วารสารวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

RMUTL Engineering Journal

RMUTL. Eng. J.

ปีที่ 5 ฉบับที่ 2

กรกฎาคม – ธันวาคม 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 วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมเกษตร วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ วิศวกรรมขนถ่ายวัสดุ วิศวกรรมอุตสาหการ วิศวกรรมแม่พิมพ์ วิศวกรรมโลหการ วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม วิศวกรรมเหมืองแร่ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้อง

เจ้าของ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
เลขที่ : 128 ถนนห้วยแก้ว ตำบลช้างเผือก อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300
โทรศัพท์ : 0 5392 1444 ต่อ 2641, 1236
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

รองศาสตราจารย์ 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

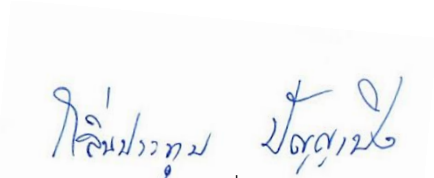
นางสาวจิราภรณ์	กันทะใจ	คณะวิศวกรรมศาสตร์
นายครรชิต	เงินคำคง	คณะวิศวกรรมศาสตร์
นางสาวอุไรวรรณ	สายยะนันท์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
นางสาวจุฑาทิพย์	สุวรรณ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
นางสาววัลลภา	วงศ์ษายะ	คณะวิศวกรรมศาสตร์

จดหมายจากบรรณาธิการ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา (RMUTL Eng. J) ปีที่ 5 ฉบับที่ 2 ประจำเดือนกรกฎาคม – ธันวาคม 2563 เป็นฉบับที่สองซึ่งจัดอยู่ในฐานข้อมูลศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (TCI) กลุ่มที่ 2 มีบทความผ่านการประเมินของผู้ทรงคุณวุฒิ (Peer review) จากภายในและภายนอกมหาวิทยาลัย ทางกองบรรณาธิการจะพยายามรักษาคุณภาพของวารสารให้คงมาตรฐานที่ดี เพื่อให้วารสารวิศวกรรมศาสตร์ (RMUTL Eng. J) เป็นที่ยอมรับในแวดวงทางวิชาการและเกิดการแบ่งปันองค์ความรู้ที่มีคุณภาพทางวิชาการด้านวิศวกรรมศาสตร์

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ (RMUTL Eng. J) ฉบับนี้ได้รวบรวมบทความทางวิชาการที่ผ่านการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิ จำนวน 7 บทความซึ่งเป็นบทความทางวิชาการในสาขาวิศวกรรมอุตสาหการ พลังงาน เหมืองแร่และสิ่งแวดล้อม อนึ่งท่านสามารถติดตามวารสารวิศวกรรมศาสตร์ (RMUTL Eng. J) และอ่านบทความต้นฉบับได้ที่เว็บไซต์ https://www.tci-thaijo.org/index.php/RMUTLEngJ

ในนามของกองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ (RMUTL Eng. J) ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงต่อนักวิจัยที่สนใจส่งบทความมาตีพิมพ์ และผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่เสียสละเวลาทำหน้าที่ประเมินบทความ รวมทั้งให้คำแนะนำที่ดีในการปรับปรุงเนื้อหาให้มีความสมบูรณ์และได้มาตรฐานทางวิชาการ อีกทั้งผู้บริหารมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาและผู้สนับสนุนทุก ๆ ท่านที่ให้การสนับสนุน โดยเฉพาะกองบรรณาธิการที่เข้มแข็งซึ่งทำให้การจัดพิมพ์เล่มวารสารแล้วเสร็จตามเวลาที่กำหนด ท้ายสุดนี้ขอเชิญชวนผู้สนใจ ส่งบทความทางวิชาการเข้าร่วมตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ (RMUTL Eng. J) ในฉบับต่อ ๆ ไป



(รองศาสตราจารย์ ดร.กลิ่นประทุม ปัญญาปิง)
บรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

สารบัญ

ปีที่ 5 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม – ธันวาคม 2563

บทความวิชาการ

การปรับปรุงกระบวนการจัดเก็บวัตถุดิบด้วยเทคนิควิศวกรรมอุตสาหการ 1

เฉลิมศักดิ์ ถาวรวัตร์ และสุวิทย์ บุญชูจรัส

กลไกการเกิดรอยเส้นและการแก้ปัญหาในกระบวนการพับขึ้นโลหะแผ่น 10

ณัฐชานันท์ อังศุเศรณี และภาสพิรุฬห์ วัชรศรีสำเริง

การศึกษาตัวแปรของกระบวนการดัดไวปิ้งรูปตัวแอลที่มีผลต่อการเกิดการดีดตัวกลับด้วยวิธีการจำลองไฟไนต์เอลิเมนท์ 19

บุญส่ง ฤทธิ์ตา วทัญญู เนตรสง่า และกฤช รุนรักษา

การพัฒนาก้อนถ่านอัดแท่งจากเศษถ่านของโรงไฟฟ้าชีวมวลชุมชนทองแสนขันด้วยแอลกอฮอล์แข็งเพื่อการติดไฟและการเผาไหม้ของก้อนถ่านอัดแท่ง 26

รัศมี สิทธิขันแก้ว กรวิทย์ พุ่มพวง ศักดิ์ดา แสงสุวรรณ สกุลชาติ ขุนเพ็ชร นฤมล สีพลไกร และประเทือง โมรารายย

การประยุกต์ใช้เทคนิคการจำลองสถานการณ์เพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตน้ำดื่ม กรณีศึกษา โรงงานน้ำดื่มแห่งหนึ่งในจังหวัดจันทบุรี 36

ฐิติ หมอรักษา นรา สมัตถภาพงศ์ ศุภกิตติ์ ยืนยาว และพงศธร วงษ์สกุล

การใช้ดินลูกรังเป็นมวลรวมหยาบในคอนกรีตเพื่อทำเป็นชั้นหินอุ้มน้ำประดิษฐ์ 43

ดนุพล ตันนโยภาส ณัฐวัตร จันทร์มาตร์ และนันทนัช เจริญสุข

การประยุกต์เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศประเมินเขตศักยภาพทำเลที่เหมาะสมของธุรกิจโรงแรมบริเวณชายฝั่งทะเลตะวันออกของประเทศไทย 51

รุ่งอาทิตย์ บูชาอินทร์ และกฤษนัยน์ เจริญจิตร

การปรับปรุงกระบวนการจัดเก็บวัตถุดิบด้วยเทคนิควิศวกรรมอุตสาหการ

Process Improvement of Raw Materials Storage with Industrial Engineering Techniques

เฉลิมศักดิ์ ถาวรวัตร์[1 *] และสุวิทย์ บุญชูจรัส[1]
[1] ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
39 หมู่ที่ 1 ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110
Chalermsak Thavornwat[1 *] and Suwit Boonchujarud[1]
[1] Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi
39 Moo 1, Klong 6, Thanyaburi, Pathum Thani, Thailand, 12110
[*]ผู้รับผิดชอบบทความ: chalermsak.t@en.rmutt.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 0-2549-4422

Received: 22 July 2020, Revised: 28 September 2020, Accepted: 31 October 2020

บทคัดย่อ
งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงกระบวนการจัดเก็บวัตถุดิบของบริษัทกรณีศึกษาประกอบด้วย การบันทึกรับเข้าวัตถุดิบ การจัดเก็บวัตถุดิบเข้าคลังวัตถุดิบ การเบิกจ่ายวัตถุดิบ การรับคืนวัตถุดิบ การแสดงสถานะรายการและจำนวนวัตถุดิบคงเหลือ เนื่องจากบริษัทไม่มีมาตรฐานการปฏิบัติงานของกระบวนการจัดเก็บวัตถุดิบ ทำให้บริษัทพบปัญหาว่าแผนกผลิตสูญเสียเวลาการผลิตไปกับการค้นหาวัตถุดิบในคลังวัตถุดิบเป็นเวลา 450 นาทีต่อเดือน งานวิจัยนี้นำเทคนิคการตั้งคำถามทำไม-ทำไม (Why-Why Analysis) และเทคนิค 3 GEN คือ Genba Genbutsu และ Genjitsu มาหาสาเหตุรากเหง้าของปัญหา ดำเนินการแก้ไขปัญหาด้วยกิจกรรม 5ส. คือ กิจกรรมสะสาง และนำเทคนิคการควบคุมด้วยสายตา (Visual Control) มาใช้ร่วมกับกิจกรรมสะดวกเพื่อช่วยปรับปรุงกระบวนการทำงาน โปรแกรม Inventor มาช่วยออกแบบและคำนวณการรับน้ำหนักของชั้นวางวัตถุดิบ โปรแกรม Microsoft Excel มาช่วยสร้างระบบบันทึกการรับเข้า การเบิกจ่าย การรับคืนวัตถุดิบ และการฝึกอบรมความรู้พื้นฐานวัตถุดิบให้กับพนักงาน ผลการปรับปรุงกระบวนการจัดเก็บวัตถุดิบทำให้สามารถลดเวลาการค้นหาวัตถุดิบลดลงจาก 450 นาทีต่อเดือน เป็น 71.26 นาทีต่อเดือน หรือลดลงร้อยละ 84.16 และสามารถเพิ่มขนาดของคลังวัตถุดิบจาก 18.06 ลูกบาศก์เมตร เป็น 25.82 ลูกบาศก์เมตร หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 42.97
คำสำคัญ การจัดเก็บวัตถุดิบ คลังวัตถุดิบ เทคนิควิศวกรรมอุตสาหการ

Abstract
This research aimed to improve the process of raw materials storage at the case study company consisted of recording raw materials receive, storing raw materials into a warehouse, raw materials disbursement, raw materials return, showing status of list and quantity of remaining raw materials. Due to no operation standards of raw materials storage process, the company had faced with the loss time problem at the production division particularly in, time to find raw materials in the warehouse, 450 minutes/month. This research used techniques of why-why analysis and 3 GEN (Genba, Genbutsu, Genjitsu) to find the root causes of the problems. The 5S activities; clearing up (Seiri) was applied to resolve the problems and the integration of visual control technique and organizing (Seiton) activities were also used to improve work process. The Inventor program was then employed to design and calculate weight loading of raw material shelves and the Microsoft excel program was used to construct a system to record of raw materials receiving, disbursement and return. As a result of having a training course for employees, the time to find raw materials was decreased from 450 minutes/month to 71.26 minutes/month, accounted for 84.16%. Furthermore, the warehouse capacity was also enhanced from 18.06 cubic meter to 25.82 cubic meter, equals to 42.97% increase.
Keywords: Raw Materials Storage, Raw Materials Warehouse, IE Techniques

1. บทนำ

บริษัทกรณีศึกษาที่นำเสนอในบทความนี้เป็นบริษัทที่ประกอบธุรกิจด้านงานวิศวกรรมแบบครบวงจรตั้งแต่การออกแบบ การผลิต การประกอบและการติดตั้งเครื่องจักรสำหรับโรงงานอุตสาหกรรม อาทิ ระบบขนถ่ายวัสดุในโรงงานอุตสาหกรรม (Material Handling System) ระบบกำจัดฝุ่นในโรงงานอุตสาหกรรม (Dust Collector System) โดยลักษณะการผลิตของบริษัทเป็นแบบการผลิตตามคำสั่งซื้อของลูกค้า (Made to Order) คือเมื่อบริษัทได้รับคำสั่งซื้อของลูกค้า แผนกวิศวกรรมจะทำหน้าที่ออกแบบผลิตภัณฑ์และกำหนดกระบวนการผลิตรวมถึงประเมินรายการและปริมาณการใช้วัตถุดิบให้กับแผนกผลิตเพื่อทำการผลิตผลิตภัณฑ์ให้กับลูกค้า บริษัทพบปัญหาว่าแผนกผลิตสูญเสียเวลาการผลิตบางส่วนไปกับการค้นหาวัตถุดิบในคลังวัตถุดิบ ส่งผลทำให้แผนกผลิตไม่สามารถปฏิบัติงานได้ตามแผนการผลิตที่กำหนดไว้และไม่สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ได้ตามกำหนดเวลา

บริษัทแบ่งพื้นที่สำหรับจัดเก็บวัตถุดิบตามลักษณะของวัตถุดิบออกเป็น 3 ส่วนคือ คลัง ก สำหรับจัดเก็บเหล็กรูปพรรณ (Steel Structural) อาทิ เหล็กกล่อง เหล็กฉาก เหล็กรางน้ำ เหล็กตัวซี เหล็กตัวยู ดังรูปที่ 1 คลัง ข สำหรับจัดเก็บเหล็กแผ่น (Steel Sheets) อาทิ ตะแกรงเหล็กฉีก เหล็กแผ่นลาย เหล็กแผ่นดำ เหล็กแผ่นขาว ดังรูปที่ 2 และคลัง ค สำหรับจัดเก็บเหล็กเพลา (Steel Round Bars) อาทิ เหล็กเพลาเหลี่ยม เหล็กเพลากลม เหล็กเพลาดำ เหล็กเพลาขาว ดังรูปที่ 3 ขนาดของคลังวัตถุดิบมีปริมาตรเท่ากับ 12.76, 4.05 และ 1.25 ลูกบาศก์เมตรตามลำดับ ลักษณะของคลังวัตถุดิบเป็นแบบเปิดอิสระ ไม่กำหนดขอบเขตของพื้นที่ที่ชัดเจน ไม่กำหนดรูปแบบการจัดเก็บวัตถุดิบให้กับพนักงาน และไม่มีระบบบันทึกการรับเข้า การเบิกจ่าย การรับคืนวัตถุดิบ พนักงานแผนกผลิตสามารถนำวัตถุดิบจากคลังวัตถุดิบไปใช้ในการผลิตโดยไม่มีการลงบันทึกเอกสารเบิกจ่ายวัตถุดิบ หรือกรณีที่วัตถุดิบเหลือจากการผลิตพนักงานผลิตจะนำวัตถุดิบเก็บเข้าคืนคลังวัตถุดิบแต่เนื่องจากบริษัทไม่มีการกำหนดรูปแบบการจัดเก็บวัตถุดิบให้กับพนักงาน ทำให้พนักงานเก็บวัตถุดิบไม่เป็นระเบียบและเก็บวัตถุดิบที่มีเกรดและขนาดแตกต่างกันปะปนกัน ส่งผลทำให้บริษัทไม่สามารถควบคุมรายการและจำนวนวัตถุดิบให้ถูกต้องและพนักงานทุกส่วนงานไม่ทราบสถานะของรายการและจำนวนวัตถุดิบแบบทันที ทำให้พนักงานผลิตสูญเสียเวลาการผลิตไปกับการค้นหาวัตถุดิบเป็นอย่างมาก [1]

การเก็บข้อมูลปริมาณและเวลาการค้นหาวัตถุดิบของแผนกผลิตระหว่างเดือนมกราคมถึงเดือนมีนาคม 2561 พบว่าปริมาณการค้นหาวัตถุดิบของเดือนมีนาคมมีปริมาณลดลงเนื่องจากคำสั่งซื้อของลูกค้าที่ลดลง โดยเป็นผลมาจาก



รูปที่ 1 คลัง ก สำหรับจัดเก็บเหล็กรูปพรรณ



รูปที่ 2 คลัง ข สำหรับจัดเก็บเหล็กแผ่น



รูปที่ 3 คลัง ค สำหรับจัดเก็บเหล็กเพลา

ใกล้ช่วงเทศกาลสงกรานต์ที่แต่ละบริษัทกำหนดให้เป็นวันหยุดยาวของบริษัท ทำให้บริษัทไม่ต้องการสินค้าหรือเก็บสินค้าไว้โดยไม่มีการทำงาน ผลการเก็บข้อมูลปริมาณการค้นหาวัตถุดิบพบว่าคลัง ก หรือคลังสำหรับจัดเก็บเหล็กรูปพรรณมีปริมาณการค้นหาวัตถุดิบเฉลี่ยต่อเดือนมากที่สุด

คือ 37 ครั้งต่อเดือน ทั้งนี้เนื่องจากวัตถุดิบประเภทเหล็กรูปพรรณเป็นวัตถุดิบหลักสำหรับการผลิตของบริษัทดังตารางที่ 1 และเมื่อทำการคำนวณเวลาการค้นหาวัตถุดิบเฉลี่ยต่อครั้ง (เก็บข้อมูลเวลาการค้นหาวัตถุดิบจำนวน 5 ครั้ง) พบว่าแผนกผลิตใช้เวลาการค้นหาวัตถุดิบเฉลี่ยที่คลัง ก มากที่สุด คือ 9 นาทีต่อครั้ง ทั้งนี้เนื่องจากเป็นพื้นที่ที่มีวัตถุดิบหลายรายการ หลายขนาดและมีปริมาณวัตถุดิบเป็นจำนวนมากดังตารางที่ 2 จากการเก็บข้อมูลปริมาณและเวลาการค้นหาวัตถุดิบของแผนกผลิต ทำให้สามารถคำนวณเวลาการผลิตรวมที่สูญเสียไปกับการค้นหาวัตถุดิบในคลังวัตถุดิบเป็นเวลา 450 นาทีต่อเดือน ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 1 ปริมาณการค้นหาวัตถุดิบของแผนกผลิต (ครั้ง)

คลังวัตถุดิบ	ปริมาณการค้นหาวัตถุดิบ			
	มกราคม	กุมภาพันธ์	มีนาคม	เฉลี่ย
คลัง ก	80	23	8	37
คลัง ข	26	13	2	13
คลัง ค	31	5	5	13

ตารางที่ 2 เวลาการค้นหาวัตถุดิบของแผนกผลิต (นาที)

คลังวัตถุดิบ	เวลาการค้นหาวัตถุดิบ					
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย
คลัง ก	8	10	9	8	10	9.00
คลัง ข	5	6	4	5	7	5.40
คลัง ค	3	4	4	3	4	3.60

ตารางที่ 3 ปริมาณและเวลาการค้นหาวัตถุดิบ

คลังวัตถุดิบ	ปริมาณการค้นหาวัตถุดิบ (ครั้งต่อเดือน)	เวลาการค้นหาวัตถุดิบ (นาทีต่อครั้ง)	เวลาการค้นหาวัตถุดิบ (นาทีต่อเดือน)
คลัง ก	37	9.00	333.0
คลัง ข	13	5.40	70.2
คลัง ค	13	3.60	46.8
รวม			450

2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เทคนิคการตั้งคำถามทำไม-ทำไม (Why-Why Analysis) เป็นเทคนิคสำหรับการวิเคราะห์หาสาเหตุรากเหง้าของปัญหาโดยการตั้งคำถามว่า “ทำไม” กับปัญหาหลักไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งพบต้นตอของปัญหา ต้นตอที่พบหลังสุดก็คือรากเหง้าของปัญหา ดังนั้นการแก้ไขปัญหาที่รากเหง้าของปัญหาย่อมเป็นการแก้ไขปัญหาที่มีประสิทธิภาพ [2-4]

เทคนิค 3 GEN เป็นหลักการที่เกี่ยวข้องกับความจริง ประกอบด้วย Genba คือการสังเกตสถานที่จริง Genbutsu คือการสังเกตวัสดุจริง Genjitsu คือการพิจารณาข้อเท็จจริงจากสถานการณ์และเหตุการณ์จริง [5-6] สำหรับการวิเคราะห์หาสาเหตุรากเหง้าของปัญหานิยมใช้เทคนิค 3 GEN ร่วมกับเทคนิคการตั้งคำถามทำไม-ทำไม เพื่อให้การวิเคราะห์หาสาเหตุเป็นไปอย่างถูกต้อง

กิจกรรม 5ส. เป็นแนวคิดการจัดระเบียบเรียบร้อยในสถานที่ทำงานเพื่อให้เกิดสภาพการทำงานที่ดี ส่งเสริมการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานและส่งเสริมการเพิ่มผลผลิต ประกอบด้วย สะสาง สะดวก สะอาด สุขลักษณะและสร้างนิสัย [7-8]

เทคนิคการควบคุมด้วยสายตา (Visual Control) เป็นเทคนิคการสื่อสารผ่านการมองเห็น อาจแสดงให้เห็นผลการปฏิบัติงาน เห็นความผิดปกติและเป็นการสื่อสารที่ทำให้เห็นได้อย่างสะดวก ชัดเจนและเข้าใจง่าย [9]

พรเทพ แก้วเชื้อ และคณะ [10] นำเทคนิคการตั้งคำถามทำไม-ทำไม มาหาแนวทางการแก้ไขปัญหาปริมาณสินค้าคงคลังมากเกินไปที่เกิดจากพนักงานและวิธีการทำงาน โดยการอบรมให้พนักงานมีความเข้าใจและปฏิบัติตามระเบียบการเบิกจ่ายสินค้า สร้างระบบการจัดเก็บข้อมูลแบบง่ายให้กับพนักงาน กำหนดปริมาณการสั่งซื้อที่เหมาะสมและการหาจุดสั่งซื้อที่เหมาะสม นอกจากนี้พงษ์ศิริ เพื่อนสงคราม และคณะ [11] นำกิจกรรม 5ส. และเทคนิคการควบคุมด้วยสายตามาปรับปรุงพื้นที่จัดเก็บวัตถุดิบของบริษัท Holm Machinery Asia ทำให้พื้นที่การจัดเก็บวัตถุดิบเพิ่มขึ้นจาก 2.68 ลูกบาศก์เมตร เป็น 4.14 ลูกบาศก์เมตร เวลาเฉลี่ยของการเบิกจ่ายวัตถุดิบลดลงจาก 3.41 นาที เป็น 1.11 นาที ขั้นตอนการเบิกจ่ายวัตถุดิบลดลงจาก 8 ขั้นตอน เหลือ 6 ขั้นตอนและคลังสินค้ามีความเป็นระเบียบเรียบร้อย เช่นเดียวกับสุพัตรา สาคร และปริญ วีระพงษ์ [12] นำเทคนิคการควบคุมด้วยสายตามาปรับปรุงกระบวนการทำงานในคลังสินค้าของบริษัท JKL จำกัด ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการคลังสินค้าคือ สินค้าถูกจัดเป็นหมวดหมู่ สามารถการมองเห็นได้ง่ายและลดการสั่งซื้อที่ซ้ำซ้อน และกฤษฎ์ ชุณหวัตร และรวินกานต์ ศรีนนท์ [13] ทำการออกแบบโปรแกรม Excel สำหรับการควบคุมสต็อกสินค้าแทนการจดบันทึกลงในสมุดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานให้มากขึ้น โดยการบันทึกข้อมูลแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วน Stock Summary และส่วนบันทึกรับจ่ายโดยเชื่อมต่อข้อมูลระหว่างกัน

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้นจึงเป็นที่มาให้นำเทคนิค 3 GEN หรือเทคนิคการวิเคราะห์ตามหลักการที่เกี่ยวข้องกับความจริงมาวิเคราะห์ร่วมกับเทคนิคการตั้งคำถามทำไม-ทำไม ทั้งนี้เพื่อป้องกันความผิดพลาดในการวิเคราะห์หาสาเหตุรากเหง้าของปัญหา (สาเหตุที่แท้จริง) อันเนื่องมาจากขาดการศึกษาข้อมูลจากสถานที่จริง วัสดุจริง สถานการณ์และเหตุการณ์จริง แล้วนำโปรแกรม Inventor มาช่วยออกแบบ

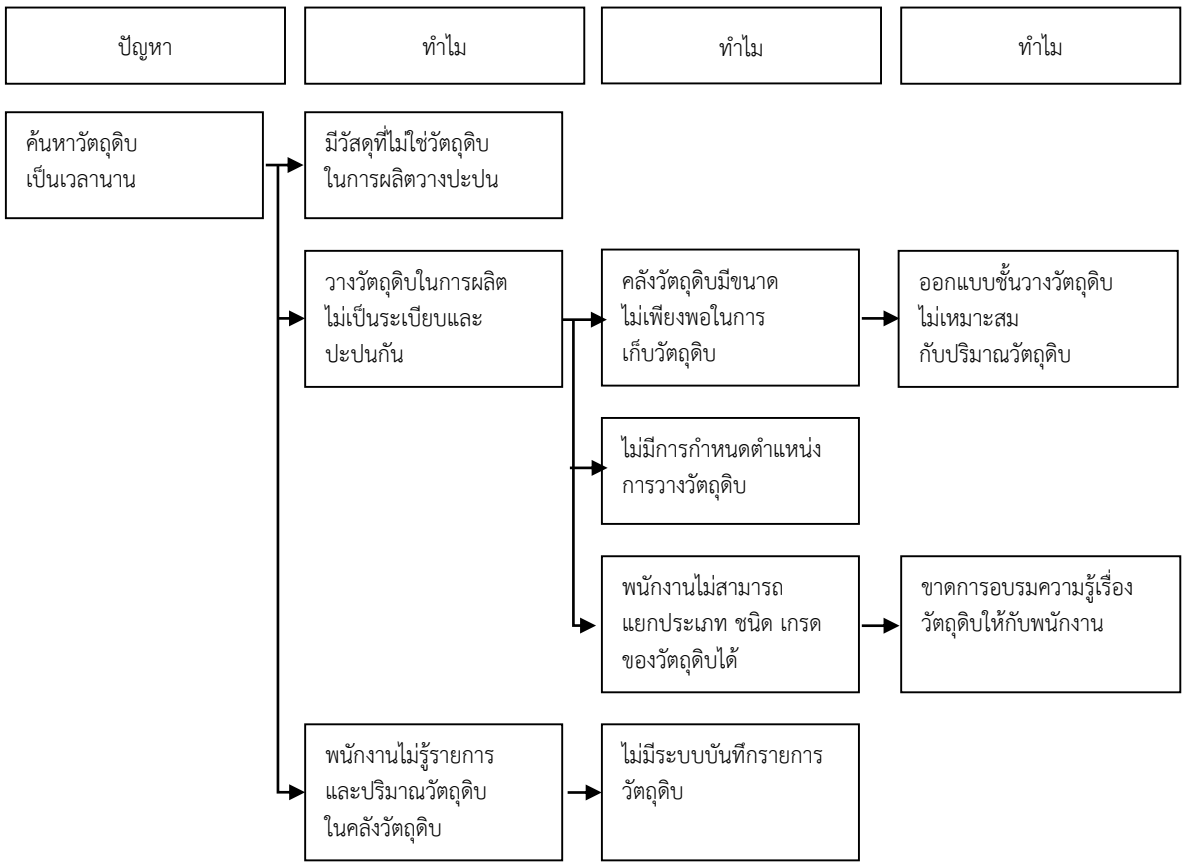
และคำนวณการรับน้ำหนักของชั้นวางวัตถุดิบเพื่อความปลอดภัยในการทำงานของพนักงาน และเพิ่มระบบบันทึกการรับคืนวัตถุดิบในกรณีที่วัตถุดิบเหลือจากการผลิต

2.2 วิธีการดำเนินการวิจัย

การดำเนินงานวิจัยเริ่มต้นจากการศึกษาพื้นที่สำหรับจัดเก็บวัตถุดิบของบริษัท ทำการเก็บข้อมูลรายการและปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต ศึกษากระบวนการจัดเก็บวัตถุดิบตั้งแต่การรับเข้าวัตถุดิบ การจัดเก็บวัตถุดิบเข้าคลังวัตถุดิบ การเบิกจ่ายวัตถุดิบ การรับคืนวัตถุดิบ การแสดงสถานะรายการและจำนวนวัตถุดิบคงเหลือ แล้วนำข้อมูลมาทำการปรับปรุงกระบวนการจัดเก็บวัตถุดิบของบริษัท เพื่อลดเวลาการค้นหาวัตถุดิบของแผนกผลิต

2.2.1 การวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา

งานวิจัยได้นำเทคนิคการตั้งคำถามทำไม-ทำไม มาทำการวิเคราะห์หาสาเหตุของการค้นหาวัตถุดิบเป็นเวลานาน โดยกำหนดหัวเรื่องที่ต้องการปรับปรุงและวิเคราะห์ควบคู่กับเทคนิค 3 GEN คือ Genba หรือการลงสำรวจพื้นที่จริง (คลังวัตถุดิบ) Genbutsu หรือการสังเกตวัสดุจริง (วัตถุดิบในคลังวัตถุดิบ) Genjitsu หรือสถานการณ์และเหตุการณ์จริง (ขั้นตอนการรับเข้า การเบิกจ่าย การรับคืนวัตถุดิบและสภาพแวดล้อมในการทำงาน) เพื่อป้องกันการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาที่ผิดพลาดและไม่สามารถแก้ไขปัญหาได้ตามวัตถุประสงค์ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 การวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาด้วยเทคนิคการตั้งคำถามทำไม ทำไม

2.2.2 การดำเนินการแก้ไขปัญหา

1) การกำจัดวัสดุที่ไม่ใช่วัตถุดิบออกจากพื้นที่คลังวัตถุดิบ

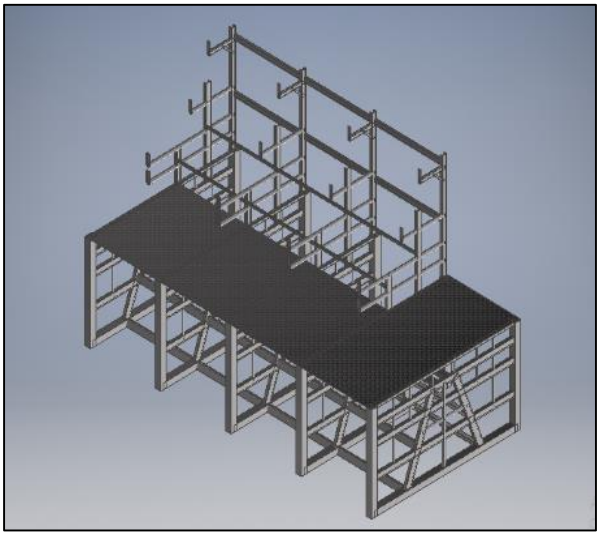
กิจกรรมสะสางเป็นกิจกรรมแรกของ 5ส. เป็นการแยกสิ่งของที่จำเป็นออกจากสิ่งของที่ไม่จำเป็นและกำจัดสิ่งของที่ไม่จำเป็นออกไปดังรูปที่ 5 ทั้งนี้เพื่อเพิ่มพื้นที่สำหรับจัดเก็บวัตถุดิบในคลังวัตถุดิบและลดการขยายพื้นที่คลังวัตถุดิบ โดยการแยกสิ่งของในคลังวัตถุดิบออกเป็น 3 กลุ่มคือ กลุ่มที่ 1 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต โดยพิจารณาปริมาณการใช้งานประกอบ กลุ่มที่ 2 วัตถุดิบ วัสดุ อุปกรณ์ที่ไม่ใช่วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต แต่ถ้ายังคงจำเป็นต้องใช้ในการผลิตในอนาคตให้จัดเก็บแยกไว้ แต่ถ้าไม่จำเป็นต้องใช้ในการผลิตในอนาคตให้ขายหรือทำลายทิ้ง กลุ่มที่ 3 วัตถุดิบ วัสดุ อุปกรณ์ที่ต้องรอผู้บริหารตัดสินใจเนื่องจากมูลค่าสูง การทำกิจกรรมสะสางทำให้พื้นที่สำหรับจัดเก็บวัตถุดิบเหลือเพียงวัตถุดิบกลุ่มที่ 1 คือ วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตเท่านั้น

2) การออกแบบและปรับปรุงชั้นวางวัตถุดิบ

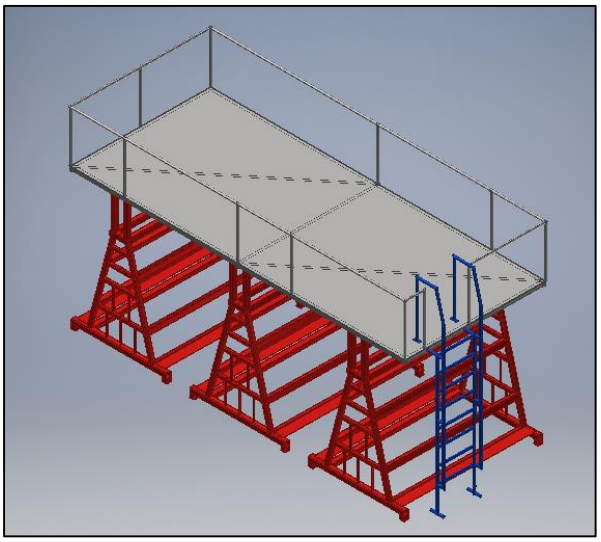
การลงสำรวจพื้นที่สำหรับจัดเก็บวัตถุดิบและสังเกตขั้นตอนการค้นหาวัตถุดิบของพนักงานผลิตด้วยเทคนิค 3 GEN พบว่าปริมาณของวัตถุดิบมีจำนวนมากกว่าขนาดของคลังวัตถุดิบที่สามารถรองรับได้ ทำให้การวางวัตถุดิบไม่เป็นระเบียบและปะปนกัน ดังนั้นการเพิ่มขนาดของคลังวัตถุดิบจำเป็นต้องทำการออกแบบปรับปรุงชั้นวางวัตถุดิบใหม่ให้เหมาะสม โดยมุ่งเน้นการเพิ่มพื้นที่แนวสูงดังรูปที่ 6 - 7 แต่การออกแบบต้องคำนึงถึงความแข็งแรงในการรับน้ำหนักวัตถุดิบและความปลอดภัยในการทำงานของพนักงาน การออกแบบจึงนำโปรแกรม Inventor มาช่วยคำนวณค่าความเค้นสูงสุด (Von Mises Stress) ของทุกจุดรับแรงดังรูปที่ 8 เพื่อนำมาคำนวณจำนวนของวัตถุดิบที่ชั้นวางวัตถุดิบสามารถรับน้ำหนักได้อย่างปลอดภัย



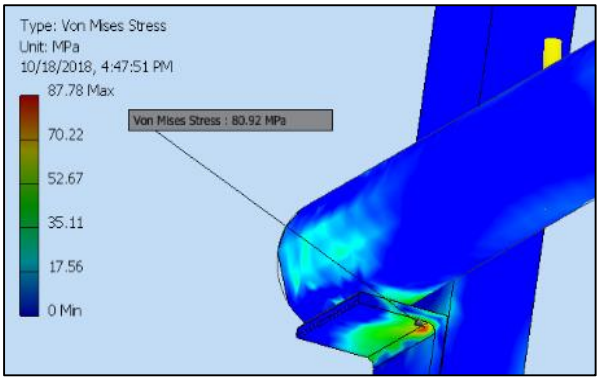
รูปที่ 5 การทำกิจกรรมสะสาง



รูปที่ 6 การออกแบบชั้นวางวัตถุดิบ คลัง ก



รูปที่ 7 การออกแบบชั้นวางวัตถุดิบ คลัง ค



รูปที่ 8 การตรวจสอบความสามารถในการรับน้ำหนัก

3) การกำหนดตำแหน่งการวางวัตถุดิบ

บริษัทแบ่งวัตถุดิบตามลักษณะของวัตถุดิบเป็น 3 ส่วน คือ เหล็กรูปพรรณ เหล็กแผ่น และเหล็กเพลา งานวิจัยทำการแบ่งวัตถุดิบดังกล่าวออกเป็น 3 กลุ่มย่อยตามประเภทของโลหะคือ เหล็กกล้า สแตนเลส และอะลูมิเนียม เพื่อศึกษาปริมาณการเคลื่อนไหววัตถุดิบ พบว่าวัตถุดิบกลุ่มเหล็กกล้ามีปริมาณการเคลื่อนไหววัตถุดิบออกจากคลังวัตถุดิบสูง (Fast Moving) วัตถุดิบกลุ่มสแตนเลสมีปริมาณการเคลื่อนไหววัตถุดิบออกจากคลังวัตถุดิบปานกลาง (Medium Moving) และกลุ่มอะลูมิเนียมมีปริมาณการเคลื่อนไหววัตถุดิบออกจากคลังวัตถุดิบต่ำ (Slow Moving) ดังตารางที่ 4 การวิเคราะห์ปริมาณการเคลื่อนไหววัตถุดิบทำให้สามารถกำหนดตำแหน่งการวางวัตถุดิบคือ สำหรับวัตถุดิบกลุ่มเหล็กกล้าที่มีปริมาณการเคลื่อนไหววัตถุดิบสูงควรกำหนดให้อยู่ในตำแหน่งที่สะดวก รวดเร็ว และปลอดภัยต่อการขนย้าย สำหรับวัตถุดิบกลุ่มอะลูมิเนียมเป็นวัตถุดิบที่มีค่าความหนาแน่นน้อย โดยค่าความหนาแน่นเฉลี่ยเท่ากับ 2,700 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ทำให้วัตถุดิบมีน้ำหนักเบาและปริมาณการเคลื่อนไหววัตถุดิบต่ำ ดังนั้นควรกำหนดให้อยู่ในตำแหน่งที่อยู่ด้านบนของคลังวัตถุดิบ และวัตถุดิบกลุ่มสแตนเลสเป็นวัตถุดิบที่มีน้ำหนักมาก เนื่องจากค่าความหนาแน่นเฉลี่ยเท่ากับ 8,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ดังนั้นควรกำหนดให้อยู่ในตำแหน่งที่อยู่ด้านล่างของคลังวัตถุดิบ โดยการคำนวณมวลของวัตถุดิบสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1

ตารางที่ 4 ปริมาณการเคลื่อนไหววัตถุดิบ (ร้อยละ)

ลักษณะของวัตถุดิบ	ประเภทของโลหะ		
	เหล็กกล้า	สแตนเลส	อะลูมิเนียม
เหล็กรูปพรรณ	72.1	20.7	7.2
เหล็กแผ่น	63.4	31.7	4.9
เหล็กเพลา	75.6	12.2	12.2

$$m = p.V \qquad (1)$$

เมื่อ m คือ มวล (กิโลกรัม)
p คือ ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
V คือ ปริมาตร (ลูกบาศก์เมตร)

เมื่อกำหนดตำแหน่งการวางวัตถุดิบตามปริมาณการเคลื่อนไหววัตถุดิบและน้ำหนักของวัตถุดิบแล้ว กิจกรรมสะดวกเป็นกิจกรรมลำดับที่สองของ 5ส. เป็นกิจกรรมการจัดวาง การจัดเก็บสิ่งของในสถานที่ทำงานอย่างเป็นระบบเพื่อประสิทธิภาพ คุณภาพ และความปลอดภัยในการทำงาน โดยนำมาใช้ควบคู่กับเทคนิคการควบคุมด้วยสายตาเพื่อให้พนักงานผลิตทราบตำแหน่งการวางวัตถุดิบที่ถูกต้อง ทำให้พนักงานผลิตสามารถเข้าใจและทำงานได้โดยง่าย ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 การกำหนดตำแหน่งการวางวัตถุดิบด้วยเทคนิคการควบคุมด้วยสายตา

4) การอบรมความรู้พื้นฐานวัตถุดิบ

อบรมความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิตของบริษัทให้กับพนักงานทุกคนเพื่อให้พนักงานเข้าใจสมบัติทางกล (Mechanical Properties) สมบัติทางเคมี (Chemical Properties) ของวัตถุดิบและสามารถแยกประเภท ชนิด และเกรดของวัตถุดิบได้ เมื่อพนักงานมีความรู้พื้นฐานของวัตถุดิบ ส่งผลทำให้พนักงานสามารถใช้งานและการจัดเก็บเข้าคลังวัตถุดิบอย่างถูกต้อง

การอบรมความรู้พื้นฐานวัตถุดิบแบ่งออกเป็น 4 หัวข้อหลักคือ 1) การแยกเกรดของวัตถุดิบกลุ่มเหล็กกล้า เพื่อให้พนักงานเข้าใจสมบัติทางกลของเหล็กกล้าแต่ละเกรดและสามารถเลือกใช้งานเหล็กกล้าได้อย่างถูกต้อง 2) การแยกเกรดของวัตถุดิบกลุ่มสแตนเลส (เหล็กกล้าไร้สนิม) ด้วยน้ำยาเคมี เพื่อให้พนักงานเข้าใจสมบัติทางเคมีของสแตนเลสที่มีเกรดแตกต่างกันเพราะการกำหนดเกรดของสแตนเลสมาจากส่วนผสมของธาตุที่ผสมลงไปในสแตนเลส โดยปริมาณและจำนวนส่วนผสมของธาตุที่แตกต่างกันย่อมส่งผลต่อสมบัติทางกลของสแตนเลสด้วย และเพื่อให้พนักงานสามารถเลือกเกรดสแตนเลสได้อย่างถูกต้อง 3) การคำนวณน้ำหนักวัตถุดิบด้วยค่าความหนาแน่น (Density) ดังสมการที่ 1 และการหาน้ำหนักของวัตถุดิบด้วยหนังสือตารางเหล็ก [14] 4) ความปลอดภัยในการเคลื่อนย้ายและการจัดเก็บวัตถุดิบ เพราะการเคลื่อนย้ายและจัดเก็บวัตถุดิบที่ไม่ถูกวิธีอาจทำให้เกิดอันตรายต่อพนักงานและวัตถุดิบได้ การอบรมมุ่งเน้นการใช้งานรถลากพาเลท (Hand Pallet Truck) รถยก (Forklift) และเครนเหนือศีรษะ (Overhead Crane) อย่างถูกต้องและปลอดภัย

5) การสร้างระบบบันทึกรายการวัตถุดิบ

การที่บริษัทไม่มีระบบบันทึกการรับเข้า การเบิกจ่าย การรับคืนวัตถุดิบ ทำให้พนักงานที่เกี่ยวข้องกับวัตถุดิบไม่ทราบสถานะของรายการและปริมาณวัตถุดิบคงเหลือในคลังวัตถุดิบ อาทิ วิศวกรออกแบบ พนักงานจัดซื้อ หัวหน้าแผนกผลิตและพนักงานผลิต ส่งผลให้แผนกวิศวกรรมที่ทำหน้าที่ออกแบบไม่สามารถนำวัตถุดิบที่มีอยู่ในคลังวัตถุดิบมาร่วมออกแบบได้ และเมื่อแผนกวิศวกรรมส่งแบบสำหรับการผลิต เอกสารประเมินรายการและปริมาณการใช้วัตถุดิบให้แผนกผลิต พนักงานผลิตจะทำการค้นหาวัตถุดิบตามเอกสารที่กำหนด ในกรณีที่มีรายการและปริมาณวัตถุดิบเพียงพอพนักงานแผนกผลิตต้องทำการค้นหาวัตถุดิบเพื่อที่จะนำวัตถุดิบออกจากคลังวัตถุดิบไปใช้ในการผลิต ลักษณะการทำงานดังกล่าวทำให้แผนกผลิตสูญเสียเวลาการผลิตไปกับการค้นหาวัตถุดิบเป็นอย่างมาก แต่ในกรณีที่ไม่มีวัตถุดิบตามรายการหรือมีปริมาณวัตถุดิบไม่เพียงพอ พนักงานจะแจ้งปัญหาต่อหัวหน้าแผนกผลิตเพื่อเร่งออกคำสั่งซื้อวัตถุดิบแบบเร่งด่วน ลักษณะการทำงานดังกล่าวส่งผลกระทบต่อบริษัทหลายด้าน อาทิ พนักงานจัดซื้อต้องเร่งออกคำสั่งซื้อวัตถุดิบ เร่งการจัดส่งวัตถุดิบของผู้ผลิต แผนกผลิตต้องปรับเปลี่ยนแผนการผลิตเนื่องจากวัตถุดิบไม่เพียงพอต่อการผลิต แผนกการตลาดต้องเลื่อนวันส่งมอบสินค้าของลูกค้า

