

การผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากขยะพลาสติกพอลิเอทิลีน ด้วยกระบวนการไพโรไลซิส

Liquid Fuel Production from Polyethylene Plastic Waste by Pyrolysis Process

โชคชัย เหมือนมาศ* และ รามพร นิกม

Chokchai Mueanmas* and Ruamporn Nikhom

Received: 10 July 2020, Revised: 24 September 2020, Accepted: 22 June 2021

บทคัดย่อ

พอลิเอทิลีนเป็นพลาสติกที่พบมากที่สุดในชีวิตประจำวัน โมเลกุลของพอลิเอทิลีนประกอบด้วยสายโซ่ของเอทิลีน ซึ่งเป็นโมเลกุลที่ประกอบด้วยไฮโดรเจน 2 อะตอมที่ต่ออยู่กับแต่ละอะตอมของคาร์บอน ซึ่งสามารถเปลี่ยนเป็นเชื้อเพลิงเหลวได้ วัตถุประสงค์ของงานวิจัยชิ้นนี้เพื่อศึกษากระบวนการไพโรไลซิสของพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนสำหรับการผลิตน้ำมันไพโรไลซิส การทดลองเบื้องต้นได้ทำการศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 300-600°C ผลการศึกษาพบว่าช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการผลิตน้ำมันไพโรไลซิสจะอยู่ในช่วง 385-425°C จากนั้นจึงทำการศึกษาผลของปัจจัย (อุณหภูมิ เวลาในการทำปฏิกิริยา และอัตราการให้ความร้อน) ต่อกระบวนการไพโรไลซิสของพลาสติกพอลิเอทิลีน ซึ่งพบว่า ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาจะแปรผันตรงกับร้อยละผลได้น้ำมันไพโรไลซิส ในขณะที่ผลของอัตราการให้ความร้อนจะแปรผกผัน โดยร้อยละผลได้น้ำมันไพโรไลซิสมีค่าเท่ากับ 53.36 เมื่อใช้อุณหภูมิ 405°C เป็นเวลา 150 นาที ด้วยอัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 8°C/นาที ซึ่งผลิตภัณฑ์น้ำมันไพโรไลซิสที่ได้มีค่าความร้อนเท่ากับ 43,438 kJ/kg ความหนืด 2.014 cSt และ pH เท่ากับ 7.2 จากนั้นน้ำมันที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสจะทำการกลั่นเพื่อเพิ่มความบริสุทธิ์ และแยกออกเป็นน้ำมันแก๊สโซลีน และน้ำมันดีเซล ซึ่งเมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์ทั้งสองส่วนพบว่ามีความคล้ายคลึงกับน้ำมันเชื้อเพลิงทางการค้า ดังนั้น พลาสติกจึงเป็นวัตถุดิบที่ดีเยี่ยมสำหรับใช้ในการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิง

คำสำคัญ: พอลิเอทิลีน, พลาสติก, ไพโรไลซิส, น้ำมันแก๊สโซลีน, น้ำมันดีเซล

หลักสูตรวิศวกรรมพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง เลขที่ 222 หมู่ที่ 2 ตำบลบ้านพร้าว อำเภอป่าพะยอม จังหวัดพัทลุง 93210

Energy Engineering Program, Faculty of Engineering, Thaksin University, Phatthalung Campus, 222 Moo 2, Baan Prao, Paphayom, Phatthalung, 93210, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): chokchai@tsu.ac.th

ABSTRACT

Polyethylene is the most common plastics found in daily life. Its molecule is nothing more than a long chain of ethylene, two hydrogen atoms attached to each carbon atom, which can be changed to liquid fuel. The pyrolysis of plastics (polyethylene) to produce the fuel oil was investigated. The preliminary experiments were carried out in the range of temperature 300 to 600°C. The results showed that the suitable range of temperature for pyrolysis process of polyethylene was 385-425°C. Then, the influence of the parameters (temperature, reaction time and heating rate) on the pyrolysis was studied. The results indicated that the effect of reaction time was directly proportional to the yield of pyrolysis oil while the heating rate was inversely proportional. The maximum yield of pyrolysis oil (53.36%) was achieved under the optimum experiment conditions of temperature of 405°C, reaction time of 150 min and heating rate of 8°C/min. The heating value, viscosity and pH of pyrolysis oil were 43,438 kJ/kg, 2.014 cSt and 7.2, respectively. After that, the pyrolysis oil was distilled to purify and was separated to gasoline and diesel oil. The chemical composition of two fractions was similar to the commercial fuel oil. Therefore, plastic is an excellent feedstock for the production of fuel oil.

Key words: polyethylene, plastic, pyrolysis, gasoline oil, diesel oil

บทนำ

ในสภาวะปัจจุบันประเทศไทยมีความจำเป็นที่จะต้องแสวงหาแหล่งพลังงานหมุนเวียนเพื่อทดแทนพลังงานเชื้อเพลิงฟอสซิลซึ่งนับวันจะมีปริมาณลดน้อยลงในขณะที่ปริมาณความต้องการกลับเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง อีกทั้งยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทั้งต่อสิ่งมีชีวิต และสิ่งแวดล้อมต่างๆ จึงได้มีการตื่นตัวในการที่จะพัฒนาเชื้อเพลิงที่สามารถเกิดการหมุนเวียน และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งหน่วยงานภาครัฐยังได้ให้การสนับสนุนเพื่อพัฒนาองค์ความรู้ทางด้านการผลิตพลังงานทดแทน จึงได้มีการกำหนดไว้ในแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558-2579 ของกระทรวงพลังงาน เพื่อลดการนำเข้าของน้ำมันปิโตรเลียม อันจะนำไปสู่ความมั่นคง มั่งคั่ง และยั่งยืนทางด้านพลังงานภายในประเทศ อีกทั้งยังส่งผลต่อการพัฒนา

ทางเศรษฐกิจและสังคมของประเทศในระยะยาวได้อีกด้วย

ขยะพลาสติกเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการที่จะนำมาใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อผลิตพลังงาน เพราะขยะมีศักยภาพที่สามารถนำมาใช้เพื่อผลิตพลังงานได้ อีกทั้งยังมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่ในปัจจุบันพบว่าการนำขยะมาผลิตเป็นพลังงานน้อยมากเมื่อเทียบกับพลังงานทดแทนด้านอื่นๆ ซึ่งจากรายงานของกรมควบคุมมลพิษ พบว่า ในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา ประเทศไทยมีขยะพลาสติกเกิดขึ้นประมาณ 12% ของปริมาณขยะที่เกิดขึ้นทั้งหมด หรือประมาณปีละ 2 ล้านตัน โดยขยะพลาสติกที่เกิดขึ้นมีการนำกลับไปใช้ใหม่เพียง 0.5 ล้านตัน ส่วนที่เหลือ 1.5 ล้านตันส่วนใหญ่เป็นพลาสติกที่ใช้ครั้งเดียว ซึ่งพลาสติกส่วนที่เหลือนี้ประกอบด้วย ถุงพลาสติก 1.2 ล้านตัน และ 3 แสนตันจะเป็นพลาสติกอื่นๆ เช่น แก้ว กล่อง ถาด ขวด ฝาจุก เป็นต้น (Pollution

