



การสังเคราะห์น้ำมันชีวภาพจากกากกาแฟและกากชาพร้อมกับน้ำมันเครื่องเก่า ด้วยกระบวนการไพโรไลซิสที่ใช้เปลือกไข่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

Bio-oil Synthesis from Spent Coffee and Tea Grounds Mixed with Waste Engine Oil Using Eggshell as a Catalyst

ธเนษฐ เคหาบาล^{1*} และ มาลี สันติคุณาภรณ์²

Tanate Kaehaban^{1*} and Malee Santikunaporn²

¹ นักศึกษาระดับปริญญาโท, สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อม, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

¹ Master's Degree Student, Master of Engineering Program in Energy and Environmental Technology Management, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University.

² รองศาสตราจารย์ ดร., ภาควิชาวิศวกรรมเคมี, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

² Assoc. Prof., Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University.

*Corresponding author, E-mail: smalee@engr.tu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการไพโรไลซิสของกากกาแฟ เพื่อผลิตน้ำมันชีวภาพและถ่านชีวภาพ โดยพิจารณาผลของอัตราการให้ความร้อน ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ (CaO) การเติมน้ำมันเครื่องเก่าและกากชาพร้อมกับกากกาแฟ จากการศึกษาพบว่า อัตราการให้ความร้อนที่สูงขึ้นช่วยเพิ่มเปอร์เซ็นต์น้ำมันชีวภาพจาก 20.21% เป็น 38.1% ในขณะที่ปริมาณถ่านชีวภาพลดลงจาก 49.58% เป็น 31.46% การเติมน้ำมันเครื่องเก่าช่วยเพิ่มค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์จาก 35.28 MJ/kg เป็น 46.21 MJ/kg ในขณะที่ปริมาณถ่านชีวภาพลดลงเล็กน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การเติมสารไฮโดรคาร์บอนช่วยเพิ่มค่าพลังงานของผลิตภัณฑ์ไพโรไลซิส นอกจากนี้การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CaO จากเปลือกไข่ช่วยเพิ่มเปอร์เซ็นต์น้ำมันชีวภาพจาก 21.84% เป็น 25.23% และช่วยปรับปรุงคุณภาพของน้ำมัน โดยลดองค์ประกอบออกซิเจนทำให้ค่าความร้อนของน้ำมันสูงขึ้น สำหรับการผสมกากชากับกากกาแฟพบว่าที่อัตราส่วน 50:50 ผลิตภัณฑ์มีค่าความร้อนสูงสุดอยู่ที่ 37.33 MJ/kg แม้ว่าการเพิ่มสัดส่วนกากชาจะทำให้เปอร์เซ็นต์น้ำมันชีวภาพลดลงจาก 36.5% (กากกาแฟ 100%) เป็น 9.65% (กากชา 100%) นอกจากนี้จากการศึกษาโดยใช้สัดส่วนกากกาแฟต่อกากชาที่ 50:50 ร่วมกับน้ำมันเครื่องเก่า 30 กรัมในอัตราส่วน 1:1 และมีตัวเร่งปฏิกิริยา CaO พบว่า ค่าความร้อนสูงสุดของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นเป็น 54.04 MJ/kg ซึ่งเป็นค่าที่สูงที่สุดในงานวิจัยนี้ ดังนั้นการปรับแต่งเงื่อนไขของกระบวนการไพโรไลซิสอย่างเหมาะสมสามารถเพิ่ม



ทั้งปริมาณและคุณภาพของพลังงานชีวภาพได้อย่างมีนัยสำคัญ ผลการศึกษานี้เป็นแนวทางสำคัญในการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตพลังงานชีวภาพจากของเสียให้มีประสิทธิภาพและยั่งยืนยิ่งขึ้น

คำสำคัญ: น้ำมันชีวภาพ, ไพโรไลซิส, น้ำมันเครื่องเก่า, กากกาแฟ, เปลือกไข่

Abstract

This research focuses on studying the factors affecting the pyrolysis process of coffee grounds to produce bio-oil and bio-char, considering the effects of heating rate, calcium oxide (CaO) catalyst, used engine oil addition, and the blending of tea grounds with coffee grounds. The study found that increasing the heating rate enhanced the bio-oil percentage from 20.21% to 38.1%, while the bio-char content decreased from 49.58% to 31.46%. The addition of used engine oil increased the energy content of the product from 35.28 MJ/kg to 46.21 MJ/kg, with a slight decrease in bio-char, indicating that adding hydrocarbons improves the energy value of the pyrolysis product. Additionally, the use of the CaO catalyst from eggshells increased the bio-oil percentage from 21.84% to 25.23% and improved the oil quality by reducing its oxygen content, leading to an increase in the oil's energy value. For the blending of tea grounds with coffee grounds, a 50:50 ratio resulted in the highest energy content of the product at 37.33 MJ/kg, although increasing the proportion of tea grounds reduced the bio-oil percentage from 36.5% (100% coffee grounds) to 9.65% (100% tea grounds). Furthermore, in the study using a 50:50 blend of coffee grounds and tea grounds with 30 grams of used engine oil at a 1:1 ratio and the CaO catalyst, the highest energy content of the product increased to 54.04 MJ/kg, which was the highest in this research. Therefore, optimizing the conditions of the pyrolysis process can significantly increase both the quantity and quality of bioenergy. The findings of this study provide important guidelines for developing more efficient and sustainable bioenergy production technologies from waste.

Keywords: Bio-oil, Pyrolysis, Waste Engine Oil, Spent Coffee Grounds, Eggshell

บทนำ

ความต้องการพลังงานที่เพิ่มขึ้นทั่วโลกและความกังวลเกี่ยวกับผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลได้กระตุ้นให้เกิดการวิจัยเกี่ยวกับแหล่งพลังงานทางเลือก และพลังงานหมุนเวียน (International Energy Agency, 2023) หนึ่งในเทคโนโลยีที่มีศักยภาพคือ การผลิตน้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) ผ่านกระบวนการไพโรไลซิส ซึ่งเป็นกระบวนการสลายตัวด้วยความร้อนในสภาวะไร้ออกซิเจนที่สามารถ



เปลี่ยนวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรให้เป็นเชื้อเพลิงเหลวที่มีมูลค่าสูง (Bridgwater, 2012) การใช้เทคโนโลยีนี้ไม่เพียงช่วยลดปริมาณของเสีย แต่ยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือใช้เหล่านี้ และช่วยลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิลที่มีทรัพยากรจำกัด (Demirbas, 2017)