โปรแกรม Microsoft Excel ถูกนำมาใช้ออกแบบระบบบันทึกการรับเข้า การเบิกจ่าย และการรับคืนวัตถุดิบของบริษัท โดยแบ่งโปรแกรมออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 ส่วนบันทึกฐานข้อมูลวัตถุดิบทำหน้าที่บันทึกรหัสวัตถุดิบ รายการวัตถุดิบทั้งหมดของบริษัท พนักงานสามารถเพิ่มเติมรายการวัตถุดิบได้ตามที่ต้องการและสามารถทราบรายการและปริมาณวัตถุดิบคงเหลือในคลังวัตถุดิบแบบทันทีได้ในส่วนดังกล่าวดังรูปที่ 10 ส่วนที่ 2 ส่วนบันทึกปริมาณการเคลื่อนไหวของวัตถุดิบทำหน้าที่บันทึกการรับเข้าวัตถุดิบจากผู้ผลิต บันทึกการเบิกวัตถุดิบของแผนกผลิตและบันทึกการรับคืนวัตถุดิบดังรูปที่ 11 โดยทั้ง 2 ส่วนเชื่อมโยงข้อมูลต่อกันด้วยคำสั่งในโปรแกรม อาทิ คำสั่ง VLOOKUP, คำสั่ง SUMIF และสูตรทางคณิตศาสตร์

การสร้างระบบบันทึกการรับเข้า การเบิกจ่าย การรับคืนวัตถุดิบของบริษัท บริษัทกำหนดให้พนักงานจัดซื้อรับผิดชอบการบันทึกรายการรับเข้าตามเอกสารใบส่งของของผู้ผลิตแบบทันทีและกำหนดให้พนักงานผลิตเมื่อทำการเบิกวัตถุดิบต้องเขียนเอกสารเบิกวัตถุดิบให้กับพนักงานจัดซื้อเพื่อทำหน้าที่ตัดรายการวัตถุดิบออกจากคลังวัตถุดิบ

สำหรับกรณีวัตถุดิบเหลือจากการผลิตให้พนักงานผลิตเขียนเอกสารคืนวัตถุดิบให้กับพนักงานจัดซื้อเพื่อทำหน้าที่เพิ่มรายการวัตถุดิบเข้าคลังวัตถุดิบ ระบบบันทึกการรับเข้าการเบิกจ่าย การรับคืนวัตถุดิบทำให้พนักงานทุกส่วนงานที่เกี่ยวข้องสามารถตรวจสอบรายการและปริมาณวัตถุดิบในคลังวัตถุดิบแบบทันทีผ่านระบบเครือข่ายคอมพิวเตอร์ของบริษัท

	A	B	E	F
1	รายการข้อมูลวัตถุดิบในคลังวัตถุดิบ			
2	รหัสวัตถุดิบ	รายการวัตถุดิบ	คงเหลือ ณ 1/7/2562	
3	A001	เหล็กกล่อง 1/2"x1/2"x1.6t	3	
4	A002	เหล็กกล่อง 3/4"x3/4"x1.6t	19	
5	A003	เหล็กกล่อง 3/4"x3/4"x2.0t	1	
6	A004	เหล็กกล่อง 1-1/2"x1-1/2"x2.3t	1	
7	A005	เหล็กกล่อง 2"x2"x4.5t	1	
8	A006	เหล็กกล่อง 2"x2"x6.0t	1	
9	A007	เหล็กกล่อง 2-1/2"x2-1/2"x3.2t	5	
10	B002	เหล็กฉาก 25x25x3t	20	
11	B003	เหล็กฉาก 25x25x5t	6	
12	B004	เหล็กฉาก 40x40x5t	3	
13	B018	เหล็กฉาก 50x50x4t	3	
14	B019	เหล็กฉาก 50x50x5t	7	
15	B020	เหล็กฉาก 65x65x6t	9	
16	C009	เหล็กแผ่นขาว 1.6tx4'x8'	15	
17	C010	เหล็กแผ่นขาว 2.3tx4'x8'	26	
18	C011	เหล็กแผ่นขาว 3.2tx4'x8'	19	
19	C012	เหล็กแผ่นดำ 6tx4'x8'	1	
20	C013	เหล็กแผ่นดำ 9tx4'x8'	21	
21	D001	เหล็กแผ่นลาย 2tx4'x8'	10	
22	D002	เหล็กแผ่นลาย 3tx4'x8'	4	
23	E001	เหล็กเพลากลม 1"	2	

ฐานข้อมูลวัตถุดิบ | ปริมาณการเคลื่อนไหวของวัตถุดิบ

รูปที่ 10 ส่วนบันทึกฐานข้อมูลวัตถุดิบ

	A	B	C	D	E	F
1	ตารางบันทึกข้อมูล					
2	การรับเข้า การเบิกจ่าย การรับคืนวัตถุดิบ					
3	วัน/เดือน/ปี	รหัสวัสดุ	รายการวัตถุดิบ	รับเข้า-รับคืน	เบิกจ่าย	หมายเหตุ
4	17/6/62	A002	เหล็กกล่อง 3/4"x3/4"x1.6t	20		PO1906-002
5	17/6/62	A004	เหล็กกล่อง 1-1/2"x1-1/2"x2.3t		2	PD19-06-025
6	17/6/62	A002	เหล็กกล่อง 3/4"x3/4"x1.6t		18	PD19-06-025
7	18/6/62	D017	เหล็กเพลาเหลี่ยม 1"x2"	15		PO1906-014
8	18/6/62	E001	เหล็กเพลากลม 1"	10		PO1906-014
9	19/6/62	E001	เหล็กเพลากลม 1"		8	PD19-06-026
10	19/6/62	C010	เหล็กแผ่นขาว 2.3tx4'x8'	30		PO1906-013
11	21/6/62	D017	เหล็กเพลาเหลี่ยม 1"x2"		15	PD19-06-027
12	22/6/62	C012	เหล็กแผ่นดำ 6tx4'x8'	5		PO1906-015
13	22/6/62	C012	เหล็กแผ่นดำ 6tx4'x8'		4	PD19-06-028
14	24/6/62	D019	เหล็กเพลาเหลี่ยม 1 1/2"x2"		6	PD19-06-029
15	25/6/62	E003	เหล็กเพลาเหลี่ยม 1"x1"	25		PO1906-010
16	26/6/62	C010	เหล็กแผ่นขาว 2.3tx4'x8'		22	PD19-06-030
17	27/6/62	D016	เหล็กเพลาเหลี่ยม 2"x2"		5	PD19-06-031
18	27/6/62	D017	เหล็กเพลาเหลี่ยม 1"x2"		2	PD19-06-031
19	27/6/62	B002	เหล็กฉาก 25x25x3t	15		PO1906-016
20	28/6/62	A001	เหล็กกล่อง 1/2"x1/2"x1.6t		2	PD19-06-032
21	28/6/62	A002	เหล็กกล่อง 3/4"x3/4"x1.6t		3	PD19-06-032
22	29/6/62	A003	เหล็กกล่อง 3/4"x3/4"x2.0t		2	PD19-06-033

ฐานข้อมูลวัตถุดิบ | ปริมาณการเคลื่อนไหวของวัตถุดิบ

รูปที่ 11 ส่วนบันทึกปริมาณการเคลื่อนไหววัตถุดิบ

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

3.1 ผลการวิจัย

การปรับปรุงกระบวนการจัดเก็บวัตถุดิบของบริษัทกรณีศึกษาโดยการนำกิจกรรม 5ส. คือ สะสางมาแยกวัตถุดิบ วัสดุ อุปกรณ์ สิ่งของที่ไม่จำเป็นต่อการทำงานและกำจัดสิ่งของเหล่านั้นออกไปจากพื้นที่การทำงาน ทำให้ความหนาแน่นของวัตถุดิบในพื้นที่สำหรับจัดเก็บวัตถุดิบลดลง การออกแบบและปรับปรุงชั้นวางวัตถุดิบทำให้สามารถเพิ่มขนาดของคลังวัตถุดิบของคลัง ก และคลัง ค ดังตารางที่ 5 การแบ่งกลุ่มวัตถุดิบตามปริมาณการเคลื่อนไหวและการนำเทคนิคการควบคุมด้วยสายตามาช่วยสื่อสารกับพนักงานด้วยรูปภาพแทนการสื่อสารด้วยชื่อของวัตถุดิบเพียงอย่างเดียว ทำให้พนักงานสามารถทราบตำแหน่งการวางวัตถุดิบและสามารถจัดเก็บวัตถุดิบได้โดยง่ายและถูกต้อง การอบรมความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับวัตถุดิบทำให้พนักงานสามารถใช้งานวัตถุดิบและจัดเก็บเข้าคลังวัตถุดิบอย่างถูกต้อง และการสร้างระบบบันทึกรายการวัตถุดิบด้วยโปรแกรม Microsoft Excel ทำให้พนักงานทุกคนสามารถทราบรายการและปริมาณวัตถุดิบคงเหลือในคลังวัตถุดิบแบบทันทีและสามารถลดเวลาการค้นหาวัตถุดิบของพนักงานผลิตดังแสดงในตารางที่ 6-7

ตารางที่ 5 ผลการเปรียบเทียบขนาดของคลังวัตถุดิบ (ลบ.ม.)

คลังวัตถุดิบ	ปริมาตรคลังวัตถุดิบ		เพิ่มขึ้น (ร้อยละ)
	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง	
คลัง ก	12.76	17.76	39.19
คลัง ข	4.05	4.05	-
คลัง ค	1.25	4.01	220.80
รวม	18.06	25.82	42.97

ตารางที่ 6 ผลการเปรียบเทียบเวลาการค้นหาวัตถุดิบ (นาที)

คลังวัตถุดิบ	เวลาการค้นหาวัตถุดิบ		ลดลง (ร้อยละ)
	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง	
คลัง ก	9.00	1.16	87.11
คลัง ข	5.40	1.14	78.89
คลัง ค	3.60	1.04	71.11

ตารางที่ 7 เวลาการค้นหาวัตถุดิบหลังปรับปรุง

คลังวัตถุดิบ	ปริมาณการค้นหาวัตถุดิบ (ครั้งต่อเดือน)	เวลาการค้นหาวัตถุดิบ (นาทีต่อครั้ง)	เวลาการค้นหาวัตถุดิบ (นาทีต่อเดือน)
คลัง ก	37	1.16	42.92
คลัง ข	13	1.14	14.82
คลัง ค	13	1.04	13.52
รวม			71.26

3.2 การอภิปรายผลการวิจัย

จากผลงานวิจัยเรื่องการปรับปรุงกระบวนการจัดเก็บวัตถุดิบของบริษัทกรณีศึกษาด้วยเทคนิควิศวกรรมอุตสาหการได้นำเทคนิค 3 GEN มากำหนดแนวทางการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาร่วมกับเทคนิคการตั้งคำถามทำไม-ทำไม ทำให้สามารถวิเคราะห์สาเหตุรากเหง้าของปัญหาได้ครบถ้วนและถูกต้อง สำหรับการดำเนินการแก้ไขปัญหานำกิจกรรมสะสางมากำจัดวัตถุดิบ วัสดุ อุปกรณ์และสิ่งของที่ไม่จำเป็นต่อการทำงานออกจากพื้นที่การทำงาน นำกิจกรรมสะดวกและเทคนิคการควบคุมด้วยสายตามาปรับปรุงพื้นที่การทำงาน โดยผลการวิจัยสอดคล้องกับงานวิจัยที่นำมาอ้างอิง สำหรับการออกแบบระบบบันทึกรายการวัตถุดิบได้ทำการเพิ่มระบบบันทึกการรับคืนวัตถุดิบที่เหลือจากการผลิต ทำให้ระบบบันทึกรายการวัตถุดิบสมบูรณ์ สามารถแสดงรายการและจำนวนวัตถุดิบคงเหลืออย่างถูกต้อง

4. บทสรุป

การนำเทคนิควิศวกรรมอุตสาหการมาปรับปรุงกระบวนการบันทึกรับเข้าวัตถุดิบ การจัดเก็บวัตถุดิบเข้าคลังวัตถุดิบ การเบิกจ่ายวัตถุดิบ การรับคืนวัตถุดิบ การแสดงสถานะรายการและจำนวนวัตถุดิบคงเหลือ ทำให้สามารถเพิ่มขนาดของคลังวัตถุดิบจาก 18.06 ลูกบาศก์เมตร เป็น 25.82 ลูกบาศก์เมตร หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 42.97 และเมื่อคำนวณเวลาการค้นหาวัตถุดิบในคลังวัตถุดิบรายเดือน โดยใช้ข้อมูลปริมาณการค้นหาวัตถุดิบเฉลี่ยก่อนปรับปรุงมาทำการคำนวณ พบว่าบริษัทสูญเสียเวลาการผลิตไปกับเวลาการค้นหาวัตถุดิบลดลงจาก 450 นาทีต่อเดือน เป็น 71.26 นาทีต่อเดือน หรือลดลงร้อยละ 84.16

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่สนับสนุนโปรแกรม Inventor และขอขอบคุณนายสันติชัย สีทา และนายพรประชา นรารัมย์ นักศึกษาภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สำหรับการเก็บข้อมูลการเขียนแบบและการประสานงานกับบริษัท

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Thavornwat C, Boonchujarud S. The reduce time of finding raw materials in warehouse using industrial engineering techniques. In: Rajamangala manufacturing & management technology conference 2019 precision manufacturing, materials and industrial education; 2019 May 30-31; The Empress hotel. Chiang Mai: p. 509-515.Thai.

[2] Ogura H. Why-Why analysis. 7th ed. Bangkok: Technology promotion association (Thailand-Japan); 2007.Thai.

[3] Mallikarjun K, Venkata Subbaiah K. Problem solving management using six sigma tools & techniques. IJSTR [Internet]. 2014 [cited 2018 Mar 9]; 3:91-93. Available from: http://www.ijstr.org /research - paper - publishing.php?month=feb2014

[4] Sooksai T. The efficiency enhancement of warehouse space management with ABC analysis : a case study of ABC Company Limited. ICBTS [Internet]. 2019 [cited 2019 Dec 28]; 162- 168. Available from: http: / / www. ijbts-journal. com/ images/ main_1366796758/ V19-30% 20 Tommanee%20Sooksai%202.pdf.

[5] Wirani AP, Saroso DS, Purba HH. Innovation of quality improvement to reduce weld defect through six sigma methods in the fabrication process of power plant component. TICATE [Internet]. 2020 [cited 2020 July 30]; 852: 1- 8. Available from: https: //iopscience. iop. org/ article/10.1088/1757-899X/852/1/012064/ meta

[6] Songjakkaew K. Applying 5G principles to production human. TPA news. 2012; 17(192): 49-50.Thai.

[7] Khunphonkaew J, Basic productivity improvement. 6th ed. Bangkok: Thailand productivity Institute; 2007.Thai.

[8] Filipand FC, Marascu-Klein V. The 5S lean method as a tool of industrial management performances. ModTech [Internet]. 2015 [cited 2018 Mar 12]; 95:1-6. Available from: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/95/1/012127.

[9] The productivity development team. Just-in-Time for operators. 1st ed. Bangkok: E.I. Square; 2006.Thai.

[10] Kaewchur P, Sudjit T, Suppasert T, Boonsan S, Saiyawut S, Phoolsawat S, Reduction in raw materials inventories : a case study of a company. In: Proceedings IE network conference 2017 industry 4.0 challenges for Thailand; 2017 July 12-15; The Empress hotel. Chiang Mai: 2017. p. 1407-1412.Thai.

[11] Phuansongkram P, Charchai W, Suktakue W, Pipattanasuk G, Kanphan C. Productivity of inventory and warehousing management systems : a case study of Holm Machinery Asia Co., Ltd. In: Proceedings IE network 2016 conference local industrial innovations for global community; 2016 July 7-8; Kosa hotel. Khin Kaen: 2016. p. 699-705.Thai.

[12] Sakhon S, Weerapong P. An increased efficiency of inventory management: a case study of JKL Co., Ltd. In: The 5th Phuket Rajabhat University Conference Proceeding Developing the Quality of Thai Research to the International standards; 2015 December 17-18; Phuket Rajabhat University convention center. Phuket: 2015. p. 413-423.Thai.

[13] Junhavat K, Srinon R. Efficiency improvement of warehouse management a case of Chaokrompoe pharmacies. In: The 16th Thai value chain management & logistics conference; 2016 August 25-26; Century Park hotel. Bangkok: 2016.Thai.

[14] Triamchaisri T. Steel table for contractors and engineers. 2nd ed. Bangkok: Tee group of engineers; 1983.Thai.

กลไกการเกิดรอยเส้นและการแก้ปัญหาในกระบวนการพับขึ้นโลหะแผ่น

Marking Lines Mechanism and Problem Solving in the Sheet Metal Bending Process

ณัฐชานันท์ อังศุเศรณี [1] และภาสพิรุฬห์ วัชรศรีสำเริง [2 *]
[1] สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
60 ถนนสายเอเชีย ตำบลหันตรา อำเภอพระนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา 13000
[2] ศูนย์เทคโนโลยีแม่พิมพ์ (TDTC) คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
7/1 ถนนนนทบุรี 1 ตำบลสวนใหญ่ อำเภอเมือง จังหวัดนนทบุรี 11000
Natchanun Angsuseranee[1] and Bhadpiroon Watcharasresomroeng[2 *]
[1] Department of Manufacturing Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi
60 Asian Highway Road, Huntra, Phranakhon Si Ayutthaya, Thailand, 13000
[2] Tool and Die Technology Center (TDTC), Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi
7/1 Nonthaburi 1 Road, Suanyai, Muang, Nonthaburi, Thailand, 11000
[*]ผู้รับผิดชอบบทความ: bhadpiroon.s@rmutsb.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 09-2289-1951

Received: 4 August 2019, Revised: 11 October 2020, Accepted: 30 October 2020

บทคัดย่อ
บทความนี้เสนอแนวทางการแก้ปัญหาการเกิดรอยเส้นบนชิ้นงานโลหะแผ่นเกรด SPCC (JIS) ที่ผ่านการพับขึ้นรูปผลิตเป็นชิ้นส่วนตู้ไฟฟ้าเพื่อลดขั้นตอนการขัดลบรอยเส้นบนผิวชิ้นงานดังกล่าวก่อนการพ่นสี การศึกษากลไกการเกิดรอยเส้นบนชิ้นส่วนดังกล่าวใช้การจำลองการทำงานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการพับขึ้นรูปวัสดุชิ้นงาน จากการศึกษาพบว่าเมื่อโลหะแผ่นได้รับแรงจากพันช์พาชิ้นงานลงไปในดาย ที่บริเวณบ่าดายโลหะแผ่นจะเกิดการเลื่อนเพื่อยกตัว ทำให้ผิวของโลหะแผ่นเกิดการครูดกับบ่าดายเกิดเป็นรอยเส้นตลอดแนวการพับขึ้นรูปบนผิวชิ้นงานที่สัมผัสกับบ่าดายดังกล่าว แนวทางการแก้ปัญหาที่นำเสนอประกอบด้วย: (1) การใช้สารหล่อลื่น (2) การเคลือบผิวดายด้วยฟิล์มแข็งบาง และ (3) การใช้แผ่นโพลีเอทิลีนวางระหว่างผิวดายกับผิวชิ้นงานขณะทำการพับขึ้นรูป ซึ่งทั้งสามแนวทางมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติทางไตรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสแม่พิมพ์กับชิ้นงานที่ถูกพับขึ้นรูป จากการเปรียบเทียบผิวชิ้นงานโลหะแผ่นที่ผ่านการพับขึ้นรูปพบว่า แนวทางที่ (3) มีประสิทธิภาพสูงสุดในการป้องกันรอยเส้นที่เกิดบนชิ้นงานหลังการพับขึ้นรูปโดยมีต้นทุนการผลิตจากการป้องกันการเกิดรอยเส้นโดยวิธีดังกล่าว 0.21 บาท/ชิ้น สามารถลดขั้นตอนและพนักงานในสายการผลิตชิ้นส่วนตู้ไฟฟ้าไปได้ 1 สถานีงาน ทำให้เวลาการผลิตรวมของชิ้นส่วนดังกล่าวลดลง 22 วินาที/ชิ้น รวมถึงสามารถลดโอกาสที่จะเกิดของเสียจากขั้นตอนการขัดลบรอยเส้นบนชิ้นงานหลังการพับขึ้นรูป
คำสำคัญ รอยเส้น การพับขึ้นรูป โลหะแผ่น

Abstract
This article proposes ways to solve the marking lines problem on sheet metal workpieces graded SPCC (JIS) that have been bent to produce electrical cabinet parts, thereby minimizing the polishing process required to remove the marking lines on the workpiece surface before painting. The mechanism of the marking lines occurring on such parts was studied using simulation by finite element method for bending the workpiece material. The studies have shown that when sheet metal is exposed to force from punch, it takes the workpiece into the die. At the die shoulder area, the sheet metal will slide to raise, causing the surface of the sheet metal to be scratched with the die shoulder thus creating marking lines along the bending line on the surface of the workpiece in contact with the die shoulder. The proposed solution consists of: (1) using lubricant, (2) coating

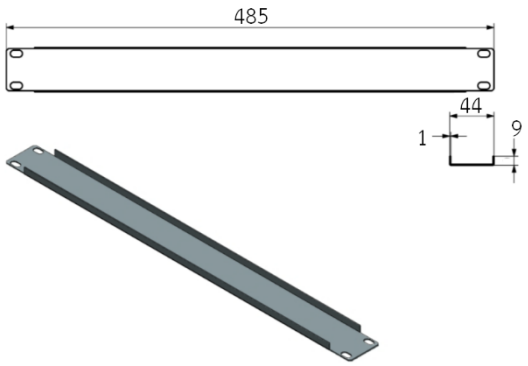
the die with a hard-thin film and (3) the use of a polyethylene sheet between the die and the workpiece surface while bending. All these methods are aimed at improving the tribological properties between the contact surfaces of the die and the workpiece. According to the comparison of the workpiece surfaces that have been bent, it has revealed that method (3) is the most effective in preventing making lines that occur on the workpiece after bending. It can also reduce the process of adjusting the workpiece surface through bending. The production cost to prevent marking lines by the above method is 0.21 baht/piece, however the process and operator in the electrical cabinet production line can also be reduced to 1 work station, resulting in a reduction of the total production time of such parts to 22 sec/piece. It can also reduce the chance of waste from the process of polishing to remove the marking lines on the workpiece surface after bending.

Keywords: Marking Line, Bending, Sheet Metal

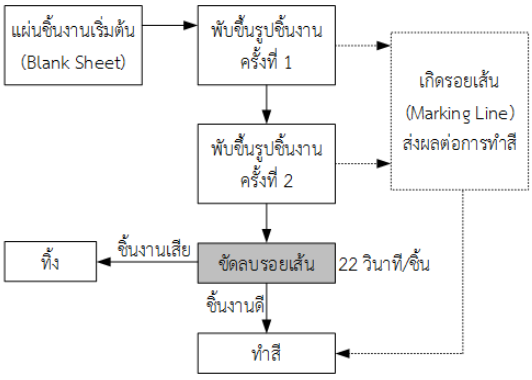
1. บทนำ

ชิ้นส่วนตู้ไฟฟ้า (Electrical Cabinet Part) ของบริษัทกรณีศึกษาทำจากโลหะแผ่นเกรด SPCC ตามมาตรฐาน JIS มีความหนา 1 มิลลิเมตร ถูกขึ้นรูป (Forming) ด้วยกระบวนการพับขึ้นรูป (Bending) เพื่อให้มีรูปทรงเป็นไปตามแบบชิ้นงานที่ต้องการผลิตดังรูปที่ 1 โดยปัจจุบันมีขั้นตอนการผลิตชิ้นงานดังกล่าวตามแผนภูมิกระบวนการผลิตดังรูปที่ 2

จากแผนภูมิกระบวนการผลิตชิ้นส่วนตู้ไฟฟ้าในปัจจุบันพบว่า การพับขึ้นรูปชิ้นงานแต่ละครั้งส่งผลให้ชิ้นงานหลังการพับขึ้นรูปเกิดรอยเส้น (Marking Lines) ขึ้นที่ผิวของชิ้นงานดังรูปที่ 3 จึงจำเป็นต้องขัดตบแต่งลบรอยเส้นที่เกิดขึ้นเพื่อป้องกันการมองเห็นรอยดังกล่าวหลังการนำชิ้นงานไปผ่านกระบวนการทำสี ซึ่งจากรูปที่ 2 การขัดตบแต่งลบรอยเส้นที่เกิดขึ้นเป็นการเพิ่มขั้นตอนการทำงานที่ต้องใช้เวลาในกระบวนการนี้ 22 วินาที/ชิ้น โดยใช้พนักงานจำนวน 1 คน ทั้งนี้จากข้อมูลการผลิตในการขัดตบแต่งลบรอยเส้นจะมีความผิดพลาดที่ก่อให้เกิดของเสียจากการทำงานที่ผิดพลาดร้อยละ 2 ทำให้เสียทรัพยากรการผลิตในขั้นตอนนี้ ดังนั้นโรงงานกรณีศึกษาจึงมีความต้องการแก้ปัญหารอยเส้นที่เกิดจากกระบวนการพับขึ้นรูปนี้เพื่อลดพนักงานและขั้นตอนกระบวนการขัดตบแต่งลบรอยเส้น



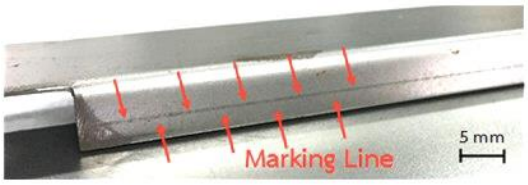
รูปที่ 1 แบบชิ้นงานที่ต้องการผลิต (หน่วย: มิลลิเมตร)



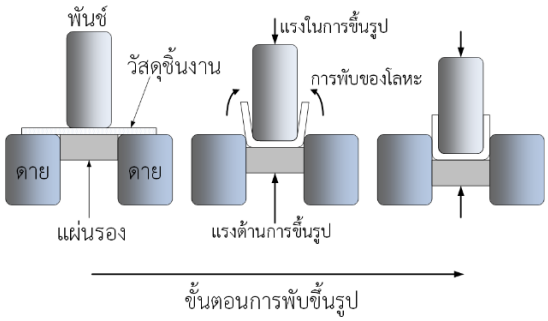
รูปที่ 2 แผนภูมิกระบวนการผลิตชิ้นส่วนตู้ไฟฟ้า

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การพับขึ้นรูป เป็นกระบวนการผลิตพื้นฐานที่สำคัญในการเปลี่ยนรูปทรงหรือรูปร่างของโลหะแผ่น (Sheet Metal) ให้เป็นไปตามที่ต้องการ เพื่อผลิตเป็นชิ้นส่วนหรือผลิตภัณฑ์โลหะ ในกระบวนการพับขึ้นรูปอาจแบ่งประเภทของการพับตามลักษณะของชิ้นงานที่ถูกพับ เช่น การพับขึ้นรูปตัวยู (U-Bending) และการพับขึ้นรูปตัววี (V-Bending) เป็นต้น



รูปที่ 3 รอยเส้นบนชิ้นงานที่เกิดจากกระบวนการพับขึ้นรูป



รูปที่ 4 ลักษณะของกระบวนการพับขึ้นรูปตัวยู [1]

ลักษณะของกระบวนการพับขึ้นรูปตัวยูแสดงดังรูปที่ 4 ซึ่งทั้งกระบวนการพับขึ้นรูปตัวยูและการพับขึ้นรูปตัววีจะใช้เครื่องมือ (Tool) ที่เรียกว่า “แม่พิมพ์” ที่ประกอบด้วยชิ้นส่วนหลัก คือ พันช์ (Punch) กับดาย (Die) แต่ในกรณีของแม่พิมพ์พับขึ้นรูปตัวยูอาจมีแผ่นรอง (Pad) ชิ้นงาน เพื่อป้องกันการแอ่นตัวของชิ้นงานขณะทำการพับขึ้นรูป

จากรูปที่ 4 ในขั้นตอนแรก วัสดุชิ้นงานซึ่งเป็นโลหะแผ่นหรือแผ่นชิ้นงานเริ่มต้น (Blank Sheet) จะถูกวางไว้บนดาย โดยมีพันช์ที่ได้รับแรงในการขึ้นรูปจากเครื่องเพรส (Press Machine) ลากพาชิ้นงานโลหะแผ่นทำให้เกิดการพับบริเวณมุมของดายหรือบ่าดาย (Die Shoulder) กับมุมของพันช์ ในขณะที่พันช์ยังคงเคลื่อนที่ลากพาชิ้นงานให้ไหลตัวเข้าไปในดายโดยมีแผ่นรองออกแรงต้าน (โดยทั่วไปแรงที่ให้กับแผ่นรองมักใช้แรงจากสปริง) จนการพับขึ้นรูปโลหะแผ่นเสร็จสิ้น

โดยทั่วไปชิ้นส่วนหลักของแม่พิมพ์นิยมทำจากเหล็กกล้าเครื่องมือ (Tool Steel) แล้วทำการชุบแข็ง (Hardening) ด้วยกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อต้องการเพิ่มอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ [1] เหล็กกล้าเครื่องมือที่นิยมใช้ทำพันช์กับดาย ได้แก่ เหล็กกล้าเครื่องมือ เกรด SKD11 ตามมาตรฐาน JIS สำหรับทำการขึ้นรูปโลหะที่ไม่ใช้อุณหภูมิช่วยในการขึ้นรูปหรือการขึ้นรูปเย็น (Cold Forming) และเหล็กกล้าเครื่องมือเกรด SKD61 ตามมาตรฐาน JIS สำหรับทำการขึ้นรูปโลหะที่ใช้อุณหภูมิช่วยในการขึ้นรูปหรือการขึ้นรูปร้อน (Hot Forming)

ปัญหาหลักของกระบวนการพับขึ้นรูป คือ รูปทรงของชิ้นงานหลังการพับขึ้นรูปไม่เป็นไปตามที่ออกแบบไว้เนื่องจากปัญหาการดีดตัวกลับ (Spring-Back) และการเกิดผนังของชิ้นงานโค้ง (Sidewall-Curl) โดยเฉพาะกับการพับขึ้นรูปโลหะแผ่นที่มีค่าความแข็งแรงสูง เช่น เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง (High Strength Steel; HSS) [1-5] รวมถึงปัญหาคุณภาพผิวของชิ้นงานหลังการพับขึ้นรูป เช่น กรณีพับขึ้นรูปเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงจะพบการเกาะติด (Adhesion) ของวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงบนผิวแม่พิมพ์ทำให้การพับขึ้นรูปชิ้นงานชิ้นต่อไปเกิดรอยเส้นที่ผิวชิ้นงานจากการครูดเนื้อวัสดุชิ้นงานของอนุภาควัสดุชิ้นงานที่เกาะติดบนผิวดายได้เอง

Sresomroeng et al. [6] ทดลองพับขึ้นรูปตัวยูด้วยแม่พิมพ์ที่ทำจากวัสดุเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น เกรด SKD11 (JIS) ผ่านการชุบแข็งที่ค่าความแข็ง 60±2 HRC แล้วเปรียบเทียบกับแม่พิมพ์ที่เคลือบด้วยฟิล์มแข็งบาง (Hard Thin Film Coating) ภายใต้กระบวนการเคลือบผิวด้วยไอทางกายภาพ (Physical Vapor Deposition; PVD) ในกลุ่มฟิล์มที่มีไนโตรเจนเป็นธาตุประกอบ เช่น ฟิล์มแข็งบางชนิด TiN TiCN TiAlN และ CrN เพื่อป้องกันการเกาะติดของวัสดุชิ้นงานบนผิววัสดุทำแม่พิมพ์ในการพับขึ้นรูปตัวยูวัสดุกลุ่มเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงโดยไม่ใช้สารหล่อลื่น (Dry Condition) และได้เปรียบเทียบผลการศึกษากับฟิล์มแข็งบางในกลุ่มฟิล์มที่มีโครงสร้างคล้ายเพชร (Diamond-like Carbon; DLC) จากการศึกษาพบว่า ฟิล์มแข็งทุกชนิดที่เลือกใช้สามารถป้องกันการเกาะติดของอนุภาควัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงบนผิวแม่พิมพ์พับขึ้นรูป โดยสามารถพับขึ้นรูปวัสดุดังกล่าวได้มากกว่า 500 ชิ้น ในขณะที่พบการเกาะติดของอนุภาควัสดุชิ้นงานตั้งแต่การพับขึ้นรูปในช่วงแรกบนผิวแม่พิมพ์เหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นเกรด SKD11 (JIS) ที่ผ่านการชุบแข็งแต่ไม่ได้ทำการเคลือบผิวด้วยฟิล์มแข็งบาง ส่งผลให้อนุภาควัสดุชิ้นงานที่เกาะติดบนผิวแม่พิมพ์ครูดเนื้อวัสดุชิ้นงานจนเป็นรอยลึกเกินค่าที่ยอมรับได้เมื่อผ่านการพับขึ้นรูปไปจำนวน 49 ชิ้น จากผลการศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการเคลือบฟิล์มแข็งบางบนผิววัสดุทำแม่พิมพ์สามารถป้องกันการเกาะติดของอนุภาควัสดุชิ้นงานบนผิวแม่พิมพ์พับขึ้นรูปได้ ทั้งนี้ปัจจัยความสำเร็จในการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ที่เคลือบฟิล์มแข็งบางอยู่ที่ความสามารถในการยึดเกาะ (Bonding Strength) ของฟิล์มแข็งบางที่เคลือบกับผิวของวัสดุทำแม่พิมพ์ เนื่องจากพบการลอกหลุดของฟิล์มแข็งบางหลังจากพับขึ้นรูปชิ้นงานไป 500 ชิ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kim et al. [7] ที่ศึกษาพฤติกรรมการเกิดการเกาะติดของอนุภาควัสดุชิ้นงานในการขึ้นรูปเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษ (Advanced High Strength Steel; AHSS) ด้วยการทดสอบแบบ Twist Compression Test (TCT) และพบว่าฟิล์มแข็งบางที่ใช้เคลือบบนเครื่องมือทดสอบสามารถป้องกันการเกาะติดของวัสดุชิ้นงานบนผิวเครื่องมือทดสอบได้ การใช้สารหล่อลื่นในงานขึ้นรูปโลหะจะช่วยลดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวคู่สัมผัสของเครื่องมือกับวัสดุชิ้นงานและช่วยยืดระยะเวลาในการเกิดการเกาะติดของอนุภาควัสดุชิ้นงานบนผิวเครื่องมือได้ด้วยเช่นกัน ในขณะที่ Purohit et al. [8] ใช้การเคลือบผิวของวัสดุชิ้นงานที่ต้องการขึ้นรูปด้วยวัสดุพอลิเมอร์เพื่อลดความเสียหายของเครื่องมือและผิวของชิ้นงานที่ทำการขึ้นรูป จากการศึกษา

พบว่าพอลิเมอร์ที่นำมาใช้สามารถลดความเสียหายบนผิวของเครื่องมือที่ใช้ขึ้นรูปได้ ทั้งนี้ชนิดของพอลิเมอร์ที่ใช้เคลือบบนผิวชิ้นงานจะส่งผลต่อความเสียหายบนผิวเครื่องมือที่ใช้ขึ้นรูป เช่น เครื่องมือที่ใช้ขึ้นรูปวัสดุชิ้นงานที่เคลือบด้วยวัสดุโพลีโพรพีลีน (Polypropylene; PP) จะเกิดความเสียหายได้ง่ายกว่าเนื่องจากวัสดุพอลิโพรพีลีนมีความแข็งต่ำ

จากงานวิจัยข้างต้น [6-8] คุณภาพผิวของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปนั้นมีความสำคัญ ปัญหาคุณภาพผิวที่ไม่ดีของชิ้นงานที่ถูกขึ้นรูปมีสาเหตุหนึ่งมาจากการเกาะติดของอนุภาควัสดุชิ้นงานบนผิวแม่พิมพ์ ดังนั้นความเสียหายของแม่พิมพ์ที่ใช้ขึ้นรูปโลหะอาจไม่ได้เกิดจากแม่พิมพ์เกิดการสึกหรอ (Wear) แต่เกิดจากการเกาะติดของอนุภาควัสดุชิ้นงานที่ทำการขึ้นรูปบนผิวของแม่พิมพ์ที่ใช้ขึ้นรูปเอง ซึ่งการแก้ปัญหาคุณภาพผิวของชิ้นงานหลังการพับขึ้นรูปจากการเกาะติดของวัสดุชิ้นงานบนผิวแม่พิมพ์ สามารถทำได้โดยปรับปรุงสมบัติทางไตรบอโลยี (Tribological Properties) ระหว่างผิวคู่สัมผัสของผิวแม่พิมพ์กับผิวของโลหะแผ่นที่ต้องการขึ้นรูป เช่น การใช้สารหล่อลื่น การเคลือบผิวแม่พิมพ์ด้วยฟิล์มแข็งบาง และการเคลือบผิวชิ้นงานที่ต้องการขึ้นรูปด้วยวัสดุพอลิเมอร์ เพื่อป้องกันผิวของแม่พิมพ์กับชิ้นงานโลหะแผ่นสัมผัสกันในลักษณะโลหะสัมผัสกับโลหะ (Metal to Metal contact)

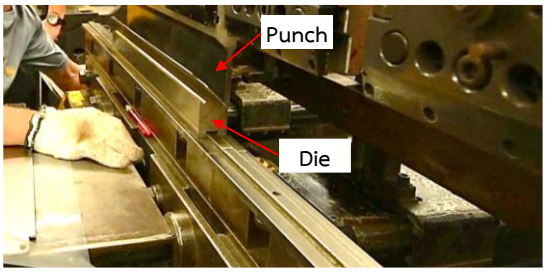
อย่างไรก็ดีจากงานวิจัยของ Sresomroeng et al. [9] แสดงรายงานผลการศึกษาการลากขึ้นรูป (Deep Drawing) โลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษที่พบว่า เกิดการเกาะติดของวัสดุเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษเกรด SPFC980Y ตามมาตรฐาน JIS บนแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปที่ทำจากวัสดุเครื่องมือขึ้นรูปเย็น เกรด SKD11 (JIS) ชุบแข็งแล้วทำการเคลือบผิวด้วยฟิล์มแข็งบางชนิด TiN ในการขึ้นรูปวัสดุชิ้นงานไม่เกิน 30 ชิ้น ซึ่งไม่แตกต่างกับการใช้แม่พิมพ์ที่ไม่ได้ทำการเคลือบผิว ดังนั้นการเลือกใช้ฟิล์มเคลือบแข็งบางเคลือบบนผิววัสดุแม่พิมพ์เพื่อป้องกันการเกาะติดของวัสดุชิ้นงานมีความจำเป็นต้องเลือกชนิดของฟิล์มให้ถูกต้อง เพราะการเคลือบฟิล์มแข็งบางเป็นต้นทุนการผลิตที่เพิ่มขึ้นและมีราคาสูง อีกทั้งฟิล์มแข็งบางแต่ละชนิดก็จะมีความสามารถในการยึดเกาะกับผิวของวัสดุทำแม่พิมพ์แตกต่างกัน และบริษัทผู้รับเคลือบฟิล์มแข็งแต่ละแห่งก็มีเทคนิควิธีการเคลือบที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อวัตถุประสงค์ในการเคลือบฟิล์มแข็งบางเพื่อยืดอายุการใช้งานของแม่พิมพ์

นอกจากรอยเส้นบนผิวชิ้นงานที่เกิดจากกระบวนการขึ้นรูปเนื่องจากอนุภาคของวัสดุชิ้นงานเกาะติดบนผิวดายแล้วครูดเนื้อวัสดุชิ้นงานในการขึ้นรูปครั้งต่อไปแล้ว ยังมีลักษณะรอยเส้นที่เกิดจากบ่าดายครูดเนื้อวัสดุชิ้นงานระหว่างกระบวนการพับขึ้นด้วย ดังได้อธิบายไว้ในการศึกษาของ Watcharasresomroeng et al. [10] ซึ่งเป็นกระบวนการพับขึ้นรูปแท่งอลูมิเนียม (Aluminum Shaft) การแก้ปัญหาดังกล่าวสามารถทำได้โดยการใช้แม่พิมพ์ทำจากวัสดุพอลิเมอร์ ซึ่งหลักการแก้ปัญหายังคงเป็นไปในลักษณะการปรับปรุงสมบัติทางไตรบอโลยี ระหว่างผิวคู่สัมผัสของผิวแม่พิมพ์กับผิวของโลหะแผ่นที่ต้องการขึ้นรูปโดยการป้องกันโลหะสัมผัสกับโลหะเช่นเดียวกัน แต่ปัญหาของการใช้แม่พิมพ์ที่ทำจากวัสดุพอลิเมอร์ คือ ชิ้นงานที่ถูกพับขึ้นรูปเกิดการดีดตัวกลับหลังการพับขึ้นรูปสูงกว่าแม่พิมพ์ที่ทำจากโลหะ เนื่องจากสมบัติความยืดหยุ่น (Elastic Property) ของวัสดุพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นวัสดุทำแม่พิมพ์

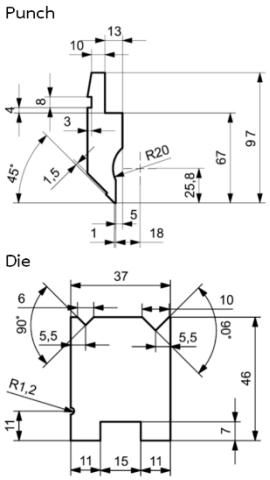
3. เครื่องมือ วัสดุ และวิธีการดำเนินงาน

3.1 เครื่องมือและวัสดุชิ้นงาน

เครื่องจักรที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นส่วนตู้ไฟฟ้าเป็นเครื่องพับแบบ Press Brake ยี่ห้อ AMADA รุ่น RG80 ขนาด 80 ตัน ติดตั้งพันช์กับดายที่มีร่องตัววี ซึ่งเป็นชุดแม่พิมพ์พับขึ้นรูปตัววีแบบมาตรฐานของบริษัท AMADA ดังรูปที่ 5 ขนาดของพันช์และดายแสดงดังรูปที่ 6 ถูกใช้เพื่อพับขึ้นรูปตัววีชิ้นงานโลหะแผ่นเพื่อให้ได้ชิ้นงานตามแบบดังรูปที่ 1



รูปที่ 5 ลักษณะการติดตั้งชุดแม่พิมพ์พับขึ้นรูปและการทำงาน



รูปที่ 6 ขนาดของพันช์และดายที่ใช้ในการพับขึ้นรูป (หน่วย: มิลลิเมตร)

ตารางที่ 1 สมบัติทางกลของวัสดุชิ้นงาน SPCC (JIS)

Yield Strength (MPa)	Ultimate Strength (MPa)	Elongation (%)
213	319	46
Hardness (HV)	**Strength Coefficient; *K* (MPa)**	**Strain Hardening exponent; *n***
125.6	415	0.16

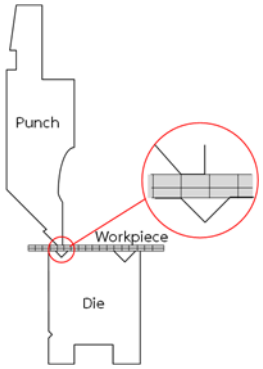
วัสดุชิ้นงานเป็นโลหะแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด SPCC (JIS) ความหนา 1 มิลลิเมตร มีสมบัติทางกลดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งได้จากการทดสอบด้วยแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8

3.2 การศึกษากลไกการเกิดรอยเส้นบนชิ้นงาน

งานวิจัยที่ผ่านมา [11] ผู้ศึกษาใช้การศึกษางาน (Work Study) โดยการถ่ายวีดีโอกระบวนการพับขึ้นรูปเพื่อศึกษาสาเหตุการเกิดรอยเส้นบนชิ้นงานชิ้นส่วนตู้ไฟฟ้า แต่การศึกษาด้วยวิธีการดังกล่าวไม่สามารถทราบถึงกลไกการเกิดรอยเส้นบนชิ้นงานดังกล่าว เพียงแต่ทราบว่ารอยเส้นเกิดจากเนื้อวัสดุชิ้นงานสัมผัสกับบ่าดายในลักษณะโลหะสัมผัสกับโลหะ ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึงใช้การจำลองการทำงานการพับขึ้นรูปตัววีด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method; FEM) โดยใช้ซอฟต์แวร์ MSC Marc เวอร์ชั่น 2008 ศึกษากลไกการเกิดรอยเส้นโดยพิจารณาสภาวะความเค้นที่เกิดกับเนื้อวัสดุชิ้นงานระหว่างการพับขึ้นรูป

