศวกรรมศาสตร์
นางสาวอุไรวรรณ	สายยะนันท์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
นางสาวจุฑาทิพย์	สุวรรณ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
นางสาวพิชญา	ศรีพรหมมา	คณะวิศวกรรมศาสตร์
นางสาววัลลภา	วงค์ษายะ	คณะวิศวกรรมศาสตร์

จดหมายจากบรรณาธิการ

สวัสดีค่ะ ท่านผู้อ่านทุกท่านที่มีความสนใจในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา (RMUTL Eng. J) วารสารฉบับนี้เป็นวารสาร ฉบับปีที่ 4 ฉบับที่ 1 ประจำเดือนมกราคม – มิถุนายน 2562 ซึ่งเป็นฉบับที่มีการปรับเปลี่ยนทั้งในส่วนของบรรณาธิการและกองบรรณาธิการ โดยเฉพาะเป็นการจัดทำวารสารวิชาการที่เข้าสู่การประเมินของฐานข้อมูลศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (Thai-Journal Citation Index/TCI Centre) จึงยังคงคุณภาพการประเมินบทความโดยผู้ทรงคุณวุฒิ (peer review) ทั้งจากภายในและภายนอกมหาวิทยาลัย โดยมุ่งเน้นให้วารสารวิศวกรรมศาสตร์ (RMUTL Eng. J) เป็นที่ยอมรับในแวดวงทางวิชาการอย่างต่อเนื่อง ซึ่งผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่าน ได้กรุณาเสียสละเวลาให้คำแนะนำและปรับปรุงบทความให้มีเนื้อหาที่มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น นับว่ามีส่วนสำคัญที่ทำให้ทุกบทความที่ได้รับการตีพิมพ์มีคุณภาพทางวิชาการในการแบ่งปันองค์ความรู้ในงานวิจัยกลุ่มวิศวกรรมศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ทั้งในรูปแบบของนวัตกรรม สิ่งประดิษฐ์และอื่น ๆ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ (RMUTL Eng. J) ฉบับนี้ ได้รวบรวมบทความที่ผ่านการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิแล้ว จำนวน 6 บทความ และในจำนวนบทความนี้มีบทความรับเชิญ 1 บทความ ซึ่งเป็นบทความด้านวิศวกรรมไฟฟ้า และบทความทางวิชาการ จำนวน 5 บทความ ทั้งทางด้านวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมอุตสาหการ วิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมเครื่องกลและสิ่งแวดล้อม อนึ่งท่านที่เป็นสมาชิกวารสาร ฯ สามารถติดตามวารสารวิศวกรรมศาสตร์ (RMUTL Eng. J) และอ่านบทความต้นฉบับได้ที่เว็บไซด์ https://engineering.rmutl.ac.th/journal/

ดิฉันในฐานะตัวแทนของกองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ (RMUTL Eng. J) ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ทั้งต่อนักวิจัยที่สนใจส่งบทความมาตีพิมพ์ และผู้ทรงคุณวุฒิ ทั้งภายในและภายนอกมหาวิทยาลัยที่ทำหน้าที่ประเมินบทความ ผู้บริหารมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา และผู้สนับสนุนทุก ๆ ท่าน ที่ให้การสนับสนุน และกองบรรณาธิการที่มีความเข้มแข็ง ซึ่งทำให้การจัดพิมพ์เล่มวารสารแล้วเสร็จตามระยะเวลาที่กำหนดไว้ ท้ายที่สุดนี้ขอเชิญชวนนักวิจัยทั้ง นิสิต นักศึกษา และคณาจารย์ ส่งบทความทางวิชาการเข้าร่วมตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ (RMUTL Eng. J) ฉบับต่อ ๆ ไป

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กลิ่นประทุม ปัญญาปิง)
บรรณาธิการวารวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

สารบัญ

ปีที่ 4 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน 2562

บทความรับเชิญ

การวิเคราะห์ระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนภาคพื้นดินที่กระแสฟ้าผ่าทางตรงขนาด 5 kA 10 kA และ 20 kA — 1
วิศรุต อัศวฉัตรสกุล และ กฤษณ์ชนม์ ภูมิกิตติพิชญ์

บทความวิชาการ

การพัฒนาก้อนอิฐดินดิบผสมใบกล้วยและขุยมะพร้าวเพื่อเป็นวัสดุก่อสร้างสำหรับบ้านดิน — 8
ชูศักดิ์ คีรีรัตน์ และสุธน รุ่งเรือง

เครื่องคัดแยกขนาดลูกมะนาวโดยใช้ระบบสมองกลฝังตัว — 16
โชคชรัตน์ ฤทธิ์เย็น วีรเมธ ปุ้ยหลวง และวรายุทธ แก้วสุข

การออกแบบระบบรากสายดินในสถานีไฟฟ้าโดยวิธีการหาค่าที่เหมาะสุดหลายฟังก์ชันวัตถุประสงค์ — 25
ประสงค์ เจริญวงค์ กฤติเดช บัวใหญ่ และกาณฑ์ เกิดชื่น

การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *Ralstonia solanacearum* ในดินเพาะปลูกด้วยการปล่อยน้ำร้อนจากท่อแนวตั้ง — 34
ณัฐพงษ์ แกมทับทิม และศิริชัย เทพา

การวิเคราะห์อัตราส่วนผสมสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งจากเศษถ่านของกระบวนการเผาอิฐมอญ — 43
ปฐมศก วิไลพล ปิยะนันท์ เจริญสวรรค์ นพรัตน์ สีหะวงษ์ จิรานุวัฒน์ เม่นเกิด ปรากรณ์ ประกอบกลิกรณ์ และปิยะวัต คำบุญ

การวิเคราะห์ระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนภาคพื้นดินที่กระแสฟ้าผ่าทางตรงขนาด 5 kA 10 kA และ 20 kA

Analysis of Lightning Protection for Ground-Mounted Photovoltaic Farm of Direct Lightning Current Size 5 kA 10 kA and 20 kA

วิศรุต อัศวฉัตรสกุล [1*] และกฤษณ์ชนม์ ภูมิกิตติพิชญ์ [2]
[1] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคอำเภอหนองแค
69 หมู่ที่ 11 ตำบลหนองไข่น้ำ อำเภอหนองแค จังหวัดสระบุรี 18140
[2] ห้องปฏิบัติการวิจัยระบบไฟฟ้ากำลังและพลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ถนนรังสิต-นครนายก ต.รังสิต อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12100
Witsarut Assawachatsakul[1*] and Krischonme Bhumkittipich[2]
[1] Provincial Electricity Authority Nongkhae,
69 Moo 11 Nong Khai Nam, Nong Khae, Saraburi, Thailand, 18140
[2] Energy and Power System Laboratory, Department of Electrical Engineering,
Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Rangsit - NakhonNayok Road, Rangsit, Thanyaburi, Pathum Thani, Thailand, 12110
[*] ผู้รับผิดชอบบทความ : witsarut_a@mail.rmutt.ac.th เบอร์โทรศัพท์ : 0-3638-1093

Received: 5 April 2019, Revised: 13 May 2019, Accepted: 23 May 2019

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการวิเคราะห์ผลกระทบของค่าแรงดันและค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดในกรณีของการเกิดเหตุการณ์ฟ้าผ่าในระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนพื้นดินขนาดกำลังการผลิตไม่เกิน 10 MW โดยมีออกแบบของระบบผลิตไฟฟ้าโดยมีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าชนิด 1 เฟส และ 3 เฟส ในตำแหน่งต่างๆ และจำลองเหตุการณ์การเกิดฟ้าผ่าทางตรงรูปคลื่นฟ้าผ่าทางตรง ขนาด 10/350 μs ที่พิกัดกระแสฟ้าผ่าใน 3 ระดับ คือ 5 kA 10 kA และ 20 kA ซึ่งเป็นระดับไม่เกินค่าพิกัดกระแสฟ้าผ่าของประเทศไทย โดยการใช้โปรแกรม PSCAD เวอร์ชั่น 4.6 ในการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ผลจากกราฟรูปคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้าสูงสุดในกรณีของการเกิดฟ้าผ่าลงสายไฟฟ้าซึ่งได้กำหนดจุดด้าน DC บริเวณแผงโซล่าเซลล์ ถึง อินเวอร์เตอร์ และจุดที่ 2 ด้าน AC บริเวณสายไฟเฟส B ก่อนเข้าหม้อแปลง และทำการเปรียบเทียบผลกระทบของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ก่อนและหลังการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า ซึ่งผลการเปรียบเทียบค่าระดับแรงดันไฟฟ้าสูงสุดหลังการออกแบบติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าแล้วนั้น ในกรณีฟ้าผ่าทางตรงด้าน DC มีค่าแรงดันไฟฟ้าในระบบ DC ลดลงเท่ากับ 0.77 kV 0.55 kV และ 0.12 kV ตามลำดับ แรงดันในระบบ AC มีค่าลดลงเหลือ 0.41 kV กรณีฟ้าผ่าทางตรงด้าน AC มีค่าแรงดันไฟฟ้าในระบบ DC มีค่าคงที่เท่ากับ 0.96 kV และแรงดันในระบบ AC มีค่าลดลงเท่ากับ -2.40 kV -4.50 kV -8.66 kV ตามลำดับ จากการออกแบบและวิเคราะห์ผลสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางการออกระบบการป้องกันฟ้าผ่าในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนภาคพื้นดินได้

คำสำคัญ ฟ้าผ่า ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ป้องกันฟ้าผ่า

Abstract

This article analyzes the impact of maximum voltage and maximum current in the event of a lightning incident in the solar power generation system installed on the ground not more than 10 MW. With the installation protection devices for 1 phase and 3 phase. The simulating the direct lightning at waveform, 10/350 μs, which the lightning current in 3 levels is 5 kA, 10 kA and 20 kA, which is not more than the lightning current value of Thailand. By using the PSCAD version 4.6 program to create a model and analyze the results from the waveform graph for maximum voltage and maximum current, which defines the DC side points of the solar cells to the inverter and Point 2 on the DC and AC. The results of the comparison of the maximum voltage level after the

design of the lightning protection device is installed. In the case of direct lightning, the DC side has a voltage drop in the DC system equal to 0.77 kV 0.55 kV and 0.12 kV, respectively. The voltage in the AC system is reduced to 0.41 kV in the case of direct lightning on the AC side with the voltage in the system. DC has a constant value of 0.96 kV and the voltage in the AC system is reduced by -2.40 kV -4.50 kV -8.66 kV, respectively. The design and analysis of results can be used as a guideline for the lightning protection system in solar power generation located on the ground.

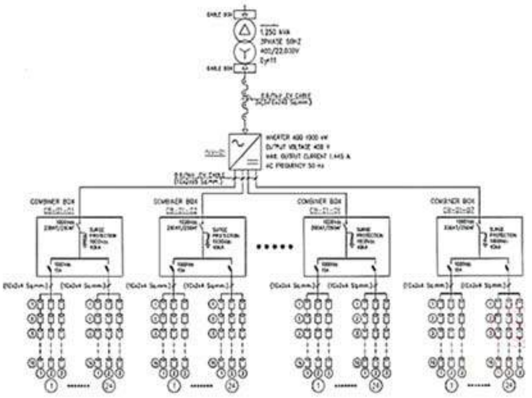
Keywords: lightning, system for solar power generation, lightning protection.

1. บทนำ

ปัจจุบันประเทศไทยมีการสนับสนุนการผลิตไฟฟ้าจากแหล่งผลิตพลังงานทดแทนเนื่องจากนำมาใช้ทดแทนวัตถุดิบประเภทเชื้อเพลิง ซึ่งมีแนวโน้มลดลงอย่างเรื่อยๆ โดยรัฐบาลได้กำหนดแผนการพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกตามเป้าหมายที่กำหนด 25% ใน 10 ปี ตั้งแต่ พ.ศ. 2555-2564 [1] และเป้าหมายตามแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558 - 2579 (AEDP2015) ได้กำหนดการเพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทนทั้งในรูปแบบพลังงานไฟฟ้า ความร้อน และเชื้อเพลิงชีวภาพ เป็นร้อยละ 30 ของการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายใน ปี 2579 จะเทียบเท่ากับการลดใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลได้ราว 39,388 ktoe ซึ่งประเมิน เป็นมูลค่าการลดใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลได้ 590,820 ล้านบาท ดังนั้นจึงทำให้การผลิตไฟฟ้าโดยแหล่งกำเนิดจากจากธรรมชาติ เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำ เข้ามามีบทบาทสำคัญสำหรับในพื้นที่ภาคกลางแหล่งผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เป็นที่นิยมมากเนื่องจากนโยบายของรัฐบาลที่มีการสนับสนุนเกี่ยวกับการลงทุนธุรกิจด้านการใช้พลังงานทดแทนนั้น จึงทำให้เป็นที่สนใจของภาคประชาชนและนักธุรกิจในภาคอุตสาหกรรมที่หันมาติดตั้งการใช้แผงโซล่าเซลล์เพื่อวัตถุประสงค์ในการลดอัตราค่าไฟฟ้าหรือเพื่อการจัดจำหน่ายพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ให้กับการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เมื่อมองในด้านปัญหาของการเกิดฟ้าผ่าลงแผงโซล่าเซลล์ในช่วงฤดูฝนนั้นนับได้ว่ายังเป็นปัญหาสำคัญที่ยังเกิดขึ้นได้บ่อยในประเทศไทยมีลักษณะของฟ้าผ่าแบบขั้วลบที่ค่ากระแสฟ้าผ่าขนาด 20 kA [2] ส่งผลให้อุปกรณ์ในระบบการผลิตเกิดความเสียหายทำกระบวนการผลิตพลังงานไฟฟ้าลดลงหรือไม่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้เลย ดังนั้นในงานบทความนี้จึงเป็นการจำลองเหตุการณ์ฟ้าผ่าในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อวิเคราะห์ผลของค่ากระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นในระบบ โดยการใช้ข้อมูลการศึกษาจากบริษัทแห่งหนึ่งในพื้นที่จังหวัดสระบุรี สำหรับเหตุการณ์ฟ้าผ่าในจังหวัดสระบุรีได้รวบรวมข้อมูลไว้โดยศูนย์ภูมิอากาศ กรมอุตุนิยมวิทยา [3]

2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

บทความนี้ได้เลือกการจำลองกรณีการเกิดเหตุการณ์ฟ้าผ่าในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ของแผงโซล่าเซลล์ในกลุ่มของอินเตอร์ตัวที่ 1 แผงโซล่าเซลล์ ชนิด Thin Film มีอัตราการผลิตค่าพลังงานไฟฟ้าขนาด 125 W จำนวนติดตั้งแผงทั้งสิ้น 8,064 แผง การจัดเรียงของแผงจำนวน 16 Module/ String อัตรากำลังการผลิต 2,000 W/String โดยในแต่ละ Section ของ PV Model จะประกอบด้วยแผง P จำนวน 16 Module 72 String รวม 1,152 แผง ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แบบแผนผังทางไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ [4]

จากนั้นนำข้อมูลมามาสร้างแบบจำลองของแผงโซล่าร์เซลล์ ในโปรแกรม PSCAD โดยในกำหนดข้อมูลในแต่ละ Section ของ PV Model จะประกอบด้วยแผง PV จำนวน 16 Module 72 String รวม 1,152 แผง

2.1 แผงโซล่าร์เซลล์ (PV Array)

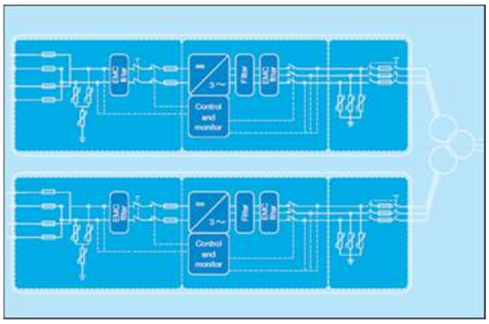
แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เป็นชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนหรือชนิดฟิล์มบาง (Thin Film Solar Cell) ซึ่งมีการจัดเรียงของแผงโซล่าเซลล์ [5] โดยคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงโซล่าเซลล์ได้การทดสอบของผลของค่าของกระแสลัดวงจร (Short-circuit current) ค่าแรงดันเปิดวงจร (Open-Circuit Voltage) คำนวณมาจากสมการที่ (1) และ สมการที่ (2)

$$I_{SC} = 0.24\ kA \quad (1)$$

$$V_{OC} = 0.9952\ kV \quad (2)$$

2.2 อินเวอร์เตอร์ (Inverter)

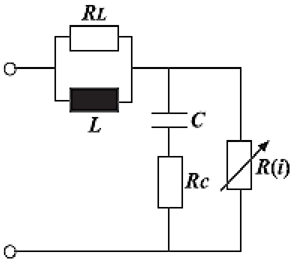
อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในโครงการที่ใช้ในกรณีศึกษาเป็นอินเวอร์เตอร์แบบรวมศูนย์ (Central Inverter) ผลิตภัณฑ์ของ ABB รุ่น PVS800-57-1,000KW-C ขนาด 3 เฟส 400 V ซึ่งเป็นอินเวอร์เตอร์ที่มีผลการทดสอบเป็นไปตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค การสร้างแบบจำลองอินเวอร์เตอร์ชนิด 3 เฟส แบบวงจรบริดประกอบด้วย 6 IGBT [6],[7] ดังแสดงวงจรในรูปที่ 2



รูปที่ 2 การเชื่อมต่ออินเวอร์เตอร์แบบศูนย์รวม

2.3 กับดักฟ้าผ่า (Lightning Arresters)

บทความนี้ได้ออกแบบอุปกรณ์กับดักฟ้าที่ป้องกันในด้านไฟฟ้ากระแสตรง และ ด้านกระแสสลับที่พิกัดป้องกันกระแสฟ้าผ่า ขนาด 40 kA [8] ซึ่งการออกแบบวงจรอุปกรณ์กับดักฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 วงจรของอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า (Surge Arrester) [9]

2.4 ฟ้าผ่า (Lightning)

กรณีฟ้าผ่าทางตรง (Direct Lightning Stroke) ได้ใช้สมการหาค่ากระแสฟ้าผ่าในฟังก์ชันของเวลาตามมาตรฐานของ IEC62305-1 [10] ดังสมการที่ (3)

$$\mathbf{I(t)=\frac{I}{k}\times\frac{(t/T_1)^{10}}{1+(t/T_1)}\times\exp(-t/T_2)} \tag{3}$$

โดยที่รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าขนาด 0.25/100 μs เลือกใช้ค่า k = 0.993 T1=0.45 μs และ T2= 143 μs แทนในสมการที่ (4)

$$I(t)=\frac{I}{0.993}\times\frac{(t/0.45\mu s)^{10}}{1+(t/0.45\mu s)}\times\exp(-t/143\mu s) \tag{4}$$

$$R_T = R_{TO}\{1+\alpha(T-T_O)\}$$

โดยที่รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าขนาด 10/350 μs เลือกใช้ค่า k = 0.93, T1=19 μs T2= 485 μs แทนในสมการที่ (5)

$$I(t)=\frac{I}{0.993}\times\frac{(t/0.93\mu s)^{10}}{1+(t/0.93\mu s)}\times\exp(-t/485\mu s) \tag{5}$$

กรณีฟ้าผ่าทางอ้อม (Indirect Lightning Stroke) เลือกใช้รูปแบบ Wave form ของกระแสฟ้าผ่าในฟังก์ชันของเวลา [11] ดังสมการที่ (6)

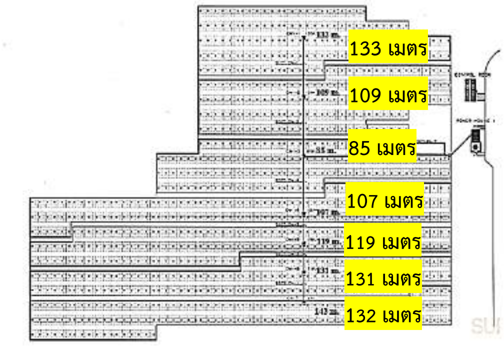
$$I(t)=Ae^{-\alpha t}\sin\omega t \tag{6}$$

โดยที่รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าขนาด 8/20 μs เลือกใช้ค่า *A* = 2.1501, α = 6.05x10^4 μs และ ω = 16.75 kHz แทนในสมการที่ (7)

$$I(t)=2.1501e^{-6.25\times10^4 t}\sin 16.75t \tag{7}$$

2.5 ความต้านทานของสายส่งกำลังไฟฟ้า

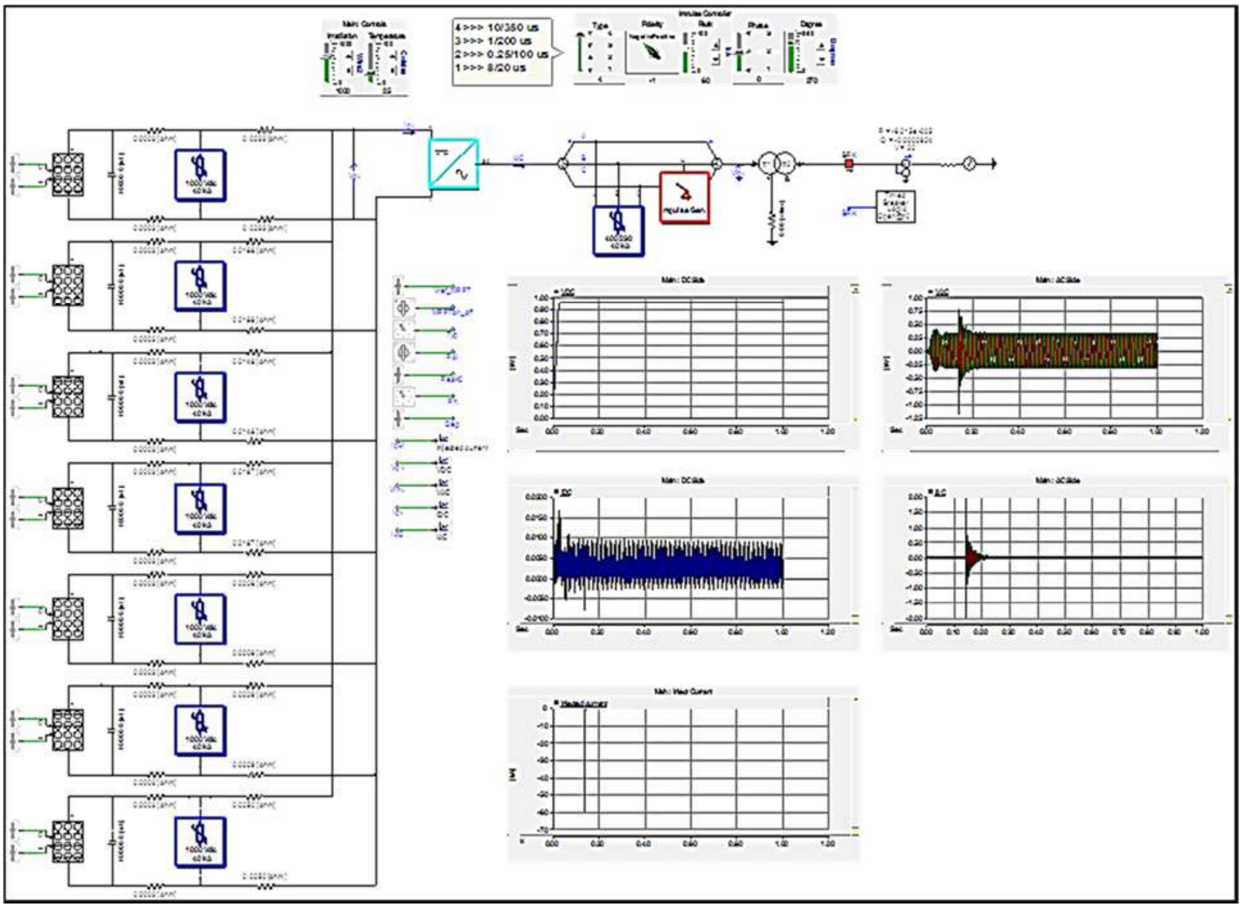
จากข้อมูลของแหล่งผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ทำการศึกษา พบว่าสายไฟที่ใช้เชื่อมต่อระหว่างตู้ Combinerbox ถึง Inverter มีลักษณะเป็นสายตัวนำทองแดงเดินร้อยท่อฝังดินที่อุณหภูมิ 25 °C ชนิดของสาย 0.6/1 kV XLPE (Cross - linked polyethylene) ขนาด 1C X 2 X 95 sq.mm เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำขนาด 11.4 mm. ดังนั้นการคำนวณหาค่าความต้านทานของสายไฟที่ในระยะความยาวสายในจุดต่อต่างๆ [12] แสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ระยะความยาวของสายไฟ

และสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (8)

$$R_T = R_{TO}\{1+\alpha(T-T_O)\} \tag{8}$$



รูปที่ 5 แบบจำลองการเกิดเหตุการณ์ฟ้าผ่าในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ [14]

เมื่อคำนวณค่าความต้านทานสายไฟฟ้า จากตู้ Combinerbox ถึง Inverter (R1-R7) จาก แผงโซล่าเซลล์ ถึง Surge Arrester (R8-R14) และความต้านทานของหม้อแปลงขนาด 1,250 kVA (R15) ดังแสดงค่าในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงค่าความต้านทานของสายไฟฟ้าตามความยาวระยะสายในจุดต่างๆ

ความต้านทานสายไฟ	ระยะสาย (เมตร)	R ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส	R ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส
R1	133	0.0229	0.0233
R2	109	0.0188	0.0188
R3	85	0.0146	0.0148
R4	107	0.0184	0.0187
R5	119	0.0205	0.0208
R6	131	0.0255	0.0229
R7	143	0.0246	0.0250
R8-R14	2	0.0069	0.0003
R15	-	0	0

จากนั้นสร้างแบบจำลองของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม PSCAD [13] ดังแสดงในรูปที่ 5

2.6 ผลกระทบจากฟ้าผ่า

ผลทางความร้อน มีผลทำให้เกิดเพลิงไหม้กับสิ่งที่ถูกฟ้าผ่า เนื่องจากเมื่อเกิดฟ้าผ่าจะมีลำแสงจ้าจากฟ้าผ่าโดยลำแกนมีเส้นผ่านศูนย์กลางเป็น cm และมีอุณหภูมิสูงถึง 30,000 K สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (9)

$$W = U\int_{0}^{\infty} i dt = U_{A-K}Q \qquad (9)$$

ดังนั้นในการออกแบบระบบสายล่อฟ้า ซึ่งต้องใช้เสาล่อฟ้าเป็นตัวล่อหรือรับให้ฟ้าลง และมีสายตัวนำลงดินที่ทำหน้าที่เป็นทางนำกระแสฟ้าผ่าให้ลงสู่ดินโดยเร็วที่สุด โดยไม่ทำให้สายตัวนำลงดินหลอมละลาย หรืออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจนเป็นเหตุให้เกิดเพลิงไหม้ นั่นคือ สายตัวนำลงดินจะต้องมีพื้นที่ภาคตัดขวางขนาดใหญ่ [15]

ผลทางแรงกลบิดหรือแรงระเบิดมีผลทำให้สิ่งที่ถูกฟ้าผ่าพังทลายลงได้ ลักษณะของแรงกลระเบิดที่เกิดขึ้นนั้นมีสองแบบ คือ แบบหนึ่ง เมื่อกระแสไหลผ่านตัวนำแล้ว ทำให้

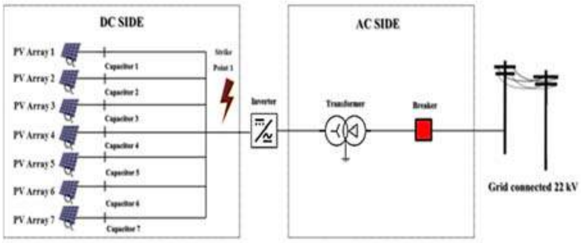
เกิดแรงบิดขึ้นกับตัวนำนั้นเป็นแรงดึงดูดหรือแรงผลัก ขนาดแรงที่เกิดขึ้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสกำลังสองของ I^2 เป็นสัดส่วนกลับระยะห่างระหว่างสายตัวนำทั้งสอง d นั่นคือ แรงที่เกิดขึ้นต่อหน่วยความยาวของตัวนำจะคำนวณได้จากสมการที่ (10)

$$(Fdt)' = \frac{10^{-7}}{d}\int i^2 dt \frac{N\sec}{m} \tag{10}$$

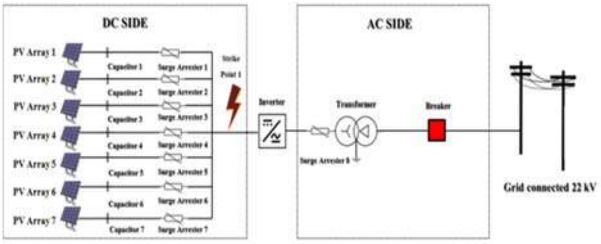
ถ้ากระแสไหลในตัวนำที่เป็นบ่วงหรือวงแหวน จะเกิดแรงทำให้บ่วงนั้นขยายหรือยืดวงกว้างออก ส่วนแรงกลแบบที่สอง เนื่องจากลำฟ้าผ่ามีอุณหภูมิสูงมากทำให้อากาศรอบๆ ลำฟ้าผ่าขยายตัวออกอย่างรวดเร็ว เป็นผลให้เกิดคลื่นความดันในย่านความเร็วเหนือเสียงแผ่กระจายไปรอบลำฟ้าผ่า เกิดเสียงดังสนั่นหวั่นไหวที่เรียบกว่าฟ้าร้องนั่นเอง สำหรับในกรณีที่ฟ้าผ่าลงวัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้า กระแสจะวิ่งผ่านไปตามแนวที่มีความต้านทานน้อยที่สุดถ้ามีความชื้นอยู่ในวัสดุนั้นจะเปลี่ยนเป็นไอ เกิดความดัน อาจมีผลทำให้ระเบิดได้

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

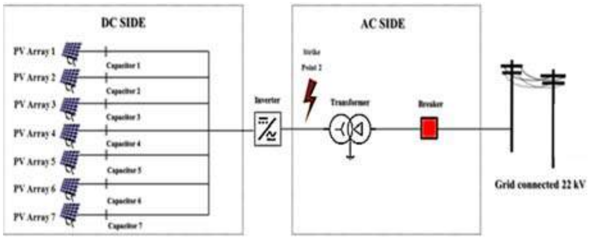
บทความนี้ได้จำลองการเกิดเหตุการณ์การเกิดฟ้าผ่าลงในสายไฟฟ้าในบริเวณ 2 จุด คือ จุดที่ 1 บริเวณสายไฟฟ้าด้าน DC อยู่ช่วงสายไฟจาก แผงโซล่าเซลล์ ถึง อินเวอร์เตอร์ และจุดที่ 2 ด้าน AC บริเวณสายไฟเฟส B ก่อนเข้าหม้อแปลงในลักษณะของการเกิดฟ้าผ่าทางตรงรูปคลื่น 10/350 μs ที่ขนาดค่ากระแสฟ้าผ่า 5 10 และ 20 kA ดังแสดงในรูปที่ 6-9 ตามลำดับ



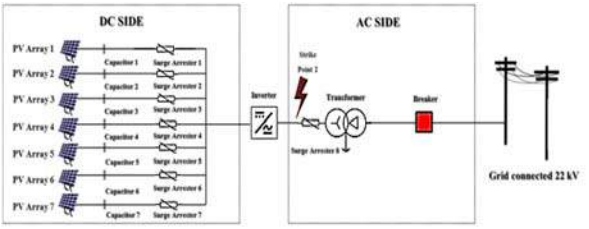
รูปที่ 6 ฟ้าผ่าด้าน DC กรณีไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า



รูปที่ 7 ฟ้าผ่าด้าน DC กรณีติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า



รูปที่ 8 ฟ้าผ่าด้าน AC กรณีไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า



รูปที่ 9 ฟ้าผ่าด้าน AC กรณีติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า

3.1. กรณีฟ้าผ่าด้าน DC

ตารางที่ 2 ค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าสูงสุดกรณีฟ้าผ่าด้าน DC

I_{inject} (kA)	ไม่มีระบบป้องกันฟ้าผ่า				มีระบบป้องกันฟ้าผ่า			
	DC		AC		DC		AC	
	V_{max} (kV)	I_{max} (kA)	V_{max} (kV)	I_{max} (kA)	V_{max} (kV)	I_{max} (kA)	V_{max} (kV)	I_{max} (kA)
5	0.82	-1.34	0.93	-2.58	0.77	-0.25	0.41	-0.11
10	0.66	-3.03	1.66	-5.14	0.55	-0.30	0.41	-0.14
20	0.33	-5.12	3.24	-10.43	0.12	-0.71	0.41	-0.17

จากตารางที่ 2 แสดงค่าของแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดของการจำลองเหตุการณ์การเกิดฟ้าผ่าด้าน DC

3.2. กรณีฟ้าผ่าด้าน AC

ตารางที่ 3 ค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าสูงสุดกรณีฟ้าผ่าด้าน AC

I_{inject} (kA)	ไม่มีระบบป้องกันฟ้าผ่า				มีระบบป้องกันฟ้าผ่า			
	DC		AC		DC		AC	
	V_{max} (kV)	I_{max} (kA)	V_{max} (kV)	I_{max} (kA)	V_{max} (kV)	I_{max} (kA)	V_{max} (kV)	I_{max} (kA)
5	0.96	0.02	-2.42	4.95	0.96	0.01	-2.40	4.95
10	0.96	0.02	-4.52	9.91	0.96	0.01	-4.50	9.90
20	0.96	0.02	-9.37	19.89	0.96	0.01	-8.66	19.82

จากตารางที่ 3 แสดงค่าของแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดของการจำลองเหตุการณ์การเกิดฟ้าผ่าด้าน AC

เมื่อเกิดเหตุการณ์ฟ้าผ่าทางตรงที่รูปคลื่นฟ้าผ่าขนาด 10/350 μs ที่ค่ากระแสฟ้าผ่าขนาด 5 kA 10 kA และ 20 kA ตามลำดับ ในกรณีฟ้าผ่าด้าน DC บริเวณสายส่งช่วงหลังแผง

โซล่าเซลล์ก่อนเข้าอินเวอร์เตอร์ในกรณีก่อนและหลังการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า (Surge Arrester) พบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด V_{max} ในระบบ DC มีค่าลดลงตามลำดับ และในส่วนของค่าแรงดันในระบบ AC ก่อนและหลังติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าพบว่ามีค่าลดลง เมื่อพิจารณาในของค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดในระบบ I_{max} ในส่วนของระบบ DC มีค่าเพิ่มขึ้น และในส่วนของระบบ AC มีค่าลดลง สำหรับกรณีที่เกิดเหตุการณ์ฟ้าผ่าด้าน AC บริเวณจุดที่ 2 บริเวณช่วงสายส่งก่อนเข้าหม้อแปลงขนาด 1,250 kVA ในกรณีก่อนและหลังติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าพบว่า ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด V_{max} ในระบบ DC มีค่าลดลง และในส่วนระบบ AC มีค่าลดลง เมื่อพิจารณาค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด I_{max} ในระบบ DC พบว่ามีค่าลดลงและในระบบ AC พบว่ามีค่าลดน้อยลงเช่นเดียวกัน

4. บทสรุป

จากการจำลองเหตุการณ์การเกิดฟ้าในระบบผลิตพลังไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนพื้นดินที่ขนาดอัตรากำลังการผลิตไม่เกิน 10 MW ซึ่งจากการจำลองเหตุการณ์ฟ้าผ่าในระบบด้าน DC พบว่า แรงดันไฟฟ้าสูงสุดของด้าน DC ในกรณีที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าที่ค่ากระแสฟ้าผ่า 5 kA 10 kA และ 20 kA ตามลำดับ มีค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 0.82 kV 0.66 kV และ 0.33 kV ตามลำดับ เมื่อเทียบกับหลังจากที่ใส่อุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดลดลงเหลือ 0.77 kV 0.55 kV และ 0.12 kV หรือคิดเป็น 6.10% 16.67% และ 63.64% ตามลำดับ ตามลำดับ สำหรับแรงดันไฟฟ้าของด้าน AC มีค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 0.93 kV 1.66 kV และ 3.24 kV ตามลำดับ เมื่อเทียบกับหลังจากที่ใส่อุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดลดลงเหลือ 0.41 kV หรือคิดเป็น 55.91% 75.30% และ 87.34% ตามลำดับ และในกรณีจำลองเหตุการณ์การเกิดฟ้าผ่าด้าน AC พบว่า แรงดันไฟฟ้าของด้าน DC และ AC ทั้งในกรณีที่ไม่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันและติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันด้วย Surge Arrester ขนาด 40 kA มีค่า แรงดันสูงสุดคงที่เท่ากับ 0.96 kV สำหรับแรงดันในระบบ AC ในกรณีที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าที่ค่ากระแสฟ้าผ่า 5 kA 10 kA และ 15 kA มีค่าแรงดันสูงสุดเท่ากับ -2.42 kV -4.52 kV และ -9.37 kV ตามลำดับ เมื่อเทียบกับหลังจากที่ใส่อุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดมีค่าเท่ากับ -2.40 kV -4.50 kV -8.66 kV หรือคิดเป็น 0.83% 0.44% และ 7.58% ทั้งนี้ในส่วนของค่าแรงดันไฟฟ้าที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงนั้นเนื่องมาจากการรักษาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของ Capacitor Bank ขนาด 10,000 µF ที่ติดตั้งอยู่ในระบบนั่นเอง ดังนั้นในการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่านอกจากจะเลือกพิกัดของอุปกรณ์ที่เหมาะสมแล้วการวางตำแหน่งของการป้องกันก็มีส่วนสำคัญรวมทั้งการพิจารณาการทำงานร่วมของอุปกรณ์อื่น เช่น เสาล่อฟ้า การวางระบบกราวด์ดิน เป็นต้น

5. กิตติกรรมประกาศ

ผลการทดลองในบทความนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดีเพราะได้รับความอนุเคราะห์ ความช่วยเหลือจากรองศาสตราจารย์ ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิกิตติพิชญ์ ที่ปรึกษาในการศึกษางานวิจัย ที่ได้ให้คำปรึกษาตลอดจนชี้แนะแนวทางอันเป็นประโยชน์อย่างสูงในการจัดทำวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษาในครั้งนี้ ขอบคุณผู้บังคับบัญชาหัวหน้าแผนกมิเตอร์ และเพื่อนพนักงานการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคอำเภอหนองแค ทุกท่านที่ได้ช่วยเหลือและสนับสนุนการศึกษาทำวิจัยเป็นอย่างดี ขอบคุณ บริษัท 17 อัญญวีร์ โฮลดิ้ง จำกัด ที่สนับสนุนข้อมูลแบบผังทางไฟฟ้าแบบผังทางโยธาและรายละเอียดอุปกรณ์ทางไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในพื้นที่จังหวัดสระบุรีให้ได้นำมาใช้เป็นกรณีศึกษาในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ขอขอบคุณกองวิจัย การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่ได้สนับสนุนโปรแกรม PSCAD Version 4.6 ขอบคุณเพื่อนนักศึกษาระดับปริญญาโท รุ่นที่ 10 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือแนะนำตลอดช่วงเวลาของการศึกษาและทำการวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Ministry of Energy. Alternative Energy Development Plan: AEDP2015. Available from: http://www.eppo.go.th/index.php/th/plan-policy/tieb/aedp [Accessed 15th May 2016].

