

การวิเคราะห์คุณสมบัติและจุดคุ้มทุนของน้ำมันไพโรไลซิส ขยะพลาสติกจากหลุมฝังกลบ

Analysis of Properties and Break-Even Point of Pyrolysis Oil of Plastic Waste from Landfill

กิตติภพ เอื้ออารีธรรม¹ ปรางค์ทิพย์ ฤทธิโชคติ แก้วเพ็งกรอ^{2*}
และ มณีรัตน์ เข้มขาว¹

Kittipob Aurreethum¹, Prangthip Rittichote Kaewpengkrow^{2*}
and Maneerat Khemkhao¹

Received: 26 December 2023

Revised: 10 June 2024

Accepted: 15 July 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาน้ำมันเชื้อเพลิงไพโรไลซิสที่ผลิตจากขยะพลาสติกอายุ 10 ปี จากหลุมขยะฝังกลบ จังหวัดนนทบุรี โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบแนวตั้งหรือเตาเบดนิ่ง (Bench-scale fixed bed reactor) ขนาด 18.85 ลิตร ที่เงื่อนไขอุณหภูมิ 400 °C และ 450 °C โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและศึกษาน้ำมันผสม (Mixed oil) ระหว่างน้ำมันไพโรไลซิสที่ผลิตได้กับน้ำมันดีเซลเชิงพาณิชย์ในอัตราส่วน 1:9, 2:8, 3:7, 4:6 และ 5:5 เพื่อพิจารณาอัตราส่วนผสมที่ให้ค่าพลังงานความร้อนมากที่สุด วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมัน ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดเพกโตรสโคปี (FT-IR) หาค่าความร้อน (Calorific value) โดยใช้ บอมบ์แคลอรีมิเตอร์ และคำนวณจุดคุ้มทุนในการผลิตน้ำมันไพโรไลซิส ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิ 400 °C และ 450 °C คือน้ำมันไพโรไลซิส (Pyrolysis oil) 21.20 % และ 32.10 % ถ่านชาร์ (Char) 42.10 %

¹วิทยาลัยพลังงานและสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืนรัตนโกสินทร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ นครปฐม ประเทศไทย 73170

¹Rattanakosin College for Sustainable Energy and Environment, Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Nakhon Pathom, Thailand 73170

²ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ ประเทศไทย 10520

²Department of Chemistry, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand 10520

*ผู้พิมพ์ประสานงาน (Corresponding author) e-mail: prangtip.ka@kmitl.ac.th

และ 24.30 % และก๊าซผสม (Mixed gases) 36.70 % และ 43.60 % ตามลำดับ น้ำมันไพโรไลซิสที่ได้มีอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอนจำพวกแอลคีนและแอลเคนเป็นองค์ประกอบหลัก สเปกตรัมของน้ำมันไพโรไลซิสและน้ำมันผสมบางอัตราส่วนมีความใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลเชิงพาณิชย์โดยน้ำมันผสมที่อัตราส่วน 3:7 ซึ่งประกอบด้วยน้ำมันไพโรไลซิสจากอุณหภูมิ 450 °C และน้ำมันดีเซลเชิงพาณิชย์ให้ค่าพลังงานความร้อนต่ออัตราส่วนของน้ำมันไพโรไลซิสมากที่สุดคือ 44.277 MJ/kg และสามารถคงคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลเชิงพาณิชย์ได้มากที่สุดเมื่อเทียบกับน้ำมันผสมในอัตราส่วนอื่น โดยจุดคุ้มทุนของการผลิตน้ำมันไพโรไลซิสอยู่ที่ 1 ปี 3 เดือน ที่ราคา 104.698 บาทต่อหนึ่งลิตร

คำสำคัญ: กระบวนการไพโรไลซิส น้ำมันไพโรไลซิส ขยะพลาสติกฝังกลบ จุดคุ้มทุนในการผลิต

ABSTRACT

This research studied pyrolysis fuel oil produced from a 10-year-old landfilled plastic waste from Nonthaburi Province. A vertical reactor (bench-scale fixed-bed reactor) with a capacity of 18.85 liters was utilized at temperature conditions of 400 °C and 450 °C, without using the catalyst. Five ratios of oil mixture comprising produced pyrolysis oil and commercial diesel fuel at 1:9, 2:8, 3:7, 4:6, and 5:5 were also studied to determine the most optimized mixture ratio and energy output. The physical properties of fuel oil were analyzed using Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR). Calorific values were obtained by bomb calorimetry, and the production break-even point was calculated. Pyrolyzed products from the experimental conditions at 400 °C and 450 °C were pyrolysis oil 21.20 %, 32.10 %, char 42.10 %, 24.30%, and mixed gases 36.70 % and 43.60 %, respectively. Pyrolysis oil was primarily constructed of L-type aliphatic hydrocarbons, alkenes, and alkanes. Spectral analysis indicated similarities between some mixed oil formulas and commercial diesel fuel. The mixture ratio of 3:7, pyrolysis oil at 450 °C, and commercial diesel fuel gave the highest calorific value at 44.277 MJ/kg and the closest properties to commercial diesel as being compared to other formulas. The break-even point of this pyrolysis oil fuel production is estimated to be 1 years and 3 months at 104.698 THB per liter.

Keywords: Pyrolysis; Pyrolysis Oil; Landfilled Plastic Waste; Break-Even Point

บทนำ

ในปัจจุบันแนวโน้มความใส่ใจต่อสิ่งแวดล้อมที่เพิ่มขึ้นและความกังวลเกี่ยวกับเชื้อเพลิงฟอสซิลที่กำลังจะหมดลงจึงเกิดการกระตุ้นให้มีการวิจัยเพื่อผลิตพลังงานที่ยั่งยืนมากขึ้น เทคโนโลยีการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกด้วยกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) เป็นแนวทางหนึ่งที่ช่วยลดปริมาณขยะพลาสติกและช่วยผลิตเชื้อเพลิงทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลได้ในเวลาเดียวกัน ไพโรไลซิสหรือการสลายตัวด้วยความร้อน

(Thermal cracking) คือการทำปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อสลายพันธะของสสารที่มีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบ ภายใต้ความร้อนในระดับหนึ่ง ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนหรือมีปริมาณออกซิเจนน้อย [1]

ผลิตภัณฑ์ที่ได้ขึ้นอยู่กับสารตั้งต้นและการควบคุมเงื่อนไขของกระบวนการไพโรไลซิส เช่น ช่วงอุณหภูมิ อัตราการให้ความร้อน ระยะเวลาของการทำปฏิกิริยาและการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมี สสารจำพวกไฮโดรคาร์บอน เช่น พลาสติกชนิดต่างๆ มักถูกใช้เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการดังกล่าว โมเลกุลของพลาสติกซึ่งเป็นห่วงโซ่ยาว จะเกิดการสลายพันธะและแตกตัวเป็นโมเลกุลที่มีห่วงโซ่สั้น แล้วเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ในรูปแบบที่แตกต่างกัน เช่น ก๊าซ ของเหลวและของแข็ง เป็นต้น น้ำมันที่ได้จากกระบวนการดังกล่าวเรียกว่าน้ำมันไพโรไลซิส (Pyrolysis oil) หรือน้ำมันเชื้อเพลิงไพโรไลซิส (Pyrolysis fuel oil) ในระหว่างกระบวนการทำปฏิกิริยาทางเคมีอาจมีก๊าซบางส่วนเกิดขึ้น ซึ่งสามารถถูกควบแน่นเป็นของเหลวและถูกรวบรวมนำไปใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงได้ด้วยเช่นกัน น้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จากกระบวนการมักถูกใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้หรือการสันดาปที่ไม่จำเป็นต้องมีความสมบูรณ์มากนักหรือสำหรับเครื่องจักรที่มีความหยาบ เช่น บอยเลอร์ เครื่องปั่นไฟและเครื่องสูบน้ำ เป็นต้น น้ำมันไพโรไลซิสสามารถถูกปรับปรุงคุณภาพได้โดยการนำไปผสมกับน้ำมันดีเซลเชิงพาณิชย์ในอัตราส่วนที่เหมาะสม เพื่อให้ได้คุณสมบัติที่สอดคล้องตามการใช้งานที่ต้องการ เช่น ค่าพลังงานความร้อนที่เพิ่มขึ้น [2]

โพลีเอทิลีน (Polyethylene: PE) เป็นหนึ่งในวัสดุเทอร์โมพลาสติกที่ถูกใช้งานกันอย่างกว้างขวางซึ่งมีโครงสร้างหลากหลายรูปแบบ เช่น แบบความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene: HDPE) แบบความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene: LDPE) และแบบความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear Low Density Polyethylene: LLDPE) โดยพื้นฐานแล้วพลาสติกมีความเสถียรทางเคมีและไม่ทำปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อม จึงถูกนำไปใช้งานอย่างแพร่หลายและในทางกลับกันก็เกิดการย่อยสลายได้ยาก ในการกำจัดขยะพลาสติกยังนิยมใช้วิธีแบบดั้งเดิมคือการฝังกลบ (Landfill) และการเผา (Incineration) แต่วิธีการเหล่านี้มีค่าใช้จ่ายสูง ขาดความยั่งยืน เป็นอันตรายต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อมและการรีไซเคิลพลาสติกก็สามารถทำได้เพียงบางส่วน เท่านั้น [3-7]

การศึกษาเกี่ยวกับช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติก LDPE ทัวไป ด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แหล่งความร้อนจากฮีตเตอร์ไฟฟ้าและใช้ช่วงอุณหภูมิ 300 °C ถึง 450 °C พบว่าที่อุณหภูมิ 350 °C ได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันไพโรไลซิสปริมาณ 52.6 %ต่อน้ำหนักของสารตั้งต้น [8]

ในการศึกษาอีกชิ้นหนึ่งเกี่ยวกับการไพโรไลซิสแบบช้า (Slow pyrolysis) วิเคราะห์การกระจายความร้อนโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ให้ความร้อนโดยใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้า ศึกษาช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกันจำนวนห้าช่วงตั้งแต่ 350 °C ถึง 450 °C โดยผลการทดลองสามารถยืนยันได้ว่ากระบวนการไพโรไลซิสโดยใช้พลาสติกเป็นวัตถุดิบนั้นสามารถผลิตน้ำมันไพโรไลซิสได้ที่อุณหภูมิ 450 °C ภายในเครื่องปฏิกรณ์ และ 75 °C ภายนอกเครื่องปฏิกรณ์พลาสติก Poly-Ethylene Terephthalate (PET) ปริมาณ 1,500 กรัม สามารถให้ผลผลิตน้ำมันไพโรไลซิสจำนวน 21 กรัม (1.4%) ถ่านชาร์ 450 กรัม (30%) และก๊าซ 1,029 กรัม (68.6%) ผลผลิตน้ำมันที่ต่ำเกิดจากปัจจัยสามอย่างคือคุณสมบัติของพลาสติก PET ขนาดของท่อควบแน่นที่เล็ก (Condenser tube) และการไหลของอากาศแบบอิสระที่ไม่ได้มีการควบคุมอย่างเหมาะสม (Free convection) [9]

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาหนึ่งเกี่ยวกับการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงจากกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ภายใต้เงื่อนไขการทดลองที่ใกล้เคียงกันในช่วงอุณหภูมิ 350 °C ถึง 450 °C โดยใช้หัวเผาและแก๊สสูงต้มแล้วนำไปกลั่นต่ออีกครั้งหนึ่งในเงื่อนไขอุณหภูมิที่ต่างกัน วัตถุดิบคือขยะพลาสติกจากหลุม

ฝักรวมซึ่งประกอบไปด้วย PP LDPE HDPE และพลาสติกผสมอื่นๆ ผลผลิตน้ำมันที่ได้จากพลาสติกแต่ละชนิดตามช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสเป็นดังนี้ PP 80 % LDPE 73 % HDPE 70 % และพลาสติกผสม 46 % ผลผลิตน้ำมันที่ได้หลังจากนำน้ำมันที่ได้จากพลาสติกประเภทต่างๆ ไปกลั่นที่อุณหภูมิสามช่วงคือ ต่ำกว่า 170 °C ระหว่าง 170 °C ถึง 250 °C และสูงกว่า 250 °C พบว่า PP ให้น้ำมันที่ 40 % 35 % และ 25 % LDPE ให้น้ำมันที่ 30 % 35 % และ 35 % HDPE ให้น้ำมันที่ 25 % 35 % และ 40 % และพลาสติกผสมให้น้ำมันที่ 30 % 30 % และ 40 % ตามลำดับ น้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จากทั้งสองการทดลองนั้นมีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับน้ำมันดีเซลเชิงพาณิชย์ในท้องตลาด [10]

จากผลการศึกษาทั้งหมดมีข้อสรุปที่เหมือนกันคือช่วงอุณหภูมิ 400 °C ถึง 450 °C เป็นช่วงที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้กระบวนการไพโรไลซิสสำหรับการผลิตน้ำมันจากขยะพลาสติกประเภท PE PP หรือ PET เมื่อทำปฏิกิริยาในช่วงอุณหภูมินี้พบว่าได้ผลผลิตน้ำมันในปริมาณต่อน้ำหนักของสารตั้งต้นที่สูง แม้มีความแตกต่างไปตามชนิดของวัตถุดิบที่เป็นสารตั้งต้นเงื่อนไขการทดลองและตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ก็ตามดังนั้นช่วงอุณหภูมิ 400 °C ถึง 450 °C ขยะพลาสติกที่มีส่วนประกอบของพลาสติก PE และการให้ความร้อนโดยใช้หัวเผาจากแก๊สสูงต้มจึงถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงไพโรไลซิสจากขยะพลาสติก ศึกษาสมบัติของน้ำมันที่ผลิตได้และปรับปรุงคุณภาพเพื่อนำไปใช้ทดแทนน้ำมันดีเซลเชิงพาณิชย์ในท้องตลาด (Commercial diesel oil fuel) ในการศึกษานี้ได้ใช้ขยะพลาสติกอายุ 10 ปีซึ่งถูกเก็บรวบรวมมาจากหลุมขยะฝักรวมที่จังหวัดนนทบุรี ใช้เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบแนวตั้งหรือเตาเบดนิ่ง (Bench-scale fixed based reactor) มีเงื่อนไขของการทดลองคือทำปฏิกิริยาในสภาพที่ปราศจากออกซิเจนในสองอุณหภูมิที่แตกต่างกันคือ 400 °C และ 450 °C โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา แล้วจึงปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันไพโรไลซิสที่ผลิตได้โดยผสมน้ำมันไพโรไลซิสกับน้ำมันดีเซลเชิงพาณิชย์ในอัตราส่วนที่ต่างกันเรียกว่าน้ำมันเชื้อเพลิงผสม (Mixed fuel oil) หรือน้ำมันผสม (Mixed oil) วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันผสมด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดเพกโตรสโคปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy หรือ FT-IR) หาค่าความร้อนของน้ำมันผสม (Calorific value หรือ Heating value) โดยใช้บอมบ์แคลอรีมิเตอร์ (Bomb calorimeter) เพื่อศึกษาว่าน้ำมันผสมที่สัดส่วนใดมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลเชิงพาณิชย์ที่มีขายอยู่ในท้องตลาดมากที่สุดและในท้ายที่สุดจึงคำนวณจุดคุ้มทุนการผลิตน้ำมันไพโรไลซิส (Break-even point) ตามลำดับ

วิธีดำเนินการวิจัย

วิธีดำเนินงานวิจัยประกอบด้วยเตรียมวัตถุดิบ การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างขยะพลาสติก การเตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง การทดลองการผลิตน้ำมัน วิเคราะห์ผลการทดลองและการคำนวณจุดคุ้มทุนการผลิตตามลำดับ

1. วัตถุดิบ

วัตถุดิบหรือสารตั้งต้นที่ใช้ในการผลิตน้ำมันคือขยะพลาสติกที่ถูกฝักรวมเป็นระยะเวลา 10 ปี จากหลุมฝักรวมที่จังหวัดนนทบุรี โดยส่วนใหญ่อยู่ในรูปของถุงพลาสติก ถุงหิ้วและถุงบรรจุอาหาร ซึ่งมีลักษณะเป็นฟิล์ม (Film) หรือแผ่นบาง (Thin sheet) ในการเตรียมวัตถุดิบดำเนินการโดยการคัดแยก แบ่งเป็น 5 ชนิด ได้แก่ ล้างทำความสะอาด, ขนาดปกติ, แบบร้อนดิน, แบบไม่ร้อนดิน และ แบบไม่ร้อนดิน ตัดเป็นชิ้นให้ได้ขนาด 50×50 มม. (2×2 นิ้ว) [10] พลาสติกที่ถูกเตรียมพร้อมแล้วสำหรับการทดลองถูกแสดงในรูปที่ 1 ใน

การทดลองหนึ่งครั้งหรือหนึ่งรอบจะใช้ขยะพลาสติกปริมาณ 1 กิโลกรัมและแก๊สหุงต้ม (LPG) 1 กิโลกรัม และการทดลองหนึ่งครั้งใช้ระยะเวลาหนึ่งวัน



Figure 1 Cleaned plastic waste

2. การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างขยะพลาสติก

ดำเนินการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพสามประการคือปริมาณสารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compound หรือ VOCs) ปริมาณความชื้น (Humidityหรือ Moisture content) และปริมาณขี้เถ้า (Ash)

หาปริมาณสารอินทรีย์ระเหยง่ายโดยการนำตัวอย่างขยะพลาสติก 1 กรัมใส่ภาชนะและให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 950°C ในสภาพที่ไม่มีออกซิเจนเป็นระยะเวลา 7 นาที จากนั้นจึงปล่อยให้เย็นตัวลงในเตาอบแล้วนำส่วนที่เหลือในภาชนะไปชั่งน้ำหนักเทียบกับน้ำหนักก่อนการให้ความร้อนเพื่อคำนวณปริมาณของสารอินทรีย์ระเหยง่ายในตัวอย่างขยะพลาสติก [4, 11, 12] จากนั้นหาปริมาณความชื้นหรือปริมาณของน้ำในขยะพลาสติกโดยการนำตัวอย่างขยะพลาสติก 50 กรัมใส่ภาชนะและอบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงปล่อยให้เย็นตัวลงในเตาอบแล้วนำส่วนที่เหลือในภาชนะไปชั่งน้ำหนักเทียบกับน้ำหนักก่อนการอบ เพื่อคำนวณปริมาณของความชื้นหรือปริมาณของน้ำในขยะพลาสติก [4, 11, 13] และในท้ายที่สุดทำการหาปริมาณของส่วนที่ไม่ถูกเผาหรือขี้เถ้าที่เหลือหลังจากการเผาไหม้แล้วโดยนำตัวอย่างขยะพลาสติก 1 กรัมใส่ภาชนะและเผาที่อุณหภูมิ 700 °C ในสภาพที่ไม่มีออกซิเจนเป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นจึงปล่อยให้เย็นตัวลงในเตาอบแล้วนำส่วนที่เหลือในภาชนะไปชั่งน้ำหนักเทียบกับน้ำหนักก่อนการเผาเพื่อคำนวณปริมาณของส่วนที่ไม่ถูกเผาหรือขี้เถ้าที่เหลือหลังจากการเผาไหม้ [4, 11, 14]

3. อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

เตาปฏิกรณ์ที่ใช้เป็นแบบทรงกระบอกแนวตั้งหรือเตาเบดนิ่ง (Fixed bed reactor) หรือเตาแนวตั้ง (Bench-scale fixed bed reactor) มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 200 มม. ความสูง 600 มม. มีปริมาตร 18.85 ลิตร ให้ความร้อนจากภายนอกโดยใช้หัวเผาแบบเทอร์โบที่เชื่อมต่อกับวาล์วจ่ายแก๊สชนิดควบคุมด้วยระบบดิจิทัลและถังแก๊สหุงต้ม (LPG) ที่มีวาล์วเปิด-ปิดแบบควบคุมด้วยมือ วัดอุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์โดยใช้เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) แก๊สที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาไพโรไลซิสจะไหลออกมาจากเครื่องปฏิกรณ์ผ่านไปยังไซโคลน (Cyclone) และผ่านไปยังหน่วยกลั่นแบบแยกส่วน (Fractionation unit) ซึ่งระบายความร้อนด้วยน้ำและทำหน้าที่เป็นคอนเดนเซอร์ (Condenser) ทำให้เกิดการควบแน่นไอน้ำมันไพโรไลซิสที่เป็นแก๊สให้กลายเป็นของเหลว และที่ส่วนปลายของหน่วยกลั่นมีภาชนะแก้วสำหรับรวบรวมน้ำมันไพโรไลซิสที่

สกัดได้เพื่อนำไปวิเคราะห์และใช้งานต่อไป ทางออกของช่องการไหลของก๊าซมีการติดตั้งเครื่องวิเคราะห์ก๊าซ (Gas analyzer) ยี่ห้อ Testo รุ่น 350 เพื่อวิเคราะห์ชนิดของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการ [9] แผนภาพของอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองถูกแสดงในรูปที่ 2

4. ขั้นตอนการทดลอง

- 1) ใส่ขยะพลาสติกขนาด 200×200 มม. ที่เตรียมไว้เข้าไปในเตาปฏิกรณ์และปิดฝักเตาปริมาณ 1 กิโลกรัม
- 2) เปิดเครื่องทำความเย็นด้วยน้ำสำหรับหน่วยกลั่นแบบแยกส่วน เปิดเครื่องวิเคราะห์ก๊าซ เปิดชุดควบคุมการให้ความร้อนและเปิดวาล์วแก๊ส
- 3) ให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่กำหนดสองจุดที่ 400 °C และ 450 °C และคงอุณหภูมิไว้เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที จากนั้นจึงปล่อยให้เย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิห้อง ตามลำดับ
- 4) ปล่อยให้ก๊าซจากเตาปฏิกรณ์ไหลผ่านไซโคลนและเข้าสู่ผ่านคอนเดนเซอร์ทำให้เกิดการควบแน่น และเข้าสู่หน่วยการกลั่นแยกลำดับส่วนกลายเป็นน้ำมันไพโรไลซิส
- 5) ศึกษาผลของน้ำมันผสมดีเซลที่อัตราส่วนต่างๆ โดยนำน้ำมันไพโรไลซิสที่ผลิตได้ผสมกับน้ำมันดีเซลเชิงพาณิชย์ในอัตราส่วนที่ต่างกัน 5 อัตราส่วน คือ 1:9, 2:8, 3:7, 4:6 และ 5:5 ตามลำดับ
- 6) นำน้ำมันดีเซลเชิงพาณิชย์ น้ำมันไพโรไลซิสที่ผลิตได้และน้ำมันผสมวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ โดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดเพกโตรสโคปี (FT-IR) เพื่อวิเคราะห์สเปกตรัม FT-IR ที่บันทึกไว้เพื่อระบุหมู่ฟังก์ชันและพันธะเคมีในตัวอย่างแต่ละชนิด
- 7) นำน้ำมันดีเซลเชิงพาณิชย์ น้ำมันไพโรไลซิสที่ผลิตได้และน้ำมันผสม ไปวิเคราะห์หาค่าความร้อน โดยใช้บอมบ์แคลอริมิเตอร์ เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติของน้ำมันไพโรไลซิสและน้ำมันผสม โดยใช้ค่าความร้อนของน้ำมันดีเซลเชิงพาณิชย์เป็นเกณฑ์อ้างอิงและเปรียบเทียบค่าความร้อนของน้ำมันไพโรไลซิสที่ผลิตได้
- 8) คำนวณจุดคุ้มทุนในการผลิตน้ำมันไพโรไลซิสโดยการหาต้นทุนคงที่และต้นทุนผันแปรรวมของการผลิตน้ำมันไพโรไลซิสปริมาตรหนึ่งลิตรในหน่วยเงินบาท และระยะเวลาคืนทุนของหน่วยการผลิตจากการทดลองนี้

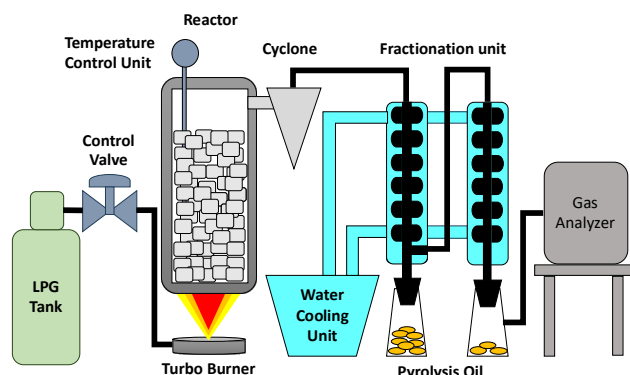


Figure 2 Equipment and tools used in the experiment

5. การวิเคราะห์ผลการทดลอง

1) เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดเพกโตรสโคปี (FT-IR)

เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดเพกโตรสโคปี ทำงานโดยอาศัยการดูดกลืนและการส่งผ่านรังสีอินฟราเรดของตัวอย่าง โดยตัวอย่างจะถูกเตรียมโดยใช้วิธีที่เหมาะสม เช่น วิธีเม็ดโพแทสเซียมโบรไมด์ จากนั้นจึงถูกสแกนด้วยความเร็วปานกลาง กระบวนการสแกนนี้จะสร้างสเปกตรัมที่ทำหน้าที่เป็นลายนิ้วมือโมเลกุลของตัวอย่าง โดยแสดงค่าพีคของการดูดกลืนจากส่วนประกอบต่างๆ จึงให้ข้อมูลโดยตรงเกี่ยวกับองค์ประกอบของวัสดุ เทคนิคนี้จึงเป็นวิธีการสำคัญในการระบุปฏิกิริยาทางกายภาพหรือเคมี [15] โดยในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดเพกโตรสโคปียี่ห้อ PerkinElmer Scientific รุ่น Spectrum Two FT-IR Spectrometer ในการวิเคราะห์

2) บอมบ์แคลอรีมิเตอร์

บอมบ์แคลอรีมิเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดความร้อนของการเผาไหม้เป็นหลัก ปฏิกิริยาเกิดขึ้นในพื้นที่ปิดที่เรียกว่าเครื่องวัดค่าแคลอรีมิเตอร์โดยตรงซึ่งสัมผัสกับความร้อนโดยรอบซึ่งก็คือปลอกหุ้มและรักษาอุณหภูมิให้คงที่ อุปกรณ์ทั้งหมดประกอบด้วยอุปกรณ์สำหรับวัดอุณหภูมิ การให้ความร้อน การทำให้เย็นและการกวน ซึ่งรวมกันเป็นระบบเครื่องวัดค่าแคลอรีมิเตอร์ [16] บอมบ์แคลอรีมิเตอร์โดยทั่วไปประกอบด้วยกระป๋องโลหะที่มีฝาปิดสนิทซึ่งบรรจุน้ำไว้และคนตลอดเวลา ภายในกระป๋องนี้ระเบิดซึ่งเป็นภาชนะที่มีผนังหนาและปิดสนิทจะบรรจุสารตั้งต้นปฏิกิริยาเกิดขึ้นภายใต้สภาวะที่มีปริมาตรคงที่เมื่อวัสดุที่ติดไฟได้ติดไฟในบรรยากาศที่มีออกซิเจนโดยในงานวิจัยนี้ใช้บอมบ์แคลอรีมิเตอร์ ยี่ห้อ Leco รุ่น AC-350 ในการวิเคราะห์

ผลการวิจัยและอภิปราย

1. คุณสมบัติทางกายภาพของพลาสติก

จากการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างขยะพลาสติกสามประการ คือ ปริมาณของสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่อยู่ในขยะพลาสติกฝักรวม ปริมาณของขยะพลาสติกฝักรวมหลังจากขจัดความชื้นออกแล้ว และปริมาณซีเมนต์ที่เหลือหลังการเผา ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 3

จากผลการทดสอบพบว่าพลาสติกที่ผ่านการฝักรวมมาแล้วมีปริมาณสารอินทรีย์ระเหยง่ายและความชื้นอยู่ที่ 1 % ถึง 3 % ของน้ำหนัก ซึ่งปริมาณดังกล่าวใกล้เคียงกับผลการศึกษาคู่สมมติทางกายภาพของพลาสติกในลักษณะเดียวกัน [17] เกี่ยวกับกระบวนการไพโรไลซิสและแก๊สซิฟิเคชันแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและมีวัตถุประสงค์เป็นขยะพลาสติกจากหลุมฝังกลบ ขยะพลาสติกเก่าสามารถย่อยสลายได้ดีกว่าขยะพลาสติกใหม่ จึงถูกทำให้สลายตัวเป็นก๊าซในกระบวนการไพโรไลซิสและแก๊สซิฟิเคชันได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิสูง จากการศึกษาดังกล่าวพบว่าปริมาณสารระเหยสูงมากกว่า 90 % ของน้ำหนัก

สำหรับปริมาณซีเมนต์ที่เหลือหลังการเผาอยู่ที่ 5 % ถึง 46 % ของน้ำหนัก เนื่องจากยังมีสิ่งปนเปื้อนจากการฝักรวมขยะพลาสติกปะปนอยู่ ส่วนประกอบหลักของซีเมนต์คือส่วนที่ไม่ถูกเผาไหม้ ซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของสารอนินทรีย์จากเศษหินและดิน ตัวอย่างของขยะพลาสติกที่ไม่ได้ผ่านการเตรียมคือการร่อนเศษดินออก การล้างทำความสะอาดและการตัดย่อยให้เป็นชิ้นเล็กๆ จะมีส่วนที่ไม่ถูกเผาไหม้มากกว่าตัวอย่างของขยะพลาสติกที่ผ่านการเตรียมแล้ว โดยได้นำน้ำมันจากพลาสติกแบบไม่ร้อนมาศึกษาต่อ เนื่องจากมีปริมาณซีเมนต์ที่เหลือหลังการเผาต่ำที่สุด ส่งผลให้สามารถผลิตปริมาณน้ำมันได้มากที่สุด

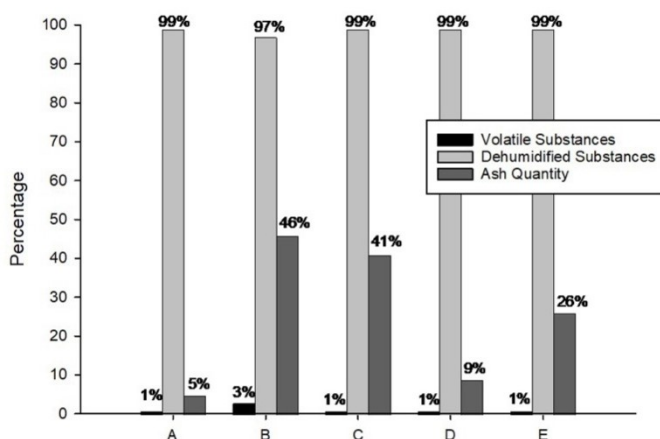


Figure 3 Physical properties of plastics waste (A) Cleaned 10-year-old landfills (B) 10-year-old landfills of normal size (C) Sieved 10-year-old landfills (D) Non sieved 10-year-old landfills and (E) Non sieved 10-year-old landfills of 2x2 inches

2. ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส

จากการทดลองพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิ 400 °C และ 450 °C คือน้ำมันไพโรไลซิส (Pyrolysis oil) 21.20 % และ 32.10 % ถ่านชาร์ (Char) 42.10 % และ 24.30 % และก๊าซผสม (Mixed gases) 36.70 % และ 43.60 % ตามลำดับ

โดยที่อุณหภูมิ 400 °C มีสัดส่วนของถ่านชาร์มากที่สุดคือ 42.10 % เนื่องจากอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาไม่เพียงพอสำหรับการสลายตัวของขยะพลาสติก ตามด้วยแก๊สผสมที่ 36.70 % และน้ำมันไพโรไลซิสน้อยที่สุดคือ 25.32 % สำหรับที่อุณหภูมิ 450 °C มีสัดส่วนของแก๊สผสมสูงที่สุดคือ 43.60 % ตามด้วยน้ำมันไพโรไลซิส 32.1 % และถ่านชาร์ที่ 24.30 % ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษา R. Miandad และคณะ [18] ที่รายงานว่าผลผลิตของเหลวสูงสุดสำหรับกระบวนการไพโรไลซิสอยู่ที่อุณหภูมิ 450 °C เนื่องจากอุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีสายโมเลกุลยาวขึ้น จึงได้เป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวคือน้ำมันไพโรไลซิสมากขึ้น ปริมาณน้ำมันที่ผลิตได้จากงานวิจัยนี้คิดเป็น 39.73 % ของการศึกษา R. Miandad และคณะ [18] ที่สามารถผลิตน้ำมันไพโรไลซิสจากพลาสติกที่อุณหภูมิ 450 °C ได้น้ำมันไพโรไลซิส 80.8% และถ่านชาร์ที่ 6.2%

3. สมบัติทางกายภาพของน้ำมันไพโรไลซิส

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลเกี่ยวกับหมู่ฟังก์ชันและพันธะเคมีในน้ำมันไพโรไลซิสที่ผลิตได้ด้วยด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดเพกโตรสโคปี (FT-IR) พบว่าน้ำมันไพโรไลซิสที่ผลิตได้มีไฮโดรคาร์บอนจำพวกแอลเคน (C-H Stretch) อยู่ในช่วงความยาวคลื่นที่ 2,875 ถึง 2,997 cm^{-1} และมีคาร์บอนิล (C=O Stretch) อยู่ในช่วงความยาวคลื่นที่ 1,707 ถึง 1,759 cm^{-1} และมีอะโรเมติก (C-C Stretch) อยู่ในช่วง 1,400 ถึง 1,456 cm^{-1} เป็นองค์ประกอบหลัก

จากผลการวิเคราะห์พบว่าคลื่นสเปกตรัมของน้ำมันไพโรไลซิสที่ผลิตได้และน้ำมันผสมมีความใกล้เคียงกันกับน้ำมันดีเซลเชิงพาณิชย์ที่มีขายอยู่ในท้องตลาด อย่างไรก็ตามเมื่อน้ำมันผสมมีอัตราส่วนของน้ำมันไพโรไลซิสที่มากขึ้นจะมีอิทธิพลต่อทำให้สเปกตรัมเปลี่ยนแปลงมากขึ้นไปด้วย โดยแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงนี้เริ่ม

ชัดเจนมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนของน้ำมันไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 450 °C ซึ่งผสมน้ำมันดีเซลเชิงพาณิชย์มีมากกว่า 3:7 เป็นต้นไป โดยสังเกตได้จากเส้นกราฟที่เริ่มตกต่ำลงไม่ตรงตามเส้นกราฟของน้ำมันดีเซลเชิงพาณิชย์เหมือนอย่างเดิมตามที่แสดงในรูปที่ 4

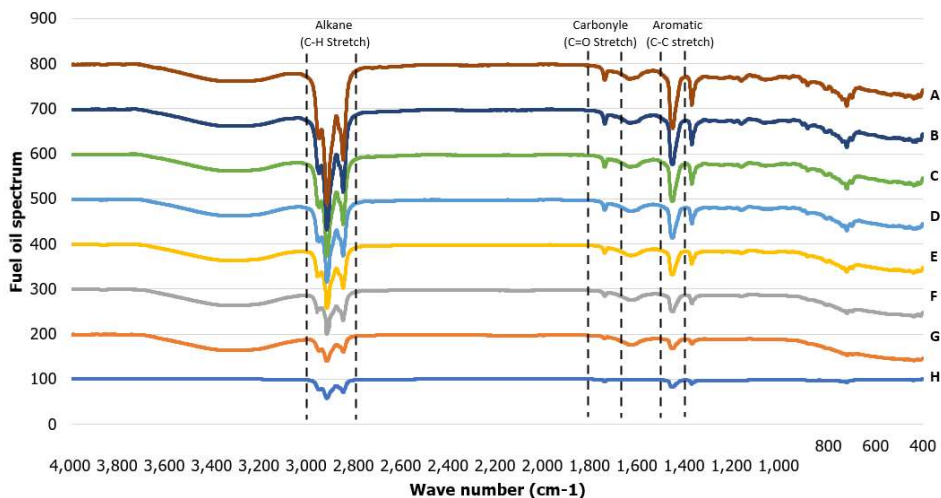


Figure 4 Fuel oil spectrums (A) Mixed oil 5:5 (B) Mixed oil 4:6 (C) Mixed oil 3:7 (D) Mixed oil 2:8 (E) Mixed oil 1:9 (F) Pyro oil 450 °C (G) Pyro oil 400 °C (H) Commercial diesel

4. ค่าความร้อน

จากการวิเคราะห์หาค่าความร้อนจากตัวอย่างน้ำมันทั้ง 8 ตัวอย่าง คือ น้ำมันดีเซลเชิงพาณิชย์ น้ำมันไพโรไลซิสที่ผลิตได้ที่อุณหภูมิ 400 °C และ 450 °C และน้ำมันผสมอีกห้าสัดส่วน [19] พบว่าค่าพลังงานความร้อนของตัวอย่างน้ำมันดีเซลเชิงพาณิชย์อยู่ที่ 45.205 ± 0.606 MJ/kg น้ำมันไพโรไลซิสที่ผลิตได้ที่อุณหภูมิ 400 °C และ 450 °C มีค่าความร้อนเท่ากับ 36.378 ± 0.024 MJ/kg และ 39.655 ± 0.251 MJ/kg ตามลำดับ น้ำมันไพโรไลซิสจากที่อุณหภูมิ 400 °C มีค่าความร้อนน้อยกว่าน้ำมันไพโรไลซิสที่ผลิตได้จากที่อุณหภูมิ 450 °C ประมาณ 8.30 % หรือ 19.50 % เมื่อเทียบกับค่าความร้อนจากน้ำมันดีเซลเชิงพาณิชย์และน้ำมันไพโรไลซิสจากที่อุณหภูมิ 450 °C มีค่าความร้อนน้อยกว่าน้ำมันดีเซลเชิงพาณิชย์ที่ 12.30 %

เมื่อนำน้ำมันไพโรไลซิสที่ 450 °C ไปผสมกับน้ำมันดีเซลที่อัตราส่วนแตกต่างกันห้าอัตราส่วน พบว่าค่าความร้อนมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเพิ่มสัดส่วนของน้ำมันไพโรไลซิสดังที่แสดงในรูปที่ 5 อย่างไรก็ตาม น้ำมันผสมที่อัตราส่วน 3:7 ให้ค่าความร้อนที่มากที่สุดเมื่อเทียบกับน้ำมันผสมในอัตราส่วนอื่นคือ 44.277 MJ/kg และตามค่ามาตรฐานของความร้อนจากการเผาไหม้น้ำมันดีเซลเชิงพาณิชย์อยู่ที่ 42 MJ/kg ถึง 46 MJ/kg น้ำมันผสมดังกล่าวมีค่าความร้อนอยู่ที่กึ่งกลางของช่วงนี้พอดีคือ 44 MJ/kg ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่ดี และหากเทียบกับน้ำมันไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์คือ 39 MJ/kg แล้วก็พบว่ามีความร้อนที่สูงกว่าถึง 11.4 % [20] ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Ruktai และคณะ [21] ที่ได้ผลลัพธ์ในลักษณะเดียวกันตามที่แสดงในรูปที่ 5

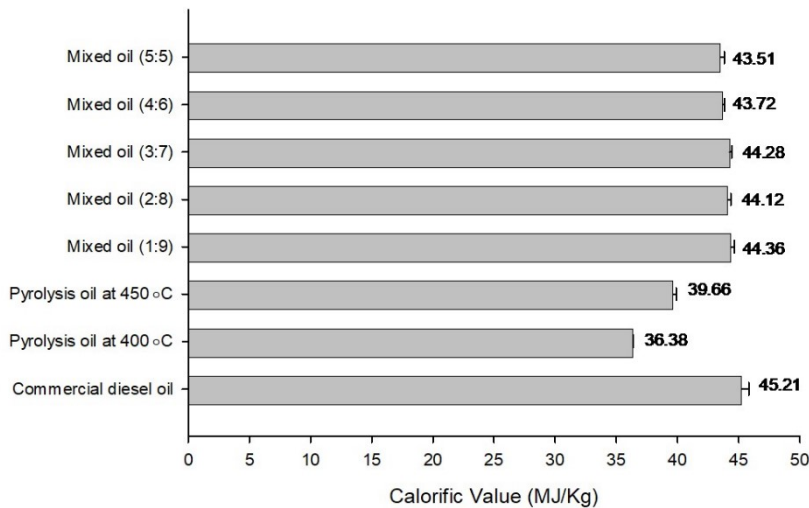


Figure 5 Average calorific value of fuel oil (MJ/kg)

5. การวิเคราะห์จุดคุ้มทุน

การคำนวณจุดคุ้มทุนในการผลิต เริ่มต้นจากการหาต้นทุนในการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกซึ่งประกอบด้วยต้นทุนคงที่และต้นทุนแปรผัน

ต้นทุนคงที่ในการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกของเตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิสคือค่าเสื่อมราคาเครื่องจักรซึ่งคำนวณตามวิธีแบบเส้นตรง (Straight Line Method) โดยเตาปฏิกรณ์ที่ใช้มีต้นทุนการสร้าง 100,000 บาท ประมาณการอายุการใช้งานที่ 10 ปี [22] และมีมูลค่าซาก 1 บาทหลังจากปีที่ 10 [23, 24] สำหรับค่าเสื่อมราคาต่อปีคำนวณจากเงินลงทุนหรืองบประมาณในการสร้างหักลบกับค่าเสื่อมราคาในปีสุดท้ายของอายุการใช้งานและหารด้วยปีสุดท้ายของอายุการใช้งานตามที่แสดงในสมการที่ 1 คือ $(100,000 \text{ บาท} - 1 \text{ บาท}) \div 10 \text{ ปี}$ เท่ากับ 9,999.90 บาทต่อปี หรือคิดเป็นต่อวันเท่ากับ $9,999.90 \text{ บาท} \div 365 \text{ วัน} = 27.40 \text{ บาทต่อวัน}$

$$\text{ค่าเสื่อมราคาต่อปี} = \frac{(\text{เงินลงทุน}) - (\text{ค่าเสื่อมราคาปีสุดท้ายของอายุการใช้งาน})}{\text{ปีสุดท้ายของอายุการใช้งาน}} \quad (1)$$

สำหรับต้นทุนผันแปรในการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติก คำนวณบนสมมติฐานโดยกำหนดวัตถุดิบปริมาณ 1 กิโลกรัมต่อ 1 รอบการผลิตจะได้น้ำมัน 0.32 ลิตร (32 %) และใน 1 รอบการผลิตใช้เวลา 2 ชั่วโมง ซึ่งประกอบด้วยค่าวัตถุดิบคือขยะพลาสติกกิโลกรัมละ 0.30 บาท [25] แต่เนื่องจากเป็นขยะจึงไม่นำมาคำนวณต้นทุน ใช้แค่สहुงต้ม 1 กิโลกรัมต่อการผลิตหนึ่งรอบการผลิต ต้นทุนค่าแก๊สสहुงต้มเท่ากับ 28.20 บาทต่อกิโลกรัม [26] ใช้ไฟฟ้า 1 หน่วยต่อวัน ต้นทุนค่าไฟฟ้าเท่ากับ 4.42 บาทต่อหนึ่งหน่วยกิโลวัตต์ (kW) [27] อ้างอิงจากผู้วิจัยได้ประเมินในห้องทดลองและจากงานวิจัยอื่นที่คล้ายกัน

ดังนั้นต้นทุนการผลิตต่อหนึ่งวันจึงประกอบด้วยค่าเสื่อมราคา 27.40 บาทต่อหนึ่งวัน ค่าแก๊สหัวต้ม 28.20 บาทต่อหนึ่งรอบการผลิต และค่าไฟฟ้า 4.42 บาทต่อหน่วยในหนึ่งวัน ในหนึ่งรอบการผลิตต่อวันมีต้นทุนเท่ากับ $27.40 + 28.20 + 4.42 = 60.02$ บาท ได้ผลผลิตน้ำมัน 0.32 ลิตร หรือที่ราคาลิตรละ 187.56 บาท หากผลิต 6 รอบการผลิตต่อวันจะมีค่าเสื่อมราคาเท่าเดิมที่ 27.40 บาทต่อหนึ่งวัน แต่ค่าแก๊สหัวต้มเพิ่มขึ้นเป็น $28.20 \times 6 = 169.20$ บาท และค่าไฟฟ้าเท่าเดิมที่ 4.42 บาทต่อหน่วยในหนึ่งวัน เพราะฉะนั้นใน 6 รอบการผลิตต่อวันมีต้นทุนเท่ากับ $27.40 + 169.20 + 4.42 = 201.02$ บาท ได้ผลผลิตน้ำมัน 1.92 ลิตร หรือที่ราคาลิตรละ 104.70 บาท ซึ่งจะใช้ในการคำนวณจุดคุ้มทุนในลำดับต่อไป

จากการคำนวณพบว่าเมื่อจำนวนรอบการผลิตเพิ่มขึ้นราคาน้ำมันจะต่ำลงเพราะความได้เปรียบจากต้นทุนคงที่ และหากผลิตที่ 12 รอบการผลิตต่อวันจะมีค่าแก๊สหัวต้มเพิ่มขึ้นเป็น $28.20 \times 12 = 338.40$ บาท และต้นทุนต่อวันเท่ากับ $27.40 + 338.40 + 4.42 = 370.22$ บาท ได้ผลผลิตน้ำมัน 3.84 ลิตร หรือที่ราคาลิตรละ 96.41 บาท

จากต้นทุนการผลิตข้างต้นพบว่าราคาน้ำมันจากขยะพลาสติกมีราคาขายเฉลี่ยต่อลิตรที่ 32.35 บาท [28] โดยอ้างอิงจากผู้ผลิตน้ำมันไพโรไลซิสเชิงพาณิชย์ที่ประเทศอินเดียซึ่งราคาจำหน่ายอยู่ที่ลิตรละ 90 รูปี หรือ 40.77 บาทต่อลิตร [29] ซึ่งมีราคาต่ำกว่าที่การทดลองนี้ผลิตได้เท่ากับ $104.70 - 40.77 = 69.93$ บาทต่อลิตร

เมื่อนำน้ำมันไพโรไลซิสที่ผลิตได้ผสมกับน้ำมันดีเซลเชิงพาณิชย์ในอัตราส่วน 3:7 พบว่ามีต้นทุนของน้ำมันไพโรไลซิสเท่ากับ $30\% \times 104.70$ บาทต่อลิตร = 31.41 บาทต่อลิตร โดยน้ำมันดีเซลเชิงพาณิชย์โดยเฉลี่ยมีราคาเท่ากับ 29.94 บาทต่อลิตร [30] ซึ่งเท่ากับ $70\% \times 29.94 = 20.96$ บาทต่อลิตร เมื่อรวมราคาน้ำมันผสมในอัตราส่วน 3:7 นี้เท่ากับ $31.409 + 20.96 = 52.37$ บาทต่อลิตร ซึ่งมีราคาสูงกว่าน้ำมันดีเซลเชิงพาณิชย์โดยเฉลี่ยเท่ากับ 20.96 บาทต่อลิตร

จุดคุ้มทุนคือจุดที่เมื่อรายได้รวมเท่ากับต้นทุนรวม (รายได้รวม = ต้นทุนรวม) ตามที่แสดงในสมการที่ 2 และสมการที่ 3 ข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์จุดคุ้มทุนในการผลิตน้ำมันจากขยะพลาสติกจากตารางที่ 1 แสดงต้นทุนคงที่ ต้นทุนผันแปร ต้นทุนคงที่รวมทั้งสิ้น 100,000 บาท ต้นทุนผันแปรรวมทั้งสิ้น 201.02 บาทต่อวัน (6 รอบการผลิตต่อวัน) หากราคาขายของน้ำมันไพโรไลซิสอยู่ที่ 104.70 บาทต่อลิตร พบว่าต้องขายน้ำมันเป็นจำนวนทั้งหมด 955.128 ลิตร จึงถึงจุดคุ้มทุน ($100,000 \text{ บาท} \div 104.698 \text{ บาทต่อลิตร} = 955.128 \text{ ลิตร}$) หรือเท่ากับ 497.463 วันการผลิต ($955.128 \text{ ลิตร} \div 1.92 \text{ ลิตรต่อวัน}$) เท่ากับ 1 ปี 3 เดือน (1.363 ปี)

$$\text{จุดคุ้มทุน} = \text{รายได้รวม} = \text{ต้นทุนรวม} \quad (2)$$

$$\text{จุดคุ้มทุน} = \frac{\text{ต้นทุนคงที่รวม}}{(\text{รายได้จากการขายสินค้า} - \text{ต้นทุนผันแปรรวม})} \quad (3)$$

สำหรับผลพลอยได้จากกระบวนการไพโรไลซิสคือขยะพลาสติกถูกกำจัด โดยพบว่าสามารถลดขยะพลาสติกต่อปีได้เท่ากับ $1 \text{ กิโลกรัม} \times 6 \text{ รอบการผลิต} \times 365 \text{ วัน} = 2,190 \text{ กิโลกรัม}$ หรือ 2.190 ตันต่อปี ราคาขยะพลาสติกเท่ากับ 0.30 บาทต่อกิโลกรัม จึงมีรายได้จากการกำจัดขยะพลาสติกที่ 657 บาทต่อปี ($2,190 \text{ กิโลกรัม} \times 0.3 \text{ บาทต่อกิโลกรัม}$) หรือตลอดระยะเวลาการคืนทุนที่ 895.43 บาท ($1 \text{ กิโลกรัม} \times 6 \text{ รอบการผลิต} \times 497.463 \text{ วัน} \times 0.3 \text{ บาทต่อกิโลกรัม}$)

Table 1 List of production costs for producing fuel oil from plastic waste per day in details (6 production cycles)

No.	Content	Unit	Cost per unit (THB)	Sum (THB)
Depreciation cost of				
1	pyrolysis machine per production cycle	1 day	27.40	27.40
2	Plastic waste (1kg)	not included, waste elimination as profit		
3	LPG 1 kilogram per production cycle	6 Kg (6 cycles)	28.20	169.20
4	Electricity	1 kW unit	4.42	4.42
Total per day (THB)				201.02

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษากรรมวิธีการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกที่นำมาจากหลุมขยะฝังกลบด้วยกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 400 °C และ 450 °C โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา จากนั้นจึงนำน้ำมันที่ผลิตได้ไปปรับปรุงคุณภาพโดยการผสมกับน้ำมันดีเซลเชิงพาณิชย์ในอัตราส่วนที่ต่างกัน 5 อัตราส่วนและวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและค่าความร้อนของน้ำมันที่ผลิตได้โดยอ้างอิงกับน้ำมันดีเซลเชิงพาณิชย์ที่มีขายอยู่ในท้องตลาด

กระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 400 °C ให้ปริมาณน้ำมันที่น้อยกว่า (21.20 %) และได้น้ำมันที่มีค่าความร้อนน้อยกว่า (36.38 MJ/kg) ที่อุณหภูมิ 450 °C ซึ่งมีปริมาณน้ำมันที่มากกว่า (32.10 %) และได้น้ำมันที่มีค่าความร้อนมากกว่า (39.66 MJ/kg)

ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำมัน ได้ผสมน้ำมันไพโรไลซิสที่ผลิตได้จากอุณหภูมิ 450 °C กับน้ำมันดีเซลเชิงพาณิชย์ที่มีขายอยู่ในท้องตลาดเพื่อลดการใช้ น้ำมันดีเซลบริสุทธิ์ โดยเสนอให้ใช้อัตราส่วนที่ 3:7 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลเชิงพาณิชย์มากที่สุด ซึ่งน้ำมันผสมในสัดส่วนดังกล่าวมีความคุ้มค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับน้ำมันผสมในอัตราส่วนอื่นโดยให้ค่าความร้อนที่ 44.277 MJ/kg คิดเป็น 97.95 % ของน้ำมันดีเซลเชิงพาณิชย์มีค่าความร้อนที่ 45.205 ± 0.606 MJ/kg

การผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกสามารถบรรลุจุดคุ้มทุนได้ภายใน 497.463 วัน หรือ 1 ปี 3 เดือน (1.363 ปี) กล่าวได้ว่าจะถึงจุดคุ้มทุนหลังผลิตและจัดจำหน่ายน้ำมันเชื้อเพลิงครบ 955.128 ลิตรที่ราคา 104.70 บาทต่อลิตร และมีผลพลอยได้คือกากจัดขยะพลาสติกไปได้ 2,190 กิโลกรัม และมีรายได้ 895.43 บาท ซึ่งคำนวณจากรอบการผลิต 6 รอบต่อวัน มีต้นทุนผันแปรรวมทั้งสิ้น 201.02 บาทต่อวัน

ในด้านข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไปควรศึกษาการผลิตน้ำมันจากขยะประเภทอื่นๆ เพิ่มเติมใช้ขนาดของวัตถุดิบพลาสติกที่ต่างกัน และระยะเวลาของการทำปฏิกิริยาที่แตกต่างกันเพื่อเปรียบเทียบผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อประสิทธิภาพของกระบวนการไพโรไลซิสและคุณภาพของน้ำมันที่ผลิตได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยเลขที่ RGNS 64-110 โดยกระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.)

References

- [1] Wichai-utcha, N. & Chavalparit, O. (2019). 3Rs Policy and Plastic Waste Management in Thailand. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 21, 10-22.
- [2] Iglinski, B., et al. (2023). Pyrolysis of Waste Biomass: Technical and Process Achievements, and Future Development—A Review. *Energies*, 16(4), 1829.
- [3] Zhuang, Y., et al. (2022). Environmental toxicity and Decomposition of Polyethylene. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 242, 113933.
- [4] Chotiratanasak, J., et al. (2023). Feasibility Study of Plastic Waste Pyrolysis from Municipal Solid Waste Landfill with Spent FCC Catalyst. *Environment and Natural Resources Journal*, 21(3), 256-265.
- [5] Chotiratanasak, J., et al. (2023). Thermal and Catalytic Pyrolysis of Municipal Plastics Waste from Samui Island Landfill. *Udon Thani Rajabhat University Journal of Sciences and Technology*, 11(1), 59-73.
- [6] Lange, J. P. (2021). Managing Plastic Waste-Sorting, Recycling, Disposal, and Product Redesign. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 9(47), 15694-16004.
- [7] Antelava, A., et al. (2019). Plastic Solid Waste (PSW) in the Context of Life Cycle Assessment (LCA) and Sustainable Management. *Environmental Management*, 64, 230–244.
- [8] Yuliansyah, A. T., et al. (2015). Pyrolysis of Plastic Waste to Produce Pyrolytic Oil as an Alternative Fuel. *International Journal of Technology*, 6(7), 1076-1083.
- [9] Hartulistiyoso, E., et al. (2015). Temperature Distribution of the Plastics Pyrolysis Process to Produce Fuel at 450 °C. *Procedia Environmental Sciences*, 28, 234-241.
- [10] Santaweek, C. & Janyalertadun, A. (2017). The Production of Fuel Oil by Conventional Slow Pyrolysis Using Plastic Waste from a Municipal Landfill. *International Journal of Environmental Science and Development*, 8(3), 168-173.
- [11] Aridito, M. N. (2017). The Influence of Particle Size and Fuel Consumption Rate on Oil Characteristics from Pyrolysis of Aluminum Foil Coated Polyethylene (Al-PE) Waste. *Conserve: Journal of Energy and Environmental Studies*, 1(1), 20-33.
- [12] ASTM D3175-20. (2020). *Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke*. Available from <https://www.astm.org/d3175-20.html>. Accessed date: 20 December 2023.
- [13] ASTM D3173-11. (2020). *Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke*. Available from <https://www.astm.org/d3173-11.html>. Accessed date:

- 20 December 2023.
- [14] ASTM D3174-12. (2020). *Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal*. Available from <https://www.astm.org/standards/d3174>. Accessed date: 20 December 2023.
- [15] Gurpreet, K. & Singh, S. K. (2018). Review of nanoemulsion formulation and characterization techniques. *Indian Journal of Pharmaceutical Sciences*, 80(5), 781-789.
- [16] Cleveland, C. J. & Morris, C. (2015). *Dictionary of Energy*. 2nd ed. Boston: Elsevier.
- [17] Kaewpengkrow, P., et al. (2012). Pyrolysis and Gasification of Landfilled Plastic Wastes with Ni– Mg– La/Al₂O₃ Catalyst. *Environmental Technology*, 33(22), 2489-2495.
- [18] Miandad, R., et al. (2017). Effect of Plastic Waste Types on Pyrolysis Liquid Oil. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 119, 239-252.
- [19] ASTM D4868-17. (2022). *Standard Test Method for Estimation of Net and Gross Heat of Combustion of Hydrocarbon Burner and Diesel Fuels*. Available from <https://www.astm.org/d4868-17.html>. Accessed date: 20 December 2023.
- [20] World Nuclear Association. (2020). *Heat Values of Various Fuels*. Available from <https://world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/heat-values-of-various-fuels>. Accessed date: 20 December 2023.
- [21] Prurapark, R., et al. (2020). Effect of Temperature on Pyrolysis Oil Using High-Density Polyethylene and Polyethylene Terephthalate Sources From Mobile Pyrolysis Plant. *Frontiers in Energy Research*, 27, 541535.
- [22] Gautam, R. & Kumar, S. (2020). Performance and Combustion Analysis of Diesel and Tallow Biodiesel in CI Engine. *Energy Reports*, 6, 2785-2793.
- [23] Royal Decree issued in accordance with the Revenue Code regarding the deduction of wear and tear and depreciation of property (No. 145) B.E. 2527. (1984, 24 February). Royal Gazette. Vol. 101 No. 24 p. 17-22. (in Thai)
- [24] The University of Chicago. (n.d.). *Useful Life of Equipment*. Available from <https://finserv.uchicago.edu/sites/finserv.uchicago.edu/files/uploads/Documents/pdf/ULOE%20pdf.pdf>. Accessed date: 20 December 2023.
- [25] Wongpanit International Company Limited. (2023). *Price for purchasing PE plastic waste on December 6, 2023*. Available from https://wongpanit.com/print_history_price/1946. Accessed date: 20 December 2023. (in Thai)
- [26] Energy Policy and Planning office (EPPO), Ministry of Energy. (2023). *Price of LPG*. Available from <https://www.eppo.go.th/epposite/index.php/th>. Accessed date: 6 December 2023. (in Thai)
- [27] Metropolitan Electricity Authority. (2023). *Different types of electricity rates: Type 2 Small General Service*. Available from <https://www.mea.or.th/our-services/tariff-calculation/other/lhKD8oIIS>. Accessed date: 6 December 2023. (in Thai)

Research Article

Journal of Advanced Development in Engineering and Science

Vol. 14 • No. 40 • May – August 2024

- [28] Ayush Udyog. (2023). Product price. Available from [https://www.exportersindia.com/ayush - udyog/polyethylene-oil-2498817245.htm](https://www.exportersindia.com/ayush-udyog/polyethylene-oil-2498817245.htm). Accessed date: 6 December 2023.
- [29] Bank of Thailand. (2023). *Daily Foreign Exchange Rates*. Available from <https://www.bot.or.th/en/statistics/exchange-rate.html>. Accessed date: 6 December 2023. (in Thai)
- [30] PTT Oil and Retail Business Public Company Limited. (2023). *Oil price in Bangkok and Vicinities*. Available from https://www.pttor.com/th/oil_price. Accessed date: 6 December 2023. (in Thai)