การวิจัยและพัฒนาหัวเผาก๊าซชีวภาพและเตาเผาอุณหภูมิสูงที่ใช้เชื้อเพลิงชีวภาพ สำหรับการผลิตเซรามิกส์ของวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อมบ้านบางระจัน จังหวัดสิงห์บุรี

The research and development of gasifier burner and high temperature biofuel kiln for ceramics produce of small and medium enterprises, Bang Rachan, Singburi province

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ฤดี นิยมรัตน์
คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา
Assistant Professor Dr. Ruedee Niyomrath
Faculty of Industrial Technology, Suan Sunandha Rajabhat University

บทคัดย่อ

การวิจัยเรื่องการวิจัยและพัฒนาหัวเผาก๊าซชีวภาพและเตาเผาอุณหภูมิสูงที่ใช้เชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับการผลิตเซรามิกส์ของวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม บ้านบางระจัน จังหวัดสิงห์บุรี มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างหัวเผาก๊าซชีวภาพและเตาเผาอุณหภูมิสูงที่ใช้เชื้อเพลิงชีวภาพ และเพื่อศึกษาประสิทธิภาพหัวเผาก๊าซชีวภาพและเตาเผาอุณหภูมิสูงที่ใช้เชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับการผลิตเซรามิกส์ของวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อมบ้านบางระจัน จังหวัดสิงห์บุรี

ผลการศึกษาพบว่า

1. หัวเผาก๊าซชีวภาพแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือส่วนหัวเผาก๊าซชีวภาพที่ประกอบด้วยถังเผาและหัวเผาก๊าซชีวภาพ และส่วนแท่งชีวมวลที่ได้จากการอัดใบไม้แห้งสนิทหนัก 3 กิโลกรัม และขี้เลื่อยหนัก 5 กิโลกรัม ใส่สลับชั้นกัน

2. เตาเผาอุณหภูมิสูงที่ใช้เชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับการผลิตเซรามิกส์ เป็นเตาเผาแบบกึ่งต่อเนื่องชนิดทางเดินลมร้อนลง มีขนาดความจุ 1 ลูกบาศก์เมตร ที่มีรถเตาใช้เพื่อการบรรจุผลิตภัณฑ์ ใช้โครงเหล็กบุผนังด้วยเซรามิกส์ไฟเบอร์ ยกเว้นส่วนพื้นเตาปูด้วยอิฐฉนวนทนไฟชนิดเบา มีช่องสำหรับบรรจุหัวเผาก๊าซชีวภาพจำนวน 8 ช่อง

3. ประสิทธิภาพหัวเผาก๊าซชีวภาพและเตาเผาอุณหภูมิสูงที่ใช้เชื้อเพลิงชีวภาพ ด้านปัจจัยนำเข้าสู่กระบวนการเผา พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพได้แก่ไหสี่หู ในการเผาที่ 900 องศาเซลเซียส ใช้แท่งชีวมวล 15 แท่ง โดยใช้หัวเผาก๊าซชีวภาพจำนวน 5 หัว ส่วนการเผาที่ 1,230 องศาเซลเซียส ใช้แท่งชีวมวล 48 แท่ง โดยใช้หัวเผาก๊าซชีวภาพจำนวน 8 หัว

ผลการศึกษาประสิทธิภาพด้านกระบวนการเผาพบว่า ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสใช้เชื้อเพลิงแข็งที่อยู่ในรูปชีวมวล 120 กิโลกรัม ใช้เวลาในการเผา 4 ชั่วโมง ส่วนที่อุณหภูมิ 1,230 องศาเซลเซียสใช้เชื้อเพลิงแข็งที่อยู่ในรูปชีวมวล 384 กิโลกรัม ใช้เวลาในการเผา 6 ชั่วโมง 30 นาที การกระจายของระดับอุณหภูมิทั้งเตาอยู่ในระดับเท่ากัน และเตาเผาสามารถใช้งานได้ถึงอุณหภูมิ 1,250 องศาเซลเซียส (โคนหมายเลข 7) ใช้เวลาในการเผานาน 6 ชั่วโมง 30 นาที ใช้แท่งชีวมวลทั้งหมดจำนวน 48 แท่ง

ผลการศึกษาประสิทธิภาพด้านผลผลิตจากกระบวนการเผา พบว่าผลิตภัณฑ์หลังการเผาทั้งสองระดับอุณหภูมิไม่แตกและไม่ร้าว ยังคงสภาพสมบูรณ์ และประสิทธิภาพด้านผลลัพธ์ของกระบวนการ พบว่าผู้ผลิตไม่พบปัญหาด้านการใช้งานเตาเผาและการเผาผลิตภัณฑ์ ปัญหาของการใช้งานมาจากการเตรียมแท่งชีวมวลให้พร้อมสำหรับการใช้งานการเผาที่ต้องใช้เวลานานในการจัดเตรียม

ข้อเสนอแนะ

1. การสร้างแท่งชีวมวลเพื่อใช้งานสามารถใช้ชีวมวลแข็งชนิดอื่นๆ ทดแทนได้ แต่ทั้งนี้ชีวมวลที่นำมาใช้งานต้องแห้งสนิท รวมทั้งการใช้งานการผลิตจริงสามารถทดลองปรับเปลี่ยนรูปแบบ ปริมาณผลิตภัณฑ์ รวมทั้งการจัดเรียง เวลาและวิธีการเผาให้สอดคล้องกับลักษณะและกำลังการผลิตได้

2. ควรทดสอบประสิทธิภาพการเผาเพื่อค้นหาข้อสรุปที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานเตาเผาเพื่อการผลิตผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกัน รวมทั้งการพัฒนาแนวทางและอุปกรณ์เพื่อนำความร้อนจากการเผามาใช้งานตามความเหมาะสม

คำสำคัญ

หัวเผาก๊าซชีวภาพ, เตาเผาอุณหภูมิสูง, เซรามิกส์, เชื้อเพลิงชีวภาพ, วิสาหกิจชุมชนขนาดกลางและขนาดย่อม

ABSTRACT

Research on The research and development of gasifier burner and high temperature biofuel kiln for ceramics produce of small and medium enterprises, Bang Rachan, Singburi province aimed to design and build gasifier burner and high temperature biofuel kiln, and to study the efficiency of gasifier burner and high temperature biofuel kiln for ceramics produce of small and medium enterprises, Bang Rachan, Singburi

The research found:

1. Gasifier burner is divided into 2 parts: gasifier burner which consists of burn bin and biogas burner, and the biomass briquet is compressed between 3 kilograms of dry leaves and 5 kilograms of sawdust.

