



วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม Journal of Engineering and Innovation

บทความวิจัย

ผลของการเติมลูกบอลโลหะทองแดง ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิไพโรไลซิส และคุณสมบัติของถ่านชีวภาพจากกากกาแฟ

Effect of addition copper metal balls on pyrolysis temperature and properties of biochar from spent coffee ground

ณรงค์พร ผึ้งวิวัฒน์¹ ธรนีสวรรค์ ดีทยา^{2*}

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50200

² หน่วยงานวิจัยระบบคุณภาพ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50200

Narongporn Pungwiwat¹ Thoranis Deethayat^{2*}

¹ Energy Engineering Program, Faculty of Engineering and Graduate School, Chiang Mai University, 239 Huay Kaew Road, Muang District, Chiang Mai 50200, Thailand

² Thermal System Research Laboratory, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University, 239 Huay Kaew Road, Muang District, Chiang Mai 50200, Thailand

* Corresponding author.

E-mail: thoranisdee@gmail.com; Telephone: 089 4339130

วันที่รับบทความ 22 กุมภาพันธ์ 2566; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 27 เมษายน 2566; วันที่ตอบรับบทความ 4 พฤษภาคม 2566

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงผลของการใช้ลูกบอลโลหะทองแดง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร มาช่วยในการกระจายความร้อนภายในกากกาแฟ ที่บรรจุในปฏิกรณ์ไพโรไลซิส ทรงกระบอกแบบเบดนิ่ง ในการผลิตถ่านชีวภาพจากกากกาแฟปริมาณ 300 กรัม ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน ที่อัตราการไหล 50 มิลลิลิตรต่อนาที โดยรักษาอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยมีการตรวจวัดอุณหภูมิของกากกาแฟที่ตำแหน่งจากผิวภายในปฏิกรณ์ และที่จุดศูนย์กลางของกากกาแฟในปฏิกรณ์ ซึ่งเป็นจุดที่ได้รับความร้อนและเกิดปฏิกิริยาสลายตัวเชิงเคมีความร้อนช้าที่สุด ลูกบอลโลหะจะถูกล้างทำความสะอาดระหว่างชั้นของกากกาแฟที่มีการแบ่งบรรจุชั้นละ 100 กรัม ผลของการเติมลูกบอลโลหะทำให้อุณหภูมิที่จุดศูนย์กลางในเบดกากกาแฟ มีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 21.32% ในช่วงอุณหภูมิ 351.5 - 461.5°C และการเติมลูกบอลโลหะเพื่อช่วยในการกระจายความร้อน ช่วยทำให้กากกาแฟได้รับความร้อนและเกิดการสลายตัวทางเคมีความร้อนได้มากขึ้น ลดการสูญเสียความร้อนเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนลงได้ ทำให้ใช้พลังงานไฟฟ้าในการให้ความร้อนแก่ปฏิกรณ์ลดลง 5.98% คุณภาพของถ่านชีวภาพในด้าน ค่าการดูดซับและความเป็นรูพรุน โดยเฉพาะค่าการดูดซับไอโอดีน ซึ่งมีค่าเปลี่ยนไป จาก 270 mg/g ไปเป็น 590 mg/g เพิ่มขึ้นถึง 118.51% ในขณะเดียวกัน ผลผลิตของผลิตภัณฑ์ที่เป็นถ่านชีวภาพ รวมถึงองค์ประกอบของ ปริมาณสารระเหย เถ้า และคาร์บอนคงตัว มีปริมาณใกล้เคียงกับการผลิตถ่านชีวภาพที่ไม่มีการเติมลูกบอลโลหะ

คำสำคัญ

ถ่านชีวภาพ กากกาแฟ ลูกบอลโลหะทองแดง ไพโรไลซิส

Abstract

In this study, slow pyrolysis of spent coffee ground (SCG) in cylinder shape fixed bed reactor was investigated with the aim to develop the way increasing the heating rate of SCG in the center of reactor. The small metal balls 8 mm. diameter were used as the thermal distributor within the final temperature 500°C, 50 ml/min of N₂ gas flow, and 2 hrs.

holding time. The results reveal that the heating rate of spent coffee ground with small metal balls (SCG+ MB) was increased in the range of temperature 351.5 - 461.5°C faster than the pyrolysis of SCG and could reduce 5.98% electric consumption for heating the reactor. The yield of bio-char from experiments are not different significantly as well as the content of Volatile matter, ash, fixed carbon and higher heating value of the products. The specific surface area, pore volume and pore size tend to increase due to the effect of addition of metal balls could rise duration time of the thermochemical decomposition, iodine adsorption of the SCB+MB bio-char is 590 mg/g which is 118.51% higher than SCG bio-char at 270 mg/g. These results claim that the pyrolysis which having metal balls can improve the raising of heating rate of the pyrolysis and could upgrade the properties of product biochar to be prepared for primary materials for further use.

Keywords

biochar; spent coffee ground; metal balls; pyrolysis

1. คำนำ

ธุรกิจกาแฟของประเทศไทยในปัจจุบัน มีแนวโน้มเติบโตอย่างต่อเนื่อง เป็นผลเนื่องมาจากความนิยมการบริโภคกาแฟของชาวไทยที่เพิ่มขึ้น เครื่องดื่มกาแฟ เริ่มเข้ามามีบทบาทในวิถีชีวิตของคนไทยมากขึ้น เนื่องจากเครื่องดื่มกาแฟสามารถหาดื่มได้ตลอดเวลา ทุกสถานที่ อีกทั้งยังมีกลิ่นและรสชาติอันเป็นเอกลักษณ์ ทำให้มีผู้คนชื่นชอบการดื่มกาแฟ มีการบริโภคกาแฟในทุกโอกาส การเติบโตของธุรกิจกาแฟที่เห็นได้อย่างเด่นชัด คือการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องของร้านกาแฟสดในทุกสถานที่ทั่วประเทศ โดยมีการคาดการณ์ว่าในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2562-2566 นี้ ธุรกิจกาแฟอาจมีการเติบโตได้เพิ่มขึ้นเฉลี่ยปีละ 3% ซึ่งในปัจจุบันนี้ พบว่าความต้องการใช้กาแฟของประเทศไทยเฉลี่ยปีละ 90,000 ตัน และหากสถานการณ์การบริโภคกาแฟ เป็นไปดังที่คาดการณ์นั้น ปริมาณความต้องการใช้กาแฟในประเทศไทยอาจสูงถึง 104,000 ตันต่อปี [1]

