การใช้ก๊าซไฮโดรเจนปรับปรุงสมรรถนะเครื่องยนต์เชื้อเพลิงร่วมของเชื้อเพลิงดีเซลผสมน้ำมันไพโรไลซิสพลาสติก

The Engine Performance of Hydrogen Enhanced Diesel Fuel Blended with Plastic Pyrolysis Oil

วรรธนะ เชาวน์สินธุ์[1,2], เสนีย์ พันโยธา[1,2], ชลกาญจน์ วงศ์ก่อทรัพย์[1,2,*] และ กัมปนาท เทียนน้อย[1,2]

[1] ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องต้นกำลัง วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

[2] ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการเผาไหม้และพลังงานทางเลือก (CTAE) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

1518 ถนนประชาราษฎร์ 1 เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

*ติดต่อ: E-mail chonlakarn.w@cit.kmutnb.ac.th, เบอร์โทรศัพท์ 02 555 2000ต่อ6427

บทคัดย่อ

ในชีวิตประจำวันเราหลีกเลี่ยงการใช้พลาสติกไม่ได้ไม่ว่าจะเป็นแปรงสีฟัน ขวดน้ำ รวมถึงโทรศัพท์มือถือ ล้วนแต่เป็นของที่ใช้ในชีวิตประจำวันทั้งสิ้น และขยะพลาสติกที่เหลือใช้ในปัจจุบันมีจำนวนมาก และส่งผลต่อสิ่งแวดล้อมก่อให้เกิดปัญหาในการกำจัดขยะประเภทพลาสติกเป็นอย่างมากการกำจัดส่วนใหญ่จะใช้วิธีฝังกลบ และใช้เวลานานในการย่อยสลาย จึงนำกระบวนการไพโรไลซิสมาช่วยในการจำกัด และสามารถเปลี่ยนจากขยะพลาสติกที่เหลือใช้ให้กลายมาเป็นน้ำมันเชื่อเพลิงร่วมกับน้ำมันดีเซล โดยโครงสร้างของพลาสติกมีการพัฒนามาจากน้ำมันดิบ เช่นเดียวกับน้ำมันเชื้อเพลิงโดยการเปลี่ยนรูปขยะพลาสติกจากของที่มีลักษณะแข็งให้กลายเป็นของเหลว ซึ่งของเหลวที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลเนื่องจากใช้การกลั่นในช่วงเดียวกับน้ำมันดีเซล จึงทำให้น้ำมันที่ได้จากขยะพลาสติกเป็นเชื้อเพลิงทางเลือกสำหรับยานยนต์ งานวิจัยนี้เพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนผสมน้ำมันดีเซล (D100) และ น้ำมันไพโรไลซิส (P100) ในอัตราส่วนน้ำมันดีเซลต่อน้ำมันไพโรไลซิส 50 : 50 และมีการฉีดก๊าซไฮโดรเจนเข้าท่อร่วมไอดีในปริมาณ 1000, 5000 และ 10000 ppm ที่ส่งผลต่อปริมาณการปลดปล่อยมลพิษ (CO, CO_2, HC, NO) ที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ที่ 1500 rpm ภายใต้ภาระการทำงานที่ 25, 50, 75 % ของภาระงานสูงสุด และเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลที่ใช้ในท้องตลาด โดยพบว่าน้ำมันผสมดังกล่าวสามารถใช้งานกับเครื่องยนต์ดีเซลที่ไม่ได้ปรับแต่งแต่ประสิทธิภาพจะต่ำกว่าน้ำมันดีเซลในท้องตลาด และปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ฉีดเข้าท่อร่วมไอดีส่งผลต่อปริมาณการปลดปล่อยมลพิษ และสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ให้ดีขึ้นรวมถึงอุณหภูมิของไอเสียก็ลดลง