2. High temperature biofuel kiln for ceramics produce is a semi continuous kiln type down draft kiln with a capacity of 1 cubic meter, and with kiln car used to pack the product into burning. The kiln use a steel frame and wall with ceramic fiber, except the burner floor use the insulated brick, and there are 8 channels for gasifier burner.

3. The efficiency of gasifier burner and high temperature biofuel kiln in aspect of input factors: It was found that the product used in the performance test was a four-

pronged jar. Firing at 900 degrees Celsius using 15 biomass briquettes by 5 gasifier burners, firing at 1,230 degrees Celsius using 48 biomass briquettes by 8 gasifier burners.

The results of the efficiency in aspect of process showed that, at a temperature of 900 degrees Celsius using 120 kilograms of solid biomass takes 4 hours to fire. At the temperature of 1,230 degrees Celsius, the solid biomass used is 384 kilograms, it takes 6 hours 30 minutes to fire.

The distribution of temperature throughout the kiln is the same. The kiln can operate up to 1,250 degree Celsius (cone number 7), take the time to fire for 6 hours 30 minutes, and use all 48 biomass briquettes

The results of the efficiency in aspect of output showed that, the fired product at both temperatures were not crack and still in perfect products. The results of the efficiency in aspect of outcome was found that the manufacturers did not find problems to kiln operation and firing. The problem came from the preparation of biomass briquettes take a long time.

Research suggestion:

1. Biomass briquettes can be replace from other biomass, but the biomass used must be completely dry. As well as production can be experimentally the product type and volume, sorting products in kilns, time and method to burn to be consistent with the production conditions and capacity.

2. It is important to test the efficiency of the kiln in order to find the appropriate conclusions for the different products. Including the development of guidelines and equipment to bring the heat from the combustion to use as appropriate.

Keywords

gasifier burner, high temperature kiln, ceramics, biofuel, small and medium enterprises

บทนำ

ประเทศไทยมีความต้องการใช้พลังงานกว่า 1.12 ล้าน ล้านบาทต่อปี จึงเป็นประเทศหนึ่งที่ต้องเผชิญกับวิกฤติการณ์ด้านพลังงาน รวมทั้งประเทศไทยไม่มีแหล่งพลังงานเพียงพอต่อความต้องการ จึงต้องพึ่งพาการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศคิดเป็นมูลค่ากว่า 900,000 ล้านบาทต่อปี คิดเป็นค่าใช้จ่ายด้านพลังงานกว่าร้อยละ 14 ของผลิตภัณฑ์มวลรวมของประเทศ โดยพลังงานที่นำเข้าจากต่างประเทศกว่าร้อยละ 50 เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับใช้ในภาคขนส่ง ส่วนอีกร้อยละ 50 เป็นก๊าซธรรมชาติและถ่านหินสำหรับการ

ผลิตไฟฟ้าในภาคอุตสาหกรรม ภาคธุรกิจและครัวเรือน จึงนับเป็นภาระจำนวนมหาศาลที่ประเทศต้องเสียเงินตราและขาดดุลบัญชีเดินสะพัดอย่างต่อเนื่อง

เพื่อการขับเคลื่อนเศรษฐกิจให้ทันต่อสภาวะการแข่งขันของโลก จึงจำเป็นต้องใช้พลังงานในหลายรูปแบบที่เป็นพลังงานทางเลือกอื่นเข้ามารองรับให้เพียงพอ มีการใช้พลังงานให้เกิดประโยชน์และมีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งการอนุรักษ์พลังงานหรือการประหยัดพลังงานในอุตสาหกรรมมีหลายระดับ ตั้งแต่วิธีการที่ไม่ต้องลงทุน (house keeping) เป็นการปิดรูรั่วด้านพลังงานอย่างง่าย เช่น การลดเวลาการทำงานของอุปกรณ์ใช้พลังงาน หรือมีการลงทุนน้อย (low to medium investment) ได้แก่การปรับปรุงอุปกรณ์ที่มีอยู่ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น เช่น การติดม่านกันความร้อน การติดตั้งสวิตช์แยกสำหรับระบบแสงสว่าง เป็นต้น และต้องมีการลงทุนสูง (high investment) ที่ต้องเปลี่ยนอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตหรือเปลี่ยนผังการผลิตของอุตสาหกรรม แต่มีผลในการอนุรักษ์พลังงานได้สูง เช่นการสร้างเตาเผาเซรามิกส์ใหม่เพื่อให้มีการสูญเสียความร้อนน้อยที่สุด (สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์, 2552)

จากข้อมูลการใช้ก๊าซแอลพีจีในภาคอุตสาหกรรมในปี 2557 พบว่ามีการใช้งานทั้งประเทศประมาณ 65,000 ตันต่อเดือน ในช่วง 3 เดือนแรกของปี 2557 มีการใช้ก๊าซแอลพีจีทั้งหมด 1,848 พันตัน เป็นการใช้ในครัวเรือนมีสัดส่วนการใช้มากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 32 ของปริมาณการใช้ทั้งหมด (582 พันตัน) สำหรับการใช้เป็นเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรมมีสัดส่วนร้อยละ 9 ของปริมาณการใช้ทั้งหมด (166 พันตัน) เพิ่มขึ้นจากปีก่อนร้อยละ 8.5 (กระทรวงพลังงาน, 2557, หน้า 5) โดยอุตสาหกรรมเซรามิกส์ มีปริมาณการใช้ประมาณ 4,000 ตันต่อเดือน ดังนั้นนอกจากการพิจารณาถึงการประหยัดพลังงานที่ใช้แล้ว การค้นหาพลังงานทดแทนมาเพื่อใช้ประโยชน์ในการเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ก็เป็นส่วนสำคัญอีกทางหนึ่ง

