

AEC-87

ผลกระทบของปริมาณการฉีดเอทานอลในส่วนผสมล่วงหน้าต่อสมรรถนะและมลพิษ
ของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด เมื่อใช้เชื้อเพลิงร่วมเอทานอล-ปาล์มไบโอดีเซล

Effect of Premixed Ethanol Injection Quantity on Performance and Emission of CI Engine Using Ethanol-Palm Biodiesel as Dual Fuel

วุฒิสาสัน เขียวทอง และ ประชาสันติ ไตรยสุทธิ์ *

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190
ติดต่อ: E-mail: *prachasanti_t@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของปริมาณการฉีดเอทานอลในส่วนผสมล่วงหน้าต่อสมรรถนะและมลพิษไอเสียของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด เมื่อใช้เชื้อเพลิงร่วมเอทานอลบริสุทธิ์ 99.8% ร่วมกับปาล์มไบโอดีเซล งานวิจัยทดลองกับเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยวแบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรง ติดตั้งอุปกรณ์วัดความดันในกระบอกสูบ ติดตั้งอุปกรณ์ฉีดเอทานอลที่ท่อไอดี องศาการฉีดเอทานอลเริ่มต้นที่ 30°ATDC ณ ตำแหน่งหลังวาล์วไอดีเสียปิด และก่อนวาล์วไอดีเปิด ปาล์มไบโอดีเซลถูกฉีดตรงเข้าห้องเผาไหม้ เพื่อใช้เป็นตัวจุดระเบิดที่ตำแหน่ง $5-10^\circ\text{BTDC}$ ทดสอบที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์คงที่ 1500 รอบต่อนาที ที่ภาระความดันยังผลเฉลี่ยในช่วง 143.2-716.2 kPa อัตราส่วนทางความร้อนของเอทานอลต่อเชื้อเพลิงรวม (rp) อยู่ระหว่าง 0-0.85 อัตราส่วนสมมูลเชื้อเพลิงรวมอยู่ระหว่าง 0.15-0.5 สมรรถนะที่ศึกษาคือ แรงบิด กำลังอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเบรก และประสิทธิภาพเชิงความร้อน คุณลักษณะในการเผาไหม้ที่ศึกษาร่วมคือ ความดันสูงสุด และอัตราการปลดปล่อยความร้อนสูงสุด มลภาวะไอเสียที่ศึกษาคือ ไฮโดรคาร์บอน คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และไนโตรเจนมอนอกไซด์ จากผลการทดลองพบว่า ที่ภาระความดันยังผลเฉลี่ย 716.2 kPa ที่ rp 0.717 เกิดความล่าช้าในการเผาไหม้เพิ่มขึ้น $6-8^\circ\text{CA}$ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเบรกมีค่าลดลง มีค่าต่ำสุด 8.369 MJ/kWh และประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกมีค่าสูงสุด 42.75% ตามค่า rp ที่เพิ่มขึ้น ผลกระทบต่อค่ามลพิษ ไฮโดรคาร์บอนเพิ่มขึ้น ไม่เกิดไนโตรเจนมอนอกไซด์ ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลง เนื่องจากปริมาณของออกซิเจนเพิ่มขึ้นจากเอทานอลและปาล์มไบโอดีเซล

คำหลัก: สมรรถนะ;มลพิษ;เอทานอลในส่วนผสมล่วงหน้า;ปาล์มไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงฉีดนำ;ระบบเชื้อเพลิงร่วมในเครื่องยนต์ CI

Abstract

This research investigates on the effect of ethanol injection volume in the premixed ratio. Research in the performances and exhaust emissions of a compression ignition engine when using 99.8% ethanol and palm biodiesel as the dual fuel. The experimental is research on, single cylinder, direct injection, diesel engine which equipped with in the cylinder pressure and equipped with injected ethanol on intake. Ethanol injection angle from 30°ATDC when the exhaust valve closed position and

AEC-87

before the intake valve closes. Palm biodiesel is injected directly into the combustion chamber as a 5-10 ° BTDC for pilot fuel. The engine speed to 1500 rpm at constant load mean effective pressure is in the range 143.2-716.2 kPa. The heating value ratio of ethanol to overall of heating value of total fuels (rp) is 0 to 0.85. The equivalence ratio of total fuels is 0.15 to 0.5. The performance is a torque, power, brake specific energy consumption and brake thermal efficiency. The combustion characteristics are maximum pressure and the maximum heat release rate. The exhaust emissions are carbon monoxide, hydrocarbon, carbon dioxide and nitrogen monoxide. The results showed on the constant load mean effective pressure is 716.2 kPa at rp 0.717 that ignition timing delays is 6-8 ° CA, the brake specific energy consumption decreases the minimum value 8.369 MJ/kWh, brake thermal efficiency maximum value 42.75%, increasing the impact of pollution hydrocarbons increased, not form nitrogen monoxide and reduced carbon monoxide. In the combustion the amount of oxygen increases from ethanol and palm biodiesel.

Keywords: Performance; Emission; Ethanol in intake air; Palm Biodiesel as a pilot fuel; Dual fuel in CI engine.

