การควบคุมกระบวนการผลิตไบโอชาร์สำหรับชุมชนด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

Production Control of Biochar for Community using Microcontroller

นงนุช ศรีเล็ก[1], อนุพงษ์ สมพฤกษ์[2], มิ่งขวัญ สมพฤกษ์[1], วิลาสินี ศรีสุวรรณ[1], ธนพล แสงสุวรรณ[1], ชัชชัย วรพัฒน์[2], วิภพ ใจแข็ง[1],จรัญ คนแรง[1], ปรศักดิ์ งามสมภาค[3], กมลชนก สว่างศิลป์[3], กิตติภพ เพ็ชร์เม็ด[3], สิทธิกฤต เหล็กพูล[1], นเรศ ใหญ่วงศ์[1], และ ปรานต์ เมฆอากาศ[1*]

Nongnoot Srilek[1], Anuphong Somphruek[2], Mingkwan Somphruek[1], Wilasinee Srisuwan[1], Tanaphon Saengsuwan[1], Chatchai Vorapat[2], Wipobh Jaikhang[1], Jarun Khonrang[1], Porrasak Ngamsompark[3], Kamolchanok Sawangsill[3], Kittiphop pedmed[3], Sitthikrit Leckpool[1], Naret Yaiwong[1], and Pran Makarkard[1*]

[1] โปรแกรมวิชาวิศวกรรมพลังงานและเทคโนโลยีไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย

[2] สาขาวิชาอุตสาหกรรมศิลป์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย

[3] สำนักงานพลังงานจังหวัดเชียงราย ศูนย์ราชการกรมโยธาธิการ ตำบลริมกก อำเภอเมืองเชียงราย

[1] Energy Engineering and Electrical Technology Program, Faculty of Industrial Technology Chiang Rai Rajabhat University

[2] Industrial Arts Program, Faculty of Industrial Technology, Chiang Rai Rajabhat University

[3] Provincial Energy of Chiang Rai, Chiang Rai Province, Rimkok Sub-district, Muang Chiang Rai

[1]Corresponding author: Tel.: 08 4617 9508. E-mail address: pran.mak@crru.ac.th

Abstract

This study aims to ensure consistent quality control in biochar production and to enable reproducibility by integrating non-complex measurement technologies. These technologies are practical for community implementation and utilize microcontrollers for the application. The reaction temperature was 300 °C and 350 °C, and the reaction duration was 60 minutes. The 200-liter reactor was equipped with a temperature measurement system. Two types of biomasses were used for testing: bamboo (BB) and wasted coffee beans (WCB). The calorific value of bamboo biochar (B-BB) and wasted coffee bean biochar (B-WCB) were 30.24±2.74 and 33.67±1.27 MJ/kg, respectively. The mass yield of B-BB was 32.67 %, while B-WCB yielded 40.00 %. The energy yield was 53.70% and 68.36% for bamboo biochar (B-BB) and wasted coffee bean biochar (B-WCB), respectively. The energy densification ratio of B-WCB was 1.70, which was higher than that of 1.64 of B-BB.

Keywords: Biochar, Production control, Renewable energy, Microcontroller

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อควบคุมคุณภาพในการผลิตไบโอชาร์ให้มีคุณภาพคงที่ สามารถทำซ้ำได้ โดยบูรณาการเทคโนโลยีด้านการตรวจวัดที่ไม่ซับซ้อน ชุมชนสามารถนำไปปฏิบัติได้จริง โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์มาประยุกต์ใช้อุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยาเป็น 300 °C และ 350 °C และระยะเวลาที่เกิดปฏิกิริยา 60 นาที ปฏิกรณ์ขนาด 200 ลิตร ติดตั้งระบบตรวจวัดอุณหภูมิ ชีวมวล 2 ชนิดใช้ในการทดสอบได้แก่ ไม้ไผ่ และเมล็ดกาแฟคัดทิ้ง พบว่า ค่าความร้อนของไบโอชาร์จากชีวมวลไม้ไผ่และเมล็ดกาแฟคัดทิ้งเป็น 30.24±2.74 MJ/kg และ 33.67±1.27 MJ/kg สัดส่วนมวลของไบโอชาร์ไม้ไผ่เป็น 32.67 % ส่วนไบโอชาร์จากเมล็ดกาแฟคัดทิ้งเป็น 40.00 % สัดส่วนพลังงานเป็น 53.70 และ 68.36 % สำหรับไบโอชาร์ไม้ไผ่ และไบโอชาร์เมล็ดกาแฟคัดทิ้ง ตามลำดับ สัดส่วนความหนาแน่นพลังงานของเมล็ดกาแฟคัดทิ้งมีค่า 1.70 ซึ่งสูงกว่าไม้ไผ่ซึ่งมีค่าเป็น 1.64