สำหรับการใช้พลังงานทดแทนในช่วง 3 เดือนแรกของปี 2557 อยู่ที่ระดับ 2,133 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ เพิ่มขึ้นจากปี 2556 ร้อยละ 11.8 โดยคิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 11.6 ของการใช้พลังงานขั้นสุดท้าย (การใช้พลังงานเชิงพาณิชย์ รวมกับการใช้พลังงานทดแทน) การใช้พลังงานทดแทนในรูปความร้อนที่ผลิตจากพลังงานแสงอาทิตย์ ชีวมวล ก๊าซชีวภาพ และขยะชุมชน มีปริมาณ 1,345 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 63 ของการใช้พลังงานทดแทนทั้งหมด (กระทรวงพลังงาน, 2557, หน้า 6) ซึ่งเชื้อเพลิงชีวภาพ (biofuel) เป็นพลังงานหมุนเวียนที่สามารถฟื้นฟูหรือสร้างขึ้นใหม่ได้สะดวกและสามารถใช้งานได้ รวมทั้งการเผาเชื้อเพลิงชีวภาพไม่ก่อให้เกิดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นและยังก่อให้เกิดปริมาณก๊าซพิษน้อยกว่าเชื้อเพลิงชนิดอื่นเมื่อเทียบกันในอัตราต่อหน่วย สำหรับการนำเชื้อเพลิงชีวภาพมาใช้สำหรับเตาเผาเซรามิกส์จะอยู่ในรูปก๊าซชีวภาพ (biogas) โดยก๊าซชีวภาพ 1 ลูกบาศก์เมตรมีค่าความร้อน 21.5 เมกะจูล (MJ) หรือเท่ากับค่าความร้อนของก๊าซหุงต้ม (Liquefied Petroleum Gas, LPG) 0.46 กิโลกรัม หรือไฟฟ้า 1.2 กิโลวัตต์ (kWh) และถ่าน 1.6 กิโลกรัม ซึ่งปัจจุบันครอบครัวตามชนบทสามารถผลิตเชื้อเพลิงแบบนี้ใช้ได้เองที่เรียกว่าเตาก๊าซชีวมวล (gasifier reactor stove) ใช้ก๊าซที่ได้จากการเผาเศษไม้ ขี้เลื่อย แกลบและน้ำมันพืช ที่ปราศจากควันและกลิ่น ได้เปลวไฟสีเหลืองอ่อน-ขาว ให้พลังงานความร้อนสูงกว่า 1,000 องศาเซลเซียส ช่วยให้ประหยัดกว่าการใช้ก๊าซหุงต้มถึงร้อยละ 92 รวมทั้งการใช้งานและบำรุงรักษาง่าย ซึ่งเป็นที่น่าสนใจว่าก๊าซ

ชีวมวลที่ใช้กับเตาหุงต้มในครัวเรือนสามารถนำมาใช้ทดแทนก๊าซแอลพีจีในการเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ได้หรือไม่

การให้ความสำคัญกับการใช้พลังงานของเตาเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกส์มีอย่างต่อเนื่องในหลายรูปแบบ ดังเช่นกระทรวงพลังงานได้จัดทำแผนปฏิบัติการอนุรักษ์พลังงาน 20 ปี (พ.ศ. 2554-2573) ที่มีการดำเนินงานโครงการปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานเชื้อเพลิงในเตาเผาและกระบวนการผลิตเซรามิกส์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้เชื้อเพลิงในเตาเผาเซรามิกส์ให้มีประสิทธิผลอย่างยั่งยืน เพื่อสนับสนุนให้ผู้ประกอบการอุตสาหกรรมเซรามิกส์ทั่วประเทศสามารถลดการใช้พลังงานเชื้อเพลิงก๊าซหุงต้มที่ใช้ในกระบวนการผลิตเซรามิกส์ และเป็นการขยายองค์ความรู้ด้านการใช้พลังงานเชื้อเพลิงอย่างมีประสิทธิภาพให้แก่ผู้ประกอบการ ลดการพึ่งพาเทคโนโลยีจากต่างประเทศ ก่อให้เกิดความยั่งยืนของอุตสาหกรรมเซรามิกส์ไทย (กระทรวงพลังงาน, 2557) การดำเนินงานตามโครงการดังกล่าวมีเป้าหมายที่จะสามารถลดการใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลว (แอลพีจี) ได้ถึง 1,200 ตันต่อปี คิดเป็นมูลค่าปีละ 36 ล้านบาท และลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกได้ไม่น้อยกว่า 3,600 ตันต่อปี หรือจะช่วยลดการใช้ก๊าซแอลพีจีในกระบวนการผลิตลงได้ประมาณร้อยละ 15-50

นอกจากองค์กรทางภาครัฐแล้วมีนักวิชาการและนักวิจัยหลายท่านที่ให้ความสนใจเกี่ยวกับการประหยัดพลังงานโดยใช้พลังงานทดแทน โดยพบการวิจัยที่พิสูจน์แล้วว่าสามารถนำเชื้อเพลิงชีวภาพมาใช้ให้พลังงานทดแทนก๊าซแอลพีจีได้ ทั้งช่วยให้ประหยัดและเกิดกาซคารบอนไดออกไซด์ต่ำกว่า (พิทักษ์ สุวรรณกูฏ, 2553) และสามารถนำเชื้อเพลิงชีวภาพมาใช้เผาผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ได้จริงที่อุณหภูมิไม่เกิน 1,000 องศาเซลเซียส สำหรับผลิตภัณฑ์ท้องถิ่นจากดินแดง (กุลเชษฐ์ เพียรทอง ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์ อดุลย์ จรรยาเลิศ อดุลย์ และอำไพศักดิ์ ทีบุญมา, 2550)