1. บทนำ

เอทานอลและปาล์มไบโอดีเซล พลังงานทดแทนที่ผลิตได้จากผลผลิตทางการเกษตร เอทานอลถูกนำมาใช้หลากหลายรูปแบบ นำไปผสมกับน้ำมันเบนซินสัดส่วน 10 – 85 % ในเชื้อแก๊สโซฮอล์ใช้กับเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟ นำไปผสมกับน้ำมันดีเซลในสัดส่วน 3 – 5 % ในเชื้อดีโซฮอล์

นำเอทานอลไปใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด โดยผสมล่วงหน้ากับอากาศในท่อไอดี ทดแทนเนื้อน้ำมันดีเซลหรือไบโอดีเซลได้มากกว่า 60% สัดส่วนโดยพลังงาน [1] เครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด มีอัตราการบริโภคน้ำมันที่ต่ำ มีประสิทธิภาพสูงกว่าเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟ ถึงแม้จะมีข้อได้เปรียบแต่กลับมีข้อเสียจากผลของการเผาไหม้ได้แก่ การเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงก่อให้เกิดแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) การฉีกน้ำมันดีเซลเข้าไปในห้องเผาไหม้โดยตรง ในช่วงเวลาสั้นทำให้เชื้อเพลิงผสมกับอากาศไม่ดีพอเกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ก่อให้เกิด ควันดำ การปล่อยฝุ่นละออง และมีไฮโดรคาร์บอน (HC) จากเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ไม่หมด การแก้ปัญหาดังกล่าวในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด โดยผสมเชื้อเพลิงชนิดที่หนึ่งล่วงหน้าในท่อไอดีเพื่อให้ได้สารผสมเนื้อเดียว ในห้องเผาไหม้และอัดให้มี

ความดันสูงอุณหภูมิสูงก่อนการฉีดเชื้อเพลิงชนิดที่สองเพื่อก่อให้เกิดการจุดระเบิดในระบบเชื้อเพลิงร่วม การพัฒนาระบบเชื้อเพลิงร่วมในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด เชื้อเพลิงร่วมที่ใช้คือแก๊สธรรมชาติ [2-3] ไบโอดีเซล [4] แก๊สโซลีน [5] ผลที่ได้จากการเพิ่มปริมาณการใช้แก๊สธรรมชาติ ไบโอดีเซล และแก๊สโซลีนในส่วนผสมล่วงหน้าในระบบเชื้อเพลิงร่วมคือประสิทธิภาพสูงขึ้น ลดควันดำ และ NO_x แต่ปริมาณ HC จากการเผาไหม้เพิ่มขึ้น

งานวิจัยที่ใช้ระบบเชื้อเพลิงร่วม เอทานอลและน้ำมันดีเซลทดสอบกับเครื่องยนต์ CI 1 สูบ 4 จังหวะที่ภาระปานกลาง รอบต่ำ ปรับช่วงเวลาการฉีกน้ำมันดีเซลที่เหมาะสม เมื่อใช้ร่วมกับเอทานอล พบว่ากำลังเบรค และประสิทธิภาพทางความร้อนลดลง ที่อัตราส่วนทางความร้อนของเอทานอลต่อเชื้อเพลิงรวม 60% ประสิทธิภาพทางความร้อนสูงสุด 10% เกิดการเผาไหม้อย่างรวดเร็วในช่วงผสมมาก่อน ทำให้อัตราการปลดปล่อยพลังงานความร้อนเพิ่มขึ้น เมื่อเลื่อนองศาการฉีกน้ำมันดีเซลมาที่ 7 (°CA) BTDC ค่ามลภาวะ HC และ CO เพิ่มขึ้น [1] ทดลองเปลี่ยนระบบเครื่องยนต์รถบรรทุกขนาดใหญ่มาใช้ระบบเชื้อเพลิงร่วม อัตราส่วนทางความร้อนเอทานอลต่อเชื้อเพลิงรวม 5-95% ประสิทธิภาพทางความร้อน

AEC-87

ใกล้เคียง 40% ค่า bmep เพิ่มขึ้นจากเดิม 25(Bar) เป็น 30(Bar)มลภาวะ CO_2 ลด [6] นำเอทานอลมาใช้ร่วมกับน้ำมันดีเซล เติมน้ำมันคาร์บูเรเตอร์เข้าทางท่อไอดี อัตราส่วนทางความร้อนของเอทานอลที่เหมาะสม 15% ผลอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ลดลง อัตราสิ้นเปลืองน้ำมันดีเซลลดลง สมรรถนะของเครื่องยนต์สูงขึ้น อุณหภูมิไอเสียลดลง มลภาวะ ลดอัตราการปล่อย NO_x , CO และ CO_2 [7] ศึกษาผลกระทบจากการใช้ Dimethyl ether เชื้อเพลิงที่ได้จากถ่านหิน มีโครงสร้างคล้ายเอทานอลที่ 1000K สลับกับการใช้เอทานอลร่วมกับน้ำมันดีเซลผสมน้ำ ในเครื่องยนต์CI ในช่วงเริ่มต้น ให้ความร้อนกับเอทานอลจนกลายเป็นไอ ผลbsfc เพิ่มขึ้น 10% ลดการใช้น้ำมันดีเซลลง 16% เพราะการใช้ Emulsified fuel กับการ Pyrolysis เชื้อเพลิงร่วม ทำให้เกิด H_2 ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงเข้าไปในห้องเผาไหม้ [8] ทดลองน้ำมันดีเซลร่วมกับเอทานอล 99.5% ควบคุมปริมาณ และเวลาในการฉีด พบว่าการใช้เอทานอลในปริมาณมากเหมาะที่จะใช้กับความเร็รรอบสูง 1800rpm โดยฉีดเข้าทางท่อไอดีในจังหวะดูด องศาที่เหมาะสมในการฉีดน้ำมันดีเซลที่ 7 ($^{\circ}CA$) BTDC ผล mep เพิ่มขึ้น 9.5% NO_x ลด 51% [9]