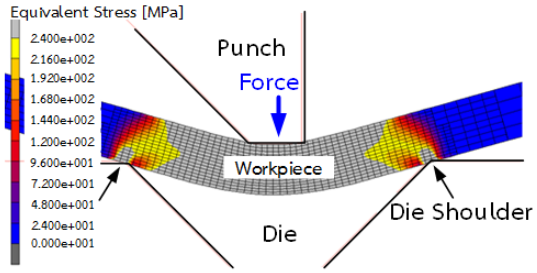
เพื่อลดเวลาในการคำนวณและสามารถเลือกใช้เอลิเมนต์ที่มีขนาดเล็ก มีความละเอียดสูง ผู้ศึกษาจึงกำหนดให้แบบจำลอง (Model) การพับขึ้นรูปตัววีเป็นแบบความเครียดระนาบ 2 มิติ (2D Plane Strain) มีเอลิเมนต์เป็นแบบทรงสี่เหลี่ยม สี่ด้าน สี่จุดต่อ (Quadrilateral 4 Node) ขนาดเริ่มต้นของเอลิเมนต์เฉลี่ย (Global Edge Length) เท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร สำหรับบริเวณที่ชิ้นงานสัมผัสกับแม่พิมพ์ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเอลิเมนต์สูง ผู้ศึกษากำหนดให้มีขนาดเอลิเมนต์เท่ากับ 0.06 มิลลิเมตร เพื่อความละเอียดในการคำนวณ พฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของวัสดุชิ้นงานแทนด้วยสมการความเค้นไหล (Flow Stress; $\bar{\sigma}$) ดังสมการที่ (1) เมื่อ $\bar{\varepsilon}$ คือ ความเครียดจริง (True Strain) โดยกำหนดให้พันช์และดายมีสมบัติเป็นวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid Body) ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวคู่สัมผัสวัสดุแม่พิมพ์กับวัสดุชิ้นงานเท่ากับ 0.05 แบบจำลองการพับขึ้นรูปแสดงดังรูปที่ 7

$$\bar{\sigma} = 415\bar{\varepsilon}^{0.16} \quad (1)$$



รูปที่ 7 แบบจำลองการทำงานการพับขึ้นรูปที่ใช้ศึกษา

จากการศึกษาพบว่าโลหะแผ่นจะถูกขึ้นรูปโดยการได้รับแรงจากพันช์พาชิ้นงานลงไปในดายดังรูปที่ 8 และที่บริเวณบ่าดายโลหะแผ่นจะเกิดการเลื่อน (Slip) เพื่อยกตัวเนื่องจากการพาของพันช์ ทำให้ผิวของโลหะแผ่นเกิดการเปลี่ยนรูปถาวร (Plastic Deformation) ในลักษณะรอยครูด (Scratch) กับบ่าดายที่ทำจากเหล็กกล้าเครื่องมือชุบแข็ง ดังพิจารณาได้จากที่บริเวณดังกล่าวบนเนื้อวัสดุชิ้นงานเกิดความเค้นสูงกว่าบริเวณอื่น ส่งผลให้เกิดเป็นรอยเส้นตลอดแนวการพับขึ้นรูปบนชิ้นงานที่สัมผัสกับบ่าดาย



รูปที่ 8 กลไกการเกิดรอยเส้นในกระบวนการพับขึ้นรูปตัววี

จากการศึกษากลไกการเกิดรอยเส้นบนชิ้นงานด้วยการจำลองการทำงานพับขึ้นรูปวัสดุชิ้นงานพบว่า สาเหตุการเกิดรอยเส้นบนผิวชิ้นงานชิ้นส่วนตู้ไฟฟ้าหลังกระบวนการพับขึ้นรูปของบริษัทกรณีศึกษาแตกต่างจากสาเหตุการเกิดรอยเส้นที่ได้รายงานไว้ในงานวิจัยที่ผ่านมา [6-9] ซึ่งมีสาเหตุจากการเกาะติดของอนุภาควัสดุชิ้นงานบนผิวแม่พิมพ์ แล้วครูดเนื้อชิ้นงานที่ถูกขึ้นรูปในครั้งต่อไปทำให้เกิดเป็นรอยเส้นบนผิวชิ้นงานหลังการพับขึ้นรูปในทิศทางตามแนวแรงที่ใช้ในการขึ้นรูป

กลไกการเกิดรอยเส้นในงานการศึกษานี้เป็นไปในลักษณะเดียวกันกับงานวิจัย [10,11] โดยมีแนวทางการแก้ปัญหาในการลดการสัมผัสระหว่างผิวของดายกับผิวโลหะแผ่นชิ้นงานขณะถูกขึ้นรูปในลักษณะโลหะสัมผัสกับโลหะ

เพื่อป้องการการครูดของบ่าดายกับผิวชิ้นงานโลหะแผ่นที่ถูกขึ้นรูป ซึ่งเป็นแนวทางการแก้ปัญหาตามทฤษฎีและงานวิจัยที่ผ่านมา

3.3 แนวทางการแก้ปัญหา

การลดการสัมผัสระหว่างผิวของดายกับผิวของโลหะแผ่นขณะถูกพับขึ้นรูปในลักษณะโลหะสัมผัสกับโลหะจะใช้วิธีการเพื่อแก้ปัญหาสามวิธี [11] คือ

(1) การใช้สารหล่อลื่นทาบนผิวชิ้นงาน

(2) การเคลือบผิวดายด้วยฟิล์มแข็งบาง

(3) การใช้ฟิล์มพอลิเมอร์เคลือบบนผิวโลหะแผ่นที่ต้องการขึ้นรูปหรือใช้วัสดุพอลิเมอร์ทำแม่พิมพ์

ตารางที่ 2 วิธีที่เสนอเพื่อแก้ปัญหารอยเส้นในการพับขึ้นรูป

วิธีการ	ราคา (บาท/หน่วย)
(1) การใช้สารหล่อลื่น ชนิดของเหลว Forming Oil, Viscosity 150 cSt.	220 (บาท/ลิตร)
(2) การเคลือบฟิล์มแข็งบาง ชนิด Nitriding+CrN (PVD)	2,890 (บาท/กิโลกรัม) (ราคาต่อน้ำหนักดายที่ต้องการเคลือบ)
(3) การใช้แผ่นโพลีเอทิลีน ชนิด HDPE ขนาด 609 x 914 x 0.1 มิลลิเมตร	120 (บาท/กิโลกรัม) (38 แผ่น/กิโลกรัม)

เนื่องจากข้อกำหนดในการทำงานของบริษัทกรณีศึกษาใช้เหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SPCC (JIS) เป็นวัตถุดิบในการผลิต ซึ่งโดยทั่วไปวัสดุดังกล่าวไม่มีการเคลือบผิวด้วยวัสดุฟิล์มพอลิเมอร์ ดังนั้นวิธีการแก้ปัญหาในลักษณะของข้อที่ (3) คณะผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้แผ่นโพลีเอทิลีน (Polyethylene; PE) ชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) วางป้องกันการสัมผัสกันระหว่างผิวโลหะของชิ้นงานและดายมาใช้แทนการเคลือบฟิล์มพอลิเมอร์บนแผ่นโลหะแผ่น SPCC (JIS) วิธีการที่เสนอเพื่อแก้ปัญหารอยเส้นที่เกิดบนชิ้นงานชิ้นส่วนตู้ไฟฟ้าจากการพับขึ้นรูป แสดงดังตารางที่ 2 โดยทำการทดสอบด้วยการพับขึ้นรูปตามเงื่อนไขของการผลิตจริงกับโลหะแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SPCC (JIS)

การทดสอบการพับขึ้นรูปดำเนินการเปรียบเทียบวิธีการตามตารางที่ 2 โดยชนิดของสารหล่อลื่นเลือกใช้จากสารหล่อลื่นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมงานขึ้นรูปโลหะ สำหรับฟิล์มแข็งบางที่เลือกใช้ได้แก่ฟิล์มชนิด CrN ที่เคลือบด้วยกระบวนการ PVD โดยเคลือบทับบนผิววัสดุแม่พิมพ์ที่ผ่านกระบวนการไนตรายด์ (Nitriding) ซึ่งถูกรายงานว่ามีความสามารถในการป้องกันการเกาะติดของวัสดุชิ้นงานบนผิวดายในการพับขึ้นรูปเหล็กกล้าที่เกิดความดันสัมผัส (Contact Pressure) ระหว่างผิวของวัสดุชิ้นงานกับวัสดุเครื่องมือสูง อย่างเช่นการขึ้นรูปเหล็กกล้ากลุ่มความแข็งแรงสูงพิเศษ อีกทั้งยังมีความสามารถในการเกาะติดของเนื้อฟิล์มแข็งบางกับผิวของวัสดุทำแม่พิมพ์ได้ดี [9]

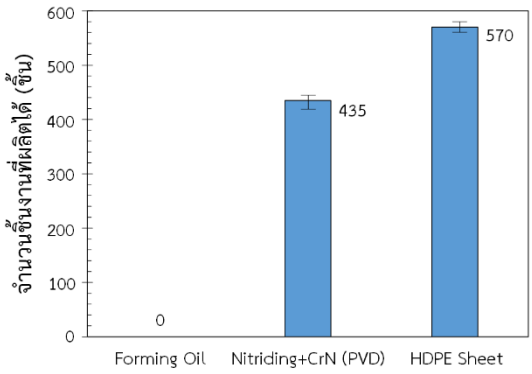
สำหรับการเลือกใช้วัสดุพอลิเมอร์ โพลีเอทิลีน ชนิด HDPE วางป้องกันการสัมผัสกันระหว่างผิวโลหะของชิ้นงานและดาย เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีใช้อยู่ในโรงงานกรณีศึกษาในรูปแบบของถุงพลาสติกสำหรับใช้ใส่ชิ้นงานสำเร็จเพื่อส่งมอบแก่ลูกค้าอีกทั้งและเป็นวัสดุชนิดเดียวกันกับที่ใช้ศึกษาในงานของ Watcharasresomroeng et al. [10] แต่ในงานวิจัยดังกล่าวการใช้แผ่นโพลีเอทิลีน ชนิด HDPE ไม่สามารถพับขึ้นรูปแท่งอลูมิเนียมได้โดยไม่เกิดรอยเส้นบนผิวชิ้นงาน ทั้งนี้ผู้วิจัยได้เปรียบเทียบค่าความเค้นที่เกิดขึ้นบนเนื้อวัสดุชิ้นงานบริเวณบ่าดายแล้วพบว่าในการศึกษาครั้งนี้เกิดค่าความเค้นขึ้นบนเนื้อวัสดุชิ้นงานน้อยกว่าการพับขึ้นรูปในงานวิจัยดังกล่าว ดังนั้นผู้ศึกษาจึงทดลองใช้วิธีการนี้เพื่อแก้ปัญหาการเกิดรอยเส้นเนื่องจากมีต้นทุนการแก้ปัญหาต่ำและเป็นวัสดุที่มีใช้ในโรงงานกรณีศึกษา

การทดสอบพับขึ้นรูปวัสดุชิ้นงานโลหะแผ่น SPCC (JIS) จะดำเนินการจนเกิดรอยเส้นบนผิวชิ้นงานแล้วจึงหยุดการทดลอง การพิจารณาการเกิดรอยเส้นที่เกิดบนชิ้นงานหลังการพับขึ้นรูปจนไม่สามารถยอมรับคุณภาพของชิ้นงานได้นั้น คณะผู้วิจัยใช้การตรวจสอบด้วยสายตากับชิ้นงานทุกชิ้นที่ผ่านการพับขึ้นรูปโดยบุคลากรแผนกควบคุมคุณภาพของบริษัทกรณีศึกษา การทดสอบจะทำซ้ำจำนวน 5 ครั้งต่อการทดลองของแต่ละวิธีการที่นำเสนอตามตารางที่ 2 แล้วทำการหาค่าเฉลี่ยของจำนวนชิ้นงานที่สามารถพับขึ้นรูปได้โดยไม่เกิดรอยเส้นของแต่ละวิธีการที่นำเสนอเพื่อรายงานผลของการศึกษา

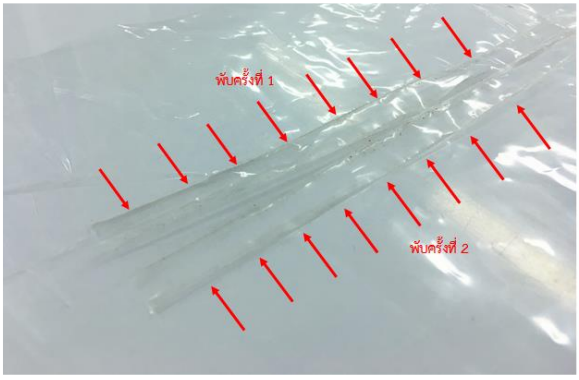
3. ผลการวิจัยและอภิปราย

จากการทดสอบใช้วิธีการแก้ปัญหาการเกิดรอยเส้นบนแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด SPCC (JIS) ด้วยวิธีการที่นำเสนอทั้ง 3 วิธี ด้วยการผลิตจริงโดยการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง ในแต่ละวิธีการที่นำเสนอนั้น จำนวนชิ้นงานเฉลี่ยที่สามารถพับขึ้นรูปได้โดยไม่เกิดรอยเส้นบนชิ้นงานชิ้นส่วนตู้ไฟฟ้าแสดงไว้ในรูปที่ 9

จากผลการทดสอบพบว่า การใช้สารหล่อลื่นไม่สามารถแก้ปัญหาการเกิดรอยเส้นบนชิ้นงานหลังการพับขึ้นรูปได้ โดยไม่สามารถพับขึ้นรูปชิ้นงานได้โดยไม่เกิดรอยเส้นแม้แต่ชิ้นเดียว แสดงให้เห็นว่าสารหล่อลื่นที่มีลักษณะเป็นน้ำมันไม่สามารถป้องกันรอยเส้นในการพับขึ้นรูปชิ้นงานในการศึกษานี้ได้ ซึ่งแตกต่างกับข้อมูลที่ได้รายงานไว้ในงานวิจัย [7] ทั้งนี้อาจเนื่องจากเป็นกระบวนการขึ้นรูปโลหะที่แตกต่างกันและมีกลไกการเกิดรอยเส้นบนผิวชิ้นงานที่มีความแตกต่างกัน การใช้สารหล่อลื่นนอกจากจะไม่สามารถป้องกันการเกิดรอยเส้นบนชิ้นงานหลังการพับขึ้นรูปชิ้นงานชิ้นส่วนตู้ไฟฟ้าได้แล้ว ยังจำเป็นต้องกำจัดสารหล่อลื่นก่อนนำชิ้นงานไปขัดตบแต่งลบ



รูปที่ 9 ผลการทดสอบพับขึ้นรูปวัสดุชิ้นงานด้วยวิธีที่เสนอ



รูปที่ 10 รอยสลิปบนแผ่นโพลีเอทิลีน

รอยเส้น รวมถึงต้องเพิ่มความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric Acid) หรือกรดเกลือสำหรับการล้างไขมันของสารหล่อลื่นที่เกาะติดบนผิวชิ้นงานในขั้นตอนการเตรียมการปรับสภาพ (Pre-treatment) ชิ้นงาน ก่อนทำการพ่นสีด้วย ทำให้ส่งผลต่อต้นทุนการผลิตและสุขภาพของพนักงานเนื่องจากการสูดดมไอระเหยของกรดไฮโดรคลอริกระหว่างกระบวนการกำจัดคราบไขมัน

กรณีการพับขึ้นรูปวัสดุชิ้นงาน SPCC (JIS) โดยใช้แม่พิมพ์ที่เคลือบฟิล์มแข็งบาง Nitriding+CrN (PVD) นั้น สามารถพับขึ้นรูปชิ้นงานได้โดยไม่เกิดรอยเส้นจำนวน 870 ครั้ง ซึ่งชิ้นงานหนึ่งชิ้นต้องพับจำนวนสองครั้ง (พับขึ้นรูป 2 ด้าน) ทำให้ได้ชิ้นงานจากการพับขึ้นรูปด้วยดายที่เคลือบฟิล์มแข็งบาง Nitriding+CrN (PVD) เท่ากับ 435 ชิ้น หลังจากนั้นเริ่มพบรอยเส้นบนชิ้นงานเนื่องจากบริเวณบ่าดายที่ทำการเคลือบผิวด้วยฟิล์มแข็งบางดังกล่าวเกิดการหลุดลอก ซึ่งความเสียหายของฟิล์มแข็งบางเป็นไปตามลักษณะของงานวิจัยที่ [9] ทั้งนี้การเคลือบผิวดายด้วยฟิล์มแข็งบาง บริษัทรับเคลือบผิวจะคิดค่าบริการจากน้ำหนักดายที่ส่งเคลือบผิว สำหรับการศึกษาครั้งนี้น้ำหนักดายที่ใช้มีขนาด 6.68 กิโลกรัม ซึ่งคิดเป็นค่าเคลือบผิวฟิล์ม Nitriding+CrN (PVD) จำนวน 19,305 บาท/ชุด

สำหรับแนวทางการใช้แผ่นโพลีเอทิลีนโดยการใช้ถุงโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ขนาด 609 x 914 x 0.1 มิลลิเมตร วางป้องกันการสัมผัสกันระหว่างผิวชิ้นงานและผิวดายขณะทำการพับขึ้นรูปพบว่า สามารถป้องกันรอยเส้นบนชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SPCC (JIS) ได้ แต่แผ่นโพลีเอทิลีนจะได้รับความเสียหายจากการเลื่อนตัวของโลหะแผ่นขณะทำการพับขึ้นรูปหรือเรียกว่า “รอยสลิป” ดังแสดงในรูปที่ 10

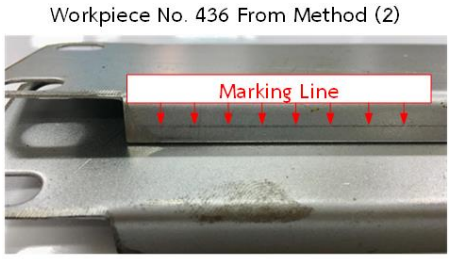
ในการพับขึ้นรูปชิ้นงานโลหะแผ่น 1 ครั้ง จะเกิดรอยสลิปบนแผ่นโพลีเอทิลีน 1 รอย ทำให้การพับขึ้นรูปชิ้นงานโลหะแผ่นครั้งต่อไป พนักงานต้องวางแผ่นโพลีเอทิลีนเลื่อนหลบรอยสลิปเดิม โดยจากการศึกษาครั้งนี้ แผ่นโพลีเอทิลีน 1 แผ่น สามารถใช้เพื่อป้องกันการเกิดรอยเส้นจากการพับขึ้นรูปได้เฉลี่ย 30 ครั้ง/การพับขึ้นรูป (ขึ้นอยู่กับความชำนาญของพนักงานในการวางแผ่นโพลีเอทิลีนระหว่างผิวดายกับผิวชิ้นงาน) ทำให้ได้ชิ้นงานจำนวน 15 ชิ้น เมื่อพิจารณาจำนวนแผ่นโพลีเอทิลีนที่ใช้ จำนวน 1 กิโลกรัม มี 38 แผ่น ดังนั้นจากการทดลองและข้อมูลในตารางที่ 2 ต้นทุนในการแก้ปัญหารอยเส้นบนชิ้นงานโลหะแผ่นจากการพับขึ้นรูปเป็นดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ต้นทุนการแก้ปัญหารอยเส้นบนชิ้นงานพับขึ้นรูป

วิธีการ	จำนวนชิ้นงานที่ผลิตได้ (ชิ้น)	ต้นทุน (บาท/ชิ้น)
(1) การใช้สารหล่อลื่น	0	-
(2) การเคลือบฟิล์มแข็งบาง Nitriding+CrN (PVD)	435	45.00
(3) การใช้แผ่นโพลีเอทิลีน	570	0.21

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบประสิทธิผลของการแก้ปัญหาการเกิดรอยเส้นบนชิ้นงานหลังการพับขึ้นรูปชิ้นส่วนตู้ไฟฟ้าดังแนวทางที่นำเสนอทั้งสามแนวทางด้วยการปรับปรุงสมบัติทางไตรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสแม่พิมพ์กับชิ้นงานที่ถูกพับขึ้นรูปพบว่า การใช้สารหล่อลื่นทาบนผิวชิ้นงานไม่สามารถป้องกันการสัมผัสของผิววัสดุชิ้นงานกับผิวของวัสดุดายขณะทำการขึ้นรูปได้ โดยเมื่อชิ้นงานถูกพันช์พาให้ไหลเข้าในดายชิ้นงานบริเวณที่สัมผัสกับบ่าดายจะเกิดการเลื่อนและยกตัวเพื่อไหลตัวเข้าสู่ดาย ส่งผลให้ฟิล์มของสารหล่อลื่นที่ทาเคลือบบนผิววัสดุชิ้นงานเกิดการแตกตัว ทำให้เนื้อวัสดุชิ้นงานสัมผัสกับผิวของดายเกิดเป็นรอยเส้นขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการขึ้นรูปในลักษณะอื่นเช่นการลากขึ้นรูป (Deep Drawing) ที่เมื่อชิ้นงานไหลผ่านรัศมีดาย ฟิล์มของสารหล่อลื่นจะแตกตัวที่บริเวณดังกล่าวเนื่องจากเกิดความดันสัมผัสที่บริเวณดังกล่าวสูง โดยเฉพาะในกระบวนการรีดขึ้นรูป (Ironing Process) ทำให้เกิดการสัมผัสกันของวัสดุชิ้นงานกับวัสดุทำแม่พิมพ์ในลักษณะโลหะสัมผัสกับโลหะ [2,12]

สำหรับการปรับปรุงสมบัติทางไตรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสดายกับชิ้นงานด้วยการเคลือบฟิล์มแข็งบางชนิด Nitriding+CrN (PVD) บนผิวดายเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นเกรด SKD11 แล้วทำการพับขึ้นรูปชิ้นงานนั้น แม้จะป้องกันรอยเส้นเกิดบนชิ้นงานหลังการพับขึ้นรูปได้ แต่เนื่องจากวิธีการนี้พับขึ้นรูปได้ชิ้นงานเพียงแค่ 435 ชิ้น หลังจากนั้นเกิดฟิล์มแข็งบางลอกหลุดส่งผลให้การพับขึ้นรูปครั้งต่อไปเกิดปัญหารอยเส้นบนผิวชิ้นงานอีกดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 เปรียบเทียบชิ้นงานที่ได้จากการพับขึ้นรูปด้วยวิธีการที่ (2) กับวิธีการที่ (3)

เมื่อเปรียบเทียบต้นทุนที่ใช้แก้ปัญหาดังตารางที่ 3 แล้ว การใช้แม่พิมพ์เคลือบผิวดายจะมีต้นทุนในการแก้ปัญหารอยเส้นบนชิ้นงานพับขึ้นรูปที่สูงถึง 45 บาท/ชิ้น และเมื่อแม่พิมพ์พับขึ้นรูปเกิดการสึกหรอเนื่องจากฟิล์มเคลือบลอกหลุด ก็จำเป็นต้องนำแม่พิมพ์ไปเคลือบผิวใหม่อีกครั้ง โดยต้องใช้ระยะเวลาในการส่งให้บริษัทรับเคลือบผิวทำการเคลือบผิวเป็นระยะเวลา 3 ถึง 7 วันทำการ ในขณะที่การใช้แผ่นโพลีเอทิลีนวางระหว่างผิวคู่สัมผัสโลหะชิ้นงานและดายสามารถกระทำได้อย่างต่อเนื่องไม่จำเป็นต้องนำแม่พิมพ์ไปทำการแก้ไขหรือปรับปรุงสภาพผิวแต่อย่างใด และยังมีต้นทุนการแก้ปัญหาต่ำเพียง 0.21 บาท/ชิ้น ดังนั้นแนวทางที่ (3) การใช้แผ่นโพลีเอทิลีนวางระหว่างผิวดายกับผิวชิ้นงานขณะทำการพับขึ้นรูปจึงมีประสิทธิภาพสูงสุดจากวิธีการที่นำเสนอในงานวิจัยนี้เพื่อแก้ปัญหารอยเส้นบนชิ้นงานชิ้นส่วนตู้ไฟฟ้าในกระบวนการพับขึ้นรูปเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด SPCC (JIS)

เป็นที่น่าสังเกตว่าการใช้แผ่นโพลีเอทิลีนวางป้องกันการสัมผัสกันระหว่างผิวโลหะของชิ้นงานและดายนั้นสามารถแก้ปัญหาการเกิดรอยเส้นบนผิวของวัสดุชิ้นงานหลังการพับขึ้นรูปได้ก็ต่อเมื่อแรงที่กระทำบริเวณบ่าดายนั้นต้องไม่สูงจนทำให้แผ่นโพลีเอทิลีนได้รับความเสียหายจนขาดแล้วก่อให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างผิวของวัสดุชิ้นงานกับผิวของวัสดุแม่พิมพ์ดังเช่นที่ได้รายงานไว้ในงานวิจัย [10]

4. บทสรุป

จากการศึกษาเพื่อหาแนวทางการแก้ปัญหาการเกิดรอยเส้นบนผิวชิ้นงานชิ้นส่วนตู้ไฟฟ้าซึ่งถูกพับขึ้นรูปจากโลหะแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด SPCC (JIS) ขนาดความหนา 1 มิลลิเมตร พบว่าวิธีการใช้แผ่นโพลีเอทิลีนวางระหว่างผิวคู่สัมผัสโลหะชิ้นงานและดายเพื่อป้องกันการสัมผัสกันในลักษณะโลหะสัมผัสกับโลหะมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อพิจารณาจากคุณภาพผิวของชิ้นงานที่ได้และต้นทุนที่ใช้แก้ปัญหาต่อหน่วยต่ำที่สุด อีกทั้งยังไม่ต้องปรับปรุงสมบัติของวัสดุทำดายอย่างเช่นการเคลือบผิวดายด้วยฟิล์มแข็งบาง

จากการแก้ปัญหารอยเส้นที่เกิดบนผิวชิ้นงานพับขึ้นรูปด้วยวิธีการตามแนวทางที่ (3) บริษัทกรณีศึกษาสามารถลดขั้นตอนขัดตบแต่งลบรอยเส้นที่เกิดขึ้นได้ ทำให้ลดขั้นตอนการผลิตชิ้นงานชิ้นส่วนตู้ไฟฟ้าไปได้ 1 สถานีงาน และสามารถลดพนักงานในสายการผลิตชิ้นส่วนดังกล่าวรวมถึงลดเวลาที่ใช้ในการผลิตได้

5. กิตติกรรมประกาศ

การศึกษานี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณจากโครงการพัฒนาผู้เชี่ยวชาญอุตสาหกรรมรุ่นใหม่เพื่อยกระดับขีดความสามารถด้านวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและนวัตกรรมในภาคเอกชน ภายใต้โครงการส่งเสริมบุคลากรด้านวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและนวัตกรรมจากมหาวิทยาลัยและสถาบันวิจัยของภาครัฐไปปฏิบัติงานเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันในภาคเอกชน (Talent Mobility Program)

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่เอื้อเฟื้อซอฟต์แวร์เพื่อใช้ในการศึกษากลไกการพับขึ้นรูป และขอขอบคุณ ดร.สมคิด เลานิตทะรากุล ผู้จัดการทั่วไป บริษัท เออีเอสซี จำกัด ที่ให้คำปรึกษาในการจำลองการทำงานการพับขึ้นรูปชิ้นงานกรณีศึกษา

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Eary DF, Reed EA. Techniques of pressworking sheet metal Englewood: Prentice-Hall;1974.

[2] Lange K. Handbook of Metal Forming. New York: McGraw-Hill; 1985.

[3] Sresomroeng B, Lawanwaong K, Premanond V, Kaewtatip P, Khantachawana A. The influences of die clearance on spring-back of high strength steel in U-bending Process. proceedings of the 21st Conference on Mechanical Engineering Network of Thailand; 2007 October 17- 19; Chonburi, Thailand. p. 881-885. Thai.

[4] Sresomroeng B, Chumrum P, Sripraserd J, Premanond V. Sidewall-curl prediction in U-bending process of advanced high strength steel. Proceedings of the 2nd TSME International Conference on Mechanical Engineering; 2011 October 19-21; Krabi, Thailand.

[5] Angsuseranee N, Pluphrach G, Watcharasresomroeng B, Songkroh A. Springback and sidewall curl prediction in U- bending process of AHSS through finite element method and artificial neural network approach. Songklanakarin J. Sci. Technol. 2018;40(3):534-539.

[6] Sresomroeng B, Premanond V, Kaewtatip P, Khantachawana A, Koga N, Watanabe S. Anti-adhesion performance of various nitride and DLC films against high strength steel in metal forming operation. Diamond & Related Materials 2010;19:833–836.

[7] Kim H, Sung J, Goodwin FE, Altan T. Investigation of galling in forming galvanized advanced high strength steels (AHSSs) using the twist compression test (TCT). Journal of Materials Processing Technology 2008;205:459–468.

[8] Purohit Z, Zhang Y, Wang J. On surface damage of polymer coated sheet metals during forming. Journal of Manufacturing Processes 2018;20:389–396.

[9] Sresomroeng B, Premanond V. Kaewtatip P. Khantachawana A. Kurosawa A, Koga N. Performance of CrN radical nitrided tools on deep drawing of advanced high strength steel. Surface & Coatings Technology 2011;205:4198–204.

[10] Watcharasresomroeng B, Angsuseranee N. A solution to die marks in the bending operation of an aluminum alloy shaft. Proceedings of 2020 IEEE 7th International Conference on Industrial Engineering and Applications; 2020 April 16-21; Bangkok, Thailand. p.177-181.

[11] Angsuseranee N, Watcharasresomroeng B. Preventing marking line in bending of electrical cabinet part. Proceedings of The Rajamangala Manufacturing and Management Technology Conference 2019; 2019 May 30-31; Chiang Mai, Thailand. p. 60-65.

[12] Hosford FW, Caddell MR. Metal Forming: Mechanics and Metallurgy. Englewood: PTR Prentice Hall;1993.

การศึกษาตัวแปรของกระบวนการดัดไวปิ้งรูปตัวแอลที่มีผลต่อการเกิดการดีดตัวกลับด้วยวิธีการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

The Study of Parameter of L-Bending Wiping Process Causing Spring Back by Simulating Finite Element.

บุญส่ง ฤทธิ์ตา[1*] วทัญญู เนตรสง่า[2] และกฤช รุนรักษา[2]
[1]สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
150 ถนนศรีจันทร์ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40000
[2] หน่วยวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
150 ถนนศรีจันทร์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40000
Boonsong Ritta[1*], Wathanyou Neadsanga[2] and Krit Runruksa[2]
[1]Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan Khonkaen Campus
150 Srijun Road, Muang, Khonkaen, Thailand, 40000
[2] Research Unit, Engineering Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan Khonkaen Campus
150 Srijun Road, Muang, Khonkaen, Thailand, 40000
*ผู้รับผิดชอบบทความ: Song_ritta@hotmail.com เบอร์โทรศัพท์ 08-3402-5554

Received: 5 August 2019, Revised: 20 August 2020, Accepted: 29 October 2020

บทคัดย่อ
การดัดชิ้นงานนับเป็นกระบวนการที่สำคัญในสายงานประกอบของภาคอุตสาหกรรม โดยเฉพาะเมื่อมีข้อบกพร่องบนชิ้นงาน พนักงานจำเป็นต้องมีการตกแต่งอีกครั้งก่อนจัดส่งสายการผลิตต่อไป ข้อบกพร่องหลักที่มักพบเป็นส่วนใหญ่คือการสปริงกลับของแผ่นโลหะ งานวิจัยครั้งนี้ได้ศึกษาการสปริงกลับของแผ่นโลหะ คือวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS304 เหล็กโครงสร้างเกรด SPCC และอะลูมิเนียมเกรด AA6016 ความหนา 1 มิลลิเมตร มีตัวแปรคือรัศมีดายอยู่ในช่วงระหว่าง 0.25t ถึง 5.5t และช่องว่างแม่พิมพ์อยู่ในช่วงระหว่าง 0.25t ถึง 1.25t ด้วยวิธีไฟไนเอลิเมนต์บนแม่พิมพ์ไวปิ้งดาย (Wiping die) เพื่อวิเคราะห์มุมดัดและสัมประสิทธิ์การสปริงกลับ ผลการทดลองพบว่าความแข็งแรงจุดครากมีผลต่อการสปริงกลับของวัสดุ และรัศมีดายแปรผันโดยตรงต่อการสปริงกลับ นอกจากนั้นยังพบว่าช่องว่างแม่พิมพ์แคบการสปริงกลับยากกว่าช่องว่างแม่พิมพ์กว้าง และสัมประสิทธิ์การสปริงกลับของเหล็กกล้าไร้สนิมจะลดลงเมื่ออัตราส่วนรัศมีดายต่อความหนาชิ้นงานเพิ่มขึ้น และการจำลองด้วยไฟไนเอลิเมนต์ให้ผลใกล้เคียงกับการทดลองจริง
คำสำคัญ การสปริงกลับ งานดัดรูปตัวแอล ไฟไนเอลิเมนต์

Abstract
Bending is an important process for assembly lines in the industrial sectors. Particularly, when there is a defect on the work piece, the employee has to waste time decorating before the next production line delivery. The main defect is the spring back of the metal sheets. Therefore, this research has studied the spring black of different types of metal sheet, which are stainless steel material grade SUS304, structural steel SPCC grade and aluminum grade AA6016, thickness 1 mm, by changing the variable of the radius to be in the range from 0.25t to 5.5t 1t, and set the mold gap in the range from 0.25 t to 1.25t, by using the finite element method on the wiping die to analyze the bending angle and the spring return coefficient. The result shows that yield strength affects the spring return of the material and the die radius is directly proportional to the spring. When considering the mold gap, it is found that the narrow mold gap causes less spring back than the wider mold. The spring return coefficient of stainless-steel decreases when the ratio of die radius to the thickness of workpiece increase. The simulation of using finite element produced results consistent with the real experiment.
Keywords: Spring-Back, L-Bending Process, Finite Element

1. บทนำ

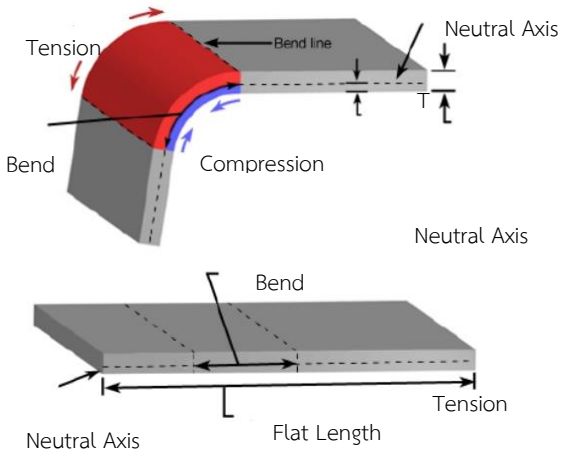
งานขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยกระบวนการดัดเป็นการเปลี่ยนรูปบริเวณรัศมีพับได้ 2 ลักษณะ กล่าวคือขอบด้านนอกมีความเค้นดึงส่วนขอบด้านในมีความเค้นอัดแต่ไม่เกินค่าความแข็งแรงดึงและอัดสูงสุด โดยลดลงตามความหนาไปยังเส้นแกนกลาง โดยความเค้นทั้งสองน้อยมากหมายถึงยังอยู่ในช่วงการเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่น (ต่ำกว่าค่าความแข็งแรงครากบนเส้นโค้งความเค้น และความเครียด) นอกเหนือบริเวณดังกล่าวเกิดความเค้นสูงกว่าจุดคราก หมายถึงการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร [1-3] ดังรูปที่ 1 และ รูปที่ 4 แสดงบริเวณการเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่นและแบบถาวรเมื่อแม่พิมพ์เปิดช่วงการเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่นจะพยายามคืนสภาพแต่ไม่สามารถทำได้ทั้งหมดเนื่องจากถูกกดด้วยบริเวณเปลี่ยนรูปถาวรด้านนอกและด้านใน ดังนั้นวัสดุจึงคืนรูปได้บางส่วนเพื่อสร้างความสมดุลระหว่างบริเวณยืดหยุ่นและบริเวณเปลี่ยนรูปถาวรเรียกกลไกนี้ว่า การสปริงกลับ [3-5] ตัวแปรที่มีผลต่อการสปริงกลับ คือความหนาชิ้นงาน ความเร็วกดจากพันช์ ระยะช่องว่างแม่พิมพ์ รัศมีการดัด ทิศทางเกรน และสัมประสิทธิ์ความเสียทาน เป็นต้น หลายปีที่ผ่านมามีงานวิจัยกล่าวถึงตัวแปรการสปริงกลับ ดังนี้ [6] ศึกษาระยะช่องว่างแม่พิมพ์ รัศมีดาย ระนาบผิวดาย ระยะระนาบผิวดาย ด้วยกระบวนการไฟไนเอลิเมนต์พบว่ารัศมีดายมีผลต่อการสปริงกลับ [7] ศึกษาความไวตัวแปรเชิงตัวเลขที่จำเป็นต่อการสร้างแบบจำลองการพยากรณ์การสปริงกลับ ในการขึ้นรูปตัวยู พบว่าการพยากรณ์ให้ผลใกล้เคียงกับเชิงตัวเลข [8] ศึกษามุมดัดชิ้นงานที่มีผลต่อการสปริงกลับของวัสดุและความหนาที่แตกต่างกันพบว่าวัสดุหนาการสปริงกลับง่ายกว่าวัสดุบาง [9] ศึกษาวัสดุอะลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิมมุม 22 และ 90 องศา ที่มีผลต่อการสปริงกลับ พบว่ามุมดัด 90 องศา ให้การสปริงกลับมากกว่ามุม 22 องศา [10] ศึกษาระยะความยาวการดัดชิ้นงาน ทิศทางเกรน และความหนาแผ่นโลหะ ที่มีผลต่อการสปริงกลับของชิ้นงานรูปตัววี พบว่าตัวแปรทั้งสองมีอิทธิพลต่อการสปริงกลับ [11] ใช้ไฟไนเอลิเมนต์โปรแกรม ANSYS APDL 14.0 ศึกษาการสปริงกลับทองแดงผสมด้วยกระบวนการไวปิ้ง พบว่ารัศมีดายเพิ่มขึ้นจะมีอิทธิพลต่อการสปริงกลับ [12] ศึกษาตัวแปรความหนาโลหะแผ่น ชนิดวัสดุ แรงเสียดทาน รัศมีและรูปร่างดาย พันช์ ของวัสดุอะลูมิเนียม ทองแดง เหล็กโครงสร้าง และเหล็กเครื่องมือ ทีมีอิทธิพลต่อการสปริงกลับของงานดัดขอบชิ้นงาน ด้วยโปรแกรม ANSYS™ LS-DYNA™ พบว่ารัศมีดายมีอิทธิพลมากกว่าตัวแปรอื่น

การสปริงกลับจะมีผลกระทบต่อสายงานการประกอบชิ้นส่วนภาคอุตสาหกรรมโดยตรง ซึ่งหากเกิดปัญหาการสปริงกลับ พนักงานต้องปรับแก้ก่อนการประกอบ เพื่อให้งานมีคุณภาพและตรงตามมาตรฐานการผลิตซึ่งทำให้เสียเวลาและต้นทุนการผลิตต้องเพิ่มขึ้น ดังนั้นในบทความวิจัยชุดนี้จึงได้มุ่งเน้นที่จะศึกษาพฤติกรรมการสปริงกลับของวัสดุที่แตกต่างกัน โดยเปลี่ยนตัวแปรรัศมีดาย และระยะช่องว่างแม่พิมพ์ด้วยวิธีไฟไนเอลิเมนต์ เพื่อวิเคราะห์มุมและสัมประสิทธิ์การสปริงกลับชิ้นทดสอบและเปรียบเทียบกับการทดลองจริง

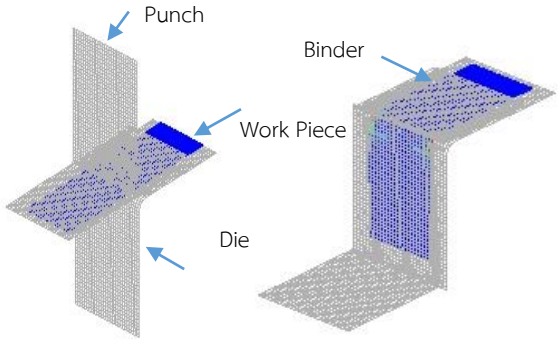
2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 ระเบียบไฟไนเอลิเมนต์

สร้างต้นแบบตามทฤษฎีงานดัด ซึ่งมีส่วนประกอบคือพันช์ดาย แผ่นกดชิ้นงาน และแผ่นชิ้นงาน ด้วยคอมพิวเตอร์ ดังรูปที่ 2 โดยมีรายละเอียดดังนี้ขนาดพันช์กว้าง 30 มิลลิเมตร รัศมี 1 มิลลิเมตร สูง 40 มิลลิเมตร ขนาดดายกว้าง 30 มิลลิเมตร สูง 40 มิลลิเมตร ระยะระนาบผิวดาย 20 มิลลิเมตร รัศมีดาย 0.25t 0.5t 1t 2t 3t 4t 4.5t 5t และ 5.5t ขนาดชิ้นงานกว้าง 20 มิลลิเมตร ยาว 70 มิลลิเมตร หนา 1 มิลลิเมตร ขนาดแผ่นกดกว้าง 30 มิลลิเมตร ยาว 30 มิลลิเมตร หนา 5 มิลลิเมตร ระยะช่องว่างระหว่างพันช์กับดาย เท่ากับ 0.25 มิลลิเมตร 1 มิลลิเมตร และ 1.25 มิลลิเมตร เมื่อเตรียมต้นแบบสมบูรณ์ จากนั้นส่งไปยังโปรแกรม LS Dyna ทางไฟไนเอลิเมนต์ ด้วยวิธีการเปลี่ยนชิ้นงานต้นแบบทั้งหมดเป็น Surface

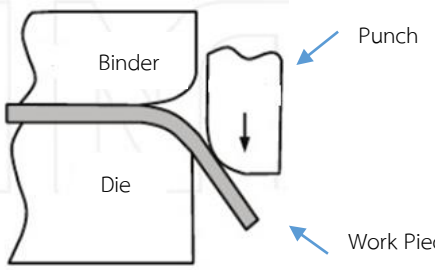


รูปที่ 1 กระบวนการดัดรูปตัวแอล [12]



รูปที่ 2 ต้นแบบไฟไนเอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม LS Dyna

ขึ้นรูปดัดมุมชิ้นงานรูปตัวแอล 90 องศา จากชุดแม่พิมพ์ไวปิ้งดาย ดังรูปที่ 3 โดยวิธีไฟไนเอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Finite Element Model)ด้วยโปรแกรม LS Dyna ซึ่งคำนวณการขึ้นรูปเป็นแบบ Explicit และการสปริงกลับเป็นแบบ Implicit บน PC Workstation หน่วยประมวลผล Intel® Core (TM) 2Quad CPU Q8400 @2.66GHz และ 2.67 GHz, RAM 3GB



รูปที่ 3 กระบวนการดัดชิ้นงานรูปตัวแอลด้วยแม่พิมพ์ไวปิ้ง [13]

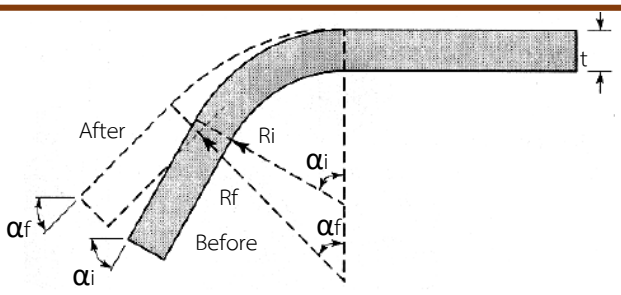
ตารางที่ 1 คุณสมบัติวัสดุทดลอง

Material	Yield Strength (MPa)	Young's Modulus (GPa)	Poisson's Ratio	K	n
AA 6016	305	69	0.33	412	0.26
SUS 304	260	207	0.28	1154	0.35
SPCC	210	207	0.28	640	0.23

วัสดุชิ้นงานแบ่งเป็น 3 ชนิดคืออะลูมิเนียมเกรด AA6016 เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS304 และเหล็กโครงสร้างเกรด SPCC โดยคุณสมบัติดังตารางที่ 1 ชนิดเอลิเมนต์เป็นแบบโครงสร้างเปลือกหอย (Shell Element) จำนวน 5,600 Quadratic Quadulateral Element (Quad Elements) และการอินติเกรตเป็นแบบลดรูป ตามสมการของ Belytschko et al มีจำนวนจุดอินทิเกรตตามแนวความหนา 5 จุด สามารถเปลี่ยนรูปได้ทุกทิศทาง(Anisotropy) ตามความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจริงกับความเครียดจริงเหนือจุดคราก หรือในขอบเขตการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร ดังสมการ (1)

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_1 = \frac{1}{(2R/T)+1} \qquad (1)$$

ε_0 = ความเครียดจริง ณ จุดครากถึงจุดสูงสุด (MPa)
ε_1 = ความเครียดจริงเริ่มต้นถึงจุดสูงสุด (MPa)
R = รัศมีดัด (มม.)
T = ความหนาชิ้นงาน (มม.)