Control Department, 2018) โดยวิธีการกำจัดส่วนใหญ่จะใช้วิธีการฝังกลบ อันจะส่งผลให้เกิดการสะสมเพิ่มขึ้นทุกปี และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบเชิงโมเลกุลของพลาสติกพบว่าสามารถนำมาแปรรูปเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงได้ด้วยกระบวนการไพโรไลซิส เนื่องจากโมเลกุลของพลาสติกจะเป็นสายโซ่ยาวที่เป็นหน่วยซ้ำของมอนอเมอร์ (monomer) ซึ่งเมื่อสายโซ่เหล่านี้ได้รับพลังงานก็จะสามารถสลายตัวกลายเป็นโมเลกุลของไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเล็กลงซึ่งมีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับน้ำมันเชื้อเพลิง อีกทั้งกระทรวงพลังงานได้ตั้งเป้าหมายการผลิตน้ำมันไพโรไลซิสเอาไว้ในปี 2579 เท่ากับ 0.53 ล้านลิตร/วันเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในภาคขนส่งจากพลังงานทดแทน โดยหากส่งเสริมให้เกิดการแปรรูปขยะพลาสติกดังกล่าวจะสามารถลดปริมาณขยะ ลดงบประมาณในการจัดการขยะ ซึ่งจะช่วยให้ปัญหาขยะที่นับวันจะมีจำนวนมากขึ้น ในขณะเดียวกันก็จะช่วยลดการนำเข้าน้ำมันได้อีกทางหนึ่ง

กระบวนการไพโรไลซิส เป็นกระบวนการสลายตัวทางความร้อนโดยการแตกพันธะทางเคมีของสารตั้งต้นในสถานะที่ปราศจากออกซิเจน (Zhang *et al.*, 2020) โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสจะอยู่ในสถานะที่เป็นของแข็ง ของเหลว หรือแก๊ส ก็ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของสารตั้งต้น และสถานะของกระบวนการที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา Tulashie *et al.* (2019) ศึกษากระบวนการไพโรไลซิสของพลาสติกผสมหลายชนิดด้วยท่อปฏิกรณ์แบบ fixed bed ที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 40 นาที โดยในช่วงเริ่มต้นของการศึกษาจะใช้ N_2 ไหลผ่านท่อปฏิกรณ์ด้วยอัตราการไหล 200 mL/min เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อกำจัดออกซิเจนออกจากเครื่องปฏิกรณ์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นโมเลกุลที่อยู่ในช่วงน้ำมันดีเซล ($C_{12} - C_{24}$) Thahir *et al.* (2019) ศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงเหลว

จากขยะพลาสติกชนิด polypropylene ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบ fixed bed ในสถานะสุญญากาศ (-3 mm H_2O) ที่อุณหภูมิ 580°C จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีองค์ประกอบของ gasoline และ kerosene นอกจากนี้ Zattini *et al.* (2017) ได้ทำการศึกษากระบวนการไพโรไลซิสของ low-density polyethylene ที่อุณหภูมิ 450 - 600°C ผลการศึกษาพบว่า ที่อุณหภูมิต่ำจะมีอัตราส่วนของผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมันต่อขี้ผึ้ง (wax) สูง และผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สจะประกอบด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนโมเลกุลของคาร์บอนตั้งแต่ 3 โมเลกุลขึ้นไป ที่อุณหภูมิสูง ผลิตภัณฑ์จะเป็นแก๊สมากกว่าของเหลว ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นแก๊สมีเทนและไฮโดรเจน โดยน้ำมันไพโรไลซิสที่ผลิตได้ Kalargaris *et al.* (2017) ได้นำมาผสมกับน้ำมันดีเซลและทำการทดสอบในเครื่องยนต์ดีเซลแล้วพบว่า การทำงานของเครื่องยนต์ที่ภาระสูง (high load) มีประสิทธิภาพเหมือนกับการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล ในขณะที่เมื่อภาระของเครื่องยนต์ต่ำ (lower load) จะมีความล่าช้าในการจุดระเบิด ซึ่งเป็นผลมาจากความคงตัวของเชื้อเพลิง อีกทั้งประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรค (Brake Thermal Efficiency) จะต่ำกว่าเชื้อเพลิงดีเซลเล็กน้อย ในขณะที่ปริมาณ NO_x ที่ปล่อยออกมาจะมีค่าสูงกว่า นอกจากนี้ Khairil *et al.* (2020) ได้นำน้ำมันไพโรไลซิสมาผสมกับน้ำมันแก๊สโซลีนเพื่อใช้ในการทดสอบกับเครื่องยนต์ที่มีการจุดระเบิดด้วยประกายไฟ (spark ignition) ผลการศึกษาพบว่า กำลังเบรค (Brake Power) และอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรค (Brake Specific Fuel Consumption) มีค่าเท่ากับ 4.1 kW และ 0.309 kg/kW h ตามลำดับ และประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ใกล้เคียงกับการใช้น้ำมันแก๊สโซลีนเพียงอย่างเดียว ซึ่งแสดงให้เห็นว่าน้ำมันไพโรไลซิสสามารถนำมาใช้กับเครื่องยนต์ดีเซล และเครื่องยนต์แก๊สโซลีนได้โดยไม่ต้องปรับแต่งหรือดัดแปลงเครื่องยนต์ แต่อย่างไรก็ตาม

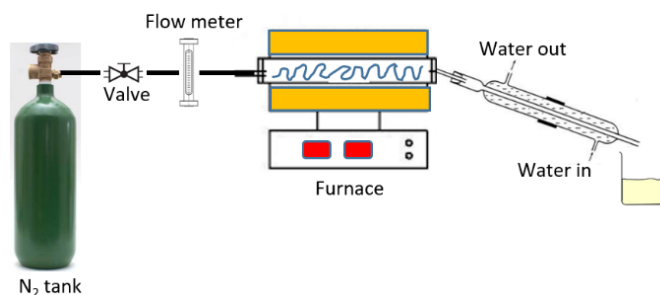
น้ำมันไพโรไลซิสที่ผลิตได้จะมีการผสมกันของโมเลกุลเล็กและโมเลกุลใหญ่ในช่วงกว้าง หากนำไปใช้งานกับเครื่องยนต์เป็นระยะเวลานานจะส่งผลเสียต่อเครื่องยนต์ได้ จึงจำเป็นต้องมีการกลั่นแยกเพื่อเพิ่มความบริสุทธิ์ และปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันไพโรไลซิสก่อนที่จะนำไปใช้ในเครื่องยนต์ เพื่อทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล จากการทบทวนผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการไพโรไลซิสของพลาสติกพบว่า มีศักยภาพ และประสิทธิภาพในการผลิตเป็นพลังงานทดแทน ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการผลิตน้ำมันไพโรไลซิสจากพลาสติกพอลิเอทิลีน และศึกษาการกลั่นแยกน้ำมันแก๊สโซลีน และน้ำมันดีเซลจากน้ำมันไพโรไลซิสเพื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบ และเพิ่มความสามารถสำหรับนำไปใช้ในเครื่องยนต์