งานวิจัยนี้ ใช้เอทานอล เป็นเชื้อเพลิงร่วมกับ ปาล์มไบโอดีเซล โดยฉีดเอทานอลด้วยหัวฉีดอิเล็กทรอนิกส์ เข้าไปในท่อไอดี เอทานอลผสมกับอากาศเป็นสารผสมเนื้อเดียว ในช่วงวาล์วไอดีเปิดหลัง วาล์วไอเสียปิด ส่วนผสมถูกอัดจนมีความดันสูง อุณหภูมิสูง ช่วงปลายของจังหวะอัด ปาล์มไบโอดีเซล ถูกฉีดโดยตรงเข้าไปในกระบอกสูบ เกิดการเผาไหม้ในระบบเชื้อเพลิงร่วม

งานวิจัยมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาถึงผลกระทบโดยการทดลองของปริมาณการใช้เอทานอล ในระบบเชื้อเพลิงร่วมเอทานอล ปาล์มไบโอดีเซล โดยพิจารณาถึง สมรรถนะ ร่วมกับคุณลักษณะในการเผาไหม้ และมลพิษไอเสีย ศึกษาผลกระทบต่อ

1) ความดันสูงสุดในกระบอกสูบ จากการใช้เอทานอลในปริมาณมาก

- 2) ผลต่ออัตราการปลดปล่อยความร้อนสูงสุด และความล่าช้าในการจุดระเบิด
- 3) ผลต่ออัตราความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเบรก
- 4) ผลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก
- 5) ผลต่อมลพิษไอเสีย HC , CO , CO_2 , O_2 และ NO_x

2. เชื้อเพลิง และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

2.1 เชื้อเพลิงและอัตราส่วนผสม

เชื้อเพลิงที่ใช้ในงานวิจัย ประกอบด้วยเอทานอล 99.8%(E100) ปาล์มไบโอดีเซล(B100) และน้ำมันดีเซล เชื้อเพลิงมีคุณสมบัติทางกายภาพดังรายละเอียดในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิง[10]

คุณสมบัติ	มาตรฐาน	ดีเซล	E100	B100
ความถ่วงจำเพาะ	ASTM D1298	0.850	0.794	0.888
ความหนืด 40 ($^{\circ}C$)	ASTM D88	4.1	1.2	6.44
จุดวาบไฟ ($^{\circ}C$)	ASTM D97	52	13.5	155
จุดติดไฟ ($^{\circ}C$)	ASTM D97	74	78.4	160
ซีเทน	ASTM D976-9	52	8	60
ความร้อน (MJ/kg)	ASTM D1250	42.78	26.95	37.52

ในบทความนี้ อัตราส่วนผสมล่วงหน้าทางความร้อน (rp) ของเชื้อเพลิงร่วม เอทานอล-ปาล์มไบโอดีเซลที่ใช้ คำนวณได้จากสมการ(1)

$$rp = \frac{m_E \times LHV_E}{m_E \times LHV_E + m_{BD} \times LHV_{BD}} \quad (1)$$

โดย m_E แทนความสิ้นเปลืองเอทานอล (kg/cycle)

m_{BD} แทนความสิ้นเปลืองและปาล์มไบโอดีเซล (kg/cycle)

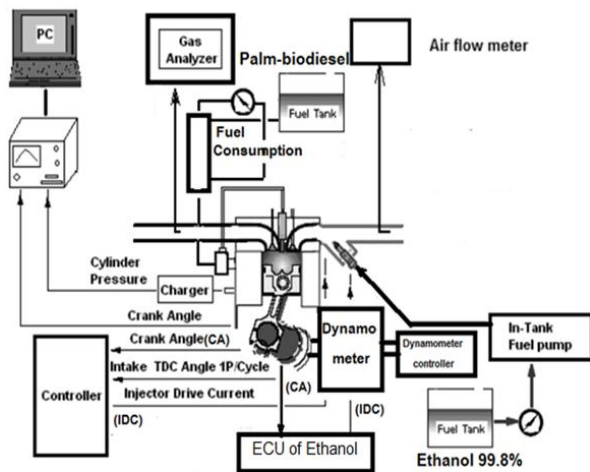
LHV_E แทนความร้อนต่ำของเอทานอล(MJ/kg)

AEC-87

LHV_{BD} แทนความร้อนต่ำของปาล์มไบโอดีเซล
(MJ/kg)

2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องยนต์ที่ใช้ในการทดสอบเป็นเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยว 4 จังหวะ ระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรง อากาศนำเข้าแบบธรรมชาติ ระบบฉีดเชื้อเพลิงเอทานอลด้วยหัวฉีด HONDA (CBR250) ติดตั้งบริเวณท่อร่วมไอดี ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ เครื่องยนต์ทำงานที่รอบคงที่ 1500 รอบต่อนาที อุปกรณ์ทดลองที่ใช้ดังแสดงในรูปที่ 1 รายละเอียดของเครื่องยนต์ดังแสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 1 แผนผังอุปกรณ์การทดลอง