[2] Klairaung N, Sapho W, Densungnern P. Lightning performance improvement of 22 kV distribution lines. Proceedings of the 48th Kasetsart University Annual Conference; 2010 Feb 3-5; Bangkok, Thailand. 2010. p. 421-428.Thai.

[3] Thai Meteorological Department. Climate center. Report natural disasters in the country. Available from: http://climate.tmd.go.th/disaster/content [Accessed 15th May 2016].

[4] Solar EPCF Co. Ltd. Power plant 6 MW solar power, Ban Lam 1 project. Unpublished material 2015.Thai.

[5] Kruengngam D, Chonsen C, Toprasertphong B. Amorphous silicon solar cell. Full research and

development reports. Dept. of Electrical Engineering, Chulalongkorn University; 1994.Thai.

[6] Zaini NH, Ab-Kadir MZ, Izadi M, Ahmad NI, Radzi MA, Azis N. On the effect of lightning on a solar photovoltaic system. Proceedings of the 33rd International Conference on Lightning Protection; 2016 Sep 25-30, Estoril, Portugal. 2016. p. 1-4.

[7] Kalbat A. PSCAD simulation of grid-tied photovoltaic systems and total harmonic distortion analysis. Proceedings of the 3rd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems; 2013. p. 1-6.

[8] Jia W, Xiaoqing Z. Double-exponential expression of lightning current waveforms. Proceedings of the 4th Asia - Pacific Conference on Environmental Electromagnetics, 2006. p. 320-323.

[9] Brito V, Lira RS, Costa EG, Maia JA. A Wide-range model for metal-oxide surge arrester. IEEE Transactions on Power Delivery. 2018 Feb; 33(1):102-109.

[10] The Engineering Institute of Thailand Under H.M. The King's Patronage (EIT). Lightning protection standards: Part 1 General requirements. Bangkok: Chulalongkorn University Printing House; 2014.Thai.

[11] Yutthagowith P, Pattanadech N. Improved least-square prony analysis technique for parameter evaluation of lightning impulse voltage and current. IEEE Transactions on Power Delivery. 2016;31(1):271-276.

[12] Kulworavanichpong T. Power Transmission System. 1st ed, Bangkok; Powerjoe; 2006. p. 40-42.Thai.

[13] Powered by Manitoba Hydro International Ltd. PSCADTM power systems computer aided design. Available from https://hvdc.ca/uploads/knowledge_base/what_s_new_in_pscad_v4_6_0.pdf [Accessed 15th May 2018].

[14] Assawachatsakul W. Design guidelines for lightning protection systems for solar power generation systems ground installation in the case of direct lightning. Proceedings of the 41th Electrical Engineering Conference; 2018 Nov 21-23; Ubon Ratchathani. Thailand: 2018. p. 224-227.Thai.

[15] Sangkasaad S. High Voltage Electrical Engineering. Bangkok: Chulalongkorn University; 2004.Thai.

การพัฒนาก้อนอิฐดินดิบผสมใบกล้วยและขุยมะพร้าวเพื่อเป็นวัสดุก่อสร้างสำหรับบ้านดิน

Development of Adobe Bricks mixed with Banana Leaves Fiber and Coir as Construction Materials for Earthen House

ชูศักดิ์ คีรีรัตน์ [1*] และสุธน รุ่งเรือง [2]

[1] สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ถนนเพชรเกษม อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ 77110

[2] สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ถนนพุธมณฑล สาย 5 อำเภอพุธมณฑล จังหวัดนครปฐม 73170

Chusak Kererat [1*] and Suthon Rungruang [2]

[1] Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin Petchkesem Road, HuaHin, Prachuap Khiri Khan, Thailand, 77110

[2] Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin Phutthamonthon Sai 5 Road, Phutthamonthon, Nakhon Pathom, Thailand, 73170

[*]ผู้รับผิดชอบบทความ: chusak.k@rmutr.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 0-3261-8542

Received: 15 August 2018, Revised: 23 September 2018, Accepted: 19 October 2018

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาก้อนอิฐดินดิบผสมวัสดุทางการเกษตรได้แก่ ใบกล้วยและขุยมะพร้าว การศึกษาครั้งนี้ควบคุมร้อยละส่วนผสมของดินและทราย เท่ากับ 85:15 ปริมาณน้ำร้อยละ 20 โดยน้ำหนักแห้งของดินผสมทราย ใช้สัดส่วนผสมของวัสดุทางการเกษตรแทนที่ปริมาณดินผสมทราย ร้อยละ 0 3 5 8 และ 10 โดยน้ำหนักแห้ง ขึ้นรูปและนำไปตากแดดเป็นเวลา 20 วัน หลังจากนั้นนำไปทดสอบกำลังต้านทานแรงอัด กำลังต้านทานแรงดัด ความหนาแน่น และการหดตัว เปรียบเทียบกับก้อนอิฐดินดิบที่มีส่วนผสมของแกลบจากศูนย์การเรียนรู้เศรษฐกิจพอเพียงเรือนจำชั่วคราวเขากลิ้ง จากผลการทดสอบคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรม แสดงให้เห็นว่าก้อนอิฐดินดิบที่มีส่วนผสมของใบกล้วย ร้อยละ 3 มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมเหมาะสมที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกับก้อนอิฐดินดิบจากศูนย์การเรียนรู้เศรษฐกิจพอเพียงเรือนจำชั่วคราวเขากลิ้งมากที่สุด กำลังต้านทานแรงอัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 8.02 และกำลังต้านทานแรงดัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 50 ซึ่งสามารถนำไปใช้ทดแทนก้อนอิฐดินดิบจากศูนย์การเรียนรู้เศรษฐกิจพอเพียงเรือนจำชั่วคราวเขากลิ้งได้ และมีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้เป็นวัสดุก่อสร้างสำหรับบ้านดิน

คำสำคัญ ก้อนอิฐดินดิบ ขุยมะพร้าว ใบกล้วย บ้านดิน วัสดุทางการเกษตร

Abstract

The purpose of this research is to develop the adobe bricks mixed with the agricultural materials which are the banana leaves fiber and the coir. The proportion of the soil and sand was controlled at 85:15 and the water proportion was 20% by dry weight of the soil-sand mixture. This research used the agricultural materials to replace the soil-sand mixture at the ratio of 0, 3, 5, 8 and 10% by dry weight. The samples were dried in the sun for 20 days and then they were tested for their compressive strength, flexural strength, density, and drying shrinkage. These properties were compared to that of the adobe bricks containing rice husk made by the Sufficiency Economy Learning Center, Khao Kling Temporary Prison. According to the test results, the appropriated proportion of the agricultural mixture is banana leaves fiber of 3%. The density of the adobe brick is close to that made by the Sufficiency Economy Learning Center, Khao Kling Temporary Prison. The compressive strength and the flexural strength increase by 8.02% and 50%, respectively. Therefore, they can use to substitute the adobe bricks made by the Sufficiency Economy Learning Center, Khao Kling Temporary Prison and use as a building material for earth houses.

Keywords: adobe bricks, coir, banana leaves fiber, earthen house, agricultural materials.

1. บทนำ

ปัจจุบันมีผู้ที่ให้ความสนใจในการสร้างบ้านดินเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก และได้พัฒนามาเป็นสถาปัตยกรรมทางเลือกหนึ่งสำหรับผู้ที่มีรายได้น้อย เนื่องจาก เล็งเห็นว่าบ้านดินสามารถสร้างได้ด้วยตนเองและใช้งบประมาณในการก่อสร้างไม่สูงมากนัก และสิ่งที่สำคัญคือวัสดุที่ใช้ในการสร้างบ้านดินนั้นไม่ก่อให้เกิดผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม [1],[2] แต่เนื่องจากการก่อสร้างบ้านดินพัฒนาขึ้นจากภูมิปัญญาของชาวบ้านที่มีการถ่ายทอดจากรุ่นสู่รุ่นมาโดยการปฏิบัติแบบลองผิดลองถูก ซึ่งวิธีการก่อสร้างเหล่านี้ไม่ได้ผ่านการวิเคราะห์ตามหลักวิศวกรรมหรือออกแบบตามหลักสถาปัตยกรรม จึงส่งผลให้เกิดปัญหาในการก่อสร้าง เช่น การพังทลายของโครงสร้าง และปัญหาระยะยาวของอาคารหลังจากสร้างเสร็จแล้ว ซึ่งทำให้อาคารไม่สามารถคงอยู่ได้นานตามที่ควรจะเป็น หรือต้องมีการซ่อมแซมบ่อยครั้ง ดังนั้นจึงควรมีการพัฒนาเพื่อแก้ไขในส่วนต่างๆเพื่อให้ประชาชนในท้องถิ่นสามารถนำไปสร้างด้วยตัวเองได้ โดยวัสดุที่นำมาใช้สร้างบ้านเป็นวัสดุที่มาจากธรรมชาติ ได้แก่ ดินเหนียว ทราย และวัสดุทางการเกษตร

การพัฒนาการก่อสร้างบ้านดินด้วยวิธีการใช้ก้อนอิฐดินดิบจึงเป็นแนวทางที่เป็นประโยชน์ต่อผู้ที่ต้องการสร้างบ้านดินด้วยตนเองอย่างมีประสิทธิภาพ แต่การผลิตก้อนอิฐดินดิบนั้นต้องใช้ดินเหนียวเป็นวัสดุหลักซึ่งมีข้อจำกัดตามธรรมชาติหลายประการคือ เมื่อนำมาผลิตเป็นก้อนอิฐแล้วมักเกิดการแตกร้าวและเกิดการหดตัวของวัสดุ โดยทั่วไปจึงมีผู้นิยมใช้วัสดุทางการเกษตรมาเป็นส่วนผสมเพื่อช่วยในการยึดเกาะตัวของดินเหนียว และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานของก้อนอิฐดินดิบ [3],[4] เช่น การเพิ่มความแข็งแรง การลดการหดตัว เป็นต้น ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นในการหาสัดส่วนผสมของวัสดุทางการเกษตร ได้แก่ ใบกล้วย และขุยมะพร้าว สำหรับใช้เป็นส่วนผสมของก้อนอิฐดินดิบ และศึกษาคุณสมบัติในด้านกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัด และการลดการหดตัว เนื่องจากปัจจุบันการทำก้อนอิฐดินดิบยังไม่มีการกำหนดสัดส่วนผสมวัสดุทางการเกษตรที่เหมาะสม แต่ใช้วิธีประมาณการจากความคุ้นเคยของผู้ผลิต ซึ่งส่งผลให้ก้อนอิฐดินดิบมีคุณสมบัติในการรับแรงได้ไม่แน่นอนอีกด้วย

2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บ้านดินส่วนใหญ่ที่ทำในประเทศไทย มักจะใช้วิธีการก่อด้วยอิฐดินดิบ เนื่องจากการก่อสร้างอิฐดินดิบเป็นโครงสร้างผนังรับน้ำหนักจึงไม่จำเป็นต้องมีเสาแต่การทำช่องเปิดที่มีขนาดกว้าง จะต้องใช้การก่ออิฐให้มีลักษณะเป็นโดมโค้งหรือโดมยอดแหลมเพื่อรับน้ำ หรือใช้ไม้ท่อน และไม้แผ่นทำเป็นคานทับหลังเพื่อรับน้ำหนักอิฐจากด้านบนบ้านดินส่วนใหญ่ที่ทำในประเทศไทยมักจะใช้วิธีนี้ในการก่อสร้างซึ่งข้อดีของการสร้างด้วยอิฐดินดิบสามารถทยอยทำอิฐเก็บรวบรวมไว้ได้ เมื่อถึงเวลาที่จะเริ่มสร้างหรือมีจำนวนอิฐดินดิบที่เพียงพอแล้วจะสามารถสร้างได้เร็ว ผนังแห้งเร็ว เมื่อก่อเสร็จแล้วสามารถฉาบได้ทันที แต่มีข้อจำกัดในเรื่องการก่อสร้างผนังที่มีความโค้งมากไม่ได้ ต้องมีพื้นที่ในการตาก และเก็บอิฐดินพอสมควรสำหรับ สัดส่วนผสมก้อนอิฐดินดิบขึ้นอยู่กับสภาพของดินแต่ละพื้นที่ แต่ส่วนผสมหลักของก้อนอิฐดินดิบแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ (1) ดินเหนียว ซึ่งโดยธรรมชาติของดินเหนียวจะเกิดการหดตัวเมื่อแห้ง ถ้าอิฐดินดิบมีการแตกร้าว แสดงว่ามีส่วนผสมของดินเหนียวมากเกินไป (2) ทราย เป็นส่วนผสมที่ช่วยลดการหดตัวและลดการแตกร้าวของดินเหนียว ทรายช่วยให้อิฐดินดิบมีความแกร่งขึ้น แต่หากมีปริมาณมากเกินไปจะทำให้ไม่แข็งแรง และอิฐดินดิบถูกน้ำฝนชะล้างได้ง่าย และ (3) แกลบหรือเส้นใยที่มีความเหนียว เป็นส่วนที่ช่วยยึดเนื้อดินเข้าด้วยกัน ลดการแตกร้าวเมื่อแห้ง และยังช่วยเพิ่มกำลังอัดของก้อนอิฐดินดิบ [5]

การศึกษาในอดีตมีนักวิจัยหลายท่านได้นำวัสดุทางธรรมชาติมาใช้ในการทำก้อนอิฐดินดิบ โดยเมื่อนำดินเหนียวมาผสมกับแกลบและขุยมะพร้าว พบว่าช่วยเพิ่มกำลังอัดและลดการหดตัวของอิฐดินดิบ แต่ในส่วนผสมที่มีแกลบเกินกว่าร้อยละ 3 จะทำให้กำลังอัดลดลง ส่วนการอบก้อนอิฐในตู้อบนั้นทำให้ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้น และพบว่าส่วนผสมที่มีปริมาณแกลบปนอยู่จะให้ค่ากำลังอัดที่สูงกว่า ค่าการนำความร้อนน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ขุยมะพร้าวเป็นส่วนผสม [6] นอกจากนี้ผลจากการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของอิฐดินดิบผสมหญ้าแฝกและฟางข้าว เพื่อใช้เป็นวัสดุก่อสร้างบ้านต้นทุนต่ำ โดยหญ้าแฝกและฟางข้าวทำหน้าที่เป็นวัสดุเสริมแรงและดินเหนียวทำหน้าที่เป็นตัวประสาน พบว่าสัดส่วนผสมที่ให้ค่าคุณสมบัติทางกลที่ดีที่สุดคือ 30:55:15 (ดินเหนียว : หญ้าแฝก : ทราย) โดยส่วนผสมดังกล่าวมีค่ากำลังอัด และกำลังดัดสูงที่สุด เมื่อพิจารณาสัดส่วนผสมเดียวกันอิฐดินดิบผสมหญ้าแฝกให้ค่าคุณสมบัติทางกลสูงที่สุด และยังพบว่าที่สัดส่วนผสมเดียวกันอิฐดินดิบผสมหญ้าแฝก ให้ค่าคุณสมบัติทางกลสูงกว่าอิฐดินดิบผสมฟางข้าว [7] สำหรับการใช้หญ้าแฝกเป็นส่วนผสมของอิฐดินดิบ โดยผันแปรสัดส่วนของปริมาณหญ้าแฝกที่ใช้แทนที่ดินต่อปริมาตรตั้งแต่ร้อยละ 0 ถึง 80 พบว่ากำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงแบกทานของก้อนอิฐแปรผกผันกับปริมาณหญ้าแฝกที่แทนที่ อย่างไรก็ตามการแทนที่ด้วยหญ้าแฝกในปริมาณที่เหมาะสมสามารถปรับปรุงความสามารถในการรับแรงดัดของอิฐได้ เป็นผลจากความสามารถในการรับแรงดึงของหญ้าแฝก การใช้ปริมาณหญ้าแฝกมากขึ้นสามารถลดความหนาแน่นของก้อนอิฐลงได้ และจากผลการทดสอบวัดค่าความเป็นฉนวนพบว่าอิฐดินดิบ

ผสมหญ้าแฝกสามารถลดผลกระทบจากอุณหภูมิได้เป็นอย่างดีตามปริมาณการแทนที่ของหญ้าแฝกที่มากขึ้น [8] จากการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและความร้อนของก้อนอิฐดินดิบผสมแกลบและกากอ้อย เพื่อก่อสร้างบ้านดินที่มีผลต่อคุณสมบัติด้านต่างๆของก้อนอิฐดินดิบ ได้แก่ กำลังรับน้ำหนัก การดูดน้ำและการนำความร้อนของก้อนอิฐดินดิบ โดยใช้วัสดุทางการเกษตรแทนที่ดินเหนียวในสัดส่วนร้อยละ 0 1 2 3 และ 6 พบว่าการแทนที่ดินเหนียวด้วยแกลบและกากอ้อย สามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัด และช่วยลดการหดตัวของก้อนอิฐดินดิบได้ แต่การใช้แกลบเกินกว่าร้อยละ 3 โดยน้ำหนักส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของก้อนอิฐดินดิบมีค่าลดลงและก้อนอิฐดินดิบผสมกากอ้อยมีค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่าก้อนอิฐดินดิบผสมแกลบในทุกสัดส่วนผสม สำหรับการนำความร้อนของก้อนอิฐดินดิบพบว่าเมื่อสัดส่วนของวัสดุทางการเกษตรเพิ่มมากขึ้น ทำให้ก้อนอิฐดินดิบมีความสามารถในการนำความร้อนต่ำลง ซึ่งก้อนอิฐดินดิบผสมกากอ้อยมีค่าการนำความร้อนต่ำกว่าก้อนอิฐดินดิบผสมแกลบ [9] ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ [10] ที่ใช้กากอ้อยเป็นส่วนผสมของก้อนอิฐดินดิบ โดยพบว่าช่วยเพิ่มความคงทน กำลังรับแรงอัด และลดการหดตัว นอกจากนี้การปรับปรุงคุณภาพก้อนอิฐดินดิบด้วยซีเมนต์และน้ำยางพารายังช่วยให้เพิ่มความทนทาน กำลังรับแรงอัด และลดการดูดซึมน้ำ [11]

2.2 วิธีการดำเนินการวิจัย

2.2.1 วัสดุที่ใช้ในการทำก้อนอิฐดินดิบ

วัสดุที่ใช้ในการวิจัยดังแสดงในรูปที่ 1 ได้แก่

1) ดินสภาพแห้งที่มีร้อยละผ่านตะแกรงเบอร์ 200 เท่ากับ 56.01 มีค่าขีดจำกัดเหลว ขีดจำกัดพลาสติก ขีดจำกัดหดตัว และค่าความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ ร้อยละ 34.5 ร้อยละ 19.87 ร้อยละ 14.45 และ 2.71 ตามลำดับ

2) ทรายละเอียดสภาพแห้ง ร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 40

รูปที่ 1 วัสดุที่ใช้ทำก้อนอิฐดินดิบ (ก) ดิน (ข) ทรายละเอียด (ค) ใบกล้วยบด (ง) ขุยมะพร้าว

3) ใบกล้วยตากแห้ง ผ่านการย่อยด้วยเครื่องบดย่อย มีลักษณะเป็นเส้นความยาวประมาณ 1-6 เซนติเมตร

4) ขุยมะพร้าว มีลักษณะเป็นขุยผสมเส้นใย

2.2.2 สัดส่วนผสมของวัสดุทางการเกษตร

สัดส่วนผสมของวัสดุทางการเกษตร กำหนดสัดส่วนผสมของใบกล้วย และขุยมะพร้าว แทนที่ปริมาณดินผสมทรายร้อยละ 0 3 5 8 และ10 โดยน้ำหนักแห้ง โดยกำหนดสัดส่วนผสมระหว่างดินต่อทรายเท่ากับ ร้อยละ 85:15 (เป็นสัดส่วนที่ได้จากการทดสอบนำทรายกับดินผสมกันหลายสัดส่วน โดยทดสอบทำเป็นก้อนอิฐดินดิบขนาด 5×5×5 เซนติเมตร แล้วนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัด พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณทรายมากขึ้นจะให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงขึ้น แต่เมื่อมีปริมาณทรายเกินร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก กำลังรับแรงอัดของก้อนอิฐดินดิบจะมีค่าลดลง) และสัดส่วนผสมระหว่างดินผสมทรายต่อน้ำเท่ากับ ร้อยละ 100:20 (เป็นสัดส่วนที่ได้จากการทดสอบโดยนำน้ำกับดินผสมกันหลายสัดส่วน ซึ่งพบว่าปริมาณน้ำที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก สามารถทำให้การขึ้นรูปก้อนอิฐดินดิบง่ายและเหมาะสมที่สุด) และเพื่อไม่ให้ผลจากการดูดซึมน้ำของใบกล้วยและขุยมะพร้าวทำให้ส่วนผสมแห้งไม่สามารถขึ้นรูปได้ จึงเติมน้ำเพิ่มตามร้อยละการดูดซึมน้ำโดยน้ำหนักของวัสดุทางการเกษตร ได้แก่ ร้อยละ 79.02 สำหรับใบกล้วย และร้อยละ 210.42 สำหรับขุยมะพร้าว (ได้จากการทดสอบหาร้อยละการดูดซึมน้ำ) ซึ่งปริมาณสัดส่วนผสม ดังแสดงในตารางที่ 1 จำนวนของก้อนอิฐดินดิบสำหรับแต่ละสัดส่วนผสมเท่ากับ 15 ก้อน โดยใช้ทดสอบกำลังรับแรงอัดจำนวน 5 ก้อน ทดสอบกำลังรับแรงดัดจำนวน 5 ก้อน และทดสอบการหดตัวจำนวน 5 ก้อน

ตารางที่ 1 ปริมาณสัดส่วนผสมของก้อนอิฐดินดิบ

สัดส่วนของดินกับทราย (85:15) (ร้อยละ)	วัสดุทางการเกษตร	ปริมาณการแทนที่ดินผสมทราย (ร้อยละ)
100	ใบกล้วย	0
97		3
95		5
92		8
90		10
100	ขุยมะพร้าว	0
97		3
95		5
92		8
90		10

2.2.3 ขั้นตอนการทำก้อนอิฐดินดิบ

การจัดทำก้อนอิฐดินดิบ มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) นำดินใส่กระบะ แล้วใช้ค้อนยางทุบให้แตกออกจากกัน ไม่ให้ดินจับตัวกันเป็นก้อน เพื่อช่วยให้ดินดูดซึมน้ำได้ดีและเร็วขึ้น

2) เติมน้ำในกระบะผสมคอนกรีต แล้วจึงใส่ดิน (ตามสัดส่วนที่กำหนดไว้) ถ้าหากใส่ดินลงไปก่อนจะทำให้น้ำซึมลงไปข้างล่างได้ยาก แช่ดินทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง โดยประมาณเพื่อให้น้ำซึมลงไปในเนื้อดินได้เต็มที่

3) นำดินที่แช่น้ำไว้ 24 ชั่วโมง ไปผสมกับทรายละเอียดในเครื่องโม่ปูนฉาบผสมจนเป็นเนื้อเดียวกัน หลังจากนั้นใส่น้ำลงไปเพิ่มในปริมาณร้อยละ 79.02 ของน้ำหนักใบกล้วยสำหรับก้อนอิฐดินดิบผสมใบกล้วย และร้อยละ 210.42 ของน้ำหนักขุยมะพร้าวสำหรับก้อนอิฐดินดิบผสมขุยมะพร้าว แล้วจึงใส่ใบกล้วย หรือขุยมะพร้าวตามสัดส่วนที่กำหนดลงไปผสมกับดินผสมทรายในเครื่องโม่ปูนฉาบทำการผสมจนส่วนผสมเข้ากัน

4) นำอุปกรณ์ขึ้นรูปก้อนอิฐดินดิบ หรือไม้แบบขนาด 20×40×10 เซนติเมตร ที่เตรียมไว้ ห่อหุ้มด้วยแผ่นพลาสติกใสโดยรอบ ยกเว้นบริเวณมือจับ จากนั้นวางให้ได้ระดับในพื้นที่ ที่ไม่ได้รับแสงแดดโดยตรง และมีลมพัดผ่านตลอดเวลา

5) นำดินที่ผสมเสร็จแล้วมาใส่ลงในอุปกรณ์ขึ้นรูปก้อนอิฐดินดิบ หรือไม้แบบที่เตรียมไว้ แล้วใช้มือกดดินบริเวณตามมุมและขอบลงไปให้แน่น ใช้เกียงฉาบปาดผิวหน้าให้เรียบพอประมาณแล้วยกพิมพ์ออกทันทีโดยไม่ต้องรอให้ดินแห้ง แล้วตากทิ้งไว้ ทำการพลิกกลับด้านก้อนอิฐดินดิบทุก ๆ 3-7 วัน จนครบ 20 วัน ดังแสดงในรูปที่ 2

6) นำตัวอย่างก้อนอิฐดินดิบไปทดสอบกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัด ตามมาตรฐาน ASTM C67 [12] ความหนาแน่น ตามมาตรฐาน ASTM C138 [13] และการทดสอบการหดตัว ซึ่งเป็นการหาค่าร้อยละของการหดตัวเชิงปริมาตรรวมแบบแห้ง คำนวณได้จากสมการที่ (1) [14]

$$T.S.V. = [(V_M - V_F)/V_M] \times 100 \qquad (1)$$

เมื่อ $T.S.V.$ คือ ร้อยละของการหดตัวรวมเชิงปริมาตร

V_M คือ ปริมาตรเดิมของก้อนตัวอย่างเทียบกับขนาดแบบหล่อ

V_F คือ ปริมาตรของก้อนตัวอย่างที่หดตัวในสภาพแห้ง

รูปที่ 2 การขึ้นรูปก้อนอิฐดินดิบ

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

ผลการศึกษาของก้อนอิฐดินดิบในงานวิจัยครั้งนี้จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับก้อนอิฐดินดิบจากศูนย์การเรียนรู้เศรษฐกิจพอเพียงเรือนจำชั่วคราวเขากลิ้ง ซึ่งเป็นวัสดุที่ถูกนำไปใช้ในการสร้างบ้านดินอยู่แล้ว

3.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ

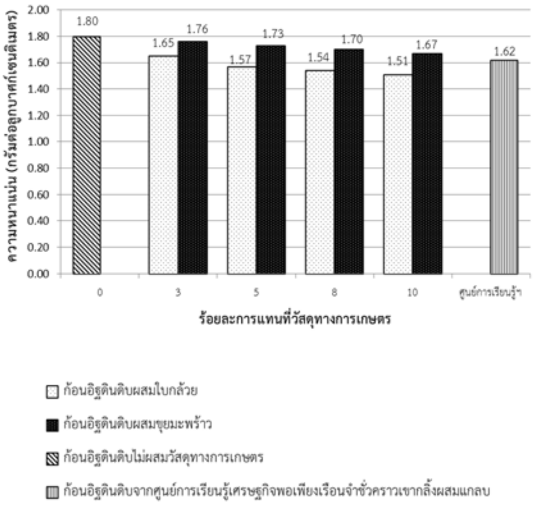
1) ผลการทดสอบโดยการตรวจพินิจด้วยสายตาก้อนอิฐดินดิบไม่ผสมวัสดุทางการเกษตร มีผิวภายนอกเรียบ เมื่อก้อนอิฐดินดิบเริ่มแห้งจะเกิดการแตกร้าวแบบแตกระแหงเป็นร่องลึกที่บริเวณช่วงล่างของก้อนอิฐ สำหรับก้อนอิฐดินดิบผสม

วัสดุทางการเกษตรนั้นมีผิวภายนอกหยาบ เมื่อมีปริมาณสัดส่วนผสมเพิ่มมากขึ้น บริเวณผิวก้อนอิฐดินดิบสามารถมองเห็นเป็นเนื้อวัสดุทางการเกษตรได้ชัด จะเกิดการหดตัวและแตกร้าวน้อยมากสามารถรักษารูปทรงของก้อนอิฐดินดิบได้ดีกว่าก้อนอิฐดินดิบไม่ผสมวัสดุทางการเกษตร ส่วนก้อนอิฐดินดิบที่ได้จากศูนย์การเรียนรู้เศรษฐกิจพอเพียงเรือนจำชั่วคราวเขากลิ้ง มีผิวภายนอกหยาบ มองเห็นเป็นเนื้อแกลบโดยส่วนใหญ่ มีรอยแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวของก้อนอิฐดินดิบ

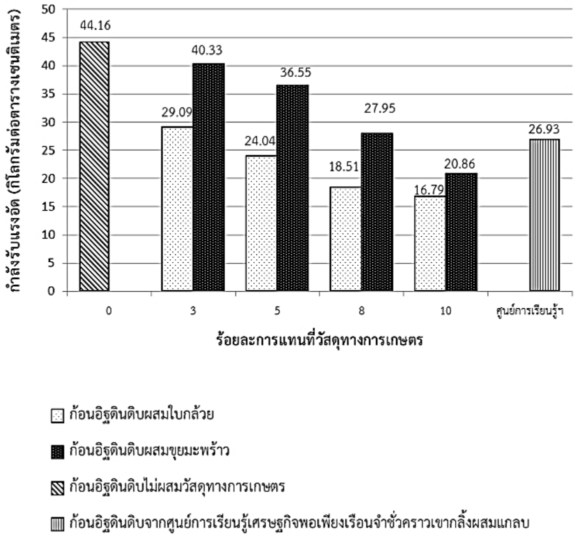
2) ผลการทดสอบความหนาแน่นของก้อนอิฐดินดิบที่ไม่ผสมวัสดุทางการเกษตร และก้อนอิฐดินดิบผสมวัสดุทางการเกษตร และก้อนอิฐดินดิบจากศูนย์การเรียนรู้เศรษฐกิจพอเพียงเรือนจำชั่วคราวเขากลิ้ง หลังจากผ่านระยะเวลาการตาก 20 วัน ดังรูปที่ 3 แสดงให้เห็นว่า ก้อนอิฐดินดิบไม่ผสมวัสดุทางการเกษตรมีค่าความหนาแน่นมากที่สุด และค่าความหนาแน่นของก้อนอิฐดินดิบที่มีส่วนผสมของวัสดุทางการเกษตรมีค่าลดลงเรื่อยๆ เมื่อมีส่วนผสมทางการเกษตรเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความหนาแน่นของก้อนอิฐดินดิบผสมใบกล้วย และขุยมะพร้าวแล้ว พบว่าก้อนอิฐดินดิบผสมขุยมะพร้าวมีค่าความหนาแน่นมากกว่าก้อนอิฐดินดิบผสมใบกล้วยในทุกอัตราส่วน ค่าความหนาแน่นก้อนอิฐดินดิบที่มีส่วนผสมของแกลบจากศูนย์การเรียนรู้เศรษฐกิจพอเพียงเรือนจำชั่วคราวเขากลิ้ง มีค่าความหนาแน่นมากกว่าก้อนอิฐดินดิบผสมใบกล้วยที่สัดส่วนผสมร้อยละ 5 8 และ 10 ซึ่งความหนาแน่นที่ไม่เท่ากันนั้น เป็นผลมาจากชนิดของวัสดุทางการเกษตร และปริมาณในการใช้ผสมในดิน จากลักษณะทางกายภาพของขุยมะพร้าวนั้นสามารถแทรกตัวเข้ากับเม็ดดินได้ดีกว่าใบกล้วย จึงทำให้มีค่าความหนาแน่นมากกว่าใบกล้วย

3.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกล

1) ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด ของก้อนอิฐดินดิบไม่ผสมวัสดุทางการเกษตร ก้อนอิฐดินดิบที่มีส่วนผสมวัสดุทางการเกษตร และก้อนอิฐดินดิบที่มีส่วนผสมของแกลบจากศูนย์การเรียนรู้เศรษฐกิจพอเพียงเรือนจำชั่วคราวเขากลิ้งที่ระยะเวลาการตาก 20 วัน ดังรูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่าก้อนอิฐดินดิบไม่ผสมวัสดุทางการเกษตรสามารถรับกำลังแรงอัดได้ดีที่สุด คือ 44.16 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยมีค่ามากกว่าก้อนอิฐดินดิบที่ผสมวัสดุทางการเกษตรในทุกสัดส่วน ส่วนก้อนอิฐดินดิบผสมขุยมะพร้าวสามารถรับกำลังแรงอัดได้ดีกว่าก้อนอิฐดินดิบผสมใบกล้วยในทุกๆสัดส่วนผสม ก้อนอิฐดินดิบที่มีสัดส่วนการแทนที่ของใบกล้วยร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก สามารถรับกำลังแรงอัดได้สูงสุด 29.09 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ในขณะที่ก้อนอิฐดินดิบที่มีการแทนที่ด้วยขุยมะพร้าวร้อยละ 3 สามารถรับกำลังแรงอัดได้สูงสุด 40.33 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งแสดงว่า การผสมขุยมะพร้าวช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการรับกำลังแรงอัดให้ก้อนอิฐดินดิบได้ดีกว่าการผสมใบกล้วยในทุกๆสัดส่วน การผสมขุยมะพร้าวที่สัดส่วนผสมร้อยละ 3 และร้อยละ 5 รวมทั้งการผสมใบกล้วยที่สัดส่วนผสมร้อยละ 3 ทำให้ก้อนอิฐดินดิบสามารถรับแรงอัดได้ดีกว่าก้อนอิฐดินดิบจากศูนย์การเรียนรู้เศรษฐกิจพอเพียงเรือนจำชั่วคราวเขากลิ้ง ซึ่งสามารถรับกำลังแรงอัดได้เพียง 26.93 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ทั้งนี้เนื่องจากเม็ดดินในก้อนอิฐดินดิบไม่ผสมวัสดุทางการเกษตรมีผิวสัมผัสระหว่างเม็ดดินมากกว่า จึงมีความสามารถยึดเกาะกันได้ดี ทำให้มีกำลังในการรับแรงได้สูงกว่าก้อนอิฐดินดิบที่ผสมวัสดุทางการเกษตร

