

บทความวิจัย (Research Article)

การผลิตน้ำมันชีวภาพด้วยการไพโรไลซิสแบบเร็วของชีวมวลเพื่อทดสอบใช้งานในเครื่องยนต์

ชินภัทร ชูระการ¹, กัมปนาท ไชยเพชร¹ และ เกยูร ดวงอุปมา^{1,*}

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและเมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

*ผู้ประสานงานบทความต้นฉบับ: keyoon.du@ksu.ac.th, k_duangsuppama@hotmail.com

(รับบทความ: 25 ตุลาคม 2566; แก้ไขบทความ: 15 พฤศจิกายน 2566; ตอรับบทความ: 29 พฤศจิกายน 2566)

บทคัดย่อ

การผลิตน้ำมันชีวภาพด้วยการไพโรไลซิสแบบเร็วของชีวมวลเพื่อทดสอบใช้งานในเครื่องยนต์ มีวัตถุประสงค์เพื่อไพโรไลซิสแบบเร็วของขี้เลื่อยปนเปื้อนในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดที่อัตราการป้อนชีวมวล 1 กิโลกรัม/ชั่วโมง และอุณหภูมิปฏิกิริยา 500 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 50 องศาเซลเซียสต่อนาที เมื่อสิ้นสุดการทดลองสมมูลมวลเพื่อหาปริมาณผลได้ของน้ำมันชีวภาพ และนำน้ำมันชีวภาพไปวิเคราะห์ค่าความร้อน ความหนืด ความหนาแน่น จุดวาบไฟ-จุดติดไฟ และปริมาณเถ้า จากนั้นนำน้ำมันชีวภาพที่เลือกไปผสมดีเซลที่อัตราส่วนร้อยละ 100:0 80:20 60:40 40:60 20:80 และ 0:100 โดยน้ำหนัก ผลการวิจัย พบว่า มีปริมาณผลได้ของน้ำมันชีวภาพร้อยละ 61.8 โดยน้ำหนัก โดยน้ำมันชีวภาพหลักที่ได้มาจากชุดควบแน่นด้วยน้ำหล่อเย็นร้อยละ 45.3 โดยน้ำหนัก ผลวิเคราะห์สมบัติ พบว่า น้ำมันชีวภาพนี้มีค่าความร้อน 32.6 เมกะจูล/กิโลกรัม ความหนืด 7.9 เซนติสโตรอกส์ ติดไฟที่อุณหภูมิ 26.2 องศาเซลเซียส เมื่อนำน้ำมันชีวภาพนี้ไปผสมกับดีเซลในอัตราส่วนที่ลดลงร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ค่าความร้อนและอุณหภูมิติดไฟเพิ่มขึ้น ขณะที่ความหนืดลดลงอย่างต่อเนื่อง ผลการทดสอบน้ำมันชีวภาพในเครื่องยนต์ พบว่า ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ได้อย่างสมบูรณ์ส่งผลให้ปริมาณไฮโดรคาร์บอนและคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลงอย่างชัดเจน จึงควรต่อยอดงานวิจัยนี้เพื่อประยุกต์ใช้น้ำมันชีวภาพในเครื่องยนต์เพื่อศึกษาสมรรถนะในระยะยาวต่อไป

คำสำคัญ: การไพโรไลซิสแบบเร็ว ขี้เลื่อย เครื่องยนต์ น้ำมันชีวภาพ

การอ้างอิงบทความ: ชินภัทร ชูระการ, กัมปนาท ไชยเพชร และ เกยูร ดวงอุปมา, "การผลิตน้ำมันชีวภาพด้วยการไพโรไลซิสแบบเร็วของชีวมวลเพื่อทดสอบใช้งานในเครื่องยนต์", วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์, vol. 1, no. 6, pp. 15-27, 2566.

Production of bio-oil by fast pyrolysis of biomass for testing in engines

Chinnapat Turakarn¹, Kumpanat Chaipheth¹ and Keyoon Duanguppama^{3,*}

¹ Department of Mechanical and Mechatronics Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University

* Corresponding Author: keyoon.du@ksu.ac.th, k_duanguppama@hotmail.com

(Received: October 25, 2023; Revised: November 15, 2023; Accepted: November 29, 2023)

Abstract

Production of bio-oil by fast pyrolysis of biomass for testing in engines. The objective is fast pyrolysis of contaminated sawdust in a fluidized bed reactor at a biomass feed rate of 1 kg/hr and a reaction temperature of 500°C. The heating rate was 50°C/min. At the end of the experiment, a mass balance was performed to quantify the yield of the bio-oil and the bio-oil was analyzed for calorific value, viscosity, density, flash point-fire point and ash content. The selected bio-oil was then mixed with diesel at ratios of 100:0, 80:20, 60:40, 40:60, 20:80 and 0:100 wt%. The results of the research found that the yield of bio-oil was 61.8 wt%, with the main bio-oil obtained from the cooling water condensation unit being 45.3 wt%. The properties analysis found that this bio-oil has a high heating value of 32.6 MJ/kg, a viscosity of 7.9 cSt, and fire point of a temperature of 26.2°C. When this bio-oil was mixed with diesel at a ratio reduced by 20 wt%, the calorific value and ignition temperature increased while the viscosity continued to decrease. The results of the test of bio-oil in the engine found that it completely improved the combustion efficiency within the combustion chamber, resulting in a marked reduction in the number of hydrocarbons (HC) and carbon monoxide (CO). Therefore, this research should be extended to apply bio-oil in engines to further study long-term performance.

Keywords: Fast pyrolysis, Sawdust, Engines, Bio-oil

Please cite this article as: C. Turakarn, K. Chaipheth and K. Duanguppama, Production of bio-oil by fast pyrolysis of biomass for testing in engines, "The Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University", vol. 1, no. 6, pp. 15-27, 2023

บทความวิจัย (Research Article)

1. บทนำ

การไฟโรไลซิสแบบเร็วของชีวมวล คือ การย่อยสลายอนุภาคทางเคมีความร้อนของชีวมวลที่อุณหภูมิปฏิกิริยาระหว่าง 400-600 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะปราศจากออกซิเจน ที่ระยะเวลาประมาณ 2.5 วินาที [1] วัตถุประสงค์ของชีวมวลต้องผ่านกระบวนการบดละเอียด คัดขนาด และทำให้แห้งโดยความชื้นเริ่มต้นไม่ควรเกินร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก [1] เพื่อควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไฟโรไลซิส

ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากการไฟโรไลซิสแบบเร็วของชีวมวล คือ ของเหลว ที่เรียกว่า “น้ำมันชีวภาพ” และมีผลิตภัณฑ์รองจากกระบวนการ คือ ถ่านชาร์ และแก๊ส น้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไฟโรไลซิสโดยทั่วไปมีความหนืดสูง มีความเป็นกรด และมีความหนาแน่นมากกว่าเชื้อเพลิงปิโตรเลียม เพราะมีน้ำผสมในปริมาณค่อนข้างสูง นักวิจัยให้ความสำคัญกับการปรับปรุงสมบัติของน้ำมันชีวภาพระหว่างกระบวนการผลิต เช่น การไฟโรไลซิสแบบเร็วของชีวมวลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา [2-5] ผสมไอน้ำกับไอไฟโรไลซิส [6] ผสมเอทานอลในชีวมวล [7] ปรับปรุงด้วยไฮโดรเจน [8, 9] ผสมพลาสติกกับชีวมวล [10, 11] อย่างไรก็ตาม น้ำมันชีวภาพที่ได้จากกระบวนการผลิตดังกล่าวยังมีคุณภาพดีขึ้นไม่มากนักเมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงปิโตรเลียม

ปี พ.ศ. 2559 มีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับชีวมวลปนเปื้อนด้วยน้ำมันเชื้อเพลิงและของแข็ง โดยในรายงานระบุว่าซีเลียมปนเปื้อน คือ ชีวมวลที่ใช้สำหรับการไฟโรไลซิส โดยก่อนนำมาเป็นวัตถุดิบซีเลียมถูกนำไปใช้ทำความสะอาดคราบน้ำมันที่เปื้อนตามพื้นหลังจากการปฏิบัติงานของช่างในโรงกลึง เมื่อซีเลียมดูดซับน้ำมันจนอิมตัวจะทำให้เศษโลหะเกาะติดไปด้วย ผลวิเคราะห์ พบว่า ชีวมวลนี้มีน้ำมันปนเปื้อนร้อยละ 23.7 โดยน้ำหนัก (ประกอบด้วย น้ำมันเบนซิน น้ำมันดีเซล น้ำมันเกียร์ และน้ำมันเฟืองท้าย) และของแข็งปนเปื้อน (เศษโลหะ) ร้อยละ 6.1 โดยน้ำหนัก [12] เมื่อนำชีวมวลไฟโรไลซิสแบบเร็วใน

เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียนได้น้ำมันชีวภาพร้อยละ 67 โดยน้ำหนัก [12] ผลวิเคราะห์สมบัติของน้ำมันชีวภาพ พบว่า มีค่าความร้อนสูงถึง 31.5 เมกะจูล/กิโลกรัม และมีปริมาณน้ำต่ำกว่าน้ำมันชีวภาพโดยทั่วไปมากกว่า 6 เท่า คือ ร้อยละ 3.8 โดยน้ำหนัก ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมียังพบว่า น้ำมันชีวภาพนี้มีองค์ประกอบของสารในกลุ่มไฮโดรคาร์บอนเป็นหลัก แต่ปริมาณน้ำมันชีวภาพที่ผลิตได้มีปริมาณน้อยเนื่องจากมีอัตราการป้อนชีวมวล 100 กรัม/ชั่วโมง จึงไม่สามารถผลิตน้ำมันชีวภาพให้เพียงพอสำหรับทดสอบใช้งานในเครื่องยนต์ได้

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ผลิตน้ำมันชีวภาพจากการไฟโรไลซิสแบบเร็วของซีเลียมปนเปื้อนจากโรงกลึงในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดที่อัตราการป้อนชีวมวล 1 กิโลกรัม/ชั่วโมง เพื่อศึกษาปริมาณผลได้และสมบัติของน้ำมันชีวภาพ จากนั้นนำน้ำมันชีวภาพที่ผลิตได้ไปทดสอบใช้งานในเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดียว เพื่อศึกษาแรงม้าเบรก อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก และมลพิษในไอเสียต่อไป

2. วิธีการวิจัย

การวิจัยเริ่มต้นจากการเตรียมชีวมวล แล้ววิเคราะห์สมบัติของชีวมวล จากนั้นเตรียมตัวกลางถ่ายโอนความร้อน และเตรียมหน่วยผลิตน้ำมันชีวภาพ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.1 การเตรียมชีวมวล

ชีวมวลที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ ซีเลียมปนเปื้อนจากโรงกลึงแทนทองคว้านเจียร์ จังหวัดมหาสารคาม นำมาคัดขนาดอนุภาคด้วยตะแกรงคัดขนาด 0.6-2.0 มิลลิเมตร แล้วนำไปเก็บในภาชนะมิดชิดป้องกันการระเหยตัวของสารปนเปื้อน

การวิเคราะห์สมบัติของชีวมวล ประกอบด้วย การวิเคราะห์แบบประมาณ และการวิเคราะห์ค่าความร้อน ทั้งหมดวิเคราะห์ 3 ซ้ำ มีรายละเอียดดังนี้

บทความวิจัย (Research Article)

2.1.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ

1) ปริมาณความชื้นวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM E 871-82

2) สารระเหยเกิดจากการระเหยตัวของสารที่ควบแน่นได้และไม่ได้ในชีวมวล ซึ่งการวิเคราะห์สารระเหยนี้วิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM E 872-82

3) เถ้า คือ สารอนินทรีย์ในชีวมวล ซึ่งปริมาณเถ้าวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM E 1755-01

4) คาร์บอนคงที่ จะทราบได้หลังจากรู้ปริมาณของความชื้น สารระเหย และเถ้า เพราะปริมาณคาร์บอนคงที่คำนวณจากน้ำหนักของชีวมวลตัวอย่าง เริ่มต้นลบด้วยปริมาณของความชื้น สารระเหย และเถ้า ตามลำดับ

5) การปนเปื้อนวิเคราะห์โดย การสกัดด้วยสารทำละลายเฮกเซน ที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นจุดเดือดของสารนี้เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นแยกน้ำมันที่ปนเปื้อนและเฮกเซนออกจากชีล้อยปนเปื้อน ด้วยวิธีการกรองแบบสุญญากาศด้วยกระดาษกรองเบอร์ 3 ที่มีความละเอียด 6 ไมโครเมตร แล้วแยกน้ำมันที่ปนเปื้อนออกจากเฮกเซนด้วยเครื่องกลั่นระเหยสารแบบหมุน จะทราบปริมาณน้ำมันที่ปนเปื้อน ส่วนปริมาณของแข็งปนเปื้อนวิเคราะห์โดยนำชีล้อยที่เหลือจากการสกัดน้ำมันปนเปื้อนไปวิเคราะห์เถ้าเปรียบเทียบกับชีล้อยไม่ปนเปื้อน

2.1.2 การวิเคราะห์ค่าความร้อนสูง

วิเคราะห์ด้วยวิธีบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ตามมาตรฐาน ASTM D240 โดยเครื่อง S.M.D. Torino บอมบ์แคลอรีมิเตอร์ รุ่น Art.2060/2070