ตารางที่ 2 รายละเอียดข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์

เครื่องยนต์	Mitsubishi D-800
ขนาดกระบอกสูบระยะชัก	82x78 mm x mm
จำนวนสูบ	1 Piston
ปริมาตรกระบอกสูบ	411cc
อัตราส่วนการอัด	18:1
การเผาไหม้	direct injection
กำลังสูงสุด	5.884kW/2400rpm
แรงบิดสูงสุด	25.5Nm/1900 rpm

ชุดทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ประกอบด้วยไดนาโมมิเตอร์ชนิดกระแสไหลวน (Eddy Current Dynamometer) รายละเอียดของไดนาโมมิเตอร์ ดัง

แสดงในตารางที่ 3 อัตราการไหลของอากาศวัดด้วย Air Box, Orifice และ Manometer อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นก่อนและหลังเข้าเครื่องยนต์วัดด้วย Thermocouple type PT 100

ตารางที่ 3 รายละเอียดข้อมูลจำเพาะของไดนาโมมิเตอร์

Model	EA-10Tokyo Meter co., Ltd.
Max. absorbing horse power	7.45 kW
Max. shaft rotational speed	5000 rpm
Arm length	0.2389 m
Coil resistance	Approx. 13 Ω
Insulation resistance	More than 10 M Ω

วัดความเร็วรอบเครื่องยนต์ด้วย Proximity ชนิด Inductive รุ่น GXL-12F ผลิตโดย Sunx Inc. วัดการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงด้วย อุปกรณ์วัดการไหลแบบ burettes skewer รุ่น BE-512 ผลิตโดย Tokyo Meter Co.,Ltd. วัดความดันภายในกระบอกสูบด้วยเซนเซอร์วัดความดันชนิด Piezoelectric รุ่น Kistler 6052C ติดตั้งบนฝาสูบบนห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์ สัญญาณขาออกของเซนเซอร์วัดความดัน ขยายและแปลงสัญญาณโดยอุปกรณ์ Dewetron รุ่น DAQP-CHARGE-B และสัญญาณขององศาเพลวข้อเหวี่ยงรับจาก DEWE-CA-Angle-Sensor 0.2 ส่งเข้ากล่องรับสัญญาณรุ่น DEWE-BOX-CA-EDUC สัญญาณที่ได้นำไปประมวลผลคุณลักษณะของการเผาไหม้ ข้อมูลที่จัดเก็บบันทึกทุก $0.2^{\circ}CA$ ค่าความดันในห้องเผาไหม้ นำมาคำนวณหาอัตราการปลดปล่อยความร้อนได้จากสมการที่ 2 [11]

$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{PdV}{d\theta} + \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{Vdp}{d\theta} \quad (2)$$

AEC-87

โดย $\frac{dQ}{d\theta}$ แทนอัตราการปลดปล่อยความร้อน
(kJ/°CA)

γ แทนอัตราส่วนความร้อนจำเพาะ (c_p/c_v)
ในงานวิจัยนี้ใช้ค่าเท่ากับ 1.37

θ แทนองศาเฟลาข้อเหวี่ยง (°CA)

P แทนความดันในห้องเผาไหม้ (Bar)

V แทนปริมาตรในห้องเผาไหม้ (m^3)

วัดก๊าซไอเสียจากเครื่องยนต์ด้วยเครื่องวิเคราะห์
ก๊าซไอเสียรุ่น HM5000 ผลิตโดย Infrared Industries
ซึ่งสามารถวัดค่าต่างๆได้ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 รายละเอียดการวัดไอเสียจากเครื่องยนต์

Gas	Range	Resolution & Accuracy
HC	0-10,000 ppm	10 ppm $\pm 2\%$
CO	0-10%	0.01% $\pm 2\%$
CO ₂	0-20%	0.01% $\pm 2\%$
O ₂	0-25%	0.01% $\pm 2\%$
NO _x	0-5000ppm	1 ppm $\pm 2\%$

2.3 วิธีการทดลอง

ติดตั้งระบบฉีดเชื้อเพลิงร่วมเอทานอล และ
ปาล์มไบโอดีเซลที่เครื่องยนต์ทดลอง ทำการทดลองที่
ความเร็วรอบคงที่ 1500 รอบต่อนาที ปรับปริมาณ
การฉีดเชื้อเพลิงร่วมเอทานอล 5 ค่าในช่วง rp เท่ากับ
0-0.85 ปรับภาระความดันยังผลเฉลี่ยของเครื่องยนต์
(mep) 143.2 , 286.5 , 429.7 , 572.9 และ 716.2 kPa
ควบคุมอุณหภูมิมีน้ำหล่อเย็นอยู่ในช่วง $80 \pm 5^\circ C$
บันทึกอัตราการไหลของเชื้อเพลิง อัตราการไหล
อากาศ ค่าความดันในห้องเผาไหม้ แรงบิด อัตราการ
สิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเบรค คำนวณพิษจากไอเสีย

3. ผลการวิจัย

นำข้อมูลความดันภายในกระบอกสูบที่บันทึกได้
ไปคำนวณหา อัตราการปลดปล่อยความร้อนของเชื้อ

