วารสารวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

RMUTL Engineering Journal

RMUTL. Eng. J.

ปีที่ 5 ฉบับที่ 1

มกราคม – มิถุนายน 2563

ISSN 2465-4248

ISSN (Online) 2697-3839

วารสารวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ได้รับการประเมินให้อยู่ในฐานข้อมูลของ
ศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (TCI) กลุ่มที่ 2

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

รองศาสตราจารย์ศิลศิริ	สง่าจิตร	ผู้ปฏิบัติหน้าที่อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระศักดิ์	อุรัจนานนท์	รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและกิจการนักศึกษา
รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาติ	หาญวงษา	รองอธิการบดีฝ่ายกิจการพิเศษ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิวัตร	มูลปา	รองอธิการบดีฝ่ายนโยบายและพัฒนาระบบ
ดร.สุรพล	ใจวงศ์ษา	รองอธิการบดีฝ่ายวิจัยและบริการวิชาการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธนากร	สร้อยสุวรรณ	ผู้ช่วยอธิการบดี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประสงค์	เหลี่ยมโสภณ	ผู้ช่วยอธิการบดี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์นพดล	ตรีรัตน์	ผู้ช่วยอธิการบดี
ดร.สนธยา	ทองอรุณศรี	ผู้ช่วยอธิการบดี
ดร.สุเทพ	ทองมา	ผู้ช่วยอธิการบดี
ดร.กิจจา	ไชยทนุ	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีระ	จูน้อยสุวรรณ	คณบดีคณะศิลปกรรมและสถาปัตยกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์นิศรา	จันทร์เจริญสุข	คณบดีคณะบริหารธุรกิจและศิลปะศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.สุนทร	วิทยาคุณ	คณบดีคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมเกียรติ	วงษ์พานิช	ผู้อำนวยการสำนักส่งเสริมวิชาการและงานทะเบียน
รองศาสตราจาย์ ดร.มาลี	ตั้งระเบียบ	ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยเทคโนโลยีเกษตร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นพพร	พัชรประกิตติ	ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์เกรียงไกร	ธารพรศรี	ผู้อำนวยการสถาบันถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่ชุมชน
ดร.นพดล	มณีเขียร	ผู้อำนวยการวิทยาลัยเทคโนโลยีและสหวิทยาการ

ดร.ประเสริฐ	ลือโขง	ผู้อำนวยการสำนักวิทยบริการและเทคโนโลยีสารสนเทศ
รองศาสตราจารย์ ดร.อุเทน	คำน่าน	รองคณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พินิจ	เนื่องภิรมย์	รองคณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
นายชาคริต	ชูวุฒิยากร	รองคณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

บรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.กลิ่นประทุม	ปัญญาปิง	คณะวิศวกรรมศาสตร์

รองบรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษดา	ยิ่งขยัน	คณะวิศวกรรมศาสตร์

กองบรรณาธิการ

กองบรรณาธิการจากหน่วยงานภายนอก

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
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
รองศาสตราจารย์ ดร.อภินิติ	โชติสังกาศ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
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

กองบรรณาธิการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัชรินทร์	สิทธิเจริญ	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประชา	ยืนยงกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย	เดชธรรมรงค์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทวีชัย	กาฬสินธุ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาคภูมิ	จารุภูมิ	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภกิต	แก้วดวงตา	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัฐพล	จีนะวงค์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฐิติพร	พันธุ์ท่าช้าง	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยวัฒน์	กิตติเดชา	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิวโรฒม์	ศิริลักษณ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กุลทรัพย์	ผ่องศรีสุข	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ดร.ภาณุ	อุทัยศรี	คณะวิศวกรรมศาสตร์
นายณัฐชาสิทธิ์	ชูเกียรติขจร	คณะวิศวกรรมศาสตร์
นายปรัชญ์	ปิยะวงศ์วิศาล	คณะวิศวกรรมศาสตร์

ฝ่ายจัดพิมพ์และเผยแพร่

นางสาวจิราภรณ์	กันทะใจ	คณะวิศวกรรมศาสตร์
นายครรชิต	เงินคำคง	คณะวิศวกรรมศาสตร์
นางสาวอุไรวรรณ	สายยะนันท์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
นางสาวจุฑาทิพย์	สุวรรณ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
นางสาววัลลภา	วงศ์ษายะ	คณะวิศวกรรมศาสตร์

จดหมายจากบรรณาธิการ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา (RMUTL Eng. J) ปีที่ 5 ฉบับที่ 1 ประจำเดือน มกราคม–มิถุนายน 2563 เป็นฉบับแรกที่จัดอยู่ในฐานข้อมูลศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (TCI) กลุ่มที่ 2 ซึ่งมีบทความผ่านการประเมินของผู้ทรงคุณวุฒิ (Peer review) ทั้งจากภายในและภายนอกมหาวิทยาลัย โดยทางกองบรรณาธิการ จะพยายามปรับปรุงคุณภาพของวารสารให้คงมาตรฐานที่ดี เพื่อให้วารสารวิศวกรรมศาสตร์ เป็นที่ยอมรับในแวดวงทางวิชาการเป็นอย่างดี และเกิดการแบ่งปันองค์ความรู้ที่มีคุณภาพทางวิชาการด้านวิศวกรรมศาสตร์

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ฉบับนี้ ได้รวบรวมบทความทางวิชาการที่ผ่านการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิ จำนวน 6 บทความ ซึ่งเป็นบทความทางวิชาการด้านวิศวกรรมอุตสาหการ วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม วิศวกรรมโยธา และวิศวกรรมไฟฟ้า อนึ่งท่านสามารถติดตามวารสารวิศวกรรมศาสตร์ และอ่านบทความต้นฉบับได้ที่เว็บไซต์ https://engineering.rmutl.ac.th/journal/ และ https://www.tci-thaijo.org/ index.php/ RMUTLEngJ

ในนามของกองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงต่อนักวิจัยที่สนใจส่งบทความมาตีพิมพ์ และผู้ทรงคุณวุฒิทั้งภายในและภายนอกมหาวิทยาลัยซึ่งทำหน้าที่ประเมินบทความอย่างเสียสละ และให้คำแนะนำที่ดีในการปรับปรุงเนื้อหาให้มีความสมบูรณ์และได้มาตรฐานทางวิชาการ รวมถึงผู้บริหารมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา และผู้สนับสนุนทุก ๆ ท่าน ที่ให้การสนับสนุน พร้อมทั้งกองบรรณาธิการที่เข้มแข็งซึ่งทำให้การจัดพิมพ์เล่มวารสารแล้วเสร็จตามเวลาที่กำหนด ท้ายสุดนี้ ขอเชิญชวนผู้สนใจ ส่งบทความทางวิชาการเข้าร่วมตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ในฉบับต่อไป



(รองศาสตราจารย์ ดร.กลิ่นประทุม ปัญญาปิง)
บรรณาธิการวารวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

สารบัญ

ปีที่ 5 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน 2563

บทความวิชาการ

เครื่องบดเศษไม้ให้เป็นขี้เลื่อยแบบสองชุดบด 1
กนต์ธีร์ สุขตากจันทร์ นริศ อินต๊ะวงค์ และนเรศ อินต๊ะวงค์

การย่อยสลายของแคฟฟีนและสารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำในอาร์โอและน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วโดยกระบวนการฉายแสงยูวีซีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 9
อรุณโรจน์ บัวไชยา กัลยกร ขวัญมา พนมชัย วีรยุทธศิลป์ และทรงพล ประโยชน์มี

กำลังรับแรงอัดของอิฐบล็อกประสานจากดินลูกรังผสมซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินและเถ้าชีวมวล 15
ฐิติพร พันธุ์ท่าช้าง วีระชาติ อินตา ธีรวัฒน์ คำใจ และเศวตสุนทร ชินะกุล

การพัฒนาวิธีการแยกแยะรูปภาพภาษามือ โดยอาศัยวิธีการปรับระนาบภาพ 25
โชคมงคล นาดี และกฤษดา ยิ่งขยัน

การศึกษาคุณสมบัติของวงจรช่องแคบในท่อนำคลื่นด้วยวัสดุแผ่นวงจรพิมพ์ 35
พินิจ เนื่องภิรมย์ กิจจา ไชยทนุ นัฐพงษ์ สิทธิกัน ธนวัฒน์ ปันห้าง และสมศักดิ์ อรรคทิมากูล

บทความปริทัศน์

Chicken slaughterhouse wastewater characteristics, current treatment and future challenges: A review 41
Siraprapa Chainetr Rungnapha Khiewwijit Nopadon Maneetien and Suraphon Chaiwongsar

เครื่องบดเศษไม้ให้เป็นขี้เลื่อยแบบสองชุดบด
Twin Mill Sawdust Grinding Machine

กนต์ธีร์ สุขตากจันทร์[1 *] นริศ อินต๊ะวงค์[1] และนเรศ อินต๊ะวงค์[1]
[1] สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
128 ถนนห้วยแก้ว อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300
Konthee Sugtakchan[1 *], Naris Intawong[1], Naret Intawong[1]
[1] Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna.
[*]ผู้รับผิดชอบบทความ: luang_s4@hotmail.com เบอร์โทรศัพท์ 0-5392-1444 ต่อ 2340

Received: 22 May 2019, Revised: 4 September 2019, Accepted: 21 February 2020

บทคัดย่อ
งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาเครื่องบดเศษไม้อเนกประสงค์ โดยให้สามารถทำการบดเศษไม้ที่มีลักษณะเป็นเศษเหลือทิ้งจากการกลึงรวมทั้งที่มีเศษไม้มะม่วงขนาดใหญ่ที่ปะปนมาด้วยเช่น เศษเปลือกไม้ แก่นไม้ที่ไม่พึงประสงค์ ได้ในเครื่องเดียวกัน หลักการเบื้องต้นของการออกแบบคือ การออกแบบเครื่องบดเศษไม้ให้เป็นขี้เลื่อยแบบสองชุดบดโดยใช้ต้นกำลังมอเตอร์เดียวกันกล่าวคือ ชุดบดหยาบใช้กลไกเพลาใบมีด เพื่อประโยชน์ในการบดย่อยเศษไม้มะม่วงขนาดใหญ่ที่ปะปนมาด้วยเช่น เศษเปลือกไม้ แก่นไม้ ให้มีขนาดเล็กลงก่อนตกลงไปสู่ชุดบดละเอียดต่อไป ชุดบดละเอียดเลือกใช้กลไกการตีกระแทกด้วยใบมีดอิสระตามแนวรัศมีของการหมุนของเพลา เป็นชุดบดที่จะทำการบดละเอียดชั้นสุดท้ายที่ทำงานรวมกับส่วนประกอบตะแกรงเพื่อทำให้ได้เศษขี้เลื่อยขนาด 4 มิลลิเมตร ผลการทดลองพบว่าเครื่องบดเศษไม้ให้เป็นขี้เลื่อยแบบสองชุดบดที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้สามารถบดย่อยเศษกลึงของไม้มะม่วงให้มีขนาดต่ำกว่า 4 มิลลิเมตรได้ตามวัตถุประสงค์ของโครงการ นอกจากนี้ผลการทดลองยังพบอีกว่าประสิทธิผลโดยรวมของเครื่องบดเศษไม้ให้เป็นขี้เลื่อยแบบสองชุดบดเท่ากับ 95% กำลังการผลิตเท่ากับ 340 กิโลกรัมต่อชั่วโมง หรือเท่ากับ 2730 กิโลกรัมต่อวัน ผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์พบว่าต้นทุนการบดย่อยเศษไม้เท่ากับ 0.163 บาทต่อกิโลกรัม และมีระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 1 เดือนกับ 11 วัน
คำสำคัญ เครื่องบดเศษไม้ ขี้เลื่อย การออกแบบเครื่องจักรกล

Abstract
The purpose of this research is to design and develop a multi-purpose wood waste grinder called “Twin Mill Sawdust Grinding Machine”. This machine is able to grind waste mango wood scrap from turning processes, that include a mixing of large and small sized mango wood scrap. The proposed wood crusher machine is designed to use a two-batch sawdust that requires equal motor power. The coarse crusher uses the “Shredding Machine” a crusher for the purpose of digesting large mango wood chips, such as wood bark crumbs, to a smaller size before falling into a fine grinding unit. The fine grinding unit uses the hammer mill mechanism as the grinding set to be finely grinded and filtered by the final grating to allow the sawdust size of 4 mm. The results showed that the machines created in this research were able to grind fine crushed mango wood chips to a size less than 4 mm which was in accordance with the objectives of the project. In addition, the results showed that the efficiency of the grinder was 95%, the production capacity of 340 kg per hour or equal to 2730 kg per day. The economic analysis showed that the cost of crushing wood chips with Twin Mill Sawdust Grinding was 0.163 Baht per kilogram, which translates to a return of investment period of 1 month and 11 days.
Keywords: Wood Sawdust, Grinder Machine, Mechanical Design

1. บทนำ

วิสาหกิจชุมชนกลุ่มหัตถกรรมไม้มะม่วง ตำบลห้วยทราย ตั้งอยู่หมู่ที่ 5 ตำบลห้วยทราย อำเภอสันกำแพง จังหวัด เชียงใหม่ จัดตั้งกลุ่มหัตถกรรมไม้มะม่วง ตำบล ห้วยทราย ได้จัดตั้งกลุ่มเมื่อวันที่ 2 เมษายน 2546 ดำเนินกิจการแปรรูปวัตถุดิบจากต้นมะม่วงเป็นสินค้าหัตถกรรมประเภทแจกัน ถ้วย ที่เขี่ยบุหรี่[1] เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 1 ส่งจำหน่ายทั้งในต่างประเทศ 80% และในประเทศ 20%



รูปที่ 1 สินค้าหัตถกรรมจากต้นมะม่วงวิสาหกิจชุมชนกลุ่มหัตถกรรมไม้มะม่วง ตำบลห้วยทราย

สินค้าหัตถกรรมจากต้นมะม่วงดังกล่าวถูกขึ้นรูปด้วยวิธีการกลึงก่อนนำมาตกแต่งด้วยสีและเสริมลวดลายโลหะต่อไป [2] จะเห็นได้ว่าในแต่ละวันมีเศษไม้มะม่วงที่ผ่านการกลึงออกจากชิ้นงานเป็นจำนวนมากประมาณ 100-150 kg/day หรือประมาณ 2 ton/month ดังแสดงในรูปที่ 2 เศษไม้มะม่วงดังกล่าวยังเป็นเศษไม้หยาบ ๆ ดังแสดงใน รูปที่ 3 ซึ่งเป็นภาระของทางผู้ประกอบการที่ต้องกำจัดซึ่งนั่นคือการเผาทำลายหรือขายในราคาถูกเพื่อนำไปทำเชื้อเพลิง หรือทิ้งให้เสื่อมสภาพไป เป็นต้น

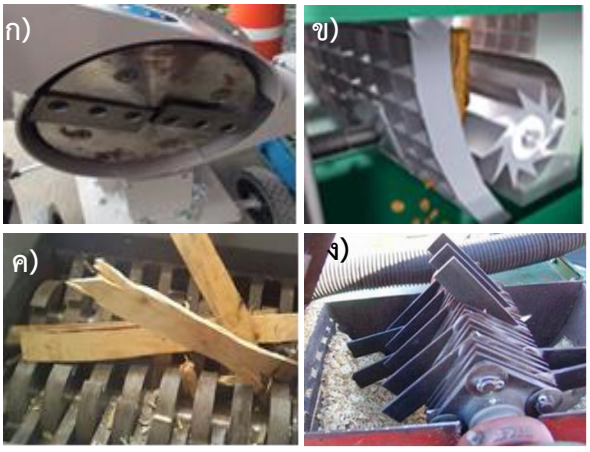


รูปที่ 2 เศษไม้มะม่วงที่ผ่านการกลึง



รูปที่ 3 เศษไม้มะม่วงที่ผ่านการกลึงแต่ยังมีขนาดที่ใหญ่ประมาณ 15-20 mm

ที่ผ่านมาทางผู้ประกอบการได้มีการหาข้อมูลเครื่องบด/ย่อยเศษไม้ที่มีขายในท้องตลาดที่คาดว่าจะนำมาใช้บดเศษไม้เพื่อแก้ปัญหาได้ โดยคาดว่าหากสามารถบดให้มีความละเอียดมากขึ้นจนเป็นขี้เลื่อยแล้วสามารถเพิ่มมูลค่าเศษไม้มะม่วงเหลือทิ้งนี้ได้โดยการจำหน่ายเพื่อนำไปทำก้อนเพาะเห็ด [3] หรือขี้เลื่อยสำหรับซับน้ำมันในโรงงานอุตสาหกรรมได้ [4] อย่างไรก็ตามพบว่าเครื่องจักรดังกล่าวนั้นสามารถบดเศษไม้ได้แต่ยังมีขนาดที่ใหญ่เกินไปประมาณ 15-20 mm เครื่องบดที่มีขายในท้องตลาดดังกล่าวเหมาะสำหรับการย่อยเศษกิ่งไม้เหลือทิ้งจากงานด้านการเกษตรกรรมที่มีลักษณะเป็นท่อนยาวเช่น กิ่งไม้ เศษท่อนไม้ เป็นต้น [5] หลักการบดของแต่ละเครื่องมีกลไกการบดที่แตกต่างกันตัวอย่างเช่น กลไกการบดด้วยใบมีดแบบหั่นรูปที่ 4 ข) กลไกการบดโดยใช้เฟืองใบมีดตัดรูปที่ 4 ข) กลไกการบดแบบเพลาใบมีด (Shredding Machine) รูปที่ 4 ค) และแบบกลไกการตีกระแทกด้วยใบมีดอิสระตามแนวรัศมี (Hammer mill Machine) รูปที่ 4 ข) [6] ดังแสดงในรูปที่ 4



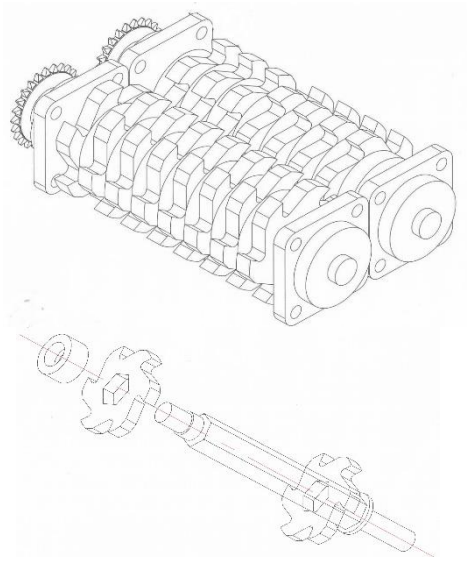
รูปที่ 4 กลไกการบดชนิดต่าง ๆ

จากเครื่องจักรที่ได้กล่าวมาข้างต้นเป็นกลไกที่ไม่เอื้อต่อการบดเศษไม้มะม่วงจากการกลึงที่มีเศษไม้ปะปนอยู่บางส่วนให้เป็นขี้เลื่อยที่มีขนาดประมาณ 4 mm ได้รวมทั้งยังไม่สามารถตอบโจทย์ด้านการใช้งานของผู้ประกอบการที่ต้องการได้

ดังนั้นในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและจัดสร้างเครื่องบดเครื่องจักรที่สามารถบดเศษไม้มะม่วง โดยการประยุกต์ใช้หลักการของกลไกการบดสองแบบตามที่ได้กล่าวมาข้างต้นให้ทำงานในเครื่องจักรเดียวกันคือ ชุดกลไกที่ 1 แบบ Shredding Machine และชุดกลไกที่ 2 แบบ Hammer Mill Machine ตลอดจนใช้ต้นกำลังมอเตอร์เดียวกันสามารถทำการบดเศษไม้ที่มีลักษณะเป็นเศษเหลือทิ้งจากการกลึงรวมทั้งที่มีเศษไม้มะม่วงขนาดใหญ่ที่ปะปนมาด้วย เช่น ท่อนไม้ กิ่งไม้ เศษเปลือกไม้ และแก่นไม้ที่ไม่พึงประสงค์ได้ในเครื่องเดียวกัน [7] โดยคาดว่าเครื่องจักรดังกล่าวนี้จะสามารถบดเศษขี้เลื่อยได้ละเอียดขนาดประมาณ 4 mm ตามประสงค์ของผู้ประกอบการ

2. วิธีดำเนินงานวิจัย

2.1 การออกแบบและจัดสร้างเครื่องบดเศษไม้ให้เป็นขี้เลื่อยแบบสองชุดบด



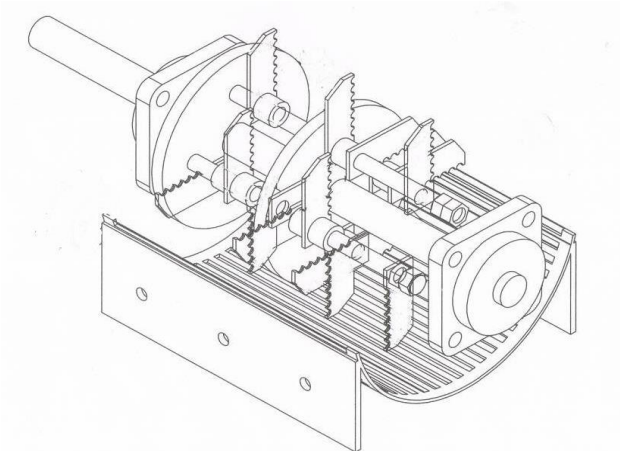
รูปที่ 5 ชุดกลไกที่ 1 แบบ Shredding Machine

2.1.1 ชุดบดที่ 1

ชุดบดด้านบนออกแบบให้มีกลไกการบดแบบเพลาใบมีดจากเครื่อง Shredding Machine ที่ให้ประสิทธิภาพการบดย่อยวัสดุที่มีมิติต่าง ๆ ได้อย่างหลากหลาย เช่นเป็นแท่งทรงกระบอก เป็นก้อน เป็นแผ่นบาง หรือแม้กระทั้งวัสดุที่มีความยืดหยุ่นเป็นต้น ที่เลือกกลไกชุดนี้เป็นชุดการบดที่อยู่ส่วนแรกของเครื่องจักรเพื่อประโยชน์ในการบดย่อยเศษไม้มะม่วงขนาดใหญ่ที่ปะปนมาด้วยเช่น เศษเปลือกไม้ แก่นไม้ให้มีขนาดเล็กลงก่อนตกลงไปสู่ชุดบดละเอียดต่อไป กลไกการบดแบบเพลาใบมีดประกอบด้วยชุดใบมีดสลับกับแผ่นกั้นประกอบบนเพลาหกเหลี่ยมดังแสดงในรูปที่ 5 จากนั้นนำมาประกอบในห้องบดโดยหันใบมีดของเพลาทั้งสองเข้าหากันแบบคู่ขนาน เพลาใบมีดทั้งสองมีทิศทางการหมุนตรงข้ามกันในแบบ Counter Rotating ที่ความเร็วรอบประมาณ 36.25 rpm โดยคมตัดของใบมีดที่หมุนเข้าหากันจะตัดเฉือนวัสดุอย่างต่อเนื่องและเศษวัสดุที่ถูกบดย่อยให้มีขนาดเล็กลงจะตกลงสู่ชุดบดละเอียดต่อไป

2.1.2 ชุดบดที่ 2

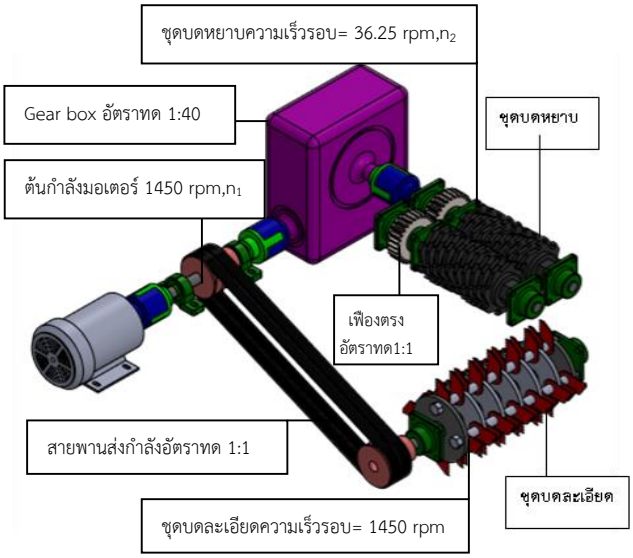
ชุดบดด้านล่างเป็นแบบกลไก Hammer Mill Machine โดยใช้การตีกระแทกด้วยใบมีดอิสระตามแนวรัศมีของการหมุนของเพลาดังแสดงในรูปที่ 6 เป็นชุดกลไกการบดที่ทำหน้าที่บดเศษไม้ที่ผ่านการบดย่อยเพื่อให้วัตถุที่ลดขนาดลงจากชุดบดที่ 1 การบดในชุดบดที่ 2 นี้จะเป็นการบดละเอียดชั้นสุดท้ายโดยใช้ใบมีดที่หมุนอิสระที่ความเร็วรอบประมาณ 1450 rpm หมุนตีเศษวัสดุให้มีขนาดเล็กลงโดยทำงานรวมกับส่วนประกอบตะแกรงที่มีขนาดช่องตะแกรงเท่ากับ 4 mm ติดตั้งด้านล่างของชุดบด หากเศษวัสดุถูกบดให้มีขนาดเล็กกว่าช่องตะแกรงจะสามารถลอดผ่านตะแกรงและหลุดออกมาเป็นเศษขี้เลื่อยขนาด 4 mm ตามประสงค์ของผู้ประกอบการ ส่วนเศษไม้ที่ยังมีขนาดใหญ่กว่าจะถูกบดอยู่ภายในชุดบดที่ 2 จนกว่าจะถูกลดขนาดลงและลอดผ่านตะแกรงออกมาได้



รูปที่ 6 แสดงชุดบดที่ 2 กลไกการบดแบบตีกระแทกด้วยใบมีดอิสระตามแนวรัศมีของการหมุนของเพลา

2.1.3. ต้นกำลังและระบบส่งกำลังของเครื่องบดเศษไม้ให้เป็นขี้เลื่อยแบบสองชุดบด

รูปที่ 7 แสดงระบบต้นกำลังของชุดเครื่องบดเศษไม้ให้เป็นขี้เลื่อยแบบสองชุดบด ใช้ต้นกำลังเดียวกันคือมอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 5 แรงม้า กำลังไฟฟ้า 220 V. AC. [8] การส่งกำลังเป็นระบบล้อสายพาน ร่วมกับสายพานและระบบเฟืองโซ่เพื่อขับเพลาใบมีดทั้งสองในชุดขับที่ 1 ที่ความเร็วรอบประมาณ 36.25 rpm โดยความเร็วดังกล่าวจะถูกปรับลดลงด้วยอัตราทดของระบบล้อสายพานร่วมกับสายพานจากต้นกำลังมอเตอร์ที่ความเร็วรอบ 1450 rpm ส่วนชุดบดที่ 2 เพลาใบมีดถูกขับด้วยระบบล้อสายพานร่วมกับสายพานเช่นกันโดยเป็นการส่งกำลังโดยตรงจากต้นกำลังมอเตอร์ซึ่งจะทำให้เพลาใบมีดในชุดบดที่ 2 นี้หมุนด้วยความเร็วรอบสูงประมาณ 1450 rpm



รูปที่ 7 แสดงระบบต้นกำลังของชุดเครื่องบดเศษไม้ให้เป็นขี้เลื่อยแบบสองชุดบด

2.1.4. การคำนวณออกแบบและหน้าที่การทำงาน (Function) ของส่วนประกอบเครื่องจักร [9]

ต้นกำลังและระบบส่งกำลังของทั้งสองชุดบดใช้ต้นกำลังเดียวกันคือมอเตอร์ไฟฟ้าความเร็วรอบ 1450 rpm ที่ถูกครอบไว้ด้วย Motor Cover เพื่อป้องกันฝุ่นละออง สำหรับการส่งกำลังแยกออกเป็นสองส่วนคือ

ชุดบดหยาบ โดยการส่งกำลังผ่านเพลาขับเข้าไปยัง Gear Box อัตราทด 1:40 เพื่อหมุนเฟืองตรงอัตราทด 1:1 เพื่อขับเพลาใบมีดบดหยาบที่ความเร็วรอบ 36.25 rpm ข้อมูลความเร็วรอบของมอเตอร์ (n1) = 1,450 rpm อัตราทดที่เกียร์ทดรอบ 1:40 กำหนดให้เลือกใช้คลัปปลิ้งต่อส่งถ่ายกำลังจากมอเตอร์เข้าสู่เกียร์ทดรอบดังนั้น ความเร็วรอบที่ออกจากเกียร์ทดรอบ= 36.25 rpm กำหนดให้เลือกใช้เฟืองตรงอัตราทด 1:1 เพื่อขับเพลาใบมีดบดหยาบ ดังนั้นความเร็วรอบของเพลาใบมีดมีความเร็วรอบ (n2) = 36.25 rpm มีทิศทางการหมุนแบบสวนทางกัน Counter Rotating

ชุดบดละเอียด โดยการส่งกำลังผ่านสายพานอัตราทด 1:1 เพื่อหมุนเพลาใบมีดบดละเอียดดังนั้นจึงทำให้เพลามีดบดละเอียด n3 หมุนด้วยความเร็วรอบ 1450 rpm

ภาพรวมเครื่องบดเศษไม้ให้เป็นขี้เลื่อยแบบสองชุดบดดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 บดย่อยเศษของไม้มะม่วงให้มีขนาดต่ำกว่า 4 mm

2.2 ขั้นตอนการทดสอบประสิทธิภาพและสมรรถนะเครื่องจักร

2.2.1 การทดลองเพื่อหากำลังการผลิตของเครื่องจักร

ทำโดยทำการบดย่อยเศษกลึงของไม้มะม่วงครั้งละ 1000 g ขนาดของเศษกลึงไม้มะม่วงประมาณกว้าง 10 mm หนา 2 mm ความยาวตั้งแต่ 100 mm ถึง 300 mm และจับเวลาที่เครื่องบดทำการบดเศษไม้มะม่วงจนหมด โดยทำการทดลอง 20 ครั้งการทดลองเพื่อหาค่าเฉลี่ยและคำนวณกำลังการผลิตต่อชั่วโมง

2.2.2 การทดสอบประสิทธิผลของเครื่องจักร [10]

โดยทั่วไปการวัดประสิทธิผลโดยรวมขอเครื่องจักร (Overall Equipment Effectiveness, OEE) สามารถได้ตามสมการที่ 1

$$OEE = (AxPxQ)100 \quad (1)$$

โดยที่

OEE = ประสิทธิผลโดยรวม (%)
A = อัตราการเดินเครื่องจักร (Availability)
P = ประสิทธิภาพการเดินเครื่องจักร (Performance efficiency)
Q = อัตราคุณภาพ (Quality rate)

การหาประสิทธิผลโดยรวมของเครื่องย่อยเศษกลึงของไม้มะม่วงในงานวิจัยนี้ ตัวแปรอัตราการเดินเครื่องจักรมีค่าและประสิทธิภาพการเดินเครื่องจักรไม่ถูกนำมาพิจารณา เนื่องจากในการทดลองเครื่องจักรทำงานโดยตลอด ไม่เกิดการขัดข้องเสียหายที่ต้องเสียเวลาการซ่อมบำรุงแต่อย่างใด ดังนั้นค่าประสิทธิผลโดยรวมของเครื่องจักรได้พิจารณาเฉพาะอัตราคุณภาพ ในความหมายตามวัตถุประสงค์ของเครื่องบดที่ต้องบดเศษไม้มะม่วงที่ให้มีขนาดเล็กกว่า 4 mm ซึ่งคำนวณได้ตามสมการที่ 2

$$Q = \frac{(q-N)}{q} x100 \quad (2)$$

Q = อัตราคุณภาพ (Quality rate)
q = น้ำหนักของขี้เลื่อยไม้มะม่วงที่บดแล้วมีขนาดเล็กกว่า 4 mm (g)
N = น้ำหนักของขี้เลื่อยไม้มะม่วงที่บดแล้วมีขนาดใหญ่กว่า 4 mm (g)

2.3 การคำนวณทางเศรษฐศาสตร์ [11]

คือการคำนวณค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากการใช้งานเครื่องบดเศษไม้ให้เป็นขี้เลื่อยแบบสองชุดบดได้แก่ ค่าไฟฟ้าจากการใช้งานจริง ค่าแรงงาน ค่าเสื่อมราคาของเครื่องจักร เพื่อนำข้อมูลดังกล่าวมาคำนวณหาระยะเวลาคืนทุนของเครื่องบดเศษไม้ให้เป็นขี้เลื่อยแบบสองชุดบด เมื่อนำไปใช้งานเชิงพาณิชย์ต่อไป

3. ผลการดำเนินงานวิจัย

3.1 ผลการหาค่ากำลังการผลิตของเครื่องจักร

รูปที่ 9 แสดงผลการใช้งานเครื่องบดเศษไม้ให้เป็นขี้เลื่อยแบบสองชุดบดเปรียบเทียบกันระหว่างเศษกลึงของไม้มะม่วงก่อนและหลังการบด ผลการใช้งานพบว่าเครื่องจักรที่สร้างขึ้นสามารถบดย่อยเศษกลึงของไม้มะม่วงให้มีขนาดต่ำกว่า 4 mm ได้ตามวัตถุประสงค์ของโครงการ



รูปที่ 9 ผลการใช้งานเครื่องบดเศษไม้ให้เป็นขี้เลื่อยแบบสองชุดบดเปรียบเทียบ เศษกลึงของไม้มะม่วงก่อนและหลังการบด

3.2 ผลการทดสอบประสิทธิผลของเครื่องจักร

ข้อมูลตารางผลการทดลองที่ 1 พบว่ากำลังการผลิตของเครื่องบดเศษไม้ให้เป็นขี้เลื่อยแบบสองชุดบดเท่ากับ 340 kg/hr หรือเท่ากับ 2730 kg/day ผลการทดลองพบว่าประสิทธิผลโดยรวมขอเครื่องบดเศษไม้ให้เป็นขี้เลื่อยแบบสองชุดบดเปรียบเทียบเท่ากับ 95 %