รูปที่ 4 การสปริงกลับ [14]

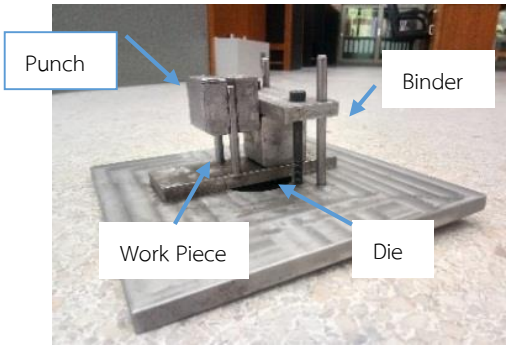
$$K_s = \frac{\alpha_f}{\alpha_i} = \frac{(2R_i/t)+1}{(2R_f/t)+1} \qquad (2)$$

K_s = สัมประสิทธิ์หรือการคาดเดาการสปริงกลับ
α_i = มุมดัดเริ่มต้น (องศา)
α_f = มุมดัดหลักการสปริงกลับ (องศา)
R_i = รัศมีก่อนดัดชิ้นงาน (มม.)
R_f = รัศมีหลังดัดชิ้นงาน (มม.)
t = ความหนาชิ้นงานดัด (มม.)

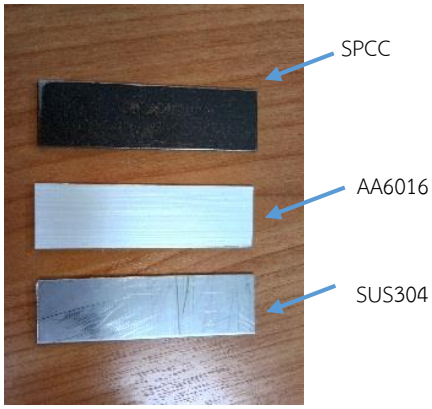
พันช์ ดาย จำนวนเอลิเมนท์ 2,400 และ 2,250 Quad Elements ตามลำดับ และแผ่นกดจำนวน 900 Quad Elements ชิ้นงานเป็นวัสดุแข็งเกร็ง (Rigid Body) สัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างคู่ผิวสัมผัส เหล็กกล้าไร้สนิม 0.133 เหล็กโครงสร้าง 0.125 และอะลูมิเนียม 0.2 ใช้แผ่นกดชิ้นงาน (Binder Force) 20 kN พันช์เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 200 mm/s หลังจากนั้นส่งไฟล์ข้อมูลเป็นนามสกุล *.IGES ไปยังโปรแกรมไฟไนเอลิเมนต์ LS Dyna เพื่อวิเคราะห์ไฟไนเอลิเมนต์และเก็บข้อมูลการทดลอง การสปริงกลับประเมินจากสัมประสิทธิ์หรือคาดเดาการสปริงกลับ (Coefficient Spring Back: k_R) ดังสมการ (2) รูปที่ 4

2.2 การทดลองจริง

ในการทดลองจริง ใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 5-8



รูปที่ 5 ชุดแม่พิมพ์ไวปิ้งดาย



รูปที่ 6 วัสดุทดสอบ SPCC AA6016 และ SUS304



รูปที่ 7 เครื่องทดสอบระบบไฮดรอลิกส์



รูปที่ 8 ติดตั้งชุดทดสอบ



รูปที่ 9 วัดมุมชิ้นงานด้วยเครื่อง CMM

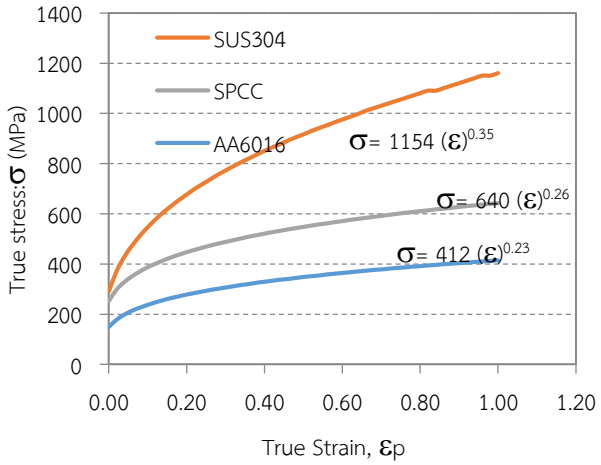
2.2.1 ลำดับขั้นตอนการทดลอง

เพื่อความเชื่อมั่นผลไฟไนเอลิเมนต์ผู้วิจัยได้ทำการทดลองจริงโดยดัดชิ้นงานสำเร็จ จากตัวแปรรัศมีดาย 3 มิลลิเมตร ระยะช่องว่างแม่พิมพ์ 1.25 มิลลิเมตร โดยใช้ขนาดชิ้นงานกว้าง 20 มิลลิเมตร ยาว 70 มิลลิเมตร หนา 1 มิลลิเมตร หลังจากนั้น กดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกส์ เพื่อวัดมุมดัดด้วยเครื่องวัด CMM ดังรูปที่ 9

3. ผลการวิเคราะห์ไฟไนเอลิเมนต์

3.1 ผลของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจริงกับความเครียดจริง

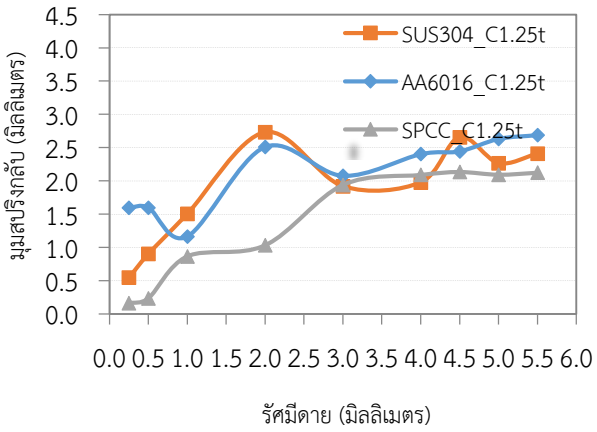
รูปที่ 10 แสดงอิทธิพลความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจริง กับความเครียดจริงของวัสดุต่างชนิดพบว่าวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS304 จะให้พฤติกรรมการไหลตัวในช่วงการเปลี่ยนรูปถาวรเรียกว่า Flow Curve [4,15]สูงกว่าวัสดุเหล็กโครงสร้างเกรด SPCC เท่ากับ 60.32% และอะลูมิเนียมเกรด AA6016เท่ากับ 38.17% ตามลำดับ หรืออาจกล่าวได้ว่าเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS304 มีความสามารถการ เปลี่ยนรูปพลาสติกอย่างถาวรง่ายกว่าวัสดุอื่นเมื่อพิจารณาความสามารถต้านทานการบางลงพบว่าเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS304 สามารถต้านทานการบางลงจากกระบวนการขึ้นรูปได้ดีกว่าวัสดุเหล็กโครงสร้างเกรด SPCC และอะลูมิเนียมเกรด AA6016 ตามลำดับ เนื่องจากพื้นที่ภายใต้เส้นความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจริง กับความเครียดจริง เรียกว่า ความเหนียวดึง (Tensile Toughness) หรือ มอดูลัสเหนียวดึง เป็นความสามารถของวัสดุในการดูดซับพลังงานได้สูงสุดก่อนชิ้นทดสอบขาด [14-15] สูงกว่าวัสดุทั้งสองประเภท โดยข้อมูลของวัสดุได้จากซอฟแวร์ในโปรแกรม Ls – Dyna



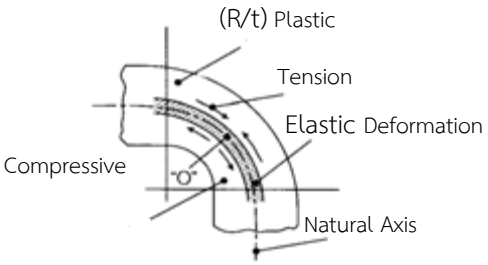
รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจริง และความเครียดจริง

3.2 ผลของอิทธิพลวัสดุที่มีผลต่อการสปริงกลับ

รูปที่ 11 แสดงอิทธิพลความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีดายกับมุมสปริงกลับ ของวัสดุต่างชนิดกัน พบว่ารัศมีดายเพิ่มขึ้นมุมสปริงกลับเพิ่มขึ้นด้วยเช่นเดียวกัน เนื่องจากพลังงานการยืดตัว (Elastic Energy) ที่ตกค้างอยู่พยายามทำให้วัสดุกลับคืนสภาพเดิม [10,14] ดังรูปที่ 12 ดังนั้นจึงทำให้มีแรงสปริงในแผ่นโลหะ เมื่อพิจารณาวัสดุต่างชนิด แยกพิจารณาเป็น 2 ช่วงดังนี้ ช่วงที่ 1 รัศมีดายตั้งแต่ 0 ถึง 2.0 มิลลิเมตร พบว่าการสปริงกลับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ช่วงที่ 2 รัศมีดายตั้งแต่ 2.0 ถึง 5.5 มิลลิเมตร พบว่ามุมสปริงกลับของวัสดุใกล้เคียงกัน แต่วัสดุอะลูมิเนียมเกรด AA6016 จะให้มุมสปริงกลับมากกว่าวัสดุเหล็กโครงสร้างเกรด SPCC เท่ากับ 8.5% และ เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 304 เท่ากับ 49.31% ตามลำดับเนื่องจากวัสดุที่มีค่าความแข็งแรงจุดคราก (Yield Strength) ต่ำเป็นผลทำให้คุณสมบัติการเปลี่ยนรูปจากแบบยืดหยุ่น ไปเป็นพลาสติกอย่างถาวร ในช่วงความเค้นดึงและความเค้นอัดได้น้อย ดังรูปที่ 10



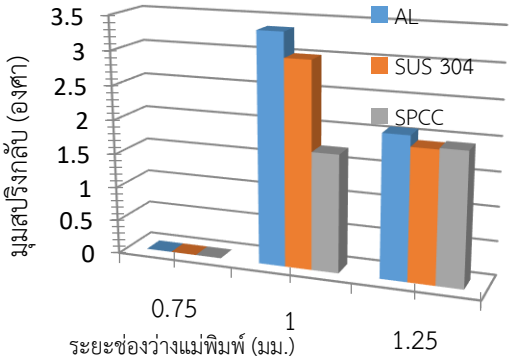
รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมสปริงกลับ กับรัศมีดายของวัสดุที่แตกต่างกัน



รูปที่ 12 พฤติกรรมการสปริงกลับ [17]

3.3 ผลของอิทธิพลช่องว่างแม่พิมพ์ที่มีผลต่อการสปริงกลับ

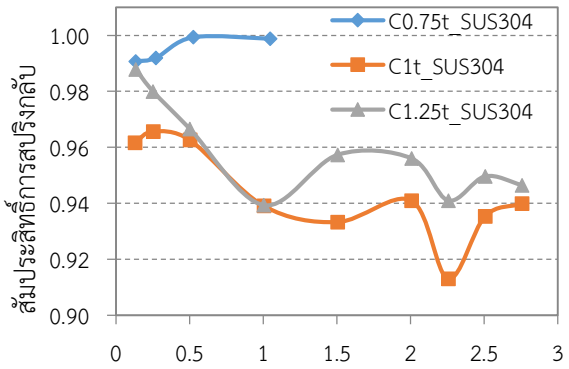
รูปที่ 13 แสดงอิทธิช่องว่างแม่พิมพ์ ที่มีผลต่อการสปริงกลับ ของวัสดุต่างชนิดกันพบว่าช่องว่างแม่พิมพ์มีอิทธิพลต่อการสปริงกลับ ซึ่งชิ้นงานทั้งสามชนิดมีแนวโน้มเดียวกัน หมายถึงช่องว่างแม่พิมพ์จาก 0.75 ไปยัง 1 มิลลิเมตร การสปริงกลับเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง หลังจากนั้นลดลงเมื่อช่องว่างแม่พิมพ์เพิ่มขึ้น (จาก1 ไปยัง 1.25 มิลลิเมตร) เนื่องจากช่องว่างแม่พิมพ์แคบชิ้นงานจะถูกพันช์ลากผ่านดายในลักษณะการรีด (Lroning) ส่งผลให้ชิ้นงานหุบเข้า [4-6] หรือเรียกว่า Spring – Go ทำให้ความเค้นสูงสุดเกิดขึ้นบนผิวชิ้นงาน จนกระทั่งถึงช่องว่างแม่พิมพ์ 1 มิลลิเมตร การสปริงกลับลดลง เพราะแผ่นชิ้นงานมีเพียงบางส่วนถูกรีด แต่พื้นที่ส่วนที่ส่วนใหญ่เป็นการดัดขึ้นรูป [14] จึงทำให้ความเค้นน้อยกว่าช่องว่างแคบ



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมสปริงกลับกับระยะช่องว่างแม่พิมพ์

3.4 ผลของอิทธิพลสัมประสิทธิ์ที่มีผลต่อการสปริงกลับ

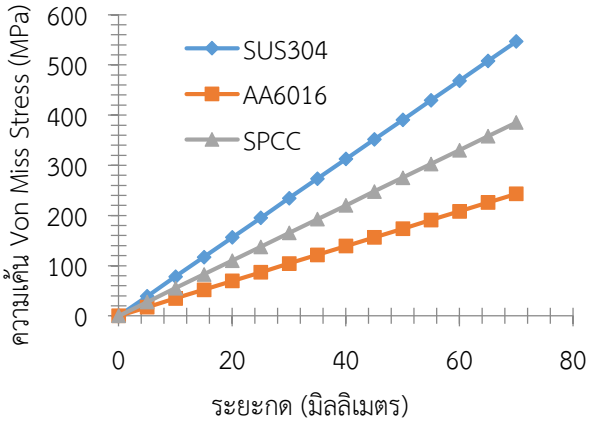
รูปที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนรัศมีดายต่อความหนาชิ้นงาน (R/t) กับสัมประสิทธิ์การสปริงกลับของวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS304 ที่ช่องว่างแม่พิมพ์แตกต่างกัน พบว่าอัตราส่วนรัศมีดายต่อความหนาชิ้นงานที่ช่องว่างแม่พิมพ์มากกว่าความหนาชิ้นงานมีผลต่อสัมประสิทธิ์การสปริงกลับใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาอัตราส่วนรัศมีดายต่อความหนาชิ้นงานของช่องว่างแม่พิมพ์น้อยกว่าความหนาชิ้นงาน พบว่าชิ้นงานจะยืดและขาดเนื่องจากระยะช่องว่างแม่พิมพ์แคบแผ่นชิ้นงานถูกรีด (Ironing) จากการเคลื่อนที่ของพันช์ผ่านไปยังดาย จึงทำให้การสปริงกลับของแผ่นชิ้นงานเป็นการหุบเข้า เรียกว่า Spring Go หมายความว่าช่องว่างแม่พิมพ์ มีผลต่อสัมประสิทธิ์การสปริงกลับคือมุมสปริงกลับชิ้นงานน้อย เมื่อสัมประสิทธิ์การสปริงกลับเพิ่มขึ้น [17]



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การสปริงกลับกับ R/t ของช่องว่างแม่พิมพ์ที่ต่างกัน

3.5 ผลการวิเคราะห์ความเค้น Von Miss Stress จากไฟไนเอลิเมนต์

จากรูปที่ 15 พบว่าวัสดุแต่ละชนิดจะให้ค่าความเค้น Von Miss Stress ไม่เท่ากัน อะลูมิเนียมเกรด AA6016 มีความเค้นน้อยกว่าเหล็กโครงสร้างเกรด SPCC และเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS304 เท่ากับ 36.82% และ 82.665% ตามลำดับ

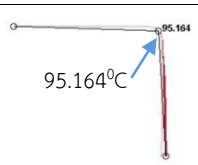
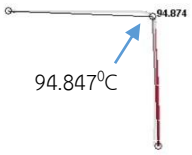
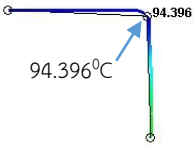


รูปที่ 15 ค่าความเค้นของวัสดุที่แตกต่างกัน

3.6 ผลการเปรียบเทียบไฟไนเอลิเมนต์กับการทดลองจริง

ตารางที่ 2 แสดงความแตกต่างระหว่างไฟไนเอลิเมนต์กับการทดลองจริงพบว่าการสปริงกลับของวัสดุแต่ละชนิดมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน คือผลการสปริงกลับทางไฟไนเอลิเมนต์จะให้ค่าน้อยกว่าการทดลองจริง วัสดุอะลูมิเนียมเท่ากับ 3.459% เหล็กโครงสร้างเกรด SPCC เท่ากับ สปริงกลับ 4.742% และ เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS304 เท่ากับ 5.359%

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบมุมสปริงกลับระหว่างไฟไนเอลิเมนต์กับการทดลองจริง

ชนิดวัสดุ	ไฟไนเอลิเมนต์	การทดลองจริง	ผลต่าง
AA6016			0.674°C
SPCC			0.20 °C
SUS304			0.119°C

4. บทสรุป

ผลการจำลองสปริงกลับของวัสดุต่างชนิด ด้วยไฟไนเอลิเมนต์ โดยเปลี่ยนรัศมีดาย และช่องว่างแม่พิมพ์ เพื่อวิเคราะห์มุมและสัมประสิทธิ์การสปริงกลับสรุปได้ดังนี้

1. ตัวแปรรัศมีดายและช่องว่างแม่พิมพ์ มีผลต่อการสปริงกลับ
2. รัศมีดายเป็นสัดส่วนโดยตรงกับมุมสปริงกลับ
3. สัมประสิทธิ์การสปริงกลับของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS304 มีอัตราส่วนรัศมีดายต่อความหนาชิ้นงาน (R/t) ที่แตกต่างกัน ทำให้สัมประสิทธิ์การสปริงกลับไม่เท่ากันซึ่งแสดงว่าอัตราส่วนรัศมีดายต่อความหนาชิ้นงานเพิ่มขึ้นในขณะที่สัมประสิทธิ์การสปริงกลับจะลดลง
4. ความแข็งแรงจุดครากมีผลโดยตรงต่อการสปริงกลับ
5. การจำลองไฟไนเอลิเมนต์ใกล้เคียงกับการทดลองจริง

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้ทำการวิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ที่ให้การสนับสนุนการวิจัย และขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ที่ให้ความเอื้อเฟื้อโปรแกรมวิเคราะห์สำหรับการวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Budcharoentong D. Theory of plasticity and plastic deformation. In: Enhance Media Bangkok center. editor. Bangkok: 2005. p. 150-180.Thai

[2] Buranathiti T, Kositpipat A. Sheet metal forming. J of King Mongkut' s University of Technology. 2006; 16(13): 14-18.

[3] Mohammad AT. Spring back in bending of sheet metal and plates. Experiment 2012 [cited 2012 Aug 5(15) Available from: https://www.scribd. com /document/102921763.

[4] Groover MP. Fundamentals of modern manufacturing.2007 [cited 2012 Apr 18] 2007 Available from:https://www.scribd.com/ presentation/90022380.

[5] Poli C. Design for Manufacturing:a structured approach. In: Elsevier Science, editor.; 2001. 23–80.

[6] Patil NB, Badhes. Review of finite element simulatons in sheet metal forming process. J Engineering and technology (IRJET) 2017; 4(5):2729-2731.

[7] Ling YE, LEE HP, CHEOK BT. Finite element Analysis of spring back in L- bending of sheet metal. J Mater Proces Tech. 2005; 168(2):296-302

[8] Tokiner Z. An experimental study on the examination of spring back of sheet metals with several thicknesses and properties in bending dies. J Mater Proces Tech. 2004 ;145(1):109-117.

[9] Garcia – Romen ML, Ciurana.J, Fevrev I Springback determination of sheet metal in an air bending process based on an experimental work. J Mater Proces Tech. 2007;191(1-3):174-177.

[10] Zhang DJ, Cui ZS, CHENZhi -Y, RUANXue – YU. An analytical model for prediction sheet springback after V- bending J Zhejiang Univ Sci A. 2007;8(2):237-244.

[11] Belytschko, T, Lin, JI, Tsai CS. Explicit algorithms for one - point quadrature shell element computational Methods in applied mechanics and engineering. 1984;42:225-51.

[12] Kattimani KD, Kakamarim PK, Tavildar RK. Springback analysis of wipe bending process by Ansys. J Emerging Technologies and Innovative Research (JETIR).2(8): 2349-5162.

[13] Gawade SD, Nandedkar VM. Spring back in sheet metal bending – A review. J of Mechanical and civil engineering (IOSR-JMCE).2014; p.53-56

[14] Mohamed FA, Xiaoxing L. Determination of spring back in sheet metal forming. J Univerity of galati fascicle; C. 2009.129-134.

[15] AlieWube DT, Tafesse GB, Numerical Investigation of spring back on sheet metal Bending process. J of Researches inEngineering: A Mechanical and Mechanics Engineering.16(4): 2249-4596.

[16] Sutasn TM. Finite element analysis on V-die bending process. 2014 Jun [cited 2014 Aug 23] Available from:https://www. scribd.com/ document/236983574.

[17] Ritta B, Khruakham A, Runrukra K. Finite element parameter analysis of spring back in L-Bending of sheet Metal 4st Rajamangala Manufacturing and Management Technology Conference 2019. May 19: 35–44.

การพัฒนาก้อนถ่านอัดแท่งจากเศษถ่านของโรงไฟฟ้าชีวมวลชุมชนทองแสนขันด้วยแอลกอฮอล์แข็งเพื่อการติดไฟและการเผาไหม้ของก้อนถ่านอัดแท่ง

Development of Charcoal Briquette Produced from Small Fragments Charcoal of Thong Saen Khan Community Biomass Power Plant Using Solid Alcohol to Ignite and Combust Charcoal Briquette

รัศมี สิทธิขันแก้ว[1 *] กรวิทย์ พุ่มพวง[2] ศักดิ์ดา แสงสุวรรณ[2] สกุลชาติ ขุนเพ็ชร[2] นฤมล สีพลไกร[2] และประเทือง โมราราย[3]

[1] วิทยาลัยพลังงานทดแทนและสมาร์ตกริดเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยนเรศวร
99 หมู่ 9 ตำบลท่าโพธิ์ อำเภอเมืองพิษณุโลก จังหวัดพิษณุโลก 65000

[2] สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
99 หมู่ 9 ตำบลท่าโพธิ์ อำเภอเมืองพิษณุโลก จังหวัดพิษณุโลก 65000

[3] ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
99 หมู่ 9 ตำบลท่าโพธิ์ อำเภอเมืองพิษณุโลก จังหวัดพิษณุโลก 65000

Russamee Sitthikhankaew[1*], Korawit Pumpuang[2], Sakda Sangsuwan[2], Sakunchat Kunphet[2], Narumon Seeponkai[2] and Prathung Moraray[3]

[1] School of Renewable Energy and Smart Grid Technology, Naresuan University
99 Moo 9 Thapo, Muang Phitsanulok, Phitsanulok, Thailand, 65000

[2] Materials Engineering Division, Industrial Engineering Department, Faculty of Engineering, Naresuan University
99 Moo 9 Thapo, Muang Phitsanulok, Phitsanulok, Thailand, 65000

[3] Industrial Engineering Department, Faculty of Engineering, Naresuan University
99 Moo 9 Thapo, Muang Phitsanulok, Phitsanulok, Thailand, 65000

[*]ผู้รับผิดชอบบทความ: russamees@nu.ac.th; russamee5@gmail.com เบอร์โทรศัพท์ 09-1778-9179

Received: 9 March 2020, Revised: 20 August 2020, Accepted: 28 August 2020

บทคัดย่อ

เศษถ่านของโรงไฟฟ้าชีวมวลชุมชนทองแสนขัน ซึ่งมีลักษณะเป็นเศษถ่านก้อนเล็ก ๆ เมื่อนำมาทำการติดไฟและทำให้เกิดการเผาไหม้ต่อเนื่องในเตาหุงต้มระดับครัวเรือนนั้นไม่สามารถทำได้ ในการวิจัยนี้ จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อทำการพัฒนาเศษถ่านของโรงไฟฟ้าชีวมวลชุมชนทองแสนขันให้เกิดการเพิ่มการติดไฟและการเผาไหม้ โดยใช้กระบวนการบดและอัดเศษถ่านให้เป็นก้อนถ่านอัดแท่งรูปทรงกระบอก และมุ่งเน้นการพัฒนาด้วยการผสมแอลกอฮอล์แข็งในกระบวนการผลิตก้อนถ่านอัดแท่ง ที่ค่าร้อยละ 2.16 4.48 7.04 และ 10.00 โดยน้ำหนัก เปรียบเทียบกับการผลิตก้อนถ่านอัดแท่งแบบที่มีการชุบเคลือบแอลกอฮอล์แข็ง และแบบไม่ผสมแอลกอฮอล์แข็ง ผลการศึกษาพบว่า การผสมด้วยแอลกอฮอล์แข็งและแบบที่มีการชุบเคลือบแอลกอฮอล์แข็ง ให้ผลดีกว่าแบบไม่ผสมแอลกอฮอล์แข็ง ทั้งระยะเวลาในการติดไฟและการเผาไหม้ก้อนถ่านเพื่อให้ถ่านแดงทั่วทั้งก้อน ส่วนพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ของก้อนถ่านอัดแท่ง น้ำหนัก 200 กรัม เมื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในเตาหุงต้มระดับครัวเรือน พบว่าถ่านอัดแท่งสูตรที่ 2 ซึ่งผสมแอลกอฮอล์แข็ง ร้อยละ 2.16 โดยน้ำหนัก ให้ค่าพลังงานความร้อนสูงสุด เท่ากับ 303,000 แคลอรี่ และทำให้อุณหภูมิของน้ำในหม้อต้มมีค่าสูงสุด (87 องศาเซลเซียส) ในระยะเวลาการเผาไหม้ 20 นาที ส่วนระยะเวลาการเผาไหม้ก้อนถ่านอัดแท่งจนมอดดับนาน 96 นาที ถ่านอัดแท่งสูตรที่ 2 จึงมีความเหมาะสมมากที่สุดในการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลในเตาหุงต้มระดับครัวเรือน

คำสำคัญ การติดไฟ การเผาไหม้ ถ่านอัดแท่ง แอลกอฮอล์แข็ง โรงไฟฟ้าชีวมวล

Abstract

Charcoal fragments of Thong Saen Khan Community Biomass Power Plant are small in size. When ignited, it can not ignite and combust continuously in household furnace. The objective of this research is to develop small charcoal fragments of Thong Saen Khan Community Biomass Power Plant with increased ignition and combustion. The small fragments charcoal be done by cutting and milling and densification process to produce cylindrical charcoal briquette. In addition, the development focuses on charcoal briquette production process by mixing with solid alcohol (2.16 %, 4.48 %, 7.04 % and 10.00 % by weight) or alcohol dip coating, compared with charcoal briquette without mixed with solid alcohol. The result shows that solid alcohol mixing process and alcohol dip coating provide better results (the duration of ignition and combustion of charcoal briquette until the whole of charcoal briquette turned red) than non-mixing solid alcohol. The thermal energy generated by combustion reaction of 200 grams charcoal briquette when used as fuel in household furnace. It was found that the second formula of the charcoal briquette, which was mixed with solid alcohol 2.16 % by weight, gave the highest thermal energy as 303,000 calories. In addition, the highest water temperature in the pot (87 °C) was achieved in 20 minute of combustion time. While the total combustion time until the charcoal briquette extinguished was 96 minutes. The second formula of the charcoal briquette was the most suitable to be used as a biomass fuel in household stoves.

Keywords: Biomass Power Plant, Charcoal Briquette, Combustion, Ignition, Solid Alcohol

1. บทนำ

ปัจจุบันชีวมวลสามารถนำมาใช้เป็นพลังงานได้หลายรูปแบบ เช่น นำไม้หรือวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร มาใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยตรงสำหรับการเผาไหม้เพื่อให้ความร้อนในระดับครัวเรือน หรือโรงงานอุตสาหกรรม [1-3] ชีวมวลที่ได้กล่าวมานั้นยังสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการกระบวนการผลิตถ่านโดยนำมาเผาในเตาเผาถ่านโดยใช้กระบวนการเผาในสภาวะไร้ออกซิเจน หรือการเผาแบบอับอากาศ) [4-6] หรือได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่น (Gasification) ของโรงไฟฟ้าชีวมวลที่มีใช้เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบไหลลง (Downdraft Gasifier) จากวัตถุดิบชีวมวล [7]

จากการที่โรงไฟฟ้าชีวมวลชุมชนทองแสนขัน อำเภอทองแสนขัน จังหวัดอุตรดิตถ์ ได้ผลิตพลังงานไฟฟ้าจากการนำไม้กระถินยักษ์สับท่อน ไปเป็นเชื้อเพลิงในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบไหลลง ซึ่งในกระบวนการผลิตไฟฟ้านั้นจะเกิดเศษถ่านซึ่งมีลักษณะเป็นก้อนเล็ก ๆ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1-5 เซนติเมตร (cm) รวมทั้งเกิดผงถ่านเกิดขึ้น เมื่อนำเศษถ่านและผงถ่านที่ถูกทำการบดละเอียดไปทำการทดสอบค่าพลังงานความร้อนของถ่านดังกล่าว โดยใช้เครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์ จะมีค่าเฉลี่ยของค่าพลังงานความร้อนเท่ากับ ค่าความร้อนของเศษถ่านของโรงไฟฟ้าชีวมวลชุมชนทองแสนขัน 6,593 กิโลแคลอรี่ต่อกิโลกรัม (kCal/kg) ซึ่งเศษถ่านและผงถ่านที่เกิดขึ้นมีปริมาณประมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของวัตถุดิบเริ่มต้น ซึ่งเมื่อเทียบเป็นปริมาณสะสมในการดำเนินการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าชีวมวลชุมชนทองแสนขันในแต่ละเดือนก็จะพบว่ามีปริมาณเศษถ่านและผงถ่านเกิดขึ้นปริมาณมาก

เศษถ่านและผงถ่านเหล่านี้สามารถที่จะนำมาจำหน่ายเพื่อสร้างรายได้เพิ่มให้กับทางโรงไฟฟ้า แต่ก็มีราคาต่อหนึ่งหน่วยกิโลกรัมที่ต่ำ เนื่องจากไม่ได้รับความนิยมนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในเตาหุงต้มระดับครัวเรือน อีกทั้งลักษณะทางกายภาพของเศษถ่านและผงถ่านที่มีขนาดเล็กมาก ๆ รวมทั้งเป็นผงละเอียด จะทำให้ไม่มีช่องว่างของอากาศที่ไหลผ่านภายในเตาหุงต้มระดับครัวเรือน ซึ่งก่อให้เกิดการขัดขวางการลุกไหม้และเผาไหม้ในเตาหุงต้มระดับครัวเรือน จากประเด็นปัญหาที่เกิดขึ้น จึงนำมาสู่หัวข้อในการทำวิจัย

โดยในการศึกษาวิจัยครั้งนี้จะทำการปรับปรุงลักษณะทางกายภาพของถ่านในลักษณะของการเพิ่มความหนาแน่นของถ่าน โดยจะทำการอัดแท่งเศษถ่านและผงถ่านที่ได้จากโรงไฟฟ้าชีวมวลชุมชนทองแสนขัน และนำมาสู่การพัฒนากระบวนการผลิตก้อนถ่านอัดแท่ง เพื่อเพิ่มการติดไฟและการเผาไหม้ของก้อนถ่านอัดแท่ง โดยจะเน้นไปที่การนำสารที่มีความสามารถในการติดไฟได้ง่าย ได้แก่ แอลกอฮอล์แข็ง มาใช้ในกระบวนการผลิตก้อนถ่านอัดแท่ง เนื่องจากแอลกอฮอล์แข็งถูกผลิตและนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงที่ให้ความร้อนแก่อาหาร ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในร้านอาหาร ซึ่งแอลกอฮอล์แข็งสามารถผลิตมาจากแอลกอฮอล์ (ปริมาณที่ใช้ในการผลิตประมาณร้อยละ 95) โซดาไฟ และกรดสเตียริค [8]

จากการค้นคว้า และทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตถ่านอัดแท่งจากชีวมวลต่าง ๆ ยกตัวอย่าง เช่น ซังข้าวโพด กะลามะพร้าว เปลือกมะขาม หญ้าแฝก

ใบยูคาลิปตัสและใบยางพารา เปลือกหมาก เปลือกทุเรียน [4-6, 9-13] โดยทำการค้นคว้าเปรียบเทียบวัสดุหรือสารเคมีที่ใส่ลงไปผสมในผงถ่าน ก่อนทำการผสม และทำการอัดแท่งก้อนถ่านในรูปทรงต่าง ๆ จะพบว่ายังไม่มีการนำแอลกอฮอล์แข็งผสมลงไปในผงถ่าน รวมถึงไม่มีการชุบเคลือบถ่านอัดแท่งด้วยแอลกอฮอล์แข็ง เพื่อเน้นไปที่การเพิ่มการติดไฟและการเผาไหม้ของถ่านอัดแท่ง จะมีเพียงแต่การใส่แป้งมันสำปะหลังหรือกาวจากแป้งมันสำปะหลัง ลงไปในผงถ่าน เพื่อใช้เป็นตัวประสานระหว่างผงถ่านและน้ำ และทำให้ผงถ่านสามารถอัดขึ้นรูปเป็นก้อน และยังคงรูปได้ภายหลังการอัดแท่ง [4-6, 9-13]

โดยในบทความวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยได้ทำการศึกษาการใช้แอลกอฮอล์แข็งผสมที่มีต่อการติดไฟและการเผาไหม้ของก้อนถ่านอัดแท่งซึ่งถูกผลิตจากเศษถ่านเหลือทิ้งของโรงไฟฟ้าชีวมวลชุมชนทองแสนขัน เพื่อที่จะนำกระบวนการ รวมถึงสูตรส่วนผสมแบบต่าง ๆ ที่ใช้ในกระบวนการผลิตก้อนถ่านอัดแท่งดังกล่าว ไปถ่ายทอดให้กับผู้ประกอบการโรงไฟฟ้าชีวมวลชุมชนทองแสนขัน รวมถึงประชาชนในพื้นที่ใกล้เคียงโรงไฟฟ้าอำเภอทองแสนขัน จังหวัดอุตรดิตถ์ หรือประชาชนทั่วไป เพื่อก่อให้เกิดการเพิ่มมูลค่าของเศษถ่านจากกระบวนการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าชีวมวล เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้ในเตาเผาที่ใช้ในภาคครัวเรือน หรือภาคธุรกิจในอนาคต

2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

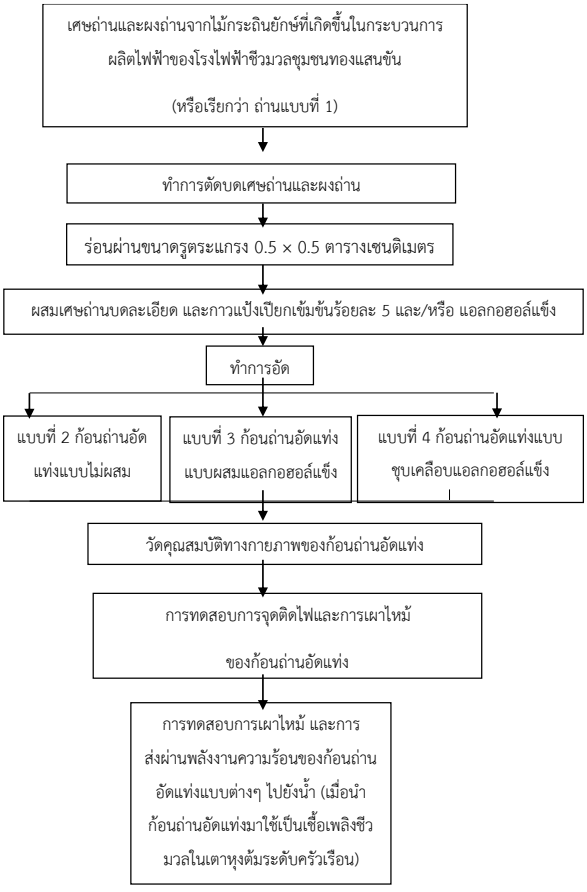
ถ่านที่ทำการพัฒนาและทดสอบ แบ่งออกเป็น 4 แบบ คือ
แบบที่ 1 เศษถ่านและผงถ่านจากไม้กระถินยักษ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าชีวมวลชุมชนทองแสนขัน
แบบที่ 2 ถ่านอัดแท่งแบบไม่ผสมแอลกอฮอล์แข็ง
แบบที่ 3 ถ่านอัดแท่งแบบผสมแอลกอฮอล์แข็ง
แบบที่ 4 ถ่านอัดแท่งแบบชุบเคลือบแอลกอฮอล์แข็ง
โดยถ่านแบบที่ 1 จะถูกนำมาใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในกระบวนการผลิตถ่านอัดแท่งแบบที่ 2-4 ซึ่งขั้นตอนการผลิตและทดสอบก้อนถ่านอัดแท่ง ตารางที่ 1 และแสดงดังรูปที่ 1

2.1 ขั้นตอนการผลิตถ่านอัดแท่งแบบที่ 2 (ถ่านอัดแท่งแบบไม่ผสมแอลกอฮอล์แข็ง)

เริ่มต้นจากนำถ่านแบบที่ 1 ดังรูปที่ 2 ก) ซึ่งมีขนาดประมาณ 1-2 เซนติเมตร นำไปตัดบด ด้วยเครื่องตัดบดแบบ Hammer Mill ซึ่งถ่านที่ผ่านการตัดบดและสามารถผ่านรูตะแกรงของเครื่องตัดบด (ขนาดประมาณ 6 มิลลิเมตร) ดังรูปที่ 2 ข) จะถูกนำไปผลิตถ่านอัดแท่งแบบที่ 2-4

ตารางที่ 1 ประเภทของถ่านที่ทำการวิจัย

ประเภทของถ่าน	ประเภทของถ่าน	ถ่านอัดแท่งสูตรที่	แอลกอฮอล์ (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)
แบบที่ 1	เศษถ่านและผงถ่านจากไม้กระถินยักษ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าชีวมวลชุมชนทองแสนขัน	ไม่ได้ทำการอัดแท่ง	0.00
แบบที่ 2	ถ่านอัดแท่งแบบไม่ผสมแอลกอฮอล์แข็ง	1	0.00
แบบที่ 3	ถ่านอัดแท่งแบบผสมแอลกอฮอล์แข็ง	2	2.16
แบบที่ 3	ถ่านอัดแท่งแบบผสมแอลกอฮอล์แข็ง	3	4.48
แบบที่ 3	ถ่านอัดแท่งแบบผสมแอลกอฮอล์แข็ง	4	7.04
แบบที่ 3	ถ่านอัดแท่งแบบผสมแอลกอฮอล์แข็ง	5	10.00
แบบที่ 4	ถ่านอัดแท่งแบบชุบเคลือบแอลกอฮอล์แข็ง	6	ชุบเคลือบ



รูปที่ 1 ขั้นตอนการผลิตและทดสอบก้อนถ่านอัดแท่งแบบที่ 2-4



ก) เศษถ่านและผงถ่านที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตไฟฟ้า (ก่อนทำการตัดบด)



ข) ถ่านจากไม้กระถินยักษ์ที่เกิดในกระบวนการผลิตไฟฟ้า ที่ผ่านการตัดบดด้วยเครื่อง Hammer Mill (ภายหลังการตัดบด)

รูปที่ 2 ถ่านแบบที่ 1 (ก่อนทำการตัดบด) และถ่านจากไม้กระถินยักษ์ จากกระบวนการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าชีวมวลชุมชนทองแสนขัน (ภายหลังการตัดบด)

จากนั้นนำถ่านที่ผ่านการบด 400 กรัม ไปผสมกับกาวแป้งเปียก 100 กรัม (สัดส่วนของกาวแป้งเปียกเท่ากับร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก) คลุกเคล้าถ่านและกาวแป้งเปียกให้เข้ากันด้วยมือ จากนั้นนำของผสมไปใส่ในแม่พิมพ์รูปทรงกระบอกที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร และความยาว 6 เซนติเมตร แล้วนำมาอัดแท่งโดยใช้เครื่องอัดแท่งไฮดรอลิกที่ความดัน 50 บาร์ (ดังรูปที่ 3)





รูปที่ 3 การอัดแท่งผงถ่านด้วยเครื่องอัดแท่งไฮดรอลิกที่ความดัน 50 บาร์

จากนั้นนำก้อนถ่านอัดแท่งไปอบในตู้อบลมร้อน อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อทำให้ก้อนถ่านแห้ง ซึ่งจะได้ก้อนถ่านอัดแท่งแบบไม่ผสมแอลกอฮอล์ ที่มีความแห้งและแข็งแรง มีรูปทรงกระบอกตัน เส้นผ่าศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร และความยาวอยู่ในช่วง 6-7 เซนติเมตร



รูปที่ 4 ก้อนถ่านอัดแท่งแบบที่ 2 (ถ่านอัดแท่งแบบไม่ผสมแอลกอฮอล์แข็ง)

2.2 ขั้นตอนการผลิตถ่านอัดแท่งแบบที่ 3 ถ่านอัดแท่งแบบผสมแอลกอฮอล์แข็ง

คณะผู้วิจัยได้ทำการศึกษาและผลิตถ่านอัดแท่งแบบผสมแอลกอฮอล์แข็ง ที่มีปริมาณของแอลกอฮอล์แข็งแตกต่างกัน ได้แก่ ร้อยละ 2.16 4.48 7.04 และ 10.00 โดยน้ำหนัก โดยกำหนดให้ปริมาณของแอลกอฮอล์แข็งไม่เกินร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เพื่อวัสดุหลักที่ผลิตได้ยังคงมาจากผงถ่าน และเพื่อให้ค่าความร้อนหลักยังคงมาจากถ่าน

นำถ่านที่ผ่านการบดละเอียด กาวแป้งเปียก และแอลกอฮอล์ มาทำการชั่งตามสัดส่วนต่าง ๆ ของแต่ละสูตร (สูตรที่ 2-5) ดังตารางที่ 2