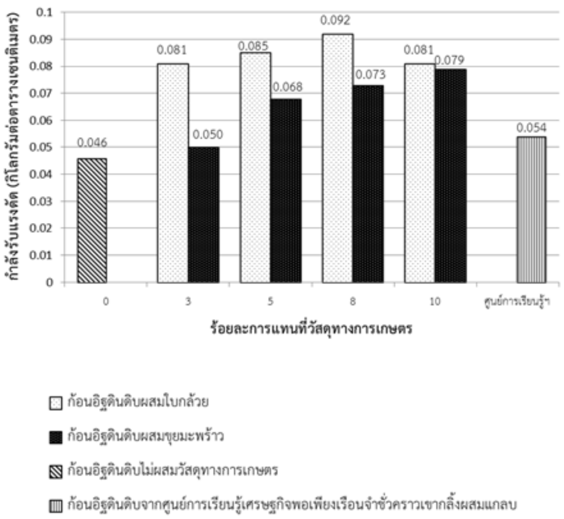


รูปที่ 3 ความหนาแน่นของก้อนอิฐดินดิบ



รูปที่ 4 กำลังรับแรงอัดของก้อนอิฐดินดิบ

2) ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของก้อนอิฐดินดิบไม่ผสมวัสดุทางการเกษตร ก้อนอิฐดินดิบผสมวัสดุทางการเกษตร และก้อนอิฐดินดิบจากศูนย์การเรียนรู้เศรษฐกิจพอเพียงเรือนจำชั่วคราวเขากลิ้ง โดยใช้ระยะเวลาการตาก 20 วัน ดังรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่าก้อนอิฐดินดิบผสมวัสดุทางการเกษตรสามารถรับกำลังแรงดัดได้ดีกว่าก้อนอิฐดินดิบไม่ผสมวัสดุทางการเกษตร โดยก้อนอิฐดินดิบผสมใบกล้วยสามารถรับแรงดัดได้มากกว่าก้อนอิฐดินดิบที่ผสมขุยมะพร้าวในทุก ๆสัดส่วน และมากกว่าก้อนอิฐดินดิบจากศูนย์การเรียนรู้เศรษฐกิจพอเพียงเรือนจำชั่วคราวเขากลิ้ง สำหรับก้อนอิฐดินดิบที่มีสัดส่วนผสมการแทนที่ของใบกล้วยร้อยละ 8 โดยน้ำหนักแห้ง สามารถรับกำลังดัดได้สูงสุด คือ 0.092 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร แต่หากสัดส่วนผสมเกินกว่าร้อยละ 10 จะมีค่ากำลังรับแรงดัดลดลง ในขณะที่ก้อนอิฐดินดิบที่มีสัดส่วนการแทนที่ด้วยขุยมะพร้าวร้อยละ 10 โดยน้ำหนักแห้ง สามารถรับกำลังดัดได้สูงสุด คือ 0.079 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และก้อนอิฐดินดิบจากศูนย์การเรียนรู้เศรษฐกิจพอเพียงเรือนจำชั่วคราวเขากลิ้ง สามารถรับกำลังแรงดัดได้ 0.054 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ทั้งนี้เนื่องจากก้อนอิฐดินดิบผสมวัสดุทางการเกษตรมีวัสดุทางการเกษตรช่วยเสริมการรับแรงดึงในก้อนอิฐดินดิบ ประกอบกับมีปริมาณดินมากพอที่จะทำให้ผิวสัมผัสของเม็ดดินยึดเกาะกันได้ดี เมื่อเสริมวัสดุทางการเกษตรเข้าไปก็ยิ่งทำให้เกิดการยึดเกาะกันได้เพิ่มขึ้น ส่วนก้อนอิฐดินดิบไม่ผสมวัสดุทางการเกษตรมีผิวสัมผัสของเม็ดดินเหนียวมาก แต่โดยธรรมชาติของดินเหนียวเมื่อแห้งจะเปราะจึงทำให้เกิดการแตกหักได้ง่าย ดังนั้นการผสมใบกล้วยจึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการรับกำลังแรงดัดให้ก้อนอิฐดินดิบได้ดีกว่าการผสมขุยมะพร้าว และก้อนอิฐดินดิบจากศูนย์การเรียนรู้เศรษฐกิจพอเพียงเรือนจำชั่วคราวเขากลิ้ง



รูปที่ 5 กำลังรับแรงดัดของก้อนอิฐดินดิบ

3) ผลการทดสอบการหดตัวของก้อนอิฐดินดิบที่ไม่ผสมวัสดุทางการเกษตร ก้อนอิฐดินดิบที่มีวัสดุทางการเกษตรเป็นส่วนผสม และก้อนอิฐดินดิบจากศูนย์การเรียนรู้เศรษฐกิจพอเพียงเรือนจำชั่วคราวเขากลิ้ง ซึ่งผ่านระยะเวลาการตาก 20 วัน ดังตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่า ก้อนอิฐดินดิบมีร้อยละการหดตัวลดลง เมื่อผสมวัสดุทางการเกษตรในสัดส่วนที่มากขึ้นทั้งใบกล้วยและขุยมะพร้าว ส่วนก้อนอิฐดินดิบจากศูนย์การเรียนรู้เศรษฐกิจพอเพียงเรือนจำชั่วคราวเขากลิ้ง จะมีร้อยละการหดตัวใกล้เคียงกับก้อนอิฐดินดิบผสมใบกล้วยที่สัดส่วนร้อยละ 10 เมื่อเปรียบเทียบร้อยละการหดตัวระหว่างก้อนอิฐดินดิบผสมใบกล้วยและก้อนอิฐดินดิบผสมขุยมะพร้าว พบว่าก้อนอิฐดินดิบที่ผสมใบกล้วยมีร้อยละการหดตัวน้อยกว่าก้อนอิฐดินดิบผสมขุยมะพร้าว

ตารางที่ 2 ร้อยละการหดตัวของก้อนอิฐดินดิบ

ร้อยละวัสดุทางการเกษตร	ร้อยละการหดตัว	
	อิฐดินดิบผสมใบกล้วย	อิฐดินดิบผสมขุยมะพร้าว
3	22.95	27.64
5	19.03	26.48
8	17.30	25.03
10	15.67	23.52
ไม่ผสมวัสดุทางเกษตร	28.97	
ศูนย์การเรียนรู้ฯ	15.71	

3.3 ผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางกล

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลและคุณสมบัติทางกายภาพของก้อนอิฐดินดิบไม่ผสมวัสดุทางการเกษตร ก้อนอิฐดินดิบผสมวัสดุทางการเกษตร และก้อนอิฐดินดิบจากศูนย์การเรียนรู้เศรษฐกิจพอเพียงเรือนจำชั่วคราวเขากลิ้งผสมแกลบ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกัน ดังตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่าก้อนอิฐดินดิบที่มีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้ในการก่อสร้างบ้านดิน มากกว่าก้อนอิฐดินดิบจากศูนย์การเรียนรู้เศรษฐกิจพอเพียงเรือนจำชั่วคราวเขากลิ้ง ได้แก่ ก้อนอิฐดินดิบผสมใบกล้วยร้อยละ 3 ก้อนอิฐดินดิบผสมขุยมะพร้าวร้อยละ 5 และร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก เนื่องจากก้อนอิฐดินดิบที่มีสัดส่วนผสมดังกล่าวสามารถรับแรงอัด และแรงดัดได้มากกว่าก้อนอิฐดินดิบจากศูนย์การเรียนรู้เศรษฐกิจพอเพียงเรือนจำชั่วคราวเขากลิ้ง

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางกลของก้อนอิฐดินดิบ

ก้อนอิฐดินดิบ	การทดสอบ				หมายเหตุ
	กำลังรับแรงอัด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)	กำลังรับแรงดัด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)	ร้อยละการหดตัวเชิงปริมาตร	ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	
ไม่ผสมวัสดุทางการเกษตร	44.16	0.046	28.97	1.80	*
ผสมใบกล้วยร้อยละ 3	29.09	0.081	22.95	1.65	*/**
ผสมใบกล้วยร้อยละ 5	24.04	0.085	19.03	1.57	**
ผสมใบกล้วยร้อยละ 8	18.51	0.092	17.30	1.54	**
ผสมใบกล้วยร้อยละ 10	16.79	0.081	15.67	1.51	**
ผสมขุยมะพร้าวร้อยละ 3	40.33	0.050	27.64	1.76	*
ผสมขุยมะพร้าวร้อยละ 5	36.55	0.068	26.48	1.73	*/**
ผสมขุยมะพร้าวร้อยละ 8	27.95	0.073	25.03	1.70	*/**
ผสมขุยมะพร้าวร้อยละ 10	20.86	0.079	23.52	1.67	**
จากศูนย์การเรียนรู้ฯ	26.93	0.054	15.71	1.62	

หมายเหตุ * ก้อนอิฐดินดิบที่มีกำลังรับแรงอัดมากกว่าก้อนอิฐดินดิบจากศูนย์การเรียนรู้เศรษฐกิจพอเพียงเรือนจำชั่วคราวเขากลิ้ง
** ก้อนอิฐดินดิบที่มีกำลังรับแรงดัดมากกว่าก้อนอิฐดินดิบจากศูนย์การเรียนรู้เศรษฐกิจพอเพียงเรือนจำชั่วคราวเขากลิ้ง

4. บทสรุป

จากผลการวิจัยสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1) ก้อนอิฐดินดิบผสมใบกล้วยมีการหดตัวน้อยกว่าก้อนอิฐดินดิบผสมขุยมะพร้าว และเมื่อเพิ่มวัสดุทางการเกษตรแทนที่ดินมากขึ้น ทำให้ก้อนอิฐดินดิบมีร้อยละการหดตัวน้อยลงเรื่อยๆ เมื่อนำไปใช้สำหรับการสร้างบ้านดิน สามารถคงรูปร่างของบ้านดินได้ดี

2) ก้อนอิฐดินดิบผสมใบกล้วยมีความหนาแน่นน้อยกว่าก้อนอิฐดินดิบผสมขุยมะพร้าว และเมื่อเพิ่มปริมาณของวัสดุทางการเกษตรมากขึ้น จะทำให้ความหนาแน่นของก้อนอิฐดินดิบลดลง เมื่อนำไปใช้สำหรับสร้างบ้านดิน สามารถลดน้ำหนักของบ้านดินได้ เป็นผลให้ขนาดของฐานรากเล็กลง

3) ก้อนอิฐดินดิบไม่ผสมวัสดุทางการเกษตรสามารถรับกำลังอัดได้มากกว่าก้อนอิฐดินดิบผสมวัสดุทางการเกษตร สำหรับก้อนอิฐดินดิบผสมวัสดุทางการเกษตรที่รับกำลังอัดได้ดีที่สุดคือ ก้อนอิฐดินดิบผสมขุยมะพร้าว ซึ่งสามารถรับกำลังอัดได้ดีกว่าก้อนอิฐดินดิบผสมใบกล้วยในทุกสัดส่วนผสม เมื่อเปรียบเทียบในสัดส่วนผสมเดียวกัน ส่วนผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของก้อนอิฐดินดิบ พบว่า ก้อนอิฐดินดิบผสมใบกล้วยสามารถรับกำลังแรงดัดได้ดีกว่าก้อนอิฐดินดิบผสมขุยมะพร้าวในทุกสัดส่วนผสม เมื่อเปรียบเทียบในสัดส่วนผสมเดียวกันและมากกว่าก้อนอิฐดินดิบไม่ผสมวัสดุทางการเกษตรด้วย

4) เมื่อพิจารณาค่ากำลังแรงอัดและกำลังแรงดัดของก้อนอิฐดินดิบที่สัดส่วนผสมต่าง ๆ พบว่าก้อนอิฐดินดิบมีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้ในการก่อสร้างบ้านดิน มากกว่าก้อนอิฐดินดิบจากศูนย์การเรียนรู้เศรษฐกิจพอเพียงเรือนจำชั่วคราวเขากลิ้งผสมแกลบ ได้แก่ ก้อนอิฐดินดิบผสมใบกล้วยแทนที่ปริมาณดินและทรายร้อยละ 3 โดยน้ำหนักแห้ง มีความเหมาะสมที่สุด เนื่องจากมีค่ากำลังรับแรงอัดกับกำลังรับแรงดัด มากที่สุด แล้วยังมีค่าการหดตัวเหมาะสมที่สุดด้วย และมีความหนาแน่นใกล้เคียงกับก้อนอิฐดินดิบจากศูนย์การเรียนรู้เศรษฐกิจพอเพียงเรือนจำชั่วคราวเขากลิ้งมากที่สุด อีกทั้งค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าสูงกว่าคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงอัดของอิฐดินดิบทั่วไป คือ 21 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร อีกด้วย [15]

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ เจ้าของไร่กล้วย และเจ้าของร้านขายต้นไม้ในอำเภอปราณบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ใบกล้วยและขุยมะพร้าวสำหรับนำมาใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ และ ขอขอบคุณศูนย์การเรียนรู้เศรษฐกิจพอเพียงเรือนจำชั่วคราวเขากลิ้ง ที่ให้ความอนุเคราะห์ก้อนอิฐดินดิบสำหรับนำมาใช้เป็นวัสดุเปรียบเทียบกับก้อนอิฐดินดิบในงานวิจัย รวมทั้งขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล ที่อนุเคราะห์อุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับใช้ในการทดสอบจนงานวิจัยสำเร็จ

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Taylor CR. Building for free with alternative natural materials. Available from: http//www.countrysidemag.com [Accessed 10th August 2018].

[2] Benghida D. Adobe bricks: the besteco-friendly building material. Advanced Materials Research. 2015;1005:386-390.

[3] Lertwattanaruk P, Tungsirisakul J. Effect of natural materials on properties of adobe brick for earth construction. Journal of Architectural/Planning Research and Studies. 2007;5(1):187-199.

[4] Lertwattanaruk P, Choksiriwanna J. The physical and thermal properties of adobe brick containing bagasse for earth construction. Built. 2011;1(1):54-61.

[5] เสริมชัย กรตระกูล. บ้านดินล้ำยุค. กรุงเทพมหานคร: พงษ์สาส์น; 2554.

[6] จตุพร ตั้งศิริสกุล. การประยุกต์ใช้วัตถุดิบทางธรรมชาติในการเพิ่มประสิทธิภาพของก้อนอิฐดินดิบเพื่อใช้ในการก่อสร้างบ้านดิน. [วิทยานิพนธ์ปริญญาสถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต]. สาขาวิชาสถาปัตยกรรม คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการผังเมือง. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์; 2550.

[7] เสน่ห์ รัตนปัญญาเจริญ, ชัยวัฒน์ ตั้งใจ และฤกษ์ชัย สว่างสินธุ์. การศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของอิฐดินดิบผสมหญ้าแฝกและฟางข้าวเพื่อเป็นวัสดุก่อสร้างบ้านต้นทุนต่ำ. [ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต]. สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์. พิษณุโลก: มหาวิทยาลัยนเรศวร; 2550.

[8] ทรงกลด ศรีวัฒนวรัญญู. การพัฒนาอิฐดินดิบผสมหญ้าแฝกเพื่อเป็นวัสดุก่อสร้างบ้านต้นทุนต่ำ. [วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต]. สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์. พิษณุโลก: มหาวิทยาลัยนเรศวร; 2551.

[9] จรุญศรี โชคศิริวรรณา. คุณสมบัติทางกายภาพและความร้อนของก้อนอิฐดินดิบผสมกากอ้อยเพื่อการก่อสร้างบ้านดิน. [วิทยานิพนธ์ปริญญาสถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต]. สาขาวิชาสถาปัตยกรรม คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการผังเมือง. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์; 2553.

[10] Hyeng CB, Bell EY. Mechanical properties of sustainable adobe bricks stabilized with recycled sugarcane fiber waste. Int. Journal of Engineering Research and Application. 2016;6(9):50-59.

[11] Begum R, Habib A, Begum HA. Adobe bricks stabilized with cement and natural rubber latex. Int. Journal of Emerging Science and Engineering. 2014;2(4):36-38.

[12] American Society for Testing and Materials. ASTM C67 Standard Test Methods For Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile. Annual Book of ASTM Standards; 2011.

[13] American Society for Testing and Materials. ASTM C138 Standard Test Method for density(unit weight) yield and air content (gravimetric) of concrete. Annual Book of ASTM Standards; 2012.

[14] พุฒิพัทธ์ ราชคำ และธีรวัฒน์ สินศิริ. การศึกษาคุณสมบัติของอิฐดินเหนียวมวลเบาผสมเถ้าลอยและแคลเซียมไฮดรอกไซด์. วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ. 2559;9(1):70-82.

[15] กรมส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน. เปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุอุตสาหกรรม 10 ชนิด. [เข้าถึงเมื่อ 1 สิงหาคม 2561]. ที่มา: www2.dede.go.th/newomesafe/webban/book/material%20table.htm.

เครื่องคัดแยกขนาดลูกมะนาวโดยใช้ระบบสมองกลฝังตัว
Lemon Sorting Machine using Embedded System

โชคชรัตน์ ฤทธิ์เย็น [1*] วีรเมธ ปุ้ยหลวง [1] และวรายุทธ แก้วสุข [1]
[1] สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก
41/1 หมู่ที่ 7 ตำบลไม้งาม อำเภอเมือง จังหวัดตาก 63000
Chokcharat Rityen [1*], Weramat Puiluang [1] and Warayut Kaewsuk [1]
[1] Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Tak
41/1 Moo 7, Mai Ngam, Muang, Tak, Thailand, 63000
[*]ผู้รับผิดชอบบทความ: chok.kpg@gmail.comเบอร์โทรศัพท์ 08-1043-0984

Received: 6 June 2018, Revised: 5 September 2018, Accepted: 30 October 2018

บทคัดย่อ
บทความนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างเครื่องคัดแยกขนาดลูกมะนาวโดยใช้ระบบสมองกลฝังตัว ประกอบด้วย 4 ส่วน คือ ส่วนช่องใส่ลูกมะนาว ส่วนคัดแยกลูกมะนาว ส่วนนับจำนวนลูกมะนาวและส่วนชั่งน้ำหนักลูกมะนาว ซึ่งสามารถคัดแยกมะนาวได้ 3 ขนาด คือ ขนาดเล็กมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 27 มิลลิเมตร ขนาดกลางเส้นผ่านศูนย์กลาง 27–40 มิลลิเมตร และขนาดใหญ่เส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 41 มิลลิเมตร เครื่องคัดแยกมะนาวที่พัฒนาขึ้นควบคุมการทำงานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์อาดุยโน่ ในการทำงานสามารถคัดแยกลูกมะนาวได้ 2 แบบ คือ แบบนับจำนวนและแบบชั่งน้ำหนัก จากการทดสอบการคัดแยกและนับจำนวนมะนาวพบว่า มะนาวขนาดเล็ก กลางและใหญ่มีความถูกต้อง 97.5 98.5 และ 100 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และผลการทดสอบคัดแยกและชั่งน้ำหนักมะนาวพบว่ามีความถูกต้อง 98.7 99.3 และ 100 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ
คำสำคัญ ไมโครคอนโทรลเลอร์ ขนาดมะนาว เครื่องคัดแยก

Abstract
This paper presents the design and construction of a lemon sorting machine using embedded system. The machine has four sections, i.e. lemon slot, lemon sorting, lemon counting and lemon weighing sections. The machine can separate three lemon sizes, i.e. small size lemon has diameter less than 27 mm, medium size lemon has diameter 27 - 40 mm, and the large size lemon has diameter above 40 mm. The Arduino has been used for process control of the machine. Two types of functionalities are available: counting and weighing. The testing results found that the averaged accuracy of sorting and counting the small size lemon, the medium size lemon and the large size lemon in the first case was 97.5, 98.5 and 100 percentage respectively and in the final case of sorting and weighing was 98.7, 99.3 and 100 percentage respectively.
Keywords: microcontroller, lemon size, sorting machine.

1. บทนำ

ปัจจุบันมีการนำมะนาวมาใช้ประโยชน์ได้หลากหลายทั้งในด้านของการปรุงอาหาร เครื่องดื่มที่มีวิตามินซีสูง ยาสมุนไพรและการใช้ในเครื่องสำอาง [1] เนื่องจากปริมาณมะนาวเป็นที่ต้องการของตลาดสูงตลอดปี และราคาจะสูงที่สุดเมื่อเข้าฤดูแล้งเพราะต้นมะนาวจะให้ผลผลิตน้อย จึงทำให้มะนาวมีราคาสูงที่สุดในช่วงนี้ โดยทั่วไปก่อนที่เกษตรกรจะส่งมะนาวขายจะต้องมีการคัดแยกขนาดลูกมะนาวก่อน ซึ่งสามารถคัดแยกลูกมะนาวได้ 3 ขนาด คือขนาดใหญ่มีขนาด 41 มิลลิเมตรขึ้นไปขนาดกลางมีขนาด 27 - 40 มิลลิเมตรและขนาดเล็กมีขนาดน้อยกว่า 27 มิลลิเมตร ในการคัดแยกขนาดของลูกมะนาวจะต้องใช้ระยะเวลาค่อนข้างมาก เพราะต้องคัดแยกออกมาให้ได้ 3 ขนาด และหากมีจำนวนของลูกมะนาวมากก็จะต้องใช้แรงงานคนในการคัดแยกขนาดของลูกมะนาวเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

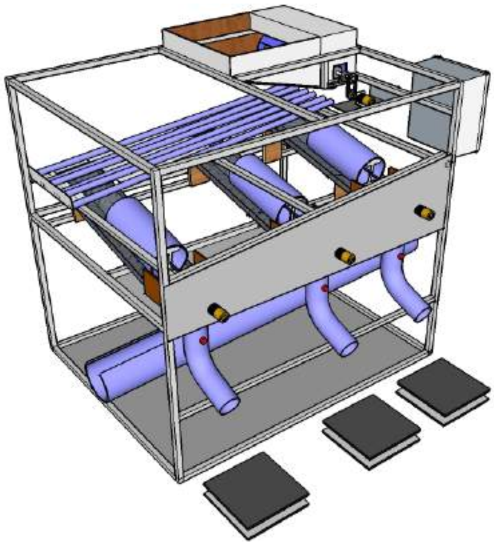
จากการสืบค้นข้อมูลเกี่ยวกับเครื่องคัดแยกขนาดและนับจำนวนลูกมะนาวพบว่ามีนักศึกษามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก ได้สร้างเครื่องคัดแยกขนาดและนับจำนวนลูกมะนาวด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ [2] ซึ่งพบปัญหา คือ เครื่องคัดแยกขนาดและนับจำนวนลูกมะนาวไม่สามารถปรับความเร็วในการปล่อยลูกมะนาวลงสู่รางคัดแยกได้ และไม่สามารถชั่งน้ำหนักลูกมะนาวเป็นกิโลกรัมได้

ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดและวัตถุประสงค์ในการพัฒนาเครื่องคัดแยกขนาดลูกมะนาวโดยใช้ระบบสมองกลฝังตัวขึ้นมา โดยเกษตรสามารถเลือกรูปแบบการคัดแยกได้ 2 วิธี คือ แบบคัดแยกและนับจำนวนลูกมะนาว และแบบคัดแยกและชั่งน้ำหนักลูกมะนาว ซึ่งจะช่วยประหยัดเวลาในการคัดแยกแบบเดิมคือใช้แรงงานคนและยังเป็นการใช้เทคโนโลยีเพื่ออำนวยความสะดวกให้แก่เกษตรกรในการคัดแยกลูกมะนาวทั้ง 3 ขนาด ดังกล่าว

2. การออกแบบและสร้าง

2.1 การออกแบบโครงสร้าง

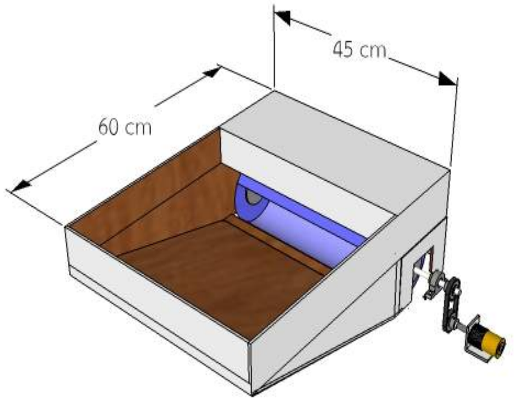
โครงสร้างของเครื่องคัดแยกขนาดลูกมะนาวโดยใช้ระบบสมองกลฝังตัวมีขนาดความกว้าง 120 เซนติเมตร ยาว 100 เซนติเมตร สูง 100 เซนติเมตร และมีส่วนประกอบ 4 ส่วน คือ 1) ส่วนช่องใส่ลูกมะนาว 2) ส่วนคัดแยกขนาดลูกมะนาว 3) ส่วนนับจำนวนลูกมะนาว และ 4) ส่วนชั่งน้ำหนักลูกมะนาว ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างและส่วนประกอบที่ได้ออกแบบไว้ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 โครงสร้างเครื่องคัดแยกขนาดลูกมะนาว

2.2 การออกแบบส่วนช่องใส่ลูกมะนาว

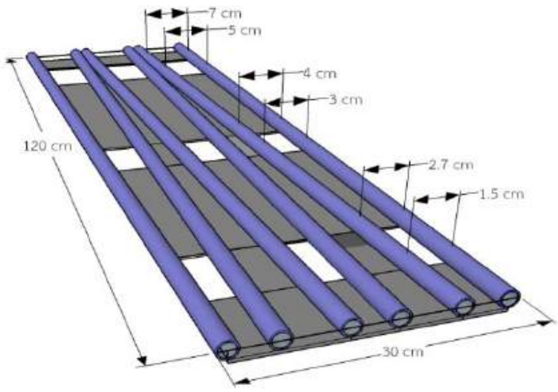
การออกแบบส่วนช่องใส่ลูกมะนาวนั้น จะใช้มอเตอร์ดีซี 12 โวลต์ เป็นตัวหมุนท่อพีวีซีที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร โดยใช้เพลาเหล็กที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร และโซ่เบอร์ 25 ที่คล้องอยู่กับเฟืองโซ่เบอร์ 25 ในการส่งกำลังจากมอเตอร์ไปยังท่อพีวีซี โดยที่ท่อพีวีซีนั้นจะเจาะร่องเป็นแนวยาว มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร หมุนด้วยความเร็วคงที่เพื่อปล่อยลูกมะนาวให้ตกลงสู่ส่วนคัดแยกลูกมะนาว โดยมีขนาดของช่องใส่ลูกมะนาวกว้าง 45 เซนติเมตรและยาว 60 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 โครงสร้างส่วนช่องใส่ลูกมะนาว

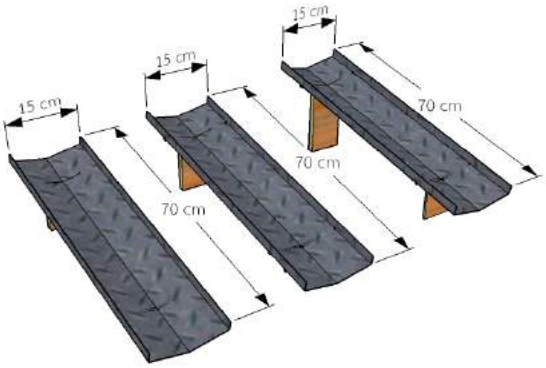
2.3 การออกแบบส่วนคัดแยกขนาดลูกมะนาว

ในส่วนของช่องคัดแยกขนาดลูกมะนาวนั้น จะใช้ท่อพีวีซีที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 1.8 เซนติเมตรยาว 120 เซนติเมตร จำนวนทั้งหมด 6 ท่อ ทำเป็นรางไหลลูกมะนาวและนำท่อพีวีซีมาวางคู่กันเป็น 3 คู่จะได้ 3 ร่องคัดแยก ติดตั้งให้มีความลาดเอียง 15 องศากับแนวระดับ โดยที่ระยะความห่างของท่อพีวีซี 1.5 - 2.7 เซนติเมตรจะได้ช่องคัดแยกลูกมะนาวขนาดเล็ก ที่ระยะความห่างของท่อพีวีซี 3.0 - 4.0 เซนติเมตร จะได้ช่องคัดแยกลูกมะนาวขนาดกลางและที่ระยะความห่างของท่อพีวีซี 5.0 – 7.0 เซนติเมตร จะได้ช่องคัดแยกลูกมะนาวขนาดใหญ่ ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 โครงสร้างส่วนคัดแยกขนาดลูกมะนาว

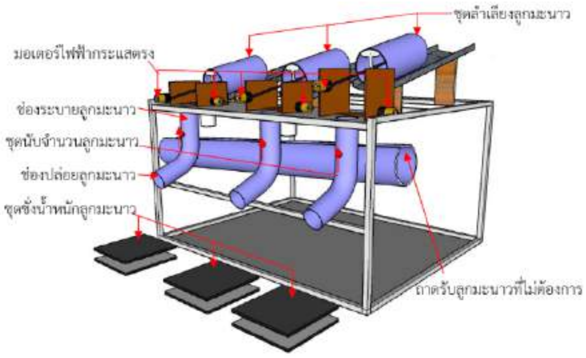
เมื่อมะนาวถูกคัดแยกจากช่องคัดแยกขนาดลูกมะนาวทั้งสามขนาดแล้วจะตกลงมายังถาดรับลูกมะนาวโดยมีขนาดความกว้าง 15 เซนติเมตรยาว 70 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ถาดรับลูกมะนาว

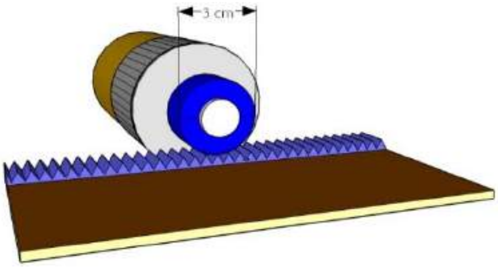
2.4 การออกแบบส่วนนับจำนวนลูกมะนาว

เมื่อลูกมะนาวแต่ละขนาดตกลงสู่ถาดรับลูกมะนาวจะถูกส่งต่อไปยังชุดลำเรียงลูกมะนาวซึ่งทำจากท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร ยาว 30 เซนติเมตร ภายในท่อจะติดตั้งสายยางพันขดเพื่อช่วยให้ลูกมะนาวไหลมาครั้งละลูก โดยจะมีมอเตอร์ดีซี 12 โวลต์เป็นตัวหมุนและเมื่อลูกมะนาวผ่านชุดลำเรียงมาแล้วจะตกลงสู่ช่องปล่อยลูกมะนาวโดยภายในจะติดตั้งเซ็นเซอร์อินฟราเรด [4] ไว้เพื่อนับจำนวนลูกมะนาวที่ไหลผ่านดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 โครงสร้างส่วนนับจำนวนลูกมะนาว

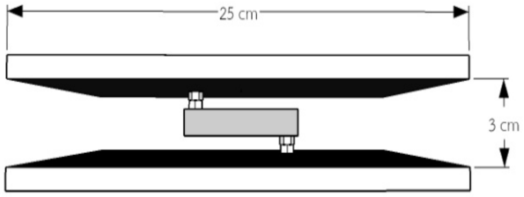
และเมื่อมีการนับจำนวนลูกมะนาวครบแล้วตามที่ตั้งค่าไว้จะมีส่วนปล่อยลูกมะนาวที่ไม่ต้องการออกมายังถาดรับลูกมะนาวที่ไม่ต้องการโดยใช้มอเตอร์ดีซี 12 โวลต์ ในการเลื่อนปิด-เปิด ช่องของลูกมะนาว ดังแสดงในรูปที่ 6



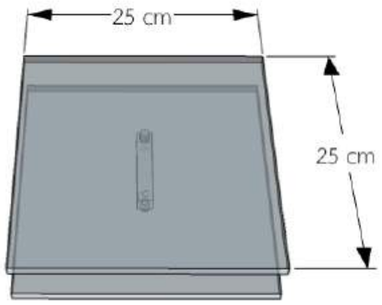
รูปที่ 6 โครงสร้างส่วนปิด - เปิดช่องลูกมะนาว

2.5 การออกแบบส่วนชั่งน้ำหนัก

ในการออกแบบชุดชั่งน้ำหนักนั้นจะต้องทำการเลือกขนาดโหลดเซลล์ [3] ให้เหมาะสมกับน้ำหนักที่จะนำมาชั่งรวมกับน้ำหนักของโครงสร้าง โดยโครงสร้างของโหลดเซลล์จะมีน้ำหนักโดยประมาณ 1กิโลกรัม และน้ำหนักของลูกมะนาวที่จะนำมาชั่งน้ำหนักสูงสุดคือ 5 กิโลกรัม ดังนั้นน้ำหนักที่โหลดเซลล์ต้องรับได้ คือ น้ำหนักของโครงสร้างรวมกับน้ำหนักของลูกมะนาวสูงสุด เมื่อรวมกันแล้วจะได้เท่ากับ 6 กิโลกรัม ดังนั้นจึงเลือกใช้โหลดเซลล์ขนาด 10 กิโลกรัม โดยการออกแบบโครงสร้างชุดชั่งน้ำหนักจะใช้ไม้อัดจำนวน 2 แผ่นต่อโหลดเซลล์หนึ่งตัว โดยไม้อัดที่ใช้จะมีขนาดความกว้าง 25 เซนติเมตร ยาว 25 เซนติเมตร และหนา 0.5 เซนติเมตร ซึ่งจะใช้น็อตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร ยาว 20 มิลลิเมตร เป็นตัวยึดแผ่นไม้กับโหลดเซลล์ทั้งด้านบนและด้านล่างดังแสดงในรูปที่ 7 และรูปที่ 8 ตามลำดับ



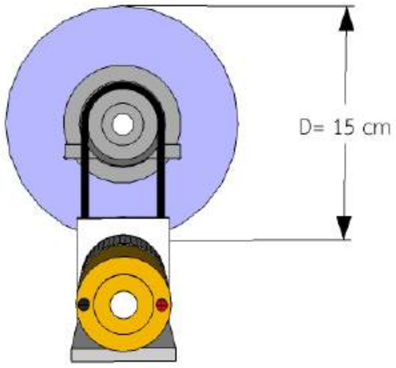
รูปที่ 7 ส่วนชั่งน้ำหนักด้านข้าง



รูปที่ 8 ส่วนชั่งน้ำหนักด้านบน

2.6 การคำนวณหากำลังวัตต์ของมอเตอร์

มอเตอร์ที่ใช้ในส่วนปล่อยลูกมะนาวลงสู่ถาดคัดแยกขนาดลูกมะนาวจะต้องมีแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง [6] พอที่จะสามารถขับน้ำหนักของลูกมะนาวรวมกับท่อพีวีซีที่ตักลูกมะนาว ซึ่งจะมีน้ำหนัก 3.5 กิโลกรัม และมีเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อพีวีซีขนาด 0.15 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 มอเตอร์ส่วนปล่อยลูกมะนาว

สามารถหารัศมีของท่อพีวีซีได้จาก

$$r = \frac{D}{2} \qquad (1)$$

เมื่อ r คือ รัศมีของท่อพีวีซี

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อพีวีซี

เมื่อแทนค่าในสมการที่ (1) จะได้

$$r = \frac{0.15}{2} = 0.075 \text{ เมตร}$$

คำนวณหาแรงบิดและกำลังวัตต์มอเตอร์ที่ต้องการจาก

$$F = mg \qquad (2)$$

เมื่อ F คือ แรง

m คือ มวลของท่อพีวีซีและลูกมะนาวที่อยู่ในท่อ

g คือ ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกที่กระทำต่อวัตถุมีค่าเท่ากับ 9.81เมตร/วินาที^{2}

เมื่อแทนค่าในสมการที่ (2) ได้ดังนี้

$$F = 3.5 \times 9.81 = 34.33 \text{ นิวตัน}$$

หาแรงบิดมอเตอร์จาก

$$T = F \times r \qquad (3)$$

เมื่อ T คือ แรงบิดของมอเตอร์

F คือ แรง

r คือ รัศมีของท่อพีวีซี

เมื่อแทนค่าในสมการที่ (3) ได้ดังนี้

$$T = 34.33 \times 0.075 = 2.57 \text{ นิวตันเมตร}$$

หากำลังวัตต์มอเตอร์จาก

$$P = \frac{2\pi TN}{60} \text{ วัตต์} \qquad (4)$$

เมื่อ P คือ กำลังวัตต์ของมอเตอร์

T คือ แรงบิดของมอเตอร์

N คือ จำนวนรอบของมอเตอร์

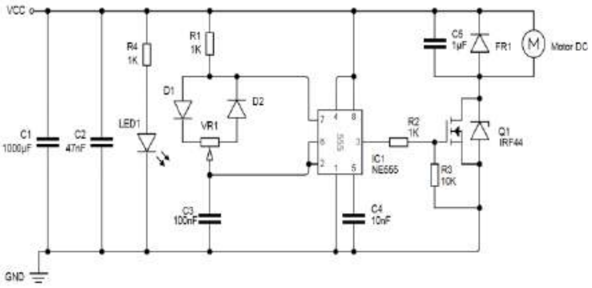
เมื่อแทนค่าในสมการที่ (4) ได้ดังนี้

$$P = \frac{2 \times \pi \times 2.57 \times 50}{60} = 13.45 \text{ วัตต์}$$

ดังนั้นจะต้องใช้มอเตอร์ที่มีขนาดกำลังวัตต์ 13.45 วัตต์ จึงเลือกใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 12 โวลต์ 50 วัตต์ ความเร็ว 50 รอบต่อนาที

2.7 ออกแบบวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

เริ่มจากอินพุตรับค่าแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 12 โวลต์ ผ่านตัวเก็บประจุฟิลเตอร์และแสดงผลสถานะการทำงานของอินพุตที่ป้อนเข้ามาด้วยหลอดแอลอีดี ในส่วนของวงจรควบคุมการสร้างสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลต โดยเลือกใช้ไอซี 555 เป็นตัวสร้างสัญญาณพัลส์ที่มีตัวต้านทานแบบปรับค่าได้และตัวเก็บประจุ เป็นตัวกำหนดความถี่ของสัญญาณพัลส์ทางด้านเอาต์พุตของไอซี 555 และความกว้างของสัญญาณพัลส์ที่เอาต์พุตของไอซี 555 จะเปลี่ยนแปลงไปตามการปรับค่าความต้านทานจากนั้นสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลตที่สร้างขึ้นจะถูกส่งไปขับมอสเฟตกำลังเพื่อให้มอสเฟตตัดต่อวงจรตามสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลต ดังแสดงในรูปที่ 10

