

คุณลักษณะทางความร้อนของเตาเผาถ่านชีวภาพแบบแอนิลาและปัจจัยที่ส่งผลต่อการผลิตถ่านชีวภาพ

Thermal Characteristics of Anila-type Biochar Kiln and Factors Affecting Biochar Production

ชัยพร มณีชัย¹, ทิพาพร คำแดง^{1*}, นำพร ปัญญาใหญ่¹, ธนศิษฐ์ วงศ์ศิริอำนวย¹ และ ประชา ยืนยงกุล²

¹สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้

63 หมู่ 4 ตำบลหนองหาร อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 50290

²สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

128 ถนนห้วยแก้ว ตำบลช้างเผือก อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300

Chaiyaphorn maneechat¹, Tipapon Khamdaeng^{1*}, Numpon Panyoyai¹, Thanasit Wongsiriamnuay¹ and Pracha Yeunyongkul²

¹Division of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering and Agro-Industry, Maejo University

63 Moo 4, Nong Harn, San Sai, Chiang Mai, Thailand, 50290

²Division of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna

128 Huay Kaew Road, Chang Phueak, Muang, Chiang Mai, Thailand, 50300

*ผู้รับผิดชอบบทความ: tipapon@mju.ac.th เบอร์มือถือ 08-5039-0883

Received: 29 September 2021, Revised: 18 November 2021, Accepted: 17 March 2022

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือเพื่อศึกษาการจำลองสภาพการกระจายอุณหภูมิในเตาเผาถ่านชีวภาพแบบหุ้มฉนวนขนาด 50 100 และ 200 ลิตร โดยใช้เตาเผาแบบแอนิลา ศึกษาผลของชนิดวัสดุชีวมวล ขนาดเตา และเวลาที่ใช้ในการแยกสลายด้วยความร้อนที่มีต่อการกระจายอุณหภูมิในเตาเผาถ่านชีวภาพแบบหุ้มฉนวน ปริมาณถ่านชีวภาพ และสมบัติของถ่านชีวภาพ และหาความสัมพันธ์ของตัวแปรในการผลิตถ่านชีวภาพ ซึ่งการออกแบบเตาเผาถ่านชีวภาพจะมีขนาดรูเจาะแกนกลาง 3.17 มิลลิเมตร จำนวน 15 24 และ 44 รูเจาะตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่าเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 200 ลิตร ที่ใช้ชีวมวลเป็นแกลบให้ปริมาณถ่านชีวภาพสูงที่สุดเท่ากับ 51.1 เปอร์เซ็นต์ โดยจากการจำลองสภาพการกระจายอุณหภูมิพบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง คือ 459.4 ± 184.9 468.7 ± 100.3 และ 353.1 ± 97.8 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าทดสอบให้ความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 6.5 ± 6.2 3.9 ± 4.1 และ 0.9 ± 0.9 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และจากสมการสหสัมพันธ์พบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยในเตาเผาไม่ได้มีผลต่อปริมาณของถ่านชีวภาพและค่าความเป็นกรด-ด่างของถ่านชีวภาพอย่างมีนัยสำคัญ แต่กลับเป็นตัวแปรมิติของเตา ได้แก่ A/Ap และ L/D เวลาที่ใช้ในการแยกสลายด้วยความร้อน และชนิดของชีวมวล ที่ส่งผลต่อปริมาณของถ่านชีวภาพ นอกจากนี้ยังพบว่า A/Ap L/D และเวลาที่ใช้ในการแยกสลายด้วยความร้อน เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความเป็นกรด-ด่างของถ่านชีวภาพด้วย จากผลการวิเคราะห์นี้ทำให้ทราบถึงลักษณะการกระจายอุณหภูมิของเตาเผาที่มีขนาดแตกต่างกันและปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อปริมาณถ่านชีวภาพและค่าความเป็นกรด-ด่างของถ่านชีวภาพที่ได้จากกระบวนการผลิต

คำสำคัญ: การจำลองทางความร้อน เตาเผาแบบแอนิลา ถ่านชีวภาพ สหสัมพันธ์

Abstract

The objectives of this research were to study the temperature distribution simulation in insulated Anila-type biochar kiln with size of 50, 100 and 200 liters and to study the effects of biomass material types, kiln size, and pyrolysis time on temperature distribution in the insulated biochar kiln, biochar yield, and biochar property. The correlations between the variables related to the biochar production were furthermore investigated. The core of the kiln had a puncture diameter of 3.17 mm, number of the puncture of 15, 24 and 44, respectively. The results showed that a 200-liter biochar kiln with biomass as the husk rice had the highest biochar yield of 51.1%. Based on the simulation results, the average temperature distribution at pyrolysis time of 1, 2 and 3 hours was 459.4 ± 184.9 °C, 468.7 ± 100.3 °C and 353.1 ± 97.8 °C, respectively, when compared with the experiment results the error was 6.5 ± 6.2 , 3.9 ± 4.1 and $0.9 \pm 0.9\%$, respectively. From the correlation equation, it was found that average temperature inside the kiln had no significant effect on the biochar yield and acidity-alkalinity. On the other hand, the kiln dimensional parameters, i.e. A/Ap, L/D, pyrolysis time and biomass material type had an effect on the biochar yield. Furthermore, the A/Ap, L/D and pyrolysis time had an effect on the acidity-alkalinity of biochar as well. From the results of this research, the temperature distribution characteristics of different kiln sizes and conditions affecting the biochar yield and acidity-alkalinity obtained from the biochar production were revealed.