ในกระบวนการผลิตเครื่องดื่มกาแฟนั้น เมล็ดกาแฟที่ผ่านกระบวนการคั่วบดจะถูกนำมาสกัดเอาน้ำกาแฟออกมาทำเครื่องดื่ม ส่วนที่เหลือเรียกว่ากากกาแฟ ซึ่งส่วนนี้ไม่สามารถนำมาใช้สกัดน้ำกาแฟได้อีกเนื่องจากคุณภาพ ได้แก่ รสชาติและกลิ่นหอมที่ได้จากน้ำกาแฟจะลดลง กากกาแฟจึงถือเป็นของเสียอันตรายที่เหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมการแปรรูปที่ได้จากร้านกาแฟสดทั่วไป ก่อให้เกิดปัญหาในการกำจัด เนื่องจากกากกาแฟยังคงมีความชื้นสูง การสะสมของกากกาแฟ อาจเป็นแหล่งสะสมของเชื้อราและแบคทีเรีย วิธีการหนึ่งที่น่าจะ

เหมาะสมในการกำจัดกากกาแฟ และนำกลับมาใช้ประโยชน์ คือการผลิตถ่านชีวภาพจากกากกาแฟ โดยวิธีไพโรไลซิส

2. ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

กระบวนการไพโรไลซิส คือ กระบวนการที่เปลี่ยนรูปของชีวมวล ด้วยปฏิกิริยาทางเคมีความร้อนไปเป็นเชื้อเพลิงที่มีค่าทางความร้อนสูงขึ้น โดยผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น ได้แก่ ถ่านชีวภาพ (bio-char) น้ำมัน (bio-oil) และ แก๊สเบาที่ไม่ควบแน่น (non-condensable gas) โดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ ในช่วง 400-800 องศาเซลเซียสในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน โดยสัดส่วนของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ สภาวะที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา สภาพวัตถุดิบที่ใช้เป็นสารตั้งต้น ชนิดของเครื่องปฏิกรณ์ เป็นต้น กระบวนการไพโรไลซิส แบ่งออกเป็นสองประเภท คือ ไพโรไลซิสแบบช้า (slow pyrolysis) เป็นกระบวนการที่มีการทำ ปฏิกิริยาในอุณหภูมิระหว่าง 400-600°C มีอัตราการให้ความร้อนต่ำ (น้อยกว่า 10°C/min) ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางของวัตถุดิบที่ใช้ในการทำปฏิกิริยามีขนาดใหญ่กว่า 2 มิลลิเมตร ผลิตภัณฑ์จากไพโรไลซิสแบบช้าจะได้ผลิตภัณฑ์หลักเป็นถ่านชีวภาพ 25-35 เปอร์เซ็นต์ และไพโรไลซิสแบบเร็ว (fast pyrolysis) เป็นกระบวนการที่ได้น้ำมันเป็นผลิตภัณฑ์หลัก ประมาณ 60-75 เปอร์เซ็นต์ โดยทำ ปฏิกิริยาที่อุณหภูมิปานกลาง 400 - 650°C มีอัตราการให้ความร้อนสูง (มากกว่า 1,000°C/sec) เส้นผ่าน ศูนย์กลางของวัตถุดิบมีขนาดต่ำกว่า 2 มิลลิเมตร มีระยะเวลาของ ไอที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์สั้นมาก (น้อยกว่า 2 วินาที) [2,3]

สำหรับถ่านชีวภาพ เป็นผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสของชีวมวล มีส่วนประกอบของคาร์บอนคงตัวเป็นส่วนใหญ่ ประกอบด้วยสารระเหยประมาณ 20-30% ค่าความร้อนประมาณ 28-33 MJ/kg มีน้ำหนักเบาสามารถลอยน้ำได้เนื่องจากความเป็นรูพรุนทำให้มีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำ ถ่านที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านชีวภาพ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้เช่นกัน โดยนำไปใช้ใน กระบวนการผลิตซีเมนต์ ถ่านชีวภาพถือเป็นเชื้อเพลิงที่มีประสิทธิภาพในการให้อุณหภูมิสูงในการเผาไหม้และไม่มีควัน มีความหนาแน่นของคาร์บอนมากกว่าแกรไฟต์ นอกจากนี้ ถ่านชีวภาพมีความพรุนในตัว มีพื้นที่ผิวสัมผัสต่อมวลมาก ทำให้ไวต่อการ เกิดปฏิกิริยาจึงนิยมใช้เป็นตัวดูดซับทางเคมีด้วย [4]

การศึกษาเกี่ยวกับการผลิตถ่านชีวภาพผ่านกระบวนการไพโรไลซิสถือว่าได้รับความสนใจอย่างมากในปัจจุบัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในยุคที่ทั่วโลกให้ความสำคัญกับการแสวงหาแหล่งพลังงานทางเลือก และวัสดุที่สามารถนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ โดยคำนึงถึงการอนุรักษ์พลังงาน ควบคู่ไปกับกระบวนการผลิต งานวิจัยส่วนใหญ่มุ่งเน้นการพัฒนากระบวนการผลิตถ่านชีวภาพผ่านการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับปริมาณและคุณภาพของถ่านชีวภาพ ได้แก่ ผลของอุณหภูมิ อัตราการไหลของแก๊สเฉื่อย ระยะเวลา ประเภทของชีวมวล เป็นต้น Xiaoxiao Zhang และ คณะ (2020) [5] ได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อผลของการเกิดถ่านชีวภาพจากเศษพืชไร่ และคุณลักษณะทางกายภาพและเคมีโดยได้ทำการเตรียมถ่านชีวภาพโดยการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 300 400 500 และ 600 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าปริมาณการเกิดถ่านชีวภาพจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสให้ผลของการเกิดถ่านชีวภาพ ปริมาณมากที่สุด และอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของถ่านชีวภาพ