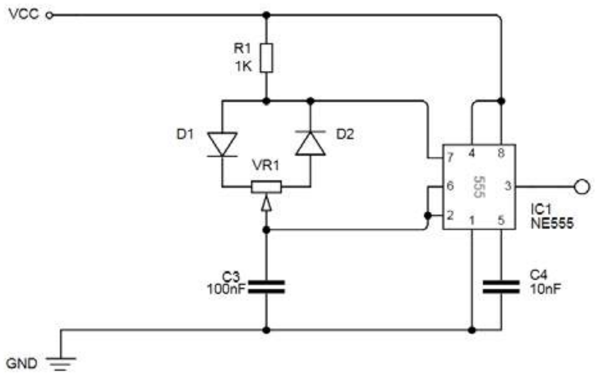


รูปที่ 10 วงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

2.7.1 วงจรควบคุม

จากรูปที่ 11 เป็นวงจรสร้างสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลต การออกแบบวงจรส่วนที่ทำหน้าที่สร้างสัญญาณขับแบบพัลส์วิดมอดูเลต โดยเลือกใช้ไอซี 555 ลักษณะการต่อของวงจรจะเป็นการต่อวงจรแบบอะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ (Astable Multivibrator) ซึ่งเป็นรูปแบบวงจรที่ใช้ในการสร้างรูปคลื่นสัญญาณสี่เหลี่ยมที่เอาต์พุตอย่างต่อเนื่องของไอซี 555 แต่ในการนำเอาไอซี 555 มาใช้ในการสร้างสัญญาณเอาต์พุตแบบพัลส์วิดมอดูเลต ที่ตำแหน่งตัวต้านทานระหว่างขา 6 และขา 7 ของไอซีจะใช้เป็นตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ ซึ่งสามารถทำให้เกิดช่วงระยะเวลาในการชาร์จประจุและการคายประจุของตัวเก็บประจุที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานปรับค่าได้ที่ถูกปรับไปในขณะนั้น ตัวเก็บประจุจะทำการชาร์จประจุผ่านตัวต้านทาน ไดโอด และความต้านทาน

ปรับค่าได้ จนเมื่อค่าแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุที่อินพุตขาเทรสโฮลด์มีค่าสูงถึงค่า 2/3 ของค่าแรงดัน Vcc ส่งผลให้ฟลิปฟลอปภายในไอซี 555 จะทำงานกระตุ้นให้ทรานซิสเตอร์ภายในของไอซีทำงานทำให้ตัวเก็บประจุ ทำการคายประจุผ่านความต้านทานปรับค่าได้ผ่านไดโอดและผ่านขา 7 ของไอซี โดยความกว้างของสัญญาณเอาต์พุตพัลส์วิดมอดูเลตจะขึ้นอยู่กับช่วงระยะเวลาในการชาร์จประจุและการคายประจุโดยขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานของตัวต้านทานปรับค่า

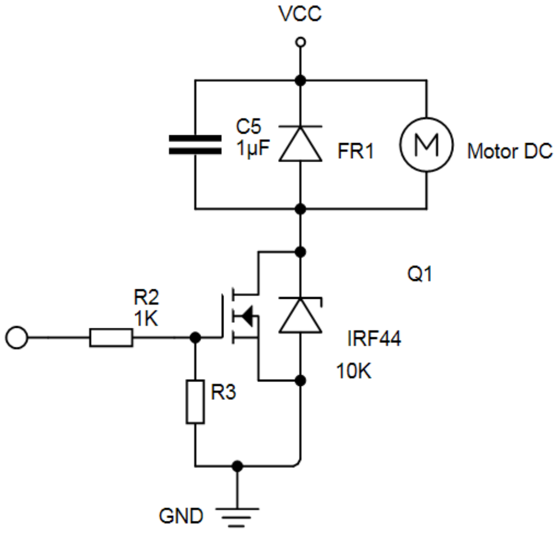


ได้

รูปที่ 11 วงจรสร้างสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลต

2.7.2 วงจรกำลัง

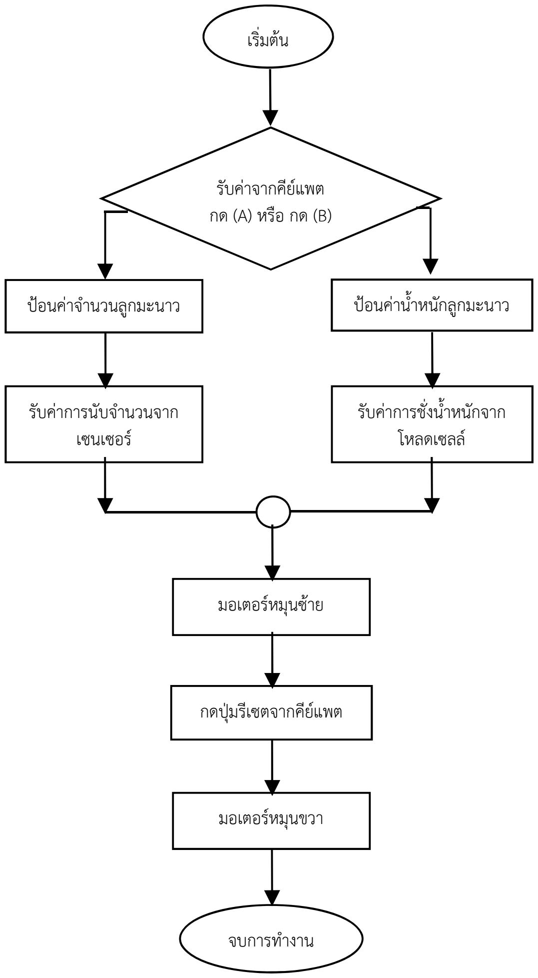
จากรูปที่ 12 เพาเวอร์มอสเฟตจะถูกกระตุ้นให้ทำงานจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 12 โวลต์ จะมีตัวเก็บประจุ C5 ทำหน้าที่เป็นฟิลเตอร์และลดระดับของแรงดันริบเปิ้ลที่โหลดจะดึงไปใช้งานเมื่อมอเตอร์เริ่มต้นทำงานไดโอด FR1 ทำหน้าที่เป็นสนับเบอร์สำหรับลดแรงดัน Back Emf ที่เกิดขึ้นจากการใช้งานโหลดแบบมอเตอร์



รูปที่ 12 ภาคกำลังของวงจรควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์

2.8 การออกแบบโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์

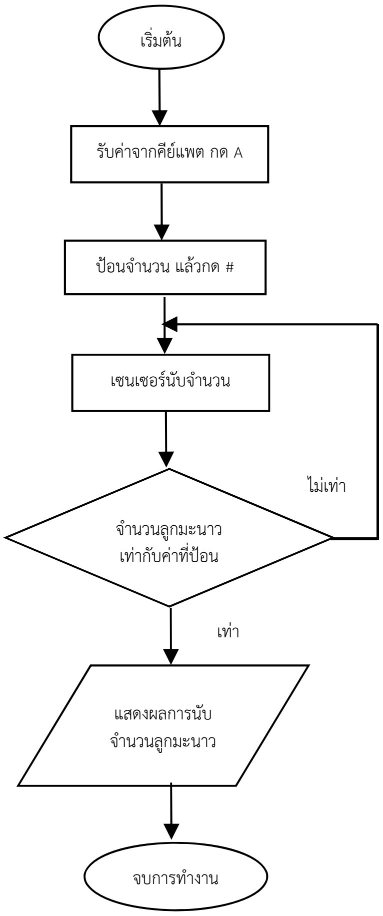
เครื่องคัดแยกขนาดลูกมะนาวจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Arduino MEGA 2560) [5] ในการควบคุมการทำงาน โดยใช้ควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงให้ทำงานเพื่อทำการปล่อยลูกมะนาวลงสู่ส่วนคัดแยก ชุดนับจำนวนลูกมะนาวหรือชุดชั่งน้ำหนักลูกมะนาวโดยมีผังการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์คือเมื่อเปิดเครื่องใส่จำนวนลูกมะนาวหรือน้ำหนักของลูกมะนาวที่ต้องการจากคีย์แพต โปรแกรมจะรับข้อมูลจากอินฟาเรดเซนเซอร์ที่ติดตั้งไว้เพื่อนับจำนวนลูกมะนาว หรือโปรแกรมจะรับข้อมูลจากโหลดเซลล์ที่ติดตั้งไว้เพื่อชั่งน้ำหนักลูกมะนาวที่ต้องการตามจำนวนที่ตั้งค่าไว้จากคีย์แพต เมื่อโปรแกรมได้รับค่าจำนวนหรือน้ำหนักลูกมะนาวครบตามที่ตั้งแล้ว โปรแกรมจะสั่งการให้มอเตอร์หมุนซ้ายเพื่อปิดช่องปล่อยลูกมะนาวแล้วหยุดเพื่อให้ลูกมะนาวที่เหลือไหลลงถาดรับมะนาวที่ไม่ต้องการ จากนั้นกดปุ่มรีเซ็ตค่าที่คีย์แพตโปรแกรมจะสั่งการให้มอเตอร์หมุนขวาเพื่อเปิดช่องปล่อยลูกมะนาวแล้วจึงจบกระบวนการทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 13



รูปที่ 13 ผังการควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

2.8.1 ผังการทำงานชุดนับจำนวนลูกมะนาว

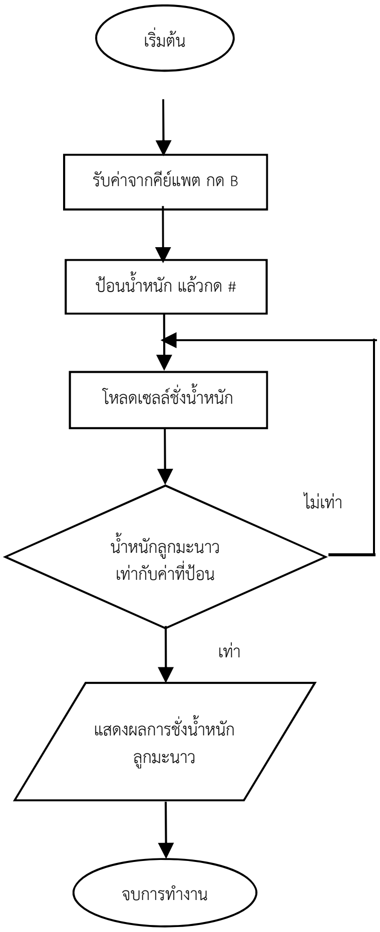
ผังการทำงานชุดนับจำนวนลูกมะนาวด้วยโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์นี้ จะเริ่มสั่งการจากคีย์แพต โดยเมื่อกด (A) เพื่อป้อนจำนวนลูกมะนาวขนาดเล็ก กลางและใหญ่ที่ต้องการได้จากตัวเลข 0 - 9 แล้วกด (#) เพื่อยืนยันการตั้งค่าแล้วเครื่องจะทำการนับจำนวนลูกมะนาวจนครบตามจำนวนที่กำหนดไว้ที่คีย์แพต หลังจากนั้นจะแสดงผลการนับจำนวนที่จอแอลซีดีแต่ละขนาดจึงจบกระบวนการทำงาน ดังแสดงใน รูปที่ 14



รูปที่ 14 ผังการทำงานชุดนับจำนวนลูกมะนาว

2.8.2 ผังการทำงานชุดชั่งน้ำหนักลูกมะนาว

ผังการทำงานชุดชั่งน้ำหนักลูกมะนาวด้วยโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์นี้ จะเริ่มสั่งการจากคีย์แพตโดยกด (B) เพื่อป้อนน้ำหนักลูกมะนาวที่ต้องการได้จากตัวเลข 0 - 9 แล้วกด (#) เพื่อยืนยันการตั้งค่าแล้วจึงทำการชั่งน้ำหนักลูกมะนาวจนครบตามค่าน้ำหนักที่กำหนดไว้ที่คีย์แพตหลังจากนั้นจะแสดงผลการชั่งน้ำหนักที่จอแอลซีดี แล้วจึงจบกระบวนการทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 15



รูปที่ 15 ผังการทำงานชุดชั่งน้ำหนักลูกมะนาว

2.9 วิธีการวัดขนาดลูกมะนาว

เนื่องจากลูกมะนาวมีลักษณะเป็นวงรี ในการวัดขนาดลูกมะนาวจึงต้องวัดตำแหน่งที่กว้างที่สุด ซึ่งได้แสดงตัวอย่างการวัดลูกมะนาวด้วยเวอร์เนียคาร์ลิเปอร์ได้มะนาวขนาดเล็ก ขนาดกลางและขนาดใหญ่ ดังแสดงในรูปที่ 16 17 และ 18 ตามลำดับ

รูปที่ 16 ตัวอย่างการวัดลูกมะนาวขนาดเล็ก

รูปที่ 17 ตัวอย่างการวัดลูกมะนาวขนาดกลาง

รูปที่ 18 ตัวอย่างการวัดลูกมะนาวขนาดใหญ่

2.10 วิธีการทดสอบเครื่องคัดแยกขนาดลูกมะนาว

เสียบปลั๊กไฟเครื่องคัดแยกขนาดลูกมะนาวโดยใช้ระบบสมองกลฝังตัวจากแหล่งจ่าย 220 โวลต์ 50 เฮิรตซ์ แล้วเปิดสวิตซ์ระบบ จากนั้นเลือกวิธีการทดสอบด้วยวิธีการนับจำนวนลูกมะนาวหรือวิธีการชั่งน้ำหนักลูกมะนาว โดยกดปุ่ม “C” ที่คีย์แพต ดังแสดงในรูปที่ 19

รูปที่ 19 กดเลือกรูปแบบการทำงานของโปรแกรม

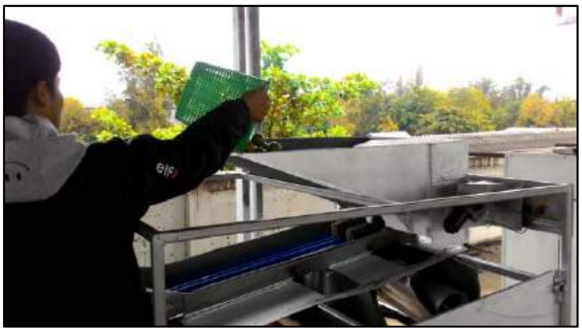
หลังจากกด “C” บนคีย์แพตแล้วหน้าจอแอลซีดีจะโชว์รูปแบบให้เลือกโดยให้สังเกตที่แถบสีดำทั้ง 3 แถบ แถบที่ 1 ที่ 2 และที่ 3 จะแทนขนาดลูกมะนาวเล็ก กลาง ใหญ่ ตามลำดับ และคำว่า “Number” คือรูปแบบการนับจำนวน และคำว่า “Weight” คือรูปแบบการชั่งน้ำหนัก ให้กดเลือกเป็นรูปแบบการนับจำนวนหรือชั่งน้ำหนัก โดยกดปุ่มบนคีย์แพตเลข 1 2 และ 3 เพื่อให้แถบสีดำย้ายมาที่รูปแบบการนับจำนวนหรือชั่งน้ำหนักและกด “#” ยืนยัน โปรแกรมจะเข้าสู่การทำงานแบบนับจำนวนหรือชั่งน้ำหนัก ดังแสดงในรูปที่ 20

รูปที่ 20 รูปแบบการทำงานแบบนับจำนวน

กด “A” หรือ “B” ดังแสดงในรูปที่ 21 เพื่อป้อนค่าจำนวนหรือน้ำหนักที่ต้องการโดยกดตัวเลขที่คีย์แพต เมื่อป้อนค่าแล้วจึงกด “#” เพื่อยืนยัน โปรแกรมจึงเริ่มการทำงาน

รูปที่ 21 กดปุ่มเข้าป้อนค่าจำนวนนับลูกมะนาว

จากนั้นนำลูกมะนาวที่เตรียมไว้ใช้ทดสอบใส่ลงในส่วนช่องใส่ลูกมะนาว ดังแสดงในรูปที่ 22



รูปที่ 22 นำลูกมะนาวทดสอบใส่ช่องใส่ลูกมะนาว

จากนั้นลูกมะนาวที่ใช้ในการทดสอบจะไหลลงสู่ส่วนคัดแยกขนาดลูกมะนาว ดังแสดงในรูปที่ 23

รูปที่ 23 ลูกมะนาวทดสอบไหลลงส่วนคัดแยก

และลูกมะนาวทดสอบจะถูกคัดแยกออกเป็นสามขนาด โดยจะไหลลงส่วนนับจำนวนซึ่งผ่านเซนเซอร์ในกรณีเลือกแบบนับจำนวนและจะไหลลงไปยังโหลดเซลล์ในส่วนชั่งน้ำหนักเมื่อเลือกแบบชั่งน้ำหนัก โดยเมื่อได้จำนวนหรือน้ำหนักเท่ากับตามค่าที่ป้อนไว้แล้วส่วนเปิด-ปิดช่องมะนาวจะทำการปิดช่องคัดแยกมะนาวทั้งสามขนาดเพื่อให้ลูกมะนาวส่วนที่เหลือไหลลงช่องของลูกมะนาวที่ไม่ต้องการ โดยผลการทดสอบนับจำนวนหรือชั่งน้ำหนักจะแสดงบนจอแอลซีดีทั้งขนาดเล็ก กลาง และใหญ่ ซึ่งผลการทดสอบได้แสดงตัวอย่างลูกมะนาวที่ผ่านการทดสอบแบบนับจำนวนไว้ดังแสดงในรูปที่ 24

รูปที่ 24 ลูกมะนาวเมื่อผ่านการทดสอบ

และแสดงตัวเครื่องคัดแยกขนาดลูกมะนาวโดยใช้ระบบสมองกลฝังตัวไว้ ดังแสดงในรูปที่ 25

รูปที่ 25 เครื่องคัดแยกขนาดลูกมะนาว

3. ผลการทดสอบ

ได้แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 กรณี คือกรณีที่ 1 ทดสอบการคัดแยกและนับจำนวนลูกมะนาวโดยนำมะนาวขนาดละ 20 ลูก คละกัน (รวม 60 ลูก) ทดสอบจำนวน 10 ครั้ง ได้ผลการทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่1 ผลการคัดแยกและนับจำนวนลูกมะนาว

การทดลอง	ขนาดเล็ก		ขนาดกลาง		ขนาดใหญ่		เวลา (นาที)
	คัดแยก	นับ	คัดแยก	นับ	คัดแยก	นับ	
1	19	19	20	20	20	20	0.58
2	20	20	20	20	20	20	1.06
3	19	19	19	19	20	20	0.54
4	20	20	20	20	20	20	0.58
5	19	19	20	20	20	20	0.56
6	20	20	20	20	20	20	0.53
7	20	20	20	20	20	20	1.02
8	19	19	19	19	20	20	0.57
9	19	19	20	20	20	20	0.55
10	20	20	19	19	20	20	1.04
% ถูกต้อง	97.5		98.5		100		เฉลี่ย 1.10

จากตารางที่ 1 ได้ผลการทดสอบประสิทธิภาพของการคัดแยกและนับจำนวนลูกมะนาว โดยความถูกต้องในการคัดแยกและนับจำนวนลูกมะนาวขนาดเล็ก ขนาดกลาง และขนาดใหญ่ คือ 97.5 98.5 และ 100% ตามลำดับ โดยใช้เวลาเฉลี่ยในการทดสอบทั้งหมด 10 ครั้งเท่ากับ 1 นาที 10 วินาที

และกรณีที่ 2 ทดสอบการคัดแยกและชั่งน้ำหนักลูกมะนาว โดยใช้มะนาวขนาดละ 5 กิโลกรัม คละกัน ทดสอบจำนวน 3 ครั้ง ได้ผลการทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการคัดแยกและชั่งน้ำหนักลูกมะนาว

การทดลอง	ขนาดเล็ก		ขนาดกลาง		ขนาดใหญ่		เวลา (นาที)
	คัดแยก	ชั่ง	คัดแยก	ชั่ง	คัดแยก	ชั่ง	
1	4.9	4.9	5.0	5.0	5.0	5.0	5.07
2	4.9	4.9	5.0	5.0	5.0	5.0	5.42
3	5.0	5.0	4.9	4.9	5.0	5.0	5.18
% ถูกต้อง	98.7		99.3		100		เฉลี่ย 5.22

จากตารางที่ 2 ได้ผลการทดสอบประสิทธิภาพของการคัดแยกและชั่งน้ำหนักลูกมะนาว โดยความถูกต้องในการคัดแยกและชั่งน้ำหนักลูกมะนาวขนาดเล็ก ขนาดกลาง และขนาดใหญ่ คือ 98.7 99.3 และ 100% ตามลำดับ โดยใช้เวลาเฉลี่ยในการทดสอบทั้งหมด 3 ครั้งเท่ากับ 5 นาที 22 วินาที

จากผลการทดสอบทั้ง 2 กรณี จะเห็นได้ว่าลูกมะนาวขนาดเล็กและขนาดกลางได้ผลการคัดแยกนับจำนวนลูกมะนาว และผลการคัดแยกชั่งน้ำหนักลูกมะนาวไม่ถูกต้องครบ 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเกิดมาจากข้อผิดพลาดในส่วนคัดแยกขนาดลูกมะนาวที่ไม่สามารถทำให้ลูกมะนาวทั้ง 2 ขนาดนี้ตกลงไปยังช่องคัดแยกที่ถูกต้องได้ โดยจากการทดสอบพบว่ามะนาวทั้ง 2 ขนาดนี้มีน้ำหนักค่อนข้างน้อยจึงทำให้การกลิ้งของลูกมะนาวดังกล่าวไม่ลื่นไหลเหมือนกับลูกมะนาวขนาดใหญ่ ทำให้มะนาวบางลูกติดอยู่ในร่องคัดแยก ซึ่งคณะผู้วิจัยได้เห็นถึงปัญหาดังกล่าวและได้เสนอแนวคิดวิธีในการแก้ปัญหาเพื่อพัฒนาต่อยอดในเวอร์ชันต่อไป โดยจะออกแบบโครงสร้างให้ส่วนคัดแยกขนาดลูกมะนาวสามารถหมุนได้เพื่อเพิ่มแรงให้ลูกมะนาวขนาดเล็กและขนาดกลางไหลได้สะดวกไม่ติดค้างอยู่ที่ร่องคัดแยก เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องคัดแยกขนาดลูกมะนาวโดยใช้ระบบสมองกลฝังตัวให้ถูกต้อง 100 เปอร์เซ็นต์ทั้งสามขนาด

4. สรุปผล

ในบทความนี้ ได้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาเครื่องคัดแยกขนาดลูกมะนาวโดยใช้ระบบสมองกลฝังตัวซึ่งใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวควบคุมการทำงานของเครื่องแบบอัตโนมัติตามที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2 จากการทดสอบเครื่องคัดแยกขนาดลูกมะนาวโดยใช้ระบบสมองกลฝังตัวที่พัฒนาขึ้น สามารถคัดแยกและนับจำนวนลูกมะนาวทั้งสามขนาด ได้ถูกต้อง 98.67% และนอกจากนี้ยังสามารถคัดแยกและชั่งน้ำหนักมะนาวทั้งสามขนาด ได้ถูกต้องถึง 99.33%

5. กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีโดยได้รับความอนุเคราะห์ในการใช้อุปกรณ์ เครื่องมือและสถานที่ในการทดลอง จากสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Umpa K. The lemons. Bangkok: Naka Publishing House Publishing;2011.Thai.

[2] Chokcharat R, Theerayut A, Tossawut C. Microcontroller Based lemons counting and Sorting machine. Phayao Research 6: conference proceedings, January 26-27, 2017, Phraya Ngam Muang Convention Hall, Phayao, Thailand. 2017.Thai

[3] Load Cell. Available from: www.ecpe.nu.ac.th/piyadanai/content/50_01/303407_1_50/.../lab3_1_loadcell.doc. [Accessed 18th November2017]. Thai.

[4] Optical sensor. Available from:http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/6805/diffuse-reflective-optical-sensor. [Accessed 17th November 2017].Thai.

[5] Somchai, B.S., K.L. Build and develop devices with microcontrollers. Bangkok: ETT Co., Ltd. Publishing;2009.Thai.

[6] Thanachap S, Wipot S. Electric motors and controls. Available from:http://thaigoodview.com/library/contest1/tech04/54/index.htm#h06. [Accessed 14th October 2015].Thai.

การออกแบบระบบรากสายดินในสถานีไฟฟ้า โดยวิธีการหาค่าที่เหมาะสุดหลายฟังก์ชันวัตถุประสงค์

Optimal Grounding Grid Design in Power System Substation by Multi-Objective Optimization NSGA-II

ประสงค์ เจริญวงศ์ [1*] กฤติเดช บัวใหญ่ [1] และกาณฑ์ เกิดชื่น [1]
[1] หน่วยวิจัยนวัตกรรมพลังงานไฟฟ้า สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
744 ถนนสุรนารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000
Prasong Charoenwong [1*], Krittidet Buayai [1] and Kaan Kerchuen [1]
[1] Department of Electrical Engineering, Faculty Engineering, Rajamangala University of Technology Isan
744 Suranarai Road, Muang, Nakhonratchasima, Thailand, 30000
[*]ผู้รับผิดชอบบทความ: prasong.ch@rmuti.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 0-8957-16881

Received: 7 August 2018, Revised: 13 Novembe 2018, Accepted: 26 November 2018

บทคัดย่อ
บทความนี้นำเสนอการออกแบบระบบรากสายดินในสถานีไฟฟ้าโดยวิธีการหาค่าที่เหมาะสุดแบบหลายวัตถุประสงค์ ซึ่งเป็นการหาค่าด้วยวิธีการเชิงพันธุกรรมแบบการจัดการลำดับที่ไม่ครอบงำ ระบบรากสายดินในสถานีไฟฟ้าจะต้องมีความปลอดภัยต่อชีวิตและอุปกรณ์ไฟฟ้า และมีราคาประหยัด ในฟังก์ชันเป้าหมายของการหาค่าที่เหมาะสมจึงประกอบด้วยราคาของวัสดุ ค่าแรงในการติดตั้งและเงื่อนไขของความปลอดภัย จากผลการทดสอบพบว่าวิธีการดังกล่าวสามารถแก้ปัญหาได้อย่างดี ทำให้ระบบรากสายดินสามารถออกแบบได้อย่างประหยัด และปลอดภัย นอกจากนี้ในบทความนี้ยังทำการทดสอบการออกแบบระบบรากสายดินจากสถานีไฟฟ้าจริง เปรียบเทียบผลลัพธ์กับวิธีหาค่าที่เหมาะสุดด้วยวิธีเชิงพันธุกรรมและวิธีหาค่าที่เหมาะแบบกลุ่มอนุภาค
คำสำคัญ รากสายดิน การหาค่าที่เหมาะสุดหลายวัตถุประสงค์ กราวด์กริด

Abstract
This paper presents the design of the grounding system in the power station using a multi-objective optimization using NSGA-II. (NSGA: Non-dominated Sorting Genetic Algorithm) The Grounding systems in power stations must be safe and electrical equipment and must be economical. The objective function of finding the right value consists of the price of the material, installation wages and security conditions. In addition, the multi-objective optimization using NSGA-II is also adjusted in line with the acceleration time for the problem. The results showed that such an approach can solve the problem well. The grounding grid design in power system substation can be designed economically and safely. This article also tests the design of the grounding system of a real power station and compares the results with the most appropriate GA (Genetic Algorithm) and PSO. (Particle Swarm Optimization)
Keywords: Grounding System, Multi-Objective, NSGA-II, Ground Grid.

1. บทนำ

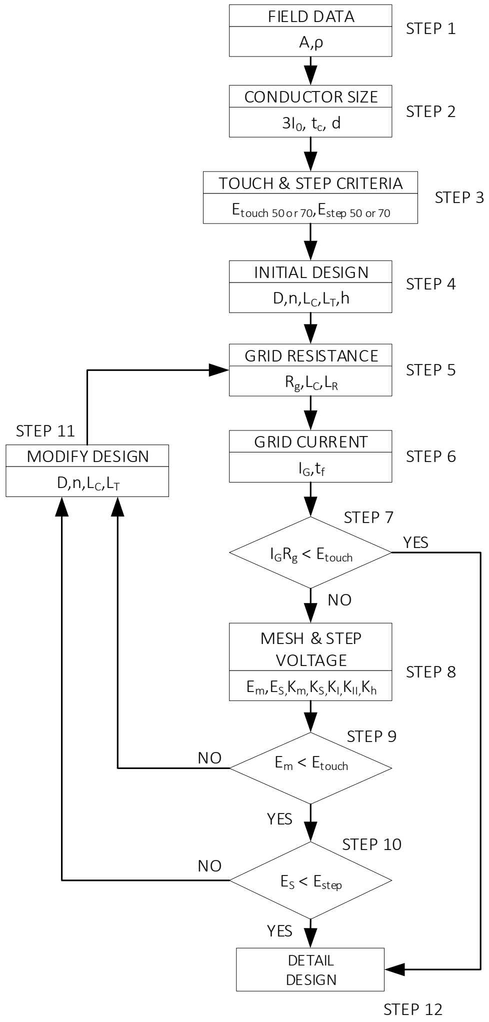
ระบบรากสายดินในสถานีไฟฟ้ามีความจำเป็นต่อชีวิตของผู้ปฏิบัติงานในสถานีไฟฟ้า และช่วยป้องกันให้อุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้ามีความปลอดภัย ในการก่อสร้างระบบรากสายดินก็ต้องการต้นทุนต่ำในการก่อสร้างด้วยเช่นกัน ดังนั้นการพิจารณาออกแบบระบบรากสายดินต้องคำนึงถึงความปลอดภัยและความประหยัดด้วย

ในการออกแบบรากสายดินนักวิจัยหลายท่านได้มีการแก้ปัญหา ด้วยวิธีการออกแบบระบบรากดินของสถานีไฟฟ้าที่เหมาะสมด้วยวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm Optimization: GA) [1] การแก้ปัญหาการออกแบบระบบรากดินของสถานีไฟฟ้าด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมฝูงอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO) [2] โดยวิธีการเหล่านี้ได้ให้ผลในการออกแบบที่มีความประหยัดและ

ปลอดภัยต่อชีวิตและทรัพย์สิน โดยอ้างอิงมาตรฐาน IEEE std. 80-2000 [3] แต่วิธีการเหล่านี้เป็นการนำเสนอวิธีการออกแบบระบบรากสายดินแบบฟังก์ชันวัตถุประสงค์เดียว (Single Objective) ทำให้การมองภาพรวมของปัญหาที่ซ้อนอยู่ในฟังก์ชันวัตถุประสงค์นั้นไม่ได้มีการเปรียบเทียบค่าที่คำนวณได้ต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นความปลอดภัยจากแรงดันช่วงก้าว (Step Voltage) แรงดันสัมผัส (Touch Voltage) และมูลค่าการลงทุนในการก่อสร้าง ในช่วงคำตอบที่ดีที่สุดในหลายๆ คำตอบที่คำนวณได้

2. การออกแบบรากสายดิน

การออกแบบระบบรากดินของสถานีไฟฟ้าเป็นไปตามมาตรฐาน IEEE std. 80-2000 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ใช้ในปัจจุบันมีขั้นตอนการออกแบบระบบรากดินมีทั้งหมด 12 ขั้นตอน [3],[4] การออกแบบกราวด์กริดสำหรับสถานีไฟฟ้ามีขั้นตอนดังแสดงตามรูปที่ 1 และรายละเอียดการออกแบบนั้นสามารถอธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 1 ขั้นตอนการออกแบบระบบรากดินของสถานีไฟฟ้าเป็นไปตามมาตรฐาน IEEE std. 80-2000 [3]

ขั้นตอนที่ 1 สำรวจข้อมูลพื้นที่ของสถานีไฟฟ้า คือ การหาข้อมูลเบื้องต้นที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบกราวด์กริด ซึ่งจะต้องถูกนำมาใช้เพื่อการคำนวณในขั้นตอนอื่นต่อไป เช่น ค่าความต้านทานจำเพาะของดินในบริเวณที่จะมีการก่อสร้างสถานีไฟฟ้า ขนาดพื้นที่ของสถานีไฟฟ้า ซึ่งโดยมากสามารถหาข้อมูลได้จากแบบก่อสร้างของสถานีไฟฟ้า

ขั้นตอนที่ 2 หาขนาดสายตัวนำ การหาขนาดสายตัวนำจะใช้กระแสฟอลต์สูงสุดที่คาดว่าจะเกิดขึ้นและใช้ช่วงเวลาการตัดกระแสที่เป็นช่วงเวลาสูงสุด

ขั้นตอนที่ 3 หาแรงดันไฟฟ้าสัมผัส (E_{touch}) และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (E_{step})ที่มนุษย์ทนได้ เป็นขั้นตอนคำนวณเพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาค่าความปลอดภัยของระบบกราวด์กริดที่จะทำการออกแบบ

ขั้นตอนที่ 4 ออกแบบกราวด์กริดเบื้องต้น โดยทำการกำหนดระยะห่างระหว่างตัวนำรวมทั้งลักษณะรูปทรงของพื้นที่

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณหาค่าความต้านทานระบบกราวด์กริด เพื่อใช้ค่าความต้านทานระบบกราวด์กริดที่คำนวณได้ไปคำนวณในขั้นตอนอื่นๆ ต่อไป

ขั้นตอนที่ 6 คำนวณหาค่ากระแสกริดสูงสุด การออกแบบจะต้องพิจารณาถึงประเภทของฟอลต์ ตำแหน่งการเกิดฟอลต์ Decrement factor และการขยายระบบในอนาคต

ขั้นตอนที่ 7 ตรวจสอบค่าศักย์ไฟฟ้าของดินที่เพิ่ม (Ground Potential Rise, GPR)

ถ้า $GPR < E_{touch}$ ไปยังขั้นตอนที่ 12

ถ้า $GPR > E_{touch}$ ไปยังขั้นตอนที่ 8

ขั้นตอนที่ 8 คำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้า โดยทำการคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าเมช (E_m) และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว (E_s) ซึ่งในการทำขั้นตอนนี้จะต้องคำนึงถึงลักษณะรูปร่างของกราวด์กริด หรือของพื้นที่

ขั้นตอนที่ 9 ตรวจสอบค่าแรงดันไฟฟ้าเมช

ถ้า $E_m < E_{touch}$ ไปยังขั้นตอนที่ 10

ถ้า $E_m > E_{touch}$ ไปยังขั้นตอนที่ 11

ขั้นตอนที่ 10 ตรวจสอบค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว

ถ้า $E_s < E_{step}$ ไปยังขั้นตอนที่ 12

ถ้า $E_s > E_{step}$ ไปยังขั้นตอนที่ 11

ขั้นตอนที่ 11 ปรับปรุงการออกแบบ เมื่อมาถึงขั้นตอนที่ 11 ได้แสดงว่าผู้ออกแบบยังออกแบบระบบต่อลงดินที่ไม่ปลอดภัย ดังนั้นในขั้นตอนนี้ผู้ออกแบบจะต้องปรับเปลี่ยนปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

1. ลดระยะห่างของกราวด์กริด (Ground grid) ซึ่งจะเป็นการเพิ่ม ความยาวของตัวนำ
2. เพิ่มแท่งหลักสายดิน (Ground rods) เพื่อเป็นการเพิ่ม ความยาวของตัวนำ
3. ลดกระแสฟอลต์ เพื่อเป็นการลดกระแสกริด
4. ลดช่วงเวลาการไหลของกระแสฟอลต์ เพื่อให้มนุษย์ทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้มากขึ้น
5. ใช้วัสดุปูบนผิวดินที่มีค่าความต้านจำเพาะมากขึ้นกว่าเดิม

ขั้นตอนที่ 12 ออกแบบในรายละเอียด กล่าวคือ การออกแบบทั้งหมดผ่านการตรวจสอบแล้วว่า การออกแบบระบบกราวด์กริดที่ได้ดำเนินการมานั้นปลอดภัย จากนี้จะเป็นการจัดวางตำแหน่งของอุปกรณ์ไฟฟ้าเหนือกราวด์กริด การเชื่อมต่อตัวนำเข้าไปยังตู้ควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้า การทำบัสต่อลงดินซึ่งต้องควบคู่ไปกับการติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้า

2.1 คำแนะนำทั่วไปของรากสายดิน

การออกแบบระบบรากดินของสถานีไฟฟ้าเป็นไปตามมาตรฐาน IEEE std. 80-2000 สิ่งที่จะบ่งบอกถึงระบบรากสายดินที่มีความเหมาะสมจะต้องประกอบไปด้วยสภาพของพื้นที่ที่มีค่าความต้านทานของดินต่ำ ซึ่งจะทำให้การติดตั้งกราวด์กริดมีต้นทุนที่ต่ำลง ความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงานภายในสถานีไฟฟ้านั้น ๆ ก็จะมีความปลอดภัยมากขึ้นด้วย ซึ่งการออกแบบระบบรากดินของสถานีไฟฟ้าให้เกิดความปลอดภัยตามมาตรฐาน จะต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขดังนี้ [2]

$$GPR \leq GPR_s \quad (1)$$

$$R_g \leq R_{gs} \quad (2)$$

$$E_s \leq E_{step70} \quad (3)$$

$$E_t \leq E_{touch70} \quad (4)$$

โดยที่

GPR คือ ศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นบนรากสายดินเทียบกับจุดดินระยะไกล (remote earth)

R_g คือ ความต้านทานรากสายดิน

E_s คือ แรงดันช่วงก้าว

E_{step70} คือ ขีดจำกัดแรงดันช่วงก้าวสำหรับคนน้ำหนัก 70 กิโลกรัมทนได้

E_t คือ แรงดันสัมผัสสูงสุดที่เกิดขึ้นภายในช่องตาข่าย (Mesh)