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องจักรและเวลาการบดเศษไม้

ครั้งที่	นน.ขี้เลื่อยขนาดเล็กกว่า 4 mm (g)	นน.ขี้เลื่อยขนาดใหญ่กว่า 4 mm (g)	เวลาในการบด (sec)	ประสิทธิผล %
1	955	45	12	95.5
2	950	50	10	95.0
3	965	35	11	96.5
4	940	60	9	94.0
5	955	45	10	95.5
6	945	55	11	94.5
7	935	65	10	93.5
8	952	48	11	95.2
9	950	50	13	95.0
10	965	35	11	96.5
11	945	55	11	94.5
12	955	45	10	95.5
13	945	55	10	94.5
14	935	65	11	93.5
15	952	48	12	95.2
16	950	50	10	95.0
17	965	35	9	96.5
18	945	55	10	94.5
19	955	45	9	95.5
20	954	46	11	95.4
		เฉลี่ย	10.55	95.065

3.3 ผลการคำนวณทางเศรษฐศาสตร์ [11]

3.3.1 ต้นทุนเครื่องจักร

3.3.1.1 ค่าเสื่อมราคาของเครื่องจักร

การคำนวณค่าเสื่อม (Depreciation, D) ราคาเป็นตัวแปรหนึ่งที่จะนำไปสู่การคำนวณหาค่าจุดคุ้มทุนของเครื่องจักรที่สร้างขึ้น โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่(3) และมีเงื่อนไขการพิจารณาคือ ราคาต้นทุนสินทรัพย์เครื่องจักร (Initial cost, P) เท่ากับ 150,000 baht ราคามูลค่าซากของทรัพย์สินเมื่อหมดอายุ(Scrap value, SV) ประเมินที่ 10 % ของราคาเครื่องจักรเริ่มต้นหลังจากผ่านการใช้งานที่ 5 ปี (Number, N) ซึ่งพบว่าในหนึ่งรอบปีการทำงานที่ 261 day คำนวณต้นทุนค่าเสื่อมราคาได้เท่ากับ 0.04 baht/kg

$$D = \frac{(P-SV)}{N} \qquad (3)$$

3.3.1.2 ค่าใช้จ่ายด้านค่าไฟฟ้าของเครื่องจักร

ค่าใช้จ่ายด้านค่าไฟฟ้าของเครื่องจักรคำนวณได้จากต้นกำลังมอเตอร์ขนาด 2 แรงม้าซึ่งใช้ไฟฟ้าเท่ากับ 1.492 KW/h โดยที่ค่าไฟฟ้าเท่ากับ 3.75 baht/kg ซึ่งในหนึ่งวันทำงานมีค่าใช้จ่ายเท่ากับ 45 baht/day ที่กำลังการผลิตเท่ากับ 2730 kg/day ดังนั้นค่าใช้จ่ายด้านค่าไฟฟ้าของเครื่องจักรเท่ากับ 0.016 baht/kg

3.3.1.3 ค่าใช้จ่ายด้านแรงงาน

ค่าแรงคนงานควบคุมเครื่องจักรใช้แรงงาน 1 คนมีค่าใช้จ่ายเท่ากับ 300 baht/day เครื่องจักรมีกำลังการผลิตสูงสุดเท่ากับ 2730 kg/day ดังนั้นค่าใช้จ่ายด้านค่าแรงคนงานเท่ากับ 0.11 kg/day

ดังนั้นต้นทุนเครื่องจักรคือผลรวมของค่าเสื่อมราคาของเครื่องจักร ค่าใช้จ่ายด้านค่าไฟฟ้าของเครื่องจักร และค่าใช้จ่ายด้านแรงงานซึ่งเท่ากับ 0.163 baht/kg

3.3.2 การเพิ่มมูลค่าของเศษไม้เหลือทิ้งหลังจากบดเป็นขี้เลื่อย

กำลังการผลิตของเครื่องจักรเท่ากับ 2730 kg/day มีต้นทุนการบดย่อยเศษไม้เท่ากับ 0.163 baht/kg เศษไม้ที่ถูกบดเป็นขี้เลื่อยแล้วสามารถจำหน่ายได้ในราคา 1.50 baht/kg สามารถสร้างมูลค่าของเศษไม้เหลือทิ้ง ดังกล่าวได้เท่ากับ 3,650 baht/day

3.3.3 จุดคุ้มทุนของการผลิต

จุดคุ้มทุนของการผลิต (Break even point, Q) คำนวณได้ตามสมการที่ 4 โดยพิจารณาจากค่าต้นทุนคงที่ (Fixed cost, F) คือราคาเครื่องจักรเท่ากับ 150,000 baht ราคาขายต่อหน่วย (Price, P) ขี้เลื่อยที่บดแล้วราคาขายเท่ากับ 1.5 baht/kg และต้นทุนแปรผัน (Variable cost, V) ซึ่งได้แก่ต้นทุนการบดย่อยเศษไม้เท่ากับ 0.163 baht/kg พบว่าปริมาณการผลิตมีจุดคุ้มทุนที่ 112,191 kg ดังนั้นจุดคุ้มทุนของเครื่องบดเศษไม้ให้เป็นขี้เลื่อยแบบสองชุดบดคือ 1 เดือนกับ 11 วัน

$$Q = \frac{F}{(P-V)} \qquad (4)$$

4. สรุปผลการทดลอง

เครื่องบดเศษไม้ให้เป็นขี้เลื่อยแบบสองชุดบดที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้ สามารถบดย่อยเศษกลึงของไม้มะม่วงให้มีขนาดต่ำกว่า 4 mm ได้ตามวัตถุประสงค์ของโครงการจากผลการทดลองพบว่าประสิทธิผลโดยรวมของเครื่องบดเศษไม้ให้

เป็นขี้เลื่อยแบบสองชุดบดเปรียบเทียบเท่ากับ 95 % กำลังการผลิตของเครื่องบดเศษไม้ให้เป็นขี้เลื่อยแบบสองชุดบดเท่ากับ 340 kg/hr หรือเท่ากับ 2730 kg/day และมีต้นทุนการบดย่อยเศษไม้เท่ากับ 0.163 baht/kg หากจำหน่ายได้ในราคา 1.50 baht/kg จะสร้างมูลค่าเพิ่มให้เศษกลึงไม้มะม่วงเหลือทิ้งดังกล่าวได้เท่ากับ 3,650 บาทต่อวันและจุดคุ้มทุนของเครื่องบดเศษไม้ให้เป็นขี้เลื่อยแบบสองชุดบดประมาณ 1 เดือนกับ 11 วัน

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยขอขอบคุณ สำนักส่งเสริมและถ่ายทอดเทคโนโลยีสำนักงานปลัดกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีและสถาบันไทย–เยอรมัน ผู้ให้ทุนสนับสนุนทุนวิจัยตลอดโครงการ ภายใต้โครงการพัฒนาต้นแบบเครื่องจักรเครื่องมือและอุปกรณ์เพื่อการผลิตระดับชุมชน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561 รวมทั้งวิสาหกิจชุมชนกลุ่มหัตถกรรมไม้มะม่วง ตำบลห้วยทราย และสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาเชียงใหม่ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และเครื่องมือในการทำวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Autsawasirilue S. Thinakoon K. Developing customer to be able about productive and productive. Retrieved June. (2011). 3; 2017, from:http://www.bacc.in.th/.[Accessed 11th July 2019].

[2] Intawong N, Sugtakchan K, Intawong N. 2015. Wood chip grinder to make two sets of sawdust. Complete report. Office of Technology Promotion and Transfer, Office of the Permanent Secretary, Thai-German Institute. Thai.

[3] Rommaphongphan. P. Mushroom cultivation from sawdust, Division of Plant Pathology and Microbiology, Department of Agriculture, Electronic publishing documents by: Bureau of Promotion and Training Kasetsart University. Thai.

[4] Arsana W. The Development of sawdust products from Ban Chom Thong community Ban Waen Subdistrict, Hang Dong District, Chiang Mai. The Far Eastern University Academic Journals; 2561: 12,166-178. Thai.

[5] Ekawutwongsa S. Analytical principles for Production design, Bangkok: Min Service Press Supply; 2014. Thai.

[6] Ekawutwongsa S. Crusher Study and Design in support of the Firebreaks Building Mission by the Forest Fire Control Research Center (FFRC), J Sci Technol MSU. 2015;5(34):496-502.

[7] Chakkajak. C. Agricultural machinery. Bangkok: Duangkamon Publisher; 2002. Thai.

[8] Sukkasem A. Alternating current motor. Bangkok: Publisher: SE-Education Company Limited; 2017. Thai.

[9] Ungphakorn W, Thanadsan C. Mechanical design, Volume 1. 10th edition. Bangkok: SN Group Company Limited, 1994. Thai.

[10] Lomchart N, Nuchanat A. A comparative study of the costs and returns of Barramundi culture in ponds, brackish and salt water. A case study sea bass culture in Prachuap Khiri Khan Province. RMUTP Research journal Special Issue, The 5th Rajamangala University of Technology National Conference; 2014. P. 80-90.

การย่อยสลายของแคฟฟีนและสารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำในน้ำอาร์โอและน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วโดยกระบวนการฉายแสงยูวีซีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

Degradation of Caffeine and Dissolved Organic Carbon in RO Water and Treated Wastewater by UVC/H_2O_2 Process

อรุณโรจน์ บัวไชยา[1] กัลยกร ขวัญมา[1 *] พนมชัย วีรยุทธศิลป์[1] และทรงพล ประโยชน์มี[2]
[1] สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
123 หมู่ 16 ถนนมิตรภาพ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40002
[2] สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร
680 ถนนนิตโย ตำบลธาตุเชิงชุม อำเภอเมือง จังหวัดสกลนคร 47000
Arunrot Buachaiya[1], Kulyakorn Khuanmar[1 *], Panomchai Verayutasil[1] and Songphon Prayochmee[2]
[1] Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University,
123 Moo 16 Mittraphap Road, Nai-Muang, Muang District, Khon Kaen 40002, Thailand.
[2] Department of Environmental Science, Faculty of Science, Sakon Nakhon Rajabhat University,
680 Nittayo Road, Mueang District, Sakon Nakhon, 47000, Thailand.
[*]ผู้รับผิดชอบบทความ: kulyakorn@kku.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 0-4320-2571

Received: 4 February 2020, Revised: 10 May 2020, Accepted: 25 May 2020

บทคัดย่อ
งานวิจัยนี้ศึกษาการบำบัดแคฟฟีน และสารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ (DOC) ด้วยกระบวนการฉายแสงยูวีซี และกระบวนการฉายแสงยูวีซีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยศึกษาการย่อยสลายแคฟฟีนในน้ำอาร์โอ (RO+Caf) และแคฟฟีนในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้ว (Eff+Caf) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการบำบัด RO+Caf และ Eff+Caf โดยใช้ UVC หรือ H_2O_2 เพียงอย่างเดียวไม่สามารถบำบัดแคฟฟีนได้อย่างมีประสิทธิภาพทั้งในสภาวะที่ละลายในน้ำอาร์โอ และในน้ำทิ้ง การบำบัดแคฟฟีนอย่างมีประสิทธิภาพจะเกิดขึ้นเมื่อมีการฉายแสง UVC ร่วมกับ H_2O_2 (UVC/H_2O_2) เท่านั้น ประสิทธิภาพการบำบัดแคฟฟีนด้วยกระบวนการ UVC/H_2O_2 ของ RO+Caf และ Eff+Caf มีประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุด ร้อยละ 100 และ 41.62 ตามลำดับ ในขณะที่ประสิทธิภาพการบำบัด DOC ใน RO+Caf และ Eff+Caf พบว่ามีประสิทธิภาพการบำบัด DOC สูงสุดที่ร้อยละ 28.37 และ 1.95 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากความขุ่น และสีของ Eff+Caf มีค่าสูงกว่า RO+Caf ทำให้มีผลต่อการส่งผ่านแสง UVC ในปฏิกิริยาของ UVC/H_2O_2 และทำให้ลดประสิทธิภาพการย่อยสลายของแคฟฟีนใน Eff+Caf นอกจากนี้สรุปได้ว่า DOC ที่อยู่ในน้ำทิ้งไม่สามารถบำบัดได้ด้วยเทคนิค UVC/H_2O_2 การเพิ่มปริมาณ H_2O_2 ในกระบวนการ UVC/H_2O_2 สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดแคฟฟีนใน Eff+Caf ได้ โดยมีประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 76.64 ที่ปริมาณ H_2O_2 500 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีแนวโน้มจะมีประสิทธิภาพสูงขึ้นหากเพิ่มปริมาณ H_2O_2 ในทางกลับกันการเพิ่มปริมาณ H_2O_2 ไม่ได้มีส่วนช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัด DOC
คำสำคัญ แคฟฟีน สารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ ยูวีซี/ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

Abstract
This research investigated the treatment of caffeine and dissolved organic carbon (DOC) using Ultraviolet C (UVC) photolysis and Ultraviolet C (UVC) photolysis in combination with hydrogen peroxide (H_2O_2). Degradation of caffeine and DOC was observed in the matrix solution of caffeine which was dissolved in both of RO water (RO+Caf) and treated wastewater (Eff+Caf). The results showed that degradation of caffeine in the matrix of RO+Caf and Eff+Caf using UVC or H_2O_2 alone could not be treated effectively. Conversely, the effective treatment occurred when the UVC radiation was combined with H_2O_2 (UV/H_2O_2). The maximum caffeine removal efficiencies of RO+Caf and Eff+Caf were 100% and 41.62% respectively, whereas the maximum DOC removal efficiencies of RO+Caf and Eff+Caf were 28.37% and 1.95% respectively. Because turbidity and color of Eff+Caf

were higher than Ro+Caf these effect on the UVC light transmittance in the UVC/H_2O_2 reaction of caffeine degradation in Eff+Caf. In addition, it concluded that the DOC in the effluent could not be treated with the UVC/H_2O_2 technique. Increasing H_2O_2 dosage in UVC/H_2O_2 process was able to improve the caffeine removal efficiency in Eff+Caf. The removal efficiency presented 76.64% at H_2O_2 500 mg/l, and these were likely to be more effective if the H_2O_2 dosage was increased. On the other hand, increasing the dosage of H_2O_2 could not improve the efficiency of the DOC removal.

Keywords: Caffeine, DOC, UVC/H_2O_2

1. บทนำ

แคฟฟีน (Caffeine) หรือที่รู้จักกันในชื่อ คาเฟอีน จัดเป็นสารมลพิษอุบัติใหม่ (Emerging pollutants) ที่ถูกตรวจพบว่ามีการปนเปื้อนในแหล่งน้ำธรรมชาติ และน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้ว อันเป็นผลมาจากกิจกรรมของมนุษย์ [1- 2] แคฟฟีนเป็นสารที่พบได้ทั่วไปในเครื่องดื่ม อาหาร ยารักษาโรคต่าง ๆ[3] มีรายงานการปนเปื้อนแคฟฟีนในแหล่งน้ำทั่วโลกพบว่ามีปริมาณสูงมากเมื่อเทียบกับสารมลพิษอุบัติใหม่ชนิดอื่น ๆ เนื่องจากแคฟฟีนมีความสามารถในการละลายน้ำได้สูงแต่ไม่สามารถบำบัดได้ดีในระบบบัดน้ำเสียชุมชน ซึ่งส่วนใหญ่เป็นระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ[4] จึงเป็นสาเหตุทำให้ตรวจพบแคฟฟีนในแหล่งน้ำผิวดิน[5] แม่น้ำลำคลอง ระบบรวบรวมน้ำฝน[6] และพบว่ามีการปนเปื้อนในปริมาณสูงในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้ว[7] การปล่อยน้ำทิ้งที่มีการปนเปื้อนของแคฟฟีนออกสู่ธรรมชาติ อาจทำให้เกิดความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต และสิ่งแวดล้อม[8] อีกทั้งการตกค้างของแคฟฟีนในสิ่งแวดล้อมสามารถเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องโดยการสะสมในระบบนิเวศน์[9] ถึงแม้ว่าประเทศไทยยังไม่มีความจำเป็นในการนำน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้วกลับมาใช้ซ้ำ แต่ก็ยังมีโอกาสที่จะเกิดการปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำผิวดินที่ใช้เป็นน้ำดิบในการผลิตน้ำประปาเพื่อนำมาอุปโภคบริโภค ปัจจุบันมีหลายงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการบำบัดสารมลพิษอุบัติใหม่ในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้ว โดยการฉายแสงยูวีซีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UVC/H_2O_2) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ถูกนำมาใช้ในการบำบัดสารมลพิษได้หลากหลายชนิด สามารถปรับเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองได้อย่างหลากหลาย [10] หากต้องการลดระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดสามารถทำได้โดยการเพิ่มปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งในกระบวนบำบัดสารมลพิษโดยการฉายแสงยูวีซีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UVC/H_2O_2) การเพิ่มปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) จะช่วยเพิ่มปริมาณอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล ($OH^{\bullet}$) ที่ไปทำปฏิกิริยา กับสารมลพิษที่ต้องการบำบัด ทำให้มีประสิทธิภาพการบำบัดสูงขึ้น บางงานวิจัยได้รายงานว่ากระบวนการฉายแสง (Photolysis) เพียงอย่างเดียวให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่าการฉายแสงยูวีซีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ แต่การย่อยสลายโดยใช้แสงเพียงอย่างเดียวจำเป็นต้องใช้พลังงานในการบำบัดสูง [11]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะศึกษาการบำบัดแคฟฟีน และสารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ (DOC) ด้วยกระบวนการฉายแสงยูวีซี (UVC) การใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และกระบวนการฉายแสงยูวีซีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UVC/H_2O_2) โดยศึกษาการย่อยสลายของแคฟฟีน และสารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำในตัวอย่างน้ำอาร์โอ และน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้วของมหาวิทยาลัยขอนแก่น ซึ่งเป็นระบบบำบัดน้ำเสียโดยใช้กระบวนการชีวภาพแบบบ่อปรับเสถียร (Stabilization ponds)

2. อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

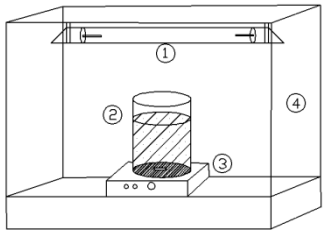
2.1 สารเคมี และอุปกรณ์การทดลอง

น้ำตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองเตรียมจากแคฟฟีน ($C_8H_{10}N_4O_2$) ยี่ห้อ Sigma Aldrich โดยเตรียมที่ความเข้มข้นสูง 1,000 mg/lit และนำไปผสมกับน้ำอาร์โอ (RO) และน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว (Treated wastewater) หรือน้ำทิ้ง (Effluent) จากระบบบำบัดน้ำเสียของมหาวิทยาลัยขอนแก่น ซึ่งเป็นระบบบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพโดยใช้ระบบบำบัดแบบบ่อปรับเสถียร โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วจากบ่อสุดท้ายของระบบบำบัด

ในการเตรียมน้ำตัวอย่างสำหรับการทดลองดำเนินการโดยเจือจางเคฟฟีน ในน้ำอาร์โอและในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้ว ให้ได้น้ำอาร์โอที่มีแคฟฟีนผสม (RO+Caf) หรือ น้ำทิ้งที่มีแคฟฟีนผสม (Eff+Caf) กำหนดความเข้มข้นของแคฟฟีน 10 mg/lit

การติดตั้งชุดการทดลอง ดังแสดงในภาพที่ 1 ซึ่งประกอบด้วยหลอด UVC ขนาด 15 วัตต์ ยี่ห้อ Philip รุ่น TUVC/G15 T8 กำหนดระยะห่างระหว่างหลอด และผิวน้ำตัวอย่าง 30 cm ระหว่างทำการทดลองจะกวนผสมน้ำตัวอย่างด้วยเครื่องกวนผสมแบบแม่เหล็ก และในกระบวนการ

UVC/H_2O_2 ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) 30% ยี่ห้อ Merck ทุกการทดลองใช้ปริมาตรรวมน้ำตัวอย่าง 1 lit ระหว่างทำการทดลองจะทำการเก็บน้ำตัวอย่าง 20 mlit ทุก 30 min ซึ่งพารามิเตอร์ที่วิเคราะห์จะประกอบด้วยความเข้มข้นของแคฟฟีน และสารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ (DOC)



รูปที่ 1 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดลอง

2.2. การวิเคราะห์พารามิเตอร์

การวิเคราะห์แคฟฟีนจะใช้เครื่องวิเคราะห์ของเหลวสมรรถนะสูง (High Performance Liquid Chromatography, HPLC) ยี่ห้อ LC-20A, Shimadzu Japan, คอลัมน์ C18 ยี่ห้อ Restek ขนาด 5 μm 250 x 4.6 mm เฟสเคลื่อนที่ (Mobile phase) ใช้ Acetonitrile (CH_3CN) สำหรับ HPLC ผสมกับน้ำ RO ในอัตราส่วน 1:1 กำหนดอัตราการไหล 1 mlit/min และใช้ UV detector ที่คลื่นความยาวแสง 275 นาโนเมตร และน้ำตัวอย่างจะถูกกรองด้วย syringe filters ขนาด 0.22 ไมครอน ก่อนนำไปวิเคราะห์ การวิเคราะห์ค่าสารอินทรีย์ละลายน้ำ (dissolved organic carbon, DOC) ทำการเตรียมตัวอย่างโดยกรองผ่าน syringe filters ขนาด 0.45 ไมครอน และนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TOC multi N/C 2100, Analytic Jena, Germany

2.3. ขั้นตอนการทดลอง

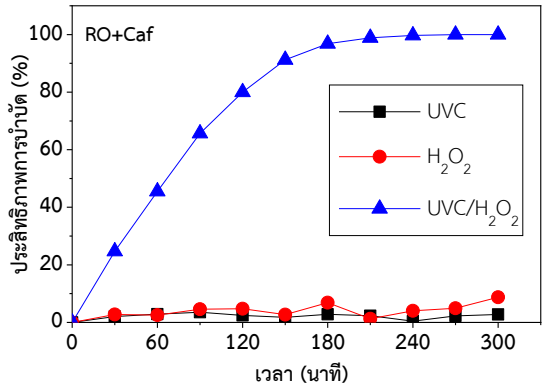
การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัด RO+Caf และ Eff+Caf ใช้ความเข้มข้นแคฟฟีนเริ่มต้น 10 mg/lit โดยใช้ 3 กระบวนการคือ การฉายแสงยูวีซี (UVC) การใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และการฉายแสงยูวีซีร่วมกับการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UVC/H_2O_2) ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 300 min เก็บตัวอย่างน้ำครั้งละ 20 mm ทุก 30 sec

การทดลองเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดแคฟฟีน ดำเนินการโดยทดลองเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) โดยกำหนดความเข้มข้น 50-500 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับการทดลองนี้กำหนดระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 210 min เก็บตัวอย่างน้ำครั้งละ 20 ml ทุก 30 min

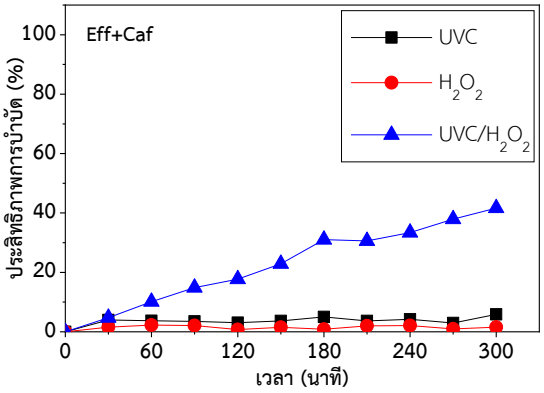
3. ผลการทดลอง และอภิปรายผล

3.1. การบำบัด RO+Caf และ Eff+Caf

การทดลองนี้เพื่อแสดงประสิทธิภาพของการบำบัด RO+Caf และ Eff+Caf ในกรณีที่ใช้แสง UVC H_2O_2 และ UVC/H_2O_2 โดยใช้ความเข้มข้นของ H_2O_2 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลาการฉายแสง 300 min ความเข้มข้นแคฟฟีนเริ่มต้นประมาณ 10 mg/lit ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 2



ก)



ข)

รูปที่ 2 ประสิทธิภาพการย่อยสลายของแคฟฟีนโดยใช้ความเข้มข้นของ H_2O_2 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ก) RO+Caf และ ข) Eff+Caf

จากรูปที่ 2 ก) แสดงผลการบำบัด RO+Caf พบว่าการฉายแสง UVC ให้ประสิทธิภาพการบำบัดแกว่งตัวอยู่ระหว่างร้อยละ 0.43-3.55 การใช้ H_2O_2 ให้ประสิทธิภาพการบำบัดแกว่งตัวอยู่ระหว่างร้อยละ 1.26-8.75 สำหรับการบำบัดโดยใช้ UVC/H_2O_2 ให้ประสิทธิภาพสูงสุดที่ร้อยละ 100.00

จากรูปที่ 2 ข) แสดงผลการบำบัด Eff+Caf พบว่าการฉายแสง UVC ให้ประสิทธิภาพการบำบัดแกว่งตัวอยู่ระหว่างร้อยละ 2.94-5.88 การใช้ H_2O_2 ให้ประสิทธิภาพการบำบัดแกว่งตัวอยู่ระหว่างร้อยละ 0.74-2.24 สำหรับการบำบัดโดยใช้ UVC/H_2O_2 ให้ประสิทธิภาพสูงสุดที่ร้อยละ 41.62

จะเห็นได้ว่าการบำบัด RO+Caf และ Eff+Caf โดยใช้ UVC หรือ H_2O_2 ไม่สามารถบำบัดแคฟฟีนได้อย่างมี

ประสิทธิภาพทั้งในสภาวะที่ละลายในน้ำอาร์โอ และในน้ำทิ้ง ซึ่งการบำบัดแคฟฟีนอย่างมีประสิทธิภาพจะเกิดขึ้นเมื่อมีการฉายแสง UVC ร่วมกับ H_2O_2 เท่านั้น

ตารางที่ 1 ค่า pH ความขุ่น และสี

ตัวอย่างน้ำ	pH	ความขุ่น (NTU)	สี (ADMI)
RO	7.57	0.32	1
RO + Caf	7.88	0.35	1
Eff	7.79	3.01	40
Eff + Caf	7.94	3.14	42

จากตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่าความขุ่น และสีของ Eff+Caf มีค่าสูงกว่า RO+Caf ทำให้ขัดขวางการฉายแสงซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพของการบำบัด Eff+Caf ด้วยกระบวนการฉายแสงยูวีซีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UVC/H_2O_2) [12] ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดแคฟฟีนใน Eff+Caf ต่ำกว่าประสิทธิภาพการบำบัดแคฟฟีนใน RO+Caf

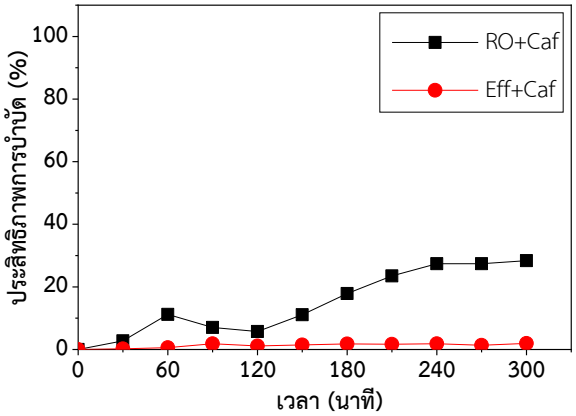
3.2. การบำบัด DOC ด้วยกระบวนการ UVC/H_2O_2

จากตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่าน้ำอาร์โอ และน้ำทิ้งมีค่า DOC 2.03 และ 17.19 mg/lit ตามลำดับ และจากการเตรียมน้ำตัวอย่างด้วยการละลายแคฟฟีนให้ได้ความเข้มข้นประมาณ 10 mg/lit ทำให้มีค่าความเข้มข้นของ DOC เพิ่มขึ้นประมาณ 6 mg/lit ใน RO+Caf มีค่า DOC 8.39 mg/lit ซึ่งเป็นค่า DOC ของแคฟฟีนที่ละลายเข้าไปในการเตรียมน้ำตัวอย่างที่เตรียมจากน้ำ RO ในการวิเคราะห์ DOC ใน Eff+Caf พบว่ามีค่า DOC 24.13 mg/lit ซึ่งเป็นค่า DOC ของแคฟฟีนที่ละลายเข้าไปในการเตรียมตัวอย่างน้ำที่เตรียมจากน้ำทิ้ง และค่า DOC ส่วนใหญ่เป็นค่า DOC ที่อยู่ในน้ำทิ้งซึ่งมีความเข้มข้น 17.19 mg/lit

ตารางที่ 2 ค่า DOC ในน้ำตัวอย่าง

ตัวอย่างน้ำ	DOC (mg/lit)
RO	2.03
RO + Caf	8.39
Eff	17.19
Eff + Caf	24.13

เมื่อ RO+Caf และ Eff+Caf มีการทำปฏิกิริยาโดยการฉายแสง UVC ร่วมกับ H_2O_2 ระยะเวลา 300 min พบว่าประสิทธิภาพการบำบัด DOC ใน RO+Caf เพิ่มขึ้นสูงสุดที่ร้อยละ 28.37 ซึ่งเป็นการบำบัด DOC เนื่องมาจากการย่อยสลายของแคฟฟีน ส่วนประสิทธิภาพการบำบัด DOC ใน Eff+Caf พบว่าที่เวลา 300 min มีประสิทธิภาพสูงสุดที่ร้อยละ 1.95 ดังแสดงในรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่า DOC ที่อยู่ในน้ำทิ้งก่อนการเติมแคฟฟีนไม่สามารถบำบัดได้ด้วยเทคนิค UVC/H_2O_2



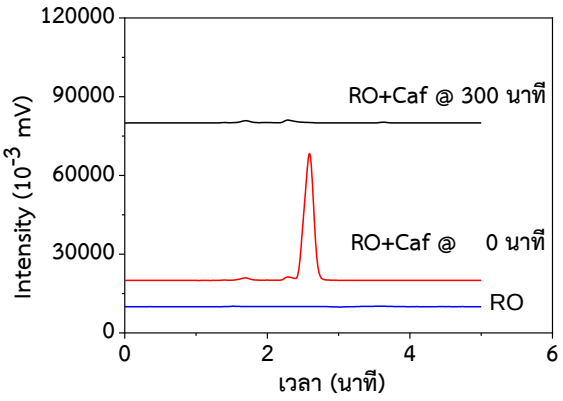
รูปที่ 3 ประสิทธิภาพการย่อยสลายของสารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ (DOC) โดยกระบวนการ UVC/H_2O_2 โดยใช้ความเข้มข้นของ H_2O_2 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

หากพิจารณาพีค (peak) โดยการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค HPLC แสดงดังรูปที่ 4 ก) ไม่ปรากฏพีคใด ๆ ในน้ำอาร์โอ เมื่อเริ่มทำการทดลอง RO+Caf จะปรากฏพีคแคฟฟีนตำแหน่งเวลา 2.6 min ระหว่างการทดลองพีคแคฟฟีนจะลดลง และหายไปเพราะถูกย่อยสลายอย่างสมบูรณ์ที่ 300 min

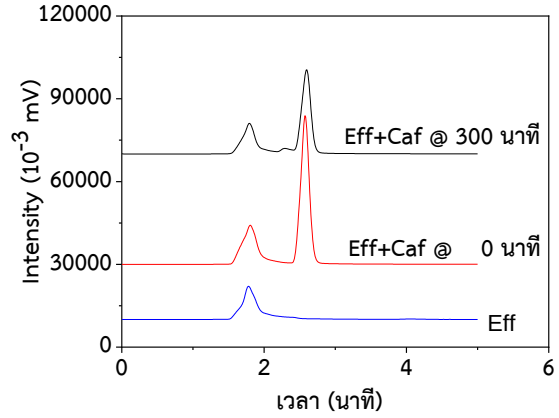
หากพิจารณารูปที่ 4 ข) พบว่าพีคของน้ำทิ้ง จะปรากฏพีคของ DOC ที่ตำแหน่งเวลา 1.8 min และไม่พบพีคของแคฟฟีน เมื่อ spike แคฟฟีน 10 mg/lit (Eff+Caf) จะพบพีคของแคฟฟีนที่ตำแหน่งเวลา 2.6 min เมื่อทำการทดลองฉายแสง UVC ร่วมกับ H_2O_2 เป็นระยะเวลา 300 min จากการทดลองพบว่าพีคของแคฟฟีนลดลง ทั้งนี้เนื่องจากมีการย่อยสลายแคฟฟีนด้วยกระบวนการ UVC/H_2O_2 แต่พีคของ DOC นั้นไม่ลดลง หรือไม่ถูกย่อยสลาย แสดงให้เห็นว่า DOC ในน้ำทิ้งไม่สามารถบำบัดได้ด้วยเทคนิค UVC/H_2O_2

3.3 การเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัด Eff+Caf โดยการเพิ่มปริมาณ H_2O_2

การทดลองนี้เป็นการทดลองโดยเพิ่มปริมาณ H_2O_2 ในการทำปฏิกิริยา UVC/H_2O_2 โดยใช้ปริมาณ H_2O_2 ที่ 50-500 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลาการฉายแสง 210 min กำหนดให้ความเข้มข้นของแคฟฟีนใน Eff+Caf 10 mg/lit ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 5

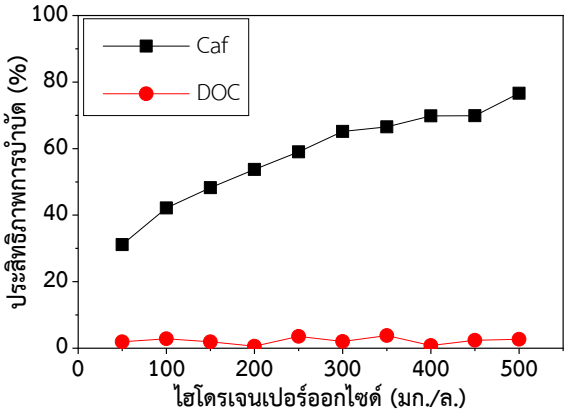


ก)



ข)

รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลง intensity ของพีค (peak) ที่เกิดขึ้นระหว่างทำการทดลอง ก) น้ำอาร์โอ และ ข) น้ำทิ้ง



รูปที่ 5 ประสิทธิภาพการบำบัดแคฟฟีน และสารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ (DOC) ใน Eff+Caf ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 270 min

จากผลการทดลองสรุปได้ว่า การเพิ่มปริมาณ H_2O_2 สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดแคฟฟีนใน Eff+Caf ได้ โดยประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 76.64 ที่ปริมาณ H_2O_2 500 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีแนวโน้มจะมีประสิทธิภาพสูงขึ้นหากเพิ่มปริมาณ H_2O_2 สำหรับการบำบัด DOC ใน Eff+Caf มีประสิทธิภาพแกว่งตัวอยู่ระหว่างร้อยละ 1.91-3.83 และไม่ได้แสดงความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณของ H_2O_2 ที่เพิ่มขึ้น ดังนั้น ปริมาณ H_2O_2 ที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดแคฟฟีนใน Eff+Caf แต่ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด DOC

4. บทสรุป

จากการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดแคฟฟีน และ DOC ในน้ำอาร์โอ และในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้ว โดยใช้กระบวนการฉายแสง UVC H_2O_2 และกระบวนการ UVC/H_2O_2 พบว่ามีเพียงกระบวนการ UVC/H_2O_2 เท่านั้นที่สามารถบำบัดแคฟฟีน และ DOC ได้ สรุปได้ว่าการฉายแสง UVC หรือใช้ H_2O_2 เพียงอย่างเดียวไม่สามารถบำบัด แคฟฟีน และ DOC ได้

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัด RO+Caf และ Eff+Caf พบว่าประสิทธิภาพของการบำบัดแคฟฟีน และ DOC ใน Eff+Caf ต่ำ เนื่องจากความขุ่นไปขัดขวางการฉายแสง UVC ส่งผลให้การเกิดปฏิกิริยา UVC/H_2O_2 ลดลง แต่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดแคฟฟีนใน Eff+Caf โดยการเพิ่มปริมาณ H_2O_2 แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณ H_2O_2 ไม่ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัด DOC เพิ่มขึ้นได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกลุ่มวิจัยวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย ขอนแก่น ที่สนับสนุนงบประมาณในการศึกษาวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Kolpin DW, Furlong ET, Meyer MT, Thurman EM, Zaugg SD, Barber LB, Buxton HT. Pharmaceuticals, hormones, and other organic wastewater contaminants in U.S. streams, 1999- 2000: A national reconnaissance. Environ Sci Technol. 2002;36(6):1202–11.