คำสำคัญ: ไบโอชาร์ การควบคุมการผลิต พลังงานทดแทน ไมโครคอนโทรลเลอร์

บทนำ

ชีวมวล (Biomass) หมายถึง วัสดุที่ได้จากธรรมชาติหรือสิ่งมีชีวิต เช่น พืช และสัตว์ ซึ่งมีวัฏจักรชีวิตที่สั้น เช่น ข้าว ข้าวโพด อ้อย มันสำปะหลัง ยางพารา ปาล์ม วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรต่าง ๆ เป็นต้น ชีวมวลเป็นองค์ประกอบเชิงซ้อนของ คาร์บอน–ไฮโดรเจน–ออกซิเจน (C–H–O complex constituents) หากพิจารณาในเส้นใยจะประกอบด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งมีสูตรโครงสร้างทางเคมีอย่างง่าย เขียนได้เป็น $C(H_2O)_{0.83}$, CH_2O และ $CH_{1.3}O_{0.32}$ [1] ตามลำดับ การปรับปรุงเพื่อเพิ่มคุณสมบัติชีวมวลด้วยเทคโนโลยีทอริแฟกชั่น (Torrefaction technology) ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาอยู่ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 200 – 300 °C [2] อัตราการให้ความร้อนต่ำกว่า 50 °C ต่อนาที [3] ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา 30 นาที ถึงหลายชั่วโมง ที่ความดันบรรยากาศ ปราศจากก๊าซออกซิเจน และอาจเกิดขึ้นในสภาวะก๊าซตัวกลาง เช่น ก๊าซไนโตรเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น กระบวนการทอริแฟกชั่น เป็นกระบวนการที่ช่วยปรับปรุงคุณภาพของชีวมวล เช่น ค่าความร้อนสูงขึ้น ความชื้นลดลง รวมถึงทำให้สมรรถนะในการบดได้ดียิ่งขึ้น เป็นต้น [4] ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการนี้ ประกอบด้วยของแข็ง ของเหลว และก๊าซ สำหรับของแข็งที่ได้จะเรียก ว่า ไบโอชาร์ (Biochar) หรือ ถ่านชีวภาพ หรืออาจเรียกว่า ชีวมวลทอริไฟด์ (Torrefied biomass) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์มูลค่าสูง สามารถนำไปใช้เพื่อวัตถุประสงค์ด้านพลังงาน และด้านอื่น ๆ ที่ไม่ใช่ด้านพลังงาน

จากการดำเนินงานร่วมกันระหว่างสำนักงานพลังงานจังหวัดเชียงราย และ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย ในโครงการตามแผนปฏิบัติราชการประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2567 ของจังหวัดเชียงราย ภายใต้กิจกรรมสัมมนาเชิงปฏิบัติการให้ความรู้ด้านชีวมวลจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ให้กับกลุ่มเป้าหมาย ได้แก่ ศูนย์การเรียนรู้การเพิ่มประสิทธิภาพการเกษตรชุมชน สหกรณ์การเกษตร กลุ่มวิสาหกิจชุมชน กลุ่มเกษตรแปลงใหญ่ ศูนย์การเรียนรู้ตำบล/องค์การปกครองส่วนท้องถิ่น (อปท.) และประชาชนในพื้นที่จังหวัดเชียงราย จำนวน 10 ครั้ง ครั้งละ 40 คน ในปีถัดมาสำนักงานพลังงานจังหวัดเชียงรายดำเนินโครงการตามแผนปฏิบัติราชการประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2568 ของกลุ่มจังหวัดภาคเหนือตอนบน 2 ในพื้นที่จังหวัดเชียงราย โครงการบูรณาการสิ่งแวดล้อมและสาธารณภัย กิจกรรมหลักปลูกจิตสำนึกและสร้างเครือข่ายการมีส่วนร่วมในการป้องกันและแก้ปัญหาหมอกควันและไฟป่าของกลุ่มจังหวัดภาคเหนือตอนบน 2 กิจกรรมย่อย การพัฒนาองค์ความรู้ด้านการใช้เทคโนโลยีพลังงาน (เตาเผาถ่านไบโอชาร์) เพื่อลดปัญหาหมอกควันและเพิ่มประสิทธิภาพอาสาสมัครพลังงานชุมชนเพื่อการเรียนรู้เทคโนโลยีพลังงานชุมชน โดยจัดกิจกรรม อบรมการเพิ่มประสิทธิภาพอาสาสมัครพลังงานชุมชนเพื่อการเรียนรู้เทคโนโลยีพลังงานชุมชน ร่วมกับคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ต่อเนื่องเป็นปีที่ 2 ให้กับกลุ่มเป้าหมายเช่นเดียวกับในปีงบประมาณ 2567 แต่เป็นพื้นที่ใหม่ จำนวน 15 ครั้ง ครั้งละ 50

