

วารสารวิชาการคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
Industrial Technology
Lampang Rajabhat University Journal

วารสารกลุ่มที่ 1 ฐานข้อมูล TCI
ค่า Thai-Journal Impact Factors (T-JTF)
ปี 2559 : 0.238

ปีที่ 10 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม 2560 – ธันวาคม 2560
ISSN 1906-5337

Industrial Technology
www.lpru.ac.in

**คณะกรรมการและกองบรรณาธิการ วารสารวิชาการ
คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพปาก**

เจ้าของ ที่ปรึกษา	คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพปาก อธิการบดี รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ คณบดี คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
บรรณาธิการ ผู้ช่วยบรรณาธิการ	ผู้ช่วยศาสตราจารย์พงษ์สวัสดิ์ อานาจกิติกร ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติศักดิ์ สมุทรารักษ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธิดิมา คุณยศยิ่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิเชษฐ ยี่มะมัย

กองบรรณาธิการ : (ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก Peer Review)

ศ.เกียรติคุณ เสริมศักดิ์	นาคบัว	มหาวิทยาลัยศิลปากร	รศ. สุวิข	บุตรสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ศ.ดร. ก้องกิติ	พสุสวัสดิ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	รศ. อายุวัฒน์	สว่างผล	มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร
ศ.ดร. ตรีนท	เหล่าศิริพงษ์ทอง	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์	ผศ.ดร. จิรพัฒน์	วณิชวัฒนาโกศล	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศ.ดร. ทนงเกียรติ	เกียรติศิริโรจน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	ผศ.ดร. นิพนธ์	เกตุจ้อย	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ศ.ดร. ธนารักษ์	ธีระมันคง	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์	ผศ.ดร. นิวัตร	พัฒนะ	มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม
ศ.ดร. ปริญญา	จินดาประเสริฐ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	ผศ.ดร. บุญล้ำ	สุนทร	มหาวิทยาลัยราชภัฏ
ศ.ดร. ผดุงศักดิ์	รัตนเดโช	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์			พระนครศรีอยุธยา
ศ.ดร. สุพล	อนันดา	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	ผศ.ดร. ศศิธร	คนทน	มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร
ศ.ดร. อภิรัฐ	ศิริธราวัตร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	ผศ.ดร. ศักดิพล	เทียนเสมอ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รศ.ดร. กวิน	สนธิเพิ่มพูน	มหาวิทยาลัยนเรศวร	ผศ.ดร. สมชาย	มนีวรรณ	มหาวิทยาลัยนเรศวร
รศ.ดร. ชิตชัย	อนันตเศรษฐ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	ผศ.ดร. สุธี	วัฒนศิริเวช	มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง
รศ.ดร. ชวงโชติ	พันธุ์เวช	มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา	ผศ.ดร. อชิตพล	ศศิธรานันต์	มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ
รศ.ดร. ดรณี	วัฒนศิริเวช	มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง	ผศ.ดร. อภิชาติ	แจ้งบำรุง	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร. ถาวร	สารวิทย์	มหาวิทยาลัยนเรศวร	ผศ. ภูพงษ์	พงษ์เจริญ	มหาวิทยาลัยนเรศวร
รศ.ดร. ธีรศิลป์	ทุมวิภาต	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า	ดร. ณัฐพร	จักรวิเชียร	มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่
รศ.ดร. นภดล	อุษายภิชาติ	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์			
รศ.ดร. ปรงศักดิ์	อัมพพ	มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา	กองบรรณาธิการ : (ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน)		
รศ.ดร. พิระวุฒิ	สุวรรณจันทร์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า	ศ. จำเียร	นันทดิลก	
รศ.ดร. พงศ์	หรรดา	มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร	รศ. นันทะ	บุตรน้อย	
รศ.ดร. มนตรี	ศิริปรัชญานันท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ	ผศ.ดร. กิตติศักดิ์	สมุทรารักษ์	
รศ.ดร. วัฒนพงศ์	รักษวิเชียร	มหาวิทยาลัยพะเยา	ผศ.ดร. อนิรุจน์	มะโนธรรม	
รศ.ดร. วัฒนวงศ์	รัตนวราห์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	ผศ. พงษ์สวัสดิ์	อานาจกิติกร	
รศ.ดร. วิชัย	แหวนเพชร	มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร	Mr. James	Fairhead	
รศ.ดร. เอกรัฐ	บุญเชียง	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่			
รศ. นิลวัฒน์	พัฒนพงษ์	มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพปาก	ฝ่ายสนับสนุนการดำเนินการจัดทำวารสาร		
รศ. บุญชัด	เนติศักดิ์	มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพปาก	ผศ. ธิติมา	คุณยศยิ่ง	ฝ่ายประสานงานทั่วไป
รศ. ยืน	ภูววรรณ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	ผศ. วิเชษฐ	ยี่มะมัย	ฝ่ายออกแบบงานศิลป์
รศ. วิชัย	พลฤทธาธิกุล	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	ผศ.ดร. วศินวิโรจน์	เนติศักดิ์	ฝ่ายออกแบบงานศิลป์
รศ. วิชัย	ฤกษ์ภูริทัต	มหาวิทยาลัยนเรศวร	ผศ. นราธิป	วงศ์ปิ่น	ฝ่ายวารสารออนไลน์
รศ. สมชาย	ชินวัฒนาประณี	มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี	นาง วรัญญา	ดวงแก้ว	ฝ่ายธุรการและการเงิน
รศ. สมพงษ์	บุญเลิศ	มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่	นางสาว กมลชนก	ธนาแก้ว	ฝ่ายจัดเตรียมต้นฉบับ
รศ. สายัณห์	จันทร์วิรัช	มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี			
รศ. สุมาลี	อุณหวนิชย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี			

วัตถุประสงค์ : เพื่อเผยแพร่และประชาสัมพันธ์ผลงานวิชาการ ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม โดยทำการตีพิมพ์บทความวิจัยและบทความวิชาการทั่วไป สิ่งประดิษฐ์และนวัตกรรม สาขาวิชาเทคโนโลยี วิศวกรรมศาสตร์ และสหวิทยาการด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

กำหนดออกวารสาร : ปีละ 2 ฉบับ คือ ฉบับที่ 1 ระหว่างเดือน มกราคม – มิถุนายน และ ฉบับที่ 2 ระหว่างเดือน กรกฎาคม – ธันวาคม

เว็บไซต์วารสาร : <http://www.journal.itech.lpru.ac.th>

I-TECH JOURNAL LPRU

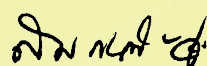


Industrial Technology
www.i-techjournal.com

สารจาก อธิการบดีมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง

ด้วยความมุ่งมั่นและความตั้งใจของคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง ในการดำเนินการจัดทำวารสารวิชาการ เพื่อเผยแพร่และประชาสัมพันธ์ผลงานวิชาการด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ด้วยการตีพิมพ์บทความวิจัยและบทความวิชาการทั่วไป สิ่งประดิษฐ์และนวัตกรรม สาขาวิชาเทคโนโลยี วิศวกรรมศาสตร์ และสหวิทยาการด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และได้รับการรับรองคุณภาพ จากศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (TCI) (กลุ่มที่ 1) สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ประจำปี 2558 - 2562 และมีค่า Thai-Journal Impact Factors (T-JTF) ปี 2559 : 0.238 แสดงถึงมาตรฐานและคุณภาพของวารสารวิชาการ รวมทั้งมีการสร้างเครือข่ายความร่วมมือทางวิชาการในระดับอุดมศึกษา ในการพัฒนาวารสารวิชาการให้เข้มแข็งและเป็นการสนับสนุนการเผยแพร่ผลงานวิชาการ เพื่อพัฒนาองค์ความรู้ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ที่บูรณาการเข้ากับวิถีภูมิปัญญาท้องถิ่นและเป็นการสร้างสรรค์ผลงานใหม่เพื่อพัฒนาองค์ความรู้ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม อันก่อให้เกิดประโยชน์ต่อการพัฒนาประเทศต่อไป อย่างยั่งยืน

ในโอกาสนี้ ขออวยพรให้วารสารเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ของคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง ประสบความสำเร็จและก้าวเข้าสู่ปีที่ 11 อย่างเต็มภาคภูมิ เพื่อผลิตผลงานคุณภาพเช่นนี้ต่อไป

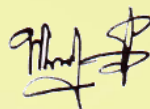


รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ สายธนู
อธิการบดี มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง

สารจาก บรรณาธิการ

การจัดทำวารสารวิชาการคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง ปีที่ 10 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม 2560 – ธันวาคม 2560 มีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่ และประชาสัมพันธ์ ผลงานวิชาการด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และผลการดำเนินงานของคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง ซึ่งได้ดำเนินการอย่างต่อเนื่อง จนเข้าสู่ปีที่ 11 ได้รับการรับรองคุณภาพ จากศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (TCI) (กลุ่มที่ 1) สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ประจำปี 2558 - 2562 และมีค่า Thai-Journal Impact Factors (T-JTF) ปี 2559 : 0.238 ด้วยความตั้งใจ และทุ่มเทของคณะทำงาน ในการพัฒนาคุณภาพวารสารวิชาการตามมาตรฐานวารสารวิชาการ ระดับชาติ

จากผลการดำเนินการของวารสารวิชาการคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง ตลอดระยะเวลา 10 ปี ที่เป็นสื่อกลางในการตีพิมพ์ เผยแพร่บทความวิชาการ และผลงานวิจัย ของนักวิชาการ คณาจารย์และนักวิจัย ในศาสตร์ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีจนเป็นที่รู้จัก และยอมรับ ในวงวิชาการด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี รวมทั้งมีการสร้างเครือข่ายความร่วมมือ ทางวิชาการในระดับมหาวิทยาลัย ในการพัฒนาวารสารวิชาการให้เข้มแข็ง ทำให้คณะทำงาน มีกำลังใจ ในการพัฒนาคุณภาพวารสารวิชาการให้ดียิ่งขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้เกิดประโยชน์ต่อการ พัฒนาเทคโนโลยีของประเทศไทยให้ดียิ่งขึ้นและยั่งยืนต่อไป



ผู้ช่วยศาสตราจารย์พงษ์สวัสดิ์ อำนางจิตติกร

บรรณาธิการ วารสารวิชาการ

คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง

สารบัญ

สารจากอธิการบดี

สารจากบรรณาธิการ

หน้า

การปรับเปลี่ยนวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยการจำลองการอบเหนียว เพื่อแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดโดยพิจารณาถึงขีดจำกัด อัตราการเปลี่ยนแปลงและช่วงเวลาต้องห้าม จิรพนธ์ ทาแกง, วันไชย คำเสน และอภิรักษ์ อูรโสภณ	1
การปรับปรุงคุณภาพน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสพลาสติกพอลิพรอพิลีน เป็นเชื้อเพลิงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซิลิกาอสัณฐานที่ทำการสกัดได้จากกลบข้าว จิรพัฒน์พงษ์ เสนาบุตร, อมรรัตน์ ปิ่นชัยมูล และกนกพงษ์ ศรีเที่ยง	12
การพัฒนาแบบจำลองแบบต่อเนื่องเพื่อวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการลงทุน โครงสร้างพื้นฐานด้านการขนส่งในมหาวิทยาลัย เจษฎา โพธิ์จันทร์, วชิระ วิจิตรพงษา, จุมพฏ พงศ์ศักดิ์ศรี และเอกภูมิ บุญธรรม	24
ความยาวท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสมสำหรับระบบเก็บกัก ความร้อนแบบเปลี่ยนสถานะ ธันวมาส กาศสนุก, ดามร บัณทุรัตน์ และคงเดช พะสีนาม	38
การจัดเส้นทางขนส่งน้ำดื่มโดยใช้การโปรแกรมเชิงเส้น กรณีศึกษา ห้างหุ้นส่วนจำกัด รัศมี 2015 เพชรายุทธ แซ่หลี่, วชิระ วิจิตรพงษา และหทัยธนก พวงแย้ม	48
การพัฒนาส่วนผสมของเนื้อดินปั้นโดยใช้แหล่งดินบ้านหนองหัวยาง เพื่อทำผลิตภัณฑ์สโตนแวร์ เพียรพิน ก่อวุฒิพงศ์	60
การประยุกต์ใช้ชุดอุปกรณ์เติมแก๊สออกซิเจนหัวเผาเวเนจูรี ในเตาเผาผลิตภัณฑ์เซรามิก ยุทธพงษ์ นาคโสภณ	75
การศึกษาอัตราส่วนของดินบ้านหัวฝายกับดินเชื้อที่เหมาะสมกับการขึ้นรูป ผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผา วีระ เนตราทิพย์	85
การพัฒนาประสิทธิภาพเตาเผาถ่านกัมมันต์ จากกะลามะพร้าว อนุสรณ์ สิ้นสะอาด	95

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
การบูรณาการประยุกต์ใช้ RFID (Radio Frequency Identification) และ IoT (Internet of thing) ผ่านระบบคลาวด์ (Cloud Computing) สำหรับการจัดการโลจิสติกส์ โอฬาร เชี่ยวชาญ และอนุกิจ เสาร์แก้ว	109
ภาคผนวก	120
ข้อกำหนดมาตรฐานวารสารวิชาการ	121
รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิตรวจประเมิน	130

การปรับเปลี่ยนวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยการจำลองการอบเหนียว
เพื่อแก้ปัญหการจ่ายโหลดอย่างประหยัดโดยพิจารณาถึงขีดจำกัด
อัตราการเปลี่ยนแปลงและช่วงเวลาต้องห้าม

Modification of Simulated Melting That is Optimized in Order
to Solve the Economic Dispatch Problem Including the Ramp
Rate Limit and The Prohibited Operating Zone

จิรพันธ์ ทาแกง^{1*}, วันไชย คำแสน² และอภินันท์ อรุโสม³

^{1,2}สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ลำปาง

200 หมู่ 17 ต.พิชัย อ.เมือง จ.ลำปาง โทรศัพท์: 054342547 ต่อ 160 E-mail: su0008@hotmail.com, wanchai_kh@rmutl.ac.th

³สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม มหาสารคาม

41/20 ตำบลขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150 โทรศัพท์ 043-754333 E-mail: aurasopon@yahoo.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการแก้ปัญหการจ่ายโหลดอย่างประหยัดที่มีฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงเป็นแบบเรียบ โดยการปรับเปลี่ยนรูปแบบอัลกอริทึมของวิธีการจำลองการอบเหนียว (SA) โดยใช้หลักการเท่ากันของต้นทุนการผลิต (incremental cost: λ) เข้าไปแทนขั้นตอนของการสุ่มหาค่าเริ่มต้นและใช้หลักการ SA ในการดำเนินการหาค่าต่อไป โดยพิจารณาความต้องการของระบบไฟฟ้า ค่าสูญเสียในสายส่ง และเงื่อนไขข้อบังคับต่าง ๆ ของระบบการจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB และทดสอบกับกรณีศึกษาที่ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 6 หน่วย และได้ทดสอบเพื่อประเมินประสิทธิภาพของวิธีการที่นำเสนอกับวิธี GA, PSO และวิธี BCO จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าวิธีการที่นำเสนอมีวิธีการแก้ปัญหาที่ถูกต้อง และมีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาด้านคุณภาพของคำตอบ คุณลักษณะของการลู่เข้า และการคำนวณที่มีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: การจำลองการอบเหนียว, การจ่ายโหลดอย่างประหยัด, แลมด้า

Abstract

This article presents the most cost-effective method to solve the economical load/dispatch problem with a smooth cost function by modifying the SA simulation algorithms using the same principle of incremental cost (λ) instead of initial randomization. In consideration of the needs of the electrical system, the loss in the transmission line and the MATLAB simulated conditions and test cases with a 6-unit generator and tested to evaluate the performance of the GA, PSO and BCO methods. This paper offers an accurate solution to the problems of quality, convergence characteristics, and efficient calculations.

Keywords: Simulated melting, Economic dispatch, Lamda

1. บทนำ

การผลิตพลังงานไฟฟ้าเพื่อให้มีเสถียรภาพและความน่าเชื่อถือเป็นสิ่งสำคัญ ในขณะที่ความต้องการพลังงานไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและการใช้พลังงานไฟฟ้าในช่วงเวลาต่าง ๆ มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ซึ่งจะนำมาด้วยปัญหาในการวางแผนการผลิตไฟฟ้า และสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาในการผลิตพลังงานไฟฟ้าคือค่าใช้จ่ายในการผลิตพลังงานไฟฟ้า ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องจัดสรรกำลังการผลิตพลังงานไฟฟ้าให้กับเครื่องกำเนิดแต่ละเครื่องโดยที่ให้ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าโดยรวมน้อยที่สุดเพียงพอกับความต้องการ และอยู่บนข้อจำกัด ข้อบังคับของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ปัญหานี้คือการจ่ายโหลดอย่างประหยัด (Economic Dispatch:ED)

การจ่ายโหลดอย่างประหยัด คือการพิจารณาความสามารถของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในการผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยให้ค่าใช้จ่ายราคาเชื้อเพลิงในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ำที่สุด มีหลายวิธีในการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด โดยสามารถแยกออกได้เป็น 2 วิธี วิธีแรกคือวิธีเชิงตัวเลข เช่น การทำซ้ำแบบแลมด้า (Lambda Iteration) เป็นวิธีอาศัยหลักการเท่ากันของต้นทุน ที่เพิ่มขึ้น (Incremental Cost) วิธีเกรเดียน (Gradient Method) เป็นวิธีที่อาศัยความลาดชันในการหาคำตอบ วิธีนิวตัน (Newton's Method) เป็นการคำนวณคำตอบด้วยการประมาณของอนุกรมเทเลอร์ วิธีการประยุกต์ใช้ฟังก์ชันส่วนของเส้นตรง (Piecewise Function) แต่วิธีเหล่านี้เป็นเพียงการหาค้นหาคำตอบเฉพาะถิ่น (local search) วิธีที่สอง คือเทคนิคใหม่ ๆ เช่นการจำลองการอบเหนียวของโลหะ (SA: Ismail Ziane, Farid Benhamida, Yacine Salhi and AmelGraa, 2015) การค้นหาแบบตาปู (TS: Bakhta Naama, Hamid Bouzeboudja, Ahmed Allali, 2013) วิธีการทางพันธุกรรม (GA: N. Javidtash, A. Davodi, M. Hakimzadeh and A. Roozb, 2014) วิธีฝูงมด (ACO: Pirmahamad Jamalbhai Vasoala, Chinmay Y. Jani, Vasim H. Ghanchi and Parth Harshad Kumar, 2014) วิธีอนุภาค (PSO: K. Srikanth and V. HariVamsi, 2016) วิธีแบบฝูงผึ้ง (BCO: Dinu Calin Secui, 2015), (Takeang C. and Khamsan W., 2016) วิธีการเหล่านี้เป็นวิธีการที่ทันสมัยในการแก้ปัญหา ED ซึ่งสามารถค้นหาคำตอบที่เป็น global แต่อย่างไรก็ตามวิธีการเหล่านี้เป็นการค้นหาคำตอบแบบสุ่ม ต้องใช้เวลานานในการค้นหาคำตอบ ปัญหานี้มีการคิดค้นวิธีการเพิ่มความเร็วในการค้นหาคำตอบนั้นคือการผสมผสานวิธีแลมด้าและวิธีฝูงผึ้ง (HLBCO: Wanchai KHAMSEN, Chiraphon TAKEANG, 2016) โดยการกำหนดค่าเริ่มต้นของการค้นหาด้วยแลมด้า และใช้ความสามารถของวิธีฝูงผึ้งในการค้นหาคำตอบ แต่วิธีการนี้มีโอกาสที่คำตอบจะติดอยู่ที่ local เนื่องจากในการวนรอบหาคำตอบอาจจะอยู่ในจุดเดิม วิธีการจำลองการอบเหนียว (SA) เป็นวิธีการปรับปรุงคำตอบเฉพาะที่ เมื่อเกิดคำตอบที่ดีกว่าคำตอบเฉพาะที่ จะยอมรับคำตอบปัจจุบันเป็นคำตอบใหม่ กระบวนการเข้าสู่คำตอบที่ดี เป็นไปอย่างรวดเร็ว แต่อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ก็ยังคงเริ่มต้นด้วยการสุ่มค่าเริ่มต้น และอาจทำให้เกิดการลดยุณหภูมิที่เร็วเกินไปทำให้ได้คำตอบเฉพาะที่

บทความนี้นำเสนอการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดด้วยการกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับวิธีการ SA โดยลดขั้นตอนของการสุ่มหาคำตอบและกำหนดค่าเริ่มต้นด้วยวิธีการทำซ้ำแบบแลมด้า จากนั้นจึงใช้ขั้นตอนของวิธีการอบเหนียวในการหาคำตอบโดยเริ่มจากค่าแลมด้าที่คำนวณได้โดยพิจารณาถึงฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานความร้อนที่มีสมการ

ทางคณิตศาสตร์ของต้นทุนการผลิตที่เป็นแบบเรียบ รวมทั้งข้อจำกัดการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า การทดสอบได้จำลองการทำงานบนโปรแกรม MATLAB กรณีศึกษาใช้ระบบที่ประกอบด้วยเครื่องกำเนิด 6 หน่วย

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

2.1 เพื่อปรับปรุงกระบวนการของ SA อัลกอริทึมให้มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด

2.2 เพื่อแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดโดยพิจารณาถึงขีดจำกัดอัตราการเปลี่ยนแปลงและช่วงเวลาต้องห้าม

3. ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด

การจ่ายโหลดอย่างประหยัดแบบสแตติก เป็นการวางแผนการผลิตกำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ณ เวลาใดเวลาหนึ่งเท่านั้น ว่าเครื่องกำเนิดแต่ละเครื่องควรผลิตกำลังไฟฟ้าเท่าไรที่ใช้ต้นทุนการผลิตน้อยที่สุด และสอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับต่าง ๆ ของระบบ ซึ่งฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective Function; All J. Wood and Bruce F. Wollenberg, 1996) ดังสมการที่ (1)

$$\text{Minimize : } TC = \sum_{i=1}^N F_i(P_i) \quad (1)$$

โดยที่ TC คือ ต้นทุนรวมในการผลิตกำลังไฟฟ้า
 i คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ i
 N คือ จำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบทั้งหมด
 $F_i(P_i)$ คือ ต้นทุนของเชื้อเพลิงการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า i

3.1 ลักษณะของฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

โดยทั่วไปฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือสมการทางคณิตศาสตร์ของต้นทุนการผลิตที่เป็นแบบเรียบ (Smooth Cost) และสมการทางคณิตศาสตร์ของต้นทุนการผลิตที่เป็นแบบไม่เรียบ (Non-Smooth Cost) ในส่วนของฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเรียบ (Smooth Cost) นั้นจะมีลักษณะของฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นฟังก์ชันกำลังสอง (Single Quadratic Function; All J. Wood and Bruce F. Wollenberg, 1996) ดังสมการที่ (2)

$$F_i(P_i) = a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i \quad (2)$$

โดยที่ a , b และ c คือ สัมประสิทธิ์ราคาเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า P คือ กำลังไฟฟ้าจ่ายออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่

3.2 เงื่อนไขบังคับ (Constraint) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

1) ข้อจำกัดกำลังไฟฟ้าสมดุลของระบบ (Power Balance Constraint) คือ กำลังการผลิตไฟฟ้าทั้งหมดเท่ากับผลรวมของความต้องการปริมาณไฟฟ้า (Demand) กับกำลังสูญเสียรวมในระบบส่งจ่าย (Power Losses) ดังสมการที่ (3) และสมการที่ (4) (All J. Wood and Bruce F. Wollenberg, 1996)

$$\sum_{i=1}^N (P_i) = P_D + P_{loss} \quad (3)$$

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N P B_{ij} P_j + \sum_{j=1}^N B_{0i} P_i + B_{00} \quad (4)$$

โดยที่ P_i คือ กำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า i
 P_D คือ กำลังไฟฟ้าที่โหลดต้องการ
 P_{loss} คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง
 B_{ij} , B_{0i} และ B_{00} คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียของสายส่ง

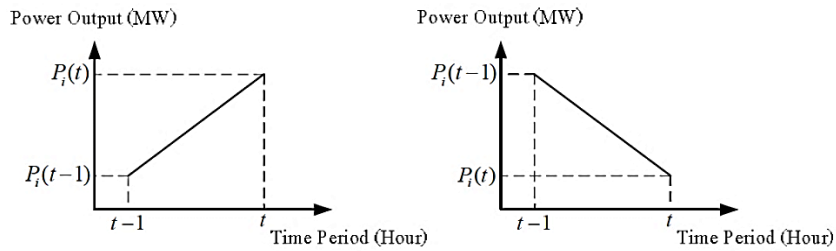
2) ข้อจำกัดพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator Rating Constraint) (All J. Wood and Bruce F. Wollenberg, 1996) คือ กำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในแต่ละเครื่องต้องอยู่ในขีดจำกัดกำลังการผลิตต่ำสุดและสูงสุดดังสมการที่ (5)

$$P_{i,min} \leq P_i \leq P_{i,max} \quad (5)$$

โดยที่ $P_{i,min}$ และ $P_{i,max}$ คือกำลังการผลิตต่ำสุดและสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า i

3) ข้อจำกัดการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Operating Limit Constraint) คือ ข้อจำกัดการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งมีการพิจารณา 2 เงื่อนไข คือ

เงื่อนไขที่ 1 ขีดจำกัดอัตราการเปลี่ยนแปลง (Ramp Rate Limit) อัตราการเปลี่ยนแปลงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่สามารถปรับได้อย่างทันทีทันใด ช่วงการผลิตกำลังไฟฟ้าจะถูกจำกัดด้วยขีดจำกัดการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้างดภาพที่ 1 แสดง 2 สภาวะ ขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตจากชั่วโมงที่ $t - 1$ ถึง t



ก) สถานะการเพิ่มกำลังการผลิต ข) สถานะการลดกำลังการผลิต

ภาพที่ 1 สถานะการเปลี่ยนแปลงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (All J. Wood and Bruce F. Wollenberg, 1996)

ดังนั้นกำลังการผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องจะอยู่ในช่วงดังสมการที่ (6)

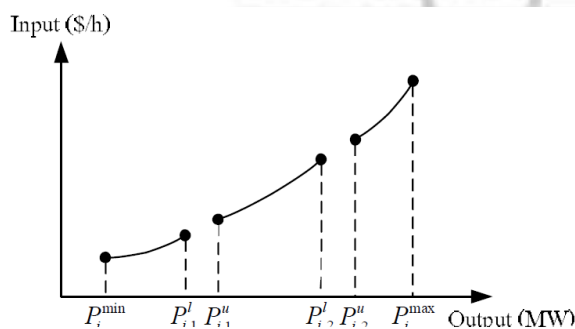
$$\max(P_{i,\min}, P_i^0 - DR_i) \leq P_i \leq \min(P_{i,\max}, P_i^0 + UR_i) \quad (6)$$

โดยที่ P_i^0 คือ กำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า i ก่อนหน้า

DR_i คือ อัตราการลดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า i

UR_i คือ อัตราการเพิ่มกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า i

เงื่อนไขที่ 2 ช่วงการทำงานต้องห้าม (Prohibited Operating Zone) สมรรถนะการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานความร้อนมีช่วงการทำงานต้องห้าม เนื่องจากวาล์วไอน้ำไม่สามารถทำงานได้ในช่วงนี้ หรือทำให้เกิดความสั่นขึ้นที่เพล่า ดังนั้นจึงควรหลีกเลี่ยงการทำงานในช่วงนี้ ช่วงการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 กราฟช่วงเวลาการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (All J. Wood and Bruce F. Wollenberg, 1996)

ดังนั้น ช่วงเวลาการทำงานของเครื่องกำเนิดดังสมการที่ (7)

$$P_i = \begin{cases} P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^l \\ P_{i,j-1}^u \leq P_i \leq P_{i,j}^l, j = 2, 3 \dots n_i \\ P_{i,n}^u \leq P_i \leq P_{i,1}^{\max} \end{cases} \quad (7)$$

4. การปรับเปลี่ยนวิธีการจำลองการอบเหนียว (Modified Simulated annealing: MSA)

วิธี Simulated Annealing หรือ SA เป็นวิธีการแก้ปัญหาเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) ที่ได้รับการพัฒนาขึ้นในปี 1983 โดย Kirkpatrick เพื่อใช้ในการแก้ปัญหาที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยกระบวนการของ SA จะเลียนแบบกระบวนการปรับโครงสร้างอะตอมของโลหะด้วยวิธีการอบเหนียวโลหะ เริ่มต้นกระบวนการโดยการให้ความร้อนและควบคุมอุณหภูมิ ใช้การปรับลดอุณหภูมิอย่างช้า ๆ เพื่อเพิ่มขนาดของผลึกและจัดเรียงตัวโครงสร้างโลหะ จนกระทั่งโลหะอยู่ในสภาวะที่เหมาะสมที่สุด วิธี SA จะมีลักษณะการทำงานที่อาศัยหลักของการค้นหาคำตอบจากคำตอบที่ใกล้เคียงกับคำตอบปัจจุบัน ซึ่ง SA เกิดจากการปรับปรุงผลของคำตอบเฉพาะที่ เมื่อเกิดคำตอบที่ดีกว่าคำตอบเฉพาะที่ จะยอมรับเป็นคำตอบใหม่ที่จะไปดำเนินการต่อไป แต่ถ้ามีคำตอบใหม่ที่คุณภาพด้อยกว่าเดิม อาจจะไม่ยอมรับคำตอบนั้น (Dinu, S., Odagescu, I., and Moise, M. 2011)

ในการปรับเปลี่ยนอัลกอริทึมของกระบวนการจำลองการอบเหนียวนี้ จะใช้วิธีการเท่ากันของต้นทุนการผลิต (incremental cost: λ) ในการคำนวณหาคำตอบเริ่มต้น และใช้หลักการของกระบวนการอบเหนียวในการหาคำตอบจากคำตอบเริ่มต้นที่ได้คำนวณไว้ โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดค่าพารามิเตอร์ให้กับอัลกอริทึม SA ดังตารางที่ 1

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณค่าคำตอบเริ่มต้นด้วยหลักการเท่ากันของต้นทุน (λ) ด้วยสมการต่อไปนี้

$$\lambda = \frac{P_D + \sum_{i=1}^m \frac{b_i}{c_i}}{\sum_{i=1}^m \frac{1}{c_i}} \quad (8)$$

นำค่า λ ที่ได้ไปคำนวณหาค่าต้นทุนการผลิต (S) โดยค่าที่ได้ต้องตอบสนองความต้องการของระบบโดยการพิจารณาเงื่อนไขของระบบ ข้อจำกัดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะต้องอยู่ในช่วงต่ำสุดและสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องที่ผลิตกระแสไฟฟ้า

ขั้นตอนที่ 3 สร้างคำตอบที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จาก λ แบบสุ่ม (S_j) และคำนวณค่าต้นทุนการผลิตเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากขั้นตอนที่ 2

ขั้นตอนที่ 4 ถ้าคำตอบใหม่ดีกว่าคำตอบเดิมก็จะดำเนินการเลือกคำตอบใหม่ แต่ถ้าหากคำตอบใหม่ด้อยกว่าคำตอบเดิม จะดำเนินการคำนวณค่าความเบี่ยงเบนของค่าใช้จ่าย $\Delta S = S_j - S_i$ และสร้างจำนวนสุ่ม จากนั้นทำการยอมรับค่าโซลูชันใหม่ (S_j) แทนค่าโซลูชันเดิม (S)

ขั้นตอนที่ 5 ดำเนินการปรับค่าอุณหภูมิในสภาวะถัดไป ($T_k = r * T_{k-1}$)

ขั้นตอนที่ 6 ดำเนินการวนซ้ำจนกระทั่งถึงเงื่อนไขการหยุดทำงาน

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์สำหรับ SA

Parameters	Values
Initial temperature	100
Final temperature	5
Cool Shed	0.83
maximum number of tries	1000
Maximum number of successes within	50

5. ผลการทดสอบ

5.1 ระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ทดสอบ

กรณีศึกษาที่ 1 ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานความร้อน 6 เครื่อง 26 บัส และสายส่ง 46 เส้น มีความต้องการกำลังไฟฟ้า 1263 MW คุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องแสดงดังตารางที่ 2 และมีค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียในสายส่งดังสมการที่ (9) สมการที่ (10) และสมการที่ (11) (S. Khamsawang and S. Jiriwibhakorn, 2009)

$$B_{ij} * 10^{-2} = \begin{bmatrix} 0.0017 & 0.0012 & 0.0007 & -0.0001 & -0.0005 & -0.0002 \\ 0.0012 & 0.0014 & 0.0009 & 0.0001 & -0.0006 & -0.0001 \\ 0.0007 & 0.0009 & 0.0031 & 0.0000 & -0.0010 & -0.0006 \\ -0.0001 & 0.0001 & 0.0000 & 0.0024 & -0.0006 & -0.0008 \\ -0.0005 & -0.0006 & -0.0010 & -0.0006 & 0.0129 & -0.0002 \\ -0.0002 & -0.0001 & -0.0006 & -0.0008 & -0.0002 & 0.0150 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$B_{oi} * 10^{-2} = [-0.391 \quad -0.13 \quad 0.7047 \quad 0.0591 \quad 0.2161 \quad -0.664] \quad (10)$$

$$B_{oi} = 0.059 \quad (11)$$

ในกรณีที่ 1 เป็นการวางแผนการผลิตโดยเป็นการวางแผนการผลิตกำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่ออยู่ในระบบไฟฟ้า ณ เวลาใดเวลาหนึ่งเท่านั้น เช่น 20.00 น. ว่าเครื่องกำเนิดแต่ละเครื่องควรผลิตกำลังไฟฟ้าเท่าไรที่ใช้ต้นทุนการผลิตน้อยที่สุด และโหลดต้องได้รับกำลังไฟฟ้าเพียงพอกับความต้องการด้วย

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากรณีศึกษาที่ 1

Unit no.	ci	bi	ai	Pmin	Pmax
1	0.0070	7.00	240	100	500
2	0.0095	10.0	200	50	200
3	0.0090	8.50	220	80	300
4	0.0090	11.0	200	50	150
5	0.0080	10.5	220	50	200
6	0.0075	12.0	190	50	120

ในกรณีศึกษาที่ 2 ได้พิจารณาถึงขีดจำกัดอัตราการเปลี่ยนแปลง (Ramp rate limit) และช่วงเวลาต้องห้าม (Prohibited Operating Zone) มีสัมประสิทธิ์การสูญเสียในสายส่งเหมือนกับกรณีศึกษาที่ 1 มีคุณสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตามตารางที่ 2 และมีข้อมูลขีดจำกัดอัตราการเปลี่ยนแปลง และช่วงเวลาต้องห้ามตามตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ขีดจำกัดอัตราการเปลี่ยนแปลงและช่วงเวลาต้องห้ามกรณีศึกษาที่ 2

Unit no.	P _o	UR	DR	Prohibited Operating Zone	
1	440	80	120	[210-240]	[350-380]
2	170	50	90	[90-110]	[140-160]
3	200	65	100	[150-170]	[210-240]
4	150	50	90	[80-90]	[110-120]
5	190	50	90	[90-110]	[140-150]
6	150	50	90	[75-85]	[100-105]

5.2 ผลการจำลองสถานการณ์และการเปรียบเทียบผล

ในการจำลองใช้โปรแกรม MATLAB คอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะ Intel(R) Core(TM) i5 2.30 GHz แรม 8 GB บนระบบปฏิบัติการ Windows 7 ทำการรันจำนวน 500 รอบ ได้ผลการจำลองดังตารางที่ 4 และตารางที่ 5 ซึ่งได้ทำการทดสอบเปรียบเทียบกับวิธีเชิงพันธุกรรม (GA), วิธีอนุภาคกลุ่ม (PSO) และวิธีแบบฝูงผึ้ง (BCO)

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบการจัดสรรกำลังการผลิตกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดแต่ละเครื่องกรณีศึกษาที่ 1

Units	GA	PSO	BCO	MSA
P ₁	474.71	446.71	448.398	450.61
P ₂	178.64	173.01	168.483	174.74
P ₃	262.21	265.00	256.951	260.69
P ₄	134.28	139.00	138.164	136.21
P ₅	151.90	165.23	164.757	162.17

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบการจัดสรรกำลังการผลิตกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดแต่ละเครื่อง กรณีศึกษาที่ 1 (ต่อ)

Units	GA	PSO	BCO	MSA
P ₆	74.18	86.78	98.343	90.73
P _T	1,276.03	1,275.7	1,275.1001	1,275.1535
P _L	13.03	12.733	12.1001	12.15
T _C	1,5459.00	1,5447	1,5440.4318	1,5439.6

จากตารางที่ 4 เป็นผลของการหาคำตอบของอัลกอริทึม MSA เปรียบเทียบกับวิธี GA, PSO และ BCO จะเห็นได้ว่าวิธีการที่นำเสนอ ให้ผลของคำตอบดีกว่าวิธีอื่น ๆ กล่าวคือให้ค่าต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดนั่นเอง

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบการจัดสรรกำลังการผลิตกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดแต่ละเครื่อง กรณีศึกษาที่ 2

Units	GA	PSO	BCO	MSA
P ₁	438.42	444.24	455.8578	450.13
P ₂	178.99	170.83	172.5688	174.80
P ₃	270.88	254.68	261.9842	256.97
P ₄	131.59	141.32	142.6500	139.72
P ₅	166.55	173.04	167.2398	162.72
P ₆	89.20	91.36	74.9646	90.72
P _T	1,275.63	1,275.47	1,275.2652	1,275.07
P _L	12.63	12.47	12.2652	12.07
T _C	1,5446.60	1,5446.10	1,5442.6189	1,5439.54

จากตารางที่ 5 เป็นผลของการหาคำตอบของอัลกอริทึม MSA เปรียบเทียบกับวิธี GA, PSO และ BCO โดยในตารางที่ 4 เป็นผลจากกรณีที่ 2 ซึ่งได้พิจารณาช่วงเวลาต้องห้าม และขีดจำกัดอัตรา การเปลี่ยนแปลงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละตัว จะเห็นได้ว่าวิธีการที่นำเสนอ ให้ผลของคำตอบดีกว่าวิธีอื่น ๆ กล่าวคือให้ค่าต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดนั่นเอง

6. สรุปผลและการอภิปรายผล

การแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดด้วยวิธีการปรับเปลี่ยนอัลกอริทึมของวิธี SA โดยการใช้ค่าของ λ เป็นค่าเริ่มต้นนั้น ในกรณีศึกษาที่ 1 พิจารณาถึงกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียจากสายส่ง และฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังความร้อนที่มีสมการทางคณิตศาสตร์ของต้นทุน การผลิตที่เป็นแบบเรียบ จะเห็นได้ว่าวิธีที่นำเสนอให้ค่าของคำตอบที่ดีกว่าวิธีที่นำมาเปรียบเทียบ ส่วนในกรณีศึกษาที่ 2 ได้พิจารณา รวมถึงข้อจำกัดอัตราการเปลี่ยนแปลงและช่วงเวลาการทำงาน ต้องห้ามของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าวิธีที่นำเสนอ ยังคงให้คำตอบที่ดีกว่า เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบ กับวิธีเชิงพันธุกรรม (GA) และวิธีอนุภาคกลุ่ม (PSO) และวิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงผึ้ง

(BCO) เทคนิคการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดโดยการปรับเปลี่ยนอัลกอริทึมของวิธี SA ที่นำเสนอนี้ ให้ค่าของคำตอบที่ดีกว่าอันเนื่องมาจากค่าของ λ ที่คำนวณได้อาจเป็นคำตอบที่อยู่ใกล้กับคำตอบที่ดีที่สุด ทำให้เมื่อค้นหาคำตอบรอบ ๆ ค่าของ λ จะมีโอกาสได้ค่าที่เหมาะสมมากกว่าเดิม ซึ่งค่าที่ได้นี้เป็นที่ยอมรับได้ และมีคำตอบที่ดีกว่า ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการวางแผนการผลิตกำลังงานไฟฟ้าในโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพได้

7. เอกสารอ้างอิง

- Dinu Calin Secui. (2015). A new modified bee colony algorithm for the economic dispatch problem, **Energy Conversion and Management, Elsevier**, pp.43-62.
- Hardiansyah, Junaidi, Yohannes MS. (2012). Solving Economic Load Dispatch Problem Using Particle Swarm Optimization Technique, I.J. **Intelligent Systems and Applications**, November 2012, pp. 12-18.
- Ismail Ziane, Farid Benhamida, Yacine Salhi and Amel Graa. (2015). Combine Dynamic Economic/Emission Dispatch Using Simulated Annealing Solution, **International Conference on Systems and Control**, Sousse, Tunisia, pp. 302-309.
- Javidtash, N., Davodi, A., Hakimzadeh, M. and Roozb, A. (2014). Genetic Algorithm for Solving Non-Convex Economic Dispatch Problem. **International Journal of Mathematical, Computational, Statistical, Natural and Physical Engineering** vol. 8, no. 5, pp.866-869.
- Khamsawang, S. and Jiriwibhakorn, S. (2009). Solving the Economic Dispatch Problem using Novel Particle Swarm Optimization, **World Academy of Science, Engineering and Technology**, vol.3, 2009, pp.1053-1058.
- Khamsen, W. and Takeang, C. (2016). **Hybrid of Lamda and Bee Colony Optimization for Solving Economic Dispatch,**” PRZEGLAD ELEKTROTECHNICZNY, pp.220-223.
- Naama, B., Bouzeboudja, H. and Allali, A. (2013). Solving the Economic Dispatch Problem by Using Tabu Search Algorithm, **TerraGreen 13 International Conference 2013 - Advancements in Renewable Energy and Clean Environment, Energy Procedia 36**, pp. 694-701.
- Pirmahamad Jamalbhai Vasovala, Chinmay Y. Jani , Vasim H. Ghanchi and Parth Harshad Kumar. (2014). Application of Ant colony Optimization technique in Economic Load Dispatch Problem for IEEE-14 Bus System. **International Journal for Scientific Research & Development**, vol. 2, issue 02, pp. 990-994.

- Simona Dinu, Ioan Odagescu, Maria Moise. (2011). Environmental Economic Dispatch Optimization using Modified Genetic Algorithm. **International Journal of Computer Applications**, vol.20, April, pp.7-14.
- Srikanth, K. and HariVamsi, V. (2016). Partical Swarm Optimization Technique for Dynamic Economic Dispatch. **Internation Journal of Research in Engineering and Technology**, vol. 5, issue 5, pp. 460-466.
- Takeang, C and Khamsan, W. (2016). Solving Economic Dispatch Problem of a Thermal Power Plant Using Bee Colony Optimization Technique, **Industrial Technology Lampang Rajabhat University Journal**, 9(2), 1-10. (in Thai)

การปรับปรุงคุณภาพน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสพลาสติกพอลิพรอพิลีน เป็นเชื้อเพลิงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซิลิกาอสัณฐานที่ทำการสกัดได้จากแกลบข้าว

The Improvement in quality of fuel oil by pyrolysis of polypropylene using of an amorphous silica catalyst made from rice husk

จิรพัฒน์พงษ์ เสนาบุตร^{1*}, อมรรัตน์ ปิ่นชัยมูล² และกนกพงษ์ ศรีเที่ยง³

^{1*} สาขาวิทยาศาสตร์เคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย
99 หมู่ 10 ตำบลทรายขาว อำเภอพาน จังหวัดเชียงราย 57120 โทร 053-723-971 ต่อ 3017 โทรสาร 053-723-978
E-mail:jirapatpong.amcet@gmail.com

² สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย
99 หมู่ 10 ตำบลทรายขาว อำเภอพาน จังหวัดเชียงราย 57120 โทร 053-723-971 ต่อ 4600 โทรสาร 053-723-978
E-mail:nu_nan_ie@hotmail.com

³ สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย
99 หมู่ 10 ตำบลทรายขาว อำเภอพาน จังหวัดเชียงราย 57120 โทร 053-723-971 ต่อ 3001 โทรสาร 053-723-978
E-mail:zercute46@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาปริมาณผลได้ของน้ำมันพลาสติกพอลิพรอพิลีนด้วยกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 350 - 450 องศาเซลเซียส ปรับปรุงคุณภาพน้ำมันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาซิลิกาอสัณฐานจากแกลบข้าว การไพโรไลซิสจะใช้เครื่องเตาปฏิกรณ์แบบกึ่งกะภายใต้สภาวะสุญญากาศและทำการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันพลาสติกพอลิพรอพิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ที่น้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก จากผลการไพโรไลซิสได้ผลปริมาณของของเหลวสูงสุดที่ 450 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 48 ถ่านชาร์ ร้อยละ 1.3 และก๊าซ ร้อยละ 0.7 และของเหลวที่ผลิตได้มีค่าความร้อนสูง 45,459 กิโลจูลต่อกิโลกรัม จากการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของน้ำมันพลาสติกพอลิพรอพิลีน พบว่า ผลิตภัณฑ์ของของเหลวแสดงถึงกลุ่มอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอนจำพวกแอลคีนและแอลเคน และจากการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันพลาสติกพอลิพรอพิลีน พบว่า ค่าความหนืด และค่าความถ่วงจำเพาะ มีค่าเทียบเคียงมาตรฐานคุณภาพน้ำมันดีเซล

คำสำคัญ: พลาสติกพอลิพรอพิลีน, ไพโรไลซิส, ซิลิกา, ตัวเร่งปฏิกิริยา, การปรับปรุงคุณภาพน้ำมันไพโรไลซิส

Abstract

This research aims to investigate the improvement in quality of fuel oil from polypropylene by pyrolysis at 350° - 450 ° Celsius using an amorphous silica catalyst extracted from rice husk. Pyrolysis uses a semi-rotary reactor under vacuum conditions. At 5 percent by weight of pyrolysis results, the maximum volume of liquid at 450° Celsius was 48%, Charcoal 1.3%, and 0.7% gas and liquid produced. The highest heating value of the liquid product was 45,459 kilojoules per kilogram of oil. Furthermore,

analysis of the chemical structure of the polypropylene oil demonstrated that the liquid products were characterized by aliphatic hydrocarbons such as alkenes and alkanes. From the analysis of the physical properties of the polypropylene it was shown that viscosity and specific gravity were similar to that of diesel fuel.