อย่างไรก็ตาม ในการผลิตถ่านชีวภาพด้วยกระบวนการไพโรไลซิส มักจะพบปัญหาในเรื่องของการถ่ายเทความร้อนให้แก่สารตั้งต้นที่บรรจุอยู่ในปฏิกรณ์โดยเฉพาะปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งจะทำให้ชีวมวลได้รับความร้อนไม่สม่ำเสมอ ทำให้ได้ถ่านชีวภาพที่มีคุณภาพแตกต่างกันถึงแม้จะเป็นถ่านชีวภาพที่มาจากแหล่งเดียวกัน นอกจากนี้ระยะเวลาในการให้ความร้อนที่เหมาะสมที่ทำให้ผลผลิตถ่านชีวภาพมีคุณภาพสูงยังไม่สามารถ

กำหนดได้ชัดเจน ซึ่งปัจจัยส่วนนี้จะมีผลต่อปริมาณและค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิง มีงานวิจัยมากมายที่ได้ศึกษาถึงการพัฒนาปฏิกรณ์ไพโรไลซิส ให้มีสมรรถนะในการส่งผ่านความร้อนให้ชีวมวลได้มีการสลายตัวได้เร็วขึ้น ดังเช่นในงานวิจัยของ Mei และคณะ (2012) [6] ที่ได้ศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของชีวมวล ในปฏิกรณ์ขนาดเล็กแบบ micro-pin-fin arrays ซึ่งพบว่าปฏิกรณ์ในรูปแบบดังกล่าว ช่วยลดความแตกต่างของคุณภาพของถ่านชีวภาพลงได้ หรือในงานวิจัยของ Zhang และคณะ (2022) [7] ได้ทำการพัฒนาปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบทอมีกริบ โดยพบว่า ปฏิกรณ์ในรูปแบบนี้ช่วยให้อุณหภูมิของชีวมวลภายในปฏิกรณ์ มีค่าเท่ากันทั่วถึงได้เร็วขึ้น ซึ่งจะส่งผลทำให้ชีวมวลเกิดการสลายตัวทางเคมีความร้อนได้เร็ว และมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีเป็นหนึ่งเดียวกันได้ ดังนั้นการศึกษาดังกล่าวจะช่วยให้ทราบถึงประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพที่มีความจำเป็น ซึ่งในงานวิจัยนี้จะหาแนวทางในการเพิ่มสมรรถนะในการถ่ายเทความร้อนโดยใช้ลูกบอลโลหะทองแดงมาช่วยกระจายความร้อนเพื่อให้อุณหภูมิของวัตถุดิบ และคุณภาพถ่านชีวภาพที่ได้มีค่าสม่ำเสมอและลดเวลาในการผลิตถ่านชีวภาพ

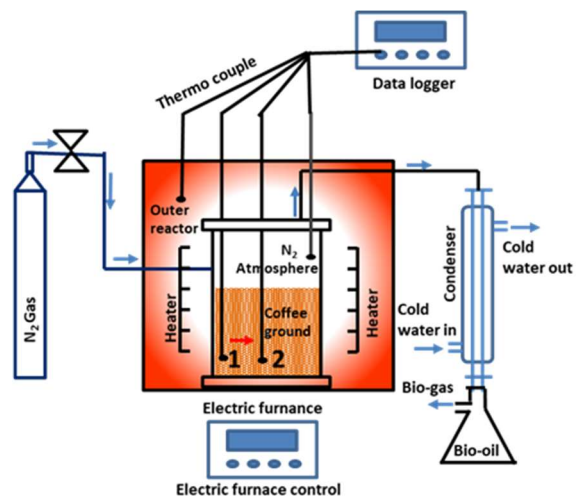
3. วิธีดำเนินการวิจัย

ในการทดสอบเพื่อผลิตถ่านชีวภาพจากกากกาแฟ จะแบ่งเป็น 2 ชุดการทดสอบ คือชุดการทดสอบไพโรไลซิสกากกาแฟแบบไม่มีการเติมลูกบอลโลหะทองแดง (SCG) และชุดการทดสอบไพโรไลซิสกากกาแฟที่มีการเติมลูกบอลโลหะทองแดง (SCG+MB) ซึ่งจะมีการเติมลูกบอลโลหะทองแดง วางแทรกคั่นอยู่ระหว่างชั้นกากกาแฟ ในลักษณะเป็นแพในแนวราบ น้ำหนักลูกบอลโลหะที่ใช้ในแต่ละชั้นเฉลี่ย ชั้นละ 378 กรัม โดยแต่ละชุดทดสอบจะมีการทดสอบ 3 ซ้ำ เพื่อนำเอาค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิในแต่ละชุดทดสอบ มาสร้างเป็นกราฟการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของกากกาแฟที่จุดต่างๆ ในปฏิกรณ์ โดยเริ่มจากการนำกากกาแฟไปทำการอบแห้งเพื่อกำจัดความชื้น ที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำกากกาแฟที่ได้น้ำหนัก 300 กรัมบรรจุใส่ในปฏิกรณ์ ต่อชุดปฏิกรณ์เข้ากับชุด Thermocouple Type K และเตาไฟฟ้าซึ่งมีการตั้งค่าอุณหภูมิการทำงานของเตาให้ความ

ร้อนด้วยไฟฟ้าที่ 500°C มีการควบคุมอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนด้วย flow meter ที่อัตราการไหล 50 ml/min ระยะเวลาการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิคงที่ 2 ชั่วโมง โดยมีการต่อท่อแก๊สไอระเหยที่ออกจากปฏิกรณ์เข้ากับชุดควบแน่นไอระเหย ซึ่งมีน้ำเย็นเป็นสารทำงานหลังจากครบกำหนดเวลาการทำไพโรไลซิสที่อุณหภูมิคงที่แล้ว จะทำการหยุดการจ่ายไฟฟ้าให้แก่เตาไฟฟ้า ทั้งให้ปฏิกรณ์เย็นลงเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 12 ชั่วโมง หลังจากนั้น นำข้อมูลอุณหภูมิที่ตรวจวัดได้ในแต่ละจุดของปฏิกรณ์มาทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการกระจายอุณหภูมิในจุดต่างๆในปฏิกรณ์ ส่วนถ่านชีวภาพในปฏิกรณ์และน้ำมันที่ชุดควบแน่น จะถูกนำออกมาชั่งน้ำหนักและคำนวณหาน้ำหนักของแก๊สที่ไม่ควบแน่นจากการหักลบ น้ำหนักของวัสดุติด กับผลรวมของน้ำหนักของถ่านชีวภาพและน้ำมันชีวภาพที่ได้ เพื่อศึกษาร้อยละของผลผลิตที่ได้ต่อไป สำหรับถ่านชีวภาพที่ผลิตได้ในแต่ละครั้งของการทดสอบ จะถูกสุ่มเก็บมาผสมแล้วจึงนำไปวิเคราะห์ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง ด้วยเครื่อง Bomb calorimeter, ปริมาณสารองค์ประกอบ Proximate analysis ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D7582 ด้วยเครื่อง TGA-701 Thermogravimetric Analyzer, ค่าพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุน (Brunauer-Emmett-Teller, BET) ด้วยเครื่อง Moded Autosorb 1 MP, Quantachrome, USA, ค่าการดูดซับไอโอดีน (Iodine number) ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D4607-94 และการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผลิตภัณฑ์ถ่านชีวภาพ โดยใช้เทคนิค scanning electron microscope (SEM) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน JEOL JSM-5910LV, France