คน ระหว่างวันที่ 19 พฤษภาคม 2568 – 13 มิถุนายน 2568 โดยปีงบประมาณ 2567 (ปีที่ 1) ให้ความสำคัญกับการใช้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเพิ่มมูลค่าเป็นไบโอชาร์โดยใช้น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว (Waste lubricating oil, WLO) [5] เป็นเชื้อเพลิง และขยายผลในปีงบประมาณ 2568 (ปีที่ 2) ซึ่งกลุ่มวิสาหกิจชุมชนหลายแห่งได้ให้ความสนใจเพิ่มมูลค่าเป็นผลิตภัณฑ์ของชุมชนเอง ได้แก่ ไบโอชาร์หรือถ่านชีวภาพเพื่อเป็นเชื้อเพลิงโดยตรง ถ่านอัดแท่ง และไบโอชาร์เพื่องานวัสดุปรับปรุงดิน ซึ่งคณะผู้วิจัยเห็นว่า การทำผลิตภัณฑ์ควรมีการผลิตไบโอชาร์ที่มีคุณภาพคงที่ ทำซ้ำได้ จะทำให้ผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้ายมีคุณภาพคงที่ด้วย ดังนั้น คณะผู้วิจัยจึงได้ศึกษาการควบคุมกระบวนการผลิตไบโอชาร์ให้มีคุณภาพคงที่โดยบูรณาการเทคโนโลยีด้านการตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดที่ไม่ซับซ้อน ชุมชนสามารถนำไปปฏิบัติได้ อันเป็นแนวทางในการนำศาสตร์ด้านพลังงานและการตรวจวัดสู่การปฏิบัติ เพื่อให้ชุมชนอยู่ได้ด้วยตนเองอย่างยั่งยืน โดยใช้ทรัพยากรที่มีอย่างจำกัดให้คุ้มค่า การศึกษานี้ได้ใช้ชีวมวลจากชุมชนและถ่ายทอดเทคโนโลยีให้กับกลุ่มวิสาหกิจชุมชนต้นแบบและถ่ายทอ ดองค์ความรู้ให้กับชุมชน

วิธีการวิจัย

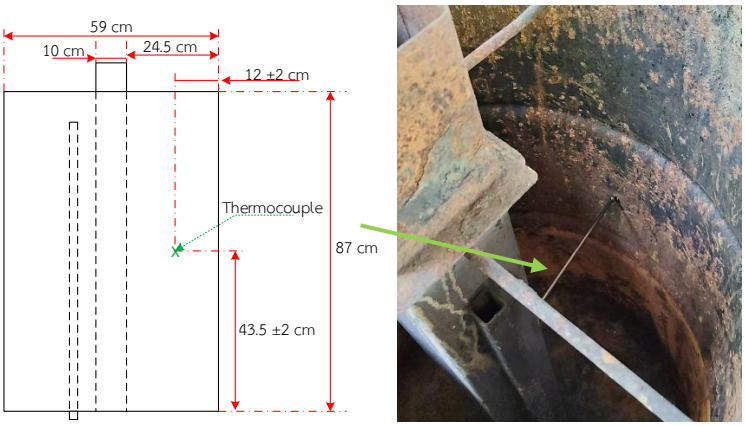
วัสดุชีวมวล ที่ใช้ในการทดสอบ 2 ชนิด คือ ไม้ไผ่เป็นวัสดุชีวมวลที่ได้จาก ตำบลจอมหมอกแก้ว อำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย และเมล็ดกาแฟคัดทิ้ง จากอำเภอแม่ฟ้าหลวง จังหวัดเชียงราย ภาพที่ 1

ลดขนาดชีวมวลไม้ไผ่เป็นชิ้นขนาด 2 นิ้ว บรรจุลงในเตาปฏิกรณ์ทอริแฟกชั่นให้เหลือช่องว่างภายในเตาเล็กน้อย และสำหรับเมล็ดกาแฟคัดทิ้งให้เหลือช่องว่างภายในเตามากขึ้นเพื่อไม่ให้มีความหนาแน่นมากเกินไป