[2] Petrie B, Barden R, Kasprzyk-Hordern B. A review on emerging contaminants in wastewaters and the environment: Current knowledge, understudied areas and recommendations. Water Res. 2014;72(0):3–27. Available from:http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2014.08.053

[3] Graham. Caffeine Its Identity, Dietary Sources, Intake and Biological Effects. 1978;

[4] Wang D, Sui Q, Lu SG, Zhao WT, Qiu ZF, Miao ZW, Yu G. Occurrence and removal of six pharmaceuticals and personal care products in a wastewater treatment plant employing anaerobic/anoxic/aerobic and UV processes in Shanghai, China. Environ Sci Pollut Res. 2014;21(6):4276–85.

[5] Strauch G, Möder M, Wennrich R, Osenbrück K, Gläser HR, Schladitz T, Schirmer M. Indicators for assessing anthropogenic impact on urban surface and groundwater. J Soils Sediments. 2008;8(1):23–33.

[6] Sauvé S, Aboulfadl K, Dorner S, Payment P, Deschamps G, Prévost M. Fecal coliforms, caffeine and carbamazepine in stormwater collection systems in a large urban area. Chemosphere. 2012;86(2):118–23.

[7] Luo Y, Guo W, Ngo HH, Nghiem LD, Hai FI, Zhang J, Wang XC. A review on the occurrence of micropollutants in the aquatic environment and their fate and removal during wastewater treatment. Sci Total Environ. 2014;473–474:619–41. Available from: http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.12.065

[8] Klavarioti M, Mantzavinos D, Kassinos D. Removal of residual pharmaceuticals from aqueous systems by advanced oxidation processes. Environ Int. 2009;35(2):402–17. Availablefrom: http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18760478

[9] Snyder S, Westerhoff P, Wert E, Yoon Y. Endocrine Disruptors and Pharmaceuticals: Implications for the Water Industry. Proc Water Environ Fed. 2003;2005(13):3166–93.

[10] Shu Z, Bolton JR, Belosevic M, Gamal El Din M. Photodegradation of emerging micropollutants using the medium-pressure UV/H_2O_2 Advanced Oxidation Process. Water Res. 2013;47(8):2881–9. Availablefrom: http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2013.02.045

[11] Kim I, Yamashita N, Tanaka H. Performance of UV and UV / H_2O_2 processes for the removal of pharmaceuticals detected in secondary effluent of a sewage treatment plant in Japan. 2009;166:1134–40.

[12] Ahn KH, Park KY, Maeng SK, Song KG, Kim KP, Lee SH, Kweon JH. Color removal and disinfection with UV/H_2O_2 system for wastewater reclamation and reuse. Water Sci Technol Water Supply. 2005;5(1):51–7.

กำลังรับแรงอัดของอิฐบล็อกประสานจากดินลูกรังผสมซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินและเถ้าชีวมวล

Compressive Strength of Coal and Biomass Ashes Mixed with Laterite-Cement in Interlocking Compressed Bricks

ฐิติพร พันธุ์ท่าช้าง[1] * วีระชาติ อินตา[1] ธีรวัฒน์ คำใจ[1] และเศวตสุนทร ชินะกุล[1]
[1]สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
128 ถนนห้วยแก้ว อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300
Thitibhorn Phantachang[1] *, Weerachat Inta[1], Teerawat Kumjai[1], Savetsuntron Chinakul[1]
[1]Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Chiang Mai
128 Huay Kaew Road, Muang, Chiang Mai, Thailand, 50300
*ผู้นิพนธ์ประสานงาน: Thitibhorn@rmutl.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 0-5392-1444

Received: 21 February 2020, Revised: 10 May 2020, Accepted: 14 May 2020

บทคัดย่อ
วัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้เพื่อนำเถ้าถ่านหินและเถ้าชีวมวลที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการผลิตไฟฟ้า มาแทนที่ปูนซีเมนต์เพื่อการผลิตอิฐบล็อกประสานจากดินลูกรัง การศึกษาใช้เถ้าจากถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง และเถ้าชีวมวล จากโรงไฟฟ้าชีวมวล จังหวัดลำพูน ตัวอย่างอิฐบล็อกประสานมีสัดส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ต่อเถ้าลอยหรือเถ้าหนักเท่ากับ 0.7:0.3 0.6:0.4 0.5:0.5 0.4:0.6 และ 0.3:0.7 ตามลำดับ ที่อายุการบ่ม 3 7 14 และ 28 วัน มีการศึกษากำลังรับแรงอัด หน่วยน้ำหนัก และการดูดกลืนน้ำของตัวอย่าง ผลการทดสอบพบว่า หน่วยน้ำหนักของอิฐบล็อกประสานลดลงตามสัดส่วนของเถ้าที่เพิ่มขึ้น สำหรับกำลังรับแรงอัดตัวอย่างอิฐบล็อกประสานที่อัตราส่วนซีเมนต์ต่อเถ้า 0.7:0.3 มีค่ากำลังสูงสุดและผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของคอนกรีตบล็อกชนิดรับน้ำหนัก มอก. 57-2533 ในขณะที่สัดส่วนอื่น ๆ ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน คอนกรีตบล็อกชนิดไม่รับน้ำหนัก มอก. 58-2533 โดยอิฐบล็อกประสานสามารถพัฒนากำลังได้ตามมาตรฐานคอนกรีตบล็อกประสานชนิดรับน้ำหนักด้วยสัดส่วนที่เหมาะสม ผลการศึกษาพบประโยชน์ของการแทนที่ด้วยเถ้าทำให้อิฐบล็อกประสานมีหน่วยน้ำหนักที่ลดลงเป็นประโยชน์ในการลดน้ำหนักบรรทุกขององค์อาคาร การนำวัสดุเหลือใช้จากภาคอุตสาหกรรมมาใช้และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมด้วยการลดปริมาณปูนซีเมนต์ ส่งเสริมการนำวัสดุเหลือใช้จากภาคอุตสาหกรรมมาใช้ให้เกิดประโยชน์ด้านการก่อสร้าง
คำสำคัญ อิฐบล็อกประสาน ถ่านหิน ชีวมวล เถ้า กำลังรับแรงอัด

Abstract
The objective of this research is to use waste coal and biomass ash from power plants to develop laterite-cement interlocking compressed bricks. The coal and bio mass ashes were collected from Mae-Moh coal fired power plant in Lampang and fuel power plant in Lampun. Portland cement was partially replaced with ash at ratios cement:ash 0.7:0.3 0.6:0.4 0.5:0.5 0.4:0.6 and 0.3:0.7 and curing time of 3 7 14 and 28 days. Compressive strength, total unit weight and percentage of water absorption were investigated. Testing results showed that the unit weight of each series of interlocking bricks decreased with the increase of the cement replacement percentage of fly ash. Compressive strength of fly ash interlocking brick at 0.7:0.3 reached the Industrial standard for bearing load concrete block TIS 57-2533 and that all the mixtures reached the Industrial standard for no bearing load concrete block TIS 58-2533. The study showed that the compressive strength and low unit weight of interlocking bricks was adequate with partial replacement of Portland cement with ashes. The use of Ash to reduce dead weight of structures is more environmentally friendly and also saves costs. when compared with using Portland cement. It' s use is also beneficial for the construction industry because it encourages them to use industrial by-products and so increase their environmental credibility.
Keywords: Interlocking brick, Coal, Biomass, Ash, Compressive Strength

1. บทนำ

จากการพัฒนาของภาคธุรกิจ ภาคอุตสาหกรรม และเศรษฐกิจของประเทศไทย ส่งผลให้มีความต้องการใช้พลังงานสูงขึ้นประเทศไทยที่มีความต้องการไฟฟ้า 40,000 MW-day แหล่งพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้ามากกว่าร้อยละ 60 จากก๊าซธรรมชาติร้อยละ 15 จากถ่านหิน และร้อยละที่เหลือจากพลังงานอื่น ๆ เช่น พลังงานน้ำ พลังงานหมุนเวียนเช่น แสงแดดและลม และรับซื้อจากแหล่งอื่น ๆ ภายในและต่างประเทศ ในขบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยโรงไฟฟ้าถ่านหิน หรือ ชีวมวลที่ใช้พลังงานความร้อนเป็นเชื้อเพลิง ในขบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่หม้อไอน้ำ จะทำให้เกิดเถ้าลอยจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ทำให้เถ้าที่เหลือมีสภาพเป็นเถ้าลอย (Fly ash) ปะปนไปกับก๊าซในรูปของเขม่าและควัน และเถ้าบางส่วนจะตกไปอยู่ที่ก้นเตาเรียกว่าเถ้าหนัก หรือ เถ้าก้นเตา (Bottom ash) สำหรับการแยกเถ้าลอยจากก๊าซส่วนใหญ่จะใช้เครื่องกำจัดมลพิษทางอากาศ เช่น เครื่องดักฝุ่นแบบไฟฟ้าสถิต (Electrostatic precipitator) หรือเครื่องดักฝุ่นแบบถุงกรอง (Fabric filter) เป็นต้น และสำหรับเถ้าหนักใช้วิธีแยกออก ทำการลดอุณหภูมิด้วยน้ำก่อนส่งลำเลียงไปจุดกองเก็บ สำหรับกรณีของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ใช้ถ่านหินลิกไนต์วันละ 40,000 ton ทำให้เกิดเถ้าจากการผลิตกว่าวันละ 10,000 ton โดยเกิดเป็นเถ้าลอยร้อยละ 80 และเถ้าหนัก (Bottom ash) ร้อยละ 20[1] ในขณะที่โรงไฟฟ้าพลังชีวมวล ที่ใช้เชื้อเพลิงจากวัสดุทางการเกษตร เช่น ซังข้าวโพด เปลือกข้าว เปลือกไม้ ขบวนการให้ความร้อนทำให้เกิดเถ้าชีวมวล (Biomass ash) เช่นกัน โดยเถ้าที่ได้จากการผลิตไฟฟ้ามีคุณสมบัติทางเคมีที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม เกิดมลภาวะและสารพิษตกค้างที่ส่งผลด้านสุขภาพสิ่งแวดล้อมต่อประชาชนในพื้นที่ การกำจัดเถ้าเป็นสิ่งสำคัญ โดยมีการมุ่งเน้นเอาไปใช้ประโยชน์ ส่วนที่เหลือใช้วิธีการฝังกลบ ผู้ผลิตได้มีการส่งเสริมให้นำเถ้าเหลือทิ้งมาใช้ในด้านต่าง ๆ เช่นใช้ทดแทนปูนซีเมนต์เพื่องานก่อสร้าง หรือการใช้เป็นวัสดุประกอบอื่น ๆ [2-4] สำหรับเถ้าลอยถูกนำมาใช้ทดแทนวัสดุประสานจากคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลาน[5] ที่ทำให้เกิดการเชื่อมประสานในวัสดุคล้ายปูนซีเมนต์ แต่มีผลในการใช้งานที่ดีกว่าในด้านเพิ่มความสามารถในการทำงาน (Work ability) จากรูปทรงของเถ้าทำให้มีการไหลตัวดี คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยสามารถเพิ่มความคงทนของคอนกรีตต่อการกัดกร่อนของเกลือซัลเฟต[6-7] มีการนำเถ้าลอยไปใช้ในงานถนน งานก่อสร้างเขื่อน ใช้แทนที่ในวัสดุ อื่น ๆ รวมถึงประยุกต์ใช้ทดแทนซีเมนต์ในวัสดุก่อสร้าง สำหรับเถ้าหนักใช้ในการแทนที่วัสดุเฉื่อยคือทรายสำหรับงานทาง ทั้งนี้ปริมาณการใช้งานเถ้าหนักยังมีปริมาณไม่มากนัก จึงมีการส่งเสริมการใช้งานเพื่อลดภาระการทิ้ง[5]

อิฐบล็อกประสานเป็นหนึ่งในวัสดุก่อสร้างที่ประยุกต์ใช้เถ้าทดแทนซีเมนต์ที่เป็นตัวเชื่อมประสานกับดินลูกรัง หินฝุ่น หรือทราย และวัสดุอื่น ๆ มาผสมกับน้ำในสัดส่วนที่เหมาะสม และอัดขึ้นรูป ทำการบ่มก่อนนำมาใช้งาน มีการออกแบบรูปร่างให้เหมาะสมกับความต้องการของผู้ใช้ (รูปที่ 1) สำหรับขั้นตอนในการผลิตอิฐบล็อกประสานมีขั้นตอนการผลิตด้วยเทคโนโลยีพื้นฐาน โดยมีรูปแบบหลายชนิด เช่น เครื่องขึ้นรูปด้วยมือโยก เครื่องจักรขนาดเล็ก ไปถึงเครื่องจักรขนาดใหญ่ จึงเป็นที่นิยมสำหรับผู้ผลิตรายย่อย โดยแนวคิดในการประยุกต์ใช้เถ้าสำหรับผลิตอิฐบล็อกประสานในงานวิจัยในปัจจุบันมีใช้งานในสองรูปแบบคือ 1) เพื่อการแทนที่ปูนซีเมนต์ 2) เพื่อแทนที่ในวัสดุเฉื่อย[8]

อนุสรณ์ เดชบุรัมย์ และกริสน์ ชัยมูล[9] ศึกษากำลังรับแรงอัดของอิฐบล็อกประสานเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 0 5 10 15 20 และ 25 ด้วยสัดส่วนซีเมนต์ต่อลูกรังเท่ากับ 1:7 ที่อายุ 14 28 และ 90 วัน พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดและการดูดซึมเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนสำหรับอิฐบล็อกประสาน ค่ากำลังมีการเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม และเถ้าลอยจากเถ้าถ่านหินและเถ้าชีวมวล ให้กำลังของอิฐบล็อกประสานดีที่สุด

สำเริง รักซ้อน และคณะ[5] เสนอผลการวิจัยการใช้เถ้าหนักในงานคอนกรีต และมอร์ตาร์พบว่า เถ้าหนักต้องมีการลดขนาดแล้วผ่านตะแกรง 325 จึงจะทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี ขนาดอนุภาคที่ละเอียดสามารถแทรกตัวเข้าในโพรงมอร์ตาร์ ส่งผลให้มอร์ตาร์มีความทึบแน่น เพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะทำให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็ว ดังนั้นขนาดอนุภาคเถ้าหนักจึงส่งผลถึงค่ากำลังรับแรงอัดโดยตรง

ในการเปรียบเทียบเถ้าชีวมวลจากวัสดุธรรมชาติเป็นที่สนใจของนักวิชาการในด้านการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าชีวมวลจากวัสดุธรรมชาติที่ผ่านการเผาไหม้ จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหิน และเถ้าแกลบนั้น พบว่ามีองค์ประกอบหลักคือ SiO_2 Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ที่สำคัญในปฏิกิริยาปอซโซลาน โดยกล่าวได้ว่า



รูปที่ 1 การประยุกต์ใช้อิฐบล็อกประสานในรูปแบบต่าง ๆ

เถ้าแกลบมาทำเป็นวัสดุจำพวกจีโอโพลิเมอร์ หรือการปรับปรุงคุณสมบัติ SiO_2 และ Al_2O_3 จะส่งผลให้กำลังวัสดุสูงขึ้น เถ้าแกลบยังช่วยปรับปรุงคุณภาพให้คอนกรีตมีกำลังและเพิ่มความทนทาน[10-12]

ทั้งนี้เพื่อเป็นการศึกษาเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย เถ้าลอย เถ้าหนัก จากถ่านหินสำหรับอัตราส่วนที่เหมาะสม เพื่อการนำไปประยุกต์ใช้ และส่งเสริมการนำวัสดุเหลือใช้จากโรงไฟฟ้าไปทำให้เกิดประโยชน์ ลดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมในด้านลดปริมาณปูนซีเมนต์ บทความนี้ทำการศึกษาสัดส่วนผสมอิฐบล็อกประสานด้วยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหิน และเถ้าชีวมวล เปรียบเทียบกับมาตรฐานของอิฐบล็อกประสานชนิดไม่รับน้ำหนัก และรับน้ำหนัก การพัฒนากำลังที่เพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้เพื่อพัฒนาออกแบบอิฐบล็อกประสานที่เหมาะสมสำหรับผู้สนใจ

2. วิธีการวิจัย

ทดสอบคุณสมบัติตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อิฐบล็อกประสาน มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 57-2533 บล็อกคอนกรีตชนิดรับน้ำหนัก[12] และ มอก. 58-2533 บล็อกคอนกรีตชนิดไม่รับน้ำหนัก[13] ทดสอบกำลังรับแรงอัด และค่าการดูดซึมน้ำ วัสดุที่ใช้มีรายละเอียดดังนี้

2.1 ขนาดและแหล่งที่มาของวัสดุ

2.1.1 ดินลูกรังจากบ่อดิน อำเภอเทิง จังหวัดเชียงราย มีลักษณะเป็นดินทรายปนดินเหนียวสีแดงเข้ม มีขนาดเม็ดดินเฉลี่ย D_{50} เท่ากับ 0.40 mm รูปถ่ายด้วย (Scanning Electron Microscope, SEM) ที่มีขนาดกำลังขยาย 1000 เท่า แสดงในรูปที่ 2 ก)

2.1.2 เถ้าลอย จากโรงไฟฟ้าถ่านหิน อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ขนาด D_{50} เท่ากับ 0.075 mm ผ่านขบวนการเผาที่อุณหภูมิการเผาอยู่ในช่วงสูงกว่า 1200 °C โดยอนุภาคของเถ้าลอยถ่านหินมีขนาดเล็กสุดเมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าชนิดอื่น รูปที่ 2 ข) ดังแสดงรูปขยายขนาด 1000 เท่า

2.1.3 เถ้าลอยชีวมวลเป็นเถ้าที่ผ่านขั้นตอนการเผาจากวัสดุทางการเกษตร เช่น ข้าวเปลือก ฟางข้าวโพด และเศษไม้ จากโรงไฟฟ้าชีวมวล อำเภอเมือง จังหวัดลำพูน เถ้าลอยได้ผ่านขบวนการเผาที่อุณหภูมิการเผาอยู่ในช่วง 400-600 °C ขนาดอนุภาคเฉลี่ยค่า D_{50} เท่ากับ 0.25 mm รูป SEM ขยาย 1000 เท่า แสดงในรูปที่ 2 ค)

2.1.4 เถ้าหนักจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ลักษณะอนุภาคขนาดใหญ่ มีขนาดไม่สม่ำเสมอ ผ่านขบวนการเผาที่อุณหภูมิการเผาอยู่ในช่วงสูงกว่า 1200 °C โดยแสดงในรูปขยายขนาด 500 เท่าในรูปที่ 2 ง) การวิจัยนี้ได้ใช้เถ้าหนักจากโรงไฟฟ้าโดยตรงไม่มีการคัดแยกขนาด

2.2 ขั้นตอนการทำการทดสอบ

2.2.1 ทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ เช่น ค่าพิกัดอัตเตอร์เบิร์ก (Atterberg limit tests) การวิเคราะห์ด้วยตะแกรง (Grain size analysis) สำหรับดินลูกรัง ทราย เถ้าถ่านหิน และเถ้าชีวมวล เพื่อศึกษาลักษณะการกระจายขนาดของวัสดุและจำแนกชนิดเม็ดดิน การควบคุมหน่วยน้ำหนักตัวอย่างได้ทำการทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard proctor test) ตามมาตรฐาน ASTM 698 เพื่อนำไปควบคุมคุณภาพในการบดอัดก้อนตัวอย่างอิฐบล็อกประสานให้มีความหนาแน่นที่คงที่ด้วยปริมาณน้ำที่เหมาะสม จากผลการทดสอบค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density, $\gamma_{dry\ max}$) และค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Optimum moisture content, OMC)

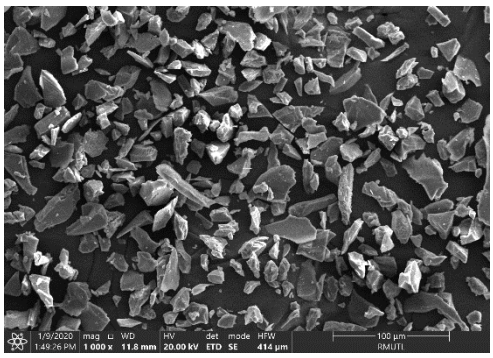
2.2.2 ปรับปรุงส่วนคละของดินลูกรังและทราย ที่รวมเป็นวัสดุเฉื่อยที่อัตราส่วน 5:1 สำหรับวัสดุประสานศึกษาค่าอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่าง ปูนซีเมนต์ และเถ้าลอย หรือเถ้าหนัก เพื่อกำหนดสัดส่วนการผสมตัวอย่าง

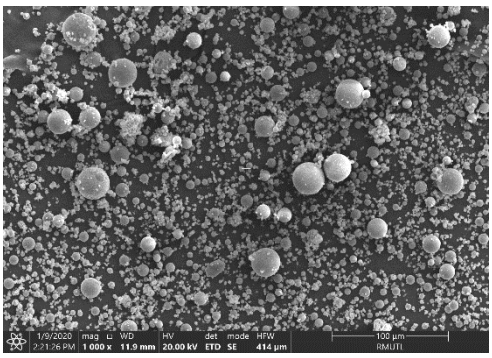
2.2.3 อัดขึ้นรูปเป็นอิฐบล็อกประสาน ด้วยการเตรียมส่วนผสมทั้งหมดให้อยู่ในสภาพแห้ง ชั่งน้ำหนักวัสดุส่วนผสมแห้งด้วยเครื่องชั่ง ผสมส่วนผสมแห้งเข้าด้วยกัน แล้วคนวัสดุให้เข้ากันไม่น้อยกว่า 15 min เติมน้ำในปริมาณน้ำที่เหมาะสม แล้วกดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดอิฐบล็อกประสานหลังแกะแบบเพื่อบ่มตามระยะเวลา สำหรับขั้นตอนการผสมแสดงในรูปที่ 3 ก)- จ)

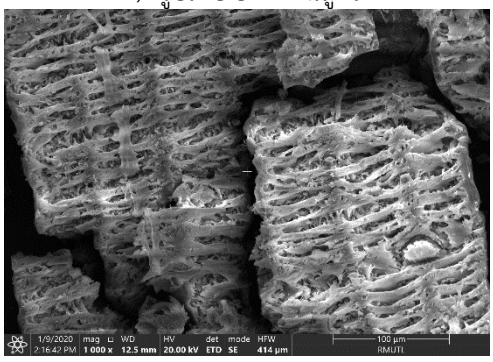
2.2.4 การบ่มอิฐบล็อกประสานหลังการอัด ทำการผึ่งในร่มเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงบ่มตัวอย่างโดยการพรมน้ำให้ทั่วแล้วหุ้มด้วยพลาสติกเก็บในที่ร่ม จนถึงเวลาทดสอบที่อายุ 3 7 14 และ 28 วัน มีการอุดช่องของอิฐบล็อกประสานด้วยปูนเกร้าท์ (วัสดุเชื่อมประสาน) ด้วยปูนผสม (ปูนก่อฉาบ) ด้วยสัดส่วนปูน 1 ส่วนต่อทรายหยาบ 2 ส่วน โดยน้ำหนัก ผสมน้ำที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) 0.75 เพื่อให้สภาพตัวอย่างทดสอบเหมือนกับสภาพการใช้งานจริง โดยปูนเกร้าท์จะมีค่าปูนกำลังที่สูงกว่าอิฐบล็อกประสาน การเตรียมตัวอย่างทดสอบ วัดขนาดและชั่งน้ำหนัก แล้วทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compression test) การดูดซึมน้ำ (Water absorption) ดังแสดงการเตรียมตัวอย่างแสดงในรูปที่ 3

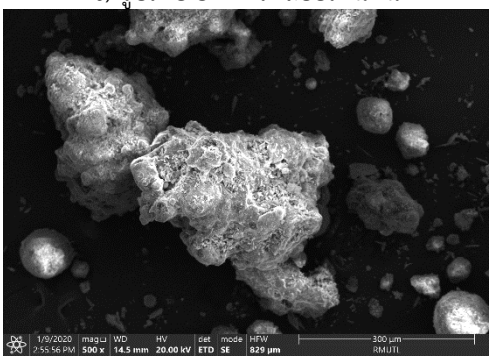
2.4 การออกแบบส่วนผสมและตัวอย่างควบคุม

ในการเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างมาตรฐานผสมปูนซีเมนต์ และสัดส่วนที่ผสมเถ้าลอยหรือเถ้าหนัก ด้วยตัวอย่างควบคุม และตัวอย่างที่มาปรับเปลี่ยนสัดส่วนด้วยเถ้าที่ทดแทนสัดส่วนของปูนซีเมนต์ และอายุการบ่ม จำนวนตัวอย่างทดสอบรวมทั้งสิ้น 204 ตัวอย่างสัดส่วนน้ำหนักปูนซีเมนต์ต่อเถ้าลอยถ่านหิน (FA) เถ้าหนักถ่านหิน


ก) รูปถ่าย SEM ดินลูกรัง


ข) รูปถ่าย SEM เถ้าลอยถ่านหิน


ค) รูปถ่าย SEM เถ้าลอยชีวมวล


ง) รูปถ่าย SEM เถ้าหนักถ่านหิน

รูปที่ 2 รูปถ่าย Scanning Electron Microscope, SEM ของวัสดุที่ใช้ทำวิจัย

(BT) หรือเถ้าลอยชีวมวล (BA) คือ 0.3:0.7 0.4:0.6 0.5:0.5 0.6:0.4 และ 0.7:0.3 ตามลำดับ รวม 5 อัตราส่วนผสม กำหนดให้อัตราส่วนผสมระหว่างดินลูกรังต่อทรายมีสัดส่วนคงที่เท่ากับ 5:1

3. ผลการวิจัย

3.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน

ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของวัสดุที่ใช้ประกอบในการศึกษา ประกอบด้วย ดินลูกรัง ทราย และดินผสมระหว่างดินผสมลูกรังและทราย (Laterite with sand) ในสัดส่วน 5:1 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยตะแกรงในรูปที่ 4 ก) และสรุปในตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์ด้วยตะแกรงสำหรับดินลูกรังและทราย มีค่า C_c และ C_u เท่ากับ 0.76 9.33 และ 0.62 2.68 ผลการจำแนกดินลูกรังอยู่ในดินทรายปนดินเหนียวที่มีการกระจายขนาดคละที่ไม่ดี (Poorly-graded sand with clay, SP-SC) และทรายสามารถจำแนกได้เป็นทรายที่มีขนาดคละไม่ดี (Poorly graded sand, SP) เมื่อผสมดินลูกรังและทรายในอัตราส่วนที่กำหนดทำให้มีการผสมกันระหว่างมวลรวมเม็ดหยาบและละเอียด สามารถจำแนกเป็นดินทรายปนดินตะกอนทรายที่มีขนาดคละดี (Well-graded sand with silt, SW-SM)

สำหรับการบดอัดตัวอย่างให้มีปริมาณน้ำที่เหมาะสม ได้มีการเตรียมตัวอย่างควบคุม สำหรับอิฐบล็อกประสานด้วยการทดสอบการบดอัดด้วยวิธีการบดอัดแบบมาตรฐาน ตามข้อกำหนดโดยใช้วัสดุผสมที่ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์:ดินลูกรัง:ทราย ที่สัดส่วนน้ำหนัก 1:5:1 ทดสอบโดยการเพิ่มปริมาณความชื้นในดินแห้ง ความชื้นจะทำหน้าที่เคลือบเม็ด ลดช่องว่าง หล่อลื่น แทนที่ช่องว่างทำให้มวลดินมีหน่วยน้ำหนักสูงขึ้นจนถึงค่าความหนาแน่นสูงสุด แล้วจึงมีค่าลดลง เนื่องจากน้ำที่เข้าไปแทนที่ช่องว่าง ผลทดสอบมีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดเท่ากับ 1,510 kg/m^3 ที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมเท่ากับร้อยละ 16 (รูปที่ 4 ข))

3.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดอิฐบล็อกประสานควบคุม

ตัวอย่างควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานโดยที่ไม่มีเถ้าชีวมวลมาเป็นวัสดุผสม ตัวอย่างอิฐบล็อกประสานในตัวอย่างควบคุมนี้ ใช้อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์:ดินลูกรัง:ทราย เท่ากับ 1:5:1 รหัสตัวอย่าง C01NA00-XX มีค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงอัดของอิฐบล็อกประสานที่อายุการบ่มเป็นระยะเวลา 3 7 14 และ 28 วัน เท่ากับ 19.53 24.13 46.97 และ 72.85 ksc ตามลำดับ และมีค่าการดูดกลืนน้ำเฉลี่ยเท่ากับ 170 kg/m^3 ผลการทดสอบค่าหน่วยน้ำหนักแห้งและกำลังรับแรงอัดแสดงไว้ในตารางที่ 2



ก) ชั่งน้ำหนักส่วนผสมแห้ง



ข) ผสมน้ำในวัสดุแห้งที่ปริมาณน้ำที่เหมาะสม



ค) อัดขึ้นรูปอิฐบล็อกประสาน



ง) แกะอิฐบล็อกประสานและผึ่งให้แห้ง 24 ชั่วโมง



จ) บ่มตัวอย่างในถุงพลาสติกตามอายุการทดสอบ

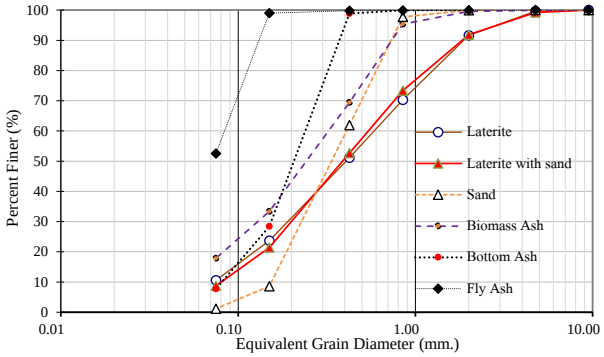
รูปที่ 3 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างอิฐบล็อกประสาน

3.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดอิฐบล็อกประสานตามอายุการบ่ม

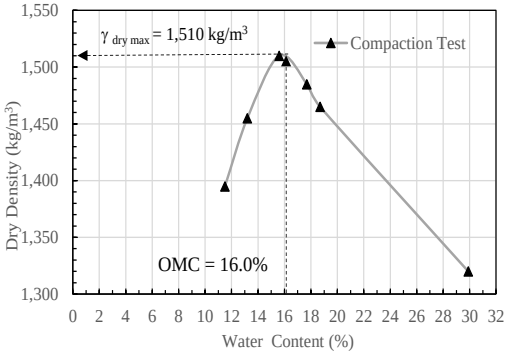
ตารางที่ 3 สรุปผลการวิเคราะห์ค่ากำลังรับแรงอัดของอิฐบล็อกประสานจากเถ้าลอยและเถ้าหนัก ถ่านหิน ในการทดสอบได้ศึกษาผลการพัฒนากำลังตามอายุการบ่มของอิฐบล็อกประสานจากการทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้า โดยพิจารณาจากอายุการบ่มตัวอย่างที่ระยะเวลา 3 7 14 และ 28 วัน สรุปผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์การพัฒนากำลังรับแรงอัดของอิฐบล็อกประสาน ตามสัดส่วนการผสมและอายุการบ่ม จะเห็นได้ว่าการพัฒนากำลังของอิฐบล็อกประสานผสมปูนซีเมนต์ของตัวอย่างควบคุม ค่ากำลังตัวอย่างควบคุมที่อายุ 28 วัน ค่ากำลัง เท่ากับ 72.85 ksc และตัวอย่างที่ทดแทนซีเมนต์ด้วยเถ้าที่สัดส่วน 0.7:0.3 0.6:0.4 0.5:0.5 0.4:0.6 และ 0.3:0.7 ค่ากำลัง 71.82 60.39 49.29 44.47 และ 41.23 ksc หรือค่ากำลังรับแรงอัดลดลงร้อยละ 1 17 32 39 และ 43 ตามลำดับ

สำหรับเถ้าลอยถ่านหิน และสำหรับเถ้าลอยชีวมวลการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังเท่ากับ 69.90 59.70 48.70 44.30 และ 40.60 ksc ค่ากำลังลดลงที่ร้อยละ 4 18 33 39 และ 44 ในขณะที่ค่ากำลังรับแรงอัดของเถ้าหนักถ่านหินมีค่ากำลังเท่ากับ 44.04 40.81 38.74 38.74 และ 35.34 ksc มีค่ากำลังที่ลดลงร้อยละ 40 44 47 48 และ 51 ตามลำดับ เมื่อทำการเปรียบเทียบค่ากำลังที่ทุกอายุการบ่มสามารถสรุปได้ว่า ค่ากำลังรับแรงอัดแปรผกผันตามการทดแทนเถ้าที่เพิ่มขึ้น และที่อายุการบ่มที่ 28 วันค่ากำลังรับแรงอัดของเถ้าลอยถ่านหินและเถ้าชีวมวล มีค่าที่ใกล้เคียงกัน และสูงกว่าเถ้าหนักถ่านหิน และค่ากำลังของอัตราส่วนผสมด้วยเถ้าลอยถ่านหินที่ C07FA03 มีค่ากำลังรับแรงอัดผ่านเกณฑ์สำหรับมาตรฐานบล็อกชนิดรับน้ำหนักตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ที่ไม่น้อยกว่า 70 ksc ที่อายุการบ่ม 28 วัน