แอลกอฮอล์แข็งถูกนำไปให้ความร้อนจากเตาไฟฟ้าและถาดน้ำมันร้อน ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 20 นาที ซึ่งจะทำให้แอลกอฮอล์แข็งกลายเป็นของเหลว จากนั้นจึงนำของเหลวไปผสมกับถ่านและกาวแป้งเปียก และทำการคลุกเคล้าด้วยมือจนส่วนผสมทั้งสามเข้ากัน มองเห็นเป็นเนื้อเดียวกัน จึงนำไปใส่ในแม่พิมพ์รูปทรงกระบอก ทำการอัดแท่งโดยใช้เครื่องอัดแท่งไฮดรอลิกที่ความดัน 50 บาร์ จากนั้นนำไปอบในตู้อบลมร้อน อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อทำให้ก้อนถ่านแห้ง ก่อนที่จะนำไปทำการทดสอบการติดไฟและการเผาไหม้ต่อไป

ตารางที่ 2 ส่วนผสมของถ่านอัดแท่ง สูตรที่ 1-5 สำหรับการผลิตก้อนถ่านอัดแท่งแบบที่ 2 และแบบที่ 3

ประเภทของถ่านอัดแท่ง	สูตร	แอลกอฮอล์ (% โดยน้ำหนัก)	แอลกอฮอล์ (กรัม)	กาวแป้งเปียก (กรัม)	ถ่าน (กรัม)
แบบที่ 2	1	0.00	0.0	100	400.0
แบบที่ 3	2	2.16	10.8	100	389.2
	3	4.48	22.4	100	377.6
	4	7.04	35.2	100	364.8
	5	10.00	50.0	100	350.0

2.3 ขั้นตอนการผลิตถ่านอัดแท่งแบบที่ 4 (ถ่านอัดแท่งแบบชุบเคลือบแอลกอฮอล์แข็ง)

แอลกอฮอล์แข็ง น้ำหนัก 200 กรัม จะถูกนำไปให้ความร้อนจากเตาไฟฟ้าและถาดน้ำมันร้อน ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 20 นาที ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 แอลกอฮอล์แข็งที่ถูกนำไปให้ความร้อนจากเตาไฟฟ้าและถาดน้ำมันร้อน ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 20 นาที

ส่วนถ่านอัดแท่งแบบชุบเคลือบแอลกอฮอล์แข็งนั้น จะใช้ถ่านอัดแท่งที่ได้จากขั้นตอนการผลิตในข้อที่ 2.1 ไปทำการจุ่มในของเหลวที่ได้จากการหลอมแอลกอฮอล์แข็งให้กลายเป็นของเหลว ใช้เวลาในการจุ่ม 1 นาที ดังรูปที่ 6 ก)





ก) ก่อนเข้าตู้อบลมร้อน ข) หลังจากเข้าตู้อบลมร้อน

รูปที่ 6 ก้อนถ่านอัดแท่งแบบชุบเคลือบแอลกอฮอล์แข็ง ก่อนและหลังเข้าตู้อบลมร้อน

จากนั้นนำก้อนถ่านอัดแท่งไปทำการอบในตู้อบลมร้อน อุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อทำให้ก้อนถ่านแห้ง ดังรูปที่ 6 ข) ก่อนที่จะนำไปทำการทดสอบการติดไฟและการเผาไหม้ต่อไป

2.4 การวัดคุณสมบัติทางกายภาพของก้อนถ่านอัดแท่ง

ก้อนถ่านอัดแท่ง แบบที่ 2-4 จะถูกทำการสุ่มตัวอย่างจำนวน 10 ก้อนต่อ 1 แบบ ทำการวัดเส้นผ่าศูนย์กลางและความยาว และชั่งน้ำหนักก้อนถ่านอัดแท่ง จากนั้นคำนวณปริมาตรและความหนาแน่นของก้อนถ่านอัดแท่งแต่ละก้อน พร้อมทั้งหาค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นของก้อนถ่านอัดแท่งแต่ละแบบ

2.5 การทดสอบการติดไฟและการเผาไหม้ของก้อนถ่านอัดแท่ง

เนื่องจากถ่านแบบที่ 1 คือ เศษถ่านและผงถ่านจากไม้กระถินยักษ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าชีวมวลชุมชนทองแสนขัน ซึ่งมีความยาว 1-2 เซนติเมตร (มีความยาวน้อยกว่าก้อนถ่านอัดแท่ง) และรูปทรงของถ่านแบบที่ 1 แตกต่างจากถ่านแบบที่ 2-4 ดังนั้นการทดสอบในข้อ 2.5 จะไม่มีการนำถ่านแบบที่ 1 มาทำการทดสอบ และจะทดสอบเฉพาะถ่านอัดแท่งแบบที่ 2-4

แหล่งที่ให้ความร้อนสำหรับการติดไฟเริ่มต้น คือ ตะเกียงแอลกอฮอล์ สำหรับการทดสอบการติดไฟของก้อนถ่านอัดแท่งนั้น จะนำก้อนถ่านอัดแท่งแบบที่ 2-4 จำนวน 1 ก้อน วางแนวตั้งบนตะแกรงที่อยู่สูงเหนือตะเกียงแอลกอฮอล์ 0.5 เซนติเมตร ดังรูปที่ 7 จากนั้นทำการจุดไฟที่ตะเกียงแอลกอฮอล์ เพื่อเป็นแหล่งให้ความร้อนกับถ่านอัดแท่ง



รูปที่ 7 การติดไฟและเผาไหม้ของก้อนถ่านอัดแท่ง

ทำการวัดระยะทางในการเผาไหม้ของถ่านอัดแท่ง เมื่อเวลาผ่านไป 3 นาที และ 5 นาที โดยจะทำการวัดจากปลายขอบของก้อนถ่านอัดแท่งด้านที่เกิดการเผาไหม้และมีสีแดงไปจนถึงจุดที่มีการเผาไหม้และมีสีแดง รวมถึงผู้ทำการวัดจะรับรู้ได้ถึงความแตกต่างของบริเวณที่สีของก้อนถ่านที่แตกต่างกันระหว่างสีแดงกับสีดำ จากนั้นบันทึกผลการทดสอบ ทำการทดสอบตัวอย่างละ 3 ครั้ง โดยกำหนดการทดสอบว่าก้อนถ่านอัดแท่งนั้นมีการติดไฟอย่างสมบูรณ์ เมื่อทำการหยุดให้ความร้อนจากตะเกียงแอลกอฮอล์ แล้วพบว่าก้อนถ่านอัดแท่งสามารถเกิดการเผาไหม้ได้เองอย่างต่อเนื่อง พร้อมทั้งมีสีแดงทั่วทั้งก้อนจึงจะถือว่าเป็นการติดไฟอย่างสมบูรณ์ เพื่อลดค่าความเคลื่อนจากสายตาของผู้สังเกตและทำการวัดค่า รวมถึงเมื่อทำการเปลี่ยนผู้ทำการสังเกตและวัดค่า และใช้เป็นเกณฑ์ในการวัดทุกครั้ง ซึ่งการทดสอบนี้จะทำการทดสอบซ้ำละ

3 ครั้ง และทำการคำนวณค่าทางสถิติอย่างง่ายของการวัดระยะทาง ซึ่งในระยะเวลาต่อจากจุดที่เกิดการติดไฟอย่างสมบูรณ์นี้ ก้อนถ่านอัดแท่งก็ยังคงเกิดการเผาไหม้ต่อไปได้ และผลิตพลังงานความร้อนจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ได้

2.6 การทดสอบการเผาไหม้ และการส่งผ่านพลังงานความร้อนของก้อนถ่านอัดแท่งแบบต่าง ๆ ไปยังน้ำ เมื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลในเตาหุงต้มระดับครัวเรือน

ตัวอย่างถ่านอัดแท่งที่จะทำการทดสอบ ได้แก่ ถ่านอัดแท่งแบบที่ 2-4 โดยเลือกใช้เตามหาเศรษฐี ที่ผลิตตามแบบที่ส่งเสริมของกระทรวงพลังงาน เป็นตัวแทนของเตาหุงต้มระดับครัวเรือน ซึ่งเตามหาเศรษฐีเป็นเตาที่ออกแบบเพื่อให้เกิดการใช้เชื้อเพลิงอย่างเต็มประสิทธิภาพและสามารถที่จะประหยัดเชื้อเพลิงได้ดีเมื่อเทียบกับเตาหุงต้มชนิดอื่น ๆ ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด

นำถ่านอัดแท่งแต่ละแบบ น้ำหนักของ 200 กรัม ไปวางในเตามหาเศรษฐี จากนั้นทำการติดไฟถ่านอัดแท่งทุกก้อนด้วยเปลวไฟจากแก๊สหุงต้ม (LPG) ที่ถูกบรรจุไว้ในกระป๋อง เป็นระยะเวลา 3 นาที ซึ่งจะทำให้ถ่านอัดแท่งทุกก้อนเกิดการเผาไหม้ต่อไปได้เอง โดยไม่จำเป็นต้องใช้แหล่งเปลวไฟและพลังงานความร้อนจากภายนอก

ทำการวางหม้อที่บรรจุน้ำ 1 กิโลกรัมลงบนเตาหุงต้ม โดยทำการวัดอุณหภูมิของน้ำเริ่มต้น และทำการวัดอุณหภูมิของน้ำ เมื่อให้ความร้อนต่อเนื่องพร้อมทั้งจดบันทึกอุณหภูมิทุก ๆ 2 นาที และจดบันทึกอุณหภูมิของน้ำสูงสุดในขณะต้มน้ำ และอุณหภูมิของน้ำในขณะที่สิ้นสุดการต้มน้ำ จนกระทั่งถ่านทั้งหมดถูกเผาไหม้จนหมด ซึ่งสังเกตได้จากอุณหภูมิของน้ำมีค่าคงที่และไม่เกิดการเพิ่มอุณหภูมิ โดยใช้ระยะเวลาทดลองทั้งหมดที่เท่ากัน นาน 96 นาที

ทำการชั่งน้ำหนักน้ำที่คงเหลืออยู่ภายในหม้อ และคำนวณหาปริมาณน้ำที่ได้รับความร้อนจนกระทั่งเกิดการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นก๊าซ (ปริมาณน้ำที่ระเหยไป) และทำการคำนวณหาปริมาณน้ำที่ได้รับความร้อนและการเพิ่มอุณหภูมิ จากนั้นทำการคำนวณหาปริมาณความร้อนทั้งหมดที่น้ำ 1 กิโลกรัมได้รับจากการส่งผ่านความร้อนจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ของถ่านอัดแท่ง ดังสมการที่ (1) โดยพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ของถ่านอัดแท่งและส่งผ่านไปยังน้ำ 1 กิโลกรัมจะทำให้น้ำ 1 กิโลกรัมเกิดการเพิ่มอุณหภูมิ รวมถึงทำให้น้ำบางส่วนเกิดการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นก๊าซ ซึ่งปริมาณความร้อนทั้งหมดที่น้ำได้รับ เมื่อนำไปคำนวณตามสมการที่ (1) ซึ่งอยู่ในหน่วยกิโลจูล (kJ) จะถูกทำการแปลงค่าให้อยู่ในหน่วยแคลอรี่

$$Q = m_w c_w \Delta T + m_e L \quad (1)$$

เมื่อ Q คือ ปริมาณความร้อนทั้งหมดที่น้ำได้รับ (kJ)
m_w คือ มวลของน้ำ (kg)
m_e คือ มวลของน้ำที่ระเหยกลายเป็นไอ (kg)
c_w คือ ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (เท่ากับ 4.187 kJ/kg·°C)
ΔT คือ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (อุณหภูมิน้ำสูงสุด-อุณหภูมิน้ำเริ่มต้น; หน่วย °C)
L คือ ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ (เท่ากับ 2,257 kJ/kg)

ถ่านแบบที่ 1 ซึ่งมีลักษณะเป็นเศษถ่านก้อนเล็ก ๆ รวมถึงผงถ่านนั้น เมื่อนำเศษถ่านและผงถ่านน้ำหนัก 200 กรัม ไปวางในเตามหาเศรษฐี จากนั้นทำการติดไฟถ่านอัดแท่งทุกก้อนด้วยเปลวไฟจากแก๊สหุงต้มที่ถูกบรรจุไว้ในกระป๋อง เป็นระยะเวลา 3 นาที และหยุดให้เปลวไฟ พร้อมทั้งทำการสังเกตการติดไฟและการเผาไหม้

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

3.1 คุณสมบัติทางกายภาพของก้อนถ่านอัดแท่ง

ความหนาแน่นเฉลี่ยของก้อนถ่านอัดแท่งแบบที่ 2-4 แสดงดังตารางที่ 3 พบว่า ค่าความหนาแน่นของถ่านอัดแท่งที่มีปริมาณแอลกอฮอล์ต่าง ๆ จะมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีความหนาแน่นเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.48 - 0.52 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ก้อนถ่านอัดแท่งทั้ง 6 สูตรมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 3 เซนติเมตร และความยาวอยู่ในช่วง 6-7 เซนติเมตร

ตารางที่ 3 ความหนาแน่นเฉลี่ยของก้อนถ่านอัดแท่งแต่ละสูตร

ประเภทของถ่านอัดแท่ง	ถ่านอัดแท่งสูตรที่	แอลกอฮอล์ (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
แบบที่ 2	1	0.00	0.48 ± 0.01
แบบที่ 3	2	2.16	0.51 ± 0.03
แบบที่ 3	3	4.48	0.50 ± 0.01
แบบที่ 3	4	7.04	0.52 ± 0.01
แบบที่ 3	5	10.00	0.51 ± 0.03
แบบที่ 4	6	ชุบเคลือบ	0.52 ± 0.05

3.2 ผลการทดสอบการติดไฟและการเผาไหม้ของก้อนถ่านอัดแท่ง

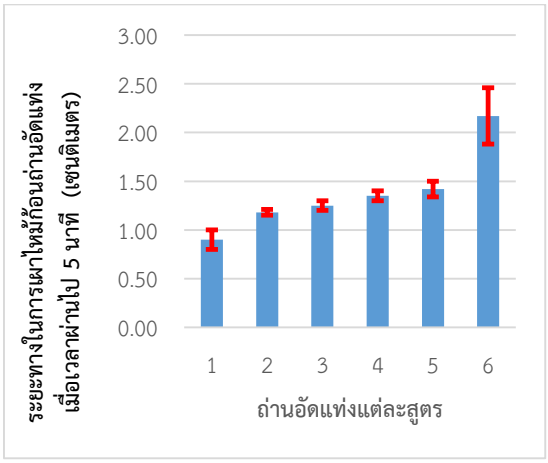
ผลการทดสอบ การติดไฟและการเผาไหม้ของก้อนถ่านอัดแท่งแบบที่ 2-4 ซึ่งมีการทดสอบซ้ำละ 3 ครั้ง แสดงดังตารางที่ 4 และรูปที่ 8-14

เมื่อทำการทดสอบจุดติดไฟและการเผาไหม้ก้อนถ่านอัดแท่ง ระยะเวลา 5 นาที (ดังรูปที่ 8-14) พบว่า สำหรับถ่านอัดแท่งแบบที่ 3 ซึ่งก็คือถ่านอัดแท่งแบบผสมแอลกอฮอล์แข็ง (สูตรที่ 2-5) พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณของแอลกอฮอล์แข็งในส่วนผสมของก้อนถ่านอัดแท่ง จะส่งผลให้ระยะทางในการเผาไหม้เพิ่มสูงขึ้น โดยที่ปริมาณแอลกอฮอล์แข็ง ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ให้ระยะทางในการเผาไหม้สูงที่สุด (1.42 ± 0.08 เซนติเมตร) นอกจากนั้นถ่านอัดแท่งแบบผสมแอลกอฮอล์แข็ง (สูตรที่ 2-5) มีระยะทางการเผาไหม้ที่มากกว่าถ่านอัดแท่งแบบไม่ผสมแอลกอฮอล์แข็ง

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบการติดไฟและการเผาไหม้ของก้อนถ่านอัดแท่งแบบต่าง ๆ

สูตรที่	ปริมาณแอลกอฮอล์ (ร้อยละ)	ระยะทางในการเผาไหม้เมื่อผ่านไป 3 นาที (เซนติเมตร)	ระยะทางในการเผาไหม้เมื่อผ่านไป 5 นาที (เซนติเมตร)	ระยะเวลาการเผาไหม้ก้อนถ่านเพื่อให้ถ่านแดงทั่วก้อน (นาที)
1	0	0.28 ± 0.03	0.90 ± 0.10	75 ± 4.51
2	2.16	0.37 ± 0.06	1.18 ± 0.03	68 ± 2.65
3	4.48	0.43 ± 0.06	1.25 ± 0.05	64 ± 1.00
4	7.04	0.65 ± 0.05	1.35 ± 0.05	62 ± 1.04
5	10.00	0.78 ± 0.08	1.42 ± 0.08	59 ± 0.76
6	ชุบเคลือบ	0.77 ± 0.12	2.17 ± 0.29	45 ± 3.00

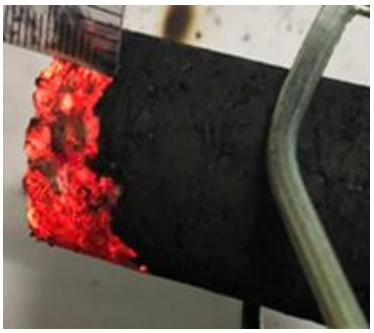
หมายเหตุ -ในกรณีที่หยุดให้ความร้อนด้วยตะเกียงแอลกอฮอล์ แล้วพบว่าถ่านอัดแท่งสามารถเกิดการเผาไหม้ได้เองอย่างต่อเนื่อง พร้อมทั้งมีสีแดงทั่วทั้งก้อน จึงจะถือว่าถ่านอัดแท่งนั้นได้เกิดการติดไฟอย่างสมบูรณ์



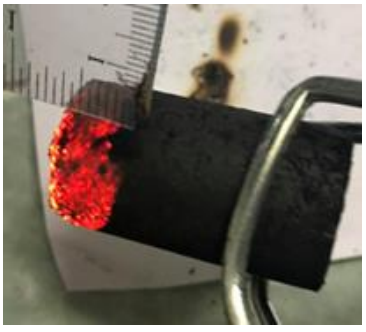
รูปที่ 8 ระยะทางในการเผาไหม้ของถ่านอัดแท่งสูตรต่าง ๆ เมื่อเวลาผ่านไป 5 นาที



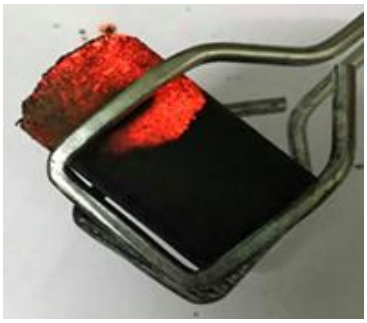
รูปที่ 9 ระยะทางการเผาไหม้ของก้อนถ่านอัดแท่งแบบไม่ผสมแอลกอฮอล์แข็ง หรือสูตรที่ 1 เมื่อเวลาผ่านไป 5 นาที



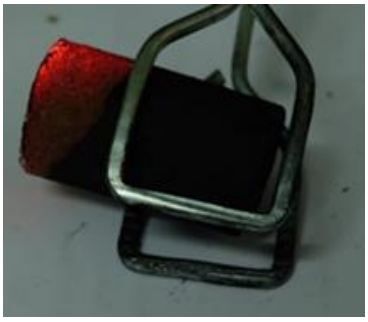
รูปที่ 10 ระยะทางการเผาไหม้ของก้อนถ่านอัดแท่งแบบผสมแอลกอฮอล์แข็ง สูตรที่ 2 เมื่อเวลาผ่านไป 5 นาที



รูปที่ 11 ระยะทางการเผาไหม้ของก้อนถ่านอัดแท่งแบบผสมแอลกอฮอล์แข็ง สูตรที่ 3 เมื่อเวลาผ่านไป 5 นาที



รูปที่ 12 ระยะทางการเผาไหม้ของก้อนถ่านอัดแท่งแบบผสมแอลกอฮอล์แข็ง สูตรที่ 4 เมื่อเวลาผ่านไป 5 นาที



รูปที่ 13 ระยะทางการเผาไหม้ของก้อนถ่านอัดแท่งแบบผสมแอลกอฮอล์แข็ง สูตรที่ 5 เมื่อเวลาผ่านไป 5 นาที



รูปที่ 14 ระยะทางการเผาไหม้ของก้อนถ่านอัดแท่งแบบชุบเคลือบแอลกอฮอล์แข็ง หรือสูตรที่ 6 เมื่อเวลาผ่านไป 5 นาที

สำหรับถ่านอัดแท่งแบบที่ 4 ซึ่งก็คือถ่านอัดแท่งแบบชุบเคลือบแอลกอฮอล์แข็ง เมื่อนำไปทำการทดสอบจุดติดไฟและการเผาไหม้ เมื่อเวลาผ่านไป 5 นาที ดังรูปที่ 9 และรูปที่ 14 จะพบว่า ระยะทางในการเผาไหม้ของก้อนถ่านอัดแท่ง เท่ากับ 2.17 ± 0.29 เซนติเมตร ซึ่งมีระยะทางการเผาไหม้ที่มากกว่าถ่านอัดแท่งแบบไม่ผสมแอลกอฮอล์แข็ง และถ่านอัดแท่งแบบผสมแอลกอฮอล์แข็ง เนื่องจากถ่านอัดแท่งแบบชุบแอลกอฮอล์แข็งจะมีแอลกอฮอล์แข็งเกาะอยู่บริเวณผิวของถ่าน ทำให้เมื่อได้รับพลังงานความร้อนจากตะเกียงแอลกอฮอล์ จะเกิดการเผาไหม้ที่บริเวณของแอลกอฮอล์แข็งก่อน ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ดีกว่า

ผลการศึกษาการใช้แอลกอฮอล์แข็งที่มีต่อการติดไฟและการเผาไหม้ของก้อนถ่านอัดแท่งแบบผสมแอลกอฮอล์แข็ง พบว่า เมื่อปริมาณร้อยละของแอลกอฮอล์แข็งเพิ่มขึ้น จะทำให้ระยะเวลาในการเผาไหม้ก้อนถ่านเพื่อให้ถ่านแดงทั่วทั้งก้อนมีระยะเวลาลดลง ดังตารางที่ 4 นอกจากนั้นก้อนถ่านอัดแท่งแบบผสมแอลกอฮอล์แข็ง (สูตรที่ 2-5) มีระยะเวลาการติดไฟและการเผาไหม้สั้นกว่าก้อนถ่านอัดแท่งที่ไม่มีการผสมแอลกอฮอล์แข็ง ดังตารางที่ 4

เมื่อเปรียบเทียบกระบวนการผลิตก้อนถ่านอัดแท่งที่มีการใช้แอลกอฮอล์แข็งในกระบวนการผลิต ทั้งสองแบบ (แบบที่ 3 คือนำแอลกอฮอล์แข็งทำการผสมไว้ภายในและภายนอกเนื้อถ่านอัดแท่ง และแบบที่ 4 คือการเคลือบแอลกอฮอล์แข็งไว้ที่พื้นผิวด้านนอกของก้อนถ่านอัดแท่ง) พบว่า ก้อนถ่านอัดแท่งแบบที่มีการชุบเคลือบแอลกอฮอล์แข็ง มีระยะเวลาการเผาไหม้ก้อนถ่านให้แดงทั่วทั้งก้อน น้อยกว่าก้อนถ่านอัดแท่งที่มีการผสมแอลกอฮอล์แข็ง (ดังตารางที่ 4) ซึ่งบ่งบอกว่า การเคลือบแอลกอฮอล์แข็งไว้ที่ผิวด้านนอกก้อนถ่านอัดแท่งนั้นจะมีส่วนช่วยให้เกิดการติดไฟและการเผาไหม้ได้อย่างดีและรวดเร็วกว่าการผสมแอลกอฮอล์แข็งไว้ในเนื้อก้อนถ่าน

ตามหลักการของปฏิกิริยาการเผาไหม้ของชีวมวลหรือวัสดุใด ๆ นั้น องค์ประกอบ 3 อย่างที่ก่อให้เกิดการติดไฟของชีวมวลได้แก่ ชีวมวล ก๊าซออกซิเจน และแหล่งให้พลังงานความร้อน (หรือเปลวไฟ) [12, 14] ซึ่งเมื่อนำก้อนถ่านอัดแท่งซึ่งคือชีวมวลไปจ่อกับเปลวไฟที่เกิดจากการเผาไหม้และให้พลังงานความร้อนของตะเกียงแอลกอฮอล์ รวมถึงก๊าซออกซิเจนที่อยู่ในบรรยากาศและอยู่บริเวณรอบนอกของผิวนอกก้อนถ่านอัดแท่ง จะช่วยให้เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้และให้ผลลัพธ์คือพลังงานความร้อน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และน้ำ (H_2O) [7], [14]

สำหรับก้อนถ่านอัดแท่งแบบชุบเคลือบแอลกอฮอล์แข็งซึ่งที่ผิวนอกก้อนถ่านอัดแท่งจะมีองค์ประกอบของแอลกอฮอล์ที่เป็น Ethanol เคลือบอยู่ผิวภายนอก ซึ่ง Ethanol มีจุดเดือดเท่ากับ 78.42 องศาเซลเซียส [15] ซึ่งมีจุดเดือดต่ำกว่าน้ำ และเมื่อ Ethanol ได้รับพลังงานจากแหล่งเปลวไฟของตะเกียงแอลกอฮอล์ จนเกิดการติดไฟและการเผาไหม้ ย่อมจะก่อให้เกิดพลังงานความร้อนที่ช่วยส่งเสริมให้ก้อนถ่านอัดแท่งได้รับพลังงานความร้อนเพิ่มขึ้น จึงสามารถทำให้เกิดการติดไฟและการเผาไหม้ได้เร็วขึ้น เช่นเดียวกับแอลกอฮอล์แข็งที่ทำการผสมไว้ในเนื้อถ่านอัดแท่ง

นอกจากนั้นผลการทดสอบในหัวข้อ 3.3 ซึ่งใช้ระยะเวลาการเผาไหม้ถ่านอัดแท่งที่ทำให้น้ำมีอุณหภูมิสูงสุด ดังแสดงในตารางที่ 5 พบว่าถ่านอัดแท่งแบบผสมแอลกอฮอล์และแบบชุบเคลือบแอลกอฮอล์นั้นจะมีระยะเวลาสั้นกว่า ถ่านอัดแท่งแบบไม่ผสมแอลกอฮอล์

3.3 การทดสอบการเผาไหม้ และการส่งผ่านพลังงานความร้อนของก้อนถ่านอัดแท่งแบบต่าง ๆ ไปยังน้ำ เมื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลในเตาหุงต้มระดับครัวเรือน

ถ่านแบบที่ 1 คือ เศษถ่านและผงถ่านจากไม้กระถินยักษ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าชีวมวลชุมชนทองแสนขัน มีการจัดเรียงตัวที่แน่นและซ้อนทับกันหลายชั้น ทำให้การติดไฟเกิดขึ้นที่ชั้นบนสุด ซึ่งเป็นบริเวณที่สามารถสัมผัสกับก๊าซออกซิเจนอยู่รอบ ๆ ถ่าน เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ได้เพียงชั่วขณะหนึ่งเท่านั้น เมื่อไม่มีปริมาณออกซิเจนหรือไม่มีเปลวไฟจากภายนอก เศษถ่านและผงถ่านเหล่านั้น ก็จะไม่ติดไฟและไม่เผาไหม้ อีกทั้งถ่านในชั้นถัด ๆ ไป ไม่สามารถทำการติดไฟและเผาไหม้ได้ ซึ่งพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นไม่สามารถที่จะทำให้น้ำ 1 กิโลกรัมที่บรรจุไว้ในหม้อ นั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ซึ่งหมายความว่าพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ถ่านแบบที่ 1 นั้นมีปริมาณน้อยมาก จนไม่สามารถแผ่และส่งผ่านพลังงานความร้อนไปยังน้ำได้ รวมถึงไม่สามารถทำการวัดค่าพลังงานความร้อนของถ่าน โดยวิธีการวัดแบบทางอ้อมได้

ผลการทดสอบการเผาไหม้ของก้อนถ่านอัดแท่งแบบที่ 2-4 ซึ่งมีน้ำหนัก 200 กรัม เมื่อนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลในเตาหุงต้มระดับครัวเรือน และการให้พลังงานความร้อนของก้อนถ่านอัดแท่งแต่ละแบบ แสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบการเผาไหม้ และการส่งผ่านพลังงานความร้อนของก้อนถ่านอัดแท่งแบบต่าง ๆ ไปยังน้ำ

สูตรที่	ปริมาณแอลกอฮอล์ (ร้อยละ)	ระยะเวลาการเผาไหม้ที่ทำให้น้ำมีอุณหภูมิสูงสุด (นาที)	อุณหภูมิสูงสุดของน้ำ (องศาเซลเซียส)	พลังงานความร้อนที่น้ำได้รับจากการเผาไหม้ก้อนถ่านอัดแท่ง 200 กรัม (แคลอรี่)
1	0	36	73	159,710
2	2.16	20	87	303,000
3	4.48	24	76	249,020
4	7.04	24	76	232,834
5	10.00	24	74	203,860
6	ชุบเคลือบ	20	69	171,885

ถ่านอัดแท่ง แบบที่ 2-4 เมื่อเกิดการติดไฟและเผาไหม้ย่อมก่อให้เกิดพลังงานความร้อนเป็นผลลัพธ์ของปฏิกิริยาการเผาไหม้ ซึ่งพลังงานความร้อนบางส่วนจะถูกถ่ายเทและส่งผ่านไปยังน้ำ 1 กิโลกรัม ที่ทำการบรรจุในหม้อที่ถูกวางไว้เหนือเตาถ่านที่เกิดการเผาไหม้ ซึ่งน้ำเมื่อรับพลังงานความร้อนดังกล่าว จะเกิดการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของน้ำ จะมีเพียงน้ำบางส่วนที่ได้รับความร้อนจนกระทั่งมีอุณหภูมิจนถึง 100 องศาเซลเซียส จากนั้นน้ำที่มีอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จะนำพลังงานความร้อนไปทำการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นก๊าซ ซึ่งค่าพลังงานความร้อนที่น้ำได้รับจากการส่งผ่านพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ก้อนถ่านอัดแท่ง 200 กรัม (แคลอรี่) จะเป็นแค่พลังงานความร้อนบางส่วนของปฏิกิริยาการเผาไหม้ถ่านอัดแท่ง ที่เกิดการส่งผ่านพลังงานความร้อนไปสู่น้ำในหม้อต้ม ไม่ใช่พลังงานงานทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ถ่านอัดแท่งในระบบเปิด ซึ่งจะมีการสูญเสียพลังงานความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อม หรือบรรยากาศที่อยู่ล้อมรอบเตาเผาและหม้อต้มน้ำ

ถ่านอัดแท่งแบบผสมแอลกอฮอล์แข็ง ทั้ง 4 สูตร ที่สัดส่วนร้อยละของแอลกอฮอล์แข็ง 2.16 4.48 7.04 และ 10.00 โดยน้ำหนัก ทำให้ระยะเวลาการเผาไหม้ถ่านอัดแท่งที่ทำให้น้ำมีอุณหภูมิสูงสุด มีระยะเวลาสั้นกว่า ก้อนถ่านอัดแท่งแบบไม่ผสมแอลกอฮอล์แข็ง

3.4 การนำไปใช้งานจริง

ถ่านอัดแท่งแบบผสมแอลกอฮอล์แข็ง ร้อยละ 2.16 โดยน้ำหนัก (ถ่านอัดแท่ง สูตรที่ 2) ทำให้เกิดค่าพลังงานความร้อนจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ สูงสุด (303,000 แคลอรี่ ต่อถ่าน 200 กรัม) และทำให้อุณหภูมิของน้ำในหม้อต้มมีค่าสูงสุด (87 องศาเซลเซียส) โดยที่ระยะเวลาการเผาไหม้ถ่านอัดแท่งที่ทำให้น้ำมีอุณหภูมิสูงสุดนั้น เป็นระยะเวลาสั้นที่สุด (20 นาที) เมื่อเปรียบเทียบกับก้อนถ่านอัดแท่งแบบไม่ผสมแอลกอฮอล์แข็ง และถ่านอัดแท่งแบบชุบเคลือบแอลกอฮอล์แข็ง ดังนั้นถ่านอัดแท่งสูตรที่ 2 มีความเหมาะสมมากที่สุดในการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลในเตาหุงต้มระดับครัวเรือน

4. บทสรุป

การผสมแอลกอฮอล์แข็งในกระบวนการผลิตก้อนถ่านอัดแท่งจากเศษถ่านของโรงไฟฟ้าชีวมวลชุมชนทองแสนขัน ที่ค่าร้อยละ 2.16 4.48 7.04 และ 10.00 โดยน้ำหนัก รวมทั้งกระบวนการผลิตก้อนถ่านอัดแท่งแบบที่มีการชุบเคลือบแอลกอฮอล์แข็งส่งผลดีต่อการติดไฟและการเผาไหม้ของก้อนถ่านอัดแท่ง (ทั้งระยะเวลาในการติดไฟและการเผาไหม้ก้อนถ่านเพื่อให้ถ่านแดงทั่วทั้งก้อน) และให้ผลการทดสอบดีกว่า ก้อนถ่านอัดแท่งแบบไม่ผสมแอลกอฮอล์แข็ง

พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ของก้อนถ่านอัดแท่ง น้ำหนัก 200 กรัม เมื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในเตาหุงต้มระดับครัวเรือน พบว่าถ่านอัดแท่งแบบผสมแอลกอฮอล์แข็งร้อยละ 2.16 โดยน้ำหนัก ให้ค่าพลังงานความร้อนสูงสุด เท่ากับ 303,000 แคลอรี่ และทำให้อุณหภูมิของน้ำในหม้อต้มมีค่าสูงสุด (87 องศาเซลเซียส) ในระยะเวลาการเผาไหม้ 20 นาทีมีระยะเวลาการเผาไหม้ก้อนถ่านอัดแท่งจนมอดดับ 96 นาที ดังนั้นถ่านอัดแท่งสูตรที่ 2 มีความเหมาะสมมากที่สุดใน

การนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลในเตาหุงต้มระดับครัวเรือน

5. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากทุนอุดหนุนการวิจัย งบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561 (สัญญาเลขที่ R2561B106) คณะผู้วิจัยขอขอบคุณวิทยาลัยพลังงานทดแทนและสมาร์ตกริดเทคโนโลยี และภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่สนับสนุนการทำวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Chaiwattanapipat W, Manonai J, Feungoui P, Phiphattanaphiphop C. The study of property and ingredients of wood pellet from bamboo. Thai Industrial Engineering Network Journal. 2018; 4(2):21-7.Thai.

[2] Wattanachira L, Laapan N, Chatchavarn V, Thanyacharoen A, Rakruam P. Development of biobriquettes from mixed rice-straw and longan waste residues. KMUTT Research and Development Journal. 2016; 39(2):239-255.Thai.

[3] Tangmankongworakoon N. The production of fuel briquettes from bio-agricultural wastes and household wastes. Srinakharinwirot University (Journal of Science and Technology). 2014; 11:66-77.Thai.

[4] Jutajan W. A study of charcoal burning process and properties of briquetted charcoal from vetiver grass. Journal of Industrial Technology Ubon Ratchathani Rajabhat University. 2019; 9(2):135-46.Thai.

[5] Wilaipon P, Chareonsawan P, Srihawong N, Menkoed C, Prakobkasikorn P, Kumboon P. Briquette ratio investigation of charcoal briquette produced from brick-burning-process residual charcoal. RMUTL. Eng. J. 2019; 4(1):43-50.Thai.

[6] Chanchaiphoom H. Charcoal from shell tamarind. In: RTUNC 2018: Proceedings of the 3rd National Conference; 2018 May 25; Thailand, p. 288-96.

[7] Jangsawang W. Gas technology for production of producer gas from biomass. Bangkok: Danax Inter Corporation Company; 2013.

[8] Koolwattanaporn S. Resource center, food and drug administration. Production of solid alcohol. Available from: http://elib.fda.moph.go.th/library/default.asp?page2=subdetail&id_L1=27&id_L2=15672&id_L3=1128 [Accessed 11th February 2020].

[9] Soontraruk S, Makmoon D, Wongmalee W. The development of charcoal fuel briquettes from eucalptus leaves and brasiliensis leaves. In: NIRC II 2018: Proceedings of the 2rd National and International Research Conference; Thailand, p. 339-348.

[10] Chuaythong T, Chaichana T, Amloy S. Properties of charcoal from areca catechu linn shells. Thaksin University Journal. 2014; 39(2):68-75.Thai.

[11] Chutsawang N. Charcoal briquette from durian husk in Tombol Kwuanhuk community enterprise, Khlung, Chanthaburi. M.Eng. Thesis. Rambhai Barni Rajabhat University; 2013.

[12] Torsakul S, Thongsri K, Supharattana C. Development of charcoal briquette from scrapped coconut for alternative energy. In: IE Network Conference 2012: Proceedings of the Industrial Challenges in the ASEAN Economic Community; 2012 October 17-19; Thailand, p. 1381-86.

[13] Boontheung N. The physical and thermal properties of compressed corncob coconut shell compostie charcoal using bio-fermentation as a binding agent. M.Sc.Thesis. Chiang Mai Rajabhat University; 2011.

[14] Tippayawong N. Gas Technology for Biomass Transformation. Bangkok: TPA Publishing; 2012.

[15] Wikipedia. Ethanol. Available from: https://en. wikipedia. org/wiki/Ethanol [Accessed 15th April 2020].