(ก) ไม้ไผ่ (ข) เมล็ดกาแฟคัดทิ้ง

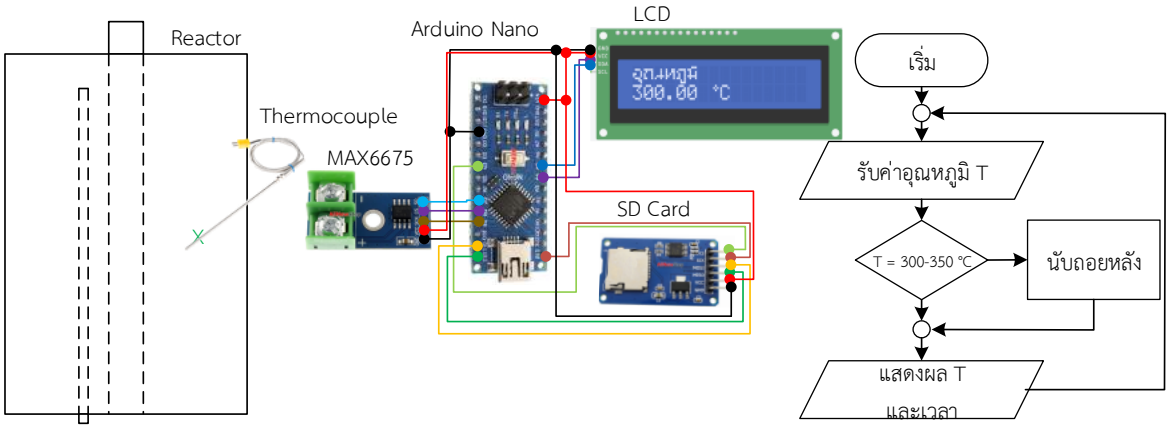
ภาพที่ 1 ชีวมวล (ก) ไม้ไผ่ และ (ข) เมล็ดกาแฟคัดทิ้ง

เตาปฏิกรณ์ทอริแฟกชั่นและการติดตั้งจุดตรวจวัด เตาปฏิกรณ์ทอริแฟกชั่นในงานวิจัยนี้ใช้เตาปฏิกรณ์ที่ใช้วัสดุจากถังเหล็กทรงกระบอกขนาด 200 ลิตร โดยมีขนาดความกว้างเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 59 เซนติเมตร (cm) สูง 87 เซนติเมตร และทำการเจาะปล่องกลางเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร (4 นิ้ว) เพื่อใช้ในการให้ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงด้านใต้เตาปฏิกรณ์ เปลวไฟจะผ่านปล่องไปยังด้านบนของปล่องและถ่ายเทความร้อนไปยังภายในเตาปฏิกรณ์ เตาปฏิกรณ์ด้านบนปิดสนิทเพื่อจำกัดอากาศ เมื่อชีวมวลได้รับความร้อนในอุณหภูมิที่มากกว่า 110 ºC [2] จะเกิดการไล่ความชื้นจากวัสดุชีวมวล เมื่อความชื้นภายในวัสดุชีวมวลหมดไปเข้าสู่ช่วงอุณหภูมิ 250-300 ºC จะปลดปล่อยสารระเหย (Volatile matter) ออกมา เกิดก๊าซเชื้อเพลิงผสม (Syngas) ที่มีคุณสมบัติเป็นเชื้อเพลิงระบายออกมายังปล่องเล็กภายในซึ่งออกแบบให้ก๊าซต่าง ๆ ไหลลงมาด้านล่าง ซึ่งสามารถนำกลับมาเผาไหม้แทนเชื้อเพลงหลักในการให้ความร้อนในตอนต้นได้ กำหนดอุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยา 300 ºC [6] และระยะเวลาที่เกิดปฏิกิริยา 60 นาที จุดตรวจวัดอุณหภูมิใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิดเค (K-Type Thermocouple) ทำการติดตั้งที่บริเวณกึ่งกลางระหว่างผิวของปล่องไอร้อนและผนังด้านข้างของเตาปฏิกรณ์ ความสูงจุดตรวจวัดโดยประมาณกึ่งหนึ่งของความสูงเตาปฏิกรณ์ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ไดอะแกรมเตาปฏิกรณ์ขนาด 200 ลิตรและจุดตรวจวัดอุณหภูมิ