อุปกรณ์สำหรับกระบวนการไพโรไลซิสที่ใช้ศึกษาแสดงดังรูปที่ 1 ชุดทดสอบประกอบไปด้วยอุปกรณ์ 4 ส่วนหลักๆ ได้แก่ 1. เตาไฟฟ้า ซึ่งมีแผงวงจรควบคุมการทำงานที่สามารถปรับค่าอุณหภูมิได้ในช่วงอุณหภูมิห้องถึง 1000°C และมีระบบตัดไฟอัตโนมัติเมื่ออุณหภูมิอยู่ในช่วงที่กำหนด, 2. ชุดปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งลักษณะทรงกระบอกทำจากเหล็ก มีรูสำหรับแก๊สเฉื่อยเข้าด้านข้างและรูสำหรับระบายแก๊สออกด้านบนของปฏิกรณ์, 3. ชุด Thermocouple type K สำหรับตรวจวัดอุณหภูมิของชีวมวลที่จุดต่างๆ เพื่อศึกษาการกระจายของอุณหภูมิ ในแนวนอน จากผิวด้านข้างของปฏิกรณ์และที่

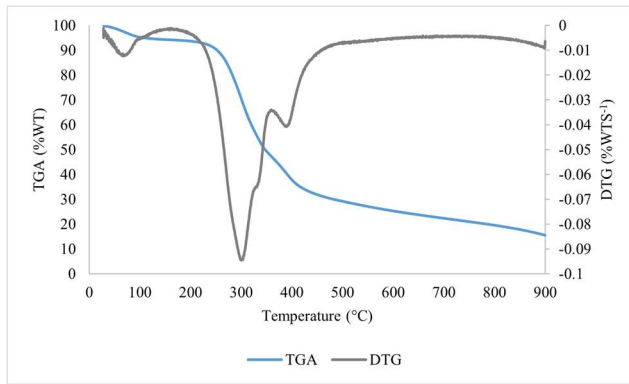
บริเวณจุดศูนย์กลางของปฏิกรณ์, และ 4. ชุดควบแน่นแบบ 1 ตอน ที่ระบายความร้อนด้วยน้ำ



รูปที่ 1 ชุดการทดลองกระบวนการไพโรไลซิสถ่านชีวภาพจากกากกาแฟ

4. ผลการทดลอง

ผลการวิเคราะห์ ค่าความร้อนของกากกาแฟ ที่ใช้เป็นวัสดุในการเปรียบเทียบคุณสมบัติของถ่านชีวภาพที่ผลิตได้มีค่าเท่ากับ $20.03\text{ กิโลจูลต่อกรัม}$ และการวิเคราะห์การสูญเสีย น้ำหนักเชิงความร้อน (Thermogravimetric Analysis, TGA) และการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน (Derivative Thermogravimetric analysis, DTG) ของกากกาแฟที่นำมาใช้เป็นวัสดุในการผลิตถ่านชีวภาพ แสดงดังรูปที่ 2 จากรูป ผลการวิเคราะห์ TGA และ DTG ของกากกาแฟตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึง 900°C ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10°C/min ทำให้ทราบพฤติกรรมการสลายตัวของกากกาแฟ จากกราฟ DTA จะเห็นได้ว่ากากกาแฟมีการเปลี่ยนแปลงอยู่สองช่วงอุณหภูมิ คือ ช่วงอุณหภูมิประมาณ $50-120$ และ $240 - 450^{\circ}\text{C}$ โดยลักษณะกราฟช่วงแรกที่มีการลดลง เป็นช่วงที่กากกาแฟได้รับความร้อน เกิดกระบวนการดูดพลังงานจนกระทั่งอุณหภูมิประมาณ 80°C กราฟมีลักษณะชันขึ้นเป็นช่วงที่มีการคายพลังงานออกมา ซึ่งช่วงพฤติกรรมนี้น่าจะเกิดขึ้นเนื่องจากกระบวนการสลายตัวของน้ำที่มีอยู่ในกากกาแฟ [8]

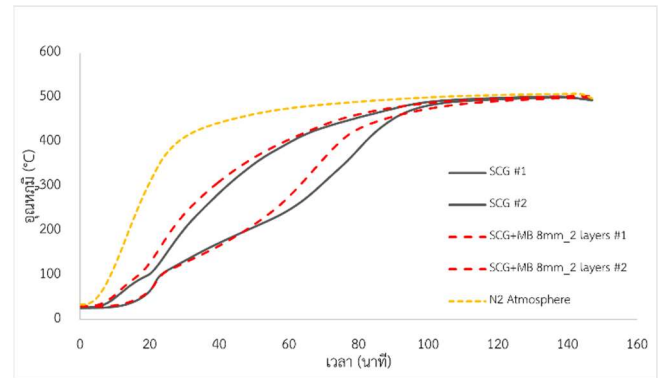


รูปที่ 2 การวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักเชิงความร้อน (TGA) และอัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของกากกาแฟ (DTG)

สอดคล้องกับกราฟ TGA ที่แสดงการลดลงของน้ำหนักกากกาแฟประมาณ 5.6% สำหรับการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนในช่วงหลัง เป็นการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการสลายตัวทางเคมีที่เกิดจากความร้อนขององค์ประกอบหลักของกากกาแฟ ได้แก่ Hemicellulose (250-350 °C) Lignin (300-450 °C) และ Cellulose (300-480 °C) [9] สอดคล้องกับข้อมูลจากกราฟ TGA ที่แสดงการลดลงของน้ำหนักกากกาแฟในช่วงอุณหภูมินี้ 61.3% สำหรับอุณหภูมิหลังจากช่วง 450 °C พบว่าการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนและน้ำหนักของกากกาแฟค่อนข้างคงที่ แสดงว่าหลังจากช่วงอุณหภูมิดังกล่าว กากกาแฟจะมีการสลายตัวเปลี่ยนเป็นถ่านชีวภาพโดยสมบูรณ์