วิธีดำเนินการวิจัย

1. ปฏิกริยาไพโรไลซิสของพอลิเอทิลีน

พลาสติกพอลิเอทิลีนที่ใช้ในการศึกษาเป็นถุงพลาสติกที่ใช้ในการบรรจุเสื้อผ้าของผู้ป่วยที่ผ่านการซักกรีดแล้ว ซึ่งรวบรวมได้จากแผนกห้องผ้าส่วนกลางของโรงพยาบาลสงขลานครินทร์ จังหวัดสงขลา โดยกระบวนการไพโรไลซิสจะใช้พลาสติกพอลิเอทิลีน 150 กรัมบรรจุลงในเครื่องปฏิกรณ์แบบงวด (Batch) ชนิด Horizontal tubular reactor ที่มีเส้น

ผ่านศูนย์กลางภายในขนาด 5 เซนติเมตร และยาว 50 เซนติเมตร (ดังแสดงในภาพที่ 1) โดยการให้ความร้อนด้วยเตาเผาอุณหภูมิสูงเพื่อควบคุมอุณหภูมิตามที่กำหนด และทำการกำจัดออกซิเจนออกจากระบบโดยใช้ Nitrogen ไหลผ่านด้วยอัตราการไหล 500 มิลลิลิตร ต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นดำเนินการทดลองโดยกำหนดอุณหภูมิ (385 393 405 417 และ 425 °C) เวลา (30 60 105 150 และ 180 นาที) และอัตราการให้ความร้อน (5 8 13 17 และ 20 °C/min) ตามที่กำหนด ไอระเหยที่ออกจากเครื่องปฏิกรณ์จะถูกส่งผ่านไปยัง condenser เพื่อควบแน่นให้กลายเป็นของเหลวด้วยน้ำที่อุณหภูมิประมาณ 10 °C เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการ ทำการชั่งน้ำหนักผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้ และคำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เหลวตามสมการที่ (1) จากนั้นวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้ด้วยเครื่อง Gas Chromatograph-Flame Ionization Detector (GC-FID) เพื่อหาสัดส่วนของแต่ละองค์ประกอบ โดยองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ แก๊สโซลีน (ผลิตภัณฑ์ที่มีจำนวนคาร์บอนในช่วง $C_7 - C_{11}$) ดีเซล (ผลิตภัณฑ์ที่มีจำนวนคาร์บอนในช่วง $C_{12} - C_{24}$) และผลิตภัณฑ์ที่มีมวลโมเลกุลขนาดใหญ่ (ผลิตภัณฑ์ที่มีจำนวนคาร์บอนมากกว่า C_{24})



ภาพที่ 1 อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสของพลาสติกพอลิเอทิลีน

$$\text{ร้อยละผลได้ของน้ำมันไพโรไลซิส} = \frac{\text{มวลของผลิตภัณฑ์เหลว}}{\text{มวลของพลาสติก}} \times 100 \quad (1)$$

2. การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ด้วย GC-FID

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส จะทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง GC-FID โดยใช้คอลัมน์ชนิด Stationary phase DB-5MS (HP-5) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 มิลลิเมตร ยาว 30 เมตร และความหนาของฟิล์ม 0.25 ไมโครเมตร ซึ่งสภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์จะทำการควบคุม อุณหภูมิของ Inlet และ Detector ไว้ที่ 290°C และ 310°C ตามลำดับ และ Oven จะทำการควบคุม อุณหภูมิเริ่มต้นที่ 50°C และคงที่ที่อุณหภูมิ 50°C เป็น เวลา 3 นาที จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 10°C ต่อ นาที จนถึงอุณหภูมิ 270°C และ คงที่ที่อุณหภูมิ 270°C เป็นเวลา 2 นาที จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 20°C ต่อ นาที จนถึงอุณหภูมิ 310°C และคงที่ที่ อุณหภูมิ 310°C เป็นเวลา 5 นาที ด้วยอัตราการไหล ของ He H₂ N₂ และ Air เท่ากับ 1.0 30 25 และ 300 mL/min ตามลำดับ ด้วย split ratio เท่ากับ 50:1

3. การวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักเชิงความร้อน (Thermogravimetric analysis, TGA)

TGA เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ความเสถียร ของวัสดุโดยเฉพาะพอลิเมอร์เมื่อได้รับความร้อน โดย การวัดน้ำหนักของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วง อุณหภูมิด้วยเครื่องซึ่งที่มีความไวสูง เมื่อนำมาเขียน กราฟจะได้ TGA thermogram ที่อธิบายถึงความสามารถ ในการทนทานต่อความร้อนของวัสดุ และจะสามารถ ใช้ในการอธิบายกลไกการเกิดการสลายตัวได้อย่างมี ประสิทธิภาพมากขึ้นเมื่อนำข้อมูลที่ได้มาทำอนุพันธ์ ของเทคนิค TGA ที่เรียกว่า Derivative Thermogravimetry (DTG) ซึ่งสามารถทำให้เห็นการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก ของวัสดุที่เกิดขึ้นได้อย่างชัดเจน ซึ่งการวิเคราะห์ TGA จะทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Thermogravimetric analysis, TGA8000, Perkin Elmer, USA ในช่วง

อุณหภูมิ 25 °C ถึง 1000 °C ด้วยอัตราการให้ความ ร้อน 5.0 °C/min ภายใต้บรรยากาศของแก๊ส ไนโตรเจน

4. การกลั่นแยกผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส จะทำการกลั่นแยกเพื่อเพิ่มค่าบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ ด้วยชุดกลั่นลำดับส่วนชนิดยาว (Fractionating Distillation) โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จะทำการกลั่นแยก ออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงแรกจะทำการกลั่นแยกที่ อุณหภูมิไม่เกิน 200°C ซึ่งเป็นช่วงของแก๊สโซลีน และช่วงที่สองจะทำการกลั่นแยกที่อุณหภูมิในช่วง 200-300°C ซึ่งเป็นช่วงของดีเซล จากนั้นจะทำการ วิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่กลั่นแยกได้ ด้วยเทคนิค GC-FID