คำหลัก: น้ำมันไพโรไลซิสจากพลาสติก, ขยะพลาสติก, มลพิษ, ก๊าซไฮโดรเจน

Abstract

In everyday life, we can't avoided the plastic, whether it's a toothbrush, Water bottles, including mobile phones, are all used in everyday life, and the amount of plastic waste that is left in the present and there is a lot of impact on the environment causing problems in the disposal of plastic waste. Most of the methods are used to remove and take a long time to decompose. Therefore the pyrolysis process was used to help limit and can be changed from waste plastic to become fuel oil together with diesel, with the structure of plastic developed from crude oil as well as fuel by changing the shape Plastic waste from solids into liquids from the pyrolysis process has properties similar to diesel fuel because In the same period as diesel oil, the oil obtained from plastic waste is an alternative fuel for vehicles. This research was to study the influence of diesel fuel mixture (D100) and pyrolysis oil (P100) in diesel oil to oil ratio. Pyrolysis as follows: 50 : 50 And hydrogen gas injection into the intake manifold in the amount of 1000 , 5000 and 10000 ppm that affects the amount of emissions at the engine speed at 1500 rpm under the work load of 25, 50, 75 % of the maximum work load and Compared with diesel oil used in the market, it was found that the mixed oil can be used with diesel engines that are not tuned and the amount of hydrogen gas injected into the intake manifold affects the volume of The emission occurred

Keywords: pyrolysis oil, plastic waste, emission, hydrogen gas

1. บทนำ

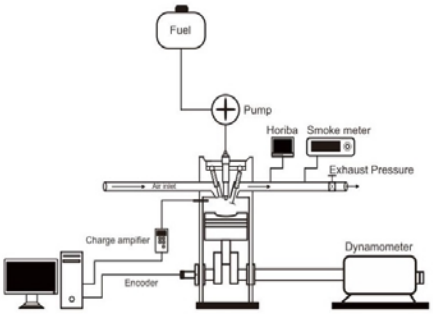
สิ่งของที่มีส่วนประกอบของพลาสติก กลายเป็นสิ่งที่ขาดไม่ได้ในชีวิตประจำวัน เริ่มตั้งแต่ตื่นนอนจนถึงเวลาเข้านอน เมื่อมีความต้องการใช้พลาสติกมาก อัตราการผลิตพลาสติกจึงสูงตามไปด้วยมากถึง 311 ล้านตันในปี 2014 [1] ผลกระทบจากการใช้พลาสติกจำนวนมากในแต่ละปีส่งผลต่อสิ่งแวดล้อมในปัจจุบันอย่างมาก เนื่องจากปริมาณขยะประเภทพลาสติกที่เกิดขึ้นมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ในขณะที่ขยะประเภทอื่นๆ สามารถย่อยสลายได้ ในระยะเวลาที่น้อยกว่า แต่ขยะจากพลาสติกนั้นต้องอาศัยระยะเวลาในการย่อยสลายที่นานกว่า ขยะประเภทพลาสติกมีหลายประเภท เช่น พอลิเอทิลีน (PE) พอลิโพรพิลีน (PP) พอลิสไตรีน (PS) [16] ดังนั้นควรลดการใช้ขยะพลาสติกหรือควรมีการนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยการเปลี่ยนขยะประเภทพลาสติกเป็นพลังงานทางเลือกอีกรูปแบบหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ทดแทนน้ำมันไบโอดีเซล B100 ด้วยกระบวนการไพโรไลซิส

กระบวนการไพโรไลซิส เป็นกระบวนการที่เปลี่ยนสถานะของพลาสติกจากของแข็งให้กลายเป็นของเหลวภายใต้สภาวะที่ไม่มีออกซิเจนในระบบ ความร้อนที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสอยู่ที่ 45°c ที่ระยะเวลา 75 นาที ขยะประเภทพอลิสไตรีน (PS) สามารถทำให้เกิดของเหลวมากที่สุดที่ออกจากกระบวนการไพโรไลซิส เมื่อเปรียบเทียบกับขยะพลาสติกประเภทอื่นๆ และของเหลวที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสยังมีค่าพลังงานความร้อน (HHV) อยู่ที่ 40.2 - 45 mJ/kg ซึ่งมีค่าพลังงานความร้อนที่ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล [16] และการฉีดไฮโดรเจนเข้าไปในท่อร่วนไอดี จะช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเครื่องยนต์และสามารถลดการปลดปล่อยมลพิษลงได้ แต่อุณหภูมิของไอเสียจะมีแนวโน้มที่สูงขึ้น [15]