Keywords: Thermal Simulation, Anila Stove, Biochar, Correlation

1. บทนำ

ปัจจุบันโลกกำลังประสบปัญหาด้านความมั่นคงทางด้านอาหาร และความต้องการด้านพลังงาน ซึ่งทั้งหมดนี้มีความเกี่ยวข้องกับการจัดการทรัพยากรที่จะนำมาช่วยแก้ไขปัญหาเหล่านี้ ในปัจจุบันเทคโนโลยีที่เหมาะสมในการแก้ปัญหาดังกล่าวไปพร้อม ๆ กันคือ เทคโนโลยีถ่านชีวภาพ (Biochar) ถ่านชีวภาพเป็นถ่านที่ผลิตจากชีวมวลหรือสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้จากธรรมชาติ เช่น เศษวัสดุทางการเกษตร ไม่ว่าจะเป็น ชังข้าวโพด (1) เปลือกกล้วย กะลากาแฟ (2,3) นำมาผ่านกระบวนการเผาไหม้ที่มีการควบคุมอุณหภูมิ และควบคุมอากาศให้เข้าไปเผาไหม้น้อยที่สุดซึ่งกระบวนการเผาไหม้นี้เรียกว่า การแยกสลายด้วยความร้อน (Pyrolysis) (4) มีการดำเนินการอยู่ 2 วิธี คือ การแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้า (Slow Pyrolysis) และการแยกสลายด้วยความร้อนแบบเร็ว (Fast Pyrolysis) (5,6) โดยงานวิจัยนี้จะเน้นไปที่การแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้าเนื่องจากจะได้ผลผลิตถ่านชีวภาพมากกว่าการแยกสลายด้วยความร้อนแบบเร็ว ซึ่งเป็นการเผาไหม้ด้วยการแยกสลายสารอินทรีย์แบบช้า ๆ ใช้ระยะเวลาเป็นชั่วโมง และใช้อุณหภูมิระหว่าง 350-600 องศา

เซลเซียส (7) ในสภาวะที่มีอากาศน้อยที่สุด

เตาแบบแอนิลา (Anila Stove) เป็นเตาประเภทหนึ่งที่ใช้ในการผลิตถ่านชีวภาพ ซึ่งถูกออกแบบให้มีแกนกลางที่ใช้เผาไหม้เชื้อเพลิงอยู่ด้านในและมีพื้นที่สำหรับบรรจุชีวมวลอยู่ภายในที่ถูกแยกออกจากแกนกลาง ด้านล่างของแกนกลางจะมีช่องให้อากาศสามารถผ่านเข้าออกได้ เมื่อให้ความร้อนแก่แกนกลางด้วยเชื้อเพลิงจนแกนกลางร้อนขึ้น (8,9) ส่งผลให้อุณหภูมิในส่วนที่บรรจุชีวมวลมีอุณหภูมิที่สูงขึ้น โดยกระบวนการดังกล่าวใช้เวลาทั้งสิ้นประมาณ 2 – 3 ชั่วโมง (10) ซึ่งเตาแบบแอนิลาได้ถูกนำมาวิจัยเพื่อพัฒนาปรับปรุงและนำไปใช้ในพื้นที่เกษตรกรรม ครุภัณฑ์ที่มีสวน ไร่ นา เป็นการจัดการวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร แปรสภาพให้เป็นถ่านชีวภาพและนำไปใช้ประโยชน์ได้

Cho et al. (11) ศึกษาถ่านชีวภาพที่ได้จากกากกาแฟมาทดสอบเป็นตัวดูดซับในการกำจัดโลหะหนักและสารอินทรีย์ต่าง ๆ ใช้เตาเผาชีวมวลแบบแก๊สซิฟิเคชันในการผลิตถ่านชีวภาพมีเป้าหมายเพื่อใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรในการปรับปรุงคุณภาพของดินแทนการใช้สารเคมีสามารถปรับค่า pH ของดินจาก 6 เป็น 7 ได้และดินที่

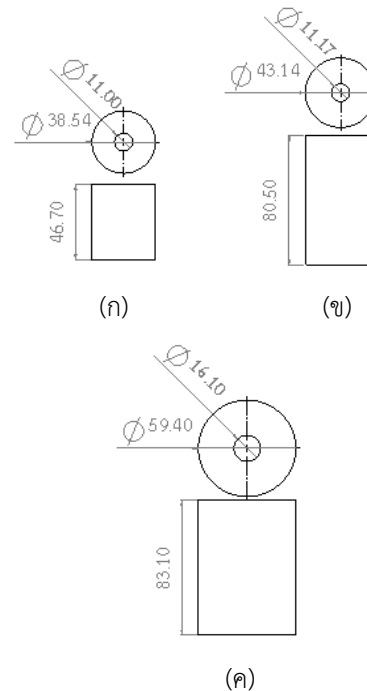
ได้มีความเสถียรมากกว่าการใช้ปูนขาวที่อัตราส่วนเดียวกัน Panyoyai et al. (12) ศึกษาออกแบบเตาเผาถ่านชีวภาพที่มีการเจาะแกนกลางที่แตกต่างกัน เพื่อให้ได้ผลผลิตของถ่านชีวภาพในปริมาณสูงสุด ทำการจำลองสภาพการกระจายอุณหภูมิด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และตรวจสอบความถูกต้องของการกระจายอุณหภูมิโดยการเปรียบเทียบกับผลการทดลอง จากผลการจำลองสามารถเผยให้เห็นถึงลักษณะของการกระจายตัวของอุณหภูมิที่มีผลต่อการผลิตและคุณภาพของถ่านชีวภาพ Panyoyai et al. (13) ศึกษาความแตกต่างของวัสดุแต่ละประเภทที่นำมาผลิตถ่านชีวภาพ คือ ชังข้าวโพด แกลบ และใบลำไย โดยใช้เตาเผาขนาด 50 ลิตร ขนาดรูเจาะ 6.35 มิลลิเมตร ผลการทดลองทำให้ทราบว่า ผลผลิตที่ได้เท่ากับ 15.7 24.3 และ 11.4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สำหรับ ชังข้าวโพด แกลบ และใบลำไย ตามลำดับ Kanouo et al. (14) ศึกษาเตาเผาแบบ pilot-scale retort kiln โดยใช้ชีวมวล 2 ชนิด คือ ชังข้าวโพดและเปลือกถั่วลิสง ประสิทธิภาพการผลิตของเตามีความแตกต่างกันอยู่ในช่วงระหว่าง 33-68 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับ 10-20 เปอร์เซ็นต์ที่ได้จากเตาเผาแบบดั้งเดิม และมีคุณสมบัติเป็นไปตามเกณฑ์ของ European Biochar Certificate (EBC) และ International Biochar Initiative (IBI) Wijitkosum et al. (15) ศึกษาการผลิตถ่านชีวภาพที่ใช้เทคโนโลยีต้นทุนต่ำเพื่อเกษตรกรในท้องถิ่น โดยวัสดุที่ใช้ในการผลิตคือ ลำต้นมันสำปะหลังและชังข้าวโพด พบว่าลำต้นมันสำปะหลังให้พื้นที่ผิวจำเพาะ (Brunauer-Emmett-Teller, BET) มากที่สุดและในการผลิตถ่านชีวภาพชังข้าวโพดให้ผลผลิตสูงสุด