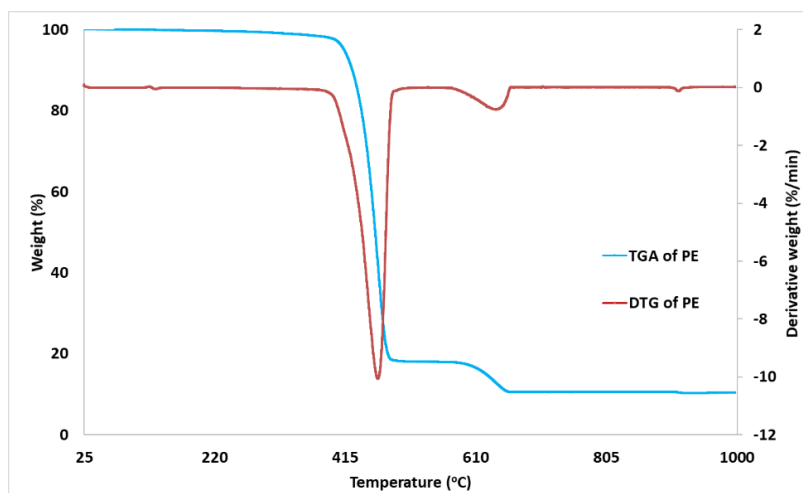
ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. การวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักเชิงความร้อน (Thermogravimetric analysis, TGA) ของพอลิเอ ทิลีน

การศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนของพอลิ เอทิลีน ทำได้โดยใช้การวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนัก เชิงความร้อน (TGA) และอัตราการสูญเสียน้ำหนัก (DTG) โดยผลที่ได้จากการวิเคราะห์เป็นดังแสดงใน ภาพที่ 2 พบว่า พอลิเอทิลีนมีการเปลี่ยนแปลง 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก ในช่วงอุณหภูมิ 370-500°C มีเปอร์เซ็นต์การหายไป ของน้ำหนัก เท่ากับ 80.3% ซึ่งเป็นส่วนของพอลิเอ ทิลีนที่เกิดการระเหิดกลายเป็นไอ ซึ่งสอดคล้องกับ ผลการศึกษาของ Shan-jun *et al.* (2013) ขั้นตอน ที่สองมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักในช่วงอุณหภูมิ 580-670°C มีเปอร์เซ็นต์การหายไปของน้ำหนัก เท่ากับ

7.3% ซึ่งเป็นการสูญเสียที่เกิดจากการสลายตัวของ char ที่เกิดขึ้นจากการที่พอลิเอทิลีนได้รับความร้อน

ซึ่งปริมาณของน้ำหนัก char ที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับ ผลการศึกษาของ Quesada *et al.* (2019)



ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนัก (TGA) และอัตราการสูญเสียน้ำหนัก (DTG) ต่ออุณหภูมิของ พอลิเอทิลีน

2. การศึกษาช่วงอุณหภูมิสำหรับกระบวนการไพโรไลซิสของพลาสติก

จากผลการวิเคราะห์การสลายตัวของพอลิเอทิลีน ด้วยเทคนิคการสูญเสียน้ำหนักเชิงความร้อน หรือ TGA พบว่า พอลิเอทิลีนจะเกิดการสลายตัวได้สูงในช่วงอุณหภูมิ 370-500°C จึงทำการทดลองโดยใช้อุณหภูมิช่วง 300 - 600°C ในการศึกษาประสิทธิภาพการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิง โดยผลที่ได้จากการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิเบื้องต้นเป็นดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งผลการศึกษาพบว่า ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการไพโรไลซิสของพอลิเอทิลีนคือช่วง 385-425°C เนื่องจากอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 385°C จะทำให้พอลิเอทิลีนเกิดการหลอมเหลวแต่ไม่สลายตัวเป็นแก๊สโซลีน และเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 425°C จะทำให้พอลิเอทิลีนเกิดการสลายตัวกลายเป็นแก๊สทั้งหมด

3. ลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสของพอลิเอทิลีน

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสของพลาสติกจะมีลักษณะเป็นของเหลวสีน้ำตาลดำ มี

ความหนืดสูง (ดังแสดงในภาพที่ 3(ก)) จากนั้นจึงทำการกลั่นแยกเพื่อเพิ่มความบริสุทธิ์ให้กับเชื้อเพลิง โดยการกลั่น ซึ่งจะทำให้การแยกผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกลั่นเป็น 2 ช่วง ช่วงแรกจะเก็บผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการกลั่นที่อุณหภูมิของไอระเหยต่ำกว่า 200°C และช่วงที่ 2 จะเก็บผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการกลั่นที่อุณหภูมิของไอระเหยในช่วง 200-300°C ดังแสดงในภาพที่ 3(ข) และภาพที่ 3(ค) ตามลำดับ เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิของไอระเหยต่ำกว่า 200°C จะเป็นช่วงอุณหภูมิที่โมเลกุลขนาดเล็กเกิดการระเหย ซึ่งจะเป็นส่วนที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงชนิดแก๊สโซลีน จะมีลักษณะสีเหลืองใส และผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิของไอระเหยในช่วง 200-300°C จะเป็นช่วงอุณหภูมิที่โมเลกุลขนาดใหญ่เกิดการระเหย ซึ่งจะเป็นส่วนที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงชนิดดีเซล จะมีลักษณะสีเหลืองใส และเข้มกว่าผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิของไอระเหยต่ำกว่า 200°C ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะเหมือนกับผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการศึกษาของ Muzarpar *et al.* (2020)