Keywords: Polypropylene, Pyrolysis, Silica, Catalyst, Pyrolysis oil quality

1. บทนำ

พอลิพรอพิลีน (polypropylene; PP) จัดเป็นพลาสติกในกลุ่มที่มีปริมาณที่สูง เนื่องจากมีการประยุกต์ใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.84-0.91 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีน้ำหนักเบา มีลักษณะขาวขุ่น ไม่ทึบแต่ไม่ใส นิยมนำมาใช้เป็นผลิตภัณฑ์บรรจุอาหารและเครื่องดื่ม เช่น ข้อน ส้อม แก้วน้ำ และขวดน้ำ เป็นต้น จึงทำให้พลาสติกประเภทนี้มีปริมาณการใช้ในชีวิตประจำวันที่สูงและมีราคาค่อนข้างถูกส่งผลให้เป็นปัญหาทางด้านขยะระดับประเทศที่รอการแก้ไข อีกทั้งยังสร้างปัญหามลพิษต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมากเนื่องจากไม่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ จึงต้องหาวิธีการกำจัดขยะพลาสติกด้วยวิธีการต่าง ๆ ได้แก่ การเผา และการฝังกลบ แต่กระบวนการกำจัดเหล่านี้ยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างชัดเจนไม่ว่าจะเป็นปัญหา คุณภาพอากาศ สารพิษปนเปื้อนในดิน และแหล่งน้ำธรรมชาติซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในอนาคต และจากปัญหานี้มนุษย์เราจึงมีการรณรงค์การลดขยะพลาสติกด้วยการนำกลับมาใช้ใหม่เพื่อให้ขยะพลาสติกกลับมามีคุณค่า แต่ด้วยวิธีนี้ก็ยังไม่สามารถที่จะลดปริมาณขยะพลาสติกได้ตามความต้องการเมื่อเทียบกับประชากรที่เพิ่มขึ้นจึงทำให้นักวิทยาศาสตร์ได้คิดค้นเทคโนโลยีการกำจัดขยะพลาสติกที่สามารถนำกลับมาใช้เป็นพลังงานหรือเชื้อเพลิงได้โดยวิธีหนึ่ง คือ วิธีการสลายตัวทางความร้อนหรือที่เรียกว่า กระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) ซึ่งจะทำให้การหลอมพลาสติกที่เหลือใช้มาเป็นเชื้อเพลิงพลังงานทดแทนเนื่องจากพลาสติกมีองค์ประกอบของสารไฮโดรคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักเมื่อให้อุณหภูมิแก่พลาสติกจนถึงจุดหลอมเหลวของพลาสติกไฮโดรคาร์บอน จะเกิดการแตกตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ที่สั้นลง ในสภาวะที่ไร้ออกซิเจนและกลั่นตัวตามจำนวนคาร์บอนที่แตกต่างกันได้เป็นผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นของเหลว (น้ำมัน) ของแข็ง และ ก๊าซ ตามลำดับ จากการศึกษาของธัญญ์พิชา เอกบุศย์ และคณะ (2557) ได้ทำการศึกษาศักยภาพการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกในประเทศไทยด้วยกระบวนการไพโรไลซิส พบว่า ผู้ประกอบการเอกชนและโครงการส่งเสริมการแปรรูปขยะพลาสติกเป็นน้ำมันด้วยกระบวนการไพโรไลซิสขนาดกำลังการผลิตตั้งแต่ 0.8-16 ตันต่อวัน ได้ผลผลิตน้ำมันแปรรูป 200 - 10,400 ลิตรต่อวัน ชนิดของพลาสติกที่เข้าเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสคือพลาสติกชนิดพอลิพรอพิลีนและพอลิเอทิลีนถูกนำมาใช้ในการกลั่นน้ำมันและทำการประเมินการวิเคราะห์จุดคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์ จึงทำให้มีองค์กรทั้งภาครัฐและเอกชนและอีกทั้งนักวิจัยที่เล็งเห็นถึงความสำคัญของการนำพลาสติกกลับมาเป็นพลังงานเชื้อเพลิงจากงานวิจัย Moinuddin Sarker et al. (2012) ได้ทำการกลั่นน้ำมันไฮโดรคาร์บอนแบบกลั่นลำดับส่วนที่อุณหภูมิต่ำจากพลาสติกประเภทพอลิสไตรีน โดยใช้อุณหภูมิในการกลั่นช่วงแรกในช่วง 100 - 400 องศาเซลเซียส ได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำมันพอลิสไตรีนที่มีความหนาแน่น 0.88 กรัมต่อมิลลิลิตร ช่วงที่สองอุณหภูมิ 40 - 60 องศาเซลเซียส ได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำมันไฮโดรคาร์บอน

ที่มีความหนาแน่น 0.84 กรัมต่อมิลลิลิตร ที่เบากว่าแต่เนื่องจากผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้ออกมา ยังมีคุณภาพไม่เป็นไปตามมาตรฐาน จึงต้องมีการปรับปรุงคุณภาพก่อนการนำไปใช้งาน แนวทางของการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันที่น่าสนใจและเป็นที่ยอมรับวิธีหนึ่งคือการปรับปรุงคุณภาพด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่นำมาใช้โดยจากงานวิจัยของ กรวิกา วงษ์ผาบ (2554) ได้ศึกษาการแตกตัวของพลาสติกที่ใช้แล้วชนิดพอลิพรอพิลีนและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะภายใต้บรรยากาศของแก๊สไฮโดรเจนที่ความดัน 1 บาร์เกจ ด้วย USY ซีโอไลต์ ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิ 380 400 และ 420 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 30 45 และ 60 นาที อัตราส่วนของ USY ซีโอไลต์ต่อพลาสติกที่ใช้แล้วร้อยละ 1 และ 5 โดยน้ำหนัก พบว่า ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวประมาณ ร้อยละ 69.81 แก๊สไฮโดรคาร์บอน ร้อยละ 20.33 และของแข็ง ร้อยละ 9.86 ซึ่งผลิตภัณฑ์ของเหลวประกอบด้วยเนฟทาร้อยละ 47.59 แก๊สออยล์เบา และเคโรซีน มีแก๊สออยล์หนักและกากน้ำมันหนักในปริมาณน้อย จากการศึกษาของ Sonawane YB et al. (2015) ได้ทำการศึกษากาโรไลซิสของพลาสติกประเภทพอลิพรอพิลีนด้วยอุณหภูมิ กาโรไลซิส 450 องศาเซลเซียส ด้วยการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์เบต้า (Zeolite beta) พบว่าได้ปริมาณของของเหลวมากที่สุดถึงร้อยละ 86.40 ที่น้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก น้ำมันมีความใสมากขึ้นและมีจำนวนคาร์บอนอยู่ในช่วง $\text{C}_5\text{-C}_{20}$ และ Akalin et al. (2011) ได้ทำการ กาโรไลซิสก้านยาสูบโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Al_2O_3 , Fe_2O_3 , AlCl_3 และ SnCl_4 ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวมากที่สุดคือ Al_2O_3 ส่วน Van Kasteren J.M.N. et al. ได้ทำการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ลงไปในกระบวนการ กาโรไลซิสพลาสติกประเภท HDPE และขยะประเภท HDPE พบว่าปริมาณน้ำมันเพิ่มขึ้นและลดปริมาณกากคาร์บอน น้ำมันมีความใสมากขึ้น และมีจำนวนคาร์บอนอยู่ในช่วง $\text{C}_5\text{-C}_{16}$

จากงานวิจัยเหล่านี้จึงมีความเป็นไปได้ว่าจะนำสารสกัดซิลิกาอสัณฐานจากแกลบข้าวมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถทดแทนตัวเร่งปฏิกิริยาที่ราคาค่อนข้างสูง อีกทั้งยังหาได้ง่าย และราคาถูก อีกทั้งซิลิกาอสัณฐานมีลักษณะโครงสร้างและมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่าจึงสามารถนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการกลั่นน้ำมันจากพลาสติกประเภทพอลิพรอพิลีนจากกิจกรรมการรณรงค์การแยกขยะภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย ด้วยกระบวนการกาโรไลซิส และทำการออกแบบและสร้างเครื่องชุดเตาปฏิกรณ์แบบแบบกึ่งกะที่อุณหภูมิระหว่าง 350 - 450 องศาเซลเซียส โดยทำการควบคุมปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อดูผลได้สูงสุดของผลิตภัณฑ์ของของเหลวที่ได้จากพลาสติกประเภทพอลิพรอพิลีนและสามารถปรับปรุงคุณภาพน้ำมันจากพลาสติกให้มีคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพมีค่าเทียบเคียงคุณภาพน้ำมันดีเซลมาตรฐาน ด้วยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซิลิกาอสัณฐาน (amorphous silica; SiO_2)

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

2.1 เพื่อทำการออกแบบและสร้างเครื่องกลั่นต้นแบบน้ำมันจากพลาสติกด้วยกระบวนการ กาโรไลซิส

2.2 เพื่อศึกษาปัจจัยของ อุณหภูมิในการกลั่นสลาย และตัวเร่งปฏิกิริยาซิลิกาอสัณฐาน (amorphous silica; SiO_2) จากแอลกอฮอล์ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของน้ำมัน จากพลาสติกพอลิพรอพิลีนให้มีคุณภาพเทียบเคียงน้ำมันดีเซลมาตรฐาน

3. ขั้นตอนการเตรียมและวิธีการทดลอง

3.1 พลาสติกประเภทพอลิพรอพิลีน (Polypropylene)

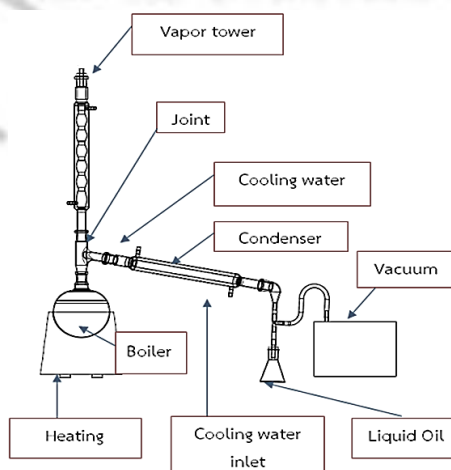
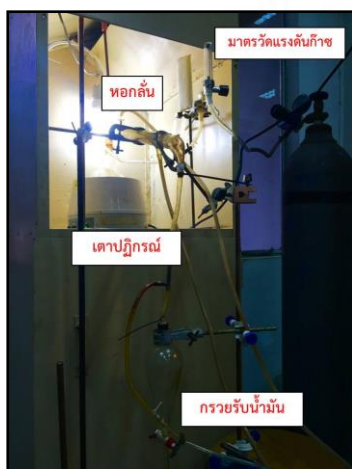
ทำการตัดแยกขยะพลาสติกประเภทพอลิพรอพิลีน นำมาทำความสะอาดและตากให้แห้ง

3.2 ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst)

ตัวเร่งปฏิกิริยาซิลิกาอสัณฐาน (SiO_2) ทำการเตรียมจากแอลกอฮอล์ด้วยกระบวนการสกัดแบบ 2 ขั้นตอน คือ การสกัดสารอินทรีย์ และสารอินทรีย์ โดยการนำแอลกอฮอล์มาทำความสะอาด และทำการอบแห้ง และทำการเติมกรดไฮโดรคลอริก (HCl) จากนั้นนำแอลกอฮอล์ด้วยน้ำปราศจากไอออน นำไปอบ และทำการคำนวณร้อยละของสารอินทรีย์ นำแอลกอฮอล์ที่ได้ไปเผา จนได้เถ้าแอลกอฮอล์สีขาว และทำการคำนวณร้อยละสารอินทรีย์

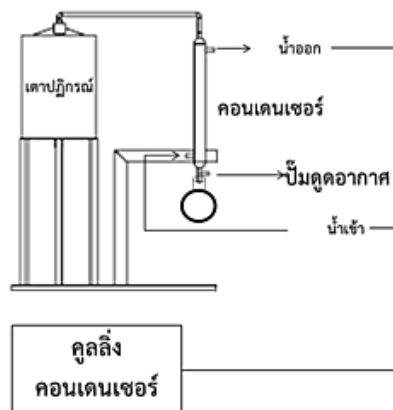
3.3 การออกแบบเตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบกึ่งกะ (Semi batch reactor)

การออกแบบอุปกรณ์การทดลองปฏิกิริยาไพโรไลซิส และการสร้างเครื่องชุดเตาปฏิกรณ์ปฏิกิริยาไพโรไลซิสต้นแบบซึ่งเป็นปฏิกรณ์แบบกึ่งกะแสดงดังภาพที่ 1 (ก) และ (ข) เป็นชุดอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการและเครื่องกลั่นน้ำมันพลาสติกต้นแบบโดยการออกแบบตัวถังปฏิกรณ์สามารถจุปริมาณพลาสติกได้ไม่เกิน 2500 กรัม ใช้ชุดลดความร้อน 2400 วัตต์ ชุดควบแน่นสำหรับกลั่นโดยใช้ระบบหล่อเย็นแบบคูลิ่งคอนเดนเซอร์ ควบคุมระบบอุณหภูมิภายในถังปฏิกรณ์และระบบปั๊มสุญญากาศที่อัตราเร็ว 0.5 ลิตรต่อวินาที ที่เวลา 5 นาที และใช้หลักการแบบกลั่นลำดับส่วนด้วยการกลั่นสลายด้วยความร้อนภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน จากนั้นให้อุณหภูมิแก่พลาสติกเปลี่ยนจากสถานะของแข็งกลายเป็นไอแก๊สไฮโดรคาร์บอนผ่านกระบวนการควบแน่น (condensation) กลายเป็นของเหลวไฮโดรคาร์บอน ตามลำดับ



(ก) ห้องปฏิบัติการทางเคมี

ภาพที่ 1 อุปกรณ์การทดลองและชุดเตาปฏิกรณ์ปฏิกิริยาไพโรไลซิสต้นแบบ



(ข) เครื่องกลั่นน้ำมันพลาสติกต้นแบบ

ภาพที่ 1 อุปกรณ์การทดลองและชุดเตาปฏิกรณ์ปฏิกิริยาไพโรไลซิสต้นแบบ (ต่อ)

3.4 ขั้นตอนการไพโรไลซิส (Pyrolysis procedure)

นำพลาสติกที่ทำกรเตรียมในหัวข้อ 3.1 มาชั่งน้ำหนักจำนวน 50 กรัม ใส่ลงในถังเตาปฏิกรณ์โดยทำการกลั่นแบบไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาและเติมตัวเร่งปฏิกิริยา ทำการเปิดก๊าซไนโตรเจนที่อัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นให้ความร้อนกับถังปฏิกรณ์ ที่อุณหภูมิ 350 400 และ 450 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เมื่อเกิดไอก๊าซไฮโดรคาร์บอนของพลาสติกให้ทำการเปิดระบบน้ำหล่อเย็นแบบคูลลิ่งคอนเดนเซอร์ จนไอก๊าซไฮโดรคาร์บอนกลั่นตัวเป็นของเหลว

3.5 การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานวิทยาและปริมาณธาตุของตัวเร่งปฏิกิริยา

วิเคราะห์พื้นฐานวิทยาของซิลิกาด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scan Electron Microscopy; SEM) และปริมาณธาตุด้วยเทคนิคเอกซเรย์สเปกโตรสโคปี (Energy Dispersive X-ray; EDX)

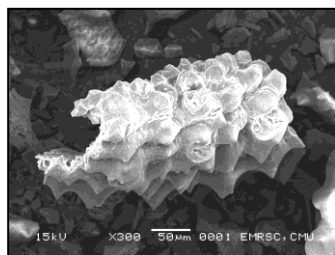
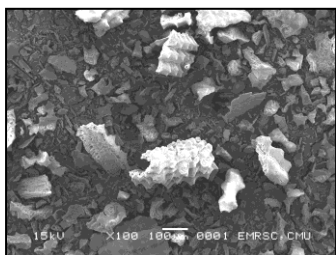
3.6 การวิเคราะห์ค่าทางความร้อน (Heating value) และหมู่ฟังก์ชันทางเคมี (Functional groups) และการวิเคราะห์จำนวนคาร์บอน (Carbon number) ของน้ำมันจากพลาสติก

น้ำมันจากพลาสติกจะทำการวิเคราะห์ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงวิเคราะห์ด้วยเครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ และวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของเชื้อเพลิงด้วยเทคนิคฟลูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy; FTIR) และวิเคราะห์จำนวนคาร์บอนด้วยเครื่องไฮโดรคาร์บอนนาไลเซอร์ (Hydrocarbon Analysis) และทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันจากพลาสติก

4. ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานวิทยาและปริมาณธาตุของตัวเร่งปฏิกิริยา

เมื่อคำนวณร้อยละของซิลิกาที่ทำการสกัดได้มีค่าเท่ากับ 16.95 การวิเคราะห์พื้นผิวของซิลิกา พบว่า ลักษณะพื้นผิวของเถ้ากลบขาวมีพื้นผิวขรุขระ และอาจเกิดจากพื้นที่ที่เลือกวิเคราะห์หาปริมาณธาตุต่าง ๆ มีซิลิกาไม่สม่ำเสมอ เพราะโครงสร้างที่เป็นอนุฐานของซิลิกาเนื่องจากมีช่วงอุณหภูมิในการเผาอยู่ในช่วง 600 - 800 องศาเซลเซียส



(ก) กำลังขยาย 100 เท่า

(ข) กำลังขยาย 300 เท่า

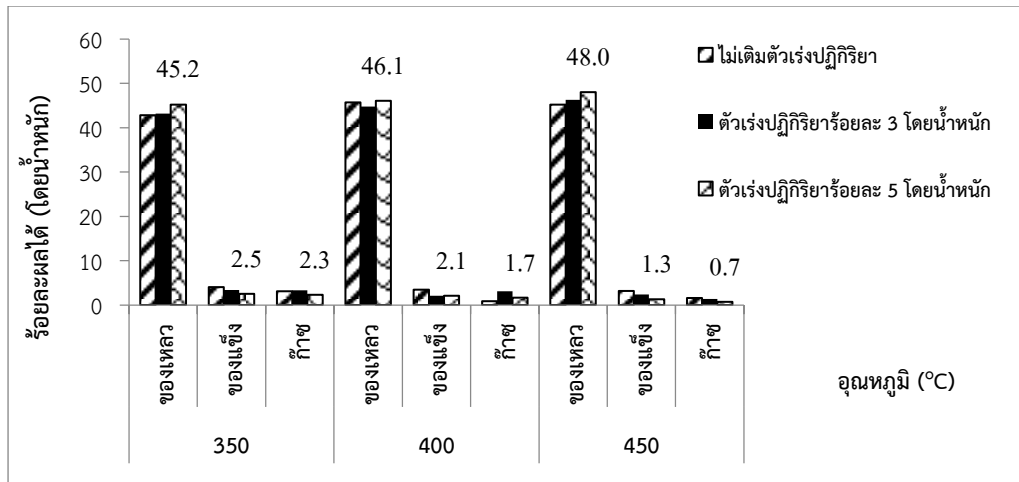
ภาพที่ 2 พื้นผิวของซิลิกาที่สกัดได้จากกลบข้าว

จากการวิเคราะห์ธาตุในซิลิกา พบว่า มีปริมาณของธาตุซิลิกอน แคลเซียม และแมกนีเซียม มีค่าเท่ากับ 30.83, 0.14 และ 0.19 %atom ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในรูปของออกไซด์โดยออกไซด์ในรูปของ SiO_2 มีคุณสมบัติรูพรุน และพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูงเพื่อเพิ่มโอกาสในการเลือกดูดซับสารที่มีโมเลกุลใหญ่และโอกาสในการทำปฏิกิริยาสำหรับการผลิตไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดกลางถึงใหญ่ระดับน้ำมันดีเซลได้ (Kraokaw S. และ Kim D. J. et al.) ซึ่งแตกต่างจากตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่น เช่น ซีโอไลต์ เนื่องจากมีความเป็นรูพรุนที่สูงและมีข้อจำกัด คือ สามารถดูดซับได้เฉพาะสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กที่สามารถผ่านเข้าไปในรูพรุนของซีโอไลต์ได้ทำให้ปฏิกิริยามีโอกาสเกิดขึ้นในระดับจำกัด ส่วน CaO และ MgO เป็นโลหะอัลคาไลน์เอิร์ท (alkaline earth metal compound) ที่มีคุณสมบัติความเป็นเบสที่สูง สามารถที่จะนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธ์ (heterogeneous catalyst) เนื่องจากเป็นออกไซด์ของสารอนินทรีย์ที่สามารถดูดซับบนพื้นผิวของแข็งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้เอง ดังนั้น พลังงานเสรีกิบส์ (ΔG) ของปฏิกิริยาจึงต้องมีค่าเป็นลบแต่ในการดูดซับนั้นโมเลกุลที่อยู่กันอย่างไม่เป็นระเบียบในเฟสแก๊สหรือของเหลวที่อยู่เหนือพื้นผิวของแข็งนั้น เมื่อมาเกาะบนพื้นผิวของแข็ง การเคลื่อนที่ของโมเลกุลนั้นจะลดลงโมเลกุลที่เกาะอยู่บนพื้นผิวจะมีความเป็นระเบียบมากกว่าโมเลกุลที่ลอยลอยอยู่เหนือพื้นผิวของแข็ง ดังนั้นการดูดซับจึงทำให้ค่าเอนโทรปี (entropy) ของระบบลดลงมีค่าเป็นลบ ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้การกลั่นน้ำมันจากพลาสติกมีคุณภาพมากขึ้น

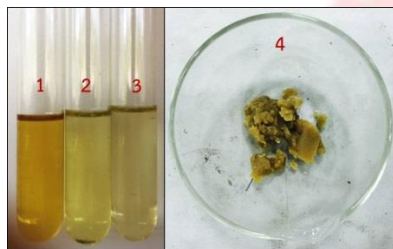
4.2 ผลของอุณหภูมิและตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อปริมาณน้ำมันจากพลาสติกพอลิพรอฟิลีน

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันจากพลาสติกพอลิพรอฟิลีนที่ได้จากระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิไพโรไลซิสที่ 350 - 450 องศาเซลเซียส และผลของการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาแสดงดังภาพที่ 3 พบว่า ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส และเติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีปริมาณของเหลวสูงสุดคือร้อยละ 48.0 ถ่านชาร์ ร้อยละ 1.3 และก๊าซร้อยละ 0.7 แสดงให้เห็นว่า การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับการแตกตัวด้วยความร้อนจะได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เนื่องจากการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่เกิดการแตกตัวเป็นโมเลกุลขนาดเล็กได้ดียิ่งขึ้นรวมถึงตัวเร่งปฏิกิริยาตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีฤทธิ์เป็นกรดช่วยแตกพันธะระหว่างคาร์บอนของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ทำให้ขนาดของโมเลกุลเล็กลง โดยเกิดขึ้นผ่านจากปฏิกิริยาของคาร์โบเนียมไอออนที่มีความสัมพันธ์กับปฏิกิริยาถ่ายโอนไฮโดรเจน (Hydrogen transfer) และปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชัน (Isomerization) และปฏิกิริยาจะหยุดลงก็ต่อเมื่อคาร์โบเนียมไอออนทำปฏิกิริยากับตัวเร่ง

ปฏิกิริยา และอาจเกิดการแตกตัวต่อไปได้อีกถ้าตัวเร่งปฏิกิริยานั้นยังคงมีความว่องไวอยู่ จากภาพที่ 4 แสดงให้เห็นว่าสีของน้ำมันที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสมีความใสและมีความสะอาดมากขึ้น และมีปริมาณถ่านชาร์ลดลงเมื่อมีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา ตามลำดับ

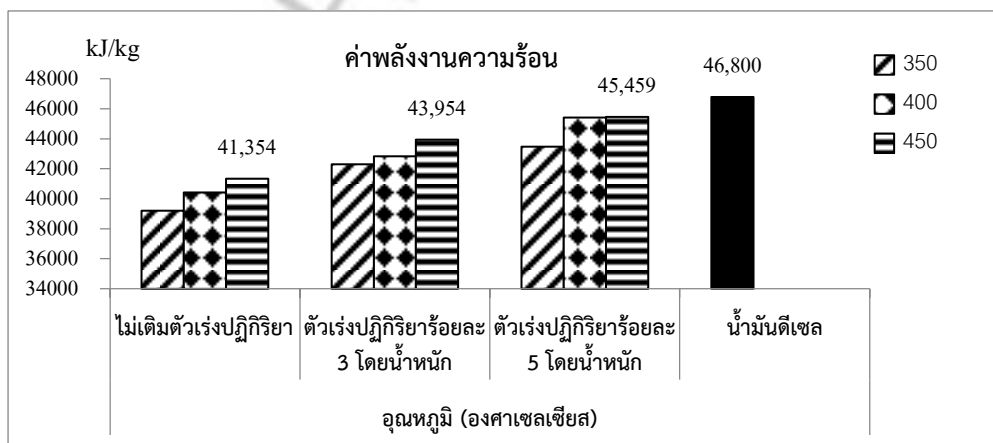


ภาพที่ 3 ร้อยละผลผลิตของกระบวนการกลั่นน้ำมันพลาสติกพอลิพรอพิลีน



ภาพที่ 4 ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส (1) ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา (2) เติมตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก (3) เติมตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (4) ถ่านชาร์

4.3 ผลของค่าความร้อนของน้ำมันพลาสติกพอลิพรอพิลีน

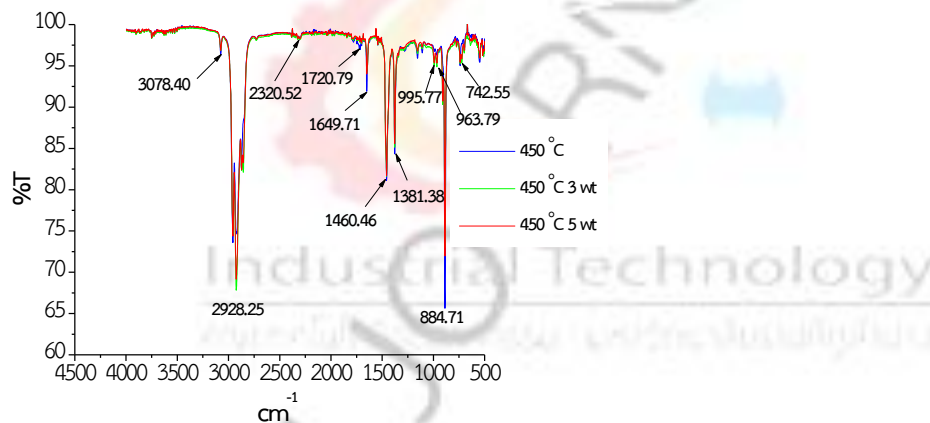


ภาพที่ 5 ค่าพลังงานความร้อนของน้ำมันพลาสติกพอลิพรอพิลีน

จากภาพที่ 5 แสดงผลของค่าความร้อนของน้ำมันพลาสติกพอลิพรอพิลีน พบว่า ค่าความร้อนของน้ำมันที่ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิโพโรไลซิส 450 องศาเซลเซียส มีค่าความร้อนเท่ากับ 41,354 กิโลจูลต่อกิโลกรัม, ค่าความร้อนของน้ำมันที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 3 และ 5 โดยน้ำหนัก มีค่าเท่ากับ 43,954 กิโลจูลต่อกิโลกรัม และ 45,459 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ โดยแนวโน้มของค่าพลังงานความร้อนมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีอุณหภูมิในการกลั่นแตกสลายและน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นโดยโครงสร้างของพลาสติกพอลิพรอพิลีนมีไฮโดรคาร์บอนที่ไม่ใหญ่มากนัก ไม่ซับซ้อนสามารถแตกตัวได้ง่าย มีส่วนทำให้โมเลกุลของไฮโดรคาร์บอนมีขนาดสั้นลงเกิดเป็นสารประกอบอะโรมาติกและผลของตัวเร่งปฏิกิริยามีส่วนช่วยให้โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนของพลาสติกพอลิพรอพิลีนมีขนาดเล็กลงและปรับโครงสร้างของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนให้เหมาะสมมีลักษณะและความเป็นอะโรมาติกเกิดขึ้นจากผลการถ่ายโอนไฮโดรเจนที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาจึงทำให้ค่าความร้อนของการเผาไหม้ของน้ำมันสูงขึ้น

4.4 การวิเคราะห์ฟังก์ชันแนลกรุปทางเคมีและจำนวนคาร์บอนของน้ำมันพลาสติกพอลิพรอพิลีน

1) การวิเคราะห์ฟังก์ชันแนลกรุปทางเคมีด้วยเทคนิคฟลูอิดเรย์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี



ภาพที่ 6 ฟลูอิดเรย์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (FT-IR) ของน้ำมันพลาสติกพอลิพรอพิลีน

ตารางที่ 1 ฟังก์ชันแนลกรุปของน้ำมันพลาสติกพอลิพรอพิลีน

จำนวนคลื่น	ความยาวคลื่น (cm ⁻¹)	ฟังก์ชันแนลกรุป	จำนวนคลื่น	ความยาวคลื่น (cm ⁻¹)	ฟังก์ชันแนลกรุป
1	742.55	-CH=CH-(cis)	6	1649.71	Non-Conjugated
2	884.71	C=CH ₂	7	1720.79	Non-conjugated
3	963.79	-CH=CH-(trans)	8	2320.52	C-C=, -C=C=, -CH
4	995.77	Acetate	9	2928.25	C-CH ₃
5	1460.46	CH ₃	10	3078.40	=C-H

จากผลการวิเคราะห์ฟังก์ชันแนลกรุปทางเคมีของน้ำพลาสติกพอลิพรอพิลีนที่แสดงดังภาพที่ 6 และตารางที่ 1 พบว่า ที่เลขคลื่น 3078 cm^{-1} เป็นพีคการดูดกลืนแสงของ $=\text{C-H}$ เป็นการสั่นของกลุ่มเมทิลและเมทิลีน, เลขคลื่น 2928.25 และ 2320.52 cm^{-1} เป็นพีคการดูดกลืนแสงของ C-CH_3 และ C-C= , $-\text{C-C=}$, $-\text{CH}$, เลขคลื่น 1720.79 และ 1649.71 cm^{-1} เป็นการสั่นของกลุ่ม non-conjugated, เลขคลื่น 1460.46 cm^{-1} เป็นรูปแบบของการสั่นแบบ asymmetric and symmetric, เลขคลื่นที่ 995.77 cm^{-1} เป็นการสั่นของกลุ่ม acetate และในช่วงเลขคลื่นตั้งแต่ $963.79 - 742.55\text{ cm}^{-1}$ เป็นการสั่นของกลุ่ม secondary cyclic alcohol และ olefins ตามลำดับ ซึ่งเลขคลื่นที่ทำการวิเคราะห์ทั้งหมดแสดงถึงกลุ่มอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอนจำพวกแอลคีนและแอลเคน

2) การวิเคราะห์จำนวนคาร์บอนของน้ำมันพลาสติกพอลิพรอพิลีน

การวิเคราะห์จำนวนคาร์บอนและองค์ประกอบของน้ำมันพลาสติก แสดงดังตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ พบว่า น้ำมันพลาสติกทั้งที่ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาและเติมตัวเร่งปฏิกิริยามีจำนวนคาร์บอน คือ $\text{C}_7\text{-C}_{13}$ มีองค์ประกอบของ normal alkanes, iso-alkanes and alkenes และไม่มีองค์ประกอบของ light alkanes, single ring aromatics ของจำนวนคาร์บอนในช่วง $\text{C}_4\text{-C}_6$ ที่จะเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของ gaseous fraction ที่มีมวลโมเลกุลต่ำ แต่เมื่อทำการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น พบว่า น้ำหนักของจำนวนคาร์บอน $\text{C}_7\text{-C}_{13}$ มีองค์ประกอบของน้ำมันที่ลดลง ซึ่งเป็นไปได้ว่า น้ำมันพลาสติกพอลิพรอพิลีนมีการแตกตัวของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่สั้นลงและส่วนน้ำมันดีเซลมีจำนวนคาร์บอน คือ $\text{C}_4\text{-C}_7$ แสดงองค์ประกอบของ lighter alkenes ซึ่งไม่มีจำนวนคาร์บอนที่มากกว่า C_{12+} ที่แสดงถึง hydrocarbon และ waxes อ้างอิงงานวิจัยของ Itsaso Barbarias et al. (2015) และ Sivakumar P., Anbarasu K. (2012) ซึ่งองค์ประกอบที่หาได้ส่วนใหญ่เป็นพวก Parafins (alkane) ซึ่งจะคล้ายกับน้ำมันดีเซล ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำมาเป็นส่วนผสมกับน้ำมันดีเซลที่ใช้งานทั่วไปได้มากกว่า

ตารางที่ 2 จำนวนคาร์บอนและองค์ประกอบของน้ำมันพลาสติกพอลิพรอพิลีน

จำนวนคาร์บอน	องค์ประกอบน้ำมันพลาสติกพอลิพรอพิลีน ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส (ร้อยละโดยปริมาตร)						องค์ประกอบ น้ำมันดีเซล (ร้อยละโดยปริมาตร)	
	ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา		เติมตัวเร่งปฏิกิริยา ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก		เติมตัวเร่งปฏิกิริยา ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก			
	n-paraffins	Isoparaffins	n-paraffins	Isoparaffins	n-paraffins	Isoparaffins	n-paraffins	Isoparaffins
C_4	-	-	-	-	-	-	1.74	0.204
C_5	-	-	-	-	-	-	8.44	32.6
C_6	-	-	-	-	-	-	7.76	23.8
C_7	-	10.9	-	6.75	-	5.40	2.02	9.44
C_8	0.543	0.366	0.576	0.385	0.815	0.774	1.01	4.10
C_9	1.94	31.4	2.00	32.6	1.94	40.6	0.34	4.54
C_{10}	3.31	8.11	3.45	8.38	0.518	7.48	0.25	0.776
C_{11}	0.151	9.50	0.156	10.4	0.149	11.8	0.13	0.654
C_{12}	0.175	20.8	0.188	22.7	0.129	19.2	-	-
C_{13}	0.144	2.76	0.150	2.93	0.325	2.56	-	-
รวม	6.26	83.8	6.52	84.1	3.88	87.8	21.7	76.1

4.5 คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันพลัสติกด้วยกระบวนการไพโรไลซิส

จากการวิเคราะห์คุณภาพน้ำมันพลัสติกด้วยกระบวนการไพโรไลซิส ที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ณ อุณหภูมิไพโรไลซิสที่ 350 - 450 องศาเซลเซียส ด้วยการเปรียบเทียบน้ำมันมาตรฐานดีเซล แสดงดังตารางที่ 6 พบว่า ค่าของจุดวาบไฟอยู่ในช่วง 62.2 - 65.8 องศาเซลเซียส และค่าความหนืดอยู่ในช่วง 1.64 - 1.77 เซนติสโตก (Cst) การเติมตัวเร่งปฏิกิริยาของโลหะออกไซด์ของแข็งมีผลทำให้สายโซ่โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนเป็นโมเลกุลที่มีสายโซ่สั้นขึ้น และสายโซ่โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนของของเหลวที่สังเคราะห์ได้ทำให้เกิดการเผาไหม้ได้ที่อุณหภูมิต่ำ จุดชุนที่มีค่าอยู่ในช่วง (-4.3) - (-7.2) องศาเซลเซียส ก็มีผลมาจากสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเป็นพวกแอลคีนและแอลเคนซึ่งเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่อิ่มตัว และค่าความถ่วงจำเพาะมีค่ามากกว่ามาตรฐานน้ำมันดีเซลซึ่งอยู่ในช่วง 0.90 - 0.93 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จึงมีผลทำให้ค่าความร้อนมีค่าเพิ่มสูงขึ้น

ตารางที่ 3 ผลคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันพลัสติก

วิธีวิเคราะห์	ค่าการวิเคราะห์ (°C)			ดีเซล
	350	400	450	
จุดวาบไฟ (องศาเซลเซียส)	65.8	64.3	62.2	41.3
จุดชุน (องศาเซลเซียส)	-4.3	-6.4	-7.2	-12.0
ความหนืด (เซนติสโตก)	1.64	1.75	1.77	1.40
ความถ่วงจำเพาะ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	0.93	0.91	0.90	0.84

5. สรุปผลการวิจัย

5.1 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการกลั่นน้ำมันพลัสติกด้วยกระบวนการไพโรไลซิส

กระบวนการกลั่นน้ำมันจากพลัสติกด้วยกระบวนการไพโรไลซิสการใช้การแตกตัวด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาจะได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นเนื่องจากการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่เกิดการแตกตัวเป็นโมเลกุลขนาดเล็ก และตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยแตกพันธะระหว่างคาร์บอนของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ทำให้ขนาดของโมเลกุลเล็กลง พบว่า ที่อุณหภูมิในการกลั่นน้ำมันพลัสติก 450 องศาเซลเซียส และตัวเร่งปฏิกิริยาที่น้ำหนักร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ให้ปริมาณของเหลวสูงสุด คิดเป็นร้อยละ 48.0 โดยน้ำหนัก

5.2 คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของน้ำมันจากพลัสติกพลัสติก

จากการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของน้ำมันจากพลัสติก พบว่า ค่าผลทางความร้อนของน้ำมันที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 450 องศาเซลเซียส ที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีค่าเท่ากับ 45,459 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ค่าผลทางความร้อนของน้ำมันดีเซลมาตรฐาน มีค่าเท่ากับ 46,800 กิโลจูลต่อกิโลกรัม การวิเคราะห์ฟังก์ชันแนลกรุปทางเคมี พบว่า อยู่ในกลุ่มอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอนจำพวกแอลคีนและแอลเคน เมื่อทำการวิเคราะห์จำนวนคาร์บอนของน้ำมันพลัสติกที่ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาและเติมตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า มีจำนวนคาร์บอนในช่วง C₇-C₁₃ ส่วนน้ำมัน

ดีเซลมาตรฐานมีจำนวนคาร์บอนในช่วง C_4 - C_{11} ตามลำดับ และการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ ยังคงต้องมีการปรับปรุงให้ได้คุณภาพเทียบเคียงน้ำมันดีเซลมาตรฐาน ด้วยการเพิ่มตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับโลหะบางตัวให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น

จากงานวิจัยนี้ยังสามารถนำไปใช้ในการเผยแพร่ให้ความรู้เกี่ยวกับพลังงานทดแทน แก่นักศึกษา องค์กรทั้งภาครัฐและเอกชน ให้ตระหนักถึงการนำพลาสติกกลับมาเป็นพลังงานให้เกิดความคุ้มค่ามากที่สุด

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา งบประมาณแผ่นดิน ปีการศึกษา 2558 ที่สนับสนุนงบประมาณในการดำเนินงานวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

กรวิกา วงษ์ผาบ, กฤษณพล เล็กภูเขียว, กัญญาวิรุ อุ่นเสื่อ, ธราพงษ์ วิทิตสานต์ และอัญชลีพร วาริต สวัสดิ์ หล่อทองคำ. (2554). การแตกตัวของพลาสติกที่ใช้แล้วชนิดพอลิโพรพิลีนและ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงด้วย USY ซีโอไลต์. **การประชุมวิชาการนานาชาติวิศวกรรม เคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 21**. อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา

Kornvika wongpap, Kridsanapon Seakphukhew, Kanyawee Aunseua, Tharapong Vitidsant and Anchaleeporn Waritswat Lothongkum. (2011). Catalytic Cracking of Used Polypropylene and High-Density Polyethylene by USY Zeolite. The Twenty-one Chemical Engineering and Applied Chemistry of Thailand. Hat Yai Songkhla. (in thai)

ธัญญ์พิชา เอกบุศย์, ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ และวลัยรัตน์ อุตตมะปรากรม. (2557). การศึกษา ศักยภาพการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกในประเทศไทย. **วารสารวิจัยพลังงาน สถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. ปีที่ 11 ฉบับที่ 1**, หน้า 38-49.

Tanpitcha Ekabut, Prasert Reubroycharoen and Walairat Uttamaprakrom. (2014). A Study of Fuel Production Potential from Plastic Waste in Thailand. Journal of Energy Research, Energy Research Institute, Chulalongkorn. 12(1), 38-49. (in thai)

วิชชากร จารศิริ, สุพรทิพย์ ธนสินกิตติโชค และปฐมทัศน์ จิระเดชะ. (2554). การแตกตัวเชิงตัวเร่ง ตัวเร่งของพอลิโพรพิลีนและพอลิสไตรีนบนตัวเร่งปฏิกิริยาฟลูออคตะไลติกแครกกิ้งใช้แล้ว. **การประชุมเชิงวิชาการ “ศรีนครินทร์วิโรฒวิชาการ” ครั้งที่ 5 (หน้า 4)**. นครนายก: มหาวิทยาลัยศรีนครินทร์วิโรฒ.

Witchakorn Charusiri, Supornthip Thanasinkitichot and Pathomthat Chiradeja. (2011). Catalytic Cracking of Polypropylene and Polystyrene over Spent Fluid Catalytic Cracking Catalyst. The fifth Srinakharinwirot Symposium (Page 4). Srinakharinwirot University, Nakornnayok. (in thai)

- Akalın, M.K. and Karagoz, S. (2011). Tobacco residue pyrolysis. **BioResources**, Vol. 6(2), pp. 1773-805.
- Barbarias I., Artetxe M., Arregi A., Alvarez J., Lopez G., Amutio M. and Olazar M. (2015). Catalytic Cracking of HDPE Pyrolysis Volatiles over a Spent FCC Catalyst, **Chemical Engineering Transactions**. Vol 43, pp. 2029-2034.
- Bertero, M., Puente, G. and Sedran, U. (2012). Fuels from bio-oils: Bio-oil production from different residual sources, characterization and thermal conditioning. **Fuel**, Vol. 95, pp. 263-71.
- Bond, G.C. (1987), Heterogeneous Catalysis-Principles and Applications, 2nd ed., **Oxford Science Publications**.
- Kim, D. J., Dunn, B. C., Huggins, F., Huffman, G. P., Kang, M., Yie, J. E. and Eyring, E. M., (2006). SBA-15-Supported Iron Catalysts for Fischer-Tropsch Production of Diesel Fuel. **Energy&Fuels**. Vol. 20: pp. 2608-2611.
- Kraokaw, S., (2008). Selective production of higher hydrocarbons over cobalt support SBA-15 mesoporous silica catalysts, M.S. Thesis, Kasetsart University.
- Ma, C., Sun, L., Jin, L., Zhou, C., Xiang, J., Hu, S. and Su S. (2015). Effect of polypropylene on the pyrolysis of flame retarded high impact polystyrene. **Fuel Processing Technology**, Vol 135, pp. 150–156.
- Sarker, M. and Mamunor Rashid, M. (2014). Polypropylene waste plastic conversion into fuel oil by using thermal degradation with fractional process. **American Journal of Environment**, Vol 2, pp. 1-10.
- Sivakumar P., Anbarasu K. (2012). Catalytic pyrolysis of dairy industrial waste LDPE film into fuel. **International Journal of Chemistry Research**. Vol 3, Issue 1, pp. 52-55.
- Sonawane YB, Shindikar MR and Khaladkar MY. (2015). Use of catalyst in pyrolysis of polypropylene waste into liquid fuel. **International Research Journal of Environment Sciences**, Vol 4(7), pp. 24-28.
- Van Kasteren, J.M.N., Zhou Q. and Verberne A.H.A. (2009). Comparing pyrolysis behavior of virgin and waste plastics. **The 5th International Symposium on Feedstock Recycling (ISFR)**, October 11-14 2009, Chengdu, China.
- Xie, C., Liu, F., Yu, S., Xie F., Li, L, Zhang S. and Yang, J. (2008). Catalytic cracking of polypropylene into liquid hydrocarbons over Zr and Mo modified MCM-41 mesoporous molecular sieve, **Catalysis Communications**, Vol. 10, pp. 79–82.

การพัฒนาแบบจำลองแบบต่อเนื่องเพื่อวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการลงทุน โครงสร้างพื้นฐานด้านการขนส่งในมหาวิทยาลัย

The Development of a Model for an Investment Feasibility Analysis of Transport Infrastructure in a University

เจษฎา โพธิ์จันทร์^{1*}, วชิระ วิจิตรพงษ์², จุมพฏ พงศ์ศักดิ์ศรี³ และเอกภูมิ บุญธรรม⁴

^{1*,2,3,4} คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม 156 หมู่ 5 ตำบลพลายชุมพล อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก
65000 โทรศัพท์ : 087-531-7788 E-mail : markpochan@gmail.com

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอวิธีการพัฒนาแบบจำลองแบบต่อเนื่องในการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการลงทุนโครงสร้างพื้นฐานด้านการขนส่งในมหาวิทยาลัย ตามหลักทางด้านวิศวกรรมจราจรและขนส่ง โดยวิธีดำเนินการแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน ได้แก่ 1) การพัฒนาและประยุกต์ใช้แบบจำลองด้านการขนส่ง 2) การศึกษามูลค่าการลงทุน 3) การศึกษาผลประโยชน์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ที่จะได้รับ และ 4) การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการลงทุน ซึ่งเป็นขั้นตอนที่นำไปสู่ข้อมูลที่ใช้ประกอบการตัดสินใจในการลงทุน อย่างไรก็ตามการวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองดังกล่าว เพื่อวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการลงทุนระบบขนส่งสาธารณะในมหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม ตลอดระยะเวลาการวิเคราะห์ 10 ปี โดยผลการศึกษา พบว่า การพัฒนาระบบขนส่งสาธารณะมีความคุ้มค่าในการลงทุน (34,695,200 บาท/10 ปี) เนื่องจากมีอัตราผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์ (EIRR) เท่ากับร้อยละ 32.95 ซึ่งผ่านเกณฑ์ที่ยอมรับ (ร้อยละ 12.00) อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อค่าใช้จ่าย (B/C) เท่ากับ 1.38 (มากกว่า 1.00) และ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) เท่ากับ 7,593,405 บาท (มีค่าเป็นบวก) โดยคาดการณ์ว่าจะมีผู้มาใช้บริการระบบขนส่งสาธารณะ ประมาณ 2,041 เที่ยวคน/วัน

คำสำคัญ: แบบจำลองการตัดสินใจแบบต่อเนื่อง 4 ขั้นตอน, ความคุ้มค่าการลงทุน, การวิเคราะห์โครงการทางเศรษฐศาสตร์

Abstract

This research proposes an approach to develop a model for an investment feasibility analysis of transport infrastructure in a university according to the principles of traffic and transport engineering. The method is divided into four steps: 1) The development and application of the transportation model, 2) Studying the value of the transport investment 3) Studying the economic and educational benefits of the model and 4) Analysis of the investment feasibility. These processes contribute towards the decision making of the investment. However, this research has applied the model to analyse the feasibility of public transportation investment in Pibulsongkram Rajabhat University during an analysis period covering ten years. The results of the study show that development of public transportation is worthy of investment (34,695,200 Baht / 10

years) because the Economic Internal Rate of Return (EIRR) is 32.95%, which is above the acceptable rate of 12%. The benefit to cost ratio (B/C) is 1.38 (over 1.00) and the Net Present Value (NPV) is 7,593,405 Baht (positive value). The analysis shows that the public transportation system will be used by 2,041 people per day.

Keywords: 4-Step Sequential Model, Investment Worthiness, Economic Cost-Benefit Analysis

1. บทนำ

การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านการขนส่งต่าง ๆ อาทิเช่น การก่อสร้างถนน การขยายถนน และการพัฒนาระบบขนส่งสาธารณะ ล้วนแล้วเป็นการพัฒนาที่ต้องใช้งบประมาณในการลงทุนเป็นจำนวนมาก ดังนั้นเพื่อให้มั่นใจว่าโครงสร้างพื้นฐานฯ ที่จะลงทุนมีความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ และมีผลประโยชน์ที่คุ้มค่าต่อการลงทุน จึงมีความจำเป็นต้องวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการลงทุนเพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจในการลงทุนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการลงทุนโครงสร้างพื้นฐานด้านการขนส่งเป็นกระบวนการที่ได้รับการยอมรับและนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในงานศึกษาความเหมาะสมของโครงการทางหลวงในประเทศไทย (Department of Highways, 2010; 2012) และในต่างประเทศ (Meyer, M.D. & Miller, E.J., 2001; Hatzopoulou, M. & Miller, J., 2009) โดยการนำหลักการของแบบจำลองการตัดสินใจแบบต่อเนื่อง 4 ขั้นตอน (4-Steps Sequential Model) มาประยุกต์ใช้เพื่อคาดการณ์ปริมาณจราจรและผลกระทบด้านการจราจรและขนส่งที่จะเกิดขึ้นจากการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานฯ ซึ่งผลการศึกษาด้านการจราจรและขนส่งจะถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์ผลประโยชน์ทางด้านเศรษฐศาสตร์และวิเคราะห์ความคุ้มค่าในการลงทุนด้วยดัชนีตัวชี้วัด ทางเศรษฐศาสตร์ต่าง ๆ อาทิเช่น อัตราผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์ (EIRR) อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อค่าใช้จ่าย (B/C) และมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) เป็นต้น (Tangvitontham, N. & Chaiwat, P., 2012)

ปัจจุบันมหาวิทยาลัยต่าง ๆ ในประเทศไทยมีการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านการขนส่งอย่างต่อเนื่อง เพื่อแก้ไขปัญหาด้านการจราจร และเพื่ออำนวยความสะดวกแก่นักศึกษาและบุคลากรของตนเอง รวมถึงเพื่อรองรับการเจริญเติบโตของมหาวิทยาลัยในอนาคต ซึ่งการพัฒนานี้จะต้องใช้งบประมาณในการลงทุนเป็นจำนวนมาก ดังนั้นการวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอวิธีการพัฒนาแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์ความเป็นไปได้ ในการลงทุนโครงสร้างพื้นฐานด้านการขนส่งในมหาวิทยาลัยตามหลักทางด้านวิศวกรรมจราจรและขนส่ง โดยได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองดังกล่าว เพื่อวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการลงทุนระบบขนส่งสาธารณะในมหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม ซึ่งเป็นการพัฒนาที่ทางมหาวิทยาลัยจัดทำขึ้น เพื่อช่วยลดการใช้ยานพาหนะส่วนบุคคลในการเดินทาง โดยแบบจำลองนี้ จะสามารถช่วยให้ผู้บริหารมีข้อมูลประกอบการตัดสินใจในการลงทุนและนำไปสู่การบริหารจัดการงบประมาณได้อย่างมีประสิทธิภาพ

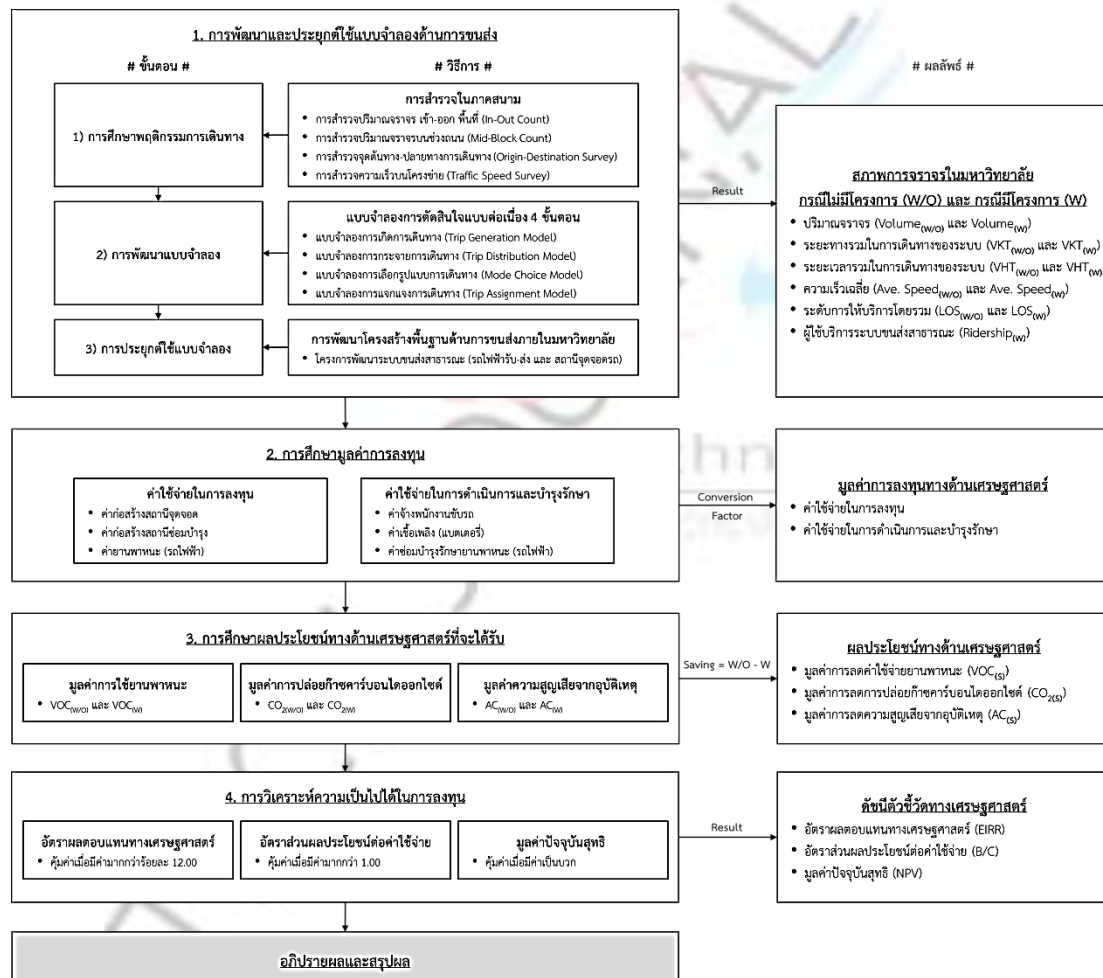
2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

2.1 เพื่อนำเสนอวิธีการพัฒนาแบบจำลองแบบต่อเนื่องในการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการลงทุนโครงสร้างพื้นฐานด้านการขนส่งในมหาวิทยาลัย

2.2 เพื่อวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการลงทุนระบบขนส่งสาธารณะในมหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม

3. วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการพัฒนาแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการลงทุนโครงสร้างพื้นฐานด้านการขนส่งในมหาวิทยาลัย โดยมีกรณีศึกษาเป็นมหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม ซึ่งแบบจำลองที่จะพัฒนาเป็นการนำแบบจำลองการตัดสินใจแบบต่อเนื่อง 4 ขั้นตอน มาประยุกต์ใช้ร่วมกับการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ โดยมีวิธีดำเนินการ 4 ขั้นตอน ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 กรอบแนวคิดการพัฒนาแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการลงทุน

3.1 การพัฒนาและประยุกต์ใช้แบบจำลองด้านการขนส่ง

แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนย่อย โดยมีขอบเขตการศึกษาครอบคลุมพื้นที่ทั้งมหาวิทยาลัย ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1) การศึกษาพฤติกรรมการเดินทาง

ขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมการเดินทางของนักศึกษาและบุคลากรภายในมหาวิทยาลัย โดยการสำรวจในภาคสนาม 4 อย่าง ครอบคลุมพื้นที่ทั้งมหาวิทยาลัย (Craig, S., 2009) ได้แก่ 1) การสำรวจปริมาณจราจร เข้า-ออก พื้นที่ (In-Out Count) จำนวน 3 จุด และ 2) การสำรวจปริมาณจราจรบนช่วงถนน (Mid-Block Count) จำนวน 9 จุด โดยการนับปริมาณรถแบบแยกประเภท (7:00 น. – 19:00 น., 12 ชั่วโมง) ซึ่งครอบคลุมช่วงเวลาที่มีการเดินทางภายในมหาวิทยาลัย โดยแบ่งประเภทรถออกเป็น 5 ประเภท ได้แก่ รถจักรยาน 2 ล้อ/3 ล้อ รถจักรยานยนต์/สามล้อเครื่อง รถยนต์นั่งส่วนบุคคล รถตู้/รถไฟฟ้า และรถขนาด 3) การสำรวจจุดต้นทาง-ปลายทาง การเดินทาง (O-D Survey) ของนักศึกษาและบุคลากรภายในมหาวิทยาลัย จำนวน 2,000 ชุด หรือประมาณร้อยละ 12 ของประชากร (16,372 คน) ซึ่งมากกว่าการสุ่มตัวอย่างโดยใช้ความน่าจะเป็นแบบง่าย (Simple Random Sampling) ที่อ้างอิงตามคำแนะนำของ Taro Yamane (1973) ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 97 (1,041 ชุด หรือร้อยละ 6 ของประชากร) เพื่อให้ได้ข้อมูลที่เพียงพอต่อการวิเคราะห์ และ 4) การสำรวจความเร็วบนโครงข่าย (Traffic Speed Survey) จำนวน 9 จุด ซึ่งเป็นตำแหน่งเดียวกับการสำรวจปริมาณจราจรบนช่วงถนน โดยสำรวจจำนวน 100 ข้อมูล/จุด (จำนวนขั้นต่ำสำหรับหาความเร็วที่ 85 เปอร์เซ็นต์ไทล์) ด้วยปืนตรวจจับความเร็ว เพื่อนำข้อมูลไปใช้ในการปรับเทียบแบบจำลอง (Model Calibration) ให้มีความสอดคล้องกับสภาพพื้นที่ภายในมหาวิทยาลัย

2) การพัฒนาแบบจำลอง

ขั้นตอนนี้เป็นการนำข้อมูลที่ได้จากการศึกษาพฤติกรรมการเดินทางมาพัฒนาเป็นแบบจำลองการตัดสินใจแบบต่อเนื่อง 4 ขั้นตอน ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ได้รับการยอมรับและนิยมใช้เพื่อการวางแผนด้านการจราจรทั้งในประเทศ (Department of Highways, 2010; 2012) และต่างประเทศ (Brustlin, V.H., 2007; Steinhoff, M. & Harpring, J., 2008) โดยทำการปรับเทียบแบบจำลองให้มีความสอดคล้องกับสภาพการจราจรในพื้นที่ตามเกณฑ์ที่ยอมรับได้ของ Comsis Corporation (1983) เพื่อได้แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์สภาพการจราจรในอนาคตของพื้นที่ศึกษา (Ortúzar, J.D. & Willumsen, L.G., 1990) ซึ่งในการพัฒนาแบบจำลองแบ่งพื้นที่ศึกษาออกเป็น 23 พื้นที่ย่อย ครอบคลุมพื้นที่ทั้งมหาวิทยาลัย และประกอบด้วย 4 แบบ จำลองย่อยที่ต่อเนื่องกันมีรายละเอียดดังนี้

(1) แบบจำลองการเกิดการเดินทาง (Trip Generation Model) เป็นการวิเคราะห์ปริมาณการเดินทางออกและเข้าพื้นที่ย่อย (Trip Production and Trip Attraction) ที่สัมพันธ์กับข้อมูลพื้นฐานของแต่ละพื้นที่ย่อย ด้วยวิธีวิเคราะห์ความถดถอยแบบพหุคูณ (Multiple Linear Regression) ดังสมการที่ (1) เนื่องจากเป็นวิธีที่สะดวกในการปรับแก้ และสามารถตรวจสอบเปรียบเทียบอัตราการเดินทางที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรที่ใช้สร้างความสัมพันธ์ได้อย่างมีเหตุผล และน่าเชื่อถือ โดยระดับความสัมพันธ์ของตัวแปรในสมการแบบจำลองประเมินได้จากค่า Coefficient of Determination (R^2) และมีการตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์ไม่เท่ากับศูนย์ (T-Test) ที่ช่วงความเชื่อมั่น (Level of Confident) ที่ร้อยละ 95

$$Y = a_1X_1 + a_2X_2 + \dots + a_nX_n + C \quad (1)$$

โดยที่ Y = ตัวแปรตาม ในที่นี้คือ ปริมาณการเดินทางทั้งหมดของพื้นที่ย่อย (PCU/วัน)
 $X_1, \dots, X_n$ = ตัวแปรอิสระ ในที่นี้คือ ข้อมูลพื้นฐานของพื้นที่ เช่น จำนวนหลังคาเรือน ที่นั่งนักเรียน
 $a_1, \dots, a_n$ = สัมประสิทธิ์ของตัวแปรอิสระ

