

การวิเคราะห์สมรรถนะของเตาแก๊สชีฟไฟเออร์ควบคู่กับการผลิต

ถ่านชีวภาพระดับครัวเรือน

Performance Analysis of Gasifier Stove Coupled with Bio-Char Production for Household

กันยาพร ไชยวงศ์ ญัฐพล วิชาญ อริยะ แสนทวีสุข วิโรจน์ ไชยสมทิพย์ สมศักดิ์ ตั้งวีไล และอภิรัตน์ เสริมศิริตระกูล

Kanyaphorn Chaiwong, Nattapon Wichan, Ariya Santaweek, Wiroat Chaisomtip, Somsak Tungwilai and Apinan Sermsirikul

ห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีพลังงานชีวภาพ คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา น่าน ตำบลฝายแก้ว อำเภอภูเพียง จังหวัดน่าน 55000

Bioenergy Technology Research Laboratory, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Nan, Phu Peang District, Nan Province 55000, Thailand

E-mail: drccrmutl@gmail.com, Tel:054-771160, Fax: 054-771160

บทคัดย่อ

การวิเคราะห์สมรรถนะของเตาแก๊สชีฟไฟเออร์ควบคู่กับการผลิตถ่านชีวภาพในการศึกษานี้ จะแสดงถึงผลด้านประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาที่ทำการออกแบบ เพื่อการพัฒนาเตาชีวมวลต้นแบบซึ่งจะสามารถนำไปใช้ในการหุงต้มในระดับครัวเรือนควบคู่กับการผลิตเชื้อเพลิงในรูปแบบถ่านชีวภาพ ทั้งนี้เตาที่ทำการออกแบบจะอาศัยกระบวนการทางด้านเคมีความร้อนสำหรับการเปลี่ยนรูปชีวมวลใน 2 กระบวนการหลักได้แก่ กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันสำหรับผลิตแก๊สเชื้อเพลิง และให้ความร้อน และกระบวนการไพโรไลซิสสำหรับผลิตถ่านชีวภาพ โดยจะอาศัยความร้อนที่สูญเสียผ่านผนังท่อในบริเวณที่เกิดกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเป็นตัวป้อนให้กระบวนการผลิตถ่านชีวภาพ ในส่วนของการเกิดกระบวนการไพโรไลซิส การศึกษาประสิทธิภาพเชิงความร้อนผ่านกระบวนการต้มเดือดกับการเปลี่ยนวัตถุดิบทดสอบพบว่า การใช้งานเตากับซังข้าวโพดจะให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงกว่าการใช้แกลบ และถ่านไม้ ซึ่งจะให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนร้อยละ 24, 21 และ 13 ตามลำดับ หากมีการใช้เชื้อเพลิงในรูปแบบผสมระหว่าง แกลบกับถ่านไม้ และแกลบกับซังข้าวโพด จะทำให้มีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่สูงขึ้นร้อยละ 27 และ 41 ตามลำดับ ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาที่ทำการศึกษาให้ค่าค่อนข้างสูงเมื่อทำการเปรียบเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ ที่มีผลค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนในช่วงร้อยละ 5 - 23 สำหรับถ่านชีวภาพที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสในเตา มีคุณสมบัติและองค์ประกอบที่ใกล้เคียงกับถ่านชีวภาพที่ผลิตได้ในระดับห้องปฏิบัติการ โดยให้ค่าความร้อนเฉลี่ยประมาณ 16.80 MJ/kg ซึ่งมีค่าต่ำกว่าถ่านชีวภาพที่ได้จากห้องปฏิบัติการร้อยละ 11.20

คำสำคัญ: เตาก๊าซชีฟไฟเออร์, ไพโรไลซิส, แก๊สซิฟิเคชัน, ถ่านชีวภาพ, แก๊สชีวมวล

ABSTRACT

Performance analysis of gasifier stove coupled with bio-char production on this study was represented to the result of thermal efficiency for a developed prototype of biomass stove which could be used for cooking on the household coupled with a bio-char production. The design of this stove depended on 2 of thermochemical productions as gasification process for syngas production and pyrolysis process for bio-char production. The heat loss from the wall of gasification zone was also

used to the production of bio-char on pyrolysis zone. The study of thermal efficiency was performed via the Water Boiling Test (WBT) with varied types of biomass. It was found that, the stove testing with corncob gave higher thermal efficiency than those with rice husk and charcoal which were 24%, 21% and 13% respectively. In case of fuel mixing between rice husk with coal and rice husk with corncob gave high thermal efficiencies of 27% and 41% respectively. The thermal efficiency on this stove quite high comparing with previous research, which gave the thermal efficiency of 5 – 23%. The bio-char from pyrolysis zone of this stove had a property and components closely to the bio-char from a producing in laboratory. The heating value of 16.80 MJ/kg around 11.20% less than that obtained in laboratory.

Keywords: Gasifier Stove, Pyrolysis, Gasification, Bio-char, Syngas

1. บทนำ

การพัฒนาเตาชีวมวลระดับครัวเรือนเป็นหนึ่งในแนวทางการส่งเสริมการใช้พลังงานชีวมวล สำหรับให้ความร้อนทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล โดยเฉพาะเชื้อเพลิงประเภท แก๊สหุงต้ม (LPG) ซึ่งมีสัดส่วนการใช้งานในครัวเรือนสูงถึงร้อยละ 64.2 เมื่อทำการเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงที่ใช้สำหรับการประกอบอาหารในครัวเรือนตามข้อมูลของสำนักงานสถิติแห่งชาติในปี 2557 [1] นอกจากนี้ยังเป็นผลที่เกิดขึ้นจากการปรับตัวของราคาแก๊สหุงต้มตามราคาของตลาดโลกทำให้ในปัจจุบันแก๊สหุงต้มมีราคาสูงถึงกิโลกรัมละ 24.16 บาท จากราคาเดิมในปี 2556 ซึ่งจำหน่ายในราคา กิโลกรัมละ 18.13 บาท [2] จึงส่งผลโดยตรงต่อค่าใช้จ่ายในภาคครัวเรือน

