วารสารเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี | Agriculture and Technology Journal

ปีที่ 2 ฉบับที่ 3

การศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับผลของชนิดและปริมาณตัวดูดซับต่อกระบวนการไมโครเวฟไพโรไลซิสของพอลิโพรพิลีน

Preliminary study on the effect of absorber type and quantity on microwave pyrolysis process of polypropylene

เทียมมะณีย์ รัตนวีระพันธ์[1*] สมภพ สนองราษฎร์[1] สิริญญา ภักดี[1] และสุขุมาภรณ์ สิทธิธรรม[1]

Tiammanee Rattanaweerapan[1*], Sompop Sanongraj[1], Sirinya Pakdee[1] and Sukumaporn Sittitham[1]

[1] *คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี*

[*] *Corresponding Author E-mail Address: Tiammanee.r@ubu.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของชนิดและปริมาณตัวดูดซับคลื่นไมโครเวฟที่มีต่อกระบวนการไมโครเวฟไพโรไลซิสพลาสติกพอลิโพรพิลีนด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยชนิดตัวดูดซับคลื่นที่เลือกใช้คือถ่านกัมมันต์และแกรไฟต์ ปริมาณที่ใช้ได้แก่ ร้อยละ 2, 5 และ 10 โดยมวล ผลการทดลองพบว่าการใช้ถ่านกัมมันต์ให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวสูงกว่าแกรไฟต์ ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการใช้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับคลื่นมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 22.20-41.60 โดยมวล ซึ่งมีแนวโน้มแปรผันตรงกับปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ใช้ ความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ของเหลวมีค่าอยู่ระหว่าง 0.72-0.80 กิโลกรัม/ลิตร ความหนืดมีค่าระหว่าง 5-31 เซนติสโตก ซึ่งเมื่อเทียบกับน้ำมันเบนซินในท้องตลาดพบว่าผลิตภัณฑ์ของเหลวจากการทดลองมีความหนาแน่นใกล้เคียงกับน้ำมันเบนซินในท้องตลาดแต่ความหนืดสูงกว่า พบหมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบในโครงสร้างโมเลกุลของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้สอดคล้องกับน้ำมันเบนซินในท้องตลาดซึ่งประกอบด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดอิ่มตัว ไม่อิ่มตัวและอะโรมาติกส์ อย่างไรก็ตามควรมีการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติอื่น ๆ เพิ่มเติม เช่น จุดวาบไฟ ค่าความร้อน และไฮโดรคาร์บอนองค์ประกอบ

คำสำคัญ: ไมโครเวฟไพโรไลซิส ขยะพลาสติก ตัวดูดซับคลื่นไมโครเวฟ

Abstract

This research was to study the effect of type and quantity of microwave absorber on microwave pyrolysis process. Activated carbon and graphite were used as microwave absorber in the percentage of 2, 5 and 10 by weight. The results showed that using activated carbon as microwave absorber gave the liquid content higher than that of graphite. The amount of liquid product from using activated carbon was between 22.20-41.60% (by weight) and tended proportional to the amount of activated carbon used. The density and viscosity of the liquid were 0.72-0.80 kg/L and 5-31 centistoke, respectively. The liquid product density is close but, the viscosity is higher than that of the gasoline from the local station. Component functional groups have been found in the molecular structure of liquid products corresponding to commercially available gasoline containing saturated, unsaturated, and aromatic hydrocarbons. However, further characterization of other properties such as flash point, heat value, and component hydrocarbons should be analyzed.

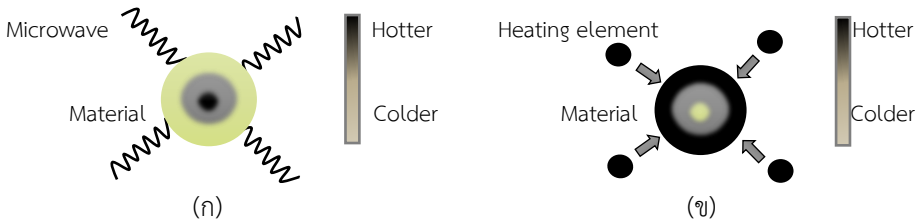
Keywords: Microwave pyrolysis, Plastic waste, Microwave absorber

บทนำ

พอลิโพรพิลีน (Polypropylene; PP) เป็นพลาสติกชนิดหนึ่งที่ถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางในการเป็นบรรจุภัณฑ์อาหารและเครื่องดื่ม ผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ หรืออุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการ เนื่องจากเป็นพลาสติกที่เบา คงรูปแต่มีความยืดหยุ่น ทนทานต่อแรงกระแทก น้ำและออกซิเจนซึมผ่านได้น้อย ปัจจุบันพบว่ามีบรรจุภัณฑ์ประเภทพอลิโพรพิลีนจำนวนมากถูกนำมาใช้งานเพียงครั้งเดียวและไม่มีการนำมารีไซเคิลเพราะมีการปนเปื้อนและยุ่งยากในการล้างทำความสะอาด ก่อให้เกิดปัญหามลภาวะทางสิ่งแวดล้อม ซึ่งพลาสติกเหล่านั้นมักจะถูกนำไปกำจัดโดยการฝังกลบหรือเผา ส่งผลต่อคุณภาพอากาศ ปนเปื้อนในดิน แหล่งน้ำธรรมชาติ อีกทั้งยังกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์อีกด้วย