$E_{touch70}$ คือ ขีดจำกัดแรงดันสัมผัสสำหรับคนน้ำหนัก 70 กิโลกรัมทนได้

ในการก่อสร้างระบบรากสายดินจะต้องมีต้นทุนในการก่อสร้างที่ต่ำที่สุด ซึ่งต้นทุนต่างๆอาจประกอบด้วย [5] ต้นทุนตัวนำที่ใช้ทำรากดิน, ต้นทุนในการติดตั้งรากดิน, ต้นทุนการขุด-ถม ร่องดินเพื่อวางรากสายดิน,ต้นทุนในการเชื่อมด้วยความร้อนที่จุดตัดของรากดิน,ต้นทุนวัสดุคลุมผิว,ต้นทุนในการติดตั้งวัสดุคลุมผิว ความสัมพันธ์ของต้นทุนที่ใช้ในการก่อสร้างระบบรากดินดังสมการที่ (9)

2.2 การหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ [6]

การแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์เป็นการค้นหาเซตคำตอบภายในพื้นที่ของคำตอบที่เป็นไปได้ เพื่อต้องการหาค่าที่ต่ำที่สุด หรือค่าสูงสุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในแต่ละฟังก์ชันพร้อม ๆ กัน โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการแก้ปัญหา เรียกว่า เซตกลุ่มคำตอบที่ ดีที่สุด ปัญหาแบบหลายวัตถุประสงค์ เป็นปัญหาการออกแบบที่มีหลายวัตถุประสงค์ ประกอบด้วยวัตถุประสงค์ และตัวแปรตัดสินใจเขียนอยู่ในรูปทั่วไปดังสมการที่ (5)

$$\text{Min (or Max)}: \{f_i(x), \ldots\ldots\ldots f_m(x)\} \quad (5)$$

โดยที่

x คือ เวคเตอร์การตัดสินใจ

$f_i(x)$ คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ i เมื่อ i = 1,2,......m

โดยทั่วไปรูปแบบปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดหลายวัตถุประสงค์ มี 3 รูปแบบ ที่เป็นไปได้ ดังนี้

1) ทุกฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต้องการหาคำตอบที่น้อยที่สุด
2) ทุกฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต้องการหาคำตอบที่มากที่สุด
3) แบบขัดแย้งกัน คือบางฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต้องการหาคำตอบที่น้อยที่สุด บางฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต้องการหาคำตอบที่มากที่สุด

สำหรับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการออกแบบระบบรากสายดินในบทความนี้เป็นการหาคำตอบที่น้อยที่สุด จากสมการที่ (6) ซึ่งการค้นหาคำตอบจะถูกกำหนดจากเวกเตอร์ของตัวแปรตัดสินใจ ภายใต้ข้อจำกัดที่จะเป็นสิ่งที่ใช้ในการกำหนดขอบเขตที่น้อยที่สุด

$$\text{Min}: f = \{f_i(x), \ldots\ldots\ldots f_m(x)\} \quad (6)$$

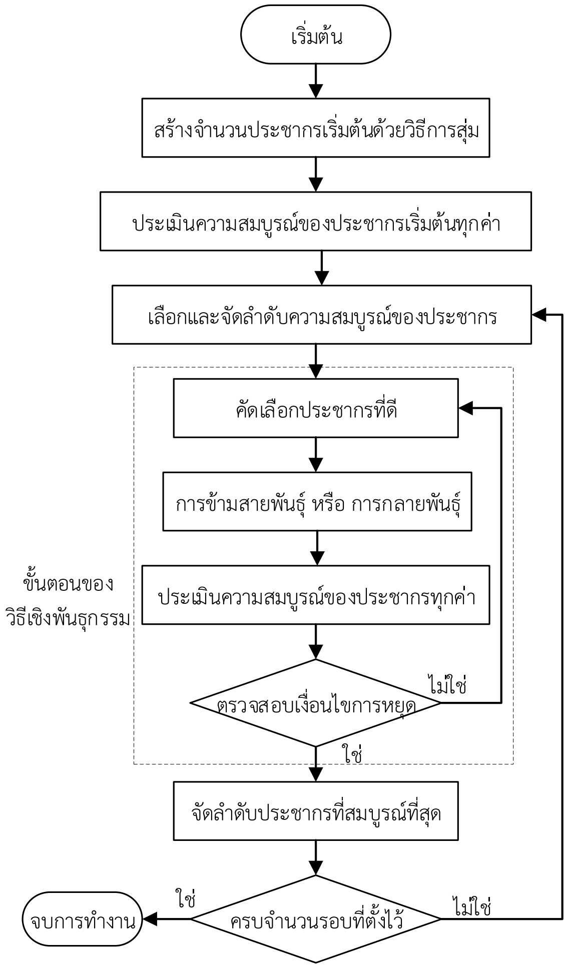
เงื่อนไข

$$g_i(x) \leq 0 \; ; i = 1, 2, \ldots\ldots m \qquad (7)$$

$$h_i(x) \leq 0 \; ; i = 1, 2, \ldots\ldots m \qquad (8)$$

เมื่อ x คือ เวคเตอร์ของตัวแปรออกแบบ
$f_i(x)$ คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ i
$g_i(x)$ คือ เงื่อนไขบังคับแบบอสมการ i
$h_i(x)$ คือ เงื่อนไขบังคับแบบสมการ i

วิธีการเชิงพันธุกรรมแบบการจัดการลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm, NSGA-II) รายงานการใช้ครั้งแรกโดย K. Deb และคณะ [7] ได้แสดงว่าเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดสำหรับการแก้ปัญหาฟังก์ชันแบบหลายวัตถุประสงค์ อัลกอริธึมนี้โดดเด่นด้วยวิธีการจัดการลำดับที่ไม่ถูกครอบงำได้อย่างรวดเร็ว แผนภูมิแสดงขั้นตอนการทำงานของ NSGA-II ดังรูปที่ 2 [8] ส่วนขั้นตอนโดยละเอียดในเชิงลึกของ NSGA-II สามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จาก K.Deb และคณะ [7]



รูปที่ 2 โครงสร้างพื้นฐานของขั้นตอนเชิงพันธุกรรมแบบการจัดการลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ [8]

3. การใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสุดหลายฟังก์ชัน วัตถุประสงค์แก้ปัญหาการออกแบบระบบรากสายดิน

ข้อมูลในการออกแบบระบบรากดินในบทความนี้เป็นข้อมูลการออกแบบระบบรากสายดินของสถานีไฟฟ้าย่อยอำเภอเกษตรสมบูรณ์ (ชั่วคราว) จังหวัดชัยภูมิ ขนาดพื้นที่กว้าง x ยาว เท่ากับ 33 x 36 เมตร ออกแบบที่ค่ากระแสลัดวงจร 8,000 แอมแปร์ ความต้านทานดิน ρ= 50 โอห์ม.เมตร ความต้านทานจำเพาะของวัสดุคลุมผิว ρ_s = 3000 โอห์ม.เมตร ช่วงเวลาที่เกิดการลัดวงจร t_f = 0.5 วินาที ช่วงข้อมูลของตัวแปร $(N_x, N_y, d_c, h, N_r, L_r, d_r, h_s)$ ที่ใช้ในการพิจารณารวมถึงต้นทุนที่ใช้คำนวณในการออกแบบดังนี้

$$N_x, N_y \in [4, 20] \qquad d_c, d_r \in [A_{min}, 0.015](m.)$$

$$h \in [0.2, 2.5](m.) \qquad N_r \in [5, 30]$$

$$L_r \in [5, 30](m.) \qquad h_s \in [0.01, 0.5](m.)$$

A_{min} คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขั้นต่ำที่ใช้ในการออกแบบฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการออกแบบระบบรากสายดิน

$$f_1(x) = \begin{pmatrix} (C_{1mat_dc} + C_{1inst} + C_{2exc}.h.e_{trch}) \\ +(C_{3mat_dr} + C_{3inst}).[N_r.L_r] \\ +(C_{4mat_dr} + C_{4inst}).[N_x.L_y.h_s] \end{pmatrix} \qquad (9)$$

$$f_2(x) = E_{touch50} + E_t \qquad (10)$$

$$\text{Constrians} : E_{touch50} - E_t \geq 0 \qquad (11)$$

$$f_3(x) = E_{step50} + E_s \qquad (12)$$

$$\text{Constrians} : E_{step50} - E_s \geq 0 \qquad (13)$$

โดยที่

C_{1mat_dc}, C_{1inst} คือ สัมประสิทธิ์ต้นทุน ตัวนำ,การติดตั้งที่ใช้ทำตาข่ายรากดิน

C_{2exc} คือ สัมประสิทธิ์ต้นทุนการขุด-ถมร่องว่างตาข่ายรากดิน

C_{3mat_dr}, C_{3inst} คือ สัมประสิทธิ์ต้นทุน ตัวนำ, การติดตั้งแท่งรากดิน (แนวดิ่ง)

C_{4mat}, C_{4inst} คือ สัมประสิทธิ์ต้นทุน วัสดุ, การติดตั้งวัสดุคลุมผิว

d_c, d_r คือ เส้นผ่านศูนย์กลางตัวนำที่ใช้ทำตาข่าย, แท่งรากดิน $(m.)$

h คือ ความลึกของการขุดร่องดินว่างตาข่ายรากดิน $(m.)$

e_{trch} คือ ความกว้างของการขุดร่องดินว่างตาข่ายรากดิน $(1\ m.)$

h_s คือ ความหนาของชั้นวัสดุคลุมผิว $(m.)$

N_x, N_y คือ จำนวนของช่องตาข่ายตามแนวแกน x, y

L_x, L_y คือ ความยาวของช่องตาข่ายตามแนวแกน x, y

N_r คือ จำนวนของแท่งรากดิน

L_r คือ ความยาวของแท่งรากดิน $(m.)$

ปัญหาการออกแบบระบบรากสายดินโดยวิธีการหาค่าที่เหมาะสุดแบบหลายฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Multi-Object: NSGA-II) มีวัตถุประสงค์หลักสามวัตถุประสงค์ ผลของการออกแบบพบว่าวัตถุประสงค์หลักทั้ง 3 วัตถุประสงค์ มีทิศทางที่ขัดแย้งกันกล่าวคือหากเลือกต้นทุนที่ต่ำจะทำให้ค่าความปลอดภัยลดลง ในขณะเดียวกันหากต้องการความปลอดภัยที่สูงก็จะทำให้ต้นทุนสูง ซึ่งเป็นลักษณะของการที่ต้องเลือกคือได้อย่างต้องเสียอย่าง (Trade-off) ดังนั้นวิธีการเลือกคำตอบที่ปะณีปะนอมจึงเป็นการดีของทั้งสามวัตถุประสงค์ ซึ่งวิธีการที่ใช้เลือกคำตอบในการออกแบบครั้งนี้ใช้หลักการของ ฟัซซี่ลอจิก โดยการกำหนดค่าความเป็นสมาชิก (Membership function) ให้กับคำตอบทุกค่าที่ได้ ดังสมการที่ (14) แล้วคัดเลือกคำตอบจากชุดคำตอบที่มีค่าความเป็นสมาชิกที่ดีที่สุด

$$\mu_{ij} = \frac{Max(f_i) - x_{ij}}{Max(f_i) - Min(f_i)} \quad (14)$$

โดยที่

μ_{ij} คือ ค่าความเป็นสมาชิก (Membership function) ของแต่ละชุดคำคอบที่ได้จากการออกแบบ

i คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ $i = 1,2,3$

j คือ ผลของคำตอบที่เหมาะสุดได้จาก NSGA-II $j=1,2,3....N_{pop}$

ค่าความเป็นสมาชิก (Membership function) ของแต่ละชุดคำคอบของแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ได้จากสมการที่ (9) มีค่าระหว่าง 0 – 1 ถ้าค่าความเป็นสมาชิก เท่ากับ 1 แสดงว่าเป็นชุดคำตอบที่มีค่าความเป็นสมาชิกที่ดีที่สุด ถ้าค่าความเป็นสมาชิก เท่ากับ 0 แสดงว่าเป็นชุดคำตอบที่มีค่าความเป็นสมาชิกที่แย่ที่สุด แล้วทำการแปลผลหาค่าคำตอบที่ต้องได้จากการออกแบบตามสมการที่ (15)

$$normalize = \left\{ \max \left\{ \frac{\sum_{\substack{i=1 \\ j=1..N_{pop}}}^{3} \mu_{ij}}{\sum \sum_{\substack{i=1 \\ j=1..N_{pop}}}^{3} \mu_{ij}} \right\} \right\} \quad (15)$$

4. ผลการออกแบบระบบรากสายดิน

ตารางที่ 1 ผลของการออกแบบระบบรากสายดิน สถานีไฟฟ้าย่อยอำเภอเกษตรสมบูรณ์ (ชั่วคราว) จังหวัดชัยภูมิ

Parameter	Solution		
	GA	PSO	NSGA-II
	N_{pop} [I]=50	SW[III]=100	N_{pop}=50
	N_{gen} [II]=200	-	N_{gen}=200
N_x	8	9	9
N_y	9	10	5
d_c	0.0093	0.0067	0.0066
h	0.6719	1.257	0.4075
N_r	38	40	11
L_r	6	6	3
d_r	0.0065	0.0063	0.0060
h_s	0.14	0.13	0.1
Cost	631,711	594,641	528,389
E_{touch}	668.35	660.40	618.04
E_m	668.344	660.36	617.57
E_{step}	2,224.11	2192.35	2,022.89
E_s	368.035	217.70	578.90

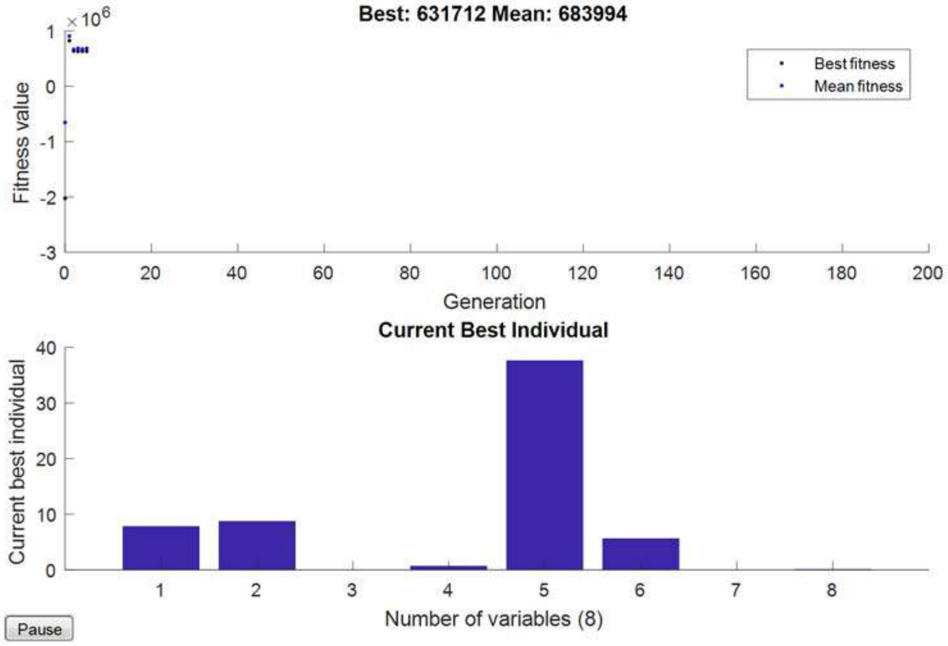
[I] N_{pop} คือ จำนวนประชากรการที่ใช้ในการสุ่ม

[II] N_{gen} คือ ประชากรรุ่นใหม่ที่เกิดจากการไขว้เปลี่ยน หรือการกลายพันธุ์

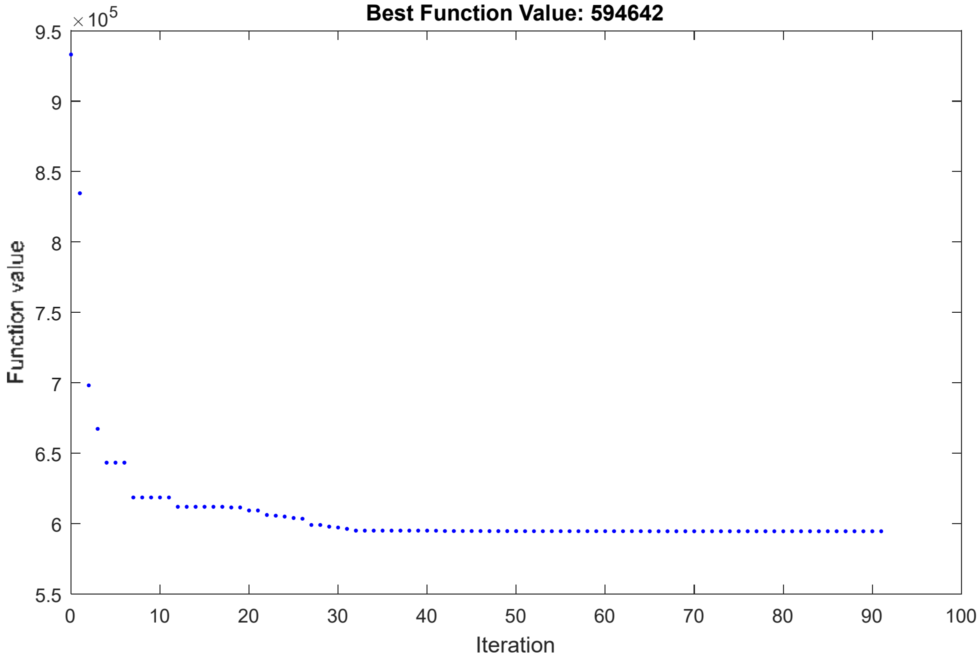
[III] SW คือ Swarm Size

ผลของการออกแบบระบบรากสายดินตามตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าการออกแบบระบบรากสายดินด้วยวิธีวิธีการหาค่าที่เหมาะสุดด้วยวิธีเชิงพันธุกรรม (GA) วิธีการหาค่าที่เหมาะสมฝูงอนุภาค (PSO) และวิธีการหาค่าที่เหมาะสุดแบบหลายวัตถุประสงค์ ด้วยวิธีการเชิงพันธุกรรมแบบการจัดการลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ (NSGA-II) โดยมีวัตถุประสงค์ที่ต้องการคือได้ระบบรากสายดินของสถานีไฟฟ้ามีความปลอดภัยและต้นทุนในการก่อสร้างที่ราคาถูก จะเห็นได้ว่าวิธีการออกแบบ

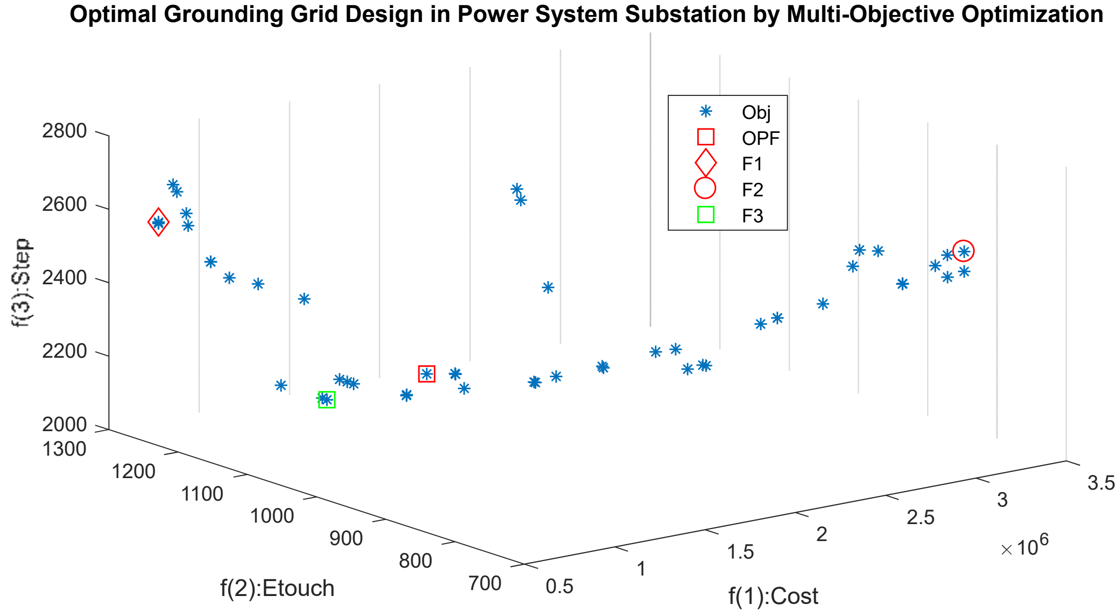
ด้วย GA และ PSO จะได้ค่าความปลอดภัยที่ใกล้เคียงกันคือแรงดันสัมผัส (E_{touch}) เท่ากับ 668.35 และ 660.40 โวลต์ แรงดันช่วงก้าว (E_{step}) เท่ากับ 2,224.41 และ 2,192.35 โวลต์ ต้นทุนในการก่อสร้าง 631,711 และ 594,641 บาท ตามลำดับ วิธีการออกแบบด้วย NSGA-II ได้ต้นทุนในการก่อสร้าง 528,389 บาท แรงดันสัมผัส (E_{touch}) 618.04 โวลต์ แรงดันช่วงก้าว (E_{step}) 2,022.89 โวลต์ เมื่อเปรียบเทียบผลการออกแบบระบบรากสายดินกับวิธี GA และ PSO แสดงให้เห็นว่าวิธีการออกแบบระบบรากสายดิน มีความปลอดภัยทั้ง 3 วิธี และ NSGA-II ให้ต้นทุนในการก่อสร้างที่ถูกกว่า ทั้งนี้ผลของการออกแบบระบบรากสายดินแสดงได้ดังรูปที่ 3-5



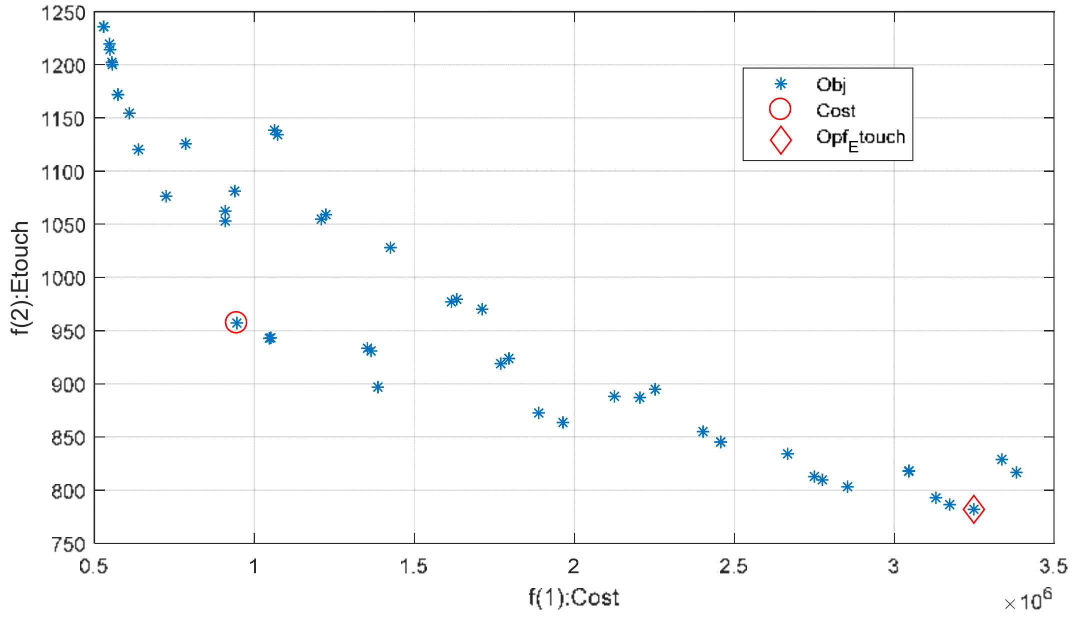
รูปที่ 3 ผลของการออกแบบระบบรากดินของสถานีไฟฟ้าที่เหมาะสมด้วยวิธีเชิงพันธุกรรม (GA)



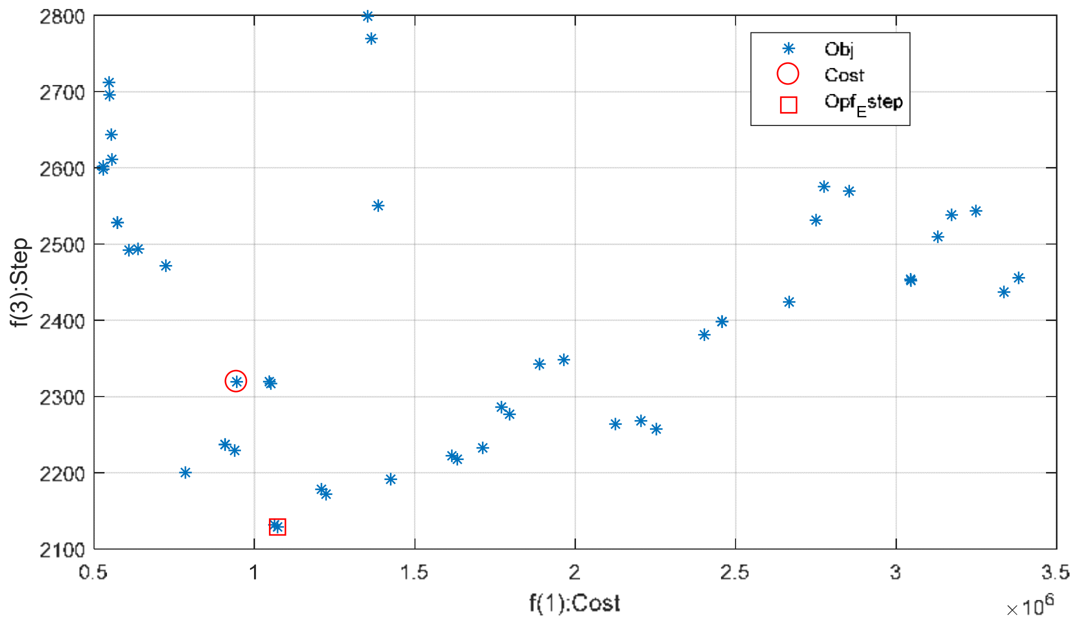
รูปที่ 4 ผลของการออกแบบระบบรากดินของสถานีไฟฟ้าที่เหมาะสมด้วยวิธีฝูงอนุภาค (PSO)



รูปที่ 5 ผลของการออกแบบระบบรากดินของสถานีไฟฟ้าที่เหมาะสมแบบหลายวัตถุประสงค์ (NSGA-II)



รูปที่ 6 เปรียบเทียบผลของการออกแบบระบบรากดินด้วย NSGA-II ระหว่างต้นทุนในการออกแบบ ความปลอดแรงดันสัมผัส



รูปที่ 7 เปรียบเทียบผลของการออกแบบระบบรากดินด้วย NSGA-II ระหว่างต้นทุนในการออกแบบ ความปลอดแรงดันช่วงก้าว

จากผลของการออกแบบระบบรากดินของสถานีไฟฟ้าที่เหมาะสมด้วยวิธีเชิงพันธุกรรม (GA) ตามรูปที่ 3 รูปบนเป็นผลของการออกแบบรากสายดิน แกน X คือจำรอบของการออกแบบ (Iteration) แกน Y คือคำตอบของการออกแบบรากสายดินในแต่ละรอบการออกแบบ (Fitness Value) รูปล่างเป็นกราฟแท่งของคำตอบที่ดีที่สุดของการออกแบบ แกน Y คือค่าช่วงของตัวแปรที่ทำการศึกษาทั้ง 8 ตัวแปร $(N_x, N_y, d_c, h, N_r, L_r, d_r, h_s)$ แกน X ตัวแปรทั้ง 8 ตัว $(1 = N_x, 2 = N_y, 3 = d_c, 4 = h, 5 = N_r, 6 = L_r, 7 = d_r, 8 = h_s)$

รูปที่ 4 ผลของการออกแบบระบบรากดินของสถานีไฟฟ้าที่เหมาะสมด้วยวิธีฝูงอนุภาค (PSO) แกน X คือจำรอบของการออกแบบ (Iteration) แกน Y คือคำตอบของการออกแบบรากสายดินในแต่ละรอบการออกแบบ (Fitness Value) จากกราฟแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าการออกแบบลู่เข้าสู่คำตอบที่ดีที่สุด และค่า gbest จะมีการเปลี่ยนแปลงทั้งหมด 5 ครั้ง เริ่มต้นจาก 6.4×10^5 ครั้งที่สอง 6.2×10^5 และครั้งสุดท้ายที่ 5.9×10^5 ในการเปลี่ยนแปลงครั้งสุดท้ายที่จำนวนรอบเท่ากับ 32

รูปที่ 5 ผลของการออกแบบระบบรากดินของสถานีไฟฟ้าที่เหมาะสมแบบหลายวัตถุประสงค์ (NSGA-II) เป็นลักษณะกราฟ 3 แกน โดยที่ประกอบด้วยผลของการออกแบบตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการออกแบบ คือ ต้นทุนในการออกแบบ (f(1) Cost) แรงดันสัมผัส (f(2) Etouch) แรงดันช่วงก้าว (f(3) Estep)

รูปที่ 6 และรูปที่ 7 เปรียบเทียบผลของการออกแบบระบบรากดินของสถานีไฟฟ้าที่เหมาะสมแบบหลายวัตถุประสงค์ (NSGA-II) ระหว่างต้นทุนในการออกแบบความปลอดแรงดันสัมผัส และความปลอดภัยจากแรงดันช่วงก้าว จะเห็นได้ว่าถ้าเราต้องการความปลอดภัยสูงสุดก็จะทำให้ต้นทุนในการก่อสร้างนั้นสูงตามไปด้วย ซึ่งเป็นลักษณะของการที่ต้องเลือกคือได้อย่างต้องเสียอย่าง (Trade-off) ดังนั้นวิธีการเลือกคำตอบที่ประณีประนอมจึงเป็นการดีของทั้งสามวัตถุประสงค์ ซึ่งวิธีการที่ใช้เลือกคำตอบในการออกแบบดังสมการที่ (14) จุดที่เหมาะสุดคือตำแหน่ง OPF แสดงตามรูปที่ 5 และค่าที่ได้จากการออกแบบดังตารางที่ 1

5. สรุป

จากการนำวิธีการหาค่าที่เหมาะแบบหลายวัตถุประสงค์มาประยุกต์แก้ปัญหาการออกแบบระบบรากสายดินในสถานีไฟฟ้า พบว่าวิธีการนี้สามารถแก้ปัญหาการออกแบบระบบรากสายดินในสถานีไฟฟ้าแบบหลายฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้ดี และสามารถนำผลที่ได้ไปใช้ในการประมาณราคาการก่อสร้างระบบรากสายดินของสถานีไฟฟ้าย่อย ที่เกิดความปลอดภัยตามที่มาตรฐานกำหนด และมีต้นทุนในการก่อสร้างที่ประหยัด

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Ahmed Z. Gabr, Ahmed A. Helal, Hussein E. Said. Optimal Design of Substation Grounding Grid Based on Genetic Algorithm Technique. World Academy of Science Engineering and Technology International Journal of Electrical. Computer, Energetic, Electronic, and Communication Engineering. 2016;10(7):863-9.

[2] Chun-Yao Lee, Yi-Xing Shen. Optimal Planning of Ground Grid Based on Particle Swam Algorithm. World Academy of Science Engineering and Technology International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic, and Communication Engineering, 2009;3(12):2235-42.

[3] IEEE Power Engineering Society. IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding. in ANSI/IEEE Std. 80 (Revision of IEEE Std 80-1986), New York: 2000.

[4] พงศ์พันธ์ ปริยวงศ์. หลักการระบบสายดินและการประยุกต์ใช้งาน. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2556.

[5] B.Alik, M.Teguar, B.Mekhaldi. Minimization of Grounding System Cost Using PSO, GAO, and HPSGAO Techniques. in IEEE Transaction on Power Delivery, 2015;30(6):2561-9.

[6] ภรัณยา อำมฤครัตน์, พยุง มีสัจ. การหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ด้วยขั้นตอนวิธีด้านวิวัฒนาการ. วารสารเทคโนโลยีสารสนเทศ 2555;8(2):73-80.

[7] Deb K, Pratap A, Agarwal S, Meyarivan T. A fast and elitist multi objective genetic algorithm: NSGA-II.IEEE Trans., Evol. Comput. 2002;6(2):182–197.

[8] Chang Y, Bouzarkouna Z, Devegowda D. Multi-objective optimization for rapid and robust optimal oilfield development under geological uncertainty. Computational Geosciences. 2015; 19:933–950.

การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *Ralstonia solanacearum* ในดินเพาะปลูกด้วยการปล่อยน้ำร้อนจากท่อแนวตั้ง

Inhibition of the Growth of *Ralstonia Solanacearum* in Field Soil by Releasing Hot Water from Vertical Pipe

ณัฐพงษ์ แกมทับทิม [1*] และศิริชัย เทพา [2]

[1] สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา พิษณุโลก 52 หมู่ 7 ตำบลบ้านกร่าง อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก 65000

[2] ห้องปฏิบัติการพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อการเกษตร สาขาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 126 ถนนประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร 10140

Natthaphong Kaemthapthim [1*] and Sirichai Thepa [2]

[1] Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Phitsanulok 52 Moo 7, Ban Krang, Muang, Phitsanulok, Thailand, 65000

[2] Solar Energy in Agriculture Laboratory, Division of Energy Technology, School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi 126 Pracha-Uthit Road, Bang Mod, Thung khru, Bangkok, Thailand, 10140

[*] ผู้รับผิดชอบบทความ: natthaphong@rmutl.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 081-965-9058

Received: 4 February 2019, Revised: 10 April 2019, Accepted: 22 April 2019

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *Ralstonia solanacearum* ในดินเพาะปลูก ซึ่งเป็นสาเหตุของโรคเหี่ยวเขียวของพืช โดยใช้เชื้อดังกล่าวจำนวน 4.7×10^7 colony forming unit/g soil ผลการทดลองพบว่าการปล่อยน้ำร้อนใต้ดินจากท่อแนวตั้ง 3 รู สามารถกระจายความร้อนไปยังชั้นดินที่ระยะห่าง 5 และ 10 cm ความลึกดิน 40 cm เมื่อเวลาปล่อยน้ำร้อนผ่านไป 240 min ผลการนับ *Ralstonia solanacearum* ที่เหลือหลังการทดลอง สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตได้ทั้งหมด

คำสำคัญ ท่อน้ำร้อน น้ำร้อน พื้นผิวดิน โรคเหี่ยวเขียว ใต้ดิน

Abstract

The purpose of this research to inhibit the growth of *Ralstonia solanacearum* bacteria, which is the cause of Wilt in plant using the bacteria at 4.7×10^7 colony forming unit/g soil. The results showed that releasing hot water from 3-holes vertical pipe method could increase efficacy of heat releasing to the soil at the distance of 5 and 10 cm with 40 cm depth of soil. After 240 minutes of hot water releasing, *Ralstonia solanacearum* was completely inhibited.

Keywords: hot water pipe, hot water, soil surface, wilt, underground.