การประยุกต์ใช้เทคนิคการจำลองสถานการณ์เพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตน้ำดื่ม กรณีศึกษาโรงงานน้ำดื่มแห่งหนึ่งในจังหวัดจันทบุรี

Simulation-Based Application for Improving Drinking Water Production Process: A Case Study of The Drinking Water Factory in Chanthaburi

ฐิติ หมอรักษา[1 *] นรา สมัตถภาพงศ์[2] ศุภกิตติ์ ยืนยาว[1] และพงศธร วงษ์สกุล[1]
[1] สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
131 หมู่ 10 ตำบลพลวง อำเภอเขาคิชฌกูฏ จังหวัดจันทบุรี 22210
[2] สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา 30000
Thiti Mhoraksa[1 *], Nara Samattapapong[2], Supakit Yunyao[1] and Pongsathon Wongsakul[1]
[1] Department of Industrial Engineering, Faculty of Agro-Industrial Technology, Rajamangala University of Technology Tawan-Ok
131 Moo 10, Pluang, Khao Kitchakut, Chanthaburi, Thailand, 22210
[2] School of Industrial Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology
111 University Avenue, Surasri, Muang Nakhon Ratchasima, Nakhon Ratchasima, Thailand, 30000
[*]ผู้รับผิดชอบบทความ: thiti_mh@rmutto.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 08-3154-8929

Received: 22 July 2020, Revised: 28 September 2020: Accepted: 31 October 2020

บทคัดย่อ
งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้เทคนิคการจำลองสถานการณ์ในการออกแบบกระบวนการผลิตเพื่อลดเวลาในการผลิตน้ำดื่มชนิดถัง กระบวนการผลิตน้ำดื่มชนิดถัง ซึ่งมีปริมาณการผลิตจำนวนมากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 88.73 ของการผลิตรวมทั้งหมด ใช้เวลา 26,966.34 วินาทีต่อปริมาณการผลิต 400 ถังหรือ 67.42 วินาทีต่อถัง ได้ถูกเลือกนำมาศึกษาพบว่าปัญหาคอขวดเกิดขึ้นที่ขั้นตอนบรรจุ ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงสร้างทางเลือกขึ้นมา 3 ทางเลือก เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว จากนั้นทำการจำลองสถานการณ์ของกระบวนการผลิตน้ำดื่มชนิดถังด้วยโปรแกรม Flexsim® และทำการทดสอบแต่ละทางเลือก ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าทางเลือกแบบเพิ่มพนักงาน 1 คน และเพิ่มเครื่องบรรจุน้ำถัง ทำให้ลดเวลาเหลือ 17,093.80 วินาทีต่อปริมาณการผลิต 400 ถังหรือ 42.73 วินาทีต่อถัง เวลาที่ลดไปจากปัจจุบัน คือ 9,873.54 วินาที หรือ 2 ชั่วโมง 44 นาที และเฉลี่ย 24.68 วินาทีต่อถัง ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 36.61
คำสำคัญ การจำลองสถานการณ์ การปรับปรุง กระบวนการผลิต น้ำดื่ม

Abstract
The objective of this research was to apply simulation techniques to reduce production time of the gallon drinking water production process due to the highest time production. The water production process which currently takes 26,966.34 seconds per 400 gallon or takes 67.42 seconds per gallon was studied. It was found that there was a problem with bottleneck during the water filling process. Therefore, three scenarios were generated to solve the problem then each scenario was tested using experimenting tool through simulation analysis process. The simulation model of the gallon drinking water production process was created using Flexsim® simulation software. The results showed that the scenario which added 1 employee and added water filling machine was the optimal solution for increasing efficiency in the production process. By this scenario, the average production time was reduced to 17,093.80 seconds per 400 gallon or 42.73 seconds per gallon. The reduced production time was 9,873.54 seconds or 2 hours 44 minutes or the average of reduced production time was 24.68 seconds per gallon which was equivalent to 36.61%
Keywords: Simulation, Improvement, Production Process, Drinking Water

1. บทนำ

น้ำเป็นสิ่งจำเป็นต่อการดำรงชีพของมนุษย์ เราจึงจำเป็นต้องบริโภคน้ำสะอาดเพื่อสุขภาพที่ดี เพราะในร่างกายของมนุษย์ประกอบไปด้วยน้ำมากถึงร้อยละ 70 ซึ่งระบบต่าง ๆ ภายในร่างกายมนุษย์ ต้องอาศัยน้ำเป็นตัวช่วยให้ระบบภายในร่างกายสามารถทำงานได้ตามปกติ คุณภาพของน้ำจึงมีอิทธิพลยิ่งต่อสุขภาพของร่างกาย หากแต่ร่างกายของมนุษย์ได้รับน้ำในแต่ละวันน้อยจนเกินไป ก็จะก่อให้เกิดผลเสียต่อร่างกายได้ โดยสถิติแล้วมนุษย์เรานั้นดื่มน้ำในปริมาณถึงหนึ่งตันต่อปี ซึ่งเป็นปริมาณมหาศาล ที่ครอบคลุมชีวิตทั้งหมดของเรา สิ่งที่ต้องคำนึงถึงเป็นอันดับแรกตามมา ก็คือ คุณภาพของน้ำที่นำมาใช้ในการบริโภค หากไม่สะอาดเพียงพออาจก่อให้เกิดผลเสีย และนำเอาโรคมาสู่ผู้บริโภคได้ [1] เราจึงพบเห็นธุรกิจผลิตน้ำดื่มเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก เนื่องจากมีความต้องการในการบริโภคสูง เช่นเดียวกับโรงงานผลิตน้ำดื่มกรณีศึกษาที่ก่อตั้งขึ้นเมื่อ พ.ศ.2550 โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อผลิตน้ำดื่มที่สะอาดจำหน่าย เป็นต้น ซึ่งจากการศึกษาข้อมูลจริงจากการผลิต พบว่า น้ำดื่มที่ผลิตมีคุณภาพ แต่ในแง่ของเวลาการผลิต และจำนวนยังต่ำกว่าเป้าหมายที่ทางบริษัทตั้งไว้ การรอคอยเนื่องจากความไม่สมดุลของแต่ละขั้นตอนการดำเนินงาน ทำให้เกิดปัญหาคอขวดในกระบวนการผลิต ทางคณะผู้วิจัยจึงร่วมกันหาแนวทางในการปรับปรุงแก้ไขปัญหาดังกล่าวข้างต้น เพื่อให้การทำงานมีประสิทธิภาพมากขึ้น เป็นการช่วยลดเวลาของการทำงาน ซึ่งทำให้สามารถเพิ่มปริมาณการผลิตในปัจจุบัน และอนาคตได้ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้เทคนิคการจำลองสถานการณ์ในการออกแบบกระบวนการผลิตเพื่อลดเวลาในการผลิตน้ำดื่มชนิดถัง

2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 ความหมายของการจำลองสถานการณ์ (Simulation)

ความหมายของการจำลองสถานการณ์

พบว่ามีผู้ที่ได้ศึกษาและกล่าวถึงการจำลองสถานการณ์ไว้หลากหลาย รุ่งรัตน์ ภิสัชเพ็ญ [2] กล่าวว่า การจำลองสถานการณ์ เป็นกระบวนการออกแบบจำลอง (Model) ของระบบจริง (Real System) แล้วดำเนินการทดลองเพื่อให้เรียนรู้ พฤติกรรมของระบบงานจริง และวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองก่อนนำไปใช้แก้ไขปัญหาในสถานการณ์จริงต่อไป

วิชัย สุรเชิดเกียรติ [3] กล่าวว่า การจำลองสถานการณ์ คือ กระบวนการของการออกแบบแบบจำลองของระบบจริง และการออกแบบการทดลองในแบบจำลองนี้แล้วทำความเข้าใจในพฤติกรรมของระบบ และทำการประมาณค่าตัวแปรที่สำคัญเพื่อการดำเนินการภายในระบบ

Kelton et al. [4] กล่าวว่า การจำลองสถานการณ์ คือ วิธีการ และการประยุกต์ในการเลียนแบบพฤติกรรมของระบบจริงโดยการใช้ซอฟท์แวร์คอมพิวเตอร์

2.1.2 การศึกษาการทำงาน (Work Study)

ตัวอย่างการศึกษาการทำงานพบว่า วัชรินทร์ สิทธิเจริญ [5] ได้กล่าวว่า การศึกษาการทำงานเป็นคำที่ใช้แทนวิธีการต่าง ๆ จากการศึกษาวิธีการทำงาน และการวัดผลงาน ซึ่งใช้ในการศึกษาวิธีการทำงานของคนอย่างมีแบบแผน และพิจารณาองค์ประกอบต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพและเศรษฐภาวะของการทำงานเพื่อปรับปรุงการทำงานนั้นให้ดีขึ้น

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าแบบจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการจัดสรรจำนวนพนักงาน เพื่อลดค่าใช้จ่ายด้านแรงงาน และใช้ประโยชน์จากพนักงานอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น เช่น วิกานดา แสงกุหลาบ และวิภาวี ธรรมาภรณ์พิลาศ [6] ได้นำเสนอการพัฒนาแบบจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม Flexsim® มาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟของกระบวนการผลิตหัวอ่าน-เขียนสำเร็จ เพื่อจัดสรรจำนวนพนักงานให้เหมาะสมกับอัตราการผลิต และปริมาณความต้องการผลิตภัณฑ์ เพื่อลดต้นทุนด้านแรงงานที่ไม่จำเป็น และเพิ่มอรรถประโยชน์ของพนักงาน หลังจากการดำเนินงานวิจัยพบว่า สามารถลดจำนวนพนักงานต่อสายการผลิต เพิ่มอรรถประโยชน์เฉลี่ยของพนักงานภายในสายการผลิตได้ และส่งผลให้ลดจำนวนเงินต่อเดือนได้ และงานวิจัยของอรรถกร เก่งพล และวุฒิชัย ยังสว่าง [7] ได้นำหลักของวิศวกรรมคอนเคอร์เร็นท์ และการจำลองสถานการณ์มาใช้จัดสรรพนักงาน และปรับกระบวนการผลิตของกระบวนการผลิตท่อน้ำมัน พบว่ากระบวนการผลิตใหม่สามารถลดจำนวนพนักงานจาก 4 คนเหลือ 2 คน และลดเครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการผลิตได้จากเดิม 2 เครื่อง เหลือ 1 เครื่อง และสามารถจัดสรรพนักงานและเครื่องจักรที่เหลือไปรองรับสายการผลิตใหม่ได้ ส่งผลให้มีความสามารถในการผลิตเพิ่มขึ้นร้อยละ 50 ทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการลงทุนซื้อเครื่องดัดท่อ และค่าใช้จ่ายในการจ้างพนักงานต่อปีลงได้

การใช้แบบจำลองสถานการณ์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการ เช่น คณน สุจารี และนรา สมัตถภาพงศ์ [8] ได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการคลังสินค้า โดยศึกษาในระบบการทำงานและการกระจายสินค้าในคลังสินค้า จากนั้นนำเอาข้อมูลไปสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม Flexsim® พบว่าเกิดปัญหาคอขวดขึ้นในระบบการลำเลียงสินค้าในคลังสินค้า จึงสร้างทางเลือกขึ้นมาหลาย ๆ ทางเลือก เพื่อแก้ปัญหาจุด ที่เป็นคอขวดนี้ จากนั้น

ทำการทดสอบแต่ละทางเลือกผลการทดสอบ พบว่า สามารถลดเวลารอคอยลงร้อยละ 41.2 และสามารถเพิ่มปริมาณการจัดส่งสินค้าขึ้นชั้นร้อยละ 40.7 และงานวิจัยของจารุพงษ์ บรรเทา รุจินี แคลนกระโทก และรพิพันธ์ แก้วกลาง [9] ได้ทำการจำลองสถานการณ์ระบบแถวคอย ณ จุดจ่ายยา กรณีศึกษา โรงพยาบาลโชคชัย เพื่อพัฒนาทางเลือกสำหรับการให้บริการผู้ป่วย โดยมีวัตถุประสงค์คือลดเวลาการรอคอยของผู้ป่วยและญาติ เพื่อปรับปรุงการให้การบริการมีประสิทธิภาพ ผลจากการจำลองสถานการณ์ พบว่าทางเลือกการเพิ่มเภสัชกรในการตรวจสอบยาเพิ่ม 1 คน ในช่วงเวลา 10.30 น.–14.30 น. ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด มีเวลาเฉลี่ยในระบบแถวคอยทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 557.13 วินาที ลดลงร้อยละ 14.68 นอกจากนั้นยังพบว่าเวลาเฉลี่ยในแถวคอยมีค่าเท่ากับ 463.97 วินาที ลดลงร้อยละ 25.93 และสามารถรองรับผู้มาใช้บริการได้สูงสุด 398 คน เพิ่มขึ้นร้อยละ 4.74 และงานวิจัยของชยุตม์ บันเทิงจิตร [10] ได้ประยุกต์ใช้เทคนิคการจำลองสถานการณ์ในการออกแบบผังคลังสินค้าเพื่อลดเวลาในการขนถ่ายวัสดุ โดยทำการศึกษาคลังสินค้าของโรงงานผลิตบล็อกแก้ว เพื่อพัฒนารูปแบบการจัดวางผังคลังสินค้าอย่างมีระบบและเพื่อลดเวลาในการขนย้ายบล็อกแก้วออกจากคลังสินค้า ซึ่งปัจจุบันใช้เวลามากกว่าค่าดัชนีชี้วัดที่โรงงานตั้งเอาไว้ จากการออกแบบการจัดวางผังคลังสินค้าแบบใหม่ และทำการจำลองสถานการณ์ จากการเปรียบเทียบการจำลองสถานการณ์ของคลังสินค้าแบบเก่ากับแบบใหม่ พบว่าหลังจากการปรับปรุงสามารถลดเวลาในการขนย้ายบล็อกแก้วลง ร้อยละ 27.27 และอยู่ในเกณฑ์ที่ดัชนีชี้วัดโรงงานตั้งไว้

นอกจากนี้แบบจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ยังถูกนำมาใช้ร่วมกับเทคนิคการผลิตแบบลีนและการจัดสมดุลการผลิต เพื่อจัดสรรจำนวนพนักงานภายในสายการผลิต และการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิต ตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ Chandrakumar et al [11] ได้เสนอการนำระบบการผลิตแบบลีน มาประยุกต์ใช้ร่วมกับแบบจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม Flexsim® เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของขั้นตอนการถ่ายโอนสินค้า ผลการจำลองสถานการณ์ พบว่าเกิดเวลารอคอย เวลาเดินงานที่ว่างเปล่าของพนักงาน และแถวคอยอย่างเห็นได้ชัดเจน จึงนำแนวคิดลีนขจัดเวลารอ เวลาเดินงานที่ว่างเปล่าของพนักงาน และความยาวของแถวคอย

2.3 วิธีการดำเนินการวิจัย

2.3.1 ศึกษาสภาพทั่วไปของโรงงานกรณีศึกษา

โรงงานกรณีศึกษาผลิตน้ำดื่ม 3 ชนิด คือ ชนิดถัง ชนิดแก้วและชนิดขวด คณะวิจัยได้เลือกศึกษากระบวนการผลิตน้ำดื่มชนิดถัง เพราะมีปริมาณการผลิตจำนวนมากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 88.73 ของการผลิตรวมทั้งหมด

ตารางที่ 1 แผนภูมิการไหลของกระบวนการผลิตน้ำดื่มชนิดถัง

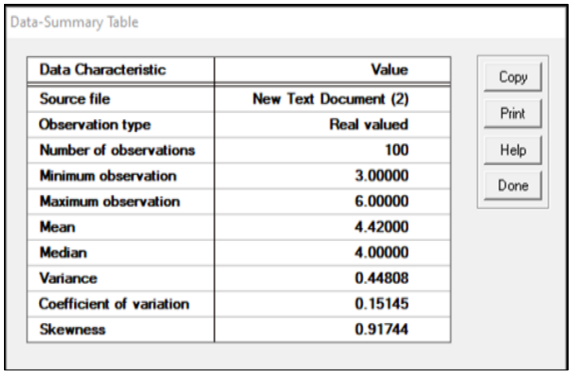
ลำดับ	กิจกรรม	การปฏิบัติงาน					เวลาเฉลี่ย (วินาที)	Staff (คน)
1	ตรวจถังน้ำด้วยสายตา	●	⇨	□	D	▽	4.42	2
2	ขัดถังภายนอก	●	⇨	□	D	▽	13.85	
3	ทำความสะอาดภายใน	●	⇨	□	D	▽	16.97	1
4	ล้างด้วยน้ำสะอาด	●	⇨	□	D	▽	2.52	
5	นำเข้าเครื่องบรรจุ	○	➡	□	D	▽	2.17	2
6	ตรวจสอบ	○	⇨	■	D	▽	3.22	
7	บรรจุ	●	⇨	□	D	▽	11.31	
8	นำไปติดฉลาก	○	➡	□	D	▽	2.48	
9	ติดฉลาก	○	⇨	□	●	▽	3.86	
10	ตรวจสอบ	○	⇨	■	D	▽	0.48	
11	เคลื่อนย้ายไปยังพื้นที่จัดเก็บ	○	➡	□	D	▽	6.14	3
รวม		5	3	2	1	-	67.42	8

จากตารางที่ 1 แสดงข้อมูลเบื้องต้นในกระบวนการผลิตด้วยหลักการศึกษางานในกระบวนการผลิตน้ำดื่มชนิดถัง พบว่าใช้เวลาเฉลี่ยในการผลิตถังละ 67.42 วินาที ใช้แรงงานรวม 8 คน

2.3.2 การเก็บรวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ

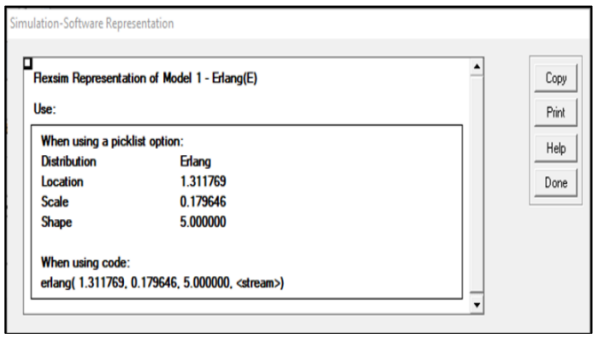
นำข้อมูลที่ได้จากการเก็บรวบรวมมาวิเคราะห์เชิงสถิติด้วยโปรแกรม ExpertFit® เพื่อหารูปแบบการแจกแจงของข้อมูล เพื่อตรวจสอบหาลักษณะรูปแบบการแจกแจงของข้อมูลเวลาที่เก็บได้ แล้วนำข้อมูลที่ได้มาใช้ในการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม Flexsim® เพื่อให้ได้รูปแบบการจำลองสถานการณ์ที่แม่นยำที่สุด

จากรูปที่ 1 แสดงตัวอย่างการนำข้อมูลที่เก็บจากการปฏิบัติงานจริงมาวิเคราะห์เชิงสถิติด้วยโปรแกรม ExpertFit®



รูปที่ 1 ตัวอย่างวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติจาก ExpertFit®

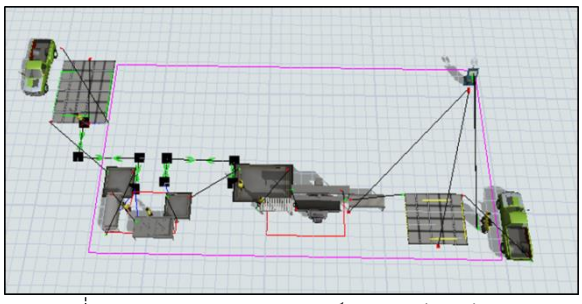
จากรูปที่ 2 แสดงตัวอย่างการนำข้อมูล Inter-Arrival Time ที่เก็บจากการปฏิบัติงานจริงมาวิเคราะห์หารูปแบบการแจงแจงด้วยโปรแกรม ExpertFit®



รูปที่ 2 ตัวอย่างข้อมูลวิเคราะห์ Inter-Arrival Time

2.3.3 สร้างแบบจำลองสถานการณ์สถานะปัจจุบัน

เมื่อได้ข้อมูล Inter-Arrival Time ที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ExpertFit® ดังแสดงในตัวอย่างรูปที่ 2 แล้วจึงนำข้อมูลนั้นมาใช้ในการสร้างแบบจำลองสถานการณ์สถานะปัจจุบันโดยการวางเครื่องจักร พนักงาน และเส้นทางการผลิตของกระบวนการผลิตน้ำดื่มชนิดถังจากการเก็บรวบรวมข้อมูล ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 แบบจำลองสถานการณ์สถานะปัจจุบัน

จากรูปที่ 3 แสดงให้เห็นแบบจำลองสถานการณ์ที่สร้างขึ้นจากสถานะปัจจุบัน เพื่อใช้ในการวิเคราะห์สถานการณ์ก่อนการสร้างทางเลือกการแก้ปัญหา

2.3.4 วิเคราะห์สถานการณ์จากแบบจำลองสถานการณ์สถานะปัจจุบัน

การจำลองสถานการณ์ผลิตน้ำดื่มชนิดถังทั้งหมด 400 ถัง ตั้งแต่กระบวนการตรวจสอบถังน้ำด้วยสายตามาจนถึงขั้นตอนเคลื่อนย้ายไปพื้นที่จัดเก็บใช้เวลาทั้งกระบวนการนาน 26,966.34 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 4



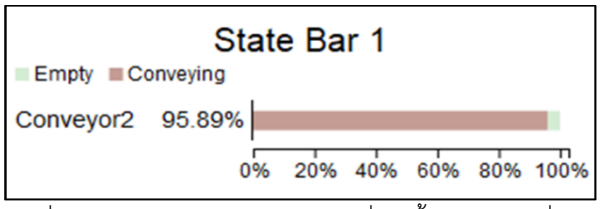
รูปที่ 4 เวลารวมในการผลิตน้ำดื่มชนิดถัง 400 ถัง ของแบบจำลองสถานการณ์สถานะปัจจุบัน

จากตารางที่ 2 แสดงให้เห็นค่าร้อยละการทำงานของเครื่องจักรแต่ละชนิดในกระบวนการผลิตน้ำดื่มชนิดถังในแบบจำลองสถานการณ์สถานะปัจจุบัน

ตารางที่ 2 การทำงานของเครื่องจักรในกระบวนการผลิตน้ำดื่มชนิดถังในแบบจำลองสถานการณ์สถานะปัจจุบัน

รายการ	Processing (ร้อยละ)	Blocked (ร้อยละ)	Waiting for transporter (ร้อยละ)	Idle (ร้อยละ)
เครื่องล้างถังภายนอก	17.45	65.15	0.48	16.92
เครื่องล้างถังภายใน	5.93	62.05	3.85	28.16
เครื่องบรรจุ	96.43	0.01	0	3.56

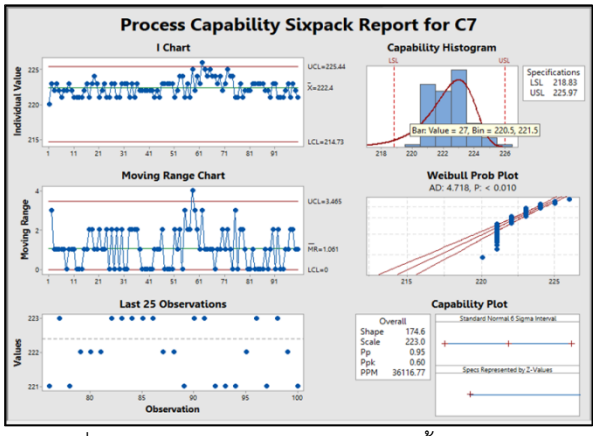
จากรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่าเกิดการรอคอยถึงร้อยละ 95.89 ที่เครื่องบรรจุกำลังบรรจุน้ำดื่มชนิดถัง



รูปที่ 5 แถบสถานะแสดงการรอคอยที่เกิดขึ้นก่อนเข้าเครื่องบรรจุของแบบจำลองสถานการณ์สถานะปัจจุบัน

จากข้อมูลข้างต้นคณะผู้วิจัยจึงได้วิเคราะห์หาความสามารถของกระบวนการผลิตน้ำดื่มชนิดถังในขั้นตอนการบรรจุแบบปัจจุบัน ด้วยโปรแกรม Minitab® 18 ดังแสดงในรูปที่ 6

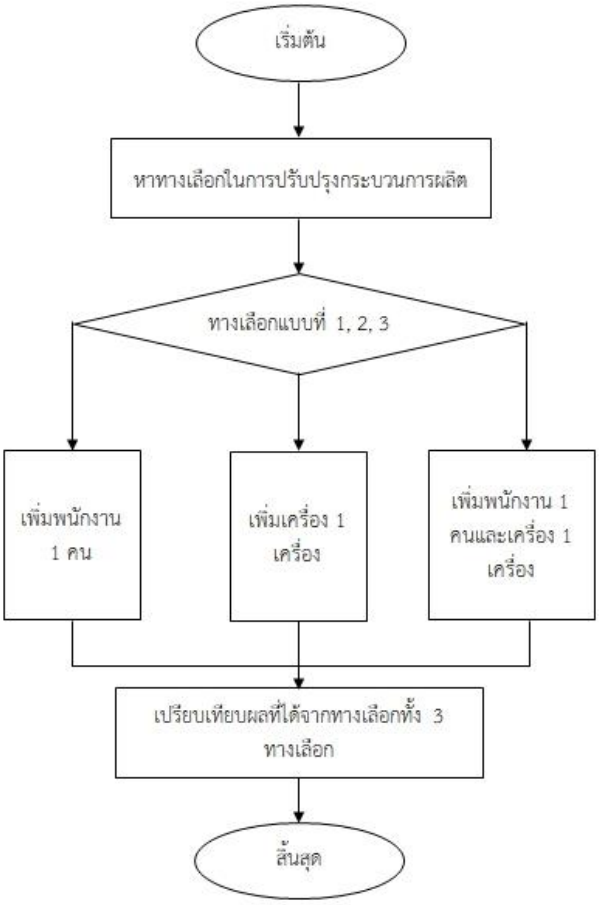
จากรูปที่ 6 แสดงให้เห็นถึงความสามารถของกระบวนการผลิตน้ำดื่มชนิดถังในขั้นตอนการบรรจุแบบปัจจุบัน ซึ่งบ่งบอกให้เห็นถึงการทำงานที่ไม่มีประสิทธิภาพ โดยสังเกตจากชุดข้อมูลมีแนวโน้มเยื้องไปทางด้านบนทำให้เห็นว่ายิ่งมีจำนวนครั้งในการทำงานมากยิ่งใช้เวลานานขึ้น จึงส่งผลให้ความสามารถของกระบวนการทำงานมีค่า Cpk. 0.60 ซึ่งน้อยกว่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้ที่ 1.33



รูปที่ 6 การวิเคราะห์ความสามารถของขั้นตอนบรรจุ

2.3.5 สร้างทางเลือกการแก้ปัญหา

จากการวิเคราะห์สถานการณ์จากแบบจำลองสถานการณ์สถานะปัจจุบัน ทำให้พบปัญหาคอขวดที่เกิดในกระบวนการผลิตน้ำดื่มชนิดถังในขั้นตอนการบรรจุ คณะผู้วิจัยจึงพิจารณาสร้างทางเลือกเพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิต 3 ทางเลือก ดังแสดงในรูปที่ 7

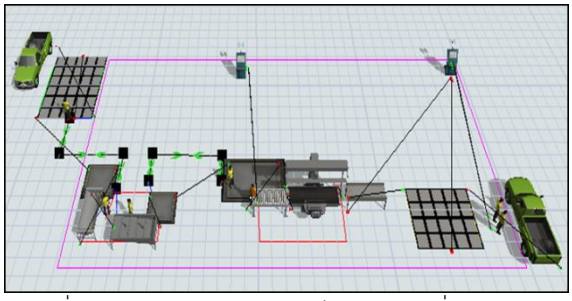


รูปที่ 7 แผนภูมิแสดงทางเลือกการแก้ปัญหา

2.3.6 สร้างแบบจำลองสถานการณ์แต่ละทางเลือก

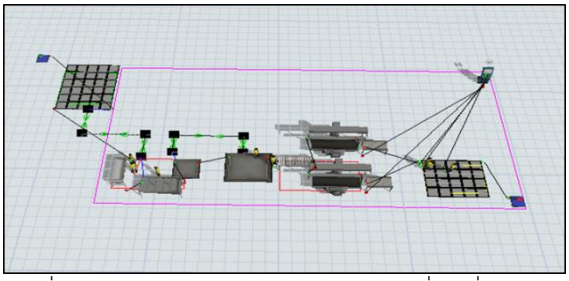
สร้างแบบจำลองสถานการณ์ทั้ง 3 ทางเลือกตามเงื่อนไขที่กำหนดด้วยโปรแกรม Flexsim® และทำการรันโปรแกรมตามแบบจำลองรวมจำนวน 30 ครั้ง เพื่อเปรียบเทียบทางเลือกแต่ละทางเลือก

จากรูปที่ 8 แสดงให้เห็นแบบจำลองสถานการณ์ที่สร้างขึ้นโดยใช้ทางเลือกเพิ่มพนักงาน 1 คน จากสถานะปัจจุบันเพื่อการแก้ไขปัญหาการรอคอย



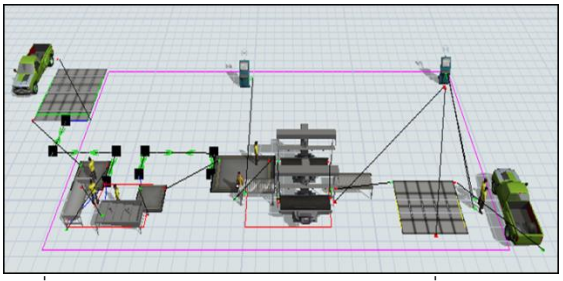
รูปที่ 8 แบบจำลองสถานการณ์ ทางเลือกเพิ่มพนักงาน

จากรูปที่ 9 แสดงให้เห็นแบบจำลองสถานการณ์ที่สร้างขึ้นโดยใช้ทางเลือกเพิ่มเครื่องบรรจุ 1 เครื่อง จากสถานะปัจจุบันเพื่อการแก้ไขปัญหาการรอคอย



รูปที่ 9 แบบจำลองสถานการณ์ ทางเลือกเพิ่มเครื่องบรรจุ

จากรูปที่ 10 แสดงให้เห็นแบบจำลองสถานการณ์ที่สร้างขึ้นโดยใช้ทางเลือกเพิ่มพนักงาน1 คน พร้อมทั้งเพิ่มเครื่องบรรจุ 1 เครื่อง จากสถานะปัจจุบันเพื่อการแก้ไขปัญหาการรอคอย



รูปที่ 10 แบบจำลองสถานการณ์ ทางเลือกเพิ่มพนักงานพร้อมทั้งเพิ่มเครื่องบรรจุ

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

ทางเลือกที่ 1 การแก้ปัญหาโดยการเพิ่มพนักงาน 1 คน จากการจำลองสถานการณ์การผลิตน้ำดื่มชนิดถังทั้งหมด 400 ถัง ในทางเลือกการแก้ปัญหาโดยการเพิ่มพนักงาน 1 คน ใช้เวลารวมในการผลิตนาน 26,971.31 วินาที ซึ่งส่งผลให้เวลาเพิ่มขึ้น 4.97 วินาที และยังคงเกิดการรอคอยก่อนเข้าเครื่องบรรจุถึงร้อยละ 95.82

ทางเลือกที่ 2 การแก้ปัญหาโดยการเพิ่มเครื่องบรรจุ 1 เครื่อง จากการจำลองสถานการณ์การผลิตน้ำดื่มชนิดถังทั้งหมด 400 ถัง ในทางเลือกการแก้ปัญหาโดยการเพิ่มเครื่องบรรจุ 1 เครื่องใช้เวลารวมในการผลิตนาน 17,165.91 วินาที สามารถลดเวลาได้ถึง 9,801 วินาที หรือ 163.35 นาที หรือ 2 ชั่วโมง 43 นาที คิดเป็นเวลาที่ลดลงร้อยละ 63.65 และการรอคอยก่อนเข้าเครื่องบรรจุลดลงเหลือร้อยละ 59.21

ทางเลือกที่ 3 การแก้ปัญหาโดยการเพิ่มพนักงาน 1 คน พร้อมทั้งเพิ่มเครื่องบรรจุ 1 เครื่อง จากการจำลองสถานการณ์การผลิตน้ำดื่มชนิดถังทั้งหมด 400 ถัง ในทางเลือกการแก้ปัญหาโดยการเพิ่มพนักงาน 1 คน พร้อมทั้งเพิ่มเครื่องบรรจุ 1 เครื่อง ใช้เวลารวมในการผลิตนาน 17,092.80 วินาที สามารถลดเวลาได้ถึง 9,873.54 วินาที หรือ 164.56 นาที หรือ 2 ชั่วโมง 44 นาที คิดเป็นเวลาลดลงร้อยละ 63.38 และการรอคอยก่อนเข้าเครื่องบรรจุลดลงเหลือร้อยละ 59.45

จากผลการจำลองสถานการณ์การผลิตน้ำดื่มชนิดถังทั้ง 3 ทางเลือก จะเห็นได้ว่าการเพิ่มพนักงานไม่ใช่การแก้ไขปัญหาที่เหมาะสม เนื่องจากไม่ได้ส่งผลต่อเวลารวมในการผลิตและการรอคอยมากนัก เนื่องจากการรอคอยเกิดขึ้นก่อนเข้าเครื่องบรรจุที่ทำงานอย่างเต็มประสิทธิภาพแล้ว

4. บทสรุป

จากผลการวิจัยในการจำลองสถานการณ์ และเปรียบเทียบเวลารวมและการรอคอยของทางเลือกในการแก้ไขปัญหาทั้ง 3 ทางเลือกแล้ว ทางเลือกที่ 2 การแก้ปัญหาโดยการเพิ่มเครื่องบรรจุ 1 เครื่อง เป็นทางเลือกที่เหมาะสมที่สุด แม้ว่าทางเลือกที่ 3 การแก้ปัญหาโดย การเพิ่มพนักงาน 1 คน พร้อมทั้งเพิ่มเครื่องบรรจุ 1 เครื่องใช้เวลารวมในการผลิตต่ำกว่าและมีเวลาในการรอคอยใกล้เคียงกัน แต่หากมองในเชิงความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในการที่ไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการจ้างพนักงานเพิ่ม 1 คน กับเวลาที่ต่างกันเพียง 73.11 วินาทีของทางเลือกทั้ง 2 ข้างต้น ทางเลือกที่ 2 จึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมที่สุด ดังนั้นการนำเทคนิคการจำลองสถานการณ์มาประยุกต์ใช้เพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตน้ำดื่ม กรณีศึกษา โรงงานน้ำดื่มแห่งหนึ่งในจังหวัดจันทบุรีสามารถช่วยสนับสนุนการพัฒนาทางเลือกและการตัดสินใจเลือกทางเลือกได้อย่างเหมาะสม ซึ่งเป็นการเพิ่มความสามารถของกระบวนการ และความสามารถในการแข่งขันของสถานประกอบการได้อีกทางหนึ่งในการนำผลการวิจัยไปประยุกต์ใช้จริง และการพัฒนาต่อไป ควรพิจารณาสถานการณ์อื่น ๆ เพิ่มเติม เช่น การปรับเปลี่ยนแผนผังโรงงาน การปรับเปลี่ยนเทคโนโลยี หรือแม้แต่การพิจารณาเพิ่มจำนวนคนหรือเครื่องจักรให้เหมาะสมกับคำสั่งซื้อในอนาคตได้ต่อไป

สำหรับข้อเสนอแนะในการศึกษาต่อไปควรมีการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการผลิตด้วยหลังจากมีการปรับปรุงกระบวนการผลิตน้ำดื่ม เพื่อให้การปรับปรุงกระบวนการผลิตมีประสิทธิภาพได้ดีและมีความชัดเจน

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สามารถดำเนินการวิจัยได้โดยเสร็จสมบูรณ์ ต้องขอขอบพระคุณโรงงานน้ำดื่มตราเพชร จังหวัดจันทบุรี ที่ได้อนุญาตให้ผู้วิจัยและคณะเข้าศึกษาวิจัย ให้ข้อมูล และเผยแพร่ข้อมูลงานวิจัยเพื่อเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาต่อไป และขอขอบคุณพนักงานทุกท่านที่ให้ความร่วมมือในการดำเนินงานวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Thongma W. Opinions towards legal measures for drinking water vending machine business and behaviour on using drinking water vending machines in Baan Suan municipaliy, amphoe Mueang, Chonburi Province. MPA thesis. Burapha University; 2016.Thai.

[2] Pisuchpen R. Modeling Manual with Arena. Bangkok: SE-Education;2008.Thai.

[3] Suracherdkiati W. Computer Simulation. Pathum Thani: Skybook; 2001.Thai.

[4] Kelton D, Sadowski R, Sturrock D. Simulation With Arena. 4th ed. New York: McGraw -Hill; 2007.

[5] Sitticharoen W. Work Study. Bangkok: Odeon Store; 2004.Thai.

[6] Saengkularb W, Tharmmaphornphilas W. Simulation model for operator allocation in head gimbal assembly line. Eng J CMU. 2019;26(1): 207-66.Thai.

[7] Kengpol A, Youngswaing W. Application of concurrent engineering and simulations in productivity improvement of the pipe bending: A case study in an oil pipe manufacturer. The J of KMUTNB. 2015;25(2): 233-42.Thai.

[8] Sujaree K, Samattapapong N. An application of simulation modeling in warehouse efficiency improvement. In: Rajamangala Manufacturing & anagement Technology Conference 2019; 2019 May 30-31; The Empress Chiang Mai Hotel. Chiang Mai: Rajamangala University of Technology Lanna; 2019. p. 474-478.Thai.

[9] Banthao J, Klaenkratoke R, Kaewhlang R. Queuing system simulation at a drug dispensing: A case study of Chok Chai hospital. In: The 35th Conference of Industrial Engineering Network 2017; 2017 July 12-15; The Empress Chiang Mai Hotel. Chiang Mai: Chiang Mai University; 2017.p. 1124-1129.Thai.

[10] Bunterngchit C. Simulation-based application in warehouse layout design for reducing material handling time. Kasem Bundit Eng J, 2018;8(3): 1-14.Thai.

[11] Chandrakumar C, Gowrynathan J, Kulatunga A, Sanjeevan N. Incorporate lean and green concepts to enhance the productivity of transshipment terminal operations. Procedia CIRP. 2016;40:301-6.

การใช้ดินลูกรังเป็นมวลรวมหยาบในคอนกรีตเพื่อทำเป็นชั้นหินอุ้มน้ำประดิษฐ์

Utilization of Lateritic Soil as Coarse Aggregate in Concrete for Artificial Aquifer

ดนุพล ตันนโยภาส[1 *] ณัฐวัตร จันทร์มาตร์[2] และนันทนัช เจริญสุข[1]

[1] ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ตำบลคอหงส์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110

[2] สำนักงานอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ เขต 2 อุดรธานี
399 หมู่ 11 ถนนมิตรภาพ ตำบลโนนสูง อำเมือง จังหวัดอุดรธานี 41330

Danupon Tonnayopas[1 *], Nattawat Janmart[2] and Nanthanat Charoensuk[1]

[1] Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University
Kho Hong, Hat-Yai, Songkhla, Thailand, 90110

[2] Office of Primary Resources and Mines, Region 2 Udonthani
399 Moo 11, Mittraphap Road, Tamboon Non Sung, Amphoe Mueang Udon Thani 41330

[1] Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University
Kho Hong, Hat-Yai, Songkhla, Thailand, 90110

[*]ผู้รับผิดชอบบทความ: danupon.t@psu.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 07-4287-0656 ต่อ 7318

Received: 8 July 2020, Revised: 26 August 2020, October: 13 November 2020

บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาเกี่ยวกับการทดสอบในห้องปฏิบัติการถึงความเหมาะสมที่ใช้ดินลูกรังเป็นมวลรวมหยาบในคอนกรีตที่ทำเป็นชั้นหินอุ้มน้ำ มวลรวมหยาบนำมาใช้หล่อตัวอย่างคอนกรีตเป็นลูกรังสองขนาดคือ 9.5-25.0 และ 25.0-37.5 มิลลิเมตร พบอยู่ในพื้นที่มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ออกแบบส่วนผสมสำหรับคอนกรีตควบคุม มีอัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อลูกรังต่อทรายเท่ากับ 1:2:1.25 และแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบบดละเอียดในปริมาณร้อยละ 15 เตรียมตัวอย่างทั้งหมดหล่อในแบบหล่อขนาด 100×100×100 มิลลิเมตร ทดสอบความหนาแน่นรวม การดูดซึมน้ำ อัตราการซึมผ่าน ความแข็งแบบชอร์ และกำลังอัด ภายหลังบ่มด้วยการแช่น้ำเป็นเวลา 1 7 และ 28 วัน วิเคราะห์วัฏภาคแร่และโครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ผลการทดลองพบว่า ตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมมวลรวมหยาบลูกรังขนาด 25.0-37.5 มิลลิเมตร บ่ม 28 วัน มีกำลังอัด 18 เมกะพาสคัล การดูดซึมน้ำร้อยละ 30.57 อัตราการซึมผ่าน 0.15-0.37 ลูกบาศก์เมตรต่อนาทีต่อตารางเมตร รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวอย่างระบุวัฏภาคแร่ เอต์ทรินไกต์และแคลไซต์ ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงบริเวณส่งผ่านรอยต่อ คอนกรีตมวลรวมลูกรังสามารถใช้ทำเป็นชั้นหินอุ้มน้ำไร้แรงดันประดิษฐ์ระดับตื้นได้

คำสำคัญ การดูดซึมน้ำ ชั้นหินอุ้มน้ำประดิษฐ์ มวลรวมหยาบดินลูกรัง เถ้าแกลบ อัตราการซึมผ่าน

Abstract

This paper presents a laboratory study on the suitability of using lateritic soil as coarse aggregate in pervious concretes as artificial aquifer. Two sizes of laterite available in Prince of Songkla University Hat Yai campus, 9.5-25.0 mm and 25.0-37.5 mm in size, were used as the coarse aggregates. The mixture contained ordinary Portland cement Type 1 (OPC), lateritic aggregate, and sand in proportion of 1:2:1.25 by weight and the OPC was partially replaced with ground rice husk ash in proportion of 15wt.%. All of the samples were casted in size of 100×100×100 mm and the bulk density, water absorption, Infiltration rate, Shore hardness and compressive strength after curing for 1, 7 and 28 days were determined. The mineral phases and microstructure were analyzed via X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscope (SEM) techniques, respectively. Experimental results showed that the laterite coarse aggregate of size 25.0-9.5 mm and concrete

cured for 28 days provided compressive strength of 18 MPa, water absorption of 30.57% and infiltration rate of 0.15-0.37 $m^3/min/m^2$. The XRD pattern revealed mineral phases abundant of ettringite and calcite. SEM displays interfacial transition zone. The lateritic aggregate concrete was found to be a satisfactorily shallow artificial unconfined aquifer.

Keywords: Artificial Aquifer, Lateritic Soil as Coarse Aggregate, Rice Husk Ash, Water Absorption, Infiltration Rate

1. บทนำ

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาประเทศไทยได้ประสบปัญหาภัยแล้งอยู่ตลอดมาและทวีความรุนแรงขึ้น จากรายงานสถานการณ์ภัยแล้งในปี 2563 ของกรมป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย พบว่ามีพื้นที่ประสบภัยแล้ง จำนวน 23 จังหวัด 135 อำเภอ [1] โดยสาเหตุหลักมาจากการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศและสิ่งแวดล้อม การที่ฝนตกทิ้งช่วง ทำให้แหล่งน้ำทั้งธรรมชาติและที่สร้างกักเก็บไว้ใช้ฤดูแล้งมีปริมาณน้ำลดลง ประกอบกับประชากรเพิ่มมากขึ้น และสภาพแวดล้อมป่าต้นน้ำลำธารเสื่อมลง ทำให้พื้นที่ชุ่มน้ำลดน้อย ปริมาณน้ำฝนซึมลงสู่ใต้ผิวดินได้น้อยตามไปด้วย อากาศที่ร้อนจัดทำให้การสูญเสียน้ำจากการระเหยมีมาก ทำให้ผิวดินแห้งแล้ง วิธีกักเก็บน้ำไว้ใต้ดินเสมือนมีชั้นหินอุ้มน้ำ (Aquifers) ก็คือมีวัตถุยอมให้น้ำซึมผ่านและกักไว้เช่นน้ำใต้ดิน ดังนั้นหากสร้างคอนกรีตพรุน (Porous Concretes) ให้เปรียบเสมือนชั้นหินอุ้มน้ำไว้ ก็สามารถแก้สถานการณ์นี้ได้ระดับหนึ่ง ซึ่งดินลูกรัง (Lateritic Soils) จัดว่าเป็นวัสดุมีความพรุนมาก พบได้ทั่วไปในภูมิประเทศเขตร้อนชื้น เช่น ไทย ลาว กัมพูชา มาเลเซีย ไนจีเรีย มีการนำไปใช้ประโยชน์ในงานก่อสร้างได้หลากหลายรูปแบบ ทั้งเป็น ศิลาแลง มวลรวมละเอียดและหยาบในคอนกรีต (Lateritic Aggregate Concrete) [2-6] อิฐบล็อก [7,8] พบว่ามีการดูดซึมน้ำมากขึ้น การผสมด้วยของเสียจากอุตสาหกรรม เช่น ผงปูนเม็ด [9] หรือเถ้าแกลบทำให้เนื้อดินจับตัวแข็งแน่นขึ้น [10] เศษเซรามิกทำให้คอนกรีตลูกรังมีกำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีตปกติ [11] เถ้าลอยทำให้คอนกรีตลูกรังทนต่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป (สูงขึ้น) และอัดแข็งตัวเองได้ [12] เนื่องจากแหล่งดินลูกรังพบมากสุดในภาคอีสานประเทศไทย ในภาคใต้พบมากที่จังหวัดสงขลา [13] จึงมีความคิดทำชั้นหินอุ้มน้ำประดิษฐ์จากคอนกรีตมวลรวมลูกรังที่ดูดซึมน้ำและซึมผ่านน้ำได้มาก เพื่อเพิ่มความชุ่มชื้นและปรับสภาพให้พื้นดินมีความสมบูรณ์มากขึ้น

2. วิธีการดำเนินการวิจัย

ดินลูกรังล้างคัดเอาก้อนเป็นหินทรายและหินดินดานสีเหลืองปนแดง ขนาด 9.5-25.0 รูปที่ 1 (ก) และ 25.0-37.5 มิลลิเมตร รูปที่ 1 (ข) ดูดซึมน้ำง่าย ส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) ความหนาแน่นจริง (True Density) 3,034.24 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (s) รูปที่ 1 (ค) และเถ้าแกลบบดละเอียด (Rice Husk Ash, RHA) ขนาดเล็กกว่า 45 ไมครอน มีความหนาแน่นจริง 2,391.14 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ดังในรูปที่ 1 (ง)



รูปที่ 1 วัสดุที่ใช้ (ก) ลูกรังขนาด 9.5-25.0 มิลลิเมตร (ข) ลูกรังขนาด 25.0-37.5 มิลลิเมตร (ค) ทรายหยาบ (ง) เถ้าแกลบ

2.1 การเตรียมตัวอย่าง

มวลรวมหยาบลูกรัง Laterite (L) ล้างสะอาด สองช่วงขนาดคือ 9.5-25.0 มิลลิเมตร (Small Laterite, SL) และ 25.0-37.5 (Large Laterite, LL) โดยออกแบบส่วนผสมคอนกรีตมีอัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อลูกรังต่อทรายต่อน้ำ 2:4:2.5:1 ได้ปรับอยู่ในกรอบ ACI 522.1-13 [14] และแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบพันธุ์ข้าวสังข์หยดบดละเอียด ในปริมาณร้อยละ 15 ที่เหมาะสมในการยืดประสานเนื้อคอนกรีตดี [15] ก็ได้ตัวอย่างคอนกรีตเพิ่มขึ้นอีก 2 ชนิด (LLRHA, SLRHA) ดังมีรายละเอียดส่วนผสมในตารางที่ 1 หล่อตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 100×100×100 มิลลิเมตร บ่มแบบชื้นในอุณหภูมิห้อง 28-30 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 68-83 เป็นเวลา 1 7 และ 28 วัน

ตารางที่ 1 ส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดลอง

รหัสชุดตัวอย่าง	ขนาดลูกรัง (มิลลิเมตร)	ปริมาณ (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)				
		OPC	L	s	น้ำ	RHA
LL	25.0-37.5	450	1000	625	225	-
SL	9.50-25.0	450	1000	625	225	-
LLRHA	25.0-37.5	382	1000	625	225	68
SLRHA	9.50-25.0	382	1000	625	225	68

2.2. วิธีการทดสอบ

ตรวจสอบสมบัติมวลรวม ได้แก่ ขนาดคละ [16] ลักษณะรูปทรงดัชนีความยาว (Elongation Index) [17] และดัชนีความแบน (Flakiness Index) [18] การดูดซึมน้ำ และความถ่วงจำเพาะ ตามวิธี ASTM C29/C29M [19] ความหนาแน่นแบบหลวมและแบบแน่น (Loose and Compacted Bulk

Density) [20] ภาวะคงทนกลั้ว (Slake Durability) [21] ค่ากระแทก (Impact Value) ตามวิธี BS EN 1097-2:2010 [22] ทดสอบคอนกรีตตามอายุบ่ม ได้แก่ ความหนาแน่นรวม การดูดซึมน้ำ [23] การขยายตัวแบบเปียกเทียบปริมาตรก่อนกับหลังบ่มน้ำ อัตราการซึมผ่านตามวิธี ASTM C1781/C1781M [24] ความแข็งแบบชอร์ (Shore Hardness) อันเป็นการทดสอบแบบไม่ทำลายตัวอย่าง [25] และกำลังอัดตามวิธี ASTM C109/C109M [26] วิเคราะห์แร่ประกอบและโครงสร้างจุลภาคด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction, XRD) และภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