การแปรรูปขยะพลาสติกให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่ากลายเป็นเป็นแนวทางที่น่าสนใจในการจัดการขยะพลาสติกในปัจจุบัน กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis process) จัดเป็นเทคโนโลยีการแปรรูปพลาสติกเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงโดยวิธีการสลายตัวทางความร้อนในสภาวะอุณหภูมิสูง (ประมาณ 400-1,000 องศาเซลเซียส) และไร้ออกซิเจน การแตกตัวของพลาสติกจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเล็กลงประกอบด้วยแก๊ส ของเหลว และของแข็ง ซึ่งของเหลวที่ได้มีลักษณะสมบัติคล้ายน้ำมันเบนซินหรือดีเซล (Samuel et al., 2019) กระบวนการไพโรไลซิส แบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ ไพโรไลซิสแบบช้า (Slow pyrolysis) ซึ่งมีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิน้อยกว่า 10 องศาเซลเซียส/วินาที และมีอุณหภูมิสูงสุด 400-600 องศาเซลเซียส การไพโรไลซิสแบบเร็ว (Fast pyrolysis) ซึ่งมีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10-100 องศาเซลเซียส/วินาที และมีอุณหภูมิสูงสุด 600-650 องศาเซลเซียส รวมทั้งการไพโรไลซิสแบบเร็วมาก (Flash pyrolysis) ซึ่งมีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิมากกว่า 100 องศาเซลเซียส/วินาที และมีอุณหภูมิสูงสุด 1,000 องศาเซลเซียส พลังงานที่ใช้ในกระบวนการมักจะเป็นพลังงานไฟฟ้า หรือพลังงานจากแก๊ส ซึ่งแม้จะมีประสิทธิภาพที่ที่ดีแต่ยังมีการสูญเสียพลังงานระหว่างการถ่ายโอนความร้อนจากแหล่งกำเนิดไปยังสารตั้งต้นที่อยู่ภายในถังปฏิกิริยา ปัจจุบันจึงมีความพยายามในการลดการสูญเสียพลังงานดังกล่าวโดยใช้คลื่นไมโครเวฟเป็นแหล่งพลังงาน หรือที่เรียกกันว่า ไมโครเวฟไพโรไลซิส (Microwave pyrolysis; MP) นั่นเอง เทคนิคไมโครเวฟไพโรไลซิสได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในไพโรไลซิสของเสียทั้งที่เป็นของเสียทางการเกษตร เช่น ชานอ้อย กะลา

ปาล์ม ฟางข้าว แกลบข้าว ซังข้าวโพด รวมถึงขยะพลาสติกด้วย (Yaning et al., 2020) สำหรับการไพโรไลซิสขยะพลาสติกนั้นต้องอาศัยการดูดซับคลื่นไมโครเวฟของวัสดุบางชนิดมีความสามารถในการดูดซับคลื่นไมโครเวฟ (Microwave absorber) เมื่อโมเลกุลของวัสดุนั้นดูดซับคลื่นไมโครเวฟแล้วจะสั่นและเกิดความร้อนขึ้นอย่างรวดเร็ว และถ่ายเทความร้อนให้แก่พลาสติกที่เป็นวัตถุดิบในถังปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว การถ่ายเทความร้อนโดยคลื่นไมโครเวฟและแหล่งความร้อนทั่วไปแสดงดังรูปที่ 1 ด้วยเหตุผลดังกล่าวไมโครเวฟไพโรไลซิสจึงเป็นเทคนิคใหม่ที่มีข้อดีหลายประการเมื่อเทียบกับกระบวนการแตกตัวโดยความร้อนแบบเดิม มีประสิทธิภาพสูงในการถ่ายเทความร้อนอย่างจำเพาะเจาะจงจากตัวดูดซับคลื่นซึ่งแทรกอยู่ระหว่างพลาสติกวัตถุดิบเข้าสู่พลาสติกโดยตรงส่งผลให้ลดการใช้พลังงาน และประหยัดเวลามากขึ้น (โปรดปราน และคณะ, 2554)



รูปที่ 1 การแสดงการกระจายความร้อนภายในเนื้อวัสดุเมื่อให้ความร้อนโดยใช้ (ก) ไมโครเวฟ และ (ข) วิธีทั่วไป (สุขสันต์ และแอ๊ปเปิ้ล, 2556)

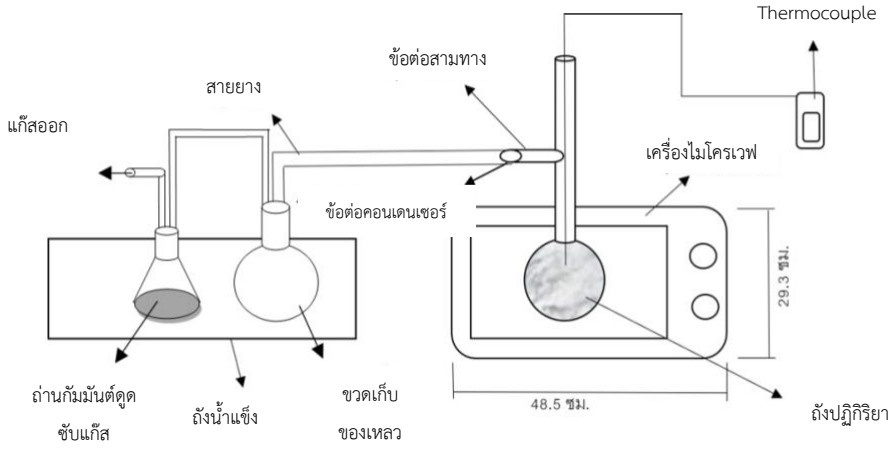
ตัวดูดซับคลื่นไมโครเวฟที่มีการศึกษาที่ผ่านมามีหลายชนิดที่ใช้ในกระบวนการไมโครเวฟไพโรไลซิสของพลาสติกและชีวมวล เช่น แกรไฟต์ (Graphite) ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ถ่าน (Charcoal) และถ่านชาร์จากการไพโรไลซิส (Pyrolysis char) เป็นต้น (Dadi et al., 2021) ตัวดูดซับคลื่นแต่ละชนิดส่งผลต่อกระบวนการไมโครเวฟไพโรไลซิสที่แตกต่างกัน เช่น เพิ่มปริมาณผลิตภัณฑ์ ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความจำเพาะ และลดอุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยา เป็นต้น ดังจะเห็นได้จากการรายงานของ Zhifeng et al. (2012) ซึ่งกล่าวว่าปริมาณไบโอออยล์ในกระบวนการไมโครเวฟไพโรไลซิสของสาหร่ายขนาดเล็กโดยใช้ถ่านกัมมันต์และถ่านชาร์มีค่าสูงขึ้น ส่วน Zhenyi et al. (2011) กล่าวว่าการใช้ถ่านชาร์เป็นตัวดูดซับคลื่นส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอนโซ่ตรงและอะโรมาติกส์ไฮโดรคาร์บอนที่มีความจำเพาะในการไพโรไลซิสสาหร่ายขนาดเล็ก นอกจากนี้ Manaeva et al. (2016) กล่าวว่าการใช้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับคลื่นในการไพโรไลซิสเปลือกถั่วลิสงทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่จำเพาะสูงคือเป็นสารประกอบจำพวกฟีนอลสูงถึงร้อยละ 61 อีกทั้งยังช่วยลดอุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสให้น้อยลงด้วย แกรไฟต์เป็นตัวดูดซับคลื่นที่ดี มีความเสถียร ให้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิสูงแต่มีราคาสูง ส่วนถ่านกัมมันต์และถ่านชาร์เป็นวัสดุที่หาได้ง่ายในท้องถิ่น จึงเป็นวัสดุที่อาจจะนำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการไมโครเวฟไพโรไลซิสขยะพลาสติกได้ในอนาคต

สำหรับลักษณะสมบัติของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากกระบวนการไมโครเวฟไพโรไลซิสนั้นมีลักษณะสมบัติเหมือนกับน้ำมันเชื้อเพลิงปิโตรเลียม เช่นน้ำมันเบนซินและดีเซล ซึ่งอาจมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของพลาสติกที่เป็นวัตถุดิบ ความสะอาดของวัตถุดิบ อัตราการเพิ่มอุณหภูมิของระบบ ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยา และตัวดูดซับคลื่นไมโครเวฟ (Dadi et al., 2021) สารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสสามารถวิเคราะห์ได้ด้วยเครื่องมือ FT-IR และ GC-MS ซึ่งจะสามารถวิเคราะห์ถึงหมู่ฟังก์ชันและชนิดของสารประกอบ (Samuel et al., 2019) ปัจจุบันข้อมูลเกี่ยวกับปัจจัยสำคัญที่ส่งกระทบต่อกระบวนการไมโครเวฟไพโรไลซิส ได้แก่ ชนิดและปริมาณตัวดูดซับ รวมถึงกำลังไฟของเครื่องไมโครเวฟที่เหมาะสมที่จะทำให้ได้ปริมาณของเหลวสูงและลักษณะสมบัติที่เหมาะแก่การนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงนั้นยังมีอยู่อย่างจำกัด งานวิจัยครั้งนี้จึงสนใจศึกษาผลของชนิดและปริมาณตัวดูดซับที่มีต่อกระบวนการไมโครเวฟไพโรไลซิส ซึ่งเป็นเพียงการศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับปริมาณของผลิตภัณฑ์เหลวและลักษณะสมบัติผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากกระบวนการไมโครเวฟไพโรไลซิสขยะพลาสติกประเภทพอลิโพรพิลีนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

วัสดุ อุปกรณ์

การวิจัยครั้งนี้เป็นการไพโรไลซิสพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีนในระดับห้องทดลอง (Lab scale) โดยใช้แหล่งพลังงานเป็นคลื่นไมโครเวฟ ดำเนินการทดลองที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมเคมี (อาคาร EN2) คณะวิศวกรรมศาสตร์ ใช้ตัวอย่างถุงพลาสติกพอลิโพรพิลีนแห้งและสะอาดที่ตัดให้มีขนาดเล็กกว่า 5 เซนติเมตร (ซื้อจากร้านค้าในท้องถิ่น) ตัวดูดซับคลื่นที่เลือกใช้ได้แก่ ผงแกรไฟต์ (ซื้อจากร้านค้าในท้องถิ่น) และผงถ่านกัมมันต์ (ยี่ห้อ ARIA) เครื่องไมโครเวฟยี่ห้อ TOSHIBA รุ่น MW2AG24PC กำลังไฟสูงสุด 800 วัตต์ ขนาดความจุ 24 ลิตร สามารถปรับระดับความร้อนได้ 5 ระดับ ได้แก่ กำลังไฟต่ำ (160 วัตต์) ต่ำปานกลาง (320 วัตต์) ปานกลาง (480 วัตต์) สูงปานกลาง (640 วัตต์) สูง (800 วัตต์) ซึ่งมีการเจาะรูข้างบนของเครื่องเพื่อเชื่อมต่อกับส่วนควบแน่นและเก็บผลิตภัณฑ์ของเหลว แผนภาพเครื่องมือไมโครเวฟไพโรไลซิสแสดงดังรูปที่ 2 ซึ่งมีองค์ประกอบสำคัญดังนี้ ในส่วนแรกที่เกี่ยวกับการเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสจะประกอบด้วยเครื่องไมโครเวฟ ภายในบรรจุขวดก้นกลม (ถังปฏิกิริยา) ที่ทำจากแก้วบอโรซิลิเกตที่ทนความร้อนสูง และต่อเข้ากับชุดตรวจวัดอุณหภูมิภายในถังปฏิกิริยา (Thermocouple) เมื่อเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสขึ้นแก๊สจะเคลื่อนที่ออกจากถังปฏิกิริยาไปตามคอนเดนเซอร์และไปควบแน่นที่ขวดเก็บผลิตภัณฑ์ของเหลวซึ่งแช่อยู่ในอ่างน้ำแข็ง แก๊สส่วนที่ไม่ควบแน่นจะเคลื่อนที่ไปที่ขวดดักแก๊สซึ่งภายในบรรจุผงถ่านกัมมันต์เอาไว้เพื่อบำบัดแก๊สก่อนจะปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมภายนอก



รูปที่ 2 แผนภาพการทดลองไพโรไลซิสพลาสติกพอลิโพรพิลีนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

วิธีการทดลอง

การศึกษาผลของชนิดตัวดูดซับคลื่นต่อกระบวนการไมโครเวฟไพโรไลซิส ผสมพลาสติกปริมาณ 50 กรัม กับแกรไฟต์ในสัดส่วนร้อยละ 2 โดยมวล ในขวดก้นกลม นำไปใส่ในเครื่องไมโครเวฟ เพื่อป้องกันความเสียหายของอุปกรณ์อันเนื่องมาจากความร้อนที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ในการทดลองจึงเริ่มต้นใช้กำลังไฟ 320 วัตต์ (ไฟอ่อนปานกลาง) เวลา 10 นาที จากนั้นปรับกำลังไฟเป็น 480 วัตต์ (ไฟปานกลาง) นาน 30 นาที บันทึกอุณหภูมิภายในถังปฏิกิริยาทุก ๆ 10 นาที อุณหภูมิสูงสุดของระบบและปริมาตรของเหลวที่ได้ทั้งหมด ปล่อยให้ระบบเย็นลงและนำของแข็งที่เหลืออยู่ในถังปฏิกิริยาใส่ในโถดูดความชื้นประมาณ 30 นาที ชั่งน้ำหนักของแข็งเหลวที่เกิดขึ้นและของแข็งที่เหลืออยู่ในถังปฏิกิริยาโดยไม่มีการแยกตัวดูดซับออก คำนวณหาร้อยละโดยมวลของแข็ง ของเหลว โดยเทียบกับน้ำหนักของพลาสติกพอลิโพรพิลีนที่ใช้ในการทดลอง คำนวณร้อยละโดยมวล