(2) แบบจำลองการกระจายการเดินทาง (Trip Distribution Model) เป็นการวิเคราะห์ว่าปริมาณการเดินทางที่เกิดขึ้นต้องการจะเดินทางไปไหนและเดินทางมาจากที่ใด ด้วยวิธีแบบจำลองความโน้มถ่วงแบบข้อจำกัด 2 ทาง (Doubly Constraint Gravity Model) ซึ่งเป็นเทคนิคการกระจายการเดินทางด้วยค่าความต้านทาน (Friction) ได้แก่ เวลา และระยะทาง ในการเดินทางของคู่พื้นที่ย่อยใด ๆ ดังสมการที่ (2) และ (3)

$$T_{ij} = \alpha_i \cdot \beta_j \cdot P_i \cdot A_j \cdot F(c_{ij}) \quad (2)$$

$$F(c_{ij}) = c_{ij}^a \cdot \exp(b \cdot c_{ij}) \quad (3)$$

โดยที่ T_{ij} = ปริมาณการเดินทางจากพื้นที่ย่อย i ไปยังพื้นที่ย่อย j (PCU/วัน)
 P_i = ปริมาณการเกิดการเดินทางทั้งหมดของพื้นที่ย่อย i (PCU/วัน)
 A_j = ปริมาณการดึงดูดการเดินทางทั้งหมดของพื้นที่ย่อย j (PCU/วัน)
 $F(c_{ij})$ = ฟังก์ชันค่าใช้จ่ายในการเดินทางระหว่างพื้นที่ย่อย i และ พื้นที่ย่อย j (บาท)
 α_i, β_j = ค่าเฉพาะการปรับสมดุล (Balancing Factor) ของแถว i และ สดมภ์ j
 c_{ij} = ค่าใช้จ่ายในการเดินทางระหว่างพื้นที่ย่อย i และ พื้นที่ย่อย j (บาท/นาท)
 a, b = ค่าปรับเทียบแบบจำลอง

(3) แบบจำลองการเลือกรูปแบบการเดินทาง (Mode Choice Model) เป็นการวิเคราะห์พฤติกรรมการตัดสินใจเลือกรูปแบบการเดินทาง ด้วยวิธีแบบจำลองโลจิต (Logit Model) ซึ่งเป็นการพิจารณาอรรถประโยชน์หรือความพึงพอใจ (Utility) ของผู้เดินทางที่ได้รับจากแต่ละทางเลือก (McFadden, D., 2001) โดยรูปแบบการเดินทางประกอบด้วย เดิน จักรยาน จักรยานยนต์ รถยนต์ และรถขนส่งสาธารณะ ดังสมการที่ (4) และ (5)

$$P_n(i) = \frac{e^{U_{in}}}{\sum_{j \in C_m} e^{U_{jn}}} \quad (4)$$

$$U = aT + bC + c \quad (5)$$

โดยที่ $P_n(i)$ = ความน่าจะเป็นของผู้ที่เลือกเดินทางลำดับที่ n เลือกยี่ห้อ i

U_n = อรรถประโยชน์ของทางเลือก i ของผู้เลือกคนที่ n

C_m = จำนวนของทางเลือกทั้งหมด

j = ทางเลือกที่ j (เช่น เดิน จักรยาน รถมอเตอร์ เป็นต้น)

T = ระยะเวลาในการเดินทางของทางเลือก (นาที)

C = ค่าใช้จ่ายในการเดินทางของทางเลือก (บาท)

a, b = ค่าสัมประสิทธิ์ (ค่าปรับเทียบแบบจำลอง)

c = ค่าคงที่

(4) แบบจำลองการแจกแจงการเดินทาง (Trip Assignment Model) เป็นการวิเคราะห์เพื่อจัดแบ่ง (Assignment) ปริมาณการเดินทางระหว่างพื้นที่ย่อยใด ๆ ที่เกิดขึ้นลงในโครงข่ายถนนและระบบขนส่งที่มีอยู่ ด้วยวิธีสมดุลของผู้เดินทาง (User Equilibrium) ซึ่งเป็นเทคนิควิธีที่ทำให้เวลาการเดินทาง (หรือ ค่าใช้จ่าย) บนเส้นทางต่าง ๆ ระหว่างคู่โหนดเดียวกันให้อยู่ในสภาพสมดุล ดังสมการที่ (6)

$$\text{Min} \sum_{a \in A} \int_0^{V_a} C_a(\omega) d\omega \quad (6)$$

โดยที่ C_a = ค่าใช้จ่ายในการเดินทาง บน Link a

3) การประยุกต์ใช้แบบจำลอง

ขั้นตอนนี้เป็น การนำแบบจำลองที่ผ่านการปรับเทียบและตรวจสอบความสอดคล้องกับสภาพพื้นที่ภายในมหาวิทยาลัยแล้วมาประยุกต์ใช้เพื่อวิเคราะห์คาดการณ์สภาพการจราจร ได้แก่ ปริมาณจราจร (Volume) ระยะทางรวมในการเดินทางของระบบ (Vehicle-Kilometers of Travel: VKT) ระยะเวลาในการเดินทางของระบบ (Vehicle-Hours of Travel: VHT) และความเร็วเฉลี่ย (Average Speed) ทั้งในกรณีไม่มีโครงการ (Without Project: W/O) และกรณีมีโครงการ (With Project: W) ซึ่งสามารถนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบ เพื่อหาผลประโยชน์ทางเศรษฐศาสตร์ที่จะได้รับในขั้นตอนต่อไปได้ โดยในกรณีศึกษาได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองกับสถานการณ์ที่มีโครงการพัฒนาระบบขนส่งสาธารณะในมหาวิทยาลัย ประกอบด้วย การจัดเส้นทางเดินรถไฟฟ้าที่ได้จากการประยุกต์ตัวแบบปัญหาการเดินทางของเซลส์แมน หรือ Travel Salesman Problem (Winyangkul, S., et al., 2014) และกำหนดเส้นทางลงในระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ หรือ Geographic Information System (Sawai, P., 2016) จำนวน 2 เส้นทาง เพื่อให้บริการรับ-ส่งบุคลากรในมหาวิทยาลัยโดยเส้นทางวงรอบเล็ก (สายสีเหลือง) มีระยะทาง 2.3 กิโลเมตร ใช้รถไฟฟ้าจำนวน 2 คัน และเส้นทางวงรอบใหญ่ (สายสีเขียว) มีระยะทาง 6.0 กิโลเมตร ใช้รถไฟฟ้าจำนวน 5 คัน รวมถึงการก่อสร้างสถานีจุดจอดรถและสถานีซ่อมบำรุง จำนวน 14 จุด และ 1 จุด ตามลำดับ

3.2 การศึกษามูลค่าการลงทุน

ขั้นตอนนี้เป็น การประเมินมูลค่าการลงทุนและค่าใช้จ่ายที่จะเกิดขึ้นทั้งหมด เนื่องจากการพัฒนาโครงการฯ ประกอบไปด้วยค่าใช้จ่ายหลัก 2 ส่วน คือ 1) ค่าใช้จ่ายในการลงทุน และ 2) ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการและบำรุงรักษา ซึ่งค่าใช้จ่ายเหล่านี้เป็นมูลค่าทางการเงินแล้วทำการปรับให้เป็นมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ (Economic Cost) ด้วยตัวคูณประกอบ (Conversion Factor) สำหรับประเทศไทย (Comsis Corporation, 1983) โดยในกรณีศึกษา ค่าใช้จ่ายในการลงทุน ประกอบด้วย ค่าก่อสร้างสถานีจุดจอด ค่าก่อสร้างสถานีซ่อมบำรุง และ ค่ายานพาหนะ (รถไฟฟ้า) ส่วนค่าใช้จ่ายในการดำเนินการและบำรุงรักษา ประกอบด้วย ค่าจ้างพนักงานขับรถ ค่าเชื้อเพลิง (แบตเตอรี่) และค่าบำรุงรักษายานพาหนะ ซึ่งได้จากการสืบราคาตามหลักการของสำนักงานประมาณ

3.3 การศึกษาผลประโยชน์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ที่จะได้รับ

ขั้นตอนนี้เป็น การประเมินผลประโยชน์ที่ทำให้ค่าใช้จ่ายในด้านต่าง ๆ ลดลง รวมถึงผลประโยชน์ที่เกี่ยวกับเศรษฐกิจของพื้นที่ที่ได้รับอิทธิพลดีขึ้นและคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้น โดยเป็นผลประโยชน์ทางตรง (Direct Benefit) ที่สามารถคิดเป็นเงินตรา (Tangible Benefit) โดยหาได้จากมูลค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการคาดการณ์สภาพการจราจรกรณีไม่มีโครงการ (W/O) ลบด้วย กรณีมีโครงการ (W) ประกอบด้วย มูลค่าการลดค่าใช้จ่ายยานพาหนะ (Vehicle Operation Cost Saving: $VOC_{(S)}$) มูลค่าการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Dioxide Emissions Saving: $CO_{2(S)}$) และมูลค่าการลดความสูญเสียจากอุบัติเหตุ (Accident Cost Saving: $AC_{(S)}$) ซึ่งมีรูปแบบดังสมการ (7) ถึง (9) ตามลำดับ

$$VOC_{(S)} = (VKT_{(W/O)} * VOC_{(W/O)}) - (VKT_{(W)} * VOC_{(W)}) \quad (7)$$

$$CO_{2(S)} = (VKT_{(W/O)} * CO_{2(W/O)}) - (VKT_{(W)} * CO_{2(W)}) \quad (8)$$

$$AC_{(S)} = (VKT_{(W/O)} * AC_{(W/O)}) - (VKT_{(W)} * AC_{(W)}) \quad (9)$$

เมื่อ $VOC_{(S)}$ = มูลค่าการลดค่าใช้จ่ายยานพาหนะ (บาท)

$VOC_{(W/O)}$ = มูลค่าการใช้จ่ายยานพาหนะกรณีไม่มีโครงการ (บาท/กม.)

$VOC_{(W)}$ = มูลค่าการใช้จ่ายยานพาหนะกรณีมีโครงการ (บาท/กม.)

$CO_{2(S)}$ = มูลค่าการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (บาท)

$CO_{2(W/O)}$ = มูลค่าการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กรณีไม่มีโครงการ (บาท/กม.)

$CO_{2(W)}$ = มูลค่าการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กรณีมีโครงการ (บาท/กม.)

$AC_{(S)}$ = มูลค่าการลดความสูญเสียจากอุบัติเหตุ (บาท)

$AC_{(W/O)}$ = มูลค่าความสูญเสียจากอุบัติเหตุกรณีไม่มีโครงการ (บาท/กม.)

$AC_{(W)}$ = มูลค่าความสูญเสียจากอุบัติเหตุกรณีมีโครงการ (บาท/กม.)

$VKT_{(W/O)}$ = ระยะทางรวมในการเดินทางของระบบกรณีไม่มีโครงการ (PCU-กม./ปี)

$VKT_{(W)}$ = ระยะทางรวมในการเดินทางของระบบกรณีมีโครงการ (PCU-กม./ปี)

3.4 การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการลงทุน

ขั้นตอนนี้เป็น การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการลงทุน โดยการพิจารณามูลค่าการลงทุนทางเศรษฐกิจของโครงการที่จะเกิดขึ้น เปรียบเทียบกับผลประโยชน์ทางเศรษฐกิจที่จะได้รับจากการพัฒนาโครงการตลอดระยะเวลา 10 ปี ด้วยดัชนีตัวชี้วัดทางเศรษฐศาสตร์ ได้แก่ อัตราผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์ (Economic Internal Rate of Return: EIRR) อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อค่าใช้จ่าย (Benefit Cost Ratio: B/C) และ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) ซึ่งมีรูปแบบดังสมการ (10) ถึง (12) ตามลำดับ (Tubpun, Y., 2008)

$$EIRR = i ; \left(NPV = \sum_{t=1}^n \frac{B_t - C_t}{(1+i)^t} = 0 \right) \quad (10)$$

$$B/C = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{B_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+i)^t}} \quad (11)$$

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{B_t - C_t}{(1+i)^t} \quad (12)$$

เมื่อ EIRR = อัตราผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์ (%) หรืออัตราส่วนลดที่ทำให้ค่า NPV ของการลงทุนเป็น 0 บาท (คําค่าเมื่อมีค่ามากกว่าอัตราส่วนลดร้อยละ 12.00) อ้างอิงตามธนาคารโลกและสำนักงานคณะกรรมการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ (คสช.)

B/C = อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อค่าใช้จ่าย (คําค่าเมื่อมีค่ามากกว่า 1.00)

NPV = มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (บาท) (คําค่าเมื่อมีค่าเป็นบวก)

B_t = ผลประโยชน์จากโครงการในปีที่ t (บาท/ปี)

C_t = ค่าใช้จ่ายของโครงการในปีที่ t (บาท/ปี)

i = อัตราดอกเบี้ยหรืออัตราส่วนลด (12 %/ปี)

n = อายุของโครงการ (10 ปี)

4. ผลการวิจัย

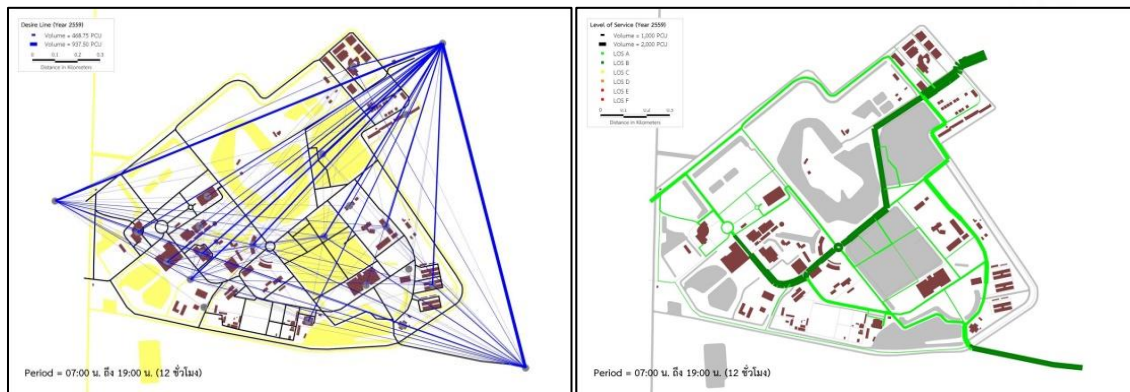
4.1 ผลการพัฒนาและประยุกต์ใช้แบบจำลองด้านการขนส่ง

ผลการศึกษาในกรณีศึกษามหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงครามมีรายละเอียดดังนี้

1) ผลการศึกษาพฤติกรรมการเดินทาง

ปัจจุบันมหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงครามมีปริมาณการเดินทางประมาณ 21,901 เที่ยวคน/วัน หรือ 13,774 PCU/วัน ระยะทางรวมในการเดินทางของระบบ (VKT) เท่ากับ 16,762 PCU-กิโลเมตร/วัน ระยะเวลารวมในการเดินทางของระบบ (VHT) เท่ากับ 335 PCU-ชั่วโมง/วัน ความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 50.00 กิโลเมตร/ชั่วโมง และมีสภาพการจราจรหรือระดับการให้บริการโดยรวมอยู่ในระดับ

LOS B ซึ่งเป็นระดับที่กระแสดำเนินการมีสภาพอยู่ตัว ผู้ขับที่สามารถเลือกใช้ความเร็ว ได้ตามสมควร โดยมีพฤติกรรมเดินทางดังแสดงในภาพที่ 3



(ก) ทิศทางการเดินทาง

(ข) สภาพการจราจร

ภาพที่ 3 ผลการศึกษาพฤติกรรมเดินทางภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม

2) ผลการพัฒนาแบบจำลอง

เมื่อนำผลสำรวจในภาคสนามมาพัฒนาและเปรียบเทียบแบบจำลอง ได้แบบจำลองดังนี้

(1) แบบจำลองการเกิดการเดินทาง (Trip Generation Model) พบว่า ปริมาณการเกิดการเดินทางจะขึ้นอยู่กับปริมาณการรองรับผู้ใช้งาน (ที่นั่งเรียน) ซึ่งมีความสัมพันธ์ของตัวแปร (R^2) อยู่ในเกณฑ์ดี ส่วนผลการตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์ไม่เท่ากับศูนย์ (T-Test) พบว่า ผ่านเกณฑ์ที่ช่วงความเชื่อมั่น (Level of Confident) ที่ร้อยละ 95 (มีค่าเกิน 1.96) โดยแบบจำลองแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการพัฒนาแบบจำลองการเกิดการเดินทาง

แบบจำลอง	สมการ	R^2	T-Statistic
1) การเกิดการเดินทาง	$P_i = 0.1908 X + 257.9914$	0.8883	10.6104
2) การดึงดูดการเดินทาง	$A_j = 0.3367 X + 221.8204$	0.7909	8.5645

โดยที่ P_i = ปริมาณการเกิดการเดินทางทั้งหมดของพื้นที่ย่อย i (Trip Production), PCU/วัน

A_j = ปริมาณการดึงดูดการเดินทางทั้งหมดของพื้นที่ย่อย j (Trip Attraction), PCU/วัน

X = ปริมาณการรองรับผู้ใช้งาน (ที่นั่งเรียน), ที่นั่ง

T-Statistic = ค่าสัมประสิทธิ์ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 2-tails > $|t_{0.025}|$ (1.96)

หมายเหตุ: PCU (Passenger Car Unit) คือ เทียบเท่ารถยนต์ส่วนบุคคล

(2) แบบจำลองการกระจายการเดินทาง (Trip Distribution Model) พบว่า แบบจำลองแบบ Doubly Constraint Gravity Model ที่ใช้เคราะห์หาปริมาณการเดินทางระหว่างคู่โซน และ ฟังก์ชันค่าใช้จ่ายในการเดินทางระหว่างพื้นที่ย่อย (Exploit Form of Impedance Function) ที่ได้จากการปรับเทียบ (Calibrate) กับพฤติกรรมเดินทางในปัจจุบัน มีรูปแบบสมการดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการพัฒนาแบบจำลองการกระจายการเดินทาง

แบบจำลอง	สมการ
ฟังก์ชันค่าใช้จ่ายในการเดินทางระหว่างพื้นที่ย่อย	$F(c_{ij}) = c_{ij}^{0.0001} \cdot \exp(-0.1489 \cdot c_{ij})$
โดยที่ $F(c_{ij})$ = ฟังก์ชันค่าใช้จ่ายในการเดินทางระหว่างพื้นที่ย่อย i และ พื้นที่ย่อย j (บาท)	
c_{ij} = ค่าใช้จ่ายในการเดินทางระหว่างพื้นที่ย่อย i และ พื้นที่ย่อย j (บาท/นาท)	

(3) แบบจำลองการเลือกรูปแบบการเดินทาง (Mode Choice Model) พบว่าแบบจำลอง ให้ค่า Likelihood Ratio Index (ρ^2) ดีที่สุด ที่ระดับ 0.302 และสามารถอธิบายพฤติกรรมการเดินทางได้เป็นอย่างดี ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการพัฒนาแบบจำลองการเลือกรูปแบบการเดินทาง

แบบจำลอง	สมการ
1) อรรถประโยชน์ (เดิน: W)	$U_W = -0.0007 T_W$
2) อรรถประโยชน์ (จักรยาน: B)	$U_B = -0.0096 T_B + 0.8780$
3) อรรถประโยชน์ (รถจักรยานยนต์: M)	$U_M = -0.0642 T_M - 0.0338 C_M + 3.9706$
4) อรรถประโยชน์ (รถยนต์: C)	$U_C = -0.1131 T_C - 0.0408 C_C + 2.2498$
5) อรรถประโยชน์ (รถขนส่งสาธารณะ: P)	$U_P = -0.0222 T_P - 1.5598 C_P + 1.5598$

โดยที่ U = อรรถประโยชน์ของทางเลือก

T = ระยะเวลาในการเดินทางของทางเลือก (นาท)

C = ค่าใช้จ่ายในการเดินทางของทางเลือก (บาท)

(4) แบบจำลองการแจกแจงการเดินทาง (Trip Assignment Model) จะแจกแจงปริมาณจราจรบนโครงข่ายระบบคมนาคม ด้วยวิธีการแจกแจงแบบสมดุลของผู้เดินทาง (User Equilibrium) โดยมีรูปแบบสมการดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการพัฒนาแบบจำลองการแจกแจงการเดินทาง

แบบจำลอง	สมการ
การแจกแจงการเดินทาง	$\text{Min} \sum_{a \in A} \int_0^{V_a} C_a(\omega) d\omega$ $\sum_{r \in R_{ij}} f_r^{ij} = q_{ij}, \forall ij \in I, J$ $f_r^{ij} \geq 0, \forall ij \in R_{ij}, ij \in I, J$

โดยที่ C_a = ค่าใช้จ่ายในการเดินทาง บน Link a (บาท)

A = เซ็ตของ a ทั้งหมด

f_r^{ij} = ปริมาณระหว่างคูโชน i และ j บนเส้นทาง r (PCU/วัน)

q_{ij} = ปริมาณการเดินทางระหว่างคูโชน i และ j (PCU/วัน)

3) ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง

เมื่อนำแบบจำลองที่ได้มาประยุกต์ใช้กับสถานการณ์ที่มีโครงการพัฒนาระบบขนส่งสาธารณะในมหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม พบว่า สภาพการจราจรภายในมหาวิทยาลัยมีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม โดยผลการวิเคราะห์สภาพการจราจรในกรณีไม่มีโครงการ และมีโครงการแสดงในตารางที่ 5 และภาพที่ 6

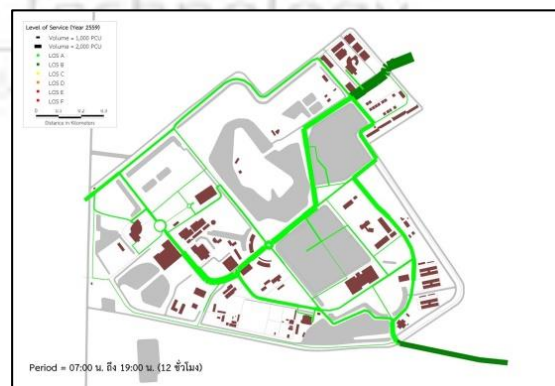
ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์สภาพการจราจรในมหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม

สภาพการจราจร	หน่วย	กรณี	
		ไม่มีโครงการ (W/O)	มีโครงการ (W)
1) ปริมาณจราจร (Volume)	PCU/วัน	13,774	12,714
2) ระยะทางรวมในการเดินทางของระบบ (VKT)	PCU-กม./วัน	16,762	15,093
3) ระยะเวลารวมในการเดินทางของระบบ (VHT)	PCU-ชม./วัน	335	301
4) ความเร็วเฉลี่ย (Ave. Speed)	กม./ชม.	50.00	50.14
5) ระดับการให้บริการโดยรวม (LOS)	-	LOS B	LOS A
6) ผู้ใช้บริการระบบขนส่งสาธารณะ (Ridership)	เที่ยวคน/วัน	-	2,041

หมายเหตุ: PCU (Passenger Car Unit) คือ เทียบเท่ารถยนต์ส่วนบุคคล



(ก) กรณีไม่มีโครงการ (W/O)



(ข) กรณีมีโครงการ (W)

ภาพที่ 6 ผลการวิเคราะห์สภาพการจราจรในมหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม

4.2 ผลการศึกษามูลค่าการลงทุน

มูลค่าการลงทุนโครงการพัฒนาระบบขนส่งสาธารณะในมหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงครามตลอดระยะเวลาการวิเคราะห์ 10 ปี ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 มูลค่าการลงทุนโครงการพัฒนาระบบขนส่งสาธารณะในมหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม

รายการ		จำนวน	หน่วย	มูลค่า ทางการเงิน (บาท)	ตัวคูณ ประกอบ	มูลค่า ทาง เศรษฐศาสตร์ (บาท)
1) ค่าใช้จ่าย ในการลงทุน	- ค่าสถานีจุดจอดรถ	14	จุด	1,540,000	0.88	1,355,200
	- ค่าสถานีซ่อมบำรุง	1	สถานี	1,000,000	0.88	880,000
	- ค่ายานพาหนะ	7	คัน	13,300,000	0.95	12,635,000
	- ค่าจ้างพนักงานขับ รถ	7	คน	12,600,000	1.00	12,600,000
2) ค่าใช้จ่าย ในการ ดำเนินการ และ บำรุงรักษา	- ค่าเชื้อเพลิง	7	คัน	2,128,000	1.00	2,128,000
	- ค่าบำรุงยานพาหนะ ทุก 1 ปี	7	คัน	1,293,600	1.00	1,293,600
	- ค่าบำรุงยานพาหนะ ทุก 2 ปี	7	คัน	2,833,600	1.00	2,833,600
มูลค่ารวม				34,695,200		33,725,400

4.3 ผลการศึกษาผลประโยชน์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ที่จะได้รับ

ผลประโยชน์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ที่จะได้รับจากโครงการพัฒนาระบบขนส่งสาธารณะในมหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงครามตลอดระยะเวลาการวิเคราะห์ 10 ปี ดังแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ผลประโยชน์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ที่จะได้รับจากโครงการพัฒนาระบบขนส่งสาธารณะ

ระยะเวลา (ปี)	มูลค่าความประหยัด/ผลประโยชน์ทางหลวง (บาท/ปี)			
	VOC _(S)	CO _{2(S)}	AC _(S)	รวม
1	4,964,531	402,036	82,147	5,366,567
10	49,645,310	4,020,360	821,470	53,665,670

4.4 ผลการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการลงทุน

ผลการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการลงทุนโครงการพัฒนาระบบขนส่งสาธารณะในมหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงครามตลอดระยะเวลาการวิเคราะห์ 10 ปี ดังแสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ผลประโยชน์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ที่จะได้รับจากโครงการพัฒนาระบบขนส่งสาธารณะ

ดัชนีชี้วัดทางเศรษฐศาสตร์	หน่วย	ผลการวิเคราะห์
1) อัตราผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์ (EIRR)	%	32.95
2) อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อค่าใช้จ่าย (B/C)	-	1.38
3) มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV)	บาท	7,593,405

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

การพัฒนาแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการลงทุนโครงสร้างพื้นฐานด้านการขนส่งในมหาวิทยาลัย ที่นำแบบจำลองการตัดสินใจแบบต่อเนื่อง 4 ขั้นตอน มาประยุกต์ใช้ร่วมกับการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ สามารถวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการลงทุนและนำไปสู่ข้อมูลที่ใช้ประกอบการตัดสินใจในการลงทุนได้ ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อพัฒนาแบบจำลองการตัดสินใจแบบต่อเนื่อง 4 ขั้นตอน พบว่าแบบจำลองสามารถจำลองพฤติกรรมการเดินทางได้สอดคล้องกับพฤติกรรมการเดินทางในปัจจุบันที่จากการสำรวจในภาคสนาม ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่ได้มีความเหมาะสม ที่จะนำมาใช้ในการคาดการณ์พฤติกรรมการเดินทาง ในกรณีที่มีการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านการขนส่งในอนาคตของมหาวิทยาลัย และเมื่อประยุกต์ใช้แบบจำลองดังกล่าวกับสถานการณ์ที่มีการพัฒนาระบบขนส่งสาธารณะ ในมหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม ตลอดระยะเวลาการวิเคราะห์ 10 ปี พบว่า การพัฒนาระบบขนส่งสาธารณะ มีความคุ้มค่าในการลงทุน (34,695,200 บาท/10 ปี) เนื่องจากมีอัตราผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์ (EIRR) เท่ากับร้อยละ 32.95 ซึ่งมีความสูงกว่าอัตราส่วนลดร้อยละ 12.00 ที่อ้างอิงตามธนาคารโลกและสำนักงานคณะกรรมการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ (คสช.) อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อค่าใช้จ่าย (B/C) เท่ากับ 1.38 (มากกว่า 1.00) แสดงให้เห็นว่าโครงการพัฒนาฯ มีผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์มากกว่ามูลค่าการลงทุน และมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) เท่ากับ 7,593,405 บาท (มีค่าเป็นบวก) แสดงให้เห็นว่าโครงการพัฒนาฯ ทำให้เกิดกำไรทางเศรษฐศาสตร์ขึ้น เนื่องจาก NPV มีค่าเท่ากับผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์หักมูลค่าการลงทุน นอกจากนี้แบบจำลองด้านการจราจรยังคาดการณ์ว่าจะมีผู้มาใช้บริการระบบขนส่งสาธารณะฯ ประมาณ 2,041 เที่ยวคน/วัน ซึ่งเป็นการพัฒนาที่ช่วยให้สภาพการจราจรภายในมหาวิทยาลัยดีขึ้น เนื่องจากระดับการให้บริการโดยรวมเปลี่ยนจากระดับ LOS B (ก่อน) เป็นระดับ LOS A (หลัง) ซึ่งเป็นระดับการให้บริการที่กระแสรถมีสภาพอิสระ มีความเร็วสูง ปริมาณการจราจรน้อย ผู้ขับขี่สามารถเลือกใช้ความเร็วได้อย่างอิสระ และไม่มีการจราจรติดขัด

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม และกองนโยบายและแผน สำนักงานอธิการบดี มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม ที่ให้ความอนุเคราะห์ในด้านข้อมูลและองค์ความรู้ต่าง ๆ ตลอดจนข้อเสนอแนะอันเป็นประโยชน์ต่อการทำการวิจัยในครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- Brustlin, V.H. (2007). *Transportation Demand Management Plan*. Virginia: University of Virginia.
- Craig, S. (2009). *A Survey of Transportation Demand Management at Colleges and Universities in British Columbia*. Camosun.
- Comsis Corporation. (1983). *UTPS Highway Network Development Guide*. Federal Highway Administration, US Department of Transportation.

- Department of Highways. (2010). **Final Report: Inter-City Motorway Pattaya-Map Ta Phut Project**. Ministry of Transport. (in Thai)
- _____. (2012). **Final Report: Highway linking Lampang - Dichai, Phrae Project**. Ministry of Transport. (in Thai)
- Hatzopoulou, M. & Miller, J. (2009). **Transport policy evaluation in metropolitan areas: the role of modelling in decision-making**. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 43, 323–338.
- McFadden, D. (2001). Economic Choices, **American Economic Review**, 91, 351-378.
- Meyer, M.D. & Miller, E.J. (2001). **Urban Transportation Planning: A Decision-Oriented Approach**. New York: McGraw-Hill.
- Ortúzar, J.D. & Willumsen, L.G. (1990). **Modeling Transport**. New York: John Wiley & Sons.
- Sawai, P. (2016). Geographic Information System for Public Transportation Service in Nakhon Sawan Municipality, Thailand. **Industrial Technology Lampang Rajabhat University Journal**, 9(1), 49-60. (in Thai)
- Steinhoff, M. & Harpring, J. (2008). **Transportation and Sustainability on the Indiana University**. Bloomington: Bloomington Campus, Indiana University.
- Tangvitoontham, N. & Chaiwat, P. (2012). Economic Feasibility Evaluation of Government Investment Project by Using Cost Benefit Analysis: A Case Study of Domestic Port (Port A), Laem-Chabang Port, Chonburi Province. **Procedia Economics and Finance**, 2, 307-314.
- Tubpun, Y. (2008). **Project Evaluation Based on Economics**. Pathumthani: Thammasat University. 180. (in Thai)
- Winyangkul, S., et al. (2014). An Application of the Travelling Salesman Problem Case Study: Routing for Streetcar Tour of the Chiang Rai. **Industrial Technology Lampang Rajabhat University Journal**, 7(2), 85-97. (in Thai)

ความยาวท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสมสำหรับระบบเก็บกักความร้อน แบบเปลี่ยนสถานะ

Optimal Heat Exchanger Pipe Length for a Phase Change Heat Storage System

ฉันทมาส กาศสนุก^{1*}, ตามร บัณชรัตน์² และคงเดช พะสินาม³

^{1,3} สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร คณะเทคโนโลยีการเกษตรและอาหาร มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม

156 หมู่ 5 ต.พลาชุมพล อ.เมือง จ.พิษณุโลก 65000 โทร 0-5526-7080

โทรสาร 0-5526-7081 E-mail: phasinam@psru.ac.th

² สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 239 ถ.ห้วยแก้ว ต.สุเทพ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อหาความยาวท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสมสำหรับระบบเก็บกักความร้อนที่ใช้พาราฟินเป็นสารเก็บกักความร้อนแบบเปลี่ยนสถานะ มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าผลกระทบจากพาราฟินที่แข็งตัวเป็นฉนวนรอบ ๆ ท่อแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อให้สามารถผลิตอากาศร้อนที่มีอุณหภูมิสูงที่สุดตลอดช่วงการใช้งานที่กำหนด ระบบเก็บกักความร้อนประกอบด้วยถังขนาด $35 \times 35 \times 150$ เซนติเมตร บรรจุพาราฟินเหลว 150 กิโลกรัม และติดตั้งท่ออากาศสำหรับแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งทำจากท่อทองแดงอยู่ภายในถังทำการทดลองโดยใช้ท่อ 2 ขนาด คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.25 เซนติเมตร และ 1.50 เซนติเมตร ทำการทดลองที่อัตราการไหลของอากาศ 75 ลิตรต่อวินาที อุณหภูมิของพาราฟินเหลวเริ่มต้นที่ 60 องศาเซลเซียส กำหนดระยะเวลาการทดสอบการถ่ายเทความร้อนเท่ากับ 4 ชั่วโมง จากการทดลองพบว่า ในช่วงเวลา 4 ชั่วโมง ของการผลิตอากาศร้อน พาราฟินจะเกิดการเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งหุ้มรอบท่อทองแดงโดยเริ่มจากปลายท่อด้านขาเข้าของอากาศทำให้เกิดเป็นฉนวนความร้อนและทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนลดลง ดังนั้นจึงต้องใช้ความยาวท่อที่ยาวขึ้นในการถ่ายเทความร้อน จากผลการทดลองพบว่า ท่อแลกเปลี่ยนความร้อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.25 เซนติเมตร และ 1.50 เซนติเมตร ต้องการความยาวท่อ 900 เซนติเมตร และ 700 เซนติเมตร ตามลำดับ เพื่อให้ได้อุณหภูมิของอากาศที่ทางออกสูงที่สุดตลอดระยะเวลา 4 ชั่วโมง และสามารถผลิตอากาศร้อนอุณหภูมิ 58 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหลของอากาศ 75 ลิตรต่อวินาที ผลจากพาราฟินที่เกิดการแข็งตัวเคลือบท่อแลกเปลี่ยนความร้อนส่งผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนลดลงร้อยละ 15 และร้อยละ 13.4 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับท่อเปล่า

คำสำคัญ: ระบบเก็บกักความร้อนชนิดพาราฟินเหลว, ความยาวท่อแลกเปลี่ยนความร้อน, การถ่ายเทความร้อน

Abstract

The objective of this research was to find an optimal length of heat-exchanged pipe used within a heat storage system that used paraffin as its phase change material. The objective was to compensate for the effects of hardening paraffin which acted as insulation around the pipe in order to produce the highest temperature of hot air

throughout the usage. The thermal storage system consists of a tank measuring 35×35×150 cm which contains 150 kg of liquid paraffin and which has internal copper piping installed as a heat exchanger. The study used 2 sizes of pipe with diameters of 1.25 cm and 1.5 cm. The experiments were conducted with an air flow rate of 75 LPM through the copper piping. The starting temperature of the liquid paraffin was 60°C. The period of the heat transfer test was 4 hours. From the experiment, during the four hours of hot air production, the paraffin would become solid and coat around the copper tubing, starting with the air inlet side, which caused thermal insulation and decreased the heat transfer rate. Therefore, a longer pipe length was required in order to transfer the heat. The results show that in order to obtain highest air temperature at the exit point, the heat exchange tubes with a diameter of 1.25 cm and 1.50 cm needed to be 900 cm and 700 cm long respectively. It could produce hot air with a temperature of 58°C at a rate of 75 LPM. When compared to an empty tube, the tube with a hardened paraffin coating had a reduced efficiency of heat transfer by 15% and 13.4% respectively.

Keywords: liquid paraffin of heat storage system, length of heat exchanger pipe, heat transfer

1. บทนำ

พลังงานเป็นสิ่งจำเป็นพื้นฐานสำหรับมนุษย์ แหล่งพลังงานส่วนใหญ่ที่ถูกนำมาใช้กันคือ แหล่งพลังงานจากฟอสซิล ซึ่งมีการลดลงอย่างต่อเนื่อง ก่อให้เกิดปัญหาตามมา เช่น ราคาน้ำมันแพง และราคาสินค้าเพิ่มสูงขึ้น รวมไปถึงภาวะโลกร้อน อันเนื่องมาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง ผลกระทบดังกล่าวจึงทำให้เกิดแนวคิดนำวัสดุเปลี่ยนสถานะ (PCM; Phase Change Material) มาใช้ เนื่องจากเป็นวัสดุที่ใช้พลังงานในการเปลี่ยนสถานะ คุณสมบัติของ PCM สามารถสะสมพลังงานความร้อนได้ในปริมาณมากขณะเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว และคายพลังงานที่สะสมออกมาในขณะที่เปลี่ยนสถานะกลับเป็นสถานะเริ่มต้น PCM จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงอุณหภูมิที่ต้องการ (Holasut et al., 2008; Malasai, S. & Holasut, 2017)

ปัจจุบัน PCM ถูกนำมาประยุกต์ใช้ เช่น การประยุกต์ใช้กับพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ ซึ่งพลังงานจากแสงอาทิตย์เป็นพลังงานจากธรรมชาติที่ได้เปล่า และสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างไม่มีวันหมด แต่เนื่องจากข้อจำกัดเรื่องแสงแดดมีเฉพาะในตอนกลางวัน ทำให้ต้องใช้พลังงานจากส่วนอื่นมาช่วยเสริมในการผลิตความร้อนในช่วงเวลาที่ไม่มีแสงแดด จึงมีแนวคิดในการเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบเก็บกักความร้อนแบบเปลี่ยนสถานะ เพราะจะทำให้การอบแห้งเป็นไปอย่างต่อเนื่อง ซึ่งระบบเก็บกักความร้อนจะทำหน้าที่เก็บความร้อนในช่วงเวลากลางวัน และคายความร้อนออกมาใช้ในการอบแห้งเมื่อไม่มีแสงแดด (Holasut & K. Kumwachara, 2010) เป็นการช่วยลดข้อจำกัดในเรื่องของเวลาในการอบแห้ง และสามารถใช้ความร้อนจากระบบเก็บกักความร้อนได้ต่อเนื่องเพิ่มขึ้น 4 ชั่วโมง (Sanchum, T. 2013) นอกจากนี้ความ

ยาวของท่อที่นำมาบรรจุอยู่ในระบบเก็บกักความร้อนจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อน โดยงานวิจัยส่วนใหญ่จะใช้ท่อตรงในการทดสอบ ซึ่งข้อจำกัดในการใช้งานจริงของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนคือมีพื้นที่จำกัด (Nakkaew, S. et al., 2013) จึงไม่เหมาะสมที่จะใช้ท่อตรงในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการพัฒนาประสิทธิภาพของระบบเก็บกักความร้อน โดยการศึกษาความยาวของท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสมสำหรับระบบเก็บกักความร้อนแบบใช้วัสดุเปลี่ยนสถานะ ซึ่งทำหน้าที่แลกเปลี่ยนความร้อนเมื่อวัสดุดังกล่าวเกิดการแข็งตัวจะเป็นฉนวน ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนลดลง ซึ่งการเก็บรักษาความร้อนจะได้พลังงานความร้อนในรูปของความร้อนแฝงไปใช้ประโยชน์ในการผลิตอากาศร้อน และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบเก็บกักความร้อนแบบเปลี่ยนสถานะ เพราะจะทำให้การอบแห้งเป็นไปอย่างต่อเนื่อง ซึ่งระบบเก็บกักความร้อนจะทำหน้าที่แลกเปลี่ยนความร้อนในช่วงเวลากลางวัน และคายความร้อนออกมาใช้ในการอบแห้งเมื่อไม่มีแสงแดด เป็นการช่วยลดข้อจำกัดในเรื่องของเวลาในการอบแห้ง

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

หาความยาวท่อที่เหมาะสมสำหรับระบบเก็บกักความร้อนเพื่อชดเชยผลกระทบจากพาราฟินที่แข็งตัวเป็นฉนวนรอบ ๆ ท่อแลกเปลี่ยนความร้อนให้สามารถผลิตอากาศร้อนที่มีอุณหภูมิสูงที่สุดตลอดช่วงการใช้งานที่กำหนด เมื่อใช้ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.25 และ 1.50 เซนติเมตร ตามลำดับ

3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุและอุปกรณ์

ระบบเก็บกักความร้อนของงานวิจัยนี้ประกอบด้วย ถังบรรจุพาราฟินรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด $35 \times 35 \times 150$ เซนติเมตร ถูกหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อน ฝาด้านบนถูกปิดด้วยแผ่นอะคริลิกหนา 0.2 เซนติเมตร ภายในระบบเก็บกักความร้อนบรรจุพาราฟิน 150 กิโลกรัม และท่อแลกเปลี่ยนความร้อนทำจากท่อทองแดงขัดเป็นวงกลมคล้ายสปริง 2 ขนาด คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.25 เซนติเมตร และ 1.5 เซนติเมตร ดังภาพที่ 1

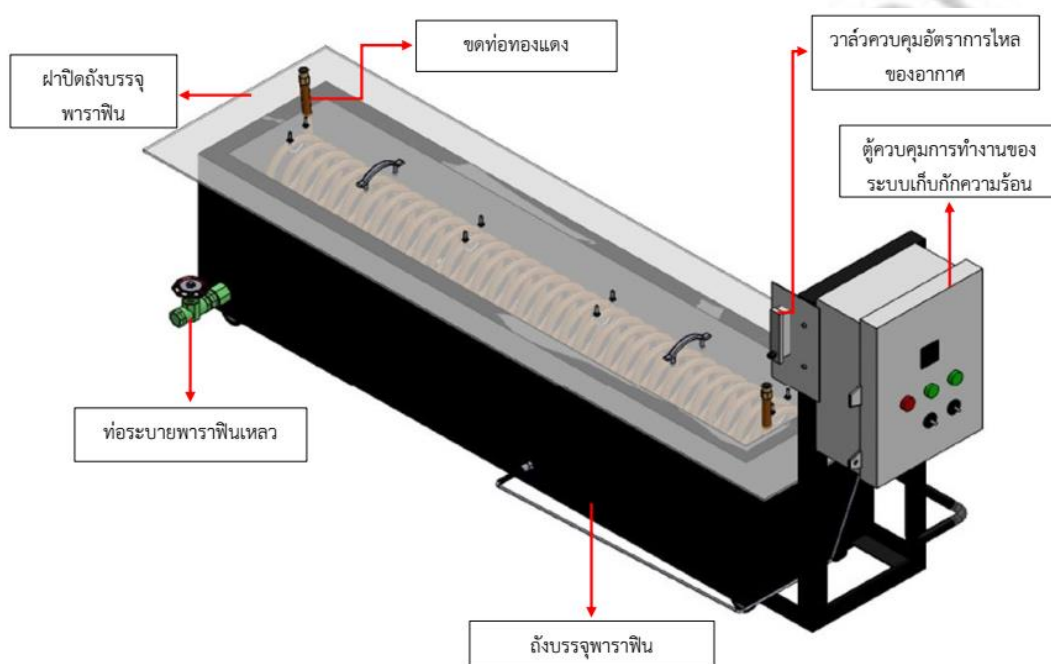
3.2 ขั้นตอนการทดลอง

การทดสอบกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนถูกพัฒนามาจากเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบเก็บกักความร้อนสำหรับการอบพริก (T. Sanchum, 2013) โดยออกแบบการทดลองให้มีความสอดคล้องตามขั้นตอนดังนี้ (ภาพที่ 2 และภาพที่ 3)

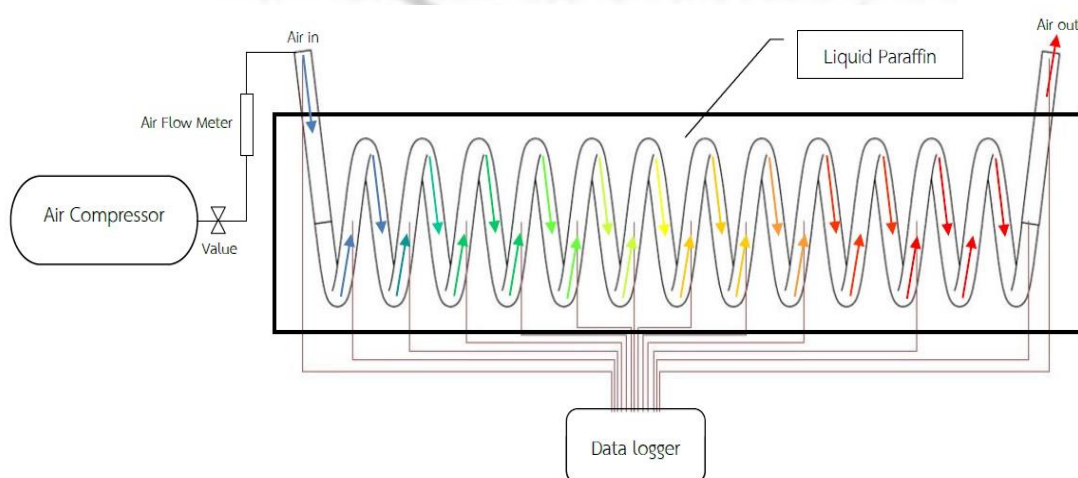
- 1) บรรจุพาราฟิน 150 กิโลกรัม ลงในถังและละลายพาราฟินด้วยความร้อนจากฮีตเตอร์ขนาด 1,000 วัตต์ จำนวน 3 ตัว
- 2) เมื่ออุณหภูมิของพาราฟินเหลือถึง 60 องศาเซลเซียส จึงเริ่มต้นการทดลอง
- 3) ป้อนอากาศภายนอกด้วยปั๊มลม (Air Compressor) เข้าในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยอัตราการไหล 75 ลิตรต่อนาที

4) วัดอุณหภูมิภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) และบันทึกข้อมูลด้วย Data Logger โดยแบ่งการวัดออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงแรกจำนวน 10 จุด มีระยะห่างจุดละ 100 เซนติเมตร และช่วงที่สองจำนวน 3 จุด มีระยะห่างจุดละ 165 เซนติเมตร ทุก 10 นาที ตลอดการทดลอง 4 ชั่วโมง

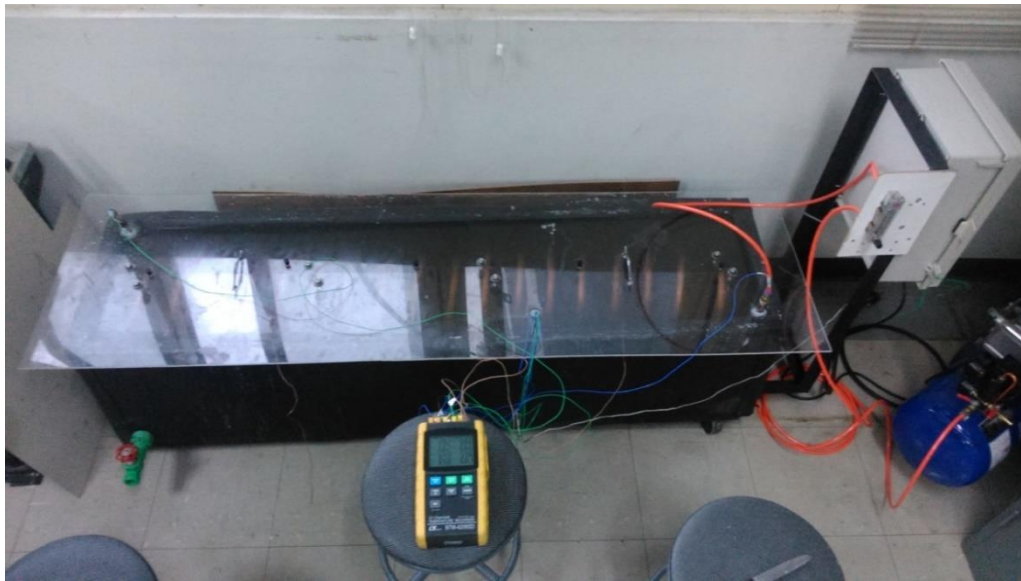
5) วัดความหนาและบันทึกค่าของพาราฟินที่เกิดการแข็งตัวเคลือบท่อแลกเปลี่ยนความร้อนทุก 10 นาที ตลอดการทดลอง 4 ชั่วโมง



ภาพที่ 1 ระบบเก็บกักความร้อนโดยใช้วัสดุเปลี่ยนสถานะ



ภาพที่ 2 แผนผังแสดงการทำงานของระบบเก็บกักความร้อนโดยใช้วัสดุเปลี่ยนสถานะ



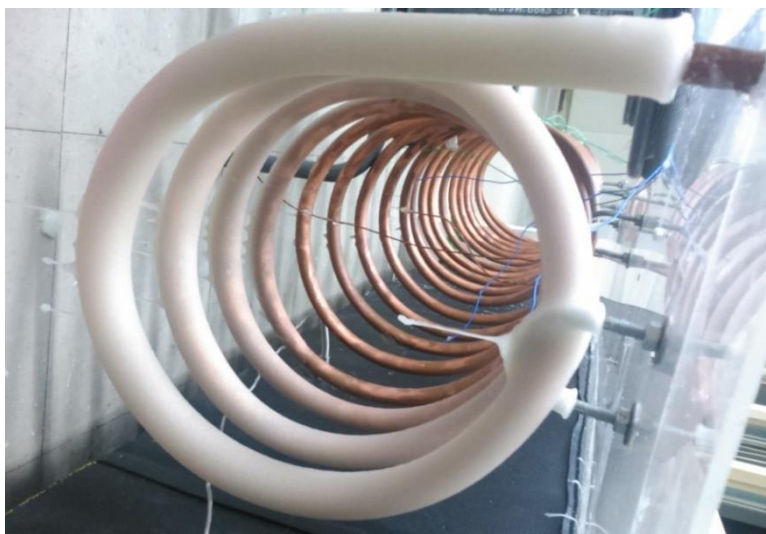
ภาพที่ 3 การติดตั้งการทดสอบระบบเก็บกักความร้อนโดยใช้วัสดุเปลี่ยนสถานะ

4. ผลการวิจัย

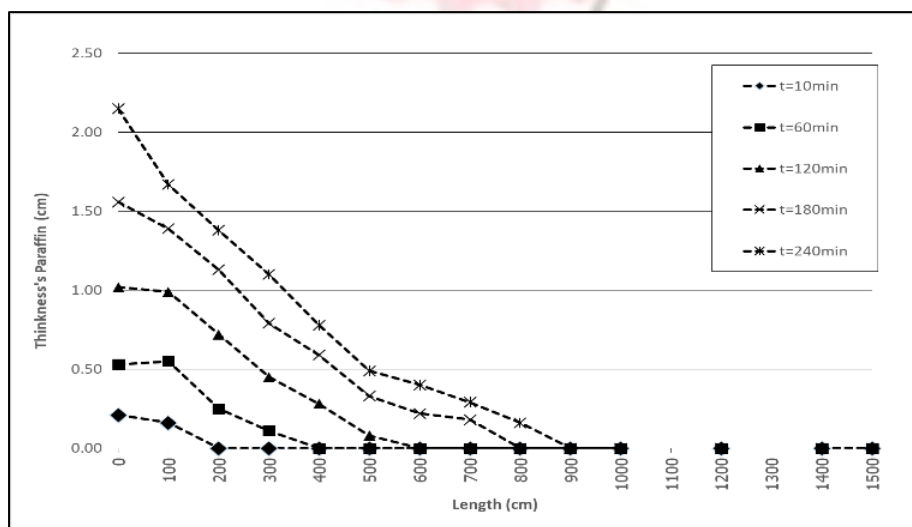
จากผลการศึกษาหาความยาวท่อที่เหมาะสมสำหรับระบบเก็บกักความร้อนแบบเปลี่ยนสถานะในการผลิตอากาศร้อน พบว่าความหนาของพาราฟินที่เกิดการแข็งตัวเคลือบท่อแลกเปลี่ยนความร้อนลดลงตามความยาวท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่เพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 4 ภาพที่ 5 และภาพที่ 6 ส่งผลให้อุณหภูมิของอากาศภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน และอัตราการถ่ายเทความร้อนค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามความยาวท่อจนกระทั่งอุณหภูมิของอากาศภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนและอัตราการถ่ายเทความร้อนคงที่ โดยบริเวณความยาวท่อแลกเปลี่ยนความร้อนช่วงแรก พาราฟินจะเกิดการแข็งตัวค่อนข้างหนา ส่งผลให้อุณหภูมิของอากาศและอัตราการถ่ายเทความร้อนค่อนข้างต่ำ และความหนาของพาราฟินจะลดลงตามความยาวท่อแลกเปลี่ยนความร้อน จนกระทั่งไม่มีพาราฟินที่แข็งตัวบริเวณผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อน จึงทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนแบบสัมผัส (Suparos et al., 2005) ซึ่งส่งผลให้อุณหภูมิของอากาศและอัตราการถ่ายเทความร้อนคงที่ที่ 58 องศาเซลเซียส และ 30 วัตต์ ตามลำดับ ดังภาพที่ 7 และภาพที่ 8 โดยท่อแลกเปลี่ยนความร้อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.25 เซนติเมตร และ 1.50 เซนติเมตร พาราฟินที่เกิดการแข็งตัวเคลือบท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ในช่วงเวลา 10 - 120 นาที ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนลดลงโดยเฉลี่ยร้อยละ 15 และร้อยละ 13.4 ที่ความยาวท่อ 900 เซนติเมตร และ 700 เซนติเมตร ตามลำดับ

ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม พบว่ามีค่าเฉลี่ยลดลงตามความยาวท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ดังภาพที่ 9 ซึ่งท่อแลกเปลี่ยนความร้อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.50 เซนติเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมต่ำกว่าท่อแลกเปลี่ยนความร้อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.25 เซนติเมตร เนื่องจากสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมในการแลกเปลี่ยนความร้อนเท่ากับอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อผลต่างของอุณหภูมิระหว่างพาราฟินเหลวกับอากาศภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน และพื้นที่ผิวท่อในการแลกเปลี่ยนความร้อน

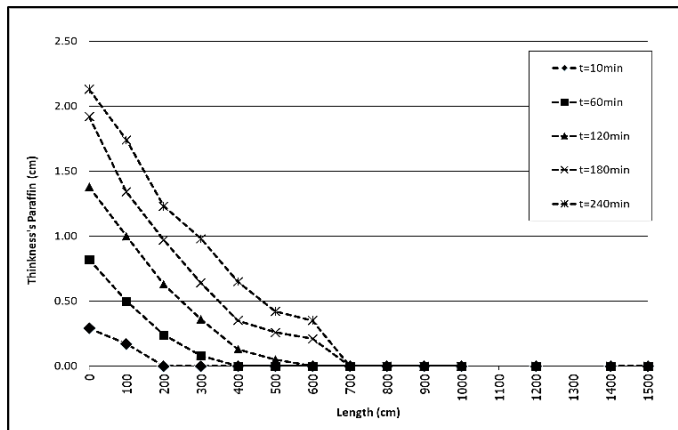
การวิเคราะห์หาความยาวท่อที่เหมาะสมสำหรับระบบเก็บกักความร้อนแบบเปลี่ยนสถานะ มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนโดยมีอุณหภูมิของอากาศขาออกท่อแลกเปลี่ยนความร้อนสูงสุด 58 องศาเซลเซียส และค่าความร้อนสูงสุด 30 วัตต์ เมื่อนำมาพิจารณาหาความยาวท่อที่เหมาะสมจากค่าความร้อนตลอดการทดสอบระหว่างช่วงที่มีพาราฟินและไม่มีพาราฟินแข็งเคลือบท่อ พบว่าความยาวท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสมของท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.25 เซนติเมตร และ 1.50 เซนติเมตร มีค่า 900 เซนติเมตร และ 700 เซนติเมตร ดังภาพที่ 10 และภาพที่ 11 ตามลำดับ



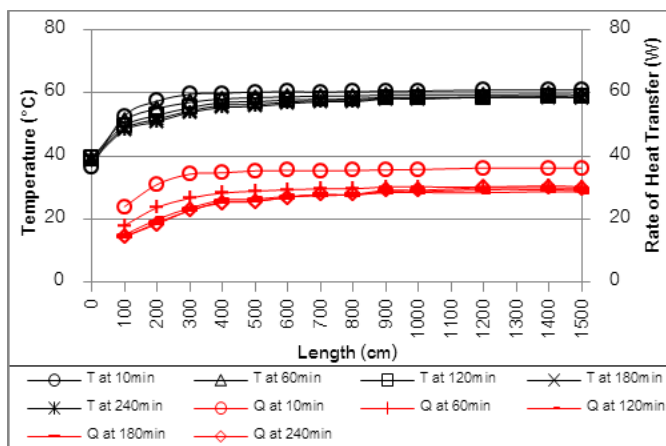
ภาพที่ 4 ลักษณะของพาราฟินที่เกิดการแข็งตัวเคลือบท่อแลกเปลี่ยนความร้อน



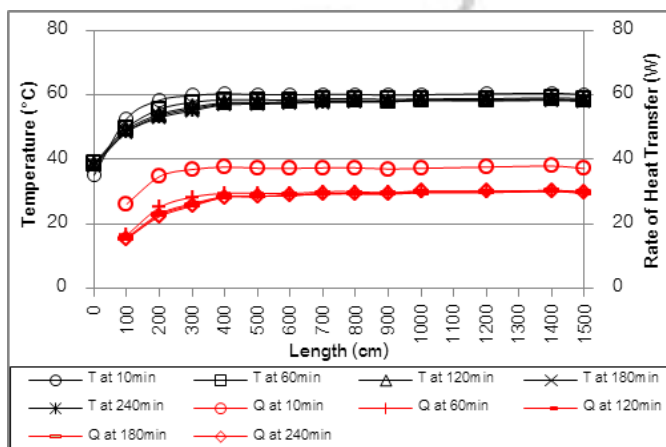
ภาพที่ 5 ความหนาของพาราฟินที่เกิดการแข็งตัวเคลือบท่อแลกเปลี่ยนความร้อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.25 เซนติเมตร



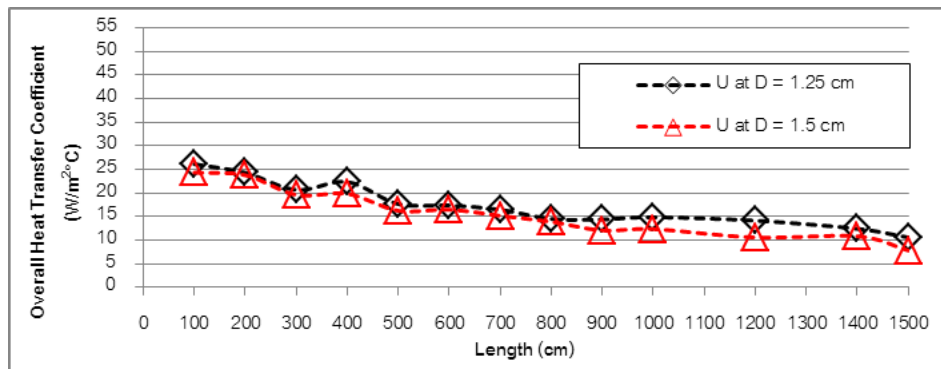
ภาพที่ 6 ความหนาของพาราฟินที่เกิดการแข็งตัวเคลือบท่อแลกเปลี่ยนความร้อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.50 เซนติเมตร



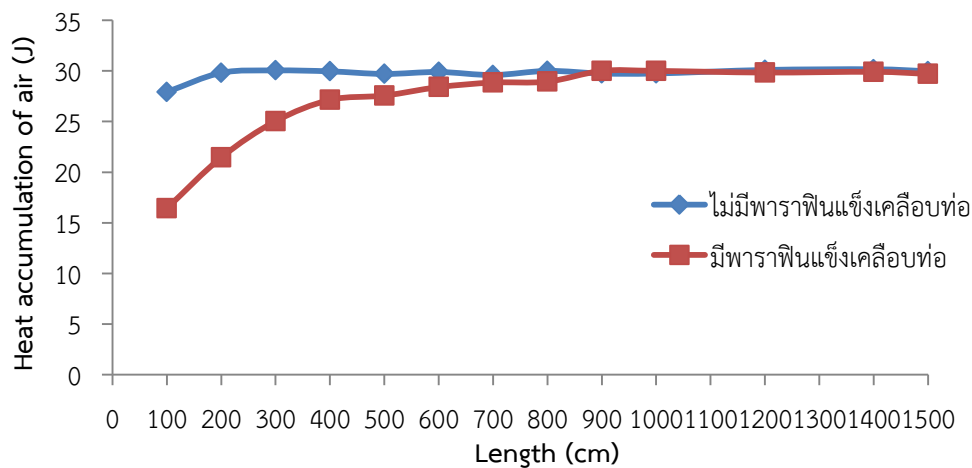
ภาพที่ 7 อุณหภูมิและอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อแลกเปลี่ยนความร้อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.25 เซนติเมตร



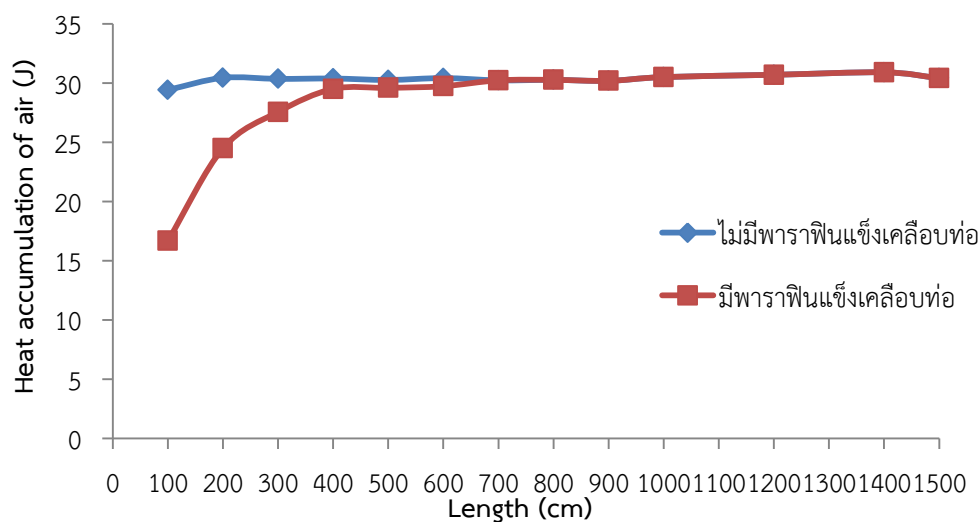
ภาพที่ 8 อุณหภูมิและอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อแลกเปลี่ยนความร้อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.50 เซนติเมตร



ภาพที่ 9 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม



ภาพที่ 10 ค่าความร้อนของอากาศในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนขนาด 1.25 ซม. ระหว่างช่วงที่ไม่มีพาราฟินแข็งเคลือบท่อที่เวลา 1 นาที กับช่วงที่มีพาราฟินแข็งเคลือบท่อที่เวลา 240 นาที



ภาพที่ 11 ค่าความร้อนของอากาศในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนขนาด 1.50 เซนติเมตร ระหว่างช่วงที่ไม่มีพาราฟินแข็งเคลือบท่อที่เวลา 1 นาที กับช่วงที่มีพาราฟินแข็งเคลือบท่อที่เวลา 24 นาที

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

การศึกษาผลกระทบของวัสดุเปลี่ยนสถานะภายในระบบเก็บกักความร้อนในช่วงเวลา 4 ชั่วโมง ของการผลิตอากาศร้อนพบว่า ท่อแลกเปลี่ยนความร้อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.25 เซนติเมตร และ 1.50 เซนติเมตร ต้องการความยาวท่อ 900 เซนติเมตร และ 700 เซนติเมตร ตามลำดับ เพื่อให้ได้อุณหภูมิของอากาศที่ทางออกสูงที่สุดตลอดระยะเวลา 4 ชั่วโมง และสามารถผลิตอากาศร้อนอุณหภูมิ 58 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหลของอากาศ 75 ลิตรต่อวินาที และผลจากพาราฟินที่เกิดการแข็งตัวเคลือบท่อแลกเปลี่ยนความร้อนส่งผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนลดลงร้อยละ 15 และร้อยละ 13.4 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับท่อเปล่า ซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบเก็บกักความร้อนแบบเปลี่ยนสถานะได้เป็นอย่างดี เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบเก็บกักความร้อนสำหรับการอบพริก และยังสามารถทำให้การอบแห้งเป็นไปอย่างต่อเนื่องอีกด้วย

6. ข้อเสนอแนะ

ควรเพิ่มพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อน เช่น การติดครีป หรือการเพิ่มจำนวนท่อแลกเปลี่ยนความร้อน เป็นต้น ซึ่งจะสามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนให้แก่อากาศได้มากขึ้น เนื่องจากยังคงมีความร้อนที่สะสมอยู่ภายในพาราฟินเหลืออีกปริมาณมาก

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัย

8. เอกสารอ้างอิง

- Holasut and Kumwachara, K. (2010). Using PCM as Thermal Storage in Solar Dryer. **Technology and Innovation for Sustainable Development Conference (TISD2010)**; March 4-6, 2010, Nongkai, Thailand.
- Holasut, P. Wongvicha, T. Srichompu, T. Mongsumpaw, A. Chaiamnart. (2008). Phase Change Materials for Retaining Heat Energy in Solar Dryer. **The 22nd Thailand Mechanical Engineering Conference; October 15-17, 2008**, Thummasart University Rungsit, Thailand.
- Malasai, S. and Holasut. (2017), Mathematical Modeling for Phase Change Materials in a Small Scale Solar Dryer. **International Journal of Engineering Research and Reviews**, Vol. 5 (1), January–March 2017, pp. 50-57.
- Nakkaew, S., Binmud, R. and Kaew-On, J. (2013). Single-Phase Heat Transfer Characteristics in the Straight and Helical Minichannel Tubes. **Thaksin University Journal**, Vol. 16 (3), pp. 65-73.

- Sanchum, T. (2013). **Design and Performance Evaluation of Solar Dryer with Heat Storage System for Chilli Drying**. Master Thesis, Chiangmai University, Thailand.
- Suparos, T., Hemwat, B., and Ratsame. (2005). Thermal and Heat Transfer Characteristics of a PCM Storage System. **International Conference on Recent Advances in Mechanical and Material Engineering (ICRAMME'05)**; May 30-31, 2005, Kaula Lumpur, Malaysia.

Industrial Technology
มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง

การจัดเส้นทางรถขนส่งน้ำดื่มโดยใช้การโปรแกรมเชิงเส้น

กรณีศึกษา ห้างหุ้นส่วนจำกัด รัศมี 2015

The Case Study of “Ratsamee 2015 Limited Partnership” : A Vehicle Routing Problem Solved using Linear Programming

เพชรรายุธ แซ่หลี่^{1*}, วชิระ วิจิตรพงษ์² และหทัยชนก พวงแย้ม³

^{1*,2,3} สาขาวิชาวิศวกรรมโลจิสติกส์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม

156 หมู่ 5 ตำบลพลายชุมพล อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก 65000

โทรศัพท์ 09-3731-7337 โทรสาร 055-282792 E-mail: PHETCHARAYUD@PSRU.AC.TH

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาปัญหาการจัดเส้นทางรถขนส่งน้ำดื่มของห้างหุ้นส่วนจำกัด รัศมี 2015 ซึ่งเป็นวิสาหกิจขนาดเล็กทำการผลิตและจัดส่งน้ำดื่มให้กับลูกค้าแต่ละร้านเอง บริษัทยังไม่มีแผนการจัดส่งที่เหมาะสม ทำให้เกิดค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการขนส่งมากเกินไปจนเกิดความจำเป็น ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ประยุกต์ใช้โปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming) ในการวางแผน เพื่อหาเส้นทางรถขนส่งน้ำดื่มที่สั้นที่สุด โดยคำนึงถึงปัจจัยและข้อจำกัดอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องด้วย หลังจากนั้นได้ใช้ OpenSolver เป็นเครื่องมือช่วยในการวิเคราะห์หาคำตอบใน Microsoft Excel ผู้วิจัยได้แบ่งการเดินรถขนส่งน้ำดื่มออกเป็น 3 กรณี ตามเส้นทางและที่ตั้งของร้านค้า ผลจากการหาระยะทางการขนส่งรวมทั้งที่สั้นที่สุดจากทั้ง 3 กรณีพบว่า การจัดเส้นทางรถขนส่งน้ำดื่มโดยแบ่งเส้นทางรถขนส่งออกเป็น 2 เส้นทาง มีความเหมาะสมที่สุด มีระยะทางรวมทั้งที่สั้นที่สุดเท่ากับ 72.26 กิโลเมตร และรถขนส่งสามารถบรรทุกและขนส่งน้ำดื่มได้เพียงพอในแต่ละเที่ยวที่ทำการจัดส่งได้ และเมื่อเทียบผลการจัดเส้นทางที่ได้กับการดำเนินงานในปัจจุบันพบว่า มีระยะทางที่สั้นกว่า 108.24 กิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 59.97 ส่งผลให้ต้นทุนค่าขนส่งลดลง 4,138.56 บาท/เดือน ทำให้สามารถจัดส่งน้ำดื่มได้รวดเร็วขึ้นและลดเวลาในการจัดส่งน้ำดื่ม

คำสำคัญ: การจัดเส้นทางรถขนส่ง, การโปรแกรมเชิงเส้น, ธุรกิจน้ำดื่ม, OpenSolver

Abstract

This research studied the problem of a vehicle routing problem relating to the delivery of drinking water by a company called “Ratsamee 2015 Limited Partnership”. This company is a small business which produces and delivers drinking water to individual customers themselves. The company did not have an appropriate plan for their water delivery which resulted in their transportation costs being too high. Therefore, for this research, we applied Linear Programming to find the shortest delivery route for their drinking water by considering all the additional factors and constraints. OpenSolver was used as a tool to find the best solution in Microsoft Excel. We proposed 3 alternative solutions according to the route and location of the shop. From the results of the 3 cases, we found that dividing the transportation

route into two routes was the optimal solution. The shortest overall distance was 72.26 kilometers and the vehicle could carry and deliver enough drinking water for all of the customers on each route. When compared with the current delivery results, the new distance was decreased by 108.24 kilometers, or by 59.97% and resulted in a reduction of transportation costs by 4,138.56 Baht per month. The company could deliver their product faster and also reduce delivery times.

Keywords: Vehicle routing problem, Linear programming, Drinking water business, OpenSolver

1. บทนำ

ธุรกิจผลิตน้ำดื่มมีมูลค่าตลาดสูงถึงประมาณ 3 หมื่นล้านบาท เพราะนอกจากจะเป็นสินค้าที่จำเป็นสำหรับชีวิตประจำวันแล้ว เทรนด์ของการดูแลสุขภาพและออกกำลังกายยังเป็นปัจจัยที่ส่งผลให้ตลาดสามารถเติบโตได้อย่างต่อเนื่อง และยังคงมีผู้ประกอบการที่สนใจเข้ามาในตลาดนี้อย่างต่อเนื่องด้วย (Prachachat Online., 2014, 2015) จากความต้องการบริโภคน้ำดื่มและจำนวนผู้ประกอบการที่เพิ่มมากขึ้นทำให้เกิดการแข่งขันมากขึ้นโดยเฉพาะในด้านการให้บริการและคุณภาพ ดังนั้นผู้ประกอบการจะต้องมีการบริหารจัดการที่ดี และมีประสิทธิภาพ เพื่อลดต้นทุนและสร้างความพึงพอใจให้กับลูกค้า เพื่อสร้างความได้เปรียบในการแข่งขัน ต้นทุนสำคัญอย่างหนึ่งของธุรกิจน้ำดื่ม คือต้นทุนในการขนส่งน้ำดื่มไปยังลูกค้า ซึ่งบริษัทจะต้องมีการบริหารจัดการการขนส่งให้มีต้นทุนที่ต่ำที่สุด ระยะทางที่สั้นที่สุดและสามารถตอบสนองต่อความต้องการของผู้บริโภคให้ได้มากที่สุด

ห้างหุ้นส่วนจำกัด รัชมี 2015 เป็นผู้ประกอบการขนาดเล็กที่ผลิตและจัดส่งน้ำดื่มให้กับลูกค้ามากกว่า 47 ราย ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งเป็นปัญหาหนึ่งของบริษัท ซึ่งบริษัทยังไม่มีเครื่องมือช่วยในการวางแผนการจัดส่งน้ำดื่มให้กับลูกค้าแต่ละราย ทำให้ไม่มีแผนหรือลำดับการจัดส่งที่ชัดเจน การจัดส่งในปัจจุบันจึงจัดส่งตามความเคยชินของพนักงานขับรถ ส่งผลให้เกิดค่าใช้จ่ายที่เกินความจำเป็น ในทางคณิตศาสตร์ถือว่าปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งหรือการเดินรถ (Vehicle Routing Problem) เป็นปัญหาที่ยากและมีความซับซ้อนมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากมีลูกค้าและรถขนส่งสินค้ามีจำนวนมาก (Paolo Toth and Daniele Vigo, 2014)

โปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming) เป็นเครื่องมือหนึ่งที่ถูกใช้ในการวางแผนการดำเนินงานต่าง ๆ เพื่อหาผลลัพธ์ที่เหมาะสมที่สุด โดยผลลัพธ์ที่ได้จะต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขที่กำหนดไว้ด้วย (Frederick S. Hillier, 2010) ตัวอย่างเช่น การวางแผนการผลิตเพื่อให้เกิดต้นทุนต่ำที่สุด (Sae-lee, P. and Ritvirool, A., 2014) การวางแผนการดำเนินงานให้ใช้พนักงานน้อย (Sae-lee, P. and Ritvirool, A., 2014) เป็นต้น สำหรับปัญหาในด้านการจัดเส้นทางขนส่ง มีงานวิจัยที่ได้ประยุกต์ใช้โปรแกรมเชิงเส้นช่วยในการจัดเส้นทางขนส่งในปัญหาการขนส่งต่าง ๆ โดยมักมีวัตถุประสงค์เพื่อลดต้นทุนการขนส่งและจัดหาเส้นทางขนส่งที่สั้นที่สุด เช่น ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งขึ้นส่วนจากโรงงานต่าง ๆ ให้เกิดต้นทุนต่ำที่สุด (Phosamrit, N. and Thammaponphirat, W., 2010) ปัญหาการจัดเส้นทางเพื่อลดต้นทุนการขนส่งในธุรกิจเครื่องดื่ม

ขานม (Sirioran, P., 2014) ปัญหาการจัดเส้นทางรถรางน้ำเที่ยว เพื่อให้เกิดเส้นทางที่สั้นที่สุด (Winyangkoon, S. et al, 2014) การลดต้นทุนการขนส่งสินค้าในธุรกิจแปรรูปอาหาร (Ketsarapong, P. and Choo-ngern, A., 2015) เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการต่อยอดสร้างพัฒนาเป็นเครื่องมือช่วยในการตัดสินใจให้ผู้ใช้งานสามารถใช้งานได้ง่ายขึ้นด้วย (Ruiz, R. Maroto, C. and Alcaraz, J., 2004) ดังนั้นในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงได้ประยุกต์ใช้โปรแกรมเชิงเส้นในการแก้ไขปัญหาการจัดเส้นทางรถรางน้ำดื่มของห้างหุ้นส่วนจำกัด รัศมี 2015 และใช้ OpenSolver เป็นเครื่องมือในการช่วยหาคำตอบใน Microsoft Excel เพื่อให้ง่ายต่อการนำไปใช้ในการวางแผนการจัดเส้นทางรถรางน้ำดื่มของผู้ประกอบการในอนาคต โดยมีวัตถุประสงค์ เพื่อหาเส้นทางที่สั้นที่สุดในการขนส่งน้ำดื่มให้กับลูกค้าเพื่อลดต้นทุนในการขนส่ง และสร้างความพึงพอใจให้กับลูกค้า

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 2.1 เพื่อจัดเส้นทางรถรางน้ำดื่มที่เหมาะสมของห้างหุ้นส่วนจำกัด รัศมี 2015
- 2.2 เพื่อลดต้นทุนในการขนส่งน้ำดื่มของห้างหุ้นส่วนจำกัด รัศมี 2015

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 ศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูลการจัดส่งน้ำดื่มของห้างหุ้นส่วนจำกัด รัศมี 2015 ในแผนกจัดส่งน้ำดื่ม โดยการลงพื้นที่จริง และใช้วิธีการสอบถามและติดตามการจัดส่งน้ำดื่มไปยังร้านค้าต่าง ๆ ของพนักงานขับรถ

3.2 นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและประยุกต์ใช้ตัวแบบโปรแกรมเชิงเส้นในการจัดเส้นทางรถรางน้ำดื่ม

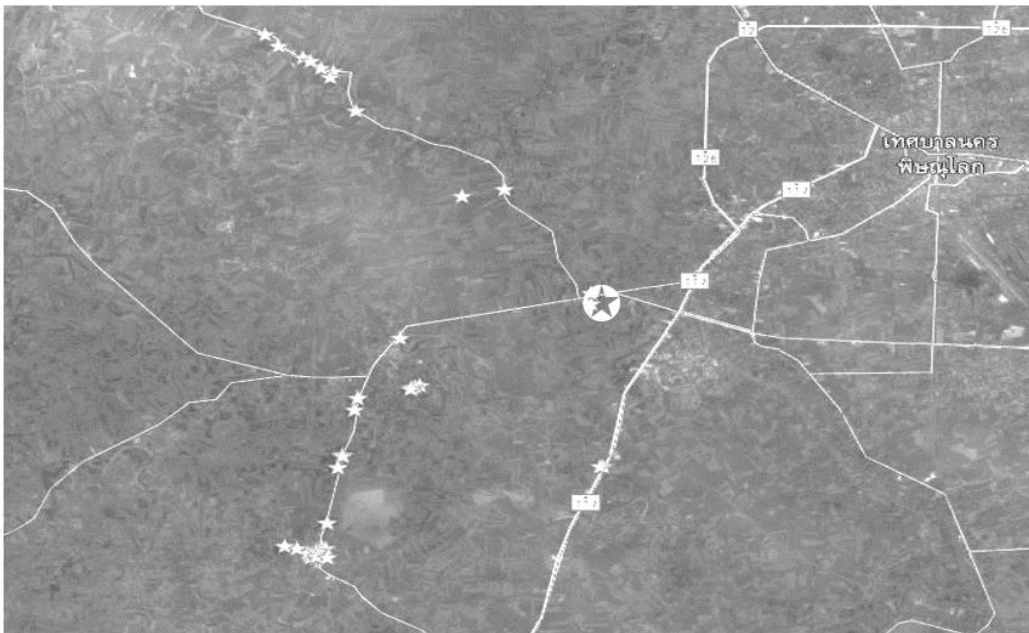
3.3 สร้างแผ่นงานใน Microsoft Excel 2013 และใช้ OpenSolver (เวอร์ชัน 2.8.6) เป็นเครื่องมือช่วยในการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด โดยทำการประมวลผลหาคำตอบผ่านเครื่องคอมพิวเตอร์แบบพกพา (Notebook computer) ซึ่งมีหน่วยประมวลผลกลาง Intel® Core™ i5-3210M CPU @ 2.5 GHz และหน่วยความจำ 4 GB

3.4 วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลเฉลยที่ได้กับการดำเนินการจัดส่งน้ำดื่มในปัจจุบัน และงานวิจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง

3.5 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

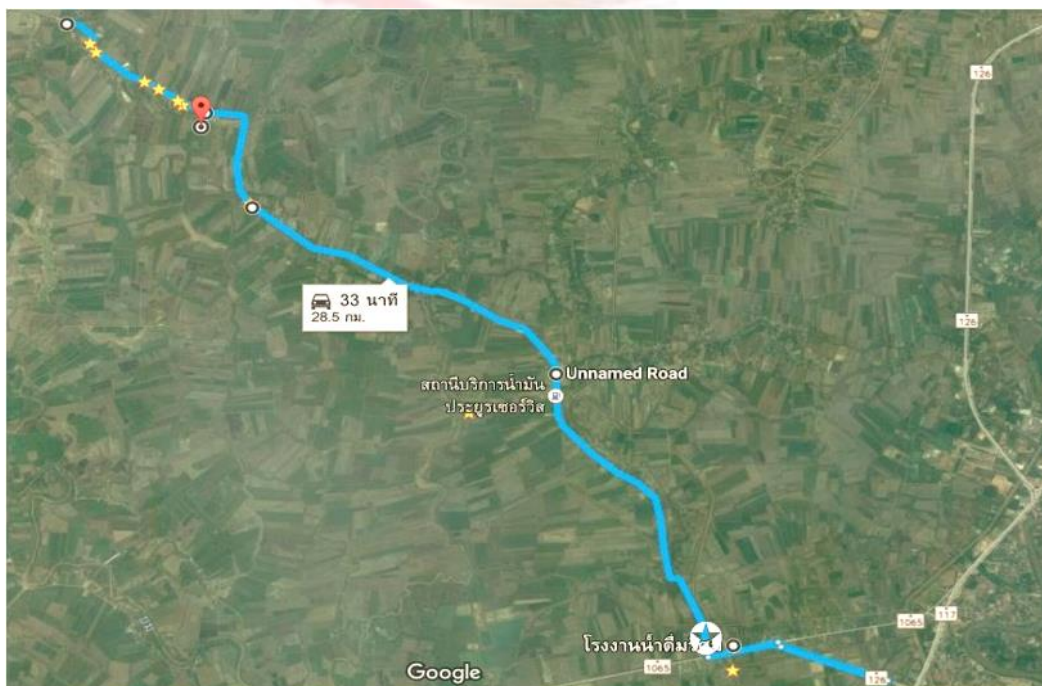
4. การขนส่งน้ำดื่มของห้างหุ้นส่วนจำกัด รัศมี 2015

ห้างหุ้นส่วนจำกัด รัศมี 2015 ผลิตและจัดส่งน้ำดื่มให้กับลูกค้าเอง จากการเก็บข้อมูลเส้นทางที่ใช้ในการขนส่งน้ำดื่มพบว่า มีร้านค้าที่ต้องจัดส่งน้ำดื่มทั้งหมด 47 ร้าน มีระยะทางในการขนส่งรวมทั้งหมด 180.50 กิโลเมตร ซึ่งจุด  เป็นตำแหน่งที่ตั้งของห้างหุ้นส่วนจำกัด รัศมี 2015 และดาวคือตำแหน่งของร้านค้าที่จะต้องจัดส่งน้ำดื่ม ดังภาพที่ 1

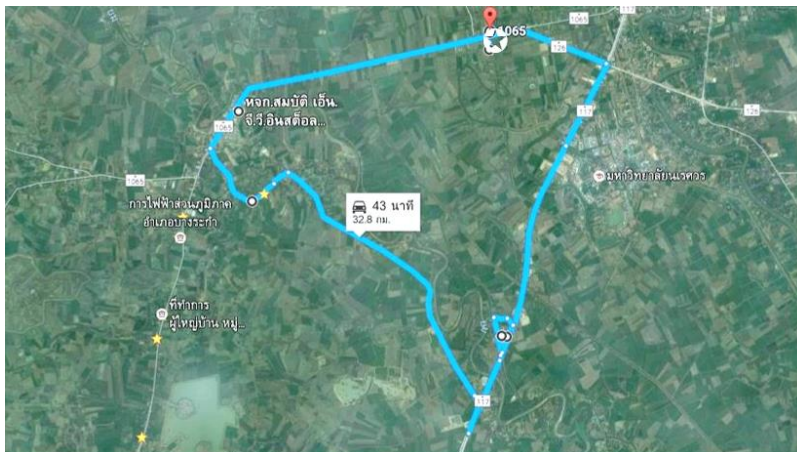


ภาพที่ 1 ตำแหน่งที่ตั้งของบริษัทและร้านค้าทั้งหมด

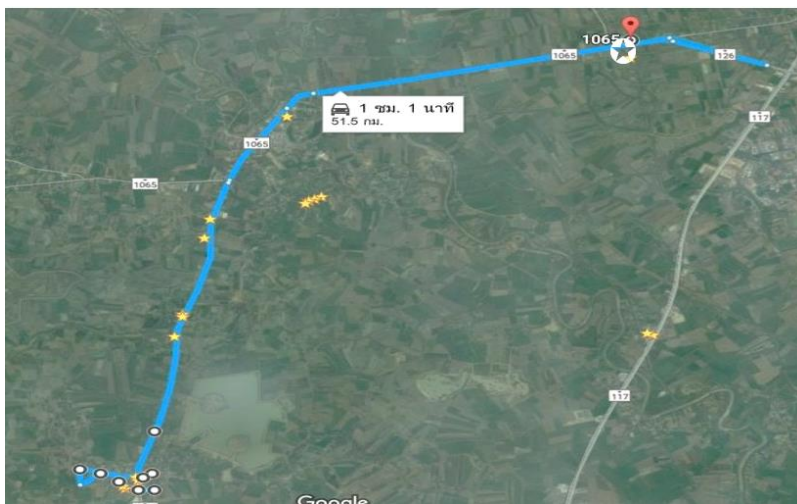
จากการลงพื้นที่เก็บข้อมูลพบว่ารถขนส่งของห้างหุ้นส่วนจำกัด รัตมี 2015 จะต้องทำการขนส่งน้ำดื่มไปจัดส่งให้กับลูกค้าทั้งหมด ในการจัดส่งน้ำดื่มของบริษัทจะแบ่งออกเป็น 3 เส้นทาง โดยมีเส้นทางในการจัดส่งแสดงดังภาพที่ 2 - 4 และมีรายละเอียดในการจัดส่งแสดงดังตารางที่ 1



ภาพที่ 2 เส้นทางการจัดส่งน้ำดื่มเส้นทางที่ 1



ภาพที่ 3 เส้นทางการจัดส่งน้ำดื่มเส้นทางที่ 2



ภาพที่ 4 เส้นทางการจัดส่งน้ำดื่มเส้นทางที่ 3

ตารางที่ 1 รายละเอียดการจัดส่งน้ำดื่มในแต่ละเส้นทางของห้างหุ้นส่วนจำกัด รัตมี 2015

รายการ	เส้นทางที่ 1	เส้นทางที่ 2	เส้นทางที่ 3	รวม
จำนวนร้านที่ส่ง	17	9	21	47
ถังขนาด 20 ลิตร (ถัง)	31	45	57	133
ถังไซขนาด 20 ลิตร (ถัง)	2	4	13	19
ขวดไซขนาด 850 มิลลิลิตร (แพ็ค)	17	12	28	57
ขวดไซขนาด 1,500 มิลลิลิตร (แพ็ค)	2	0	2	4
ขวดไซขนาด 600 มิลลิลิตร (แพ็ค)	7	3	6	16
ขวดไซขนาด 350 มิลลิลิตร (แพ็ค)	9	0	5	14
น้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	939.60	1,124.00	1,767.80	3,831.40
ระยะทางรวมในการขนส่ง (กิโลเมตร)	44.90	32.80	102.80	180.50

หมายเหตุ : น้ำหนักที่รถบรรทุกทุกน้ำดื่มสามารถบรรทุกได้สูงสุดต่อ 1 เที่ยวเท่ากับ 2,120 กิโลกรัม

จากในตารางที่ 1 ผู้วิจัยได้ทำการปรับลดจำนวนจุดรับส่ง เพื่อให้สามารถทำการวิเคราะห์และวางแผนการจัดเส้นทางได้ง่ายขึ้น โดยรวมจุดรับส่งที่มีระยะห่างน้อย 50 เมตร เข้าด้วยกันโดยยังคงสภาพเส้นทางเดิมไม่มีการเปลี่ยนแปลงเส้นทาง จากการปรับลดจำนวนจุดรับส่งทำให้จำนวนจุดรับส่งลดลงจาก 47 จุด เหลือ 34 จุด โดยรวมที่ตั้งของห้างหุ้นส่วนจำกัด รัชมี 2015 ด้วย

5. ผลการวิจัย

ผู้วิจัยได้ศึกษาและนำตัวแบบโปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming) ของปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (Travelling salesman problem) (Rasmus Rasmussen, 2011) มาประยุกต์ใช้ เพื่อสร้างตัวแบบโปรแกรมเชิงเส้นสำหรับจัดเส้นทางขนส่งน้ำดื่ม โดยแบบจำลองนี้ไม่ได้พิจารณาถึงการจัดเรียงน้ำดื่มในการบรรทุก ตัวแบบโปรแกรมเชิงเส้นมีรายละเอียดดังนี้

ดัชนี (Indices)

i, j = จุดรับส่งลูกค้า i และ j ใด ๆ เมื่อ $i = 1, 2, 3, \dots, n$ และ $j = 1, 2, 3, \dots, n$

พารามิเตอร์ (Parameters)

n = จำนวนจุดรับส่งทั้งหมด

d_{ij} = ระยะทางจากจุดรับส่งลูกค้า i ใด ๆ ถึงจุดรับส่งลูกค้า j ใด ๆ (กิโลเมตร)

ตัวแปรตัดสินใจ (Decision variables)

x_{ij} = ตัวแปรตัดสินใจในการเลือกเดินทางจากจุดรับส่งลูกค้า i ใด ๆ ไปจุดรับส่งลูกค้า j ใด ๆ

u_i = ลำดับการเดินทางจากจุดรับส่งลูกค้า i ใด ๆ

ฟังก์ชันจุดประสงค์ (Objective function)

การวางแผนการจัดเส้นทางขนส่งน้ำดื่มมีวัตถุประสงค์ เพื่อให้เกิดระยะทางรวมในการขนส่งต่ำที่สุดดังสมการที่ (1)

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

เงื่อนไขบังคับ (Constraints)

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 \quad \text{เมื่อ } i = 1, 2, 3, \dots, n \quad \forall j \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad \text{เมื่อ } j = 1, 2, 3, \dots, n \quad \forall i \quad (3)$$

$$x_{ij} = 0 \quad \text{เมื่อ } i = j \quad \forall i, j \quad (4)$$

$$u_i - u_j + (n-1)x_{ij} \leq n-2 \quad \text{เมื่อ } 2 \leq i \leq n \text{ และ } 2 \leq j \leq n \quad (5)$$

$$u_i = 1 \quad \text{เมื่อกำหนดให้จุดที่ } 1 (i=1) \text{ เป็นโรงงานผลิตน้ำดื่ม} \quad (6)$$

$$2 \leq u_i \leq n \quad \text{เมื่อ } 2 \leq i \leq n \quad (7)$$

$$x_{ij} = \{0,1\} \quad \text{เมื่อ } i, j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (8)$$

เงื่อนไขบังคับแต่ละเงื่อนไขมีความหมายดังนี้

เงื่อนไขที่ (2) เป็นเงื่อนไขบังคับให้ผลรวมของตัวแปรตัดสินใจที่เดินทางจากทุกๆจุดลูกค้า i ไปยังลูกค้า j ใด ๆ ต้องมีค่าเท่ากับ 1 กล่าวคือการเดินทางจากจุด i ไปยังจุด j ใด ๆ จะมีจุดหมายปลายทางเพียงจุดเดียวเท่านั้น

เงื่อนไขที่ (3) เป็นเงื่อนไขบังคับให้ผลรวมของตัวแปรตัดสินใจที่เดินทางออกจากจุดลูกค้า i ใด ๆ ไปยังทุก ๆ จุดลูกค้า j ต้องมีค่าเท่ากับ 1 กล่าวคือการเดินทางออกจากจุด i ใด ๆ ไปยังจุด j จะเดินทางออกได้เพียงครั้งเดียวเท่านั้น

เงื่อนไขที่ (4) เป็นเงื่อนไขบังคับให้ตัวแปรตัดสินใจ x_{ij} ใด ๆ มีค่าเท่ากับ 0 เมื่อ i และ j มีค่าเท่ากัน

เงื่อนไขที่ (5) เป็นเงื่อนไขบังคับเพื่อกำจัดทัวร์ย่อย เป็นการจำกัดเรียงลำดับในการขนส่ง โดยจะต้องทำการขนส่งน้ำดื่มให้ครบทุกจุดก่อนที่จะกลับมายังโรงงานผลิตน้ำดื่มซึ่งเป็นจุดเริ่มต้น

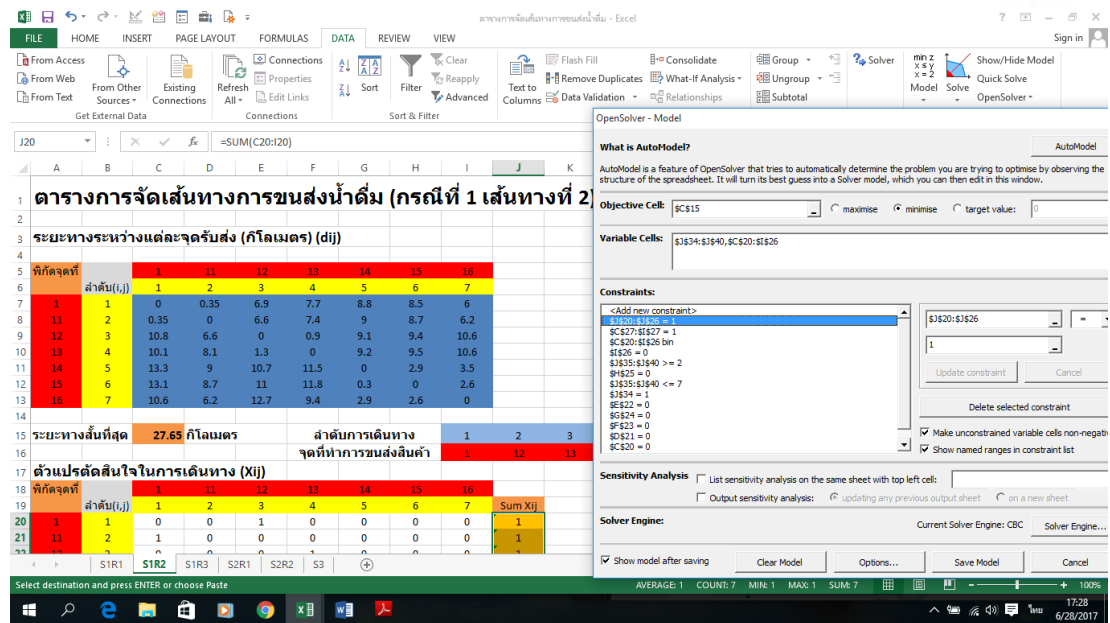
เงื่อนไขที่ (6) เป็นเงื่อนไขบังคับที่กำหนดให้ลำดับการขนส่ง (u_i) มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อกำหนดให้จุดที่ $1 (i=1)$ เป็นโรงงานผลิตน้ำดื่มซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นในการขนส่งน้ำดื่มแต่ละรอบ

เงื่อนไขที่ (7) เป็นเงื่อนไขบังคับที่กำหนดให้ลำดับการขนส่ง (u_i) ของแต่ละจุดมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 2 และน้อยกว่าหรือเท่ากับ n เมื่อ $2 \leq i \leq n$

เงื่อนไขที่ (8) เป็นเงื่อนไขบังคับให้ตัวแปรตัดสินใจ x_{ij} มีค่าเป็น 0 หรือ 1 เท่านั้น (Binary) โดย $x_{ij} = 0$ คือ ไม่เลือกส่งน้ำดื่มจากจุด i ไปยังจุด j และ $x_{ij} = 1$ คือเลือกส่งน้ำดื่มจากจุด i ใด ๆ ไปยังจุด j ใด ๆ

การแก้ปัญหาโดยใช้โปรแกรมเชิงเส้นเป็นการหาคำตอบแบบแม่นยำตรง (Optimization) ซึ่งจะทำให้ได้ผลคำตอบที่ดีที่สุดภายใต้ขอบเขต และเงื่อนไขที่กำหนด Microsoft Excel เป็นโปรแกรมที่ใช้เพื่อการวิเคราะห์ คำนวณ และการจัดการข้อมูลในรูปแบบตาราง โดยปกติใน Microsoft Excel จะมี Add-in ที่ชื่อว่า “Solver” ซึ่งสามารถใช้ในการหาคำตอบของตัวแบบโปรแกรมเชิงเส้นได้ แต่มีข้อจำกัดคือ สามารถหาคำตอบของปัญหาที่มีตัวแปรตัดสินใจไม่เกิน 200 ตัวแปรเท่านั้น จากการศึกษาพบว่า มีเครื่องมือที่สามารถใช้ในการหาคำตอบของตัวแบบโปรแกรมเชิงเส้นได้ คือ SolverStudio และ OpenSolver ซึ่งถูกพัฒนาโดย Andrew J. Mason ผู้ใช้สามารถดาวน์โหลดและติดตั้งได้ฟรี การใช้ SolverStudio ผู้ใช้จะต้องมีความรู้ทางด้านภาษาคอมพิวเตอร์ในระดับหนึ่ง ส่วนการใช้งาน OpenSolver มีหลักการใช้งานเหมือนกับ Solver สามารถใช้ในการหาคำตอบของแบบจำลองโปรแกรมเชิงเส้นได้ โดยไม่จำกัดจำนวนตัวแปรตัดสินใจ (A. J. Mason and I. Dunning,

2010; Andrew J. Mason, 2012) ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้ OpenSolver เป็นเครื่องมือช่วยในการวิเคราะห์หาเส้นทางการจัดส่งน้ำดื่มที่สั้นที่สุด ดังตัวอย่างแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ตัวอย่างแบบจำลองและ OpenSolver ใน Microsoft Excel 2013

ในการจัดส่งน้ำดื่มของห้างหุ้นส่วนจำกัด รัศมี 2015 ผู้วิจัยได้แบ่งการวิเคราะห์และหาคำตอบในการจัดรถขนส่งน้ำดื่มออกเป็นกรณีย่อยได้ 3 กรณี คือ กรณีที่ 1 แบ่งออกเป็น 3 เส้นทาง กรณีที่ 2 แบ่งออกเป็น 2 เส้นทาง และกรณีที่ 3 วางแผนการจัดส่งน้ำดื่มทั้งหมดในคราวเดียวกัน รวมเป็น 1 เส้นทาง และผลจากการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดพบว่า สามารถใช้ OpenSolver ช่วยในการหาเส้นทางที่สั้นที่สุดในการขนส่งน้ำดื่มของแต่ละกรณีได้ โดยใช้เวลาในการหาคำตอบแตกต่างกันตามขนาดของปัญหาดังแสดงข้อมูลในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สรุปผลการจัดเส้นทางขนส่งน้ำดื่มของทั้ง 3 กรณี

กรณี ที่	จำนวน พิกัดจุด รับส่ง (จุด)	ลำดับเส้นทางในการขนส่งของ แต่ละพิกัด	น้ำหนัก รวม (กิโลกรัม)	ระยะทาง รวม (กิโลเมตร)	เวลาในการหา คำตอบ
1	14	1 -2-34-3-4-5-7-8-10-9-6-33-32-31-1	939.60	37.07	1 นาที 6 วินาที
	7	1-12-13-15-14-16-11-1	1,124.00	27.65	4 วินาที
	15	1 -20-21-23-22-30-24-25-26-28-27-29-19-18-17-1	1,767.80	26.03	2 ชั่วโมง 2 นาที
		รวม	3,831.40	90.75	14 วินาที 2 ชั่วโมง 3 นาที 24 วินาที
2	20	1 -2 -31-32-33-34-3-4-5-6-9-10-8-7-14-15-16-13-12-11-1	2,063.60	46.23	1 นาที 13 วินาที
	15	1 -20-21-23-22-30-24-25-26-28-27-29-19-18-17-1	1,767.80	26.03	2 ชั่วโมง 2 นาที
		รวม	3,831.40	72.26	14 วินาที 2 ชั่วโมง 3 นาที 27 วินาที
3	34	1-2-31-32-33-34-3-4-5-6-9-10-8-7-14-15-16-17-18-19-20-21-29-23-22-30-24-25-27-28-26-13-12-11-1	3,831.40	60.15	13 ชั่วโมง 39 นาที 34 วินาที

หมายเหตุ : กำหนดให้จุดพิกัดที่ 1 เป็นโรงงานผลิตน้ำดื่มของห้างหุ้นส่วนจำกัด รัตมิ 2015 ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นในการขนส่งในแต่ละรอบ

ผลจากการจัดเส้นทางขนส่งน้ำดื่มของทั้ง 3 กรณี โดยใช้ OpenSolver ช่วยในการหาคำตอบพบว่าระยะทางรวมในการขนส่งน้ำดื่มของทั้ง 3 กรณีที่ได้จากการใช้โปรแกรมเชิงเส้นน้อยกว่าระยะทางรวมในการขนส่งน้ำดื่มในปัจจุบันของบริษัท โดยกรณีที่ 1 เส้นทางที่ 1 มีระยะทาง 37.07 กิโลเมตร น้ำหนักการบรรทุก 939.60 กิโลกรัม เส้นทางที่ 2 มีระยะทาง 27.65 กิโลเมตร มีน้ำหนักบรรทุก 1,124.00 กิโลกรัม และเส้นทางที่ 3 มีระยะทาง 26.03 กิโลเมตร มีน้ำหนัก 1,767.80

กิโลกรัม รวมระยะทางทั้งหมดในกรณีที่ 1 เท่ากับ 90.75 กิโลเมตร กรณีที่ 2 เส้นทางที่ 1 มีระยะทาง 46.23 กิโลเมตร น้ำหนักบรรทุก 2,063.60 กิโลกรัม และเส้นทางที่ 2 มีระยะทาง 26.03 กิโลเมตร น้ำหนักบรรทุก 1,767.80 กิโลกรัม ระยะทางรวมทั้งหมดในกรณีที่ 2 เท่ากับ 72.26 กิโลเมตร กรณีที่ 3 เป็นการขนส่งแบบรอบเดียวครบทุกร้านค้า ได้ระยะทางรวมทั้งหมด 60.15 กิโลเมตร มีน้ำหนักบรรทุก 3,831.40 กิโลกรัม เมื่อเปรียบเทียบผลคำตอบที่ได้จากทั้ง 3 กรณีพบว่ากรณีที่ 3 มีเส้นทางที่สั้นที่สุดเท่ากับ 60.15 กิโลเมตร และมีน้ำหนักบรรทุก 3,831.40 กิโลกรัม แต่จากข้อมูลของรถบรรทุกน้ำดื่มที่สามารถบรรทุกได้สูงสุดเพียง 2,120 กิโลกรัมเท่านั้น ทำให้ไม่สามารถจัดส่งน้ำดื่มได้ทั้งหมดในรอบเดียวดังกรณีที่ 3 ได้ ดังนั้นการจัดเส้นทางขนส่งน้ำดื่มที่มีระยะทางรวมที่สั้นที่สุดและรถบรรทุกน้ำดื่มสามารถบรรทุกน้ำดื่มได้เพียงพอต่อความต้องการ คือ กรณีที่ 2 ซึ่งแบ่งเป็น 2 เส้นทาง มีระยะทางการขนส่งรวม 72.26 กิโลเมตร โดยเส้นทางที่ 1 บรรทุกน้ำดื่ม 2,063.60 กิโลกรัม และเส้นทางที่ 2 บรรทุกน้ำดื่ม 1,767.80 กิโลกรัม และเมื่อเทียบผลจากการดำเนินงานในปัจจุบันพบว่าระยะทางที่สั้นกว่า 108.24 กิโลเมตร ($180.50 - 72.26$) หรือคิดเป็นระยะทางที่ใช้ในการขนส่งน้ำดื่มลดลงมากถึงร้อยละ 59.97 จากราคาเชื้อเพลิงในปัจจุบันเท่ากับ 25.49 บาท/ลิตร วันที่ 12 ธันวาคม 2559 ซึ่งรถที่ใช้ขนส่งน้ำดื่มของห้างหุ้นส่วนจำกัด รัตมี 2015 มีอัตราการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงเฉลี่ย 20 กิโลเมตร/ลิตร ดังนั้นจึงคิดเป็นต้นทุนค่าขนส่งที่ลดลงต่อรอบเท่ากับ $(108.24/20) \times 25.49 = 137.95$ บาท/รอบ หรือคิดเป็นค่าขนส่งที่ลดลงต่อเดือนเท่ากับ $137.95 \times 30 = 4,138.56$ บาท/เดือน จากผลการดำเนินงานวิจัยข้างต้นจึงกล่าวได้ว่าสามารถประยุกต์ใช้การใช้โปรแกรมเชิงเส้นในการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งเช่นเดียวกับงานวิจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง

6. สรุปผลและการอภิปรายผล

จากปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งน้ำดื่มของห้างหุ้นส่วนจำกัด รัตมี 2015 ผู้วิจัยได้รวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ผลโดยใช้โปรแกรมเชิงเส้น และใช้ OpenSolver ช่วยในการหาคำตอบใน Microsoft Excel โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้เกิดระยะทางในการขนส่งน้ำดื่มต่ำที่สุด ในการดำเนินงานวิจัยผู้วิจัยได้แบ่งเส้นทางในการเดินรถขนส่งน้ำดื่มออกเป็นกรณีย่อยได้ 3 กรณี หลังจากนั้นได้ทำการประมวลผลหาคำตอบ เพื่อหาระยะทางที่สั้นที่สุดในแต่ละกรณี และนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกัน ผลจากการเปรียบเทียบคำตอบที่ได้จากทั้ง 3 กรณีพบว่ากรณีที่ 3 มีระยะทางในการขนส่งน้ำดื่มที่สั้นที่สุดเท่ากับ 60.15 กิโลเมตร มีน้ำหนักบรรทุก 3,831.40 กิโลกรัม แต่จากข้อมูลพบว่ารถบรรทุกน้ำดื่มของบริษัทสามารถบรรทุกได้สูงสุดเพียง 2,120 กิโลกรัมเท่านั้น จึงทำให้ไม่สามารถจัดส่งน้ำดื่มได้ทั้งหมดในรอบเดียวดังกรณีที่ 3 ได้ ดังนั้นกรณีที่ 2 จึงเป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดในการจัดส่งน้ำดื่มของห้างหุ้นส่วนจำกัด รัตมี 2015 คือ มีระยะทางเดินรถขนส่งน้ำดื่มรวมที่สั้นที่สุดเท่ากับ 72.26 กิโลเมตร โดยเส้นทางที่ 1 และ 2 จะต้องบรรทุกน้ำดื่มเพื่อจัดส่งให้กับลูกค้า 2,063.60 กิโลกรัม และ 1,767.80 กิโลกรัม ตามลำดับ และเมื่อเทียบผลจากการดำเนินงานในปัจจุบันของบริษัทพบว่า การจัดเส้นทางขนส่งในกรณีที่ 2 มีระยะทางที่สั้นกว่า 108.24 กิโลเมตร หรือคิดเป็นระยะทางที่ใช้ในการขนส่งน้ำดื่มลดลงร้อยละ 59.97 ทำให้บริษัทสามารถลดค่าใช้จ่ายในการขนส่งน้ำดื่มได้มากถึง 4,138.56 บาท/เดือน จากระยะทางที่ใช้ในการขนส่งที่สั้นลงทำให้ใช้เวลาในการจัดส่งน้อยลงส่งผลให้พนักงานสามารถจัดส่งน้ำดื่มเพื่อตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้รวดเร็วยิ่งขึ้น เป็นการ

สร้างความได้เปรียบในด้านการแข่งขันให้กับบริษัทและยังเพิ่มโอกาสในการให้บริการลูกค้ารายใหม่ ๆ อีกด้วย

7. ข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัยเรื่องการจัดเส้นทางการขนส่งโดยใช้โปรแกรมเชิงเส้น พบว่าสามารถใช้โปรแกรมเชิงเส้นในการจัดเส้นทางการขนส่งน้ำดื่มให้ครบทุกร้านค้าภายในรอบการขนส่งเดียวได้ ดังกรณีที่ 3 แต่มีข้อจำกัดเรื่องน้ำหนักบรรทุกของรถขนส่งทำให้จำนวนน้ำดื่มที่บรรทุกได้ไม่เพียงพอต่อการจัดส่งทุกร้าน ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีข้อเสนอแนะดังนี้

1. บริษัทควรเพิ่มประสิทธิภาพของรถขนส่งน้ำดื่ม เพื่อให้สามารถบรรทุกและจัดส่งน้ำดื่มให้กับลูกค้าทั้งหมดได้ภายในรอบเดียว โดยทั้งนี้จะต้องไม่ขัดกับกฎหมายหรือข้อบังคับว่าด้วยการขนส่ง

2. บริษัทควรมีการจัดบันทึกหรือมีระบบติดตามความต้องการของแต่ละร้านค้า เพื่อให้สามารถบรรทุกและจัดส่งน้ำดื่มได้สอดคล้องกับความต้องการของลูกค้าได้มากยิ่งขึ้น

8. เอกสารอ้างอิง

- A. J. Mason and I. Dunning. (2010, November 29-30, 2010). OpenSolver: Open source optimisation for Excel. **Paper presented at the Proceedings of the 45th Annual Conference of the ORSNZ**, Auckland, New Zealand.
- Andrew, J. Mason. (2012). OpenSolver-An Open Source Add-in to Solve Linear and Integer Programmes in Excel. **Operations Research Proceedings 2011** (pp. 401-406). Berlin Heidelberg: Springer.
- Frederick, S. Hillier. (2010). **Introduction to operations research, (9th ed.)**, Boston: McGraw-Hill.
- Ketsarapong, P. and Choo-ngern, A. (2015). Transportations management of the SME food processing plant with vehicle routing problem model. **Kasem Bundit Engineering Journal**, 5(2), 39-55. (in Thai).
- Paolo Toth and Daniele Vigo. (2014). **Vehicle routing: problems, methods, and applications**, SIAM.
- Phosamrit, N. and Thammaponphirat, W. (2010). A Mathematical Model for Inventory-routing Problem. **The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok**, 20(3), 544-551. (in Thai).
- Prachachat Online. (2014). **"30 billion drinking water market" race, Singha - Crystal - Nestle to brand extension**. Retrieved March 18, 2016, from http://www.prachachat.net/news_detail.php?newsid=1403766330 (in Thai).