การพัฒนาเทคโนโลยีเตาชีวมวลโดยทั่วไปอาศัยกระบวนการทางด้านเคมีความร้อน ทำให้เกิดการแปรรูปพลังงาน และทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงหลักสำหรับการหุงต้มในครัวเรือน กระบวนการที่นำมาใช้ในเตาชีวมวลส่วนใหญ่มักถูกควบคุมภายใต้ปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification Reaction) ซึ่งขณะเกิดปฏิกิริยา หรือภายใต้กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน จะทำให้เกิดกระบวนการหลักๆ ใน 4 กระบวนการคือ กระบวนการอบแห้ง กระบวนการไพโรไลซิส กระบวนการเผาไหม้ และกระบวนการรีดักชัน ภายในเตาปฏิกรณ์ ที่รู้จักกันทั่วไปในชื่อ เตาแก๊สซิฟิเคชัน (Gasifier Stove) [3]

แก๊สซิฟิเคชัน สามารถนำมาใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงแก๊ส กับชีวมวลหลากหลายประเภท อาทิ ช้างข้าวโพด เศษไม้ ฟางข้าว แกลบ กะลามะพร้าว เป็นต้น ที่นอกจากจะ

ส่งเสริมการพัฒนาเชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับใช้งานแล้ว เตาในลักษณะดังกล่าวยังช่วยลดควัน และมลพิษที่เกิดจากการเผา นอกจากนี้การประยุกต์ใช้เตาแก๊สซิฟิเคชัน ถือเป็นอีกหนึ่งแนวทางที่จะช่วยลดต้นทุนในภาคอุตสาหกรรมเกษตรได้ ตัวอย่างการศึกษาการออกแบบ และสร้างเตาแก๊สซิฟิเคชันจากเชื้อเพลิงของ อภิรักษ์ ทุมพร และคณะ [4] ได้มีการศึกษาการนำเอาเชื้อเพลิงซึ่งหาได้ง่ายในประเทศไทย ผลิตเป็นพลังงานเชื้อเพลิงทดแทน โดยผ่านระบบการเผาไหม้ ของเตาแก๊สซิฟิเคชัน ออกแบบวงจรการลำเลียงเชื้อเพลิง และออกแบบวงจรควบคุมอากาศโดยใช้มอเตอร์เข้าช่วยในการเผาไหม้ เพื่อให้ได้แก๊สเชื้อเพลิงที่มีความต่อเนื่อง และแก๊สเชื้อเพลิงที่สามารถติดไฟได้

นอกจากการศึกษาเตาชีวมวลในรูปแบบแก๊สซิฟิเคชันแล้ว ยังมีการศึกษาที่น่าสนใจเกี่ยวกับการออกแบบเตาถ่านชีวภาพ ซึ่งจะถูกรออกแบบให้สามารถผลิตถ่านชีวภาพด้วยกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis Process) ที่ใช้ในการเปลี่ยนอินทรีย์วัตถุด้วยความร้อน ในช่วงอุณหภูมิที่ไม่สูงมากนัก ประมาณ 400-600°C ภายใต้สภาวะการทำงานที่ปราศจากอากาศ หรือออกซิเจน ด้วยกระบวนการดังกล่าวจะสามารถผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพใน 3 ชนิดหลัก ได้แก่ น้ำมันชีวภาพ (Bio-Oil) แก๊ส และถ่านชีวภาพ (Bio-Char) [5] ลักษณะของเตาถ่านชีวภาพส่วนใหญ่ เป็นรูปแบบเตาถ่านอย่างง่าย ที่มีลักษณะของการให้ความร้อนกับเชื้อเพลิงจากการเผาไหม้โดยตรง ในรูปแบบเตาที่มีการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงจากทางด้านบนลงด้านล่าง (Downdrafts) และเตาที่มีการจุดติดเชื้อเพลิงจากทางด้านล่างขึ้นด้านบน (Updrafts) [6] ถ่านชีวภาพ

ที่ผลิตได้นอกจากจะสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในรูปแบบเชื้อเพลิงแล้ว ยังได้รับการส่งเสริมในรูปแบบวัตถุดิบสำหรับปรับปรุงดิน ด้วยคุณลักษณะของวัตถุดิบที่มีความพรุนสูง และมีขนาดที่เหมาะสมต่อการกักเก็บน้ำ และสารอาหาร จึงเป็นประโยชน์ต่อการเจริญเติบโตของพืช นอกจากนี้แล้วกระบวนการไพโรไลซิสจะสามารถกักเก็บคาร์บอนลงในถ่านชีวภาพได้มาก จึงเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีของการกักเก็บคาร์บอน เพื่อช่วยลดภาวะเรือนกระจกและลดผลกระทบจากภาวะโลกร้อน [7] สำหรับการส่งเสริมการใช้เตาถ่านชีวภาพระดับครัวเรือนเริ่มมีการส่งเสริมในกลุ่มประเทศกำลังพัฒนา อาทิ การส่งเสริมการใช้เตาในรูปแบบ Rocket Stove ตามการศึกษาของ Torres-Rojas และคณะ, [8] ใน ประเทศเคนยา ซึ่งนอกจากจะใช้ในการผลิตถ่านชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่พบในชุมชนได้แล้ว ยังสามารถใช้งานทดแทนเตาหุงต้มในครัวเรือน ผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพเตาถ่านชีวภาพ โดยเฉลี่ยจากจำนวนกลุ่มผู้ใช้ตัวอย่าง 50 ครัวเรือน มีค่าสูงกว่าเตาหุงต้มทั่วไป และยังช่วยลดปริมาณการใช้ฟืน และเศษไม้ ได้ถึงร้อยละ 27 สามารถผลิตถ่านชีวภาพได้ประมาณ 0.46 Mg/ha ต่อปี และถ่านชีวภาพดังกล่าวสามารถนำมาใช้ช่วยในการปรับปรุงดินทางการเกษตรให้มีลักษณะทางกายภาพที่เหมาะสมต่อการเพาะปลูกมากขึ้น อย่างไรก็ตามการออกแบบและพัฒนาเตาถ่านชีวภาพต้องมีความเหมาะสมทั้งทางด้านวัสดุในการจัดสร้าง รูปแบบของการป้อนอากาศเข้าภายในเตารวมถึงการแยกชนิดของเตาตามชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตเชื้อเพลิง ตามผลสรุปจากการศึกษาลักษณะของเตาถ่านชีวภาพในหลายรูปแบบ ของ Kumar, [9] ที่ได้ทำการศึกษา และแบ่งประเภทของเตาถ่านชีวภาพ ตามลักษณะของท่อส่งผ่านความร้อน โดยปรับรูปแบบของตัวท่อเป็น 3 รูปแบบหลัก ได้แก่ รูปแบบท่อเดี่ยวแบบง่าย (The Simple Tube Stove) รูปแบบท่อรวม (The Multi-Port Pulverized Stove) และรูปแบบผสมผสาน (The Typical Configuration of A Single-port and Multiport Pulverized Fuel