ของแก๊สโดยคำนวณจากสูตร ร้อยละของแก๊ส = 100 - (ร้อยละของแข็ง+ร้อยละของเหลว) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ และนำตัวอย่างของเหลวมารวมกันเพื่อนำไปวัดความหนืด ความหนาแน่น และวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน และทำการทดลองเช่นเดียวกันนี้แต่เปลี่ยนตัวดูดซับเป็นถ่านกัมมันต์ เลือกตัวดูดซับคลื่นที่ให้ปริมาณของเหลวมากกว่าเพื่อทำการทดลองต่อไป

การศึกษาผลของปริมาณตัวดูดซับคลื่นต่อกระบวนการไมโครเวฟไพโรไลซิส

ผสมพลาสติกปริมาณ 50 กรัมกับตัวดูดซับถ่านกัมมันต์ในสัดส่วนร้อยละ 2 โดยมวล ในขวดก้นกลม นำไปใส่ในเครื่องไมโครเวฟ เริ่มต้นใช้กำลังไฟ 320 วัตต์ (ไฟอ่อนปานกลาง) เวลา 10 นาที เพื่อให้ถังปฏิกิริยาค่อย ๆ ร้อนขึ้น จากนั้นปรับกำลังไฟเป็น 480 วัตต์ (ไฟปานกลาง) นาน 30 นาที บันทึกอุณหภูมิภายในถังปฏิกิริยาทุก ๆ 10 นาที อุณหภูมิสูงสุดของระบบ และปริมาตรของเหลวที่ได้ทั้งหมด ปล่อยให้ระบบเย็นลงและนำของแข็งที่เหลืออยู่ในถังปฏิกิริยาใส่ในโถดูดความชื้นประมาณ 30 นาที ชั่งน้ำหนักของแข็งเหลวที่เกิดขึ้นและของแข็งที่เหลืออยู่ในถังปฏิกิริยาโดยไม่มีการแยกตัวดูดซับออก คำนวณหาร้อยละโดยมวลของแข็ง ของเหลว โดยเทียบกับน้ำหนักของพลาสติกพอลิโพรพิลีนที่ใช้ในการทดลอง คำนวณร้อยละโดยมวลของแก๊สโดยคำนวณจากสูตร ร้อยละของแก๊ส = 100 - (ร้อยละของแข็ง+ร้อยละของเหลว) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ และนำตัวอย่างของเหลวมารวมกันเพื่อนำไปวัดความหนืด ความหนาแน่น และวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน และทำการทดลองเช่นเดียวกันนี้แต่เพิ่มปริมาณตัวดูดซับเป็นร้อยละ 5 และ 10 โดยมวล ซึ่งอ้างอิงจากการทดลองเบื้องต้นของเราที่พบว่าปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 2-10 ไม่ทำให้เกิดความร้อนสูงเกินไปและไม่ส่งผลให้ถังปฏิกิริยาเสียหาย

การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของผลิตภัณฑ์ของเหลว

ลักษณะสมบัติที่วิเคราะห์ในการทดลองนี้เป็นการวิเคราะห์เพียงบางพารามิเตอร์เท่านั้น ได้แก่ ความหนืดซึ่งวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดความหนืด ยี่ห้อ HAAK 6 plus ตามมาตรฐาน ASTM D445 ความหนาแน่นซึ่งคำนวณจากการชั่งน้ำหนักผลิตภัณฑ์ของเหลวปริมาตร 10.00 มิลลิลิตร และคำนวณจากสมการที่ (1) ที่อุณหภูมิห้อง และชนิดของสารจากหมู่ฟังก์ชันซึ่งวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง ATR-FTIR Spectrophotometer ยี่ห้อ Perkin Elmer เปรียบเทียบลักษณะสมบัติของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการทดลองกับน้ำมันเบนซินในท้องตลาด (ไม่ระบุค่าออกเทน) จากสถานีน้ำมัน ปตท. ในท้องถิ่น

$$\text{ความหนาแน่น (กิโลกรัม/ลิตร)} = \frac{\text{น้ำหนักผลิตภัณฑ์ของเหลว (กิโลกรัม)}}{\text{ปริมาตรผลิตภัณฑ์ของเหลว (ลิตร)}} \quad \text{.....(1)}$$

ผลการวิจัย และการอภิปรายผล

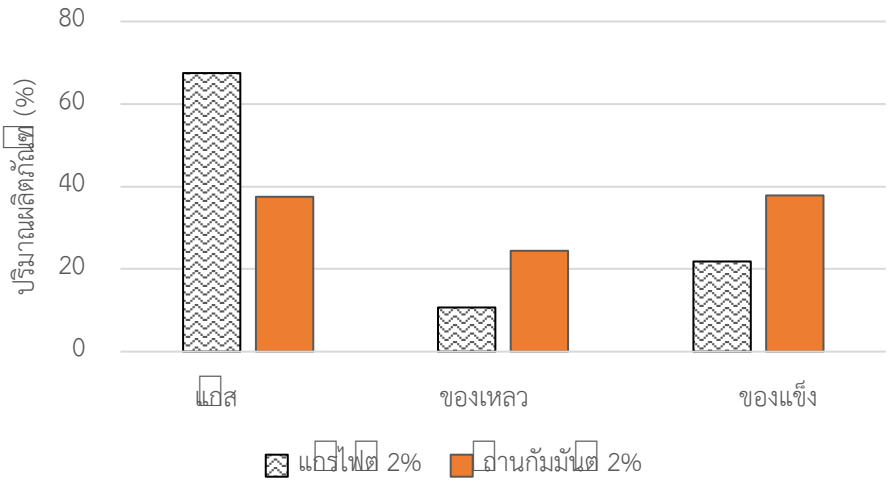
งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของชนิดและปริมาณของตัวดูดซับคลื่นไมโครเวฟที่มีต่อกระบวนการไมโครเวฟไพโรไลซิส โดยขั้นตอนแรกศึกษาผลของชนิดตัวดูดซับคลื่นก่อน จากนั้นเลือกตัวดูดซับคลื่นที่ให้ผลิตภัณฑ์ของเหลวมากกว่าเพื่อนำไปศึกษาผลของปริมาณตัวดูดซับซึ่งเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 5 และ 10 โดยมวล ตามลำดับ ปริมาณและลักษณะสมบัติบางประการของของเหลวจากกระบวนการไมโครเวฟไพโรไลซิสของพลาสติกพอลิโพรพิลีน แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปริมาณผลิตภัณฑ์และลักษณะสมบัติบางประการของของเหลวจากกระบวนการไมโครเวฟไพโรไลซิสพลาสติกพอลิโพรพิลีน