ส่วนประกอบและหลักการทำงานระบบตรวจวัดอุณหภูมิ ระบบตรวจวัดอุณหภูมิใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์อาร์ดูอิโนนาโน (Arduino Nano) เชื่อมต่อกับโมดูล MAX6675 ที่ใช้ในการขยายสัญญาณไฟฟ้าที่มาจากเทอร์โมคัปเปิลชนิดเค เข้ามายังไมโครคอนโทรลเลอร์ แสดงผลไปยังจอแสดงผล LCD20X4 เพื่อทำการแสดงอุณหภูมิและทำการบันทึกข้อมูลในทุก 10 วินาที (s) ไปยังหน่วยความจำผ่านโมดูล Micro SD Card ดังแสดงใน ภาพที่ 3 และภาพที่ 4



ภาพที่ 3 วงจรการเชื่อมต่อระบบตรวจวัดอุณหภูมิ

ภาพที่ 4 ระบบตรวจวัดอุณหภูมิ

การวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงพลังงาน ได้แก่ ค่าความร้อน (Calorific value) สัดส่วนมวล (Mass yield) สัดส่วนพลังงาน (Energy yield) และสัดส่วนความหนาแน่นพลังงาน (Energy densification ratio)

ค่าความร้อน (Calorific value หรือ Heating value, MJ/kg) ทดสอบด้วยเครื่องมือ Parr Bomb calorimeters ดัง ภาพที่ 5 ค่าความร้อน (Calorific value) หรือ Heat of combustion หมายถึงปริมาณความร้อนต่อหน่วยมวลตัวอย่างที่เผาไหม้ด้วยออกซิเจนในห้องเผาไหม้ที่ปริมาตรคงที่

ภาพที่ 5 การวัดค่าความร้อน

สัดส่วนมวล หรือ ผลได้เชิงมวล (Mass yield, MY%) หาได้จากความสัมพันธ์ ดังสมการที่ (1)

$$MY(\%) = \frac{TB}{B} x100 \quad (1)$$

เมื่อ MY = Mass yield หรือ สัดส่วนมวล หรือ ผลได้เชิงมวล (MY, %)

TB = Torrefied biomass หรือ ชีวมวลผ่านการทอริแฟกชั่น หรือ ไบโอชาร์ (kg)

B = Biomass หรือ ชีวมวล (kg)

สัดส่วนพลังงาน หรือ ผลได้เชิงพลังงาน (Energy yield, %) หาได้จากความสัมพันธ์ ดังสมการที่ (2)

$$EY(\%) = \frac{HV_{TB}}{HV_B} xMY \quad (2)$$

เมื่อ EY = Energy yield หรือ สัดส่วนมวล หรือ ผลได้เชิงมวล (MY, %)

HV_{TB} = Heating value of torrefied biomass หรือ ค่าความร้อนของชีวมวลผ่านการทอริแฟกชั่น หรือ ค่าความร้อนไบโอชาร์ (MJ/kg)

HV_B = Heating value of biomass หรือ ค่าความร้อนของชีวมวล (MJ/kg)

สัดส่วนความหนาแน่นพลังงาน (Energy densification ratio, EDS) หาได้จากความสัมพันธ์ ดังสมการที่ (3)

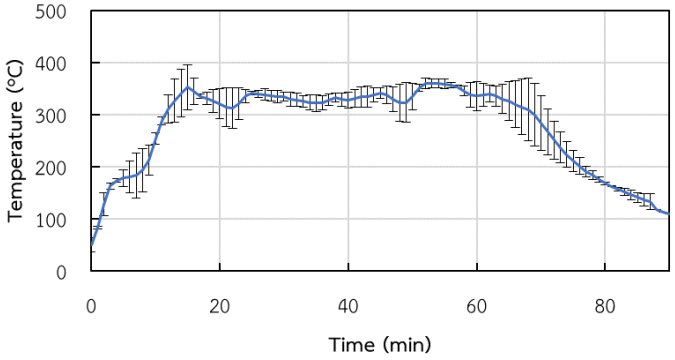
$$EDS = \frac{HV_{TB}}{HV_B} \quad (3)$$

เมื่อ EDS = Energy densification ratio หรือ สัดส่วนความหนาแน่นพลังงาน

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

ผลการดำเนินการของเตาปฏิกรณ์ทอริแฟกชั่น ซึ่งทำการทดลองวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร 2 ชนิดได้แก่ ไม้ไผ่และเมล็ดกาแฟคัดทิ้ง โดยไม้ไผ่ที่ทำการผลิตเป็นไบโอชาร์นั้นถูกลดขนาดประมาณ 2 นิ้ว บรรจุลงในเตาปฏิกรณ์ให้เหลือ