จากการศึกษางานวิจัยข้างต้นพบว่าชนิดวัสดุชีวมวล ลักษณะเตา และอุณหภูมิในกระบวนการผลิต ล้วนเป็นปัจจัยในการผลิตถ่านชีวภาพ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตถ่านชีวภาพ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะการกระจายอุณหภูมิในเตาเผาถ่านชีวภาพที่มีขนาดแตกต่างกัน และหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในเตาเผาถ่านชีวภาพ ชนิดวัสดุชีวมวล เวลาที่ใช้ในการแยกสลายด้วยความร้อน ที่มีต่อปริมาณถ่านชีวภาพ และสมบัติของถ่านชีวภาพ

2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 รูปแบบเตาเผาถ่านชีวภาพ

เตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 50 100 และ 200 ลิตร ที่ใช้ในการทดลองหุ้มฉนวนด้วยเซรามิคไฟเบอร์ โดยทุกขนาดเตาทำจากเหล็กกล้าคาร์บอน มีความหนา 2 มิลลิเมตร ความสูงและขนาดรูเจาะแกนกลางเตาเพื่อใส่ท่อแกนกลางแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 เตาเผาถ่านชีวภาพขนาด (ก) 50 ลิตร (ข) 100 ลิตร และ (ค) 200 ลิตร (ขนาดมิติหน่วยเป็นมิลลิเมตร)

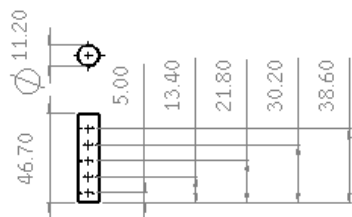
2.2 แกนกลางของเตาเผาถ่านชีวภาพ

จากรูปที่ 2 แสดงแกนกลางของเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 50 100 และ 200 ลิตร ที่ใช้ในการทดลอง ทำจากเหล็กกล้าคาร์บอน มีความหนา 2 มิลลิเมตร และมีขนาดรูเจาะแกนกลาง 3.17 มิลลิเมตร จำนวนรูเจาะเท่ากับ 15 24 และ 44 รูเจาะ ตามลำดับ

2.3 การทดสอบเตาเผาถ่านชีวภาพ

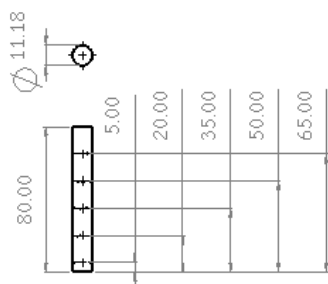
ชีวมวลที่ใช้ในการทดสอบมีทั้งหมด 5 ชนิด คือ ชังข้าวโพด แกลบ เปลือกลำไย กิ่งไม้ลำไย และกะลาจากแพะ เริ่มต้นการทดสอบโดยการนำชีวมวลไปตากแดดเพื่อลดความชื้นให้มีความชื้นต่ำกว่า 10 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก นำชีวมวลที่จะใช้ในการทดสอบใส่ลงไปในเตาเผาถ่านชีวภาพ จนเต็ม ใช้เชื้อเพลิงอัดแท่งจำนวน 3 กิโลกรัม และชังข้าวโพดแห้งอีก 1 กิโลกรัม เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ ใส่ลงไปใน

แกนกลางของเตาเผา จุดไฟจากทางด้านบนเตา ใช้เวลาในการเผาไหม้ทั้งหมด 3 ชั่วโมง (6) ชีวมวลภายในเตาจะเกิดการแยกสลายด้วยความร้อนและคายแก๊สออกมาเผาไหม้เชื้อเพลิงที่อยู่ในแกนกลาง จนการลุกไหม้ที่เกิดจากแก๊สดับลงปล่อยทิ้งไว้จนเตาเย็นลงจากนั้นจึงเปิดฝาเตาเพื่อนำถ่านชีวภาพออกจากเตาและทำการคัดแยกหาปริมาณของชีวมวลที่เปลี่ยนเป็นถ่าน

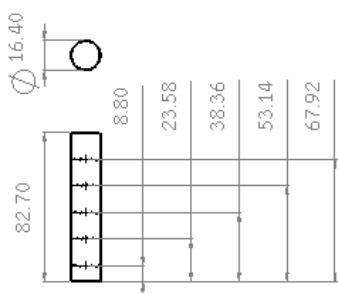


(ก)