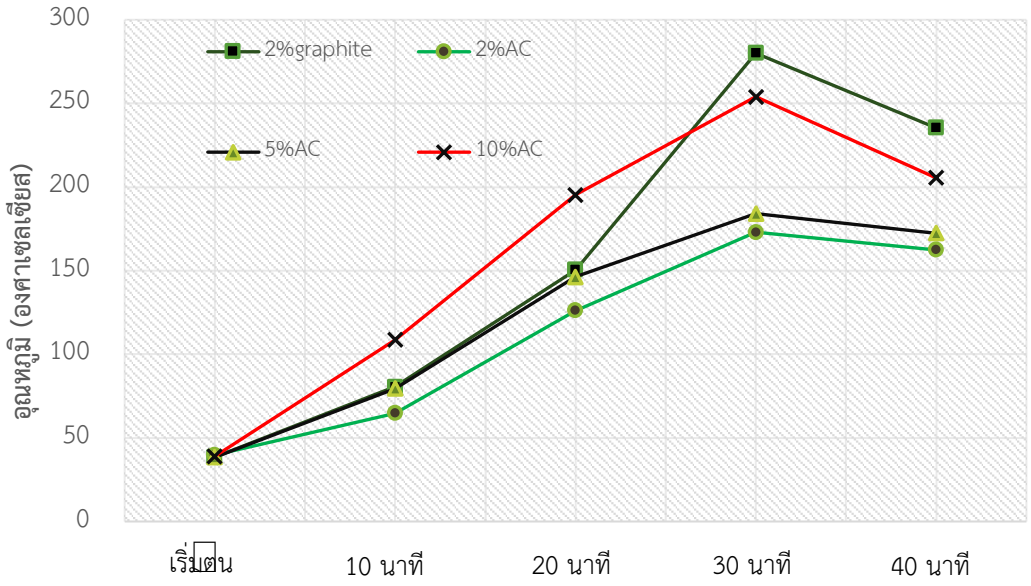
ปัจจัยศึกษา		ลักษณะสมบัติของของเหลว	
		ความหนาแน่น (กิโลกรัม/ลิตร)	ความหนืด (เซนติสโตก)
ชนิดของตัวดูดซับคลื่น	แกรไฟต์ (ร้อยละ 2 โดยมวล)	76.0±0.006	6
	ถ่านกัมมันต์ (ร้อยละ 2 โดยมวล)	72.0±0.010	7
ปริมาณตัวดูดซับคลื่น (ถ่านกัมมันต์)	ร้อยละ 2 โดยมวล	72.0±0.010	7
	ร้อยละ 5 โดยมวล	74.0±0.010	5
	ร้อยละ 10 โดยมวล	80.0±0.012	31

จากตารางที่ 1 ชนิดของตัวดูดซับคลื่นในการทดลองครั้งนี้เลือกมา 2 ชนิด ได้แก่ แกรไฟต์และถ่านกัมมันต์ พบว่าการใช้ถ่านกัมมันต์ให้ปริมาณของเหลวร้อยละ 24.48 โดยมวล สูงกว่าแกรไฟต์ซึ่งได้ของเหลวเพียงร้อยละ 10.64 โดยมวล แสดงดังรูปที่ 3 แต่เมื่อพิจารณาถึงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดลอง (รูปที่ 4) พบว่าการใช้แกรไฟต์ให้อุณหภูมิภายในถังปฏิกิริยาสูงสุด 280.0 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าการใช้ถ่านกัมมันต์ซึ่งให้อุณหภูมิสูงสุดเพียง 173.0 องศาเซลเซียส สอดคล้องกับที่กล่าวไว้ในรายงานของ Dadi et al. (2021) ที่กล่าวว่า แกรไฟต์เป็นตัวดูดซับคลื่นที่ดี ให้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิสูง แต่ในถ่านกัมมันต์จะมีแกรไฟต์เป็นองค์ประกอบเพียงบางส่วน ดังนั้นแกรไฟต์จึงมีความสามารถในการดูดซับคลื่นและเกิดอันตกิริยากับคลื่นไมโครเวฟได้ดีกว่าถ่านกัมมันต์ และเกิดการสั่นของโมเลกุลมากกว่า ส่งผลให้อุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นในถังปฏิกิริยาสูง ปฏิกิริยาการสลายตัวของพลาสติกพอลิโพรพิลีนจึงเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และได้ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็นแก๊ส ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Raj and Chayan (2016) ที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะพบผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สมากขึ้นและกล่าวว่า การไพโรไลซิสในช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นของเหลวสูง

เนื่องจากในการทดลองครั้งนี้พบว่า การใช้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับทำให้ได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวมากกว่าการใช้แกรไฟต์ ดังนั้นจึงใช้ถ่านกัมมันต์เพื่อศึกษาผลของการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับคลื่นไมโครเวฟในการทดลองต่อไป



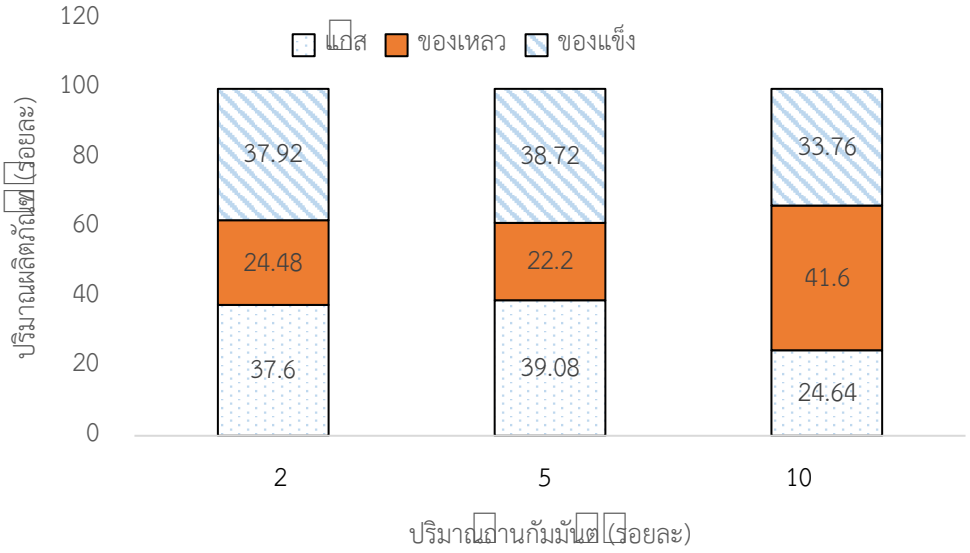
รูปที่ 3 ปริมาณผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิสพลาสติกพอลิโพรพิลีน โดยใช้แกรไฟต์และถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับคลื่นไมโครเวฟ



รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในระหว่างการทดลอง (AC คือ Activated carbon)

ในการทดลองผลของปริมาณตัวดูดซับที่มีต่อผลิตภัณฑ์ของเหลว พบว่าเมื่อปริมาณตัวดูดซับคลื่นเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 2, 5 และ 10 (โดยมวล) ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวร้อยละ 24.48, 22.20 และ 41.60 โดยมวล ตามลำดับ ดังรูปที่ 5 และอุณหภูมิสูงสุดที่วัดได้เป็น 173.0, 184.1 และ 254.0 ตามลำดับ ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ผลการทดลองที่ได้จากการใช้ถ่านกัมมันต์ร้อยละ 2 และ 5 นั้นไม่ชัดเจนเพราะปริมาณของเหลวไม่แปรผันตามแนวโน้มดังกล่าว แต่เมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับสูงถึงร้อยละ 10 จะได้ปริมาณของเหลวเพิ่มขึ้นอย่างมาก (ร้อยละ 41.60) สำหรับอุณหภูมิสูงสุดที่ได้จากการทดลองนั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณตัวดูดซับ และอัตราการเพิ่มอุณหภูมิของการทดลองครั้งนี้อยู่ในช่วง 4.76-7.46 องศาเซลเซียส/นาที จึงจัดเป็นการไพโรไลซิสแบบช้า แตกต่างจากการรายงานของ Dadi et al. (2021) ซึ่งได้ทำการทดลองไพโรไลซิสพลาสติกพอลิโพรพิลีนปริมาณ 50 กรัม โดยใช้แกรไฟต์เป็นตัวดูดซับในสัดส่วนร้อยละ 50, 66.7

และ 87.5 โดยมวล (ปริมาณตัวดูดซับ 50, 200 และ 350 กรัมต่อพลาสติกพอลิโพรพิลีน 50 กรัม) กำลังไฟของเครื่องไมโครเวฟ 300 วัตต์ พบว่า อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ เป็น 25.7, 9.3 และ 8.4 องศาเซลเซียส/นาที จึงมีความเป็นไปได้ว่าหากต้องการให้เกิดการไพโรไลซิสแบบเร็วหรือต้องการให้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นต้องเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์ให้มากขึ้น อย่างไรก็ตาม การใช้ตัวดูดซับคลื่นในปริมาณมากอาจทำให้สิ้นเปลืองและเกิดความร้อนสูงอาจส่งผลต่อถังปฏิกิริยา จำเป็นจะต้องเป็นวัสดุที่มีความทนทานต่ออุณหภูมิสูง เช่น ควอตซ์ซึ่งมีราคาสูง และผลจากการทดลองครั้งนี้ค่อนข้างมีจำกัดจึงควรมีการศึกษาปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมที่จะทำให้อัตราการเกิดผลิตภัณฑ์ที่สูงขึ้นเพิ่มเติมอีก



รูปที่ 5 ปริมาณผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิสพลาสติกพอลิโพรพิลีน โดยใช้ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่แตกต่างกัน

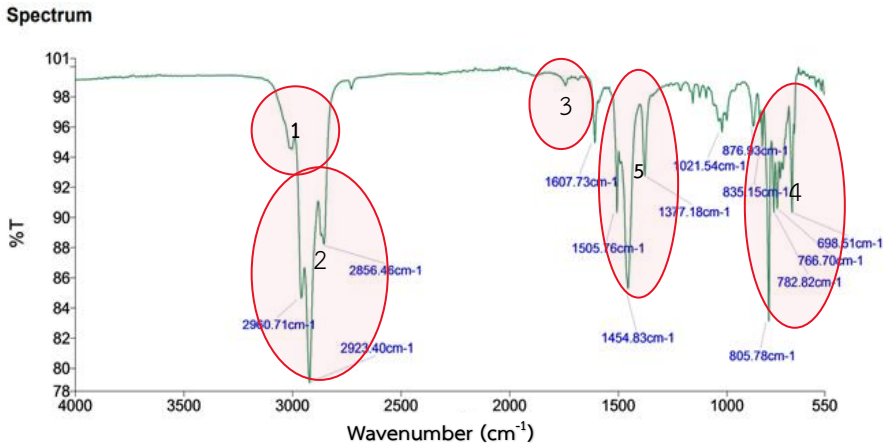
สำหรับลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการทดลองแสดงดังรูปที่ 6 ลักษณะสมบัติเบื้องต้นซึ่งได้แก่ ความหนาแน่นที่ใช้ตัวดูดซับคลื่นเป็นแกรไฟต์ร้อยละ 2 ถ่านกัมมันต์ร้อยละ 2, 5 และ 10 (โดยมวล) มีค่าเป็น 0.76, 0.72, 0.74 และ 0.80 กิโลกรัม/ลิตร และความหนืดของของเหลวมีค่า 6, 7, 5 และ 31 เซนติสโตก ตามลำดับ สำหรับความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ของเหลวจากการทดลองนี้คล้ายกับการศึกษาที่รายงานโดย Raj and Chayan (2016) ซึ่งทำการไพโรไลซิสพลาสติพอลิโพรพิลีนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่มีความหนาแน่น 0.76-0.79 กิโลกรัม/ลิตร ในการทดลองครั้งนี้การใช้ถ่านกัมมันต์ร้อยละ 10 โดยมวลนั้นได้ผลิตภัณฑ์เป็นของเหลวปริมาณสูงแต่ของเหลวมีความหนืดสูงถึง 31 เซนติสโตก ซึ่งมากกว่าการทดลองของ Raj and Chayan (2016) ที่ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่มีความหนืดระหว่าง 3-4 เซนติสโตกเท่านั้น ทั้งนี้ในตัวอย่างที่มีความหนืดสูงนั้นอาจเนื่องมาจากของเหลวที่ได้อาจมีองค์ประกอบไฮโดรคาร์บอนโซ่ยาว (มากกว่า C_{20}) (Lopez et al., 2017) เมื่อเปรียบเทียบกับคุณสมบัติของน้ำมันเบนซินและดีเซลแล้วพบว่า ผลิตภัณฑ์ของเหลวจากการทดลองนี้มีความหนาแน่นใกล้เคียงกับน้ำมันเบนซินในท้องตลาด (ข้อมูลจากการวัดความหนาแน่นของน้ำมันเบนซินจากสถานีจำหน่ายน้ำมัน ปตท. ในท้องถิ่น มีค่า 0.71-0.77 กิโลกรัม/ลิตร)