Stove) โดยได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติ และความสามารถในการใช้งานเตาถ่านชีวภาพแต่ละประเภท โดยพิจารณาตามค่าการทดสอบต่างๆ เช่น Water Boiling Test (WBT), Controlled Cooking Test (CCT), Kitchen Performance Test (KPT) เพื่อนำผลการทดสอบมาทำการปรับปรุงลักษณะของเตาถ่านชีวภาพ ตัวอย่างของการพัฒนาเตาชีวมวลที่มีการใช้งานในลักษณะเตาหุงต้มควบคู่กับการใช้ผลิตถ่านชีวภาพ ตามการศึกษาในงานวิจัยของ กันยาพร ไชยวงศ์ และคณะ, [10] ในลักษณะเตาทรงกระบอก 2 ชั้น บริเวณแกนกลางของเตาใช้สำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงโดยตรงเพื่อให้ความร้อนในการหุงต้มทั่วไป ขณะที่บริเวณชั้นเปลือกของตัวเตาถูกใช้สำหรับการผลิตถ่านชีวภาพ โดยอาศัยความร้อนที่ได้จากช่องการเผาไหม้ซึ่งจะถูกส่งถ่ายจากบริเวณผนังท่อมายังชีวมวลทำให้เกิดการย่อยสลายเชิงความร้อนด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า จนได้ผลิตภัณฑ์ในรูปแบบถ่านชีวภาพ ผลการศึกษาพบว่าเตาที่ได้มีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนโดยเฉลี่ยร้อยละ 29.67 มีอัตราการใช้เชื้อเพลิงเฉลี่ย 14.11 g/min ตามผลการทดสอบการผลิตถ่านชีวภาพกับ วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรใน 3 ประเภท ได้แก่ ชังข้าวโพด กะลากาแฟ และเมล็ดมะไฟจีน และยังพบว่าเตาชีวมวลที่ได้รับการพัฒนาให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ค่อนข้างสูงเมื่อทำการเปรียบเทียบค่ากับเตาในลักษณะใกล้เคียง แต่ยังมีปัญหาที่เกิดจากควันขณะจุดเตา และบริเวณช่องเผาไหม้ซึ่งควรจะต้องได้รับการปรับปรุงและพัฒนาเพื่อให้เหมาะสมต่อการนำไปใช้ประโยชน์จริงในชุมชน

ดังนั้นในการศึกษานี้จึงให้ความสนใจในการศึกษาถึงการออกแบบเตาในลักษณะเตาแก๊สซิไฟเออร์สำหรับใช้ให้ความร้อนควบคู่ไปกับการนำไปใช้ในการผลิตถ่านชีวภาพ โดยการเลือกใช้ชีวมวลจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น ชังข้าวโพด และแกลบ ที่มีสมบัติและองค์ประกอบพื้นฐานที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 1 เพื่อศึกษาถึงสมรรถนะของเตาจากประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาที่ออกแบบ โดยพิจารณาผลที่เกี่ยวกับ ชนิด

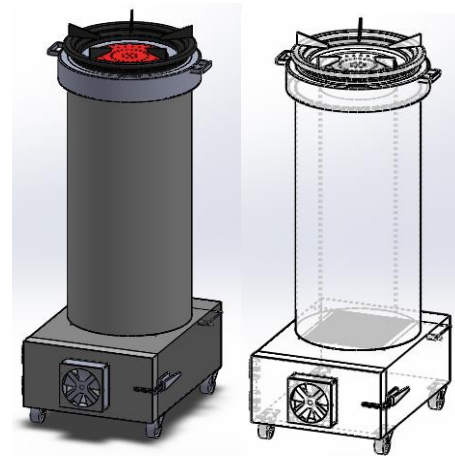
ของวัตถุดิบต่อการเปลี่ยนแปลงด้านอุณหภูมิของเตา และประสิทธิภาพเชิงความร้อน รวมถึงผลด้านคุณภาพของถ่านชีวภาพที่ผลิตได้ และเปรียบเทียบผลที่ได้กับการพัฒนาเตาในลักษณะใกล้เคียงร่วมด้วย

ตารางที่ 1 สมบัติ และองค์ประกอบของซังข้าวโพดและ แกลบ [11]

ชีวมวล	ซังข้าวโพด	แกลบ
ธาตุองค์ประกอบ (%wt)		
C	49.0	47.0
O	44.5	41.4
H	5.4	10.8
N	0.5	0.6
S	0.20	0.24
ค่าความร้อน (kcal/kg)	3,860	4,540

2. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการศึกษา

เตาชีวมวลที่ใช้ในการศึกษา และออกแบบในงานวิจัยนี้เป็นเตาที่สามารถให้ความร้อนในการหุงต้มทั่วไป ร่วมกับการผลิตถ่านชีวภาพ ซึ่งเป็นแนวคิดของการพัฒนาเตาในรูปแบบ Rocket Stove [12] ข้อดีของการใช้งานเตาลักษณะดังกล่าว คือ สามารถช่วยลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิง ลดการปลดปล่อยคาร์บอนมอนนอกไซด์ และฝุ่นได้ มากกว่าเตาประเภทอื่นๆ แสดงลักษณะของเตาที่ได้ทำการออกแบบ และจัดสร้างดังรูปที่ 1 ซึ่งเป็นเตาในลักษณะเตารูปทรงกระบอก 2 ชั้น บริเวณแกนกลางของเตาถูกออกแบบให้มีขนาด และการควบคุมการป้อนของอากาศที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน เพื่อผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Syngas) เพื่อใช้ในการหุงต้ม ขณะเดียวกัน ความร้อนที่ส่งผ่านจากผนังเตารอบๆ จะถูกส่งผ่านมายังบริเวณเปลือกเตาที่มีการควบคุมให้อยู่ในสภาวะปราศจากอากาศ และทำให้เกิดการย่อยสลายเชิงความร้อนกับชีวมวลที่บรรจุอยู่ หรือเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิส ถ่านชีวภาพที่ผลิตได้จะถูกนำมาใช้ภายหลังเสร็จสิ้นปฏิกิริยา และเกิดการย่อยสลายเชิงความร้อนอย่างสมบูรณ์