1. บทนำ

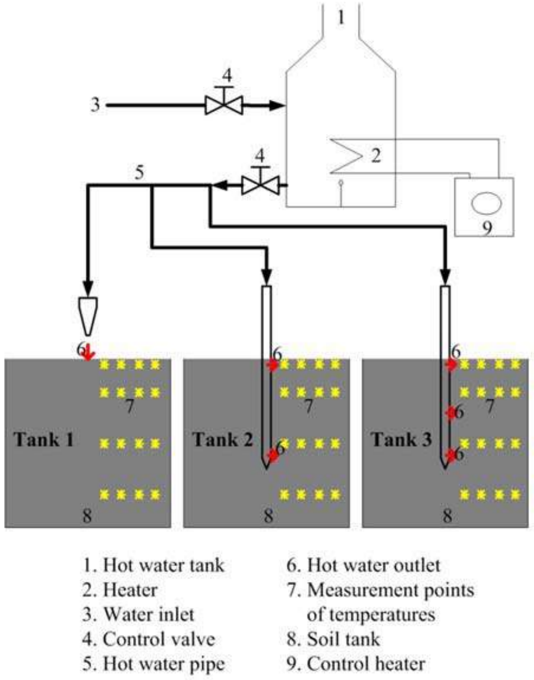
พืชไร่เศรษฐกิจหลายชนิดประสบปัญหาการเกิดโรคเหี่ยวเขียวที่มีสาเหตุจากเชื้อ *Ralstonia solanacearum* ซึ่งเป็นโรคที่ทำความเสียหายตั้งแต่ระยะต้นกล้าจนกระทั่งเก็บเกี่ยวผลผลิต เชื้อสามารถเข้าทำลายพืชทุกระยะการเจริญเติบโต ทำให้เกษตรกรประสบปัญหาการเพาะปลูกพืชไร่ และเพื่อลดความเสียหายของเชื้อชนิดนี้ที่มีต่อพืชที่ผ่านมาได้มีการใช้พันธุ์ต้านทาน การปลูกพืชหมุนเวียน การใช้สารเคมีและการใช้ส่วนที่ไม่มีโรคมาเพาะปลูก แต่ก็ยังไม่ประสบความสำเร็จเท่าที่ควร *Ralstonia solanacearum* เป็นเชื้อที่เจริญเติบโตและเข้าทำลายพืชได้ดีในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 30 - 35 °C ซึ่งอิทธิพลส่วนใหญ่เกิดจากอุณหภูมิดิน ดังนั้นในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *Ralstonia solanacearum* ด้วยวิธีเพิ่มความร้อนดินจึงเป็นวิธีที่เหมาะสำหรับนำไปใช้ควบคุมปริมาณเชื้อ *Ralstonia solanacearum* ในดินที่มีอยู่มากบริเวณรอบรากพืชที่ส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืช

โดยสิ่งสำคัญสำหรับการเพิ่มความร้อนดินประกอบด้วย อุณหภูมิ ความชื้น และระดับความลึกของดิน ซึ่งมีผลต่อการเพิ่มอุณหภูมิดินโดยตรง [1],[2] การ solarization ดินเป็นวิธีการที่ดีในการควบคุมเชื้อโรคและแมลงศัตรูพืชในดินที่มีการปลูกพืชในโรงเรือน อีกทั้งใช้เทคโนโลยีที่ไม่ซับซ้อนไม่ส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมของดิน การ solarization ดิน อุณหภูมิจะแปลผกผันกับความลึก โดยการ solarization ดินติดต่อกันสองหรือสามรอบต่อปีจะมีผลกระทบทางชีวภาพเพียงเล็กน้อยในดิน [3] จากการทดลอง solarization ดินเพื่อควบคุมเชื้อโรคในประเทศกรีซ โดยดินถูกคลุมด้วยพลาสติกโปร่งใส 4 - 6 สัปดาห์ ในช่วงฤดูร้อนเพื่อควบคุมเชื้อ *Pyrenochaeta lycopersici, Verticillium dahlia* และ *Fusarium oxysporum f. sp. lycopersici* ที่เกิดกับมะเขือเทศ ทำให้เชื้อโรคในดินลดลงรวมทั้งยังสามารถเพิ่มผลผลิตได้อีกด้วย [4] ในการศึกษาการเพิ่มความร้อนต้องเลือกดินที่เหมาะสมซึ่งมีความสำคัญอย่างมาก เพื่อประโยชน์สำหรับการวิเคราะห์แก้ปัญหาการนำความร้อนเพราะดินแต่ละชนิดจะมีค่าการนำความร้อนที่แตกต่างกัน [5] ดังนั้นเพื่อลดระยะเวลาในการ solarization ดิน จึงมีการใช้ท่อช่วยเพิ่มความร้อนดินแต่ต้องศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกระบวนการส่งถ่ายความร้อนในดิน โดย อุณหภูมิของดินที่ใช้ทดลองจะมีค่าสูงในชั่วโมงแรก จากนั้นจะลดลงอย่างรวดเร็วซึ่งเป็นข้อจำกัดของดินสำหรับการนำความร้อนจากท่อสู่ดิน [6] โดยมีองค์ประกอบที่ต้องศึกษาคืออัตราการไหลของน้ำในท่อ อัตราส่วนความพรุนและความจุความร้อนของดิน โดยการนำความร้อนของดินรอบท่อความร้อนมีการกระจายอุณหภูมิที่แตกต่างกัน รวมถึงระยะห่างการวางท่อที่เหมาะสมสำหรับการเพิ่มความร้อนดินที่มีจำนวนหลายท่อซึ่งมีความสำคัญในการเพิ่มความร้อนดิน [7] จากข้อมูลเบื้องต้นสามารถนำมาประยุกต์ใช้ควบคุมเชื้อโรคในดินได้ โดยเชื้อ *Ralstonia solanacearum* ไม่สามารถรอดชีวิตอยู่ได้ที่อุณหภูมิ 37 – 40 °C พิจารณาการกระจายอุณหภูมิของดินในแต่ละชั่วโมงจะมีความสม่ำเสมอ ที่ระดับความลึก 2 cm มีค่ามากกว่า 40 °C [8] และมีการใช้ความร้อนเพื่อควบคุมเชื้อโรคในดินด้วยวิธีการเพิ่มความร้อนดินโดยใช้พาราโบราแบบไม่สมมาตรร่วมกับการหยดน้ำร้อนบนผิวดิน โดยที่ระดับความลึกไม่เกิน 50 cm จะมีค่าอุณหภูมิดิน 41.3 °C ซึ่งสามารถใช้ควบคุมเชื้อโรคในดินได้แต่ยังไม่สามารถยับยั้งเชื้อได้ทั้งหมด [9] นอกจากนี้ยังมีการเพิ่มความร้อนดินที่ให้ผลรวดเร็วจากการใช้ไอน้ำร้อน แต่ความชื้นเป็นสิ่งสำคัญต่อประสิทธิภาพการเพิ่มความร้อนของดินด้วยไอน้ำร้อน และมีความยุ่งยากรวมถึงมีค่าใช้จ่ายสูง [10],[11] ดังนั้นการเพิ่มอุณหภูมิดินสามารถทำได้หลายวิธี แต่เมื่อพิจารณาอุณหภูมิที่ความลึกดินเพิ่มขึ้น การใช้น้ำร้อนช่วยเพิ่มอุณหภูมิดินเป็นวิธีที่ดี โดยการเพิ่มอุณหภูมิดินที่เหมาะสมสำหรับใช้ยับยั้งเชื้อ *Ralstonia solanacearum* ในกรณีการปล่อยน้ำร้อนลงดิน จำเป็นต้องพิจารณาอัตราการไหลของน้ำร้อนใต้ดิน โดยเม็ดดินขนาดใหญ่จะมีผลต่ออัตราการแทรกซึมของน้ำเร็วขึ้น และมีรูปแบบการแทรกซึมที่ลึกและกว้างขึ้น [12] ซึ่งผลดังกล่าวเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการควบคุมโรคพืช และเป็นวิธีที่ง่ายต่อการทำงาน

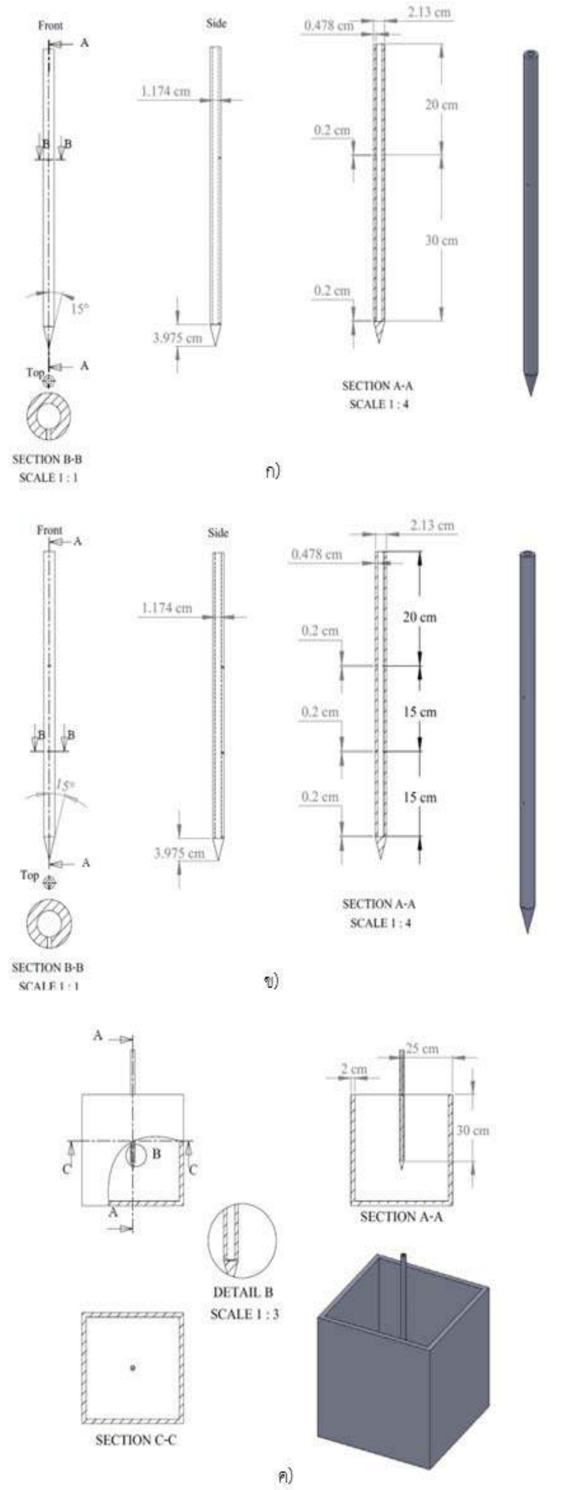
ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้ จึงได้เลือกใช้เชื้อ *Ralstonia solanacearum* 4.7 × 10^7 colony forming unit/g soil เนื่องจากเชื้อจะถูกเจือจางและนำตัวอย่างผสมกับดินทดลองในแต่ละถุง โดยประเมินการเปลี่ยนแปลงของเชื้อ *Ralstonia solanacearum* ในดินตัวอย่างที่ความลึก 0 10 25 และ 40 cm ระยะห่างจากท่อ 5 10 15 และ 20 cm ที่ 30 60 และ 240 min เพื่อทำการศึกษาหาการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อด้วยวิธีการปล่อยน้ำร้อนเพื่อเพิ่มความร้อนในดิน

2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาวิธีการเพิ่มอุณหภูมิดินที่สูงพอสำหรับยับยั้งการเจริญเติบโตของ *Ralstonia solanacearum* โดยวิธีการปล่อยน้ำร้อนบนผิวดินและวิธีการปล่อยน้ำร้อนใต้ผิวดินจากท่อแนวตั้งแบบ 2 และ 3 รู เพื่อศึกษาการกระจายความร้อนของดินจากการไหลแทรกซึมของน้ำร้อนไปยังดินและนำมาใช้ยับยั้งการเจริญเติบโตของ *Ralstonia solanacearum*



รูปที่ 1 แผนภาพการทดลองกระจายความร้อนในดิน



รูปที่ 2 อุปกรณ์ทดลอง (ก) ท่อ 2 รู (ข) ท่อ 3 รู (ค) การวางท่อจ่ายน้ำร้อนในถังใส่ดิน

2.1 ข้อมูลการทดลอง

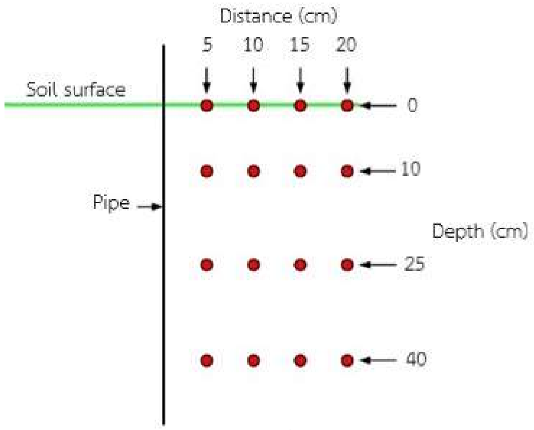
การทดลองกระจายความร้อนในดินจำนวน 3 ถัง ถังที่ 1 ใช้สำหรับปล่อยน้ำร้อนบนผิวดิน ถังที่ 2 ใช้สำหรับท่อปล่อยน้ำร้อนใต้ผิวดินแบบ 2 รู และถังที่ 3 ใช้ท่อแบบ 3 รู ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยใช้น้ำร้อนที่อุณหภูมิ 70 °C อัตราการไหลของน้ำ 9.35×10^{-6} m^3 s^{-1} และวัดอุณหภูมิห่างจากท่อปล่อยน้ำร้อน 5 10 15 และ 20 cm ที่ระดับความลึกดิน 0 10 25 และ 40 cm ใช้เวลาในการทดลอง 30 60 120 180 และ 240 min โดยมีปริมาตรดินภายในถัง 0.10157 m^3 ความหนาแน่นของดิน 886.09 kg m^{-3} โดยมีส่วนประกอบของดินที่ใช้ในการทดลองแบ่งเป็นดินชนิด sand 32% silt 28% และ clay 40% ความชื้นของดิน 47.2% และค่าการนำความร้อน 0.85 W $(m\ K)^{-1}$

2.2 ท่อและถังใส่ดิน

ท่อปล่อยน้ำร้อนใต้ดิน มีขนาดความยาว 50 cm เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 2.13 cm เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.174 cm ความหนาของผนังท่อ 0.478 cm โดยท่อปล่อยน้ำร้อน 2 รู กำหนดให้รูที่ 1 อยู่บนผิวดินและรูที่ 2 อยู่ใต้ดินระยะห่าง 30 cm และท่อปล่อยน้ำร้อน 3 รู กำหนดให้รูที่ 1 อยู่บนผิวดิน รูที่ 2 และ 3 อยู่ใต้ดินระยะห่างของรู 15 cm ท่อทั้ง 2 แบบ ฝังในถังดินแนวตั้งลึก 30 cm และการปล่อยน้ำร้อนบนผิวดินโดยปล่อยน้ำร้อนที่ศูนย์กลางของถังดิน ที่ทางออกน้ำร้อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 cm และถังใส่ดินขนาดภายนอก 50 × 50 × 50 cm ความหนาผนัง 2 cm ดังแสดงในรูปที่ 2

2.3 ตำแหน่งวัดอุณหภูมิและฝังเชื้อ

ตำแหน่งวัดอุณหภูมิและฝังเชื้อ *Ralstonia solanacearum* ภายในถังใส่ดิน ดังแสดงในรูปที่ 3 ท่อปล่อยน้ำร้อนติดตั้งกลางถังดิน และวัดระยะห่างจากท่อปล่อยน้ำร้อน 5 10 15 และ 20 cm ที่ความลึก 0 10 25 และ 40 cm เพื่อติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิและฝังเชื้อ 1 ถุงต่อตำแหน่ง ทั้งหมด 16 ตำแหน่งต่อการทดลอง



รูปที่ 3 ตำแหน่งวัดอุณหภูมิและฝังเชื้อ *Ralstonia solanacearum*

2.4 การเพาะเชื้อและทดสอบ

การยับยั้งเชื้อ *Ralstonia solanacearum* ในดินเพื่อศึกษาการใช้น้ำร้อนยับยั้งจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรคพืช *Ralstonia solanacearum* เป็นสาเหตุของโรคเหี่ยวเขียวในรากพืชที่ถูกฝังอยู่ในดินที่ความลึก 0 10 25 และ 40 cm ตัวอย่างเชื้อแบคทีเรีย *Ralstonia solanacearum* (from Bacteriology group, Plant Disease Research and Development Department of Agriculture, Thailand) ได้มาจากการเพาะเลี้ยงเชื้อด้วยการเขย่าที่ 30 °C และหมุนเหวี่ยง 6,000 × g ที่ 20 min แล้วนำเชื้อไปล้างในน้ำกลั่นสองครั้ง หลังจากที่ล้างเชื้อครั้งสุดท้าย พักไว้ในน้ำกลั่น ปลอดเชื้อ (SDW) การกำหนดจำนวนของเซลล์ ได้จากการวัดความหนาแน่นของแสงด้วย OD600 เชื้อจะถูกเจือจางเพื่อให้ได้จำนวนของเซลล์ที่ต้องการ และนำตัวอย่างเชื้อไปผสมกับดินทดลอง การยับยั้งเชื้อแบคทีเรียในดินที่มีจำนวน 4.7×10^7 cfu g^{-1} จากการเพาะเชื้อสายพันธุ์ *Ralstonia solanacearum* ถูกผสมกับดินแต่ละถุงและเมื่อผ่านการฆ่าเชื้อ ผลของการประเมินการเปลี่ยนแปลงของเชื้อ *Ralstonia solanacearum* ในดินตัวอย่างที่ความลึก 0 10 25 และ 40 cm ระยะห่างจากท่อปล่อยน้ำร้อน 5 10 15 และ 20 cm ที่ 30 60 และ 240 min หลังการทดลองทำการวิเคราะห์ โดยวิธีเจือจางบนแผ่นมันฝรั่งในอาหารเลี้ยงเชื้อสังเคราะห์ (PSA) เชื้อในดินจะถูกนับจำนวน *Ralstonia solanacearum* ที่เจริญเติบโตบน PSA และนำมาเปรียบเทียบกับการควบคุมการเจริญเติบโตของแบคทีเรียบน PSA

2.5 วิธีการดำเนินการวิจัย

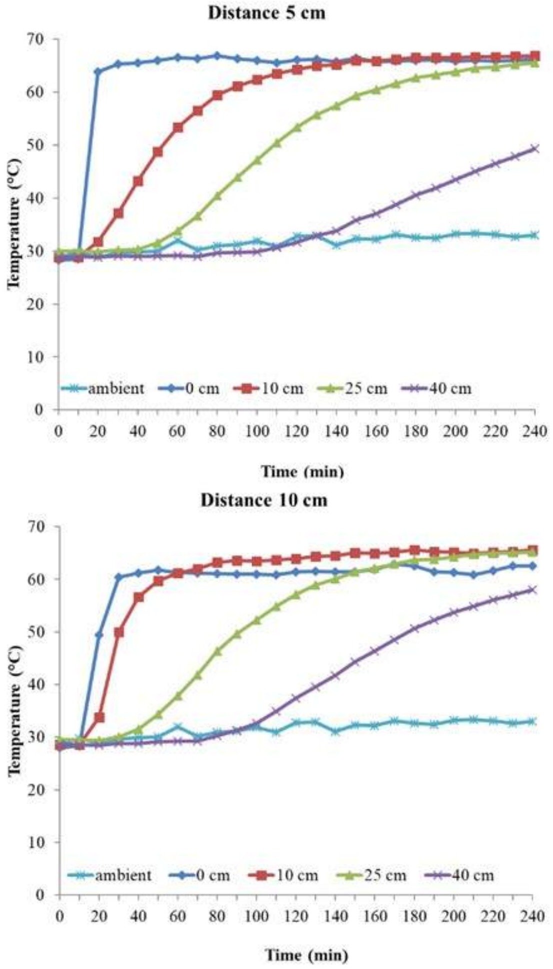
การทดลองกระจายความร้อนดินด้วยน้ำร้อนทั้ง 3 วิธี เริ่มจากขั้นตอนการเตรียมดินใส่ถังก่อนการทดลองทิ้งไว้ 48 hr (ทำซ้ำทุกการทดลอง) การเก็บบันทึกข้อมูลอุณหภูมิดินใช้เครื่องบันทึกข้อมูล Yokogawa DX230-3-2 ร่วมกับเทอร์โมคัปเปิล ทุก 10 min ที่ระยะเวลา 240 min และตั้งค่าอุณหภูมิน้ำร้อนที่ 70 °C ด้วยกล่องควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติก่อนการทดลอง 30 min และปรับตั้งอัตราการไหลของน้ำร้อน เริ่มบันทึกข้อมูลอุณหภูมิดินก่อนปล่อยน้ำร้อน 10 min หลังจากนั้นจึงเริ่มปล่อยน้ำร้อนลงดิน หลังจากครบเวลาที่กำหนด นำผลมาวิเคราะห์เปรียบเทียบการกระจายความร้อนในดินทั้ง 3 วิธี และนำวิธีการปล่อยน้ำร้อนที่ใช้เวลาเพิ่มความร้อนดินน้อยที่สุด มาใช้สำหรับยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *Ralstonia solanacearum* ในดินเพาะปลูก โดยทดลองที่ระยะเวลา 30 60 และ 240 min โดยฝังถุงดินและ *Ralstonia solanacearum* ตัวอย่างในดินที่ระยะห่างและความลึกที่กำหนด หลังจากนั้นดำเนินการตามขั้นตอนวิธีการปล่อยน้ำร้อนลงดินข้างต้น เมื่อครบกำหนดเวลาทดลองทำการเก็บถุงตัวอย่าง เพื่อนำมาวิเคราะห์ผลโดยการเพาะเชื้อและนับจำนวนเชื้อที่เหลือหลังการทดลองในห้องปฏิบัติการ

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

พิจารณาผลการทดลองที่ระยะเวลาปล่อยน้ำร้อน เนื่องจากต้องการลดเวลาการเพิ่มความร้อนดินที่ระยะห่างและระดับความลึกต่าง ๆ

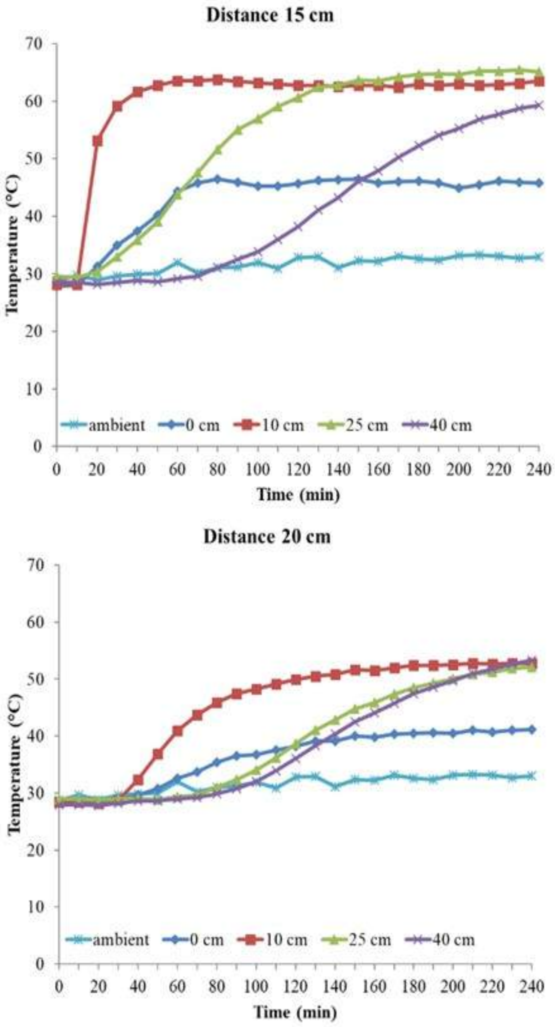
3.1 ผลการทดลองปล่อยน้ำร้อนบนผิวดิน

อุณหภูมิดินก่อนการทดลองเฉลี่ย 28.2 °C และอุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ย 31.7 °C พบว่าอุณหภูมิดินขึ้นอยู่กับเวลาการปล่อยน้ำร้อน โดยพิจารณาอุณหภูมิดินที่เหมาะสำหรับยับยั้งเชื้อ *Ralstonia solanacearum* ต้องใช้เวลาปล่อยน้ำร้อน 180 min โดยมีอุณหภูมิดินเรียงตามลำดับความลึกที่ระยะห่าง 5 cm ดังแสดงในรูปที่ 4

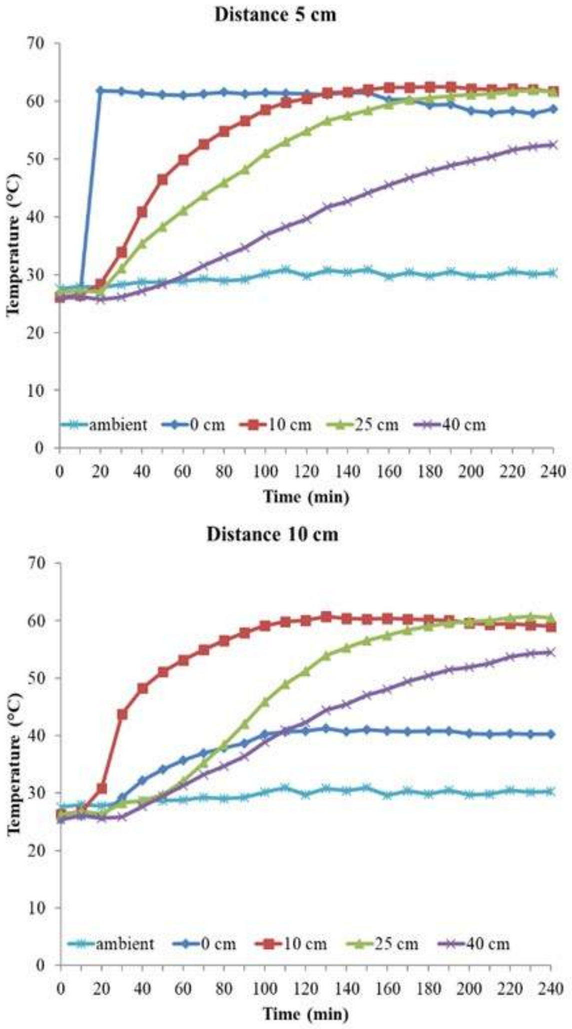


รูปที่ 4 ผลการทดลองปล่อยน้ำร้อนบนผิวดินที่ระยะห่าง 5 และ 10 cm ที่ความลึกของดิน 0 10 25 และ 40 cm บันทึกอุณหภูมิทุก 10 min

อุณหภูมิดินเท่ากับ 66 66.5 62.7 และ 40.6 °C ระยะห่าง 10 cm อุณหภูมิดินเท่ากับ 62.6 65.6 63.7 และ 50.7 °C ระยะห่าง 15 cm ดังแสดงในรูปที่ 5 อุณหภูมิดินเท่ากับ 46.1 63 64.6 และ 52.3 °C ระยะห่าง 20 cm อุณหภูมิดินเท่ากับ 40.5 52.4 48.5 และ 47.5 °C แสดงให้เห็นว่าเวลามีผลต่อการเพิ่มอุณหภูมิดิน และอุณหภูมิผิวดินต่ำกว่าที่ระดับความลึกเพิ่มขึ้น เนื่องจากน้ำมีการสูญเสียความร้อนจากการพาสู่สิ่งแวดล้อมบริเวณผิวดิน และเมื่อระยะห่างเพิ่มขึ้นการไหลอิสระของน้ำตามแรงโน้มถ่วงของโลกในดินที่เป็นวัสดุพรุนจะแทรกซึมลงสู่ดินด้านล่างมากกว่าด้านข้าง และน้ำยังมีการถ่ายเทความร้อนสู่ชั้นดินที่ไหลผ่านจึงส่งผลต่ออุณหภูมิดินที่ความลึกเพิ่มขึ้นเช่นกัน



รูปที่ 5 ผลการทดลองปล่อยน้ำร้อนบนผิวดินที่ระยะห่าง 15 และ 20 cm ที่ความลึกของดิน 0 10 25 และ 40 cm บันทึกอุณหภูมิทุก 10 min

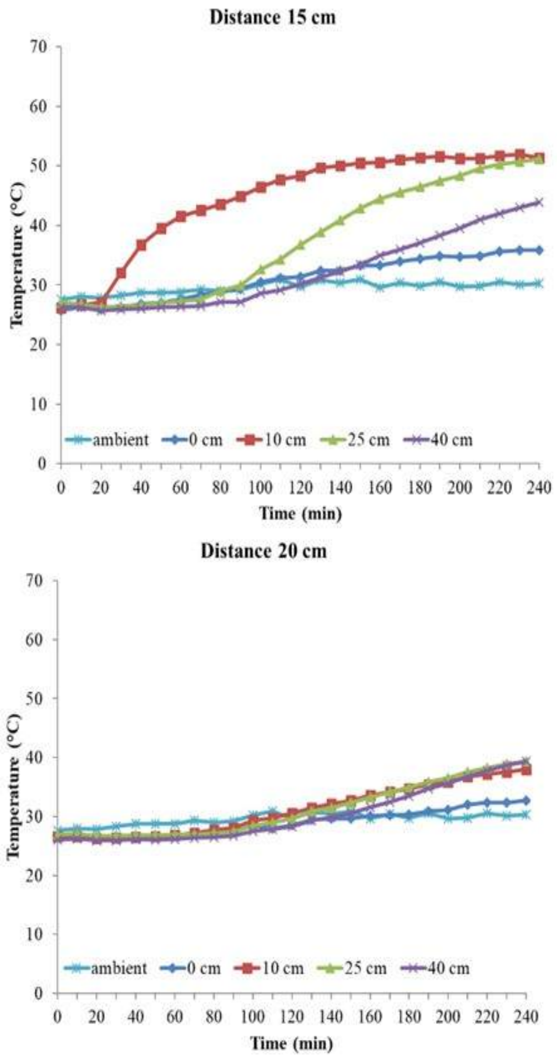


รูปที่ 6 ผลการทดลองปล่อยน้ำร้อนจากท่อ 2 รู ที่ระยะห่าง 5 และ 10 cm ที่ความลึกของดิน 0 10 25 และ 40 cm บันทึกอุณหภูมิทุก 10 min

3.2 ผลการทดลองปล่อยน้ำร้อนใต้ดินจากท่อ 2 รู

อุณหภูมิดินก่อนการทดลองเฉลี่ย 26.1 °C และอุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ย 29.7 °C พบว่าผิวดินบริเวณท่อปล่อยน้ำร้อนมีอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็วคล้ายกับการปล่อยน้ำร้อนบนผิวดิน พิจารณาที่อุณหภูมิดินสำหรับยับยั้งเชื้อ *Ralstonia solanacearum* ต้องใช้เวลาปล่อยน้ำร้อน 120 min ตามลำดับความลึกดิน ดังแสดงในรูปที่ 6 ระยะห่าง 5 cm อุณหภูมิดินเท่ากับ 61.3 60.5 54.8 และ 39.7 °C ระยะห่าง 10 cm อุณหภูมิดินเท่ากับ 40.8 60.1 51.2 และ 42.3 °C แต่ที่ระยะห่าง 15 cm ดังแสดงในรูปที่ 7 สามารถเพิ่มความร้อนดินได้เฉพาะที่ความลึก 10 cm เท่ากับ 48.3 °C และที่ระยะห่าง 20 cm ไม่สามารถเพิ่มอุณหภูมิดินเพื่อยับยั้งเชื้อ *Ralstonia solanacearum* ได้ แต่เมื่อเพิ่มเวลาปล่อย น้ำร้อนเป็น 240 min ที่ระยะห่าง 15 cm ความลึก 10 25 และ

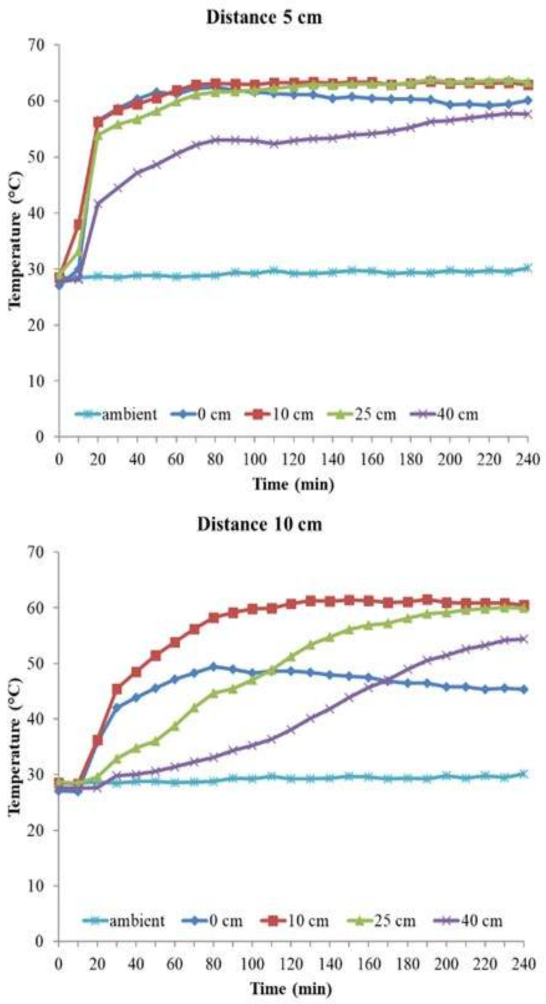
40 cm อุณหภูมิดินเพิ่มขึ้นเป็น 51.4 51.1 และ 43.9 °C ตามลำดับ และที่ระยะห่าง 20 cm ที่ความลึก 25 และ 40 cm อุณหภูมิดินเพิ่มขึ้นเป็น 39.4 °C เท่ากัน จากผลการทดลองสามารถเพิ่มอุณหภูมิดินที่ระยะห่างจากท่อ 5 และ 10 cm ทุกระดับความลึกเพื่อใช้ยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *Ralstonia solanacearum* และใช้เวลาน้อยกว่าการปล่อยน้ำร้อนบนผิวดิน แต่น้ำร้อนยังมีการสูญเสียความร้อนระหว่างไหลผ่านชั้นดินเช่นเดียวกับการปล่อยน้ำร้อนบนผิวดิน



รูปที่ 7 ผลการทดลองปล่อยน้ำร้อนจากท่อ 2 รู ที่ระยะห่าง 15 และ 20 cm ที่ความลึกของดิน 0 10 25 และ 40 cm บันทึกอุณหภูมิทุก 10 min

3.3 ผลการทดลองปล่อยน้ำร้อนใต้ดินจากท่อ 3 รู

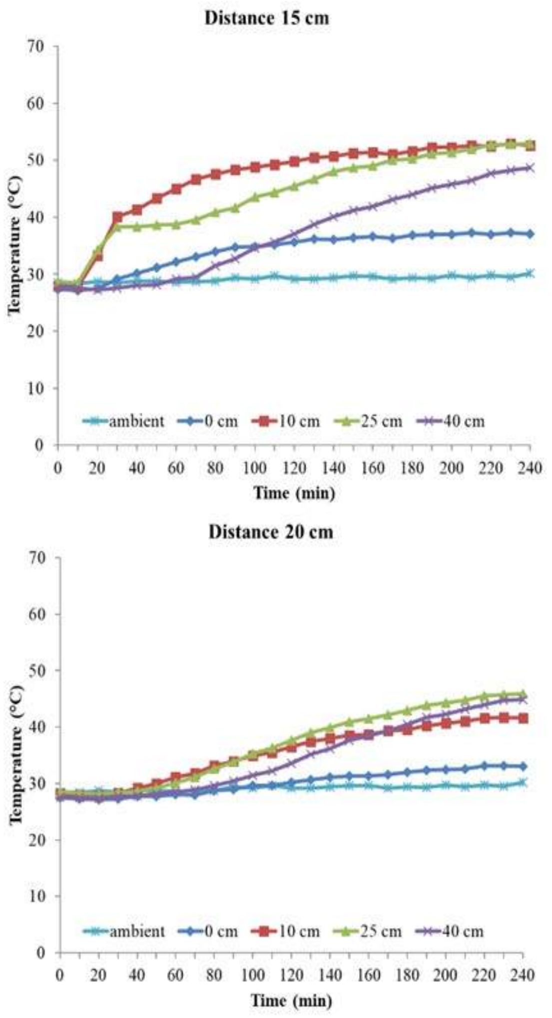
อุณหภูมิดินก่อนการทดลองเฉลี่ย 27.7 °C และอุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ย 29.3 พบว่าอุณหภูมิดินที่ระยะห่าง 5 cm ความลึก 0 10 25 และ 40 cm ดังแสดงในรูปที่ 8 อุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็วซึ่งดีกว่า 2 วิธีแรก และพิจารณาที่อุณหภูมิดินสำหรับยับยั้งเชื้อ *Ralstonia solanacearum* ใช้เวลาเพียง 30 min ที่ระยะห่าง 5 cm สามารถเพิ่มอุณหภูมิดิน 58.7 58.4 55.9 และ 44.5 °C เรียงตามลำดับความลึก แต่ที่ระยะห่าง 10 cm สามารถเพิ่มอุณหภูมิดินเพื่อยับยั้งเชื้อ *Ralstonia solanacearum* ที่ความลึก 0 และ 10 cm เท่านั้น ที่อุณหภูมิ 42.1 และ 45.4 °C ตามลำดับ



รูปที่ 8 ผลการทดลองปล่อยน้ำร้อนจากท่อ 3 รู ที่ระยะห่าง 5 และ 10 cm ที่ความลึกของดิน 0 10 25 และ 40 cm บันทึกอุณหภูมิทุก 10 min

และที่ระยะห่าง 15 cm ดังแสดงในรูปที่ 9 สามารถเพิ่มอุณหภูมิดินที่ความลึก 10 cm เท่านั้น ที่อุณหภูมิดิน 40.1 °C และที่ระยะห่าง 20 cm ไม่สามารถเพิ่มอุณหภูมิเพื่อยับยั้งเชื้อ *Ralstonia solanacearum* ได้ทุกระดับความลึกดิน แต่เมื่อเพิ่มเวลาปล่อยน้ำร้อน 180 min ตามลำดับความลึกดิน ที่ระยะห่าง 5 cm อุณหภูมิดินเพิ่มขึ้น 60.4 63.2 63.3 และ 55.3 °C ที่ระยะห่าง 10 cm อุณหภูมิดินเพิ่มขึ้น 46.5 61.1

58.1 และ 48.9 °C แต่ที่ระยะห่าง 15 cm ความลึก 10 25 และ 40 cm สามารถเพิ่มอุณหภูมิดิน 51.6 50.3 และ 44 °C ตามลำดับ ที่ระยะห่าง 20 cm ความลึก 10 25 และ 40 cm อุณหภูมิดินเท่ากับ 39.6 42.9 และ 40.5 °C ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มเวลาปล่อยน้ำร้อน 240 min ที่ระยะห่างและความลึกดินทั้งหมดมีลักษณะการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเช่นเดียวกับระยะเวลา 180 min แต่อุณหภูมิมีค่าสูงกว่า 1 ถึง 5 °C การปล่อยน้ำร้อนจากท่อจำนวน 3 ตำแหน่งที่ผิวดินและที่ระดับความลึกใต้ดิน 15 และ 30 cm สามารถลดการสูญเสียความร้อนและเวลาการซึมของน้ำร้อนสู่ชั้นดินที่มีความลึกเพิ่มขึ้น โดยสามารถถ่ายเทความร้อนจากน้ำร้อนสู่ดินเร็วกว่าการนำความร้อนของดินที่สภาวะปกติ แต่มีข้อจำกัดเรื่องระยะห่างจากท่อปล่อยน้ำร้อน เนื่องจากน้ำร้อนมีการไหลแบบอิสระจึงสามารถแทรกซึมสู่ดินด้านข้างได้ไม่เกิน 10 cm