3.1 สมบัติทางกายภาพของมวลรวมลูกรัง

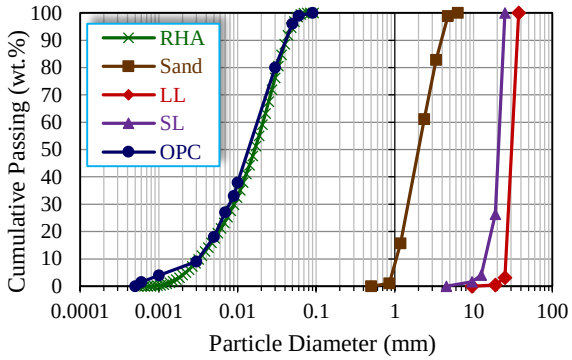
มวลรวมลูกรังที่ใช้มีรูปร่างเรียวแบน ยกเว้นที่บดมีขอบรอยแตกคม มีค่ากระแทกร้อยละ 29 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์งานผิวถนนตามการจำแนกของ IS [27] ดัชนีภาวะคงทนกลั้วช่วงร้อยละ 85.22-96.78 (91.58±3.43) จัดอยู่ในภาวะคงทนกลั้วสูง [28] อนึ่งมวลรวมลูกรังในมาเลเซียมีค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 1.0-2.32 [29] น้อยกว่าค่าเฉลี่ยของจำนวนลูกรัง 3 ชุด ที่ทดลองครั้งนี้มาก (ตารางที่ 2)

ตารางที่ 2 สมบัติมวลรวมของดินลูกรังที่ใช้

สมบัติ	ขนาดมวลรวม	ค่าทดสอบที่ได้
ค่าการดูดซึมน้ำ, %	25.0 มม.	2.60
(Water Absorption, %)	12.5 มม.	11.54
ค่าความถ่วงจำเพาะปรากฏ	25.0 มม.	2.52
(Apparent Specific Gravity)	12.5 มม.	1.88
ดัชนีความแบน, %	25.0 มม.	44.57
(Flakiness Index, %)	12.5 มม.	92.70
ดัชนีความยาว, %	25.0 มม.	41.36
(Elongation Index, %)	12.5 มม.	97.13
ความหนาแน่นหลวม, กก./ม^3	25.0 มม.	3,689.65
(Loose Bulk Density, kg/m^3)	12.5 มม.	3,884.90
ความหนาแน่นแน่น, กก./ม^3	25.0 มม	3,864.87
(Dense Density, kg/m^3)	12.5 มม.	3,957.49

3.2 การคละขนาดของมวลรวม

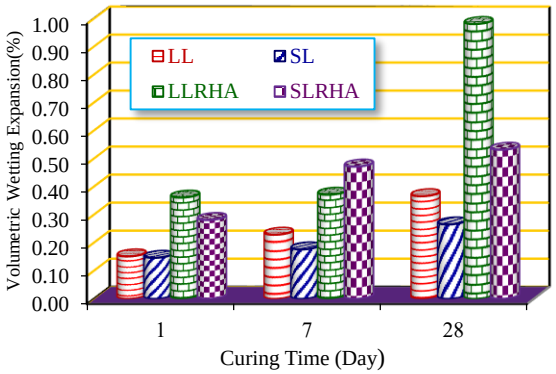
ผลการวิเคราะห์ขนาดของเถ้าแกลบสังข์หยด ด้วยแสงด้วยเลเซอร์พบกระจายตัวในช่วง 0.545-92.02 ไมโครเมตร ส่วนทรายกระจายตัวอยู่ในช่วง 0.8–7 มิลลิเมตร และลูกรังมีการกระจายตัวอยู่ในช่วง 10–40 มิลลิเมตร (รูปที่ 2) เส้นโค้งของเถ้าแกลบได้ส่วนขนาดคละ (Well Graded) เส้นโค้งของทรายลูกรังขนาดใหญ่และขนาดเล็ก มีการคละขนาดเดียวถึงค่อนข้างเป็นขนาดเดียว (Uniform Graded) พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ (Coefficient of Uniformity, C_u) ของเถ้าแกลบ ทราย ลูกรังขนาดเล็ก และลูกรังขนาดใหญ่ คือ 6.12 2.30 1.56 และ 1.24 ตามลำดับ ในเถ้าแกลบมีการคละขนาดที่ดี ส่วนทรายและลูกรังมีช่องว่างระหว่างอนุภาคมาก ค่าสัมประสิทธิ์ความคละกัน (Coefficient of Curvature, C_C) ของเถ้าแกลบ ทราย ลูกรังขนาดเล็ก และลูกรังขนาดใหญ่ คือ 1.22 1.07 0.97 และ 0.94 ตามลำดับ และค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus, F.M) ของทรายคือ 2.44 อยู่ในช่วง 1.18-2.36 มิลลิเมตร ของลูกรังขนาดเล็กและลูกรังขนาดใหญ่ร้อยละ 1.70 และ 35.12 จากขนาดช่วง 9.51-12.5 และ 19-25 มิลลิเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 2 การกระจายขนาดของวัสดุใช้ในการศึกษาครั้งนี้

3.3 การขยายตัวแบบเปียก

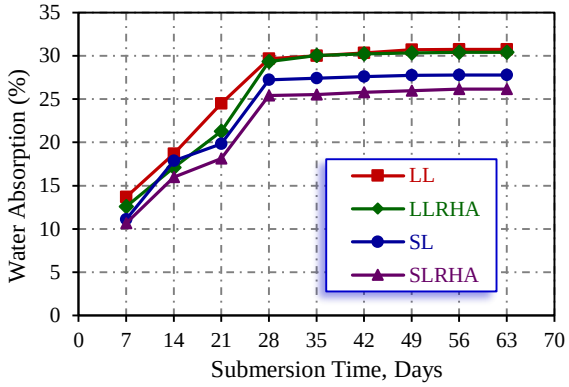
คอนกรีตที่ผสมด้วยเถ้าแกลบได้ขยายตัวแบบเปียกเชิงปริมาตรสูงกว่าคอนกรีตควบคุมทั้งสอง (รูปที่ 3) ทั้งนี้สันนิษฐานว่าเกิดช่องว่างในเนื้อประสานคอนกรีตขึ้น พบว่าคอนกรีตมวลรวมขนาดใหญ่ขยายตัวมากกว่าคอนกรีตมวลรวมขนาดเล็ก ขนาดคอนกรีตทุกสูตรเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามอายุบ่ม โดยเฉพาะคอนกรีตผสมเถ้าแกลบที่บ่ม 28 วัน



รูปที่ 3 การขยายตัวแบบเปียกเชิงปริมาตรของคอนกรีตมวลรวมลูกรังผสมเถ้าแกลบ

3.4 การดูดซึมน้ำ

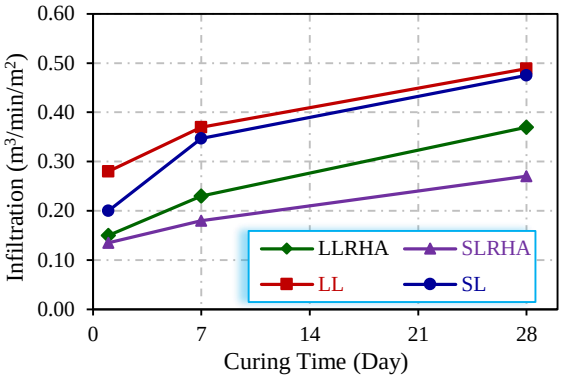
ตัวอย่างคอนกรีตแต่ละชนิดไม่ผ่านการบ่มได้แช่น้ำ 56 วัน พบค่าการดูดซึมน้ำเริ่มคงที่ คอนกรีตควบคุมที่ใส่ลูกรังขนาดใหญ่ มีค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 30.74 มากกว่าที่ใส่ลูกรังขนาดเล็กที่ได้ร้อยละ 27.79 เมื่อคอนกรีตลูกรังทั้งสองขนาดผสมเถ้าแกลบ ค่าได้ลดเหลือร้อยละ 30.40 และ 26.14 ตามลำดับ (รูปที่ 4) ค่าการดูดซึมน้ำลดลงประมาณร้อยละ 1.09 และ 5.92 ตามลำดับ ซึ่งผลจากการเติมเถ้าแกลบได้ทำให้การขยายตัวเพิ่มขึ้น (รูปที่ 3) โดยเฉพาะบริเวณส่งผ่านรอยต่อ (Interfacial Transition Zone, ITZ) ระหว่างเนื้อประสานกับมวลรวมลูกรัง ได้เอื้อให้ค่าการดูดซึมน้ำมากขึ้นอีก นอกเหนือจากซึมผ่านในตัวมวลรวมลูกรังแล้ว (ตารางที่ 2) ซึ่งคอนกรีตมวลรวมขนาดใหญ่ผสมเถ้าแกลบมีค่าการดูดซึมน้ำลดลงเข้าใกล้ค่าของคอนกรีตมวลรวมขนาดเล็ก อย่างไรก็ตามคอนกรีตทดลองครั้งนี้มีการดูดซึมน้ำหรือปริมาณโพรง (Void Content) อยู่ในเกณฑ์คอนกรีตพรุน ซึ่งกำหนดไว้อยู่ในช่วงร้อยละ 15-35 [14]



รูปที่ 4 การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลรวมลูกรังผสมเถ้าแกลบ

3.5 อัตราการซึมผ่าน

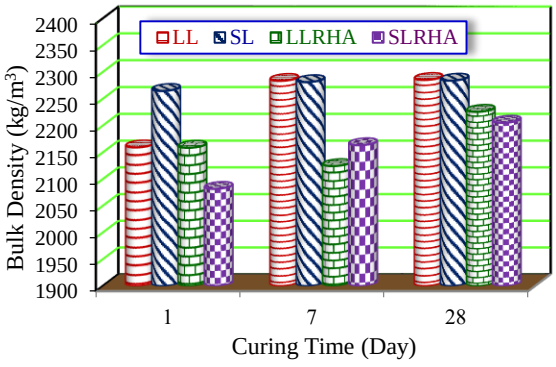
พบว่าคอนกรีตมวลรวมลูกรังทั้งสองขนาดมีค่าอัตราการซึมผ่านช่วง 0.20-0.49 ลูกบาศก์เมตรต่อนาทีต่อตารางเมตรดังรูปที่ 5 เป็นผลจากช่องว่างระหว่างมวลรวมขนาดใหญ่ (LL) มากกว่าทำให้น้ำซึมผ่านเข้าไปตามซอกระหว่างช่องได้มากกว่าคอนกรีตมวลรวมขนาดใหญ่ที่ผสมเถ้าแกลบ มีค่าอัตราการซึมผ่าน 0.15-0.37 ลูกบาศก์เมตรต่อนาทีต่อตารางเมตร มากกว่าคอนกรีตมวลรวมลูกรังขนาดเล็กผสมเถ้าแกลบ 0.14-0.27 ลูกบาศก์เมตรต่อนาทีต่อตารางเมตร ปริมาณเถ้าแกลบที่เติมเข้าไปทำให้เนื้อคอนกรีตมีช่องว่างลดลงและค่อนข้างสอดคล้องกับค่าการดูดซึมน้ำที่ลดลงเช่นกันหลังแช่ 28 วัน (รูปที่ 4) คอนกรีตพรุนทั่วไปได้กำหนดค่าอัตราการซึมผ่านอยู่ในช่วง 0.08-0.72 ลูกบาศก์เมตรต่อนาทีต่อตารางเมตร [14] ซึ่งผลทดลองได้ค่าอัตราการซึมผ่านอยู่ในช่วงปานกลาง ก็ถือว่าเป็นผลในแง่บวก เพราะช่วยให้การกักเก็บน้ำไว้ในตัวคอนกรีตอยู่ได้นาน ไม่ระบายน้ำไหลออกไปอย่างรวดเร็วหรือรั่วไหล อันจะทำเป็นชั้นหินอุ้มน้ำ (Aquifer) หรืออ่างเก็บน้ำใต้ดิน (Underground Reservoir) ที่ดีให้ความชุ่มชื้นพื้นดิน และอาจพัฒนานำน้ำขึ้นมาใช้ภายหลัง



รูปที่ 5 อัตราการซึมผ่านของคอนกรีตมวลรวมลูกรังผสมเถ้าแกลบ

3.6 ความหนาแน่นรวม

คอนกรีตควบคุมที่ใส่มวลรวมลูกรังสองชุด มีความหนาแน่นใกล้เคียงกัน เมื่ออายุบ่มเพิ่มขึ้นความหนาแน่นรวมเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วง 2,159-2,285 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เมื่อคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ ความหนาแน่นรวมมีค่าลดลงอยู่ที่ 2,082-2,226 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (รูปที่ 6) สาเหตุมาจากเถ้าแกลบมีความหนาแน่นจริงที่น้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ส่งผลให้คอนกรีตผสมมีความหนาแน่นรวมลดลง นอกจากนี้การดูดซึมน้ำและอัตราการซึมผ่านมาก เปรียบได้ว่าคอนกรีตมีช่องว่างมาก ทำให้น้ำหนักแห้งลดลงและขนาดตัวอย่างที่ขยายขึ้น ก็รวมเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อค่าความหนาแน่นรวมลดลงได้เช่นกัน



รูปที่ 6 ความหนาแน่นรวมของคอนกรีตมวลรวมลูกรังผสมเถ้าแกลบ

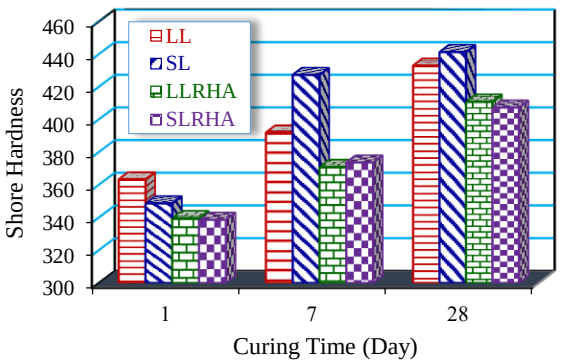
3.7 ความแข็งแบบชอร์

ค่าเฉลี่ยของความแข็งแบบชอร์ของคอนกรีตมวลรวมลูกรังขนาดเล็กและใหญ่ที่ผสมเถ้าแกลบ บ่ม 28 วัน ได้ 407 (SLRHA) และ 411 (LLRHA) ตามลำดับ พบว่าน้อยกว่าคอนกรีตมวลรวมลูกรังทั้งสองขนาดที่เฉลี่ยสูงสุดได้ 441 (SL) และ 433 (LL)

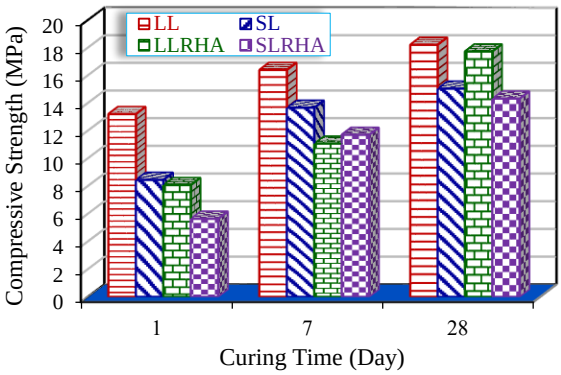
ตามลำดับ ค่าทั้งหมดนั้นได้เพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม (รูปที่ 7) สอดคล้องกับค่าความหนาแน่นรวมหลังบ่ม 7 วัน ขึ้นไป (รูปที่ 6) ซึ่งน่าเป็นปัจจัยที่มีผลโดยตรงต่อค่าทดสอบชนิดนี้

3.8 กำลังอัด

คอนกรีตมวลรวมลูกรังขนาดใหญ่ (25-37.5 มิลลิเมตร) ทุกอายุบ่มมีค่ากำลังอัด (13.20-18.62 เมกะพาสคัล) มากกว่าคอนกรีตมวลรวมลูกรังขนาดเล็ก (8.44 - 15.03 เมกะพาสคัล) ตามลำดับ สอดคล้องกับผลวิจัยของ Ogundipe et al. [30] ที่กำลังอัดมากขึ้นตามมวลรวมที่ขนาดใหญ่ขึ้น และคอนกรีตผสมเถ้าแกลบก็เช่นกัน มีกำลังอัดน้อยกว่าคอนกรีตควบคุมที่ผสมลูกรังขนาดเดียวกัน (รูปที่ 8) อย่างไรก็ตามพบว่าคอนกรีตที่ทดสอบทั้งหมดมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม [29] และค่าเข้าใกล้กันที่อายุบ่ม 28 วัน สอดคล้องกับผลศึกษาของ Olugbenga [31] ที่พบว่าอายุบ่มและอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ส่งผลต่อกำลังอัดเมื่อคำนึงถึงรูปทรงของลูกรัง ซึ่งค่อนข้างรูปไข่มนถึงเรียวแบนมน ทำให้การขัดประสานระหว่างอนุภาคลูกรังน้อย ส่งผลค่ากำลังอัดลดลงได้ [2] และผลจากการผสมเถ้าแกลบ อายุบ่มช่วงต้น (1–7 วัน) ค่ากำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม แต่เมื่ออายุบ่ม 28 วัน พบว่าคอนกรีตมวลรวมทั้งสองขนาดผสมเถ้าแกลบได้พัฒนากำลังอัดที่ขยับเข้าใกล้ค่าคอนกรีตควบคุม (รูปที่ 8) สันนิษฐานเป็นผลจากเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างสารละลาย $Ca(OH)_2$ กับซิลิกาอสัณฐาน (Amorphous Silica) ที่อยู่ในเถ้าแกลบ [10] ได้ส่งผลให้เนื้อประสานกันแน่น [32] แต่ต้องใช้เวลา [15] นอกจากนี้พบว่าแนวโน้มทำนองเดียวกับค่าความแข็งแบบชอร์ (รูปที่ 7) อย่างไรก็ตามค่ากำลังอัดที่ได้ผ่านเกณฑ์ ACI 522.1-13 ซึ่งได้กำหนดค่าไว้อยู่ในช่วง 2.8-28 เมกะพาสคัล [14]



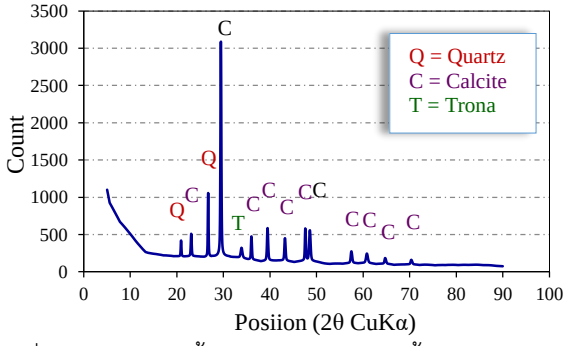
รูปที่ 7 ความแข็งแบบชอร์ของคอนกรีตมวลรวมลูกรังผสมเถ้าแกลบ



รูปที่ 8 กำลังอัดของคอนกรีตมวลรวมลูกรังผสมเถ้าแกลบ

3.9 องค์ประกอบแร่ของคอนกรีต

วิเคราะห์องค์ประกอบแร่โดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) ของคอนกรีตมวลรวมลูกรังขนาดใหญ่ที่ผสมเถ้าแกลบมีค่ากำลังอัดสูงสุด นำไปวิเคราะห์แร่ประกอบที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) ดังในรูปที่ 9 ปริมาณวัฏภาคแร่ที่มีการตกผลึก (Precipitation) โดดเด่นมากที่สุดคือ แร่แคลไซต์ (Calcite, $CaCO_3$) และรองลงมาเป็นควอตซ์ (Quartz) และโทรนา (Trona, $Na_3H(CO_3)_2.2H_2O$) การที่เนื้อคอนกรีตมีสภาพแอลคาไลสูงและอุณหภูมิต่ำ ส่งผลให้ CO_2 สามารถจับกับสารละลายโซเดียมไอดรอกไซด์ และมีการตกผลึกวัฏภาคแร่โทรนาขึ้นมา



รูปที่ 9 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเนื้อคอนกรีตมวลรวมลูกรังผสมเถ้าแกลบ

4.0 โครงสร้างจุลภาค

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบปริมาณร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่ากำลังอัดสูงสุดในการทดลองนี้ เน้นวิเคราะห์บริเวณเนื้อประสานกัน พบว่าเนื้อมวลรวมลูกรัง (L) ยึดติดกับเนื้อประสานกันอย่างหลวมในบริเวณส่งผ่านรอยต่อ (ITZ) ดังในรูปที่ 10 (ก) พบแร่ควอตซ์ฝังเนื้อผิวโค้งมนติดกัน ขณะที่ในซอกร่องโพรงเกิดวัฏภาคเอตทริงไกต์

(Ettringite Phase, $(CaO)_3(Al_2O_3)(CaSO_4)_3{\cdot}32H_2O$) มีลักษณะเป็นรูปทรงแท่งเข็มเกิดขึ้นมาก (รูปที่ 10 ข) เช่นเดียวกับงานคอนกรีตมวลรวมกรวดทะเลสาบสงขลาผสมเถ้าแกลบ [15] จากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานมีน้ำมากเกินไป [33] และค่าอัตราส่วนระหว่างแคลเซียมซัลเฟตต่อไตรแคลเซียมอะลูมิเนตสูงทำให้เกิดได้ง่าย [34] ดังแสดงสมการทางเคมี (1)

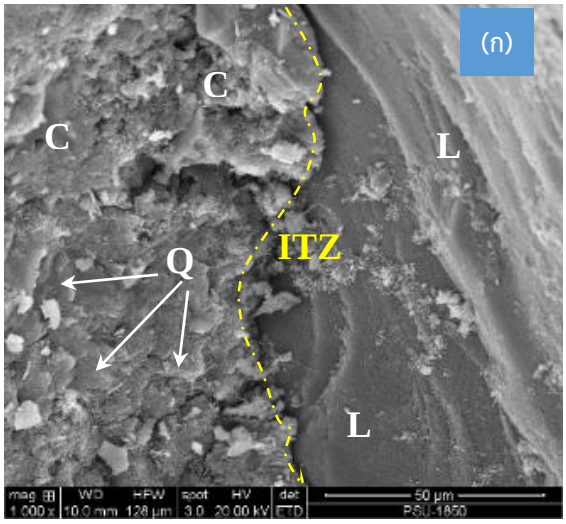
$$C_3A + 3CaSO_4 \rightarrow Ca_6Al_2(SO_4)_3(OH)_{12}{\cdot}26H_2O \quad (1)$$

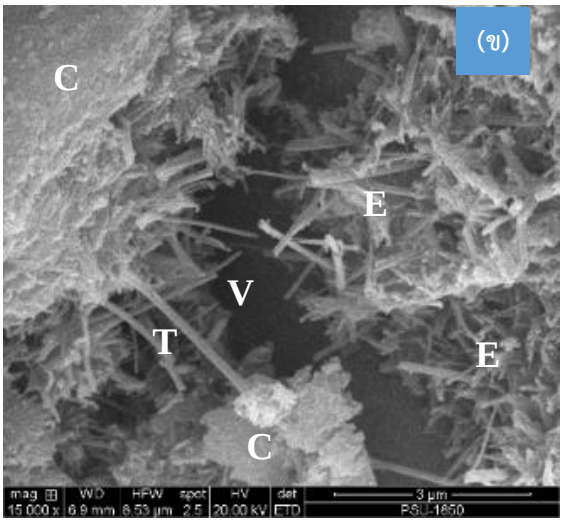
ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต+แคลเซียมซัลเฟต → เอต์ทรินไกต์

การเกิดเอต์ทรินไกต์ในโพรงทำให้ขยายตัวมาก [33] เช่นผลทดลองครั้งนี้ (รูปที่ 10 ข) อันส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานไม่เต็มที่ (รูปที่ 8) แต่กลับเป็นผลให้คอนกรีตขยายตัว (รูปที่ 3) ดูดซึมน้ำ (รูปที่ 4) และอัตราการซึมผ่าน (รูปที่ 5) สูงขึ้น นอกจากนี้ยังตรวจพบแคลไซต์ (Calcite, C) มีลักษณะเป็นแผ่นซ้อนกันจับกันเป็นกลุ่ม และวัฏภาคแร่โทรนา (Trona, T) มีลักษณะรูปแท่งแขนงกลมยาวสม่ำเสมอแต่มีปริมาณน้อย ดังในรูปที่ 10 (ข) อันเนื่องจากในช่วงสภาวะนั้นเนื้อคอนกรีตบริเวณดังกล่าวมีสภาพแอลคาไล (Alkalinity) เข้มข้นกว่าบริเวณอื่น จึงตกผลึกให้แร่โทรนาเกิดขึ้นมา

4. บทสรุป

จากการทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลรวมลูกรัง พบว่ามีการดูดซึมน้ำมาก โดยเฉพาะคอนกรีตมวลรวมลูกรังขนาดใหญ่ (25.0 - 37.5 มิลลิเมตร) มีค่าการดูดซึมน้ำที่มากกว่าคอนกรีตมวลรวมลูกรังขนาดเล็ก (9.5 - 25.0 มิลลิเมตร) เมื่อผสมเถ้าแกลบ คอนกรีตมวลรวมลูกรังขนาดใหญ่และขนาดเล็กมีค่าการดูดซึมน้ำลดลงเล็กน้อย เฉลี่ยร้อยละ 1.09 และ 5.92 ตามลำดับ ซึ่งคอนกรีตทดลองทั้งหมดมีค่าการดูดซึมน้ำและอัตราการซึมผ่านที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาบ่ม อยู่ในเกณฑ์คอนกรีตพรุน [14] ส่วนความหนาแน่นรวมของคอนกรีตควบคุมทั้งมวลรวมลูกรังขนาดใหญ่และเล็ก มีค่าใกล้เคียงกัน แต่คอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบมีค่าความหนาแน่นรวมลดลงจากการที่มีการขยายตัวเชิงปริมาตร (รูปที่ 3) และความพรุน (รูปที่ 4) เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับค่าความแข็งแบบชอร์ (รูปที่ 7) กำลังอัดของคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตผสมเถ้าแกลบมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุบ่มที่เพิ่ม ค่ากำลังอัดสูงสุดที่บ่ม 28 วัน ประมาณ 18 เมกะพาสคัล และคอนกรีตมวลรวมลูกรังขนาดใหญ่มีกำลังอัดสูงกว่าที่ใส่มวลรวมขนาดเล็ก คิดเป็นค่าเฉลี่ยร้อยละ 23.39 ซึ่งค่ากำลังอัดที่ทดสอบทั้งหมดผ่านเกณฑ์มาตรฐานงานคอนกรีตพรุน ACI 522.1-13 ผลการศึกษาครั้งนี้บ่งว่าดินลูกรังที่พบได้ในหลายพื้นที่ในประเทศไทยนำมาผสมกับเถ้าแกลบนั้น เพื่อจะทำเป็นคอนกรีตชนิดน้ำซึมผ่านนั้น ควรต้องมีการศึกษาสมบัติและทดสอบถึงความเหมาะสมก่อน ว่าตัวอย่างคอนกรีตที่หล่อจะมีกำลังอัดพอรับน้ำหนักดินบรรทุกข้างบนและอัตราการซึมผ่านน้ำจัดทำเป็นชั้นน้ำบาดาลระดับตื้นได้ดี ซึ่งงานวิจัยนี้ไม่เพียงรณรงค์วัสดุของเสียทางเกษตรกลับมาใช้ใหม่ (Recycled) ให้ได้คุณประโยชน์สูงสุด แต่ยังช่วยลดการนำพื้นที่ทำเป็นบ่อฝังกลบขยะอีกด้วย นอกจากเถ้าแกลบแล้ว ในประเทศไทยก็พบว่าเถ้าชนิดอื่นที่มีศักยภาพมาศึกษาทดลองพัฒนางานวิจัยนี้ได้อีก เช่น เถ้าชานอ้อย เถ้าปาล์มน้ำมัน เถ้ามันสำปะหลัง เถ้ากะลามะพร้าว เถ้าซังข้าวโพด คอนกรีตพรุนสามารถใช้ทำเป็นพื้นที่ชุ่มน้ำ (Wet Land) หรือแหล่งน้ำใต้ดินในบริเวณที่อัตคัดแหล่งน้ำผิวดิน หรือพัฒนาแหล่งกักเก็บน้ำในรูปแก้มลิงใต้ดิน อันจะช่วยชะลอน้ำป้องกันน้ำท่าไหลท่วมบ่า และเป็นมาตรการหนึ่งช่วยแก้ไขความกันดารขาดแคลนน้ำในยามต้องการ





รูปที่ 10 ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของคอนกรีตมวลรวมลูกรังผสมเถ้าแกลบ ก) รอยต่อระหว่างลูกรังกับเนื้อประสาน (LTZ) มีควอตซ์ (Q) แคลไซต์ (C) ติดกับมวลรวมลูกรัง (L) และ ข) รูปทรงสัณฐานผลึกแคลไซต์ เอต์ทรินไกต์ (E) และโทรนา (T) ที่เกิดขึ้นในซอกโพรง (V)

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัย ประเภทโครงงานนักศึกษา ตามสัญญาเลขที่ ENG–58-2-7-08-0218-S ประจำปี 2559 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ หาดใหญ่

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Drought of Thailand in 2020. Available from http://portal.disaster.go.th/portal/ext/nirapai/ [Accessed 21th June 2020].

[2] Ryduchowska DT. The effect of aggregate variation on the compressive strength of laterite concrete. Cem. Concr. Res. 1986; 16(2):135-142.

[3] Falade FA. Comparative study of normal concrete with concretes containing granite and laterite fine aggregates. SEMC. 2001;2:1407-1413.

[4] Udeoyo FF, Iron UH, Odim OO. Strength performance of laterized concrete. Constr Build Mater. 2006;20(10):1057-1062.

[5] Ettu LO, Ibearugbulem OM, Ezeh JC, Anya UC. The suitability of using laterite as soil fine aggregate in structural concrete. IJSER. 2013;4(5):502-507.

[6] Muthusamy K, Kamaruzaman NW, Ahmad SW, Yahaya FM. Study on durability performance of concrete containing laterite aggregates. Concr Res Lett. 2015;6(2):60-68.

[7] Raheem AA, Bello OA, Makinde OA. A comparative study of cement and lime stabilized lateritic interlocking blocks. PJST. 2010;11(2):27-34.

[8] Otoko GR, Isoteim F–M, Oyebode OJ. The suitability of lateritic soils for block making. IJMER. 2016;6(9):12-16.

[9] Tonnayopas D, Hnumuang K and Nounpradit T. Effect of cement clinker dust on stabilized lateritic soil. Proceedings of the 9th Mining, Metallurgical and Petroleum Conference (REUSE II), 2011 Jan 13-14; Montien Riverside Hotel, Bangkok: 2011. p. 183-190.Thai.

[10] Tonnayopas D, Thinpakpanang T. Improvement of clay soil with industrial wastes. Engng.J.CMU. 2015;22(1):1-8.Thai.

[11] Awoyera PO, Dawson AR, Thom NH, Akinmusuru JO. Suitability of mortars produced using Laterite and ceramic wastes: Mechanical and microscale analysis. Constr Build Mater. 2017;148:195-203.

[12] Mathew G, Paul MM. Mix design methodology for laterized self-compacting concrete and its behavior at elevated temperature. Constr Build Mater. 2012;36:104–109.

[13] Ministry of Natural Resources and Environment. Environmental management from the use of lateritic soil and soft rock (South Region). The Office of Natural Resources and Environmental Policy and Planning, Thailand. Final Report: 2014.Thai.

[14] American Concrete Institute. ACI 522.1-13. Specification For pervious concrete pavement. USA; ACI Committee; 2013.

[15] Tonnayopas D, Jitnukoon K. Effect of Sang Yod rice husk ash on Songkhla Lake gravel gap-graded aggregate concrete. SWU Eng. J. 2013; 8(2):62-69. Thai.

[16] American Society for Testing and Materials. ASTM C136/C136M-14. Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates. PA: ASTM International; 2014.

[17] British Standards Institution. BS 812-105.2:1990. Testing aggregates. Methods for determination of particle shape. –Section elongation index of coarse aggregate. London: BSI; 1990.

[18] British Standards Institution. BS EN 933-3:2012. Tests for geometrical properties of aggregates. Determination of particle shape. Flakiness index. London: BSI; 2012.

[19] American Society for Testing and Materials. ASTM C29/C29M-17a. Standard test method for bulk density (“Unit Weight”) and voids in aggregate. PA: ASTM International; 2017.

[20] British Standards Institution. BS EN 1097-3:1998. Tests for mechanical and physical properties of aggregates –Part 3: Determination of loose bulk density and voids. London: BSI; 1998.

[21] American Society for Testing and Materials. ASTM D4644-16. Standard test method for slake durability of shales and other similar weak rocks. PA: ASTM International; 2016.

[22] American Society for Testing and Materials. ASTM C131/C131M-20. Standard test methods for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles machine. PA: ASTM International; 2020.

[23] American Society for Testing and Materials. ASTM C1754/C1754M-12. Standard test method for density and void content of hardened pervious concrete, PA: ASTM International; 2012.

[24] American Society for Testing and Materials. ASTM C1781/C1781M-18e1. Standard test method for surface infiltration rate of permeable unit pavement systems. PA: ASTM International; 2018.

[25] American Society for Testing and Materials. ASTM F1957-99(2017), Standard Test Method for composite foam hardness-durometer hardness. PA: ASTM International; 2017.

[26] American Society for Testing and Materials. ASTM C109/C109M-16a. Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (Using 2-in. or [50-mm] cube specimens). PA: ASTM International; 2016.

[27] Indian Standard (IS), Indian Road Congress (IRC), BIS and Ministry of Road Transport and Highway (MORTH).

[28] Franklin JA, Chandra R. The slake-durability test. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr. 1972; 9(3):325-328.

[29] Muthusamy K, Kamaruzaman NW. Assessment of Malaysian laterite aggregate in concretes. IJCEE. 2012;12(4):83-86.

[30] Ogundipe OM, Olanike AO, Nnochiri ES, Ale PO. Effects of coarse aggregate size on the compressive strength of concrete. C.E.J. 2018;4(4):836-842.

[31] Olugbenga A. Effects of varying curing age and water/cement ratio on the elastic properties of laterized concrete. Civ. Eng. Dimens. 2007;9(2):85-89.

[32] Yu Q, Sawayama K, Sugita S, Shoya M, Isojima Y. The reaction between rice husk ash and $Ca(OH)_2$ solution and the nature of its product. Cem. Concr. Res. 1999:29(1):37-43.

[33] Min D, Tang M. Formation and expansion of ettringite crystals.Cem. Concr. Res. 1994:24(1):119-126.

[34] Bizzozero J, Gosselin C, Scrivener KL. Expansion mechanisms in calcium aluminate and sulfoaluminate systems with calcium sulfate Cem. Concr. Res. 2014:56:190-202.

การประยุกต์เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศประเมินเขตศักยภาพทำเลที่เหมาะสมของธุรกิจโรงแรมบริเวณชายฝั่งทะเลตะวันออกของประเทศไทย

The Application of Geo-Informatics Technology to Assess the Potential Location of the Hotel Business on the Eastern Seaboard of Thailand

รุ่งอาทิตย์ บูชาอินทร์[1 *] และกฤษนัยน์ เจริญจิตร[1]
[1] คณะภูมิสารสนเทศศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
169 ถนนลงหาดบางแสน อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี 20131
Rungathit Buchain[1 *] and Kitsanai Charoenjit[1]
[1] Faculty of Geo-Informatics, Burapha University
169 Long Had Bangsaen Road, Saen Suk, Chon Buri District, Chon Buri, 20131
[*]ผู้รับผิดชอบบทความ: Rungatith@go.buu.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 0-3810-2328 ต่อ 101

Received: 19 July 2020, Revised: 31 August 2020, Accepted: 5 November 2020

บทคัดย่อ
การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินศักยภาพทำเลที่เหมาะสมของตำแหน่งโรงแรมบริเวณชายฝั่งทะเลตะวันออกของประเทศไทย โดยใช้การวิเคราะห์ค่าถ่วงน้ำหนักปัจจัยแบบลำดับขั้นเพื่อสร้างเกณฑ์การวิเคราะห์ทำเลที่เหมาะสมของธุรกิจโรงแรม การสำรวจภาคสนามเพื่อเก็บข้อมูลตำแหน่งโรงแรม และการสร้างข้อมูลปัจจัยเชิงพื้นที่เพื่อวิเคราะห์ศักยภาพทำเลที่เหมาะสมของธุรกิจโรงแรมด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ศักยภาพเชิงพื้นที่ในระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ ผลการศึกษาพบว่า โรงแรมที่ถูกประเมินอยู่ในเขตศักยภาพทำเลที่เหมาะสมระดับสูงมีทั้งหมด 99 โรงแรม อยู่ในเขตชายฝั่งจังหวัดชลบุรีจำนวน 58 โรงแรม จังหวัดระยองจำนวน 41 โรงแรม โรงแรมที่ถูกประเมินอยู่ในเขตศักยภาพทำเลที่เหมาะสมระดับปานกลางมีทั้งหมด 154 โรงแรม อยู่ในเขตชายฝั่งจังหวัดชลบุรีจำนวน 32 โรงแรม จังหวัดระยองจำนวน 47 โรงแรม จังหวัดจันทบุรีจำนวน 57 โรงแรม และจังหวัดตราดจำนวน 18 โรงแรม และโรงแรมที่ถูกประเมินอยู่ในเขตพื้นที่ศักยภาพทำเลที่เหมาะสมระดับต่ำมีทั้งหมด 4 โรงแรม ซึ่งอยู่ในเขตชายฝั่งจังหวัดตราดทั้งหมด
คำสำคัญ เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศ ธุรกิจโรงแรม การประเมินศักยภาพทำเล ชายฝั่งทะเลตะวันออก

Abstract
The objective of this research was to evaluate the potential of the suitable locations for the hotel on the eastern coast of Thailand by using analytic hierarchy process (AHP) to create criteria for analyzing the suitable locations of the hotel business. Field survey was conducted to collect hotel location data, and spatial factors data were created to analyze the potential and suitable location of the hotel business using potential surface analysis (PSA), a technique in geographic information system. The results showed that the total number of hotels in the highest potential areas was 99 hotels, consisting of 58 hotels in the coastal area of Chon Buri Province and 41 hotels in Rayong Province. There were 154 hotels in the evaluation area that were moderately suitable locations, consisting of 32 hotels in Chon Buri Province, 47 hotels in Rayong Province, 57 hotels in Chanthaburi Province, and 18 hotels in Trat Province. There were four hotels evaluated in the low-potential locations, and all the hotels were in the coastal areas of Trat Province.
Keywords: Geo-Informatics Technology, Hotel Business, Potential Evaluation of Location, Eastern Seaboard.