เพลิง ดังสมการที่ (2) ข้อมูลความดันที่ได้เฉลี่ยมาจาก
ข้อมูลการเผาไหม้ 60 วิวัจจร

3.1 การวิเคราะห์คุณลักษณะการเผาไหม้ของ เครื่องยนต์เชื้อเพลิงร่วมที่ภาระต่างๆ

รูปที่ 2-1, 2-2 แสดงผลกระทบของ rp ต่อค่า
ความดัน (P) และค่าความดันสูงสุด (P_{max}) ที่ภาระ
mep คงที่ °CAใดๆ และรูปที่ 4 แสดงผลกระทบของ
 rp ต่อค่า P_{max} และการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง °CA
 P_{max} ที่ภาระความดันยังผลเฉลี่ยคงที่ พบว่าเมื่อค่า
 rp เพิ่มขึ้นจากน้อยไปหามาก ค่าความดันสูงสุด มีค่า
เพิ่มขึ้นช้าๆตามค่า rp จนมีค่าสูงสุดที่ค่า rp คงที่
และมีค่าลดลงที่ rp สูงขึ้น

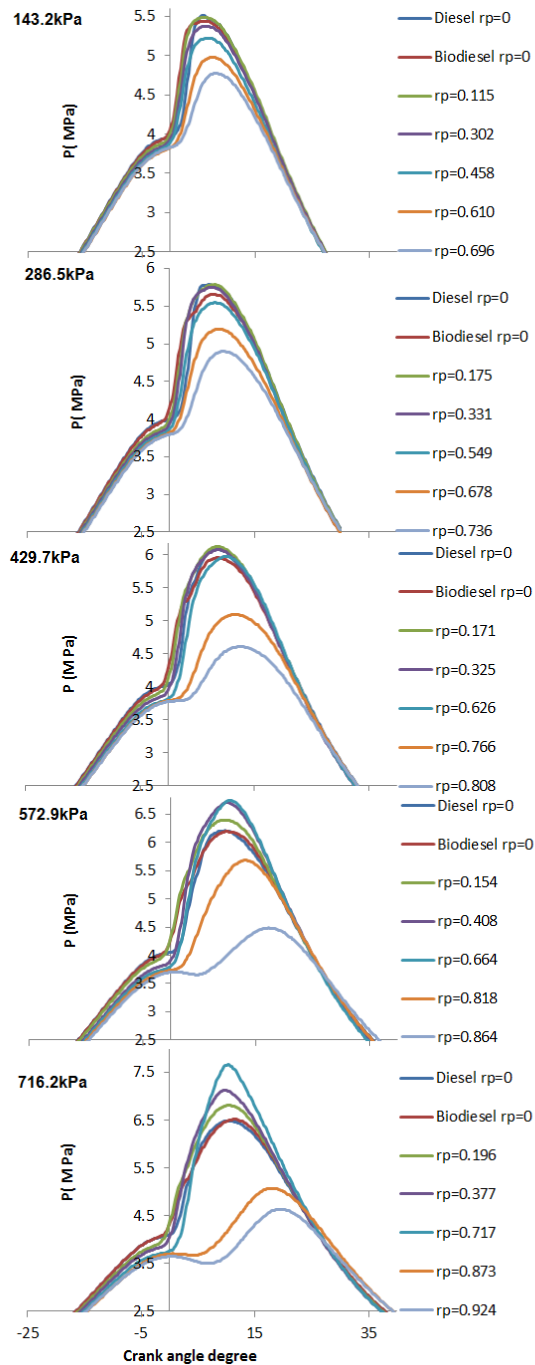
จากรูปที่ 2-2 และรูปที่ 4 พบว่าที่ค่าภาระ mep
143.2 -429.7 kPa ความดันสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นต่อเนื่อง
ที่ rp เท่ากับ 0-0.2 จนมีค่าสูงกว่าความดันสูงสุดของ
ปาล์มไบโอดีเซล เมื่อ rp เพิ่มขึ้นจนถึงช่วง 0.2-0.8
ความดันสูงสุดเริ่มมีค่าลดลงจนอยู่ในระดับต่ำสุด

เมื่อพิจารณาที่ค่าภาระ mep จาก 572.9 - 716.2
kPa พบว่าที่ภาระสูงขึ้น rp เพิ่มขึ้น ความดันสูงสุดมี
ค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ที่ค่าภาระ mep 572.9 kPa
ที่ rp 0.664 P_{max} มีค่าเพิ่มขึ้นต่อเนื่องจนมีค่าสูงสุด
6.745 MPa และมีค่าลดลงทันทีที่ rp สูงขึ้น ที่ค่า
ภาระ mep 716.2 kPa ที่ rp 0.717 ความดันสูงสุด
มีค่าเพิ่มขึ้นต่อเนื่องจน P_{max} มีค่าสูงสุด 7.661 MPa
และมีค่าลดลงที่ rp สูงขึ้น

จากรูปที่ 4 เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่า
ความดันสูงสุดและตำแหน่ง °CA ของการเกิดความดัน
สูงสุด พบว่าที่ภาระ mep เดียวกัน เมื่อ rp มีค่าเพิ่ม
ขึ้น ค่า P_{max} เลื่อนไป °CA ที่สูงขึ้น 2-3 °CA ที่ค่าภาระ
mep ต่ำ และเลื่อนไปสูงถึง 7-8 °CA ที่ค่าภาระ mep
สูง ที่ rp เดียวกัน เมื่อค่าภาระ mep สูงขึ้น °CA P_{max}
เลื่อนไป 2-4 °CA ค่าสูงสุดของ P_{max} ที่เกิดมีการ