รูปที่ 1 เตาแก๊สซิฟิเออควงถ่านชีวภาพ

2.1 การทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อน

ภายหลังการออกแบบ และจัดสร้างเตา ได้ดำเนินการทดสอบเตาด้วยมาตรฐานการทดสอบแบบ Water Boiling Test (WBT) เพื่อหาค่าประสิทธิภาพเตา เมื่อมีการเปลี่ยนเชื้อเพลิงขณะใช้งาน ทั้งในรูปแบบของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ได้แก่ ซังข้าวโพด และแกลบ รวมถึงการใช้เชื้อเพลิงทั่วไป เช่น การใช้ถ่านไม้ และการใช้เชื้อเพลิงในรูปแบบเชื้อเพลิงผสม ทั้งนี้ในบริเวณที่มีการควบคุมให้เกิดกระบวนการไพโรไลซิสเพื่อผลิตถ่านชีวภาพ (บริเวณเปลือกเตา) จะใช้ทดสอบการผลิตถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดเท่านั้น

การทดสอบแบบวิธีการต้มเดือด (Water Boiling Test, WBT) เป็นการทดสอบที่วัดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงในการทำน้ำให้เดือด (Water Boiling Test, WBT) [9] ตามเงื่อนไขที่กำหนด ซึ่งเป็นการทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการที่ใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนการออกแบบเตาโดยพิจารณาจากความสามารถในการถ่ายเทความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับน้ำ และการใช้เชื้อเพลิงในการเผาไหม้ ซึ่งข้อดีของการเลือกใช้วิธีการทดสอบวิธีนี้คือ เป็นวิธีการที่ง่าย สามารถเปรียบเทียบค่าการทดสอบระหว่างเตาในลักษณะต่างๆ รวมถึงใช้เป็นข้อมูลในการปรับปรุงเตาขณะพัฒนา และลดข้อผิดพลาดในการ

จัดสร้าง วิธีการทดสอบมาตรฐานด้วยวิธีการต้มเดือดมี ขั้นตอนการทดสอบดังต่อไปนี้

- 1) เตรียมภาชนะสำหรับบรรจุ และต้มน้ำในปริมาณ 3,000 g พร้อมติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์ให้สูงจากก้น ภาชนะประมาณ 5 cm เพื่อวัดอุณหภูมิขณะทดสอบ การทดสอบ จากนั้นทำการอ่านค่าอุณหภูมิน้ำขณะ เริ่มทำการทดสอบ
- 2) บรรจุขังข้าวโพดที่ต้องการผลิตถ่านชีวภาพ จำนวน 1 kg บริเวณรอบตัวเตา (ใช้ปริมาณเท่ากันในทุกๆ การทดสอบ)
- 3) ทำการจุดเตาโดยทำการบรรจุวัตถุคิบที่จะใช้เป็น เชื้อเพลิงบริเวณแกนกลางของเตา ทั้งนี้ในกรณีศึกษา การใช้เชื้อเพลิงชนิดเดียว ได้แก่ ขังข้าวโพด แกลบ และ ถ่านไม้ จะขังเชื้อเพลิงในปริมาณชนิดละ 1.5 kg สำหรับเชื้อเพลิงผสมระหว่าง แกลบ:ถ่านไม้ และ ขังข้าวโพด:ถ่านไม้ จะใช้สัดส่วนของเชื้อเพลิง 1:1 (ชนิดละ 750 g) เริ่มทำการจุดเตาโดยใช้แกลบ ปริมาณ 100 g รองด้านบนสุดของเชื้อเพลิง และใช้ เศษกระดาษเพียงเล็กน้อยช่วยในการจุดติดเตา จากนั้นเปิดพัดลมบริเวณส่วนล่างของเตา และทำการ จุดติดเตาแล้วปล่อยให้เกิดการจุดติดประมาณ 5 min ก่อนทำการทดสอบในขั้นตอนถัดไป
- 4) นำภาชนะที่เตรียมไว้แล้ววางบนเตาและบันทึก อุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงของน้ำทุกๆ 1 min ตั้งแต่ น้ำอุณหภูมิ 40°C จนอุณหภูมิของน้ำมีค่าประมาณ 95°C จากนั้นทำการบันทึกเวลาขณะนั้นไว้แล้วทำ การต้มน้ำต่อไปอีก 5 min จึงทำการดับเตาร่วมกับ หยุดเวลาและอุณหภูมิน้ำเมื่อสิ้นสุดการทดสอบ
- 5) ชั่งน้ำหนักของน้ำในภาชนะที่เหลือ รวมถึงและ เชื้อเพลิงที่ใช้ ค่าที่ได้ทั้งหมดถูกนำไปใช้ในการ คำนวณประสิทธิภาพเชิงความร้อนจากความสัมพันธ์ ในสมการที่ 1

$$\eta_{th} = \frac{(C_{p,water} \times W_{water} \times \Delta T) + (h_{fg,vapour} \times W_{vapour})}{\dot{m}_{fuel} \times LHV_{fuel} \times \Delta t} \quad (1)$$