ตารางที่ 1 ลักษณะของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสของพลาสติกที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	ลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้
300	พลาสติกเกิดการหลอมเหลว แต่ไม่กลั่นตัวออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ เมื่อเย็นตัวกลายเป็นก้อนพลาสติกแข็งอยู่ภายในเครื่องปฏิกรณ์
350	พลาสติกเกิดการหลอมเหลว แต่ไม่กลั่นตัวออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ เมื่อเย็นตัวกลายเป็นก้อนพลาสติกแข็งอยู่ภายในเครื่องปฏิกรณ์
380	พลาสติกเกิดการหลอมเหลว แต่ไม่กลั่นตัวออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ เมื่อเย็นตัวกลายเป็นก้อนพลาสติกแข็งอยู่ภายในเครื่องปฏิกรณ์
385	พลาสติกเกิดการสลายตัว และกลั่นตัวออกมาเป็นของเหลวสีเหลือง มี slurry สีน้ำตาลเข้ม และของแข็งสีดำเหลืออยู่ในเครื่องปฏิกรณ์
400	พลาสติกเกิดการสลายตัว และกลั่นตัวออกมาเป็นของเหลวสีเหลือง มี slurry สีน้ำตาลเข้ม และของแข็งสีดำเหลืออยู่ในเครื่องปฏิกรณ์
425	พลาสติกเกิดการสลายตัว และกลั่นตัวออกมาเป็นของเหลว ผสมกับ slurry สีเหลือง ไม่มี slurry และของแข็งเหลืออยู่ในเครื่องปฏิกรณ์
450	พลาสติกเกิดการสลายตัว และกลั่นตัวออกมาเป็น slurry สีเหลืองเข้ม ไม่มีส่วนที่เป็นของเหลว ไม่มี slurry และของแข็งเหลืออยู่ในเครื่องปฏิกรณ์
500	พลาสติกเกิดการสลายตัว และกลั่นตัวออกมาเป็น slurry สีเหลือง เพียงเล็กน้อย อีกทั้งเป็นควันสีขาวออกมามาก ไม่มี slurry และของแข็งเหลืออยู่ในเครื่องปฏิกรณ์
600	พลาสติกเกิดการสลายตัว มีควันสีขาวออกมาจากเครื่องปฏิกรณ์มาก ไม่มี slurry และของแข็งเหลืออยู่ในเครื่องปฏิกรณ์



(ก)



(ข)



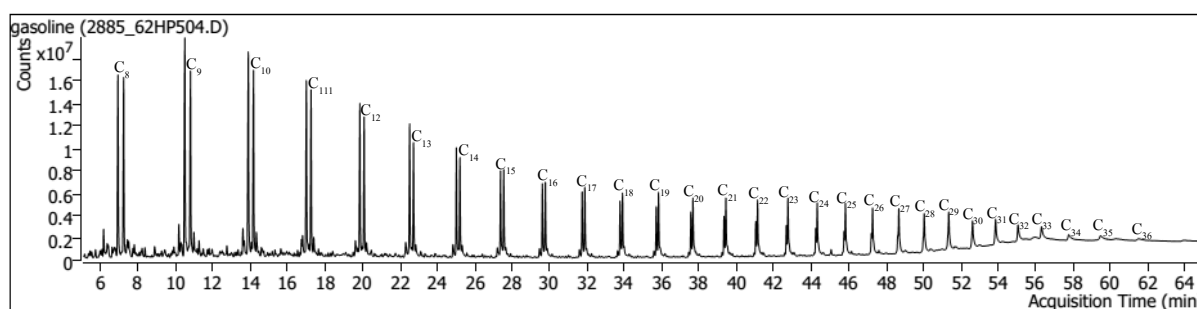
(ค)

ภาพที่ 3 ลักษณะของผลิตภัณฑ์ (ก) ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสของพลาสติก (ข) ที่ผ่านการกลั่นที่อุณหภูมิของไอระเหยต่ำกว่า 200°C (ค) ที่ผ่านการกลั่นที่อุณหภูมิของไอระเหยในช่วง 200-300°C

4. การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสของพลาสติกด้วยเทคนิค Gas chromatograph-Mass spectrometer (GC-MS)

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสของพลาสติก ในเบื้องต้นได้ส่งวิเคราะห์เชิงคุณภาพเพื่อหาลำดับประกอบของผลิตภัณฑ์ด้วยเทคนิค GC-MS ซึ่งโครมาโทแกรมที่ได้เป็นดังแสดงในภาพที่ 4

โดยเมื่อทำการทวนสอบการแตกโมเลกุลขององค์ประกอบต่างๆ ที่อยู่ในผลิตภัณฑ์กับฐานข้อมูลของเครื่อง Mass spectrometer พบว่า องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีองค์ประกอบของคาร์บอนโมเลกุลในช่วง $C_8 - C_{36}$ ซึ่งเป็นผลมาจากการสลายตัวด้วยความร้อนของพลาสติก



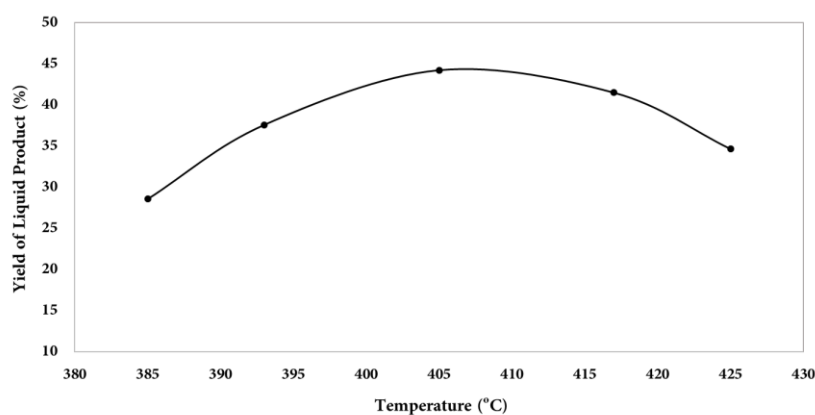
ภาพที่ 4 โครมาโทแกรมสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสของพลาสติก

5. ผลของปัจจัยจากกระบวนการไพโรไลซิสต่อปริมาณผลิตภัณฑ์เหลว

5.1 ผลของอุณหภูมิ

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อปริมาณของน้ำมันไพโรไลซิสที่เกิดขึ้นจากกระบวนการไพโรไลซิสของพลาสติก ผลที่ได้เป็นดังแสดงในภาพที่ 5 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 385°C เป็น 405°C %yield ของน้ำมันไพโรไลซิสจะเพิ่มขึ้นจาก 28.55% เป็น 44.22% แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 405°C ไปเป็น 425°C พบว่า %yield ของน้ำมันไพโรไลซิสจะลดลงจาก 44.22% เป็น 34.65% ดังแสดงในภาพที่ 5 ซึ่งเป็นผลสืบเนื่องมาจากการสลายตัวของพลาสติกที่มากเกินไป นั่นคือ เมื่ออุณหภูมิต่ำๆ อัตรา

การสลายตัวของพลาสติกจะต่ำ และอัตราการสลายตัวของพลาสติกจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่ม ซึ่งเมื่อพลาสติกเกิดการสลายตัวต่ำ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ ก็จะสามารกลั่นตัวออกมาเป็นของเหลวได้ แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ไฮโดรคาร์บอนที่เกิดจากการสลายตัวของพลาสติกมีขนาดโมเลกุลที่เล็กลง จนไม่สามารถกลั่นตัวเป็นผลิตภัณฑ์เหลวได้ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Thahir *et al.* (2019) ซึ่งพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้พันธะทางเคมีของพอลิเมอร์อ่อนตัวลงจึงสามารถที่จะเกิดการแตกสลายได้ง่ายขึ้น