AEC-87

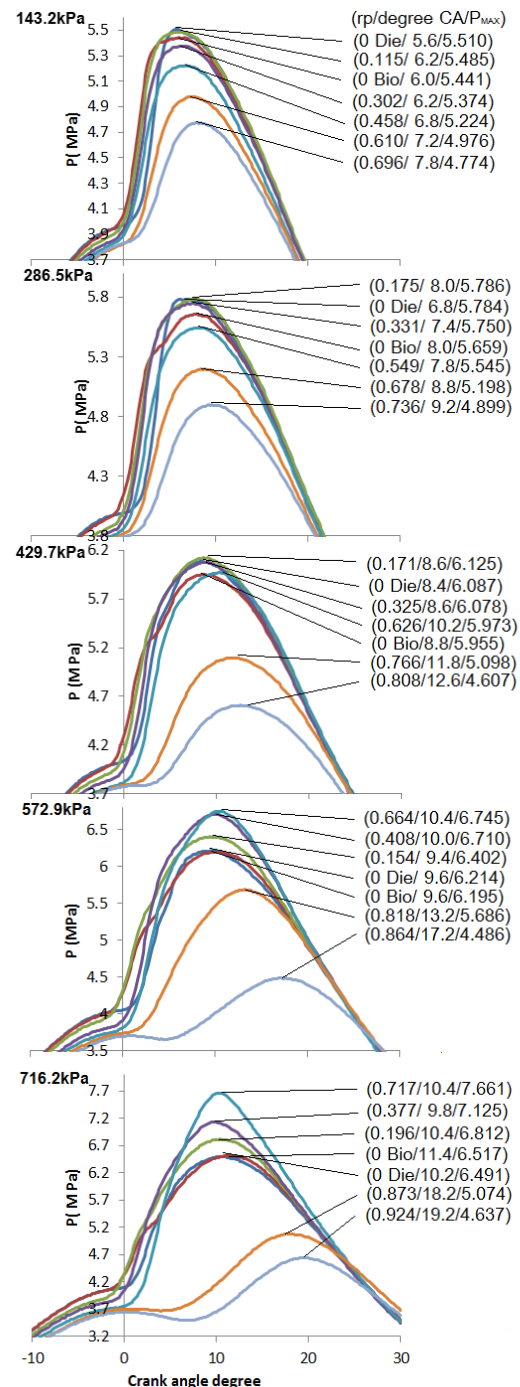
เปลี่ยนค่า เกิดที่ตำแหน่ง $^{\circ}\text{CA}$ $P_{\max}$ สูงขึ้น เมื่อค่า rp และค่าภาระ mep มีค่าสูงขึ้นสอดคล้องกัน



รูปที่ 2-1 ผลกระทบของ rp ต่อความดัน P ที่ภาระความดันยังผลเฉลี่ยคงที่ ที่ตำแหน่ง $^{\circ}\text{CA}$ ใดๆ

รูปที่ 3-1, 3-2 แสดงผลกระทบ rp ต่ออัตราการปลดปล่อยความร้อน (Hrr) และอัตราการปลดปล่อย

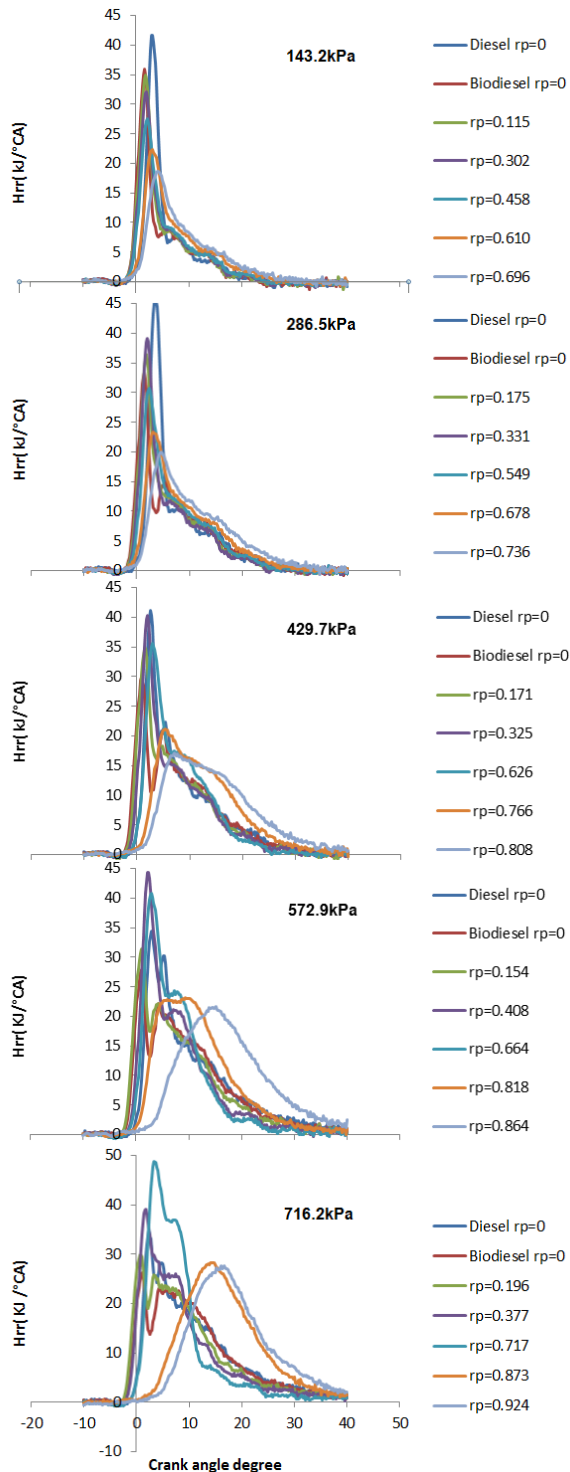
ความร้อนสูงสุด ($Hrr_{\max}$) $^{\circ}\text{CA}$ ใดๆ และรูปที่ 5 แสดงผลกระทบของ rp ต่อการเปลี่ยนแปลง $Hrr_{\max}$ และการเปลี่ยนแปลง $^{\circ}\text{CA}$ $Hrr_{\max}$ ที่ภาระ mep คงที่