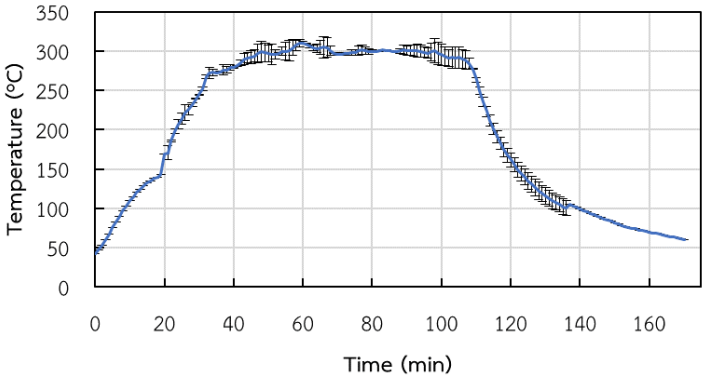
ช่องว่างไว้เล็กน้อย ขั้นตอนถัดไปให้ความร้อน ใช้การบันทึกข้อมูลอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในเตาปฏิกรณ์ โดยให้ควบคุมเกิดปฏิกิริยาอยู่ที่ 350 °C ระยะเวลาที่เกิดปฏิกิริยา 60 นาที (min) ดังแสดงใน ภาพที่ 6



ภาพที่ 6 อุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในเตาปฏิกรณ์ของชีวมวลไม้ไผ่

เมล็ดกาแฟที่ทำการผลิตเป็นไบโอชาร์นั้นใช้เมล็ดกาแฟคัดทิ้งทำการบรรจุลงในเตาปฏิกรณ์บรรจุลงในเตาปฏิกรณ์ให้เหลือช่องว่างไว้เล็กน้อย ให้ความร้อนแล้วบันทึกข้อมูลเช่นเดียวกันไม้ไผ่ โดยให้ควบคุมอุณหภูมิเกิดปฏิกิริยาอยู่ที่ 300 °C ระยะเวลาที่เกิดปฏิกิริยา 60 นาที (min) ดังแสดงใน ภาพที่ 7

การตรวจวัดอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ซึ่งใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิดเค (K-Type Thermocouple) ติดตั้งที่บริเวณกึ่งกลางระหว่างผิวของปล่องไอร้อนและผนังด้านข้างของเตาปฏิกรณ์ โดยอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์จะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อถึงอุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยาที่กำหนด 300 °C และ 350 °C ผู้ปฏิบัติงานจะควบคุมอุณหภูมิโดยปรับเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าโดยการเพิ่ม ลด เชื้อเพลิงให้อยู่ในช่วงอุณหภูมิ 300±10 °C และ 350±10 °C เมื่อครบตามระยะเวลาที่เกิดปฏิกิริยา 60 นาที จะหยุดเพิ่มเชื้อเพลิงและปล่อยให้เย็นลง



ภาพที่ 7 อุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในเตาปฏิกรณ์ของชีวมวลเมล็ดกาแฟคัดทิ้ง

ค่าความร้อน หรือ Heat of combustion ที่ได้จากเครื่องมือ Bomb calorimeter เป็นค่าความร้อนแบบกรอส (Gross calorific value หรือ Gross heat of combustion หรือ Higher heating value, HHV) โดยค่าความร้อนของชีวมวลและไบโอชาร์ที่ได้จากปฏิกรณ์ทอริแฟกชั่นดัง ภาพที่ 8 พบว่า มีค่าความร้อนของไบโอชาร์ไม้ไผ่และเมล็ดกาแฟมีค่า

30.24±2.74 MJ/kg และ 33.67±1.27 MJ/kg ตามลำดับ จะเห็นว่าสัดส่วนมวลของการผลิตไบโอชาร์ไม้ไผ่และเมล็ดกาแฟคัดทิ้งมีค่า 32.67 และ 42.00 % ตามลำดับ ไบโอชาร์ไม้ไผ่มีสัดส่วนพลังงานเป็น 53.70 % และ 68.30 % สำหรับไบโอชาร์เมล็ดกาแฟคัดทิ้ง และสัดส่วนความหนาแน่นพลังงานของไบโอชาร์ไม้ไผ่และไบโอชาร์เมล็ดกาแฟคัดทิ้ง เป็น 1.64 และ 1.70 ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงพลังงานข้างต้นแสดงดังตารางที่ 1