- _____. (2015). **Drinking water market growth to 30 billion**. Retrieved March 18, 2016, from http://www.prachachat.net/news_detail.php?newsid=1432183793 (in Thai).
- Rasmussen, R. (2011). TSP in Spreadsheets – a Guided Tour. **International Review of Economics Education**, vol. 10(1), pp. 94-116.
- Ruben,R., Maroto, C and Alcaraz, J. (2004). A decision support system for a real vehicle routing problem. **European Journal of Operational Research**, vol. 153(3), pp. 593-606.
- Sae-lee, P. and Ritvirool, A. (2014). A Mixed-Integer Linear Programming Model for Workforce Planning in the Pickled-Ginger Production. **Naresuan University Engineering Journal**, 9(2), 48-54. (in Thai).
- Sae-lee, P. and Ritvirool, A. (2014). An Integer Linear Programming Model for Herbal Cosmetic Production Planning. **KMUTT Research and Development Journal**, 37(4), 347-360 (in Thai).
- Sirioran, P. (2014). TRANSPORTATION COST REDUCTION BY OPTIMAL VEHICLE ROUTING MANAGEMENT A CASE STUDY: THE SOFT DRINK BUSINESS. **Panyapiwat Journal**, 5, 272-279. (in Thai).
- Winyangkoon, S., Jeenaboonroeng, N., Anan-uaoe, P., Chaiwongsakda, N., Kanthawong, P., Muakkaur, N. and Chanthaphoon, T. (2014). An Application of the Travelling Salesman Problem Case Study: Routing for Streetcar Tour of the Chiang Rai Municipality. **Industrial Technology Lampang Rajabhat University Journal**, 7(2), 85-97. (in Thai).

การพัฒนาส่วนผสมของเนื้อดินปั้นโดยใช้แหล่งดินบ้านหนองห้วยยาง เพื่อทำผลิตภัณฑ์สโตนแวร์

Development of a clay mixture from Ban Nong Hua Yang soil for stoneware pottery production

เพียรพิน ก่อวุฒิพงศ์^{1*}

^{1*}สาขาวิชาเซรามิกส์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม

156 หมู่ 5 ตำบลพลายชุมพล อำเภอเมืองพิษณุโลก จังหวัดพิษณุโลก 65000

โทรศัพท์ 081-8886657 โทรสาร 055-282792 E-mail : p_kowuttiiphong@hotmail.com

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีจุดมุ่งหมาย เพื่อพัฒนาส่วนผสมของเนื้อดินปั้นสำหรับทำผลิตภัณฑ์สโตนแวร์ มีวิธีดำเนินการวิจัยเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนที่ 1 การทดสอบสมบัติของเนื้อดินปั้นที่มีอัตราส่วนผสมระหว่างดินบ้านหนองห้วยยาง ตำบลท่าทอง อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก ร่วมกับดินขาวระนอง และทราย ด้วยการเลือกแบบเจาะจงจากตารางสามเหลี่ยม จำนวน 36 สูตรส่วนผสม โดยทำการเผาทดลองที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศออกซิเดชัน แล้วนำมาทดสอบสมบัติทางกายภาพทั้งก่อนเผาและหลังเผา ได้แก่ ความหดตัว ความทนไฟ ความแข็งแรง การดูดซึมน้ำ และสีของเนื้อดินปั้น ขั้นตอนที่ 2 การผลิตผลิตภัณฑ์ประเภทถ้วยชามจากเนื้อดินปั้นสโตนแวร์ ด้วยวิธีการขึ้นรูปด้วยแป้นหมุนและขึ้นรูปด้วยใบมีด

ผลการวิจัยพบว่า เนื้อดินปั้นจำนวน 22 สูตรส่วนผสม มีสมบัติตามเกณฑ์เนื้อดินปั้นสโตนแวร์ และคัดเลือกสูตรส่วนผสมสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ คือ สูตรส่วนผสมที่ 17 ประกอบด้วยส่วนผสมของดินบ้านหนองห้วยยาง ร้อยละ 30 ทราย ร้อยละ 20 และดินขาวระนอง ร้อยละ 50 มีค่าความหดตัวร้อยละ 11.08 มีค่าความแข็งแรง 190.30 Kg/cm³ และมีค่าการดูดซึมน้ำ ร้อยละ 1.27 เพื่อทำการผลิตผลิตภัณฑ์ขึ้นรูปด้วยวิธีการขึ้นรูปด้วยแป้นหมุนและขึ้นรูปด้วยใบมีด ซึ่งสามารถขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ได้ดีทั้งสองวิธี

คำสำคัญ: ดินบ้านหนองห้วยยาง, เนื้อดินปั้น, สโตนแวร์

Abstract

The purpose of this research is to develop a mixture of clay for the manufacturing of stoneware. There are 2 steps to perform in this research project. The first step was to create a mixture of ceramic body and to study its various physical properties. The experimental samples were made up from various compositions of Ban Nong Hua Yang Clay (from Tha Thon in Phitsanulok province) and Ranong Clay. These 36 formulae were tested using a Purposive Sampling Technique along with a Triaxial Diagram of the different compositions at a temperature of 1230°C within an oxidation atmosphere. The testing of the physical properties were conducted before and after

firing to measure shrinkage, the softening point, strength, water absorption and the fired color.

Step 2 in the research involved the production of tableware from a swivel wheel using the best composition selected from the results of step 1.

The results showed that 22 formulae passed the standard to be classed as stoneware clay. The 17th formula, which consisted of 30% Ban Nong Hua Yang Clay, 20% sand, and 50% Ranong clay was selected for the production. The shrinkage level was 11.08%, its strength was measured at 190.30 Kg/cm³, and water absorption of 1.27%. The product was formed by using a swivel wheel combined with a throwing and jiggling method and gave good quality results.

Keywords : Ban Nong Hua Yang Clay, Body, Stoneware

1. บทนำ

เครื่องปั้นดินเผานั้นเกิดขึ้นได้เนื่องจากความจำเป็นและความต้องการของมนุษย์ ตั้งแต่ดั้งเดิมผลิตขึ้นเพื่อเป็นภาชนะใส่อาหารและน้ำ ต่อมามีการพัฒนาเครื่องปั้นดินเผาให้มีคุณภาพดียิ่งขึ้น และมีประโยชน์ใช้สอยเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ ตลอดจนการพัฒนาเครื่องปั้นดินเผาให้มีความหลากหลายดังปรากฏให้เห็นในปัจจุบัน ปัจจัยสำคัญในการผลิตคือ วัตถุดิบที่มีอยู่ในพื้นดิน บางอย่างได้มาจากสินแร่ธรรมชาติ เช่น ดิน หินฟันม้า บางอย่างได้จากการสกัดจากสินแร่ตามธรรมชาติ และนำมาทำให้บริสุทธิ์ด้วยกระบวนการทางเคมี เช่น อะลูมินา จากแร่บอกไซต์ และที่ได้จากการสังเคราะห์ ตลอดจนสารอินทรีย์บางชนิดที่ใช้เป็นตัวช่วยในการขึ้นรูป และมีคุณสมบัติที่เหมาะสมนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตเครื่องปั้นดินเผาได้ ดินจึงเป็นวัตถุดิบที่สำคัญ โดยเฉพาะการผลิตผลิตภัณฑ์ภาชนะรองรับอาหาร สุขภัณฑ์ กระเบื้อง และอื่น ๆ ดินมีหลายชนิดที่แตกต่างกันไป อาจจะแตกต่างกันไปในเรื่องสี หรือต่างกันในเรื่องโครงสร้าง รวมทั้งคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี เป็นต้นว่ามีความเหนียวต่างกัน มีปริมาณ SiO₂ ต่างกัน (Pimkaokum, P., 1992)

จังหวัดพิษณุโลกเป็นแหล่งผลิตเครื่องปั้นดินเผาทั้งในอดีตและปัจจุบัน โดยมีแหล่งผลิตหลายแหล่ง ได้แก่ 1) แหล่งวิสาหกิจชุมชนเครื่องปั้นดินเผาบ้านเตาไห ตำบลหัวรอ อำเภอเมือง 2) แหล่งเครื่องปั้นดินเผาบ้านวังดินสอ ตำบลวังนกแอ่น อำเภอวังทอง 3) แหล่งเครื่องปั้นดินเผาบ้านท่าโพธิ์ ตำบลท่าโพธิ์ อำเภอเมือง และ 4) แหล่งเครื่องปั้นดินเผาบางแก้ว ตำบลปลักแรด อำเภอบางระกำ เป็นต้น ซึ่งจากการสำรวจข้อมูลกระบวนการผลิตเครื่องปั้นดินเผาของกลุ่มบ้านวังดินสอพบว่าผู้ประกอบการเครื่องปั้นดินเผา ใช้แหล่งวัตถุดิบในท้องถิ่น คือ แหล่งดินบ้านหนองหัวยางเป็นวัตถุดิบหลัก สำหรับนำมาผลิตผลิตภัณฑ์ประเภทกระถางต้นไม้ มีผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็นผลิตภัณฑ์ประเภทเอิเทินแวร์ (Earthenware) จัดเป็นผลิตภัณฑ์ตามประเภทของเนื้อดินปั้นที่มีคุณภาพต่ำและราคาถูก ปัจจุบันการผลิตผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาผู้ผลิตใช้วัตถุดิบจากหลายแหล่ง โดยเฉพาะวัตถุดิบจากดินท้องถิ่น จะเห็นได้ว่าการนำดินท้องถิ่นดังกล่าวมาใช้ประโยชน์ในหลาย ๆ ด้าน เช่น นำมาถมทำถนน ถมที่ดินเพื่อการก่อสร้าง และการเพาะปลูก นอกจากนี้ร่วมถึงการนำมาใช้สำหรับการผลิตเครื่องปั้นดินเผาอีกด้วย (Wilai, P. and Wilai, A.,

2016) กล่าวถึงปัจจัยสำคัญที่มีต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาของทุกชุมชน คือ คุณภาพวัตถุดิบที่เป็นเนื้อดินเอร์ทเทนแวร์ เป็นวัตถุดิบที่หาง่าย ตามบริเวณหรือใกล้เคียงชุมชน แต่มีคุณภาพต่ำทั้งในด้านความแข็งแรง การดูดซึมน้ำและความสะอาด จึงเหมาะสำหรับ การผลิตของใช้ราคาถูก ซึ่งการเปลี่ยนแปลงการใช้วัตถุดิบจากเดิมมาพัฒนาการใช้วัตถุดิบที่มีคุณภาพสูงในระดับ เซรามิกส์ประเภทสโตนแวร์เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูง และเหมาะสำหรับการนำไปใช้อย่างแท้จริง

ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจศึกษาแหล่งดินบ้านหนองห้วยยาง ตำบลท่าทอง อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก ซึ่งเป็นดินในท้องถิ่น มีลักษณะที่ค่อนข้างพิเศษ คือ มีสีเดียวกันและมีเนื้อดินที่สม่ำเสมอในปริมาณมาก มีสิ่งเจือปนน้อย ในขณะที่เนื้อดินลักษณะดังกล่าว สามารถพัฒนาเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตเครื่องปั้นดินเผาประเภทสโตนแวร์ได้ เนื่องจากเป็นแหล่งดินหาง่าย จำหน่ายในราคาถูก อยู่ในพื้นที่ใกล้ผู้ผลิต มีระบบการขนส่งสะดวก จากลักษณะของดินบ้านหนองห้วยยางที่กล่าวมาแล้วนั้น จึงสามารถนำมาพัฒนาสมบัติของเนื้อดินโดยการผสมกับวัตถุดิบอื่น ๆ ที่มีคุณภาพ ให้สามารถผลิตผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาที่มีคุณภาพประเภทสโตนแวร์ โดยใช้วัตถุดิบในท้องถิ่นเป็นหลัก ด้วยกระบวนการการตลาดทางวิทยาศาสตร์ประยุกต์สาขาเซรามิกส์ ผลิตผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาจากดินแหล่งบ้านหนองห้วยยาง ซึ่งเป็นแนวทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาให้มีคุณภาพดีขึ้นและสร้างความมีเอกลักษณ์ของท้องถิ่น สอดคล้องกับยุทธศาสตร์การพัฒนาอุตสาหกรรมเซรามิกส์ ด้านการสร้างเอกลักษณ์เมืองหัตถกรรมเซรามิกส์ พัฒนามาตรฐานสินค้าหัตถกรรมเซรามิกส์ ประชาสัมพันธ์และสร้างช่องทางการจำหน่ายสินค้าหัตถกรรมเซรามิกส์ ให้เกิดขึ้นในพื้นที่ที่มีการผลิตผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ โดยการสร้างสรรค์และพัฒนาผลิตภัณฑ์ให้มีเอกลักษณ์ด้วยการใช้เครื่องหมายการค้าท้องถิ่น (Local Brand) (Office of Industrial Economics., 2012) เกิดการสร้างอาชีพหลักหรืออาชีพเสริมของชุมชนได้ ทั้งยังสอดคล้องกับการพัฒนาทรัพยากรธรรมชาติให้เกิดประโยชน์สูงสุดของแหล่งผลิตเครื่องปั้นดินเผาในจังหวัดพิษณุโลก และจังหวัดใกล้เคียง

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

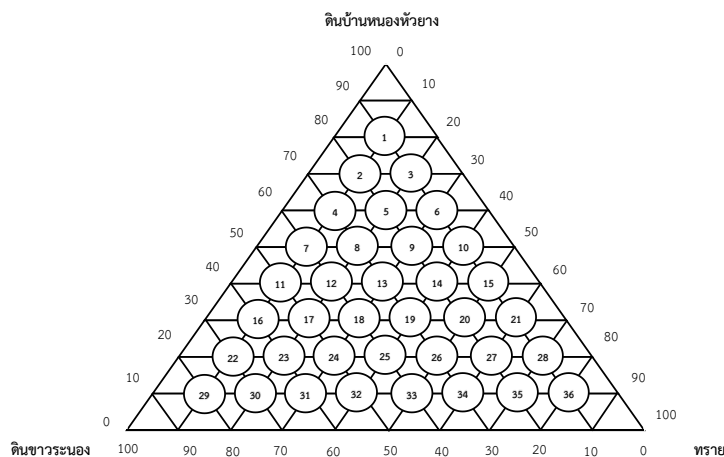
เพื่อพัฒนาส่วนผสมและทดสอบสมบัติของเนื้อดินปั้นจากดินบ้านหนองห้วยยาง ดินขาวระนอง และทรายสำหรับทำผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาประเภทสโตนแวร์ ที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส

3. วิธีดำเนินการวิจัย

วิธีการดำเนินการวิจัยครั้งนี้ มี 2 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนที่ 1 การพัฒนาส่วนผสมเนื้อดินปั้นสโตนแวร์ ขั้นตอนที่ 2 การผลิตผลิตภัณฑ์จากเนื้อดินปั้นสโตนแวร์

ขั้นตอนที่ 1 การพัฒนาส่วนผสมเนื้อดินปั้นสโตนแวร์

การวิจัยครั้งนี้ ได้กำหนดขอบเขตของการวิจัยด้านประชากรและกลุ่มตัวอย่าง ได้แก่ ส่วนผสมของดินบ้านหนองห้วยยาง ตำบลท่าทอง อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก ดินขาวระนอง และทราย โดยเลือกแบบเจาะจง (Purposive Sampling) จากตารางสามเหลี่ยมด้านเท่า (Triaxial Diagram) อย่างมีระบบ จำนวน 36 สูตรส่วนผสมดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ตารางสามเหลี่ยมแสดงส่วนผสมของเนื้อดินปั้น

จากภาพที่ 1 แสดงส่วนผสมของเนื้อดินปั้นจากดินบ้านหนองห้วยยาง ดินขาวระนอง และทราย ที่ใช้ต่างกันเนื้อดินปั้น โดยแต่ละสูตรส่วนผสมคิดเป็นร้อยละซึ่งแสดงได้ดัง ตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของเนื้อดินปั้น

สูตรที่	อัตราส่วนผสมของวัตถุดิบ (ร้อยละ)			สูตรที่	อัตราส่วนผสมของวัตถุดิบ (ร้อยละ)		
	ดินบ้าน หนองห้วยยาง	ดินขาว ระนอง	ทราย		ดินบ้าน หนองห้วยยาง	ดินขาว ระนอง	ทราย
1	80	10	10	19	30	30	40
2	70	20	10	20	30	20	50
3	70	10	20	21	30	10	60
4	60	30	10	22	20	70	10
5	60	20	20	23	20	60	20
6	60	10	30	24	20	50	30
7	50	40	10	25	20	40	40
8	50	30	20	26	20	30	50
9	50	20	30	27	20	20	60
10	50	10	40	28	20	10	70
11	40	50	10	29	10	80	10
12	40	40	20	30	10	70	20
13	40	30	30	31	10	60	30
14	40	20	40	32	10	50	40

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของเนื้อดินปั้น (ต่อ)

สูตรที่	อัตราส่วนผสมของวัตถุดิบ (ร้อยละ)			สูตรที่	อัตราส่วนผสมของวัตถุดิบ (ร้อยละ)		
	ดินบ้าน หนองหัวยาง	ดินขาว ระนอง	ทราย		ดินบ้าน หนองหัวยาง	ดินขาว ระนอง	ทราย
15	40	10	50	33	10	40	50
16	30	60	10	34	10	30	60
17	30	50	20	35	10	20	70
18	30	40	30	36	10	10	80

1. การพัฒนาส่วนผสมเนื้อดินปั้น ดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้

1.1 เตรียมวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง และนำวัตถุดิบอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส

1.2 นำส่วนผสมของเนื้อดินปั้นที่ได้จากการผสมตัวอย่าง มาชั่งโดยเครื่องชั่งระบบดิจิทัล
สูตรส่วนผสมละ 500 กรัม

1.3 บดส่วนผสมของแต่ละสูตรโดยใช้หม้อบด Hight speed Ball Mill : Centrifugal
เป็นเวลา 20 นาที

1.4 นำเนื้อดินปั้นแต่ละสูตรส่วนผสม มาผ่านตะแกรงขนาดเบอร์ 120 เมช

1.5 นำเนื้อดินปั้นที่ได้มาขึ้นรูปแท่งทดลองขนาดความกว้าง 2 เซนติเมตร หนา 1
เซนติเมตร ยาว 12 เซนติเมตร ด้วยวิธีการอัดแบบพิมพ์กด

1.6 นำแท่งทดลองทั้งหมดไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส นำมาชั่งน้ำหนัก
วัดขนาด จดบันทึก

1.7 นำแท่งทดลองมาทดสอบสมบัติทางกายภาพก่อนเผา หาค่าการหดตัว และค่าความ
แข็งแรงโดยเครื่องทดสอบความแข็งแรง (Modulus of Rupture : MOR)

1.8 นำแท่งทดลองไปเผาที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส บรรยากาศแบบออกซิเดชัน

1.9 นำแท่งทดลองที่ผ่านการเผามาทดสอบสมบัติทางกายภาพหลังเผา ซึ่งได้แก่ การหด
ตัวภายหลังการเผา ความแข็งแรงหลังเผา การดูดซึมน้ำ ความทนไฟ และสีภายหลังการเผา
โดยเครื่องมือเทียบสีมาตรฐาน Fan 4 The Royal Horticultural Society London

2. การวิเคราะห์ข้อมูลในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ดำเนินการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ
ของเนื้อดินปั้นก่อนเผาและหลังเผา ดังต่อไปนี้

2.1 การหดตัวของเนื้อดินปั้นก่อนเผาและหลังเผา (Rhodes, D., 1974)

1) การหดตัวเมื่อแห้ง วิเคราะห์โดยการคำนวณจากสูตร ดังนี้

$$\text{ร้อยละการหดตัวของดินแห้ง} = \frac{\text{ความยาวของดินเปียก} - \text{ความยาวของดินแห้ง}}{\text{ความยาวของดินเปียก}} \times 100$$

2) การหดตัวภายหลังการเผา วิเคราะห์โดยการคำนวณจากสูตร ดังนี้

$$\text{ร้อยละการหดตัวของดินหลังเผา} = \frac{\text{ความยาวของดินแห้ง} - \text{ความยาวของดินหลังเผา}}{\text{ความยาวของดินแห้ง}} \times 100$$

2.2 ความแข็งแรงของเนื้อดินปั้นก่อนเผาและหลังเผา วิเคราะห์โดยการคำนวณจากสูตร (Andrews, A.I., 1957) ดังนี้

$$M = \frac{3PL}{2bd^2}$$

โดย M = ค่าความแข็งแรงของดิน หน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
 P = แรงที่ใช้กดทำให้แท่งทดสอบหัก หน่วยเป็นกิโลกรัม
 L = ระยะห่างของแท่นรองรับแท่งทดสอบ หน่วยเป็นเซนติเมตร
 b = ความกว้างของแท่งทดสอบ หน่วยเป็นเซนติเมตร
 d = ความหนาของแท่งทดสอบ หน่วยเป็นเซนติเมตร

2.3 การดูดซึมน้ำ วิเคราะห์โดยการคำนวณจากสูตร (Rhodes, D., 1974) ดังนี้

$$A = \frac{W - D}{D} \times 100$$

โดย A = ร้อยละของการดูดซึมน้ำ
 W = น้ำหนักของแท่งทดสอบที่อิ่มตัว
 D = น้ำหนักของแท่งทดสอบที่แห้ง

2.4 สีภายหลังการเผา โดยการเปรียบเทียบสีที่ปรากฏภายหลังจากการเผากับแผ่นเทียบสี Fan 4 The Royal Horticultural Society London

2.5 ความทนไฟ วิเคราะห์โดยการเปรียบเทียบกับ Cone มาตรฐาน ตามลักษณะการเอียงของแท่งทดสอบรูปท่อนวดอุณหภูมิว่าเอียงล้มหรือไม่ ภายหลังจากการเผาที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียสแล้ว นั่นคือความทนไฟของเนื้อดินปั้น

ขั้นตอนที่ 2 การผลิตผลิตภัณฑ์จากเนื้อดินปั้นสโตนแวร์

1. คัดเลือกเนื้อดินปั้นสโตนแวร์ที่ได้จากผลการทดลองในขั้นตอนที่ 1 โดยใช้นิยามของเครื่องปั้นดินเผาสโตนแวร์ คือ เครื่องปั้นดินเผาเนื้อละเอียด แกร่ง มีความพรุนตัวต่ำ ทึบแสง ซึ่งทำขึ้นจากดินปนสวณประกอบหลัก เช่น ดินขาว ดินเหนียว อาจผสมหินหรือแร่ธาตุต่าง ๆ เช่น หินทรายแก้ว หินควอตซ์ หินฟนมา ในอัตราส่วนที่เหมาะสม ผ่านกระบวนการขึ้นรูปให้ได้รูปทรงตามต้องการ อาจตกแต่ง ลวดลาย แล้วนำไปเคลือบผิว (Thai Industrial Standards Institute., 2013) สอดคล้องกับ โกมล รักษ์วงศ์ (2531) (Rakwong, K., 1988) กล่าวว่า การพิจารณาสมบัติเนื้อดินปั้น สโตนแวร์จากเกณฑ์ ดังต่อไปนี้

1.1 พิจารณาเนื้อดินทนความร้อนสูงถึงอุณหภูมิสูง 1230 - 1300 องศาเซลเซียส ภายหลังการเผาที่อุณหภูมิที่กำหนด

1.2 พิจารณาการดูดซึมน้ำของเนื้อดินปั้นไม่เกินร้อยละ 3

1.3 พิจารณาความแข็งแรงตั้งแต่ 9.1 – 682 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

2. เตรียมส่วนผสมของเนื้อดินปั้นตามสูตรที่คัดเลือกจำนวน 1 สูตร ส่วนผสมปฏิบัติการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีการขึ้นรูปด้วยแป้นหมุนและขึ้นรูปด้วยใบมีด นำผลิตภัณฑ์เผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ทำการชุบเคลือบ และเผาเคลือบผลิตภัณฑ์ อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส บรรยากาศออกซิเดชัน

4. ผลการวิจัย

4.1 ผลการทดสอบสมบัติของเนื้อดินปั้น

การทดลองหาอัตราส่วนผสมเนื้อดินปั้นสโตนแวร์ เพื่อหาคุณสมบัติทางกายภาพของเนื้อดินปั้นก่อนเผาและภายหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศออกซิเดชัน ได้ผลการวิเคราะห์ข้อมูลแสดงรายละเอียดดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของเนื้อดินปั้นก่อนเผา

สูตรที่	สมบัติทางกายภาพของเนื้อดินปั้นก่อนเผา		สูตรที่	สมบัติทางกายภาพของเนื้อดินปั้นก่อนเผา	
	ความหดตัว (ร้อยละ)	ความแข็งแรง (Kg/cm^3)		ความหดตัว (ร้อยละ)	ความแข็งแรง (Kg/cm^3)
1	4.00	8.18	19	5.00	9.90
2	5.00	9.00	20	4.00	12.60
3	5.00	6.30	21	5.00	7.20
4	5.00	7.20	22	4.00	7.20
5	5.00	9.00	23	6.00	14.40
6	5.00	7.20	24	4.00	9.90
7	6.00	12.60	25	4.00	12.60
8	6.00	10.80	26	4.00	7.20
9	5.00	7.20	27	5.00	11.70
10	3.00	8.10	28	4.00	10.80
11	6.00	9.00	29	6.00	13.00
12	6.00	10.80	30	6.00	5.40
13	6.00	9.90	31	6.50	11.70
14	5.00	12.60	32	6.00	13.50
15	4.00	9.00	33	6.00	13.20
16	4.00	11.70	34	4.00	12.60
17	5.00	10.50	35	4.00	3.60
18	5.00	9.90	36	4.00	9.90

จากตารางที่ 2 เนื่อดินปั้นก่อนเผาที่มีค่าความหดตัวน้อยที่สุด ได้แก่ สูตรส่วนผสมที่ 10 มีค่าร้อยละ 3.00 เนื่อดินปั้นก่อนเผาที่มีค่าการหดตัวมากที่สุด ได้แก่ สูตรส่วนผสมที่ 31 มีค่าร้อยละ 6.50 เนื่อดินปั้นก่อนเผาที่มีค่าความแข็งแรงน้อยที่สุด ได้แก่ สูตรส่วนผสมที่ 35 มีค่า 3.60 Kg/cm³ และเนื่อดินปั้นที่มีค่าความแข็งแรงมากที่สุด ได้แก่ สูตรส่วนผสมที่ 32 มีค่า 13.50 Kg/cm³

ตารางที่ 3 ผลวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของเนื่อดินปั้นภายหลังเผา

สูตร ที่	สมบัติทางกายภาพของเนื่อดินปั้นหลังเผาที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส				
	ความแข็งแรง (Kg/cm ³)	ความหดตัว (ร้อยละ)	การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)	ความทนไฟ	สี
1*	225.50	14.53	0.49	ทนไฟได้	G-O GREYED – ORANGE
2*	213.40	6.38	0.49	ทนไฟได้	G-O GREYED – ORANGE
3*	150.70	6.68	1.17	ทนไฟได้	G-O GREYED – ORANGE
4*	113.30	9.86	0.49	ทนไฟได้	G-O GREYED – ORANGE
5*	133.10	6.68	0.74	ทนไฟได้	G-O GREYED – ORANGE
6*	96.80	5.62	0.75	ทนไฟได้	G-O GREYED – ORANGE
7*	91.30	10.14	2.53	ทนไฟได้	G-O GREYED – ORANGE
8*	150.70	0.22	0.98	ทนไฟได้	G-O GREYED – ORANGE
9*	147.96	1.38	0.86	ทนไฟได้	G-O GREYED – ORANGE
10*	138.60	2.44	0.89	ทนไฟได้	G-O GREYED – ORANGE
11*	138.60	5.62	1.24	ทนไฟได้	O-W ORANG – WHITE
12*	166.10	3.80	1.46	ทนไฟได้	O-W ORANG – WHITE
13*	125.40	2.74	1.50	ทนไฟได้	G-O GREYED – ORANGE
14*	138.6	0.63	1.28	ทนไฟได้	G-O GREYED – ORANGE

ตารางที่ 3 ผลวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของเนื้อดินปั้นภายหลังเผา (ต่อ)

สูตร ที่	สมบัติทางกายภาพของเนื้อดินปั้นหลังเผาที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส				
	ความแข็งแรง (Kg/cm ³)	ความหดตัว (ร้อยละ)	การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)	ความทนไฟ	สี
15	110.0	6.25	3.61	ทนไฟได้	G-O GREYED – ORANGE
16*	188.10	11.57	2.96	ทนไฟได้	O-W ORANG – WHITE
17*	190.30	11.08	1.27	ทนไฟได้	O-W ORANG – WHITE
18*	135.30	10.42	1.05	ทนไฟได้	G-O GREYED – ORANGE
19*	92.40	7.95	1.48	ทนไฟได้	G-O GREYED – ORANGE
20*	105.60	8.42	1.54	ทนไฟได้	G-O GREYED – ORANGE
21*	66.00	7.66	2.44	ทนไฟได้	G-O GREYED – ORANGE
22	105.60	9.76	6.08	ทนไฟได้	O-W ORANG – WHITE
23	135.30	10.15	3.24	ทนไฟได้	O-W ORANG – WHITE
24	114.40	10.42	3.15	ทนไฟได้	O-W ORANG – WHITE
25	96.80	8.71	3.21	ทนไฟได้	O-W ORANG – WHITE
26*	83.60	7.66	2.47	ทนไฟได้	G-O GREYED – ORANGE
27*	52.80	7.29	1.13	ทนไฟได้	G-O GREYED – ORANGE
28	48.80	7.87	3.28	ทนไฟได้	G-O GREYED – ORANGE
29	86.60	9.94	5.27	ทนไฟได้	O-W ORANG – WHITE
30	84.70	8.90	3.89	ทนไฟได้	O-W ORANG – WHITE
31	84.70	10.41	3.81	ทนไฟได้	O-W ORANG – WHITE
32	71.50	5.86	4.47	ทนไฟได้	O-W ORANG – WHITE
33	53.90	8.20	4.00	ทนไฟได้	O-W ORANG – WHITE
34	42.90	6.47	4.92	ทนไฟได้	G-O GREYED – ORANGE
35	34.10	6.63	5.51	ทนไฟได้	G-O GREYED – ORANGE

ตารางที่ 3 ผลวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของเนื้อดินปั้นภายหลังเผา (ต่อ)

สูตร ที่	สมบัติทางกายภาพของเนื้อดินปั้นหลังเผาที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส				
	ความแข็งแรง (Kg/cm ³)	ความหดตัว (ร้อยละ)	การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)	ความทนไฟ	สี
36	20.90	4.62	6.10	ทนไฟได้	G-O GREYED – ORANGE

หมายเหตุ : * หมายถึง สูตรส่วนผสมที่มีสมบัติทางกายภาพตามเกณฑ์เนื้อดินปั้นสโตนแวร์ ที่มีคุณสมบัติตามเกณฑ์ที่กำหนด

จากตารางที่ 3 พบว่า เนื้อดินปั้นที่มีคุณสมบัติตามเกณฑ์เนื้อดินปั้นสโตนแวร์ ได้แก่ สูตรส่วนผสมที่ 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 16 17 18 19 20 21 26 และ 27 มีค่าความหดตัวอยู่ระหว่าง ร้อยละ 0.22 – 14.53 มีค่าความแข็งแรงอยู่ระหว่าง 52.80 – 225.50 Kg/cm³ และมีค่าการดูดซึมน้ำอยู่ระหว่าง ร้อยละ 0.49 – 2.96 ซึ่งมีส่วนผสมของดินบ้านหนองห้วยยาง อยู่ในช่วงร้อยละ 20 – 80 ทราวยอยู่ในช่วงร้อยละ 10 – 60 และดินขาวระนองอยู่ในช่วงร้อยละ 10 – 60 และเนื้อดินสามารถทนความร้อนในระดับอุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส ได้ทุกสูตรส่วนผสมดังภาพที่ 2 และภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ผลการทดลองเนื้อดินปั้นภายหลังการเผาที่ 1230 องศาเซลเซียส บรรยากาศออกซิเดชัน

4.2 ผลการผลิตผลิตภัณฑ์จากเนื้อดินปั้นสโตนแวร์

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้านคุณสมบัติทางกายภาพของเนื้อดินปั้นก่อนเผา และหลังเผา ผู้วิจัยได้พิจารณาคัดเลือกเนื้อดินปั้นที่มีคุณสมบัติทางกายภาพเหมาะสมที่สุด เพื่อนำมาขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ประเภทผลิตภัณฑ์บนโต๊ะอาหาร ได้แก่ สูตรส่วนผสมที่ 17 มีส่วนผสมของดิน

บ้านหนองห้วยยาง ร้อยละ 30 ทราย ร้อยละ 20 และดินขาวระนอง ร้อยละ 50 มีค่าความหดตัว ร้อยละ 11.08 มีค่าความแข็งแรง 190.30 Kg/cm^3 และ มีค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 1.27 โดยวิธีการ ขึ้นรูปด้วยแป้นหมุนและขึ้นรูปด้วยใบมีด ซึ่งสามารถขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ได้ดีทั้งสองวิธี และนำมาเคลือบ ผลิตภัณฑ์ด้วยเคลือบขาวที่บเผาที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส ได้ผลิตภัณฑ์ดังภาพที่ 4 และภาพที่ 5



ภาพที่ 4 ผลิตภัณฑ์สโตนแวร์ที่ได้จากการทดลองขึ้นรูปโดยการวิธีขึ้นรูปด้วยแป้นหมุนและการขึ้นรูปด้วยใบมีด



ภาพที่ 5 ผลิตภัณฑ์สโตนแวร์ภายหลังการเผาเคลือบ

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

จากผลการวิจัย ผู้วิจัยสามารถอภิปรายผล ดังรายละเอียดต่อไปนี้

ด้านความหดตัวของเนื้อดินปั้นก่อนเผา พบว่า สูตรที่ 10 มีค่าการหดตัวน้อยที่สุด คือ ร้อยละ 3.00 ในส่วนผสมมีทรายปริมาณสูงถึงร้อยละ 40 ทำให้มีค่าความหดตัวน้อย และสูตรที่ 31 มีค่าการหดตัวมากที่สุด คือ ร้อยละ 6.50 จะเห็นว่ามีส่วนผสมของดินบ้านหนองห้วยยาง และดินขาวระนอง ปริมาณสูงถึงร้อยละ 70 มีความหดตัวมาก และเมื่อผ่านการเผาแล้ว พบว่า ในสูตรที่ 8 มีค่าการหดตัวน้อยที่สุด คือ ร้อยละ 0.22 และสูตรที่ 1 มีค่าการหดตัวร้อยละ 14.53 ซึ่งเนื้อดินปั้นมีส่วนผสมของดินบ้านหนองห้วยยาง และดินขาวระนองอยู่ในปริมาณมากทำให้เนื้อดินปั้นมีความเหนียวมาก และมีความละเอียดการดูดซับน้ำไว้ในเนื้อดินปั้นน้อย เมื่อน้ำระเหยออก ในระหว่างการอบ และการเผา โครงสร้างเม็ดดินเข้าแทนที่น้ำเป็นสาเหตุให้มีการหดตัวมากกว่าสูตรส่วนผสมอื่น ๆ ดังที่ ธิติมา

คุนยตยั้ง (2556) (Khunyotyng, T., 2013) กล่าวว่า ค่าการหดตัวของเนื้อดินมีความสัมพันธ์กับ ปริมาณวัตถุขี้ดินในอัตราส่วนผสม นอกจากนี้ สุขุมาล เล็กสวัสดิ์ (2548) (Leksawat, S., 2005) กล่าวว่า ดินจะมีการหดตัวเมื่อแห้งและเมื่อถูกเผา ดินต่างชนิดก็มีร้อยละการหดตัวต่างกัน จะพบการ หดตัวเมื่อแห้งเกิดจากเนื้อดินสูญเสียน้ำออกไป และการหดตัวหลังเผาเกิดจากโครงสร้างของเนื้อดิน หรือวัตถุขี้ดินเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมในขั้นตอนการเผา สอดคล้องกับ ดนัย อารยะพงษ์ (2538) (Arayapong, D., 1995) กล่าวว่า การเผาเนื้อดินปั้นจะทำให้เกิดการหดตัวอีกครั้งหนึ่ง การหดตัวหลัง เผาที่ค่าเป็นช่วงกว้าง เช่นเดียวกับการหดตัวหลังแห้ง องค์ประกอบที่สำคัญคือ ชนิดของดิน ขนาด ความละเอียดของดิน สารอินทรีย์ที่อยู่ในดิน ซึ่ง आयुวัฒน์ สว่างผล (2543) (Sawangpon, A., 2000) กล่าวว่า การหดตัวของดินมีความสำคัญต่อการผลิตเครื่องปั้นดินเผาเป็นอย่างยิ่ง เพราะถ้าดินหดตัว มากจะทำให้ผลิตภัณฑ์แตกร้าวได้ง่ายหรือทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่ตรงตามความต้องการ อาจส่งผลให้ ผลิตภัณฑ์แตกร้าวได้ง่ายหรือเกิดการบิดเบี้ยวได้ง่าย แต่ถ้าดินหดตัวน้อยหรือไม่มีการหดตัว แสดงให้ เห็นว่าเนื้อดินนั้นไม่มีความเหนียวทำให้เกิดปัญหาสำหรับการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์

ด้านความแข็งแรงของเนื้อดินปั้นก่อนเผา จะเห็นว่า สูตรที่ 35 มีความแข็งแรงน้อยที่สุด คือ 3.60 Kg/cm^3 พบว่า มีดินบ้านหนองห้วยยางและดินขาวระนองร้อยละ 30 มีทรายสูงถึงร้อยละ 70 ส่วนเนื้อดินปั้นก่อนเผาที่มีค่าความแข็งแรงมากที่สุด ได้แก่ สูตรที่ 32 มีค่า 13.50 Kg/cm^3 พบว่า ส่วนผสมที่มีดินบ้านหนองห้วยยางและดินขาวระนองในปริมาณมากถึงร้อยละ 60 ส่งผลให้มีความ แข็งแรงก่อนเผามาก เนื่องจากเป็นดินที่มีความเหนียว เนื้อดินมีความละเอียดเมื่อแห้งยึดเกาะกันแน่น ส่งผลให้เนื้อดินปั้นมาความแข็งแรงมาก สอดคล้องกับ โกมล รัชวงศ์ (2531) (Rakwong, K., 1988) ที่กล่าวว่า ดินเหนียวเป็นวัตถุดิบที่ใช้มากในอุตสาหกรรม ที่มีเม็ดละเอียดมีความเหนียวดีเหมาะกับการ ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ ให้ความแข็งแรงต่อผลิตภัณฑ์เมื่อยังไม่เผา ซึ่ง ปรีดา พิมพ์ขาวขำ (2539) (Pimkaokum, P., 1996) กล่าวว่า ดินเหนียวเมื่อแห้งมีความแข็งแรงสูงและมีความหดตัวสูงเช่นกัน เมื่อผสมเนื้อดินปั้นจะช่วยให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรงสูงตามด้วย ส่วนสูตรส่วนผสมที่มีความแข็งแรง น้อยที่สุดจะมีส่วนผสมของทรายสูง ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่ไม่มีความเหนียวส่งผลให้ความแข็งแรงลดลงด้วย เช่นกัน จากผลการทดลองขึ้นรูปแท่งทดลองพบว่าสูตรที่มีทรายมากขึ้นตามลำดับความเหนียว จะลดลง ซึ่งหลังจากผ่านการเผาแล้ว พบว่า สูตรที่มีค่าความแข็งแรงน้อยที่สุด ได้แก่ สูตรที่ 36 มีค่าความแข็งแรง 20.90 Kg/cm^3 ส่วนสูตรที่มีค่าความแข็งแรงมากที่สุด ได้แก่ สูตรที่ 1 มีค่าความ แข็งแรง 225.50 Kg/cm^3 เกิดจากโครงสร้างของวัตถุดิบในเนื้อดินปั้นเปลี่ยนแปลงบางส่วนเกิดการ หลอมละลายทำให้เนื้อดินหลังเผามีความแข็งแรงสูงมากขึ้น ดังที่ ประดุจฤดี สารสิทธิ์ (2543) (Sarasin, P., 2000) กล่าวว่า ความแข็งแรงภายหลังการเผาจะมีค่าสูงกว่าค่าความแข็งแรงก่อนเผา เนื่องจากอิทธิพลความร้อนที่มีต่อเนื้อดินปั้นทำให้โครงสร้างของเนื้อดินเปลี่ยนแปลงทำให้ผลิตภัณฑ์ มีความแข็งแรง มีความคงทนมากขึ้น สอดคล้องกับ ไพจิตร อังศิริวัฒน์ (2541) (Ingsirawat, P., 1998) กล่าวว่า การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพเป็นปรากฏการณ์อย่างหนึ่งที่เกิดขึ้น เมื่อเราทำการเผา ผลิตภัณฑ์หรือเนื้อดิน คือ การรวมตัวหลอมละลาย (Sintering) อนุภาคของเนื้อดินเดิมที่เป็นเม็ด ๆ ได้รับความร้อนจนลดพื้นที่ผิว และลดความพรุนตัวลงมาของเนื้อผลิตภัณฑ์ ซึ่งเพิ่มความแข็งแรง ให้เนื้อผลิตภัณฑ์หลังการเผา

ด้านการดูดซึมน้ำของเนื้อดินปั้นภายหลังการเผา พบว่า เนื้อดินปั้นที่มีค่าการดูดซึมน้ำน้อยที่สุด คือ สูตรที่ 1 2 และ 4 ร้อยละ 0.49 มีปริมาณของดินระหว่างร้อยละ 80 - 90 ส่วนเนื้อดินปั้นที่มีค่าการดูดซึมน้ำมากที่สุด คือ สูตรที่ 36 ร้อยละ 6.10 มีปริมาณของดินร้อยละ 20 ซึ่งเกิดจากเนื้อดินปั้นมีการหลอมหรือเผาถึงจุดสุกตัวรูพรุนจะเล็กลงทำให้เกิดช่องว่างเล็กลง ปริมาณน้ำที่เข้าไปภายในมีน้อยทำให้ค่าการดูดซึมน้ำน้อย แต่ถ้ามีรูพรุนมากและมีช่องว่างที่ใหญ่จะส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำมาก ดังที่ ประดุจฤดี สารสิทธิ์ (2543) (Sarasin, P., 2000) กล่าวว่า ผลิตภัณฑ์เซรามิกส์หลังจากการเผาแล้ว วัตถุดิบจะหลอมตัวกันเกิดเป็นโครงสร้างใหม่แต่โครงสร้างของเซรามิกส์ มักมีส่วนที่เป็นฟองอากาศขนาดเล็กปะปนอยู่ในโครงสร้าง ซึ่งเรียกว่า รูพรุน (Pore) นอกจากนี้ ปิรดา พิมพ์ขาวขำ (2539) (Pimkaokum, P., 1996) กล่าวไว้เช่นกันว่า ความพรุนตัวของผลิตภัณฑ์มีน้อยที่สุดที่อุณหภูมิระหว่าง 1100 - 1200 องศาเซลเซียส และจะมีค่ามากขึ้นเนื่องจากการขยายตัวของรูพรุน ซึ่งรูพรุนที่เกิดขึ้นเหล่านี้เกิดจากการสลายตัวของวัตถุดิบที่เป็นส่วนผสมของเนื้อดินปั้นที่เกิดปฏิกิริยาในขณะที่ทำการเผา

ความทนไฟของเนื้อดินปั้นภายหลังการเผา เนื้อดินปั้นทุกสูตรส่วนผสมสามารถทนความร้อนได้ ซึ่งจากผลการทดลองโดยการทำทุ่นทนไฟ ผลปรากฏว่า ลักษณะของแท่งทดลองเมื่อเผาถึงอุณหภูมิที่ทำการเผาสามารถทนความร้อนที่อุณหภูมินั้นได้ ดังที่ โกมล รักษ์วงศ์ (2531) (Rakwong, K., 1988) กล่าวว่า ทRAYจะให้ซิลิกาสูงใช้แทนหินเขียวหนุมานได้ หินเขียวหนุมานนำมาใช้ในอุตสาหกรรมวัตถุทนไฟได้ดี เนื่องจากเป็นวัตถุที่ทนความร้อนได้สูง นอกจากนี้สังเกตได้จากลักษณะของแท่งทดลองที่ยังคงรูปสัณฐานเดิมอยู่ได้ที่อุณหภูมิสูง

สีของเนื้อดินปั้นภายหลังการเผา พบว่าแต่ละสูตรส่วนผสมจะให้สีใกล้เคียงกันค่าของสีเนื้อดินปั้นตั้งแต่สีเทาอ่อนจนถึงสีน้ำตาลเข้มและสีเทาอมส้มสีที่ปรากฏนั้นเป็นสีที่มาจากเฟอร์ริกออกไซด์จากเนื้อดิน ซึ่งสอดคล้องกับคำกล่าวของ มัลลิกา ชัยชนะ (2545) (Chaicana, M., 2002) ว่าเนื้อดินที่มีเหล็กออกไซด์เป็นองค์ประกอบร้อยละ 5 - 10 เมื่อถูกเผาไหม้ในบรรยากาศเผาไหม้แบบบรรยากาศออกซิเดชันจะให้สีของเนื้อดินหลังเผาเป็นสีส้ม หรือสีน้ำตาลสำหรับบรรยากาศในการเผาไหม้แบบรีดักชันเป็นสีน้ำตาลหรือสีน้ำตาลดำ

ซึ่งสรุปได้ว่า ในช่วงของสูตรส่วนผสมของเนื้อดินปั้นที่มีคุณภาพมีส่วนผสมของดินบ้านหนองห้วยยางอยู่ในปริมาณมากจึงทำให้เนื้อดินปั้นมีความเหนียวเพราะในการผลิตผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาจำเป็นต้องอาศัยเนื้อดินปั้นที่มีความเหนียวมากในการผลิต มีส่วนผสมของดินขาวระนองซึ่งเป็นวัตถุดิบที่มีคุณสมบัติช่วยให้ผลิตภัณฑ์มีความขาวและช่วยให้สีของดินบ้านหนองห้วยยางอ่อนลงและมีจุดหลอมตัวสูงขึ้น ทำให้เนื้อดินปั้นไม่แตกหักง่ายป้องกันการบิดเบี้ยวซึ่งช่วยให้เนื้อดินปั้นมีความทนไฟสูงและมีสมบัติการขยายตัวต่ำ และมีส่วนผสมของทรายซึ่งเป็นวัตถุดิบที่เป็นซิลิกาเป็นตัวช่วยก่อให้เกิดเนื้อแก้วในเนื้อดินปั้นอีกด้วย การวิจัยในครั้งนี้ผู้วิจัยได้นำมาทดลองขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ประเภทภาชนะบนโต๊ะอาหาร โดยวิธีการขึ้นรูปด้วยแป้นหมุนและขึ้นรูปด้วยใบมีด ซึ่งปรากฏว่าสามารถขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ได้ดีทั้งสองวิธี ดังนั้นเนื้อดินปั้นที่ได้มีความเหมาะสมกับการผลิตเครื่องปั้นดินเผาเป็นอย่างดี

6. ข้อเสนอแนะ

6.1 ข้อเสนอแนะในการนำวิจัยไปใช้

1) การนำผลการทดลองไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผา ควรมีการทดลองใหม่อีกครั้ง เนื่องจากวัตถุดิบที่ใช้อาจมีคุณสมบัติไม่เหมือนกันกับวัตถุดิบที่ผู้วิจัยใช้ในการทดลอง ซึ่งจะทำให้ผลที่ได้ไม่ตรงตามที่ต้องการ

2) เนื้อดินที่ใช้ในการทดลองถ้ามีการแห้งตัวเร็วจะเกิดการแตกร้าวบิดรูป เสียทรงในการทดลองครั้งต่อไปควรควบคุมการแห้งตัวของชิ้นงานให้แห้งตัวอย่างช้า ๆ เพื่อป้องกันการแตกร้าวบิดเบี้ยวเสียรูปทรงของชิ้นงาน

6.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป

1) ควรศึกษาวัตถุดิบท้องถิ่นเพิ่มเติม รวมถึงการพัฒนาารูปแบบผลิตภัณฑ์ เพื่อให้เกิดความหลากหลายในด้านการนำวัตถุดิบมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด และการนำไปพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่เป็นเอกลักษณ์ของท้องถิ่น

2) ควรทดลองนำผลการทดลองที่ได้ไปทำการทดลองขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ลักษณะอื่น ๆ พร้อมทั้งทดสอบความเหมาะสมกับเคลือบประเภทอื่น ๆ

7. เอกสารอ้างอิง

Andrews, A.I. (1957). **Ceramic Test and Calculation**. America : Braunworth & Co.

IND.Book Manufactures.

Arayapong, D. (1995). **Training on Ceramic Material Properties**. Bangkok :

Chulalongkorn University. (in Thai)

Chaicana, M. (2002). **Research and Development for the utilization of Lampang Kaolin in Production Earthenware products (Earthenware)**. Ceramic Body and Glaze Technology Unit. Ceramic Industries Development Center. (in Thai)

Ingsiriwat, P. (1998). **Ceramic Body**. Bangkok : Odean Store. (in Thai)

Khunyotying, T. (2013). Clay Body for Making Fragrant Ceramic by Using Kaolin Waste instead of Silica. **Industrial Technology Lampang Rajabhat University Journal**, 6 (1), 19-30.

Leksawat, S. (2005). **Pottery: Fundamentals of Design and Implementation**. Bangkok : Chulalongkorn University. (in Thai)

Office of Industrial Economics. (2012). **Industry Summary Report 2012 And Trends 2013**. Bangkok : Ministry of Industry.