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่ากำลังของเถ้าลอยจากถ่านหินและเถ้าชีวมวลในรูปที่ 5 ก) และ ข) แนวโน้มการพัฒนากำลังรับแรงอัดมีการพัฒนากำลังอย่างรวดเร็วเกิดขึ้นในช่วงอายุการบ่มที่ 14 วัน จากนั้นการพัฒนากำลังอัดมีแนวโน้มไม่เพิ่มขึ้นมากที่อายุการบ่ม 28 วัน การพัฒนากำลังรับแรงอัดของสัดส่วนการผสมสำหรับเถ้าลอยจากถ่านหิน และชีวมวลที่สัดส่วน C07FA03 และ C07BA03 คือ ปูนซีเมนต์:เถ้า เท่ากับ 0.7:0.3 มีการพัฒนากำลังที่สอดคล้องกับตัวอย่างควบคุม ในขณะที่การพัฒนากำลังของเถ้าหนักถ่านหินในรูปที่ 5 ค) พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างมีค่ากำลังลดลงอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม โดยมีค่ากำลังรับแรงอัดที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับส่วนผสมที่มาจากเถ้าลอยทั้งสองชนิด สามารถอธิบายได้จากขนาดอนุภาค และการกระจายขนาดของเถ้าดังแสดงในรูปที่ 2 รูปถ่าย SEM และ รูปที่ 4 ก) พบว่า



ก) ผลการทดสอบการวิเคราะห์ด้วยตะแกรง



ข) ผลการทดสอบการบดอัด

รูปที่ 4 ผลการทดสอบวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

ตารางที่ 1 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน

Property	Laterite	Sand	Laterite with sand
Sieve analysis			
- Coefficient of curvature, C_c	0.76	0.62	1.00
- Coefficient of uniformity, C_u	9.33	2.68	6.25
- Percent passing # 4	99.65	100	99.2
- Percent passing # 200	10.54	1.18	8.75
Atterberg's limits Test			
- Liquid limit, LL (%)	47	NP	9.70
- Plastic limit, PL (%)	17	NP	1.52
- Plastic index, PI (%)	30	-	8.18
Soil classification, USCS	SP-SC	SP	SW-SM

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบตัวอย่างควบคุม

Curing time (Day)	Dry unit weight kg/m^3	Comp. strength ksc
C01NA00-03	1,615.7	19.53
C01NA00-07	1,625.9	24.13
C01NA00-14	1,630.2	46.97
C01NA00-28	1,631.0	72.85

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด

Sample ID (Curing time)	Compressive strength, ksc		
	FA (Coal) ksc	BT (Coal) ksc	BA (Biomass) ksc
C07XX03-03	10.73	7.18	18.83
C07XX03-07	22.62	15.86	22.07
C07XX03-14	45.56	32.86	44.69
C07XX03-28	71.82	44.04	69.00
C06XX04-03	9.20	6.42	17.84
C06XX04-07	20.17	13.70	21.20
C06XX04-14	44.83	29.36	44.29
C06XX04-28	60.39	40.81	59.70
C05XX05-03	7.93	6.42	17.07
C05XX05-07	17.96	13.70	20.24
C05XX05-14	42.08	29.36	41.35
C05XX05-28	49.29	38.74	48.70
C04XX06-03	7.40	6.20	16.11
C04XX06-07	15.78	11.64	19.04
C04XX06-14	38.27	25.64	35.46
C04XX06-28	44.47	37.72	44.30
C03XX07-03	6.74	5.65	15.22
C03XX07-07	14.13	10.34	17.74
C03XX07-14	32.84	22.18	31.86
C03XX07-28	41.23	35.34	40.60

การกระจายขนาดของอนุภาคเถ้าลอยถ่านหิน เถ้าลอยชีวมวล เถ้าหนักถ่านหิน เรียงตามขนาดอนุภาพจากเล็กไปใหญ่ โดยขนาดอนุภาพที่เล็กกว่า ขนาดอนุภาคที่ละเอียดสามารถแทรกตัวเข้าในโพรง เพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะ ทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีกว่าเถ้าที่มีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่าส่งผลให้ค่ากำลังของเถ้าลอยทั้งสองชนิดที่ค่ากำลังที่สูงกว่าเถ้าหนักถ่านหินอย่างเห็นได้ชัด

3.4 ผลการทดสอบด้านกำลังรับแรงอัด และค่าหน่วยน้ำหนักของอิฐบล็อกประสานผสมเถ้า

ในรูปที่ 6 ก) และ ข) แสดงผลการทดสอบหน่วย

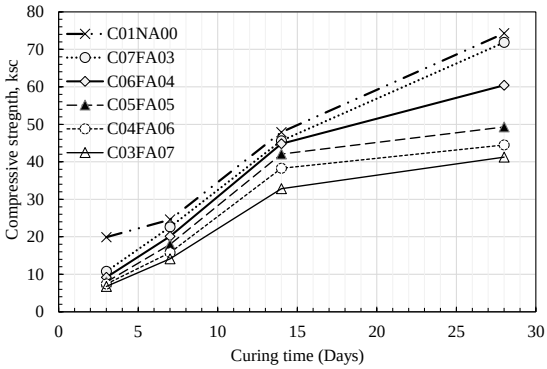
น้ำหนักเทียบกับหน่วยน้ำหนักของอิฐบล็อกประสานควบคุม (C01NA00) ที่อายุ 3 วัน และ 14 วันตามลำดับ กรณีผสมเถ้าลอย (ถ่านหิน) มีหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 1,616 kg/m^3 จากรูปแสดงการพัฒนากำลังเปรียบเทียบและค่าหน่วยน้ำหนัก โดยเมื่อเพิ่มสัดส่วนผสมของเถ้าลอยในอัตราส่วนของปูนซีเมนต์ต่อเถ้าลอย (ถ่านหิน) ที่ 0.7:0.3 0.6:0.4 0.5:0.5 0.4:0.6 และ 0.3:0.7 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า เมื่อสัดส่วนของเถ้าลอยมีค่ามากขึ้นค่าหน่วยน้ำหนักแห้งลดลง เนื่องจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.65 ส่งผลทำให้หน่วยน้ำหนักของอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าลอยแนวโน้มที่ลดลง ดังนั้นในการประยุกต์ใช้งานโดยใช้อิฐบล็อกประสานผสมเถ้าลอยไปใช้เป็นส่วนประกอบในงานผนัง จะช่วยลดน้ำหนักถาวรที่กระจายสู่โครงสร้างได้

3.5 การทดสอบการดูดกลืนน้ำของตัวอย่างจากเถ้าลอย เถ้าหนักจากถ่านหิน และเถ้าลอยชีวมวล

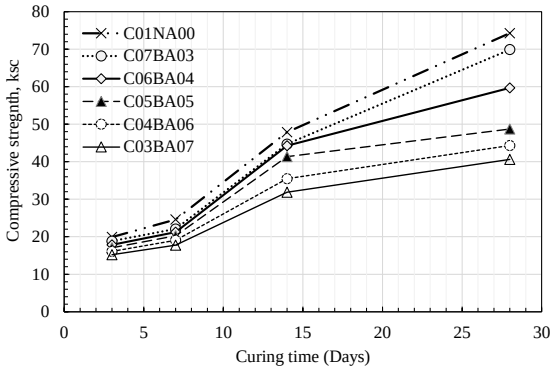
การทดสอบการดูดกลืนน้ำของตัวอย่างอิฐบล็อกประสานโดยใช้เถ้าลอยและเถ้าหนักจากถ่านหิน เพื่อทดแทนซีเมนต์ โดยทำการทดสอบจากตัวอย่างที่อายุ 28 วัน มีสัดส่วนผสมระหว่างซีเมนต์และ เถ้าลอยถ่านหิน (FA) หรือเถ้าหนักถ่านหิน (BT) ที่สัดส่วนน้ำหนักเท่ากับ 0.7:0.3 0.6:0.4 0.5:0.5 0.4:0.6 และ 0.3:0.7 โดยแสดงไว้ในหมายเลขตัวอย่าง จำนวนทดสอบ 3 ตัวอย่างต่อหนึ่งอัตราส่วนผสม มีจำนวนรวม 30 ตัวอย่าง ในรูปที่ 7 ก) และ รูปที่ 7 ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนน้ำของตัวอย่างผสมเถ้าลอย และเถ้าหนักถ่านหินร่วมกับผลการทดสอบการดูดกลืนน้ำจากตัวอย่างควบคุมอายุ 28 มีค่าการดูดกลืนน้ำเท่ากับ 170 kg/m^3 และผลการทดสอบอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าจากถ่านหินทุกตัวอย่างมีค่าการดูดกลืนน้ำ อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ให้ไม่เกิน 272 kg/m^3 ผลการทดสอบตัวอย่างมีร้อยละความแตกต่างของเถ้าแต่ละชนิด พบว่าค่าการดูดกลืนน้ำแปรผันตรงกับการเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของเถ้า สำหรับตัวอย่างผสมเถ้าลอยมีค่าการดูดกลืนน้ำแตกต่างจากผลทดสอบของตัวอย่างควบคุมที่ร้อยละ 25.9-37.6 โดยสำหรับตัวอย่างที่ผสมเถ้าหนักมีการดูดกลืนที่สูงกว่าเล็กน้อย โดยมีค่าร้อยละแตกต่างจากการดูดกลืนน้ำที่เทียบกับตัวอย่างควบคุมที่ค่าเฉลี่ยร้อยละ 28.2 - 38.2 สำหรับเถ้าลอยชีวมวลมีค่าการดูดกลืนต่างจากตัวอย่างควบคุมที่ค่าเฉลี่ยร้อยละ 37.1-27.6 ดังแสดงในรูปที่ 7 ค) ในรูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนน้ำและหน่วยน้ำหนักของก้อนตัวอย่างทดสอบจากเถ้าลอยและเถ้าหนักถ่านหิน กับสัดส่วนระหว่างปูนซีเมนต์ต่อเถ้าลอยทั้ง 5 อัตราส่วนผสม ค่าการดูดกลืนน้ำของตัวอย่างแปรผันตรงกับสัดส่วนของเถ้าที่เพิ่มขึ้น โดยค่าหน่วยน้ำหนักแห้งของตัวอย่างมีค่าประมาณ 1,605-1,686 kg/m^3 ตัวอย่างผสมเถ้าลอยถ่านหินมีหน่วยน้ำหนักแห้งที่อายุ 28 วันมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่าง โดยเมื่อเปรียบเทียบตัวอย่างที่ 0.3:0.7 มีค่าหน่วยน้ำหนักที่ลดลงเท่ากับร้อยละ 5 จากตัวอย่างควบคุม สำหรับตัวอย่างผสมเถ้าหนักมีค่าความหนาแน่นแห้งเท่ากับ 1,626 – 1,599 kg/m^3 สัดส่วนระหว่างปูนซีเมนต์ต่อเถ้าหนัก เท่ากับ 0.3:0.7 ถึง 0.7:0.3 แสดงผลของหน่วยน้ำหนักแห้งไปทิศทางเดียวกัน โดยมีแนวโน้มที่สูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อมีสัดส่วนของเถ้าหนักผสมเพิ่มขึ้น สันนิษฐานได้ว่าจากขนาดอนุภาคของเถ้าหนักที่ใหญ่กว่าการดูดกลืนน้ำไปสะสมที่พื้นทำให้ยังมีค่าหน่วยน้ำหนักที่สูงและค่าหน่วยน้ำหนักที่แตกต่างยังไม่มีนัยสำคัญที่แตกต่างระหว่างแต่ละสัดส่วนที่เปลี่ยนแปลงไป

ผลการทดสอบโดยมีอัตราส่วนผสม ปูนซีเมนต์และเถ้า:ดินลูกรัง:ทราย เท่ากับ 1:5:1 และอัตราส่วนระหว่างปูนซีเมนต์และเถ้าเท่ากับ 0.7:0.3 0.6:0.4 0.5:0.5 0.4:0.6 และ0.3:0.7 พบว่า กำลังรับแรงอัดของอิฐบล็อกประสานมีการพัฒนากำลังอย่างรวดเร็วเกิดขึ้นในช่วงอายุการบ่มที่ 14 วัน จากนั้นการพัฒนากำลังอัดมีแนวโน้มไม่เพิ่มขึ้นมากที่อายุการบ่ม 28 วัน โดยสัดส่วนของปูนซีเมนต์และเถ้าลอยถ่านหินที่ 0.7:0.3 มีค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 70.4 ksc ค่าการดูดกลืนน้ำ 214 kg/m^3 ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน มอก. 57-2533 บล็อกคอนกรีตชนิดรับน้ำหนัก และสำหรับสัดส่วนของเถ้าหนักถ่านหิน และเถ้าชีวมวลอายุ 28 วัน สำหรับผลการทดสอบที่สัดส่วนการผสมอื่น ๆ นั้นผ่านเกณฑ์มาตรฐาน มอก. 58-2533 บล็อกคอนกรีตชนิดไม่รับน้ำหนักที่กำหนดไว้ต้องมีค่ากำลังรับแรงอัดไม่น้อยกว่า 25 ksc

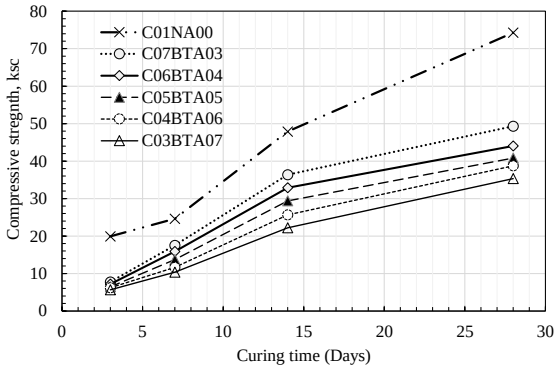
ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งของอิฐบล็อกประสานที่ทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้า มีค่าแปรผันตรงกับสัดส่วนของเถ้าหนักที่เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับผลการทดสอบค่าการดูดกลืนน้ำที่เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของเถ้า เนื่องจากขนาดของอนุภาพเถ้ามีผลกับความสามารถดูดกลืนน้ำ อีกทั้งขนาดอนุภาคเถ้ายังมีผลกับการทำปฏิกิริยาปอซโซลานที่ส่งผลถึงค่ากำลังรับแรงอัดโดยตรง [5] ดังนั้นหากต้องการพัฒนาอิฐบล็อกประสานชนิดรับน้ำหนัก ควรมีการคัดขนาด เพื่อให้อิฐ



ก) เถ้าลอยถ่านหิน (FA)

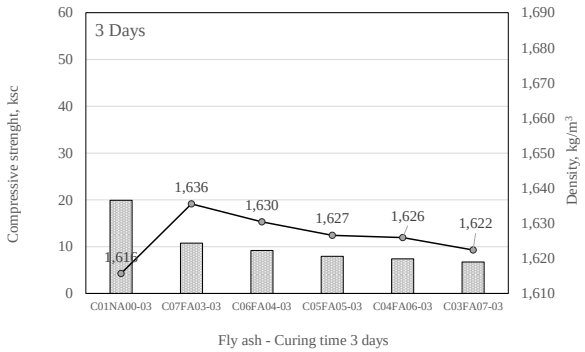


ข) เถ้าลอยชีวมวล (BA)

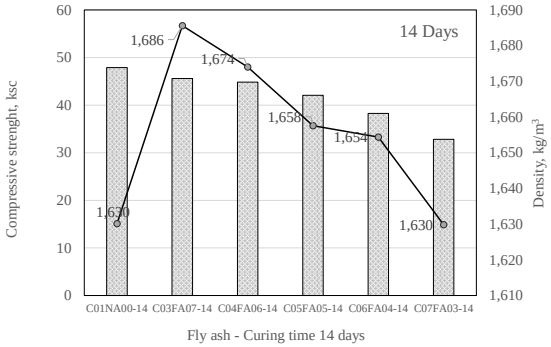


ค) เถ้าหนักถ่านหิน (BT)

รูปที่ 5 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของอิฐบล็อกประสานตามอายุการบ่มและชนิดของวัสดุผสม



ก) อายุการบ่ม 3 วัน

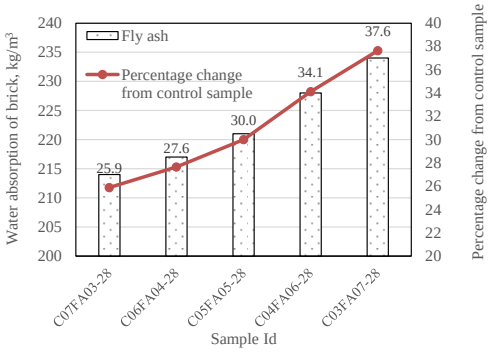


ข) อายุการบ่ม 14 วัน

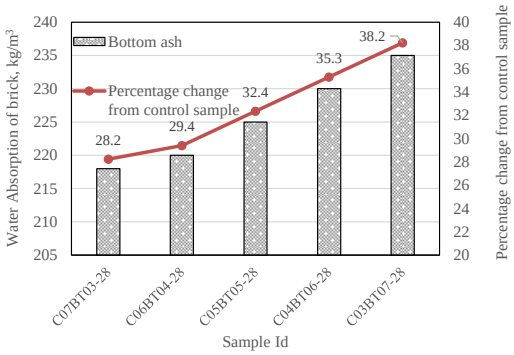
รูปที่ 6 กำลังรับแรงอัดกับหน่วยน้ำหนักอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าลอย อายุ 3 และ 14 วัน

บล็อกประสานมีความสามารถในการรับน้ำหนักดีขึ้น ดังจะเห็นได้จากการเปรียบเทียบกับเถ้าลอยที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่าและที่สัดส่วนระหว่างปูนซีเมนต์และเถ้าที่มีน้ำหนักที่เท่ากัน

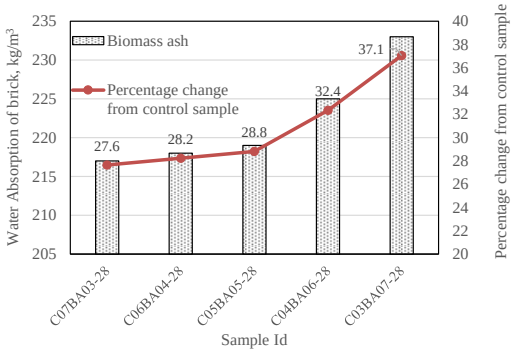
ผลการศึกษานี้สามารถนำสัดส่วนผสมนี้ไปใช้งานที่มีคุณสมบัติสอดคล้องตามมาตรฐานของอิฐบล็อกประสานชนิดไม่รับน้ำหนัก เหมาะสมสำหรับงานที่ไม่ได้รับน้ำหนักโครงสร้างโดยตรง เช่น งานวัสดุก่อผนัง หรือพัฒนาวัสดุก่อสร้างอื่น ๆ ที่ต้องการการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ จากการศึกษาพบว่าในการผสมเถ้ามีผลทำให้ลดปริมาณเนื้อดิน ส่งผลทำให้หน่วยน้ำหนักของอิฐบล็อกประสานมีค่าลดลง ให้ลดน้ำหนักในการรับน้ำหนักของโครงสร้าง สำหรับในขั้นตอนการผลิตยังสามารถลดค่าแรงงานและค่าใช้จ่ายในการขนส่ง ทั้งยังเป็นการรักษาสภาพแวดล้อม และนำของเสียจากภาคอุตสาหกรรมมาใช้ให้เกิดประโยชน์และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม



ก) เถ้าลอยถ่านหิน

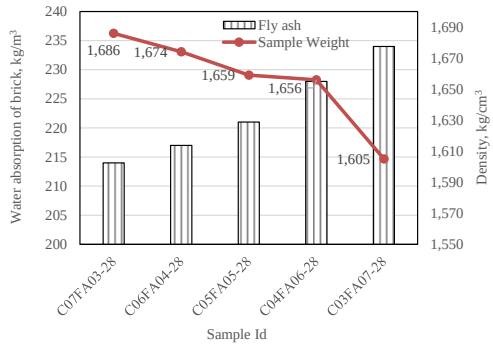


ข) เถ้าหนักถ่านหิน

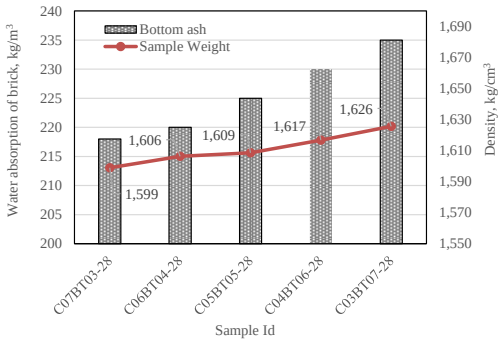


ค) เถ้าลอยชีวมวล

รูปที่ 7 การดูดกลืนน้ำของอิฐบล็อกประสานกับค่าเปอร์เซ็นต์การดูดกลืนเทียบกับตัวอย่างควบคุม



ก) เถ้าลอยถ่านหิน



ข) เถ้าหนักถ่านหิน

รูปที่ 8 การเปรียบเทียบผลทดสอบการดูดกลืนน้ำของอิฐบล็อกประสานเถ้าลอย และหน่วยน้ำหนักแห้งของตัวอย่างอายุ 28 วัน

4. สรุปผลการทดสอบ

จากผลการศึกษาการพัฒนากำลังของอิฐบล็อกประสานที่แทนที่ด้วยเถ้า สามารถสรุปได้ดังนี้

1) อิฐบล็อกประสานที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยถ่านหิน เถ้าลอยชีวมวล และเถ้าหนักถ่านหิน มีค่ากำลังรับแรงอัดแปรผกผันกับอัตราส่วนของเถ้าที่เพิ่มขึ้น และการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนเถ้าช่วยลดลงของหน่วยน้ำหนักแห้งอิฐบล็อกประสานได้

2) สัดส่วนที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดใกล้เคียงกับกำลังของตัวอย่างควบคุม สัดส่วนของปูนซีเมนต์ที่มีต่อเถ้าลอยถ่านหินที่ 0.7:0.3 โดยอัตราส่วนผสม 1:5:1 ที่อายุการบ่ม 28 วัน ได้ค่ากำลังอัดเท่ากับ 71.82 ksc ค่าการดูดกลืนน้ำ 214 kg/m^3 ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน มอก. 57-2533 บล็อกคอนกรีตชนิดรับน้ำหนัก สำหรับสัดส่วนผสมของเถ้าอื่น ๆ ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน มอก 58-2533 บล็อกคอนกรีตชนิดไม่รับน้ำหนัก

3) ผลการทดสอบร้อยละการดูดซึมของอิฐบล็อกประสาน พบว่ามีค่าร้อยละการดูดซึมที่เพิ่มขึ้น ตามสัดส่วนของเถ้าที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะเถ้าหนักถ่านหินที่มีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่าจะมีร้อยละการดูดซึมที่สูงขึ้นโดยผลทดสอบจากส่วนผสมค่าการดูดซึมของน้ำยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

4) การนำเถ้าลอย หรือเถ้าหนักจากถ่านหินหรือชีวมวลมาเป็นวัสดุประสานในงานอิฐบล็อกประสาน จากผลการทดสอบพบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าสามารถลดการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมได้ โดยมีค่ากำลังที่เหมาะสม เพียงพอตามมาตรฐานบล็อกคอนกรีตชนิดไม่รับน้ำหนัก อีกทั้งยังเป็นการลดภาระการทิ้งวัสดุที่เหลือจากการผลิตกระแสไฟฟ้ามาทำให้เกิดประโยชน์ในด้านอื่น ๆ และเป็นการส่งเสริมการประยุกต์การใช้งานวัสดุที่มีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณวัสดุประกอบในการวิจัยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ การไฟฟ้าฝ่ายผลิต อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง และโรงไฟฟ้าชีวมวล บริษัทโคเจน กรีน จังหวัดลำพูน สนับสนุนวัสดุทดสอบ ขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภาคภูมิ จารุภูมิ และกลุ่มวิจัยนวัตกรรมวัสดุ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล้านนาล้านนา ที่ได้อนุเคราะห์การถ่ายภาพ SEM ในการวิจัย และขอขอบคุณ คุณองอาจ นวลปลอด นักวิจัย สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) สำหรับข้อมูล และข้อแนะนำในการเตรียมตัวอย่าง

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Saisuthanawit S, Charoenchai N. Engineering economic value analysis of interlocking block pilot plant using Mae Moh power plant bottom ash. NUEJ. 2018;13(1): 80-98. Thai.

[2] Kamhang W, Janbanjong B. Thailand institute of scientific and technological research (online). Available: fromhttp://technologyblockprasan.com /information1_2.php/ [Accessed: 30 June 2018].

[3] Dasaesamoh A, Maha H, Chebueraheng H. Properties of interlocking block from para rubber wood fly ash mixed Narathiwat kaolin. J. Res. Unit Sci. Tech. Environ. Learning. 2014; 5(2):202-208.Thai.

[4] Saramakon S. Usage of fly ash for manufacturing interlocking block. Master Thesis. Suranaree University of Technology, Nakhonratchasima; 2013.Thai.

[5] Rukzon S, Phupa W, Ngenprom N, Chindaprasirt P. Final Report. The innovation of use bottom ash on green concrete. Rajamangala University of Technology Phra Nakhon. Bangkok; 2012. Thai.

[6] Sujjavanich S, Suwanwitaya P. Final Report. Durability of fly ash concrete. Electricity generating authority of Thailand. April. 2003. Thai.

[7] Dumrongsil S, Sujjavanich S. Effect of Cement containing binary blended bagasse ash-fly ash on physical and mechanical properties of concrete. KMUTT Research and Development Journal. 2007;30(3):489-499.Thai.

[8] Department of industrial works. Manual and criteria for processing fuel rods and concrete interlocking bricks. 1st Edition. Bangkok; CMS Engineering. 2012.Thai.

[9] Dechburum A, Chaimoon K. Properties of interlocking block containing fly ash and bottom ash. SWU Engineering Journal. 2019;14(1):99-105.Thai.

[10] Klabprasit T, Jaturapitakkul C, Chindaprasirt P, Songpiriyakij S. Fly ash and biomass ash Based geopolymer pastes Part I: Effect of mix proportion on compressive strength. Research and Development Journal. 2008;19(2):11-16. Thai.

[11] Ramjan S, Tangchirapat W, Jaturapitakkul C. Effect of finesses of fly ash and rice husk ash on compressive strength and expansion of mortar in accelerated mortar bar method. Journal of Thailand Concrete Association. 2017;5(1):1-13.Thai.

[12] TIS. 1990. Standard for hollow-bearing concrete masonry unit. TIS 57-2533. Thai Industrial Standards Institute.

[13] TIS. 1990. Standard for hollow non-load-bearing concrete masonry unit. TIS 58-2533. Thai Industrial Standards Institute.

การพัฒนาวิธีการแยกแยะรูปภาพภาษามือ โดยอาศัยวิธีการปรับระนาบภาพ
Development of Method for Categorization on Sign Language Picture using Image Plane Adjustment Technique

โชคมงคล นาดี[1] และกฤษดา ยิ่งขยัน[1 *]
[1, 2] สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
128 ถนนห้วยแก้ว อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300
Chokemongkol Nadee[1] and Krisda Yingkayun[1 *]
[1, 2] Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering , Rajamangala University of Technology Lanna
128 Huay Kaew Road, Muang, Chiang Mai, Thailand, 50300
[*]ผู้รับผิดชอบบทความ: krisda@rmutl.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 0-5392-1444 ต่อ 314

Received: 2 March 2020, Revised: 27 May 2020, Acceepted: 31 May 2020

บทคัดย่อ
การแยกแยะรูปภาพโดยส่วนใหญ่อาศัยวิธีการตัดสินอย่างใดอย่างหนึ่งหรือใช้กระบวนการหลายอย่างร่วมกัน เช่นการปรับภาพก่อนเข้าร่วมกับวิธีการของแมทชีนเลินนิ่ง เพื่อกระบวนการดึงจุดเด่นหรือน้ำหนักของภาพให้ได้ค่าที่ดีที่สุดสำหรับการตัดสินใจ ในบทความวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการแยกแยะรูปภาพภาษามือโดยวิธีการแบบหลายแมทชีนเลินนิ่ง การแยกแยะรูปภาพภาษามือที่ใช้ในงานวิจัยมีการเลือกพื้นหลังหรือสิ่งแวดล้อมในหลายรูปแบบเช่น พื้นหลังสีดำ พื้นหลังสีขาว พื้นหลังแบบมีลวดลาย โดยที่ทั้งรูปภาพแบบขาวดำและรูปภาพสี RGB โดยใช้รูปภาพของภาษามือจากฐานข้อมูลของ ASL จากการทดลองพบว่าวิธีการแบบหลายแมทชีนเลินนิ่งมีการแยกแยะรูปภาพภาษามือได้ถูกต้องถึง 98.06 เปอร์เซ็นต์
คำสำคัญ การแยกแยะรูปภาพ แมทชีนเลินนิ่ง ภาษามือ

Abstract
Most image classification is based on applying decision- making algorithms, in conjunction with image preprocessing, in order to extract distinctive features from the images and compute the most appropriate weights used in the decision making. This paper presents a method to classify sign language images by using multiple machine learning methods. The sign language images used in this work are obtained from the American Sign Language (ASL) database, which contains both black and white and color images (RGB). Experiments have shown that the multiple machine learning method is able to correctly classify sign language images with 98.06 percent accuracy.
Keyword: Classification, Machine Learning, Sign Language

1. บทนำ

ในปี ค.ศ. 2019 จำนวนประชากรของโลกมีประมาณจำนวน 7.7 พันล้านคน [1] และมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น 8.5 พันล้านคนในปี ค.ศ. 2030 และคาดการณ์ว่าจะมีเพิ่มขึ้นถึง 10.9 พันล้านคนในปี ค.ศ. 2050 โดยจำนวนของผู้พิการทางการได้ยินอยู่ประมาณ 466 ล้านคน [2] และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นประมาณ 900 ล้านในปี ค.ศ. 2050 สำหรับประเทศไทยในปี พ.ศ. 2561 มีประชากรประมาณ 66 ล้านคน [3] ซึ่งเป็นจำนวนผู้พิการทางการได้ยินประมาณ 375,680 คน [4] ผู้พิการทางการได้ยินคือผู้ที่มีความบกพร่องในการได้ยินจึงไม่สามารถเลียนแบบเสียงที่ได้ยิน หรือเปล่งเสียงพูดได้เหมือนคนปกติ ดังนั้นผู้พิการทางการได้ยินส่วนใหญ่ใช้ภาษามือในการติดต่อสื่อสารกันระหว่างผู้พิการทางการได้ยินกันเองและกับคนที่มีความสามารถในการแปลภาษามือ ซึ่งต้องมีการฝึกฝนเพราะภาษามือเป็นภาษาที่มีทั้งท่ามือ ตำแหน่งมือ การเคลื่อนไหวของมือ จึงทำให้มีความยากในการจดจำ ฉะนั้นจึง

ต้องมีระบบในการแปลภาษามือเพื่อช่วยให้สามารถสื่อสารกันได้ ภาษามือที่ผู้พิการทางการได้ยินในแต่ละประเทศใช้นั้นจะมีความแตกต่างกันเช่นเดียวกับภาษาพูด ซึ่งภาษามือของแต่ละประเทศก็ไม่เหมือนกัน แม้กระทั่งในประเทศเดียวกันแต่คนละภาคก็ยังไม่เหมือนกัน

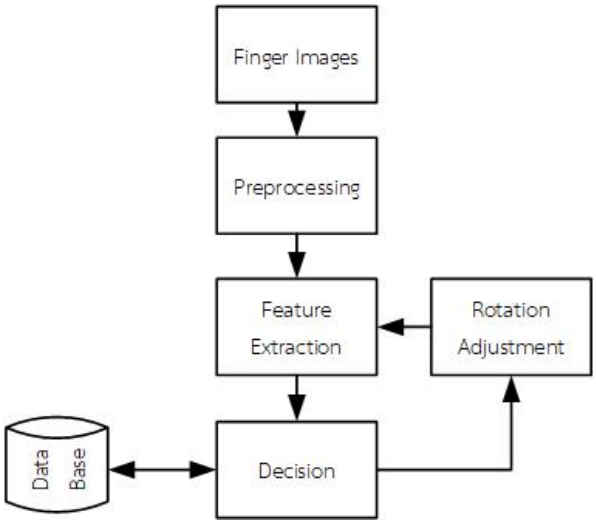
ระบบการแปลภาษามือในอดีตนั้นมีหลายเทคนิคในการแปลภาษามือโดยส่วนใหญ่แบ่งออกเป็นสองกลุ่ม 1) กลุ่มภาพจริง 2) กลุ่มกราฟฟิก ซึ่งข้อดีและข้อเสียต่างกันเพราะถ้าใช้ในส่วนของภาพจริง อาจจะมีมุมมองของภาพที่มีการบดบังของภาพสภาพแวดล้อมของแสงรวมถึงพื้นหลังทำให้การแปลภาษามือผิดพลาดได้ ซึ่งต้องมีการใช้เทคนิคในการปรับภาพก่อนเข้าเพื่อใช้ในการประมวลผล ส่วนการใช้กราฟฟิกส่วนใหญ่จะได้รูปแบบท่าทาง การเคลื่อนไหวที่ใกล้เคียงกับภาษามือที่ใช้จริง ทำให้การสื่อสารง่ายขึ้นและมีความถูกต้องแต่ยังมีความยากในส่วนของกฎในการควบคุมไวยากรณ์ ทำให้การแปลภาษามือที่ซับซ้อนอาจจะยังไม่ถูกต้องเท่าที่ควร

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการแยกแยะรูปภาพของภาษามือซึ่งเป็นกระบวนการดึงน้ำหนักของภาพโดยวิธีการของแบบหลายแมทชีนเลินนิ่ง แล้วนำค่าน้ำหนักเหล่านั้นมาทำการตัดสินใจว่าตรงกับตัวอักษรใดในภาษามือ เมื่อเปรียบเทียบข้อดีข้อด้อยของระบบนี้ พบว่าข้อดีของระบบนี้คือความถูกต้องเพิ่มมากขึ้น เพราะใช้เทคนิคหลายแมทชีนเลินนิ่ง ส่วนข้อด้อยคือความเร็วของระบบอาจจะช้าลงเพราะใช้การประมวลแบบหลายอย่างในการเวลาเดียวกัน