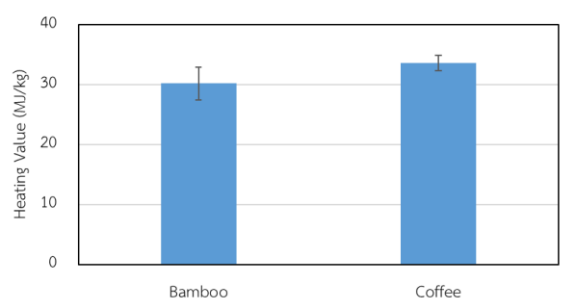
(ก) ไบโอชาร์ไม้ไผ่ (ข) ไบโอชาร์เมล็ดกาแฟคัดทิ้ง

ภาพที่ 8 ไบโอชาร์ (ก) ไบโอชาร์ไม้ไผ่ (ข) ไบโอชาร์เมล็ดกาแฟคัดทิ้ง

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงพลังงาน

คุณสมบัติ	ประเภท	ผลการทดลอง
ค่าความร้อน (MJ/kg)	ชีวมวลไม้ไผ่	18.40±1.88
	ไบโอชาร์ไม้ไผ่	30.24±2.74
ค่าความร้อน (MJ/kg)	ชีวมวลเมล็ดกาแฟคัดทิ้ง	19.70±1.65
	ไบโอชาร์เมล็ดกาแฟคัดทิ้ง	33.67±1.27
สัดส่วนมวล (%)	ไบโอชาร์ไม้ไผ่	32.67
	ไบโอชาร์เมล็ดกาแฟคัดทิ้ง	40.00
สัดส่วนพลังงาน (%)	ไบโอชาร์ไม้ไผ่	53.70
	ไบโอชาร์เมล็ดกาแฟคัดทิ้ง	68.36
สัดส่วนความหนาแน่นพลังงาน	ไบโอชาร์ไม้ไผ่	1.64
	ไบโอชาร์เมล็ดกาแฟคัดทิ้ง	1.70

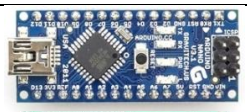
ค่าความร้อนของไบโอชาร์ที่อุณหภูมิ 300 °C สอดคล้องกับการศึกษาของ [6] ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส เกิดการสลายตัวอย่างสมบูรณ์ องค์ประกอบที่เหลือจะเป็นลิกนินซึ่งมีค่าความร้อนสูงถึง 23.26-25.58 MJ/kg ส่วนเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสมีค่าความร้อนต่ำกว่าลิกนิน โดยมีค่าประมาณ 18.6 MJ/kg [7] ณ สภาวะการทอริแฟกชั่นของชีวมวลไม้ไผ่ที่ 300 °C นี้ ไบโอชาร์มีค่าความร้อนเป็น 30.24 และ 33.67 MJ/kg สำหรับไบโอชาร์เมล็ดกาแฟคัดทิ้งที่อุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาเป็น 350 °C ดังภาพที่ 9 ซึ่งเป็นการเพิ่มคุณภาพให้สูงขึ้น มีคุณสมบัติเหมาะสมกับการนำไปเป็นเชื้อเพลิง เมื่อเปรียบเทียบกับการทอริแฟกชั่นไม้ไผ่ที่อุณหภูมิเดียวกันที่ 300 °C ได้ค่าความร้อนเป็น 30.00 MJ/kg โดยไม้ไผ่มีค่าความร้อน 19.0 MJ/kg [6] ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการทดลองจากการศึกษานี้



ภาพที่ 9 ค่าความร้อนของไบโอชาร์ไม้ไผ่และไบโอชาร์เมล็ดกาแฟคัดทิ้ง

ระบบตรวจวัดอุณหภูมิที่ติดตั้งสำหรับเตาปฏิกรณ์นี้มีต้นทุนประมาณ 695 บาท ดังตารางที่ 2 ซึ่งวิสาหกิจชุมชนสามารถนำไปใช้เพื่อการควบคุมคุณภาพกระบวนการทอริแฟกชั่นเพื่อผลิตไบโอชาร์ได้

ตารางที่ 5 ต้นทุนอุปกรณ์การตรวจวัด

ส่วนประกอบ		ราคา (บาท)
1. Arduino NANO		85
2. LCD 20X4 I^2C		135
3. MAX6675		110
4. K-type thermocouple		80
5. โมดูลบันทึกข้อมูลลง Micro SD Card		35
6. Adapter 5 V + mini USB		150
7. กล่องกันน้ำเอนกประสงค์ 4”X6”		100
รวม		695