เมื่อ

- η_{th} = Thermal efficiency, %
- W_{water} = น้ำหนักน้ำที่ใช้ทดสอบ, g
- W_{vapour} = น้ำหนักไอน้ำที่ระเหย, g
- ΔT = ผลต่างของอุณหภูมิเริ่มต้น และอุณหภูมิ สิ้นสุดของน้ำที่ได้จากการทดสอบ, °C
- $h_{fg,vapour}$ = Latent Heat of Vaporizer, 2260 J/g
- $C_{p,water}$ = Specific Heat of Water, 4.178 J/g°C
- \dot{m}_{fuel} = ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้, g
- LHV_{fuel} = Lower Heating Value of fuel, J/g
- Δt = เวลาที่ใช้ในการให้ความร้อนแก่น้ำในช่วง 40 - 95°C

2.2 การทดสอบคุณสมบัติถ่านชีวภาพ

การทดสอบการใช้งานเตาเพื่อศึกษาถึงคุณสมบัติของ ถ่านชีวภาพ จะมีการทดสอบในลักษณะใกล้เคียงการ ทดสอบเพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงความร้อน โดยจะใช้ ความร้อนที่ได้ในการต้มน้ำ และผลิตถ่านชีวภาพ โดยใช้ ปริมาณของวัตถุคิบ และปริมาณน้ำที่เท่ากัน ทั้งนี้จะปล่อยให้ เตาทำงานตั้งแต่เริ่มจุดติดเตา ไปจนกระทั่งเตาดับ ขณะ ทดสอบทำการวัดอุณหภูมิเตาด้วยการติดตั้งเทอร์โมคัปเปอร์ บริเวณส่วนบนของเตา เพื่อหาอัตราการให้ความร้อน โดย เฉลี่ยของเตา ภายหลังการทดสอบขังปริมาณถ่านชีวภาพ จากขังข้าวโพดที่ผลิตได้ด้วยปฏิกิริยาไพโรไลซิส (บริเวณ เปลือกเตา) และเก็บตัวอย่างถ่านชีวภาพที่เกิดภายหลัง ปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน (บริเวณแกนกลางของเตา) พร้อม ตัวอย่างถ่านที่ได้จากบริเวณเปลือกเตา เพื่อนำมาวิเคราะห์ คุณสมบัติถ่านชีวภาพดังนี้

1. การวิเคราะห์ค่าความร้อน

การวิเคราะห์ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง ตาม มาตรฐาน ASTM D 240 โดยการทดสอบค่าความร้อน จากตัวอย่างเชื้อเพลิงโดยใช้เครื่อง Bomb Calorimeter ทำการเผาไหม้ตัวอย่างสมบูรณ์ใน ตัว Bomb ที่มี ออกซิเจนอยู่ในปริมาณเกินพอ และให้กระแสไฟฟ้าวิ่งผ่าน ฟิวส์ไปสัมผัสตัวอย่างเชื้อเพลิง เมื่อเกิดการเผาไหม้จน

หมจะสามารถนำผลการเปลี่ยนอุณหภูมิ มาใช้ในการคำนวณค่าความร้อนในหน่วย แคลอรีต่อกรัม [13]

2. การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis)

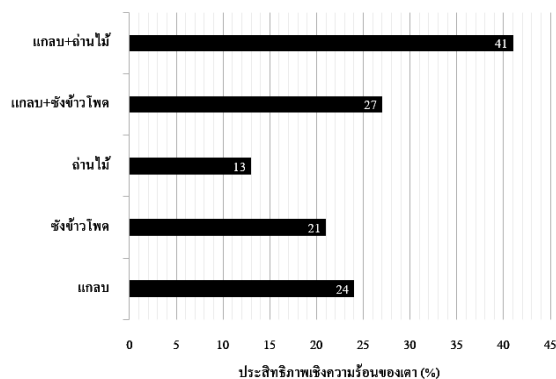
เป็นการวิเคราะห์เพื่อหาค่าความชื้น สารระเหย เถ้า และปริมาณคาร์บอนคงตัวที่อยู่ในถ่านชีวภาพ ซึ่งการวิเคราะห์ดังกล่าวจะบ่งบอกถึงคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของถ่านชีวภาพที่ผลิตได้ รวมไปถึงปริมาณคาร์บอนที่ถ่านชีวภาพสามารถรักษาไว้หลังจากชีวมวลถูกย่อยสลายด้วยความร้อน สำหรับวิธีการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D 3172 [14]

3. ผลการศึกษา

เมื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพเตาแก๊สซิฟิเออร์ควบคู่กับการผลิตถ่านชีวภาพ ขณะใช้งานเตาโดยใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ได้แก่ ชังข้าวโพด และแกลบ เทียบกับการใช้เชื้อเพลิงทั่วไป ได้แก่ ถ่านไม้ และการใช้เชื้อเพลิงผสมในสัดส่วน 1:1 ระหว่าง แกลบร่วมกับชังข้าวโพด และแกลบร่วมกับถ่านไม้ เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงหลักในการหุงต้ม พร้อมกับการผลิตถ่านชีวภาพจากชังข้าวโพดทำให้ได้ผลการศึกษาดังนี้

3.1 ผลการศึกษาประสิทธิภาพเชิงความร้อน

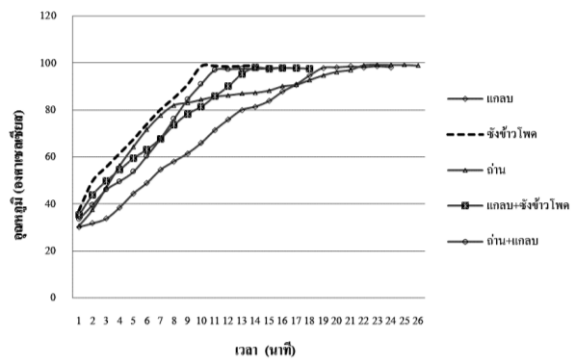
การทดสอบเพื่อศึกษาเปรียบเทียบการใช้เชื้อเพลิงในรูปแบบต่างๆ ซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สซิฟิเออร์ที่มีการใช้งานไปพร้อมๆ กับการผลิตถ่านชีวภาพ ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตา

แก๊สซิฟิเออร์กับการใช้เชื้อเพลิงชนิดต่างๆ

จากผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 1 จะเห็นได้ว่าการใช้เชื้อเพลิงในลักษณะเชื้อเพลิงผสมจะทำให้ได้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาสูงกว่า การใช้เชื้อเพลิงชนิดใดชนิดหนึ่ง ซึ่งประสิทธิภาพของการใช้งานเตากับแกลบจะให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงกว่า ชังข้าวโพด และถ่านไม้ โดยให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนประมาณร้อยละ 24 21 และ 13 ตามลำดับ ขณะที่การใช้เชื้อเพลิงในรูปแบบเชื้อเพลิงผสมระหว่างแกลบกับถ่านไม้ และแกลบกับชังข้าวโพดจะทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ร้อยละ 41 และ 27 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาผลที่เกิดจากการเปลี่ยนอุณหภูมิของน้ำในแต่ละการทดสอบซึ่งแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำขณะทำการทดสอบการใช้งานเตา

จากรูปที่ 2 จะเห็นได้ว่าการใช้เชื้อเพลิงแต่ละประเภทจะแสดงผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำที่แตกต่างกัน ซึ่งพบว่าการใช้ชังข้าวโพดเป็นเชื้อเพลิงเพียงอย่างเดียวจะทำให้ น้ำสามารถเดือดได้เร็วกว่าเชื้อเพลิงจากแกลบ และถ่านไม้ แต่จะสามารถใช้งานเพื่อทำความร้อนให้กับเตาได้ไม่นานเท่า แกลบ และถ่านไม้ ขณะที่การใช้เชื้อเพลิงในรูปแบบเชื้อเพลิงผสม จะช่วยให้ น้ำสามารถเดือดได้เร็วขึ้น กว่า การใช้แกลบ และถ่านไม้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติพื้นฐานของเชื้อเพลิงที่เลือกใช้ ทั้งผลที่เกิดจากค่าความร้อน และองค์ประกอบพื้นฐานที่แตกต่างกัน [15] อีกทั้งยังเป็นผลที่เกิดขึ้นจากลักษณะทางกายภาพของ

เชื้อเพลิงที่ถูกจัดเรียงภายในเตา ซึ่งการใช้เชื้อเพลิงในลักษณะผสม จะส่งผลให้เกิดช่องว่างระหว่างชั้นของเชื้อเพลิง จึงเหมาะแก่การผสมของอากาศที่ถูกป้อนจากทางด้านล่างของตัวเตา ง่ายต่อการเกิดปฏิกิริยา

หากทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาที่พัฒนาขึ้น กับเตาชีวมวลระดับครัวเรือนจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีลักษณะการใช้งานในรูปแบบเดียวกัน คือสามารถใช้ในการหุงต้มไปพร้อมๆ กับการผลิตถ่านชีวภาพ ซึ่งได้ทำการสรุปผลการศึกษาโดย Carter and Shackle, [16] และในงานวิจัยของ กันยาพร และคณะ [10] ทำให้ได้ข้อมูลของการเปรียบเทียบผลประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาที่ทำการออกแบบกับที่เลยพัฒนาแล้วก่อนหน้านี้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงความร้อน

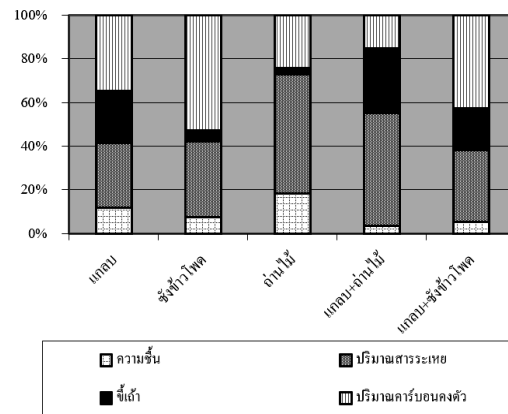
ชนิดเตา	เวลาในการต้มเดือด (mins)	อัตราการใช้เชื้อเพลิง (g/min)	Thermal Efficiency (%)
Anila 1*	10.86	35.83	14
Everything Nice*	30.29	15.63	19
Sampada*	11.77	56.67	12
TLUD*	10.10	41.98	12
Anila 2*	10.86	105.83	5
Biochar Stove **	9.00	17.33	23.67
Gasifier Stove	10.00	18.46	21.00

ที่มา:*Carter and Shackle, [16] **กันยาพร และคณะ [10]

จากตารางจะเห็นถึงผลการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนตามการทดสอบด้วยวิธีการแบบ WBT ซึ่งพบว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สซิไฟเออร์ที่มีการทำงานควบคู่กับการผลิตถ่านชีวภาพมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนค่อนข้างสูง เมื่อทำการเปรียบเทียบกับข้อสรุปที่ได้จากการศึกษาของ Carter and Shackle, [15] และให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนใกล้เคียงกับผลการทดสอบเตาของ กันยาพร และคณะ [10] นอกจากนี้เตาที่ออกแบบยังสามารถลดปัญหาที่เกิดจากควันขณะใช้งาน พร้อมทั้งมีการปรับขนาดที่เหมาะสมกับการใช้งานได้ในครัวเรือนได้ดีขึ้นอีกด้วย

3.2 ผลการศึกษาคุณสมบัติของถ่านชีวภาพ

การศึกษาการผลิตถ่านชีวภาพควบคู่กับการทดสอบประสิทธิภาพเตาแก๊สซิไฟเออร์ ทำให้ทราบว่าเตาที่ทำการออกแบบสามารถผลิตถ่านชีวภาพ ควบคู่ไปกับการให้ความร้อนสำหรับการหุงต้ม โดยมีอัตราการให้ความร้อนเฉลี่ย 8.83°C/min ทั้งนี้พบว่าปริมาณถ่านชีวภาพที่ผลิตได้ด้วยกระบวนการไพโรไลซิส บริเวณเปลือกเตาในทุกการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกัน โดยให้ค่าเฉลี่ยประมาณ 41% ของปริมาณซังข้าวโพดที่ป้อน หรือให้ปริมาณถ่านชีวภาพเฉลี่ยประมาณ 410 g ของการผลิตในแต่ละครั้ง ทั้งนี้เป็นผลที่เกิดจากการเลือกใช้วัตถุดิบชนิดเดียวกันในการผลิต [11] และเมื่อนำตัวอย่างถ่านชีวภาพที่เกิดขึ้นใน 2 ส่วนของเตา ได้แก่ ถ่านชีวภาพที่เกิดภายหลังปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน (บริเวณแกนกลางของเตา) และถ่านชีวภาพที่เกิดขึ้นด้วยปฏิกิริยาไพโรไลซิส (บริเวณเปลือกเตา) พบว่าถ่านชีวภาพที่ได้จากปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน จะมีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันไปตามชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ในการทดสอบ ดังแสดงผลในรูปแบบที่ 3