กากกาแฟ (Spent Coffee Grounds: SCGs) เป็นของเสียที่เกิดขึ้นในปริมาณมากจากอุตสาหกรรมกาแฟ โดยคาดการณ์ว่าทั่วโลกผลิตกากกาแฟเหลือทิ้งมากกว่า 8 ล้านตันต่อปี (Campos-Vega, Loarca-Piña, Vergara-Castañeda, & Oomah, 2015) หากไม่มีการนำกากกาแฟมาใช้ซ้ำ จะต้องถูกกำจัดโดยการฝังกลบหรือเผาทำลาย ซึ่งเป็นสาเหตุของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและสร้างปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม (Zuorro & Lavecchia, 2013) อย่างไรก็ตาม กากกาแฟมีศักยภาพสูงในการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตน้ำมันชีวภาพ เนื่องจากมีปริมาณไขมันและสารอินทรีย์สูงที่สามารถแปรรูปเป็นพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Kwon, Yi, & Jeon, 2021) นอกจากกากกาแฟแล้ว น้ำมันเครื่องเก่า (Waste Engine Oil: WEO) ก็เป็นอีกหนึ่งของเสียที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในกระบวนการไพโรไลซิส น้ำมันเครื่องเก่าที่ถูกทิ้ง โดยไม่มีการจัดการที่เหมาะสมอาจก่อให้เกิดมลพิษทางดินและน้ำ เนื่องจากประกอบด้วยโลหะหนักและสารพิษอื่น ๆ (Mahamuni & Adewuyi, 2010) การผสมน้ำมันเครื่องเก่ากับกากกาแฟในระหว่างกระบวนการไพโรไลซิสได้รับการศึกษา เพื่อปรับปรุงค่าความร้อนสูงสุด (Higher Heating Value: HHV) ของน้ำมันชีวภาพที่ได้ ซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพด้านพลังงานของเชื้อเพลิงที่ผลิตออกมา (Zhang, Guo, Cheng, & Chen, 2018)

อย่างไรก็ตาม ความต้องการพลังงานที่เพิ่มขึ้นทั่วโลกและความกังวลเกี่ยวกับผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล ได้กระตุ้นให้เกิดการวิจัยเกี่ยวกับแหล่งพลังงานทางเลือก (International Energy Agency, 2023) หนึ่งในแนวทางสำคัญคือ การผลิตน้ำมันชีวภาพผ่านกระบวนการไพโรไลซิส (Bridgwater, 2012) งานวิจัยก่อนหน้านี้ เช่น Wang, Jiang, Yu, Wang, & Luo, (2016) ศึกษาการเติมน้ำมันเครื่องเก่ากับกากกาแฟในการไพโรไลซิส เพื่อเพิ่มค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพ แต่ยังไม่มีการศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากวัสดุธรรมชาติ เช่น เปลือกไข่ รวมถึงการผสมวัสดุ ชีวมวลต่างชนิด เช่น กากกาแฟกับกากชาในกระบวนการเดียวกันเปลือกไข่ ซึ่งประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) เมื่อผ่านการเผาที่ 900°C จะเปลี่ยนเป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเบสิก ช่วยลดองค์ประกอบออกซิเจนในน้ำมันชีวภาพ และเพิ่มค่าความร้อน (Xu, Yang, Liu, & Zhang, 2014)

การผสมกากชาซึ่งมีลิกนินสูงกว่ากากกาแฟ อาจส่งผลต่อปริมาณและคุณภาพของน้ำมันชีวภาพ (Santos, Lima, Oliveira, & Rocha, 2017) การศึกษานี้จึงมีเป้าหมายเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตน้ำมันชีวภาพจากวัสดุเหลือใช้ดังกล่าว นอกจากนี้ยังเป็นแนวทางที่ช่วยลดของเสียและเพิ่มการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือใช้ในภาคอุตสาหกรรมอย่างมีประสิทธิภาพ หากไม่มีการนำวัสดุเหลือใช้เหล่านี้มาประยุกต์ใช้จะเกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมที่รุนแรงขึ้น การกำจัดกากกาแฟผ่านการฝังกลบสามารถสร้างก๊าซมีเทน ซึ่งเป็นก๊าซเรือนกระจกที่มีศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อนมากกว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถึง 25 เท่า (Environmental Protection Agency, 2022) ในทำนองเดียวกัน การทิ้ง



น้ำมันเครื่องเก่า โดยไม่มีการบำบัดอาจก่อให้เกิดมลพิษทางน้ำและส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศ (González-Munoz, Rodríguez, & Luque, 2013) การใช้เปลือกไข่ในอุตสาหกรรมอาหารก็ยังไม่ถูกนำมาใช้ในระดับที่กว้างขวางมากพอ ซึ่งทำให้เกิดปัญหาการกำจัดของเสียจากอุตสาหกรรมอาหารที่ไม่ยั่งยืน (López, Vargas-García, Suárez-Estrella, & Moreno, 2018)

ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการไพโรไลซิส โดยใช้ กากกาแฟ, น้ำมันเครื่องเก่า และเปลือกไข่เป็นวัตถุดิบและตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อลดปัญหาของเสียและเพิ่มศักยภาพในการผลิตพลังงานหมุนเวียน การศึกษานี้จะเป็นประโยชน์ทั้งในเชิงพลังงานและสิ่งแวดล้อม โดยเป็นแนวทางที่ช่วยลดปัญหามลพิษจากของเสียและเพิ่มโอกาสในการนำวัสดุเหลือทิ้งกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลของอัตราการให้ความร้อนและการเติมน้ำมันเครื่องเก่าต่อเปอร์เซ็นต์น้ำมันชีวภาพ ถ่านชีวภาพ และค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิสกากกาแฟ
2. เพื่อประเมินผลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CaO จากเปลือกไข่ในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตน้ำมันชีวภาพ
3. เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของการผสมกากกาแฟกับกากชาต่อปริมาณและคุณภาพของน้ำมันชีวภาพที่ได้

แนวคิด ทฤษฎี กรอบแนวคิด

การใช้ชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานทดแทนได้รับความนิยมอย่างมาก เนื่องจากเป็นพลังงานสะอาดและยั่งยืน กระบวนการไพโรไลซิสเป็นหนึ่งในเทคนิคสำคัญที่ใช้แปรรูปชีวมวลให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่มได้แก่ น้ำมันชีวภาพ ถ่านชีวภาพ และก๊าซเชื้อเพลิง โดยกระบวนการนี้เกิดขึ้นภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน และสามารถปรับเปลี่ยนสภาวะต่าง ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตได้ ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการไพโรไลซิส ได้แก่ อัตราการให้ความร้อน องค์ประกอบของชีวมวล และการเติมสารเสริม (Mohan, Pittman, & Steele, 2006; Bridgwater, 2012)

กากกาแฟและกากชาประกอบด้วยสารชีวโมเลกุลที่สำคัญ เช่น เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งมีผลต่อพฤติกรรมการแตกตัวทางความร้อน งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า กากกาแฟมีปริมาณไขมันและสารประกอบอินทรีย์ที่สามารถกลายเป็นไฮโดรคาร์บอนได้สูงกว่ากากชา ในขณะที่กากชามีลิกนินสูง ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดของแข็งตกค้างมากขึ้น อย่างไรก็ตาม อัตราส่วนที่เหมาะสมของวัตถุดิบทั้งสองชนิดอาจช่วยเพิ่มผลผลิตและค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพ (Li, Zhang, & Wang, 2020; Chen, Zhang, & Wang, 2021)