4.1 การกระจายอุณหภูมิของกากกาแฟในปฏิกรณ์

จากการทดสอบการผลิตถ่านชีวภาพจากกากกาแฟด้วยกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 500 °C ระยะเวลาไพโรไลซิสที่อุณหภูมิคงที่ 2 ชั่วโมง ที่อัตราการไหลไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที ได้กราฟผลการกระจายของอุณหภูมิของกากกาแฟ จากผิวเข้าสู่ศูนย์กลางของปฏิกรณ์ ตั้งแต่เริ่มให้ความร้อนด้วยเตาไฟฟ้า ณ อุณหภูมิห้อง (นาที่ที่ 0) ไปจนกระทั่งอุณหภูมิภายในเตาถึงที่กำหนดไว้ที่ 500 °C ใช้เวลาเฉลี่ย 27 นาที จากนั้น ทำการให้ความร้อนภายใต้อุณหภูมิคงที่ 500 °C ต่อไปอีกเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ได้กราฟอุณหภูมิของถ่านชีวภาพที่ผิวปฏิกรณ์ (จุดที่ 1) และบริเวณจุดตรงกลางปฏิกรณ์ (จุดที่ 2) ของการไพโรไลซิสกากกาแฟที่ไม่มีการเติมลูกบอลโลหะ (SCG) และการไพโรไลซิสกากกาแฟที่มีการเติมลูกบอลโลหะ (SCG+MB) ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิที่ผิวเข้าสู่ศูนย์กลางของปฏิกรณ์ จุด 1 ไปยังจุด 2 ในกระบวนการไพโรไลซิสกากกาแฟที่ไม่มีการเติมลูกบอลโลหะ และกากกาแฟที่มีการเติมลูกบอลโลหะ ในปฏิกรณ์ที่เวลาต่างๆ

จากรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของกากกาแฟที่ติดกับผิวปฏิกรณ์ (จุดที่ 1) จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ตามอุณหภูมิอากาศร้อนภายในเตา และสู่เข้าหาอุณหภูมิ 500 °C ส่วนอุณหภูมิที่บริเวณจุดกลางปฏิกรณ์ของเบตกากกาแฟ ในจุดที่ 2 ซึ่งถือว่าเป็นจุดที่ได้รับความร้อนและมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิช้าที่สุด ในกรณีของการไพโรไลซิสกากกาแฟที่มีลูกบอลโลหะ อุณหภูมิจุดที่ 2 จะเพิ่มขึ้นในอัตราที่สูงกว่า โดยพบว่าในช่วงอุณหภูมิ 200-450 °C จะมีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ศูนย์กลางของเบตกากกาแฟ เท่ากับ 7.17 °C/min มากกว่าการไพโรไลซิสกากกาแฟที่ไม่มีการเติมลูกบอลโลหะที่มีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเท่ากับ 5.91 °C/min คิดเป็นการเพิ่มขึ้นร้อยละ 21.32 ซึ่งการที่อุณหภูมิที่ศูนย์กลางของเบตกากกาแฟของการไพโรไลซิสกากกาแฟที่มีการเติมลูกบอลโลหะ มีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจนกระทั่งถึงที่ 400 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่กากกาแฟ มีการสลายตัวเป็นถ่านชีวภาพหมด ได้ก่อนการไพโรไลซิสกากกาแฟที่ไม่มีลูกบอลโลหะ ทำให้มวลทั้งก้อนของกากกาแฟ มีเวลาในการสลายตัวโดยสมบูรณ์ ได้นานขึ้น ซึ่งส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของถ่านชีวภาพที่ผลิตได้

4.2 สมบัติของถ่านชีวภาพที่ผลิตได้

4.2.1 คุณสมบัติด้านองค์ประกอบทางเคมี

จากการทดลองผลิตถ่านชีวภาพจากการไพโรไลซิสกากกาแฟที่ไม่มีการเติมลูกบอลโลหะ (SCG) เปรียบเทียบกับการผลิตถ่านชีวภาพจากกากกาแฟที่มีการเติมลูกบอลโลหะ

(SCG+MB) เพื่อช่วยในการกระจายความร้อนที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงได้ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ร้อยละผลผลิต, องค์ประกอบทางเคมี ค่าความร้อน และพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ ของถ่านชีวภาพที่ผลิตได้

ถ่านชีวภาพ		SCG	SCG+MB
ร้อยละผลผลิต(%)		25.67	25.67
Proximate analysis (%)	ความชื้น	0.25	0.96
	ปริมาณสารระเหย	14.11	14.68
	เถ้า	6.45	6.51
	คาร์บอนคงตัว	79.19	77.85
ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (MJ/kg)		28.77	28.08
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (kWh)		7.02	6.50

จากตารางที่ 1 นำหนักของผลิตภัณฑ์ถ่านชีวภาพที่ผลิตได้ที่อุณหภูมิ 500°C จะเห็นได้ว่า การไพโรไลซิสกากกาแฟที่อุณหภูมิเดียวกัน ได้ปริมาณผลผลิตไม่แตกต่างกัน เช่นเดียวกับผลการวิเคราะห์ องค์ประกอบทางเคมีของถ่านชีวภาพ จากการวิเคราะห์ Proximate analysis ได้แก่ ปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย เถ้า และ ปริมาณคาร์บอนคงตัว รวมถึง ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงของถ่านชีวภาพที่ผลิตได้ จะพบว่าค่าคุณสมบัติต่างๆเหล่านี้ของผลิตภัณฑ์ถ่านชีวภาพที่เตรียมได้ที่อุณหภูมิเดียวกัน แทบจะไม่มีมีความแตกต่างกัน อาจเนื่องมาจากการไพโรไลซิสกากกาแฟที่อุณหภูมิ 500°C เป็นระยะเวลานานถึง 2 ชั่วโมงนี้ เป็นสภาวะอุณหภูมิและเวลานานเกินไปที่จะทำให้เกิดการสลายตัวขององค์ประกอบต่างๆของกากกาแฟอย่างสมบูรณ์ ทำให้เกิดเป็นถ่านชีวภาพที่คงเหลือองค์ประกอบต่างๆ ของการไพโรไลซิส กากกาแฟจากการทดลองทั้ง 2 รูปแบบนี้ในลักษณะที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