2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาวิธีการแยกแยะรูปภาพภาษามือ สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ 1) ระบบการอ่านท่าทางจากเซ็นเซอร์ โดยเครื่องตรวจจับพิกัดจะถูกติดตั้งที่ข้อต่อและตำแหน่งที่สำคัญของมือและนิ้วมือ เซ็นเซอร์จะทำการรวบรวมข้อมูลตำแหน่งและข้อมูลจะถูกประมวลผลเพื่อตีความสัญญาณ วิธีการเหล่านี้อาจให้ตำแหน่งที่ถูกต้อง แต่อาจมีข้อจำกัดบางประการ ตามลักษณะของผู้ใช้งาน [5-7] และ 2) ระบบการอ่านท่าทางจากกล้องหรือการมองเห็น ซึ่งแบ่งเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ 1) เป็นกลุ่มที่อาศัยมือเปล่าในการวิเคราะห์ [8-10] โดยแยกออกเป็นกลุ่มที่ใช้หน้ามือและหลังมือ 2) เป็นกลุ่มที่อาศัยการสวมถุงมือ [11-12] ระบบการแปลภาษามืออัตโนมัติส่วนใหญ่ใช้การแยกแยะรูปแบบของท่าทางโดยอาศัยวิธีการแมทชีนเลินนิ่งในหลาย ๆ เทคนิค เช่น Canonical correlation analysis (CCA), Convolutional neural network (CNN) และอีกหลายเทคนิค เป็นต้น

วิธีการปรับปรุงระบบอัตโนมัติในการแปลภาษามือ ในงานวิจัยนี้ได้คำนึงถึงปัญหาที่เกิดขึ้นจากการวิจัยที่ผ่านมาสรุปปัญหาได้ 3 รูปแบบหลัก คือ 1) ผลกระทบและการเปลี่ยนแปลงของแสงต่อภาพมือ 2) ผลกระทบและการเปลี่ยนแปลงท่าทางและการหมุนของภาพมือ 3) ผลการกระทบการเปลี่ยนแปลงของภาพมือที่เกิดจากการสูญเสียจากการวิเคราะห์ภาพโดยใช้เทคนิคหลายแมทชีนเลินนิ่ง ผลของการวิเคราะห์จากระบบจะได้เป็นค่าน้ำหนักของตัวอักษรและตัวเลข จากลักษณะของน้ำหนักของภาพแต่ละภาพในชุดของตัวอักษรเดียวกัน ลักษณะของน้ำหนักจะคล้ายกัน เพื่อบ่งชี้ว่าข้อมูลลักษณะที่ถอดออกมาจากภาพตรงกับข้อมูลลักษณะภาพมือในฐานข้อมูล จากปัญหาข้างต้นงานวิจัยนี้จึงได้รวมวิธีการวิเคราะห์ลักษณะโดยรวมของภาพมือ และได้เพิ่มวิธีการตรวจวัดลักษณะของการเอียงของภาพมือเพื่อแก้ส่วนของปัญหาที่เกิดขึ้นในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะของภาพมือที่มีแนวเอียงเกิดขึ้น และวิธีการวิเคราะห์ส่วนประกอบหลัก ซึ่งการวิเคราะห์ทั้งสองจะทำการวิเคราะห์องค์ประกอบที่สัมพันธ์กันคือ ภาพมือจะถูกวิเคราะห์ลักษณะการเอียงของภาพมือ ถ้ามีการเอียงของภาพมือแล้วจะส่งภาพที่ได้นั้นเข้าสู่ระบบปรับภาพเพื่อหาระนาบที่ถูกต้องในการปรับภาพ จากนั้นเมื่อผ่านระบบในการปรับภาพแล้ว ภาพที่ถูกปรับแล้วนั้นจะถูกทำการวิเคราะห์โดยวิธีการวิเคราะห์ส่วนขององค์ประกอบหลัก จากโครงสร้างของระบบการแปลภาษามือ อธิบายรายละเอียดดังต่อไปนี้ ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนภาพระบบแปลภาษามือ

2.1 ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง

การประมวลผลภาพกับรูปร่างและโครงร่างของภาพ (Morphological image processing) การประมวลผลภาพกับรูปร่างและโครงร่างของภาพ คือ กระบวนการประมวลผลภาพโดยการเปลี่ยนแปลงลักษณะรูปร่างหรือโครงสร้างของภาพ โอเปอเรชั่นพื้นฐานโดยทั่วไปได้แก่ การขยายภาพ

(Dilation) การย่อภาพ (Erosion) และ การหาโครงสร้างหลักของภาพ (Skeleton) โดยการขยายภาพ คือ การขยายภาพโดยมีสัดส่วนเท่ากันทั่วทั้งภาพ (Uniform) การย่อภาพคือการย่อภาพ ส่วนการทำ การหาโครงสร้างของภาพเป็นกระบวนการหาโครงสร้างหลักของวัตถุ โดยจะกล่าวรายละเอียดต่อไปตามหัวข้อ นอกจากนั้นยังมีวิธีการใช้โอเปอเรชั่นอื่นๆ นี้ได้แก่การ Opening และ Closing เป็นต้น

2.1.1 *แมทชีนเลินนิ่ง*

ลักษณะการเรียนรู้โดยวิธีการของแมทชีนเลินนิ่งสามารถแบ่งออกได้เป็นสามกลุ่มดังนี้

1) การเรียนรู้แบบมีผู้สอน (Supervised learning)

2) การเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอน (Unsupervised learning)

3) การเรียนรู้แบบการเสริมแรงใจ (Reinforcement learning)

มนุษย์มีความสามารถในการเรียนรู้จำสิ่งต่าง ๆ จำแนกได้เป็นหลายลักษณะการเรียนรู้ เช่นการเรียนรู้โดยมีผู้สอน การเรียนรู้จากประสบการณ์ ด้วยตนเอง เป็นต้น ผลลัพธ์จากการเรียนรู้ก็คือ พฤติกรรมที่เปลี่ยนไป ความรู้ที่ได้ถูกนำไปประกอบการตัดสินใจในการปฏิบัติต่อปัญหาต่าง ๆ ที่พบการเรียนรู้เป็นสิ่งที่มนุษย์รับรู้ถึงสิ่งต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นรอบ ๆ ตัว โดยผ่านกระบวนการของการรับความรู้ ซึ่งสภาวะแวดล้อมต่างเป็นตัวกระตุ้นให้มนุษย์มีการตอบสนองทางพฤติกรรมต่าง ๆ ความรู้ของมนุษย์ถูกจัดเก็บไว้เป็นความจำและสามารถเรียกกลับมาใช้ใหม่ได้ นักจิตวิทยาได้ศึกษาถึงการจดจำของมนุษย์ และพบว่า มนุษย์มีการเรียนรู้เป็นแบบไม่มีความสัมพันธ์ (Non-associative learning) และการเรียนรู้แบบมีความสัมพันธ์ (Associative learning) และความจำของมนุษย์ แบ่งออกได้เป็น ความจำระยะสั้น (Short-term memory: STM) และ ความจำระยะยาว (Long-termmemory: LTM) สำหรับโครงข่ายประสาทเทียมซึ่งเป็นการจำลองสมองมนุษย์ จะต้องมีการเรียนรู้เช่นกัน การเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมจำแนกออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ 1) การเรียนรู้แบบมีผู้สอน (Supervised learning) 2) การเรียนรู้ แบบไม่มีผู้สอน (Unsupervised learning) และ 3) การเรียนรู้แบบการเสริมแรงใจ (Reinforcement learning)

2.1.2 SVM (Support vector machine)

SVM เป็นอัลกอริทึมในการคัดแยกที่มีการนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางในด้านการประมวลผลเป็นภาพดิจิตอล หลักการของ SVM คือการให้อินพุทที่ใช้ฝึกเป็นเวคเตอร์ในสเปซ N มิติ เช่นถ้าในกรณีของ 2 มิติ และ 3 มิติ จะเป็นจุดที่อยู่ในระนาบ xy และสเปซ xyz ตามลำดับ จากนั้นทำการสร้างไฮเปอร์เพลน (Hyperplane) ที่จะแยกกลุ่มของเวคเตอร์อินพุทออกเป็นประเภทต่างๆ ในกรณีที่เป็น 2 มิติ และ 3 มิติ ไฮเปอร์เพลนคือเส้นตรงและระนาบตามลำดับ ข้อเด่นของ SVM จะทำการเก็บแมพ (Map) เวคเตอร์ ในสเปซอินพุทให้เข้าสู่ Feature Space โดยใช้ฟังก์ชั่นหรือเรียกว่าเคอร์นัล (Kernel) ชนิดต่าง ๆ เช่น โพลีโนเมียล (Polynomial) เรเดียล (Radial) เป็นต้น ใน Feature Space ดังกล่าวเวคเตอร์อินพุทสามารถแยกประเภทได้โดยไฮเปอร์เพลน [5]

2.1.3 ต้นไม้ตัดสินใจ (Decision tree)

ต้นไม้ตัดสินใจเป็นเทคนิคที่ช่วยในการตัดสินใจโดยใช้วิธีการโครงสร้างของกราฟที่มีรูปร่างเหมือนกับต้นไม้ ทำให้สามารถแปลความหมายเข้าใจง่ายมากขึ้นเพื่อใช้ในการแยกแยะทั้งแบบสองทาง (Binary) และปัญหาแบบหลายคลาส (Multiple classes) [13]

2.1.4 การวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติค

การวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติคแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ (1) การวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติคทวิ ใช้กับตัวแปรเกณฑ์ที่แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มย่อย เช่น 1) กลุ่มที่ปรากฏเหตุการณ์ที่สนใจ มีค่าเป็น 1 กับกลุ่มที่ไม่ปรากฏเหตุการณ์ที่สนใจ มีค่าเป็น 0 และ 2) การวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติคพหุกลุ่ม ใช้กับตัวแปรเกณฑ์ที่มีหลายกลุ่มย่อยหรือมีมากกว่า 2 กลุ่มย่อย เช่น ขนาดสถานศึกษาแบ่งเป็นกลุ่มขนาดใหญ่/กลาง/เล็ก หรือโรงพยาบาลมีมาตรฐานการให้บริการสูง/ปานกลาง/ต่ำการวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติค ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทำนายกับตัวแปรเกณฑ์จึงไม่เป็นความ สัมพันธ์เชิงเส้นในการวิเคราะห์จะต้องมีการปรับให้ความสัมพันธ์อยู่ในรูปเชิงเส้น ในรูปของ odds และในการเขียนโมเดลโลจิสติค จะต้องเขียนให้อยู่ในรูป log ของ odds เรียกว่า logit [14]

2.1.5 โครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neuron Network : ANN) เป็นศาสตร์แขนงหนึ่งของทางด้านปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence : AI) มีรูปแบบโครงสร้างและการทำงานของการประมวลผลเหมือนกับสมองของสิ่งมีชีวิตซึ่งมีปรับเปลี่ยนตัวเองต่อการตอบสนองของอินพุตตามกฎของการเรียนรู้ (Learning rule) หลังจากที่โครงข่ายได้เรียนรู้สิ่งที่ต้องการแล้ว โครงข่ายนั้นจะสามารถทำงานที่กำหนดไว้ได้ โครงข่ายประสาทเทียมได้ถูกพัฒนาคิดค้นจากการทำงานของสมองมนุษย์โดยสมองมนุษย์ประกอบไปด้วยหน่วยประมวลผลเรียกว่า นิวรอน (เซลล์ประสาท หรือ Neuron) จำนวนนิวรอลในสมองมนุษย์มีอยู่ประมาณและมีการเชื่อมต่อกันอย่างมากมาย สมองมนุษย์จึงสามารถกล่าวได้ว่าเป็นคอมพิวเตอร์ที่

มีการปรับตัวเอง (Adaptive) ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear) และทำงานแบบขนาน (Parallel) ในการดูแลจัดการการทำงานร่วมกันของนิวรอนในสมอง การคำนวณเชิงนิวรอลเป็นการคำนวณที่เลียนแบบมาจากการทำงานของสมองมนุษย์นั่นเอง [15]

2.1.6 KNN (K-Nearest neighbor)

เป็นวิธีการในการจัดแบ่งคลาส โดยเทคนิคแบบนี้จะตัดสินใจว่า คลาสใดสามารถแทนเงื่อนไขหรือมีกรณีใหม่ ๆ อย่างไรบ้าง โดยตรวจสอบจำนวนบางจำนวนในขั้นตอน KNN ของกรณีหรือเงื่อนไขที่เหมือนกันหรือใกล้เคียงกันมากที่สุด โดยจะหาผลรวม (Summary or count up) ของจำนวนเงื่อนไข หรือกรณีต่าง ๆ สำหรับแต่ละคลาส และกำหนดเงื่อนไขใหม่ ๆ ให้คลาสที่เหมือนกันกับคลาสที่ใกล้เคียงกันมากที่สุด

2.2 วิธีการดำเนินการวิจัย

ในการทดลองแบ่งออกเป็นขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 รับภาพอินพุต

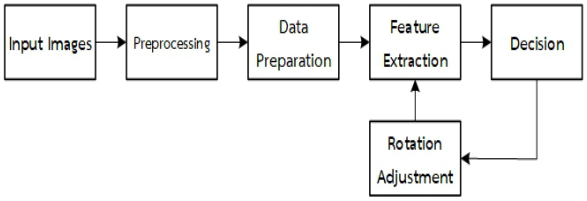
ขั้นตอนที่ 2 ทำการปรับภาพก่อนเข้า เนื่องจากการรับภาพมาวิเคราะห์มีอยู่ 2 กลุ่มคือกลุ่มภาพขาวดำ และกลุ่มภาพสีแบบ RGB จึงต้องทำการแยกระดับของสี ถ้าในอยู่ในรูปแบบของภาพขาวดำต้องทำเป็นภาพเทา 256 ระดับส่วนภาพสีเลือกระดับแม่สี RGB 256 ระดับเพื่อใช้ในการแยกข้อมูล

ขั้นตอนที่ 3 การเตรียมข้อมูล (Data preparation) เมื่อได้ชุดภาพภาษามือแล้ว ทำการกำหนด Labels ของชุดภาพภาษามือของแต่ละตัวอักษรโดยกำหนดชุดข้อมูลในการเรียนรู้อยู่ที่ 100 ภาพต่อตัวอักษร และชุดของการทดสอบอีกอย่างละ 72 ภาพตามสภาพแวดล้อมต่าง ๆ เช่น 1.พื้นหลังสีดำ 2.พื้นหลังสีขาว 3.พื้นหลังแบบมีลวดลาย 4. ภาพสีแบบ RGB

ขั้นตอนที่ 4 การหาค่าตัวถ่วงน้ำหนักโดยวิธีการของแมทชีนเลินนิ่งแต่ละแบบนั้นจะต้องหาตัวถ่วงน้ำหนักเพื่อหาการเคลื่อนที่ของชุดข้อมูลว่าไปในทิศทางใด ถ้าค่า cost function ออกมามีค่าน้อยเกินไปก็ต้องกลับไปเข้าสู่วิธีการเรียนรู้หลายรอบ เพื่อปรับค่าให้ได้ค่าตัวถ่วงน้ำหนักที่ดีที่สุดในการนำไปใช้งาน

ขั้นตอนที่ 5 การตัดสินใจ (Decision) ขั้นตอนนี้จะเป็นการเปรียบเทียบข้อมูลที่นำมาทดสอบกับชุดข้อมูลที่ทำการเรียนรู้แล้ว จึงได้ผลลัพธ์จากแมทชีนเลินนิ่งหลาย ๆ แบบส่วนที่มีการผิดพลาดจากการตัดสินใจ

ขั้นตอนที่ 6 การปรับระนาบของภาพของมือใหม่ในกรณีที่มีความผิดพลาดอยู่จึงนำภาพที่ผิดพลาดมาหาจุดซ้ายขวาของขอบมือเพื่อหามุมในการปรับระนาบของภาพใหม่ จากนั้นนำภาพที่ปรับมุมใหม่เข้าสู่ขั้นตอนที่ 4 เพื่อทำการตัดสินใจอีกครั้งขั้นตอนการทำงานของระบบแสดงดังรูปที่ 2



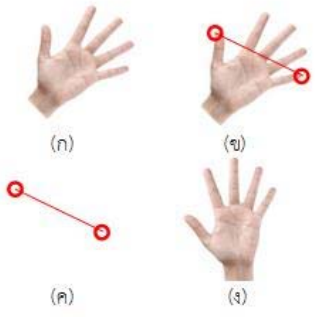
รูปที่ 2 ขั้นตอนการทำงานของระบบแปลภาษามือ

2.2.1 การรับภาพอินพุท (Input images)

ในการรับภาพที่ใช้เป็นอินพุทจะทำการอ่านไฟล์ภาพเข้ามาด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปโดยไฟล์ภาพที่อ่านเข้ามาเป็นภาพสีขนาด 105x122 จุดภาพ โดยมีตัวอักษรภาษาอังกฤษทั้งหมด 24 ตัวโดยเลือกรูปภาพตัวอักษรมาอย่างละ 100 ภาพสำหรับการเรียนรู้โดยแบ่งเป็นกลุ่มที่มีสีพื้นหลังแบบสีเดียว และกลุ่มที่มีพื้นหลังมีลวดลายโดยจะส่งผ่านเป็นภาพอินพุทให้กับวิธีการวิเคราะห์หาจุดเด่นและกระบวนการเทียบน้ำหนักจากระบบแมทชีนเลินนิ่ง

2.2.2 การวิเคราะห์ส่วนเอียงของรูป

กระบวนการในการนำภาพมือเพื่อใช้ในการทดลองอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงของท่าทางของมือได้ ทำให้ข้อมูลที่ใช้วิธีการวิเคราะห์แบบจับคู่แม่แบบ และกระบวนการเทียบน้ำหนักจากระบบแมทชีนเลินนิ่งแล้วนั้นอาจเกิดความผิดพลาดได้ จึงต้องมีส่วนของการวิเคราะห์การเอียงโดยวิเคราะห์ด้วยวิธีการของราดอนทรานฟอร์ม แล้วนำไปหาจุดอ้างอิงจากกรอบของรูปมือเพื่อหาระนาบของมุมที่ถูกต้องเพื่อใช้ในการตัดสินและการปรับมุมให้ถูกต้องเพื่อนำภาพที่ได้ไปวิเคราะห์ได้อย่างถูกต้องดังแสดงแนวคิดการปรับแก้ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 วิธีการในการปรับภาพ

2.2.3 การวิเคราะห์ภาพ

ในขั้นตอนของการวิเคราะห์ส่วนประกอบหลักนั้น เป็นขั้นตอนต่อจากการวิเคราะห์หาการเอียงของภาพมือ โดยเมื่อการปรับภาพให้อยู่ในระนาบตรงแล้วนั้น ภาพที่ได้จะถูกส่งผ่านมาวิเคราะห์หาค่าน้ำหนักของตัวอักษร ซึ่งสาเหตุที่ใช้การวิเคราะห์การหาน้ำหนักของตัวอักษรนี้ เนื่องจากเป็นวิธีการที่เร็วและสามารถลดขนาดของข้อมูลลงได้มาก โดยที่ยังสามารถอธิบายลักษณะทั้งหมดของภาพตัวอักษรที่คล้ายกันได้อย่างชัดเจนโดยที่ภาพอินพุทจะถูกนำมาหาความแตกต่างจากภาพเฉลี่ยซึ่งถือว่าเป็นภาพที่แสดงลักษณะของแต่ละตัวอักษรแล้ว นำมาค่าที่หาได้นำไปทำการแยกแยะต่อไป

2.2.4 การแยกแยะและการตัดสินใจ

ในขั้นตอนนี้การตัดสินใจเพื่อพิจารณาว่าเวกเตอร์น้ำหนักที่ใช้แทนภาพตัวอักษร จะอยู่ในขอบเขตการตัดสินใจของการแยกแยะ โดยใช้การวัดจากน้ำหนักโดยแบ่งเป็นช่วงของการยอมรับโดยที่ค่าตัดสินใจน้อยกว่า ค่าตัดสินใจที่เกิดจากการประมาณค่าโดยใช้เส้นโค้งของความผิดพลาดที่ตำแหน่งความผิดพลาดร้อยละ 1 จากกราฟ False Acceptance Error และช่วงที่ไม่แน่ใจอยู่ระหว่างค่าตัดสินใจแรก และค่าตัดสินใจที่ False Acceptance Error มีค่าเท่ากับ False Rejection Error ซึ่งข้อมูลที่อยู่ในช่วงของความไม่แน่ใจนี้ จะนำไปทำการแยกแยะโดยการจับคู่แบบรูป (Template matching) อีกครั้ง โดยที่แบบรูปที่นำมาใช้ ได้มาจากการคำนวณเวกเตอร์น้ำหนักของแต่ละตัวอักษรจากชุดภาพที่นำมาใช้สร้างฐานข้อมูล เมื่อผ่านกระบวนการจับคู่แบบรูปเพื่อแยกแยะตัวอักษรอีกครั้งแล้ว จะทำให้การตัดสินใจมีความถูกต้องเพิ่มมากยิ่งขึ้น

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

การทดลองในงานวิจัยนี้ได้ใช้รูปภาพภาษามือโดยแบ่งออกเป็น 24 ตัวอักษรในภาษาอังกฤษเว้นตัว j กับตัว z เพราะมีความใกล้เคียงกันกับตัวอักษรอื่น โดยใช้องค์ประกอบด้วยภาพระดับ สีแดง สีเขียว สีน้ำเงิน 256 ระดับ และภาพที่ใช้สำหรับการสอนให้ระบบการแปลภาษามือที่ใช้สำหรับแมทชีนเลินนิ่งโดยแบ่งออกเป็น ตัวอักษรภาษาอังกฤษ 24 ตัว มีขนาดภาพ 106x119 จุดภาพ โดยให้แต่ละตัวอักษรมี 100 ภาพ ต่อหนึ่งตัวอักษร การทดลองเริ่มด้วยการนำภาพอินพุทที่เป็นภาพ มาทำการสอนโดยวิธีการแมทชีนเลินนิ่ง หลายแบบโดยใช้วิธีการ 1. KNN 2. SVM 3. Neural Network 4. การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น 5. การวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติค จากนั้นนำภาพมาคำนวณหาเวกเตอร์น้ำหนักด้วยกระบวนการของแมทชีนเลินนิ่งในสภาพแวดล้อมแบบต่าง ๆ จากนั้นทำการทดสอบในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ กันเช่นการเปลี่ยนแปลงของแสงสว่าง ท่าทาง ขนาด ภาพที่ที่มีการเอียงและภาพที่มีการบดบังเป็นบางส่วนซึ่งเปรียบการสูญหายของภาพภาษามือ โดยนำส่วนที่ตัดสินใจผิดพลาดกลับปรับระนาบที่ถูกต้องใหม่แล้วกลับไปเข้าสู่กระบวนการของแมทชีนเลินนิ่งใหม่ บนความเปลี่ยนแปลงของข้อมูลที่แตกต่างกันคือ ภาพที่ถูกกำหนดให้เห็นลักษณะของภาพภาษามือชัดเจนจากชุดภาพที่ใช้สอน และชุดภาพภาษามือที่ใช้ทดสอบ ภาพที่มีการบดบัง โดยรายละเอียดเงื่อนไขของระบบแยกแยะที่ใช้ทดสอบแสดงดังต่อไปนี้

จากการออกแบบการทดลอง ได้กำหนดรูปภาพของมือจากฐานข้อมูลของ ASL จำนวน 24 ตัวอักษร โดยมีท่าทางในแบบต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4 เพื่อใช้ในการเรียนรู้ ส่วนรูปที่ 5 เป็นภาพของมือที่นำมาทดสอบโดยมีการเปลี่ยนแปลงของพื้นหลังหรือสภาพแวดล้อมแบบต่าง ๆ เช่น รูปที่ 5 (ก) เป็นภาพมือที่มีพื้นหลังหลากหลายเช่น พื้นหลังสีขาว พื้นหลังสีดำ พื้นหลังที่มีลวดลาย รูปที่ 5 (ข) เป็นรูปภาพภาษามือที่มีการดึงเฉพาะมือออกมาเป็นแบบขาวดำในพื้นหลังสีขาว ส่วนรูปที่ 5 (ค) เป็นรูปภาพภาษามือที่มีการดึงเฉพาะมือออกมาในรูปแบบภาพสีระดับเทา ในพื้นหลังสีขาว และรูปที่ 5 (ง) เป็นรูปของภาษามือที่มีการบดบังของภาพหรือการสูญเสียข้อมูล

ตารางที่ 1 แสดงรายละเอียดของระบบที่ใช้ทดสอบ

Micro-computer	Processor	Intel corei7
	Memory	12GB
Database Input	Finger images ASL database	106x119



รูปที่ 4 ตัวอย่างภาพภาษามือที่ระบบใช้นำมาใช้การเรียนรู้



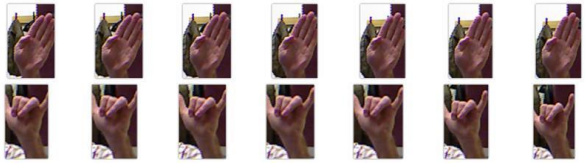
ก) รูปภาพภาษามือที่มีพื้นหลังแบบต่าง ๆ [16]



ข) รูปภาพภาษามือที่มีดึงเฉพาะส่วนของมือแบบขาว-ดำ [16]



ค) รูปภาพภาษามือที่มีดึงเฉพาะส่วนของมือแบบระดับเทา [16]



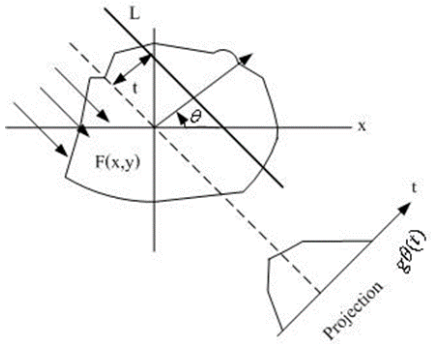
ง) รูปภาพภาษามือที่มีการบดบังหรือสูญหาย [16]

รูปที่ 5 ตัวอย่างภาพภาษามือที่นำมาใช้ทดสอบ

3.1 การปรับระนาบของภาพ

3.1.1 การวิเคราะห์ส่วนของระนาบภาพโดยอาศัยวิธีการของราดอนทรานฟอร์ม

การหาส่วนของระนาบของภาพวิธีการแรกนั้น อาศัยหลักการของราดอนทรานฟอร์ม เพราะวิธีการของราดอนทรานฟอร์มนั้นมีข้อดีในการหาการเอียงของภาพได้รวดเร็ว โดยสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 หลักการของราดอนทรานฟอร์ม

จากปัญหาเบื้องต้นของการวางตัวของภาพใน 1 มิติ มุมของภาพที่ได้นั้นสามารถที่จะสร้างใหม่ให้อยู่ในรูปของ 2 มิติได้ สิ่งที่ต้องพิจารณานั้นต้องมองจากลักษณะการวางตัวของภาพ โดยอาศัยหลักการจากสมการของราดอน ดังแสดงไว้ในสมการที่ 1

$$\Re\{I\}(d,\phi) = \int_{-\infty}^{\infty} I(d\cos\phi - \sin\phi + s\cos\phi)ds \qquad (1)$$

d = ระยะในแกน x จากจุด Origin

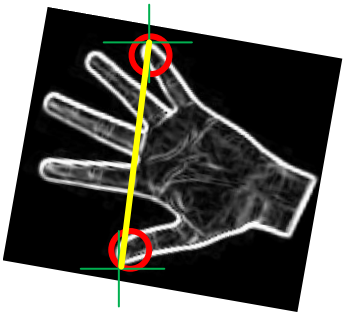
s = ระยะในแกน y จากจุด Origin

ϕ = มุม

I = ขนาดของกรอบหาได้จากตัวแปร d และ s

3.1.2 การหามุมของ (Reference point)

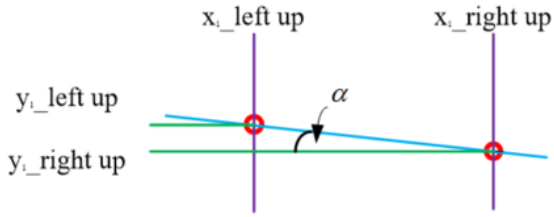
การหาขอบล่างสุดและขอบบนสุดของภาพมือเพื่อหาระนาบโดยวิธีการหาขอบแบบ Candy Edge จากนั้นจะได้ยอดที่สูงที่สุด และยอดที่ต่ำสุดของภาพดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ลักษณะการหาขอบบนและขอบล่างของภาพมือ

เป็นการนำเอาจุดอ้างอิงนำมาใช้งานโดยจะกำหนดได้ดังนี้ x1 _left up, y1 _left up คือจุดที่อยู่ตรงขอบด้านบนหรือขอบด้านล่างซ้าย และ x1_right up, y1_right up คือจุดที่อยู่ตรงขอบด้านบนหรือขอบด้านล่างทางด้านขวา ดังระยะในรูปที่ 7 เพื่อนำมาหาค่ามุม และนำค่าที่ได้ไปทำการปรับมุมต่อไปโดยหาได้จากสมการที่ 2

$$\text{Angle}=\arctan\left(\frac{x_1_\text{left up} - x_1_\text{right up}}{\text{abs}(y_1_\text{left up}) - y_1_\text{right up}}\right) \quad (2)$$



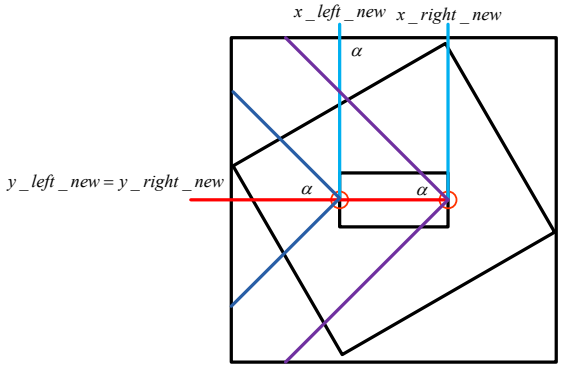
รูปที่ 8 การหาส่วนของจุดอ้างอิงที่ใช้ในการปรับภาพ

จากรูปที่ 8 เป็นภาพของการหาจุดอ้างอิง x1 _left up, y1 _left up และ x1_right up, y1_right up เมื่อได้ 2 จุด ข้างต้นแล้วใช้วิธีการจากสมการที่ 2 เพื่อหามุมอัลฟา เพื่อใช้ในการปรับระนาบในวิธีการต่อไป

3.1.3 ผลที่ได้จากมุม (Result degree)

เมื่อได้มุมจากสมการที่ 2 โดยการหาค่าเฉลี่ยของมุม แล้วนำมุมนั้นมาทำการหาค่าขององศาที่ถูกต้องเพราะค่าของมุมที่ได้จากสมการแรกนั้นจะได้มุมที่เป็นเรเดียนต้องนำกลับมาทำเป็นมุมที่เป็นองศาโดยใช้สมการที่ 3

*Angle(degree) = Angle(radian) * (180/Pi)* (3)



รูปที่ 9 ภาพการหมุนกลับมาอยู่ในมุมที่ถูกต้อง

จากรูปที่ 9 แสดงการหมุนกลับของภาพมาอยู่ในระนาบมุมที่ถูกต้องโดยอาศัยวิธีการของราดอนทรานฟอร์มอาศัยการแบ่งส่วนของภาพออกเป็นส่วนย่อย ซึ่งแบ่งโดยใช้จุด 2 x1 _left up, y1 _left up และ x1_right up, y1_right up เพื่อใช้อ้างอิงการแบ่งส่วนของรูปมือ โดยเมื่อได้มุมอัลฟ่าแล้วซึ่งเป็นมุมเรเดียนจากสมการที่ 2 แล้วต้องหาค่ามุมที่เป็นองศาโดยเปลี่ยนได้จากสมาการที่ 3 จากนั้นเมื่อได้ค่ามุมองศาที่ถูกต้องแล้วจึงนำมุมที่ได้ป้อนค่าให้กับโปรแกรมเพื่อนำมุมไปปรับระนาบของรูปภาพ

3.1.4 การวิเคราะห์ขั้นตอนวิธี k-Nearest neighbors

กำหนดให้ชุดข้อมูลประกอบไปด้วยกลุ่มของรูปภาพภาษามือจำนวน 24 ตัวอักษร (A-Y ยกเว้นตัว J และ Z) โดยเมื่อต้องการทราบประเภทของข้อมูลที่นำมาทดสอบทำได้ดังนี้

ขั้นที่ 1 กำหนดค่า k ซึ่งหมายถึงจำนวนตัวอย่างที่ใกล้เคียงที่สุด k ตัว โดยจะมีตั้งแต่ 1 จนถึงจำนวนตัวอย่างทั้งหมดในปริภูมิ

ขั้นที่ 2 กำหนดวิธีการวัดความใกล้เคียงหรือความเหมือน (Similarity) ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะวัดจากค่าผกผันของระยะทาง (Distance) ระหว่างตัวอย่าง ระยะที่นิยมมากที่สุด คือ ระยะแบบยูคลิด (Euclidean distance) ระยะทางแบบยูคลิดจากจุด P = (p1,p2,...,PN) ไปยังจุด q= (q1,q2,...,qN) ในปริภูมิ N มิติ หาได้จากสมการที่ 4

$$d(p,q) = \sqrt{\sum_{i=1}^{N}(p_i - q_i)^2} \quad (4)$$

ขั้นที่ 3 นับจำนวนตัวอย่างที่ใกล้เคียงที่สุด k ตัวโดยหากจำนวนตัวอย่างประเภทใดมีมากที่สุดใน k ตัวให้กำหนดประเภทของตัวอย่างที่ต้องการทราบประเภทเป็นประเภทเดียวกับตัวอย่างประเภทที่มีมากที่สุดนั้น ซึ่งความแตกต่างกันไปตามค่า k ที่กำหนด

3.1.5 SVM (Support vector machine)

ข้อดีของการใช้วิธีการแบบ SVM คือสามารถรองรับข้อมูลที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้นได้ โดยอาศัยฟังก์ชันของเคอร์เนล (Kernel) ในการลดความซับซ้อนของข้อมูลโดยการส่ง (Mapping) ไปยังปริภูมิพิเศษที่มีความเป็นเชิงเส้น