ตัวเร่งปฏิกิริยา CaO เป็นหนึ่งในตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีศักยภาพในการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันชีวภาพโดยลดองค์ประกอบออกซิเจนและเพิ่มค่าความร้อน นอกจากนี้การเติมน้ำมันเครื่องเก่าในกระบวนการไพโรไลซิสสามารถช่วยเพิ่มปริมาณน้ำมันชีวภาพที่ได้ และปรับปรุงคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ (Wang et al., 2016) การเติมน้ำมันเครื่องเก่าซึ่งมีองค์ประกอบของไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาว ในสัดส่วนสูงเข้าไปในกระบวนการไพโรไลซิส มีบทบาทสำคัญทั้งในด้านการเพิ่มแหล่งสารตั้งต้นสำหรับการผลิตน้ำมันชีวภาพ และการกระตุ้นกลไกการแตกตัวทางความร้อน (Thermal Cracking) ของสารอินทรีย์ในชีวมวลน้ำมันเครื่องเก่าช่วยลดความหนืดของระบบโดยรวม ทำให้การถ่ายเทความร้อนมีประสิทธิภาพมากขึ้น ส่งผลให้โครงสร้างโมเลกุลขนาดใหญ่ในกากกาแฟและกากชาสลายตัวได้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น อีกทั้งยังลดแนวโน้มการเกิดถ่าน (Biochar) โดยเปลี่ยนเส้นทางการสลายตัวไปสู่การผลิตไฮโดรคาร์บอนมากกว่า

นอกจากนี้องค์ประกอบของน้ำมันเครื่องเก่า ซึ่งมีคาร์บอนสูงและมีออกซิเจนต่ำ ยังมีผลโดยตรงต่อการลดปริมาณองค์ประกอบออกซิเจนในน้ำมันชีวภาพที่ได้ ส่งผลให้ค่าความร้อน (Higher Heating Value: HHV) ของผลิตภัณฑ์เพิ่มสูงขึ้น และเสถียรภาพทางเคมีของน้ำมันดีขึ้นเมื่อเทียบกับการไพโรไลซิสชีวมวลล้วน (Bridgwater, 2012) ผลลัพธ์ที่ได้จึงเป็นน้ำมันชีวภาพที่มีปริมาณสูงขึ้น มีคุณภาพดีขึ้น เหมาะสำหรับการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือเป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตต่อยอดอื่น ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การศึกษาผลกระทบของปัจจัยเหล่านี้ โดยเฉพาะอัตราส่วนของกากกาแฟและกากชา การเติมน้ำมันเครื่องเก่า และการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CaO จากเปลือกไข่เพื่อตรวจสอบว่าสถานะใดให้ค่าความร้อนสูงสุดและมีประสิทธิภาพดีที่สุดสำหรับการผลิตพลังงานชีวภาพ

วิธีดำเนินการวิจัย

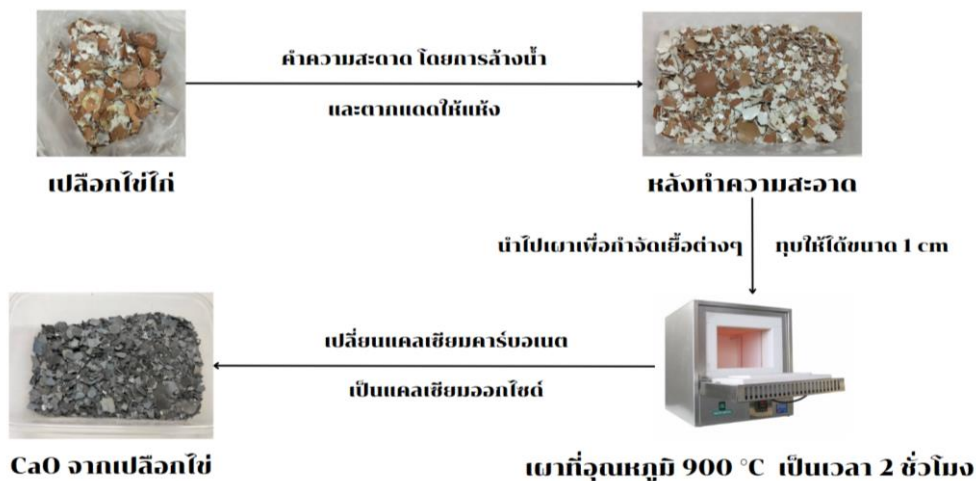
วัสดุ

1. กากกาแฟและกากชา: ได้มาจากร้านสตาร์บัคส์ ในมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
2. น้ำมันเครื่องเก่า: ได้จากศูนย์ซ่อมรถยนต์ Toyota ในพื้นที่ปทุมธานี
3. เปลือกไข่ไก่: เก็บสะสมจากครัวเรือนและร้านอาหาร ในมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

การเตรียมกากกาแฟและกากชา นำไปอบให้เตาอบที่อุณหภูมิ $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำมาใช้งาน โดยเก็บรักษาให้เปอร์เซ็นต์ความชื้นไม่เกิน $5\text{ }\%(\text{w/w})$

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกไข่ออกเป็น 3 ขั้นตอนซึ่งได้แก่ การทำความสะอาดและเตรียมเปลือกไข่ การเผาเปลือกไข่ (Calcination) และการเก็บรักษาเริ่มจากล้างเปลือกไข่ด้วยน้ำประปา เพื่อลดสิ่งสกปรกและสารอินทรีย์ที่ติดอยู่จากนั้น ตากแดดเป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีความชื้นหลงเหลืออยู่ หลังจากแห้งสนิทให้นำเปลือกไข่มาทุบให้ได้ขนาดประมาณ 1 cm . หลังจากนั้น นำเปลือกไข่ที่บดแล้วไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อเปลี่ยนแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ในเปลือกไข่ให้เป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ผ่านกระบวนการแคลไซน์ชัน (อัจฉรา อิมคำ พุฒคำ, 2016) และหลังจากเผาเสร็จ ให้เก็บ CaO ที่ได้ในภาชนะที่ปิดสนิทและป้องกัน

ความชื้น เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยากับความชื้นในอากาศ (สุกร บัญยีน, มณฑา มาลัยทอง, อภิสิทธิ์ โพธิ์แก้ว, เบญญา เชิดศิริกูร และ อิสรพงษ์ เชื้อสันเทียะ, 2558) โดยวิธีการเตรียมแสดงได้ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่