รูปที่ 9 ผลการทดลองปล่อยน้ำร้อนจากท่อ 3 รู ที่ระยะห่าง 15 และ 20 cm ที่ความลึกของดิน 0 10 25 และ 40 cm บันทึกอุณหภูมิทุก 10 min

3.4 การเปรียบเทียบผลการทดลองปล่อยน้ำร้อน 3 แบบ

อุณหภูมิน้ำ 70 °C อัตราการไหลของน้ำ 9.35×10^{-6} $m^3\ s^{-1}$ เวลา 30 min ระยะห่าง 5 cm ความลึกดิน 0 10 25 และ 40 cm การปล่อยน้ำร้อนบนผิวดิน อุณหภูมิเท่ากับ 65.3 37.2 30.2 และ 29.1 °C ตามลำดับความลึกดิน การปล่อยน้ำร้อนจากท่อ 2 รู อุณหภูมิเท่ากับ 61.7 33.9 31.1 และ 26.2 °C ตามลำดับความลึกดิน การปล่อยน้ำร้อนจากท่อ 3 รู อุณหภูมิเท่ากับ 58.7 58.4 55.9 และ 44.5 °C ตามลำดับความลึกดิน จากผลการทดลองพบว่าท่อแบบ 3 รู ที่ระดับความลึกดิน 40 cm สามารถเพิ่มอุณหภูมิดินสูงกว่า 2 แบบแรกที่เงื่อนไขเดียวกัน

3.5 ผลการทดลองยับยั้งเชื้อ Ralstonia solanacearum

การทดลองยับยั้งเชื้อ *Ralstonia solanacearum* ทำการทดลองกับการปล่อยน้ำร้อนจากท่อ 3 รู (ผลการทดลองเพิ่มความร้อนดินใช้เวลาน้อยที่สุด) เก็บข้อมูลที่เวลา 30, 60 และ 240 min ตามลำดับ โดยมีจำนวนเชื้อ *Ralstonia solanacearum* เริ่มต้น 4.7×10^7 cfu g^{-1} soil (cfu =colony forming unit) คิดเป็น 100% ก่อนการทดลอง พิจารณาผลการยับยั้งเชื้อ *Ralstonia solanacearum* ในตารางที่ 1 เป็นจำนวนที่เหลือหลังการทดลอง

ตารางที่ 1 *Ralstonia solanacearum* ที่เหลือหลังการทดลอง

Distance 5 cm			
Depth of soil (cm)	Time (min) and Population of *R. solanacearum* (cfu g^{-1})		
	30	60	240
0	4.2×10^7	5.2×10^4	0
10	3.7×10^6	1.6×10^3	0
25	1.2×10^7	2.7×10^5	0
40	4.6×10^7	3.5×10^4	0
Distance 10 cm			
Depth of soil (cm)	Time (min) and Population of *R. solanacearum* (cfu g^{-1})		
	30	60	240
0	4.7×10^7	2.3×10^4	1.2×10^2
10	4.4×10^7	7.6×10^3	0
25	4.1×10^5	6.1×10^4	0
40	4.6×10^7	2.2×10^6	3.9×10^3

Distance 15 cm			
Depth of soil (cm)	Time (min) and Population of *R. solanacearum* (cfu g^{-1})		
	30	60	240
0	4.7×10^{7}	4.6×10^{7}	4.4×10^{7}
10	4.5×10^{7}	4.3×10^{7}	5.3×10^{6}
25	4.7×10^{7}	2.1×10^{7}	3.6×10^{3}
40	2.4×10^{6}	2.9×10^{5}	1.4×10^{2}
Distance 20 cm			
Depth of soil (cm)	Time (min) and Population of *R. solanacearum* (cfu g^{-1})		
	30	60	240
0	4.7×10^{7}	4.1×10^{7}	4.5×10^{7}
10	4.1×10^{7}	4.3×10^{7}	4.7×10^{7}
25	4.3×10^{7}	4.2×10^{7}	4.3×10^{7}
40	2.4×10^{7}	3.7×10^{6}	2.2×10^{6}

แสดงให้เห็นว่าการปล่อยน้ำร้อนลงดินที่เวลา 240 min ที่ระยะห่าง 5 cm ความลึกดิน 0 10 25 และ 40 cm และที่ระยะห่าง 10 cm ความลึกดิน 10 และ 25 cm สามารถยับยั้งเชื้อ *Ralstonia solanacearum* ได้ทั้งหมด แต่ที่ระยะห่าง 15 และ 20 cm สามารถลดจำนวนเชื้อเหลือเพียง 1.4×10^{2} และ 2.2×10^{6} cfu g^{-1} ที่ความลึกของดิน 40 cm สังเกตว่าจำนวน *Ralstonia solanacearum* ลดลงโดยขึ้นอยู่กับเวลาและน้ำร้อนที่ไหลผ่านชั้นดิน ที่เวลา 30 60 และ 240 min ยังมีจำนวน *Ralstonia solanacearum* เหลืออยู่ทั้งหมด 71.5% 32.3% และ 24.8% ตามลำดับเวลา

3.6 อภิปรายผลการวิจัย

การปล่อยน้ำร้อนใต้ดินจากท่อ 3 รู สามารถลดเวลาการไหลของน้ำร้อนผ่านชั้นดิน และถ่ายเทความร้อนจากการนำของน้ำร้อนสู่ดินชั้นล่างได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งสามารถใช้ยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *Ralstonia solanacearum* ในดินที่ระยะห่างจากท่อปล่อยน้ำร้อน 5 cm สามารถเพิ่มอุณหภูมิผิวดินสูงสุด 58.7 °C และต่ำสุดที่ความลึกของดิน 40 cm อุณหภูมิ 44.5 °C ที่เวลา 30 min เมื่อเพิ่มเวลาการปล่อยน้ำร้อนเป็น 60 120 180 และ 240 min พิจารณาความสามารถในการเพิ่มอุณหภูมิดินที่ระดับความลึก 40 cm เท่ากับ 50.6 52.9 55.3 และ 57.7 °C ตามลำดับเวลา และเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเพิ่มความร้อนดินแบบอื่น ตัวอย่างเช่น การคลุมดินด้วยพลาสติกเพื่อเก็บความร้อนและการทำ solarization ทั่วไปปกติอุณหภูมิต่ำสุดและสูงสุด ที่ความลึก 10 cm เท่ากับ 37 และ 50 °C และที่ความลึก 20 cm เท่ากับ 38 และ 43 °C ที่อุณหภูมิอากาศ 20 ถึง 35 °C [1] และการใช้พาราโบลาแบบไม่สมมาตรรวมกับการหยดน้ำบนผิวดินระดับความลึกไม่เกิน 50 cm อุณหภูมิเฉลี่ย 41.3 °C [9] และการใช้ไอน้ำร้อนสามารถเพิ่มอุณหภูมิดินได้ไม่เกินระดับความลึก 16 cm [10],[11] จากข้อมูลดังกล่าว เมื่อพิจารณาวิธีการปล่อยน้ำร้อนจากท่อ 3 รู ผลการทดลองที่ระยะห่างท่อ 5 cm อุณหภูมิดินสูงขึ้นมากกว่า 50 °C อย่างรวดเร็วถึงระดับความลึก 40 cm ซึ่งสามารถเพิ่มอุณหภูมิและความลึกดินที่ดีกว่าวิธีอื่น

การนำวิธีปล่อยน้ำร้อนจากท่อ 3 รู ยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *Ralstonia solanacearum* โดยพิจารณาจำนวนที่เหลือหลังจากการทดลองเปรียบเทียบกับการใช้พาราโบลาแบบไม่สมมาตรรวมกับการหยดน้ำบนผิวดิน ผลการทดลองที่ผิวดิน และที่ความลึก 5 cm เหลือ *Ralstonia solanacearum* หลังการทดลอง 4.1×10^{3} และ 7.5×10^{3} cfu g^{-1} ตามลำดับ [9] และเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้แอมโมเนียไบท์คาร์บอเนตยับยั้งการเจริญเติบโตของ *Fusarium oxysporum f. sp. cucumerinum (FOC), F. oxysporum f. sp. niveum (FON),* และ *F. oxysporum f. sp. melonis (FOM)* ในดิน โดยใช้เวลาในการทดลอง 5 7 และ 3 วัน ตามลำดับ [13] และเปรียบเทียบกับการใช้ความร้อนยับยั้งเชื้อ *Ralstonia solanacearum* ในดินผสมกับเศษซากมะเขือเทศ ที่อุณหภูมิ 25 และ 45 °C โดยใช้เวลา 1 ถึง 6 สัปดาห์ [14] แต่วิธีการปล่อยน้ำร้อนจากท่อ 3 รู ที่ระยะห่าง 5 cm ความลึก 0 10 25 และ 40 cm ใช้เวลาเพียง 240 min สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *Ralstonia solanacearum* ได้ทั้งหมด

ข้อเสนอแนะจากผลการทดลอง สามารถนำผลการทดลองมาพัฒนาต่อโดยการเพิ่มจำนวนท่อปล่อยน้ำร้อนและจัดเรียงท่อที่ระยะห่างระหว่างท่อ 5 cm (แนวระนาบ) เพื่อลดปัญหาความร้อนของดินที่ระยะห่างเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นอีกวิธีที่สามารถนำไปใช้ยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *Ralstonia solanacearum* ในดินที่มีการระบาดของเชื้อได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4. บทสรุป

ในการศึกษาครั้งนี้สามารถสรุปประเด็นสำคัญจากการทดลองดังนี้

- วิธีการปล่อยน้ำร้อนใต้ดินจากท่อแนวตั้งแบบ 3 รู สามารถเพิ่มอุณหภูมิดินที่ระยะห่างจากท่อปล่อยน้ำร้อน 5 10 15 และ 20 cm ที่ความลึกดิน 0 10 25 และ 40 cm
- เมื่อนำวิธีการดังกล่าวมาใช้ยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *Ralstonia solanacearum* ในดินเพาะปลูกที่เวลา 30 60 และ 240 min สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อ *Ralstonia solanacearum* ที่ 28.5% 67.7% และ 75.2%

ตามลำดับเวลา แต่ที่ระยะเวลา 240 min ระยะห่างจากท่อปล่อยน้ำร้อน 5 cm ทุกระดับความลึกดิน และที่ระยะห่าง 10 cm ความลึกดิน 10 และ 25 cm นั้นสามารถยับยั้งเชื้อได้ทั้งหมด

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา พิษณุโลก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และโครงการวิจัยแห่งชาติสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา สำหรับการสนับสนุนการวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Stapleton J. Soil solarization in various agricultural production systems. Crop Protection. 2000;19:837–841.

[2] Al-Karaghouli AA, Al-Kayssi AW. Influence of soil moisture content on soil solarization efficiency. Renewable Energy. 2001;24:131-144.

[3] Scopa A, Candido V, Dumontet S, Pasquale V, Miccolis V. Repeated solarization and long-term effects on soil microbiological parameters and agronomic traits. Crop Protection. 2009;28:818-824.

[4] Tjamos EC, Antoniou P, Tjamos SE. Implementation of soil solarization in Greece: conclusions and suggestions. Crop Protection. 2000;19:843-846.

[5] Pulat E, Coskun S, Unlu K, Yamankaradeniz N. Experimental study of horizontal ground source heat pump performance for mild climate in Turkey. Energy. 2009;34:1284-1295.

[6] Koyun A, Demir H, Torun Z. Experimental study of heat transfer of buried finned pipe for ground source heat pump applications. International Communications in Heat and Mass Transfer. 2009;36:739-743.

[7] Gao P, Zhou G. Study on temperature field around heat pipe underground based on line heat source theory. Energy and Buildings. 2011;43:2483-2487.

[8] Scopa A, Candido V, Dumontet S, Miccolis V. Greenhouse solarization: effects on soil microbiological parameters and agronomic aspects. Scientia Horticulture. 2008;116:98-103.

[9] Phitthayarachasak T, Thepa S, Kongkiattikajorn J. Solar energy system reduces time taken to inhibit microbial growth in soil. Renewable Energy. 2009;34:2467-2473.

[10] Gay P, Piccarolo P, Aimonino D, Tortia C. A high efficiency steam soil disinfestation system, part I: Physical background and steam supply optimization. Biosystems engineering. 2010;107:74-85.

[11] Gay P, Piccarolo P, Aimonino D, Tortia C. A high efficacy steam soil disinfestations system, part II: Design and testing. Biosystems engineering. 2010;107:194-201.

[12] Suttisong S, Rattanadecho P. The experimental investigation of heat transport and water infiltration in granular packed bed due to supplied hot water from the top: Influence of supplied water flux, particle sizes and supplied water temperature. Experimental Thermal and Fluid Science. 2011;35:1530-1534.

[13] Sun L, Song S, Fu L, Deng X, Wang D, Liang X, Li R, Shen Q. Exploring a soil fumigation strategy based on ammonium bicarbonate to control *Fusarium* wilts of cucurbits. Crop Protection. 2015;70:53-60.

[14] Zanón MJ, Font MI, Jordá C. Use of tomato crop residues into soil for control of bacterial wilt caused by *Ralstonia solanacearum*. 2011;30:1138-1143.

การวิเคราะห์อัตราส่วนผสมสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งจากเศษถ่านของกระบวนการเผาอิฐมอญ

Briquette Ratio Investigation of Charcoal Briquette Produced from Brick-Burning-Process Residual Charcoal

ปฐมศก วิไลพล [1*] ปิยะนันท์ เจริญสวรรค์ [1] นพรัตน์ สีหะวงษ์ [1] จิรานุวัฒน์ เม่นเกิด [1] ปรากรณ์ ประกอบกสิกรณ์ [1] และปิยะวัต คำบุญ [1]

[1] ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
99 หมู่9 ถนนพิษณุโลก-นครสวรรค์ อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก 65000

Patomsok Wilaipon [1*], Piyanun Chareonsawan [1], Nopparat Srihawong [1], Chiranuwat Menkoed [1], Prakorn Prakobkasikorn [1] and Piyawat Kumboon [1]

[1] Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Naresuan University
99 Moo9, Phitsanulok-Nakonsawan Road, Muang, Phitsanulok, Thailand, 65000

*ผู้รับผิดชอบบทความ: Patomsok@hotmail.com เบอร์โทรศัพท์ 0-5596-4231

Received: 5 March 2019, Revised: 3 May 2019, Accepted: 15 May 2019

บทคัดย่อ

ผลการสำรวจภาคสนามจากโรงเผาอิฐขนาดกลางและขนาดย่อม พบว่ามีเศษถ่านไม้เหลือหลังจากกระบวนการเผาอิฐเป็นจำนวนมาก ซึ่งมีศักยภาพในการนำไปเป็นวัตถุดิบผลิตถ่านอัดแท่งเพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับเศษเชื้อเพลิงจากการผลิต ในการศึกษาครั้งนี้ได้นำเศษถ่านดังกล่าวมาทำการอัดแท่งเชื้อเพลิงโดยใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นตัวเชื่อมประสาน ที่ความดัน 5 เมกกะปาสคาล โดยทำการศึกษาในอัตราส่วนผสมของผงถ่าน (42-51%) ต่อน้ำ (41-51%) และแป้งมันซึ่งเป็นตัวเชื่อมประสาน (2-14%) โดยมวล จากการทดสอบการเผาไหม้โดยใช้การให้ความร้อนแก่น้ำ พบว่าถ่านอัดแท่งที่ผลิตด้วยอัตราส่วนผงถ่าน 49% น้ำ 49% และแป้งมันสำปะหลัง 2% มีคุณสมบัติด้านระยะเวลาเริ่มติดไฟและระยะเวลาน้ำเดือดดีที่สุด โดยมีค่าความร้อนในช่วง 6726 แคลอรี่ต่อกรัม

คำสำคัญ ถ่านอัดแท่ง เศษถ่าน เผาอิฐ

Abstract

According to the survey of a SME brick factory, it was found that the brick burning process produces a large amount of charcoal residue. It seems that this kind of waste has high potential as the raw material for charcoal briquetting. In this study, the charcoal was mixed with water and starch. The compressed pressure was set to 5 MPa by using a universal testing machine. The percentage of charcoal : water : starch was varied between 42-51%, 41-51% and 2-14% respectively. The briquette burning test showed that 49:49:2% briquette has the shortest ignition and water boiling durations. In addition, the heating values of the briquettes were between 6726 cal/g.

Keywords: charcoal briquette, unburned charcoal, brick burning.

1. บทนำ

การนำวัสดุที่เหลือใช้กลับมาพัฒนาปรับปรุงให้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้นและสามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อได้นั้น นอกจากจะเป็นการบริหารจัดการการใช้ทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่อย่างจำกัด ให้มีความคุ้มค่าและเกิดประโยชน์สูงสุดแล้ว ยังจะเป็นการลดปัญหาในเรื่องการจัดการขยะอีกด้วย ดังจะเห็นได้จากมีงานวิจัยหลายชิ้น ที่เกี่ยวเนื่องกับแนวคิดดังกล่าว เช่น การใช้ประโยชน์จากต้นถั่วเหลือง [1] กะลามะพร้าวและเหง้ามันสำปะหลัง [2] ขี้เลื่อยไม้ [3],[4] ทางมะพร้าว [5] ซังและเปลือกข้าวโพด [6] ถ่าน [7],[8] แกลบ [9] และฟางข้าว [10] เป็นต้น เศษเชื้อเพลิงที่เหลือจากอุตสาหกรรมการผลิตอิฐเป็นอีกตัวอย่างหนึ่งของวัสดุเหลือใช้ที่ควรมีการพิจารณาความเป็นไปได้ และหากระบวนการเพื่อ

ทำให้สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้อีกครั้ง ซึ่งจะเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดขยะ อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มมูลค่าของเศษวัสดุที่เหลือจากการเผาไหม้ในอุตสาหกรรมการผลิตอิฐ

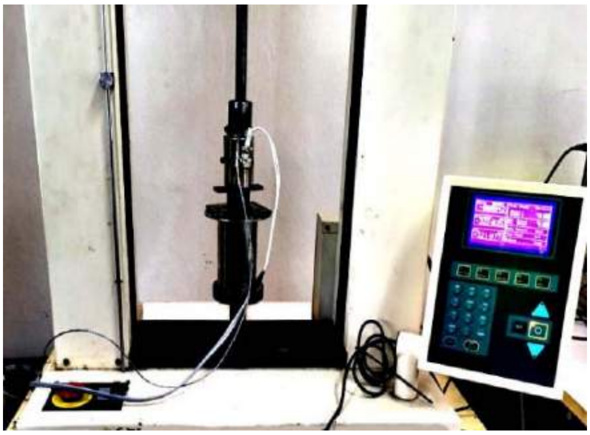
ในกระบวนการผลิตอิฐก่อสร้างนั้นจะมีการเผาอิฐเพื่อเพิ่มความแข็งแรงทนทานให้กับอิฐ ซึ่งการเผาดังกล่าวนิยมใช้เชื้อเพลิงไม้เนื้อแข็ง หลังจากกระบวนการเผาอิฐเสร็จสมบูรณ์จะมีของเหลือจากกระบวนการเผาไหม้ในรูปของเศษถ่านปนกับขี้เถ้า ซึ่งอาจมองว่าเศษเถ้าถ่านดังกล่าวเป็นขยะ เป็นถ่านที่แตกเป็นชิ้นเล็ก มีประสิทธิภาพต่ำ อย่างไรก็ตามเมื่อทำการคัดแยกขี้เถ้าออก จะได้คาร์บอนที่เหลือจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ซึ่งการวิจัยในครั้งนี้มีแนวคิดว่า ถ่านที่เป็นของเหลือจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงนั้นยังสามารถนำไปต่อยอดเพื่อเพิ่มมูลค่าและเพิ่มคุณค่าในการนำไปเป็นเชื้อเพลิงอีกครั้ง จึงตั้งวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการนำถ่านที่เป็นของเหลือจากการเผาไหม้ มาเพิ่มมูลค่าและคุณค่าด้วยการนำมาแปรรูปเป็นถ่านอัดแท่ง และทำการศึกษาคุณสมบัติทั้งด้านกายภาพและการเผาไหม้

2. วัตถุดิบและขั้นตอนการวิจัย

เศษขี้เถ้าปนกับเศษถ่านไม้เป็นของเหลือหลังจากกระบวนการเผาอิฐ ดังแสดงในรูปที่ 1 ทำการแยกเศษถ่านออกจากขี้เถ้า แล้วนำถ่านไม้ที่ได้ไปทำการบดด้วยเครื่องแฮมเมอร์มิลล์ ขนาด 2 แรงม้า

รูปที่ 1 เศษถ่านจากการเผาอิฐ

ผงถ่านที่ผ่านกระบวนการบด จะถูกคัดกรองความละเอียดโดยการร่อนผ่านตะแกรงขนาด 1 มิลลิเมตร ก่อนนำมาผสมกับแป้งมันที่จะช่วยผสานให้ผงถ่านสามารถนำไปขึ้นรูปเป็นถ่านอัดแท่งโดยใช้เครื่อง UTM ที่ความดัน 5 เมกกะปาสคาล ซึ่งเป็นค่าความดันในช่วงปานกลางถึงต่ำ ใกล้เคียงกับการอัดแท่งแกลบ [11] ชุดกระบอกอัดถ่านมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 36 มิลลิเมตร แกนอัดมีก้านยาวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 มิลลิเมตรเพื่อทำให้ถ่านอัดแท่งเป็นรูปทรงกระบอกแบบมีรูกลวง กระบอกอัดถ่านจะถูกควบคุมให้มีอุณหภูมิคงที่ ที่ 100 องศาเซลเซียส ผ่านการควบคุมอุณหภูมิของขดลวดความร้อนชนิดรัดท่อขนาด 450 วัตต์ เครื่องมือต่าง ๆ มีการจัดวางดังแสดงในรูปที่ 2

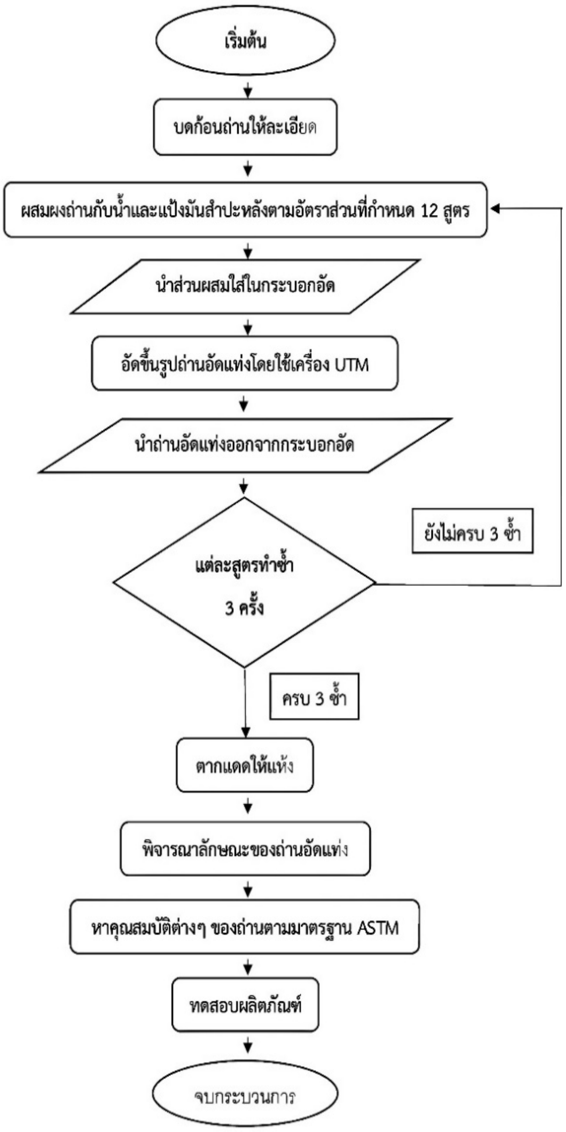


รูปที่ 2 การติดตั้งชุดกระบอกอัดเพื่อผลิตถ่านอัดแท่ง

อัตราส่วนการผสมของวัสดุในการอัดขึ้นรูปถ่านอัดแท่งจะมีอัตราส่วนของผงถ่าน : น้ำ : แป้งมันสำปะหลัง เป็นไปตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมระหว่างผงถ่าน : น้ำ : และแป้งมันสำปะหลัง ในการผลิตถ่านอัดแท่ง

ลำดับที่	สัดส่วนขององค์ประกอบ		
	ผงถ่าน	น้ำ	แป้งมัน
1.	0.51	0.46	0.03
2.	0.50	0.45	0.05
3.	0.48	0.43	0.09
4.	0.45	0.41	0.14
5.	0.49	0.49	0.02
6.	0.48	0.48	0.04
7.	0.45	0.45	0.10
8.	0.43	0.43	0.14
9.	0.47	0.51	0.02
10.	0.45	0.50	0.05
11.	0.43	0.48	0.09
12.	0.42	0.46	0.12



รูปที่ 3 ผังงานการอัดแท่งเชื้อเพลิงจากเศษถ่าน

เมื่อทำการอัดแท่งเสร็จ จะนำชิ้นงานไปตากแดดเพื่อลดความชื้นเป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นจะทำการคัดเลือกถ่านอัดแท่งที่สมบูรณ์ ไม่มีรอยแตกร้าว นำไปวิเคราะห์ค่าความร้อนด้วยเครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ Isoperibol bomb calorimeter model 1261 (Parr instrument company, USA) โดยนำตัวอย่างผงถ่านบรรจุในลูกบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ ตัดลวดฟิวส์ยาว 10 เซนติเมตร ติดตั้งโดยจัดลวดให้สัมผัสกับตัวอย่างผงถ่าน จัดการกระจายตัว ให้ผงถ่านกลบลวดเพื่อเพิ่มพื้นผิวสัมผัสระหว่างลวดและผงถ่าน จากนั้นนำไปอัดออกซิเจนที่ 500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว นำไปวางในถังบรรจุ ใส่น้ำกลั่นที่มีอุณหภูมิประมาณ 24 องศาเซลเซียส ปริมาณ 2 ลิตร ลงในถังติดตั้งสายไฟที่ใช้ในการจุดระเบิด ทำการจุดระเบิดเมื่ออุณหภูมิของน้ำในถังบรรจุ และน้ำที่อยู่ในตัวหุ้มมีค่าใกล้ เคียงกัน วัดความยาวลวดที่เหลือแล้วป้อนค่าเข้าสู่เครื่องเพื่อคำนวณค่าความร้อนของผงถ่าน

รูปที่ 4 Isoperibol bomb calorimeter model 1261

นำผงถ่าน และตัวอย่างถ่านไปวิเคราะห์ปริมาณความชื้นโดยใช้ ตู้อบลมร้อน ความจุ 749 ลิตร ขนาด 1040x720x600 มิลลิเมตร โดยนำถ้วยเผาอุณหภูมิสูงที่สะอาดไปอบ 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นำออกมาปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปใส่ในโถดูดความชื้น 30 นาที ชั่งน้ำหนักแล้วนำผงถ่านบดละเอียดปริมาณ 1 กรัม ใส่ลงในถ้วยนำไปชั่งน้ำหนักแล้วนำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ประมาณ 24 ชั่วโมง นำออกมาปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้องแล้วนำไปใส่ในโถดูดความชื้น 30 นาที จึงนำไปชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหาปริมาณความชื้น

รูปที่ 5 ตู้อบ

การวิเคราะห์หาปริมาณสารระเหยจะใช้ เตาเผาซึ่งมีอุณหภูมิการใช้งาน 100-1,100 องศาเซลเซียส โดยนำถ้วยเปล่าไปอบก่อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ประมาณ 1 ชั่วโมง แล้วจึงนำออกมาไว้ที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำถ้วยเปล่าไปใส่ในโถดูดความชื้น 30 นาที เพื่อไล่ความชื้นที่อยู่ในถ้วยออกให้หมด ก่อนที่จะทำการเผาตัวอย่าง แล้วนำไปชั่งน้ำหนักเริ่มต้นของถ้วยเผาอุณหภูมิสูง จากนั้น ชั่งผงถ่านบดละเอียดปริมาณ 1 กรัม ที่ผ่านการลดความชื้นใส่ลงในถ้วยเปล่ากระจายผงถ่านออกให้ทั่วเพื่อให้ผงถ่านรับความร้อนอย่างทั่วถึง แล้วนำเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการเผา 7 นาที โดยปิดฝาเพื่อจำกัดปริมาณออกซิเจน เมื่อเผาตัวอย่างเสร็จปล่อยในเย็นลงที่อุณหภูมิห้อง นำไปใส่ในโถดูดความชื้น 30 นาที แล้วนำไปชั่งน้ำหนักสุดท้ายเพื่อคำนวณหาปริมาณสารระเหย

รูปที่ 6 เตาเผา

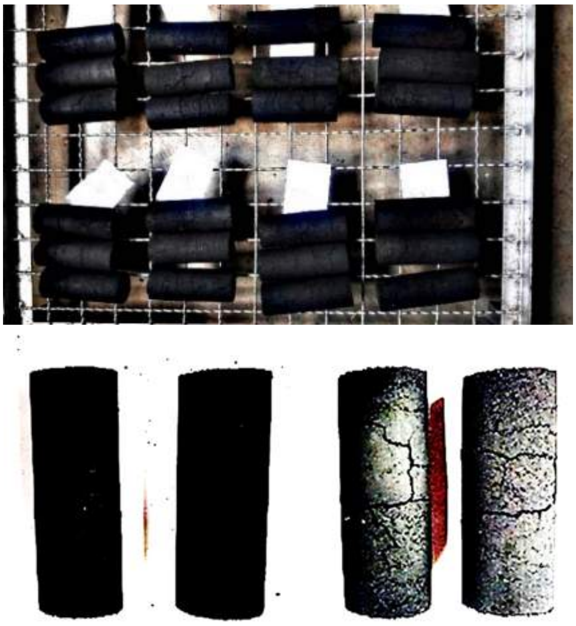
การวิเคราะห์ปริมาณเถ้าทำโดยการ นำถ้วยเผาอุณหภูมิสูงไปกำจัดความชื้นที่แฝงอยู่ ตามขั้นตอนข้างต้นของการวิเคราะห์หาปริมาณสารระเหย แล้วนำถ้วยไปชั่งน้ำหนักเริ่มต้น ชั่งผงถ่านบดละเอียดปริมาณ 1 กรัม ที่ผ่านกระบวนการกำจัดสารระเหยลงในถ้วย กระจายผงถ่านออกให้ทั่วเพื่อให้ผงถ่านรับความร้อนอย่างทั่วถึง นำไปเผาที่อุณหภูมิ 450-500 องศาเซลเซียสใน 1 ชั่วโมงแรก เผาต่อที่อุณหภูมิ 700-750 องศาเซลเซียสในชั่วโมงที่ 2 จากนั้นอุ่นต่อที่อุณหภูมิสุดท้าย 2 ชั่วโมง โดยเปิดฝาถ้วยเผาอุณหภูมิสูงเพื่อให้เชื้อเพลิงสัมผัสกับออกซิเจน ปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง นำไปใส่ในโถดูดความชื้น 30 นาที ชั่งน้ำหนักสุดท้ายเพื่อคำนวณหาปริมาณเถ้า โดยคาร์บอนคงตัวคำนวณได้จากสัดส่วนที่คงเหลือหลังการวิเคราะห์ความชื้น สารระเหยและปริมาณเถ้า

คัดเลือกถ่านอัดแท่งที่สมบูรณ์ ไม่มีรอยแตกร้าว นำไปวิเคราะห์ค่าความร้อนโดยใช้เครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ Isoperibol bomb calorimeter model 1261 (Parr instrument company, USA) จากนั้นนำถ่านอัดแท่ง 200 กรัม ไปทดสอบอัตราการเผาไหม้ โดยการต้มน้ำปริมาณ 200 กรัม ในหม้อต้มน้ำกับเตาหุงต้มทั่วไป ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้องปกติไม่มีลมพัด สังเกตการแตกปะทุของเชื้อเพลิง ปริมาณควันของเชื้อเพลิงขณะติดไฟ จับเวลาจนกระทั่งน้ำเดือดและถ่านอัดแท่งมอดดับ บันทึกเวลาแต่ละขั้นตอน

ทดสอบแรงกดที่ทำให้ถ่านอัดแท่งเสียรูป โดยการใช้เครื่อง UTM ทำการกดตามแนวแกนโดยใช้ความเร็วต่ำ ทำการคำนวณหาจำนวนชั้นของกล่องบรรจุถ่านอัดแท่งโดยตั้งสมมุติฐานจากกล่องมาตรฐานบรรจุสินค้าเกรด A กว้าง 30x40x24 เซนติเมตร คำนวณปริมาณบรรจุถ่านอัดแท่งจากปริมาตรของถ่านอัดแท่งที่ผลิต เปรียบเทียบน้ำหนัก จำนวนชั้นของกล่องที่สามารถวางซ้อนได้ กับแรงกดสูงสุดที่ถ่านอัดแท่งไม่เกิดการเสียรูป

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

จากการทดลองอัดแท่งเศษถ่านที่เหลือจากกระบวนการเผาอิฐจำนวน 12 อัตราส่วน พบว่าถ่านอัดแท่งบางส่วนมีการยึดเกาะกันดี มีผิวเรียบหลังจากกระบวนการอัด แต่เกิดรอยแตกที่พื้นผิวหลังจากการตากแดดเพื่อลดความชื้น ดังแสดงในรูปที่ 7



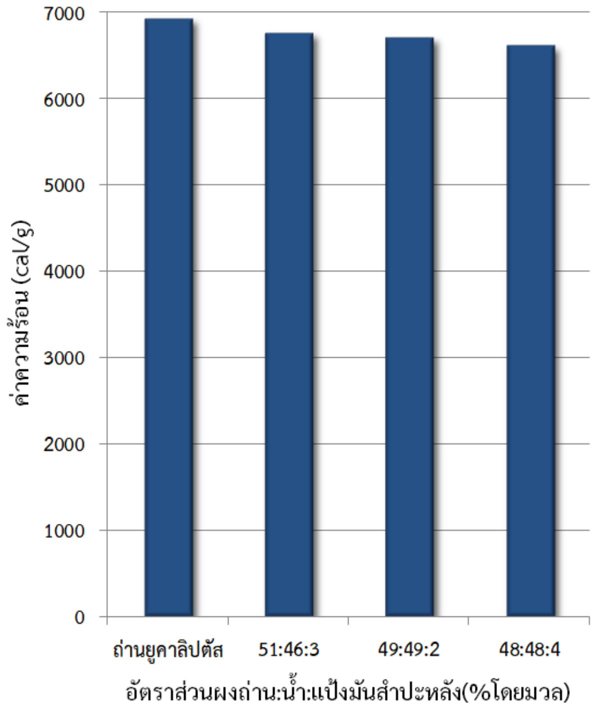
รูปที่ 7 ตัวอย่างถ่านอัดแท่ง ผิวเรียบ และมีรอยแตก

อัตราส่วนการผสมที่ทำให้ลักษณะของถ่าน มีผิวเรียบสมบูรณ์ ทั้งก่อนและหลังการตากแดด มีจำนวน 3 อัตราส่วน ดังจะเห็นได้จากข้อมูลในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ลักษณะภายนอกและรอยแตกของถ่านอัดแท่ง

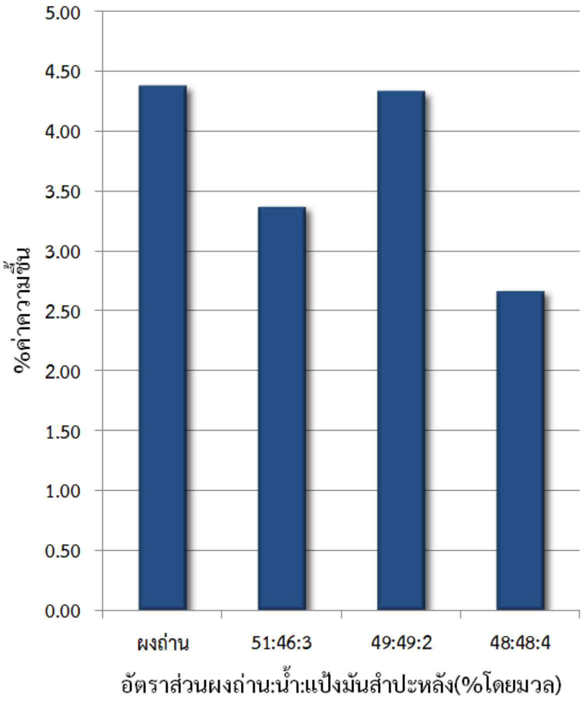
ลำดับ	การยึดเกาะ
1	ยึดเกาะกันดี ผิวเรียบ
2	ยึดเกาะปานกลาง มีรอยแตก
3	ยึดเกาะปานกลาง มีรอยแตก
4	ยึดเกาะปานกลาง มีรอยแตก
5	ยึดเกาะกันดี ผิวเรียบ
6	ยึดเกาะกันดี ผิวเรียบ
7	ยึดเกาะปานกลาง มีรอยแตก
8	ยึดเกาะปานกลาง มีรอยแตก
9	ยึดเกาะปานกลาง มีรอยแตก
10	ยึดเกาะปานกลาง มีรอยแตก
11	ยึดเกาะปานกลาง มีรอยแตก
12	ยึดเกาะปานกลาง มีรอยแตก