Pimkaokum, P. (1992). **Ceramics**. 3rd ed. Bangkok : Chulalongkorn University. (in Thai)

_____. (1996). **Ceramics**. 4th ed. Bangkok : Chulalongkorn University. (in Thai)

Rakwong, K. (1988). **Materials used in pottery and Body**. Bangkok : Teacher College, Phranakhon. (in Thai)

Rhodes, D. (1974). **Clay and Glazes for the potter**. New York : Chilton Book.

- Sarasin, P. (2000). **Course Materials Ceramic Body Course**. Retrieved September 27, 2015, from <http://www.teacher.ssru.ac.th.>, access on (in Thai)
- Sawangpon, A. (2000). **Raw materials used in ceramics**. Bangkok : Odean Store. (in Thai)
- Thai Industrial Standards Institute. (2013). **Thai community products standards stoneware pottery**. Bangkok : Ministry of Industry.
- Wilai, P. and Wilai, A. (2016). National Academic Conference (Proceeding) "Naresuan Research" 12th Naresuan Research and Innovation with the country development. 461-467. (in Thai)

การประยุกต์ใช้ชุดอุปกรณ์เติมแก๊สออกซิเจนหัวเผาเวนจูรี ในเตาเผาผลิตภัณฑ์เซรามิก

Application of Oxygen-inlet Venturi Burner in Ceramic Kilns

ยุทธพงษ์ นาคโสมณ^{1*}

^{1*} คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย 234 ถนนเลย-เชียงคาน ตำบลเมือง อำเภอเมือง จังหวัดเลย 42000

โทรศัพท์ 042-835232 โทรสาร 042-835232 E-mail : yut007@hotmail.com

บทคัดย่อ

การประยุกต์ใช้ชุดอุปกรณ์เติมแก๊สออกซิเจนหัวเผาเวนจูรี มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเผาของเตาเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกชนิดทางเดินลมร้อนลง โดยอาศัยการควบคุมอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนเข้าสู่หัวเผาแบบเวนจูรีด้วยเกจควบคุมแรงดันพร้อมกับเชื้อเพลิงแก๊สปิโตรเลียมเหลว จำนวน 6 ชุด ในเตาเผาขนาด 1 ลูกบาศก์เมตร จากนั้นตรวจสอบประสิทธิภาพการเผา ผลการวิจัยพบว่า ชุดอุปกรณ์เติมแก๊สออกซิเจนหัวเผาเวนจูรี มีประสิทธิภาพการเผาที่อุณหภูมิ 1220 องศาเซลเซียส คือ สามารถเผาได้ทั้งบรรยากาศออกซิเดชันและรีดักชัน ใช้เวลาในการเผา 10 และ 10 ชั่วโมง อัตราการเผา 122 และ 122 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง โดยใช้ปริมาณแก๊สเชื้อเพลิง 25.2 และ 29.6 กิโลกรัม และปริมาณแก๊สออกซิเจน 12.9 และ 9.4 กิโลกรัม ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเผาโดยใช้หัวเผาแบบปกติและการเผาแบบใช้ชุดอุปกรณ์เติมแก๊สออกซิเจนหัวเผาเวนจูรี พบว่า การเผาที่อุณหภูมิ 1220 องศาเซลเซียส บรรยากาศออกซิเดชัน ใช้เวลาการเผาลดลง 4 ชั่วโมง คิดเป็นร้อยละ 28.57 อัตราการเผาเร็วขึ้น 35 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง คิดเป็นร้อยละ 40.23 และปริมาณแก๊สเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาลดลง 8.9 กิโลกรัม คิดเป็นร้อยละ 26.10 เมื่อศึกษาต้นทุนและผลตอบแทน พบว่า มีต้นทุนเพิ่มขึ้นจากการปรับปรุงหัวเผา 9,000 บาท จุดคุ้มทุนที่ต้องใช้ชุดอุปกรณ์เติมแก๊สออกซิเจนในการเผาผลิตภัณฑ์ จำนวน 563 ครั้ง มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ 2,417.47 บาท อัตราผลตอบแทนของโครงการ ร้อยละ 19.82 ซึ่งเป็นค่าอัตราผลตอบแทนของโครงการสูงกว่าอัตราดอกเบี้ยที่ใช้ในการคำนวณ ร้อยละ 10 และระยะเวลาคืนทุน 3.86 ปี

คำสำคัญ: เตาเผา, หัวเผาเวนจูรี, เติมแก๊สออกซิเจน, ประสิทธิภาพการเผา

Abstract

The aim of the direct oxygen-inlet Venturi burner is to optimize the firing efficiency of downdraft ceramic kilns by controlling the flow rate of oxygen into the Venturi burner with the amount of 6 units of LPG per 1 cubic meter of kiln space. There follows tests of its firing efficiency. The results found that it fires at 1220 degrees Celsius and that it is able to burn at both oxidation and reduction atmospheres for 10 hours, the firing rate is 122 degrees Celsius/hour, with 25.2 and 29.6 kilograms of spent LPG fuel, and 12.9 and 9.4 kilograms of spent oxygen, respectively.

When comparing the combustion performance of conventional firing against that of direct-oxygen flow equipment at 1220 degrees Celsius within an oxidation atmosphere, it was found that firing time can be reduced by 4 hours or 28.57%, with an increased burn rate of 35 degrees Celsius/hour or 40.23% and a reduction in the consumption of LPG fuel to 8.9 kilograms or 26.10%. When studying the costs and returns, it was found that the cost of upgrading a burner was 9000 Baht. The break-even point is 563 times, with a Net Present Value (NPV) of 2,417.47 Baht, an Internal Rate of Return (IRR) of 19.82% (10 % higher than the interest rate used for the calculation) and a payback period (PBP) of 3.86 years.

Keywords: kiln, venturi burner, oxygen-inlet, firing efficiency

1. บทนำ

หัวเผาเวนจูรี (Venturi burner) เป็นหัวเผาในบรรยากาศเปิดชนิดเปลวไฟแก๊สผสมอากาศ (Premixed flames) ใช้หลักการเดียวกับตะเกียงเบนเซน (Bunsen burner) คือใช้โมเมนตัมของแก๊สที่พุ่งผ่านหัวฉีดออกมาถึงอากาศส่วนแรกเข้าผสมเป็นส่วนผสมแรก เกิดเปลวไฟขึ้นในเหนือหัวเผา แล้วเกิดเปลวไฟขึ้นนอกโดยการแพร่ของอากาศที่อยู่ล้อมรอบเข้าหาผลผลิตที่ยังเผาไหม้ได้ที่อยู่จากเปลวไฟขึ้นในส่วนประกอบสำคัญของหัวเผา ได้แก่ หัวฉีดแก๊ส (Injector) ช่องเปิดให้อากาศส่วนแรกเข้า (Primary air port) ท่อผสมส่วนคอคอดและท่อเวนจูรี (Throat and diffuser) ส่วนหัวเตา (Burner head) และช่องเปลวไฟ (Flame port or burner port) ควบคุมอากาศไหลเข้าโดยการปรับแผ่นกั้นอากาศ (Air baffle) เพื่อนำอากาศเข้าไปผสมกับแก๊ส (Air-gas mixed) (Bunyakit, K., 2001) การตรวจสอบและปรับปรุงสมรรถนะของหัวเผานับเป็นหัวใจสำคัญของการเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ ซึ่งมีแนวทางในการตรวจสอบและปรับปรุงหลายวิธี อาทิ Kosasang, P. et al. (2011) ดำเนินการตรวจสอบอัตราส่วนระหว่างอากาศและน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับแบบจำลองหัวเผาแบบเปิดในกระบวนการผลิตเหล็กเส้น โดยทดสอบอัตราส่วนที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่พอดีกันพบว่า อัตราส่วนระหว่างอากาศต่อน้ำมันเชื้อเพลิง (A/F Ratio) ที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 10.5670 คือ ออกซิเจน ร้อยละ 12.31 คาร์บอนไดออกไซด์ ร้อยละ 4.3 คาร์บอนมอนอกไซด์ 4 ppm ที่อุณหภูมิ 526.4 องศาเซลเซียส ส่วน กนกกาญจน์ ว่องวัชรพร (2556) (Wongwatcharaphon, K., 2013) ศึกษาการใช้วัสดุพรุน (Porous materials) ในการประยุกต์สำหรับการเผาไหม้สมรรถนะสูง พบว่าวัสดุประเภทซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) อลูมินา (Al_2O_3) และเซอร์โคเนียไดออกไซด์ (ZrO_2) เหมาะสำหรับการเผาไหม้ชนิดเปลวผสม ที่มีประสิทธิภาพสูง โดยการหมุนเวียนความร้อนด้วยการแผ่รังสีความร้อนและการนำความร้อนในเนื้อของวัสดุแข็ง ในขณะที่มีการปลดปล่อยมลภาวะต่ำทั้งไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) และคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) รวมทั้งมีความเร็วในการเผาไหม้สูงเมื่อเทียบกับการเผาแบบเปิดทั่วไป นอกจากนี้ สบสันต์ อุตกฤษฎ์ และคณะ (2521) (Utakrit, S. et al. 1978) ระบุว่า การสันดาประหว่างแก๊สอะเซทิลีนและแก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์จากแหล่งที่มีความดัน เช่น จากถังบรรจุแก๊ส เพื่อช่วยการสันดาปให้สมบูรณ์ที่สุดนั้น จะต้องใช้แก๊สทั้งสองชนิดร่วมกับเครื่องมืออุปกรณ์ที่ทำไว้โดยเฉพาะเท่านั้น ได้แก่ หัวเชื่อม เครื่องบังคับแก๊สและอื่น ๆ แก๊สทั้งสองจะรวมกันกลายเป็นแก๊สผสม

ก่อนที่จะพ่นผ่านหัวเชื่อมออกมาสันดาปภายนอก ความร้อนที่ได้จากการสันดาปวิธีนี้ จะสูงกว่าวิธีอื่น ๆ ทั้งหมด และถ้าแก๊สทั้งสองชนิดผสมกันด้วยอัตราที่เหมาะสม จะให้ความร้อนซึ่งมีอุณหภูมิสูงถึง 3200 องศาเซลเซียส การสันดาปจะสมบูรณ์ที่สุดปราศจากเขม่าและควัน ในขณะที่ Hong, S. K., Noh, D. S. and Lee, E. K. (2015) พบว่า การเผาแบบอาศัยแก๊สออกซิเจนช่วยในการสันดาป จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพทางความร้อนได้ดี และประสิทธิภาพในการเผาไหม้จะดียิ่งขึ้นเมื่อใช้ร่วมกับวิธีดักไอเสียทางอ้อม (Exhaust gas bypass method) และวิธีควบคุมการไหลหมุนเวียนของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂ recirculation method)

วัตถุประสงค์ในงานวิจัยนี้ จะเป็นการปรับปรุงหลักการควบคุมอากาศไหลเข้าของหัวเผาแบบเวนจูรี โดยการปรับแผ่นกั้นอากาศร่วมกับการใช้แก๊สออกซิเจนผสมกับแก๊สเชื้อเพลิงภายในท่อเวนจูรี จากนั้นแก๊สผสมจะไหลออกทางด้านปลายท่อ ก่อนที่จะพ่นผ่านหัวเผาแบบเวนจูรีออกมาสันดาปภายนอก เพื่อช่วยการสันดาปให้สมบูรณ์ที่สุด และให้ความร้อนซึ่งมีอุณหภูมิสูง ซึ่งจะเป็นแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการเผาไหม้ขั้นสูงต่อไป

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

2.1 เพื่อปรับปรุงและติดตั้งชุดอุปกรณ์เติมแก๊สออกซิเจนหัวเผาเวนจูรี

2.2 เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานของชุดอุปกรณ์หัวเผาแบบใช้แก๊สออกซิเจนร่วมในการเผา

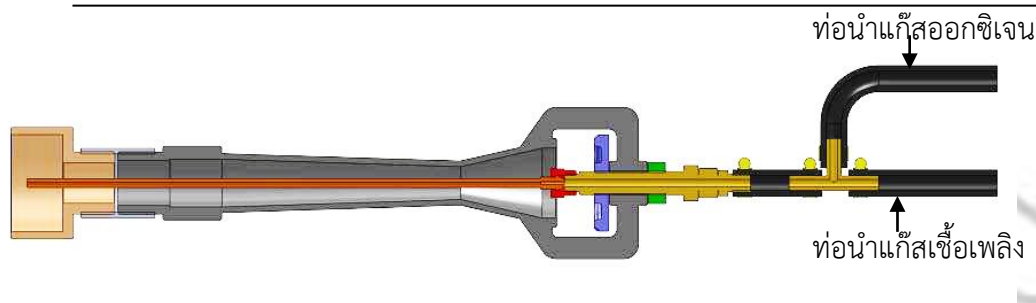
3. วิธีดำเนินการวิจัย

วิธีดำเนินการวิจัย มีทั้งสิ้น 4 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนที่ 1 การปรับปรุงและติดตั้งชุดอุปกรณ์หัวเผา ขั้นตอนที่ 2 การทดสอบและวิเคราะห์ประสิทธิภาพการเผา ขั้นตอนที่ 3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเผา และขั้นตอนที่ 4 การศึกษาต้นทุนและผลตอบแทน

4. ผลการวิจัย

4.1 ผลการปรับปรุงและติดตั้งชุดอุปกรณ์เติมแก๊สออกซิเจนหัวเผาเวนจูรี

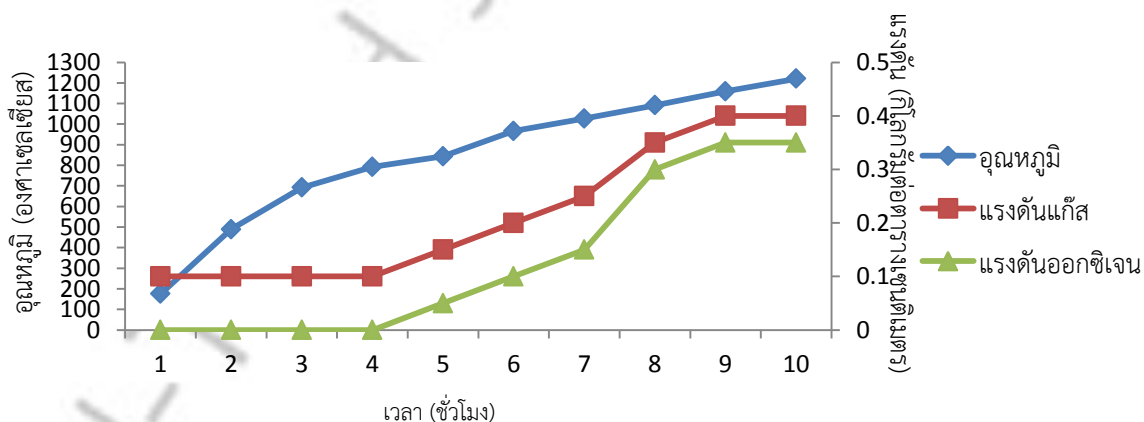
การปรับปรุงหัวเผาแบบเวนจูรีโดยการต่อท่อทองแดงกับหัวฉีดหัวเผาเวนจูรี จากนั้นต่อสายเข้ากับเกจแรงดัน (อากาศ) และถังบรรจุแก๊สออกซิเจน เพื่อควบคุมปริมาณแก๊สออกซิเจนเข้าสู่หัวเผา โดยการควบคุมเกจแรงดัน (อากาศ) สามารถประกอบชุดอุปกรณ์หัวเผา ดังภาพที่ 1



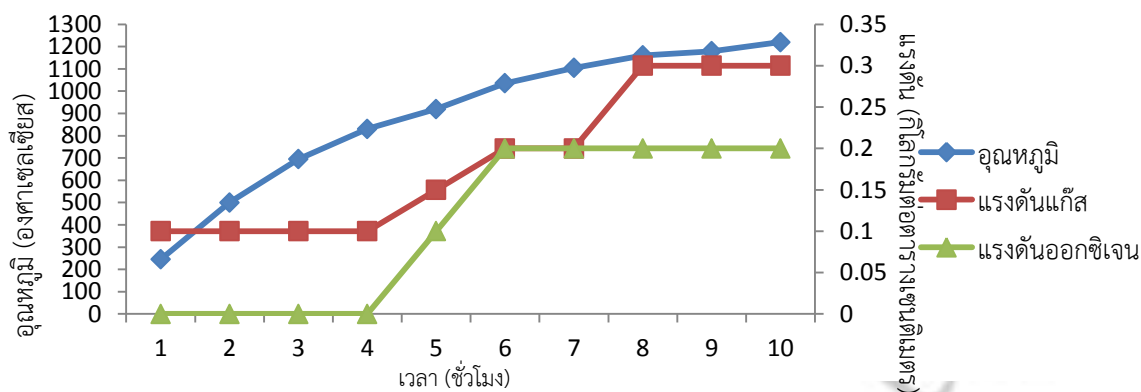
ภาพที่ 1 โครงสร้างภายในของชุดอุปกรณ์หัวเผาแบบใช้แก๊สออกซิเจนร่วมในการเผา

4.2 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ประสิทธิภาพการใช้งานของชุดอุปกรณ์หัวเผาแบบใช้แก๊สออกซิเจนร่วมในการเผา

- 1) ผลการตรวจสอบอุณหภูมิการเผาด้วยอุปกรณ์ไพโรมิเตอร์ พบว่า ชุดอุปกรณ์หัวเผาที่ผ่านการปรับปรุงสามารถเผาได้ที่อุณหภูมิ 1220 องศาเซลเซียส
- 2) ผลการตรวจสอบเวลาการเผาด้วยการบันทึกกราฟการเผา พบว่า การเผาที่อุณหภูมิ 1220 องศาเซลเซียส ที่บรรยากาศออกซิเดชันและรีดักชัน ใช้เวลาการเผา 10 และ 10 ชั่วโมง ตามลำดับ
- 3) ผลการตรวจสอบบรรยากาศการเผาด้วยการสังเกตสีผลิตภัณฑ์ทดสอบหลังการเผา พบว่า การเผาที่อุณหภูมิ 1220 องศาเซลเซียส เผาได้ทั้งบรรยากาศออกซิเดชันและรีดักชัน
- 4) ผลการคำนวณอัตราการเผา พบว่า อัตราการเผาที่อุณหภูมิ 1220 องศาเซลเซียส ที่บรรยากาศออกซิเดชันและรีดักชัน เท่ากับ 122 และ 122 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง ตามลำดับ
- 5) ผลการคำนวณปริมาณแก๊สเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผา พบว่า ปริมาณแก๊สเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาที่อุณหภูมิ 1220 องศาเซลเซียส บรรยากาศออกซิเดชันและรีดักชัน เท่ากับ 25.2 และ 29.6 กิโลกรัม ตามลำดับ
- 6) ผลการคำนวณปริมาณแก๊สออกซิเจนที่ใช้ในการเผา พบว่า ปริมาณแก๊สออกซิเจนที่ใช้ในการเผาที่อุณหภูมิ 1220 องศาเซลเซียส บรรยากาศออกซิเดชันและรีดักชัน เท่ากับ 12.9 และ 9.4 กิโลกรัม ตามลำดับ



ภาพที่ 2 กราฟการเผาแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง เวลา อุณหภูมิ และแรงดัน บรรยากาศออกซิเดชันจากการเผาแบบใช้ชุดอุปกรณ์หัวเผาเติมแก๊สออกซิเจนร่วมในการเผา



ภาพที่ 3 กราฟการเผาแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง เวลา อุณหภูมิ และแรงดัน บรรยากาศที่ติดขึ้นจากการเผาแบบใช้ชุดอุปกรณ์หัวเผาเติมแก๊สออกซิเจนร่วมในการเผา

จากภาพที่ 2 และ 3 พบว่า ชุดอุปกรณ์หัวเผาเวนจูรี่แบบเติมแก๊สออกซิเจนร่วมในการเผาสามารถเผาได้ที่อุณหภูมิ 1220 องศาเซลเซียส โดยเผาได้ทั้งบรรยากาศออกซิเดชันและบรรยากาศรีดักชัน โดยใช้เวลาในการเผา 10 และ 10 ชั่วโมง และอัตราการเผาเท่ากับ 122 และ 122 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง ตามลำดับ

4.3 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเผา

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเผาโดยใช้หัวเผาแบบปกติ และการเผาแบบใช้ชุดอุปกรณ์หัวเผาเติมแก๊สออกซิเจนร่วมในการเผา ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเผา

รายการเปรียบเทียบ	การเผาแบบปกติ (ก่อนการปรับปรุง)	การเผาแบบใช้ ชุดอุปกรณ์เติมแก๊สออกซิเจน (หลังการปรับปรุง)
อุณหภูมิการเผาสูงสุด (องศาเซลเซียส)	1220	1220
เวลาการเผา (ชั่วโมง)	14	10
บรรยากาศการเผา	ออกซิเดชัน	ออกซิเดชัน
อัตราการเผา (องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง)	87	122
ปริมาณแก๊สเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผา (กิโลกรัม)	34.10	25.20
ปริมาณแก๊สออกซิเจนที่ใช้ในการเผา (กิโลกรัม)	-	12.90
ค่าแก๊สเชื้อเพลิง (บาท)	852.50	630
ค่าแก๊สออกซิเจน (บาท)	-	206.40
รวมค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน (บาท)	852.50	836.40

หมายเหตุ: ค่าแก๊สเชื้อเพลิงต่อกิโลกรัม เท่ากับ 25 บาท

ค่าแก๊สออกซิเจนต่อกิโลกรัม เท่ากับ 16 บาท

4.4 ผลการศึกษาต้นทุนและผลตอบแทน

1) ต้นทุนที่เพิ่มขึ้น คือ ค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงหัวเผา ชุดละ 1,500 บาทต่อหัว จำนวน 6 หัว รวมเป็นเงิน 9,000 บาท

2) จุดคุ้มทุน

$$\begin{aligned}\text{ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานลดลง} &= \text{การเผาแบบปกติ} - \text{การเผาแบบใช้ชุดอุปกรณ์เติมแก๊สออกซิเจน} \\ &= 852.50 - 836.40 = 16.10 \text{ บาท}\end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้น จุดคุ้มทุนในการลงทุนเพิ่ม คือ } \frac{9,000}{16.10} = 562.5$$

ต้องใช้ชุดอุปกรณ์เติมแก๊สออกซิเจนในการเผาผลิตภัณฑ์ จำนวน 563 ครั้ง

3) การประเมินคุณค่าโครงการ

1) มูลค่าปัจจุบันสุทธิ หรือ Net Present Value (NPV)

ถ้าประเมินคุณค่าโครงการจากอายุการใช้งาน (t) 5 ปี มีเงินลงทุนเริ่มต้นโครงการ (B) ที่ใช้ในการปรับปรุงหัวเผา 9,000 บาท อัตราคิดลดหรืออัตราดอกเบี้ยหรือค่าเสียโอกาสของทุน (r) คิดเป็น ร้อยละ 10 ต่อปี มูลค่าซาก คิดเป็น 500 บาท และมีกระแสเงินสด (C) ที่ได้จากค่าใช้จ่ายด้านพลังงานลดลงในการเผาครั้งละ 16.10 บาท โดยใช้เผาผลิตภัณฑ์ 182 ครั้งต่อปี คิดเป็น 2,930 บาทต่อปี คำนวณโดยใช้สูตร

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

$$\text{ดังนั้น NPV} = 2,417.47 \text{ บาท}$$

2) อัตราผลตอบแทนของโครงการ หรือ Internal rate of return (IRR)

หลักการหา IRR คือ NPV = 0 (จุดเท่าทุน) คำนวณโดยใช้สูตร

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

สุ่มค่า i = 19 %

ดังนั้น IRR = 19.82 %

3) ระยะเวลาคืนทุน หรือ Payback Period (PBP)

$$PBP = 3.86 \text{ ปี}$$



(ก)



(ข)

ภาพที่ 4 ชุดอุปกรณ์ในการทดลองและการติดตั้งระบบ

(ก) ส่วนประกอบชุดอุปกรณ์หัวเผาเวนจูรีแบบเติมแก๊สออกซิเจนร่วมในการเผา

(ข) ระบบท่อและวาล์วควบคุมแก๊สเชื้อเพลิงและออกซิเจน

5. อภิปรายผลการวิจัย

5.1 การปรับปรุงหัวเผา

การปรับปรุงหัวเผาแบบใช้ชุดอุปกรณ์หัวเผาเติมแก๊สออกซิเจนร่วมในการเผา ช่วยให้การสันดาปสมบูรณ์ และให้ความร้อนซึ่งมีอุณหภูมิสูง สอดคล้องกับ สบสันต์ อุตกฤษฎ์ และคณะ (2521) (Utakrit, S. et al., 1978) กล่าวว่า การสันดาประหว่างแก๊สอะเซทิลีน และแก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์จากแหล่งที่มีความดัน เช่น จากถังบรรจุแก๊ส เพื่อช่วยการสันดาปให้สมบูรณ์ที่สุดนั้น จะต้องใช้แก๊สทั้งสองชนิดร่วมกับเครื่องมืออุปกรณ์ที่ทำไว้โดยเฉพาะเท่านั้น ได้แก่ หัวเชื่อม เครื่องบังคับแก๊สและอื่น ๆ แก๊สทั้งสองจะรวมกันกลายเป็นแก๊สผสม ก่อนที่จะพุ่งผ่านหัวเชื่อมออกมา สันดาปภายนอก ความร้อนที่ได้จากการสันดาปวิธีนี้ จะสูงกว่าวิธีอื่น ๆ ทั้งหมด และถ้าแก๊สทั้งสองชนิดผสมกันด้วยอัตราที่เหมาะสม จะให้ความร้อนซึ่งมีอุณหภูมิสูงถึง 3200 องศาเซลเซียส การสันดาปจะสมบูรณ์ที่สุดปราศจากเขม่า และกัญจนา บุญเกียรติ (2544) (Bunyakiat, K., 2001) กล่าวว่า แก๊สปิโตรเลียมเหลว (Liquefied Petroleum Gases หรือ LPG) เป็นแก๊สที่บรรจุอยู่ในถัง ขนาดต่าง ๆ ที่สามารถขนส่งไปยังผู้ใช้ได้สะดวก ประกอบด้วย ไฮโดรคาร์บอน อิ่มตัวสองชนิดหลัก คือ โพรเพน (Propane, C_3H_8) และบิวเทน (Butane, C_4H_{10}) เป็นส่วนใหญ่ในอัตราส่วนต่าง ๆ กัน เช่นร้อยละ 65 โพรเพน และร้อยละ 35 บิวเทน และสมบูรณ์ เต็งหงษ์เจริญ (2545) (Tonghongcharoen, S., 2002) กล่าวว่า การใช้แก๊สออกซิเจน + โพรเพน ให้ความร้อนสูงสุดโดยประมาณ 2500 องศาเซลเซียส หรือ 4600 องศาฟาเรนไฮต์ และอากาศ + โพรเพน ให้ความร้อนสูงสุดโดยประมาณ 1750 องศาเซลเซียส หรือ 3200 องศาฟาเรนไฮต์ โดยจะเห็นได้ว่าการใช้แก๊สออกซิเจนร่วมกับแก๊สเชื้อเพลิง จะให้ความร้อนที่สูงกว่า ทั้งนี้ Ozdermir, I. B. and Kantas, M. (2016) ยังพบว่า การเผาไหม้ของหัวเผาโดยทั่วไปที่ไม่ได้ผสมแก๊ส (Non-premixed) พลังงานความร้อนจะสูญเสียออกสู่บรรยากาศ โดยการรั่วไหลรอบเปลวไฟ ทำให้ประสิทธิภาพทางความร้อนลดลง ก่อให้เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ และเป็นการปลดปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ เข้าสู่บรรยากาศมากขึ้น

5.2 การทดสอบและวิเคราะห์ประสิทธิภาพการเผา

1) การตรวจสอบอุณหภูมิการเผา เป็นการตรวจสอบอุณหภูมิที่ตำแหน่งด้านบนใกล้กับปล่องไฟ โดยเทอร์โมคัปเปิล ชนิด K และอ่านค่าอุณหภูมิด้วยอุปกรณ์ดิจิทัล มีค่าเท่ากับ 1220 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิในช่วงของการเผาเคลือบ ซึ่งในการเผาเคลือบไม่ว่าจะเป็นเคลือบชนิดไฟต่ำหรือไฟสูงก็ตาม จะต้องเผาให้ได้อุณหภูมิตามกำหนดของน้ำเคลือบแต่ละชนิด มิฉะนั้นการเผาจะเกิดการเสียหายได้ (Prompruek, T., 1980) โดยเคลือบอุณหภูมิสูง เป็นเคลือบที่เผาอุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียสขึ้นไป (Raksawongsa, K., 1995)

2) การตรวจสอบเวลาการเผา เป็นการจับเวลาตั้งแต่เริ่มจุดเตาจนกระทั่งอุณหภูมิการเผาเท่ากับ 1220 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิการเผาเคลือบ โดยการทดลองของ ภควดี ศิริห้ำ และคณะ (2551) (Sirilar, P. et al., 2008) พบว่า การเผาเคลือบที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการเผาเฉลี่ย 8.30 ชั่วโมง

3) การตรวจสอบบรรยากาศการเผา โดยการสังเกตสีของเปลวไฟในขณะทดสอบการเผา พบว่า เปลวไฟมีสีเขียว-ฟ้า นั่นคือการเผาไหม้ มีอากาศส่วนเกิน (Excess air) มากพอที่จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Remmy, G. B., 1994) การเผาไหม้ หากป้อนอากาศเข้าเผาไหม้ในปริมาณที่พอดีกับค่าทางทฤษฎีแล้ว เป็นการยากที่จะทำให้ออกซิเจนพบกับธาตุต่าง ๆ ในเชื้อเพลิงได้หมดและทั่วถึงกัน จึงเป็นผลให้การเผาไหม้ในลักษณะอากาศที่ไม่เพียงพอ จะทำให้พลังงานความร้อนออกมาน้อยกว่าการเผาไหม้สมบูรณ์ เกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ เชื้อเพลิงที่ไม่เผาไหม้ เเขม่า และควันดำ ในทางปฏิบัติการเผาไหม้จริง จำเป็นที่จะต้องป้อนอากาศให้เกินกว่าความต้องการในเชิงทฤษฎี (Poogungploy, P., 2012 : 13 as cited in Department of Alternative Energy Development and Efficiency, 2010) ทั้งนี้ไม่พบเขม่าดำภายในห้องเผาที่อาจจะเกิดขึ้นในกรณีบรรยากาศการเผาเป็นแบบรีดักชัน (Ceramic Industrial Development, Center, 1999) การเผาในเตาเผาที่มีบรรยากาศแตกต่างกัน ได้แก่ การเผาบรรยากาศออกซิเดชัน และรีดักชัน การเผาทั้งสองแบบนี้ทำให้ได้สีแตกต่างกัน เคลือบที่มีส่วนผสมออกไซด์ของโลหะทองแดง เมื่อนำมาเผาในบรรยากาศสมบูรณ์ จะให้สีเขียว แต่เมื่อนำมาเผาในบรรยากาศไม่สมบูรณ์ เคลือบที่มีออกไซด์ของทองแดงโลหะจะให้สีแดงสด (Pichayapaiboon, P., 1995)

4) การคำนวณอัตราการเผา เป็นสัดส่วนของอุณหภูมิการเผาต่อเวลาการเผา มีค่าเท่ากับ 122 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง ทั้งนี้อัตราการเผาจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบที่สำคัญประการหนึ่ง คือ การผสมเป็นเนื้อเดียวกันของเชื้อเพลิงที่มีไฮโดรคาร์บอนกับอากาศที่ใช้ในการเผา โดยในอากาศจะมีปริมาณออกซิเจนที่จำเป็นต่อการเผาไหม้ ถ้าปริมาณออกซิเจนต่ำเกินไป การเผาไหม้จะเกิดขึ้นช้า และหากปริมาณออกซิเจนเหมาะสมการเผาไหม้จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว (Ceramic Industrial Development, Center, 1999)

5) การคำนวณปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผา เป็นผลต่างของน้ำหนักถังแก๊สก่อนการเผาและน้ำหนักถังแก๊สหลังการเผา หรือระบุเป็นค่าการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงการเผา ทั้งนี้ในโรงงานอุตสาหกรรมสามารถวัดการสิ้นเปลืองการเผาแต่ละครั้งได้จากน้ำหนักที่แตกต่างกันของก่อนและหลังการใช้งานของถังบรรจุแก๊สแอลพีจี (Ceramic Industrial Development, Center, 1999) การใช้พลังงานสูงในการเผาผลิตภัณฑ์เซรามิก คือ ปัญหาหนึ่งที่ผู้ผลิตส่วนใหญ่ไม่

ความสำคัญต่อกระบวนการผลิตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม หรือการผลิตสีเขียว เป็นสาเหตุหนึ่ง ที่ผลิตภัณฑ์เซรามิกไม่มีศักยภาพที่สามารถส่งออกไปยังตลาดต่างประเทศได้ (Lawanwadeekul, S., Khunyosying, T. and Moolintha, S., 2017, 280 as cited in Department of Environmental Quality Promotion, 2015)

6) การศึกษาต้นทุนและผลตอบแทน มีต้นทุนเพิ่มขึ้นจากการปรับปรุงหัวเผา 9,000 บาท จุดคุ้มทุนที่ต้องใช้ชุดอุปกรณ์เดิมแก๊สออกซิเจนในการเผาผลิตภัณฑ์ จำนวน 563 ครั้ง มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) 2,417.47 บาท อัตราผลตอบแทนของโครงการ (IRR) ร้อยละ 19.82 และระยะเวลาคืนทุน (PBP) 3.86 ปี มีความคุ้มค่าในการลงทุน เนื่องจาก เปรมชัย มูลห้ำ และคณะ (2560) (Moolla, P. et al., 2017) การคำนวณ NPV มีค่ามากกว่าศูนย์ หรือเป็นบวก แสดงว่าโครงการมีความเหมาะสมที่จะลงทุน และถ้าค่า IRR ที่ได้สูงกว่าอัตราดอกเบี้ยหรือค่าเสียโอกาสของทุน จะเป็นการลงทุนที่คุ้มค่า

6. ข้อเสนอแนะ

6.1 ทดสอบและวิเคราะห์ประสิทธิภาพการเผาโดยวิธีจำลองสถานการณ์การไหลทางวิศวกรรม (Flow simulation) จะช่วยทำนายประสิทธิภาพการเผาได้ดียิ่งขึ้น ทั้งนี้จำเป็นต้องจัดหาซอฟต์แวร์ที่เหมาะสมในการใช้งานเพิ่มเติม

6.2 ทดสอบหาปริมาณ CO และ CO₂ โดยใช้เครื่องวัดประสิทธิภาพการเผาไหม้จะช่วยให้ทราบปริมาณแก๊สที่ลดลงได้ ทั้งนี้จำเป็นต้องจัดหาเครื่องมือที่เหมาะสมในการทดสอบเพิ่มเติม

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ดร.สมนึก ศิริสุนทร ผู้อำนวยการฝ่ายอาวุโสฝ่ายพัฒนากำลังคนและถ่ายทอดเทคโนโลยี ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำหรับคำแนะนำในการปฏิบัติงานวิจัย ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) สำหรับทุนสนับสนุนการวิจัย ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย สำหรับการส่งเสริมการพัฒนางานวิจัย และขอขอบคุณ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย สำหรับความอนุเคราะห์สถานที่ เครื่องมือ และอุปกรณ์ประกอบการวิจัย

8. เอกสารอ้างอิง

- Bunyakiat, K. (2001). **Fuel and Combustion**. Bangkok : Chulalongkorn University Press. (in Thai)
- Ceramic Industrial Development, Center. (1999). **Training Documents of Kiln Firing for Ceramics**. Lampang : author. (in Thai)
- Hong, S. K., Noh, D. S. and Lee, E. K. (2015). Improvement in thermal efficiency of regenerator system by using oxy-fuel combustion. **Applied Thermal Engineering**. 87, pp. 648-654.
- Kosasang, P., Sanrach, C. and Ascharyaphotha, N. (2011). Determination of A/F Ratio for the Open Burner Model. **The 49th Conference of Kasetsart University**,

- Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)
- Lawanwadeekul, S., Khunyosying, T. and Moolintha, S. (2017). Development of environmental friendly production process of ceramic industries in Lampang Province. **The 3rd National Conference of Industrial Technology**, Rajabhat Maha Sarakham University, Maha Sarakham. (in Thai)
- Moolla, P., Phongphanok, S. and Graurysawat, V. (2017). Efficiency Enhancement and Performance Evaluation of Cassava Rasper with Engineering Economics. **IE Network Conference 2017**, Chiang Mai University, Chiang Mai. (in Thai)
- Ozdemir, I. B. and Kantas, M. (2016). Investigation of partially-premixed combustion in a household cooker-top burner. **Fuel Processing Technology**. 151, pp. 107-116.
- Pichayapaiboon, P. (1995). **Ceramics : Techniques and methods of creativity**. Bangkok : Chulalongkorn University Press. (in Thai)
- Poogungploy, P. (2012). **Designed and Built a small Low Pressure Boilers for Medium and Small Industries**. Loei : Loei Rajabhat University. (in Thai)
- Prompruek, T. (1980). **Introduction to Ceramics**. Bangkok : Odeon Store. (in Thai)
- Raksawongsa, K. (1995). **Teachings document of Glaze 2**. Bangkok : Rajabhat Institute Phranakhon. (in Thai)
- Remmy, G. B. (1994). **Firing ceramics**. Singapore : World Scientific.
- Sirilar, P., Pebkhuntod, N., Naksopon, Y., Charuenying, P. and Bootpeng, P. (2008). **Production-power Increasing and Product Design Development of Ceramic OTOP in Loei**. Loei : Loei Rajabhat University. (in Thai)
- Tonghongcharoen, S. (2002). **Metal Welding 1**. Bangkok : Technique Center Publishing House. (in Thai)
- Utakrit, S. et al. (1978). **Welding and Metal Cutting by Oxygen-Acetylene**. Bangkok : Office of service and research King Mongkut's Institute of Technology. (in Thai)
- Wongwatcharaphon, K. (2013). **High Performance Porous Burner**. Princess of Naradhiwas University Journal. 5(1), 109-123. (in Thai)

การศึกษาอัตราส่วนของดินบ้านหัวฝายกับดินเชื้อ ที่เหมาะสมกับการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผา

A Study of The Ratio of Huepai Village Clay with Grog for Pottery Product forming

วีระ เนตราทิพย์^{1*}

^{1*} คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์ 439 ถนนจิระ อำเภอเมือง ตำบลในเมือง จังหวัดบุรีรัมย์ 31000
โทรศัพท์ 089-1893132 E-mail : weeranatrapi@gmail.com

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง โดยมีวัตถุประสงค์ 1) เพื่อศึกษาเนื้อดินบ้านหัวฝาย ตำบลบ้านจาน อำเภอพุทไธสง จังหวัดบุรีรัมย์ 2) เพื่อพัฒนาสมบัติของเนื้อดินให้เหมาะสมในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผา โดยศึกษาอัตราส่วนผสมระหว่างดินบ้านหัวฝายกับดินเชื้อ จำนวน 10 สูตร เเผาที่อุณหภูมิ 800 เซลเซียส และที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส อัตราส่วนผสมของเนื้อดินที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผา คือ สูตรที่ 4 ซึ่งมีอัตราส่วนผสมของดินพื้นบ้านหัวฝาย ร้อยละ 80 และดินเชื้อ ร้อยละ 20 เนื้อดินหลังการเผาให้สีน้ำตาลอ่อนจนถึงสีน้ำตาลเข้มมีอัตราการหดตัวของเนื้อดินอยู่ที่ร้อยละ 14.10 มีค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 11.80 และมีค่าความแกร่งของเนื้อดินอยู่ที่ 172.90 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อนำมาทดสอบขึ้นรูปในแบบอิสระ พบว่าเนื้อดินสามารถขึ้นรูปได้ดี เนื้อดินมีความเหนียวดี สามารถกดหรือรีดดินให้เป็นแผ่น และคลึงให้เป็นเส้นมีความสม่ำเสมอ ในส่วนการขึ้นรูปด้วยแป้นหมุนพบว่าเนื้อดินตั้งศูนย์ได้ง่าย ทรงตัวได้ดี จัดรูปทรงได้ง่าย สามารถขึ้นรูปเป็นชิ้นงานได้หลายขนาด ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการผลิตเครื่องปั้นดินเผาในเชิงอุตสาหกรรมขนาดเล็กได้

คำสำคัญ: ดินเชื้อ, ดินบ้านหัวฝาย, การขึ้นรูป

Abstract

This aims of this research paper are: 1) To study properties of the clay from Huephai village, Bhuthaisong district, in the province of Buriram. 2) To study and improve the quality of the clay to be the most suitable for molding and creating pottery products. The is done by taking a 10 samples of varying clay and soil mixtures and heating them at temperatures of between 800 degrees Celsius and 1,100 degrees Celsius. At 1100°C Celsius, it was found that the 4th formula was the most appropriate formula which contained 80% of Huepai clay and 20% of regular clay. The mixture turned from light brown to dark brown after firing. The physical properties of the object were as follows: 14.10% shrinkage, 11.80% water absorption, and 172.90 kg/cm² strength which proved that this particular mixture of clay could be classified as Terracotta. This

successful 4th formula of mixed clay could be formed by both hand-modeling and throwing techniques. The clay mixture was smooth and soft. It could be rolled easily into sheets or flat plates with a uniform thickness which was advantageous for forming. While using the throwing technique, the clay was well poised and easily formed into any shape and dimension. In conclusion, the 4th formula of mixed clay could possibly be used in industrial manufacturing.

Keywords: Clay, Huephai Clay, Forming.

1. บทนำ

บุรีรัมย์เป็นจังหวัดที่อยู่ในเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยเป็นแหล่งโบราณคดีและแหล่งเครื่องปั้นดินเผาโบราณที่มีชื่อเสียง จากการศึกษาแหล่งโบราณคดีของ พบว่าบุรีรัมย์มีแหล่งเตาเผาและเครื่องปั้นดินเผาโบราณกระจายเกือบทุกอำเภอ (Fine Arts Department., 1989) และยังคงมีการสืบทอดการทำเครื่องปั้นดินเผาอยู่ในหลายชุมชนจากการศึกษาแหล่งผลิตในชุมชนพบว่ามีการใช้ดินจากแหล่งพื้นบ้าน ซึ่งสมบัติของดินยังไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากยังไม่มีการศึกษาสมบัติของดิน ในการนำไปใช้งานทำให้มีความพยายามที่จะศึกษา และรวบรวมข้อมูลแหล่งดินจากอำเภอต่าง ๆ ของจังหวัดบุรีรัมย์ เพื่อให้ทราบถึงสมบัติของดิน และความเหมาะสมในการนำไปใช้ผลิตเครื่องปั้นดินเผา ดังเช่น (Natrati, W., 2009) ได้ศึกษาเนื้อดินการพัฒนาเนื้อดินเทรคคอตต้าเพื่อใช้เป็นเนื้อดินปั้นในงานอุตสาหกรรมของตกแต่ง ภูมิศึกษา ดินอำเภอลำปลายมาศจังหวัดบุรีรัมย์ พบว่าเนื้อดินมีคุณสมบัติที่สามารถนำไปขึ้นรูปได้ดี สีหลังการเผาสีน้ำตาล และเนื้อดินสามารถทนความร้อนได้สูงถึง 1100 องศาเซลเซียส ได้ทุกจุดโดยไม่หลอมละลาย มีค่าการหดตัวของเนื้อดินอยู่ที่ประมาณร้อยละ 8.96 (Pinsakul, P., 2005) ได้ศึกษาการทำเนื้อดินสโตนแวร์อุณหภูมิต่ำจากเนื้อดินอำเภอกะสัง จังหวัดบุรีรัมย์ พบว่าเนื้อดินมีสมบัติทางกายภาพที่เหมาะสมสามารถนำไปขึ้นรูปแป้นหมุน และแบบอิสระได้ดี มีสีหลังการเผาน้ำตาลแดงเข้ม และเนื้อดินสามารถทนความร้อนได้สูงถึง 1190 องศาเซลเซียส มีค่าการหดตัวไม่เกินร้อยละ 15 ค่าการดูดซึมน้ำไม่เกินร้อยละ 3 จากการลงไปศึกษาวิจัยเพื่อเก็บตัวอย่างดินที่บ้านหัวฝาย ตำบลบ้านจาน อำเภอพุทไธสง จังหวัดบุรีรัมย์ ซึ่งเป็นชุมชนที่มีการทำเครื่องปั้นดินเผามายาวนานอีกแห่งหนึ่ง พบว่าดินบ้านหัวฝายมีความน่าสนใจที่จะนำมาศึกษาอีกแห่งหนึ่ง เนื่องจากเนื้อดินมีความละเอียด มีความเหนียว มีสีส้มอมน้ำตาลที่สวยงาม พบว่าชาวบ้านบางกลุ่มได้นำดินไปผลิตอิฐ กระเบื้อง และหม้อดินเผาเพื่อจำหน่าย ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะศึกษาสมบัติเบื้องต้นของดินบ้านหัวฝาย ตำบลบ้านจาน อำเภอพุทไธสง จังหวัดบุรีรัมย์ให้มากขึ้นเพื่อจะได้นำมาพัฒนาทำผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาในรูปแบบอื่นที่หลากหลายและเป็นการเพิ่มมูลค่าของวัตถุดิบในท้องถิ่นและสร้างรายได้ให้กับชุมชนได้อีกทางหนึ่ง

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

2.1 ศึกษาสมบัติของเนื้อดินบ้านหัวฝาย ตำบลบ้านจาน อำเภอพุทไธสง จังหวัดบุรีรัมย์

2.2 เพื่อทดลองหาอัตราส่วนผสมและสมบัติทางกายภาพของเนื้อดินที่เหมาะสมกับการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผา

3. วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยเพื่อศึกษาสมบัติของดินบ้านหัวฝาย ตำบลบ้านจาน อำเภอพุนพอง จังหวัดบุรีรัมย์ ในครั้งนี้ผู้วิจัยได้แบ่งขั้นตอนการทดลองออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาสมบัติของเนื้อดินบ้านหัวฝาย ตำบลบ้านจาน โดยไม่มีการปรับปรุงสมบัติของเนื้อดิน ซึ่งได้ทำการทดลองดังนี้

1) ทำการเก็บดินตัวอย่าง โดยใช้วิธีการเปิดหน้าดินเพื่อกำจัดเศษปนเปื้อนต่าง ๆ จากนั้นทำการขุดหลุมลึก 1 เมตร เพื่อเก็บดินตัวอย่างเพื่อใช้ในการทดลอง

2) การเตรียมดินตัวอย่าง เมื่อได้ดินตัวอย่างมาแล้วทำการตากแห้งจากนั้นนำมาบดให้มีขนาดเล็กลงด้วยหม้อบด (Ball Mill) เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำไปผ่านตะแกรงร่อนขนาด 100 Mesh เมื่อได้ดินตัวอย่างแล้วนำไปอบที่ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อเก็บดินไว้ทดสอบในขั้นตอนต่อไป

ขั้นตอนที่ 2 หาค่าอัตราส่วนของดินบ้านหัวฝายที่เหมาะสมกับการขึ้นรูป

1) การหาอัตราส่วนผสมโดยการสุ่มตัวอย่างจากทฤษฎีเชิงเส้น (Line Blend) (Kosiyapan, S., 1991) โดยใช้อัตราส่วนผสมจาก ดินบ้านหัวฝาย ตำบลบ้านจาน อำเภอพุนพอง จังหวัดบุรีรัมย์ กับดินเชื้อ (Grog) ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 100 Mesh โดยกำหนดสูตรในการทดลองทั้งหมด 10 สูตร โดยปรับดินเชื้อครั้งละ 5 เมื่อรวมกันแล้วทุกสูตรจะเท่ากับ 100 ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงอัตราส่วนผสมทั้ง 10 สูตร

สูตรที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ดินบ้านหัวฝาย	95	90	85	80	75	70	65	60	55	50
ดินเชื้อ	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
รวม	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

2) ขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่าง โดยชั่งส่วนผสมของวัตถุดิบสูตรละ 1,000 กรัม ผสมกับน้ำให้เกิดความเหนียวนำเนื้อดินในแต่ละสูตรที่ได้มาขึ้นรูปแท่งทดสอบไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส

3) นำแท่งทดสอบมาทำการทดสอบการหดตัวก่อนเผา โดยใช้สูตร (1) ดังนี้

$$\text{ร้อยละการหดตัวก่อนการเผา} = \frac{\text{ความยาวของดินเปียก} - \text{ความยาวของดินแห้ง}}{\text{ความยาวของดินเปียก}} \times 100 \quad (1)$$

4) ทดสอบความทนไฟของเนื้อดินที่อุณหภูมิ 800 และ 1100 องศาเซลเซียส จากนั้นนำมาทำการทดสอบหาความทนไฟที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส

5) การหดตัวหลังเผา โดยวัดความยาวของแท่งทดสอบทันทีหลังแกะออกจากแบบพิมพ์ปูนปลาสเตอร์ หลังจากนั้นนำไปผึ่งให้แห้งแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส นำไปเผาที่อุณหภูมิ 800 และ 1100 องศาเซลเซียส แล้ววิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้สูตร (2) (Rhodes, 1974)

$$\text{ร้อยละการหดตัวของดินก่อนหลังเผา} = \frac{\text{ความยาวของดินเปียก} - \text{ความยาวของดินหลังเผา}}{\text{ความยาวของดินเปียก}} \times 100 \quad (2)$$

6) ทดสอบการดูดซึมน้ำหลังการเผา ทดสอบโดยนำแท่งทดสอบเนื้อดินแต่ละสูตรที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 800 และ 1100 องศาเซลเซียส สูตรละ 3 แท่ง ชั่งน้ำหนักแท่งทดสอบแห้ง (กรัม) บันทึกข้อมูล จากนั้นนำแท่งทดสอบไปต้มในน้ำเดือดเป็นเวลา 5 ชั่วโมง แล้วแช่น้ำทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง นำแท่งทดสอบมาเช็ดผิวให้แห้ง แล้วชั่งน้ำหนักอีกครั้งนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้สูตร (3) เพื่อหาร้อยละของการดูดซึมน้ำ (Rhodes, 1974)

$$\text{ร้อยละการดูดซึมน้ำ} = \frac{\text{น้ำหนักดินที่อิ่มตัว} - \text{น้ำหนักดินที่แห้ง}}{\text{น้ำหนักดินที่แห้ง}} \times 100 \quad (3)$$

7) ทดสอบความแข็งแรง โดยนำแท่งทดสอบของเนื้อดินแต่ละสูตรที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 800 และ 1100 องศาเซลเซียส สูตรละ 3 แท่ง ค่าความแข็งแรงแล้วบันทึกข้อมูล และนำผลทดสอบที่วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้สูตร (4) ทดสอบหาค่าความแข็งแรง

$$\text{MOR} = \frac{3LD}{2bd^2} \quad (4)$$

L = ค่าน้ำหนักแรงกดที่หัก

D = ระยะห่างของลิ้นที่รองรับแผ่นทดสอบ

b = ความกว้างของแผ่นทดสอบ

d = ความหนาของแผ่นทดสอบ

8) วิเคราะห์สีของดินหลังเผาโดยการเปรียบเทียบสีของดินทดสอบหลังเผากับแผ่นสีมาตรฐาน Pantone Formula Guides

ขั้นตอนที่ 3 การทดสอบขึ้นรูป

1) นำดินจากตอนที่ 1 ดิน ร้อยละ 100 และเนื้อดินที่มีส่วนผสมที่เหมาะสม จากตอนที่ 2 มาทำการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ จากนั้นเลือกสูตรที่ดีที่สุดนำมาทดสอบการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์

2) เมื่อได้เนื้อดินสูตรที่ดีที่สุดแล้วนำอัตราส่วนผสมที่ได้มาเพิ่มอัตราส่วน 1,000 กรัม มาทำการนวดผสมกับน้ำเพื่อใช้ในการขึ้นรูป โดยกำหนดวิธีการทดสอบการขึ้นรูปใน 2 ลักษณะ ประกอบด้วย การขึ้นรูปด้วยแป้นหมุน รูปทรงกระบอกที่มีฐานกว้าง 10 เซนติเมตร และดึงดินขึ้นรูปให้สูงมากที่สุดและบางมากที่สุด เพื่อหาประสิทธิภาพของเนื้อดิน และนำดินมาขึ้นรูปแบบอิสระ โดยใช้วิธีการบีบหรือกด (Pinching) โดยใช้สัญลักษณ์ (P) และการขึ้นรูปแบบแผ่น (Slabbing) ใช้สัญลักษณ์ (S) ทั้ง 2 รูปแบบ เพื่อดูประสิทธิภาพของเนื้อดินในการขึ้นรูปทรงในลักษณะต่าง ๆ ว่ามีการปริหรือแตกร้าว ของเนื้อดินขณะขึ้นรูปและหลังจากการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์

3) ปล่อยชิ้นงานให้แห้งสนิทแล้วนำชิ้นงานที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส ด้วยเตาไฟฟ้าบรรยากาศแบบออกซิเดชัน จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปไปทดสอบความทนไฟที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส เพื่อดูความทนไฟของเนื้อดิน