สำหรับการวิจัยที่มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเตาเผาเซรามิกส์นั้นพบว่าการประหยัดพลังงานของเตาเผาเซรามิกส์ที่ใช้ก๊าซแอลพีจีเป็นเชื้อเพลิง ต้องคำนึงถึงโครงสร้างของเตาเผาซึ่งฉนวนกันความร้อน หรือเซรามิกส์ไฟเบอร์จะช่วยให้ประหยัดพลังงานได้มากกว่าอิฐทนไฟ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2551) นอกจากนี้หัวเผาไหม้ที่ใช้ก็เป็นส่วนสำคัญที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ลดการสูญเสียและควบคุมการเผาไหม้ให้สมบูรณ์ รวมทั้งลดการใช้เชื้อเพลิงก๊าซแอลพีจีได้ (สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์, 2552) หากใช้ออกซิเจนช่วยในการเผาก็สามารถเร่งอุณหภูมิการเผาได้รวดเร็ว สิ้นเปลืองเชื้อเพลิงก๊าซแอลพีจีน้อย และเผาได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 1,600 องศาเซลเซียส (มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย, 2548) ที่สามารถปรับปรุงวิธีการเผาเพื่อให้เหมาะสมกับการเผาเซรามิกส์สมัยใหม่ (advance ceramics หรือ new ceramics) เช่นเผาชิ้นงานอะลูมินาที่มีความบริสุทธิ์สูงที่ต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่า 1,650 องศาเซลเซียส (กุลจิรา สุจิโรจน์ กรรณิการ์ เดชรักษา ธนวัฒน์ ปิยะดำรง และประมาณ ไตรภพกลาง, 2557)

อำเภอบางระจัน จังหวัดสิงห์บุรี ที่วัดพระปรางค์ บ้านโคกหม้อ ตำบลเชิงกลัด เป็นที่ตั้งของแหล่งเตาเผาแม่น้ำน้อย เป็นแหล่งการผลิตเครื่องปั้นดินเผาที่ใหญ่ที่สุดในสมัยกรุงศรีอยุธยาที่ผลิตผลิตภัณฑ์อย่างหลากหลายทั้งเครื่องปั้นดินเผาประเภทเคลือบผิวและไม่เคลือบผิว ประเภทเครื่องใช้สอยเช่น ไห อ่าง ครก กระปุก แจกัน กาน้ำ และประเภทเครื่องประกอบสถาปัตยกรรมและประติมากรรมเช่น ช่อฟ้า กระเบื้องเชิง

ชาย มังกรยักษ์ ตุ๊กตา ลูกกระสุนดินเผา กระเบื้องปูพื้น ท่อน้ำ เป็นต้น รวมทั้งผลิตสินค้าเพื่อการส่งออก มีทั้งชนิดเออร์เทนแวร์และสโตนแวร์ ชนิดเคลือบและไม่เคลือบ ปัจจุบันมีกลุ่มอนุรักษ์เครื่องปั้นไหสี่หูเตาเผาแม่น้ำน้อย ที่เกิดการรวมตัวโดยชาวบ้านในชุมชน ผลิตผลิตภัณฑ์ที่ยังคงเอกลักษณ์ดั้งเดิมของไหสี่หูเป็นหลัก ไม่มีการพัฒนารูปแบบและการตกแต่งมากนัก รวมทั้งระบบโครงสร้างการบริหารจัดการของกลุ่มทุกด้านไม่มีความชัดเจน จึงส่งผลให้การดำเนินกิจกรรมของกลุ่มขาดสภาพคล่องและการพัฒนาด้านคุณภาพสินค้าและการตลาดในเชิงพาณิชย์ (หิรัญ เกิดศิริ, 2555) ประกอบกับเตาเผาแม่น้ำน้อยมีขนาดใหญ่ มีเตาแก๊สที่ได้รับการสนับสนุนที่มีขนาดใหญ่เช่นกัน รูปแบบผลิตภัณฑ์ได้รับการพัฒนาโดยลดขนาดให้เป็นไหสี่หูขนาดเล็กที่ใช้สำหรับเป็นของชำร่วย ของที่ระลึก และของฝาก ที่มีการเผาอุณหภูมิสูงมีการเคลือบผิวด้วยเคลือบเถ้าพืชที่อุณหภูมิประมาณ 1,230 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ในกระบวนการผลิตของกลุ่มอนุรักษ์เครื่องปั้นดินเผาไหสี่หูเตาเผาแม่น้ำน้อยต้องใช้ระยะเวลาในการรอเพื่อให้สามารถมีปริมาณมากพอสำหรับการเผาดิบและเผาเคลือบได้ในแต่ละครั้ง

ในการวิจัยและพัฒนาหัวเผาก๊าซชีวภาพและเตาเผาอุณหภูมิสูงที่ใช้เชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับการผลิตเซรามิกส์ของวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อมบ้านบางระจัน จังหวัดสิงห์บุรีมีความสนใจที่จะออกแบบและสร้างเตาเผาที่เหมาะสมกับการผลิตเซรามิกส์ทั้งชนิดผลิตภัณฑ์พื้นบ้านจากดินแดงท้องถิ่น เช่น กระถาง อิฐมอญ ที่ใช้อุณหภูมิในการเผา 800-900 องศาเซลเซียส และผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ที่เคลือบผิวจากเนื้อดินปั้นชนิดเออร์เทนแวร์และสโตนแวร์ เช่น ผลิตภัณฑ์ตกแต่งบ้านและสวน ของชำร่วยและเครื่องประดับ และเครื่องโต๊ะอาหาร ที่ต้องการอุณหภูมิการเผาถึง 1,230 องศาเซลเซียส สามารถเผาได้ทั้งบรรยากาศออกซิเดชั่นและรีดักชั่น จึงมีลักษณะส่วนประกอบและโครงสร้างเช่นเดียวกับเตาเผาชนิดใช้ก๊าซแอลพีจีเป็นเชื้อเพลิง โดยการพิจารณาถึงการใช้เชื้อเพลิงชีวภาพด้วยหัวเผาก๊าซชีวภาพมาทดแทนการใช้ก๊าซแอลพีจีในการให้พลังงานความร้อน