รูปที่ 2 (หน้าถัดไป)



(ข)



(ค)

รูปที่ 2 แกนกลางของเตาเผาถ่านชีวภาพที่มีจำนวนรูเจาะ (ก) 15 รูเจาะ (ข) 24 รูเจาะ และ (ค) 44 รูเจาะ (ขนาดมิติหน่วยเป็นมิลลิเมตร)

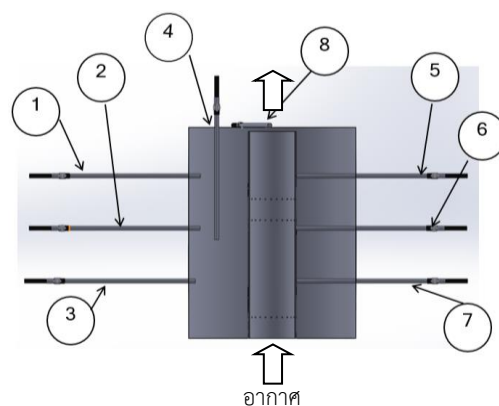
ชีวภาพ นำถ่านชีวภาพที่ได้ไปชั่งน้ำหนักเพื่อนำไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ปริมาณถ่านชีวภาพ

จากนั้นนำถ่านชีวภาพที่ได้ไปวิเคราะห์หาค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ตามมาตรฐาน DIN ISO 10390 ใช้อัตราส่วน

1:5 (น้ำหนักต่อปริมาตร) ของถ่านชีวภาพต่อสารละลาย CaCl_2 0.01 โมลาร์ โดยนำมาเขย่าเป็นเวลา 60 นาที ที่ความเร็วรอบ 180 รอบต่อนาที

2.4 การทดสอบการกระจายอุณหภูมิ

ทำการวัดอุณหภูมิในระหว่างกระบวนการทดสอบทั้งหมด 8 จุด โดยใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ที่มีช่วงการวัดอุณหภูมิ 0-1,000 องศาเซลเซียส และมีค่าความผิดพลาด ± 2.5 องศาเซลเซียส ติดตั้งที่ตำแหน่งตามแนวแกนเตา (ด้านบน ตรงกลาง และด้านล่างเตา) และตามแนวรัศมี (ตำแหน่งแกนกลาง ตรงกลาง และผนังเตาด้านใน) โดยระยะของเทอร์โมคัปเปิลที่ติดตั้งตามแนวแกนเท่ากับ 1/4 2/4 และ 3/4 ของความสูงเตาแต่ละขนาด ตำแหน่งที่ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลภายในเตาแสดงในรูปที่ 3 โดยแบ่งเป็นวัดอุณหภูมิภายในเตา 7 จุด (ตำแหน่งที่ 1-7) และอุณหภูมิเปลวไฟ 1 จุด (ตำแหน่งที่ 8) ซึ่งอุณหภูมิภายในเตาตำแหน่งที่ 1-7 จะนำไปใช้เปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ได้จากการจำลองสภาพและคำนวณเป็นค่าเฉลี่ยเพื่อใช้ในการสร้างสมการสหสัมพันธ์ต่อไป



รูปที่ 3 ตำแหน่งติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล

อุณหภูมิในระหว่างกระบวนการทดสอบจะถูกบันทึกไว้โดยใช้อุปกรณ์ Wisco Online Datalogger OD04 โดยจะเก็บอุณหภูมิทุก ๆ 2 วินาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จนกระทั่งจบการทดสอบ และเลือกอุณหภูมิจากตำแหน่งต่าง ๆ ที่วัดค่าได้ที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของการกระจายอุณหภูมิในแต่ละช่วงเวลา และนำไปเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ได้จากการจำลองสภาพ

2.5 การจำลองสภาพด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์

ทำการจำลองสภาพภายใต้เงื่อนไขการถ่ายเทความร้อน



ในสภาวะคงตัว มีการถ่ายเทความร้อนจากเชื้อเพลิงผ่านผนังท่อแกนกลางด้วยการนำความร้อน และมีการส่งถ่ายความร้อนจากผนังท่อแกนกลางด้านในไปสู่ชีวมวลในเตาด้วยการนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน ส่วนผนังเตาไม่มีการสูญเสียความร้อนเนื่องจากเตามีการหุ้มฉนวน จำลองสภาพการถ่ายเทความร้อนแบบแกนสมมาตรและแสดงผลการกระจายอุณหภูมิแบบ 2 มิติ ตัวแปรในการจำลองสภาพ ได้แก่ ชนิดวัสดุชีวมวลและขนาดของเตาเผา ที่เวลาที่ใช้ในการแยกสลายด้วยความร้อน 1 2 และ 3 ชั่วโมง ขั้นตอนการจำลองสภาพคือใช้แบบจำลองที่เขียนโดยโปรแกรม SolidWorks จากนั้นใช้โปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในการจำลองสภาพ กำหนดเงื่อนไขต่าง ๆ และวิเคราะห์การกระจายของอุณหภูมิ โดยกำหนดให้แบบจำลองมีการส่งถ่ายความร้อนแบบคงตัว มีการนำความร้อนจากผนังท่อแกนกลางด้านในไปสู่ผนังท่อแกนกลางด้านนอก มีการนำพาความร้อนในเตาเผา และมีการพาความร้อนแบบอิสระออกสู่สิ่งแวดล้อม ส่วนเงื่อนไขขอบ กำหนดให้อุณหภูมิผนังท่อแกนกลางด้านนอกมีค่าเท่ากับอุณหภูมิภายในเตาเผาตามแนวแกนที่ตำแหน่งแกนกลาง อุณหภูมิที่ได้จากการจำลองสภาพจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับอุณหภูมิของกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้าในเตาเผาถ่านชีวภาพที่ได้จากการทดสอบเพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองที่ใช้ในการจำลองสภาพ