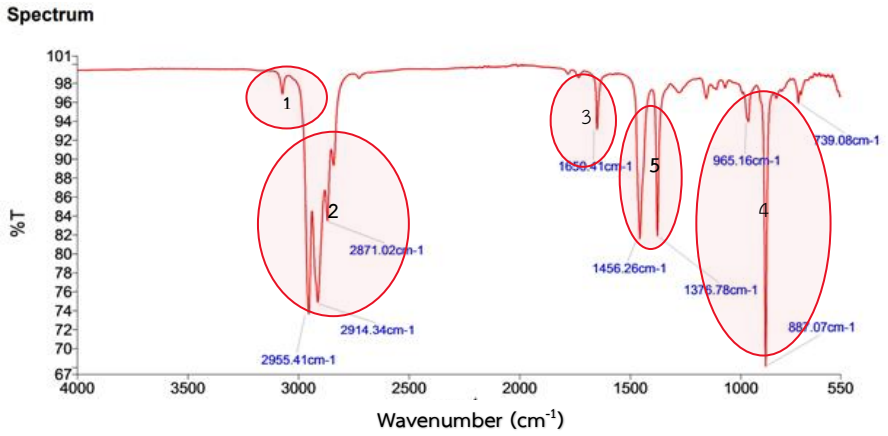
ก. PP+2% แกรไฟต์ ข. PP+2% ถ่านกัมมันต์ ค. PP+5% ถ่านกัมมันต์ ง. PP+10% ถ่านกัมมันต์

รูปที่ 6 ลักษณะของเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสพลาสติกพอลิโพรพิลีนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

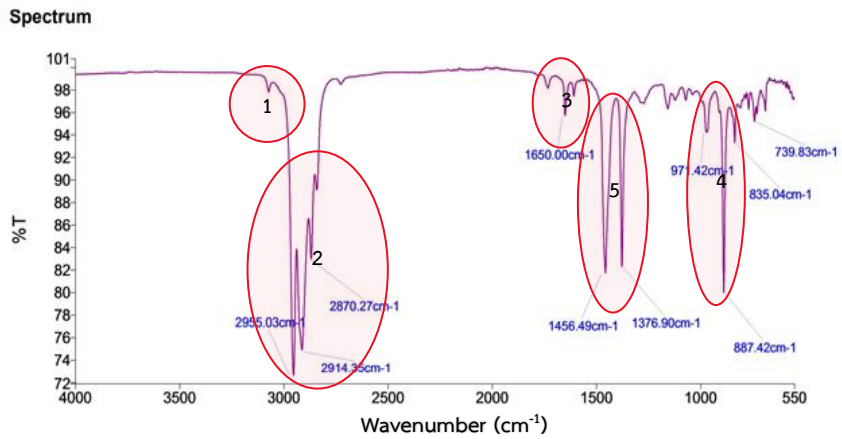
จากการศึกษาหมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบในโครงสร้างทางเคมีของของเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสพลาสติกพอลิโพรพิลีนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ด้วยเทคนิค ATR-FTIR เปรียบเทียบกับน้ำมันเบนซินในท้องตลาด (สถานีน้ำมัน ปตท. ในท้องถิ่น) ได้ผลดังรูปที่ 7-10 ซึ่งจะเห็นว่า IR spectrum ของผลิตภัณฑ์ของเหลวนั้นคล้ายกับน้ำมันเบนซินจากท้องตลาด โดยจะพบพีกของ C-H ระหว่างเลขคลื่น 3000-2800 cm^{-1} (หมายเลข 2) ซึ่งอาจจะมาจากการสั่นของโมเลกุลของหมู่เมทิลและเมทิลีน พบการสั่นของพันธะ C=C ที่เลขคลื่น 1650-1550 cm^{-1} (หมายเลข 3) ซึ่งในน้ำมันเบนซินจากสถานีจำหน่าย ปตท. ในท้องถิ่นพบพีกนี้ขนาดเล็กมาก แต่พบพีกของ =C-H (แบบงอ) ที่ช่วงเลขคลื่น 1000-650 cm^{-1} นอกจากนี้ก็ยังพบว่าในทุกตัวอย่างมีพีก C-H ที่เลขคลื่นมากกว่า3000 cm^{-1} (หมายเลข 1) แสดงว่าอาจจะมีพันธะคู่จากวงแหวนอะโรมาติกส์ พบพีก C-H (แบบงอ) ที่เลขคลื่น 1500-1300 cm^{-1} (หมายเลข 5) และพบพีกที่แสดงถึงสารประกอบวงเบนซีนที่เลขคลื่น 800-400 cm^{-1} (หมายเลข 4) หากพิจารณาเพิ่มเติมจาก IR spectrum ไม่พบพีกที่แสดงถึงหมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรด (เช่น หมู่ -COOH, -OH) ในของเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสพอลีเอทิลีนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่ากลุ่มสารที่เป็นองค์ประกอบหลักในผลิตภัณฑ์ของเหลวเป็นสารพวกไฮโดรคาร์บอนชนิดอิ่มตัว ไม่อิ่มตัว ซึ่งอาจจะมีทั้งที่เป็นโซ่ตรงและเป็นวง คล้ายกับการรายงานของ Samuel et al. (2019) ที่ศึกษาการใช้กระบวนการไพโรไลซิสขยะพลาสติกผสมให้เป็นทรัพยากรที่มีคุณค่า เช่น น้ำมันดิบ เพื่อลดปัญหาสิ่งแวดล้อม ซึ่งทำในถังปฏิกรณ์แบบ Fixed bed ใช้อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะที่มีไนโตรเจนไหลด้วยอัตรา 200 มิลลิลิตร/นาที นาน 2 ชั่วโมง, เวลาในการ Cracking 40 นาที วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่องมือ FT-IR และ GC-MS พบว่า ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้มีหมู่ฟังก์ชัน 21 ชนิด ซึ่งส่วนใหญ่เป็นส่วนผสมของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดโซ่ตรงและเป็นวง สารประกอบเหล่านี้จัดอยู่ในกลุ่มน้ำมันดีเซล (C_{12}-C_{24}) และน้ำมันมีค่าความหนืด Kinematic viscosity เป็น 1.036 ตารางมิลลิเมตรต่อวินาที น้ำมันดิบที่ได้จากการทดลองมีความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงทางเลือกในอนาคต อย่างไรก็ตาม ในการทดลองครั้งนี้ไม่ได้ทำการศึกษาชนิดของสารที่เป็นองค์ประกอบด้วยเทคนิค GC-MS จึงไม่อาจระบุชนิดของสารได้อย่างแน่ชัด และจะทำการทดลองในครั้งต่อไป