ดังนั้นงานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของการใช้ก๊าซไฮโดรเจนกับการปลดปล่อยมลพิษ ในการใช้เชื้อเพลิงร่วมดีเซลผสมน้ำมันไพโรไลซิสพลาสติก ที่ส่งผลต่อการเผาไหม้และมลพิษของเครื่องยนต์

2. อุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพล ของการใช้ก๊าซไฮโดรเจนกับการปลดปล่อยมลพิษในการใช้เชื้อเพลิงร่วมดีเซลผสมน้ำมันไพโรไลซิสพลาสติกที่ส่งผลต่อการเผาไหม้ และมลพิษของเครื่องยนต์ ภายใต้ภาระงานที่ 50 % ของภาระงานสูงสุด ที่ความเร็วรอบ 1500 rpm และปริมาณการฉีดก๊าซไฮโดรเจนเข้าท่อร่วมไอดีที่ 1000, 5000 และ 10000 ppm ในอัตราส่วนน้ำมันดีเซล (D100) ต่อน้ำมันไพโรไลซิส (P100) 50 : 50 และเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลในท้องตลาด (B7)



รูปที่ 1 รูปแบบในการทดลอง

2.1 เชื้อเพลิง

ในงานวิจัยนี้ใช้น้ำมันดีเซล (D100) ต่อน้ำมันไพโรไลซิส (P100) ในอัตราส่วน 50 : 50 และมีการฉีดก๊าซไฮโดรเจนเข้าท่อร่วมไอดีที่ 1000, 5000 และ 10000 ppm เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ ตารางที่ 1 คุณสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิง

Property	Method	D100	P100	B7	P50	H_2
Cetane Index	ASTM D976	57	48	58	55.5	-
Apl Gravity@15.6C	ASTM 405-11	38.6	40.7	38.4	39.5	-
Viscosity@ 30°c(mm^2/s)	ASTM D445-12	3.3	1,495	3.4	2.264	-
Flash point	ASTM D93-12	65	17	56	-	-
HHV(mJ/kg)		45.62	43.99	44.91	44.81	119.93

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิง

2.2 เครื่องยนต์ที่ใช้ในการทดสอบ

เครื่องยนต์ที่ใช้ในการทดสอบยี่ห้อ YANMAR รุ่น L100 V ดังแสดงข้อมูลในตารางที่ 2 ตารางแสดงข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์

เครื่องยนต์	YANMAR L100V
ชนิดเครื่องยนต์	ดีเซล 1 สูบ 4 จังหวะ ระบายความร้อนด้วยอากาศ
ปริมาตรกระบอกสูบ	0.435 ลิตร
อัตตราส่วนการอัด	21.2:1
ระบบฉีดเชื้อเพลิง	ฉีดตรงเข้าห้องเผาไหม้
ตำแหน่งการฉีด	15.5°ก่อนศูนย์ตายบน

ตารางที่ 2 ข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์

2.3 การวิเคราะห์ความดันในเผาไหม้และมลพิษ

การวิเคราะห์ความดันในห้องเผาไหม้จะวัดโดย In-cylinder pressure โดยใช้คอมพิวเตอร์ในการเก็บข้อมูลความดันในห้องเผาไหม้และตำแหน่งเพลาเพื่อวิเคราะห์การปลดปล่อยความร้อนจากการเผาไหม้

การวิเคราะห์การปลดปล่อยมลพิษที่เกิดการการเผาไหม้ด้วยเครื่องวิเคราะห์ไอเสีย Horiba รุ่น Mexa 584L ใช้วิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ (NO), คาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO_2), ไฮโดรคาร์บอน (HC) และการวิเคราะห์ระดับควันดำนั้นใช้เครื่องมือวัดควันดำ โดยค่าที่วัดได้จะเป็นระดับความเข้มของแสงที่ผ่านได้ 0 - 100 ตามปริมาณควันดำจากน้อยไปหามาก

2.4 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ

ในการหาความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจากเครื่องยนต์แต่ละเครื่องนั้นจำเป็นต้องวัดเทียบกับขนาดของเครื่องยนต์ พารามิเตอร์เรียกว่า ความสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงจำเพาะ

ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (Break Specific Fuel Consumption)

$$BSFC = \frac{\dot{m}_f}{P_h}$$

โดย $BSFC$ = อัตราการสิ้นเปลืองจำเพาะเบรค (kg/kW.hr)

$\dot{m}_f$ = อัตราไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง (g/h)

หาอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงได้จาก

$$\dot{m}_f = \frac{W_f x3600}{t}$$

โดยที่ W_f= มวลของเชื้อเพลิง (kg)

t = เวลาที่ใช้เชื้อเพลิง (sec)

2.5 ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Break Thermal Efficiency : η_{BHT})

$$\eta_{BTH} = \frac{P_b}{P_f} x100$$

โดยη_{BTH} = ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก (%)

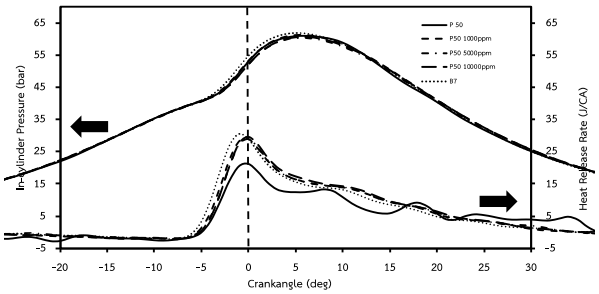
P_b = กำลังงานเชื้อเพลิง (kW)

P_f = กำลังงานเบรกของเครื่องยนต์ (kW)

3.ผลการดำเนินการวิจัย

3.1 อิทธิพลของก๊าซไฮโดรเจนที่มีผลต่อความดันในกระบอกสูบและการถ่ายเทความร้อน

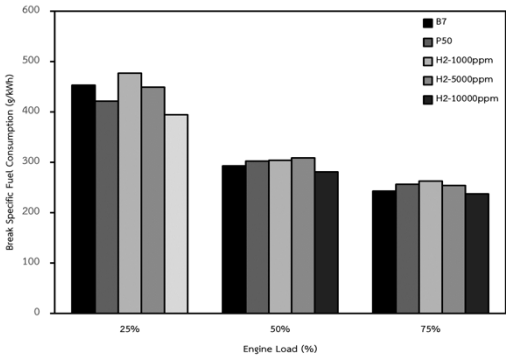
อิทธิพลของก๊าซไฮโดรเจนส่งผลต่อความดันในกระบอกสูบ ดังรูปที่ 2 แสดงให้เห็นว่าก๊าซไฮโดรเจนช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ และการถ่ายเทความร้อน จะเห็นได้ว่าเมื่อมีก๊าซไฮโดรเจนเข้าไปในท่อร่วมไอดี จะทำให้ลดการจุดระเบิดล่าช้าของเครื่องยนต์ได้ปริมาณการฉีดไฮโดรเจนมีผลต่อประสิทธิภาพ และการถ่ายเทความร้อนของเครื่องยนต์ เนื่องจากก๊าซไฮโดรเจนมีค่าพลังงานความร้อนที่สูงจึงทำให้ลดการจุดระเบิดที่ล่าช้าของเครื่องยนต์ได้ [16] ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 อิทธิพลของก๊าซไฮโดรเจนที่ส่งผลต่อความดันในกระสูบและการถ่ายเทความร้อน

3.2 อิทธิพลของก๊าซไฮโดรเจนที่มีผลต่ออัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ

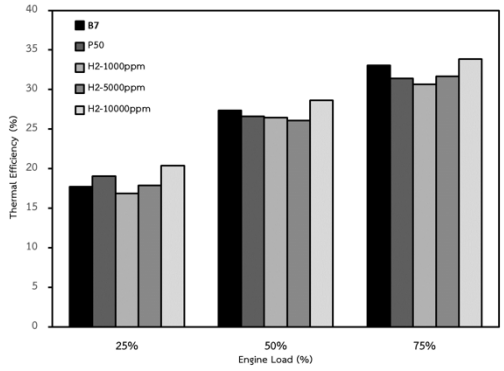
เมื่อมีการฉีดไฮโดรเจนร่วมกับเชื้อเพลิงผสมระหว่างน้ำมันดีเซล (D100) กับ น้ำมันไพโรไลซิส (P100) จะเห็นได้อย่างชัดเจนในภาระงานของเครื่องยนต์ที่ต่ำและที่ภาระงานสูงขึ้นจะไม่ค่อยต่างมากนัก เนื่องจากในภาระงานต่ำมีการฉีดน้ำมันในปริมาณที่น้อย และเมื่อฉีดไฮโดรเจนเข้าไป และก๊าซไฮโดรเจนมีค่าพลังงานความร้อนที่สูงกว่าน้ำมันดีเซล [16] จึงส่งผลทำให้อัตราการสิ้นเปลืองจำเพาะมีแนวโน้มที่สูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 อิทธิผลของก๊าซไฮโดรเจนที่ส่งผลต่ออัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะที่ 1500 rpm

3.3อิทธิพลของก๊าซไฮโดรเจนที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อน

การฉีดก๊าซไฮโดรเจนเข้าท่อร่วมไอดีส่งผลต่อปริมาณอากาศที่เข้าเครื่องยนต์ ทำให้การเผาไหม้ของเครื่องยนต์อยู่ในสภาวะที่ส่วนผสมหนา จึงส่งผลทำให้อุณหภูมิของการเผาไหม้มีแนวโน้มที่สูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4

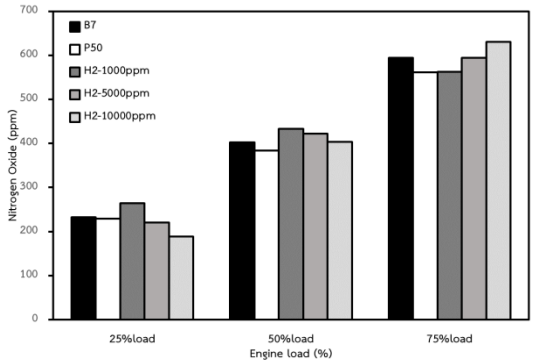


รูปที่ 4 อิทธิพลของก๊าซไฮโดรเจนที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ความเร็วรอบ 1500 rpm

3.4 อิทธิพลของก๊าซไฮโดรเจนที่ส่งผลต่อการปลดปล่อยมลพิษของเครื่องยนต์

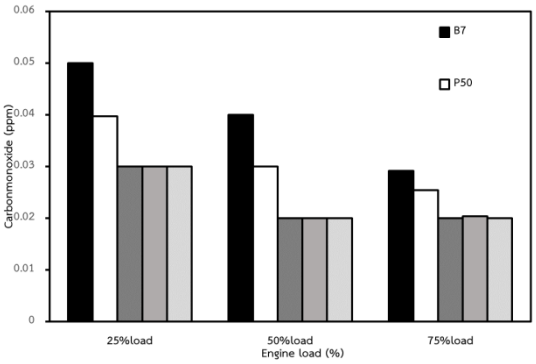
ปริมาณของไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ที่ฉีดไฮโดรเจนเข้าท่อร่วมไอดี พบว่าปริมาณของไนโตรเจนออกไซด์มีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณการฉีดก๊าซไฮโดรเจนพบว่ามีปริมาณเพิ่มขึ้น 6 %

และ12 % ตามปริมาณการฉีดก๊าซไฮโดรเจนที่ 5000, 10000 ppm การเพิ่มขึ้นของไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากค่าพลังงานความร้อนของก๊าซไฮโดรเจนสูง ส่งผลให้อุณหภูมิการเผาไหม้ในกระบอกสูบสูง ทำให้การเกิดไนโตรเจนออกไซด์สูงตามไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 5



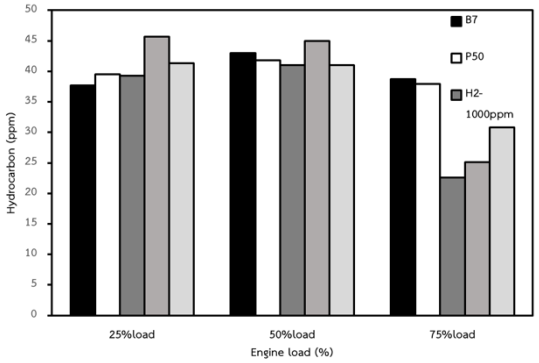
รูปที่ 5 อิทธิพลของก๊าซไนโตรเจนที่ส่งผลต่อการปลดปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ที่ความเร็วรอบ 1500 rpm

การปลดปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์จากการฉีดก๊าซไฮโดรเจนพบว่า ปริมาณการเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์มีแนวโน้มที่ลดลงตามปริมาณการฉีดไฮโดรเจนที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 6



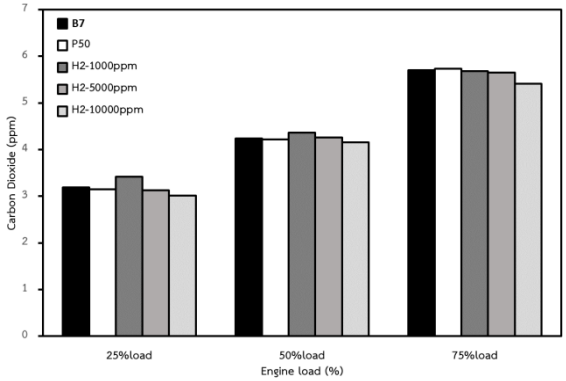
รูปที่ 6 อิทธิพลของก๊าซไฮโดรเจนที่มีผลต่อการปลดปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ความเร็วรอบ 1500 rpm

ปริมาณการเกิดไฮโดรคาร์บอนที่ภาระงาน 75 % ของภาระงานสูงสุด จะเห็นได้ว่าปริมาณการเกิดไฮโดรคาร์บอนนั้นมีแนวโน้มลดลง 18 % ปริมาณก๊าซไฮโดรเจน 10000 ppm เนื่องจากเมื่อก๊าซไฮโดรเจนเข้าไปในห้องเผาไหม้จะช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพทำให้น้ำมันที่เหลือจากการเผาไหม้ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 อิทธิพลของก๊าซไฮโดรเจนที่มีผลต่อการปลดปล่อยไฮโดรคาร์บอนที่ความเร็วรอบ 1500 rpm

อิทธิพลของก๊าซไฮโดรเจนส่งผลต่อปริมาณการปลดปล่อยคาร์บอนไดร์ออกไซด์ ยิ่งปริมาณก๊าซไฮโดรเจนมากจะมีแนวโน้มที่ลดลง 0.86 % , 1.43 % และ 5.63 %ที่ปริมาณก๊าซไฮโดรเจน 1000, 5000 และ 10000 ppmตามลำดับที่ภาระงาน 75 % ของภาระงานสูงสุด ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 อิทธิพลของก๊าซไฮโดรเจนที่ส่งผลต่อการปลดปล่อยคาร์บอนไดร์ออกไซด์ที่ความเร็วรอบ 1500 rpm

4. สรุปผลการทดลอง

การฉีดก๊าซไฮโดรเจนเข้าท่อร่วมไอดีในเครื่องยนต์ในสภาวะการทำงานคงที่ในภาระงานที่ต่างกัน พบว่าก๊าซไฮโดรเจนส่งผลช่วยให้ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ดีขึ้น ช่วยปรับปรุงการจุดระเบิดให้ดีขึ้นเนื่องจากค่าพลังงานความร้อนของก๊าซไฮโดรเจนที่สูงกว่าน้ำมันเชื้อเพลิง และมีอัตราการปลดปล่อยมลพิษลดลง เนื่องจากก๊าซไฮโดรเจนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ให้ดีขึ้น แต่มีปริมาณไนโตรเจนออกไซด์เพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิการเผาไหม้มีแนวโน้มสูงขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการเผาไหม้และพลังงานทดแทน (CTAE) ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องต้นกำลัง คณะวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ สำหรับการสนับสนุนทางวิชาการและบริษัท บางจาก คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน) ที่สนับสนุนการวิเคราะห์คุณภาพน้ำมัน บริษัท ซินฮวดเฮง นวัตกรรม จำกัด ที่สนับสนุนน้ำมันเชื้อเพลิงในการวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

1. WI, 2015. World Watch Institute, Global Plastic Production Rises, Recycling Lags. New World Watch Institute Analysis Explores Trends in Global Plastic Consumption and Recycling, January
2. European Commission, “Proposal for a directive of the European Parliament and of the council amending Directive 94/62/EC on Packaging and packaging waste” Available: http://ec.europa.eu/environment/circular-economy/index_en.htm
3. A. Demirbas, “Pyrolysis of Municipal Plastic Wastes for Recovery of Gasoline-Range Hydrocarbons,” Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, Vol. 72, 2004, pp. 97-102.
4. Journal of Energy Policy, “Transforming waste plastic to Fuel, Way out of Oil Crisis” Energy Policy and Planning Office, Ministry of Energy, Thailand, 80 (2551) :12
5. Y. M. Chang, “On Pyrolysis of Waste Tire: Degradation Rate and Product Yields,” Resources, Conservation and Recycling, Vol. 17, 1996, pp.125-139.
6. Energy Policy and Planning Office, “ Policy of supporting oil from waste plastic” Ministry of Energy, Thailand Available:http://www.eppo.go.th/images/petroleum/Biofuels/oilplasticwaste.pdf
7. M. Mani and G. Nagarajan, “Influence of Injection Tim-ing on Performance, Emission and Combustion Charac-teristics of a DI Diesel Engine running on Waste Plastic Oil,” Energy, Vol. 34, 2009, pp. 1617-1623.
8. Date, Anil W., “Analytic Combustion: With Thermodynamics, Chemical Kinetics and Mass Transfer.” Cambridge University Press. ISBN 1-107-00286-9.
9. Chand P, Chintareddy VR, Verkade JG, Grewell D., “Enhancing biodiesel production

from soybean oil using ultrasonics." Energy Fuels 2010;24: 2010–5.

10. Najafi G, "Diesel engine combustion characteristics using nano-particles in biodiesel-diesel blends" Fuel, Vol 212, 2018, pp. 668-678.

11. Kaimal V. K, Vijayabalan P., "An investigation on the effects of using DEE additive in a DI diesel engine fuelled with waste plastic oil" Fuel, Volume 180, 15 September 2016, pp 90-96

12. Heywood JB. Internal combustion engine fundamentals. USA: McGraw-Hill; 1984.

13. C.Wongkhorsub, N.Chindaprasert,"A Comparison of the Use of Pyrolysis Oils in Diesel Engine", Energy and Power Engineering, 2013, 5, pp 350-355

14. Peanprasit S. et al., "The Comparison of the Alternative Fuel Properties at Low Temperatures" The 8th RMUTP ICON SCI Conference, 2016, pp 142-146

15. K. Theinnoi, W. Temwutthikun, "Application of Exhaust Gas Fuel Reforming in Diesel Engines Towards the Improvement Urban Air Qualities"CUE2018, Shanghai, China

16. Ioannis Kalargaris, Guohong Tian, Sai Gu"Combustion, performance and emission analysis of a DI diesel engine using plastic pyrolysis oil" Fuel Processing Technology 157 (2017) 108–115