2.6 วิธีการหาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตถ่านชีวภาพ

วิธีการหาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตถ่านชีวภาพจากชีวมวลทั้ง 5 ชนิด คือ ช้างข้าวโพด แกลบ เปลือกกล้วย กิ่งไม้ลำไย และกะลาปากแพ โดยการศึกษาปัจจัยของอุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต พื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อนของแกนกลางต่อพื้นที่รูเจาะของแกนกลาง (A/Ap) ความสูงของเตาเผาต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเตา (L/D) เวลาที่ใช้ในการแยกสลายด้วยความร้อน และค่าความร้อนของชีวมวล ที่มีต่อปริมาณถ่านชีวภาพและค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) วางแผนการทดลองโดยศึกษาปัจจัยที่ระดับต่ำและระดับสูง ระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองแสดงในตารางที่ 1 และวิเคราะห์หาแนวโน้มความสัมพันธ์ของข้อมูลแบบการวิเคราะห์แบบถดถอย เพื่อหาปัจจัยที่มีความสำคัญในการผลิตถ่านชีวภาพจากชีวมวลทั้ง 5 ชนิด

ตารางที่ 1 ปัจจัยและระดับที่ส่งผลต่อการผลิตถ่านชีวภาพ

Factors	Levels	
	Low	High
Temp, X_1 (°C)	126.85 (12)	690.94 (12)
A/Ap, X_2	274.53	296
L/D, X_3	1.302	1.86
Time, X_4 (hr)	1	3
HHV, X_5 (MJ/kg)	8.37 (6)	28.95 (6)

2.7 การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของตัวแปร

การออกแบบการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรในการผลิตถ่านชีวภาพจากชีวมวลทั้ง 5 ชนิด มีปัจจัยสำหรับการศึกษาร่วมกันด้วย อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต (X_1) พื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อนของแกนกลางต่อพื้นที่รูเจาะของแกนกลาง, A/Ap, (X_2) ความสูงของเตาเผาต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเตา, L/D, (X_3) เวลาที่ใช้ในการแยกสลายด้วยความร้อน (X_4) และค่าความร้อนของชีวมวล (X_5) ตามลำดับ

ผลจากการทดลองสามารถนำมาสร้างสมการเชิงเส้น เพื่อใช้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยทั้ง 5 และการตอบสนอง (Y) สามารถคำนวณปริมาณถ่านชีวภาพ (Y_1) ค่าความเป็นกรด-ด่าง, pH, (Y_2) ตามสมการที่ (1) คือ

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_5 X_5 \quad (1)$$

โดยที่ Y คือ ค่าทำนายการตอบสนอง; β_0 เป็นค่าคงที่; X_1, X_2, X_3, X_4, X_5 เป็นตัวแปรอิสระ; $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$ เป็นค่าสัมประสิทธิ์เชิงเส้นซึ่งประสิทธิภาพของการทำนายผลผลิตสูงสุดโดยสมการเชิงเส้น จะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2)

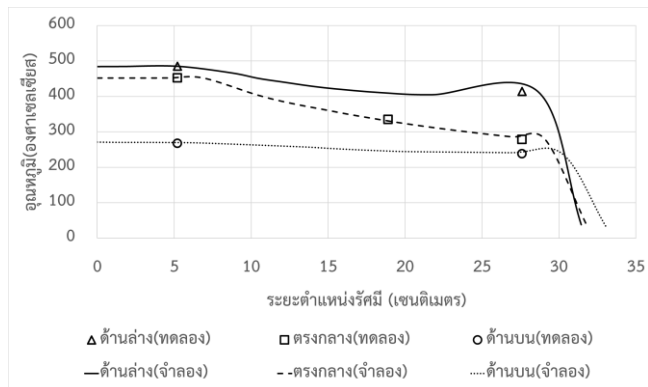
3. ผลการวิจัยและอภิปราย

ทำการทดสอบหาการกระจายอุณหภูมิภายในเตาเผาถ่านชีวภาพ และหาปริมาณถ่านชีวภาพและสมบัติของถ่านชีวภาพที่ผลิตได้จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ซึ่งได้แก่ ช้างข้าวโพด แกลบ เปลือกกล้วย กิ่งไม้ลำไย และกะลาปากแพ โดยใช้เตาเผาถ่านชีวภาพแบบแอนนิลาหุ้มฉนวน ขนาดเตา 50 100 และ 200 ลิตร และใช้เวลาในการแยกสลายด้วยความร้อน 1 2 และ 3 ชั่วโมง ผลที่ได้การทดสอบมีดังต่อไปนี้

3.1 การเปรียบเทียบผลการจำลองสภาพกับผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบเตาเผาถ่านชีวภาพแบบหุ้มฉนวนขนาด

50 100 และ 200 ลิตร จากชีวมวลทั้ง 5 ชนิด คือ ช้างข้าวโพด แกลบ เปลือกกล้วย กิ่งไม้ลำไย และกะลาปากแพ พบว่าแกลบเป็นชีวมวลที่ให้ปริมาณถ่านชีวภาพดีที่สุดคือ 45.6 47.8 และ 51.1 เปอร์เซ็นต์ และกะลาปากแพเป็นชีวมวลที่ให้ปริมาณถ่านชีวภาพน้อยที่สุดคือ 27.6 32.9 และ 34.9 เปอร์เซ็นต์ ที่เตาขนาด 50 100 และ 200 ลิตร ตามลำดับ