ดังนั้นการวิจัยเพื่อออกแบบและหัวเผาก๊าซชีวภาพและเตาเผาอุณหภูมิสูงที่ใช้เชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับการผลิตเซรามิกส์ของวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อมบ้านบางระจัน จังหวัดสิงห์บุรี โดยการใช้เชื้อเพลิงชีวภาพจากวัสดุเหลือใช้ที่หาง่าย ราคาถูกและใช้งานได้สะดวก ด้วยต้นทุนที่เหมาะสม จึงเป็นการตอบสนองกลยุทธ์ด้านพลังงานของกระทรวงพลังงานทางด้านการส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทน ส่งเสริมการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีด้านการอนุรักษ์พลังงานในภาคอุตสาหกรรม รวมทั้งเสริมสร้างความรู้ความเข้าใจและจิตสำนึกในการใช้พลังงานอย่างประหยัด อนุรักษ์พลังงาน ตลอดจนป้องกันและบรรเทาผลกระทบจากภาวะโลกร้อน ซึ่งจะเป็นส่วนหนึ่งการลดต้นทุนการผลิตและเป็นโยชน์สำหรับบุคคลทั่วไป ชุมชน ท้องถิ่นที่สนใจ อุตสาหกรรมเซรามิกส์ไทยต่อไป

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อออกแบบและสร้างหัวเผาก๊าซชีวภาพและเตาเผาอุณหภูมิสูงที่ใช้เชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับการผลิตเซรามิกส์ของวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อมบ้านบางระจัน จังหวัดสิงห์บุรี

2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพหัวเผาก๊าซชีวภาพและเตาเผาอุณหภูมิสูงที่ใช้เชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับการผลิตเซรามิกส์ของวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อมบ้านบางระจัน จังหวัดสิงห์บุรี

วิธีการวิจัย

การวิจัยประยุกต์ครั้งนี้นำไปสู่การออกแบบและพัฒนาหัวเผาก๊าซชีวภาพและเตาเผาอุณหภูมิสูงที่ใช้เชื้อเพลิงชีวภาพ โดยแบ่งกระบวนการวิจัยออกเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

1. ออกแบบและสร้างหัวเผาก๊าซชีวภาพสำหรับเตาเผาอุณหภูมิสูงที่ใช้เชื้อเพลิงชีวภาพ มีการดำเนินงานวิจัยตามขั้นตอนดังนี้

1) วิเคราะห์ลักษณะรูปแบบและขนาดของหัวเผาหรือแหล่งกำเนิดความร้อนที่ต้องใช้เชื้อเพลิงก๊าซชีวภาพ

2) ปรับปรุงโครงสร้างและทดสอบประสิทธิภาพหัวเผาก๊าซชีวภาพที่เหมาะสมและให้ความร้อนสูงสุด

2. ออกแบบและสร้างเตาเผาอุณหภูมิสูงที่ใช้เชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับการผลิตเซรามิกส์ ของวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อมบ้านบางระจัน จังหวัดสิงห์บุรี มีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังนี้

1) ศึกษาและวิเคราะห์รูปแบบเตาเผาอุตสาหกรรมเซรามิกส์กึ่งต่อเนื่องประหยัดพลังงานโดยค้นหาแนวทางการใช้พลังงานเชื้อเพลิงชีวภาพ หรืออาจเป็นการใช้เชื้อเพลิงแบบผสมระหว่างเชื้อเพลิงชีวภาพและก๊าซแอลพีจี

2) ศึกษาและวิเคราะห์วัสดุประกอบการสร้างเตาเผาเครื่องปั้นดินเผาโดยคำนึงถึงการกักเก็บความร้อนและความเหมาะสมกับการใช้เชื้อเพลิงเป็นหลัก

3) วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างหัวเผา วัสดุ และเป้าหมาย

4) ร่างแบบเตาเผาโดยคำนึงถึงลักษณะหัวเผาที่ใช้เชื้อเพลิงก๊าซชีวภาพและวัสดุการสร้างเตา

5) คำนวณโครงสร้างและเขียนแบบเตาเผา

6) ซื้อวัสดุ อุปกรณ์ตามที่กำหนดและสร้างเตาเผาตามแบบที่กำหนด

3. ศึกษาประสิทธิภาพหัวเผาก๊าซชีวภาพและเตาเผาอุณหภูมิสูงที่ใช้เชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับการผลิตเซรามิกส์ของวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อมบ้านบางระจัน จังหวัดสิงห์บุรี ได้แก่การศึกษาและประเมินประสิทธิภาพของเตาเผาอุณหภูมิสูงที่ใช้เชื้อเพลิงชีวภาพครอบคลุมทั้งระบบการใช้งานเตาเผาได้แก่ ประเมินปัจจัยนำเข้าสู่กระบวนการเผา (input) ประเมินกระบวนการเผา (process) และประเมินผลผลิตจากกระบวนการเผา (output) รวมทั้งประเมินผลลัพธ์ของกระบวนการ (outcome) มีการดำเนินงานวิจัยที่มีรายละเอียดดังนี้

1) ประเมินปัจจัยนำเข้าสู่กระบวนการเผา ได้แก่ การพิจารณาถึงรูปแบบ รูปร่าง และสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่นำมาเผา วัตถุดิบที่นำมาใช้ทำก๊าซชีวภาพ รูปแบบหัวเผาและการติดตั้ง รวมทั้งปัจจัยสภาพแวดล้อมที่เกี่ยวข้อง

2) ประเมินกระบวนการเผา ได้แก่การทดสอบประสิทธิภาพการเผาของเตาเผาที่ 2 ระดับอุณหภูมิคือที่ 900 และ 1,230 องศาเซลเซียส ในการเผาเตาแต่ละครั้งมีการทดสอบดังนี้