สรุปผลการวิจัย

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหากระบวนวิธีการควบคุมคุณภาพในการผลิตไบโอชาร์ให้มีคุณภาพคงที่ ทำซ้ำได้ จะทำให้ผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้ายมีคุณภาพคงที่ด้วย โดยบูรณาการเทคโนโลยีด้านการตรวจวัดที่ไม่ซับซ้อน ต้นทุนไม่สูง ชุมชนสามารถนำไปปฏิบัติได้จริง อันเป็นแนวทางในการนำศาสตร์ด้านพลังงานและการตรวจวัดสู่การปฏิบัติ เพื่อให้ชุมชนอยู่ได้ด้วยตนเองอย่างยั่งยืน โดยใช้ทรัพยากรที่มีอย่างจำกัด ให้มีความคุ้มค่า โดยใช้ชีวมวลจากชุมชน 2 ชนิด คือ ไม้ไผ่และเมล็ดกาแฟคัดทิ้ง โดยใช้เตาปฏิกรณ์ทอริแฟกชั่นที่ชุมชนสามารถนำไปใช้ได้ ซึ่งพบว่าการผลิตไบโอชาร์จากเมล็ดกาแฟคัดทิ้ง และไม้ไผ่ ใช้อุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยาที่ 300 °C และ 350 °C ตามลำดับ ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา 60 นาที สามารถผลิตไบโอชาร์ที่มีคุณสมบัติด้านความร้อนสอดคล้องกับการศึกษาอื่น ๆ และการศึกษานี้ได้นำสู่กระบวนการถ่ายทอดเทคโนโลยีให้กับกลุ่มวิสาหกิจชุมชนต้นแบบและถ่ายทอดองค์ความรู้ให้กับชุมชนต่าง ๆ การศึกษานี้สามารถสร้างความเชื่อมั่นในคุณภาพไบโอชาร์ที่คงที่ วิสาหกิจชุมชนบางแห่งได้ขยายผลในการยกระดับการตลาดถ่านอัดแท่ง และขยายผลนำไบโอชาร์ไปใช้ในงานวัสดุปรับปรุงดินต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย ที่สนับสนุนงบประมาณเข้าร่วมประชุมวิชาการ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย อนุเคราะห์เครื่องมือการหาค่าความร้อน สำนักงานพลังงานจังหวัดเชียงราย สนับสนุนงบประมาณการจัดกิจกรรมสัมมนาเชิงปฏิบัติการ และ วิสาหกิจชุมชนเกษตรสร้างสรรค์ 99 อำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย สนับสนุนสถานที่ในการถ่ายทอดเทคโนโลยี

เอกสารอ้างอิง

[1] Andreas Hornung. (2014). **Transformation of Biomass - Theory to Practice**. John Wiley & Sons, Ltd. doi:10.1002/9781118693643

[2] Bimal Acharya, Idris Sule, และ Animesh Dutta. (2012). **A review on advances of torrefaction technologies for biomass processing**. Biomass Conversion and Biorefinery, 2, 349-369.

[3] Emanuela Peduzzi, Guillaume Boissonnet, Geert Haarlemmer, Capucine Dupont, และ François Maréchal. (2014). **Torrefaction modelling for lignocellulosic biomass conversion process**. Energy, 70, 58-67.

[4] Esteves Bruno, Sen Umut, และ Pereira Helena. (2023). **Influence of Chemical Composition on Heating Value of Biomass: A Review and Bibliometric Analysis**. Energies, 16(10), 4226.

[5] Prabir Basu. (2010). **Biomass Gasification and Pyrolysis Practical Design**. UK: Elsevier Inc.

[6] Yang Wei, Wu Shengji, Wang Hui, Ma Pengyu, Shimanouchi Toshiniri, Kimura Yukitaka, และ Zhou Jie. (2017). **Effect of Wet and Dry Torrefaction Process on Fuel Properties of Solid Fuels Derived from Bamboo and Japanese Cedar**. BioResources, 12(4), 8629-8640.

[7] ปรานต์ เมฆอากาศ, วิลาสินี ศรีสุวรรณ, สิทธิกฤต เหล็กพูล, จรัญ คนแรง, ปรศักดิ์ งามสมภาค, กมลชนก สว่างศิลป์, . . . นงนุช ศรีเล็ก. (2567). **การศึกษาการไพโรไลซิสชีวมวลเพื่อผลิตไบโอชาร์ด้วยน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว**. ประชุมวิชาการวิจัยและนวัตกรรมสร้างสรรค์ ครั้งที่ 10. เชียงใหม่ ประเทศไทย.