1. บทนำ

อุตสาหกรรมภาคธุรกิจการโรงแรมและท่องเที่ยวนับว่าเป็นธุรกิจสำคัญที่สามารถทำรายได้ให้แก่ประเทศไทยเป็นอันดับหนึ่งอย่างต่อเนื่องตลอดหลายสิบปีที่ผ่านมา

นับได้ว่าเป็นธุรกิจที่สามารถพัฒนาได้ในทุกภูมิภาคของประเทศไทย ในยุคโลกาภิวัตน์ธุรกิจด้านการท่องเที่ยวมีการแข่งขันกันอย่างรุนแรงมากขึ้น และผลจากภาวะเศรษฐกิจโลก ภัยธรรมชาติ ตำแหน่งที่ตั้งโรงแรม ความยากง่ายในการเดินทางเข้าถึงสถานที่ ตลอดจนสภาวะทางการเมืองของไทยมีผลทำให้รายได้จากการท่องเที่ยวของไทยชะลอตัว [1] ซึ่งปัญหาเหล่านี้สามารถลดผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญได้ โดยประยุกต์เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศเข้ามาช่วยในการบริหารจัดการด้านต่าง ๆ [2] โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำเทคโนโลยีภูมิสารสนเทศมาช่วยในการวิเคราะห์ศักยภาพพื้นที่โดยใช้เทคนิค Potential Surface Analysis (PSA) ในการจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการพัฒนาเมืองและคำนวณหาพื้นที่ที่มีศักยภาพเหมาะสมต่อการพัฒนาเมืองและที่อยู่อาศัย ซึ่งเทคนิคนี้มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในสาขาวิชาภูมิศาสตร์ วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ภูมิสถาปัตยกรรม และสาขาวิชาด้านผังเมือง [3]

ตามยุทธศาสตร์แผนการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 12 (พ.ศ.2560-2564) ในยุทธศาสตร์ที่ 3 และ 8 เรื่องการสร้างความเข้มแข็งทางเศรษฐกิจและแข่งขันได้อย่างยั่งยืน และการพัฒนาวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี วิจัย และนวัตกรรม ซึ่งได้จัดทำบนพื้นฐานของยุทธศาสตร์ชาติ 20 ปี (พ.ศ. 2560-2579) ซึ่งเป็นแผนแม่บทหลักของการพัฒนาประเทศ และเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน รวมทั้งการปรับโครงสร้างประเทศไทยไปสู่ประเทศไทย 4.0 ซึ่งเน้นการประยุกต์นวัตกรรมแขนงต่าง ๆ ในการสนับสนุนภาคธุรกิจโดยเฉพาะธุรกิจการโรงแรมและการท่องเที่ยว [4] โดยในพื้นที่ศึกษาวิจัยในครั้งนี้ (ชายฝั่งทะเลตะวันออกของประเทศไทย) ได้รับการส่งเสริมเศรษฐกิจด้านการท่องเที่ยวและเป็นเขตเศรษฐกิจพิเศษ (Eastern Economic Corridor : EEC) เพราะโดยลักษณะของภูมิภาคนี้ มีความได้เปรียบทางด้านตำแหน่งที่ตั้งติดทะเล ระบบการขนส่ง ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม และอยู่ไม่ไกลจากกรุงเทพฯ และนิคมอุตสาหกรรมต่าง ๆ จึงนับได้ว่าเป็นพื้นที่มีมีจุดเด่นในการทำวิจัยเกี่ยวกับธุรกิจการโรงแรมและการท่องเที่ยวอย่างมีนัยสำคัญ

ดังนั้นจากที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นว่างานวิจัยในการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพื้นที่ ในการสนับสนุนธุรกิจการโรงแรมและการท่องเที่ยว ในด้านการบริหารจัดการในพื้นที่ภาคตะวันออก ประเภทนี้ค่อนข้างน้อย โดยจากงานวิจัยของ [3] [5] และ [6] เป็นการศึกษาศักยภาพทำเลที่เหมาะสมต่อการพัฒนาเมืองและที่อยู่อาศัย คณะวิจัยจึงได้เล็งเห็นความสำคัญในการประยุกต์เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศศึกษาศักยภาพทำเลที่เหมาะสมของธุรกิจโรงแรมในเขตพื้นที่ตามแนวชายฝั่งทะเลตะวันออกเฉพาะที่อยู่บนแผ่นดิน (Main Land) ในรัศมี 10 กิโลเมตร ถัดจากเส้นแนวชายฝั่งของบริเวณจังหวัด ชลบุรี ระยอง จันทบุรี และ ตราด ซึ่งไม่รวมพื้นที่เกาะในภาคตะวันออก โดยจากข้อมูลการสำรวจภาคสนามของ [7] พบว่าการใช้ประโยชน์ที่ดินในรัศมี 10 กิโลเมตร จากแนวชายฝั่งทะเลตะวันออกส่วนใหญ่เป็นสิ่งปลูกสร้างประเภทโรงแรม รีสอร์ท และถัดจาก 10 กิโลเมตรเป็นต้นไปจะเป็นสิ่งปลูกสร้างประเภทที่อยู่อาศัย

โดยผลการวิจัยนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการวางแผนการบริหารจัดการธุรกิจของผู้ประกอบการในพื้นที่ศึกษาและการเตรียมความพร้อมของธุรกิจโรงแรมไปสู่รูปแบบประเทศไทย 4.0 เพื่อเศรษฐกิจที่ยั่งยืนและมั่นคงต่อไป

2. ทฤษฎีและวิธีการวิจัย

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และวิธีการดำเนินการวิจัย โดยทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสามารถพิจารณาเป็น 5 ประเด็นที่สำคัญคือ ธุรกิจโรงแรมและการจำแนกประเภทโรงแรม ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเลือกทำเลที่เหมาะสมของธุรกิจโรงแรม เทคนิคการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น การวิเคราะห์ศักยภาพเชิงพื้นที่ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ส่วนวิธีการดำเนินการวิจัยจะกล่าวถึงขั้นตอนการดำเนินการวิจัยในแต่และส่วน

2.1 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 ธุรกิจโรงแรม และการจำแนกประเภทโรงแรม

โรงแรม หมายถึง สถานที่พักที่จัดตั้งขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์ในทางธุรกิจเพื่อให้บริการที่พักชั่วคราวสำหรับคนเดินทางหรือบุคคลอื่นใดโดยมีค่าตอบแทน โดยการแบ่งประเภทของที่พักแรมแตกต่างกันออกไปตามวัตถุประสงค์ในการจัดประเภทซึ่งอาจขึ้นอยู่กับทำเลที่ตั้ง การเข้าพักอาศัยของแขก การบริหารงาน การจัดบริการแก่แขก หรือขึ้นอยู่กับองค์ประกอบอื่น ๆ โดยการแบ่งประเภทของที่พักแรม สามารถยกตัวอย่างได้ดังนี้

1) โรงแรมเพื่อการพาณิชย์ หรือโรงแรมแขกพักไม่ประจำ โรงแรมประเภทนี้มีมากกว่าประเภทอื่น ๆ ทำเลที่ตั้งอยู่ในเมือง ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการติดต่อธุรกิจ แขกซึ่งพักในโรงแรมดังกล่าว ส่วนใหญ่เป็นนักธุรกิจ นักท่องเที่ยว ที่มิได้มีวัตถุประสงค์เพื่อเช่าอยู่เป็นที่พักประจำ

2) โรงแรมแขกพักประจำ มีวัตถุประสงค์ในการให้แขกเช่าพักอาศัยอยู่ประจำ มีการจัดห้องอาหารบริการแก่แขกและลูกค้าทั่วไป ทำเลที่ตั้งโดยปกติแล้วอยู่ในบริเวณชานเมืองเพื่อเหมาะแก่การเป็นที่พักอาศัย แต่ก็มีบางโรงแรมตั้งอยู่ใกล้

ย่านธุรกิจ เพื่ออำนวยความสะดวกแก่แขกในการติดต่อการงาน

3) โรงแรมรีสอร์ท มักตั้งอยู่ในบริเวณใกล้ชิดกับธรรมชาติ เพื่อให้แขกได้พักผ่อน สัมผัสกับธรรมชาติอย่างแท้จริง โรงแรมต้องจัดบริการต่าง ๆ โดยเน้นบริการทางด้านการกีฬาและนันทนาการ ตลอดจนกิจกรรมในการบันเทิงอื่น ๆ ให้กับแขกผู้มาพัก ซึ่งมีวัตถุประสงค์ในด้านการพักผ่อนเป็นหลัก [8] นอกจากนี้ยังได้กำหนดลักษณะของที่พักโดยแบ่งมาตรฐานที่พักเพื่อการท่องเที่ยวเป็นระดับ 1-5 ดาว เพื่อพัฒนาที่พักให้มีคุณภาพซึ่งมีการตรวจประเมินตลอดจนมีเกณฑ์และตัวชี้วัดที่เป็นมาตรฐานสากล

2.1.2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเลือกทำเลที่เหมาะสมของธุรกิจโรงแรม

เนื่องจากยังไม่มีงานวิจัยที่มีการประยุกต์เทคโลยีภูมิสารสนเทศในการวิเคราะห์ทำเลที่เหมาะสมของธุรกิจโรงแรมโดยตรงในงานวิจัยนี้จึงได้ทำศึกษาแนวทางการวิเคราะห์ปัจจัยเชิงพื้นที่จากงานวิจัยของ [9] ซึ่งได้ทำการประยุกต์เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศร่วมกับการศึกษาปัจจัยในการเลือกทำเลที่ตั้งของธุรกิจอสังหาริมทรัพย์โดยทำการเก็บรวบรวมข้อมูลโดยวิธีการสัมภาษณ์เชิงลึกจากผู้ให้ข้อมูลหลักจำนวน 19 คน ประกอบด้วยผู้บริหารองค์การธุรกิจอสังหาริมทรัพย์และผู้เชี่ยวชาญด้านภูมิสารสนเทศ พบว่ามีปัจจัยที่สำคัญในการเลือกทำเลที่มีศักยภาพ ดังนี้

1) การเข้าถึงสิ่งอำนวยความสะดวก หมายถึง ปัจจัยที่ผู้ประกอบการธุรกิจอสังหาริมทรัพย์ใช้ในการพิจารณาการเลือกทำเลหมู่บ้านจัดสรรจากระยะการเข้าถึงสิ่งอำนวยความสะดวกต่าง ๆ ได้แก่ ศูนย์การค้า ห้างสรรพสินค้า ตลาด สถานศึกษา และ โรงพยาบาล

2) การเข้าถึงการเดินทาง หมายถึง ปัจจัยที่ผู้ประกอบการธุรกิจอสังหาริมทรัพย์ใช้ในการพิจารณาการเลือกทำเลหมู่บ้านจัดสรรจากระยะห่างจากถนนสายหลักและสายรองและมีผลต่อการวางแผนเลือกทำเลที่อยู่อาศัยของผู้บริโภค

3) การเข้าถึงแหล่งงาน หมายถึง ปัจจัยที่ผู้ประกอบการธุรกิจอสังหาริมทรัพย์ใช้ในการพิจารณาการเลือกทำเลหมู่บ้านจัดสรรจากการเข้าถึงแหล่งอุตสาหกรรม และแหล่งท่องเที่ยว จะมีผลต่อการตัดสินใจเลือกทำเลในการสร้างที่อยู่อาศัยของผู้ประกอบการ ซึ่งจะทำให้ผู้อยู่อาศัยลดระยะเวลาและค่าใช้จ่ายในการเดินทางลงได้

4) ภัยพิบัติและอาชญากรรม หมายถึง ปัจจัยที่ผู้ประกอบการธุรกิจอสังหาริมทรัพย์ใช้ในการพิจารณาการเลือกทำเลหมู่บ้านจัดสรรจากพื้นที่น้ำท่วมซ้ำซาก และความหนาแน่นของชุมชน

5) แผนพัฒนาเมือง หมายถึง ปัจจัยที่ผู้ประกอบการธุรกิจอสังหาริมทรัพย์ใช้ในการพิจารณาการเลือกทำเลหมู่บ้านจัดสรรจากกฎหมายผังเมืองว่า ทำเลที่สนใจสามารถพัฒนาเป็นหมู่บ้านจัดสรรได้หรือไม่

6) ปัจจัยทางภูมิศาสตร์ หมายถึง ปัจจัยที่ผู้ประกอบการธุรกิจอสังหาริมทรัพย์ใช้ในการพิจารณาการเลือกทำเลหมู่บ้านจัดสรรจากความสูงต่ำของภูมิประเทศ

2.1.3 เทคนิคการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น เป็นเทคนิคที่มีโครงสร้างหรือแนวคิดเลียนแบบความคิดของมนุษย์ที่ใช้เหตุผลในการแก้ปัญหา โดยวิเคราะห์ความสำคัญตามเหตุและผลที่เหมาะสมกับปัญหานั้น ๆ นอกจากนี้ยังเป็นเทคนิคที่ใช้ง่ายทั้งในลักษณะเป็นรายบุคคลหรือหมู่คณะ มีผลที่น่าเชื่อถือและแม่นยำเหมาะสำหรับใช้เป็นส่วนหนึ่งของข้อมูลในการนำไปใช้ในกระบวนการการตัดสินใจในการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อประเมินเขตศักยภาพทำเลที่เหมาะสมของธุรกิจโรงแรม [10] โดยมีขั้นตอนการวิเคราะห์ ดังนี้

1) การใช้ตารางเมทริกซ์ ตารางเมทริกซ์สามารถใช้ในการเปรียบเทียบ อธิบาย และทดสอบความสอดคล้องของเหตุผลและความอ่อนไหวของลำดับความสำคัญของทางเลือก ซึ่งสามารถเขียนในรูปแบบทางคณิตศาสตร์ได้ ดังนี้

กำหนดให้ C_i คือ เกณฑ์หลักในการตัดสินใจ โดยที่ $i = 1, 2, ..., n$

A_j คือ เกณฑ์รองในลำดับชั้นที่จะทำการวินิจฉัย โดยที่ $j = 1, 2, ..., n$

a_{ij} คือ ผลการเปรียบเทียบเกณฑ์ในการตัดสินใจแบบคู่ โดยที่ $i = 1, 2, ..., n$ และ $j = 1, 2, ..., n$ การวินิจฉัยจะทำทีละคู่เกณฑ์ C_i กับ A_j

ดังนั้น การวินิจฉัยจะทำในรูปของตารางเมทริกซ์ขนาด n×n และจะได้นิยามเมทริกซ์

$A = [a_{ij}]$ โดยที่ $i = 1, 2, ..., n$ และ $j = 1, 2, ..., n$

2) การวินิจฉัยเปรียบเทียบและการหาค่าน้ำหนักเกณฑ์ การวินิจฉัยเปรียบเทียบแต่ละคู่เกณฑ์ระหว่างเกณฑ์ C_i กับ A_j นั้น ผู้ทำการตัดสินใจให้ค่าน้ำหนักจะต้องทราบว่าแต่ละเกณฑ์ที่ทำการพิจารณานั้นมีความสำคัญ มีการส่งผล มีอิทธิพลต่อเกณฑ์อื่นที่นำมาเปรียบเทียบในระดับใด ซึ่งการเปรียบเทียบนั้นผู้ทำการพิจารณาต้องแสดงออกในรูปของความหมายที่เป็นคำพูด เช่น น้อยที่สุด น้อย ปานกลาง มาก มากที่สุด เพื่อให้การพิจารณานั้นมีความถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น

3) การคำนวณหาลำดับความสำคัญในระดับชั้นถัดลงมาทำโดยการคำนวณตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1 จนถึงขั้นตอนที่ 2 แล้วนำค่าที่คำนวณได้ จากลำดับชั้นที่อยู่สูงกว่า 1 ระดับชั้น มาเป็นตัวคูณค่า Normalized ของลำดับชั้นที่ 2 ที่ได้จากการคำนวณ จะได้ค่าลำดับความสำคัญในลำดับชั้นรองลงมาตามเกณฑ์ในระดับชั้นนั้น ๆ จนครบทุกเกณฑ์

4) คำนวณค่าความสอดคล้องกันของเหตุผล (Consistency Ration: C.R.) คำนวณได้จากอัตราส่วนเปรียบเทียบระหว่างค่าดัชนีวัดความสอดคล้อง (Consistency Index: C.I.) ที่คำนวณได้จากตารางเมทริกซ์กับค่าดัชนีความสอดคล้องเชิงสุ่ม (Random Consistency Index: R.I.) สามารถเขียนเป็นสมการได้ ดังนี้

$$C.R. = CI / RI \quad (1)$$

สำหรับค่าของ C.R. นั้น ถ้าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.12 ถือว่ายอมรับได้ ถ้ามากกว่า 0.12 ถือว่ายอมรับไม่ได้จะต้องทำการทบทวนค่าการให้ค่าน้ำหนักคะแนนเปรียบเทียบในเกณฑ์ครั้งนั้นใหม่ จนได้ค่า C.R. ที่สามารถยอมรับได้

2.1.4 การวิเคราะห์หาศักยภาพเชิงพื้นที่ (Potential Surface Analysis: PSA) เป็นเทคนิควิธีที่สามารถใช้ประเมินและวิเคราะห์ทำเลที่ตั้งที่เหมาะสมสำหรับการพัฒนาที่อยู่อาศัย พาณิชยกรรม และแหล่งท่องเที่ยว ทั้งนี้การวิเคราะห์ความเหมาะสมเชิงพื้นที่มีความสำคัญอยู่ที่การให้ค่าน้ำหนักแก่กลุ่มปัจจัยต่าง ๆ ซึ่งเป็นการจัดลำดับความเหมาะสมเพื่อรองรับการพัฒนาพื้นที่ การวิเคราะห์ศักยภาพเชิงพื้นที่ได้พัฒนามาจากหลักการของเทคนิคการวิเคราะห์แบบซ้อนทับแผนที่ (Overlay Mapping) ซึ่งต้องใช้ข้อมูลเชิงพื้นที่ (Spatial Data) และข้อมูลรายละเอียด (Attribute Data) จากระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ (Geographic Information System) มาวิเคราะห์และสังเคราะห์ร่วมกัน [5] โดยขั้นตอนของการวิเคราะห์ข้อมูลมีดังนี้

1) การกำหนดระดับคะแนนของปัจจัย (Rating Value) เป็นการกำหนดระดับค่าคะแนนของปัจจัยว่ามีมากหรือน้อย สำหรับการศึกษาครั้งนี้จะใช้เลขจำนวนเต็มตั้งแต่ 1-3 โดยค่าหมายเลข 3 คือ ระยะของปัจจัยที่มีความเหมาะสมมาก ค่าหมายเลข 2 คือ ระยะของปัจจัยที่มีความเหมาะสมปานกลาง และค่าหมายเลข 1 คือ ระยะของปัจจัยที่มีความเหมาะสมน้อย

2) การกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักความสำคัญของกลุ่มปัจจัย (Weighting Value) เป็นการกำหนดค่าของกลุ่มปัจจัยที่มีอิทธิพลหรือความสัมพันธ์กับศักยภาพของพื้นที่สำหรับธุรกิจโรงแรม โดยเป็นค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น (Analytic Hierarchy Process: AHP) สำหรับประเมินเขตศักยภาพทำเลที่เหมาะสมสำหรับธุรกิจโรงแรม

3) การคำนวณผล (Data Manipulation) เป็นการคำนวณค่าคะแนนของแต่ละปัจจัย โดยใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ในการคำนวณค่าคะแนนจากผลคูณระหว่างค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละกลุ่มปัจจัย และค่าคะแนนของแต่ละปัจจัยด้วยสมการดังนี้

$$S = (R_1 \times W_1) + (R_2 \times W_2) + (R_n \times W_n) \quad (2)$$

เมื่อ S = พื้นที่เหมาะสม (Suitability)

W = ค่าคะแนนความสำคัญของปัจจัย (Weighting)

R = ค่าความสามารถของปัจจัย (Rating)

และจำแนกระดับความเหมาะสมออกเป็น 3 ระดับ โดยใช้หลักการจำแนกด้วย Standard Deviation (SD) ได้แก่

พื้นที่เหมาะสมสูง มีค่าคะแนน $> \mu + SD$ (3)

พื้นที่เหมาะสมปานกลาง มีค่าคะแนน

$\mu - SD <$ ค่าคะแนน $> \mu + SD$ (4)

พื้นที่เหมาะสมต่ำ มีค่าคะแนน $< \mu - SD$ (5)

โดย μ = mean และ SD = Standard Deviation

2.1.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องในด้านการวิเคราะห์ศักยภาพทำเลที่เหมาะสมในการพัฒนาที่อยู่อาศัยและพาณิชยกรรมโดยประยุกต์ระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ พบว่า พื้นที่ที่มีศักยภาพเหมาะสมในระดับสูงต่อการรองรับการขยายตัวของที่อยู่อาศัยและพาณิชยกรรมจะอยู่ในเขตพื้นที่ที่ใกล้กับเส้นทางคมนาคมสายหลัก และพื้นที่ที่มีศักยภาพเหมาะสมในระดับปานกลางและต่ำ จะอยู่ในเขตพื้นที่ที่ห่างไกลจากเส้นทางคมนาคมสายหลักออกมา [5] โดยบริเวณที่เหมาะสมสูงจะต้องเป็นบริเวณที่มีแหล่งอำนวยความสะดวกครบถ้วน เช่น ห้างสรรพสินค้า โรงเรียน โรงพยาบาล เป็นต้น [6] โดยจะต้องมีการพัฒนาที่เป็นไปตามข้อกฎหมายผังเมือง

2.2. วิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยโดยประยุกต์เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศในการศึกษาวิเคราะห์ โดยในขั้นแรกได้ทำการคัดเลือกปัจจัย และวิเคราะห์ค่าถ่วงน้ำหนัก (Weighting) แบบการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น (Analytic Hierarchy Process : AHP) และใช้วิธีการสุ่มแบบเจาะจงจากผู้เชี่ยวชาญด้านนักพัฒนาอสังหาริมทรัพย์ประเภทโรงแรม นักภูมิสารสนเทศเพื่อการท่องเที่ยว และนักท่องเที่ยว ซึ่งใช้ข้อมูลแบบสอบถามในการให้ค่าคะแนนแบบปรียบเทียบปัจจัยเชิงคู่ (Pairwise Comparison) จากปัจจัยหลักทั้ง 4 ประเภทและปัจจัยรอง 17 ประเภทที่ปรับปรุงจาก [6] ดังตารางที่ 1 จากนั้นเมื่อได้แบบจำลองศักยภาพเชิงพื้นที่ (PSA) แล้วดำเนินการจัดสร้างข้อมูลเชิงพื้นที่ของปัจจัยตามเกณฑ์เพื่อนำเข้าวิเคราะห์ในระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ เพื่อวิเคราะห์และประมวลผล

ตารางที่ 1 ปัจจัยที่ใช้ในการวิเคราะห์ทำเลที่เหมาะสมของธุรกิจโรงแรม ปรับปรุงจาก [6]

ปัจจัยหลัก	การจำแนกปัจจัยย่อย
1. ด้านการเข้าถึงสิ่งอำนวยความสะดวก	1.ระยะห่างจากห้างสรรพสินค้า และศูนย์การค้า 2. ระยะห่างจากร้านสะดวกซื้อ 3.ระยะห่างจากโรงพยาบาล
2. ด้านการเข้าถึงการเดินทาง	1. ระยะห่างจากถนนสายหลัก 2. ระยะห่างจากถนนสายรอง 3. ระยะห่างจากสนามบิน 4. ระยะห่างจากสถานีรถไฟ 5. ระยะห่างจากสถานีขนส่งรถโดยสาร 6. ระยะห่างจากท่าเรือพาณิชย์
3. ด้านการเข้าถึงแหล่งท่องเที่ยว	1. ระยะห่างจากแหล่งท่องเที่ยวทางธรรมชาติ 2. ระยะห่างจากแหล่งท่องเที่ยวทางวัฒนธรรม 3. ระยะห่างจากแหล่งท่องเที่ยวทางประวัติศาสตร์ 4. ระยะห่างจากแหล่งท่องเที่ยวนันทนาการ
4. ด้านภัยพิบัติและอาชญากรรม	1. พื้นที่เสี่ยงอุทกภัย 2. พื้นที่เสี่ยงฝนตกหนัก 3. ความหนาแน่นของชุมชน 4. ระยะห่างจากสถานีตำรวจ

ในทางขนานกันดำเนินการสำรวจข้อมูลธุรกิจโรงแรมในพื้นที่ศึกษา ซึ่งประกอบด้วยฐานข้อมูลด้านตำแหน่งที่ตั้ง และลักษณะทั่วไปของธุรกิจโรงแรม และนำเข้าข้อมูลทั้งหมดในรูปแบบของข้อมูลระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ โดยพิจารณาเกณฑ์และให้ค่าคะแนนปัจจัยเพื่อหาพื้นที่เหมาะสมโดยอ้างอิงจากงานวิจัยของ [6] ร่วมกับการวิเคราะห์ศักยภาพเชิงพื้นที่ (Potential Surface Analysis: PSA) ด้วยโปรแกรมระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

3.1 ผลการวิจัย

3.1.1 ผลการวิเคราะห์ค่าถ่วงน้ำหนัก (Weighting) แบบการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น (Analytic Hierarchy Process: AHP)

โดยข้อมูลที่ได้จากการตอบแบบประเมิน AHP ทั้งหมดจากผู้เชี่ยวชาญ นำมาทดสอบค่าดัชนีความสอดคล้อง (Consistency Ratio : CR) โดยกำหนดค่าความเชื่อมั่นไว้ที่ CR < 0.12 จากนั้นดำเนินการหาค่า Eigenvector และนำค่าเฉลี่ย (Column Average) ที่ได้ไปปรับเป็นค่าข้อมูลแบบเส้นตรง (Linear Ranking) และนำค่าน้ำหนักที่ได้จากปัจจัยหลักไปวิเคราะห์ร่วมกับค่าปัจจัยรอง เพื่อจัดทำตารางค่าถ่วงน้ำหนักปัจจัยหลักและปัจจัยรองที่พร้อมวิเคราะห์ในระบบสารสนเทศภูมิสาสตร์ ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าถ่วงน้ำหนักปัจจัยหลักและปัจจัยรองพร้อมวิเคราะห์ในระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์

ปัจจัย	ค่าน้ำหนัก	เกณฑ์	ค่าคะแนน
ด้านการเข้าถึงแหล่งท่องเที่ยว			
ระยะห่างจากแหล่งท่องเที่ยวทางธรรมชาติ	16	ระยะห่าง < 5 กม. ระยะห่าง > 5 - แต่ไม่เกิน 30 กม. ระยะห่าง > 30 กม.	3 2 1
ระยะห่างจากแหล่งท่องเที่ยวนันทนาการ	12	ระยะห่าง < 5 กม. ระยะห่าง > 5 - แต่ไม่เกิน 30 กม. ระยะห่าง > 30 กม.	3 2 1
ระยะห่างจากแหล่งท่องเที่ยวทางประวัติศาสตร์	8	ระยะห่าง < 5 กม. ระยะห่าง > 5 - แต่ไม่เกิน 30 กม. ระยะห่าง > 30 กม.	3 2 1
ระยะห่างจากแหล่งท่องเที่ยวทางวัฒนธรรม	4	ระยะห่าง < 5 กม. ระยะห่าง > 5 - แต่ไม่เกิน 30 กม. ระยะห่าง > 30 กม.	3 2 1
ด้านการเข้าถึงการเดินทาง			
ระยะห่างจากถนนสายหลัก	18	ระยะห่าง < 1 กม. ระยะห่าง > 2 - แต่ไม่เกิน 5 กม. ระยะห่าง > 5 กม.	3 2 1
ระยะห่างจากถนนสายรอง	15	ระยะห่าง < 1 กม. ระยะห่าง > 2 - แต่ไม่เกิน 5 กม. ระยะห่าง > 5 กม.	3 2 1
ระยะห่างจากสถานีขนส่งรถโดยสาร	12	ระยะห่าง < 1 กม. ระยะห่าง > 2 - แต่ไม่เกิน 5 กม. ระยะห่าง > 5 กม.	3 2 1
ระยะห่างจากสนามบิน	9	ระยะห่าง < 60 กม. ระยะห่าง > 60 - แต่ไม่เกิน 100 กม. ระยะห่าง > 100 กม.	3 2 1
ระยะห่างจากท่าเรือพาณิชย์	6	ระยะห่าง < 10 กม. ระยะห่าง > 10 - แต่ไม่เกิน 30 กม. ระยะห่าง > 30 กม.	3 2 1
ระยะห่างจากสถานีรถไฟ	3	ระยะห่าง < 1 กม. ระยะห่าง > 2 - แต่ไม่เกิน 5 กม. ระยะห่าง > 5 กม.	3 2 1

ตารางที่ 2 ค่าถ่วงน้ำหนักปัจจัยหลักและปัจจัยรองพร้อมวิเคราะห์ในระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (ต่อ)

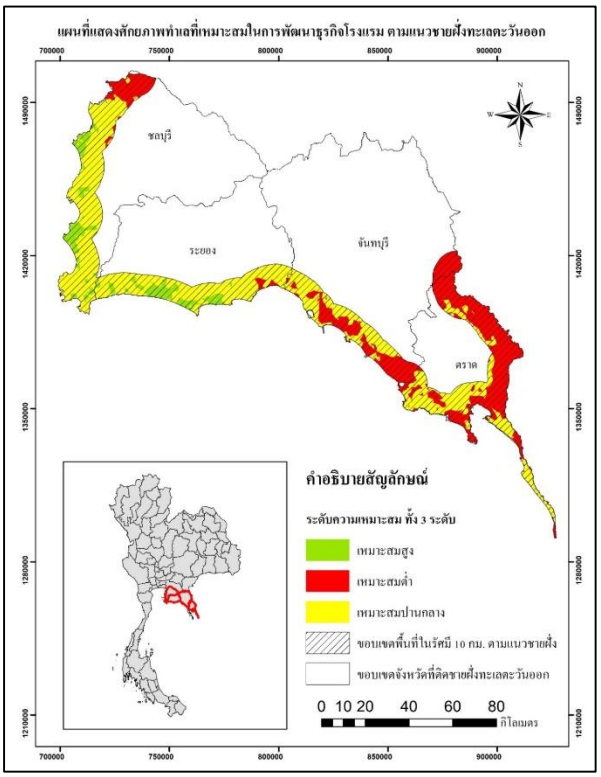
ด้านการเข้าถึงสิ่งอำนวยความสะดวก			
ระยะห่างจากร้านสะดวกซื้อ	6	ระยะห่าง < 1 กม. ระยะห่าง > 2 - แต่ไม่เกิน 5 กม. ระยะห่าง > 5 กม.	3 2 1
ระยะห่างจากห้างสรรพสินค้าและศูนย์การค้า	4	ระยะห่าง < 1 กม. ระยะห่าง > 2 - แต่ไม่เกิน 5 กม. ระยะห่าง > 5 กม.	3 2 1
ระยะห่างจากโรงพยาบาล	2	ระยะห่าง < 1 กม. ระยะห่าง > 2 - แต่ไม่เกิน 5 กม. ระยะห่าง > 5 กม.	3 2 1
ด้านภัยพิบัติและอาชญากรรม			
พื้นที่เสี่ยงอุทกภัย	8	นอกเขตพื้นที่เสี่ยงภัย ในเขตพื้นที่เสี่ยงภัย	2 1
พื้นที่เสี่ยงฝนตกหนัก	6	นอกเขตพื้นที่เสี่ยงภัย ในเขตพื้นที่เสี่ยงภัย	2 1
ระยะห่างจากสถานีตำรวจ	4	ระยะห่าง < 1 กม. ระยะห่าง > 2 - แต่ไม่เกิน 5 กม. ระยะห่าง > 5 กม.	3 2 1
ความหนาแน่นของชุมชน	2	> 129 คน/ตร.กม. 100 - 129 คน/ตร.กม. 70 - 99 คน/ตร.กม. <70 คน/ตร.กม.	4 3 2 1

3.1.2 ผลการประเมินศักยภาพทำเลที่เหมาะสมของธุรกิจโรงแรม

จากการนำเข้าข้อมูลเชิงพื้นที่ของปัจจัยต่าง ๆ ตามเกณฑ์การประเมินศักยภาพทำเลที่เหมาะสมของธุรกิจโรงแรมจากแบบจำลอง PSA และทำการประยุกต์ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ เพื่อวิเคราะห์และจัดสร้างข้อมูลเชิงพื้นที่โดยเทคนิคการซ้อนทับ (Overlay Analysis) โดยจำแนกระดับความเหมาะสมของศักยภาพทำเล ออกเป็น 3 ระดับ ได้แก่ พื้นที่ที่มีศักยภาพทำเลเหมาะสมสูง พื้นที่ที่มีศักยภาพทำเลเหมาะสมปานกลาง และพื้นที่ที่มีศักยภาพทำเลเหมาะสมต่ำ พบว่าพื้นที่ที่มีศักยภาพทำเลเหมาะสมสูง มีพื้นที่ 353.89 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 7.53 ของพื้นที่ทั้งหมด พื้นที่ที่มีศักยภาพทำเลเหมาะสมปานกลาง มีพื้นที่ 2,731.95 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 58.12 ของพื้นที่ทั้งหมด และพื้นที่ที่มีศักยภาพทำเลเหมาะสมต่ำ มีพื้นที่ 1,614.31 ตารางกิโลเมตรคิดเป็นร้อยละ 34.35 ของพื้นที่ทั้งหมด ดังแสดงในตารางที่ 3และรูปที่ 1

ตารางที่ 3 ศักยภาพทำเลที่เหมาะสมของธุรกิจโรงแรม

ระดับความเหมาะสม	พื้นที่ (ตารางกิโลเมตร)	ร้อยละ
เหมาะสมสูง	353.89	7.53
เหมาะสมปานกลาง	2,731.95	58.12
เหมาะสมต่ำ	1,614.31	34.35
รวม	4,700.15	100.00



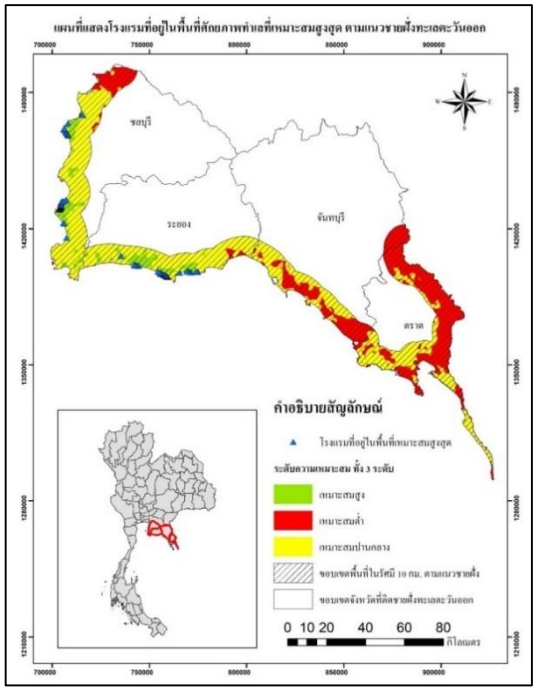
รูปที่ 1 แผนที่ศักยภาพทำเลที่เหมาะสมของธุรกิจโรงแรมในพื้นที่ศึกษา

3.1.3 ผลการประเมินศักยภาพทำเลของตำแหน่งโรงแรมในพื้นที่ศึกษา

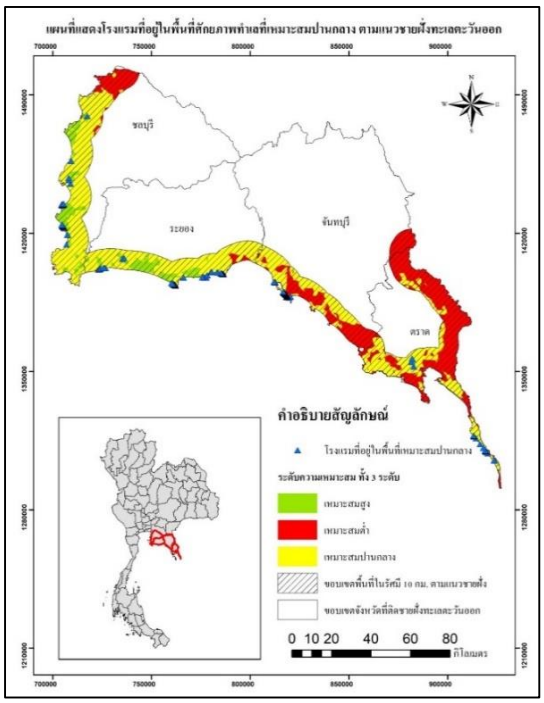
จากผลการสำรวจภาคสนามในการเก็บข้อมูลตำแหน่งโรงแรมในพื้นที่ศึกษา พบว่ามีจำนวนโรงแรมทั้งหมด 257 โรงแรม เมื่อนำข้อมูลมาทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการซ้อนทับข้อมูล (Overlaying) กับข้อมูลพื้นที่ศักยภาพทำเลที่เหมาะสมของธุรกิจโรงแรมทำให้ทราบถึงศักยภาพทำเลที่เหมาะสมของตำแหน่งโรงแรมในพื้นที่ศึกษา ดังนี้

โรงแรมที่ถูกประเมินอยู่ในพื้นที่ศักยภาพทำเลที่เหมาะสมระดับสูงมีจำนวน 99 โรงแรม โดยเป็นโรงแรมที่อยู่ในจังหวัดชลบุรีจำนวน 58 โรงแรม จังหวัดระยองจำนวน 41 โรงแรม ส่วนจังหวัดจันทบุรีและจังหวัดตราดไม่มีโรงแรมที่ถูกประเมินอยู่ในพื้นที่ที่อยู่ในศักยภาพทำเลที่เหมาะสมสูง ทั้งนี้เนื่องจากปัจจัยด้านแหล่งท่องเที่ยวซึ่งเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญมากที่สุดในจังหวัดตราดส่วนใหญ่จะเป็นพื้นที่เกาะต่าง ๆ ซึ่งอยู่นอกเขตพื้นที่ศึกษาของงานวิจัยนี้ (รูปที่ 2 – 4)

โรงแรมที่ถูกประเมินอยู่ในพื้นที่ศักยภาพทำเลที่เหมาะสมระดับปานกลางมีทั้งหมด 154 โรงแรม โดยเป็นโรงแรมในจังหวัดชลบุรีจำนวน 32 โรงแรม จังหวัดระยองจำนวน 47 โรงแรม จังหวัดจันทบุรีจำนวน 57 โรงแรม และจังหวัดตราดจำนวน 18 โรงแรม (รูปที่ 3)



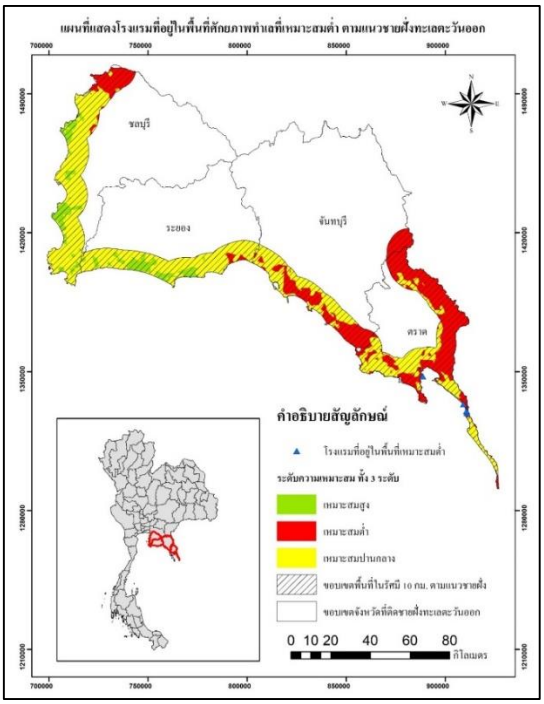
รูปที่ 2 แผนที่ตำแหน่งโรงแรมที่อยู่ในพื้นที่ศักยภาพทำเลที่เหมาะสมระดับสูงของพื้นที่ศึกษา



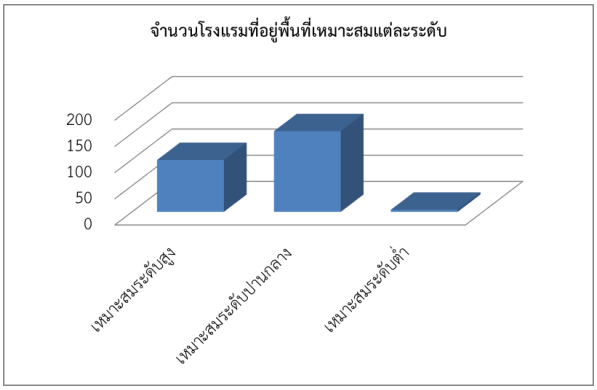
รูปที่ 3 แผนที่ตำแหน่งโรงแรมที่อยู่ในพื้นที่ศักยภาพทำเลที่เหมาะสมระดับปานกลางของพื้นที่ศึกษา

โรงแรมที่ถูกประเมินอยู่ในพื้นที่ศักยภาพทำเลที่เหมาะสมระดับต่ำมีทั้งหมด 4 โรงแรม โดยเป็นโรงแรมที่อยู่ในจังหวัดตราดทั้งหมดจำนวน 4 โรงแรม ส่วนจังหวัดชลบุรี จังหวัดระยอง และจังหวัดจันทบุรีไม่มีพื้นที่ที่อยู่ในศักยภาพทำเลที่เหมาะต่ำ (รูปที่ 4)

โดยภาพรวมตำแหน่งโรงแรมที่ถูกประเมินอยู่ในพื้นที่ศักยภาพทำเลที่เหมาะสมแต่ละระดับ พบว่า โรงแรมที่อยู่ในพื้นที่เหมาะสมระดับสูง มีจำนวน 99 โรงแรม โรงแรมที่อยู่ในพื้นที่เหมาะสมระดับปานกลางมีจำนวน 154 โรงแรม และโรงแรมที่อยู่ในพื้นที่เหมาะสมระดับต่ำมีจำนวน 4 โรงแรม ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 4 แผนที่ตำแหน่งโรงแรมที่อยู่ในพื้นที่ศักยภาพทำเลที่เหมาะสมระดับต่ำของพื้นที่ศึกษา



รูปที่ 5 จำนวนโรงแรมที่อยู่ในพื้นที่เหมาะสมแต่ละระดับ

3.2 อภิปราย

จากผลการประเมินเขตศักยภาพทำเลที่เหมาะสมของธุรกิจโรงแรม พบว่า เขตศักยภาพทำเลที่เหมาะสมสูงจะอยู่ในเขตพื้นที่ที่ใกล้กับเส้นทางคมนาคมที่สามารถเดินทางได้สะดวก ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยของ [5] และเป็นบริเวณที่สามารถเดินทางไปเที่ยวยังแหล่งท่องเที่ยวทางธรรมชาติได้สะดวก ซึ่งจะแตกต่างจากผลการศึกษาของ [6] ที่พบว่าทำเลที่เหมาะสมสูงต่อการพัฒนาที่อยู่อาศัยจะอยู่ในเขตพื้นที่ที่ใกล้กับแหล่งอำนวยความสะดวก และถนนสายหลัก นอกจากนี้จากงานวิจัยของ [11] ได้มีการนำเทคนิคการวิเคราะห์ค่าถ่วงน้ำหนักด้วยการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น (AHP) จากผู้เชี่ยวชาญในสาขาที่เกี่ยวข้อง และนำเข้าข้อมูลปัจจัยเชิงพื้นที่ในระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ (GIS) เพื่อวิเคราะห์ทำเลที่เหมาะสมสำหรับจัดตั้งอุตสาหกรรมในรัฐอุตตราขัณฑ์ ประเทศอินเดีย โดยผลการวิจัยได้แบ่งพื้นที่เหมาะสมออกเป็น 4 ระดับ ได้แก่ พื้นที่เหมาะสมมาก ปานกลาง น้อย และพื้นที่ไม่เหมาะสมและยังระบุได้ว่า AHP เป็นเครื่องมือที่เหมาะสมและเชื่อถือได้ในการตัดสินใจวางแผนและจัดการการใช้ประโยชน์ที่ดิน

4. บทสรุป

จากผลการวิเคราะห์ศักยภาพทำเลที่เหมาะสมของตำแหน่งโรงแรมบริเวณชายฝั่งทะเลตะวันออกของประเทศไทย ทำให้ทราบว่าปัจจัยที่มีผลต่อทำเลที่ตั้งธุรกิจโรงแรมมากที่สุดคือปัจจัยด้านการเข้าถึงแหล่งท่องเที่ยว เนื่องจากพื้นที่ศึกษาอยู่ในเขตชายฝั่งทะเลตะวันออกและเป็นแหล่งท่องเที่ยวทางธรรมชาติที่สำคัญ ทำให้ผู้ประกอบการให้ความสำคัญกับปัจจัยนี้มากที่สุด และลูกค้าที่มาพักส่วนใหญ่มีวัตถุประสงค์เพื่อมาพักผ่อนควบคู่กับการท่องเที่ยวเป็นหลัก ดังนั้นผู้ประกอบการที่อยู่ในศักยภาพทำเลที่เหมาะสมระดับต่ำจึงควรส่งเสริมให้มีการจัดกิจกรรมนันทนาการต่าง ๆ บริการให้กับนักท่องเที่ยวที่มาพัก หรือการทำความร่วมมือกับผู้ประกอบการแหล่งท่องเที่ยวเพื่อจัดโปรโมชั่นในการเข้าพักและควรมีการนำเทคโนโลยีต่าง ๆ เข้ามาช่วยบริหารจัดการเพื่อให้มีการเข้าถึงได้ง่ายมากขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ คณะวิจัยขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Tourism authority of Thailand. Annual report 2017. Available from: https://www.tat.or.th/th/About - tat/annual - report [Accessed 8th April 2017]. Thai.

[2] Surinwarangkul T. Analysis for guidelines for the development of information technology applications for hotel and tourism business. Suan Sunandha Rajabhat University; 2011. Thai.

[3] Ativitavas P, Thongsukplang S. Potential surface analysis (PSA) for urban development in Samutsakorn, Nakornpathom, Samutsongkram, Petchaburi and Huahin, Prajuabkirikhan. Journal of Architectural Planning Research and Studies. 2006; (4): 37-50 Available from: https://so02.tci-thaijo.org/[Accessed 17th December 2018]. Thai.index.php/jars/article/view/169178/121706

[4] Office of the national economic and social development board. National Economic and Social Development Plan 12th edition B.E. 2560 – 2564, The Government Gazette, Volume 133, Chapter 115a; 2016. Thai.

[5] Sukpromsun B. Potential surface analysis for urban expansion around University of Phayao. The Science and Technology Journal. 2015; 23(3): 432-445. Available from: https://li01.tci-thaijo.org/index.php/tstj/article/view/33485/28395 [Accessed 17th December 2018]. Thai.

[6] Buchain R, Jarinto K. Application of geoinformation technology for planning site Selection of housing in real estate in amphoe Mueang Chon Buri, Chon Buri Province. Science and Technology Journal Ubon Ratchathani University. 2018; 20(2): 14-27. Available from: https:// li01.tci - thaijo.org/ index.php/ sci_ubu/ issue/view/13780 [Accessed 24th August 2018]. Thai.

[7] Buchain R, Charoenjit K. The impact of climate variability on hotels business in eastern coast of Thailand using integrating of geo- informatics and natural disasters model. Burapha Science Journal. 2018; 23(3): 1409-1425 Available from: http: / / science. buu. ac. th/ ojs246/ index. php/ sci/ Issue/ view/ 94/ showToc [Accessed 15th December 2018]. Thai.

[8] Ministry of tourism and sports. Thai tourism standards, accommodation standards for tourism, 5-star hotel category. Available from: https//thaits.org/tts_pr/wp - content/uploads/ 2016/09/Travel - hotel standards 1-4 star.pdf. [Accessed 16th April 2017]. Thai.

[9] Buchain R, Jarinto K. The factors used in real estate organization planning for site selection of new housing project. Panyapiwat Journal. 2016; 8(2): 1-10. Available from: https://journal. pim.ac.th/th/news/24/Panyapiwat Journal-Vol-8-Issue -2.html. [Accessed 14th July 2017]. Thai.

[10] Defence technology institute. Analysis hierarchical process. Available from: http://dti.or.th/download/150319174753_3ah p4.pdf [Accessed 8th April 2019]. Thai.

[11] Ramya S and Devadas V. Integration of GIS, AHP and TOPSIS in evaluating suitable locations for industrial development: A case of Tehri Garhwal district, Uttarakhand, India. Journal of cleaner production. 2019; 238 Abstract Availablefrom: https://www. sciencedirect./com/science/article/abs/pii/ S0959652619327428?via%3Dihub [Accessed 16th October 2020].