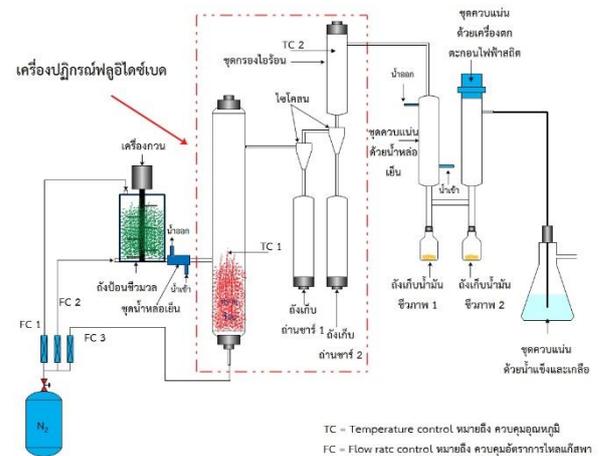
2.2. การเตรียมตัวกลางถ่ายโอนความร้อน

ทราย คือ ตัวกลางถ่ายโอนความร้อน ที่ผ่านการคัดขนาดอนุภาค 0.4-0.6 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นขนาดที่เหมาะสมกับการเป็นตัวกลางถ่ายโอนความร้อนในเครื่องปฏิกรณ์ของงานวิจัยครั้งนี้ นำไปเผาที่อุณหภูมิ 575 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง ตามมาตรฐาน ASTM

E 1755-01 เพื่อกำจัดเถ้าหรือเศษวัสดุที่ปนเปื้อนทรายออก หลังจากนั้นนำทรายที่ผ่านการเผามาคัดขนาด 0.4-0.6 มิลลิเมตร อีกครั้งก่อนนำไปใช้เป็นตัวกลางถ่ายโอนความร้อน

2.3 การไพโรไลซิสแบบเร็วของชีวมวล

เริ่มต้นโดยให้ความร้อนกับขวดหลอดความร้อนด้วยการปรับอุณหภูมิปฏิกิริยา (TC 1) ในภาพที่ 1 ให้ได้ 500 องศาเซลเซียส (เครื่องปฏิกรณ์ขนาดความจุ 5 ลิตร) และปรับอุณหภูมิกรองไอร้อน (TC 2) ที่อุณหภูมิ 420 องศาเซลเซียส เมื่อแน่ใจว่าอุณหภูมิทุกจุดได้ตามค่าที่กำหนดให้ปรับอัตราการไหลของไนโตรเจน (FC 3) 4 ลิตร/นาที่ เพื่อให้ทรายได้รับความร้อนและกระจายความร้อนภายในเครื่องปฏิกรณ์จนกว่าอุณหภูมิไพโรไลซิส (TC 1) จะคงที่ จากนั้นเปิดการทำงานปั้มน้ำหล่อเย็นชุดป้อนชีวมวล และชุดควบแน่นด้วยน้ำหล่อเย็น



ภาพที่ 1 แผนภาพหน่วยผลิตน้ำมันชีวภาพ

เริ่มการไพโรไลซิสแบบเร็วด้วยการเปิดเครื่องกลั่นและปรับอัตราการไหลไนโตรเจน (FC 1 และ FC 2) ตำแหน่งละ 2 ลิตร/นาที่ เพื่อป้อนชีวมวลจากถังผ่านท่อลำเลียงเข้าไปยังภายในของเครื่องปฏิกรณ์ด้วยอัตราการป้อน 1 กิโลกรัม/ชั่วโมง เมื่อชีวมวลสัมผัสกับทรายร้อนจะสลายตัวกลายเป็นไอผสมกับของแข็ง

บทความวิจัย (Research Article)

ที่ไม่สามารถสลายตัวได้ไหลขึ้นด้านบนเครื่องปฏิกรณ์ ผ่านไปยังไซโคลนทั้งสองตัวเพื่อแยกของแข็งหรือถ่าน ชาร์ จากนั้นไอจะถูกส่งผ่านไปยังกรองไอร้อนเพื่อแยก ถ่านชาร์ขนาดเล็กออกด้วยตัวกลางกรองใยแก้ว หลังจากนั้นไอจะถูกส่งต่อไปควบแน่นให้เป็นน้ำมัน ชีวภาพด้วยชุดควบแน่น 3 ชุด คือ ชุดควบแน่นด้วย น้ำหล่อเย็น ชุดควบแน่นด้วยเครื่องตกตะกอนไฟฟ้า สถิต และชุดควบแน่นด้วยน้ำแข็งและเกลือ



ภาพที่ 2 หน่วยผลิตน้ำมันชีวภาพ

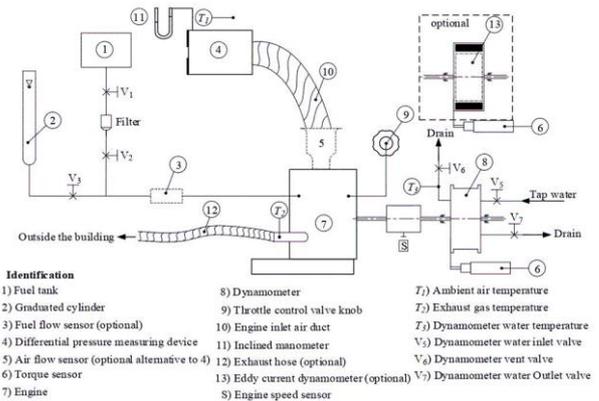
2.4 การสมดุลมวล

น้ำมันชีวภาพ คือ ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จาก กระบวนการผลิต ซึ่งปริมาณผลได้ของน้ำมันชีวภาพ คำนวณจากน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นจากของเหลวที่อยู่ในขวด เก็บน้ำมันชีวภาพของชุดควบแน่นด้วยน้ำหล่อเย็น ชุด ควบแน่นด้วยเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต และชุด ควบแน่นด้วยน้ำแข็งและเกลือ ขณะที่ปริมาณผลได้ ของถ่านชาร์คำนวณจากน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของของแข็ง ในเครื่องปฏิกรณ์ ไซโคลน กรองไอร้อน และท่อความ ร้อน สำหรับปริมาณผลได้ของแก๊สคำนวณโดยความ ต่างของปริมาณผลได้ผลิตภัณฑ์

2.5 ทดสอบน้ำมันชีวภาพเพื่อหาสมรรถนะใน เครื่องยนต์

น้ำมันชีวภาพที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ จะถูกนำไป ทดสอบการใช้งานในเครื่องยนต์ เพื่อหาสมรรถนะของ

เครื่องยนต์ ประกอบด้วย แรงม้าเบรก และอัตราการ สิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก โดยงานวิจัยครั้งนี้ เลือกใช้เครื่องทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ดีเซลแบบ สูบเดี่ยวยี่ห้อคูโบต้า ขนาด 10.5 แรงม้า ทดสอบที่ ความเร็วรอบ 2400 รอบ/นาที โดยภาพที่ 3 แสดง ไดอะแกรม และภาพที่ 4 คือ ชุดทดสอบสมรรถนะ