3.1.6 ขั้นตอนการถดถอยโลจิสติก

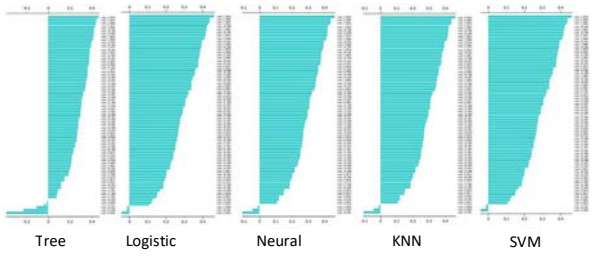
การถดถอยโลจิสติก (Logistic regression) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับการพยากรณ์ความน่าจะเป็นของการเกิดเหตุการณ์ที่สนใจจากชุดตัวแปรอิสระ หรือตัวแปรตามที่มีการวัดแบบกลุ่ม (Categorical dependent variables) ส่วนใหญ่ใช้โมเดลทางคณิตศาสตร์ดังสมการที่ 5

$$g(x) = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \ldots + \beta_k X \quad (5)$$

g = ความน่าจะเป็นหรือ โอกาสที่จะเกิดเหตุการณ์
β = ส่วนตัดแกน Y (intercept)
β_k = ค่าคงที่ หรือ ความชัน (slope) ของเส้นตรง แสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของ Y เมื่อ X_k เปลี่ยนไป 1 หน่วย
X = ค่าตัวแปรอิสระ

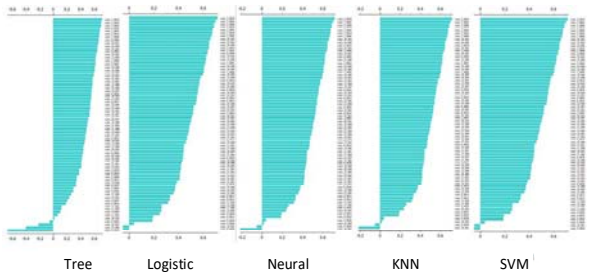
3.17 ขั้นตอนการโครงข่ายประสาทเทียม

เมื่อผ่านขั้นตอนการตัดตัวเลขและตัวอักษร ส่วนรู้ของระบบการแปลภาษามือหรือการระบุตัวอักษรของภาษามือ ซึ่งขั้นตอนการระบุตัวอักษร โดยที่เครือข่ายใยประสาทที่สร้างนี้เป็นแบบ ReLu (Rectified Linear Unit) ซึ่งเป็นฟังก์ชั่นเส้นตรงที่ถูกปรับแก้ เพื่อนำการใช้งานเครือข่ายใยประสาทให้สามารถจดจำตัวอักษรภาษาอังกฤษ A-Y ยกเว้นตัว (I,Z) ได้นั้นจะต้องทำการ สอน(train) ให้กับเครือข่ายใยประสาทก่อนนำไปใช้งาน โดยได้ช้าภาพตัวอักษรอย่างละ 100 ภาพแล้วนำภาพทั้งหมดมาหาค่า Central Moment และ Sum ค่าออกไปจากจุด Central Moment ตามแนวรัศมี ซึ่งจะได้ค่าเฉพาะออกมาแต่ละภาพทั้งหมดจำนวน 24 ค่า จากนั้นก็นำค่า 24 ค่าของแต่ ละรูปภาพ (ภาพ A-Y อย่างละ 100 ภาพ) นี้ ส่งเข้าไป สอน (Train) ให้กับเครือข่ายใยประสาทได้จดจำเพื่อใช้เป็น ตัวอ้างอิงในการเปรียบเทียบภาพภาษามือที่จะรับเข้ามาว่าเป็นตัวอักษรใด



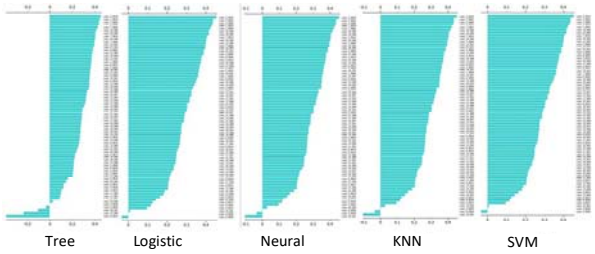
รูปที่ 10 ผลการทดลองโดยใช้ระยะทางแบบยุคลิด

จากรูปที่ 10 แสดงผลการทดลองของการใช้แมทชีนเลินนิ่งแบบหลายแมทชีนเลินนิ่ง ใช้รูปแบบระยะทางแบบยุคลิด โดยผลการทดลองสามารถแยกแยะภาพภาษามือโดยได้ผลลัทธ์ จากการใช้วิธีการของทรีผลลัพธ์เท่ากับ 93.05% วิธีการของ KNN ผลลัพธ์เท่ากับ 94.44% วิธีการของโครงข่ายใยประสาท ผลลัพธ์เท่ากับ 94.44 % วิธีการของ SVM ผลลัพธ์เท่ากับ 95.53% และ วิธีการของ Logistic ผลลัพธ์เท่ากับ 95.83% โดยรวมประมาณ 94.72%



รูปที่ 11 ผลการทดลองโดยใช้วิธีแบบโคไซน์

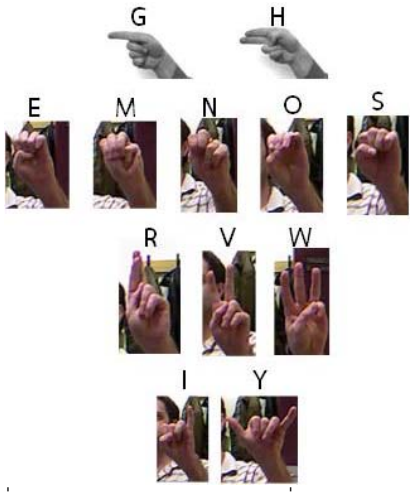
จากรูปที่ 11 แสดงผลการทดลองของการใช้แมทชีนเลินนิ่งแบบหลายแมทชีนเลินนิ่งใช้วิธีแบบโคไซน์ โดยผลการทดลองสามารถแยกแยะภาพภาษามือโดยได้ผลลัทธ์ จากการใช้วิธีการของทรี ผลลัพธ์เท่ากับ 94.44% วิธีการของ KNN ผลลัพธ์เท่ากับ 97.22% วิธีการของโครงข่ายใยปราสาท ผลลัพธ์เท่ากับ 97.22 % วิธีการของ SVM ผลลัพธ์เท่ากับ 97.22% และ วิธีการของ Logistic ผลลัพธ์เท่ากับ 97.22% โดยรวมประมาณ 96.66%



รูปที่ 12 ผลการทดลองโดยใช้วิธีการของแมนฮัตตัน

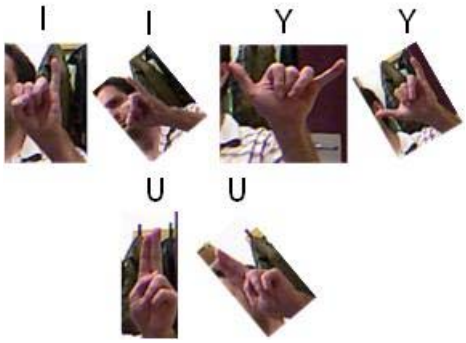
จากรูปที่ 12 แสดงผลการทดลองของการใช้แมทชีนเลินนิ่งแบบหลายแมทชีนเลินนิ่ง ใช้วิธีการของแมนฮัตตัน โดยผลการทดลองสามารถแยกแยะภาพภาษามือโดยได้ผลลัทธ์ จากการใช้วิธีการของทรีผลลัพธ์เท่ากับ 94.44% วิธีการของ KNN ผลลัพธ์เท่ากับ 95.83% วิธีการของโครงข่ายใยปราสาท ผลลัพธ์เท่ากับ 95.83 % วิธีการของ SVM ผลลัพธ์เท่ากับ 97.22% และ วิธีการของ Logistic ผลลัพธ์เท่ากับ 97.22% โดยรวมประมาณ 96.11%

จากการทดลองผลลัพธ์ที่ได้จากการแยกแยะทำให้สามารถทราบในส่วนของความถูกต้อง โดยรวมของระบบประมาณ 95.83% โดยผลของการผิดพลาดอยู่ประมาณ 4.17% จากการวิเคราะห์ทำให้ทราบว่าความผิดพลาดของระบบเกิดจากสามสาเหตุหลัก ๆ คือ 1.ความคล้ายกันของภาพภาษามือดังรูปที่ 13



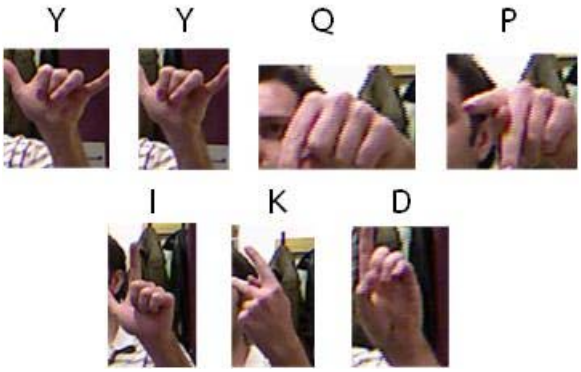
รูปที่ 13 สัญลักษณ์ของภาษามือที่มีความคล้ายกัน

สาเหตุหลักอย่างที่ 2 ความผิดพลาดเกิดขึ้นจากการเคลื่อนตัวของภาพมือดังตัวอย่างรูปที่ 14



รูปที่ 14 ภาพของภาษามือที่มีการเคลื่อนตัว

สาเหตุหลักอย่างที่ 3 ความผิดพลาดเกิดขึ้นจากการสูญเสียของภาพมือดังตัวอย่างรูปที่ 15



รูปที่ 15 ภาพของภาษามือที่มีการสูญเสีย

จากการทดลองใช้ ตัวอักษร 24 ตัวอักษรสีขาวดำ อย่างละ 100 ภาพต่อตัวและตัวอักษรสี 24 ตัว อย่างละ 100 ภาพต่อตัวอักษรรวมทั้งหมด รวมทั้งหมด 4,800 ภาพในการทดลองเพื่อใช้ในการเรียนรู้ โดยแบ่งเป็นชุดของภาพขาวดำและสีเพื่อให้รวดเร็วในการแยกแยะ จากการทดลองโดยดึงผลระยะทางแบบยุคลิดได้ 94.72% การทดลองแบบใช้วิธีแบบโคไซน์ได้ 96.66% และ การทดลองแบบได้ 96.11% ระบบโดยรวมที่ใช้วิธีการแยกแยะได้ถูกต้องโดยรวม 95.83% จึงนำมาวิเคราะห์หาสาเหตุการผิดพลาดของระบบจากที่ได้กล่าวมานั้นกระบวนการเคลื่อนไหว สามารถปรับแก้โดยวิธีการหาระนาบใหม่แล้วนำภาพกลับไปสู่กระบวนการตัดสินใจอีกครั้ง ส่วนสาเหตุการมีความคล้ายกันของรูปภาพนั้น ใช้วิธีการเพิ่มรูปแบบความคล้ายกันของภาพมือให้มากขึ้น เพื่อหาความค่าน้ำหนักในการตัดสินใจใหม่ ส่วนสาเหตุสูญเสียหายของภาพนั้นยังต้องหาวิธีการต่อไปในการเพิ่มความถูกต้อง ในการทดลองสามารถเพิ่มความถูกต้องเพิ่มขึ้นได้อีก 2.23% จากการนำภาพมาทำหาระนาบใหม่แล้วทำการเข้าสู่กระบวนการดึงลักษณะหรือน้ำหนักของภาพ และเข้าสู่กระบวนการตัดสินใจอีกครั้ง จึงทำให้ระบบโดยรวมมีความถูกต้องอยู่ที่ 98.06 %

4. บทสรุป

งานวิจัยฉบับนี้ได้นำเสนอการเพิ่มประสิทธิภาพในระบบการแปลภาษามือ โดยการใช้ภาพภาษามือภาษาอังกฤษด้วยการเพิ่มส่วนของการปรับการเอียงของภาพภาษามือ ร่วมกับการวิเคราะห์โดยแมทชีนเลินนิ่งแบบหลายแมทชีนเลินนิ่ง โดยระบบที่นำเสนอนี้ได้ตั้งสมมติฐานที่ว่า ภาพภาษามือเป็นลักษณะข้อมูลคุณลักษณะภาพที่มีเป็นเอกลักษณ์ทางตัวอักษร ซึ่งระบบที่ได้นำเสนอประกอบกับการปรับการเอียงของภาพภาษามือและการวิเคราะภาพโดยใช้แมทชีนเลินนิ่ง ซึ่งถ้านำเอาข้อมูลที่ผิดพลาดกลับมาหมุนภาพใหม่ แล้วส่งข้อมูลไปวิเคราะห์โดยวิธีการของแมทชีนเลินนิ่งอีกครั้ง โดยหากมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะท่าทางไปมากกว่าขอบเขตที่สามารถแยกแยะได้ จะทำให้ระบบสับสนได้ ยิ่งถ้าใช้การแบบวัดระยะทางด้วยน้ำหนักตัวอักษรด้วยแล้ว จะทำให้ผลการแยกแยะคลาดเคลื่อนเนื่องจากลักษณะข้อมูล ที่คล้ายคลึงกัน จึงได้ใช้วิธีการปรับภาพเอียงของภาพภาษามือเข้ามาช่วยปรับภาพภาษามือของข้อมูลให้มีลักษณะของระนาบให้ถูกต้องเพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์โดยรวม โดยสรุปการแยกแยะสามารถทำได้อยู่ที่ 98.06% ของความถูกต้องโดยการรวมแมทชีนเลินนิ่งแบบหลายวิธีร่วมกับการปรับระนาบภาพใหม่เพื่อใช้ในการตัดสินใจอีกครั้ง ทำให้การแยกแยะตัวอักษรภาพภาษามือได้ประสิทธิภาพดีขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาที่ได้ให้สถานที่และทุนในการทำงานวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

[1] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2019). World Population Prospects 2019: Highlights (ST/ESA/SER.A/423).

[2] United Nations, Multi-country assessment of national capacity to provide hearing care, WHO Report Hearing Care: (NLM classification: WV 270)

[3] Demographic Statistics Report Population and Housing, National Statistical Office. Available from: http:// http://statbbi.nso.go.th/

[4] Report of the situation of the disabled in Thailand. Available from: http://www.dep.go.th

[5] Gałka, Jakub, et al. "Inertial motion sensing glove for sign language gesture acquisition and recognition," *IEEE Sensors Journal* 16.16 (2016): pp.6310-6316.

[6] Javed, Shahrukh. “Wireless Glove for Hand Gesture Acknowledgment: Sign Language to Discourse Change Framework in Territorial Dialect,” *ICRA 2018* (2018).

[7] Saleh, Neven, et al.“Smart glove-based gestures recognition system for Arabic sign language,” *Innovative Trends in Computer Engineering (ITCE)*, International Conference on (2020).

[8] Rokade, Rajeshree S, Dharmpal D. Dye. "Spelled sign word recognition using key frame." *IET Image Processing* , 9.5 (2014): pp 381-388.

[9] Kshirsagar, Ketki P. "Key Frame Selection for One-Two Hand Gesture Recognition with HMM." International Journal of Advanced Computer Research 5.19 (2015): pp. 192.

[10] Hosain, Al Amin, et al. "FineHand: Learning Hand Shapes for American Sign Language Recognition." arXiv preprint arXiv:2003.08753 (2020).

[11] Tubaiz, Noor, Tamer Shanableh, Khaled Assaleh. "Glove-based continuous Arabic sign language recognition in user- dependent mode." *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 45.4 (2015): pp.526-533.

[12] Jiang, Shuo, et al. "Stretchable E-Skin Patch for Gesture Recognition on the Back of the Hand." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* (2019).

[13] Sanguansat, P. (2019). Artificial Intelligence with Machine Learning, Nonthaburi : IDC Premier.

[14] Miroslav Kubat. (2015). An Introduction to Machine Learning. Coral Gables: Springer.

[15] Srikaew, A. (2009). Computational intelligence. Teaching documents Department of Electrical Engineering Suranaree University of Technology.

[16] Life Print. American Sign Language. Available from:https://www.lifeprint.com/asl101/ fingerspelling/fingerspelling.htm/ [Accessed 6th April 2020].

การศึกษาคุณสมบัติของวงจรช่องแคบในท่อนำคลื่นด้วยวัสดุแผ่นวงจรพิมพ์

The Study of Characteristics of the Waveguide Iris by using Printed Circuit Board

พินิจ เนื่องภิรมย์[1 *] กิจจา ไชยทนุ[1] นัฐพงษ์ สิทธิกัน[2] ธนวัฒน์ ปันห้าง[2] และสมศักดิ์ อรรคทิมากูล[3]

[1] สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
128 ถนนห้วยแก้ว อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300

[2] สาขาครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
128 ถนนห้วยแก้ว อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300

[3] ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
1518 ถนนประชาราษฎร์1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

Pinit Nuangpirom[1 *] Kitchar Chaitanu[1] Nuttapong Sidtigun[2], Thanawat Panhang[2] and Somsak Akatimagool[3]

[1] Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna, 128 Huay Kaew Road, Muang, Chiang Mai, Thailand, 50300

[2] Department of Technical Education and Technology, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna, 128 Huay Kaew Road, Muang, Chiang Mai, Thailand, 50300

[3] Department of Teacher Training in Electrical Engineering, Faculty of Technical Education, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, 1518 Pracharat 1 Road,Wongsawang, Bangsue, Bangkok 10800

[*]ผู้รับผิดชอบบทความ: elecpnt@rmutl.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 0-8955-52266

Received: 18 May 2020, Revised: 28 May 2020, Accepted: 31 May 2020

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างวงจรช่องแคบในท่อนำคลื่นที่มีโครงสร้างตามมาตรฐาน WR340 (86mm x 43mm x 182mm) ที่มีการป้อนสัญญาณในท่อนำคลื่นด้วยสายอากาศแบบโมโนโพลที่เชื่อมต่อสัญญาณด้วยขั้วต่อแบบ SMA วงจรช่องแคบที่นำเสนอออกแบบบนวัสดุประเภทแผ่นวงจรพิมพ์ ชนิด FR4 ที่มีค่า ε_r เท่ากับ 4.4 ผลการวิจัยพบว่า 1) กรณีวงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำที่สร้างด้วยวัสดุแผ่นวงจรพิมพ์ ให้ผลการตอบสนองต่อความถี่ในลักษณะของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน ที่ความถี่ตัดเท่ากับ 2.44 GHz ที่ขนาด d/a เท่ากับ 0.67 2) กรณีวงจรช่องแคบตัวเก็บประจุ ที่มีขนาด d/b เท่ากับ 0.075 พบว่าให้ผลการตอบสนองต่อความถี่ในลักษณะของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ที่ความถี่ตัด 2.30 GHz และ 3) กรณีวงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำขนานตัวเก็บประจุ พบว่าให้ผลการตอบสนองต่อความถี่ในลักษณะวงจรกรองความถี่แถบผ่านในช่วงความถี่ 2.26 GHz ถึง 2.50 GHz ที่ขนาด d/a เท่ากับ 0.72และ d/b เท่ากับ 0.11 โดยภาพรวมพบว่าผลการทำงานของวงจรที่นำเสนอเป็นไปตามหลักการทางทฤษฎีและสอดคล้องกันกับที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรมจำลอง

คำสำคัญ วงจรช่องแคบ ท่อนำคลื่น แผ่นวงจรพิมพ์

Abstract

In this paper, the Iris circuit in the rectangular waveguide are designed and implemented. The dimension of rectangular waveguide is designed at WR340 standard (86mm x 43mm x 182mm). The signal in waveguide is fed by monopole antenna that connect to SMA (Subminiature version A) connector. The Iris circuits are designed on print circuit board, FR4 substrate with ε_r = 4.4. The results of the research showed that 1) the inductive Iris circuit acts as a high pass filter with 2.44 GHz of cutoff frequency at d/a = 0.67, 2) the capacitive Iris circuit acts as a low pass filter with 2.30 GHz of cutoff frequency at d/b = 0.075 and 3) the parallel of the inductive iris circuit and the capacitive iris circuit act as a band pass filter, supporting responses in range of 2.26-2.50 GHz of

operating frequency. The results are consistent with the theoretical methods as well as commercial simulation program.

Keywords: Iris circuits, Waveguide, Printed Circuit Board

1. บทนำ

ท่อนำคลื่นเป็นสายส่งชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญในระบบสื่อสาร โดยเฉพาะการสื่อสารที่มีการส่งสัญญาณกำลังสูง มีต้องการการสูญเสียน้อย อย่างเช่นระบบสื่อสารดาวเทียมที่มีการรับ-ส่งสัญญาณจากสถานีส่งบนพื้นโลก ไปยังดาวเทียมที่มีการโคจร อยู่บนวงโคจรค้างฟ้า [1] การประยุกต์ใช้งานท่อนำคลื่นนอกเหนือจากการใช้งานในลักษณะของสายส่งสัญญาณ ยังสามารถพัฒนาในรูปแบบของวงจรสายอากาศ [2] ที่ให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในลักษณะของทิศทาง และประยุกต์ใช้ในรูปแบบของวงจรกรองความถี่ในท่อนำคลื่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ [3]-[5].

วงจรกรองความถี่ คือวงจรที่ยอมให้สัญญาณในช่วงที่ต้องการผ่านไปได้ แบ่งออกเป็น 4 ชนิด ได้แก่วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน วงจรกรองความถี่สูงผ่าน วงจรกรองความถี่แถบผ่าน และวงจรกรองความถี่แถบหยุด [6] การออกแบบและสร้างวงจรกรองความถี่ในท่อนำคลื่น มีการพัฒนาไปอย่างหลากหลาย เช่นการออกแบบวงจรกรองความถี่ที่ใช้ทฤษฎีการประมาณค่า แล้วนำค่าที่ได้ไปจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมจำลอง และสร้างเป็นของจริงเพื่อทดสอบต่อไป [7] กระบวนการพัฒนาวงจรกรองความถี่ในท่อนำคลื่น มีขั้นตอนการสร้างที่ต้องอาศัยความแม่นยำ และต้องใช้เครื่องมือที่มีราคาสูง เช่น การตัดและสร้างลวดลายบนแท่งอลูมิเนียมด้วยเทคโนโลยีของเลเซอร์ จึงส่งผลให้เกิดกระบวนการที่มีขั้นตอนซับซ้อน และต้นทุนที่สูงต่อการออกแบบและการพัฒนาเป็นชิ้นงาน

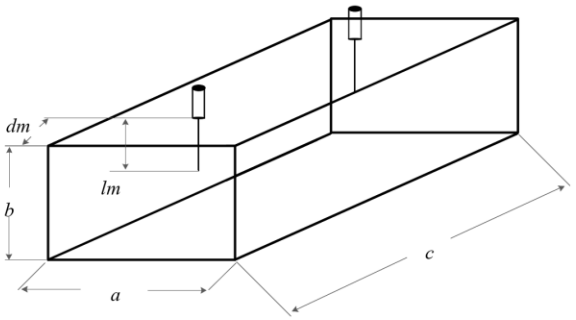
ดังนั้นในบทความวิจัยนี้ จึงนำเสนอการประยุกต์ใช้วัสดุประเภทแผ่นวงจรพิมพ์ที่มีราคาถูก และสามารถสร้างวงจรได้ง่ายด้วยวิธีการที่หลากหลาย สำหรับการประยุกต์ใช้เป็นวงจรช่องแคบในท่อนำคลื่น และเพิ่มเป็นทางเลือกสำหรับประยุกต์ใช้กับวงจรไมโครเวฟอื่นๆได้อย่างหลากหลาย

2. การดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยสำหรับการศึกษาวัสดุประเภทแผ่นวงจรพิมพ์ที่มีผลต่อการทำงานในท่อนำคลื่น ในรูปแบบของวงจรเสมือนตัวเหนี่ยว และตัวเก็บประจุ เพื่อวิเคราะห์ผลการตอบสนองต่อความถี่ของวงจรที่ได้ มีการดำเนินการดังนี้

2.1 โครงสร้างท่อนำคลื่น

การออกแบบและสร้างท่อนำคลื่นสำหรับประยุกต์ใช้เป็นสายส่งสัญญาณและรับการป้อนพลังงานจากแหล่งจ่ายเพื่อให้คลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางกระทบกับวงจรช่องแคบที่นำเสนอด้วยแผ่นวงจรพิมพ์ในงานวิจัยนี้ กำหนดช่วงความถี่ตามมาตรฐานท่อนำคลื่น WR340 ย่านความถี่ 1.736 GHz ถึง 3.417 GHz ซึ่งกำหนดขนาดความกว้าง (a) เท่ากับ 86 mm ความสูง (b) เท่ากับ 43 mm แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 โครงสร้างท่อนำคลื่น

การออกแบบเพื่อหาความยาวของท่อนำคลื่นใช้วิธีการคำนวณตามค่าความยาวคลื่นของท่อนำคลื่น(λ_g)ที่กำหนดความถี่ทดสอบ $f_0 = 2.4GHz$ มีรายละเอียดการคำนวณดังนี้

$$\lambda_g = \lambda_0 / \sqrt{1-(\lambda_0 / \lambda_C)^2} \quad (1)$$

เมื่อ $\lambda_o = c / f_0$ = 125mm (2)

และ $\lambda_C = 2 / \sqrt{(m/a)^2 + (n/b)^2}$ = 172 mm (3)

แทนค่าตัวแปร λ_0 และ λ_C ลงในสมการที่ (1) จะได้

$$\lambda_g = 0.125 / \sqrt{1-(0.125/0.172)^2} = 182mm \quad (4)$$

เมื่อ λ_0 คือ ความยาวคลื่นที่ความถี่หลัก

λ_C คือ ความยาวคลื่นในโมด TE_{10}

f_0 คือ ความถี่ตัดในโมดพื้นฐาน กำหนดที่ 2.4GHz

m,n คือ ตัวเลขแสดงค่าของโมด TE_{10} กำหนด $m=1$ และ $n=0$

c คือค่าความเร็วของแสง มีค่าเท่ากับ 3×10^8 m/s

a คือ ความกว้างของท่อนำคลื่น

b คือ ความสูงของท่อนำคลื่น

ดังนั้น ค่าความยาวของท่อนำคลื่น

$$c = \lambda_g = 182mm \quad (5)$$

2.2 สายอากาศโมโนโพล

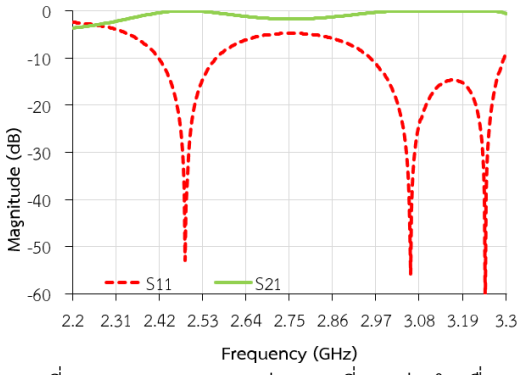
สายอากาศโมโนโพลออกแบบให้เชื่อมต่อร่วมกับขั้วต่อแบบ SMA เพื่อรับพลังงานจากจุดป้อนสัญญาณ เกิดการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศภายในสายส่งสัญญาณที่เป็นท่อนำคลื่น เพื่อให้เกิดการเดินทางของคลื่นไปกระทบตัวกลางที่เป็นวงจรช่องแคบสำหรับวิเคราะห์ผลการตอบสนองต่อความถี่ของวงจรนั้นๆ การคำนวณหาความยาวของสายอากาศโมโพล (l_m) ดังสมการที่ (6)

$$l_m = \frac{\lambda_0}{4} = \frac{125}{4} = 31.25\ mm \qquad (6)$$

ตำแหน่งการวางสายอากาศในท่อนำคลื่น (d_m) คำนวณได้ดังนี้

$$d_m = \frac{\lambda_g}{4} = \frac{182mm}{4} = 45.5\ mm \qquad (7)$$

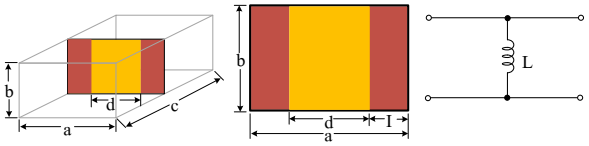
นำค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดที่ออกแบบได้ ไปจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมจำลองเชิงพาณิชย์ที่ช่วงความถี่ 2.2 GHz ถึง 3.3 GHz เพื่อวิเคราะห์ผลการตอบสนองต่อความถี่ ผลที่ได้พบว่าท่อนำคลื่นมีความถี่ตัดในการทำงานที่ ความถี่ 2.28 GHz ถึง แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ผลการตอบสนองต่อความถี่ของท่อนำคลื่น

2.3 วงจรช่องแคบ

วงจรช่องแคบหรือไอริส (Iris) มีลักษณะเป็นแผ่นโลหะบาง ๆ ขนาดความหนาน้อยกว่าค่าความยาวคลื่นที่ใช้งานมาก ๆ วางขวางที่ผนังด้านในของท่อนำคลื่น การวางตัวของไอริสมีหลายรูปแบบ ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน และรูปแบบการวาง แต่ที่นิยมในปัจจุบันมากที่สุดได้แก่ การวางแผ่นโลหะติดที่ผนังด้านข้างของท่อนำคลื่น ในลักษณะขนานกับสนามไฟฟ้า (E) ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านและเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็ก โดยวงจรสมมูลทางไฟฟ้าเปรียบเทียบได้เป็นวงจรตัวเหนี่ยวนำต่อแบบขนานนั่นเอง แสดงดังรูปที่ 3 [6]



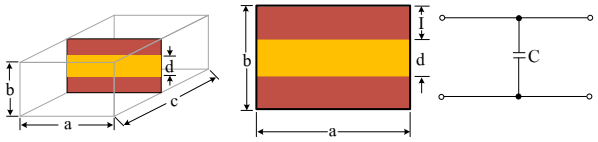
ก) มุมมองโดยรวม ข) ภาคตัดขวาง ค) วงจรสมมูล

รูปที่ 3 วงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำ

สมการสำหรับหาค่า Inductive Reactance [6] ที่อาศัยความสัมพันธ์ของความกว้างไดอิเล็กตริก (d) ต่อค่าความกว้างของท่อนำคลื่น (a) จากรูปที่ 3 ข) เขียนได้ดังนี้

$$X_L = Z_0 \frac{2a}{\lambda_g}\left(\frac{\pi d}{2a}\right)^4\left[1+12\left(\frac{a}{\lambda}\right)^2\left(\frac{\pi d}{2a}\right)^4\right] \qquad (8)$$

รูปที่ 4 แสดงวงจรช่องแคบ ที่มีลักษณะการวางตัวนำในแนวขนานกับความกว้าง (a) ส่งผลให้เกิดวงจรสมมูลทางไฟฟ้าในลักษณะของตัวเก็บประจุ



ก) มุมมองโดยรวม ข) ภาคตัดขวาง ค)วงจรสมมูล

รูปที่ 4 วงจรช่องแคบตัวเก็บประจุ

สมการสำหรับหาค่า Capacitive Susceptance เขียนได้ดังนี้

$$B_C = Y_0 \frac{4b}{\lambda_g}\left\{\begin{array}{l}\ln\left(\csc\frac{\pi d}{2b}\right)+\frac{Q_2\cos^4\frac{\pi d}{2b}}{1+Q_2\sin^4\frac{\pi d}{2b}}+ \\ \frac{1}{16}\left(\frac{b}{\lambda_g}\right)^2\left(1-3\sin^2\frac{\pi d}{2b}\right)^2\cos^4\frac{\pi d}{2b}\end{array}\right\} \qquad (9)$$

เมื่อ

$$Q_n = \frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{2b}{n\lambda_g}\right)^2}}-1$$

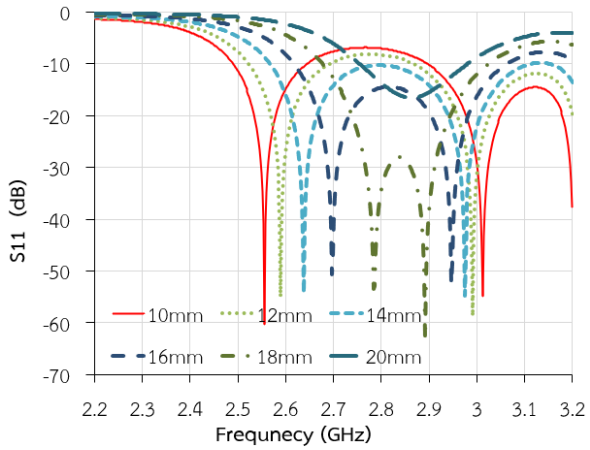
$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1-\left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}}$$

$$\lambda = \frac{c}{f\sqrt{\mu_r\varepsilon_r}}$$

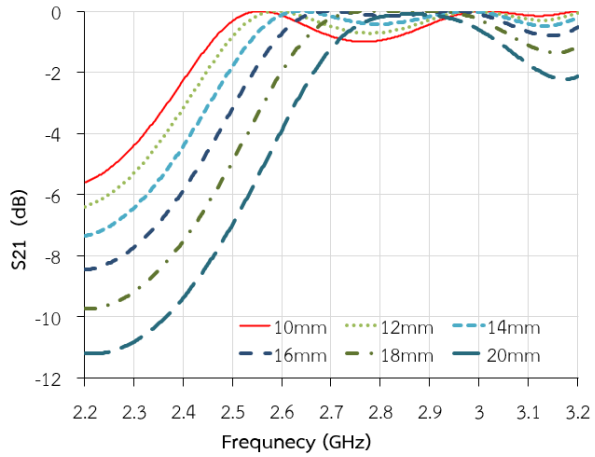
2.4 วงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำ

การศึกษาคุณสมบัติวงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำบนวัสดุประเภทแผ่นวงจรพิมพ์ชนิด FR4 ที่มีความหนาเท่ากับ

1.6mm มีโครงสร้างดังรูปที่ 3 โดยกำหนดขนาดกว้างตัวนำ (a) เท่ากับ 86 mm ความสูงของตัวนำ (b) เท่ากับ 43 mm