(1) ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาถึงอุณหภูมิที่ต้องการ

(2) ระยะเวลาที่ใช้ในการเผาถึงอุณหภูมิที่ต้องการ

(3) การกระจายของระดับอุณหภูมิภายในเตาเผา

(4) อัตราการใช้พลังงานต่อน้ำหนักผลิตภัณฑ์

(5) ระดับอุณหภูมิสูงสุดของเตาเผาที่สามารถใช้งานได้

3) ประเมินผลผลิตจากกระบวนการเผา ได้แก่การพิจารณาผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการเผาด้านปริมาณและคุณภาพ

4) ประเมินผลลัพธ์ของกระบวนการ ได้แก่การพิจารณาความยืดหยุ่น ความสะดวก ความเหมาะสม และความคิดเห็นที่มีต่อหัวเผาก๊าซชีวภาพ เตาเผาอุณหภูมิสูงที่ใช้เชื้อเพลิงชีวภาพและการใช้งานโดยการสังเกตการใช้งานเตาเผาและสอบถามความคิดเห็นของกลุ่มผู้ผลิต

ผลการดำเนินงาน

1. ผลการออกแบบและสร้างหัวเผาก๊าซชีวภาพ พบว่าหัวเผาก๊าซชีวภาพแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ (1) ส่วนหัวเผาก๊าซชีวภาพ ที่ประกอบด้วยส่วนบรรจุแท่งชีวมวลที่ทำหน้าที่เป็นถังเผา รูปทรงกระบอกปิดด้านล่าง เปิดด้านบน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 เซนติเมตร สูง 70 เซนติเมตรทำจากเหล็กแผ่นม้วน ด้านในบุด้วยเซรามิกส์ไฟเบอร์ และส่วนหัวเผาก๊าซชีวภาพทำจากเนื้อเซรามิกส์ที่มีซิลิกาสูง มีสมบัติทนความร้อนและทนการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยกะทันหัน และ (2) ส่วนแท่งชีวมวลที่นำมาเผาให้เป็นก๊าซชีวภาพ โดยการบรรจุแท่งชีวมวลลงในถังเผา แท่งชีวมวลมีรูปแท่งทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 29 เซนติเมตร สูงประมาณ 40 เซนติเมตร แท่งชีวมวล 1 แท่ง ใช้ใบไม้แห้งสนิทหนัก 3 กิโลกรัม และขี้เลื่อยหนัก 5 กิโลกรัม ใส่สลับชั้นกัน รวมน้ำหนักของแท่งชีวมวลคือ 8 กิโลกรัม

2. ผลการออกแบบและสร้างเตาเผาอุณหภูมิสูงที่ใช้เชื้อเพลิงชีวภาพ พบว่าเตาเผาอุณหภูมิสูงที่ใช้เชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับการผลิตเซรามิกส์ของวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อมบ้านบางระจัน จังหวัดสิงห์บุรี เป็นเตาเผาแบบกึ่งต่อเนื่อง (semi continuous kiln) ชนิดทางเดินลมร้อนลง (down draught kiln) มีขนาดความจุ 1 ลูกบาศก์เมตร ที่มีรถเตา (kiln car) ใช้เพื่อการบรรจุผลิตภัณฑ์ ใช้โครงเหล็กบุผนังด้วยเซรามิกส์ไฟเบอร์ ยกเว้นส่วนพื้นเตาปูด้วยอิฐฉนวนทนไฟชนิดเบา มีช่องสำหรับบรรจุหัวเผาก๊าซชีวภาพจำนวน 8 ช่อง อยู่ด้านข้าง ข้างละ 3 ช่องและด้านหน้าอีก 2 ช่อง

3. ผลการศึกษาประสิทธิภาพหัวเผาก๊าซชีวภาพและเตาเผาอุณหภูมิสูงที่ใช้เชื้อเพลิงชีวภาพ พบว่า

3.1 ผลการศึกษาปัจจัยนำเข้าสู่กระบวนการเผา พบว่า (1) ด้านผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพได้แก่ไหสี่หู ที่ขึ้นรูปด้วยแป้นหมุนโดยใช้ดินแดงท้องถิ่น มีความสูง 15 เซนติเมตร น้ำหนักเมื่อแห้ง 600 กรัม บรรจุผลิตภัณฑ์เข้าเตาเผาจำนวน 100 ใบ (2) ด้านวัตถุดิบที่นำมาใช้ทำก๊าซชีวภาพ ได้แก่ใบไม้แห้งและขี้เลื่อย ในการเผาที่ 900 องศาเซลเซียส ใช้แท่งชีวมวลทั้งหมดจำนวน 15 แท่ง ส่วนการเผาที่ 1,230

องศาเซลเซียส ใช้แท่งชีวมวลทั้งหมดจำนวน 48 แท่ง (3) ด้านหัวเผาและการติดตั้ง พบว่าการเผาที่ 900 องศาเซลเซียส ใช้หัวเผาก๊าซชีวภาพจำนวน 5 หัว ส่วนการเผาที่ 1,230 องศาเซลเซียส ใช้ทั้ง 8 หัวเผา (4) ด้านปัจจัยสภาพแวดล้อมที่เกี่ยวข้อง พบว่าการทดสอบในช่วงเดือนมกราคม-เมษายน อากาศแห้งและร้อนช่วยให้ใบไม้ร่วงมีปริมาณมากและแห้งสนิท