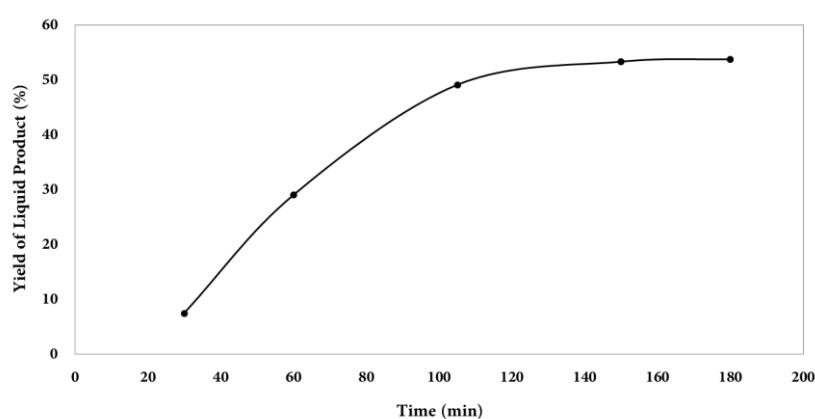


ภาพที่ 5 ผลของอุณหภูมิต่อ %yield ของน้ำมันไพโรไลซิส

5.2 ผลของเวลา

เวลาสำหรับกระบวนการไพโรไลซิส เป็นอีกปัจจัยหนึ่งซึ่งมีความสำคัญ เนื่องจากจะส่งผลต่อร้อยละผลได้ของน้ำมันไพโรไลซิสที่เกิดขึ้น นั่นคือถ้าใช้ระยะเวลาสั้น จะส่งผลให้ปริมาณของไอระเหยเกิดการกลั่นตัวน้อย จึงทำให้ปริมาณน้ำมันไพโรไลซิสลดลง แต่ถ้าใช้ระยะเวลามากจนเกินไปก็จะสิ้นเปลืองพลังงานส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตน้ำมันไพโรไลซิสจากพลาสติกเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งผลที่ได้จากการศึกษาเป็นดังแสดงในภาพที่ 6 พบว่าในช่วง 100 นาทีแรก ร้อยละผลได้ของน้ำมันไพโรไลซิสจะเพิ่มขึ้นอย่าง

รวดเร็ว และเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นร้อยละผลได้ของน้ำมันไพโรไลซิสจะค่อยๆ ลดลง จนคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 140 นาที เป็นผลสืบเนื่องมาจากเมื่อเวลาของกระบวนการไพโรไลซิสเพิ่มขึ้น ปริมาณพลาสติกที่เป็นสารตั้งต้นในเครื่องปฏิกรณ์จะค่อยๆ ลดลง จึงทำให้ไอระเหยที่เกิดจากการสลายตัวของพลาสติกลดลง จนไม่กลั่นตัวออกมาเป็นน้ำมันไพโรไลซิส ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ López *et al.* (2011) ที่พบว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นไม่ได้ส่งผลต่อปริมาณการเปลี่ยนแปลงและคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น

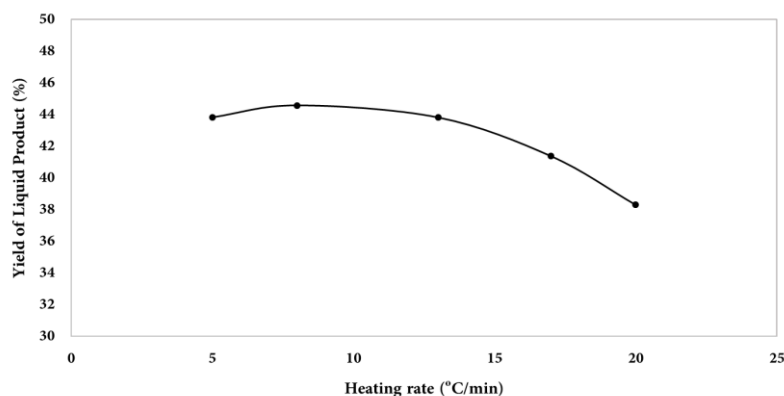


ภาพที่ 6 ผลของเวลาต่อ %yield ของน้ำมันไพโรไลซิส

5.3 ผลของอัตราการให้ความร้อน

อัตราการให้ความร้อนส่งผลต่อร้อยละผลได้ของน้ำมันไพโรไลซิสเป็นดังแสดงในภาพที่ 7 เมื่ออัตราการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันไพโรไลซิสมีค่าลดลง เนื่องจากกระบวนการไพโรไลซิสจะถูกควบคุมด้วยกระบวนการแพร่กระจายแบบจำกัด (diffusion-limited process) ซึ่งเป็นกลไกที่ถูกควบคุมโดยการกระจายตัวของความร้อน (Cahyono and Styana, 2017) ดังนั้นเมื่ออัตราการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นก็จะ

ส่งผลให้การกระจายความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ส่งผลให้ไอระเหยของพลาสติกสามารถที่จะเกิดการสลายโมเลกุลได้อย่างต่อเนื่อง จนทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีโมเลกุลต่ำจนไม่สามารถที่จะเกิดการกลั่นตัวออกมาเป็นของเหลวได้ เพราะฉะนั้นเมื่ออัตราการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้พอลิเอทิลีนเกิดการสลายตัวเพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยผลที่ได้สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Dubdub and Al-Yaari (2020) และ Budsareechai *et al.* (2019)