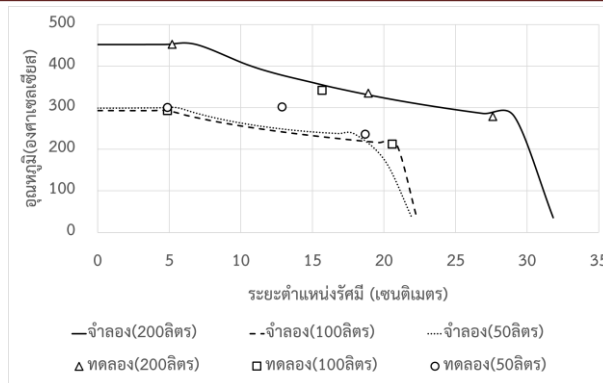


รูปที่ 5 การกระจายอุณหภูมิที่ตำแหน่งบน กลาง ล่าง ของเตา ขนาด 200 ลิตร ที่เวลา 3 ชั่วโมง ชีวมวลเป็นแกลบ

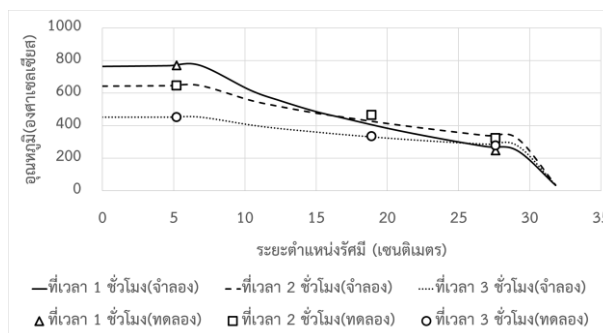
เมื่อเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิที่ได้จากการจำลองสภาพกับผลการกระจายอุณหภูมิที่ได้จากการทดสอบ จากรูปที่ 5 การกระจายอุณหภูมิของเตาขนาด 200 ลิตร ที่เวลา 3 ชั่วโมง ใช้ชีวมวลเป็นแกลบ อุณหภูมิที่ได้จากการจำลองสภาพที่ตำแหน่งบน กลาง ล่างของเตา มีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.9 ± 0.1 0.9 ± 0.9 และ 0.2 ± 0.1 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

รูปที่ 6 แสดงการกระจายอุณหภูมิของเตาที่เวลา 3 ชั่วโมง ที่ตำแหน่งกลางเตา ใช้ชีวมวลเป็นแกลบ อุณหภูมิที่ได้จากการจำลองสภาพที่ขนาดเตา 50 100 และ 200 ลิตร มีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 4.3 ± 6.7 5.1 ± 12.1 และ 0.7 ± 0.6 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

รูปที่ 7 แสดงการกระจายอุณหภูมิของเตาขนาดเตา 200 ลิตร ที่ตำแหน่งกลางเตา ใช้ชีวมวลเป็นแกลบ อุณหภูมิที่ได้จากการจำลองสภาพที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง มีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 6.5 ± 6.2 3.9 ± 4.1 และ 0.9 ± 0.9 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และรูปที่ 8 แสดงการกระจายอุณหภูมิของเตาที่เวลา 3 ชั่วโมง ขนาดเตา 200 ลิตร ตำแหน่งกลางเตาอุณหภูมิ



รูปที่ 6 การกระจายอุณหภูมิที่ขนาดเตา 50 100 และ 200 ลิตร ที่เวลา 3 ชั่วโมง ตำแหน่งกลางเตา ชีวมวลเป็นแกลบ



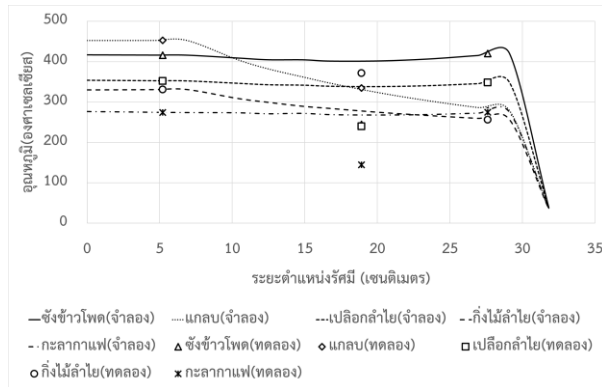
รูปที่ 7 การกระจายอุณหภูมิที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง ขนาดเตา 200 ลิตร ตำแหน่งกลางเตา ชีวมวลเป็นแกลบ

ที่ได้จากการจำลองสภาพของวัสดุชีวมวล 5 ชนิดคือ ช้างข้าวโพด แกลบ เปลือกกล้วย กิ่งไม้ลำไย และกะลาปากแพ มีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 21.6 ± 36.8 0.9 ± 0.9 13.9 ± 23.5 8.7 ± 14.3 และ 28.6 ± 49.1 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการเปรียบเทียบผลการจำลองสภาพและผลการทดสอบเกิดจากสมมติฐานของแบบจำลองที่กำหนดขึ้น จากทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนที่ใช้ อุณหภูมิใกล้เคียงกำเนิดความร้อน (แกนกลาง) จะสูงสุด แล้วค่อยลดลงตามระยะห่างจากแหล่งกำเนิดความร้อน ซึ่งไม่ซับซ้อนเหมือนปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในการทดสอบจริง จากผลการเปรียบเทียบผลการจำลองสภาพและผลการทดสอบทำให้ทราบค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยน้อยที่สุด คือ 0.2 ± 0.1 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งได้ถ่านชีวภาพจากแกลบที่ผลิตด้วยเตาเผาถ่านชีวภาพขนาด 200 ลิตร ที่เวลาในการแยกสลายด้วยความร้อน 3 ชั่วโมง และให้ผลผลิตสูงที่สุดคือ 51.1 เปอร์เซ็นต์

3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณถ่านชีวภาพและค่าความเป็นกรด-ด่างของถ่านชีวภาพ

ผลการวิเคราะห์สมการสหสัมพันธ์จากผลที่ได้จากการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณถ่านชีวภาพ (ตารางที่ 2) พบว่าพื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อนของแกนกลางต่อพื้นที่รูเจาะของแกนกลาง, A/Ap, (X_2) ความสูง



รูปที่ 8 การกระจายอุณหภูมิของวัสดุชีวมวล 5 ชนิดที่เวลา 3 ชั่วโมง ขนาดเตา 200 ลิตร ตำแหน่งกลางเตา

ของเตาเผาต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเตา, L/D, (X_3) เวลาที่ใช้ในการแยกสลายด้วยความร้อน (X_4) และค่าความร้อนของชีวมวล (X_5) ให้ค่า p-value น้อยกว่า 0.05 บ่งชี้ว่าปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อปริมาณถ่านชีวภาพ (Y_1) ที่ได้จากการผลิต อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีค่าความเชื่อมั่นที่ R^2 เท่ากับ 0.835

จากผลงานวิจัยก่อนหน้านี้ (4) พบว่าปริมาณถ่านชีวภาพขึ้นอยู่กับอุณหภูมิภายใต้กระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน โดยที่อุณหภูมิแปรผกผันกับปริมาณถ่านชีวภาพ เป็นการทดสอบในเตาเผาไฟฟ้า ซึ่งสามารถควบคุมอุณหภูมิได้แม่นยำ แต่อุณหภูมิที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นค่าเฉลี่ยภายในเตาเผาแบบแอนนิลาซึ่งแต่ละจุดมีค่าไม่เท่ากัน การจะควบคุมอุณหภูมิให้แม่นยำเหมือนเตาไฟฟ้าไม่สามารถทำได้ ในส่วนนี้คือข้อจำกัดของงานวิจัย แต่อย่างไรก็ตามเตาที่ทดสอบสามารถผลิตถ่านชีวภาพได้อยู่ในช่วง 27.6 ถึง 51.1 เปอร์เซ็นต์ ตามขนาดของเตาเผาและชนิดวัสดุชีวมวล ซึ่งสามารถผลิตถ่านชีวภาพเพื่อนำไปใช้ในการปรับปรุงดินได้ (13)

ตารางที่ 2 ANOVA สำหรับแบบจำลองเชิงเส้นของปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณถ่านชีวภาพ

Factors	P-value
Intercept	0.0001
Temp, X_1 ($^{\circ}\text{C}$)	0.1008
A/Ap, X_2	0.0001
L/D, X_3	0.0171
Time, X_4 (hr)	0.0001
HHV, X_5 (MJ/kg)	0.0315

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อสร้างสมการทางคณิตศาสตร์จากแบบจำลองเชิงเส้น และการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการแบบถดถอย สามารถสร้างสมการสหสัมพันธ์เพื่อทำนายปริมาณถ่านชีวภาพได้ ดังสมการที่ (2)

$$Y_1 = -187.600 - 0.016X_1 + 0.744X_2 - 12.940X_3 + 13.843X_4 - 0.294X_5 \quad (2)$$

ตารางที่ 3 ANOVA สำหรับแบบจำลองเชิงเส้นของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

Factors	P-value
Intercept	0.0001
Temp, X_1 ($^{\circ}\text{C}$)	0.9715
A/Ap, X_2	0.0001
L/D, X_3	0.0001
Time, X_4 (hr)	0.0279
HHV, X_5 (MJ/kg)	0.1177

จากตารางที่ 3 แสดงผลการวิเคราะห์สมการสหสัมพันธ์จากผลที่ได้จากการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) พบว่าพื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อนของแกนกลางต่อพื้นที่รูเจาะของแกนกลาง, A/Ap, (X_2) ความสูงของเตาเผาต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเตา, L/D, (X_3) เวลาที่ใช้ในการแยกสลายด้วยความร้อน (X_4) ให้ค่า p-value น้อยกว่า 0.05 บ่งชี้ว่าปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อค่า pH ของถ่านชีวภาพ (Y_2) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีค่าความเชื่อมั่นที่ R^2 เท่ากับ 0.737 โดยที่จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ (7) พบว่าอุณหภูมิมีผลต่อค่า pH โดยอุณหภูมิแปรผันตรงกับค่า pH ส่วนค่าความร้อนของชีวมวลหรือ HHV แปรผกผันกับอัตราส่วนของธาตุออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C) และแปรผัน

ตรงกับค่า pH ซึ่งค่า pH ที่ได้เป็นผลจากหมู่ฟังก์ชันขององค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลแต่ละชนิดที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิภายใต้กระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน ซึ่งจากข้อจำกัดของเตาแอนิลาตั้งที่ได้กล่าวมาแล้ว ทำให้ผลของอุณหภูมิและค่าความร้อนของชีวมวลไม่ส่งผลต่อค่า pH

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อสร้างสมการทางคณิตศาสตร์จากแบบจำลองเชิงเส้น และการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการแบบถดถอย สามารถสร้างสมการสหสัมพันธ์เพื่อทำนายค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของถ่านชีวภาพได้ดังสมการที่ (3)

$$Y_2 = -8.925 - (0.018 \times 10^{-3})X_1 + 0.063X_2 - 1.579X_3 + 0.129X_4 - 0.011X_5 \quad (3)$$

4. สรุปผล

จากการทดสอบเตาเผาถ่านชีวภาพแบบหุ้มฉนวนที่มีขนาดแตกต่างกัน 3 ขนาด (50 100 และ 200 ลิตร) เวลาการทดสอบ 3 ค่า (1 2 และ 3 ชั่วโมง) และชนิดชีวมวลแตกต่างกัน 5 ชนิด (ซึ่งข้าวโพด แกลบ เปลือกกล้วย กิ่งไม้ลำไย และกะลาจากแพ) ได้ผลสรุปดังนี้

- แกลบเป็นวัสดุที่ให้ปริมาณของถ่านชีวภาพมากที่สุดคือ 51.1 เปอร์เซ็นต์ ที่เตาขนาด 200 ลิตร และเวลา 3 ชั่วโมง โดยจากการเปรียบเทียบผลการกระจายอุณหภูมิที่ตำแหน่งตรงกลางเตาจากการจำลองสภาพกับการทดลอง พบว่ามีความคลาดเคลื่อน 0.7 ± 0.6 เปอร์เซ็นต์
- จากการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อสร้างสมการสหสัมพันธ์จึงพบว่า พื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อนของแกนกลางต่อพื้นที่รูเจาะของแกนกลาง (A/Ap) มีผลทั้งต่อปริมาณของถ่านชีวภาพและค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของถ่านชีวภาพ อย่างมีนัยสำคัญ

โดยผลที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการออกแบบเตาเผาถ่านชีวภาพแบบแอนิลาเพื่อผลิตถ่านชีวภาพให้ได้ปริมาณสูงที่สุดและกำหนดคุณภาพของถ่านชีวภาพให้อยู่ในช่วงที่ต้องการได้ ซึ่งขอบเขตสถานะที่

สามารถนำสมการสหสัมพันธ์ไปใช้งานได้ กำหนดอยู่ในตารางที่ 1

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณคณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ สำหรับสิ่งอำนวยความสะดวกและสนับสนุนการวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

1. Budai A, Rasse DP, Lagomarsino A, Lerch TZ, Paruch L. Biochar persistence, priming and microbial responses to pyrolysis temperature series. *Biol Fertil Soils*. 2016 Aug;52(6):749–61.
2. Mengesha TT, Ramayya AV. Performance Evaluation of Pyrolysis Cookstove Using Water Boiling Test. *Am J Mod Phys*. 2017 Sep 12;6(5):108.
3. Biochar Production using pyrolysis cook stove from coffee husk, Wood working waster and wastes from bedele brewery.
4. Wallace C. Microwave pyrolysis biochar characterization and modeling of char reinforced GFRP biocomposites [Internet]. University of New Brunswick.; 2019 [cited 2022 Nov 21]. Available from: <https://unbscholar.lib.unb.ca/islandora/object/unbscholar%3A9802/>
5. Petchaihan L, Panyoyai N, Khamdaeng T, Wongsiriamnuay T. Test of a modified small-scale biochar kiln. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*. 2020 Mar 1;463(1):012004.
6. Srisophon M, Khamdaeng T, Panyoyai N, Wongsiriamnuay T. Characterization of thermal distribution in 50-Liter biochar kiln at different heating times. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*. 2020 Mar 1;463(1):012079.



7. Budai A, Wang L, Gronli M, Strand LT, Michael J. Antal J, Abiven S, et al. Surface Properties and Chemical Composition of Corncob and Miscanthus Biochars: Effects of Production Temperature and Method [Internet]. ACS Publications. American Chemical Society; 2014 [cited 2022 Nov 21]. Available from: <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/jf501139f>
8. Intagun W, Khamdaeng T, Prom-ngarm P, Panyoyai N. Effect of Core Puncture Diameter on Bio-Char Kiln Efficiency. *Int J Biotechnol Bioeng*. 2018 Oct 1;12(11):435–9.
9. Mengesha TT, Ramayya A. Heat Transfer Validation and Comparative Evaluation of Biochar Yield from Pyrolysis Cook Stove. *J of Agricultural Science and Technology: B*. 2015; 5:389-400.
10. Daosukho S, Rodprasert S. The Development of Soil Quality Using Biochar Amendment from Agricultural Waste. *Bull Appl Sci*. 2015 Aug 1;4(4):95–102.
11. Fabrication of magnetic biochar as a treatment medium for As(V) via pyrolysis of FeCl₃-pretreated spent coffee ground. *Environ Pollut*. 2017 Oct 1;229:942–9.
12. Panyoyai N, Wongsiriamnuay T, Khamdaeng T. Temperature Distribution Inside Biochar Kiln for Biochar Production. The 10th International Conference on Sciences, Technology and Innovation for Sustainable Well-Being (STISWB 2018). July 11th -13th; Vientiane, Lao/Vientiane, Lao PDR, 2018. p. 56–60.
13. Panyoyai N, Petchaihan L, Wongsiriamnuay T, Hirsatitporn B, Khamdaeng T. Simulation of Temperature Distribution in Biochar Kiln with Different Feedstock Types. *J Engineering*. 2019 Dec 28;5(2):59–64. Available from: doi: 10.14456/mijet.2019.9. [Accessed 14th Dec 2022].
14. Djousse Kanouo, BM, Allaire SE, Munson AD. Quality Quality of Biochars Made from Eucalyptus Tree Bark and Corncob Using a Pilot-Scale Retort Kiln. *Waste Biomass Valorization*. 2018 Jun 1;9(6):899–909. Available from: doi.org/10.1007/s12649-017-9884-2 [Accessed 14th Dec 2022].
15. Wijitkosum S, Jiwnok P. Elemental Composition of Biochar Obtained from Agricultural Waste for Soil Amendment and Carbon Sequestration. *Appl Sci*. 2019 Jan;9(19):3980.