เมื่อพิจารณาถึงพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการไพโรไลซิส พบว่าการไพโรไลซิสกากกาแฟที่ไม่มีการเติมลูกบอลโลหะ มีการใช้พลังงานไฟฟ้าตลอดกระบวนการ เท่ากับ 7.02 kWh ในขณะที่การไพโรไลซิสกากกาแฟที่มีการเติมลูกบอลโลหะเพื่อช่วยในการกระจายความร้อน มีการใช้พลังงานไฟฟ้าตลอดกระบวนการเท่ากับ 6.60 kWh ซึ่งถือว่า การเติมลูกบอลโลหะเพื่อช่วยในการกระจายความร้อน สามารถช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ถึง 5.98% ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการไพโรไล

ซิสของกากกาแฟภายในปฏิกรณ์ ของการทดลองที่มีการเติมลูกบอลโลหะ เกิดขึ้นได้เร็วกว่า โดยเมื่อกากกาแฟที่บริเวณผิวปฏิกรณ์ ได้รับความร้อนจากเตาไฟฟ้า ซึ่งเป็นแหล่งความร้อนภายนอก เกิดการสลายตัวทางเคมีความร้อน จะมีการคายพลังงานออกมา (ตามลักษณะของกราฟ DTG ช่วงขาขึ้น จากรูปที่ 2) ลูกบอลโลหะที่วางแทรกอยู่ในเบตกากกาแฟ จะทำหน้าที่นำความร้อนกระจายเข้าสู่กากกาแฟที่อยู่บริเวณศูนย์กลางภายในปฏิกรณ์ได้เร็วขึ้น ทำให้ลดการสูญเสียพลังงานความร้อนเนื่องจากการถ่ายเทพลังงานความร้อนจากกากกาแฟ จึงทำให้เห็นว่า การไพโรไลซิสกากกาแฟที่มีการเติมลูกบอลโลหะ มีอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าเพื่อให้ความร้อนแก่ปฏิกรณ์ได้น้อยกว่าการไพโรไลซิสกากกาแฟที่ไม่มีการเติมลูกบอลโลหะ

4.2.2 คุณสมบัติด้านพื้นที่ผิว ความเป็นรูพรุน และค่าการดูดซับไอโอดีน ของถ่านชีวภาพที่ผลิตได้

ปริมาณองค์ประกอบภายในของถ่านชีวภาพที่ผลิตได้ถึงแม้จะมีการแสดงค่าตัวเลขที่มีความใกล้เคียงกันจนทำให้ไม่สามารถอภิปรายถึงความแตกต่างของการไพโรไลซิสที่มีการเติมลูกบอลโลหะกับการไพโรไลซิสแบบที่ไม่มีการเติมลูกบอลโลหะได้ แต่เมื่อนำผลิตภัณฑ์ถ่านชีวภาพที่ผลิตได้จากทั้งสองการทดลอง มาวิเคราะห์เปรียบเทียบคุณสมบัติด้านพื้นที่ผิว ความเป็นรูพรุน และคุณสมบัติด้านการดูดซับไอโอดีน ได้ข้อมูลแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน ขนาดรูพรุน และค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านชีวภาพที่ผลิตได้

ถ่านชีวภาพ	SCG	SCG+MB
พื้นที่ผิวจำเพาะ (m ² /g)	20.29	29.34
ปริมาตรรูพรุน (cm ³ /g)	0.0387	0.0448
ขนาดรูพรุน (Å)	26.66	30.51
ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ (mg/g)	270	590

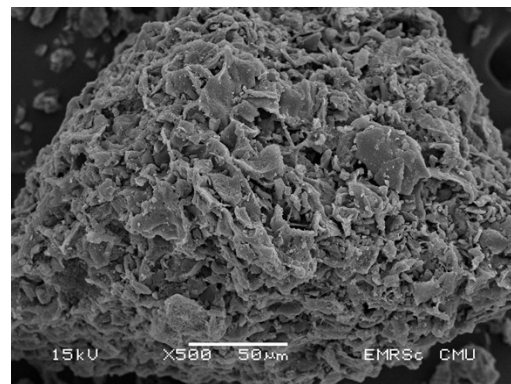
จากตารางที่ 2 คุณสมบัติด้านพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดของรูพรุน ซึ่งเป็นคุณสมบัติสำคัญของถ่านชีวภาพที่ใช้เป็นตัวบ่งชี้ คุณภาพของถ่านชีวภาพในการใช้ประโยชน์ในด้านการเป็นวัสดุดูดซับสารเคมี ไอออน และแก๊สต่างๆ ได้ พบว่า ถ่านชีวภาพที่ผลิตได้จากการทดลองที่ไม่มีการเติมลูกบอลโลหะ (SCG) เมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติ กับการ