ภาพที่ 3 ไดอะแกรมชุดทดสอบสมรรถนะของ เครื่องยนต์ดีเซลแบบสูบเดี่ยว

ซึ่งมีสมการคำนวณ ดังนี้

- กำลังเบรกของเครื่องยนต์ (Engine brake power)

$$P = \frac{2\pi Tn}{60} \quad (1)$$

เมื่อ P = กำลังเบรกของเครื่องยนต์ (วัตต์)

T = แรงบิด (นิวตันเมตร)

n = รอบของเครื่องยนต์ (รอบ/นาที)

- ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (Fuel Combustion)

$$Q_{mf} = Q_{vf}\rho_f \quad (2)$$

เมื่อ Q_{mf} = ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (กิโลกรัม/วินาที)

Q_{vf} = ปริมาตรของน้ำมันเชื้อเพลิง (ลูกบาศก์ เมตร/วินาที)

ρ_f = ความหนาแน่นน้ำมันเชื้อเพลิง (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)

- อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (Brake specific fuel consumption)

บทความวิจัย (Research Article)

$$Bsfc = \frac{3600Q_{mf}}{P} \quad (3)$$

เมื่อ $Bsfc$ = อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง
จำเพาะเบรค (กิโลกรัม/กิโลวัตต์-
ชั่วโมง)

P = กำลังเบรคของเครื่องยนต์ (กิโลวัตต์)

Q_{mf} = ความสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง
(กิโลกรัม/วินาที)



ภาพที่ 4 ชุดทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ดีเซล
แบบสูบลมเดียว

2.6 การวิเคราะห์แก๊สไอเสียของเครื่องยนต์

งานวิจัยนี้วิเคราะห์การปล่อยไอเสียของ
เครื่องยนต์ด้วยเครื่องวัดและวิเคราะห์ไอเสียรถยนต์
ยี่ห้อ CAPELEC รุ่น CAP-3201-GO มีรายละเอียด
ดังนี้

- แสดงค่า HC 0-20000 PPM
- แสดงค่า CO ร้อยละ 0-5 โดยปริมาตร
- แสดง CO ที่ถูกต้อง: ร้อยละ 0-10 โดยปริมาตร
- แสดงค่า NOX ตั้งแต่ 0-5,000 PPM

- แสดงความเร็วรอบเครื่องยนต์ตั้งแต่ 0-9999
รอบ/นาที

- ความดันบรรยากาศตั้งแต่ 750-1150 มิลลิบาร์

- ตอบสนองต่อการวัดภายใน 5 วินาที

- ได้รับการรับรอง OIML R99 คลาส 0, ISO-
3930 และ BAR97

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

ผลการทดลองของงานวิจัยนี้ แบ่งออกเป็น 4 ส่วน
หลัก คือ ผลวิเคราะห์สมบัติของชีวมวล ผลของ
ปริมาณผลิตภัณฑ์ ผลวิเคราะห์สมบัติของน้ำมัน
ชีวภาพ และผลทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ ดังนี้

3.1 ผลวิเคราะห์สมบัติของชีวมวล

สมบัติของชีวมวลในตาราง 1 จะเห็นว่า ชีวเอเลียมมี
ความชื้นต่ำสุดร้อยละ 5.5 โดยน้ำหนัก แฉ่ำต่ำสุดร้อยละ
9.4 โดยน้ำหนัก สารระเหยสูงที่สุดร้อยละ 83.3
โดยน้ำหนัก และไม่มีน้ำมันและของแข็งปนเปื้อน เมื่อ
ชีวลีเอียมนี้ผ่านการใช้ทำความสะอาดพื้นของโรงกลึง
พบว่า ความชื้นเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 7.8 โดยน้ำหนัก
แฉ่ำเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 11.3 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้สาร
ระเหยลดลงเป็นร้อยละ 81.0 โดยน้ำหนัก นั่นเป็น
เพราะว่า ชีวลีเอียมนี้ปนเปื้อนด้วยน้ำมันร้อยละ 23.1
โดยน้ำหนัก และปนเปื้อนด้วยของแข็งร้อยละ 6.7
โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 1 สมบัติของชีวมวล

การวิเคราะห์	ชีวลีเอียม	ชีวลีเอียม ปนเปื้อน งานวิจัยนี้	ชีวลีเอียม ปนเปื้อน [12]
<i>วิเคราะห์แบบประมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก, ฐานแห้ง)</i>			
ความชื้น	5.5	7.8	6.1
สารระเหย	83.3	81.0	81.6
คาร์บอนคงที่	7.3	7.7	7.2
แฉ่ำ	9.4	11.3	11.2
น้ำมันปนเปื้อน	N/A	23.1	23.7

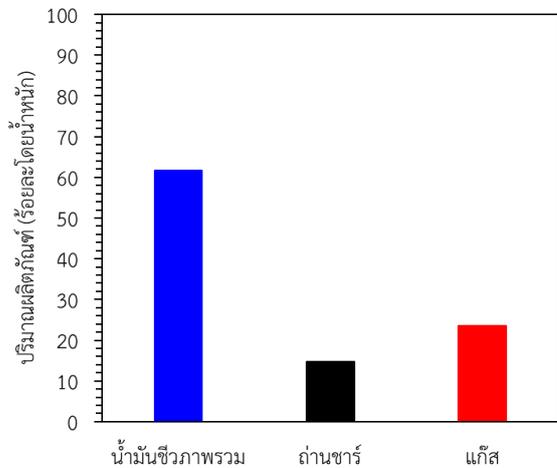
บทความวิจัย (Research Article)

การวิเคราะห์	ซีเลื่อย	ซีเลื่อย ปนเปื้อน งานวิจัยนี้	ซีเลื่อย ปนเปื้อน [12]
ของแข็งปนเปื้อน	N/A	6.7	6.1
ค่าความร้อนสูง (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)			
	17.9	22.9	23.2

เมื่อเปรียบเทียบสมบัติของซีเลื่อยปนเปื้อนจะเห็นว่าซีเลื่อยปนเปื้อนในงานวิจัยนี้มีความชื้นและของแข็งที่สูงกว่าเล็กน้อย มีน้ำมันปนเปื้อนร้อยละ 23.1 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้มีปริมาณสารระเหยต่ำกว่าเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม ซีเลื่อยปนเปื้อนในงานวิจัยนี้ก็มีค่าความร้อนสูงกว่าซีเลื่อยไม่ปนเปื้อนอย่างชัดเจน 5 เมกะจูลต่อกิโลกรัม แสดงให้เห็นว่าน้ำมันที่ปนเปื้อนในซีเลื่อยช่วยเพิ่มค่าความร้อนของชีวมวลได้

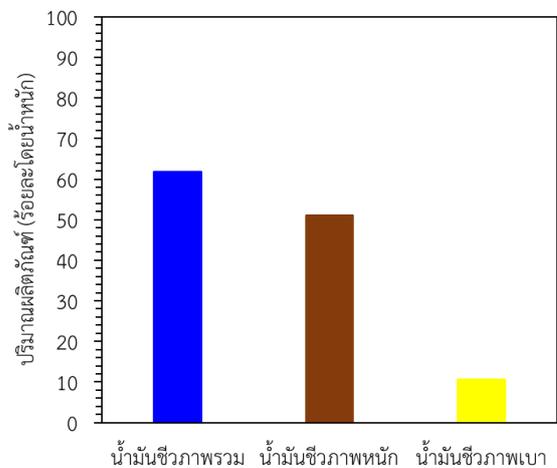
3.2 ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสแบบเร็วของซีเลื่อยปนเปื้อน

ภาพที่ 4 แสดงให้เห็นว่า การไพโรไลซิสแบบเร็วของซีเลื่อยปนเปื้อนในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดที่อัตราการป้อน 1 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อุณหภูมิปฏิกิริยา 500 องศาเซลเซียส มีปริมาณผลได้ของน้ำมันชีวภาพร้อยละ 61.8 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีปริมาณต่ำกว่าประมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เมื่อเทียบกับการไพโรไลซิสในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียนที่อัตราการป้อนชีวมวล 100 กรัม/ชั่วโมง [12] นั่นเป็นเพราะว่าเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ไม่มีระบบกำจัดถ่านชาร์ที่เคลือบบนตัวกลางถ่ายโอนความร้อนระหว่างกระบวนการผลิต ส่งผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อนของตัวกลางลดลงตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นซึ่งเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียนมีระบบกำจัดถ่านชาร์ดังกล่าวจึงช่วยให้มีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนดีกว่า ส่งผลให้ได้ปริมาณน้ำมันชีวภาพสูงกว่า



ภาพที่ 4 ปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์

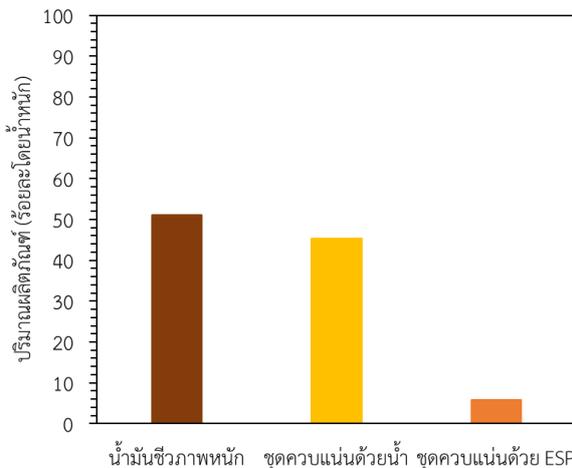
ภาพที่ 5 แสดงให้เห็นว่าน้ำมันชีวภาพหนักจากชุดควบแน่นด้วยน้ำหล่อเย็นและชุดควบแน่นด้วยเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิตย์ คือ สัดส่วนหลักร้อยละ 51.2 โดยน้ำหนัก จากปริมาณน้ำมันชีวภาพรวมร้อยละ 61.8 โดยน้ำหนัก จึงอธิบายได้ว่าชุดควบแน่นทั้งสองมีประสิทธิภาพควบแน่นไอไพโรไลซิสให้กลายเป็นน้ำมันชีวภาพได้ค่อนข้างสมบูรณ์ ขณะที่ปริมาณผลได้น้ำมันชีวภาพเบาจากชุดควบแน่นด้วยน้ำแข็งและเกลือ คือ ร้อยละ 10.6 โดยน้ำหนัก สอดคล้องกับการไพโรไลซิสในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียนที่มีปริมาณผลได้น้ำมันชีวภาพเบาร้อยละ 11 โดยน้ำหนัก [12]



ภาพที่ 5 สัดส่วนของน้ำมันชีวภาพ

บทความวิจัย (Research Article)

น้ำมันชีวภาพหนัก คือ ผลิตภัณฑ์หลักของน้ำมันชีวภาพรวม ซึ่งภาพที่ 6 แสดงให้เห็นว่าชุดควบแน่นด้วยน้ำหล่อเย็นสามารถควบแน่นไอไฟโรไลซิสให้กลายเป็นน้ำมันชีวภาพได้สูงสุดร้อยละ 45.3 โดยน้ำหนัก ขณะที่ชุดควบแน่นด้วยเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิตย์มีปริมาณผลได้ร้อยละ 5.9 โดยน้ำหนักจากปริมาณรวมร้อยละ 51.2 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 6 สัดส่วนของน้ำมันชีวภาพหนัก

ความแตกต่างของปริมาณผลได้น้ำมันชีวภาพจากชุดควบแน่นทั้งสองนี้เป็นผลมาจากไอไฟโรไลซิสมีโมเลกุลขนาดใหญ่ [13] เมื่อถูกลดอุณหภูมิจาก 420 เป็น 30 องศาเซลเซียส ด้วยระบบน้ำหล่อเย็นจึงกลั่นตัวกลายเป็นของเหลวได้ในปริมาณมาก ขณะที่ไอบางส่วนที่ไม่สามารถควบแน่นได้ด้วยชุดนี้มีโมเลกุลขนาดเล็กจึงถูกดักจับด้วยชุดควบแน่นด้วยเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิตย์

3.3 สมบัติของน้ำมันชีวภาพ

น้ำมันชีวภาพหนัก คือ ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากการไฟโรไลซิสแบบเร็วของซีเลื้อยปนเปื้อน โดยตารางที่ 2 แสดงสมบัติของน้ำมันชีวภาพจากชุดควบแน่นด้วยน้ำหล่อเย็นและชุดควบแน่นด้วยเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิตย์ ซึ่งจะเห็นว่าชุดควบแน่นด้วยน้ำหล่อเย็นได้น้ำมันชีวภาพที่มีความหนืดต่ำ จุกวบน้ำ-จุกตืดไฟ

ต่ำ ปริมาณเถ้าต่ำ และความหนาแน่นใกล้เคียงน้ำมันดีเซล

ตารางที่ 2 สมบัติของน้ำมันชีวภาพหนัก

สมบัติ	น้ำมันชีวภาพหนักจาก	น้ำมันชีวภาพ	น้ำมันดีเซล
ค่าความร้อน (เมกะจูล/กิโลกรัม)	ชุดควบแน่นแรก	32.6	42.5
	ชุดควบแน่นสอง	21.6	
ค่าความหนืด (เซนติสโตกร์)	ชุดควบแน่นแรก	7.9	3.39
	ชุดควบแน่นสอง	288.3	
ค่าความหนาแน่น (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)	ชุดควบแน่นแรก	896.8	876.3
	ชุดควบแน่นสอง	1114.7	
จุกวบน้ำ (องศาเซลเซียส)	ชุดควบแน่นแรก	25.3	87.9
	ชุดควบแน่นสอง	130.3	
จุกตืดไฟ (องศาเซลเซียส)	ชุดควบแน่นแรก	26.2	113.4
	ชุดควบแน่นสอง	149.5	
เถ้า (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ชุดควบแน่นแรก	0.1	0.01
	ชุดควบแน่นสอง	0.3	

หมายเหตุ ชุดควบแน่นแรก (ชุดควบแน่นด้วยระบบน้ำหล่อเย็น) ชุดควบแน่นสอง (ชุดควบแน่นด้วยเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิตย์)

นอกจากนี้ น้ำมันชีวภาพจากชุดควบแน่นด้วยน้ำหล่อเย็นยังมีค่าความร้อนสูงกว่าน้ำมันชีวภาพจากชุดควบแน่นด้วยเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิตย์ 11 เมกะจูลต่อกิโลกรัม อีกทั้งมีค่าความร้อนสูงกว่าน้ำมันชีวภาพหนักจากการไฟโรไลซิสแบบเร็วของซีเลื้อยปนเปื้อนด้วยเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียน [12] ประมาณ 1 เมกะจูล/กิโลกรัม ซึ่งใช้ชุดควบแน่นด้วยน้ำหล่อเย็นและเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิตย์รวมกัน ดังนั้น น้ำมันชีวภาพหนักจากชุดควบแน่นด้วยน้ำหล่อเย็นจึงเป็นผลิตภัณฑ์หลักที่ถูกเลือกไปทดสอบใช้งานในเครื่องยนต์

ตารางที่ 3 คือ สมบัติของน้ำมันชีวภาพหนักจากชุดควบแน่นด้วยน้ำหล่อเย็นผสมกับน้ำมันดีเซลในอัตราส่วนต่าง ๆ จะเห็นว่า อัตราส่วนน้ำมันชีวภาพที่ลดลงส่งผลให้ความหนืด ความหนาแน่น และปริมาณเถ้าลดลงอย่างต่อเนื่อง ขณะที่ค่าความร้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและจุกตืดไฟได้ยากขึ้น

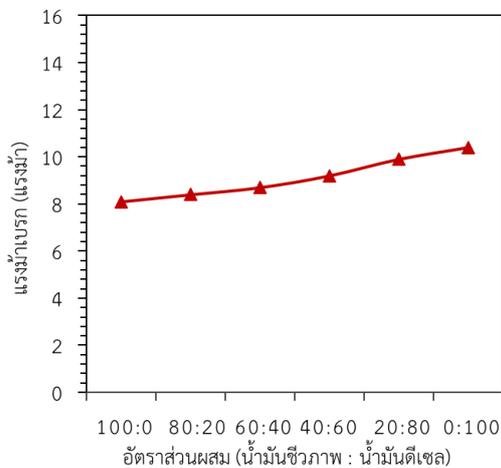
บทความวิจัย (Research Article)

ตารางที่ 3 สมบัติของน้ำมันชีวภาพที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ

สมบัติ	อัตราส่วนน้ำมันชีวภาพต่อน้ำมันดีเซล					
	100:0	80:20	60:40	40:60	20:80	0:100
ค่าความร้อน (เมกะจูล/กิโลกรัม)	32.6	33.4	35.2	38.7	40.1	42.5
ค่าความหนืด (เซนติสโตกรัส)	7.9	7.1	6.4	5.7	4.2	3.9
ค่าความหนาแน่น (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)	896.8	892.4	890.3	884.3	880.7	876.3
จุดวาบไฟ (องศาเซลเซียส)	25.3	38.8	47.4	61.2	72.3	87.9
จุดติดไฟ (องศาเซลเซียส)	26.2	42.5	61.8	81.9	93.2	113.4
เถ้า (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.10	0.10	0.08	0.05	0.02	0.01

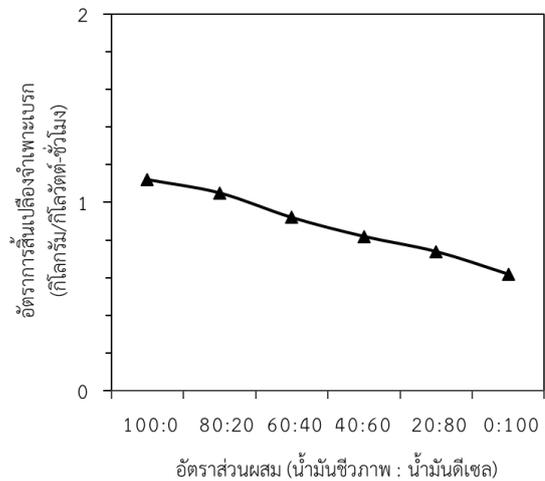
3.4 ผลของอัตราส่วนผสมน้ำมันชีวภาพต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์

ภาพที่ 7 แสดงให้เห็นว่า น้ำมันชีวภาพร้อยละ 100 ให้แรงม้าเบรก 8.1 แรงม้า ขณะที่อัตราส่วนของน้ำมันชีวภาพลดลงส่งผลให้แรงม้าเบรกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเป็น 10.4 แรงม้า เมื่อใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิงร้อยละ 100 ซึ่งแรงม้าเบรกเพิ่มขึ้นสอดคล้องกับค่าความร้อนของเชื้อเพลิงผสมที่เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 7 ผลของอัตราส่วนผสมของน้ำมันชีวภาพต่อแรงม้าเบรก

ภาพที่ 8 แสดงให้เห็นชัดเจนว่าน้ำมันชีวภาพที่มีค่าความร้อนต่ำทำให้แรงม้าเบรกของเครื่องยนต์ลดลง [14] ภาพที่ 8 แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนของน้ำมันชีวภาพที่ลดลงส่งผลให้อัตราการสิ้นเปลืองของน้ำมันเชื้อเพลิงลดลงตามไปด้วย โดยน้ำมันชีวภาพร้อยละ 100 มีอัตราการสิ้นเปลืองจำเพาะเบรกสูงสุด 1.1 กิโลกรัม/กิโลวัตต์-ชั่วโมง เมื่อลดอัตราส่วนของน้ำมันชีวภาพเหลือร้อยละ 0 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกลดลงอย่างต่อเนื่องเป็น 0.6 กิโลกรัม/กิโลวัตต์-ชั่วโมง



ภาพที่ 8 ผลของอัตราส่วนผสมของน้ำมันชีวภาพต่ออัตราการสิ้นเปลืองจำเพาะเบรก

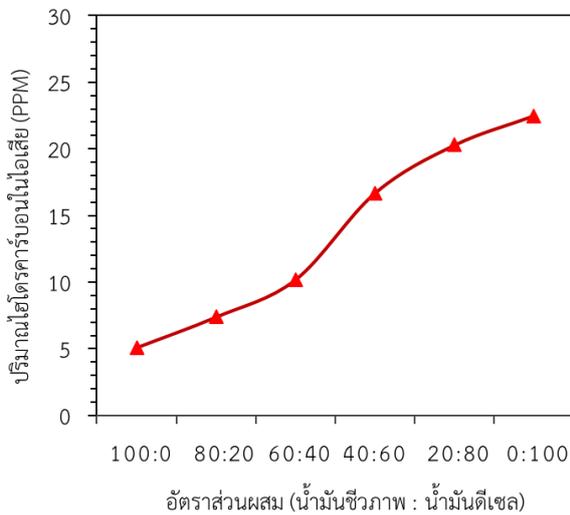
3.5 ผลของอัตราส่วนผสมน้ำมันชีวภาพต่อมลพิษของไอเสีย

ปริมาณไฮโดรคาร์บอนในไอเสียของเครื่องยนต์เกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ส่งผลให้เชื้อเพลิงถูกปล่อยออกทางท่อไอเสียของเครื่องยนต์ โดยปัจจัยที่ทำให้ปริมาณไฮโดรคาร์บอนในไอเสียของเครื่องยนต์เพิ่มขึ้น คือ อุณหภูมิห้องเผาไหม้ต่ำ กำลังอัดต่ำ ส่วนผสมหนาเกินไป หัวฉีดรั่ว หรือการจุดติดไฟในห้องเผาไหม้ไม่ครอบคลุมพื้นที่ ภาพที่ 9 แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนผสมน้ำมันชีวภาพร้อยละ 100 มีปริมาณไฮโดรคาร์บอนในไอเสียต่ำสุด 5.1 PPM ขณะที่การลดอัตราส่วนผสมน้ำมันชีวภาพเหลือร้อยละ 0 ส่งผล

บทความวิจัย (Research Article)

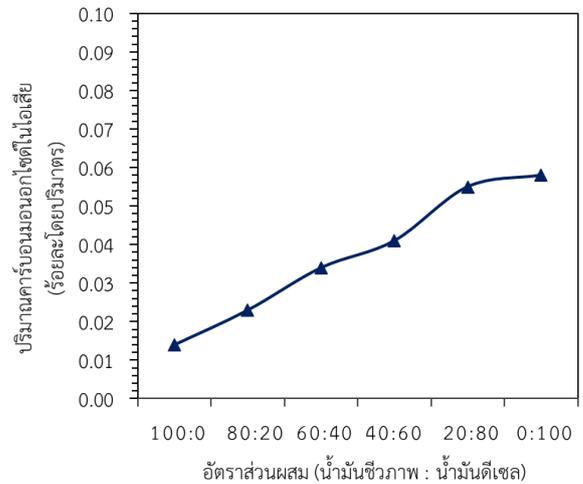
ให้ปริมาณไฮโดรคาร์บอนในไอเสียมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเป็น 22.5 PPM

แสดงให้เห็นว่าน้ำมันชีวภาพช่วยลดปริมาณไฮโดรคาร์บอนในไอเสียได้ดีกว่าถึง 4 เท่า นั้นเป็นเพราะว่าน้ำมันชีวภาพสามารถติดไฟได้ที่อุณหภูมิต่ำ จึงอาจมีส่วนผสมของน้ำมันเบนซินที่เปื้อนตามพื้นของโรงกลึงติดมาด้วย เมื่อไฟโรไลซิสไอน้ำมันเบนซินจึงถูกควบแน่นรวมกับน้ำมันชีวภาพ การนำน้ำมันชีวภาพนี้ไปเผาไหม้ในเครื่องยนต์จึงช่วยให้การเผาไหม้เกิดขึ้นได้สมบูรณ์ครอบคลุมพื้นที่มากขึ้น



ภาพที่ 9 ผลของอัตราส่วนผสมของน้ำมันชีวภาพต่อปริมาณไฮโดรคาร์บอนในไอเสียเครื่องยนต์

การเผาไหม้ที่สมบูรณ์ช่วยให้มลพิษของแก๊สไอเสียลดลง [15] โดยภาพที่ 10 แสดงให้เห็นว่าน้ำมันชีวภาพช่วยให้ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลง ซึ่งเกิดจากการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ภายในกระบอกสูบ

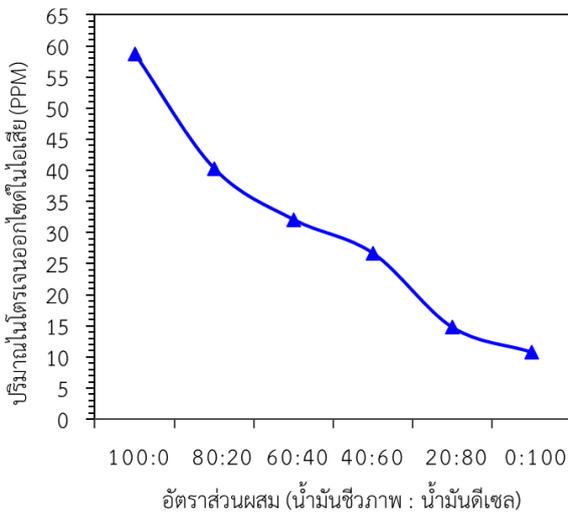


ภาพที่ 10 ผลของอัตราส่วนผสมของน้ำมันชีวภาพต่อปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ในไอเสียเครื่องยนต์

อัตราส่วนผสมของน้ำมันชีวภาพร้อยละ 100 มีปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ในไอเสียต่ำสุดร้อยละ 0.014 โดยปริมาตร เมื่อลดอัตราส่วนผสมของน้ำมันชีวภาพลงเป็นร้อยละ 0 ทำให้คาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเป็นร้อยละ 0.058 โดยปริมาตร ซึ่งโดยทั่วไปปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ในไอเสียเครื่องยนต์ไม่ควรเกินร้อยละ 1 โดยปริมาตร [16] ที่อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง (14.5:1)

ไนโตรเจนออกไซด์ในไอเสียของเครื่องยนต์เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ที่สมบูรณ์ภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่สูงกว่า 1,700 องศาเซลเซียส [17] ภาพที่ 11 แสดงให้เห็นว่าน้ำมันชีวภาพจากซีเลื้อยปนเปื้อนช่วยให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ภายในห้องเผาไหม้เพราะมีปริมาณไนโตรเจนออกไซด์สูงสุด 58.7 PPM เมื่อลดส่วนผสมของน้ำมันชีวภาพปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ลดลงอย่างต่อเนื่องเป็น 10.8 PPM ที่อัตราส่วนผสมน้ำมันชีวภาพร้อยละ 0

บทความวิจัย (Research Article)



ภาพที่ 11 ผลของอัตราส่วนผสมของน้ำมันชีวภาพต่อปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ในไอเสียเครื่องยนต์

จึงสรุปได้ว่าน้ำมันชีวภาพช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ได้สมบูรณ์ส่งผลให้มลพิษในไอเสียลดลง

4. สรุปผล

การไพโรไลซิสแบบเร็วของขี้เลื่อยป่นเปื้อนในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดที่อัตราการป้อนชีวมวล 1 กิโลกรัม/ชั่วโมง และอุณหภูมิปฏิกิริยา 500 องศาเซลเซียส พบว่า มีปริมาณผลได้ของน้ำมันชีวภาพร้อยละ 61.8 โดยน้ำหนัก โดยน้ำมันชีวภาพหลักที่ได้มาจากชุดควบแน่นด้วยน้ำหล่อเย็นร้อยละ 45.3 โดยน้ำหนัก ผลวิเคราะห์สมบัติ พบว่า น้ำมันชีวภาพนี้มีค่าความร้อน 32.6 เมกะจูล/กิโลกรัม ความหนืด 7.9 เซนติสตรอกซ์ จุดติดไฟที่ 26.2 องศาเซลเซียส การเพิ่มสัดส่วนของน้ำมันชีวภาพในเชื้อเพลิงมากขึ้น ทำให้ค่าความร้อนลดลง ค่าความหนืดเพิ่มขึ้น และอุณหภูมิจุดติดไฟลดลง

ผลการทดสอบน้ำมันชีวภาพในเครื่องยนต์ พบว่าปริมาณน้ำมันชีวภาพที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้แรงม้าเบรกลดลงและอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเพิ่มขึ้น แต่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ได้อย่างสมบูรณ์ส่งผลให้ปริมาณไฮโดรคาร์บอนและคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลงอย่างชัดเจน จึงควรต่อ

ยอดงานวิจัยนี้เพื่อประยุกต์ใช้น้ำมันชีวภาพในเครื่องยนต์เพื่อศึกษาสมรรถนะในระยะยาว หรือภาวะโหลดที่แตกต่างกันต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยประจำปีงบประมาณ 2562-2563 จากมหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ รหัสข้อเสนอโครงการ 59845 สัญญาเลขที่ 005/2019 และรหัสข้อเสนอโครงการ 14912 สัญญาเลขที่ กท. 012/2020

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. V. Bridgwater, D. Meier, and D. Radlein, "An overview of fast pyrolysis of biomass," *Organic Geochemistry*, vol. 30, no. 12, pp. 1479-1493, 1999.
- [2] K. Duanguppama, N. Pannucharoenwong, S. Echaroj, L. K. H. Pham, C. Samart, and P. Rattanadecho, "Integrated catalytic pyrolysis and catalytic upgrading of *Leucaena leucocephala* over natural catalysts," *Journal of the Energy Institute*, vol. 106, p. 101155, 2023.
- [3] K. Duanguppama, N. Pannucharoenwong, S. Echaroj, C. Turakarn, K. Chaipheth, and P. Rattanadecho, "Processing of *Leucaena leucocephala* for renewable energy with catalytic fast pyrolysis," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 466-479, 2022.
- [4] K. Duanguppama, K. Rueangsan, P. Kraisoda, and C. Turakarn, "The effect of catalyst on the heating value and energy yield from the fast pyrolysis of *leucaena leucocephala*," *Udon thani rajabhat university journal of sciences and*

บทความวิจัย (Research Article)

- technology*, vol. 5, no. 1, pp. 97-111, 2017.
- [5] K. Duanguppama *et al.*, "Catalytic Fast Pyrolysis of *Leucaena Leucocephala* in Fluidised-bed Reactor with In-situ and Ex-situ Vapors Upgrading," *TSME International Conference on Mechanical Engineering*, vol. 7th, p. 170, 2016.
- [6] M. Zhang and H. Wu, "Stability of emulsion fuels prepared from fast pyrolysis bio-oil and glycerol," *Fuel*, vol. 206, pp. 230-238, 2017.
- [7] K. Rueangsan, A. Heman, P. Kraisoda, H. Tasarod, K. Duanguppama, and J. Morris, "Bio-oil production via fast pyrolysis of cassava residues combined with ethanol and volcanic rock in a free-fall reactor," *Cogent Engineering*, vol. 10, 2022.
- [8] A. G. Margellou *et al.*, "Catalytic fast pyrolysis of beech wood lignin isolated by different biomass (pre)treatment processes: Organosolv, hydrothermal and enzymatic hydrolysis," *Applied Catalysis A: General*, vol. 623, p. 118298, 2021.
- [9] N. Promsampo, N. Chollacoop, and A. Pattiya, "Effect of low-temperature hydrothermal treatment of HZSM-5 extrudates on the production of deeply-deoxygenated bio-oil via ex-situ catalytic fast pyrolysis of biomass," *Fuel*, vol. 324, p. 124627, 2022.
- [10] W. Cai *et al.*, "Synergetic effects in the co-pyrolysis of lignocellulosic biomass and plastic waste for renewable fuels and chemicals," *Fuel*, vol. 353, p. 129210, 2023.
- [11] A. Abdullahi Shagali *et al.*, "Synergistic interactions and co-pyrolysis characteristics of lignocellulosic biomass components and plastic using a fast heating concentrating photothermal TGA system," *Renewable Energy*, vol. 215, p. 118936, 2023.
- [12] K. Duanguppama, N. Suwapaet, and A. Pattiya, "Fast pyrolysis of contaminated sawdust in a circulating fluidised bed reactor," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 118, pp. 63-74, 2016.
- [13] J. Wang, S. Zhang, M. Chen, Y. Feng, and H. Zhang, "Fractional condensation of pyrolysis oil from fast pyrolysis of food waste digestate for enrichment of high value-added nitrogen-containing components," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 166, p. 105609, 2022.
- [14] K. Midhun Prasad and S. Murugavelh, "Experimental investigation and kinetics of tomato peel pyrolysis: Performance, combustion and emission characteristics of bio-oil blends in diesel engine," *Journal of Cleaner Production*, vol. 254, p. 120115, 2020.
- [15] T. Hassan, M. M. Rahman, A. R. Adib, R. M. Meraz, M. A. Rahman, and M. S. H. K. Tushar, "Effect of Ni and Al nanoadditives on the performance and emission characteristics of a diesel engine fueled with diesel-castor oil biodiesel-n-butanol blends," *Case Studies in Chemical and*

บทความวิจัย (Research Article)

Environmental Engineering, p. 100531,
2023.

- [16] D. Singh and A. Paul, "Energy, exergy, emission, exergoeconomic, enviroeconomic, and sustainability analysis of diesel engine, fueled by waste cooking oil and waste polyethylene co-pyrolysis oil-diesel blends," *Journal of Cleaner Production*, vol. 426, p. 139186, 2023.
- [17] S. Gowthaman and K. Thangavel, "Performance, emission and combustion characteristics of a diesel engine fuelled with diesel/coconut shell oil blends," *Fuel*, vol. 322, p. 124293, 2022.