4. ผลการวิจัย

ผลการวิจัยสมบัติของเนื้อดินบ้านหัวฝาย ตำบลบ้านจาน อำเภอพุทไธสง จังหวัดบุรีรัมย์ พบว่า

ขั้นตอนที่ 1 การทดสอบสมบัติของเนื้อดินโดยไม่มีการปรับปรุงสมบัติของดิน

ผลการวิเคราะห์เนื้อดินบ้านหัวฝาย ตำบลบ้านจาน อำเภอพุทไธสง จังหวัดบุรีรัมย์ เมื่อบดตัวอย่างดินเพื่อخذตัวอย่างขนาดใหญ่และเศษต่าง ๆ ที่ปะปนมากับดิน พบว่าเนื้อดินละเอียดมากมีทรายปนอยู่เล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับ (Sinmak, Y., 2016) ได้กล่าวไว้ว่าค่าความแข็งแรงของดินก่อนเผาจะขึ้นอยู่กับอนุภาคของเม็ดดิน เม็ดดินที่มีความละเอียดจะทำให้มีค่าความเหนียวเพิ่มมากขึ้น ในส่วนของสีของดินเมื่อแห้งก่อนเผา พบว่ามีสีเทาอ่อนจนถึงสีดำเมื่อนำดินมาทดสอบค่าการหดตัวก่อนเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เนื้อดินมีอัตราการหดตัวก่อนเผาอยู่ที่ ร้อยละ 8.6 และที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส พบว่าเนื้อดินบ้านหัวฝายมีค่าการหดตัว ร้อยละ 14.25 เมื่ออุณหภูมิการเผาสูงขึ้น จะทำให้มีค่าการหดตัวที่เพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากน้ำที่อยู่ในผิวดินและน้ำที่อยู่ในโครงสร้างรวมอินทรีย์สารจะถูกเผาไหม้ และระเหยออกจากโครงสร้างของเนื้อดินซึ่งสอดคล้องกับ (Pimkhaokum, P., 1996) ได้กล่าวไว้ว่า ปริมาณของอินทรีย์สารที่ปนอยู่ในเนื้อดิน หากมีปริมาณมากจะทำให้ค่าการหดตัวหลังเผามีมากขึ้นที่อุณหภูมิสูงขึ้น ในส่วนผลการวิเคราะห์ข้อมูลสมบัติทางกายภาพของเนื้อดินบ้านหัวฝาย ก่อนและหลังเผาแสดงไว้ ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของเนื้อดินหลังเผา

อุณหภูมิ องศา เซลเซียส	สมบัติทางกายภาพของเนื้อดินก่อนเผาและหลังเผา ที่อุณหภูมิ 800 และ 1100 องศาเซลเซียส						
	การหดตัว ก่อนเผา (ร้อยละ)	การดูด ซึมน้ำ (ร้อยละ)	ความแกร่ง กก/ซม ³	สีหลังเผา	การขึ้นรูป		
					แป้น หมุน	แบบอิสระ P	S
800	8.60	14.47	46.30	น้ำตาลอ่อน	ดี	ดี	ดี
1100	14.25	2.71	46.05	น้ำตาล	ดี	ดี	ดี

ในส่วนของสีหลังเผาทั้งสองอุณหภูมิพบว่าจะมีสีน้ำตาลอ่อนไปจนถึงเข้มดังภาพที่ 1 และยังพบว่าดินบ้านหัวฝายสามารถเผาได้สูงถึง 1100 องศาเซลเซียส โดยไม่มีการหลอมตัว



ภาพที่ 1 แท่งทดสอบหลังเผาที่อุณหภูมิ 800 และ 1100 องศาเซลเซียส

ขั้นตอนที่ 2 การทดสอบหาอัตราส่วนของดินพื้นบ้าน

จากการทดลองเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการขึ้นรูปพบว่าดินบ้านห้วยผาผสมกับดินเชื้อโดยปรับดินเชื้อตามอัตราส่วนโดยการเพิ่มครั้งละ 5 และเมื่อผสมกันแล้วได้เท่ากับ 10 จำนวน 10 สูตร ผลการทดลองที่ได้แสดงไว้ ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของเนื้อดินหลังเผา

สูตรที่	สมบัติทางกายภาพของเนื้อดินหลังเผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส			
	สีของเนื้อดิน	การหดตัวหลังเผา (ร้อยละ)	การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)	ความแกร่ง กก/ซม ³
1	สีส้ม	14.2	6.45	89.16
2	สีส้ม	13.9	7.33	141.13
3	สีส้ม	14.3	9.58	140.09
4	สีส้ม	14.1	11.80	172.90
5	สีส้ม	13.2	12.27	78.22
6	สีส้มอ่อน	12.5	15.31	93.70
7	สีส้มอ่อน	10.4	18.35	77.25
8	สีส้มอ่อน	11.2	21.31	75.89
9	สีส้มอ่อน	8.6	21.89	56.55
10	สีส้มอ่อน	8.7	22.61	51.84

สมบัติทางกายภาพของเนื้อดินบ้านห้วยผาหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียสพบว่าเนื้อดินทุกสูตรสามารถนำมาขึ้นรูปได้ แต่สูตรที่ดีที่สุดใน การขึ้นรูปคือ สูตรที่ 4 ส่วนสูตรที่ไม่ดีที่สุดคือ สูตรที่ 10 เนื่องจากมีค่าความแกร่งน้อยที่สุดอยู่ที่ ร้อยละ 51.84 มีค่าการดูดซึมน้ำอยู่ที่ร้อยละ 22.61

ค่าการหดตัวหลังการเผา พบว่าหลังจากเผาที่ 1100 องศาเซลเซียส ค่าการหดตัวหลังเผา มากที่สุดคือ สูตรที่ 3 อยู่ที่ ร้อยละ 14.3 โดยมีอัตราส่วนผสมของดินหัวฝาย ร้อยละ 85 และดินเชื้อ ร้อยละ 15 และค่าการหดตัวหลังเผาน้อยสุดได้แก่สูตรที่ 9 โดยมีอัตราส่วนผสมของดินหัวฝายร้อยละ 55 และดินเชื้อ ร้อยละ 45

ค่าการดูดซึมน้ำหลังการเผา พบว่ามีค่าดูดซึมน้ำมากที่สุดได้แก่สูตรที่ 10 อยู่ที่ ร้อยละ 22.61 โดยมีอัตราส่วนผสมของดินหัวฝาย ร้อยละ 50 และดินเชื้อ ร้อยละ 50 จากผลการทดสอบค่า การดูดซึมน้ำหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส ดังกล่าว พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้มี การหดตัวเพิ่มขึ้น เนื่องจากเนื้อดินเข้ามาชิดกันมากขึ้นทำให้ค่าการดูดซึมน้ำลดลง ซึ่งสอดคล้องกับ (Lawanwadeekul, S., 2012) ได้กล่าวไว้ว่า ค่าการดูดน้ำจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจาก รูพรุนเปิดที่ผิวของดินทดสอบมีปริมาณลดลง

การทดสอบสีของเนื้อดินหลังเผา พบว่า มีสีส้ม สีส้มอ่อน เนื่องมาจากการผสมดินเชื้อเข้าไป ในสูตรส่วนผสมทำให้สีที่ได้จึงอ่อนลงตามอัตราส่วนผสม ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 แท่งทดสอบหลังเผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส

ขั้นตอนที่ 3 การทดลองขึ้นรูปผลิตภัณฑ์

ผู้วิจัยคัดเลือกสูตรส่วนผสมของเนื้อสูตรที่ 4 ซึ่งมีสมบัติที่ดีที่สุดโดยพิจารณาความเหมาะสมจากผลการวิเคราะห์ข้อมูลสมบัติทางกายภาพก่อนเผาและหลังเผา ซึ่งในสูตรที่ 4 นั้นมีส่วนผสมของเนื้อดินบ้านหัวฝาย ร้อยละ 80 และดินเชื้อ ร้อยละ 20 ผสมกันตามอัตราส่วนใช้น้ำ ผสมร้อยละ 20 ค่าการหดตัวก่อนเผาเฉลี่ย ร้อยละ 14.25 การหดตัวหลังเผาเฉลี่ย ร้อยละ 14.1 การดูดซึมน้ำเฉลี่ย ร้อยละ 11.80 และความแกร่งเฉลี่ย ร้อยละ 172.90 เนื้อดินมีสีส้มเมื่อนำมาผสม น้ำนวดให้เข้ากันแล้วใส่ถุงหมักไว้ 1 วัน และนำมาทดสอบความเหนียวของเนื้อดินเบื้องต้นโดยนำเนื้อ ดินไปคลึงเป็นเส้นขนาดเท่าแท่งดินสอแล้วนำแท่งดินที่ได้มาพันรอบนิ้วมือ เพื่อพิจารณารอย บริแตกร้าวของเนื้อดิน ถ้าเนื้อดินที่พันรอบนิ้วนั้นไม่มีการปริหรือแตกร้าว แสดงว่าเนื้อดินนั้นมีความ เหนียวมากพอสำหรับการขึ้นรูป จากการทดสอบขึ้นรูปในรูปแบบต่าง ๆ พบว่า

การขึ้นรูปแบบอิสระ พบว่าเมื่อนวดดินเนื้อดินจะมีความเหนียวเหมาะสำหรับการขึ้น รูปคือไม่แข็งหรือนิ่มจนเกินไปสามารถปั้นให้เป็นรูปร่างได้ง่ายมีความหนาสม่เสมอ กดปรับดินให้ได้ รูปทรงตามต้องการได้ ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 การขึ้นรูปแบบอิสระแบบกด

การขึ้นรูปด้วยดินแผ่น เนื่องจากเนื้อดินมีความเหนียว ทำให้สามารถใช้ไม้รีดดินให้เป็นแผ่นมีความหนาสม่ำเสมอการตัดดินแผ่นและการต่อประกอบให้เป็นรูปทรงต่าง ๆ เนื้อดินสามารถคงรูปได้ การเชื่อมต่อกันควรกดให้สนิทแน่นสม่ำเสมอซึ่งจะช่วยให้รอยต่อติดสนิทดียิ่งขึ้นและไม่เกิดการแตกร้าว ดังภาพที่ 4 แสดงตัวอย่างการขึ้นรูปแบบแผ่น



ภาพที่ 4 การขึ้นรูปอิสระแบบแผ่น

ในส่วนของการขึ้นรูปด้วยแป้นหมุนพบว่า ดินมีคุณสมบัติด้านความเหนียวอยู่ในระดับดีเหมาะสำหรับการขึ้นรูปด้วยแป้นหมุนที่ต้องใช้ดินที่มีความเหนียวเป็นหลัก ในด้านคุณสมบัติด้านการทรงตัวขณะขึ้นรูป พบว่าเนื้อดินที่ได้จากการทดลองนั้นมีการทรงตัวในการขึ้นรูปได้ดีสามารถตั้งขึ้นรูปทรงกระบอกได้สูง 17.5×10 ซม. จากดินปั้น 1,000 กรัม โดยไม่มีการทรุดตัว ดังภาพที่ 5



(ก) การขึ้นรูปทรงกระบอก



(ข) การขึ้นรูปทรงแจกัน

ภาพที่ 5 แสดงการขึ้นรูปด้วยแป้นหมุน (ก) การขึ้นรูปทรงกระบอก และ (ข) การขึ้นรูปทรงแจกัน



(ก) ผลิตภัณฑ์ที่เผาที่อุณหภูมิ 1100 °C

(ข) ผลิตภัณฑ์ที่เผาอุณหภูมิ 1200 °C

ภาพที่ 6 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ (ก) ผลิตภัณฑ์เผาที่อุณหภูมิ 1100 °C และ (ข) ผลิตภัณฑ์เผาที่อุณหภูมิ 1200 °C

5. สรุปผลและอภิปรายผล

จากการทดลองพบว่าอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในการทำเนื้อดินชนิดเทราคอตต้า โดยการสุมตัวอย่างจากทฤษฎีเชิงเส้น (Line Blend) ใช้วัตถุดิบ 2 ชนิด เป็นส่วนผสม ได้แก่ ดินบ้านหัวฝาย และดินเชื้อ กำหนดสูตรในการทดลอง 10 สูตร ทดลองบดผสมในห้องปฏิบัติการ และเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส โดยใช้เตาไฟฟ้า และวิเคราะห์ผลหลังเผาแล้วทำการสรุปได้ดังนี้

จากผลการทดลองครั้งนี้ผู้วิจัยได้คัดเลือกสูตรที่ 4 ซึ่งมีอัตราส่วนผสมดินบ้านหัวฝาย ร้อยละ 80 ดินเชื้อ ร้อยละ 20 ซึ่งมีผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของเนื้อดินหลังการเผาแล้วเนื้อดินมีสีน้ำตาลอ่อนมีค่าการหดตัวของเนื้อดินอยู่ที่ ร้อยละ 14.10 มีค่าการดูดซึมน้ำ ร้อยละ 11.80 และมีค่าความแกร่งของเนื้อดิน 172.90 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ของเนื้อดินเซรามิกชนิดเทราคอตต้าคือ มีค่าการหดตัวน้อย ค่าการดูดซึมน้ำมาก และมีค่าความแกร่งน้อยเมื่อเคาะแล้วเสียงไม่กังวาน มีสีน้ำตาลอ่อนจนถึงน้ำตาลเข้ม ซึ่งสอดคล้องกับคำกล่าวของ (Phromphruek, T., 1989) ที่ได้กล่าวว่า ดินที่มีแร่เหล็กอยู่ในดินสูงเนื้อดินจะมีสีน้ำตาลอ่อนจนถึงน้ำตาลเข้มและเมื่อนำเนื้อดินไปทดลองขึ้นรูปด้วยแป้นหมุน เนื้อดินสูตรที่ 4 สามารถขึ้นรูปได้ดี เนื้อดินมีความละเอียดและเหนียว การขึ้นรูป ตั้งศูนย์เจาะศูนย์ ดึงดินขึ้นรูปทรงต่าง ๆ ได้ดีสามารถนำไปใช้ในการผลิตเครื่องปั้นดินเผาได้

จากการนำเนื้อดินที่ได้จากการพัฒนามาทำการขึ้นรูปแบบอิสระ และขึ้นรูปด้วยแป้นหมุน กล่าวโดยสรุปสามารถวิเคราะห์ได้ว่าเนื้อดินบ้านหัวฝาย ตำบลบ้านจาน อำเภอพุทไธสง จังหวัดบุรีรัมย์เป็นเนื้อดินที่มีศักยภาพในการขึ้นรูปทั้งสองวิธีได้ดี กล่าวคือ เนื้อดินมีความเหนียว สามารถบีบกดรีดดินให้เป็นแผ่นและคลึงให้เป็นเส้นมีความหนาสม่ำเสมอการต่อประกอบให้เป็นรูปทรงต่าง ๆ ได้ดีสำหรับการขึ้นรูปด้วยแป้นหมุนเนื้อดินตั้งศูนย์ได้ง่ายทรงตัวได้ดีจัดรูปทรงได้ง่าย สามารถปั้นเป็นชิ้นงานได้ทุกขนาด ตั้งแต่ งานขนาดเล็ก ขนาดกลาง และขนาดใหญ่ ได้ดีสามารถจะนำไปใช้ในการผลิตในเชิงอุตสาหกรรมเพื่อสร้างรายได้ให้ประชาชนในท้องถิ่นได้

6. เอกสารอ้างอิง

- Fine Arts Department, (1989). **Porcelains from Kilns in Buriram Province**. Bangkok: Distribution and Publication of Secretary Office, Fine Arts Department. (in Thai)
- Kosiyapan, S. (1991). **Ceramic Glazes**. Bangkok: Thai Watana Panich Press. (in Thai)
- Lawanwadeekul, S. (2012). Study of Ratio between Lampang Kaolin and Mae Tan Ball Clay on Physical and Mechanical Properties of Clay Slip. **Industrial Technology Lampang Rajabhat University Journal**, 5(2), 51-59. (in Thai)
- Phromphruek, T. (1989). **Introduction to Ceramic**. Bangkok: Odian Store. (in Thai)
- Pinsakul, P. (2005). **Making Stoneware ware from Clay in Krasang District, Buriram Province**. (Master's Thesis). Bangkok: Industrial Technology Program, Phranakhon Rajabhat University. (in Thai)
- Pimkhaokum, P. (1996). **Ceramics**. 4th Published. Bangkok: Chulalongkorn University. (in Thai)
- Rhodes, D. (1974). **Clay and Glazes for the Potter**. New York : Chilton Book
- Singer, Sonja S. (1963). **Industrial Ceramic**. New – York: Chemieal Publishing Company.
- Sinmak, Y. (2016). A Study of the Suitability of Clay from Muand, Sakaeo Province, for the Manufacture of Pottery. **Industrial Technology Lampang Rajabhat University Journal**, 9(1), 61-71. (in Thai)
- Wongpun, N. (2009). Development of Terra Cotta Used as Clays in Decorated Products Industry: A case study of the Clays Found in Lamplaimas District, Buriram Province. **Buriram Rajabhat University of Journal of Research and Development**, 2(1), 42-50. (in Thai)

การพัฒนาประสิทธิภาพเตาเผาถ่านกัมมันต์ จากกะลามะพร้าว Development of Activated Charcoal from a Coconut Shell Kiln

อนุสรณ์ สิ้นสะอาด^{1*}

^{1*} คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์

398 หมู่ 9 ถนนสวรรค์วิถี ตำบลนครสวรรค์ตก อำเภอเมือง จังหวัดนครสวรรค์ 60000

โทรศัพท์ 056-219-100 ต่อ 2311 โทรสาร 056-882-523 e-mail : anu_bird@hotmail.com

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้เป็นการการพัฒนาประสิทธิภาพเตาเผาถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว ที่มีอยู่ในชุมชน จากกระบวนการสร้างและพัฒนาประสิทธิภาพเตาเผาถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว ลักษณะเด่นของเตาจะเป็นแนวนอน สามารถกระจายความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพทำให้กระบวนการเผาไหม้เป็นไปตามที่กำหนดส่วนประกอบของเตามีดังนี้ ส่วนมอเตอร์ไฟฟ้า ส่วนเทอร์โมมิเตอร์ ส่วนเทอร์โมคัปเปิล ตัวถังและฝาเปิดปิดสำหรับใส่วัสดุที่นำมาเผา ควบคุมการทำงานด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเป็นเครื่องมือสำหรับการนำกะลาที่เหลือใช้กลับมาใช้ประโยชน์อีกครั้ง โดยการนำมาเผา การทำงานของเตาเผาถ่านกัมมันต์นั้นในแต่ละครั้งได้คุณภาพถ่านแตกต่างกันไป การเผาถ่านกัมมันต์ที่ดีคือเผาในช่วงอุณหภูมิ 700 - 900 องศาเซลเซียส การเผาในช่วงอุณหภูมินี้ จะเป็นการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ กะลาจะกลายเป็นคาร์บอนมีรูพรุนหนาแน่นสามารถนำไฟฟ้าและฟอกอากาศได้ ช่วยลดระยะเวลาในการเผาจากเตาแบบเดิมใช้เวลา 15 - 20 ชั่วโมง ลดระยะเวลาเหลือ 8 - 10 ชั่วโมง อุณหภูมิในการเผาจะขึ้นอยู่กับความชื้นของวัสดุที่นำมาเผา และยังลดต้นทุนในการเผาและได้น้ำตัวอย่างถ่านส่งทดสอบจาก กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ทดสอบโดยใช้สารเคมีตามกระบวนการของผู้เชี่ยวชาญได้ค่าไอโอดีนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว เท่ากับ 390 มิลลิกรัมต่อกรัม ได้ประสิทธิภาพที่ดีขึ้นกว่าการเผาแบบเดิมถึงร้อยละ 70 ซึ่งจากการศึกษาค่าไอโอดีนัมเบอร์นี้ ถ่านกัมมันต์นำไปใช้ประโยชน์ในด้านดูดกลืนอับชื้นในตู้เย็นหรือตู้กับข้าว พลังงานความร้อนสูงขึ้นและยาวนาน กรองน้ำในระบบเครื่องกรองน้ำต่าง ๆ เนื่องจากถ่านกะลาจะมีรูพรุนหนาแน่นอยู่เต็มพื้นที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ประโยชน์ที่ได้จากเตาเผาถ่านกัมมันต์สามารถนำไปพัฒนาต่อในงานอุตสาหกรรมชุมชนต่าง ๆ และทำให้สามารถเกิดอาชีพใหม่ ๆ ได้

คำสำคัญ: ถ่านกัมมันต์, การพัฒนาประสิทธิภาพ, กะลามะพร้าว

Abstract

This research project focuses on the development in the efficiency of producing activated charcoal from within pre-existing coconut shell kilns from within the local community. The kiln is composed of an electric motor, a thermometer, and a thermocouple within the main body as well as a lid used for feeding substances to the kiln. The operation of the kiln is controlled by an electronic circuit. The kiln is

used to recycle the waste from coconut shells. Each time it is used, the kiln produces results of differing quality. The best operational temperature is between 700 – 900 degrees Celsius. At this temperature the kiln efficiently turns all the coconut shells into charcoal which is then capable of being electric conductors. The kiln period is 8 – 10 hours with the kiln temperature depending on the humidity of the substances inside the kiln. The sample products are sent to be tested at the Department of Science and Technology Services at The Ministry of Science and Technology which are performed using chemical agents in accordance with specialist procedures. The iodine number value of the activated charcoal is 390 milligrams per gram. From the study results of the iodine number value, the activated charcoal can be used to absorb household odors that are found in refrigerators or in cupboards as well as to act as a water filter as the surface area of the activated charcoal is extremely porous. The kilns can be developed for the industrial purposes of the local community and to help promote new job creations.

Keywords: Activated Charcoal, Efficiency Development, Coconut shells

1. บทนำ

ปัจจุบันกลุ่มอาชีพของเกษตรกรในจังหวัดนครสวรรค์ มีมากมายหลายสาขาอาชีพ ซึ่งเป็นไปตามภูมิศาสตร์ของจังหวัด ทั้งภาคเกษตรกรรม อุตสาหกรรมการค้าและบริการการท่องเที่ยว เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตโดยใช้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เป็นเครื่องมือที่สำคัญอย่างยิ่ง ทั้งในด้านการเพิ่มผลผลิตที่มากขึ้น คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้มาตรฐาน เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค และที่สำคัญทำให้การขยายตัวทางเศรษฐกิจของจังหวัดนครสวรรค์มีการจ้างงานเพิ่มขึ้นการกระจายรายได้ลงไปในพื้นที่ชุมชนมากขึ้นมีการสร้างความเข้มแข็งของชุมชนและภูมิปัญญาท้องถิ่นการผลิตถ่านไม้เป็นภูมิปัญญาของคนในท้องถิ่นมาช้านาน มีรูปแบบการเผาที่แตกต่างกันมากมาย ถ่านไม้ที่ได้ก็มีประสิทธิภาพที่แตกต่างกันไปตามความสามารถของการเผา รูปแบบของเตา และทักษะ ภูมิปัญญาของแต่ละที่ การผลิตถ่านกัมมันต์ เป็นอีกอาชีพหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจ และมีผู้ที่พยายามผลิตด้วยวิธีใช้ภูมิปัญญาท้องถิ่น (Sunpetch, B.,2000)

กลุ่มวิสาหกิจชุมชนผลิตภัณฑ์สมุนไพรและถ่านแปรรูปตั้งอยู่เลขที่ 33/1 ม.2 ต.วัดไพร อ.เมือง จ.นครสวรรค์ โดยมี นางสาว วิชาศิริ เป็นประธานกลุ่ม ซึ่งมีความสนใจเกี่ยวกับวิธีการสร้างเตาเผาถ่านปัจจุบันกลุ่มได้ใช้ถัง 200 ลิตร ทำเป็นเตาเผา และใช้กะลามะพร้าวเป็นวัตถุดิบในการเผาซึ่งมีอยู่จำนวนมากภายในกลุ่มวิสาหกิจนั้นมีการคิดค้นศึกษาหาวิธีการต่าง ๆ ในการเผาถ่านให้ออกมาเป็นถ่านกัมมันต์หรือถ่านคาร์บอน แต่ก็ยังไม่ประสบผลสำเร็จ วิธีการเผายังมีความบกพร่องหลายอย่างที่ต้องแก้ไข

ดังนั้นการพัฒนาประสิทธิภาพเตาเผาถ่านกัมมันต์ จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร จึงเป็นแนวคิดของคณะผู้วิจัยที่จะพัฒนาการเผาถ่านกัมมันต์ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ได้ผลผลิตที่มีคุณภาพและยังสามารถที่จะควบคุมมาตรฐานผลิตภัณฑ์ให้เป็นไปตามความต้องการได้ หลักการซึ่งสามารถ

สร้างเป็นมูลค่าเพิ่มของผลิตภัณฑ์ และสร้างกลุ่มอาชีพ เพื่อพัฒนาศักยภาพของคนในชุมชน และสามารถนำไปพัฒนาต่อในงานอุตสาหกรรม ชุมชนต่าง ๆ และทำให้สามารถเกิดอาชีพใหม่ ๆ ได้ ตามแนวยุทธศาสตร์ของจังหวัดอีกทางหนึ่ง

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อออกแบบและสร้างเตาเผาถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว
2. เพื่อหาประสิทธิภาพของเตาเผาถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและวิธีการทดลอง

การเผาถ่านในยุคแรก ๆ กว่า 10,000 ปีมาแล้ว จะนำท่อนไม้มาเรียงทับกันแล้วจุดไฟ จากนั้นจึงกลบด้วยดิน เตาเผาถ่านในลักษณะนี้จึงเรียกว่า เตากลบ หรือเตาหลุม (เหมือนกับการฝังศพคน) แต่วิธีการดังกล่าวให้ผลผลิตในปริมาณและคุณภาพต่ำ เนื่องจากอากาศสามารถไหลผ่านดินที่กลบไว้ได้ทำให้ไม่สามารถควบคุมอากาศภายในได้ตามต้องการ ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาเตาผลิตถ่านไม่อย่างต่อเนื่องจนได้เป็นเตาผลิตถ่านที่ผนึกแน่นสามารถควบคุมอากาศได้ตามต้องการทำให้สามารถผลิตถ่านไม้ได้ผลผลิตและคุณภาพดีขึ้น เช่น เตาเผาถ่าน 200 ลิตร เป็นต้น

3.1 รูปแบบของเตาเผาถ่าน

1) เตาหลุมหรือเตากลบ

เป็นเตาชนิดแรกของโลกที่ยังคงใช้อยู่จนถึงปัจจุบัน มีรูปร่าง ขนาด และวัสดุที่ใช้กลบแตกต่างกันไปแต่ละภูมิภาคของเตา เช่น เตากลม เตาเหลี่ยม เตาโดม ซึ่งกลบด้วยดิน แกลบ ขี้เลื่อย จุดเด่นของเตาแบบนี้คือ ก่อสร้างง่าย ราคาถูก มีข้อเสีย คือ ผลผลิตและคุณภาพต่ำเนื่องจากมีอากาศเข้าไปข้างในเตาปริมาณที่มากในขณะที่เผาถ่าน ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 เตาหลุมหรือเตากลบ

2) เตาเผาถ่านแบบ 200 ลิตร

การเผาถ่านในอดีตจะทำได้โดยวิธีการที่เรียกว่าเตาหลุมฝังหรือเตากลบโดยจะขุดดินให้เป็นหลุมลึกประมาณจากนั้นก็เอาไม้ไปกองไว้อย่างเป็นระเบียบแล้วก็เอา ดิน ฟางข้าวใบไม้ หรือแกลบ คลุมกลบแล้วเผาวัสดุเหล่านี้ทางด้านบน จากนั้นก็ใช้น้ำดับถ่านไม้ที่ได้ จึงมีคุณภาพต่ำได้ ปริมาณของถ่านน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณไม้ที่ใช้ และที่สำคัญ คือเตาประเภทนี้ สามารถเผากิ่งไม้ขนาดเล็กได้ 30 เซนติเมตร เตาเผาถ่าน 200 ลิตร เป็นเตาเผาถ่านที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าเตาเผา

ถ่านแบบดั้งเดิม โดยใช้ถังขนาด 200 ลิตรเป็นตัวเตา เตาประเภทนี้ อาศัยความร้อนจากควันไฟไล่ความชื้นในเนื้อไม้ทำให้ไม้กลายเป็นถ่าน หรือที่เรียกว่า “อากาศ” จึงไม่มีการลุกติดไฟของเนื้อไม้ ผลผลิตที่ได้จึงเป็น ถ่านที่มีคุณภาพ ขึ้นเล็กน้อยดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 เตาเผาถ่าน 200 ลิตร

3.2 ขั้นตอนของการเผาถ่าน

1) การกลายเป็นถ่าน หรือคาร์บอนไนเซชัน

เกิดจากการเผาไหม้ภายในบริเวณที่มีอากาศอยู่เบาบาง หรืออาจจะกล่าวในทางเทคนิค ก็คือกระบวนการแยกสารอินทรีย์ภายในไม้ในสภาวะที่มีอากาศอยู่น้อยมาก เมื่อมีการให้ความร้อนระหว่างการเผาถ่านจะช่วยกำจัดน้ำ น้ำมันดินและสารประกอบอื่น ๆ ออกจากไม้พื้น ผลผลิตที่ได้จากกระบวนการ คือสารต่าง ๆ ประกอบด้วย คาร์บอนร้อยละ 80 นอกจากนั้นจะเป็นสารประกอบ ไฮโดรคาร์บอนร้อยละ 10 – 20 และแร่ธาตุต่าง ๆ เช่น กำมะถันและฟอสฟอรัส ถ่านที่ได้หลังจากกระบวนการผลิตจะมีประมาณของคาร์บอนสูงและไม่มีความชื้น ทำให้ปริมาณพลังงานในถ่านสูง โดยมีค่าเป็นสองเท่าของปริมาณพลังงานในไม้แห้ง เพื่อความเข้าใจในวิธีการที่ทำให้ไม้กลายเป็นถ่านนั้น มีขั้นตอนต่าง ๆ ประกอบไปด้วย ขั้นตอนสำคัญ 4 ขั้นตอน คือการไล่ความชื้น การเปลี่ยนจากไม้เป็นถ่านการทำถ่านให้บริสุทธิ์และการทำให้เย็นลง

2) การไล่ความชื้น

อุณหภูมิ 20 – 270 องศาเซลเซียส ขั้นตอนนี้จำเป็นต้องใช้ความร้อนจากภายนอก เพื่อให้ไม้พื้นเกิดปฏิกิริยาคายความร้อน (Endothermic Reaction) จะสะสมไว้ให้ได้อีกพอที่จะเกิดปฏิกิริยา คายความร้อน (Endothermic Reaction) ในขั้นตอนต่อไป

3) การเปลี่ยนจากไม้เป็นถ่าน

อุณหภูมิระหว่าง 270 – 400 องศาเซลเซียส จะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงอุณหภูมิอยู่ที่ระหว่าง 270 – 300 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิระหว่าง 300 – 400 องศาเซลเซียส

(1) อุณหภูมิระหว่าง 270 – 300 องศาเซลเซียส

ช่วงนี้ไม้ในเตาเผาจะสะสมความร้อนไว้มากพอที่จะเกิดปฏิกิริยาคายความร้อน (Endothermic Reaction) โดยไม่ต้องเติมฟืนหน้าเตาอีก ไม้พื้นจะลุกไหม้และสลายตัวโดยความร้อนที่สะสมไว้ในตัวเอง เซลลูโลสจะเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส การสลายตัวจะเป็นไป

อย่างรวดเร็ว คว้นที่ออกมาจากปล่องจะมีสีขาวปนเหลืองมีกลิ่นฉุนจัด ผู้ผลิตถ่านในประเทศไทยเรียกคว้นนี้ว่า คว้นบ้ำหลังจากคว้นบ้ำมีปริมาณน้อยลงและเริ่มเปลี่ยนเป็นสีเทาแล้วจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องควบคุมอุณหภูมิไว้ให้คงที่เป็นเวลานานพอสมควร เพื่อให้ขั้นตอนนี้เป็นไปอย่างช้า ๆ และสม่ำเสมอความร้อนจากมันบนหน้าเตาจะต้องค่อย ๆ ถ่ายเทความร้อนไปยังจุดต่าง ๆ ทุกจุดเตาอย่างช้า ๆ หากปล่อยให้อุณหภูมิขึ้นสูงเร็วเกินไปจะทำให้ไม้ที่สะสมความร้อนไว้มากกว่ากลายเป็นขี้เถ้าเสียก่อน และถ้ากรณีที่เปลวไฟแลบออกมาทางหน้าเตา ไม้ส่วนด้านล่างของเตาอาจจะเป็นถ่านไม่สุก ทำให้ปริมาณผลผลิตต่ำ การควบคุมอุณหภูมิสามารถทำได้โดยการควบคุมอากาศที่หน้าเตาควบคู่กับการใช้เครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermometer) แต่การวัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมมิเตอร์เพียงอย่างเดียว อาจผิดพลาดได้ โดยเฉพาะเมื่อมีการเติมฟืนหน้าเตามากและเร็วเกินไป ดังนั้นการดูสีคว้นและการนำกระเบื้องเคลือบสีขาวมาอังที่ปล่องคว้นเพื่อดูสีของคว้นที่กลั่นตัวติดกระเบื้องเคลือบเป็นการตรวจสอบซ้ำ

(2) อุณหภูมิระหว่าง 300 – 400 องศาเซลเซียส

ช่วงนี้เซลล์ลุสยังสลายตัวอยู่อย่างต่อเนื่อง และลิกนินจะเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิ 310 องศาเซลเซียส การสลายตัวทั้งหมดจะเสร็จสิ้นสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ขั้นตอนการจากเปลี่ยนไม้เป็นถ่านนี้ คว้นที่ออกมาจะประกอบด้วยสารต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นใหม่มากมายหลายชนิดจากการสลายตัวของไม้ด้วยความร้อน (Pyrolysis) และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายด้าน

4) การทำถ่านให้บริสุทธิ์

ถึงแม้ว่าขั้นตอนการเปลี่ยนไม้กลายเป็นถ่าน จะเสร็จสิ้นสมบูรณ์แล้ว ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส แต่ยังมีปริมาณคาร์บอนเสถียร (Fixed Carbon) ต่ำ และยังคงมีน้ำมันดินเป็นส่วนประกอบในปริมาณที่สูงมาก หากนำไปใช้จะได้ถ่านคุณภาพต่ำและถ้านำไปประกอบอาหารปิ้งย่าง น้ำมันดินที่ยังคงค้างอยู่ในถ่านเมื่อถูกเผาไหม้ที่ อุณหภูมิสูงกว่า 425 องศาเซลเซียส โดยปกติเตาหุงต้มมีอุณหภูมิประมาณ 500 – 600 องศาเซลเซียส จะเกิดเป็นสารประกอบใหม่ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง ดังนั้นจึงต้องเพิ่มอุณหภูมิให้มีความสูงขึ้นโดยการปรับออกซิเจนไหลเข้ามาสูงขึ้น อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จาก 400 องศาเซลเซียส เป็น 500 องศาเซลเซียส แต่เนื่องจากอุณหภูมิเตาด้านบนจะสูงกว่าอุณหภูมิที่ ฟืนเตา ดังนั้นต้องใช้เวลาพอสมควรในการที่จะทำให้อุณหภูมิเท่ากันหมดทั้งเตา ดังนั้นหากเร่งให้อากาศเข้าเร็วเกินไปเพื่อเพิ่มอุณหภูมิ กว่าอุณหภูมิที่ฟืนเตาสูงถึง 500 องศาเซลเซียส เพื่อไล่น้ำมันดินออกจากถ่าน อุณหภูมิด้านบนเตาถึง 700 องศาเซลเซียส ในเวลาที่เราเร่งไปจะทำให้ไม้ด้านบนกลายเป็นขี้เถ้าเสียก่อน จึงควรควบคุมอุณหภูมิด้วยความระมัดระวังอย่างยิ่ง ในทางปฏิบัติเมื่ออุณหภูมิด้านบนของเตาสูงถึง 700 องศาเซลเซียส อาจสังเกตได้จากสีของคว้นที่เริ่มใส ผู้ควบคุมการผลิตถ่านจะเปิดช่องอากาศเข้า แล้วรอให้ความร้อนถ่ายเทจากด้านบนของเตาลงมาที่ฟืนเตา อุณหภูมิในเตาจะใกล้เคียงกันทุกจุดประมาณ 500 องศาเซลเซียส ซึ่งในขณะนั้นจะไม่มีคว้นเหลืออยู่อีกแล้ว จึงปิดปล่องคว้น ขั้นตอนการทำให้ถ่านบริสุทธิ์นี้ คว้นที่ออกมาจะมีสารก่อมะเร็งปนออกมาด้วยเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 425 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงไม่ควรเก็บน้ำส้มคว้นไม้ในช่วงนี้เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ใด ๆ ควรนำไปบำบัดทิ้งหรือนำไปเป็นเชื้อเพลิง

5) การทำให้เย็นลง

หลังจากปิดปล่องเตาแล้ว ต้องปล่อยให้เตาเย็นลง จึงจะนำถ่านไม้ออกมาใช้งานได้ ก่อนจะเปิดเตาต้องให้อุณหภูมิในภายในเตาต่ำลงเพราะว่าถ่านไม้อุณหภูมิสูงสามารถลุกติดไฟเองได้ ถ้าได้รับออกซิเจนจากอากาศ ดังนั้นการเปิดเตาต้องเริ่มเปิดที่ปล่องควันก่อน เพื่อระบายความร้อนและแก๊สที่ยังคงค้างอยู่ในเตาให้หมด หลังจากนั้นจึงเปิดหน้าเตา

4. ผลการดำเนินงาน

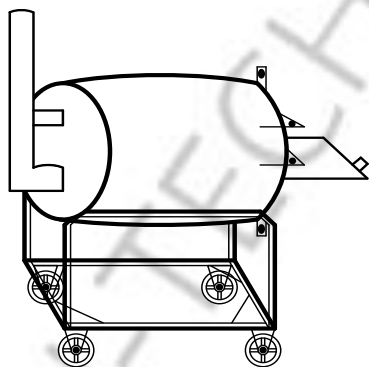
4.1 ผลของการสร้างและพัฒนาเตาเผาถ่านถ่านกัมมันต์

การออกแบบชิ้นส่วนต่างๆของเตาเผาถ่านกัมมันต์เป็นสิ่งสำคัญมากเนื่องจากชิ้นส่วนอุปกรณ์ต้องมีความเหมาะสมกับการใช้งานได้ดีมีประสิทธิภาพ และมีความแข็งแรง โดยมีส่วนประกอบดังนี้

1) ส่วนของโครงสร้าง ใช้ถัง 200 ลิตร เป็นโครงสร้างของเตาเผาถ่านกัมมันต์และหุ้มฉนวนเหล็กและใยหินหรือใยแก้วเพื่อให้สามารถทนกับอุณหภูมิที่สูงได้การนำเหล็กมาห่อหุ้มเป็นฉนวนเมื่อทำการเจาะเสร็จแล้วต่อไปก็จะทำการหุ้มเหล็กเข้าไปในการหุ้มนั้นจะใช้เหล็กแผ่นขนาด 0.3 เซนติเมตร มาม้วนรอบตัวถัง 200 ลิตร โดยมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 77 เซนติเมตร ยาว 98 เซนติเมตร ภายในพร้อมไปด้วยการหุ้มฉนวนใยแก้วกันความร้อนในอุณหภูมิที่สูงมากขึ้น และยังเป็นการช่วยความร้อนในเตาได้ดี

2) ส่วนของการระบายความร้อนปล่องควันของเตาเผาถ่านกัมมันต์ขนาดกว้าง 8.5 เซนติเมตร สูง 110 เซนติเมตร มีไว้เพื่อช่วยระบายออกซิเจนและควันภายในเตาให้ออกไปยังภายนอกเพื่อช่วยให้อุณหภูมิสูงหรือคงที่ และยังทำให้ออกซิเจนภายในเตาสามารถหมุนเวียนได้ดี

3) การควบคุมอุณหภูมิภายในเตาช่องเดิมเชื้อเพลิงเป็นช่องที่ช่วยปรับหรือควบคุมอุณหภูมิภายในเตา จะใช้แก๊สหุงต้มเป็นเชื้อเพลิง ใช้พัดลมในการเติมออกซิเจน ทำให้เผาได้ในความร้อนสูงสุด 800 - 900 องศาเซลเซียส จึงทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีคุณภาพสูง ทำด้วยเหล็กหนา 0.12 เซนติเมตรทำเป็นสี่เหลี่ยม ยาว 38 เซนติเมตร สูง 16 เซนติเมตร กว้าง 21 เซนติเมตร



(ก)



(ข)

ภาพที่ 3 เตาเผาถ่านกัมมันต์ (ก) การออกแบบเตาเผาถ่านกัมมันต์ (ข) เตาเผาถ่านกัมมันต์ที่เสร็จสมบูรณ์

4.2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพเตาเผาถ่านกัมมันต์ในช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ และปริมาณถ่านกัมมันต์

ผลการทดสอบเตาเผาถ่านกัมมันต์ในช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ โดยการทดสอบทั้งหมด 5 ครั้ง และทำการเก็บผลในช่วงเวลาต่างๆเพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมและดีที่สุดในการเผาถ่านกัมมันต์ จากกะลามะพร้าวผลการวิจัยพบว่าช่วงอุณหภูมิ 700 - 900 องศาเซลเซียส เป็นช่วงเวลาที่ดียิ่งที่สุดในการเผาถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวเพื่อจะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด

4.3 ผลการทดสอบความร้อนถ่านกัมมันต์เปรียบเทียบกับถ่านทั่วไป

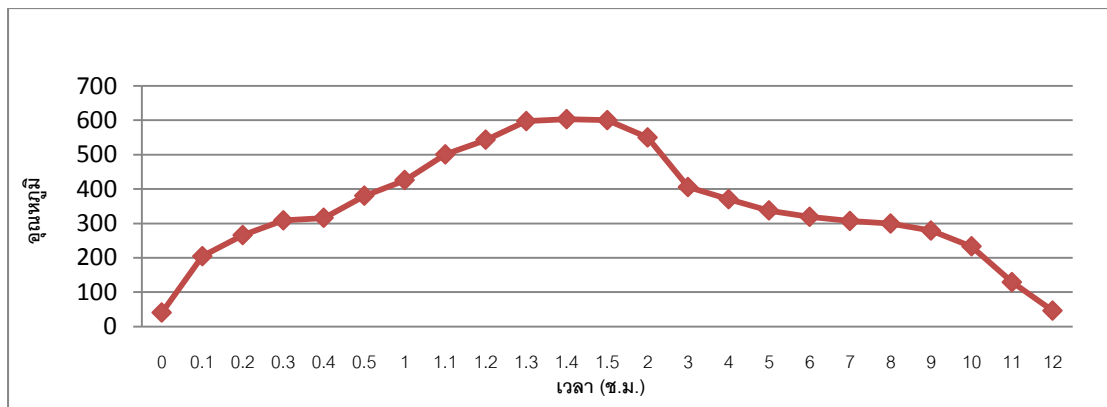
ผลการทดสอบความร้อนถ่านกัมมันต์เปรียบเทียบกับถ่านทั่วไปโดยการเปรียบเทียบในช่วงเวลาในการใช้ต่าง ๆ ผลการทดลองพบว่าถ่านกัมมันต์สามารถให้ความร้อนดีกว่าถ่านทั่วไปในช่วงเวลาการใช้ที่เท่ากันโดยการให้อุณหภูมิที่สูงที่สุดเวลาหลังจากถูกเผาแล้ว 15 นาที คือ 450 องศาเซลเซียส และ 350 องศาเซลเซียส สำหรับถ่านกัมมันต์และถ่านทั่วไป

4.4 ผลการทดสอบค่ากรด-เบส ของถ่านกัมมันต์เปรียบเทียบกับถ่านทั่วไป

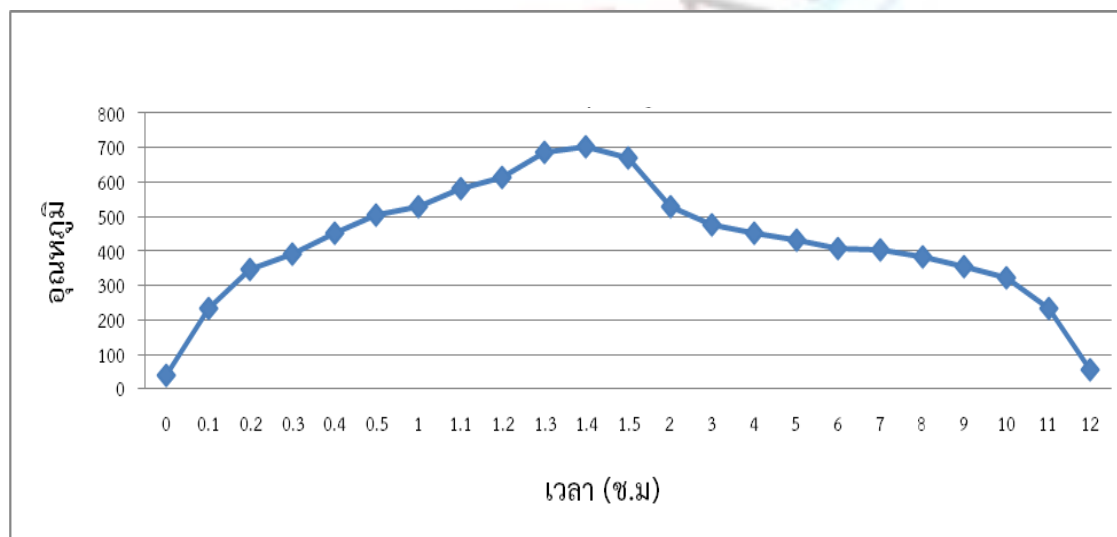
จากงานวิจัย (Wongnate, T., and Panya, P. 2011) การทดสอบกรด-เบส จะบอกได้ถึงคุณภาพของถ่าน ถ่านกัมมันต์ที่เผาในอุณหภูมิ 800 - 1000 องศาเซลเซียส จะมีค่าเป็นเบส (ด่าง) และถ่านที่เผาที่อุณหภูมิ 400 - 500 องศาเซลเซียส จะมีค่าเป็นกรด ซึ่งคณะผู้จัดทำได้ทดสอบถ่านกัมมันต์ตามงานวิจัย โดยใช้กระดาษลิตมัสในการทดสอบ ถ่านกัมมันต์ที่เผาอุณหภูมิ 800 - 1000 องศาเซลเซียส กระดาษลิตมัสจะเปลี่ยนสีจากสีแดงเป็นสีน้ำเงินจึงมีค่าเป็นเบส และถ่านทั่วไป กระดาษลิตมัสสีแดงจะไม่เปลี่ยนสีมีค่าเป็นกรด



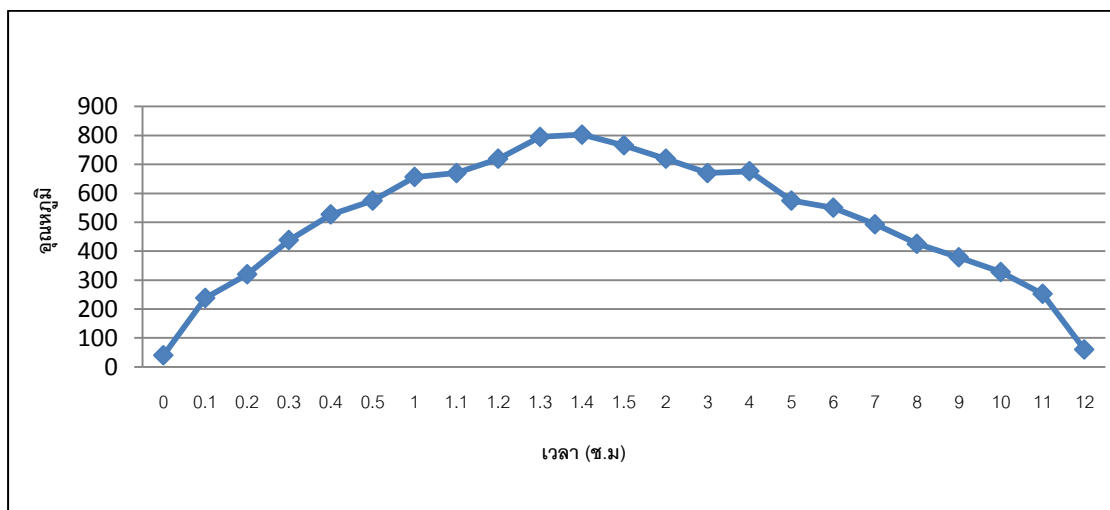
ภาพที่ 4 การทดสอบถ่านกัมมันต์โดยการวัดค่ากรด-เบส



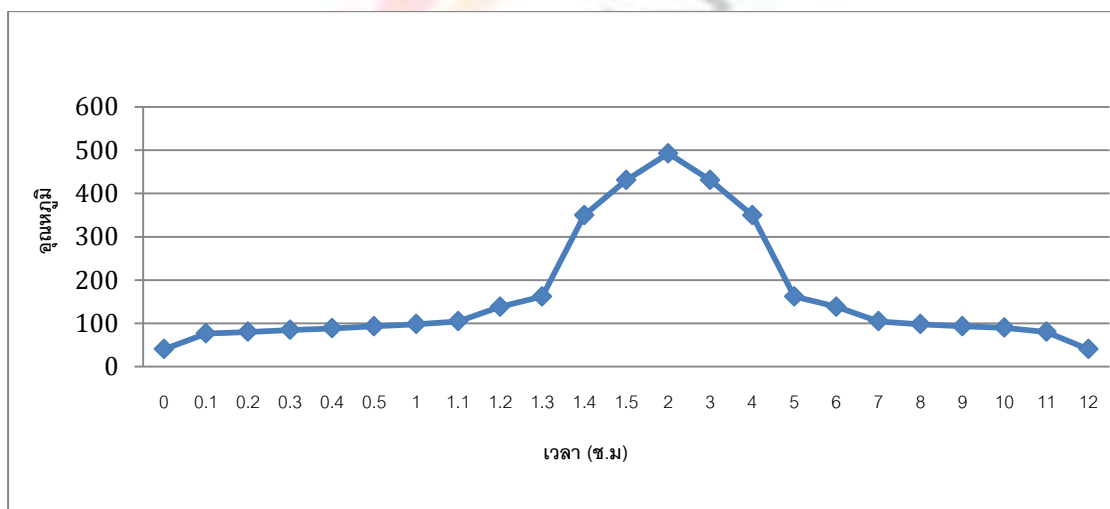
ภาพที่ 5 แสดงอุณหภูมิในเตาเผาถ่านกัมมันต์ที่ได้รับการพัฒนา เมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เมื่อเวลาการเผาผ่านไปเป็นเวลา 1.30 ชั่วโมง เป็นช่วงที่อุณหภูมิสูงที่สุด จนถึงเวลา 1.50 ชั่วโมง ความร้อนจึงเริ่มลดลงรวมเวลาแล้วช่วงที่อุณหภูมิสูงที่สุด คือ 20 นาที ค่าไอโอดีนัมเบอร์ที่ได้แตกต่างกัน



ภาพที่ 6 แสดงอุณหภูมิในเตาเผาถ่านกัมมันต์ที่ได้พัฒนาแล้ว เมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เมื่อเวลาการเผาผ่านไปเป็นเวลา 1.40 ชั่วโมง เป็นช่วงที่อุณหภูมิสูงที่สุด จึงเริ่มลดลง ค่าไอโอดีนัมเบอร์และถ่านแตกต่างกัน

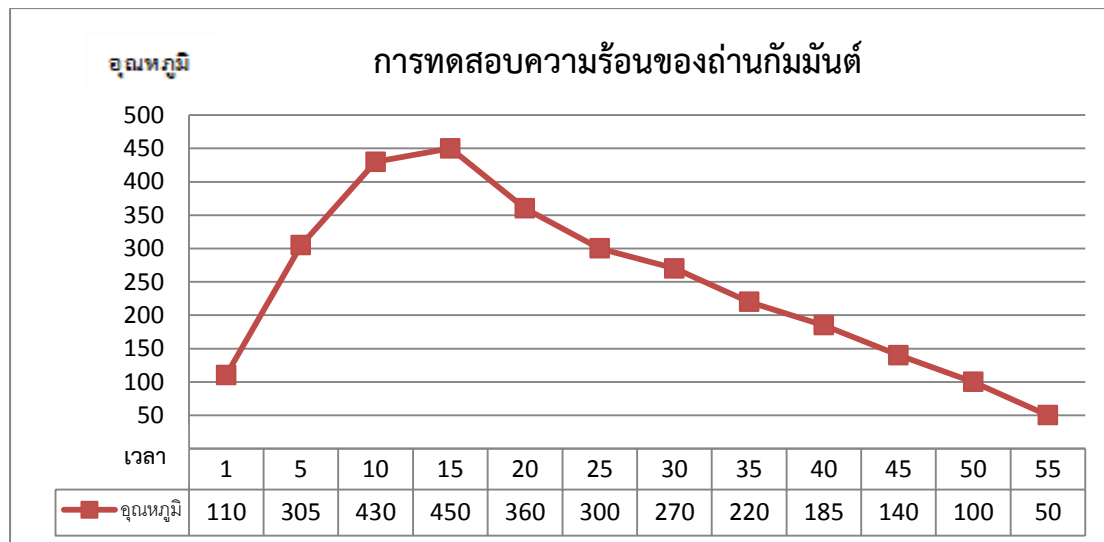


ภาพที่ 7 แสดงอุณหภูมิในเตาเผาถ่านกัมมันต์ที่ได้พัฒนาแล้ว เมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เมื่อเวลาการเผาผ่านไปเป็นเวลา 1:30 ชั่วโมง เป็นช่วงที่อุณหภูมิสูงสุดจนถึงเวลา 1:40 ชั่วโมง ความร้อนจึงเริ่มลดลงรวมเวลาแล้วช่วงที่อุณหภูมิสูงที่สุด 10 นาที ค่าไอโอดีน นัมเบอร์และถ่านที่ได้แตกต่างกัน