ทดลองที่มีการเติมลูกบอลโลหะ (SCG+MB) จะเห็นได้ว่า ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุน ของถ่านชีวภาพที่ผลิตได้จากการทดลองที่มีการเติมลูกบอลโลหะเพื่อช่วยในการกระจายความร้อน มีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 44.60, 15.76 และ 14.44% ตามลำดับ ซึ่งจากข้อมูลดังกล่าวช่วยสนับสนุนแนวคิดของการเติมลูกบอลโลหะซึ่งช่วยกระจายความร้อนในเบตกากากาแฟทำให้เกิดการสลายตัวเชิงเคมีความร้อนของกากกาแฟในบริเวณศูนย์กลางของปฏิกรณ์ซึ่งเป็นจุดที่ได้รับความร้อนและเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวเชิงเคมีความร้อนได้ช้า เกิดการสลายตัวของกากกาแฟได้เร็วและมีระยะเวลาในการสลายตัวที่อุณหภูมิสูงได้นานขึ้น ซึ่งจะสอดคล้องกับข้อมูลอุณหภูมิของกากกาแฟในการทดลองที่มีการเติมลูกบอลโลหะในหัวข้อที่ 4.1 ซึ่งการที่กากกาแฟในการทดลอง SCG+MB ได้รับความร้อนและเกิดการสลายตัวในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 400°C ได้เร็วและนานขึ้น ส่งผลทำให้กลุ่มสารองค์ประกอบที่เป็นเป็นสารระเหย มีระยะเวลาการสลายตัวและระเหยออกจากกากกาแฟได้มากขึ้น ทำให้ถ่านชีวภาพที่เกิดขึ้น มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุน ที่เพิ่มมากขึ้น เช่นเดียวกับผลการวิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีน ที่แสดงให้เห็นความแตกต่างอย่างชัดเจนของการเติมลูกบอลโลหะเพื่อช่วยในการกระจายความร้อนที่มีผลต่อคุณสมบัติด้านการดูดซับไอโอดีน โดยค่าการดูดซับไอโอดีนมีค่าเพิ่มขึ้นจากการทดลองที่ไม่มีการเติมลูกบอลโลหะ จาก 270mg/g เพิ่มขึ้นเป็น 590 mg/g คิดเป็นการเปลี่ยนแปลงค่าการดูดซับไอโอดีนที่เพิ่มขึ้นถึง 118.51% ซึ่งค่าการดูดซับไอโอดีนที่วิเคราะห์ได้ถือว่ามีความใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Naruephat (2019) [10] ที่มีการระบุค่าไอโอดีน ของถ่านชีวภาพจากกากกาแฟที่ผลิตได้สำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ด้านการปรับปรุงดิน มีค่าเท่ากับ 618.3 มิลลิกรัมต่อกรัม (ช่วงอุณหภูมิไพโรไลซิส 350-550 °C) ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นของค่าการดูดซับไอโอดีน ของถ่านชีวภาพที่ผลิตได้ในงานวิจัยนี้ มีค่าแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ อาจเป็นผลเนื่องมาจากการเติมลูกบอลโลหะที่มีค่าการนำความร้อนสูงกว่ากากกาแฟ เป็นตัวช่วยกระจายความร้อนเข้าสู่บริเวณต่างๆของเบตกากากาแฟ ทำให้กากกาแฟ ได้รับความร้อนเร็วขึ้น ส่งผลให้กากกาแฟทั่วทั้งปฏิกรณ์เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวทางความร้อนได้เร็วและนานขึ้น กากกาแฟจึงมีการสลายโครงสร้างเดิมและเกิดเป็นถ่านชีวภาพที่มีโครงสร้างที่มีหมู่ฟังก์ชันที่มีความ

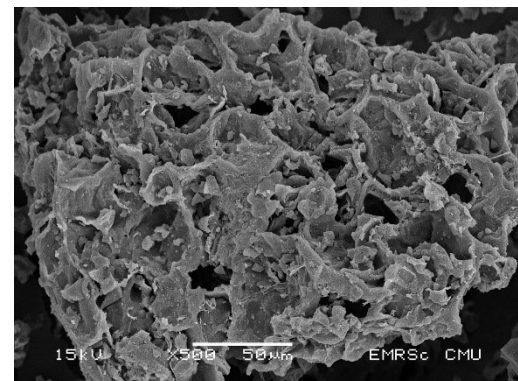
สารถในการดูดซับไอโอดีน บนพื้นผิวและในรูพรุนของถ่านชีวภาพได้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

4.2.3 ลักษณะสัณฐานวิทยาของถ่านชีวภาพที่ผลิตได้

ถ่านชีวภาพที่ผลิตได้จากการกระบวนการไพโรไลซิสกากกาแฟที่ไม่มีการเติมลูกบอลโลหะ (SCG) กับกากกาแฟที่มีการเติมลูกบอลโลหะเพื่อช่วยในการกระจายความร้อน (SCG+MB) สามารถนำมาศึกษาวิเคราะห์ความแตกต่างของลักษณะพื้นผิว และรูพรุนที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างถ่านชีวภาพจากกากกาแฟด้วยการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM ดังแสดงในรูปที่ 4 และรูปที่ 5



รูปที่ 4 ภาพถ่ายลักษณะสัณฐานวิทยา ของถ่านชีวภาพจากการไพโรไลซิสกากกาแฟที่ไม่มีการเติมลูกบอลโลหะ



รูปที่ 5 ภาพถ่ายลักษณะสัณฐานวิทยา ของถ่านชีวภาพจากการไพโรไลซิสกากกาแฟที่มีการเติมลูกบอลโลหะ

จากรูปที่ 4 และรูปที่ 5 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาบริเวณพื้นผิวของถ่านชีวภาพจากการไพโรไลซิสกากกาแฟ ที่ไม่มีการเติมลูกบอลโลหะ (SCG) และการไพโรไลซิสกากกาแฟที่มีการ

เติมลูกบอลโลหะเพื่อช่วยในการกระจายความร้อน (SCG+MB) ตามลำดับ จะเห็นว่าลักษณะพื้นผิวและรูพรุน ที่ได้จากการทดลองทั้ง 2 รูปแบบนี้ มีความแตกต่างกัน โดยลักษณะพื้นผิวของ SCG จะเป็นลักษณะพื้นผิวที่มีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก ส่วนถ่านชีวภาพ SCG+MB จะเห็นได้ว่าลักษณะพื้นผิวมีรูพรุนขนาดใหญ่และมีจำนวนรูพรุนมากกว่า ซึ่งลักษณะดังกล่าวสอดคล้องกับค่าการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุนในหัวข้อ 4.2.2 จึงเป็นข้อมูลที่ช่วยสนับสนุนแนวคิดในเรื่องของการเติมลูกบอลโลหะที่สามารถช่วยในการกระจายความร้อนในเบตกากากาแฟทำให้กากากาแฟได้รับความร้อนได้เร็วขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhao และคณะ, (2017) [11] ที่ได้ศึกษาถึงผลของอัตราการให้ความร้อนต่อชีวมวลถ่านผัดกาด ที่มีผลต่อการเกิดรูพรุนของถ่านชีวภาพ โดยพบว่า การเพิ่มขึ้นของอัตราการได้รับความร้อนในของชีวมวลในกระบวนการไพโรไลซิส ทำให้เกิดการสลายตัวของกลุ่มสารองค์ประกอบที่เป็นสารระเหยได้เร็วและมากขึ้น จึงส่งผลให้เกิดถ่านชีวภาพ ที่มีลักษณะความเป็นรูพรุนที่มากขึ้นดังปรากฏดังรูปที่ 5 สอดคล้องกับงานวิจัยของ Southavong, (2019) [12] ได้ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบลักษณะสัณฐานวิทยาของถ่านชีวภาพที่ผลิตได้จากขี้ข้าว โดยระบุปัจจัยด้านระยะเวลาในกระบวนการไพโรไลซิสซึ่งมีผลต่อการเกิดลักษณะรูพรุนชีวภาพ โดยถ่านชีวภาพที่ได้รับความร้อนสูงในระยะเวลาที่ยาวนานกว่า ทำให้มีโอกาสเกิดถ่านชีวภาพที่มีปริมาณรูพรุนเกิดขึ้นได้มากกว่า

5. การอภิปรายผลและสรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการศึกษาผลของการเติมลูกบอลโลหะ ที่มีต่อการเกิดถ่านชีวภาพจากกากากาแฟ ซึ่งจากการทดลองพบว่า การเติมลูกบอลโลหะเพื่อช่วยในการกระจายความร้อนของกากากาแฟ ในปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบเบตนิ่ง มีผลช่วยทำให้อุณหภูมิของกากากาแฟภายในปฏิกรณ์ โดยเฉพาะในตำแหน่งที่ 2 ซึ่งถือว่าเป็นตำแหน่งที่ได้รับความร้อนช้าที่สุด ได้รับความร้อนและเกิดการสลายตัวทางเคมีความร้อนได้เร็วขึ้น ช่วยลดพลังงานไฟฟ้าเนื่องจากการสูญเสียพลังงานความร้อนจากการถ่ายเทความร้อนสู่กากากาแฟที่อยู่ศูนย์กลางภายในปฏิกรณ์ได้มากถึง 5.98% การเติมลูกบอลโลหะใน

กระบวนการไพโรไลซิสกากากาแฟ ไม่มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติด้านปริมาณถ่านชีวภาพ และค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอย่างมีนัยสำคัญ แต่มีความแตกต่างอย่างชัดเจนเมื่อทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติด้าน พื้นที่ผิวจำเพาะและความเป็นรูพรุน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ค่าการดูดซับไอโอดีน โดยการเติมลูกบอลโลหะเพื่อช่วยกระจายความร้อนมีผลต่อระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาสลายตัวทางเคมีความร้อน ซึ่งมีผลต่อโครงสร้างและความเป็นรูพรุนของถ่านชีวภาพ ทำให้เพิ่มคุณสมบัติด้านการดูดซับไอโอดีน จาก 270 mg/g เป็น 590 mg/g เพิ่มขึ้น 118.51% ซึ่งสมบัติด้านความเป็นรูพรุน และการดูดซับไอโอดีน ที่ได้จากการเตรียมถ่านชีวภาพจากกากากาแฟที่มีการเติมลูกบอลโลหะนี้ สามารถนำไปสู่การต่อยอดเพื่อการพัฒนาถ่านชีวภาพให้ใช้ประโยชน์ได้อย่างหลากหลาย อาทิ การพัฒนาเป็นถ่านกัมมันต์ชีวภาพเพื่อการดูดซับสารเคมีอันตรายและโลหะหนักในอุตสาหกรรม การพัฒนาเป็นวัสดุดูดซับและปลดปล่อยแร่ธาตุเพื่อการปรับปรุงดิน เพื่อเพิ่มธาตุอาหารในดินทางการเกษตรกรรม ให้มีคุณภาพดีขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณจาก Fundamental Fund มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ประจำปี 2565

เอกสารอ้างอิง

- [1] วิเคราะห์สถานการณ์เศรษฐกิจการค้าไทยรายภูมิภาค. กลุ่มพัฒนาเศรษฐกิจฐานราก กองนโยบายการสร้างความเข้มแข็งทางการค้าสำนักงานนโยบายและยุทธศาสตร์การค้า (อ.อน.โล.น.). <http://www.tpsa.moc.go.th/>. สืบค้นวันที่ 27 เมษายน 2566
- [2] Tongcumpou C, Usapein P, Nattapong Tuntiwiwattanapun N. Complete utilization of wet spent coffee grounds waste as a novel feedstock for antioxidant, biodiesel, and bio-char production. *Industrial Crops and Products*. 2019;138: 111484
- [3] กุลนันท์ วิจารณ์กร. ไพโรไลซิส (Pyrolysis). *Technology Promotion and Innomag Magazine*. 2562;42: 61-64

- [4] นคร ทิพย์วงศ์. เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล. สำนักพิมพ์สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี ไทย-ญี่ปุ่น; 2553.
- [5] Zhang X, Zhang P, Yuan X, Li Y, Han L. Effect of pyrolysis temperature and correlation analysis on the yield and physicochemical properties of crop residue biochar. *Bioresource Technology*. 2020; 296: 122318
- [6] Mei D, Qian M, Liu B, Jin B, Yao Z, Chen Z. A micro- reactor with micro- pin- fin arrays for hydrogen production via methanol steam reforming. *Journal of Power Sources*. 2012; 205:367–376.
- [7] Zhang H, Xu C, Yu H, Wu H, Jin F, Xiao F, et al. Enhancement of methanol steam reforming in a tubular fixed- bed reactor with simultaneous heating inside and outside. *Energy*. 2022;254:124330.
- [8] Naruephat T, Patcharee P. Pyrolysis kinetics of coffee residue and tea residue by thermogravimetric analysis. *International Journal of Advances in Science Engineering and Technology*. 2017; 5(2): 25-28.
- [9] Anca-Couce A, Scharler R. Modelling heat of reaction in biomass pyrolysis with detailed reaction schemes. *Fuel*. 2017;206: 572-579.
- [10] Tangmunkongworakoon N. An approach to produce biochar from coffee residue for fuel and soil amendment purpose. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*. 2019; 8(1): S37–S44
- [11] Zhao B, O’ Connor D, Zhang J, Peng T, Shen Z, Tsang DCW, et al. Effect of pyrolysis temperature, heating rate, and residence time on rapeseed stem derived biochar. *Journal of Cleaner Production*. 2018;174:977–987.
- [12] Southavong S, Ismail M, Preston T, Saud H, Ismail R. Effects of pyrolysis temperature and residence time on rice straw- derived biochar for soil application. *International Journal of Plant & Soil Science*. 2018;23(3):1–11.