3.2 ผลการศึกษากระบวนการเผาโดยการทดสอบประสิทธิภาพการเผาของเตาเผาพบว่า (1) ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสใช้เชื้อเพลิงแข็งที่อยู่ในรูปชีวมวล (ใบไม้แห้งและขี้เลื่อย) หนัก 120 กิโลกรัม และที่อุณหภูมิ 1,230 องศาเซลเซียสใช้เชื้อเพลิงแข็งที่อยู่ในรูปชีวมวลหนัก 384 กิโลกรัม (2) ระยะเวลาที่ใช้ในการเผาถึงอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการเผา 4 ชั่วโมง และใช้เวลาในการเผาที่อุณหภูมิ 1,230 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการเผา 6 ชั่วโมง 30 นาที (3) การกระจายของระดับอุณหภูมิภายในเตาเผา จากการพิจารณาความสม่ำเสมอของอุณหภูมิภายในเตาเผาอุณหภูมิสูงขณะเผาที่อุณหภูมิ 1,230 องศาเซลเซียสพบว่ามีการกระจายของระดับอุณหภูมิทั้งเตาอยู่ในระดับเท่ากัน ทำให้เคลือบผลิตภัณฑ์สุกตัวได้เหมือนกันทุกส่วนภายในเตา (4) อัตราการใช้พลังงานต่อน้ำหนักผลิตภัณฑ์ พบว่าการเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส มีอัตราการใช้พลังงานต่อน้ำหนักผลิตภัณฑ์เท่ากับ 0.5 และการเผาที่อุณหภูมิ 1,230 องศาเซลเซียส มีอัตราการใช้พลังงานต่อน้ำหนักผลิตภัณฑ์เท่ากับ 0.17 และ (5) ระดับอุณหภูมิสูงสุดของเตาเผาที่สามารถใช้งานได้ คืออุณหภูมิ 1,250 องศาเซลเซียส (โคนหมายเลข 7) ใช้เวลาในการเผานาน 6 ชั่วโมง 30 นาที ใช้แท่งชีวมวลทั้งหมดจำนวน 48 แท่ง

3.3 ผลการประเมินผลผลิตจากกระบวนการเผา พบว่าผลิตภัณฑ์หลังการเผาทั้งสองระดับอุณหภูมิไม่แตกและไม่ร้าว ยังคงสภาพสมบูรณ์

3.4 ผลการประเมินผลลัพธ์ของกระบวนการ พบว่าผู้ผลิตไม่พบปัญหาด้านการใช้งานเตาเผาและการเผาผลิตภัณฑ์ ปัญหาของการใช้งานมาจากการเตรียมแท่งชีวมวลให้พร้อมสำหรับการใช้งานการเผาที่ต้องใช้เวลานานในการจัดเตรียม

วิจารณ์

จากผลการวิจัยเรื่องการพัฒนาหัวเผาก๊าซชีวภาพและเตาเผาอุณหภูมิสูงที่ใช้เชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับการผลิตเซรามิกส์ของวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อมบ้านบางระจัน จังหวัดสิงห์บุรี มีข้อค้นพบที่นำสู่การอภิปรายผลดังนี้

1. จากการออกแบบและสร้างหัวเผาก๊าซชีวภาพ พบว่าหัวเผาก๊าซชีวภาพที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเผาที่เป็นทางออกของเปลวไฟขนาด 6 เซนติเมตร เมื่อใช้งานมีเปลวไฟสูงประมาณ 20-30 เซนติเมตร เมื่อประกอบกับเตาเผาที่มีช่องสำหรับบรรจุหัวเผาก๊าซชีวภาพจำนวน 8 ช่อง ช่วยให้การเผามีประสิทธิภาพดี มีการกระจายความร้อนที่ทั่วถึง แม้ตามทฤษฎีจะกล่าวว่าหัวเผาที่มีขนาดใหญ่จะทำให้ได้เปลวไฟที่ยาวกว่า แต่ก็อาจสร้างปัญหาในเรื่องของการยากต่อการควบคุมเปลวไฟในเตาเผาขนาดเล็ก มีการสูญเสียความร้อนได้มากกว่าเมื่อเปลวไฟกระทบผนังหรือหลังคาเตา รวมทั้งทำให้อายุการใช้งานของผนังเตาสั้นลง (โครงการ

สิ่งแวดล้อมแห่งสหประชาชาติ, 2006, หน้า 31) ดังนั้นการพิจารณาถึงหัวเผาที่มีขนาดเล็กกว่า แต่ใช้ปริมาณหัวเผาเพิ่มมากขึ้น จะช่วยให้เกิดความคุ้มค่าด้านพลังงานมากกว่า

2. จากการออกแบบและสร้างเตาเผาอุณหภูมิสูงที่ใช้เชื้อเพลิงชีวภาพ พบว่าเตาเผาอุณหภูมิสูงที่ใช้เชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับการผลิตเซรามิกส์ของวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อมบ้านบางระจัน จังหวัดสิงห์บุรี มีขนาดความจุ 1 ลูกบาศก์เมตร ใช้รถเตาเพื่อการบรรจุผลิตภัณฑ์ มีช่องสำหรับบรรจุหัวเผาก๊าซชีวภาพจำนวน 8 ช่อง ผนังเตาบุด้วยเซรามิกส์ไฟเบอร์จึงมีน้ำหนักเบากว่าเตาเผาที่สร้างด้วยอิฐฉนวนทนไฟ (insulating brick) แต่ทั้งนี้ยังพบว่าเตาเผามีหลังคาตรงแม้ผลการทดสอบประสิทธิภาพด้านอุณหภูมิการเผาและการกระจายอุณหภูมิจะดีก็ตาม แต่หากเตาเผามีหลังคาหรือผนังเตาด้านบนโค้งจะช่วยสะท้อนความร้อนให้กับชิ้นงานได้มากขึ้น (กลุ่มวิจัยเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน, ม.ป.ป.) นอกจากนี้อาจมีการจัดเรียงหัวเผาด้านซ้ายและขวาให้อยู่ในตำแหน่งสลับกันได้เพื่อการกระจายความร้อนและเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ (โครงการสิ่งแวดล้อมแห่งสหประชาชาติ, 2006, หน้า 31)