ค่าความร้อนของถ่านอัดแท่งที่ผลิตด้วยอัตราส่วน 51:46:3 49:49:2 และ 48:48:4 ซึ่งเป็นถ่านอัดแท่งที่ไม่มีรอยแตกบริเวณผิว หลังจากการตากแดดเพื่อลดความชื้น มีค่าในช่วง 6609-6755 แคลอรี่ต่อกรัม ดังแสดงในรูปที่ 8 โดยอัตราส่วน 48:48:4 มีค่าความร้อนต่ำที่สุด เท่ากับ 6609±27 แคลอรี่ต่อกรัม อย่างไรก็ตามจากกราฟข้อมูลจะเห็นได้ว่าค่าความร้อนที่ได้จากทั้ง 3 อัตราส่วน มีค่าใกล้เคียงกันมาก แตกต่างกันเพียง 2.16% เท่านั้น เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าความร้อนของถ่านชนิดอื่น พบว่า มีค่าความร้อนสูงกว่าถ่านอัดแท่งจากต้นถั่วเหลือง ที่มีค่าประมาณ 5087 แคลอรี่ต่อกรัม [1] และถ่านอัดแท่งจากกะลามะพร้าวผสมเหง้ามันสำปะหลัง ที่มีค่าระหว่าง 4514-6588 แคลอรี่ต่อกรัม [2] แต่มีค่าต่ำกว่าถ่านอัดแท่งที่มีการเผาถ่านเพื่อทำการอัดแท่งโดยตรง เช่น ถ่านอัดแท่งจากถ่านไม้ยูคาลิปตัส ซึ่งมีค่าความร้อนประมาณ 6921 แคลอรี่ต่อกรัม [1] และเมื่อพิจารณาผลิตภัณฑ์ทั้ง 3 อัตราส่วนผสม พบว่ามีค่าความร้อนมากกว่าเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช.) ซึ่งกำหนดเกณฑ์ค่าความร้อนของถ่านอัดแท่งเท่ากับ 5,000 กิโลแคลอรี่ต่อกิโลกรัม



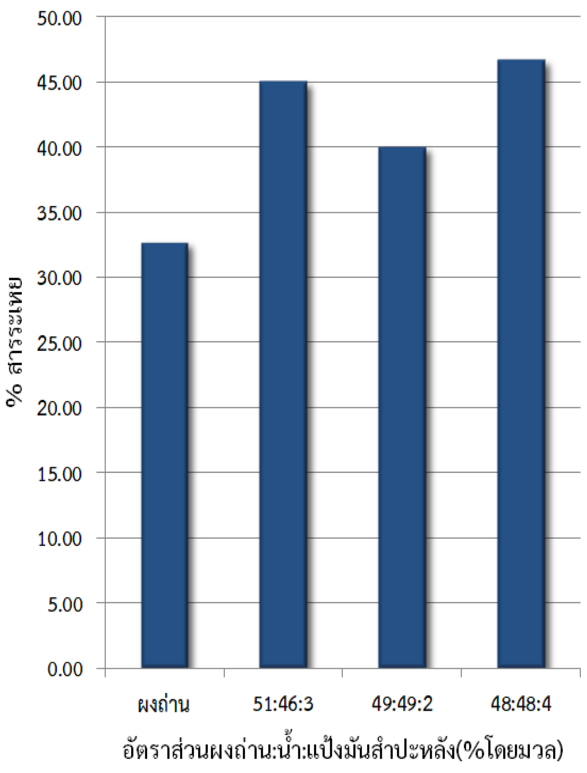
รูปที่ 8 ค่าความร้อนของถ่านอัดแท่ง

เมื่อนำตัวอย่างถ่านอัดแท่งทั้ง 3 อัตราส่วน รวมถึงผงถ่านจากโรงงานเผาอิฐ ไปทดสอบหาค่าความชื้น พบว่ามีค่าความชื้นที่ได้มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช.) ที่ได้กำหนดไว้ว่าความชื้นของถ่านอัดแท่งควรมีค่าไม่เกิน 8 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนัก



รูปที่ 9 เปอร์เซ็นต์ค่าความชื้นของถ่านอัดแท่ง

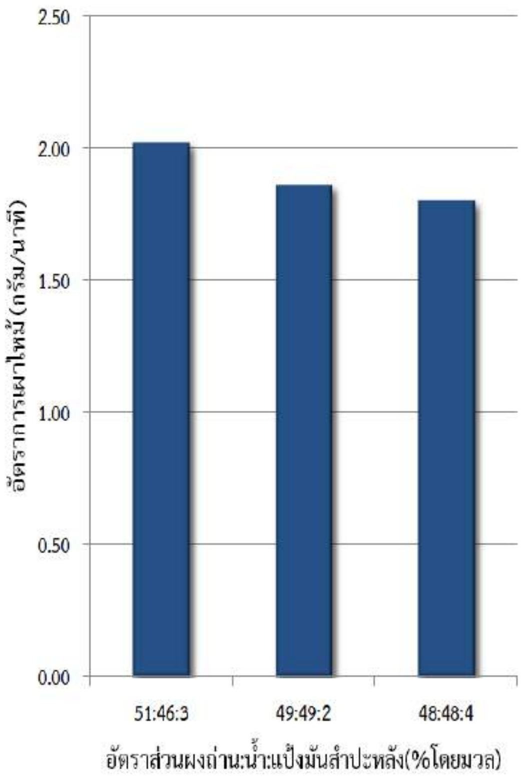
การวิเคราะห์ทดสอบปริมาณสารระเหยของถ่านอัดแท่งจากถ่านเหลือในอุตสาหกรรมผลิตอิฐเป็นการบอกถึงคุณสมบัติของการจุดติดไฟได้ง่าย ถ้ามีปริมาณสารระเหยที่มากจะทำให้การจุดติดไฟได้ง่าย จากผลการวิจัยพบว่าถ่านอัดแท่งที่ผลิตด้วยอัตราส่วน 48:48:4 มีเปอร์เซ็นต์ของสารระเหยสูงสุด เท่ากับ 46.67 เปอร์เซ็นต์ โดยมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1.53



รูปที่ 10 เปอร์เซ็นต์สารระเหยของถ่านอัดแท่ง

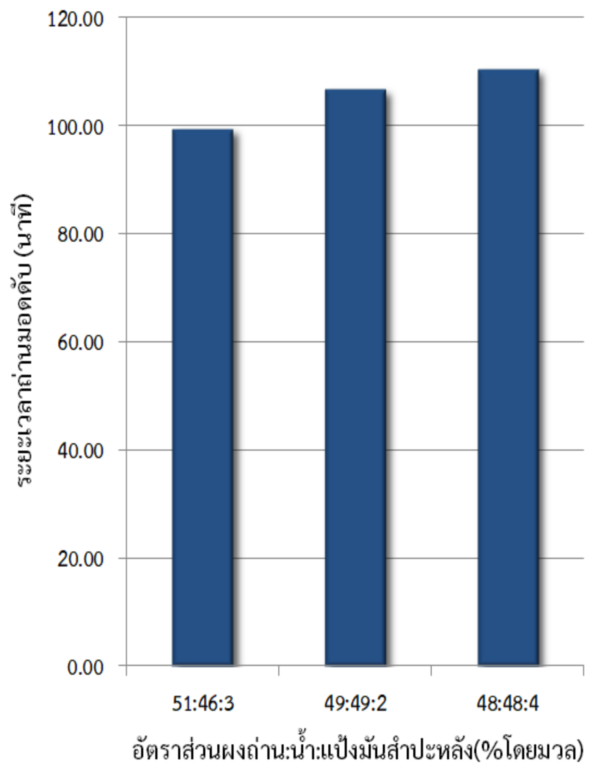
ในด้านความแข็งแรงทนทาน ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบแรงกดสูงสุดที่กระทำในแนวแกนของถ่านอัดแท่งโดยไม่เกิดการแตกหัก จากการทดสอบพบว่า แรงกดของถ่านอัดทั้งสามอัตราส่วน มีค่าในช่วง 1427-2802 นิวตัน ดังนั้นเมื่อพิจารณากล่องมาตรฐานบรรจุสินค้าเกรด A กว้าง 30 ซม. ยาว 40 ซม. สูง 24 ซม. โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านอัดแท่ง 3.6 ซม.ยาว 12 ซม.หนักเฉลี่ย 50 กรัม/แท่ง จึงสามารถบรรจุถ่านอัดแท่งได้ 2 ชั้นต่อกล่องขนาดดังกล่าว รวมแล้วสามารถบรรจุถ่านอัดแท่งได้จำนวน 176 แท่งต่อกล่อง คิดเป็นน้ำหนัก 8.8 กิโลกรัม/กล่อง หรือ 86.328 นิวตัน น้ำหนักของกล่องลูกฟูกห้าชั้นสำหรับขนาดบรรจุดังกล่าวคือ 580 กรัม/กล่อง หรือ 5.690 นิวตัน ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากแรงกดต่ำสุดที่กระทำในแนวแกนต่อถ่านอัดแท่งโดยไม่เกิดการเสียรูป คือ 1427 นิวตัน ซึ่งสามารถรับแรงในการวางซ้อนกล่องได้ทั้งหมด 15 กล่อง

นำถ่านอัดแท่งทั้ง 3 อัตราส่วน ไปทดสอบการเผาไหม้โดยการต้มน้ำ พบว่ามีระยะเวลาการเริ่มติดไฟ น้ำเดือด และถ่านมอดดับ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 12-14 เมื่อนำน้ำหนักของถ่านอัดแท่งมาหารด้วยระยะเวลาที่ใช้ไป จะพบว่าที่อัตราส่วนผสม 48:48:4 มีค่าอัตราการเผาไหม้ต่ำที่สุด (1.78 กรัมต่อนาที) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าถ่านอัดแท่งในอัตราส่วนดังกล่าวมีความหนาแน่นสูงกว่าอัตราส่วนอื่น ส่งผลให้มีการเผาไหม้อย่างช้าๆ จึงมีระยะเวลาในการมอดดับที่นานกว่า โดยมีค่าใกล้เคียงกับอัตราการเผาไหม้ ของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากขี้เลื่อยไม้ยางพาราผสมกับมูลสัตว์ [3]

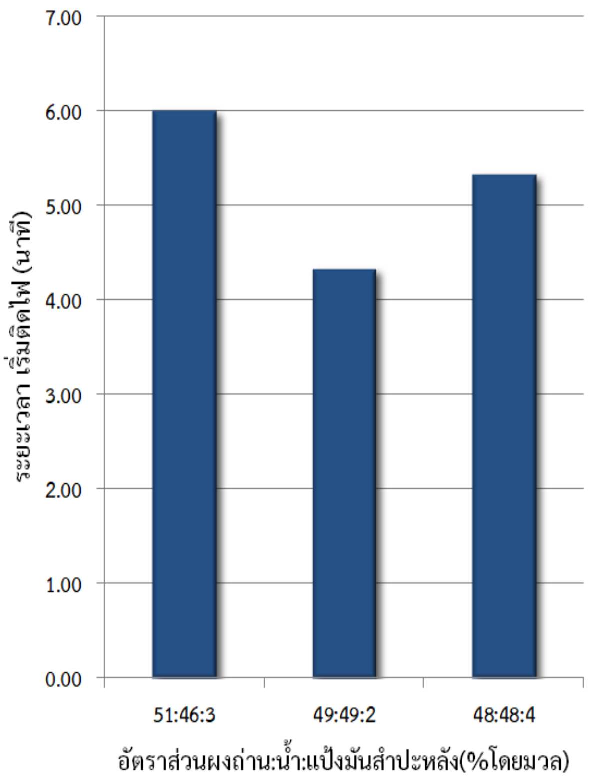


รูปที่ 11 อัตราส่วนการเผาไหม้

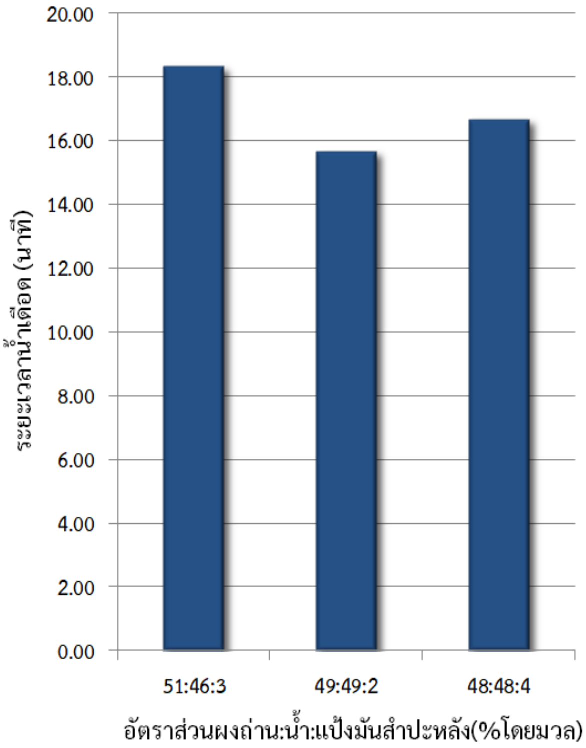
ในส่วนของระยะเวลาเริ่มติดไฟและระยะเวลาน้ำเดือด อัตราส่วน 49:49:2 มีค่าระยะเวลาทั้ง 2 ดีที่สุด ดังจะเห็นได้จากข้อมูลในกราฟรูปที่ 13-14 โดยระยะเวลาเริ่มติดไฟของถ่านอัดแท่งที่อัตราส่วน 49:49:2 มีค่าต่ำกว่าระยะเวลาเริ่มติดไฟของถ่านอัดแท่งที่ผลิตจากขี้เลื่อยไม้ยางพาราผสมมูลสัตว์ที่มีช่วงระยะเวลาเริ่มติดไฟประมาณ 6.3-11.7 นาที [3]



รูปที่ 12 ระยะเวลามอดดับ



รูปที่ 13 ระยะเวลาเริ่มติดไฟ



รูปที่ 14 ระยะเวลาน้ำเดือด

4. สรุปผลการวิจัย

การใช้เศษถ่านจากกระบวนการเผาอิฐมาเป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่ง โดยใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นตัวเชื่อมประสาน สามารถผลิตถ่านอัดแท่งที่มีคุณภาพดี มีลักษณะการยึดจับที่ดีไม่แตกร้าว ที่อัตราส่วนผสม(%โดยมวล)ของผงถ่าน : น้ำ : แป้งมันสำปะหลัง 51:46:3 49:49:2 และ 48:48:4 ถ่านอัดแท่งที่ได้มีค่าความร้อนในช่วง 6609-6755 แคลอรี่ต่อกรัม และมีอัตราการเผาไหม้ 1.78-2.03 กรัมต่อนาที โดยที่อัตราส่วนผสม 49:49:2 จะมีระยะในการเริ่มติดไฟและระยะเวลาทำให้น้ำเดือดดีที่สุด (ต่ำที่สุด)

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและอำนวยความสะดวกต่าง ๆ

6. เอกสารอ้างอิง

[1] ธีรพจน์ พุทธิกีฏกวีวงศ์, เจษฎานันท์ เวียงนนท์, ภัทราวดี ศรีบุญสม. การผลิตถ่านอัดแท่งจากต้นถั่วเหลือง. วารสารมหาวิทยาลัยนเรศวร. 2549;14(3):11-8.

[2] รุ่งโรจน์ พุทธีสกุล, อุปวิทย์ สุวคันธกุล, อัมพร กุญชรรัตน์. การผลิตถ่านอัดแท่งจากถ่านกะลามะพร้าวและถ่านเหง้ามันสำปะหลัง. วารสารวิชาการอุตสาหกรรมศึกษา. 2553;4(2):18-28.

[3] ปราณี วุ่นศรี, วราวุฒิ ดวงศิริ, นุชลี ทิพย์มณฑา. การศึกษาวิธีการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากขี้เลื่อยไม้ยางพารากับมูลสัตว์. วารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ. 2018;12(2):17-25.

[4] Antwi-Boasiako C, Acheampong BB. Strength properties and calorific values of sawdust-briquettes as wood-residue energy generation source from tropical hardwoods of different densities. Biomass and Bioenergy. 2016;85:144-152.

[5] Tantisattayakul T, Phongsasem S, Phooyar P. Taibangury P. Community-based renewable energy from biomass briquettes fuel from coconut leaf. Thai Journal of Science and Technology. 2558;3:418-31.Thai

[6] Sasujit K, Sanpinit W, Wongrin N, Dussadee N. Study of process densification of corn cob and corn husk briquettes by cold extrusion technique using starch with lime mixed as binder. Thaksin University Journal. 2558;18:5-12. Thai

[7] Teixeira SR, Pena AFV, Miguel AG. Briquetting of charcoal from sugar-cane bagasse fly ash (scbfa) as an alternative fuel. Waste Management 2010;30(5):804-7.

[8] Massaro MM, Son SF, Groven LJ. Mechanical, pyrolysis, and combustion characterization of briquetted coal fines with municipal solid waste plastic (MSW) binders. Fuel 2014;115:62-69.

[9] Ndindeng SA, Mbassi JEG, Mbacham WF, Manful J, Acquaah SG, Moreira J, Dossou J, Futakuchi K. Quality optimization in briquettes made from rice milling by-products. Energy for Sustainable Development 2015;29:24-31.

[10] Jittabut P. Physical and Thermal Properties of Briquette Fuels from Rice Straw and Sugarcane Leaves by Mixing Molasses. Energy Procedia 2015;79:2-9.

[11] Yank A, Ngadi M, Kok R. Physical properties of rice husk and bran briquette under low pressure densification for rural applicaton. Biomass and Bioenergy. 2016;84:22-30.

คำแนะนำในการเขียนบทความ

วัตถุประสงค์ของวารสาร

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เป็นวารสารทางวิชาการจัดพิมพ์ฉบับแรกในเดือนมกราคม พ.ศ.2559 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่ผลงานวิจัยและองค์ความรู้ทางที่น่าสนใจด้าน ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการสร้างความก้าวหน้าทางวิชาการ และมาตรฐานการประกอบวิชาชีพ โดยสาขาวิชาที่เกี่ยวข้องได้แก่ วิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์ วิศวกรรมระบบควบคุม วิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ วิศวกรรมโทรคมนาคม วิศวกรรมเครื่องกลวิศวกรรมเกษตร วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ วิศวกรรมขนถ่ายวัสดุ วิศวกรรมอุตสาหการ วิศวกรรมแม่พิมพ์ วิศวกรรมโลหการ วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม วิศวกรรมเหมืองแร่ สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และสาขาที่เกี่ยวข้อง

ประเภทของบทความ

บทความวิจัย (research articles) เป็นรายการวิจัย หรือรายงานทางวิชาการทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ซึ่งสร้างความก้าวหน้าทางวิชาการ โดยบทความดังกล่าวจะต้องไม่เคยตีพิมพ์ในวารสารหรือหนังสือ

บทความปริทัศน์ (review articles) เป็นบทความที่รวบรวมความรู้เชิงวิชาการเรื่องใดเรื่องหนึ่งจากวารสารหรือหนังสือ โดยมีการวิเคราะห์และวิจารณ์ เพื่อให้เกิดความเข้าใจเชิงลึกอย่างแท้จริง

การส่งบทความ

นักวิจัยและผู้ที่สนใจตีพิมพ์บทความในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา สามารถจัดส่งบทความโดยมีรายการดังต่อไปนี้ คือ (1) ต้นฉบับบทความที่เป็นข้อมูลของโปรแกรม Microsoft word และ Adobe Acrobat จำนวนอย่างละ 1 ชุด (2) จดหมายนำส่งที่เป็นข้อมูลของโปรแกรม Adobe Acrobat จำนวน 1 ชุด โดยสามารถจัดส่งได้ทั้งทางอีเมล์ EngineeringJournal@rmutl.ac.th และทางไปรษณีย์

ที่อยู่และสถานที่จัดส่งจดหมาย
"กองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา"
128 ถนนห้วยแก้ว ตำบลช้างเผือก อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ เบอร์โทรศัพท์ 053-921444 ต่อ1236

กำหนดการตีพิมพ์เผยแพร่ปีละ 2 ฉบับ (รายหกเดือน)

กรณีที่บทความได้รับการตีพิมพ์ กองบรรณาธิการจะแจ้งรายละเอียดที่ต้องแก้ไขครั้งสุดท้ายให้ผู้เขียนบทความทราบ หลังจากที่ผู้เขียนได้พัฒนาบทความฉบับสมบูรณ์เรียบร้อยแล้ว ผู้เขียนบทความจะต้องส่งเอกสารดังนี้ คือ 1) ต้นฉบับบทความที่เป็นข้อมูลของโปแกรม Microsoft word และ Adobe Acrobat จำนวนอย่างละ 1 ชุด โดยสามารถจัดส่งได้ทั้งทางอีเมล์ และทางไปรษณีย์ตามที่อยู่ที่กล่าวไว้ในข้างต้น

โครงร่างของบทความ

1. บทนำ
2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย
3. ผลการวิจัยและอภิปราย
4. สรุป
5. กิตติกรรมประกาศ
6. เอกสารอ้างอิง

การเตรียมบทความ

1. การพิมพ์บทความใช้แบบอักษร TH SarabunPSK ขนาดตัวอักษรเท่ากับ 14 ใช้กระดาษขนาด A4 ซึ่งมีความกว้าง x ยาว เท่ากับ 21.2x29.7 ซม. พิมพ์ด้านเดียว โดยระยะห่างระหว่างบรรทัดเท่ากับหนึ่งช่อง และพิมพ์ห่างระยะห่างจากขอบกระดาษเท่ากับ 2.5 ซม. ริมขอบกระดาษด้านบน 2.5 ซม. ริมขอบกระดาษด้านล่าง 2.0 ซม. ริมขอบกระดาษด้านซ้าย 2.5 ซม. ริมขอบกระดาษด้านขวา 2.0 ซม.

2. ทุกด้านข้างของกระดาษ ส่วนตัวเลขหน้ากำหนดให้อยู่ด้านล่างขวา จำนวนหน้าของบทความทั้งหมดไม่ควรเกิน 8 หน้ากระดาษขนาด A4

3. ภาพประกอบทุกภาพและตารางควรมีการอ้างอิงในบทความ รูปภาพที่เป็นดิจิตอลควรเลือกใช้รูปแบบ eps tiff หรือ jpg และมีความละเอียดของภาพไม่น้อยกว่า 300 dpi

4. ตัวเลขที่ใช้เป็นเลขอารบิกเท่านั้น

5. ตารางที่ใช้ต้องมีหัวข้อและเชิงอรรถเพื่อบรรยายคำย่อสัญลักษณ์ หรือเครื่องหมายที่ใช้

6. หน่วยที่ใช้ควรใช้ระบบหน่วย International System Units หรือ SI โดยในบทความต้องเขียนเป็นภาษาอังกฤษ

7. คำภาษาไทยให้ใช้ตัวสะกดตามพจนานุกรมฉบับราชบัณ-ฑิตยสถาน

8. ศัพท์ภาษาอังกฤษให้แปลเป็นภาษาไทย ให้ใช้คำที่ราชบัณฑิตยสถานบัญญัติได้กำหนดไว้ให้ ในกรณีที่ไม่ยังไม่ถูกกำหนด ให้เขียนภาษาอังกฤษในวงเล็บด้านหลังเฉพาะครั้งแรกเท่านั้น

9. การย่อคำและการกำหนดสัญลักษณ์ให้ใช้เฉพาะคำย่อมาตรฐานโดยควรกำหนดคำเต็มก่อนครั้งแรกและอ้างอิงคำย่อไว้ท้าย

ส่วนประกอบของบทความ

1. ชื่อเรื่องที่ใช้ควรกระชับและชัดเจนแต่ครอบคลุมเนื้อหาทั้งหมด และไม่ควรใช้ตัวอักษรย่อ

2. บทคัดย่อภาษาไทยและภาษาอังกฤษ จะต้องแสดงรายละเอียดและระบุ ชื่อเรื่อง วัตถุประสงค์ วิธีการวิจัย ผลการวิจัย สรุปผล โดยความยาวของบทคัดย่อไม่ควรเกิน 250 คำ และมีคำสำคัญประมาณ 3-5 คำ ส่วนการคั่นในบทคัดย่อภาษาไทย ให้ใช้ เว้นวรรค และเรียงตามตัวอักษร ส่วนการคั่นคำสำคัญให้ใช้เครื่องหมายจุลภาค (,) คำสำคัญภาษาอังกฤษต้องให้ความเหมือนคำสำคัญภาษาไทย และมีจำนวนเท่ากับคำสำคัญภาษาไทย

3. เนื้อเรื่องของบทความจะประกอบไปด้วย บทนำ ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย ผลการวิจัยและอภิปราย บทสรุป กิตติกรรมประกาศ และเอกสารอ้างอิง

3.1 บทนำ จะกล่าวถึงที่มาและความสำคัญของงานวิจัย วัตถุประสงค์ ขอบเขตการวิจัย สมมติฐาน ซึ่งเชื่อมโยงกับผลการวิจัย

3.2 ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย จะกล่าวถึง ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง รายละเอียดของวัสดุและวิธีการที่ใช้ในการศึกษา โดยรายละเอียดที่แสดง สามารถนำไปทดลองทำซ้ำได้

3.3 ผลการวิจัยและอภิปราย จะต้องแสดงเป็นหมวดหมู่และสัมพันธ์กับวัตถุประสงค์ของบทความซึ่งผลการศึกษาสามารถแสดงในรูปแบบตำราและรูปภาพได้ แต่ต้องไม่ซ้ำกับเนื้อหาที่เขียนในส่วนนี้ ส่วนตำแหน่งการวางรูปภาพจะต้องอยู่หลังจากคำแนะนำในบทความ และไม่จำเป็นต้องแสดงทันทีทันใดหลังจากแนะนำหรือบรรยายบทความ ผู้เขียนอาจวางรูปใกล้กับรูปอื่น โดยจัดให้อยู่บริเวณด้านบนสุดหรือด้านล่างสุดของบทความ

โดยในแต่ละช่วงของผลการวิจัย ผู้เขียนสามารถเขียนบทวิจารณ์ และวิจารณ์ได้ทุกส่วนประกอบของบทความและผลของการวิจารณ์จะต้องแสดงองค์ความรู้ใหม่ที่ได้รับ ผลประโยชน์ที่ได้รับ รวมทั้งรายละเอียดของปัญหาและอุปสรรคต่างๆ

3.4 บทสรุป เป็นการกล่าวถึงผลโดยย่อและข้อสรุปจากบทวิจารณ์

3.5 กิตติกรรมประกาศ เป็นส่วนที่กล่าวคำขอบคุณถึงองค์กร หรือบุคคลที่ให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนต่อผู้เขียน

3.6 เอกสารอ้างอิง ซึ่งการเขียนเอกสารอ้างอิงสามารถแสดงในลำดับถัดไป โดยใช้รูปแบบการอ้างอิงแบบแวนคูเวอร์ (Vancouver system) ในกรณีที่เอกสารอ้างอิงต้นฉบับเขียนเป็นภาษาไทยให้ผู้เขียนเปลี่ยนเป็นภาษาอังกฤษแล้วใช้ระบบแวนคูเวอร์และเขียนกำกับด้านท้ายว่า Thai ซึ่งตัวอย่างการอ้างอิงบางส่วนสามารถแสดงได้ดังนี้

<u>ตัวอย่างการเขียนอ้างอิงหนังสือ</u>

[1] Simons NE, Menzies B, Matthews M. A Short Course in Soil and Rock Slope Engineering. London: Thomas Telford Publishing;2001.

<u>ตัวอย่างการเขียนอ้างอิงบทในหนังสือ</u>

[1] Meltzer PS, Kallioniemi A, Trent JM. Chromosome alterations in human solid tumors. In: Vogelstein B, Kinzler KW, editors. The genetic basis of human cancer. New York: McGraw-Hill;2002. p. 93-113.

<u>ตัวอย่างการเขียนอ้างอิงวารสาร</u>

[1] Geck MJ, Yoo S, Wang JC. Assessment of cervical ligamentous injury in trauma patients using MRI. J Spinal Disord. 2001;14(5):371-7.

[2] Bua-art S, Saksirirat W, Kanokmedhakul S, Hiransalee A, Lekphrom R. Extraction of bioactive compounds from luminescent mushroom (*Neonothopanus nambi*) and its effect on root-knot nema-tode (*Meloidogyne incognita*). KKU Res J. 2010;15(1):726-37.Thai.

<u>ตัวอย่างการเขียนอ้างอิงบทความในการประชุมวิชาการ</u>

[1] Christensen S, Oppacher F. An analysis of Koza's computational effort statistic for genetic programming. In: Foster JA, Lutton E, Miller J, Ryan C, Tettamanzi AG, editors. Genetic programming: EuroGP 2002: Proceedings of the 5th European Conference on Genetic Programming; 2002 Apr 3-5; Kinsdale, Ireland. Berlin: Springer; 2002. p. 182-91.

[2] Wittke M. Design, construction, supervision and long-term behaviour of tunnels in swelling rock. In: Van Cotthem A., Charlier, R., Thimus, J.-F. and Tshibangu, J.-P. (eds.) Eurock 2006: Multiphysics coupling and long term behaviour in rock mechanics: Proceedings of the International Symposium of the International Society for Rock Mechanics, EUROCK 2006, 2006 May 9-12, Liège, Belgium. London: Taylor & Francis; 2006.p. 211-216.

[3] Edge BL. Coastal engineering 2000: conference proceedings, 2000 July 16-21, Sydney Convention

& Exhibition Centre, Sydney, Australia. Reston, VA: ASCE; 2001.

ตัวอย่างการเขียนอ้างอิงวิทยานิพนธ์

[1] Leckenby RJ. Dynamic characterisation and fluid flow modelling of fractured reservoirs. PhD thesis. Imperial College London; 2005.

ตัวอย่างการเขียนอ้างอิงสิทธิบัตร

[1] Landini, L. & Chielini, E. Water soluble and biodegradable self airproof tight closing bag. CN101045489 (Patent) 2007.

ตัวอย่างการเขียนอ้างอิงจากบทความวารสารอิเล็กทรอนิกส์

[1] Wang F, Maidment G, Missenden J and Tozer R. The novel use of phase change materials in refrigeration plant. Part 1: Experimental investigation. Applied Thermal Engineering. 2007;27(17-18): 2893-2901. Available from: doi:10.1016/j.applthe rmaleng. 2005.06.011 [Accessed 14th July 2008].

ตัวอย่างการเขียนอ้างอิงจากมาตรฐาน

[1] British Standards Institution. BS 5950-8:2003. Structural use of steelwork in building: code of practice for fire resistant design. London: BSI; 2003.

ตัวอย่างการเขียนอ้างอิงจากเว็บไซต์

[1] European Space Agency. Rosetta: rendezvous with a comet. Available from: http://rosetta .esa.int/ [Accessed 15th June 2015].

ตัวอย่างการเขียนอ้างอิงจากรายงาน

[1] Leatherwood S. Whales, dolphins, and porpoises of the western North Atlantic. U.S. Dept. of Commerce. Report number: 63, 2001.

การพิจารณากลั่นกรอง

บทความวิจัยและบทความปริทัศน์จะได้รับการกลั่นกรองจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขานั้นๆ อย่างน้อย 2 ท่าน โดยใช้เวลาประมาณ 4-8 สัปดาห์ ในกรณีที่ผู้ทรงวุฒิแนะนำให้แก้ไข ผู้เขียนต้องพิจารณาแก้ไขหรือชี้แจ้งเพิ่มเติมให้ผู้ทรงคุณวุฒิทราบ เมื่อผู้ทรงคุณวุฒิและผู้เขียนมีความเห็นตรงกัน และบทความได้แก้ไขเรียบร้อย จึงสามารถดำเนินการขั้นตอนการตีพิมพ์บทความในวารสารได้

สำเนาพิมพ์

ผู้เขียนบทความวิจัยและบทความปริทัศน์จะได้รับวารสาร 1 ฉบับ และสำเนาพิมพ์ (Reprint) เรื่องละ 5 ชุด โดยหากผู้เขียนต้องการจำนวนมากกว่านี้จะต้องแจ้งให้ทราบเมื่อส่งบทความฉบับแก้ไขครั้งสุดท้ายและต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมตามอัตราที่กำหนดโดยสำนักพิมพ์

จดหมายนำส่งบทความเพื่อตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

เรียน หัวหน้ากองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

ข้าพเจ้ามีความประสงค์ขอเสนอบทความเพื่อตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา และขอรับรองว่าบทความนี้เป็นบทความต้นฉบับ ไม่มีส่วนลอกเลียนผลงานของผู้ใดและผลงานนี้ไม่ได้ส่งตีพิมพ์ผลงานในวารสารฉบับอื่นเว้นแต่ได้รับการปฏิเสธมาก่อน ข้าพเจ้าขอรับรองว่าข้าพเจ้ามีส่วนร่วมในการศึกษาและได้รู้เห็นข้อมูลทั้งหมดในบทความอย่างครบถ้วนรวมทั้งได้ตรวจสอบข้อมูลความถูกต้องของเนื้อหาเป็นอย่างดีแล้ว

ประเภทบทความ ○ บทความวิจัย ○ บทความปริทัศน์

ลายมือชื่อ ....

(...) วันที่ ....

ลายมือชื่อ ....

(...) วันที่ ....

ลายมือชื่อ ....

(...) วันที่ ....

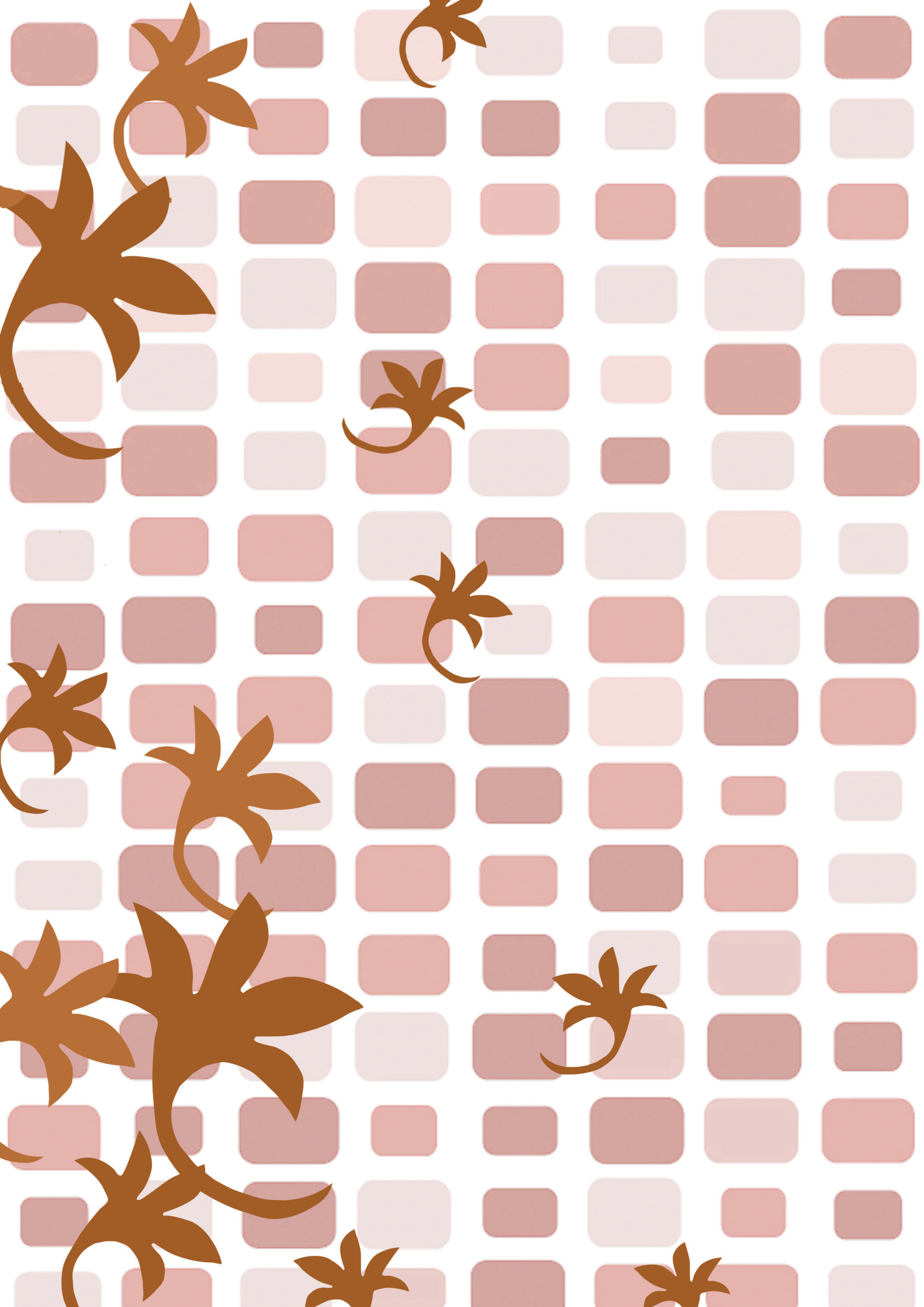
ลายมือชื่อ ....

(...) วันที่ ....

ชื่อผู้เขียนที่ให้ติดต่อเกี่ยวกับบทความ...

สถานที่ติดต่อ ....

....

....

โทรศัพท์ ....E-Mail...