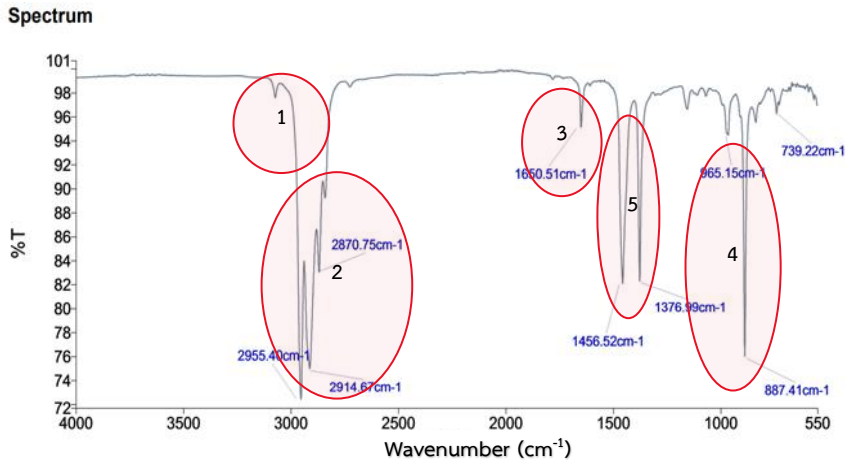
รูปที่ 7 IR Spectrum ของน้ำมันเบนซินจากสถานีจำหน่าย ปตท. ในท้องถิ่น



รูปที่ 8 IR Spectrum ของพอลิโพรพิลีน+ ถ่านกัมมันต์ ร้อยละ 2



รูปที่ 9 IR Spectrum ของพอลิโพรพิลีน + ถ่านกัมมันต์ร้อยละ 5



รูปที่ 10 IR Spectrum ของพอลิโพรพิลีน + ถ่านกัมมันต์ร้อยละ 10

บทสรุป

จากการศึกษาผลของชนิดตัวดูดซับคลื่นโครเวฟที่มีกระบวนการไมโครเวฟไพโรไลซิสครั้งนี้สามารถสรุปได้ว่า การใช้ถ่านกัมมันต์ให้อุณหภูมิสูงสุดของระบบต่ำกว่าการใช้แกรไฟต์แต่ให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวสูงกว่า ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการใช้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับคลื่นมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 22.20-41.60 โดยมวล ซึ่งปริมาณของเหลวที่ได้มีแนวโน้มแปรผันตรงกับปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ใช้ ความหนาแน่นของของเหลวมีค่าอยู่ระหว่าง 0.72-0.80 กิโลกรัม/ลิตร ความหนืดของของเหลวมีค่า 5-31 เซนติสโตก ซึ่งเมื่อเทียบกับน้ำมันเบนซินในท้องตลาดพบว่าผลิตของเหลวจากการทดลองมีความหนาแน่นใกล้เคียงกับน้ำมันเบนซินในท้องตลาดแต่ความหนืดสูงกว่า พบหมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบในโครงสร้างโมเลกุลของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้สอดคล้องกับน้ำมันเบนซินในท้องตลาด ซึ่งประกอบด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดอิ่มตัว ไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัวและอะโรมาติกส์ อย่างไรก็ตาม ควรมีการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติอื่น ๆ เพิ่มเติม เช่น จุดวาบไฟ ค่าความร้อน และไฮโดรคาร์บอนองค์ประกอบ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ที่สนับสนุนทุนในการสร้างเครื่องไมโครเวฟไพโรไลซิส ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ และภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่และเครื่องมือในการทำวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

โปรดปราน สิริธีรศาสตร์, ณัฐพล ช่างการ และศรัณย์ ชโนวิทย์. (2554). การปรับปรุงคุณภาพของผสมชีวมวล และถ่านหินด้วยกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน (Pyrolysis) โดยใช้คลื่นไมโครเวฟ. ใน การประชุมวิชาการนานาชาติวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์ แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 21 วันที่ 10–11 พฤศจิกายน 2554. สงขลา. T-16.

สุขสันต์ อมรรักษา และแอ๊ปเปิ้ล แจ่มจำรัส. (2556). การประยุกต์ใช้ไมโครเวฟไพโรไลซิสสำหรับอุตสาหกรรมปิโตรเคมี. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 23(2): 480-488.

Dadi V.S., Garlapati N., Attada Y. and Veluru S. (2021). Optimization of microwave power and graphite susceptor quantity for waste polypropylene microwave pyrolysis. Process Safety and Environmental Protection. 149: 234-243.

Lopez G., Artetxe M., Amutio M., Bilbao J. and Olazar M. (2017). Thermochemical routes for the valorization of waste polyolefinic plastics to produce fuels and chemicals. A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 73: 346–368.

Manaeva A., Tahmasebi A., Tian, L. and Yu, J. (2016). Microwave-assisted catalytic pyrolysis of lignocellulosic biomass for production of phenolic-rich bio-oil. Bioresource Technology. 211: 382–389.

Raj M.B. and Chayan B. (2016). Study on Microwave Pyrolysis of Polypropylene. International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT). 5: 108-116.

Samuel K.T., Enoch K.B. and Samuel D. (2019). Plastic waste to fuel via pyrolysis: A key way to solving the severe plastic waste problem in Ghana. Thermal Science and Engineering Progress. 11: 417–424.

Yaning Z., Yunlei C., Shiyu L., Liangliang F., Nan Z., Peng P., Yunpu W., Feiqiang G., Min M., Yanling C., Yuhuan L., Hanwu L., Paul C., Bingxi L. and Roger R. (2020). Fast microwave-assisted pyrolysis of wastes for biofuels production–A review. Bioresource Technology. 297: 122480.

Zhenyi D., Yecong L., Xiaoquan W., Yiqin W., Qin C., Chenguang W., Xiangyang L., Yuhuan L., Paul C. and Roger R. (2011). Microwave-assisted pyrolysis of microalgae for biofuel production. Bioresource Technology. 102: 4890–4896.

Zhifeng H., Xiaoqian M. and Chunxiang C. (2012). A study on experimental characteristic of microwave-assisted pyrolysis of microalgae. Bioresource Technology. 107: 487–493.