รูปที่ 2-2 ผลกระทบของ rp ต่อความดัน $P_{\max}$ ที่ภาระความดันยังผลเฉลี่ยคงที่ ที่ตำแหน่ง $^{\circ}\text{CA}$ ใดๆ

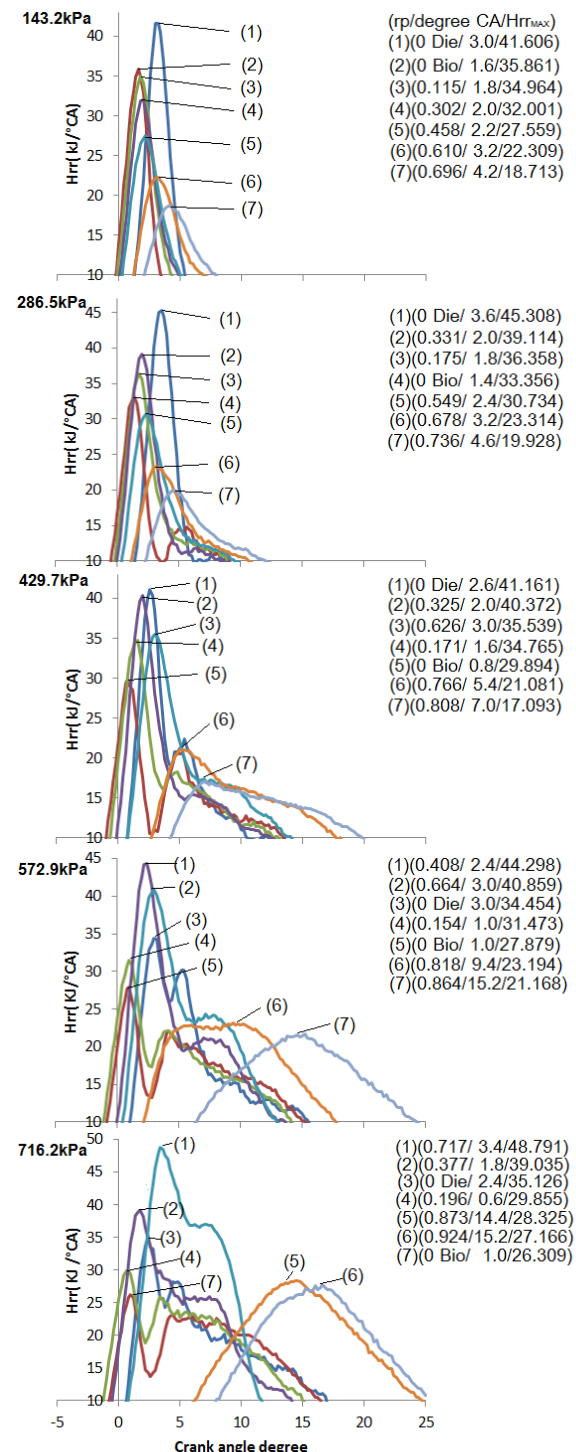
AEC-87

พบว่าที่ rp เท่ากับ 0 Hrr_{max} มีค่าลดลงเมื่อค่าภาระ mep มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อค่า rp มีค่าเพิ่มขึ้นจากน้อยไปหามากพบว่าที่ค่าภาระ mep 143.2 kPa ค่า Hrr_{max} ลดลงตาม rp ที่เพิ่มขึ้น สำหรับค่าภาระ mep ในช่วง



รูปที่ 3-1 ผลกระทบของ rp ต่อ Hrr ที่ภาระความดันยังผลเฉลี่ยคงที่ ที่ตำแหน่ง CA ใดๆ