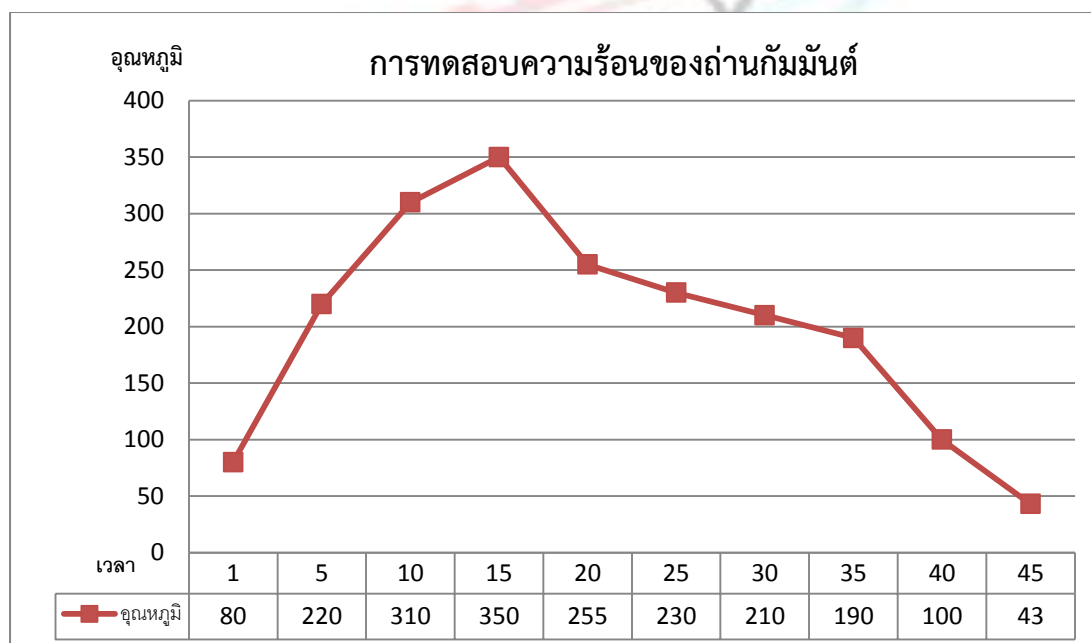


ภาพที่ 8 แสดงอุณหภูมิในเตาเผาถ่านแบบดั้งเดิมผลการทดลองระหว่าง ช่วงให้ความร้อน และช่วงคายความร้อน ของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนสมุนไพรและการแปรรูป ในอุณหภูมิอยู่ 300 – 500 องศาเซลเซียส

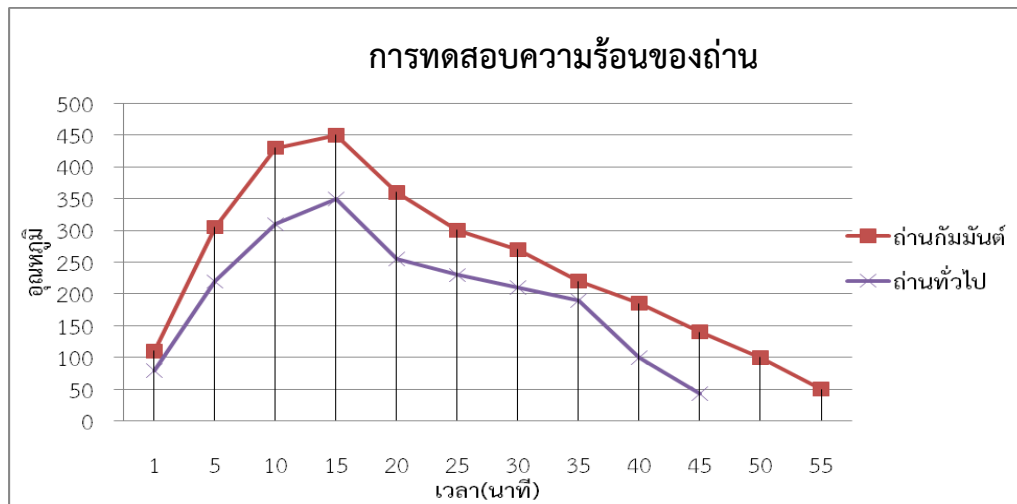
จากภาพที่ 5 - 7 ซึ่งเป็นการเผาในเตาเผาถ่านกัมมันต์ที่ได้พัฒนาแล้วจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิต่างกันอย่างชัดเจนค่าไอโอดีนนัมเบอร์จะแตกต่างกัน คุณภาพของถ่านที่ได้แตกต่างกัน



ภาพที่ 9 แสดงผลกราฟการทดสอบความร้อนของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากเตาเผาถ่านที่พัฒนาแล้วจะเห็นว่าอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ 450 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการเผาไหม้ 55 นาที



ภาพที่ 10 แสดงผลกราฟการทดสอบความร้อนของถ่านทั่วไปจะเห็นว่าอุณหภูมิสูงที่สุดอยู่ที่ 350 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 11 แสดงผลกราฟการทดสอบความร้อนของถ่านทั้ง 2 ประเภทระหว่าง ถ่านกัมมันต์ และถ่านธรรมดาทั่วไปจะเห็นว่า 1 นาที แรก ความร้อนอยู่ที่ 100 องศาเซลเซียส ระหว่าง 1 นาที ถึง 5 นาที ความร้อนอยู่ที่ 300 องศาเซลเซียส ระหว่าง 5 นาที ถึง 10 นาที ความร้อนอยู่ที่ 445 องศาเซลเซียส ให้อ่านไปเรื่อย ๆ จนถึง 55 นาที สุดท้ายสังเกต เวลาจาก 1 นาที ถึง 15 นาที ช่วงนี้ความร้อนจะสูงเพราะเราต้องทำการกระตุ้นให้ วัสดุที่ที่เราเผาไหม้มีความสมบูรณ์ และทำให้เกิดจากถ่านธรรมดา กลายเป็นถ่านกัมมันต์ หลัง 20 นาที ถึง 55 นาที ความร้อนก็จะเริ่มลดลงไปเรื่อย ๆ จนไฟดับสนิท

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

จากการทดลองทดสอบประสิทธิภาพเตาเผาถ่านกัมมันต์ที่ออกแบบขึ้นโดยการศึกษา อุณหภูมิในการเผาสมบัติทางความร้อนและสมบัติทางเคมีของถ่านกัมมันต์ที่ส่งผลต่อปริมาณ ถ่านกัมมันต์ที่เกิดขึ้นผลการทดสอบเตาเผาถ่านกัมมันต์ในช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ โดยการทดสอบทั้งหมด 5 ครั้ง และทำการเก็บผลในช่วงเวลาต่าง ๆ เพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมและดีที่สุดในการเผาถ่านกัมมันต์ จากกะลามะพร้าวผลการวิจัยพบว่าช่วงอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นช่วงเวลาที่ดียิ่งที่สุดในการเผา ถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวและนำมาเปรียบเทียบกับถ่านทั่วไป ผลการทดสอบความร้อนถ่าน กัมมันต์เปรียบเทียบกับถ่านทั่วไปโดยการเปรียบเทียบในช่วงเวลาในการใช้ต่าง ๆ ผลการทดลอง พบว่าถ่านกัมมันต์สามารถให้ความร้อนดีกว่าถ่านทั่วไปในช่วงเวลาการใช้ที่เท่ากันโดยการให้อุณหภูมิที่ สูงที่สุดเวลาหลังจากถูกเผาแล้ว 15 นาที คือ 450 องศา ผลการทดสอบค่ากรด-เบส ของถ่านกัมมันต์ เปรียบเทียบกับถ่านทั่วไปจะบอกได้ถึงคุณภาพของถ่าน ซึ่งคณะผู้จัดทำได้ทำการทดสอบถ่านกัมมันต์ ตามงานวิจัย โดยใช้กระดาษลิตมัสในการทดสอบ ถ่านกัมมันต์ที่เผาอุณหภูมิ 800 - 1000 องศา เซลเซียส กระดาษลิตมัสจะเปลี่ยนสีจากสีแดงเป็นสีน้ำเงินจึงมีค่าเป็นเบส และถ่านทั่วไปกระดาษ ลิตมัสสีแดงจะไม่เปลี่ยนสีมีค่าเป็นกรด

ผลการวิจัยเผาถ่านกัมมันต์โดยเผาในช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ พบว่าการเผาถ่านในแต่ละครั้งได้ คุณภาพถ่านแตกต่างกันไป การเผาถ่านกัมมันต์ที่ดีคือเผาในช่วงอุณหภูมิ 700 - 900 องศาเซลเซียส การเผาในช่วงอุณหภูมินี้ จะเป็นการเผาไหม้ที่สมบูรณ์เปรียบเทียบกับระหว่าง เตาเผาถ่านกัมมันต์ และเตาเผาถ่านแบบดั้งเดิม เนื่องจากเตาเผาถ่านกัมมันต์ได้มีการออกแบบเพื่อใช้เผาในระยะเวลา

ที่สั้นลงกว่าเตาแบบดั้งเดิม โดยการเปรียบเทียบนั้น เตาเผาถ่านกัมมันต์มีระยะเวลาในการเผา 8 - 10 ชั่วโมง อุณหภูมิ ในการเผาที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 700 - 900 องศาเซลเซียส จากการสอบถามกลุ่มวิสาหกิจชุมชนผลิตภัณฑ์สมุนไพรและถ่านแปรรูปตั้งอยู่เลขที่ 33/1 ม.2 ต.วัดไทร อ.เมือง จ.นครสวรรค์ โดยมี นาง ลำอาง วิชาศิริ เป็นประธานกลุ่มเตาเผาถ่านแบบนั้นดั้งเดิมจะใช้เวลาในการเผาอยู่ที่ 25 - 35 ชั่วโมง อุณหภูมิในการเผาในช่วง 300 - 500 องศาเซลเซียส หากนำเตาทั้ง 2 ประเภทมาเปรียบเทียบกันนั้น จะสังเกตได้ว่าเตาเผาถ่านกัมมันต์จะใช้เวลาในการเผาน้อยกว่าเตาแบบดั้งเดิม 17 - 25 ชั่วโมง ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับความชื้นของวัสดุที่นำมาเผา

การทดสอบสมบัติทางเคมีของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตขึ้นจากการทดสอบถ่านกัมมันต์ของคณะผู้จัดทำที่เผาในช่วงอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส พบว่า เป็นเบส ซึ่งตรงกับงานวิจัย (Wongnate, T., and Panya, P.: Adsorption of Some Heavy Metal Ions Using Activated Carbons Prepared from Cassava Root) และมีค่าไอโอดีนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว เท่ากับ 390 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งเหมาะสมกับการใช้ประโยชน์ในการดูดกลืนอับ ดูดความชื้น กรองน้ำ

ตารางที่ 1 เกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 900-2523) ของถ่านกัมมันต์

คุณภาพ	ต่ำ 0-100mg/g	พอใช้ 101- 300mg/g	ปานกลาง 301- 400mg/g	ดี 401- 600mg/g	ดีมาก 600 mg/g ขึ้นไป
การใช้งาน	ใช้ให้ความร้อนทั่วไป	ใช้ให้ความร้อน, ดูดกลิ่นอับ	ดูดกลิ่นอับ, ดูดความชื้น, กรองน้ำ	ดูดกลิ่นอับ, ดูดความชื้น, กรองน้ำ หรือ ใช้ในงานอุตสาหกรรม	เหมาะสมสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ

จากตารางที่ 1 ได้นำตัวอย่างถ่านส่งทดสอบจากกรมวิทยาศาสตร์บริการ ทดสอบโดยใช้สารเคมีตามกระบวนการของผู้เชี่ยวชาญ แล้วได้ค่าไอโอดีนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว เท่ากับ 390 มิลลิกรัมต่อกรัม

6. ข้อเสนอแนะ

- 6.1 หากจะนำเตาเผาถ่านกัมมันต์ไปใช้ในงานอุตสาหกรรม ควรเพิ่มขนาดให้ใหญ่กว่าเดิม
- 6.2 เตาเผาถ่านกัมมันต์สามารถใช้แก๊สเป็นเชื้อเพลิงหรือใช้ฟืนเป็นเชื้อเพลิงก็ได้
- 6.3 พัดลมจะมีความเร็วทั้งหมด 3 ระดับ ควรปรับใช้ตามความเหมาะสม
- 6.4 การเผาถ่านกัมมันต์ในแต่ละครั้งสามารถเก็บน้ำส้มควันไม้จากปล่องควันได้ซึ่งจะนำไปใช้ประโยชน์อื่น ๆ ได้ เช่น ในการกำจัดแมลง เป็นต้น

7. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคณาบดีคณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์ กลุ่มผู้ประกอบการถ่านแปรรูปสมุนไพร เลขที่ 33/1 ม.2 ต.วัดไทร

อ.เมือง จ.นครสวรรค์ และนักศึกษา รวมถึงชาวบ้านที่ให้ความร่วมมือความช่วยเหลือเสมอมา ให้การสนับสนุนโครงการวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจนสามารถพัฒนาประสิทธิภาพเตาเผา ถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว ให้กลุ่มวิสาหกิจชุมชนสามารถเข้าถึงเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพ และราคาถูกลงสามารถผลิตเองได้เหมาะสมกับการใช้งานเกิดประโยชน์ต่อความมั่นคงของกลุ่มอาชีพ ในท้องถิ่นต่อไป

8. เอกสารอ้างอิง

- Ahmed Abu Ismaiel, Mohamed Kheireddine Aroua, Rozita Yusoff, (2013). Palm shell activated carbon impregnated with task-specific ionic-liquids as a novel adsorbent for the removal of mercury from contaminated water, **Chemical Engineering Journal** 225 (2013). 306–314.
- Arash Arami-Niya, Wan Mohd Ashri Wan Daud, Farouq S. Mjalli, (2011). **Comparative study of the textural characteristics of oil palm shell activated carbon produced by chemical and physical activation for methane adsorption**, *Chemical Engineering Research and Design* 89 (2011). 657–664.
- Chaiya, C. (2009). **Production of activated carbon from rubber seed shell using steam activation** Rajamangala University of Technology. (in Thai)
- Chontawan, N., **Alternating Current Motor**. Bangkok :Erawan,(1998). Thesis bachelor Program in Chemistry. Faculty of Engineering. Khon Kaen University. (in Thai)
- Panyawathanakit, P. (1997). **Production of Activated Carbon from Palm Oil-Shell**: Retrieved August, 7, 2015. From. Thes is Thai. 1997, https://info.rdi.ku.ac.th/forest/ภัทรา_ปัญญาวัฒนกิจ. (in Thai)
- Prajuksoot, C. (2011). **The preparation of activated carbon from roasted coffee residues**, Retrieved August,7,2015 From Thesis bachelor Chemical Engineering Khon Kaen University https://app.enit.kku.ac.th/mis/project/project_detail.php?projectID=ChE201106&start=600&proName=&proDep=&proYear=. (in Thai)
- Ruchi Malik, Manisha Mukherjee, Aditya Swami, Dilip S. Ramteke and Rajkamal Sarin., (2004). Validation of Adsorption Efficiency of Activated Carbons through Surface Characterization Using Scanning Electron Microscopy Technique. **Carbon Science**. Vol. 5, No. 2 June 2004 pp. 75-80.
- Sunpetch, B. (2000). **Activated Carbon from Palm Shells**. Retrieved August ,7,2015. From <http://www.thaithesis.org/detail.php?id=32801>. (in Thai)
- Temyarasil, P. (2008). **Preparation and Characterization of Activated Carbon from Dendrocalamus asper Backer and Dendrocalamus Latiflorus**. Thesis Bachelor of Science Program in Chemistry kasetsart University. (in Thai)

- Thakunmahachai, B. (1993). **Production of Activated Carbon from Paitera Palm Shell in Fluidized Bed**. Thesis 1994 khunying long Athakravisunthon Learning Resources Center. (in Thai)
- Thumchart, W. (2014). Producer Gas Production using Rice Husk as Fuel by Inverted Downdraft Stove. **Industrial Technology Lampang Rajabhat University Journal**. 1 January-June 2016, 26-39. (in Thai)
- Wongnate, T., and Panya, P.: (2011, January – June) Adsorption of Some Heavy Metal Ions Using Activated Carbons Prepared from Cassava Root.: **The Golden Teak: Research Journal**. 17(1), 13-20. (in Thai)
- Yooman, P. (2016). Development of a Cold Production Biomass Charcoal Briquette Machine to use Waste from Coffee Bean Processing. **Industrial Technology Lampang Rajabhat University Journal**. 1 January- June 2016, 34 – 48. (in Thai)

การบูรณาการประยุกต์ใช้ RFID (Radio Frequency Identification)
และ IoT (Internet of thing) ผ่านระบบคลาวด์ (Cloud Computing)
สำหรับการจัดการโลจิสติกส์

An Integrated System of RFID (Radio Frequency Identification),
IoT (Internet of Things) and Cloud Computing
for Logistics Management

โอฬาร เชี่ยวชาญ^{1*} และอนุกิจ เสาร์แก้ว²

^{1,2}สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง 119 หมู่ 9 ตำบล ขมพู่ อำเภอ เมือง จังหวัด ลำปาง 52000

โทรศัพท์ 08 7811 9939 E-mail: oran_c2515@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้บูรณาการประยุกต์ใช้ ระบบ RFID และ IoT ให้กับรถขนถ่านหินลิกไนต์ในเหมืองการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ผ่านระบบ Private cloud computing ของการไฟฟ้าแม่เมาะ เพื่อลดความผิดพลาดในการตรวจสอบจำนวนเที่ยวรถขนถ่านหินลิกไนต์แทนการนับด้วยคน และสามารถดูข้อมูลผ่านคอมพิวเตอร์ หรือ โทรศัพท์มือถือได้แบบ real-time โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ RFID Reader, UHF passive RFID tag, Arduino Mega 2560 + Ethernet Shield, ภาษา PHP, JSON, Node.JS และ MariaDB เป็นระบบฐานข้อมูลและโปรโตคอลที่ใช้ในการส่งข้อมูลคือ MQTT และได้ทำการติดตั้ง UHF passive Tag กับรถขนถ่านหินจำนวน 27 คัน และติดตั้งเครื่องอ่าน RFID 1 จุดที่ตำแหน่งเครื่องบดถ่านหินลิกไนต์ที่ 3 และระบบนี้ใช้งานมาประมาณ 1 ปี ตั้งแต่ต้นปี 2558 ถึง 2559 ผลการวิจัยระบบ RFID และ IoT ที่ได้พัฒนาสามารถลดความผิดพลาดการตรวจสอบการจัดการโลจิสติกส์ การนับจำนวนรวมเที่ยวรถขนถ่านหินลิกไนต์ในหนึ่งวัน และจำนวนเที่ยวรถขนถ่านหินลิกไนต์ของรถแต่ละคันในหนึ่งวัน

คำสำคัญ: โลจิสติกส์, อาเอฟไอดี, ไอโอที, คลาวด์ คอมพิวติ้ง

Abstract

The aim of this research is to explore the application of a prototype used within logistics management of the Electricity Generation Authority of Thailand (EGAT) at the Mae Moh coal mining plant, Lampang. This research explores the use an integrated application through the RFID ID of Coal trucks and data from the RFID ID processes through private cloud computing. The research aimed to reduce human error in the counting of the numbers of trucks that collected coal from the mine. All the data can be monitored in real-time on computers and smart phones. The equipment and tools used in the research were RFID Readers, UHF-passive RFID tags, Arduino Mega 2560 + Ethernet Shields, PHP, JSON, Node.JS and a Maria DB database system. The protocol used was MQTT. During the first phase, 27 trucks were installed with UHF passive tags

whilst 1 crusher (at location number 3) was installed with a RFID reader. This system ran for one year from the beginning of 2015. The results of the research showed that the development of the RFID and IoT system enhanced the logistical management at the coal mine by reducing the human error made in counting the total number of rounds made by trucks that picked up coal each day, or the total number of rounds that each truck made picking up coal per day.

Keywords: logistic, RFID, IoT, Cloud computing

1. บทนำ

เหมืองแม่เมาะ เป็นเหมืองถ่านหินลิกไนต์ที่ใหญ่ที่สุดของประเทศไทย และเป็นหน่วยงานหนึ่งของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย โดยกำลังการผลิตของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ คิดเป็นร้อยละ 20 ของการผลิตกระแสไฟฟ้าในประเทศไทย

เนื่องจากในกระบวนการผลิตถ่านหิน โดยเฉพาะขบวนการเคลื่อนย้ายถ่านหินลิกไนต์จากบ่อถ่านหินลิกไนต์ไปยังเครื่องบด (Crusher) ต้องใช้รถบรรทุกขนาดใหญ่ในการขนย้ายและรถบรรทุกมี 2 ส่วนหลัก คือรถบรรทุกของการไฟฟ้า และรถบรรทุกจากบริษัทเอกชนที่สัมปทานได้ โดยรถบรรทุกทำงานตลอด 24 ชั่วโมง 7 วัน ระบบการจัดคิวและระบบการตรวจสอบยังคงใช้ระบบคนนับ (Manual) ทำให้เกิดความผิดพลาดในการบริหารจัดการ และส่งผลต่อคุณภาพของถ่านหินที่จะใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า

ดังนั้นงานวิจัยนี้ต้องการแก้ปัญหาด้านการจัดการโลจิสติกส์ ของรถขนถ่านหินลิกไนต์ในเหมืองการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแม่เมาะ โดยการประยุกต์ใช้ระบบ RFID และ IoT ผ่านระบบ Cloud Computing เพื่อการจัดการโลจิสติกส์ และการตรวจสอบจำนวนเที่ยวรถขนถ่านหินลิกไนต์ในแต่ละวัน และสามารถดูข้อมูลผ่านคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์โทรศัพท์มือถือแบบ real-time

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

2.1 เพื่อพัฒนาระบบ Auto ID โดยการประยุกต์ใช้ระบบ RFID และ IoT ผ่านระบบ Cloud computing ในการจัดการโลจิสติกส์เพื่อการตรวจสอบจำนวนเที่ยวรถขนถ่านหินลิกไนต์ในเหมืองการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแม่เมาะแทนการตรวจสอบโดยการนับด้วยคน

2.2 เพื่อพัฒนาระบบ Auto ID ที่สามารถแสดงข้อมูลจำนวนรถเที่ยวขนถ่านหินลิกไนต์ผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตบนคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์มือถือ

2.3 เพื่อประเมินผลความสามารถของระบบ RFID และ IoT ผ่านระบบ Cloud Computing ที่ได้พัฒนาโดยเปรียบเทียบกับ การตรวจสอบจำนวนเที่ยวรถขนถ่านหินลิกไนต์ในเหมืองการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแม่เมาะโดยการนับด้วยคน และลดความผิดพลาดในการนับ

3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 ทบทวนเอกสาร

RFID ย่อมาจาก Radio Frequency Identification เป็นเทคโนโลยีการระบุข้อมูลที่แสดงเอกลักษณ์ของวัตถุหรือบุคคล ด้วยคลื่นความถี่วิทยุเพื่อวัตถุประสงค์นำไปใช้ในการบ่งชี้วัตถุในระดับใกล้เคียง โดยมีจุดเด่นคือสามารถอ่านข้อมูลจากป้าย (Tag) ได้หลาย ๆ ป้าย แบบไร้สัมผัส และสามารถอ่านค่าได้แม้อยู่ในสภาพที่ทัศนวิสัยไม่ดี ทนต่อความเปียกชื้นแรงสั่นสะเทือนการกระแทก และสามารถอ่านข้อมูลด้วยความเร็วสูง (Kowintaweewat, P., et al., 2009) ดังนั้นจึงเลือกใช้ระบบ RFID มาพัฒนาเพื่อนำไปใช้ในงานวิจัยนี้ ในการบันทึกเวลาเข้าออกของรถขนถ่านหินลิกไนต์ และตรวจสอบว่ารถขนถ่านหินมาจากบ่อพักถ่านหินใด

IoT ย่อมาจาก Internet of Things ในชื่อไทยว่า อินเทอร์เน็ตกับสรรพสิ่งใด ๆ Poomrittigul, S., & Tuwanut, P. (2016) ได้สรุปคุณลักษณะสำคัญของ IoT คือ เป็นการเชื่อมต่อกันระหว่างสรรพสิ่งใด ๆ เข้ากับโครงข่ายอินเทอร์เน็ต หรือถ้ากล่าวโดยง่าย ๆ IoT คือ การทำอุปกรณ์ใด ๆ หรือ สรรพสิ่งใด ๆ ให้ฉลาดขึ้น โดยการใส่สมองกลให้กับอุปกรณ์แล้วให้สรรพสิ่งนั้น ๆ สามารถสื่อสาร ควบคุม หรือรายงานผลซึ่งกันและกันได้ผ่านอินเทอร์เน็ต และในการพัฒนาการสื่อสารข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ใด ๆ นั้น จำเป็นจะต้องใช้โปรโตคอลในการสื่อสารโดยเฉพาะในการพัฒนา IoT ในปัจจุบันมีโปรโตคอลที่ได้รับความนิยมอยู่สองชนิดคือ CoAP Protocol และ MQTT Protocol โดยในงานวิจัยนี้จะใช้ MQTT Protocol

Cloud Computing คือวิธีการประมวลผลที่อิงกับความต้องการของผู้ใช้ โดยผู้ใช้สามารถระบุความต้องการไปยังซอฟต์แวร์ของระบบ Cloud Computing จากนั้นซอฟต์แวร์จะร้องขอให้ระบบจัดสรรทรัพยากรและบริการให้ตรงกับความต้องการของผู้ใช้ ทั้งนี้ระบบสามารถเพิ่ม และลดจำนวนของทรัพยากรรวมถึงเสนอบริการให้พอเหมาะกับความต้องการ ของผู้ใช้ได้ตลอดเวลาโดยที่ผู้ใช้ไม่จำเป็นต้องทราบเลยว่าการทำงานหรือเหตุการณ์เบื้องหลังเป็นอย่างไร ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ระบบ Private Cloud ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต ในส่วนทรัพยากรและการบริการต่าง ๆ เพื่อนำข้อมูลไปเก็บและประมวลผล และสามารถดูข้อมูลรถขนถ่านหินลิกไนต์ผ่าน Web Browser ได้

3.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Fang and Shaowu (2013) ได้วิจัยเกี่ยวกับการนำเทคโนโลยีของ Internets of things มาประยุกต์ใช้สำหรับการดูแลผู้ป่วยที่พักรักษาตัวอยู่ที่บ้าน รูปแบบการประยุกต์ใช้งานนั้น มีการใช้เครื่องรับรู้ต่าง ๆ ที่จำเป็นในการวัดสัญญาณชีพและส่งข้อมูลดังกล่าวผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตมายังโรงพยาบาล เพื่อให้พยาบาล และแพทย์ได้ดูข้อมูล และแนะนำขั้นตอนการปฏิบัติ โดยในงานวิจัยดังกล่าวจะมุ่งเน้นไปที่การใช้เทคโนโลยีสารสนเทศในการเฝ้าสังเกตผู้ป่วยแบบ Real Time และกล่าวถึงระบบความปลอดภัยโดยใช้ RFID ในการแยกแยะประเภทของยาที่ให้ผู้ป่วย งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การนำข้อมูลเกี่ยวกับสุขภาพต่าง ๆ ที่ได้จากอุปกรณ์เครื่องมือวัดจากผู้ป่วยหรือผู้สูงอายุ นำไปเก็บไว้บนกลุ่มเมฆ (Cloud) เพื่อให้สามารถเข้าถึงข้อมูลต่าง ๆ บริหารจัดการข้อมูลต่าง ๆ ได้ง่ายขึ้นและมีค่าใช้จ่ายที่ถูกลง

Zhikui et al. (2011) พัฒนาและประยุกต์ใช้ IoT เพื่อการเตือนภัยพิบัติทางธรรมชาติ โดยเฉพาะแผ่นดินไหว โดยการเก็บข้อมูลแบบ Real Time และทำการทำนายความเสียหายทาง

เศรษฐกิจ โดยใช้ข้อมูลจากระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) และคาดการณ์ประเมินความเสียหายจากแผ่นดินไหว นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังพัฒนาระบบที่ปรับปรุงความสามารถในการตอบสนองต่อเหตุการณ์แผ่นดินไหว และให้ข้อมูลในการสั่งการช่วยเหลือฉุกเฉินและต่อมา Junbo et al. (2012) นำเอาหลักการของ IoT มาใช้ในการประหยัดพลังงาน อุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ภายในบ้าน โดยเมื่อเกิดแผ่นดินไหวอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ จะถูกบังคับปิดลงอัตโนมัติเพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายต่อผู้พักอาศัยอีกด้วย

3.3 วิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้วิธีวิจัยได้ทำตามขั้นตอน Waterfall Model 5 ขั้นตอน Requirement and Feasibility study, System analysis and design, implementation, testing, and maintaining และแต่ละขั้นตอนสามารถตรวจสอบย้อนกลับได้ตามคำแนะนำของ Atsawamaykin, N. (2015) และตามเงื่อนไขของมาตรฐานการทำงานของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแม่เมาะในระดับ Industrial Standard และง่ายต่อการติดตั้งการใช้งานและบำรุงรักษา

1) Requirement and Feasibility study

การศึกษาความเป็นไปได้ของระบบเปรียบเทียบกับความต้องการของผู้ใช้ โดยเงื่อนไขงานวิจัยขั้นนี้คือต้องการระบบ Auto ID ที่จะมาตรวจสอบระบบการจัดการโลจิสติกส์รถขนถ่านหินลิคไนต์ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต แม่เมาะ โดยงานวิจัยนี้ เลือกระบบ RFID ร่วมกับ passive RFID tag ย่านความถี่ UHF โดยข้อดีของ RFID ย่านความถี่สูงคือ ความเร็วในการอ่านข้อมูล และระยะการอ่านที่มาก (Kowintaweewat, P., et al., 2009) และเงื่อนไขของเครื่อง RFID reader ต้องเป็นไปตามข้อบังคับของ กสทช. คือ กำหนดความถี่ใช้งาน ของ RFID ที่ 920 – 925 MHz และกำลังส่งสูงสุด 0.5 W ได้รับยกเว้นใบอนุญาตวิทยุคมนาคม และ กำลังส่งสูงสุด 4 W ต้องได้รับใบอนุญาตวิทยุคมนาคมที่เกี่ยวข้อง (NBTC, 2016) โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ประกอบไปด้วย hardware, software และ protocol ที่ใช้

ตารางที่ 1 อุปกรณ์ Hardware และหน้าที่การทำงานที่ใช้ในงานวิจัย

Hardware	หน้าที่
RFID reader รุ่น Speedway Revolution ยี่ห้อ Impinj ย่านความถี่ UHF ระยะไกล	อ่านและประมวลผลข้อมูลจาก RFID UHF tag
สายอากาศแบบบังคับทิศทาง ที่เชื่อมต่อกับ RFID reader	รับข้อมูลจาก RFID UHF tag
RFID UHF tag (passive tag) ความถี่ 920 MHz	Auto ID
Arduino Mega 2560 + Ethernet Shield บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ที่มีการพัฒนาแบบ Open Source	ส่งข้อมูลจาก RFID reader ที่อ่านจาก RFID tag ขึ้น Cloud

ตารางที่ 2 software และหน้าที่การทำงานที่ใช้ในงานวิจัย

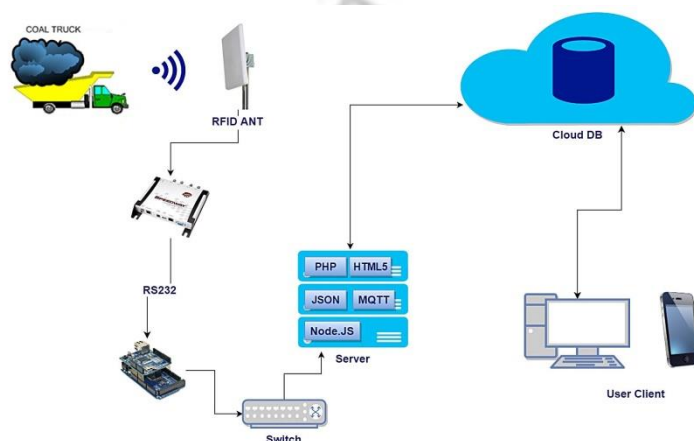
Software	หน้าที่
PHP	ดึงข้อมูลจาก database แสดงบน Browser
MariaDB	เป็น database
JSON (JavaScript Object Notation)	JavaScript ทำหน้าที่บริหารจัดการฟอร์มแม่ตที่ใช้ในการรับส่งข้อมูล
Node.js	เป็น JavaScript ในฝั่ง server ที่ใช้ในการจัดการข้อมูลจัดเก็บใน database

ตารางที่ 3 : โพรโตคอลและหน้าที่การทำงานที่ใช้ในงานวิจัย

Protocol	หน้าที่
MQTT 3.1.1	เป็น protocol ในการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์

2) Analysis and Design

ในการวิจัยนี้ได้แบ่งสถาปัตยกรรมระบบการจัดการโลจิสติกส์ ของรถขนถ่านหิน ลิกไนต์ในเหมืองการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแม่เมาะ โดยการประยุกต์ใช้ระบบ RFID และ IoT ผ่านระบบ cloud computing เป็น 3 layers (Somhum, S., 2016) แนะนำว่าระบบ IoT ควรมีสถาปัตยกรรม เป็น 3 layers คือ Hardware, Communication และ Software ซึ่งในงานวิจัยนี้ ใน layer cloud ก็คือ communication เนื่องจากกล่าวถึงการใช้ protocol ในการสื่อสารระหว่าง RFID reader (sensor) กับ server โดยในฝั่ง Layer Hardware จะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ เป็นหลัก ในงานวิจัยใช้อุปกรณ์ RFID reader, Arudino, UHF RFID tag ส่วน Layer Cloud จะประกอบไปด้วย Software เป็น Script JSON และ Node JS และฐานข้อมูลเป็น MariaDB และโพรโตคอลที่ใช้ในการสื่อสาร คือ MQTT ส่วนใน layer Application ฝั่ง Server คือ PHP และ HTML5



ภาพที่ 1 ภาพรวมของระบบการจัดการ logistic ของรถขนถ่านหินลิกไนต์ในเหมืองการไฟฟ้า โดยการประยุกต์ใช้ระบบ RFID และ IoT ผ่านระบบ cloud

ลักษณะข้อมูลมาจากเครื่องอ่าน RFID จะระบุวันเวลาที่อ่าน Antenna และหมายเลข RFID tag ที่อ่าน 2015-09-16 06:22:58,SN:370-14-39-0351, Ant:1, EPC: 300833B2DDD 9091500XX ,RSSI:-39 (EPC คือ หมายเลข electronic product code) และงานวิจัยนี้ได้ใช้ JSON และ MQTT protocol มาจัดมาตรฐานข้อมูลส่งผ่านระบบ Private Cloud ของการไฟฟ้าโดยการตัดตัวอักษรที่ไม่ต้องการออก โดยใช้ฟังก์ชัน Replace, ทำการตัดข้อความที่ต้องการข้อความถูกค้นด้วยเครื่องหมาย, เก็บไว้ใน Array, นำเอาข้อความที่ต้องการใน Array มาทำให้เป็น ข้อความรูปแบบ JSON

```
BEGIN
```

```
GET RFID_String
```

```
Remove "SN:" , "Ant:","EPC:","RSSI:" From RFID_String
```

```
Data[ ] ← Split RFID_String By "," delimiter
```

```
JSON_Data ← {"CLIENT_D_T":"Data[n]" ,
```

```
"SN": "Data[n+1]",
```

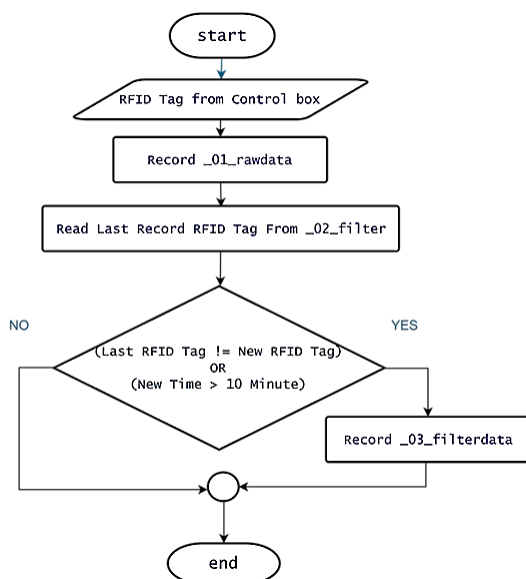
```
"ANT":"Data[n+2]",
```

```
"EPC":"Data[n+3]",
```

```
"RSSI": "Data[n+4]}"
```

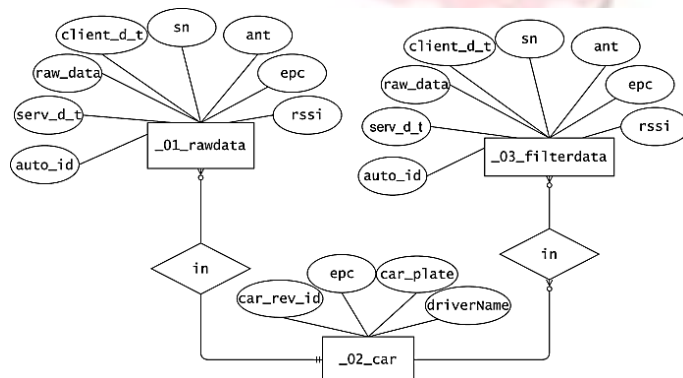
```
END
```

และข้อมูลจาก RFID reader ส่งผ่าน cloud Node.JS จะใช้จัดการกับข้อมูลเพื่อจัดเก็บข้อมูลลง Database โดยงานวิจัยนี้ใช้ MariaDB ในการพัฒนาฐานข้อมูล โดยข้อมูลจะจัดเก็บลงตารางข้อมูลจำนวน 3 ตาราง โดยตารางแรก 01_rawdata จะจัดเก็บทุกค่าที่ส่งผ่านระบบ Cloud มาและตารางที่ 2 PHP ทำการ mapping RFID tag กับหมายเลขรถ ส่วนตารางที่ 3 ทำการตรวจสอบในกรณีรถชนถ้านินจอตนานเกิน 10 นาทีหรือไม่ เป็นการ filtering ข้อมูลก่อนที่จะทำการบันทึกค่าลงตาราง 03_filterdata และกรณีถ้าเกิน 10 นาที ก็จะมีการบันทึกซ้ำ



ภาพที่ 2 การ filtering ข้อมูลก่อนจัดเก็บลง database โดยใช้เวลาเงื่อนไข

ฐานข้อมูลเชิงสัมพันธ์ในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย 3 ตาราง คือ 01_rawdata ใช้ในการเก็บข้อมูลจาก RFID reader และ ฐานข้อมูลที่ 2 คือ 02_car ใช้การ mapping กับหมายเลขรถชน ถ่านหินลิกไนต์ และตารางที่ 3 ใช้ในการกรอง (filtering) ข้อมูลรถชนถ่านหินลิกไนต์ โดยแต่ละตารางประกอบด้วยข้อมูล เช่น auto_id คือหมายเลขที่กำหนดแบบอัตโนมัติ, client_d_t คือ เวลาที่รถเข้ามาในตำแหน่งเครื่องบดถ่านหินลิกไนต์, epc คือหมายเลข RFID tag ที่อ่านได้ เป็นต้น



ภาพที่ 3 ฐานข้อมูลระบบการจัดการโลจิสติกส์ รถชนถ่านหินลิกไนต์

โดย Node.js ในฝั่ง server มีการเรียกใช้ library MQTT และทำการเชื่อมต่อไปยัง Server MQTT Broker (private cloud ของการไฟฟ้า) แล้วทำการเชื่อมต่อไปยัง Database ชื่อ rf_id และ MQTT client Subscribe ไปยัง Topic ชื่อ "th.co.egat.meamoh.rfid.bigtruck" ในกรณี MQTT client ได้รับ message จากการ MQTT Broker จะนำ message มาทำการแปลงให้อยู่ในรูปของ JSON Object แล้วนำมาสร้างเป็นคำสั่ง SQL Insert เพื่อบันทึกลงสู่ Maria Database ต่อไป และมีการตรวจสอบค่า EPC (หมายเลข RFID tag) ไม่ซ้ำกับค่าบันทึกก่อนหน้านี้ หรือต้องมีระยะเกิน 10 นาทีถึงจะบันทึกข้อมูล

การดำเนินการ (Implement)

ติดตั้งเครื่องอ่าน RFID และสายอากาศพร้อมด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ หน้าเครื่องบดถ่านหิน ลิกไนต์ที่ 3 ทำการติดตั้ง Software ทั้งในส่วน IoT และ Cloud และทำการติดตั้ง RFID tag แบบ Passive กับรถขนถ่านหินลิกไนต์ในเหมืองการไฟฟ้าฝ่ายผลิตและรถบริษัทเอกชนคู่สัญญา จำนวน 27 คัน



ภาพที่ 4 การติดตั้ง RFID reader ที่เครื่องบดถ่านหินลิกไนต์ที่ 3

การทดสอบ (Testing)

ระบบ RFID และ IoT ผ่านระบบ cloud เพื่อการจัดการ logistic ของรถขนถ่านหินลิกไนต์ ในเหมืองการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแม่เมาะ ได้ทำการทดสอบความเสถียรของระบบและความถูกต้องของข้อมูล เป็นเวลา 1 เดือน โดยการเปรียบเทียบข้อมูลจากระบบ RFID และระบบ manual และจากกล้องวงจรปิด ตำแหน่งหน้าเครื่องบดถ่านหินลิกไนต์ เป็นการตรวจสอบแบบ Triple Check โดยจะแสดงข้อมูลลำดับ ของรถขนถ่านหินที่เข้ามาที่เครื่องบดถ่านหินลิกไนต์ เวลากลางของระบบ Private Cloud ของการไฟฟ้า เวลาของเครื่อง RFID reader หมายเลขเครื่อง reader หมายเลข RFID tag และสุดท้ายหมายเลขรถขน ถ่านหินลิกไนต์

การบำรุงรักษา (Maintaining)

การบำรุงรักษาทุก ๆ เดือนจะมีทำความสะอาดอุปกรณ์ต่าง ๆ โดยการเป่าฝุ่น และมีการตรวจสอบการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น ตรวจสอบการทำงานของอุปกรณ์สำรองไฟ การทดสอบการสำรองข้อมูลใน SD card ในส่วนของ network ได้มีการ ping อุปกรณ์ เครื่องอ่าน RFID, Arduino Mega 2560 + Ethernet Shield บอร์ด กับ Private Cloud ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต แม่เมาะ

4. ผลการวิจัย

จากงานวิจัยนี้ ระบบ RFID และ IoT ที่พัฒนาขึ้นสามารถอ่านค่าและนับจำนวนรถขนถ่าน หินลิกไนต์ได้ถูกต้องและข้อมูลสามารถส่งขึ้นระบบ Cloud และดูข้อมูลผ่านคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์ โทรศัพท์มือถือได้ โดยในตารางการแสดงผลข้อมูลประกอบไปด้วย เวลากลางของระบบ Private Cloud ของการไฟฟ้าเวลาของเครื่อง RFID reader หมายเลขเครื่อง reader หมายเลข RFID tag และ สุดท้าย หมายเลขรถขนถ่านหิน

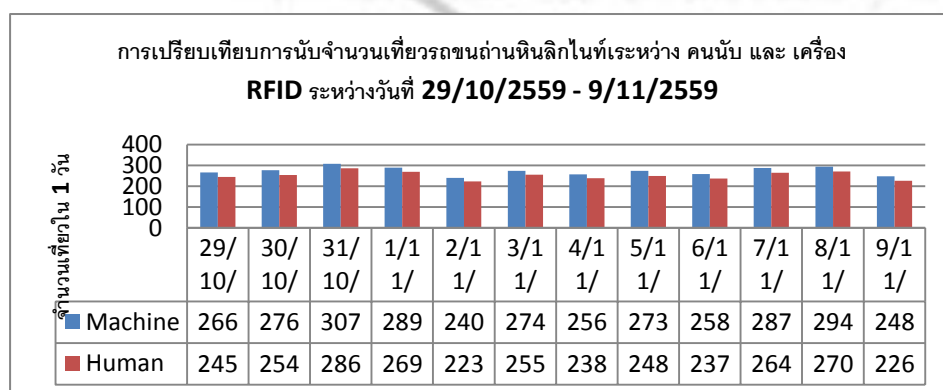
ลำดับ	เวลา เม้า่าน	เวลา Reader	หมายเลข Reader	EPC	หมายเลขรถ
3147	2015-10-30 01:23:34	2015-10-30 01:18:24	370-14-39-0351	90083382DD909150005	62-0108
3146	2015-10-30 01:21:32	2015-10-30 01:16:22	370-14-39-0351	90083382DD909150005	62-0108
3145	2015-10-30 01:19:01	2015-10-30 01:13:50	370-14-39-0351	90083382DD909150013	62-0116
3144	2015-10-30 01:16:44	2015-10-30 01:11:34	370-14-39-0351	90083382DD909150014	62-0117
3143	2015-10-30 01:03:16	2015-10-30 00:58:06	370-14-39-0351	90083382DD909150005	62-0108
3120	2015-10-29 22:42:21	2015-10-29 22:37:11	370-14-39-0351	90083382DD909150002	62-0105
3119	2015-10-29 22:41:38	2015-10-29 22:36:28	370-14-39-0351	90083382DD909150006	62-0109
3118	2015-10-29 22:40:45	2015-10-29 22:35:36	370-14-39-0351	90083382DD909150006	62-0109
3117	2015-10-29 22:39:37	2015-10-29 22:34:28	370-14-39-0351	90083382DD909150002	62-0105
3116	2015-10-29 22:26:13	2015-10-29 22:21:03	370-14-39-0351	90083382DD909150002	62-0105
3115	2015-10-29 22:25:22	2015-10-29 22:20:13	370-14-39-0351	90083382DD909150005	62-0108
3114	2015-10-29 22:24:31	2015-10-29 22:19:20	370-14-39-0351	90083382DD909150005	62-0108
3113	2015-10-29 22:20:41	2015-10-29 22:15:31	370-14-39-0351	90083382DD909150013	62-0116
3112	2015-10-29 22:19:53	2015-10-29 22:14:43	370-14-39-0351	90083382DD909150013	62-0116
3111	2015-10-29 22:19:22	2015-10-29 22:08:13	370-14-39-0351	90083382DD909150002	62-0105
3110	2015-10-29 22:10:53	2015-10-29 22:05:43	370-14-39-0351	90083382DD909150002	62-0105
3109	2015-10-29 22:06:57	2015-10-29 22:01:48	370-14-39-0351	90083382DD909150005	62-0108
3108	2015-10-29 22:05:09	2015-10-29 22:00:00	370-14-39-0351	90083382DD909150013	62-0116

ภาพที่ 5 ข้อมูลของระบบการจัดการโลจิสติกส์ รถขนถ่านหินลิกไนต์

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

5.1 ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้แสดงการเปรียบเทียบการนับจำนวนเที่ยวรถขนถ่านหินลิกไนต์ระหว่างคนนับและเครื่อง RFID ระหว่างวันที่ 29/10/2559 ถึง 9/11/2559 เพื่อเปรียบเทียบความผิดพลาดที่เกิดจากการนับโดยคนนับ (ภาพที่ 6) โดยใน 1 ชั่วโมงจะมีรถขนถ่านหินลิกไนต์จากบ่อขุดไปที่เครื่องบดที่ 3 ประมาณ 30 ถึง 40 เที่ยวและภายใน 1 วัน (3 กะการทำงาน 24 ชั่วโมง) พบว่าค่าที่อ่านได้จาก RFID ประมาณ 240 - 300 เที่ยว ในส่วนการจดค่าด้วยคนนับจะอยู่ที่ 220 - 280 เที่ยว เมื่อนำมาเปรียบเทียบพบว่าจะมีความผิดพลาดอยู่ ประมาณร้อยละ 10 (เช่น ลืมจด หรือ จดผิดพลาด) ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าระบบบูรณาการ RFID, IoT และ Cloud Computing นี้มีความน่าเชื่อถือและสามารถนำมาใช้แทนระบบแบบคนนับได้



ภาพที่ 6 การเปรียบเทียบการนับจำนวนเที่ยวรถขนถ่านหินลิกไนต์ระหว่างคนนับและเครื่อง RFID

5.2 ปัญหาและอุปสรรคในการทำวิจัย

เนื่องจากกระบวนการทำงานในเหมืองถ่านหินลิกไนต์ รถขนถ่านหินจะทำงาน 24 ชั่วโมง โดยแบ่งเป็น 3 กะ/กะละ 8 ชั่วโมง ดังนั้นในการจะติดตั้ง RFID tag จะสามารถทำได้ตอนเวลาพัก

เท่านั้นและการทดสอบการอ่าน RFID tag จะทำการทดสอบได้ตอนที่รถเริ่มทำงานเท่านั้น และการเข้าไปติดตั้งต้องมีการประสานงานหลายภาคส่วน เนื่องจากเป็นระเบียบปฏิบัติในการรักษาความปลอดภัย

5.3 งานวิจัยต่อยอด

งานวิจัยต่อยอดด้านระบบ คือจะมีการพัฒนาติดตั้ง RFID reader อีก 3 จุด คือที่บดถ่านหิน ลิกไนต์ที่ 1 และ 2 และตำแหน่งที่ซึ่งน้ำหนักและจะมีการเชื่อมต่อบริการซึ่งน้ำหนักให้ส่งข้อมูล และประมวลผลผ่านระบบ cloud และในส่วนการเพิ่มการตรวจสอบสถานการณ์แท่นหินลิกไนต์ ของรถขนถ่านหิน ที่ตรงหน้าเครื่องบดถ่านหินลิกไนต์ เนื่องจากระบบที่พัฒนาในงานวิจัยนี้ ตรวจสอบแค่การเข้ามาของรถขนถ่านหินลิกไนต์ เนื่องจากมีรถขนถ่านหินลิกไนต์ไม่สามารถเทถ่านหิน ได้สาเหตุเช่น การขนถ่านหินผิดบ่อ หรือ เครื่องบดถ่านหินขัดข้อง โดยโจทย์วิจัยต่อไป คือการตรวจสอบ สถานะการเทถ่านหิน ที่หน้าเครื่องบดถ่านหิน โดยข้อมูลต้องมีความสัมพันธ์กันระหว่างผู้ควบคุม เครื่องบดถ่านหิน และ ระบบ RFID ในงานวิจัยนี้

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ต้องขอขอบคุณ ธนัน รังสีพรหม ผู้บริหารโครงการของบริษัท I Generation Company Limited ที่สนับสนุนอุปกรณ์ในการวิจัย และขอขอบคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยที่เป็นผู้ให้ทุนวิจัย และขอขอบคุณ พนักงานการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยที่อำนวยความสะดวกในการทำงาน

7. เอกสารอ้างอิง

- NBTC. (2016). **Technical standards of telecommunications equipment and tools**. Retrieved September 18, 2016, from <http://standard.nbt.go.th/index.php/2012-10-25-06-22-49> (in Thai).
- Atsawamaykin, N. (2015). **Basic principle of software engineering**. Se-Ed Public Company Limited. (in Thai).
- Kowintaweewat, P., Chunta, W., Weeroad, K., Dinsakhun, H. (2009). **Radio Frequency Identification (RFID) System**. National Science and Technology Publishing House. (in Thai).
- Somhum, S. (2016). Perspective of Internet of Things (IoT) and Application. **Science CMU. 22(3)**, 2-6. (in Thai).
- Poomrittigul, S., & Tuwanut, P. (2016). Internet of Things for Human Healthcare Services and Data Analytics with Hadoop. **Pathumwan Academic Journal**, 6(15), 61-72 (in Thai).
- Fang H.D.X. and Shaowu S. (2013). On the Application of the Internet of Things in the Field of Medical and Health Care,” **Green Computing and Communications (GreenCom), IEEE and Internet of Things (iThings/CPSCoM)**,

IEEE International Conference on and IEEE Cyber, Physical and Social Computing. 2053-2058.

- Junbo W., Cheng Z.L.Y. and Ozawa Y. (2012) A location-aware lifestyle improvement system to save energy in smart home, **4th International Conference on Awareness Science and Technology (iCAST)**. 109-114.
- Zhikui C., Zhenyu L.Y.L. and Jing L. (2011) Quasi Real-Time Evaluation System for Seismic Disaster Based on Internet of Things,” Internet of Things (iThings/CPSCoM), **International Conference on and 4th International Conference on Cyber, Physical and Social Computing**, pp. 520 – 524, 19-22 Oct. 2011.

Industrial Technology
มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง