บทความวิจัย

อิทธิพลขององศาการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงต่อสมรรถนะ การเผาไหม้ และมลพิษของเครื่องยนต์ดีเซลโดยใช้เชื้อเพลิงดีเซลผสมน้ำมันไพโรไลซิสจากพลาสติก

อนุชา ครุฑธาพันธ์ และ วรรธนะ เชาวน์สินธุ
ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องต้นกำลัง วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

กัมปนาท เทียนน้อย และ ชลกาญจน์ วงศ์ก่อทรัพย์*
ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องต้นกำลัง วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการเผาไหม้และพลังงานทางเลือก สำนักวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0 2555 2000 ต่อ 6427 อีเมล: chonlakarn.w@cit.kmutnb.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.11.002
รับเมื่อ 7 กุมภาพันธ์ 2563 แก้ไขเมื่อ 27 พฤษภาคม 2563 ตอบรับเมื่อ 17 กันยายน 2563 เผยแพร่ออนไลน์ 2 พฤศจิกายน 2564
© 2022King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เพื่อศึกษาอิทธิพลขององศาการฉีดของน้ำมันเชื้อเพลิงที่เหมาะสมสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้น้ำมันไพโรไลซิสจากพลาสติกเป็นเชื้อเพลิง น้ำมันไพโรไลซิสถูกกลั่นในกระบวนการโดยไม่ผ่านการปรับแต่งคุณภาพ อัตราส่วนน้ำมันดีเซล (B7) ผสมกับน้ำมันไพโรไลซิสที่ 50 : 50, 60 : 40, 70 : 30, 80 : 20 และ 90 : 10 โดยนำมาทดสอบความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาที และภาระงานของเครื่องยนต์ 50% คงที่ โดยทำการปรับเปลี่ยนองศาการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงที่ –15.5, –16.5 และ –17.5 องศาเพลาข้อเหวี่ยง (Crank Angle Degree; CAD) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของเครื่องยนต์ โดยงานวิจัยพบว่า เมื่ออัตราส่วนผสมน้ำมันไพโรไลซิสในน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลที่สูงขึ้นสำหรับเครื่องยนต์ที่ไม่ได้ปรับแต่ง ส่งผลให้เกิดความล่าช้าในการฉีดของน้ำมันผสม ดังนั้นการปรับตั้งการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงที่ –16.5 องศาเพลาข้อเหวี่ยง (CAD) ช่วยปรับปรุงการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสมน้ำมันไพโรไลซิสให้ดีขึ้น โดยที่อัตราส่วนผสมของน้ำมันไพโรไลซิสผสมดีเซลที่ 60 : 40 เป็นอัตราส่วนเหมาะสมที่สุด โดยพิจารณาจากประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงขึ้น และมีอัตราความสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงจำเพาะที่ดีที่สุดโดยการปลดปล่อยมลพิษที่ลดลง ดังนั้นการปรับแต่งองศาการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับน้ำมันไพโรไลซิสที่มีอัตราส่วนผสมจึงมีความจำเป็นเพื่อให้เครื่องยนต์มีประสิทธิภาพสูงสุด

คำสำคัญ: เครื่องยนต์ดีเซล การปรับตั้งองศาการฉีด น้ำมันไพโรไลซิสจากพลาสติก น้ำมันดีเซล

การอ้างอิงบทความ: อนุชา ครุฑธาพันธ์, วรรธนะ เชาวน์สินธุ์, กัมปนาท เทียนน้อย และ ชลกาญจน์ วงศ์ก่อทรัพย์, "อิทธิพลขององศาการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงต่อสมรรถนะ การเผาไหม้ และมลพิษของเครื่องยนต์ดีเซลโดยใช้เชื้อเพลิงดีเซลผสมน้ำมันไพโรไลซิสจากพลาสติก," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 32, ฉบับที่ 2, หน้า 375–385, เม.ย.–มิ.ย. 2565.

วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 32, ฉบับที่ 2 เม.ย.–มิ.ย. 2565
The Journal of KMUTNB., Vol. 32, No. 2, Apr.–Jun. 2022

Research Article

Influence of Injection Timing on Performance, Combustion and Emission Characteristics from Diesel Engine Fueled with Diesel-plastic Pyrolysis Oil Blends

Anucha Kruttapun and Wantana Chaowasin
Department of Power Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand
Kampanart Theinnoi and Chonlakarn Wongkhorsub*
Department of Power Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand
Research Centre for Combustion and Alternative Energy (CTAE), Science and Technology Research Institute, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 0 2555 2000 Ext. 6427, E–mail: chonlakarn.w@cit.kmutnb.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.11.002
Received 7 February 2020; Revised 27 May 2020; Accepted 17 September 2020; Published online: 2 November 2021
© 2022King Mongkut’s University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

The objective of this research is to study the influence of the injection timing of plastic pyrolysis oil fuel blended with diesel-B7 that is suitable for diesel engine. The plastic pyrolysis oil was processes by a commercial plant oil without any fuel additive. The experiment fuels were the blend of diesel-B7 and pyrolysis oil at the ratio of 50 : 50, 60 : 40, 70 : 30, 80 : 20 and 90 : 10. The research condition were operated by a single cylinder diesel engine, at 50% load of the maximum workload, engine speed at 1,500 rpm. In addition, the injection timing were varied at –15.5, –16.5 and –17.5 Crank Angle Degree (CAD) in order to obtain the optimum injection timing for blended fuel. The result showed that the ratio of pyrolysis oil effects the ignition delay. Therefore, the adjustment of injection timing at –16.5 CAD enhances the combustion performance. The 60 : 40 fuel blended is the most suitable blended ratio for the engine performance by considering the combustion performance and the Brake specific fuel consumption; the emission is also reduced. Consequently, the injection timing adjustment is necessary to obtain best engine performance.

Keywords: Diesel Engine, Injection Timing Adjustment, Plastic Pyrolysis Oil, Diesel Fuel

Please cite this article as: A. Kruttapun, W. Chaowasin, K. Theinnoi, and C. Wongkhorsub, “Influence of injection timing on performance, combustion and emission characteristics from diesel engine fueled with diesel-plastic pyrolysis oil blends,” *The Journal of KMUTNB*, vol. 32, no. 2, pp. 375–385, Apr.–Jun. 2022 (in Thai).

1. บทนำ

ปัญหาจากการทิ้งขยะพลาสติก และการกำจัดขยะพลาสติกที่ไม่ถูกวิธีในปัจจุบันเป็นผลทำให้เกิดมลพิษกับสิ่งแวดล้อม ปริมาณขยะพลาสติกส่งผลกับระบบนิเวศน์ทั้งบนพื้นดิน และในทะเล จากรายงานสถานการณ์มลพิษประเทศไทยปี 2561 ในปริมาณขยะมูลฝอย 27.93 ล้านตันเป็นขยะพลาสติกมากกว่า 2 ล้านตัน [1] จากปัญหาดังกล่าวทางภาครัฐดำเนินการกำหนดมาตรการส่งเสริมการลดใช้ถุงพลาสติก และการรีไซเคิลอย่างมีประสิทธิภาพเพื่อลดการสร้างขยะจากพลาสติก แต่อย่างไรก็ตาม สังคมต้องใช้เวลาเพื่อเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการใช้ถุงพลาสติกทำให้ไม่สามารถงดการใช้ถุงพลาสติกอย่างสิ้นเชิงโดยเร็ว ดังนั้นกระบวนการกำจัด และเพิ่มมูลค่าของขยะพลาสติกที่ถูกวิธีจึงมีการศึกษาพัฒนา กอปรกับปัญหาผันผวนของพลังงานซึ่งประเทศต้องพึ่งพาการนำเข้าโดยเฉพาะเชื้อเพลิงปิโตรเลียม ดังนั้นความพยายามในการพัฒนาเชื้อเพลิงทางเลือกมาทดแทนเชื้อเพลิงปิโตรเลียม การนำขยะพลาสติกมาเปลี่ยนเป็นเชื้อเพลิงด้วยกระบวนการความร้อน ทำให้เกิดการสลายตัวของโครงสร้างพลาสติก (Depolymerization) ภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่กำหนดโดยปราศจากออกซิเจน หรือกระบวนการไพโรไลซิส จึงเป็นทางเลือกที่ถูกพัฒนาขึ้น

กระบวนการไพโรไลซิส เป็นกระบวนการทางความร้อนที่เปลี่ยนรูปสารประกอบไฮโดรคาร์บอนต่างๆ ให้กลายเป็นของเหลว โดยปราศจากออกซิเจน ของเหลวที่ได้จากกระบวนการนั้นเป็นเชื้อเพลิงซึ่งควรปรับแต่งคุณภาพของน้ำมันก่อนจะนำมาใช้งานในเครื่องยนต์ [2] ซึ่งข้อดีของกระบวนการนี้คือการเปลี่ยนรูปเชื้อเพลิงจากของแข็งให้กลายเป็นของเหลวซึ่งสามารถนำมาปรับสภาพใช้กับเครื่องยนต์หรือหม้อไอน้ำโดยตรง ซึ่งวัตถุดิบที่เหมาะสมสามารถใช้ได้ทั้งวัสดุชีวมวล ยางรถยนต์ และขยะพลาสติก น้ำมันจากกระบวนการไพโรไลซิสจากขยะพลาสติกมีค่าพลังงานความร้อนสูงสุด (HHV) ที่ 46 MJ และองค์ประกอบทางเคมีใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล [3] อัตราการผลิตของน้ำมันไพโรไลซิสจากพลาสติกอยู่ที่ 1 ลิตรต่อปริมาณขยะพลาสติก 2 กิโลกรัม [4] ทั้งนี้กระบวนการไพโรไลซิสน้ำมันได้มีการพัฒนาเพื่อกำจัดขยะพลาสติก และผลิตน้ำมันในเชิงพาณิชย์แล้ว น้ำมันที่ได้ส่วนมากใช้ทดแทนน้ำมันเตา หรือนำส่งโรงกลั่นเพื่อผสมกับน้ำมันปิโตรเลียมกลั่นอีกครั้งโดยได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน ในการชดเชยราคาน้ำมันไพโรไลซิสให้มีการรับซื้อจากโรงกลั่นที่ 18 บาทต่อลิตร เพื่อสนับสนุนให้เกิดการจัดการขยะในชุมชน [5] ทั้งนี้ในทางปฏิบัติโรงงานชุมชนเหล่านี้เกิดปัญหาในเรื่องผู้รับซื้อน้ำมัน และการขนส่งไปยังโรงกลั่น แนวคิดเพื่อให้เกิดความยั่งยืนในระบบคือการนำน้ำมันไพโรไลซิสมาใช้โดยตรงกับเครื่องยนต์ขนาดเล็กจึงเกิดขึ้น อย่างไรก็ตาม ในการใช้งานจำเป็นต้องมีการศึกษาทดลองอัตราส่วนผสม ที่เหมาะสมกับการใช้งานและมลพิษทิเกิดขึ้น เนื่องจากขยะพลาสติกที่เกิดขึ้นจากชุมชนมาจากพลาสติกหลากชนิด โดยอัตราส่วนต่างกัน ทั้งนี้คุณภาพของน้ำมันไพโรไลซิสพลาสติกขึ้นอยู่กับปัจจัยของขยะ และอุณหภูมิการกลั่นของเครื่องไพโรไลซิส ซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพเผาไหม้ และการเกิดมลพิษ มีการศึกษาประสิทธิภาพเผาไหม้และการเกิดมลพิษ ของน้ำมันไพโรไลซิสจากขยะพลาสติกซึ่งกลั่นในช่วงอุณหภูมิ 300–400 องศาเซลเซียส พบว่าการปรับตั้งองศาการฉีดให้ล่าช้า (Retarded Injection Timing) ให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกเพิ่มขึ้น และการปลดปล่อยมลพิษที่ลดลงเมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซล ในขณะที่ปริมาณควันดำมีปริมาณที่สูงขึ้นตามภาระงานที่สูงขึ้น [6]

การศึกษางานวิจัยจึงแบ่งเป็น 2 ส่วน คือการทดสอบน้ำมันผสมกับเครื่องยนต์ที่ไม่ได้ทำการปรับตั้งองศาการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงที่ 15.5 องศาเพลาข้อเหวี่ยง (Crank Angle Degree; CAD) โดยอัตราส่วนน้ำมันดีเซล (B7) ผสมกับน้ำมันไพโรไลซิสโดยปริมาตร เท่ากับ 50 : 50, 60 : 40, 70 : 30, 80 : 20 และ 90 : 10 นำมาทดสอบความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาที และภาระงานของเครื่องยนต์คงที่ 50% เพื่อศึกษาลักษณะการจุดระเบิด กำลังอัดเครื่องยนต์ การปลดปล่อยความร้อน สมรรถนะเครื่องยนต์ และมลภาวะที่เกิดขึ้น จากนั้นจึงวิจัยทดสอบการปรับตั้งเครื่องยนต์ที่องศาการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงที่ –16.5 และ –17.5 องศาเพลาข้อเหวี่ยง (CAD) เพื่อศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงองศาการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงที่เหมาะสมของเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้น้ำมันดีเซลผสม

กับน้ำมันไพโรไลซิสจากพลาสติกที่ส่งผลต่อสมรรถนะ และปริมาณการปลดปล่อยมลพิษ เปรียบเทียบกับก่อนการปรับตั้งเพื่อการใช้น้ำมันไพโรไลซิสด้วยประสิทธิภาพสูงสุดและลดมลภาวะที่เกิดขึ้น และเป็นแบบอย่างการใช้งานกับเครื่องยนต์ขนาดเล็กต่อไป

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 น้ำมันไพโรไลซิสพลาสติก

น้ำมันไพโรไลซิสพลาสติกที่ใช้ในการวิจัยนำมาจากโรงงานต้นแบบนวัตกรรมเครื่องกำจัดขยะพลาสติกเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงทดแทน จากบริษัท ซินฮวดเฮงนวัตกรรม จำกัด จังหวัดสุรินทร์ ซึ่งวัตถุดิบเป็นขยะพลาสติกจากชุมชนที่ผ่านการคัดแยกแล้ว มีองค์ประกอบหลักเป็น พอลิเอทิลีน (Polyethylene; PE) พอลิโพรพิลีน (Polypropylene; PP) และพอลิสไตรีน (Polystyrene; PS) ตามสัดส่วนผันผวนไปเนื่องจากเป็นขยะ ซึ่งพลาสติก 3 ชนิดหลักนี้ เป็นชนิดที่เมื่อผ่านกระบวนการไพโรไลซิสแล้ว มีศักยภาพใช้ทดแทนน้ำมันดีเซล และควรผ่านการปรับปรุงคุณภาพ เช่น การกลั่นลำดับส่วน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ และคุณสมบัติเชื้อเพลิง [7], [8] โดยเครื่องไพโรไลซิสนี้มีกำลังการผลิตน้ำมัน 1,000 ลิตรต่อวัน ใช้วัตถุดิบขยะพลาสติก 1.5 ตันต่อวัน โดยมีการนำขยะพลาสติกไปบดและอัดเป็นแท่งขนาดเล็ก ขนาดไม่เกิน 10 เซนติเมตร ก่อนนำเข้าระบบเพื่อลดขนาดพลาสติก ระบบทำงานที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส แปรสภาพพลาสติกเป็นไอและของเหลวก่อนส่งต่อสู่ระบบการควบแน่น และปรับปรุงคุณภาพ ทั้งนี้น้ำมันไพโรไลซิสพลาสติกจะถูกกลั่นในช่วงอุณหภูมิ 250–400 องศาเซลเซียส เพื่อให้ได้น้ำมันไพโรไลซิสที่คุณสมบัติเทียบเท่าน้ำมันดีเซล น้ำมันที่ได้นำมาใช้ทดแทนน้ำมันเตา และใช้งานกับเครื่องยนต์ขนาดเล็ก โดยผสมกับน้ำมันดีเซล B7 ในอัตราส่วนผสมต่างๆ ในการทดสอบ ได้รับความอนุเคราะห์น้ำมันจากโรงงาน 3 ครั้ง ครั้งละ 20 ลิตร เพื่อนำมาผสมทดสอบและวิเคราะห์คุณภาพ

2.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติน้ำมันไพโรไลซิสพลาสติก

น้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จากโรงงานต้นแบบ ถูกนำมาผสมกับน้ำมันดีเซล B7 จากสถานีบริการน้ำมันบางจาก ในสัดส่วนอัตราส่วนน้ำมันดีเซล B7 ผสมกับน้ำมันไพโรไลซิสพลาสติกที่ 50 : 50 (P50), 60 : 40 (P40), 70 : 30 (P30), 80 : 20 (P20), และ 90 : 10 (P10) โดยปริมาตร โดยมีทั้งน้ำมันดีเซล B7 และน้ำมันไพโรไลซิส 100% (P100) เป็นน้ำมันอ้างอิง น้ำมันทั้งหมดส่งตรวจวิเคราะห์คุณสมบัติตามมาตรฐาน ASTM โดยฝ่ายเทคนิคและความปลอดภัย อาชีวอนามัยสิ่งแวดล้อม บริษัท บางจากคอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน) รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 1

2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและหลักการคำนวณของงานวิจัย

2.3.1 กำลังเครื่องยนต์ (Engine Power) ดังสมการที่ (1)

$$P = \frac{2\pi nT}{60 \times 1000} \tag{1}$$

2.3.2 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเบรกจำเพาะ (Brake Specific Fuel Consumption; BSFC)

อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเบรกจำเพาะเป็นค่าเปรียบเทียบของเครื่องยนต์ระหว่างความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงต่อกำลังของเครื่องยนต์มีหน่วยเป็น กิโลกรัม/กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง ดังสมการที่ (2)

ตารางที่ 1 คุณสมบัติเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลองและเชื้อเพลิงอ้างอิง

Property	Test Method	Diesel (B7)	P10	P20	P30	P40	P50	P100
HHV (kJ/kg)	ASTM D5865	44912	44820	44729	44637	44546	44455	43998
Density@15°C (g/cm^3)	ASTM D341	0.8289	0.8332	0.8285	0.8246	0.8209	0.8155	0.7890
Flash point (°c)	ASTM D93	63	53	41	38	35	30	17
Viscosity@40°C (mm^2/s)	ASTM D445	3.416	3.081	2.795	2.585	2.408	2.189	1.68
Cetane index	ASTM 976	60	58	57	57	56	55	48

$$BSFC = \frac{\dot{m}_f}{P} \quad (2)$$

2.3.3 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก (Brake Thermal Efficiency; η_{th})

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกเป็นการพิจารณาเพื่อศึกษาความสามารถในการเปลี่ยนความร้อนที่ได้รับจากกระบวนการเผาไหม้เปลี่ยนเป็นพลังงานกล ดังสมการที่ (3)

$$\eta_{th} = \frac{1000}{BSFC \cdot Q_{HV} .3600} \times 100 \quad (3)$$

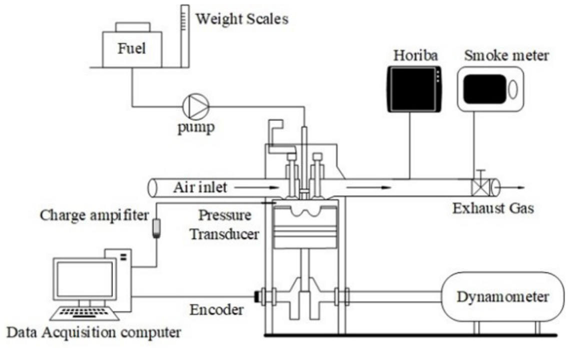
เมื่อ P คือ กำลังเครื่องยนต์ (kW)
n คือ ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ (rpm)
T คือ แรงบิด (N.m)
$\dot{m}_f$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง (g/hr)
G_{HV} คือ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (MJ/kg)

2.4 อุปกรณ์ศึกษาสมรรถนะและการปลดปล่อยมลพิษ

การศึกษาสมรรถนะเครื่องยนต์ทดสอบโดยใช้เครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กหนึ่งสูบ 4 จังหวะ YANMAR L100V รายละเอียดดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณสมบัติเครื่องยนต์

เครื่องยนต์	YANMAR L100V
ชนิดเครื่องยนต์	ดีเซล 4 จังหวะ
ระบบระบายความร้อน	ระบายความร้อนด้วยอากาศ
จำนวนกระบอกสูบ	1 สูบ
กระบอกสูบ × ช่วงชัก	86 × 76 มิลลิเมตร
ชนิดการฉีดเชื้อเพลิง	ฉีดเชื้อเพลิงแบบตรง
ปริมาตรกระบอกสูบ	0.435 ลิตร
อัตราส่วนการอัด	21.2 : 1
กำลังสูงสุด	6.8 kW@3600RPM
จังหวะการฉีดเชื้อเพลิง	15.5 CA BTDC



รูปที่ 1 แผนผังอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ

ติดตั้งบนแท่นทดสอบและต่อเข้ากับไดนาโมมิเตอร์แบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Eddy Current Engine Dynamometer) เพื่อควบคุมภาระงานของเครื่องยนต์ที่ทดสอบ สำหรับการวัดความดันในกระบอกสูบจะใช้อุปกรณ์วัดความดัน (Pressure Transducer) ที่ติดตั้งอยู่ที่ฝาสูบของเครื่องยนต์และใช้ Shaft Encoder วัดตำแหน่งองศาเพลาข้อเหวี่ยงซึ่งจะส่งสัญญาณไปที่ Charge Amplifier เพื่อขยายสัญญาณ และแปลงสัญญาณไฟฟ้าให้เป็นค่าความดันพร้อมเก็บข้อมูลด้วยโปรแกรมวิเคราะห์และเก็บข้อมูลที่พัฒนาภายใต้โปรแกรม Labview เพื่อนำมาคำนวณเป็นค่าความดันภายในกระบอกสูบและอัตราการปลดปล่อยความร้อน ในส่วนการวัดค่าอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันจะใช้การวัดเป็นอัตราการไหลเชิงมวลโดยทำการเก็บข้อมูลทุกวินาทีเป็นเวลา 1 นาที แล้วหาค่าเฉลี่ยดังแสดงในรูปที่ 1แผนผังอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ

ส่วนเครื่องมือทดสอบการปลดปล่อยมลพิษจากการเผาไหม้ยี่ห้อ Horiba รุ่น MEXA 584L ใช้วัดปริมาณไฮโดรคาร์บอนโดยมีหลักการทำงานด้วยวิธี Non – Dispersive Infra-Red (NDIR) ปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ด้วยวิธีการวัดด้วยวิธี Chemiluminescence และออกซิเจนวัดด้วยวิธี Electrochemical ซึ่งค่าที่วัดได้นั้นจะเชื่อมต่อกับซอฟต์แวร์ของระบบคอมพิวเตอร์เพื่อบันทึกผล และวัดปริมาณควันดำโดยเครื่องมือที่วัดระดับควันดำ (Smoke Meter) โดยค่าที่วัดได้จะเป็นค่าระดับความเข้มของแสงที่ผ่านได้ตั้งแต่ 0 ถึง 100 ตามปริมาณความเข้มของควันดำจากน้อยไปหามากตามลำดับ

2.5. เงื่อนไขการทดสอบและการปรับตั้งองศาการฉีด

ในการทดสอบนี้ทดสอบที่ภาระงาน 50% ของภาระงานสูงสุดของเครื่องยนต์ ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ที่ 1,500 รอบต่อนาที โดยเบื้องต้นทดสอบที่องศาการฉีดมาตรฐานของเครื่องยนต์ที่ 15.5 องศาก่อนศูนย์ตายบน โดยใช้น้ำมันดีเซล B7 ทดสอบในอัตราส่วนผสมของน้ำมันระหว่างน้ำมันดีเซล B7 กับน้ำมันไพโรไลซิส ที่ 50 : 50 (P50), 60 : 40 (P40), 70 : 30 (P30), 80 : 20 (P20) และ 90 : 10 (P10) เปรียบเทียบน้ำมันดีเซล B7 จากนั้นปรับแต่งองศาการฉีดที่เร็วขึ้น 1 องศา (–16.5 CAD) และ 2 องศา (–17.5 CAD) โดยยังคงทดสอบน้ำมันในอัตราส่วนเดิมซึ่งจะเปลี่ยนแปลงแค่การปรับตั้งองศาการฉีดเท่านั้น โดยการปรับเปลี่ยนองศาการฉีดนั้นสามารถปรับเปลี่ยนความหนาของแผ่นชิม (Shim) ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานจากโรงงานผู้ผลิตเครื่องยนต์ ที่ติดตั้งอยู่ระหว่างปั๊มกลไกน้ำมันเชื้อเพลิง และเสื้อสูบ โดยแต่ละความหนาของแผ่นชิมที่เปลี่ยนไป 0.1 มิลลิเมตร จะส่งผลให้องศาการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงเปลี่ยนไป 1 CAD [9]

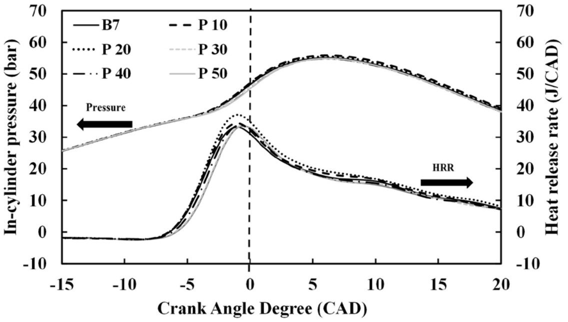
3. ผลการทดลอง

3.1 อิทธิพลของน้ำมันไพโรไลซิสที่ส่งผลต่อความดันในกระบอกสูบและการปลดปล่อยความร้อน

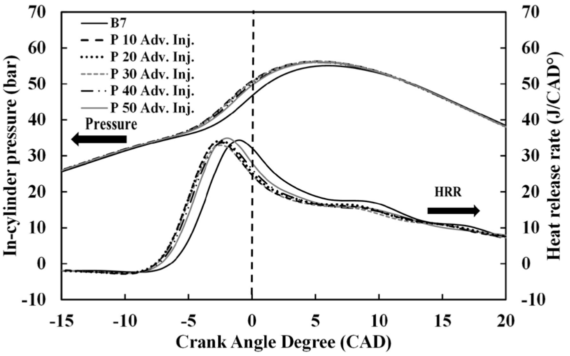
เมื่อศึกษาลักษณะการจุดระเบิดของน้ำมันผสมไพโรไลซิสพลาสติกโดยทดลองวัดค่าความดันในกระบอกสูบและอัตราการปลดปล่อยความร้อน ที่ความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาที ที่ภาระงาน 50% ของภาระงานสูงสุดของเครื่องยนต์ ที่องศาการฉีดน้ำมันมาตรฐานของเครื่องยนต์ กับน้ำมันตัวอย่างพบว่า ยิ่งเพิ่มอัตราส่วนของน้ำมันไพโรไลซิสมากขึ้นส่งผลต่อการจุดระเบิดของเครื่องยนต์ ยิ่งทำให้มีความล่าช้าในการจุดระเบิดที่มากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล B7 เนื่องจากเป็นผลของค่าจุดติดไฟและค่าความร้อนของน้ำมันไพโรไลซิสมีค่าที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล [4], [9] จึงทำให้ P50 มีความล่าช้าในการจุดระเบิดที่สุดดังแสดงในรูปที่ 2 การปรับตั้งองศาฉีดจึงทำล่วงหน้าเป็นหลัก

3.2 การปรับตั้งองศาการฉีดน้ำมันของเครื่องยนต์

เนื่องจากการผสมน้ำมันไพโรไลซิสกับน้ำมันดีเซลทำให้

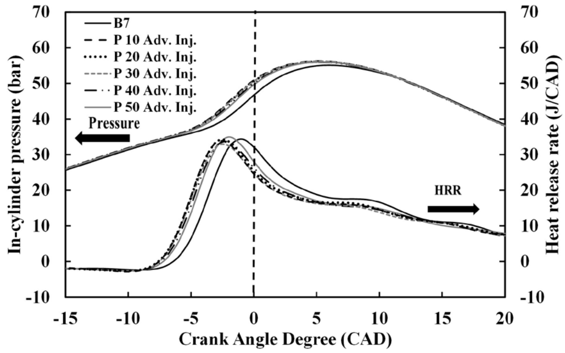


รูปที่ 2 ค่าความดันในกระบอกสูบและอัตราการปลดปล่อยความร้อน

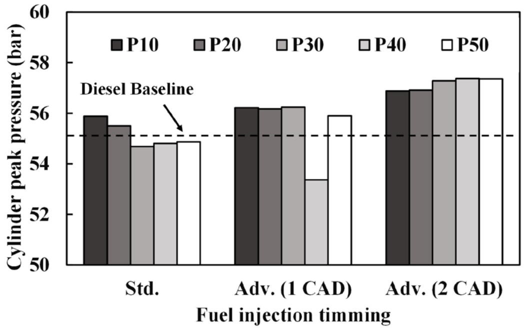


รูปที่ 3 ค่าความดันในกระบอกสูบและอัตราการปลดปล่อยความร้อน ปรับตั้งองศาฉีดที่ –16.5 CAD

มีความล่าช้าในการจุดระเบิดของของเครื่องยนต์ดังแสดงในรูปที่ 2 จึงได้มีการปรับตั้งองศาการฉีดน้ำมันเพื่อลดการจุดระเบิดล่าช้าของเครื่องยนต์ แสดงค่าความดันในกระบอกสูบและการปลดปล่อยความร้อนที่ความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาทีที่ภาระงาน 50% ของภาระงานสูงสุด เมื่อปรับตั้งองศาการฉีดที่ –16.5 องศาก่อนศูนย์ตายบน พบว่า การจุดระเบิดที่จะเรียงไปตามอัตราส่วนผสมของน้ำมันไพโรไลซิสที่เพิ่มขึ้น ซึ่งน้ำมันไพโรไลซิสในอัตราส่วนน้อยจะจุดระเบิดก่อน และน้ำมันส่วนผสมสูงสุด P50 จะเข้าใกล้น้ำมันดีเซล B7 มากที่สุดเป็นผลมาจากความล่าช้าในการจุดระเบิดของน้ำมัน โดยเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล B7 ที่องศาการฉีดมาตรฐาน (–15.5 CAD) ดังรูปที่ 3 และความดันในกระบอกสูบของน้ำมันผสมที่มีการปรับตั้งจะสูงกว่าน้ำมันดีเซล



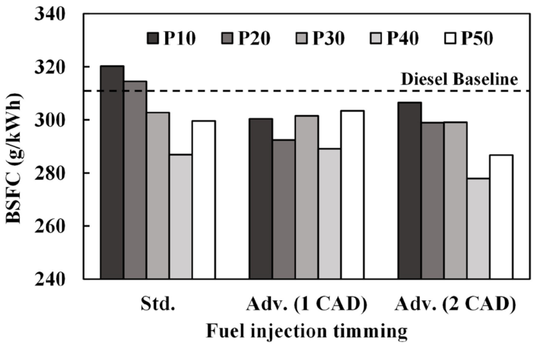
รูปที่ 4 ค่าความดันในกระบอกสูบและอัตราการปลดปล่อยความร้อน ปรับตั้งองศาฉีดที่ –17.5 CAD



รูปที่ 5 ความดันสูงสุดในกระบอกสูบที่การปรับตั้งองศาฉีดที่ –16.5 CAD และ –17.5 CAD

ในขณะที่เมื่อทำการปรับตั้งองศาการฉีดที่ –17.5 องศาก่อนศูนย์ตายบน พบว่า การจุดระเบิดที่จะเรียงไปตามอัตราส่วนผสมของน้ำมันไพโรไลซิสที่เพิ่มขึ้นซึ่งน้ำมันไพโรไลซิสในอัตราส่วนน้อยจะจุดระเบิดก่อน และน้ำมันส่วนผสมสูงสุด P50 เช่นเดียวกับการปรับตั้งองศาการฉีดที่ –16.5 องศาก่อนศูนย์ตายบน ดังรูปที่ 4 แต่ส่งผลให้ความล่าช้าในการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงมากกว่าซึ่งอาจส่งผลต่อสมรรถนะเครื่องยนต์

เมื่อศึกษาค่าความดันสูงสุดในกระบอกสูบโดยเปรียบเทียบน้ำมันผสมก่อนปรับตั้ง และหลังปรับตั้งโดยมีน้ำมันดีเซลก่อนปรับตั้งเป็นค่ามาตรฐานพบว่า ก่อนปรับตั้งองศาการฉีด ความดันสูงสุดในกระบอกสูบของน้ำมันผสมจะลดลงแปรผันตามอัตราส่วนน้ำมันไพโรไลซิสที่เพิ่มขึ้น และเมื่อปรับตั้งองศาการฉีดล่วงหน้าที่ –16.5 และ –17.5 CAD ค่าความดันในกระบอกสูบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 5

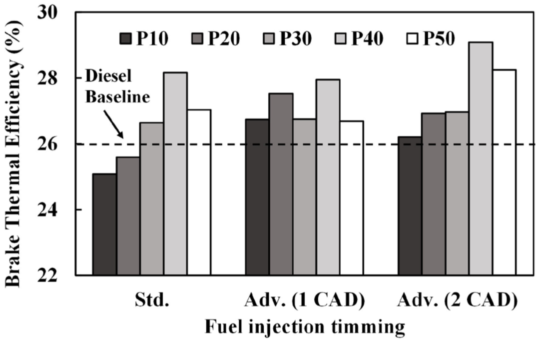


รูปที่ 6 ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกที่การปรับตั้งองศาฉีดที่ –16.5 CAD และ –17.5 CAD

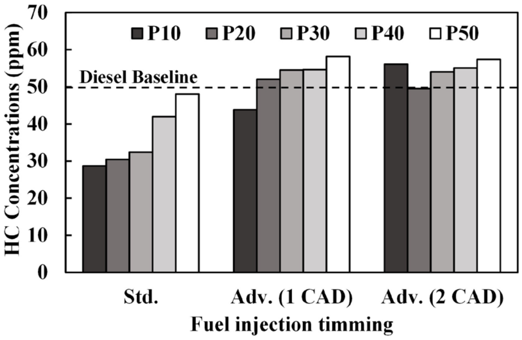
3.3 อิทธิพลของน้ำมันไพโรไลซิสที่ส่งผลต่อสมรรถนะเครื่องยนต์

เมื่อปรับตั้งองศาการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงล่วงหน้าที่ –16.5 และ –17.5 องศาก่อนศูนย์ตายบน พบว่า ค่าความดันในกระบอกสูบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ปริมาณส่วนผสมน้ำมันไพโรไลซิสเป็นอีกปัจจัยที่จำเป็นต้องศึกษา เนื่องจากน้ำมันไพโรไลซิสมีค่าความร้อนใกล้น้ำมันดีเซล แต่มีค่าความหนืดและจุดวาบไฟที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล ส่งผลให้รูปแบบการจุดระเบิดจึงแตกต่างไป ดังนั้นการปรับตั้งองศาการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงส่งผลต่ออัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ โดยเมื่อปรับองศาการฉีดที่ –16.5 และ –17.5 CAD พบว่า เมื่อมีการปรับองศาการฉีดน้ำมันเร็วขึ้น จะส่งผลการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะมีแนวโน้มลดลงกว่าองศาการฉีดที่ –15.5 CAD ดังรูปที่ 6 พบว่า อัตราส่วนผสมน้ำมันไพโรไลซิสที่สูงขึ้น ส่งผลให้อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะลดลงในกรณียังไม่ปรับตั้งเครื่องยนต์ แต่เมื่อปรับตั้งแล้วพบว่า อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะลดลงในทุกกรณีของน้ำมันผสม เทียบกับน้ำมันดีเซลที่ยังไม่ปรับตั้ง และยิ่งลดลงมากขึ้นในการปรับตั้งองศาฉีดที่ –17.5 CAD

การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกที่ลดลงส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงขึ้น เนื่องจากเมื่อปรับองศาการฉีด –16.5 และ –17.5 CAD จึงทำให้น้ำมันเชื้อเพลิงมีระยะเวลาผสมกับอากาศนานขึ้น อัตราส่วนผสมอากาศกับเชื้อเพลิงมีแนวโน้มที่ดีขึ้นจึงส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพ



รูปที่ 7 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกที่การปรับตั้งองศาฉีดที่ –16.5 CAD และ –17.5 CAD



รูปที่ 8 ปริมาณไฮโดรคาร์บอนในไอเสียที่การปรับตั้งองศาฉีดที่ –16.5 CAD และ –17.5 CAD

เชิงความร้อนสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันไพโรไลซิสที่ปรับตั้งองศาการฉีดมาตรฐานดังแสดงในรูปที่ 7 โดยน้ำมันผสมที่น่าสนใจคือ P20 และ P40 ซึ่งมีค่าประสิทธิภาพความร้อนสูงถึง 27.52% และ 27.94% เมื่อปรับองศาการฉีด –16.5 CAD ซึ่ง P20 นั้นปรับขึ้นจากที่เดิมมีประสิทธิภาพเพียง 25.59% ซึ่งต่ำกว่าการใช้เชื้อเพลิง B7

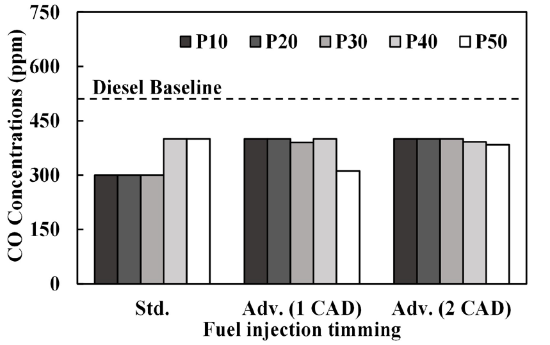
3.4 อิทธิพลของน้ำมันไพโรไลซิสที่ส่งผลต่อการปลดปล่อยมลพิษ

ในการศึกษาอิทธิพลของน้ำมันไพโรไลซิสพลาสติกที่ส่งผลต่อการปลดปล่อยมลพิษนี้ศึกษา 4 ชนิด จากไอเสีย คือ ปริมาณการปลดปล่อยไฮโดรคาร์บอน (HC) ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ปริมาณไนโตรเจนมอนอกไซด์ (NO) และปริมาณควันดำซึ่งเกิดจากไอเสีย ซึ่งในการทดลองนี้ปัจจัยการเกิดมลพิษมีสองปัจจัยหลักคือการเผาไหม้ที่เปลี่ยนไปอันเนื่องจากองศาการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิง และการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงผสมซึ่งเปลี่ยนไป

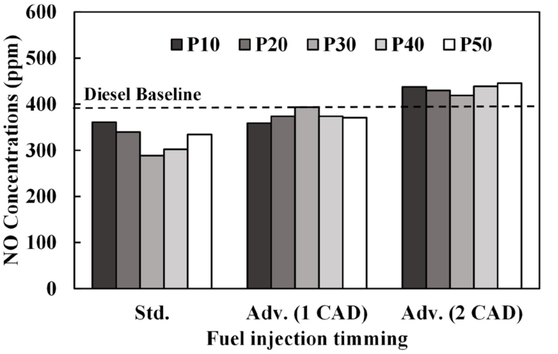
ปริมาณการปลดปล่อยไฮโดรคาร์บอน (HC) มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีการปรับตั้งองศาการฉีดที่ –16.5 และ –17.5 CAD แสดงถึงแนวโน้มการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์เนื่องมาจากการจุดระเบิดล่วงหน้าขององศาการฉีดเชื้อเพลิง ทำให้เวลาในการผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงสั้นลงซึ่งอาจทำให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ โดยไปในทิศทางเดียวกับปริมาณน้ำมันไพโรไลซิสที่สูงขึ้น [10] เป็นผลเนื่องจากน้ำมันเชื้อเพลิงที่คงเหลือจากเผาไหม้ภายในกระบอกสูบ จึงส่งผลให้ปริมาณไฮโดรคาร์บอนมีแนวโน้มที่สูงขึ้นเล็กน้อยตามการปรับองศาการฉีดที่ล่วงหน้าขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับองศาการฉีดมาตรฐานดังแสดงในรูปที่ 8 โดยมีค่าปริมาณการปลดปล่อยไฮโดรคาร์บอน (HC) ของน้ำมันผสม P50 สูงสุด (58 ppm) ที่การปรับตั้งองศาการฉีดที่ –16.5 CAD ขณะที่ปริมาณการปลดปล่อยไฮโดรคาร์บอน (HC) ของน้ำมันดีเซลในเครื่องยนต์ปกติ

ทั้งนี้ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นอีกมลพิษที่แปรผันตามการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ ในการทดลองนี้ปัจจัยการปรับตั้งองศาการฉีดที่ –16.5 และ –17.5 CAD ทำให้ปริมาณ CO ที่เกิดสูงขึ้นเมื่อปรับองศาการฉีด แต่เมื่อมองปัจจัยของการผสมน้ำมันไพโรไลซิส ไม่ได้ทำให้เกิดมลพิษสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณคาร์บอนในน้ำมันไพโรไลซิสมีแนวโน้มมากกว่าน้ำมันดีเซลและเป็นคาร์บอนสายโซ่ที่สั้นกว่า เนื่องจากเป็นน้ำมันซึ่งเกิดจากการสังเคราะห์ [11] จึงส่งผลทำให้ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์มีแนวโน้มที่ลดเล็กน้อย และทำให้การเผาไหม้ที่เกิดขึ้นดีขึ้น และยังน้อยกว่าการเผาไหม้จากน้ำมันดีเซลที่ปรับตั้งองศาการฉีดมาตรฐานดังรูปที่ 9

ปริมาณไนโตรเจนมอนอกไซด์ซึ่งมีปัจจัยการเกิดจากความดันและอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ที่สูง ส่งผลให้ไอเสียมีอุณหภูมิสูง [12] ซึ่งการปรับตั้งองศาการฉีดเชื้อเพลิงทำให้ความดันและปริมาณการปลดปล่อยความร้อนเพิ่มขึ้น จึง



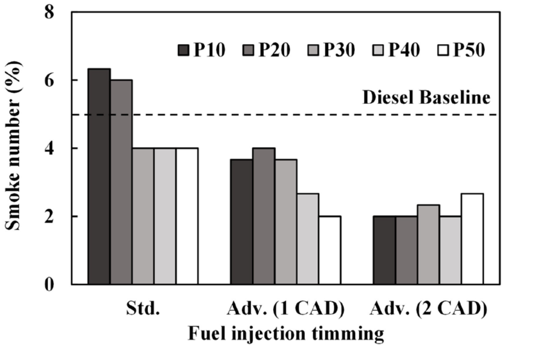
รูปที่ 9 ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ในไอเสียที่การปรับตั้งองศาฉีดที่ –16.5 CAD และ –17.5 CAD



รูปที่ 10 ปริมาณไนโตรเจนมอนอกไซด์ในไอเสียที่การปรับตั้งองศาฉีดที่ –16.5 CAD และ –17.5 CAD

ทำให้เกิดไนโตรเจนมอนอกไซด์ ในปริมาณที่เพิ่มสูงขึ้นเมื่อทำการปรับตั้งองศาการฉีดที่ –16.5 และ –17.5 CAD ซึ่งปัจจัยการผสมน้ำมันไพโรไลซิสที่สัดส่วนสูงขึ้นไม่เป็นนัยสำคัญในการเกิดไนโตรเจนมอนอกไซด์ ดังรูปที่ 10 เนื่องจากการเผาไหม้ของน้ำมันมีแนวโน้มที่ดีขึ้นเมื่อดูจากค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงขึ้นจึงส่งผลให้ความร้อนภายในกระบอกสูบสูงขึ้นตามไปด้วยเป็นผลทำให้ปริมาณไนโตรเจนมอนอกไซด์มีแนวโน้มที่สูงขึ้นตามไปด้วย

ปริมาณควันดำที่ปลดปล่อยออกมาจากไอเสียจะมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อทำการปรับตั้งองศาการฉีดที่ –16.5 และ –17.5 CAD สอดคล้องกับประสิทธิภาพเครื่องยนต์ที่เพิ่มขึ้นมากกว่าน้ำมันดีเซล B7 ส่งผลทำให้ปริมาณควันดำมีแนวโน้ม



รูปที่ 11 ปริมาณควันการปรับตั้งองศาฉีดที่ –16.5 CAD และ –17.5 CAD

ลดลงดังรูปที่ 11 จากการวิจัยพบว่า น้ำมันผสมไพโรไลซิสพลาสติกจะมีอิทธิพลให้การจุดระเบิดในห้องเผาไหม้ล่าช้าขึ้นตามปริมาณน้ำมันไพโรไรซิสที่สูงขึ้น โดยสอดคล้องกับคุณสมบัติของเชื้อเพลิงซึ่งมีค่าความร้อนที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล [13] และเมื่อทำการปรับตั้งองศาฉีดจะสามารถเพิ่มสมรรถนะเครื่องยนต์ได้ โดยประสิทธิภาพความร้อนของน้ำมัน P20 และ P40 มีค่าประสิทธิภาพความร้อนสูงถึง 27.52% และ 27.94% เมื่อปรับองศาการฉีดเป็น –16.5 CAD ซึ่ง P20 นั้นปรับขึ้นจากที่เดิมมีประสิทธิภาพเพียง 25.59% ซึ่งต่ำกว่าการใช้เชื้อเพลิง B7 และเมื่อปรับองศาการฉีดเป็น –17.5 CAD น้ำมัน P20 และ P40 จะมีประสิทธิภาพ 26.92% และ 29.08% ตามลำดับ อย่างไรก็ดีนอกจากการปรับองศาการฉีดจะทำให้สมรรถนะเพิ่มขึ้นแล้วการปลดปล่อยมลพิษบางชนิดยังลดลงต่ำกว่าน้ำมันดีเซลเนื่องจากคุณสมบัติของน้ำมันไพโรไลซิสพลาสติก ซึ่งหลังจากการปรับตั้งแล้ว น้ำมันผสมจะมีค่าปริมาณไฮโดรคาร์บอน (HC) ไนโตรเจนออกไซด์ (NO) เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซล และค่าปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และควันดำลดลงเล็กน้อยเทียบกับน้ำมันดีเซล ในปรับตั้งองศาการฉีดที่ –16.5 CAD

4. สรุป

จากการตรวจวัดคุณสมบัติ การทดสอบสมรรถนะ และการปลดปล่อยมลพิษก่อนและหลังการปรับตั้งองศาการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงพบว่า คุณสมบัติเชื้อเพลิงที่มีน้ำมันไพโรไลซิส

พลาสติกผสมมีค่าความร้อนจำเพาะ ความหนาแน่น และ Cetane Index เทียบเคียงได้กับน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลได้ โดยเมื่อปริมาณน้ำมันไพโรไลซิสพลาสติกที่สูงขึ้นจะส่งผลให้การจุดระเบิดล่าช้า ดังนั้นการปรับตั้งองศาการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงเพื่อเพิ่มศักยภาพในการเผาไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิงไพโรไรซิสผสม ซึ่งองศาการฉีดที่ –16.5 CAD สำหรับน้ำมันเชื้อเพลิง P40 ส่งผลให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่สูง และมีการปลดปล่อยมลพิษโดยรวมที่ลดลงต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล B7 ซึ่งเป็นอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในการใช้งาน ดังนั้นการปรับแต่งองศาการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ที่เหมาะสมกับปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงไพโรไลซีสผสมจึงมีความสำคัญเพื่อให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้จากเครื่องยนต์สูงสุดและมีการปลดปล่อยมลพิษที่ต่ำที่สุด

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการเผาไหม้และพลังงานทดแทน (CTAE) ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องต้นกำลัง วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ สำหรับการสนับสนุนทางวิชาการ ฝ่ายเทคนิคและความปลอดภัย อาชีวอนามัยสิ่งแวดล้อม บริษัท บางจากคอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน) สำหรับความอนุเคราะห์ตรวจสอบคุณสมบัติน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดสอบ และบริษัท ซินฮวดเฮง นวัตกรรม จำกัด สำหรับการสนับสนุนน้ำมันเชื้อเพลิงในงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] Pollution Control Department. (2018). Thailand State of Pollution Report 2018. Ministry of Natural Resources and Environment. Bangkok, Thailand [Online]. (in Thai). Available: http://www.pcd.go.th/file/AW-Pollution-Report2018.pdf

[2] S. D. A. Sharuddin, F. Abnisa, W. M. W. Daud, and M. K. Aroua, “A review on pyrolysis of plastic wastes” *Energy Conversion and Management*, vol. 115, pp. 308–326, 2016.

[3] C. Wongkhorsub and N.Chindaprasert, “A comparison of the use of pyrolysis oils in diesel engine,” *Energy and Power Engineering*, 2013, 5, pp. 350–355.

[4] I. Kalargaris, G. Tian, and S. Gu, “Combustion performance and emission analysis of a DI diesel engine using plastic pyrolysis oil,” *Fuel Processing Technology*, vol. 157, pp. 108–115, 2017.

[5] Energy Policy and Planning office (EPPO). Waste plastic pyrolysis oil support policy guideline. Ministry of Energy. Bangkok, Thailand [Online]. (in Thai). Available: http://www. eppo.go.th/epposite/index.php/th/petroleum/biofuel/oil-garbage

[6] M. Mania and G. Nagarajan, “Influence of injection timing on performance, emission and combustion characteristics of a DI diesel engine running on waste plastic oil,” *Energy*, vol. 34, no. 10, pp. 1617–1623, 2009.

[7] R. Miandad, M. A. Barakat, A. S. Aburiazaiza, M. Rehan, I. M. I., and A. S. Nizami, “Effect of plastic waste types on pyrolysis liquid oil” *International Biodeterioration & Biodegradation*, vol. 119, pp. 239–252, 2017.

[8] J. Devaraj, Y. Robinson, and P.Ganapathi, “Experimental investigation of performance, emission and combustion characteristics of waste plastic pyrolysis oil blended with diethyl ether used as fuel for diesel engine,” *Energy*, vol. 85, pp. 304–309, 2015.

[9] YANMAR. (2005). LV series OPERATION MANUAL. Yanmar Co., Ltd. Japan [online]. Available:https://www.nuvair.com/manuals/Yanmar-LV-100-Use-Manual.pdf

[10] N. Sirisawat, P. Thaiyasuit, and K. Pianthong, "Combustion characteristic and performance of small CI engine using palm biodiesel-ethanol blend as fuels" *UBU Engineering Journal*, vol. 8, no. 1, 2015 (in Thai).

[11] S. Maithomklang, T. Henkeaw, S. Tessungnern, E. Sukji, and A. Maneedang "Engine performance and emissions of microemulsion-based from waste plastic oil and hydrous ethanol," in *Proceedings 14th Conference On Energy Network of Thailand (E-NETT)*, 2018, pp. 762–769 (in Thai).

[12] A. S. Ramadhas, C. Muraleedharan, and S. Jayaraj, "Performance and emission evaluation of a diesel engine fueled with methyl esters of rubber seed oil," *Renewable Energy*, vol. 30, no. 12, pp. 1789–1800, 2005.

[13] S. Peanprasit, N. Chindaprasert, C. Wongkhorsub, P. Sankasem, and P. Tinprabath, "The comparison of the alternative fuel properties at low temperatures," in *Proceedings the 8th RMUTP ICON SCI Conference*, 2017, pp. 154 (in Thai).