3. จากการศึกษาประสิทธิภาพหัวเผาก๊าซชีวภาพและเตาเผาอุณหภูมิสูงที่ใช้เชื้อเพลิงชีวภาพ โดยการวิจัยใช้ผลิตภัณฑ์เพื่อการทดสอบประสิทธิภาพจำนวน 100 ใบ จากการคำนวณปริมาณความจุของเตาเผาที่สามารถจุได้ถึง 160 ใบ ทั้งนี้เนื่องจากกำลังการผลิตที่ก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดที่เป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของเตาเผาได้แก่ปริมาณชิ้นงานที่ใส่ในเตาเผา การจัดวางชิ้นงาน และเวลาที่ใช้ในการเผา (โครงการสิ่งแวดล้อมแห่งสหประชาชาติ, 2006, หน้า 34) ซึ่งการบรรจุผลิตภัณฑ์จำนวนชิ้นงานมากอาจทำให้เตามีประสิทธิภาพในการเผาต่ำกว่าการเผาชิ้นงานที่ลดลง เนื่องจากการบรรจุผลิตภัณฑ์จำนวนมากจะมีการจัดเรียงผลิตภัณฑ์ที่ชิดกัน จำเป็นต้องใช้เวลาในการเผานานขึ้น ใช้เชื้อเพลิงมากขึ้น เพื่อให้ความร้อนกระจายตัวได้อย่างทั่วถึงก่อนเคลื่อนตัวลงสู่พื้นเตา ซึ่งโดยมากพบว่าการบรรจุผลิตภัณฑ์ที่อัดแน่น นอกจากจะใช้เวลาการเผาที่นานกว่าแล้ว ความร้อนไม่สามารถหมุนเวียนไปรอบๆ พื้นผิวผลิตภัณฑ์ได้อย่างทั่วถึง มีการกระจายความร้อนไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์บริเวณกลางเตาของทุกชั้นโดยเฉพาะชั้นกลางและชั้นล่างไม่สุกตัวได้

ข้อเสนอแนะ

1. ข้อเสนอแนะเพื่อการนำผลการวิจัยไปใช้งาน

1.1 จากการวิจัยมีการสร้างแท่งชีวมวลจากใบไม้แห้งและขี้เลื่อย ทั้งนี้ในการสร้างแท่งชีวมวลเพื่อใช้งานสามารถใช้ชีวมวลแข็งชนิดอื่นๆ ทดแทนได้ แต่ทั้งนี้ชีวมวลที่นำมาใช้งานต้องแห้งสนิท เนื่องจากหากชีวมวลซึ่งเป็นเชื้อเพลิงมีความชื้นอยู่ จะต้องใช้ความร้อนบางส่วนในการทำให้ความชื้นเหล่านั้นระเหยไปในเตาจึงเป็นการสูญเสียความร้อนเพื่อการเผาไปได้

1.2 จากการวิจัยมีการทดสอบประสิทธิภาพของเตาเผาโดยควบคุมด้านลักษณะผลิตภัณฑ์ จำนวนผลิตภัณฑ์ การจัดเรียงผลิตภัณฑ์ และการให้ความร้อน สำหรับการนำไปใช้งานการผลิตจริงสามารถทดลองปรับเปลี่ยนรูปแบบและปริมาณให้สอดคล้องกับกำลังการผลิตได้

2. ข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยต่อไป

2.1 ทดสอบประสิทธิภาพการเผาโดยการเปรียบเทียบด้านลักษณะและขนาดของผลิตภัณฑ์ จำนวนผลิตภัณฑ์ การจัดเรียงผลิตภัณฑ์ และการให้ความร้อน เพื่อค้นหาข้อสรุปที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานเตาเผาเพื่อการผลิตผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกัน

2.2 พัฒนาแนวทางและอุปกรณ์เพื่อการนำความร้อนจากการเผามาใช้งานตามความเหมาะสมของผู้ผลิต

เอกสารอ้างอิง

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2551). โครงการปรับปรุงประสิทธิภาพเตาเผาเครื่องปั้นดินเผาโดยการใช้ฉนวนกันความร้อน (Insulation for ceramics kiln). กรุงเทพฯ: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน.

กระทรวงพลังงาน. (2557). แผนปฏิบัติราชการสี่ปีและแผนปฏิบัติราชการประจำปีงบประมาณ 2558. กรุงเทพฯ: กลุ่มพัฒนายุทธศาสตร์พลังงาน กองนโยบายและแผนพลังงาน.

กลุ่มวิจัยเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน. (ม.ป.ป.). เตาเผาอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ: กลุ่มวิจัยเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

กุลจิรา สุจิโรจน์ กรรณิการ์ เดชรักษา ธนวัฒน์ ปิยะดำรง และประมาณ ไตรภพกลาง. (2557). การเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ในระดับโรงประลองโดยใช้เตาก๊าซ LPG. กรุงเทพฯ: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ.

กุลเชษฐ์ เพียรทอง ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์ อดุลย์ จรรยาเลิศอดุลย์ และอำไพศักดิ์ ทีบุญมา. (2550). การศึกษาปัญหา การออกแบบ และการปรับปรุงการใช้งานเตาเผาชีวมวล สำหรับเครื่องปั้นดินเผาให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น กรณีศึกษา เตาเผาเครื่องปั้นดินเผา ตำบลปากห้วยวังนอง จังหวัดอุบลราชธานี. อุบลราชธานี: ศูนย์วิจัยและบริการพลังงาน มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.

โครงการสิ่งแวดล้อมแห่งสหประชาชาติ. (2006). เครื่องมือที่ใช้พลังงานความร้อน: เตาเผาและวัสดุทนความร้อน แนวทางปฏิบัติเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพในภาคอุตสาหกรรมของเอเชีย. สืบค้นเมื่อ 2558, มิถุนายน 5 จาก www.energyefficiencyasia.org

มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย. (2548). การออกแบบและพัฒนาเตาเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ โดยใช้ก๊าซเชื้อเพลิง อุณหภูมิ 1,600 องศาเซลเซียส. เลย: สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิกส์ มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย.

สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์. (2552). โครงการการพัฒนาหัวเผาไหม้ประสิทธิภาพสูงสำหรับเตาเผาเซรามิกส์. เชียงใหม่: สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

หิรัญ เกิดศิริ. (2555). โครงการนวัตกรรมฟื้นฟูศิลปหัตถกรรมเครื่องปั้นดินเผาไหสี่หูและเตาเผาฟืนโบราณ. ลพบุรี: คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี.