การปรับปรุงสมบัติถ่านชีวภาพจากกากกาแฟร่วมกับกากไซยาโนแบคทีเรีย ภายใต้กระบวนการไพโรไลซิส

Properties Improvement of Biochar from Spent Coffee Ground with Leptolyngbya sp. Residues Under Pyrolysis Process

เหนือพล ดวงเบี้ย[1] , วาสนา คำโอภาส[2,*], ธรณิศวร์ ดีทายาท[3], อรรถกร อาสนคำ[3] และทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์[3]

Nuapon Duongbia[1], Wassana Kamopas[2,*], Thoranis Deethayat[3], Attakorn Asanakham[3] and Tanongkiat Kiatsiriroat[3]

[1] สำนักงานบริหารงานวิจัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่ 50200

[2] หน่วยวิจัยระบบทางอุณหภาพ สถาบันวิจัยพหุศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่ 50200

[3] ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่ 50200

[1]Office of Research Administration, Chiang Mai University, Chiang Mai, Thailand 50200

[2] Thermal System Research Unit, Multidisciplinary Research Institute, Chiang Mai University, Chiang Mai, Thailand 50200

[3]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University, Chiang Mai, Thailand 50200

[*]Corresponding author: Tel.: 061-6851850 E-mail address: ic41062@hotmail.com

Received: 28 May 2024, Revised: 13 June 2024, Accepted: 12 December 2024, Published online: 30 December 2024

Abstract

In this research, biochar was experimentally produced through a co-pyrolysis process between spent coffee grounds (SCG) and *Leptolyngbya* sp. residue (LTR) at ratios of 1:0, 1:1, and 0:1. The reactor was heated to 500°C with a holding time of 1 hour. The results showed that the percent yield of biochar from spent coffee grounds (BSCG), *Leptolyngbya* sp. residue (BLTR), and the blended spent coffee grounds with *Leptolyngbya* sp. residue at a ratio of 1:1 (BSCG:BLTR) were 35.28%, 52.66%, and 41.13% by weight, respectively. The higher heating values of all biochars were in a range of 15.10 - 27.16 MJ/kg. The biochar with the 1:1 mixing ratio increased the nitrogen content of BSCG from 4.23% to 4.62% by weight. As the proportion of LTR in SCG increased, the specific surface area and pore volume also increased, which was consistent with the morphological characteristics of the biochar. The values of pH and electrical conductivity (EC) of the biochar were within the standard ranges for soil amendment usage. Additionally, the co-pyrolysis of SCG and LTR could be used for agricultural purposes.

Keywords: Biochar, Spent coffee ground, *Leptolyngbya* sp. Residues, Pyrolysis

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ ได้ทำการทดลองผลิตถ่านชีวภาพผ่านกระบวนการไพโรไลซิสร่วม ระหว่างกากกาแฟเหลือทิ้ง (SCG) และกากไซยาโนแบคทีเรีย *Leptolyngbya sp*. (LTR) ที่อัตราส่วน 1:0, 1:1 และ 0:1 ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส รักษาอุณหภูมิให้คงที่อยู่ในช่วงเวลา 1 ชั่วโมง จากการทดลอง พบว่า ร้อยละโดยมวลของถ่านกากกาแฟ (BSCG), ถ่านกากไซยาโนแบคทีเรีย *Leptolyngbya sp*. (BLTR) และถ่านกากกาแฟต่อกากไซยาโนแบคทีเรีย *Leptolyngbya* sp. อัตราส่วน 1:1 (BSCG:BLTR) มีค่าเท่ากับ 35.28, 52.66 และ 41.13 ตามลำดับ ค่าความร้อนของถ่านชีวภาพทั้ง 3 ชนิด จะมีค่าอยู่ในช่วง 15.10 - 27.16 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ถ่านชีวภาพ BSCG:BLTR ที่อัตราส่วน 1:1 จะทำให้สัดส่วนของไนโตรเจนของถ่าน BSCG สูงขึ้น จากร้อยละ 4.23 เป็น 4.62 โดยมวล การนำ LTR มาไพโรไลสิสร่วมกับ SCG จะทำให้ผลิตภัณฑ์ถ่านชีวภาพที่ได้ มีพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนสูงขึ้นเมื่อเทียบกับถ่านชีวภาพจาก SCG ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะทางสัณฐานวิทยาของถ่านชีวภาพ ค่าความเป็นกรดด่างและค่าการนำไฟฟ้าของถ่านชีวภาพ อยู่ในค่ามาตรฐานสำหรับใช้ในการปรับปรุงดิน ดังนั้น การไพโรไลซิสร่วมระหว่าง SCG กับ LTR จึงถือเป็นการปรับปรุงพื้นผิว และเพิ่มสมบัติบางประการเพื่อใช้ในเชิงเกษตรกรรมได้

คำสำคัญ: ถ่านชีวภาพ, กากกาแฟ, กากไซยาโนแบคทีเรีย, ไพโรไลซิส

บทนำ

การนำวัสดุเหลือทิ้งหรือชีวมวลเหลือทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์นับเป็นแนวทางหนึ่ง ซึ่งในปัจจุบันมีนักวิชาการ นักวิจัย หรือผู้ที่สนใจ ทำการศึกษา พัฒนา และนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ กลับมาใช้ประโยชน์ในรูปแบบต่าง ๆ ถ่านชีวภาพ ถือเป็นผลิตภัณฑ์รูปแบบหนึ่งที่ได้จากการนำเอาชีวมวลหรือชีวมวลเหลือทิ้งไปผ่านกระบวนการย่อยสลายเชิงความร้อน ในช่วงอุณหภูมิ 400-600 องศาเซลเซียส [1] โดยปราศจากอากาศ ซึ่งเรียกว่ากระบวนการไพโรไลซิส ทำให้ผลิตภัณฑ์ถ่านชีวภาพที่ได้ จะให้คุณลักษณะ สมบัติ และองค์ประกอบพื้นฐานที่แตกต่างจากถ่านไม้ที่ผ่านการเผาไหม้โดยทั่วไป [2]

กาแฟเป็นผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรชนิดหนึ่ง ที่ได้รับความนิยมนำมาปรุงเป็นเครื่องดื่ม ซึ่งการดื่มกาแฟในปริมาณที่พอเหมาะ จะทำให้เกิดประโยชน์ทางการแพทย์ เช่น ป้องกันโรคพาร์กินสัน โรคนิ่วในถุงน้ำดี โรคเบาหวานชนิดที่ 2 โรคเก๊าท์ โรคอัลไซเมอร์ โรคหืด โรคมะเร็งกระเพาะอาหาร โรคมะเร็งปอด และโรคมะเร็งเต้านม เป็นต้น [3] มีรายงานจากศูนย์อัจฉริยะเพื่ออุตสาหกรรมอาหาร, สถาบันอาหาร ระบุว่า ปี 2564 ตลาดกาแฟ (Coffee) ปี 2564 ในประเทศไทย มีมูลค่าสูงถึงประมาณ 32,134.9 ล้านบาท โดยมีอัตราการขยายตัวร้อยละ 5.3 เมื่อเทียบกับปี 2563 [4] จากความนิยมบริโภคกาแฟดังกล่าว ส่งผลให้มีการผลิตกาแฟเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้กากกาแฟเหลือทิ้งจากการระบวนการปรุงเครื่องดื่มมีปริมาณสูงขึ้นตามไปด้วย มีรายงานการวิจัยของ Tongcumpou, C., et al., 2019 [5] ได้ระบุว่า ถ่านชีวภาพจากกากกาแฟ ที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิส ในช่วงอุณหภูมิ 400-500 องศาเซลเซียส จะให้ค่าความร้อน อยู่ในช่วง 25.77-26.77 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งเป็นระดับความร้อนที่ค่อนข้างสูง และมีความเป็นไปได้ในการนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงพลังงาน

ไซยาโนแบคทีเรีย *Leptolyngbya* sp. AARL KC 45 (LT) เป็นสิ่งมีชีวิตที่มีลักษณะเป็นเส้นสายที่แยกได้จากน้ำพุร้อนของประเทศไทย เป็นสิ่งมีชีวิตที่เจริญเร็ว เก็บเกี่ยวเซลล์ได้ง่าย สามารถเจริญได้ในอาหารที่มีความเป็นด่างสูง ประมาณ 8.2 จึงช่วยลดการปนเปื้อนจากสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ ได้ นอกจากนี้ยังมีรงควัตถุที่เป็นโปรตีนชนิดหนึ่ง เรียกว่า ไฟโคบิลิโปรตีน ซึ่งประกอบไปด้วย phycocyanin (PC) สารสีน้ำเงิน และ phycoerythrin (PE) สารสีแดง [5] สารสีดังกล่าวถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เครื่องดื่ม เครื่องสำอาง นอกจากนี้ สารสกัดที่ได้จากไซยาโนแบคทีเรีย จะมีสารที่มีคุณสมบัติเป็นสารออกฤทธิ์ชีวภาพ (bioactive compounds) ที่สำคัญ คือมีสมบัติเป็นสารแอนติออกซิแดนท์ หรือสารต้านอนุมูลอิสระ สารออกฤทธิ์ต้านเนื้องอก สารออกฤทธิ์ต้านการแข็งตัวของเลือด สารออกฤทธิ์ลดไขมันในเลือด และสารออกฤทธิ์ต้านไวรัส ดังนั้น สารสกัดจากไซยาโนแบคทีเรีย จึงถูกนำไปใช้ในทางการแพทย์อีกด้วย อย่างไรก็ตาม หลังจากนำไซยาโนแบคทีเรียไปผ่านกระบวนการสกัดสารสำคัญแล้ว กากไซยาโนแบคทีเรีย ถือเป็นของเสียเหลือทิ้งที่มีความน่าสนใจที่จะนำมาผ่านกระบวนการ

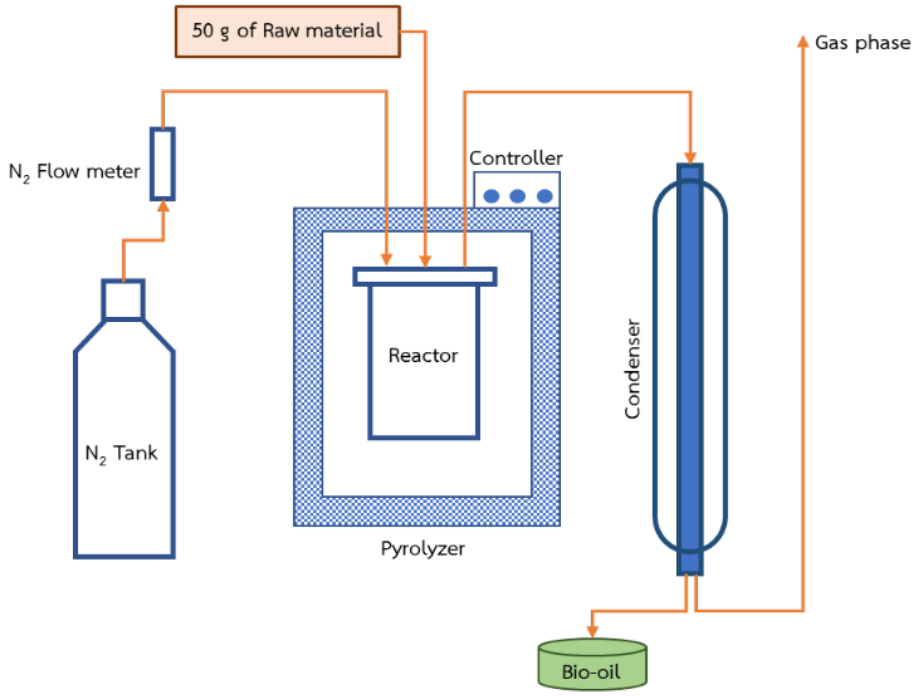
แปรรูป เพื่อใช้ประโยชน์ในเชิงเกษตรกรรมและสิ่งแวดล้อม โดยมีข้อมูลการวิจัยของ Saiyud, N., et al. 2022 [7] รายงานว่า การนำสาหร่ายไปใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการไพโรไลซิสร่วม จะสามารถช่วยปรับปรุงคุณภาพถ่านชีวภาพได้

บทความวิจัยนี้ จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะนำของเสียเหลือทิ้ง ทั้งในรูปของกากกาแฟเหลือทิ้ง (SCG) ซึ่งเก็บรวบรวมจากร้านกาแฟทั่วไปในจังหวัดเชียงใหม่ และกากไซยาโนแบคทีเรีย *Leptolyngbya sp*. (LTR) ที่ผ่านกระบวนการสกัดสารมูลค่าสูงออกไปแล้ว มาผ่านกระบวนการไพโรไลซิสร่วม (Co-Pyrolysis) เพื่อวิเคราะห์คุณลักษณะและสมบัติเชิงเคมี, เชิงคุณภาพ และลักษณะทางสัณฐานวิทยาของถ่านชีวภาพที่ได้ ซึ่งการไพโรไลซิสร่วมนี้ ถือเป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถช่วยปรับปรุงคุณภาพถ่านชีวภาพได้

วิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้ ได้ทำการทดลองผลิตถ่านชีวภาพผ่านกระบวนการไพโรไลซิสร่วม ระหว่าง SCG ซึ่งเก็บรวบรวมจากร้านกาแฟทั่วไปในจังหวัดเชียงใหม่ และ LTR ที่ผ่านกระบวนการสกัดสารมูลค่าสูงออกไปแล้ว (ได้รับความอนุเคราะห์จากห้องปฏิบัติการวิจัยสาหร่ายและไซยาโนแบคทีเรีย คณะวิทยาศาสตร์ และหน่วยวิจัยความหลากหลายของสาหร่ายและแพลงก์ตอน สถาบันวิจัยพหุศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่) ซึ่งใช้วิธีการและสัดส่วนการผสมกากชีวมวลสองชนิดก่อนการไพโรไลซิสอ้างอิงจากงานวิจัย [7] โดยในงานวิจัยนี้ใช้อัตราส่วนผสมระหว่าง SCG ต่อ LTR เท่ากับ 1:0, 1:1, 0:1 โดยน้ำหนัก เตรียมวัตถุดิบโดยการนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำวัตถุดิบแห้งปริมาณ 50 กรัม เข้าสู่กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (Fixed-bed reactor) ทรงกระบอก (ตามภาพที่ 1) ใช้แก๊สไนโตรเจนเป็นตัวไล่อากาศ ให้อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการให้ความร้อนอยู่ที่ 5-10 องศาเซลเซียสต่อนาที ทำการผลิตถ่านชีวภาพในช่วงอุณหภูมิที่เกิดไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส รักษาอุณหภูมิให้คงที่อยู่ในช่วงเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างถ่านชีวภาพที่ผลิตได้ไปวิเคราะห์สมบัติและคุณลักษณะต่างๆ ดังนี้

1. การวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักเชิงความร้อนของวัตถุดิบ เป็นกระบวนการวิเคราะห์เพื่อศึกษากลไกการสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิค (Thermo gravimetric Analysis, TGA) และอัตราการสูญเสียมวลเทียบกับเวลา (derivative, DTG) ด้วยเครื่อง Thermo plus EVO2 (Rigaku, Japan)
2. การวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสาร (Proximate Analysis) เพื่อศึกษาหาค่าความชื้น สารระเหย เถ้าและคาร์บอนคงตัว และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) เพื่อศึกษาหาปริมาณธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ออกซิเจน และซัลเฟอร์ของวัตถุดิบ และถ่านชีวภาพที่ได้
3. การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-เบส (pH) ของถ่านชีวภาพ โดยนำถ่านชีวภาพมาผสมกับน้ำบริสุทธิ์ RO (Reverse osmosis) ที่อัตราส่วนผสม 1:1 (mg/ml) จากนั้นทำการวัดค่า ด้วยเครื่องวัด pH (pH meter F-71, LAQUA, Horiba)
4. การวิเคราะห์ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity; EC) ของถ่านชีวภาพ โดยนำถ่านชีวภาพมาผสมกับน้ำบริสุทธิ์ RO (Reverse osmosis) ที่อัตราส่วนผสม 1:1 (mg/ml) จากนั้นทำการวัดค่าด้วยเครื่องวัดการนำไฟฟ้า (914 pH/Conductometer, Metrohm, swissmade)
5. การวิเคราะห์ลักษณะพื้นที่ผิวของถ่านชีวภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Electron microscope) เพื่อทำให้ทราบลักษณะของรูพรุนในถ่านชีวภาพที่ได้จากกระบวนการ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (JEOL JSM-5910LV, France)
6. การวิเคราะห์ลักษณะพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) และปริมาณความเป็นรูพรุนของถ่านชีวภาพ (Total pore volume) เพื่อทำให้ทราบค่าการดูดซับของถ่านชีวภาพที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสร่วม โดยใช้เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุน (Moded Autosorb 1 MP, Quantachrome, USA)



ภาพที่ 1 แผนภาพชุดไพโรไลซิสระดับห้องปฏิบัติการ

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

1. ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของวัตถุดิบ

1.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสาร (Proximate Analysis) และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) ของวัตถุดิบ

จากผลวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสารของวัตถุดิบ ตามตารางที่ 1 จะเห็นว่า ความชื้นและสารระเหยของวัตถุดิบทั้ง 2 ชนิด มีค่าค่อนข้างสูง เมื่อนำวัตถุดิบไปผ่านกระบวนการไพโรไลซิสแล้ว ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีโอกาสอยู่ในสถานะของเหลวและก๊าซสูงตามไปด้วย สำหรับถ่านชีวภาพ จะเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากสารประกอบอนินทรีย์ในวัตถุดิบ ซึ่งแสดงในรูปของปริมาณเถ้า [7] ดังนั้น เมื่อเปรียบเทียบปริมาณเถ้าของ SCG และ LTR ซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 9.63 และ 16.29 โดยมวล ตามลำดับ แล้ว LTR จะให้ปริมาณถ่านชีวภาพสูงกว่า SCG

1.2 ผลการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของกากกาแฟและกากไซยาโนแบคทีเรีย

จากการวิเคราะห์การสลายตัว หรือการสูญเสียน้ำหนักเชิงความร้อนของวัตถุดิบ คือ SCG และ LTR ด้วยเทคนิค Thermo Gravimetric Analysis, TGA และอัตราการสูญเสียมวลเทียบกับเวลา (Derivative Thermo Gravimetry, DTG) โดยมีการควบคุมอัตราการให้ความร้อนที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที สามารถแสดงผลวิเคราะห์ ได้ดังภาพที่ 2

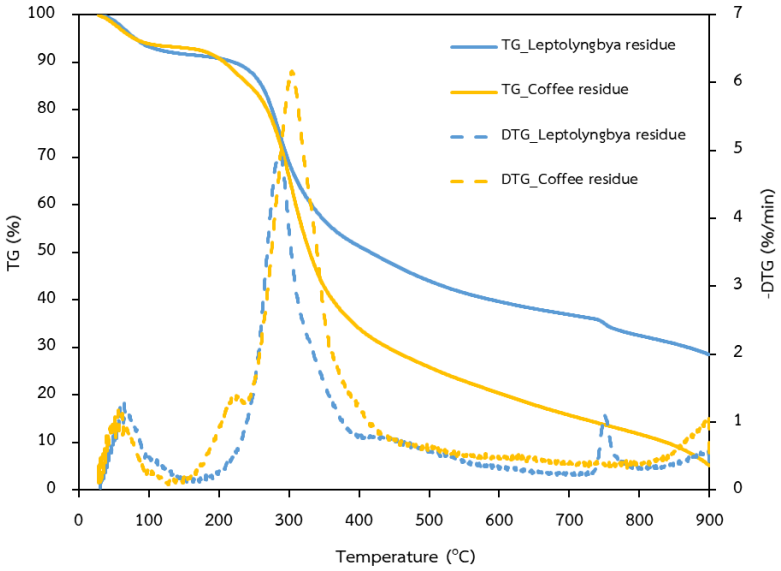
ตารางที่ 1 ผลวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสาร (Proximate Analysis) และแบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) ของ SCG และ LTR

ค่าการวิเคราะห์	Biomass	
	SCG	LTR
Proximate analysis[a] (ร้อยละโดยมวล)		
Moisture	6.72	7.54
Volatile matter	64.05	58.85

ค่าการวิเคราะห์	Biomass	
	SCG	LTR
Fixed carbon[b]	19.60	17.32
Ash	9.63	16.29

หมายเหตุ: [a] as received

[b] Calculated by difference



ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนัก และอัตราการสลายตัวจากกระบวนการไพโรไลซิสของ SCG และ LTR ที่อุณหภูมิ 25 - 900 องศาเซลเซียส

จากภาพที่ 2 จะเห็นว่า SCG จะเริ่มมีการสลายตัวที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส และจะเกิดการสลายตัวอย่างรวดเร็ว ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 240 - 430 องศาเซลเซียส ซึ่งช่วงอุณหภูมินี้จะเป็นช่วงอุณหภูมิของการสลายตัวด้วยความร้อนของ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน [8-10] โดย SCG จะเกิดการสูญเสียน้ำหนักชีวมวลมากที่สุดที่อุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียส สำหรับ LTR จะเริ่มมีการสลายตัวทางความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 240 องศาเซลเซียส และจะเกิดการสลายตัวอย่างรวดเร็วในช่วงอุณหภูมิ 240 - 400 องศาเซลเซียส และจะเกิดการสูญเสียน้ำหนักของชีวมวลมากที่สุด ที่อุณหภูมิประมาณ 280 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณาการสลายตัวขอวัตถุดิบ 2 ชนิด จะเห็นว่า SCG จะมีองค์ประกอบของลิกโนเซลลูโลสสูงกว่า LTR จึงสลายตัวได้สูงกว่า โดยอัตราการสูญเสียมวลต่อเวลาสูงสุดของ SCG และ LTR มีค่าเท่ากับร้อยละ 6.14 และ 4.9 โดยมวลต่อนาที ตามลำดับ

จากผลการวิเคราะห์การสลายตัวหรือการสูญเสียน้ำหนักทางความร้อน ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมการสลายตัวของวัตถุดิบทั้ง 2 ชนิด คือ จะสลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 240-430 องศาเซลเซียส ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ จึงได้กำหนดและควบคุมอุณหภูมิการผลิตถ่านชีวภาพที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เพื่อให้วัตถุดิบที่ใช้ เกิดการสลายตัวและการเปลี่ยนแปลงทางเคมีได้อย่างสมบูรณ์

2. ผลการวิเคราะห์สมบัติและคุณลักษณะของถ่านชีวภาพ

2.1 ผลการผลิตถ่านชีวภาพ

การผลิตถ่านชีวภาพผ่านกระบวนการไพโรไลซิสร่วม ระหว่าง SCG ร่วมกับ LTR ที่อัตราส่วน 1:0, 1:1 และ 0:1 จะสามารถหาร้อยละโดยมวลของผลิตภัณฑ์ถ่านชีวภาพที่ได้ จากสมการ (1) [7-9]

$$\%Yield = \frac{M_b}{M_o} \times 100 \quad (1)$$

โดย M_b คือ น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ถ่านชีวภาพที่ได้รับ, M_o คือ น้ำหนักของวัตถุดิบที่ใช้ และ %Yield คือ ร้อยละโดยมวลของผลิตภัณฑ์ถ่านชีวภาพที่ได้ ซึ่งหลังจากนำวัตถุดิบตั้งต้น ปริมาณ 50 กรัม เข้าสู่กระบวนการไพโรไลซิสแล้ว จะทำให้ได้ BSCG, BLTR และ BSCG:BLTR อัตราส่วน 1:1 มีค่าเท่ากับร้อยละ 35.28, 52.66 และ 41.13 โดยมวล ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ผลวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) และค่าความร้อนของ BSCG:BLTR ที่อัตราส่วน 1:0, 1:1 และ 0:1

Ultimate analysis[a]	Raw material		Biochar			Coffee ground biochar [11]
	SCG	LTR	BSCG	BLTR	BSCG : BLTR 1:1	
คาร์บอน (ร้อยละโดยมวล)	50.43	34.06	81.98	36.78	49.83	74.25
ไฮโดรเจน (ร้อยละโดยมวล)	6.83	5.07	5.13	2.33	2.61	4.38
ไนโตรเจน (ร้อยละโดยมวล)	2.25	4.95	4.23	5.02	4.62	4.00
ออกซิเจน[b] (ร้อยละโดยมวล)	40.50	55.85	8.67	55.80	42.94	17.10
ซัลเฟอร์ (ร้อยละโดยมวล)	0.00	0.07	0.00	0.08	0.00	<0.1
ค่าความร้อน (MJ/kg)	20.59	15.73	27.16	15.10	18.35	30.80

หมายเหตุ: [a] Dry ash free basis

[b] Calculated by difference

จากการวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสารของถ่านชีวภาพทั้ง 3 ตัวอย่าง ตามตารางที่ 2 จะเห็นว่า สัดส่วนคาร์บอนของ BSCG, BLTR จะมีค่าสูงขึ้นมากกว่าค่าที่วิเคราะห์ได้จากวัตถุดิบ จากร้อยละ 50.43 เป็น 81.98 (ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tangmankongworakoon, 2019 [11]) และ 34.06 เป็น 36.78 โดยมวล ตามลำดับ และสัดส่วนคาร์บอนของ BSCG:BLTR อัตราส่วน 1:1 มีค่าร้อยละ 49.83 โดยมวล จากผลการทดลอง จะเห็นว่า การผลิตถ่านชีวภาพ BSCG:BLTR ที่อัตราส่วน 1:1 จะทำให้สัดส่วนของไนโตรเจนของ BSCG สูงขึ้น จากร้อยละ 4.23 เป็น 4.62 โดยมวล และเมื่อพิจารณาค่าความร้อนของถ่านชีวภาพ พบว่า ค่าความร้อนของวัตถุดิบทั้ง 2 ชนิด และถ่านชีวภาพทั้ง 3 ชนิด จะมีค่าอยู่ในช่วง 15.10 - 27.16 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าความร้อนของชีวมวลทั่วไป [12]

2.2 ผลของคุณสมบัติของถ่านชีวภาพที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

สำหรับผลวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ (BET) ปริมาตรรูพรุน (pore volume) ค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ค่าการนำไฟฟ้า (EC) และผลวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของ BSCG, BLTR และ BSCG: BLTR แสดงตามตารางที่ 3 และภาพที่ 3 ตามลำดับ

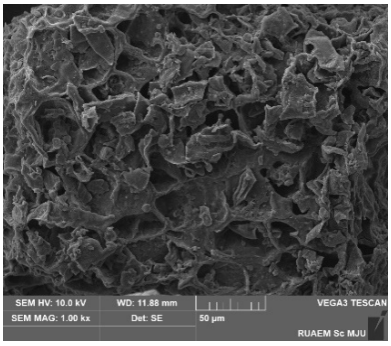
ตารางที่ 3 สมบัติทางพื้นผิวของ BSCG, BLTR และ BSCG : BLTR ที่อัตราส่วน 1:1

ค่าการวิเคราะห์	Biochar			Coffee ground biochar [9]	Standard Reference [11]
	BSCG	BLTR	BSCG:BLTR (1:1)		
พื้นที่ผิวจำเพาะ, S (m^2/g),	21.59	48.87	40.04	29.34	-
ปริมาตรรูพรุน, Vp, (ml/g)	0.0384	0.1675	0.1263	0.0448	-
ความชื้น (ร้อยละโดยมวล)	0.55	1.35	2.14	0.96	≤35
pH	6.4	6.2	6.3	10.41	5.5-8.5
EC (dS/m)	1.01	1.90	1.62	1.26	≤4

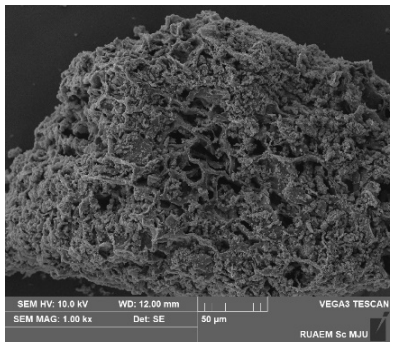
จากตารางที่ 3 พบว่า BSCG, BLTR และ BSCG : BLTR ที่อัตราส่วน 1:1 จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะ (BET) 21.59, 48.87 และ 40.04 m^2/g ตามลำดับ และมีปริมาตรรูพรุนเท่ากับ 0.0384, 0.1675 และ 0.1263 cm^3/g ตามลำดับ จะเห็นว่า BLTR จะให้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนสูงสุด และสูงกว่า BSCG ที่ผลิตขึ้นภายใต้งานวิจัยนี้ และยังสูงกว่าถ่านกากกาแฟจากงานวิจัยของณรงค์พร ผังวิวัฒน์, 2565 [9] และ BSCG : BLTR ที่อัตราส่วน 1:1 จะให้พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนสูงขึ้นเมื่อเทียบกับ BSCG ซึ่งถือเป็นการปรับปรุงคุณภาพ BSCG ได้ทางหนึ่ง

สำหรับค่าความชื้น, ค่าความเป็นกรดด่าง และค่าการนำไฟฟ้า ของถ่านชีวภาพที่ผลิตขึ้นในงานวิจัยนี้ มีค่าอยู่ในช่วงค่ามาตรฐานสำหรับการนำถ่านชีวภาพไปใช้ประโยชน์ในการปรับปรุงดิน [11]

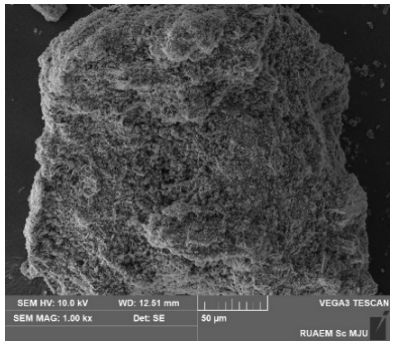
ด้านลักษณะทางสัณฐานวิทยาของถ่านชีวภาพ ที่แสดงตามภาพที่ 3 จะเห็นว่า BSCG มีลักษณะเป็นก้อนมีผิวขรุขระ พื้นผิวมีแผ่นเกล็ดเรียงตัวสลับซับซ้อนกันเกิดช่องว่างเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ แต่สำหรับ BLTR จะมีลักษณะเป็นผิวขรุขระที่สุด โดยเมื่อพิจารณาจากภาพซึ่งใช้กำลังขยาย 1,000 เท่า จะเห็นเป็นลักษณะขุยเล็ก ๆ จำนวนมาก ซึ่งเป็นเพราะ LTR เป็นกากที่ผ่านการสกัดสาระสำคัญด้วยกระบวนการย่อยด้วยตัวทำละลายและผ่านความร้อน ทำให้เซลล์แตก เมื่อนำมาทำเป็นถ่านชีวภาพ ถ่านที่ได้มีลักษณะถูกย่อยเป็นขุยเล็ก ๆ มีพื้นที่ผิวสูง ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ BET ที่ได้ค่าสูงที่สุด (ตามตารางที่ 3) และเมื่อพิจารณา BSCG : BLTR ที่อัตราส่วน 1:1 จะเห็นว่า ขุยผงเล็ก ๆ ของ BLTR จำนวนมาก จะเกาะอยู่บนพื้นผิวของ BSCG ช่วยเพิ่มพื้นที่ผิว และปริมาณรูพรุน ให้แก่ BSCG ซึ่งสอดคล้องกับผลวิเคราะห์ BET ตามตารางที่ 3 เช่นกัน ดังนั้นการไพโรไลสิสร่วมระหว่าง SCG กับ LTR จึงถือเป็นการปรับปรุงพื้นผิว และเพิ่มสมบัติบางประการ เพื่อใช้ในเชิงเกษตรกรรมและสิ่งแวดล้อมได้ทางหนึ่ง



(ก) BSCG



(ข) BSCG: BLTR (1:1)



(ค) BLTR

ภาพที่ 3 ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของ BSCG, BLTR และ BSCG:BLTR ที่อัตราส่วน 1:1 ที่กำลังขยาย 1,000

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ ได้ทำการทดลองผลิตถ่านชีวภาพผ่านกระบวนการไพโรไลซิสร่วม ระหว่าง SCG ซึ่งเก็บรวบรวมจากร้านกาแฟทั่วไปในจังหวัดเชียงใหม่ และ LTR ที่ผ่านกระบวนการสกัดสารมูลค่าสูงออกไปแล้ว หรืออย่างใดอย่างหนึ่ง ซึ่งจากผลวิเคราะห์เชิงเคมี, เชิงคุณภาพ และลักษณะทางสัณฐานวิทยาของถ่านชีวภาพที่ได้ ทำให้ทราบว่า การไพโรไลซิสร่วม สามารถช่วยปรับปรุงคุณภาพถ่านชีวภาพได้ นอกจากนี้ ยังมีความน่าสนใจและมีความเป็นไปได้ที่จะนำตัวอย่างถ่านชีวภาพที่ได้ไปประยุกต์ใช้งาน เนื่องจากถ่านชีวภาพค่าความร้อนมากพอสำหรับใช้ประโยชน์เชิงพลังงาน หรือมีค่า pH และ EC อยู่ในช่วงค่ามาตรฐานที่จะใช้ประโยชน์ในเชิงเกษตรกรรมอีกด้วย

กิตติกรรมประกาศ

บทความวิจัยนี้ ขอขอบคุณทุน Fundamental Fund 2022, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ขอบคุณสถาบันวิจัยพหุศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ได้สนับสนุนการทำวิจัย และขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยสาหร่ายและไซยาโนแบคทีเรีย คณะวิทยาศาสตร์ และหน่วยวิจัยความหลากหลายของสาหร่ายและแพลงก์ตอน สถาบันวิจัยพหุศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่สนับสนุนวัตถุดิบกากไซยาโนแบคทีเรีย *Leptolyngbya* sp. สำหรับงานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] Kelkar, S., Saffron, C.M., Chai, L., Bovee, J., Stuecken, T.R., Garedew, M., Li, Z. and Robert M. Kriegel, R.M. (2015). Pyrolysis of spent coffee grounds using a screw-conveyor reactor. **Fuel Processing Technology**. 137, 170-178.

[2] ณัชพล สายหยุด ธรณิศวร์ ดีทายาท และทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. (2563) "การวิเคราะห์สมบัติถ่านชีวภาพจากสาหร่ายชุมชน/กากกาแฟภายใต้กระบวนการไพโรไลซิส", ใน **การประชุมวิชาการ เรื่องการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวล ในอุปกรณ์ด้านความร้อน และกระบวนการ ครั้งที่ 19**, วันที่ 12-13 มีนาคม 2563 ณ เจ้าหลาว คาบาน่า รีสอร์ท จังหวัดจันทบุรี, 378-383

[3] สำนักงานเกษตรและสหกรณ์จังหวัดตาก กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. **ข้อมูลสินค้าจังหวัดตาก ปีงบประมาณ พ.ศ. 2564 "กาแฟ"** สืบค้นเมื่อ 9 ตุลาคม 2566, จาก https://www.opsmoac.go.th.

[4] ศูนย์อัจฉริยะเพื่ออุตสาหกรรมอาหาร. **ตลาดกาแฟในประเทศไทย ปี 2564** สืบค้นเมื่อ 9 ตุลาคม 2566, จาก https://fic.nfi.or.th/market-intelligence-detail.php?smid=364

[5] Chantra Tongcumpou, C., Parnuwat Usapein, P., Nattapong Tuntiwiwattanapun, N. (2019). Complete utilization of wet spent coffee grounds waste as a novel feedstock for antioxidant, biodiesel, and bio-char production. **Industrial Crops & Products**. 138, 111484.

[6] Pumas, C., Peerapornpisal, Y., Vacharapiyasophon, P., Leelapornpisid, P., Walailuck Boonchum, W., Ishii, M. and Khanongnuch, C. (2012). Purification and characterization of a thermostable phycoerythrin from hot spring cyanobacterium *Leptolyngbya* sp. KC45. **International Journal of Agriculture & Biology**. 14, 121–125.

[7] Saiyud, N., Deethayat, T., Asanakham, A., Kamopas, W., Kiatsiriroat, T. (2014). Biochar production from co-pyrolysis of coffee ground and native microalgae consortium. **Biomass Conversion and Biorefinery**. 14, 6855-6863.

[8] ณัชพล สายหยุด. (2565). **การผลิตถ่านชีวภาพภายใต้กระบวนการไพโรไลซิสจากสาหร่ายชุมชนร่วมกับผงกาแฟใช้แล้ว**. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

[9] ณรงค์พร ผังวิวัฒน์. (2565). **การผลิตถ่านชีวภาพจากกากกาแฟในปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบเบดนิ่งที่มีลูกบอลโลหะช่วยกระจายความร้อน.** วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

[10] Lanjewar, R., Thakur, L.S., Parmar, H., Varma, A.K. and Hinge, K.V. (2019). A review on physicochemical characterization and pyrolysis kinetics of biomass. **International Journal of Management, Technology and Engineering**. IX(III), 4595 4617.

[11] Tangmankongworakoon, N. (2019). An approach to produce biochar from coffee residue for fuel and soil amendment purpose. **International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture**. 8(1), S37–S44.

[12] กองศึกษาและพัฒนาไฟฟ้าฐาน กระทรวงพลังงาน. **พลังงานชีวมวล** สืบค้นเมื่อ 9 ตุลาคม 2566, จาก https://energy-ops-prod.jigsawgroups.work/th/attitude-documentation/.