ภาพที่ 2 ระบบไพโรไลซิส

การทดลองกระบวนการไพโรไลซิสเริ่มจากการเตรียมสารตั้งต้นเป็นของแข็ง 30 กรัมและส่วนผสมอื่น ๆ ตามตารางที่ 1 - 4 โดยในที่นี้ใช้กากกาแฟผสมน้ำมันเครื่องเก่าในอัตราส่วน 1:1, 2:1 และ 3:1 สำหรับในการศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยานั้น สามารถทำได้โดยการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาลงไปพร้อมกับสาร

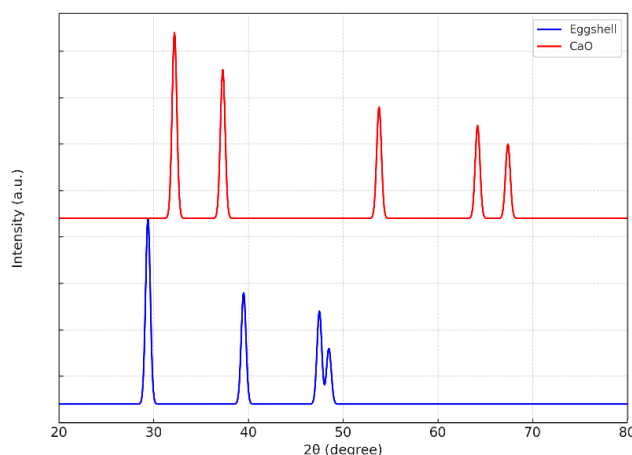
ตั้งต้นในปริมาณคงที่ที่ 30 กรัม สำหรับกระบวนการไพโรไลซิส นั้น เริ่มจากการบรรจุสารตั้งต้นเข้าเครื่องไพโรไลซิส จากนั้นให้ความร้อนกับเครื่องไพโรไลซิสในอัตราที่กำหนด (10, 80, 120, และ 160 °C /min) เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงถึง 390 °C ให้รักษาอุณหภูมิและดำเนินการไพโรไลซิสจนเสร็จสิ้น ซึ่งใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง ในขณะที่เกิดกระบวนการไพโรไลซิสให้ทำการเก็บน้ำมันและหลังจากกระบวนการให้ทำการเก็บถ่านชีวภาพที่เกิดขึ้นด้วย เพื่อนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติต่อไป

การวิเคราะห์น้ำมันที่เกิดขึ้นถูกนำไปวิเคราะห์หาค่าความร้อนสูง (HHV) ด้วยเครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ Parr 6100 โดยให้คำนวณปริมาณน้ำมันชีวภาพและถ่านชีวภาพที่เกิดขึ้นดังสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ

$$\text{Bio-oil yield (\%w/w)} = \frac{(\text{Mass of collected bio-oil (g)})}{(\text{Mass of raw material used (g)})} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Biochar yield (\%w/w)} = \frac{(\text{Mass of collected biochar (g)})}{(\text{Mass of raw material used (g)})} \times 100 \quad (2)$$

ผลการวิจัย



ภาพที่ 3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวอย่างเปลือกไข่ (Eggshell) และตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่ได้จากกระบวนการเผาที่อุณหภูมิสูงโดยใช้เทคนิค XRD

สำหรับตัวอย่างเปลือกไข่ (เส้นสีน้ำเงิน) พบว่า มีค่าสัญญาณการเลี้ยวเบนเด่นที่ตำแหน่งประมาณ 29.4°, 36°, และ 47° ซึ่งสอดคล้องกับระนาบผลึกหลักของสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ในรูปของแคลไซต์ (Calcite) แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างหลักของเปลือกไข่ในสภาพดิบ มีองค์ประกอบหลักเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต หลังจากผ่านกระบวนการแคลซิเนชัน (Calcination) ที่อุณหภูมิสูงเพื่อเปลี่ยนเปลือกไข่เป็นแคลเซียมออกไซด์พบว่า ในตัวอย่าง CaO (เส้นสีแดง) มีค่าสัญญาณการเลี้ยวเบนหลักเปลี่ยนแปลงไปอย่างชัดเจน โดยมีพิกัดเด่นที่ตำแหน่งประมาณ 32.2°, 37.4°, 53.9°, 64.2° และ 67.4° ซึ่งสอดคล้องกับระนาบผลึกของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ตามมาตรฐาน JCPDS Card No. 37-1497



การเปลี่ยนแปลง ดังกล่าวยืนยันได้ว่ากระบวนการเผาที่อุณหภูมิสูงสามารถสลายแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ในเปลือกไข่ให้กลายเป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ได้สำเร็จ ผ่านปฏิกิริยาสลายตัวของคาร์บอเนต (thermal decomposition) ซึ่งเป็นไปตามปฏิกิริยาเคมีดังนี้:



ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยา CaO ที่ได้มีความบริสุทธิ์สูง และมีโครงสร้างผลึกที่ดี เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการไพโรไลซิส ต่อไป

จากการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสลายตัวของชีวมวลผ่านกระบวนการไพโรไลซิส พบว่าปัจจัยที่สำคัญ ได้แก่ อัตราการให้ความร้อน การเติมน้ำมันเครื่องเก่า การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา และการผสมกากกากาแฟ ซึ่งมีผลโดยตรงต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น ได้แก่ น้ำมันชีวภาพ ถ่านชีวภาพ และค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพ

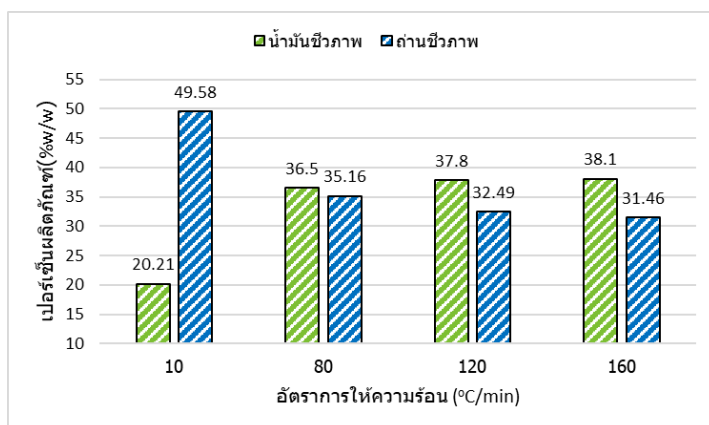
1. อัตราการให้ความร้อน

ตารางที่ 1 ผลการเปลี่ยนแปลงอัตราให้ความร้อน

Raw material	Condition			Product		
Coffee (g)	Temperature (°C)	Heat Rate (°C/min)	N ₂ Flow (ml/min)	%Yield	HHV (MJ/Kg)	%Char
30	390	10	50	20.21	35.28	49.58
30	390	80	50	36.5	35.38	35.16
30	390	120	50	37.8	34.49	32.49
30	390	160	50	38.1	35.02	31.46

เมื่อทำการไพโรไลซิสกากกาแฟที่อุณหภูมิ 390 °C N₂ flow 50 mL/min โดยใช้อัตราการให้ความร้อนที่ 10, 80, 120 และ 160 °C/min ทั้งนี้ การเพิ่มอัตราการให้ความร้อนจาก 10 °C/min ไปที่ 80 °C/min โดยตรง แทนที่จะเพิ่มทีละน้อย ๆ นั้น มีจุดประสงค์เพื่อเปลี่ยนลักษณะกระบวนการจาก Slow Pyrolysis เป็น Fast Pyrolysis ซึ่งเหมาะสมสำหรับการผลิตน้ำมันชีวภาพในปริมาณสูง อัตราการให้ความร้อนที่สูงช่วยลดเวลาในการทำไพโรไลซิส กระตุ้นการสลายตัวของชีวมวลได้รวดเร็วขึ้น และลดการเกิดถ่านชีวภาพที่ไม่ต้องการ ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์น้ำมันที่ได้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญตามแนวทางที่รายงานไว้ในงานวิจัยของ Demirbas (2009) และ Bridgwater (2012) พบว่า เปอร์เซ็นต์น้ำมันที่ได้มีค่าเท่ากับ 20.21%, 36.5%, 37.8% และ 38.1% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราการให้ความร้อนเพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำมันที่ผลิตได้ก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังแสดงในภาพที่ 3 แนวโน้มของผลลัพธ์นี้สามารถอธิบายได้ว่า อัตราการให้ความร้อนที่สูงช่วยเร่งการแตกตัวของโครงสร้างลิกโนเซลลูโลสในกากกาแฟ ทำให้เกิดไอระเหยของสารอินทรีย์ในปริมาณมากขึ้นก่อนที่จะเกิดการเกิดถ่านชีวภาพ (Demirbas, 2009) อย่างไรก็ตาม ที่อัตราการให้ความร้อนสูงมาก เช่น 160 °C/min พบว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำมันเริ่มชะลอตัว ซึ่งอาจเกิดจากไอระเหยบางส่วนถูกแตกตัวเป็นก๊าซ (Thermal Cracking)

สำหรับเปอร์เซ็นต์ของถ่านชีวภาพ พบว่ามีค่าเท่ากับ 49.58%, 35.16%, 32.49% และ 31.46% ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราการให้ความร้อนเพิ่มขึ้น ปริมาณของแข็งตกค้างลดลงดังแสดงในภาพที่ 4 เนื่องจากอัตราการให้ความร้อนที่สูงช่วยกระตุ้นการสลายพันธะเคมีในชีวมวลอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้สารอินทรีย์กลายเป็นไอระเหยในปริมาณมากขึ้นและหลงเหลือถ่านชีวภาพน้อยลง (Bridgwater, 2012) เมื่อพิจารณาค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพที่ได้พบว่า มีค่าเท่ากับ 35.28, 35.38, 34.49 และ 35.02 MJ/kg ตามลำดับที่อัตราการให้ความร้อน 10, 80, 120 และ 160 °C/min ตามลำดับ แนวโน้มแสดงให้เห็นว่าค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย โดยมีค่าสูงสุดที่อัตราการให้ความร้อน 80 °C/min และลดลงเล็กน้อยเมื่ออัตราการให้ความร้อนสูงขึ้นถึง 120 °C/min ซึ่งอาจเกิดจากการที่อัตราการแตกตัวของโครงสร้างอินทรีย์ที่เร็วเกินไป ทำให้ไอระเหยบางส่วนเกิดการแตกกร้าวเป็นก๊าซที่มีค่าพลังงานต่ำ ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของน้ำมันชีวภาพ อย่างไรก็ตาม ค่าความร้อนที่ได้ในทุกกรณียังคงอยู่ในระดับที่สูงและเหมาะสมต่อการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง



ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ผลิตภัณฑ์ต่ออัตราการให้ความร้อน

2. การเติมน้ำมันเครื่องเก่า

ตารางที่ 2 ผลการเติมน้ำมันเครื่องเก่า

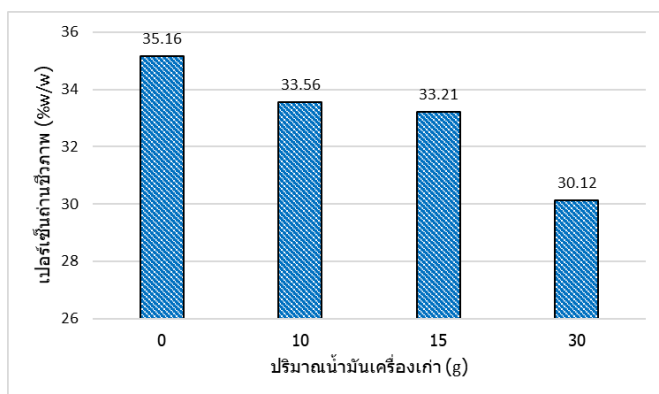
Raw material		Condition			Product		
Coffee (g)	Waste Engine Oil (g)	Temperature (°C)	Heat Rate (°C/min)	N2 Flow (ml/min)	%Yield	HHV (MJ/Kg)	%Char
30	0	390	80	50	36.5	35.38	35.16
30	10	390	80	50	22.15	40.04	33.56
30	15	390	80	50	19.65	45.96	33.21
30	30	390	80	50	21.84	46.21	30.12

เมื่อทำการเติมน้ำมันเครื่องเก่าที่ปริมาณ 0, 10, 15 และ 30 กรัม (อัตราส่วน 0, 1:3, 1:2, และ 1:1 ของน้ำมันเครื่องเก่าต่อกากกาแฟ) ลงในกากกาแฟก่อนทำไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 390 °C อัตราการให้ความร้อน 80 °C/min และอัตราการไหลของไนโตรเจน 50 mL/min พบว่า เปอร์เซนต์ของถ่านชีวภาพที่ได้มีค่าเท่ากับ 35.16%, 33.56%, 33.21% และ 30.12% ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 5 แนวโน้มแสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณการเติมน้ำมันเครื่องเก่าเพิ่มขึ้น ปริมาณถ่านชีวภาพที่เหลืออยู่มีแนวโน้มลดลงสาเหตุ

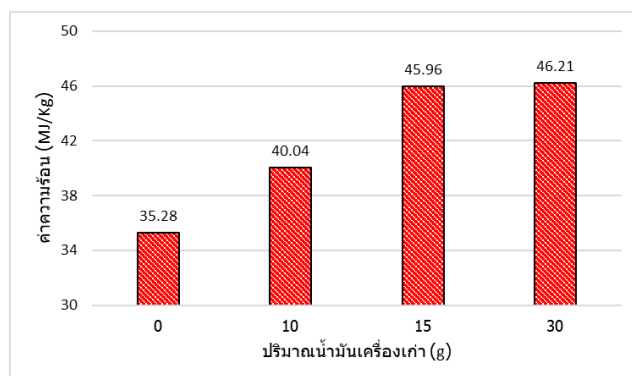
เนื่องจากน้ำมันเครื่องเก่าช่วยเสริมการแตกตัวขององค์ประกอบอินทรีย์ในกากกาแฟระหว่างกระบวนการไพโรไลซิส ทำให้ไอระเหยปลดปล่อยออกมาในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณถ่านชีวภาพที่เหลือหลังการไพโรไลซิสลดลง

ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพที่ผลิตได้มีค่าเท่ากับ 35.28, 40.04, 45.96 และ 46.21 MJ/kg ตามลำดับเมื่อเติมน้ำมันเครื่องเก่าที่ 0, 10, 15 และ 30 กรัมตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 6 แนวโน้มแสดงให้เห็นว่าการเติมน้ำมันเครื่องเก่าช่วยเพิ่มค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะเมื่อเติมน้ำมันเครื่องเก่าในปริมาณสูง เช่น 15 และ 30 กรัม ซึ่งค่าความร้อนที่ได้เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนจากค่าตั้งต้นของกากกาแฟเพียงอย่างเดียว

สำหรับเปอร์เซ็นต์น้ำมันชีวภาพที่ได้พบว่า มีค่าเท่ากับ 35.6%, 22.15%, 19.65% และ 21.84% ตามลำดับที่เติมน้ำมันเครื่องเก่า 0, 10, 15 และ 30 กรัม แม้การเติมน้ำมันเครื่องเก่าในปริมาณมากจะช่วยเพิ่มค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพ แต่กลับพบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์น้ำมันชีวภาพลดลงเมื่อคิดเทียบกับน้ำหนักสารตั้งต้นรวม (กากกาแฟ + น้ำมันเครื่องเก่า) เนื่องจากน้ำหนักตั้งต้นที่เพิ่มขึ้นจากการเติมน้ำมันเครื่อง ทำให้สัดส่วนของน้ำมันชีวภาพที่ได้ต่อสารตั้งต้นรวมลดลง อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนยังแสดงถึงการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันชีวภาพได้เป็นอย่างดี



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ถ่านชีวภาพกับปริมาณน้ำมันเครื่องเก่า



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนสูงสุดกับปริมาณน้ำมันเครื่องเก่า



3. ผลจากการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา

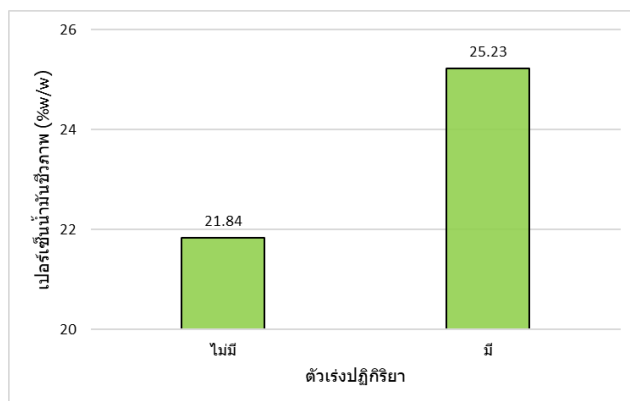
ตารางที่ 3 ผลการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา

Raw material			Condition			Product		
Coffee (g)	Waste Engine Oil (g)	Egg shell (g)	Temperature (°C)	Heat Rate (°C/min)	N2 Flow (ml/min)	%Yield	HHV (MJ/Kg)	%Char
30	30	0	390	80	50	21.84	46.21	30.12
30	30	30	390	80	50	25.23	49.60	29.86

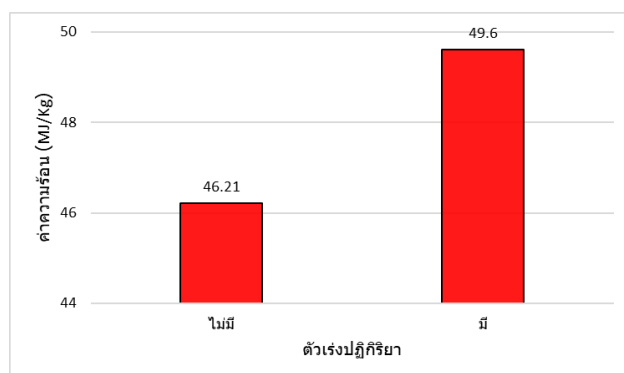
จากการทดลองเปรียบเทียบระหว่างการใช้กากกาแฟเพียงอย่างเดียว กับ การเติมตัวเร่งปฏิกิริยา CaO ที่ได้จากเปลือกไข่ พบว่าเปอร์เซ็นต์น้ำมันชีวภาพที่ได้เพิ่มขึ้นจาก 21.84% เป็น 25.23% ดังแสดงในภาพที่ 7 นอกจากนี้ ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพยังเพิ่มขึ้นจาก 46.21 MJ/kg เป็น 49.6 MJ/kg ซึ่งคิดเป็นการเพิ่มขึ้นประมาณ 7.3% ดังแสดงในภาพที่ 8 เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา ทั้งนี้สอดคล้องกับรายงานของ Xu et al. (2014) ที่ระบุว่าตัวเร่งปฏิกิริยา CaO สามารถช่วยลดปริมาณออกซิเจนในผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพได้

การสังเกตการเปลี่ยนแปลงของค่าความร้อน (Higher Heating Value: HHV) สามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้ทางอ้อมในการประเมินปริมาณออกซิเจนในน้ำมันชีวภาพได้ เนื่องจากน้ำมันที่มีองค์ประกอบออกซิเจนสูงมักมีค่าความร้อนต่ำ การที่ค่าความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญหลังการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาแสดงให้เห็นว่าเกิดการลดปริมาณออกซิเจนในผลิตภัณฑ์ ส่งผลให้สัดส่วนของหมู่ไฮโดรคาร์บอนบริสุทธิ์เพิ่มขึ้นและทำให้พลังงานที่ได้ต่อหน่วยมวลของน้ำมันสูงขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นการใช้ CaO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการไพโรไลซิสชีวมวลจึงมีประสิทธิภาพ ทั้งในด้านการเพิ่มผลผลิตและการยกระดับคุณภาพของน้ำมันชีวภาพที่ได้อย่างชัดเจน

จากข้อมูลที่ได้แสดงให้เห็นว่าการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา CaO ไม่เพียงแต่ช่วยเพิ่มเปอร์เซ็นต์การผลิตน้ำมันชีวภาพและยกระดับค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์เท่านั้น แต่ยังมีความคุ้มค่าเชิงพลังงานอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากค่าความร้อนที่เพิ่มขึ้น หมายถึง ปริมาณพลังงานที่ผลิตได้จากน้ำมันชีวภาพต่อหน่วยน้ำหนักมีมากขึ้น ส่งผลให้กระบวนการผลิตมีประสิทธิภาพสูงขึ้นเมื่อนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ นอกจากนี้ CaO ที่ได้จากเปลือกไข่ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ ยังมีต้นทุนต่ำและมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ทำให้การเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานี้มีความเหมาะสมทั้งในด้านเศรษฐศาสตร์และความยั่งยืนของกระบวนการ การเพิ่มขึ้นของผลผลิตน้ำมันพร้อมกับการเพิ่มคุณภาพของน้ำมัน จึงแสดงให้เห็นว่าการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา CaO เป็นทางเลือกที่คุ้มค่าและมีศักยภาพสำหรับการพัฒนากระบวนการไพโรไลซิสชีวมวลในระดับอุตสาหกรรม



ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์น้ำมันชีภาพกับตัวเร่งปฏิกิริยา CaO



ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนสูงสุดกับตัวเร่งปฏิกิริยา CaO

4. ผลกระทบจากการผสมกันระหว่างกากกาแฟและกากชา

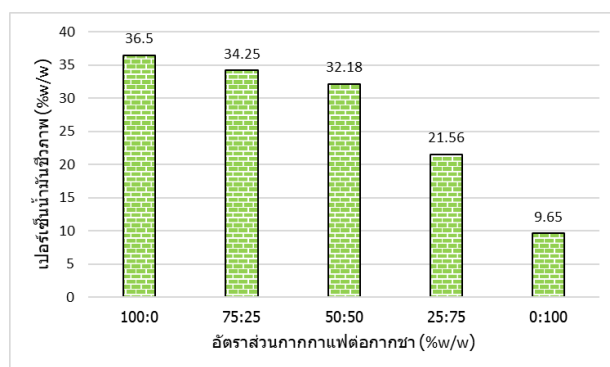
ตารางที่ 4 ผลกระทบจากการผสมกากกาแฟกับกากชา

Raw material		Condition			Product		
Coffee (g)	Tea (g)	Temperature (°C)	Heat Rate (°C/min)	N2 Flow (ml/min)	%Yield	HHV (MJ/Kg)	%Char
30	0	390	80	50	36.5	35.38	35.16
22.5	7.5	390	80	50	34.25	36.34	36.75
15	15	390	80	50	32.18	37.33	38.47
7.5	22.5	390	80	50	21.56	33.45	38.54
0	30	390	80	50	9.65	31.71	40.54

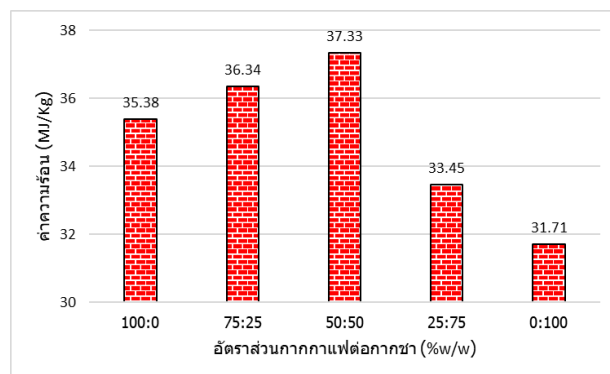
จากการทดลองที่ใช้กากกาแฟผสมกับกากชาที่อัตราส่วน 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 และ 0:100 ที่อุณหภูมิ 390 °C อัตราการให้ความร้อน 80 °C/min N₂ flow 50 mL/min พบว่า เปอร์เซนต์น้ำมันที่ได้มีค่าเท่ากับ 36.5%, 34.25%, 32.18%, 21.56% และ 9.65% ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 9 ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าเท่ากับ 35.38, 36.34, 37.33, 33.45 และ 31.71 MJ/kg ตามลำดับ โดยพบว่าเมื่อเพิ่มสัดส่วนของกากชา ปริมาณน้ำมันชีภาพมีแนวโน้มลดลงดังแสดงในภาพที่ 10 ซึ่งอาจ

เกิดจากองค์ประกอบทางเคมีของกากขาที่แตกต่างจากกากกาแฟ โดยกากขามีปริมาณลิกนินสูงกว่า ส่งผลให้เกิดของแข็งตกค้างมากขึ้น (Santos et al., 2017)

ทั้งนี้ เมื่อตรวจสอบค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์พบว่า ค่าความร้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนของกากขาจาก 0% ถึง 50% โดยค่าความร้อนสูงสุดอยู่ที่ 37.33 MJ/kg ที่อัตราส่วนกากกาแฟต่อกากขา 50:50 อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มสัดส่วนของกากขามากเกินครึ่งหนึ่ง ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์กลับลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งอาจเป็นผลจากองค์ประกอบลิกนินและเถ้าที่สูงในกากขาทำให้เกิดสารตกค้างในรูปของแข็งมากขึ้น ส่งผลให้สัดส่วนของสารที่สามารถเปลี่ยนเป็นไอระเหยและน้ำมันชีวภาพลดลง และส่งผลต่อค่าพลังงานโดยรวมของผลิตภัณฑ์ที่ได้ (Santos et al., 2017)



ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนกากกาแฟต่อกากขากับเปอร์เซ็นต์น้ำมันชีวภาพ



ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนกากกาแฟต่อกากขากับค่าความร้อนสูงสุด

สรุปและอภิปรายผล

จากการศึกษาพบว่าอัตราการใช้ความร้อนที่เหมาะสมและการเติมสารเสริม เช่น น้ำมันเครื่องเก่า และตัวเร่งปฏิกิริยา CaO สามารถเพิ่มผลผลิตน้ำมันชีวภาพและค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การใช้กากกาแฟและกากขาในอัตราส่วน 50:50 ร่วมกับการเติมน้ำมันเครื่องเก่า 30 กรัม และตัวเร่งปฏิกิริยา CaO ให้ค่าความร้อนสูงสุดถึง 54.04 MJ/kg ซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่ดีกว่าการใช้กากกาแฟเพียงอย่างเดียว เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นพบว่า การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CaO มีแนวโน้ม



ให้ผลใกล้เคียงกับการใช้ซีโอไลต์ (Zeolite) ซึ่งมีรายงานว่าช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตน้ำมันชีวภาพ และลดองค์ประกอบออกซิเจนได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตาม การศึกษาของ Li et al. (2020) ระบุว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ZnO อาจให้ผลที่ดีกว่า CaO ในแง่ของการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันชีวภาพ โดยลดปริมาณกรดอินทรีย์และเพิ่มสัดส่วนไฮโดรคาร์บอนหนักที่มีค่าพลังงานสูงกว่า นอกจากนี้งานวิจัยของ Chen et al. (2021) ที่ศึกษาการใช้ไฟโรไลซิสกับกากชาลวัน ๆ พบว่า กากชาที่มีปริมาณลิกนินสูง ส่งผลให้เกิดของแข็งตกค้างมากขึ้นและผลิตน้ำมันได้น้อยกว่ากากกาแฟ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในงานวิจัยนี้ ที่พบว่า การเพิ่มสัดส่วนกากชาทำให้เปอร์เซ็นต์น้ำมันชีวภาพลดลง ดังนั้น การเลือกใช้สัดส่วน 50:50 ของกากกาแฟและกากชาในงานวิจัยนี้ อาจเป็นจุดสมดุลที่เหมาะสมระหว่างปริมาณน้ำมันที่ได้และค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ แม้ว่าผลการทดลองจะแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการใช้กากกาแฟและกากชา เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตพลังงานชีวภาพ แต่ยังมีข้อจำกัดบางประการ เช่น การควบคุมคุณภาพของน้ำมันชีวภาพและความเสถียรของกระบวนการผลิตในระดับอุตสาหกรรม ดังนั้นควรมีการศึกษาต่อยอดเกี่ยวกับการอัปเดตน้ำมันชีวภาพและการเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูงขึ้นและสามารถนำไปใช้งานได้จริงในภาคพลังงานต่อไป

ข้อเสนอแนะ

1. การศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่น แม้ว่า CaO จากเปลือกไข่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตน้ำมันชีวภาพ แต่ควรมีการศึกษาเปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่น เช่น ซีโอไลต์ (Zeolite) หรือ แบไรต์ (BaO) ที่อาจช่วยลดออกซิเจนในน้ำมันได้ดียิ่งขึ้น รวมถึงการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันชีวภาพ
2. การปรับปรุงกระบวนการไฟโรไลซิสเพื่อเพิ่มผลผลิตน้ำมัน จากผลการศึกษาพบว่า อัตราการให้ความร้อนที่สูงเกินไปอาจทำให้เกิดการแตกตัวของไอระเหย ซึ่งลดประสิทธิภาพในการผลิตน้ำมัน ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับอัตราการให้ความร้อนที่เหมาะสมที่สุด และอาจพิจารณาใช้ระบบควบคุมอุณหภูมิแบบหลายขั้นตอน (Multi-stage Heating) เพื่อลดการแตกตัวของน้ำมัน
3. การศึกษาผลกระทบของสัดส่วนกากชาและกากกาแฟที่เหมาะสม ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสัดส่วน 50:50 ของกากชาและกากกาแฟให้ค่าความร้อนสูงสุด อย่างไรก็ตาม ควรมีการศึกษาสัดส่วนอื่นเพิ่มเติม เช่น 60:40 หรือ 40:60 เพื่อดูว่ามีสัดส่วนใดที่ให้ผลผลิตน้ำมันสูงขึ้นในขณะที่ยังคงค่าความร้อนที่เหมาะสม
4. การประเมินด้านเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อม ควรมีการศึกษาต้นทุนของกระบวนการไฟโรไลซิส รวมถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่น การปล่อยก๊าซเรือนกระจกและการใช้พลังงานในกระบวนการ เพื่อประเมินความคุ้มค่าและความยั่งยืนของการนำของเสียจากกากกาแฟและกากชามาผลิตพลังงานชีวภาพ



กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์และสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม สำหรับเงินอุดหนุนการทำกิจกรรมส่งเสริมและสนับสนุนการพัฒนาวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ปีงบประมาณ 2567

เอกสารอ้างอิง

- สุภกร บุญยีน, มณฑา มาลัยทอง, อภิสิทธิ์ โพธิ์แก้ว, เบญญา เชิดหิรัญกร และอิสรพงษ์ เชื้อสันเทียะ.
(2558). การสลายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนตในเปลือกหอย. *Thai Journal of Science and Technology*, 4(2), 115–122.
- อัจฉรา อิมคำ พุดคำ. (2016). การสังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์ฟืนที่ผิวสูงจากเศษเปลือกไข่อุตสาหกรรม (รายงานวิจัย). พิษณุโลก : มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- Arumugam, S., Kumar, P. S., & Murugesan, A. (2020). Application of waste eggshell as heterogeneous catalyst for the production of biodiesel. *Environmental Technology & Innovation*, 17, 100544.
- Bridgwater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, 38, 68–94.
- Campos-Vega, R., Loarca-Piña, G., Vergara-Castañeda, H. A., & Oomah, B. D. (2015). Spent coffee grounds: A review on current research and future prospects. *Trends in Food Science & Technology*, 45(1), 24–36.
- Chen, L., Zhang, H., & Wang, X. (2021). Pyrolysis of tea waste for bio-oil production: The impact of process parameters and additives. *Journal of Environmental Management*, 271, 111027.
- Demirbas, A. (2009). Pyrolysis of biomass for fuels and chemicals. *Energy Sources, Part A*, 31(12), 1022–1033.
- Demirbas, A. (2017). Waste management, waste resource facilities and waste conversion processes. *Energy Conversion and Management*, 136, 1–7.
- Environmental Protection Agency (EPA). (2022). Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990–2020.
- González-Muñoz, M. J., Rodríguez, M. A., & Luque, S. (2013). Separation of heavy metals from oil-in-water emulsions by ultrafiltration: Heavy metal and oil rejection. *Chemical Engineering Journal*, 230, 175–182.



- International Energy Agency (IEA). (2023). World Energy Outlook 2023. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>
- Kwon, E. E., Yi, H., & Jeon, Y. J. (2021). Resource recovery and waste-to-energy from spent coffee grounds: A review. *Chemical Engineering Journal*, 403, 126533.
- Li, Y., Zhang, J., & Wang, H. (2020). Effects of catalytic pyrolysis on bio-oil production from coffee grounds using different catalysts. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 42(24), 3075–3085
- López, M. J., Vargas-García, M. C., Suárez-Estrella, F., & Moreno, J. (2018). Biotechnological valorization of egg-shell waste. In *Waste and By-products in Food Industry* (pp. 197–221). Springer, Cham.
- Mahamuni, N. N., & Adewuyi, Y. G. (2010). Sonochemical degradation of volatile and semi-volatile organic compounds in water: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 17(6), 990–1003.
- Mohan, D., Pittman, C. U., & Steele, P. H. (2006). Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: A critical review. *Energy & Fuels*, 20(3), 848–889.
- Santos, R. C., Lima, D. R., Oliveira, L. B., & Rocha, J. D. (2017). Biomass pyrolysis with lignin-rich feedstocks. *Bioresource Technology*, 245, 1201–1207.
- Wang, S., Jiang, X., Yu, Y., Wang, Y., & Luo, Z. (2016). Effect of used engine oil addition on pyrolysis of biomass. *Fuel Processing Technology*, 149, 69–76.
- Xu, R., Yang, S., Liu, X., & Zhang, Y. (2014). Bio-oil upgrading with CaO catalysts. *Fuel*, 123, 29–37.
- Zhang, Q., Chang, J., Wang, T., & Xu, Y. (2007). Review of biomass pyrolysis oil properties and upgrading research. *Energy Conversion and Management*, 48(1), 87–92.
- Zuorro, A., & Lavecchia, R. (2013). Spontaneous lipid peroxidation of spent coffee grounds: A spectrophotometric study. *Journal of Environmental Management*, 129, 189–193.