รูปที่ 5 ค่า S11 ของวงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำ



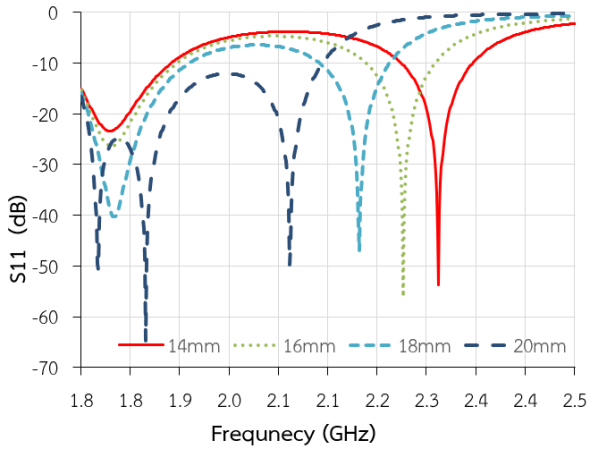
รูปที่ 6 ค่า S21 ของวงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำ

และค่าความกว้างของวัสดุซับเสตรท (d) ใช้การปรับเปลี่ยนค่าตั้งแต่ 10 mm ถึง 20 mm ผลที่ได้จากการจำลองการทำงานแสดงดังรูปที่ 5 และรูปที่ 6

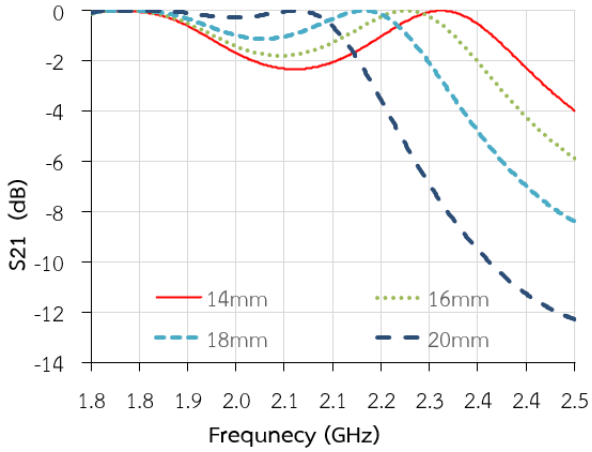
รูปที่ 5 แสดงสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S11) ของวงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำ ที่มีการกำหนดค่าความกว้างของพื้นที่ตัวนำต่อข้าง (l) ตั้งแต่ 10 mm ถึง 20 mm โดยเพิ่มขนาดครั้งละ 2 mm ผลการจำลองพบว่าค่าความถี่ตัดของวงจรตัวเหนี่ยวนำมีการแปรผันตรงกับค่าความกว้างของแถบตัวนำ (l) ที่มีการเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกันกับสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S21) ดังแสดงในรูปที่ 6 ที่ค่าความถี่ตัดมีการเพิ่มขึ้นตามค่าของความกว้างแถบตัวนำ (l)

2.5 วงจรช่องแคบตัวเก็บประจุ

วงจรช่องแคบตัวเก็บประจุ แสดงดังรูปที่ 4 ที่มีการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมเชิงพาณิชย์ ที่ช่วงความถี่ตั้งแต่ 1.75 GHz ถึง 2.5 GHz กำหนดขนาดความกว้างของแถบตัวนำ (l) ตั้งแต่ 14 mm ถึง 20 mm โดยเพิ่มค่าขึ้นครั้งละ 2 mm ผลการจำลองพบว่าขนาดความกว้างของแถบตัวนำ (l) ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความถี่ตัดของลดลงในลักษณะของการแปรผกผัน แสดงผลดังรูปที่ 7 และ 8



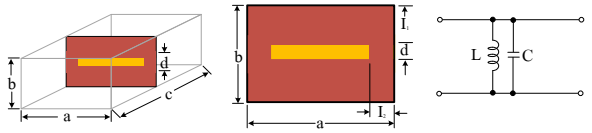
รูปที่ 7 ค่า S11 ของวงจรช่องแคบตัวเก็บประจุ



รูปที่ 8 ค่า S21 ของวงจรช่องแคบตัวเก็บประจุ

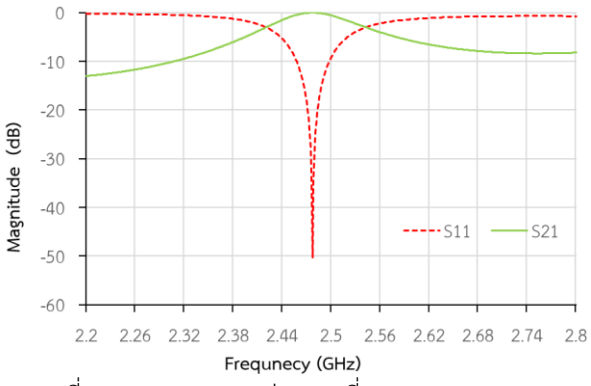
2.6 วงจรช่องแคบตัวเก็บประจุขนานตัวเหนี่ยวนำ

วงจรช่องแคบตัวเก็บประจุขนานตัวเหนี่ยวนำมีโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 9 เป็นการประยุกต์ใช้หลักการของวงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำและวงจรช่องแคบตัวเก็บประจุวางในลักษณะของการขนานกัน โดยกำหนดขนาดความกว้างของตัวนำ l_1 เท่ากับ 12mm และความกว้างของตัวนำ l_2 เท่ากับ 20 mm ผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมจำลองเชิงพาณิชย์พบว่าวงจรให้ผลการตอบสนองในลักษณะของวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน ในช่วงความถี่ 2.42 GHz ถึง 2.55 GHz ซึ่งเป็นไปตามหลักการทางทฤษฎีของรูปแบบการวางวงจรช่องแคบดังกล่าว [6] แสดงดังรูปที่ 10



(ก) มุมมองโดยรวม (ข) ภาคตัดขวาง (ค) วงจรสมมูล

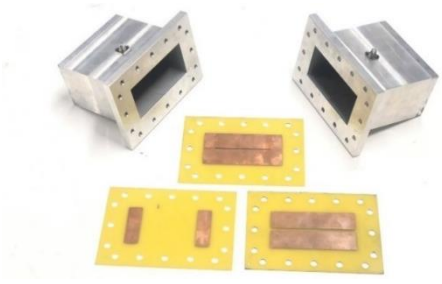
รูปที่ 9 วงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำขนานตัวเก็บประจุ



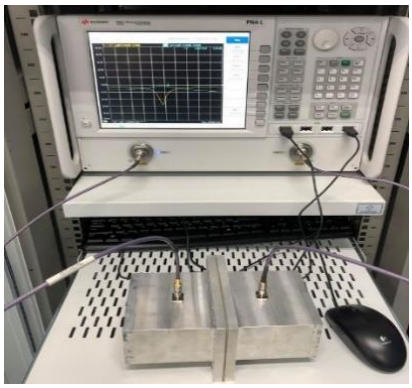
รูปที่ 10 การตอบสนองต่อความถี่ของวงจร LC ขนาน

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

การศึกษาคุณสมบัติของวงจรช่องแคบในท่อนำคลื่นด้วยโดยการประยุกต์ใช้วัสดุแผ่นวงจรพิมพ์ (PCB) เพื่อเพิ่มทางเลือกในการพัฒนาวงจรไมโครเวฟในท่อนำคลื่น ให้มีวิธีการที่หลากหลายมากยิ่งขึ้น และสะดวกต่อการออกแบบใช้ต้นทุนต่ำและง่ายต่อการผลิต ผลการดำเนิน ผู้วิจัยได้ออกแบบและสร้างท่อนำคลื่น ตามมาตรฐาน WR340 ที่มีขนาดความกว้าง (a) เท่ากับ 86 mm ความสูง (b) เท่ากับ 43 mm และความยาว (c) เท่ากับ 182 mm (พิจารณารูปที่ 1) โดยใช้วัสดุแบบดั้งเดิม (อลูมิเนียม) เพื่อใช้เป็นท่อนำคลื่นสำหรับทดสอบวงจรช่องแคบ (Iris) ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ (แสดงดังรูปที่ 11) การป้อนสัญญาณทดสอบด้วยสายอากาศโมโนโพล ที่ความถี่เรโซแนนซ์เท่ากับ 2.4GHz มีขนาดความยาวของสายอากาศเท่ากับ 31.25 mm เชื่อมต่อสัญญาณด้วยขั้วต่อแบบ SMA วงจรช่องแคบที่นำเสนอมีทั้งหมด 3 วงจร ได้แก่ วงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำ วงจรช่องแคบตัวเก็บประจุ และวงจรช่องแคบตัวเก็บประจุขนานตัวเหนี่ยวนำ ออกแบบและหาค่าที่ดีที่สุดด้วยโปรแกรมจำลองเชิงพาณิชย์ สร้างบนวัสดุประเภทแผ่นวงจรพิมพ์ชนิด FR4 ที่มีค่าความหนาของวัสดุฐานรองเท่ากับ 1.6 mm และมีค่า ε_r เท่ากับ 4.4 จากนั้นทำการวัดและวิเคราะห์สัญญาณด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายเวกเตอร์ดังแสดงในรูปที่12 เปรียบเทียบผลที่ได้กับการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมจำลองเชิงพาณิชย์ ผลการดำเนินการที่ได้ มีรายละเอียดดังนี้

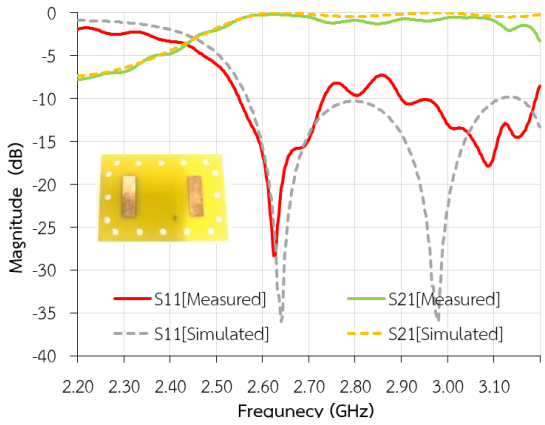


รูปที่ 11 วงจรช่องแคบที่ทดสอบในท่อนำคลื่น



รูปที่ 12 วงจรช่องแคบที่ทดสอบในท่อนำคลื่น

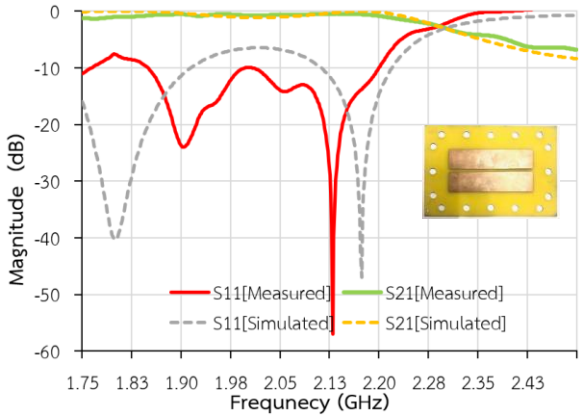
ผลการวิเคราะห์วงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำที่นำเสนอที่มีค่าขนาดความกว้างของแถบตัวนำ l = 14 mm โดยพิจารณารูปที่ 3 ประกอบ หรือคิดเป็นอัตราส่วนของไดอิเล็กตริกต่อขนาดความกว้าง d/a = 0.67 ผลการวัดทดสอบวงจรด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายเวกเตอร์ พบว่าวงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำที่นำเสนอให้ผลการตอบสนองในลักษณะของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน ที่ความถี่ตัดเท่ากับ 2.44 GHz สอดคล้องกันกับผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมจำลองที่มีความถี่ตัดเท่ากับ 2.46 GHz ดังแสดงในรูปที่ 13



รูปที่ 13 การตอบสนองต่อความถี่วงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำ

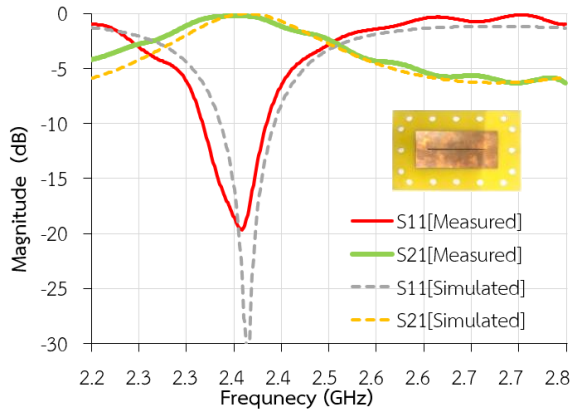
รูปที่ 14 แสดงผลการวิเคราะห์วงจรช่องแคบตัวเก็บประจุ ที่มีค่าขนาดความกว้างของแถบตัวนำ (l) เท่ากับ 20 mm (พิจารณารูปที่ 4 ประกอบ) หรือคิดเป็นอัตราส่วนของไดอิเล็กตริกต่อขนาดความสูง d/b = 0.075 ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายเวกเตอร์ที่กำหนดความถี่ทดสอบในช่วง 1.75 GHz ถึง 2.45 GHz ผลการทดสอบพบว่าวงจรช่องแคบตัวเก็บประจุที่นำเสนอให้ผลการตอบสนองต่อความถี่ในลักษณะของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ที่ความถี่ตัดเท่ากับ 2.30 GHz ในขณะที่ค่าที่วิเคราะห์ได้ด้วยโปรแกรมจำลอง มีความถี่ตัดของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่ความถี่ 2.31 GHz ถือว่ามีความสอดคล้องกันกับผลที่วัดได้ และให้การตอบสนอง

ต่อความถี่เป็นไปตามหลักการทางทฤษฎีทั้งนี้ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นเล็กน้อยเกิดจากความผิดพลาดในกระบวนการผลิตที่มีขนาดของช่องว่างเล็กกว่าที่ออกแบบ



รูปที่ 14 การตอบสนองต่อความถี่วงจรช่องแคบตัวเก็บประจุ

การวิเคราะห์และทดสอบวงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำขนานตัวเก็บประจุดังแสดงในรูปที่ 15 ใช้คุณสมบัติของวงจรช่วงแคบตัวเก็บประจุและวงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำในลักษณะของการวางแบบขนาน มีค่าขนานความกว้างของแถบตัวนำ l_1 = 12 mm และ l_2 = 19 mm คิดเป็นค่า d/a = 0.72 และค่า d/b = 0.11 โดยพิจารณาจากรูปที่ 9 ประกอบ ผลการวิเคราะห์วงจรที่นำเสนอด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายพบว่า วงจรให้ผลการตอบสนองในลักษณะของวงจรกรองความถี่แถบผ่าน มีการทำงานที่ระดับ -3 เดซิเบล ในช่วงความถี่ 2.26GHz ถึง2.50GHz ในขณะที่ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมจำลองมีช่วงการตอบสนองความถี่ตั้งแต่ 2.30 GHz ถึง 2.51 GHz อย่างไรก็ตามผลการเปรียบด้วยวิธีการวิเคราะห์ทั้งสองวิธีถือว่ามีความสอดคล้องกัน



รูปที่ 15 การตอบสนองต่อความถี่วงจร LC ขนาน

4. บทสรุป

บทความวิจัยนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้แผ่นวงจรพิมพ์ที่มีราคาถูกและง่ายต่อการสร้างมาใช้เป็นวงจรช่องแคบในท่อนำคลื่น เพื่อศึกษาผลการตอบสนองต่อความถี่ของวงจรที่ได้ออกแบบตามหลักการทางทฤษฎี ที่แบ่งออกเป็นวงจรช่องแคบตัวเก็บประจุ วงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำ และวงจรช่องแคบตัวเก็บประจุขนานตัวเหนี่ยวนำ ผลการวิจัยพบว่า วัสดุประเภทแผ่นวงจรพิมพ์สามารถนำมาประยุกต์ใช้สำหรับพัฒนาวงจรช่องแคบในท่อนำคลื่นได้ เป็นไปตามหลักการทางทฤษฎี [6] และสอดคล้องกันกับผลที่วิเคราะห์ได้ด้วยโปรแกรมจำลองเชิงพาณิชย์ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับวงจรไมโครเวฟอื่น ๆ ในท่อนำคลื่นได้ อย่างมีประสิทธิภาพ

5. เอกสารอ้างอิง

[1] Shengxian L.,Junmei F. Xuda W., Analysis of High-Power Rectangular Waveguide Filter with Capacitive Coupling Iris for Satellite, in Power and Energy Engineering Conference (APPEEC) , 2009, pp.1-4.

[2] Chieh, J.-C.S., et.al, Tapered Slot Waveguide Antenna for Ku-Band Phased Array Applications, International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, July 2015.

[3] S.Soo Park, et.al., "Design of 40 GHz-band Iris-Type Waveguide Bandpass Filter," International Journal of Infrared and Millimeter Waves, Vol.24, pp 941-951. June 2003.

[4] Y. Zhai, et al. "The Design of an Iris Waveguide Filter at 35.75 GHz," in Millimeter Waves Global Symposium on, 2008, pp.348-350.

[5] G. Prigent, et al. "Design of Waveguide Bandpass Filter in The X-Frequency Band," International Journal of Microwave Journal, Vol.7, No.1 pp.1-16, Jan.2008.

[6] Marcuvitz,N."Waveguide Handbook,"Short RunPress Ltd., London, UK, 1986.

[7] Shengxian L.,Junmei F. Xuda W., "Analysis of High-Power Rectangular Waveguide Filter with Capacitive Coupling Iris for Satellite," in Power and Energy Engineering Conference (APPEEC) , 2009, pp.1-4.

Chicken Slaughterhouse Wastewater Characteristics, Current Treatment and Future Challenges: A review

Siraprapa Chainetr[1 *], Rungnapha Khiewwijit[1], Nopadon Maneetien[2] and Suraphon Chaiwongsar[3]

[1] Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna. 128 Huay Kaew Road, Muang, Chiang Mai, Thailand, 50300

[2] Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna. 128 Huay Kaew Road, Muang, Chiang Mai, Thailand, 50300

[3] Faculty of Science and Agricultural Technology, Rajamangala University of Technology Lanna. 128 Huay Kaew Road, Muang, Chiang Mai, Thailand, 50300

[*]Corresponding Author: Siraprapha42@yahoo.com. Phone Number 0-5392-1444

Received: 9 May 2020, Revised: 22 May 2020, Accepted: 25 May 2020

Abstract

In this study, a thorough review of advancement in chicken slaughterhouse wastewater (CSWW) characteristics, current treatment and future challenges were presented. The data of CSWW characteristics and discharge limits were collected, in particular in Thailand, as well as in several other neighboring countries and the world's leading chicken meat producing countries. The data clearly showed that the CSWW typically contained high concentrations of organic matter in the forms of Biochemical Oxygen Demand and Chemical Oxygen Demand, suspended solids, oil and grease, and nitrogen in the form of Total Kjeldahl Nitrogen. For example, in Thailand the concentrations of mentioned parameters were ranged from 490-1200 mg/L, 890-1900 mg/L, 415-700 mg/L, 80-190 mg/L and 73-240 mg/L, respectively. In the treatment of CSWW, biological wastewater treatment was commonly applied for the removal of organic matter and nutrients. An overview of the typical CSWW treatment systems was also discussed. Moreover, this review also provided a better understanding of the future challenges of CSWW management that aimed at both high treatment efficiency and potential resource recovery.

Keywords: Chicken slaughterhouse wastewater, wastewater characteristics, wastewater treatment.

1. Introduction

Over the last centuries, the world population has increased many folds and will reach probably eight billion by 2030 and over nine billion by 2050 [1]. Such a high world population will be demanding for more water and food, including meat products. In 2016, poultry, including chicken, become the most popular processed meat products with a 38% share of the global market, while the red meat product of pork and beef accounts for about 33% [2]. Moreover, this global poultry market is expected to continue to grow as demand for both meat and egg products increase every year. In 2015-2019, the United States represent as the world's largest chicken meat producers, followed by Brazil and China, respectively. Thailand is also one of world's top ten largest chicken meat producers [3]. With a rich and wide variety of natural resources, low labor costs, and dedicated efforts of the government, the number of chicken production in Thailand has multiplied over the years, both for domestic consumption and for exports worldwide [4]. Consequently, the chicken production and processing industries, including slaughterhouses not only produce a large volume of chicken

products daily but also produce a large volume of wastewater. The average wastewater generated by chicken slaughterhouse is 12 L per chicken slaughtered [5]. Using Thailand as an example, in 2017, there was in total 1,239 million chickens produced in Thailand and it is expected to rise to 1263 million chickens in 2022 [4]. This would translate to a wastewater production as high as 15 million m^3 from the chicken slaughterhouse in 2022. Therefore, with all the chicken slaughterhouses worldwide, an enormous volume of wastewater will be produced in the future.

The wastewater produced from chicken slaughterhouse comes from different activities, including stunning and slaughtering, de-feathering, evisceration, trimming and carcass washing, de-boning, chilling, rendering, waste disposal, and cleaning [3], [6]. The chicken slaughterhouse wastewater (CSWW) typically has high organic matter, which composes of complex mixtures such as blood, skin, feathers, and carcasses, as well as contained nutrients nitrogen (N) and phosphorus (P), suspended solids (SS), oil and grease (O&G), pathogenic microorganisms, and cleaning agents [6-8]. Therefore, the direct discharge of untreated CSWW into surface water streams leads to serious environmental and health concerns. For example, high organic matter in CSWW causes the problem of deoxygenation in the aquatic ecosystem, while the nutrients N and P may cause eutrophication. High SS and O&G in water streams can inhibit the penetration of light into the water and inhibit the biodegradation. Besides, the presence of pathogenic microorganisms and cleaning agents will cause the spreading of waterborne diseases and toxic compounds, which may lead to the death of aquatic life and the public health effects of human communities [9-12]. Therefore, the CSWW requires significant treatment for a sustainable and safe treated effluent before discharge to the environment.

However, limited information can be found in the literature on a local characterization of CSWW as well as on the integration of both treatment and resource recovery perspectives in the future of CSWW treatment plant. Chicken slaughterhouse or chicken processing industry commonly produce a large volume of wastewater, and this wastewater can be considered as a valuable resource, especially the potential energy benefit. Therefore, the objective of this study was to characterize the CSWW and review discharge limits for the discharge of chicken slaughterhouse effluent from different countries, in particular in Thailand, as well as in several other neighboring countries and the world's leading chicken meat producers. Moreover, this study also reviewed the current treatment of CSWW and its future challenges towards resource recovery.

2. Characteristics of chicken slaughter-house wastewater

As the characteristics of slaughterhouse wastewater may vary depending on the water usage and the type of animals slaughtered [13], therefore, the first step towards designing appropriate treatment processes for CSWW is to characterize its quality. Table 1 gives a summary of the essential characteristics of the CSWW and discharges limit in Thailand as well as in some other neighboring countries and the world's leading chicken meat producers [3], [14].

Moreover, in this study, an example of the CSWW was collected from a chicken slaughterhouse located in Chiang Mai Province, the Northern region of Thailand. This chicken slaughterhouse was one of the largest chicken slaughterhouses in Chiang Mai, which had an average slaughter capacity of 15,000 units per day. The physico-chemical parameters such as pH, SS, total dissolved solids (TDS), O&G, Biochemical Oxygen Demand (BOD), Chemical Oxygen Demand (COD), Total Kjeldahl Nitrogen (TKN), ammonia nitrogen (NH_3-N), and total phosphorus (TP) were analyzed, and the results are shown in Table 1. The pH was measured using pH electrode (OHAUS Starter ST5000-B Bench pH Meter, USA). The measurements of SS, TDS, O&G,

BOD, COD, TKN, NH_3-N, and TP were determined according to standard methods [15].From Table 1, it is noticeable that the parameters of CSWW characteristics investigated by the researchers were different, which commonly depending on the discharge limits and regulations applied to discharge effluent. As demonstrated by the data in Table 1, the average characteristics of CSWW were different concerning the location of chicken slaughterhouse. These differences in the CSWW characteristics could be driven by several factors, for example, the quantity of water used for slaughtering and other processing steps, scale in the production facilities, and the differences in the nutritional quality of the chicken slaughtered [7]. However, the data clearly showed that the wastewater discharged by the chicken slaughter house worldwide was characterized mainly by high organic matter in the forms of BOD and COD, and contained high concentrations of SS, O&G, and nutrients especially N as compared to the average characteristics of municipal wastewater [41]. For example, in Thailand, the concentrations of BOD and COD were ranged from 490-1200 mg/L and 890-1900 mg/L, respectively. Besides, the concentrations of SS, O&G and TKN were ranged from 415-700 mg/L, 80-190 mg/L and 73-240 mg/L, respectively. For the organic matter, high BOD and COD concentrations in CSWW came mainly from the discharge of blood and offal chicken by-products, such as feathers, heads, lungs, intestinal tracts, and carcasses [23], [42]. Also, it can be noticed that most of the organic matter in CSWW was presented in the form of biodegradable matter, as the BOD/COD ratio was more than 0.5 in most presented countries. This provides an initial selection for the appropriate treatment of CSWW that could be used both biological aerobic and anaerobic processes because of the good biodegradability potential of CSWW [43], [44]. Moreover, using the chicken slaughterhouse in Thailand as an example, it is important to note that the concentrations of BOD and COD in the small scale chicken slaughterhouse were lower than the medium and large scale chicken slaughterhouse. This could be explained by the meat processing steps applied in the chicken slaughterhouse, as the small scale chicken slaughterhouse is usually processed for slaughtering chickens only and not for other additional operations of such as whole carcass cutting-up, de-boning, and rendering. Therefore, less offal chicken by-products could be found in the wastewater generated from the small scale chicken slaughterhouse [18], [45]. The suspended solids content in CSWW was also high due to small organic and inorganic particles presented in CSWW and some of the offal chicken by-products. This high SS value indicates high levels of water pollution and can inhibit the penetration of light into the water, which causing photosynthesis to be disturbed. Besides, high SS can also lead to an increase in the water temperatures, as SS absorbs more heat from the solar radiation than the water molecules. This would result in ultimate reduction of dissolved oxygen [23], [44]. Besides, the oil and grease in CSWW came mainly from the fat content of chicken by-products and the rendering process. High O&G can cause pipelines clogging and lead to a lower treatment efficiency of wastewater treatment due to sludge deterioration and washout, the formation of scum layers at the surface of the reactors, and the inhibition of anaerobic biodegradability [11], [14]. For the nutrients, similar to other wastewater sources, the nutrients in CSWW refer to nitrogen and phosphorus. Nitrogen is available both for organic nitrogen and inorganic nitrogen, which presented in various forms such as ammonia nitrogen (NH_3-N), nitrite nitrogen (NO_2-N) and nitrate-nitrogen (NO_3-N). Because the major forms of nitrogen in wastewater and treated effluent are ammonia nitrogen, nitrite nitrogen, nitrate-nitrogen, and organic nitrogen, thus total nitrogen (TN) is more common to indicate the nitrogen in wastewater and discharge limits. TN is the sum of organic nitrogen, ammonia nitrogen, nitrite nitrogen, and nitrate nitrogen. However, as the nitrogen in raw polluted water is originally presented in the forms of organic nitrogen and ammonia nitrogen. Therefore, ammonia nitrogen

Table 1 Comparison of the crucial characteristics of chicken slaughterhouse wastewater and discharge limits in Thailand as well as in some other neighboring countries and the world's leading chicken meat producers.

Country	Chicken slaughterhouse wastewater characteristics (Except pH, all values are in mg/L)										Reference
	pH	SS	TDS	O&G	BOD	COD	TN	TKN	NH_3-N	TP	
Thailand											
1.[a]	6.6-7.2	593	NR	167	793	973	NR	124	NR	7.8	[16]
2.[b]	6.9-7.6	522	NR	177	913	1120	NR	82	NR	6.1	[16]
3.[c]	6.6-6.9	616	NR	96	602	896	NR	153	NR	21.6	[16]
4.[a]	7.31	543	890	110	1061	1342	NR	73	NR	7.5	[17]
5.[b]	NR	580	NR	133	910	1444	NR	186	NR	15.0	[18]
6.	NR	500	NR	218	490	890	NR	110	NR	8.0	[19]
7.[d]	NR	450-700	NR	80-190	700-1200	1300-1900	NR	150-240	NR	NR	[6]
8.	6.73	415	828	135	792	995	NR	118	72	14.3	This study
Discharge limits	5.5-9.0	50	3000[e]	5	60[f]	400[f]	NR	200[f]	NR	NR	[20]
Other countries[g]											
Malaysia											
1.	7.17	515	545	NR	1360	4979	NR	NR	110	NR	[10]
2.	8.02	3482	NR	NR	1602	5422	361	NR	NR	NR	[8]
3.	7.3	727	NR	NR	834	2069	NR	NR	NR	NR	[21]
4.	NR	297	NR	NR	2152	5381	NR	NR	NR	NR	[22]
Discharge limits	5.5-9.0	100	1000	NR	50	100	NR	NR	1.5	NR	[10]
Indonesia											
1.	7.19	126	NR	15	3215	6406	NR	NR	13.8	NR	[23]
Discharge limits	6.0-9.0	100	NR	15	100	200	NR	NR	25	NR	[23]
China											
1.	7.5	1158	NR	160	710	1450	NR	NR	120	NR	[24]
Discharge limits	6.0-9.0	60	NR	15	25	70	NR	NR	15	NR	[24]
USA											
1.	NR	1090	NR	NR	1645	3780	NR	133	11	26	[25]
2.	6.7	391	469	235	551	1085	NR	61	NR	NR	[26]
3.	NR	884-1255	NR	NR	NR	2499-3157	NR	125-236	NR	32-35	[27]
4.	NR	510-1526	NR	NR	1488-2166	NR	NR	65-112	NR	15-48	[12]
Discharge limits	6.0-9.0	20-30	NR	NR	16-26	NR	4-8	NR	NR	NR	[3]
Brazil											
1.	6.8-7.8	NR	NR	115	2127	4020	NR	176	53	NR	[28]
2.[h]	6.5-7.0	872	NR	375	1780	3102	NR	186	39	76	[29]
Discharge limits	5.0-9.0	NR	NR	50	NR	NR	NR	NR	20	NR	[28]

Table 1 Comparison of the essential characteristics of chicken slaughterhouse wastewater and discharge limits in Thailand as well as in some other neighboring countries and the world's leading chicken meat producers. (continued)

Country	chicken slaughterhouse wastewater characteristics (Except pH, all values are in mg/L)										Reference
	pH	SS	TDS	O&G	BOD	COD	TN	TKN	NH_3-N	TP	
Other countries[g] (continued)											
Canada											
1.	6.9	1164	NR	NR	1209	4221	427	NR	NR	50	[30]
2.	NR	760	NR	665	1662	NR	NR	54	NR	12	[31]
Discharge limits	6.0-9.0	5-30	NR	10	5-30	NR	1.25	NR	NR	1	[3], [31]
South Africa											
1.	6.9	794	NR	406	1667	2903	NR	211	40	17	[32]
2.	6.1-7.2	1654	1138	715	2477	5216	NR	NR	216	38[i]	[33]
Discharge limits	5.5-9.5	25	NR	2.5	NR	75	NR	15	6	10[i]	[34]
India											
1.	7.0-7.6	300-950	NR	800-1385	750-1890	3000-4800	NR	109-325	16-165	16-32[i]	[35]
Discharge limits	5.5-9.0	100	NR	NR	30-100	250	10-50	NR	NR	5	[3]
Mexico											
1.	6.6	938	1833	306	5500	7333	75	NR	62	9.5	[36]
Discharge limits	5.0-10.0	40-60	NR	15-25	30-60	NR	15-25	NR	NR	5-10	[37][j]
Turkey											
1.	6.7	NR	NR	143	1123	2171	NR	NR	NR	9.6[i]	[38]
Discharge limits	6.0-9.0	NR	NR	20	NR	160	NR	NR	NR	NR	[39]
EU											
1.	NR	2280-2446	NR	289-389	1900-2200	3610-4180	NR	NR	NR	NR	[40]
Discharge limits	NR	50	NR	5	50	250	NR	NR	NR	NR	[40]

NR: Data not reported.

[a] Data taken from the large scale chicken slaughterhouse with a slaughter capacity of higher than 80,000 units per day.

[b] Data taken from the medium scale chicken slaughterhouse with a slaughter capacity of 10,000 - 80,000 units per day.

[c] Data taken from the small scale chicken slaughterhouse with a slaughter capacity of lower than 10,000 units per day.

[d] Data taken from both the large and medium scale chicken slaughterhouse.

[e] When discharged effluent to the receiving water, TDS must not exceed 3000 mg/L.

[f] Data taken from the Notification of Pollution Control Department regarding determination of industrial types that allow for different industrial effluent standards in which notified by Ministry of Science, Technology and Environment in the Issue no. 3 (B.E. 2539) industrial effluent standards. Issued on 17th September B.E. 2539. Royal Thai Government Gazette; 1996.

[g] Data of scale production sizes and treatment processes are not reported.

[h] Considering the wastewater produced from only the slaughtering process, and not from the cleaning and sanitation processes.

[i] Considering the concentration of phosphate phosphorus (PO_4^{3-}-P).

[j] Considering the maximum permissible limits discharged into rivers for aquatic life protection.

and Total Kjeldahl Nitrogen (TKN) are also applied to qualify the characteristics of wastewater and treated effluent. TKN is defined as the sum of organic nitrogen and ammonia nitrogen [15], [41]. The high nitrogen content in CSWW was due to the mixture of blood and decomposition of organic matter microbiologically [13], [23]. In addition to the nutrients contained in CSWW, total phosphorus (TP) is defined as the sum of all organic and inorganic phosphorus compounds in wastewater, and treated effluent. However, TP in wastewater exists primarily as inorganic phosphorus compounds in the forms of orthophosphate (PO_4^{3-}) and polyphosphate. The phosphorus content in CSWW came mainly from detergent compounds and hygiene products used in the chicken slaughterhouse. High concentrations of nitrogen and phosphorus in water streams can accelerate eutrophication, which leads to an overgrowth of algae and plants in aquatic systems. Eutrophication has several adverse effects on water streams, for example, light inhibition into the water and oxygen depletion that dominated by the decay of algae and plant biomass; consequently, this is harmful to aquatic life [8], [12].

Additionally, discharge limits are necessary to mitigate the environmental impacts of slaughterhouse wastewater, including the chicken slaughterhouse. From Table 1, it is important to note that different countries have different discharge limits with different important parameters of effluent quality. However, the most common parameters of discharged wastewater quality were pH, SS, O&G, BOD, and COD, as these parameters provide an index to assess the effect of discharged wastewater that would have on the receiving environment [41]. Moreover, most countries do not have the specific discharge limits for the chicken slaughterhouse, but they generally apply the discharge limits for the discharge of industrial wastewater. According to Table 1, it is difficult to highlight the highest or lowest level of discharge limits among the presented countries. However, based on the data shown in Table 1, it clearly showed that most of the CSWW quality parameters were not suitable for direct discharge of CSWW into surface water streams without prior treatment. It is also recommended that the CSWW should not be discharged into the municipal sewage systems because of the differences in wastewater quality [10]. Moreover, due to the differences in discharge limits worldwide, the selection of appropriate treatment for CSWW should be considered both wastewater characteristics and the national discharge limits for discharging effluent.