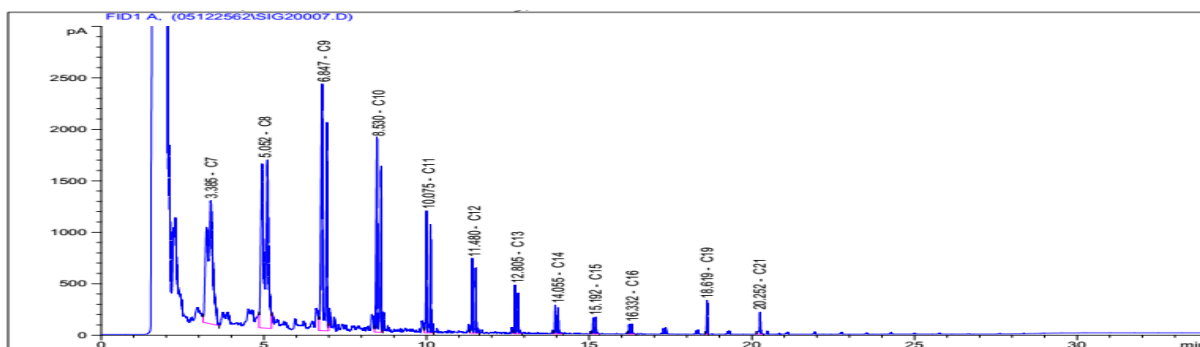


ภาพที่ 7 ผลของอัตราการให้ความร้อนต่อ %yield ของน้ำมันไพโรไลซิส

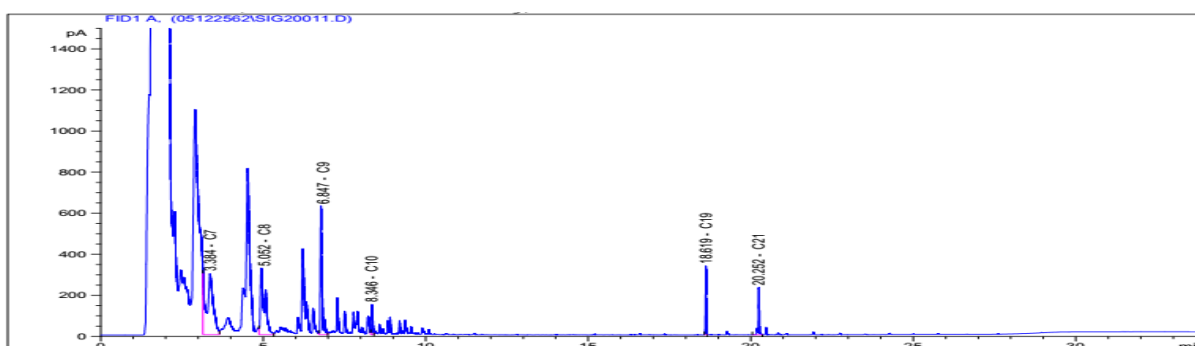
6. การกลั่นแยกน้ำมันไพโรไลซิส

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสของพลาสติกเป็นสารผสมของไฮโดรคาร์บอน เมื่อทำการวิเคราะห์เบื้องต้นพบว่ามีค่าความร้อนเท่ากับ 43,438 kJ/kg ความหนืด 2.014 cSt และ pH เท่ากับ 7.2 ซึ่งผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับการศึกษาของ Syamsiro *et al.* (2014) โดยองค์ประกอบของน้ำมันไพโรไลซิสจะอยู่ในช่วงกว้าง (ดังแสดงในภาพที่ 4) จึงจำเป็นต้องทำการกลั่นแยกเพื่อเพิ่มความบริสุทธิ์ให้กับเชื้อเพลิงที่ได้ โดยการกลั่นแยกจะทำการเก็บตัวอย่างแยกเป็น 2 ช่วง ช่วงแรกจะทำการเก็บผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิของไอระเหยต่ำกว่า 200°C ซึ่งเป็นสารที่มีโมเลกุลอยู่ในช่วงของน้ำมันแก๊สโซลีน และช่วงที่ 2 จะเก็บผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการกลั่นที่อุณหภูมิของไอระเหย

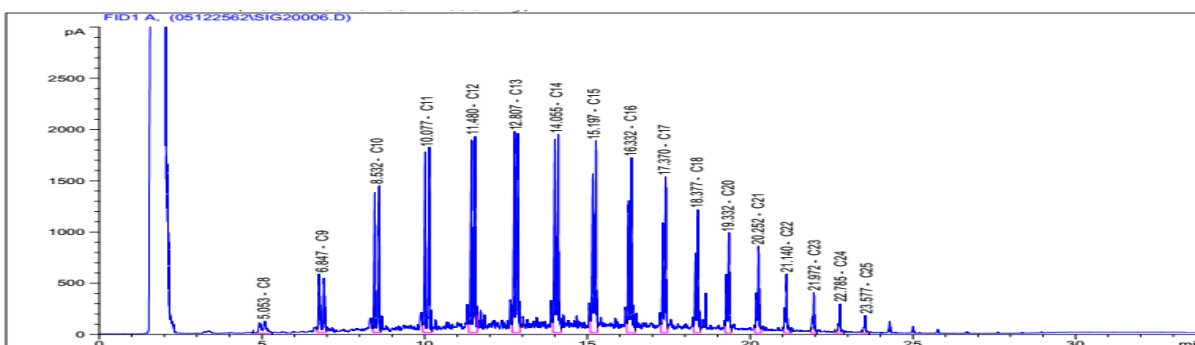
ในช่วง 200-300°C ซึ่งเป็นสารที่มีโมเลกุลอยู่ในช่วงของน้ำมันดีเซล โดยเมื่อคำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการกลั่น พบว่า สารที่มีโมเลกุลอยู่ในช่วงของน้ำมันแก๊สโซลีน และดีเซล มีร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ เท่ากับ 22.12 และ 44.98 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าที่สูงกว่าผลการศึกษาของ Pradipta *et al.* (2019) ที่สามารถกลั่นแยกน้ำมันแก๊สโซลีน และดีเซลได้เพียงร้อยละ 10.5 และ 19.37 ตามลำดับ โดยปัจจัยที่ทำให้ได้ปริมาณของน้ำมันแก๊สโซลีน และดีเซลเพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากกระบวนการไพโรไลซิสเนื่องจากใช้กระบวนการกลั่นแยกที่เหมือนกัน จากนั้นจึงนำผลิตภัณฑ์ที่กลั่นได้ทั้ง 2 ส่วน มาวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเครื่อง GC-FID ผลเป็นดังแสดงในภาพที่ 8 และภาพที่ 10



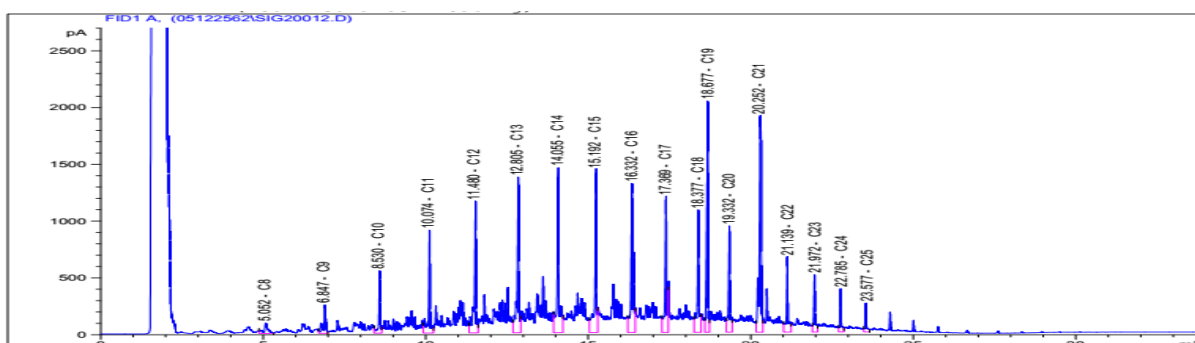
ภาพที่ 8 Chromatogram ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกลั่นแยกที่อุณหภูมิต่ำกว่า 200°C



ภาพที่ 9 Chromatogram ของเชื้อเพลิงแก๊สโซฮอล์ 91 (Gasohol 91) ทางการค้า



ภาพที่ 10 Chromatogram ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกลั่นแยกที่อุณหภูมิในช่วง 200-300°C



ภาพที่ 11 Chromatogram ของเชื้อเพลิงดีเซล (Diesel) ทางการค้า

โดยองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่กลั่นแยกที่อุณหภูมิของไอร่เหยต่ำกว่า 200°C จะอยู่ในช่วง C₇ - C₂₁ และองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่กลั่นแยกที่อุณหภูมิของไอร่เหยในช่วง 200-300°C จะอยู่ในช่วง C₈ - C₂₅ และเมื่อทำการเปรียบเทียบองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่กลั่นแยกที่อุณหภูมิของไอร่เหยต่ำกว่า 200°C กับเชื้อเพลิงแก๊สโซฮอล 91 (ภาพที่ 9) และองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่กลั่นแยกที่อุณหภูมิของไอร่เหยในช่วง 200-300°C กับเชื้อเพลิงดีเซล (ภาพที่ 11) พบว่าองค์ประกอบมีความใกล้เคียงกันมาก สามารถนำมาใช้ทดแทนกันได้

สรุป

จากผลการศึกษาการผลิตน้ำมันไพโรไลซิสจากพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนด้วยกระบวนการไพโรไลซิส พบว่าช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงเหลวอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 385 - 425°C โดยองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันไพโรไลซิสจะมีโมเลกุลอยู่ในช่วง C₈ - C₃₆ ซึ่งน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จะสามารถกลั่นแยกออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกคือผลิตภัณฑ์เหลวที่อุณหภูมิของไอร่เหยต่ำกว่า 200°C และส่วนที่สองคือผลิตภัณฑ์เหลวที่อุณหภูมิของไอร่เหยอยู่ในช่วง 200-300°C ซึ่งผลิตภัณฑ์เหลวทั้งสองส่วนมีองค์ประกอบทางเคมีที่ใกล้เคียงกับเชื้อเพลิงเหลวทางการค้าชนิดแก๊สโซฮอลีน และดีเซลตามลำดับ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินแผ่นดิน มหาวิทยาลัยทักษิณ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561

เอกสารอ้างอิง

- Budsareechai, S., Hunt, A.J. and Ngemyen, Y. 2019. Catalytic pyrolysis of plastic waste for the production of liquid fuels for engines. **RSC advances** 9: 5844-5857.
- Cahyono, M.S. and Styana, U.I.F. 2017. Influence of Heating Rate and Temperature on the Yield and Properties of Pyrolysis Oil Obtained from Waste Plastic Bag. **Conserve: Journal of Energy and Environmental Studies** 1(1): 1-8.
- Dubdub, I. and Al-Yaari, M. 2020. Pyrolysis of Low Density Polyethylene: Kinetic Study Using TGA Data and ANN Prediction. **Polymer** 12(891): 1-14.
- Kalargaris, I., Tian, G. and Gu, S. 2017. Combustion, Performance and Emission analysis of DI Diesel Engine using Plastic Pyrolysis Oil. **Fuel Processing Technology** 157: 108-115.
- Khairil, Riayatsyah, T.M.I., Bahri, S., Sofyan, S.E., Jalaluddin, J., Kusumo, F., Silitonga, A.S., Padli, Y., Jihad, M. and Shamsuddin, A.H. 2020. Experimental Study on the Performance of an SI Engine Fueled by Waste Plastic Pyrolysis Oil-Gasoline Blends. **Energies** 13(4196): 1-15.
- López, A., de Marco, I., Caballero, B.M., Laresgoiti, M.F. and Adrados, A. 2011. Influence of time and temperature on pyrolysis of plastic wastes in a semi-batch reactor. **Chemical Engineering Journal** 173(1): 62-71.
- Muzarpar, S., Leman, A.M., Rahman, K.A. and Foudzi, M. T.R.M. 2020. Recycling of Plastic Throughout

- Pyrolysis and Distillation Process to Recover an Alternative Fuel Sources, pp. 1-9. *In International Conference on Innovative Research - ICIR EUROINVENT 2020*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Romanian.
- Pollution Control Department. 2018. **Waste Plastic Management 2018-2030**. Available Source: http://www.pcd.go.th/Info_serv/File/Plastic%20Roadmap.pdf, June 30, 2020. (in Thai)
- Pradipta, I.Z., Rochmadi and Purnomo, C.W. 2019. High Grade Liquid Fuel from Plastic Waste Pyrolysis Oil by Column Distillation, pp. 240-244. *In 2019 IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON)*. IEEE Power Electronics (PEL) Malaysia Chapter, Indonesia.
- Quesada, L., Pérez, A., Godoy, V., Peula, F.J., Calero, M. and Blázquez, G. 2019. Optimization of the pyrolysis process of a plastic waste to obtain a liquid fuel using different mathematical models. **Energy Conversion and Management** 188: 19-26.
- Shan-jun, M., Jun, Z., Dong, L. and Hong-yin, C. 2013. Study on Pyrolysis Characteristics of Cross-linked Polyethylene Material Cable. **Procedia Engineering** 52: 588-592.
- Syamsiro, M., Saptoadi, H., Norsujianto, T., Noviasri, P., Cheng, S., Alimuddin, Z. and Yoshikawa, K. 2014. Fuel Oil Production from Municipal Plastic Wastes in Sequential Pyrolysis and Catalytic Reforming Reactors. **Energy Procedia** 47: 180-188.
- Thahir, R., Altway, A., Juliastuti, S.R. and Susianto. 2019. Production of liquid fuel from plastic waste using integrated pyrolysis method with refinery distillation bubble cap plate column. **Energy Reports** 5: 70-77.
- Tulashie, S.K., Boadu, E.K. and Dapaah, S. 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.
- Zattini, G., Leonardi, C., Mazzocchetti, L., Cavazzoni, M., Montanari, I., Tosi, C., Benelli, T. and Giorgini, L. 2017. Pyrolysis of Low-Density Polyethylene. **Sustainable Design and Manufacturing** 2017: 480-490.
- Zhang, Y., Cui, Y., Liu, S., Fan, L., Zhou, N., Peng, P., Wang, Y., Guo, F., Min, M., Cheng, Y., Liu, Y., Lei, H., Chen, P., Li, B. and Ruan, R. 2020. Fast microwave-assisted pyrolysis of wastes for biofuels production - A review. **Bioresource Technology** 297: 122480.