รูปที่ 3 องค์ประกอบของถ่านชีวภาพที่ได้จากปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน

รูปที่ 3 แสดงถึงองค์ประกอบของถ่านชีวภาพที่ได้จากวัตถุดิบแตกต่างกัน ซึ่งเป็นผลผลิตที่ได้ภายหลังใช้งานเตาบริเวณที่บังคับให้เกิดกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน หรือส่วนแกนกลางของเตา เมื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบพื้นฐานของถ่านชีวภาพด้วย Proximate Analysis ทำให้

เห็นได้ว่า ถ่านชีวภาพที่ได้มีองค์ประกอบที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบ พบว่าถ่านชีวภาพที่ได้จากแกลบจะมีความชื้น และเถ้าสูงกว่า ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด ขณะที่ปริมาณสารระเหย และคาร์บอนคงตัวในถ่านชีวภาพที่ได้จากซังข้าวโพดมีค่าสูงกว่า และยังแสดงผลในลักษณะเดียวกันกับถ่านไม้ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาการผลที่เกิดจากการใช้วัตถุดิบผสมระหว่าง แกลบกับถ่านไม้ และแกลบกับซังข้าวโพด จะพบว่า การใช้แกลบกับถ่านไม้ จะทำให้ได้ถ่านชีวภาพที่มีค่าเถ้าและสารระเหยสูงกว่าในกรณีใช้ แกลบและซังข้าวโพด ซึ่งผลด้านองค์ประกอบของถ่านชีวภาพดังกล่าวยังมีส่วนที่สอดคล้อง ระหว่างปริมาณคาร์บอนคงตัวที่เป็นองค์ประกอบในถ่านชีวภาพแต่ละชนิดกับผลจากการทดสอบค่าความร้อนของถ่านชีวภาพจากการวิเคราะห์โดยบอมบ์แคลอริมิเตอร์ (Bomb Calorimeter) ซึ่งพบว่าถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดจะให้ค่าความร้อนที่สูงมากกว่าถ่านชีวภาพจากแกลบ และถ่านไม้ ซึ่งจะให้ค่าความร้อนเท่ากับ 15.54, 11.34 และ 13.64 MJ/kg ตามลำดับ สำหรับในกรณีใช้วัตถุดิบผสมระหว่าง แกลบกับซังข้าวโพดจะให้ค่าความร้อนที่สูงกว่ากรณีใช้แกลบร่วมกับถ่าน ไม้ซึ่งจะให้ค่าความร้อนเท่ากับ 14.78 และ 11.66 MJ/kg ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามหากพิจารณาค่าความร้อนของถ่านชีวภาพที่ผลิตได้ในกรณีเป็นวัตถุดิบชนิดเดียวกัน แต่ผ่านกระบวนการผลิตที่แตกต่างกัน พบว่า ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดที่ย่อยสลายด้วยกระบวนการไพโรไลซิส (บริเวณเปลือกเตา) จะให้ค่าความร้อนที่สูงมากกว่า ถ่านชีวภาพที่ได้จากบริเวณแกนกลางของเตา หรือผ่านกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ซึ่งจะให้ค่าความร้อนเท่ากับ 16.80 และ 15.54 MJ/kg ตามลำดับ และหากพิจารณาผลด้านองค์ประกอบและค่าความร้อนของถ่านชีวภาพที่ผลิตได้จากกระบวนการไพโรไลซิส ที่ผลิตได้จากเตาที่ทำการออกแบบ กับถ่านชีวภาพที่ผลิตได้ในระดับห้องปฏิบัติการ [17] ในช่วงอุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ 400°C พบว่าให้ผลดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบองค์ประกอบและคุณสมบัติของถ่านชีวภาพจากเตาทดสอบ และระดับห้องปฏิบัติการ

องค์ประกอบ	Gasifier Stove	Laboratory*
ความชื้น (%)	17.53	2.79
ปริมาณสารระเหย (%)	19.16	21.81
เถ้า (%)	4.87	1.91
คาร์บอนคงตัว (%)	58.43	73.49
HHV (MJ/kg)	16.80	18.92

จากตารางที่ 2 แสดงถึงคุณสมบัติของถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดที่ผลิตได้ภายหลังจากการใช้งานเตาแก๊สซิฟิเคชัน ซึ่งยังคงมีค่าความชื้น และเถ้า สูงกว่าถ่านชีวภาพที่ได้จากการผลิต โดยควบคุมการผลิตในระดับห้องปฏิบัติการ ในช่วงอุณหภูมิไพโรไลซิสเฉลี่ย 400 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน และมีปริมาณคาร์บอนคงตัว และปริมาณสารระเหยที่ต่ำกว่า ส่งผลให้มีความร้อนที่ต่ำกว่าด้วย โดยให้ค่าความร้อนต่ำกว่าเฉลี่ยร้อยละ 11.20 แต่ถึงอย่างไรก็ตามหากทำการเปรียบเทียบค่าความร้อนที่ได้จากถ่านชีวภาพที่ผลิตได้จากเตาแก๊สซิฟิเคชัน กับเตาทดสอบในงานวิจัยของ กันยาพร ไชยวงศ์ และคณะ [10] พบว่าถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดที่ผลิตได้ให้ค่าความร้อนเฉลี่ยประมาณ 7.49 MJ/kg ซึ่งให้ค่าเฉลี่ยต่ำกว่าถ่านชีวภาพที่ผลิตได้จากเตาแก๊สซิฟิเคชันที่ทำการศึกษานงานวิจัยนี้ถึงร้อยละ 55.42

4. สรุปผลการศึกษา

การศึกษาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สซิฟิเคชันที่สามารถใช้งานในการผลิตถ่านชีวภาพควบคู่ด้วยให้ผลการศึกษาที่สำคัญ คือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่ป้อนให้กับเตา ซึ่งพบว่าการใช้ซังข้าวโพดจะให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงกว่าการใช้แกลบกับแกลบ และถ่านไม้ ในขณะที่การใช้เชื้อเพลิงในรูปแบบเชื้อเพลิงผสมจะให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตามีค่าสูงขึ้น ทั้งนี้หากพิจารณาถึงองค์ประกอบและคุณสมบัติของถ่านชีวภาพที่ผลิตได้จาก

การใช้งานเตา พบว่าถ่านชีวภาพที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส จะมีสมบัติเชิงพลังงาน และค่าความร้อนสูงกว่าถ่านชีวภาพที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน และให้ค่าความร้อนเข้าใกล้ถ่านชีวภาพที่ผลิตได้ในระดับห้องปฏิบัติการ ตามผลการศึกษาที่ได้พบว่าควรมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงการพัฒนาเตาโดยการเพิ่มจนวนกันความร้อนเพื่อลดการสูญเสียความร้อน รวมถึงปรับปรุงขนาดของเตาให้เหมาะสมกับการใช้งานจริงในระดับชุมชนที่ต้องการเพิ่มกำลังการผลิตถ่านชีวภาพ เพื่อให้เกิดการพัฒนาต่อได้อย่างเหมาะสมต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ “โครงการยกระดับปริญญาโทเป็นงานวิจัยตีพิมพ์ งานสร้างสรรค์ และงานบริการวิชาการสู่ชุมชน” ประจำปี 2558” มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และ สวทช.ภาคเหนือ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ผู้สนับสนุนโครงการวิจัย ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีพลังงานชีวภาพ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นำนั้ให้การสนับสนุนด้านอุปกรณ์ สถานที่ และบุคลากรในการศึกษาโครงการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] สุวีรัตน์ สันติภรณ์. การสำรวจภาวะเศรษฐกิจและสังคมของครัวเรือนกับการใช้พลังงานของครัวเรือน. เอกสารประกอบการบรรยายสำนักงานสถิติแห่งชาติ, โรงแรมอีสติน แกรนด์ สาทร กรุงเทพมหานคร, 21 สิงหาคม 2557.
- [2] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน. ก๊าซหุงต้ม. [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: <http://www.eppo.go.th/lpg/>, 16 พฤศจิกายน 2558.
- [3] ศูนย์วิศวกรรมอุณหภาพ. เตาแก๊สซิฟิเคชันสำหรับอุตสาหกรรมเกษตร. การใช้แก๊สเชื้อเพลิงจากชีวมวลหรือเชื้อเพลิงแข็ง ทดแทน LPG ในอุตสาหกรรม. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://www.kmutt.ac.th>, 16 พฤศจิกายน 2558.
- [4] อภิรักษ์ ทุมพร และ อภิรักษ์ แทนพรม. การออกแบบและสร้างเตาแก๊สซิฟิเคชันจากชี้อ้อย. ปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า. คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2556.
- [5] Chaiwong K, Kiatsiriroat T, Vorayos N, Thararax C. Study of bio-oil and bio-char production from algae by slow pyrolysis. *Biomass and bioenergy*, 2013; 56: 600 – 606.
- [6] Dixit CSB, Paul PJ, Mukunda HS. PartI—Experimental studies on a pulverised fuel stove. *Biomass and Bioenergy*, 2006; 30: 673–683.
- [7] อรสา สุขสว่าง. เทคโนโลยีถ่านชีวภาพ:วิธีแก้ปัญหาโลกร้อน ดิน และความยากจนในภาคเกษตรกรรม. การประชุมวิชาการเรื่องสภาวะโลกร้อน ความหลากหลายชีวภาพ และการใช้ประโยชน์อย่างยั่งยืน. 5-6 พฤศจิกายน 2552, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตกำแพงแสน, 2552.
- [8] Torres-Rojas, D., Lehmann, J., Hobbs, P., Joseph, S. Neufeldt, H. Biomass availability. Energy consumption and biochar production in rural households of Western Kenya. *Biomass and Bioenergy*, 2011; 35: 3537 – 3546.
- [9] Kumar, M., Kumar, S., Tyagi, S.K. Design, development and technological advancement in the biomass cookstoves: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013; 26: 265-285.

- [10] กัญยาพร ไชยวงศ์, ณัฐพล วิชาญ, อริยะ แสนทวีสุข และชญศิภรณ์ จันทร์หอม. การพัฒนาเตาถ่านชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร. รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ โครงการวิจัย พัฒนาและวิศวกรรม สวทช. ภาคเหนือ, สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2557.
- [11] Tripathi, M., Sahu, J.N., Ganesan,P. Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016; 55: 467-481.
- [12] L'Orange, C., DeFoort, M., Willson, B. Influence of testing parameters on biomass stove performance and development of an improved testing protocol. *Energy for Sustainable Development*, 2012; 16: 3-12.
- [13] โปรดปราน สิริธีรศาสน์, ณัฐพล ช่างการ และ ศรัณย์ ชโนวิทย์. การปรับปรุงคุณภาพของของผสมชีวมวลและถ่านหินด้วยกระบวนการ แยกสลายด้วยความร้อน (pyrolysis) โดยใช้คลื่นไมโครเวฟ. การประชุมวิชาการนานาชาติวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 21. 10 – 11 พฤศจิกายน 2554, อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา.
- [14] เจือจันทน์ เกศยา. ผลของอุณหภูมิคาร์บอนไนเซชันต่อสมบัติของถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมเคมี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2556.
- [15] Lehmann J. and Joseph S. *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*, London. Earthscan, 2009, 1-9.
- [16] Carter, K and Shackle, S. *Biochar Stoves: An Innovation Studies Perspective*. UK Biochar Research Center (UKBRC), School of GeoScience, University of Edinburgh, 2011.
- [17] กัญยาพร ไชยวงศ์ และ สิทธิบูรณ์ ศิริพรอักษรชัย. การวิเคราะห์พารามิเตอร์การผลิตถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า. *วารสารวิศวกรรม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*, 2559; 23(1): 85-92.