3. Current treatment of chicken slaughterhouse wastewater

At present, the treatment of wastewater produced from the chicken slaughterhouse is not adequately managed, in particular in the small scale chicken slaughterhouse, which generally refers to the activities done in the wet market and chicken processing stall. Therefore, the wastewater can be exposed to some health hazards with regards directly to the workers and communities located nearby the slaughterhouse. Most of the small scale chicken slaughterhouse, which is commonly located near the residential and urban areas, applies only the preliminary treatment such as screening and grease and oil trap before discharging untreated wastewater directly into the municipal sewage systems [16], [18], [21], [22], [30]. While the medium and large scale chicken slaughterhouse have their wastewater treatment plant, which will be further discussed in more detail later on. However, currently, the small and medium scale chicken slaughterhouses are accounted for as the main producers of chicken processing products. Thus, the current treatment of CSWW will be focused on two different wastewater treatment systems, which are (1) for the small and medium scale chicken slaughterhouse and

(2) for the large scale chicken slaughterhouse [6], [16], [18], [22], [45], [46].

The typical treatment systems for CSWW are shown schematically in Figure 1. These CSWW treatment systems are currently applied in the chicken slaughterhouse that has its own wastewater treatment plant. The CSWW treatment systems consist of the preliminary treatment, primary treatment, and secondary treatment as well as the tertiary treatment can also be used if it is required by the discharge limits or safe reuse of treated effluent. However, in most cases, the quality of treated effluent produced from the secondary treatment indicates that the sequence of processes in CSWW treatment plant that including preliminary, primary and secondary treatment is adequate to meet the discharge limits for surface water streams [6], [16], [17], [28], [47-49].

As shown in Figure 1A and 1B, the preliminary treatment is used as the first step to removing solids and large particles from the liquid portion in CSWW. The most common unit operations for the preliminary treatment are screening, sieves, flotation, settlers, and equalization tank. The screening process is typically the simplest and most economical preliminary treatment unit applied in the chicken slaughterhouse. Most of the chicken slaughterhouse uses a two-stage series of the coarse and fine screens to remove the offal chicken by-products, such as feathers, heads, lungs, intestinal tracts, and carcasses. After that, grease and oil trap is used to remove O&G before the wastewater enters to further advanced treatment systems. In this grease and oil trap unit, the O&G that is less dense than water will be risen to the surface where these O&G are then trapped inside the grease and oil trap by using a system of baffles or plates. Besides, as the quality and quantities of the CSWW could be varied from day to day, and when there is an accident situation, thus the equalization tank becomes vital in the CSWW treatment systems. This equalization tank is used to minimize the fluctuations in the flow and quality of the wastewater, consequently providing optimum conditions for the subsequent treatment. Retention time in the equalization tank is usually designed for the 24-hour average flow [12], [36].

After that, the effluent processed from the preliminary treatment is passed on to a subsequent primary and secondary treatment. The primary treatment is applied to further remove SS and O&G from the CSWW as well as to reduce the organic content. Dissolved air flotation (DAF) system is commonly used as the primary treatment process for the poultry processing wastewater, including the CSWW. The main advantage of DAF system over a primary catch basin is that DAF system has a high ability to remove very tiny and light particles in a shorter time [12]. In this DAF unit, the liquid-solid separation is occurred by the use of a dissolved air in wastewater that produced in a pressure vessel for mixing and air saturation and then injected through the bottom of the DAF reactor. When the pressure decreases and the air comes out of the solution, resulting in the production of fine bubbles, which carry light solids and O&G to the surface of the reactor where these are skimmed off [47], [48]. In the study of Del Nery et al. (2007) showed that DAF unit could achieve the removal efficiencies of 37% for SS and 51% for O&G [29]. However, it is important to note that not all chicken slaughterhouses applied the primary treatment in their wastewater treatment plant. For example, most CSWW treatment systems in Thailand consist of coarse and fine screens, grease and oil trap, equalization tank, and biological treatment system prior to discharge the treated effluent into surface water streams [16], [17]. This could be explained by the lower concentrations of SS and O&G presented in the CSWW as compared to other countries, suchas in the USA, Canada, South Africa, and India (Table 1).

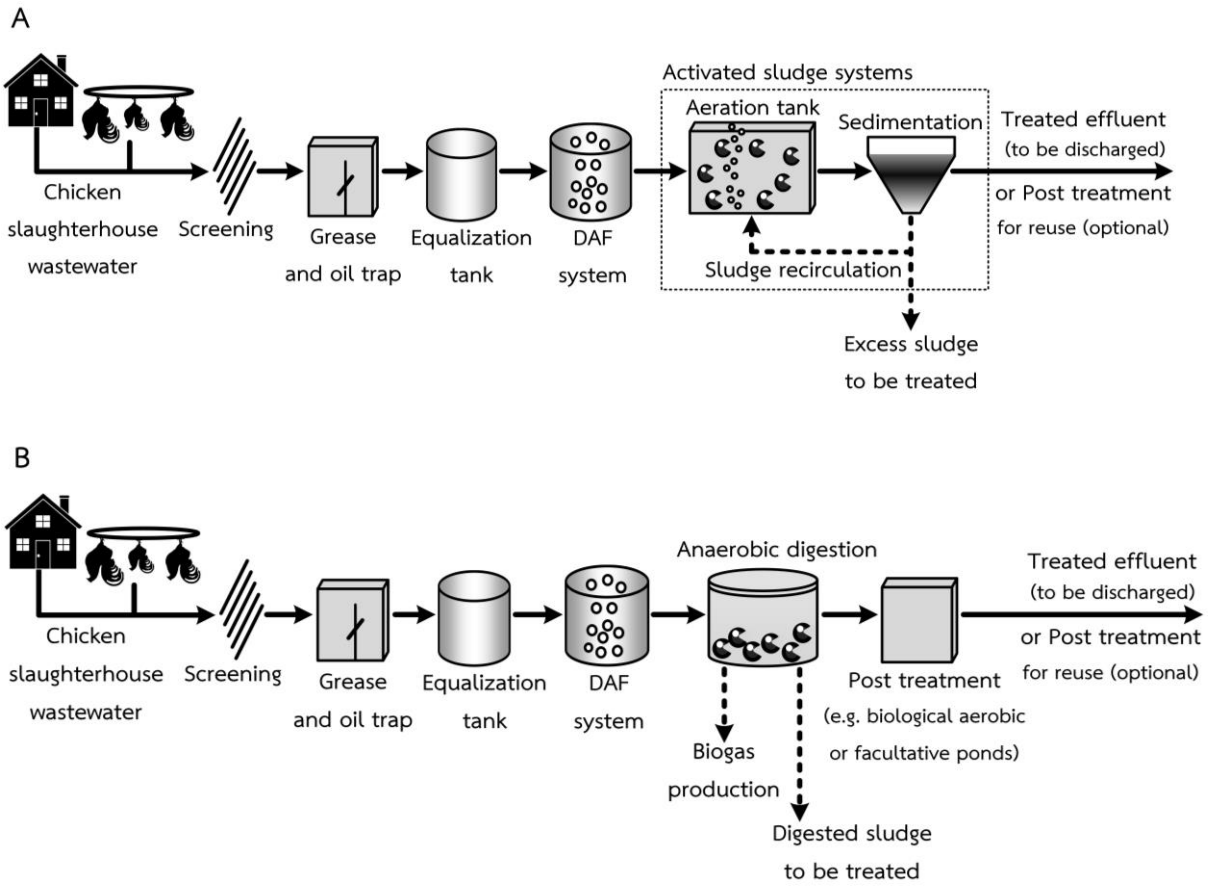


Figure 1 Schematic diagram of the typical chicken slaughterhouse wastewater treatment system; (A) Small and medium scale chicken slaughterhouse, and (B) Large scale chicken slaughterhouse.

For the secondary treatment, biological treatment processes are typically used to remove organic matter and nutrients and deactivated pathogens presented in the CSWW. There are different types of biological treatment processes, which include aerobic, anaerobic, and combined processes. Examples of microorganisms used in such a process would include bacteria, protozoa, fungi, and algae [41]. However, based on the literature data and recent research findings in the treatment systems of CSWW, the common biological treatment units for the secondary treatment are different depending on the production scale of the chicken slaughterhouse. In the small and medium scale chicken slaughterhouse, the biological aerobic processes are commonly applied for the secondary treatment (Figure 1A). There are several aerobic treatment processes available, such as activated sludge (AS) systems, aerated lagoons, aerobic sequencing batch reactor (SBR), and trickling filters. Among the alternatives in biological aerobic treatment processes, AS systems are the most frequently used in the current treatment systems of CSWW [18], [23], [45], [50], [51]. The main advantages of AS systems are that they are robust and generally produce an effluent quality that meets the discharge limits. The key processes in aeration tank are that the organic matter is aerobically mineralized to CO_2 and form new cells, whereas nutrients nitrogen is removed by the biological process, and phosphorus is removed by chemical or biological processes. The AS systems consist of two main units, which are an aeration tank and a sedimentation tank where the sludge is separated

from the treated effluent. In the aeration tank, the aerators are used to provide aerobic microorganisms with the oxygen and induce sufficient mixing. Moreover, the sedimentation tank provides a quiescent environment to allow the activated sludge solids to separate by flocculation and gravity from the treated effluent. Some of the settled sludge is recycled to the aeration tank for the maintenance of microbial culture, whereas a large amount of excess sludge is discharged from the sedimentation tank. This excess sludge requires further sludge treatment and disposal processes [41]. In most cases, the AS systems generally produce an effluent of sufficient quality that meet the discharge limits for discharging effluent into surface water streams. However, the tertiary treatment is still required to permit safe reuse of treated effluent, such as for irrigation water or industrial process water. Tertiary treatment processes that would utilize for treating CSWW include chlorine disinfection, advanced oxidation processes (AOPs), and membrane filtration systems [12], [45], [47].

In the large scale chicken slaughterhouse, the most common biological treatment unit for the secondary treatment is the anaerobic biological processes (Figure 1B). As was discussed earlier, the aerobic AS systems are currently applied as the main biological treatment of CSWW for the small and medium scale production sizes. However, these systems cannot be considered sustainable because these require a large amount of energy for aeration, generate high CO_2 emissions and a large amount of sludge production, and do not recover valuable resources, especially organic matter [52]. In particular, a large volume of high strength wastewater that produces from the large scale chicken slaughterhouse would result in such a high aeration cost, which makes the AS systems not economically attractive. Thus, the anaerobic digestion processes become a promising alternative and effective system to use as a main biological treatment, especially for the large scale chicken slaughterhouse. In this anaerobic digestion unit, the organic matter is degraded by bacteria in the absence of oxygen. The major end product of anaerobic digestion is biogas, which is a mixture of main methane (CH_4) and CO_2 gases. The biogas production is considered as valuable renewable energy that can be converted into electricity and heat energy. The anaerobic digestion processes offer several advantages over the aerobic processes for treating high strength wastewater, such as low initial and operational costs, low sludge production, high biodegradation of organic matter, and potential energy benefit through the production of biogas, which make the systems technologically and economically attractive [35], [41]. However, a post-treatment for treating anaerobically treated effluent is usually needed to further remove the remaining of organic matter and nutrients down to reach the discharge limits. Because most organic matter and nutrients presented in anaerobically treated effluent are in the solubilized forms, thus the biological aerobic processes or simple, low-cost treatment technology, i.e., facultative ponds and constructed wetlands, are the most frequently applied as a post-treatment to remove organic matter and nutrients [9], [17], [28], [29], [53].

4. Challenges in the future treatment of chicken slaughterhouse wastewater

As mentioned earlier, the small and medium scale slaughterhouse are currently accounted for the main chicken processing producers. However, in the near future, the global business trends of chicken slaughterhouses have changed from the small and medium scale into large scale production [6], [35], [45], [49], [54]. Several factors are contributed to this change, for example (1) the replacement of local butchers by the high standard supermarkets, (2) the increase in numbers of restaurants and food businesses which required a large amount of standardized meat products, (3) new stricter regulations, such as on products quality, public safety, and wastes discharge that made it difficult for the small scale production, and (4) impacts of the virus pandemic that increased consumer awareness about food safety, in particular, the contamination caused by the workers, which made it difficult to

control in the small scale production [54]. However, it is important to note that the differences in large, medium, and small scale production sizes may vary between countries, as the sizes can be described by various factors, such as production volume, the number of employees, the financial assets, and the annual profit. For example, over the last decades, the chicken slaughterhouse in Thailand was dominated by the small scale production size with a slaughter capacity of lower than 10,000 units per day, which accounted for 80% of the total chicken slaughterhouse. At present, the large scale chicken slaughterhouse with a slaughter capacity of higher than 80,000 units per day have continually increased, while the small scale chicken slaughterhouse is continually decreasing and tending towards zero in the future [16]. Changes in scale production size not only affect the demand for advanced equipment to handle a large amount of chicken at one time but also the appropriate treatment of a large volume of high strength wastewater should be developed.

Therefore, the challenges in the future treatment of CSWW have changed to the development of combined novel treatment systems that beneficial for cost-effective, high treatment efficiency and potential resource recovery, in particular for the large scale chicken slaughterhouse. Similar to Figure 1B, the preliminary and primary treatment steps of the novel CSWW treatment plant is still essential and suggested to apply the same treatment units. Besides, the performance of the DAF system can be further improved by chemical addition, such as aluminum sulfate, ferric chloride, and polymers, into the pre-treated wastewater before entering to the DAF system [28], [47], [55]. However, the main challenge of the novel CSWW treatment plant is to explore the appropriate secondary treatment processes for treating CSWW. Recently, several treatment technologies have been investigated, such as electrocoagulation process [38], [56], ultrafiltration [40], aerobic sequencing batch reactor (SBR) system with granular activated sludge [23], aerobic SBR system with granular activated carbon (GAC) [18], aerobic SBR with submerged fibers [50], and anaerobic digestion processes with different types of bioreactors, for example, anaerobic lagoons [57], static granular bed reactor (SGBR) [33], [58], SGBR coupled with ultrafiltration (UF) membrane [32], an expanded granular sludge bed (EGSB) [42], [59], an up-flow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor [28], [29], [36], and an up-flow anaerobic filter reactor [35]. Among the different treatment systems suggested by the researchers, anaerobic digestion processes are still considered as a promising alternative and effective system to use as a main biological treatment. The anaerobic digestion processes have the advantage of providing potential benefits of organic waste utilization through the production of biogas [41]. The biogas produced can then be used to generate electricity and heat energy, which can be supplied within the CSWW treatment plant. This would help the CSWW treatment plant in a reduction of operational costs for treating CSWW, which will be finally resulted in a reduction of production costs for the chicken production and processing industries. Although the average concentration of organic matter presented in CSWW is typically lower than for beef and pork slaughterhouse wastewaters [13], the anaerobic digestion of CSWW is still potentially attractive substrate for renewable and sustainable energy because of its large production worldwide. However, limited information can be found in the literature on the performance, investment cost, and economic impact of an integration of both treatment and resource recovery perspectives on the future of CSWW treatment plant, and this should be further investigated.

Another challenge for the future of CSWW treatment plant would be focused on the opportunities for increasing the value of by-products from the CSWW treatment plant. For example, the anaerobic co-digestion of CSWW with other organic wastes should be further explored for enhancing biogas production. This anaerobic co-digestion of CSWW needs to be further investigated with respect

to types of organic wastes used and mixing ratios. Examples of organic wastes used in the anaerobic co-digestion of poultry slaughterhouse wastewater and waste are trapped grease waste [60], dairy manure [61], crude glycerol [62], maize residues [63], and sewage sludge [64]. Additionally, other higher value by-products that can be produced from the CSWW need to be explored, such as volatile fatty acids (VFA) [65], [66]. Production of VFA is preferred over biogas because VFA can be used as the starting compounds for a wide range of higher value products, for example, medium-chain fatty acids, bioplastics, and lipids for biodiesel [67].

Finally, there are concerns about the pathogens and odor in the sludge production that generates from the CSWW treatment processes [51], [68]. Therefore, there is a need for more research on the appropriate treatment and utilization of sludge waste generation to reduce environmental impacts.

5. Conclusions

Recently, an interest in the advancement of CSWW treatment and its future challenges is significantly increasing among researchers throughout the world. Researchers have characterized CSWW quality as it is deemed necessary for the design of an efficient combined treatment and resource recovery processes. The CSWW is typically contained high organic matter, suspended solids, oil and grease, and nutrient nitrogen. The conventional biological aerobic treatment systems, which are applied to treat CSWW, cannot be considered sustainable. The major drawbacks are that these systems consume a amount of energy for aeration and do not recover valuable resources, in particular with the high organic matter as it is destroyed by aerobic mineralization to CO_2. Therefore, the development of sequential biological anaerobic-aerobic treatment processes presents as a promising option for the future treatment plant of CSWW for its potential resource recovery and high treatment efficiency. Moreover, the future of CSWW treatment plants could also be focused on the opportunities for increasing biogas production with the use of anaerobic co-digestion and for producing other higher value by-products. This provides more benefits and sustainable for the chicken production and processing industries in the future.

6. Acknowledgement

The authors gratefully acknowledge the financial support of the National Key Research and Development Program of China (2016YFE0205600).

7. References

[1] Foresight. The future of food and farming: Challenges and choices for global sustainability. Final project report. London: The Government Office for Science;2011.

[2] Shahbandeh M. Global meat industry - statistics & facts. Available from: https://www.statista.com/topics/4880/global-meat-industry/#dossierSummary__chapter1 [Accessed 7th April 2020].

[3] Njoya M, Basitere M, Ntwampe SK. Analysis of the characteristics of poultry slaughterhouse wastewater (PSW) and its treatability. Water Practice & Technology. 2019;14(4):959-970.

[4] Department of Livestock Development and National Institute of Development Administration. Strategy for the department of livestock development during the period of 2018-2022. Ministry of Agriculture and Cooperatives, Bangkok, Thailand;2018.Thai.

[5] Natthaporn O. The guidelines for improving quality of wastewater from chicken slaughter industry for water reuse. Master thesis. King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok; 2014.Thai.

[6] Department of Industrial Works, Thailand. Chapter 1: Knowledge of the chicken slaughtering and processing industries. In: Regulatory handbook for the chicken slaughtering and processing industries. Ministry of Industry, Bangkok, Thailand;2010.Thai.

[7] Avula RY, Nelson HM, Singh RK. Recycling of poultry process wastewater by ultrafiltration. Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2009;10(1):1-8.

[8] Yaakob MA, Mohamed RMSR, Al-Gheethi AAS, Kassim AHM. Characteristics of chicken slaughterhouse wastewater. Chemical Engineering Transactions. 2018;63:637-42.

[9] Bustillo-Lecompte C, Mehrvar M. Chapter 8 Slaughterhouse wastewater: Treatment, management and resource recovery. Physico-chemical wastewater treatment and resource recovery. 2017:153-74.

[10] Daud NNN, Anijiofor SC. Chicken slaughterhouse wastewater disposal: The challenges ahead. Asian Journal of Agriculture and Biology. 2018; (Special Issue):42-5.

[11] Pereira EB, De Castro HF, Spiller VR, Junior AF. Degradation of fat and grease in slaughterhouse wastewater by a commercial microbial lipase. Brazilian Archives of Biology and Technology. 2006;49:21-8.

[12] USEPA. Technical development document for the final effluent limitations guidelines and standards for the meat and poultry products point source category (40 CFR 432). Washington DC, USA: United States Environmental Protection Agency;2004.

[13] Wu PF, Mittal GS. Characterization of provincially inspected slaughterhouse wastewater in Ontario, Canada. Canadian Biosystems Engineering. 2012;54:9-18.

[14] COWI Consulting Engineers and Planners AS, Denmark. Cleaner production assessment in meat processing. United Nations Environment Programme, Division of Technology, Industry and Economics, and Danish Environmental Protection Agency, Copenhagen, Denmark; 2000.

[15] APHA. Standard methods for the examination of water and wastewater. 22nd eds. American Water Works Association and Water Environment Federation. Washington DC, USA; 2012.

[16] Prachuab T. Appropriate waste water management systems for chicken slaughter houses. Master thesis. King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok; 1999.Thai.

[17] Prasith R. How to manage wastewater in food Industry: Plenary session of the International Conference of Thai Water 2013: Water for the future, June 6-7, 2013, Bangkok, Thailand; 2013.Thai.

[18] Kwannate M. Study of the efficiency of granular activated carbon - sequencing batch reactor (GAC-SBR) for treating slaughterhouse wastewater. Master thesis. King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok; 2000.Thai.

[19] CMS Environmental Consultant. The study of high polluting industries for the reduction of pollution: Poultry slaughterhouse industry. CMS Engineering & Management Co., Ltd. Bangkok, Thailand;1995. p.5-30.

[20] Ministry of Industry, Thailand. Notification of Ministry of Industry regarding industrial effluent standards B.E. 2560. Issued on 30th May B.E. 2560. Royal Thai Government Gazette;2017.

[21] Seswoya RB, Mat Daud AM, Md Ali Z, Mohamed Basri ZDB, Raja Yunus RNB. The first attempt of chicken wastewater treatment using sand filtration. In: International Conference on Science and Technology Application in Industry & Education (ICSTIE'06), 8-9 December 2006, Universiti Teknologi MARA (UiTM), Penang, Malaysia; 2006.

[22] Bakar JA, Mohamed RMSR, Bakar M, Baker R, Al-Gheethi AAS, Fitriani N. Small-scale chicken slaughterhouse industries: Production and its effluent quality characteristics. Pollution Research. 2019;August Suppl. Issue:S43-8.

[23] Oktafani B, Siami L, Hadisoebroto R, Tazkiaturrizki T, Ratnaningsih R. The effect of aeration time on chicken slaughterhouse water treatment using GAS-SBR. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing. 2019; 1402(3):1-6.

[24] Chen XM, Zhang P, Wang HY, Yu S, Deng L, Yu XG. Technical process adopting DAT-IAT

(demand aeration tank-intermittent aeration tank) for livestock and poultry slaughter wastewater treatment. CN102887586A (Patent) 2012.

[25] NCLEAR. TPX™ helps solve wastewater challenges in poultry processing. Georgia, USA: NCLEAR Inc.; 2019. Available from: https://nclear.us/wp-content/uploads/2020/02/Fieldale-Farms-Case-Study-Draft-Final-CH.pdf [Accessed 7th April 2020].

[26] Sardari K., Askegaard J, Chiao, YH, Darvishmanesh S, Kamaz M, Wickramasinghe SR. Electrocoagulation followed by ultrafiltration for treating poultry processing wastewater. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2018;6(4):4937-44.

[27] Kiepper BH. Effects of tertiary microsieving on the composition of poultry processing wastewater. Journal of Applied Poultry Research. 2009;18(4):716-24.

[28] Del Nery V, Damianovic MHZ, Moura RB, Pozzi E, Pires EC, Foresti E. Poultry slaughterhouse wastewater treatment plant for high quality effluent. Water Science and Technology. 2016; 73(2);309-16.

[29] Del Nery V, De Nardi IR, Damianovic MHRZ, Pozzi E, Amorim AKB, and Zaiat M. Long-term operating performance of a poultry slaughterhouse wastewater treatment plant. Resources, Conservation and Recycling. 2007; 50(1):102-14.

[30] Bustillo-Lecompte C, Mehrvar M, Quinones-Bolanos E. Slaughterhouse wastewater characterization and treatment: An economic and public health necessity of the meat processing industry in Ontario, Canada. Journal of Geoscience and Environmental Protection. 2016;4(4):175-86.

[31] The Ministry of Environment, British Columbia. Technical guidance document for the slaughter and poultry processing industries. Victoria, Canada, Environmental Protection Division; 2018.

[32] Basitere M, Rinquest Z, Njoya M, Sheldon MS, Ntwampe SK. Treatment of poultry slaughterhouse wastewater using a static granular bed reactor (SGBR) coupled with ultrafiltration (UF) membrane system. Water Science and Technology. 2017;76(1):106-14.

[33] Basitere M, Njoya M, Rinquest Z, Ntwampe SK., Sheldon MS. Performance evaluation and kinetic parameter analysis for static granular bed reactor (SGBR) for treating poultry slaughterhouse wastewater at mesophilic condition. Water Practice and Technology. 2019;14(2):259-68.

[34] Department of Water and Sanitation, South Africa. Department of Water and Sanitation notice 1154 of 2015, No. 39411. Issued on 13th November 2015. Pretoria, South Africa Government Gazette;2015.

[35] Rajakumar R, Meenambal T, Banu JR, Yeom IT. Treatment of poultry slaughterhouse wastewater in upflow anaerobic filter under low upflow velocity. International Journal of Environmental Science & Technology. 2011; 8(1):149-58.

[36] Chavez CP, Castillo RL, Dendooven L., Escamilla-Silva EM. Poultry slaughter wastewater treatment with an up-flow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor. Bioresource technology. 2005;96(15):1730-36.

[37] Mexico Secretary of Environment, Natural Resources and Fisheries. Mexican Official Standard: NOM-001-ECOL-1996: Pollutants in wastewater discharges into national waters and goods. Issued on 24th June 1996. Mexico Official Journal of the Federation. Available from: http://cepis.org.pe/mexican-official-standard-001ecol1996/ [Accessed 20th April 2020].

[38] Bayar S, Yildiz YS, Yilmaz AE, Irdemez S. The effect of stirring speed and current density on removal efficiency of poultry slaughterhouse wastewater by electrocoagulation method. Desalination. 2011;280(1-3):103-7.

[39] Republic of Turkey Ministry of Environment and Forest. Water pollution and control regulations, Issue 25687. Issued on 31st December 2004. Ankara, Turkey Official Gazette;2004.

[40] Yordanov D. Preliminary study of the efficiency of ultrafiltration treatment of poultry slaughterhouse wastewater. Bulgarian Journal of Agricultural Science. 2010;16(6):700-4.

[41] Metcalf and Eddy. Wastewater engineering: Treatment and reuse. International edition 4 th ed. USA: McGraw-Hill;2004.

[42] Williams Y. Treatment of poultry slaughterhouse wastewater using an expanded granular sludge bed anaerobic digester coupled with anoxic/aerobic hybrid side stream ultrafiltration membrane bioreactor. PhD thesis. Cape Peninsula University of Technology, Cape Town, South Africa; 2017.

[43] Baker BR, Mohamed R, Al-Gheethi A., Aziz HA. Advanced technologies for poultry slaughterhouse wastewater treatment: A systematic review. Journal of Dispersion Science and Technology. 2020:1-20.

[44] Pozo RD, Tas DO, Dulkadiroglu H, Orhon D, Diez V. Biodegradability of slaughterhouse wastewater with high blood content under anaerobic and aerobic conditions. Journal of Chemical Technology & Biotechnology. 2003; 78(4):384-91.

[45] Kiepper BH. Characterization of poultry processing operations, wastewater generation, and wastewater treatment using mail survey and nutrient discharge monitoring methods. Master thesis. The University of Georgia, USA; 2003.

[46] Peng, G. Inter-organizational information exchange, supply chain compliance and performance. PhD thesis. Wageningen University, Wageningen, The Netherlands; 2011.

[47] Bingo MN, Basitere M, Ntwampe SKO. Poultry slaughterhouse wastewater treatment plant design advancements. Conference papers of the 16th SOUTH AFRICA Int'l Conference on Agricultural, Chemical, Biological & Environmental Sciences (ACBES-19), November 18-19, 2019, Johannesburg, South Africa; 2019.

[48] Dlamini DN, Basitere M., Ntwampe SKO. Current and functional reactor designs in poultry slaughterhouse wastewater treatment. Conference papers of the 16th SOUTH AFRICA Int'l Conference on Agricultural, Chemical, Biological & Environmental Sciences (ACBES-19), November 18-19, 2019, Johannesburg, South Africa; 2019.

[49] Molapo NA. Waste handling practices in the South African high-throughput poultry abattoirs. PhD thesis. Central University of Technology, Free State; 2009.

[50] Aziz HA, Puat NNA, Alazaiza MYD, Hung YT. Poultry slaughterhouse wastewater treatment using submerged fibers in an attached growth sequential batch reactor. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2018;15(8),1734:1-12.

[51] Masoumi Z, Shokoohi R, Atashzaban Z, Ghobadi N, Rahmani AR. Stabilization of excess sludge from poultry slaughterhouse wastewater treatment plant by the fenton process. Avicenna Journal of Environmental Health Engineering. 2017;2(1),e3239:1-5.

[52] Khiewwijit R, Temmink H, Rijnaarts H, Keesman KJ. Energy and nutrient recovery for municipal wastewater treatment: how to design a feasible plant layout?. Environmental Modelling & Software. 2015;68:156-65.

[53] Chernicharo CD. Post-treatment options for the anaerobic treatment of domestic wastewater. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology. 2006;5(1):73-92.

[54] Cook EAJ, de Glanville WA, Thomas LF, Kariuki S, de Clare Bronsvoort BM, Fevre EM. Working conditions and public health risks in slaughterhouses in western Kenya. BMC Public Health. 2017;17(1),14:1-12.

[55] Martin EJ, Martin ET. Technologies for small water and wastewater systems. New YorK, USA: Van Nostrand Reinhold;1991.

[56] Kobya M, Senturk E, Bayramoglu M. Treatment of poultry slaughterhouse wastewaters by electrocoagulation. Journal of hazardous materials. 2006;133(1-3):172-6.

[57] USEPA. Wastewater technology fact sheet anaerobic lagoons. Washington DC, USA: United States Environmental Protection Agency;2002.

[58] Debik E, Coskun TJBT. Use of the Static Granular Bed Reactor (SGBR) with anaerobic sludge to treat poultry slaughterhouse wastewater and kinetic modeling. Bioresource Technology. 2009;100(11):2777-82.

[59] Basitere M, Williams Y, Sheldon MS, Ntwampe SKO, De Jager D, Dlangamandla C. Performance of an expanded granular sludge bed (EGSB) reactor coupled with anoxic and aerobic bioreactors for treating poultry slaughterhouse wastewater. Water Practice and Technology. 2016;11(1):86-92.

[60] Affes M, Aloui F, Hadrich F, Loukil S, Sayadi S. Effect of bacterial lipase on anaerobic co-digestion of slaughterhouse wastewater and grease in batch condition and continuous fixed-bed reactor. Lipids in Health and Disease. 2017; 16(1),195:1-8.

[61] Ogejo JA, Li L. Enhancing biomethane production from flush dairy manure with turkey processing wastewater. Applied Energy. 2010; 87(10):3171-77.

[62] Foucault LJ. Anaerobic co-digestion of chicken processing wastewater and crude glycerol from biodiesel. Master thesis. Texas A & M University, USA; 2011.

[63] Cuetos MJ, Gomez X, Martinez EJ, Fierro J, Otero M. Feasibility of anaerobic co-digestion of poultry blood with maize residues. Bioresource Technology. 2013;144:513-20.

[64] Latifi P, Karrabi M, Danesh S. Anaerobic co-digestion of poultry slaughterhouse wastes with sewage sludge in batch-mode bioreactors (effect of inoculum-substrate ratio and total solids). Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2019;107:288-96.

[65] Kuruti K., Nakkasunchi S, Begum S, Juntupally S, Arelli V, Anupoju GR. Rapid generation of volatile fatty acids (VFA) through anaerobic acidification of livestock organic waste at low hydraulic residence time (HRT). Bioresource Technology. 2017;238:188-93.

[66] Placido J, Zhang Y. Production of volatile fatty acids from slaughterhouse blood by mixed-culture fermentation. Biomass Conversion and Biorefinery. 2018;8(3):621-34.

[67] Khiewwijit R, Temmink H, Labanda A, Rijnaarts H, Keesman KJ. Production of volatile fatty acids from sewage organic matter by combined bioflocculation and alkaline fermentation. Bioresource Technology. 2015;197:295-301.

[68] Da Costa PM, Vaz-Pires P, Bernardo F. Antimicrobial resistance in *Escherichia coli* isolated in wastewater and sludge from poultry slaughterhouse wastewater plants. Journal of Environmental Health. 2008;70(7):40-5.

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 โดยสามารถจัดส่งได้ทั้งทางไปรษณีย์ อีเมล์ EngineeringJournal@rmutl.ac.th และทางเว็บไซต์ https://www.tci-thaijo.org/index.php/RMUTLEngJ

ที่อยู่และสถานที่จัดส่งจดหมาย
“กองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา”
128 ถนนห้วยแก้ว ตำบลช้างเผือก อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ เบอร์โทรศัพท์ 053921444 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 ซึ่งมีความกว้างx 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. ตารางที่ใช้ต้องมีหัวข้อและเชิงอรรถเพื่อบรรยายคำย่อ สัญลักษณ์ หรือเครื่องหมายที่ใช้

6. หน่วยที่ใช้ควรใช้ระบบหน่วย International System Units หรือ SI โดยในบทความต้องเขียนเป็นภาษาอังกฤษ

7. คำภาษาไทยให้ใช้ตัวสะกดตามพจนานุกรมฉบับราชบัณฑิตยสถาน

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 รายละเอียดของวัสดุและวิธีการที่ใช้ในการศึกษาโดยรายละเอียดที่แสดง สามารถนำไปทดลองทำซ้ำได้

3.3 ผลการวิจัยและอภิปราย จะต้องแสดงเป็นหมวดหมู่และสัมพันธ์กับวัตถุประสงค์ของบทความซึ่งผลการศึกษาสามารถแสดงในรูปแบบตำราและรูปภาพได้ แต่ต้องไม่ซ้ำกับเนื้อหาที่เขียนในส่วนนี้ ส่วนตำแหน่งการวางรูปภาพจะต้องอยู่หลังจากคำแนะนำในบทความ และไม่จำเป็นต้องแสดงทันทีทันใดหลังจากแนะนำหรือบรรยายบทความ ผู้เขียนอาจวางรูปใกล้กับรูปอื่น โดยจัดให้อยู่บริเวณด้านบนสุดหรือล่างสุดของบทความ

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, 9-12 May 2006, Liège, Belgium. London: Taylor & Francis; 2006.p. 211-216.

[3] Edge BL. Coastal engineering 2000: conference proceedings, July 16-21, 2000, 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.Availablefrom:doi:10.1016/j.applthermaleng.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.....