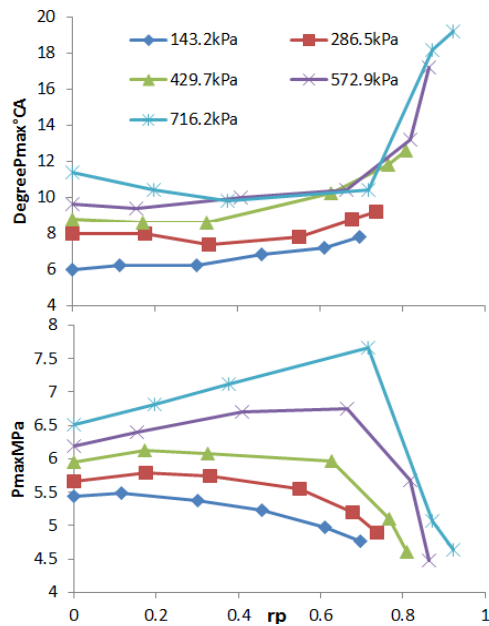
286.5-716.2 kPa เมื่อ rp มีค่าเพิ่มขึ้นจากน้อยไปหามากค่า Hrr_{max} มีค่าเพิ่มสูงขึ้นสอดคล้องกัน จนมีค่าสูงสุดที่ rp คงที่และมีค่าลดลงทันทีที่ rp สูงขึ้น



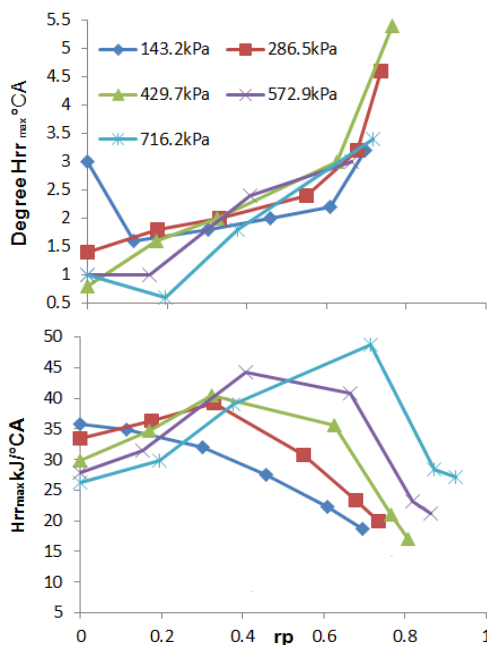
AEC-87

รูปที่ 3-2 ผลกระทบของ rp ต่อ Hrr_{max} ที่ภาวะความดันยังผลเฉลี่ยคงที่ ที่ตำแหน่ง $^{\circ}CA$ ใดๆ

พบว่าที่ภาวะ mep 286.5 kPa Hrr_{max} มีค่าเพิ่มขึ้นในช่วง rp 0-0.3 มีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ rp เท่ากับ 0.331 มีค่า 39.114 kJ/ $^{\circ}CA$ และมีค่าลดลง



รูปที่ 4 ผลกระทบของ rp ต่อการเปลี่ยนแปลง P_{max} และการเปลี่ยนแปลง $^{\circ}CA$ ตำแหน่ง P_{max} ที่ภาวะคงที่



รูปที่ 5 ผลกระทบของ rp ต่อการเปลี่ยนแปลง

ค่า Hrr_{max} และ $^{\circ}CA$ การเกิด Hrr_{max} ที่ ภาวะความดันยังผลเฉลี่ยคงที่

ทันทีเมื่อ rp มีค่าสูงขึ้น ที่ภาวะ mep 429.7 kPa Hrr_{max} มีค่าเพิ่มขึ้นในช่วง rp 0-0.3 มีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุด 40.372 kJ/ $^{\circ}CA$ ที่ rp เท่ากับ 0.325 และมีค่าลดลงทันทีเมื่อ rp มีค่าสูงขึ้น ที่ภาวะ mep 572.9 kPa Hrr_{max} มีค่าเพิ่มขึ้นในช่วง rp 0-0.4 มีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ 40.860 kJ/ $^{\circ}CA$ ที่ rp เท่ากับ 0.408 และมีค่าลดลงทันทีเมื่อ rp มีค่าสูงขึ้น ที่ภาวะ mep 716.2 kPa Hrr_{max} มีค่าเพิ่มขึ้นในช่วง rp 0-0.7 มีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุด 48.791 kJ/ $^{\circ}CA$ ที่ rp เท่ากับ 0.717 และมีค่าลดลงทันทีเมื่อ rp มีค่าสูงขึ้น

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลง $^{\circ}CA$ ของการเกิด Hrr_{max} ที่ภาวะ mep คงที่ พบว่าที่ rp เท่ากับ 0 ปาล์มไบโอดีเซลมีจุดเริ่มต้นการเผาไหม้ที่ $^{\circ}CA$ ที่เร็วกว่าน้ำมันดีเซล 3 $^{\circ}CA$ สำหรับในระบบเชื้อเพลิงร่วมเอทานอล ปาล์มไบโอดีเซล ที่ความดันยังผลเฉลี่ยต่ำและ rp ต่ำ มีปริมาณปาล์มไบโอดีเซลมากกว่าเอทานอล จุดเริ่มต้นการเผาไหม้จะเร็วกว่าน้ำมันดีเซลและล่าช้าออกไป 2-4 $^{\circ}CA$ ที่ rp สูงขึ้น เมื่อ rp สูงถึง 0.7 ความล่าช้าของการเผาไหม้จะเลื่อนออกไป 6-8 $^{\circ}CA$ และที่ rp มากกว่า 0.7 ความล่าช้าจะเลื่อนออกไปมากกว่า 10 $^{\circ}CA$ เนื่องจากเอทานอลปริมาณมากดูดความร้อน เพื่อระเหยกลายเป็นไอในช่วงปลายสุดของจังหวะอัด มีผลต่อการผสมเป็นเนื้อเดียวกันระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศ ก่อนการจุดระเบิด ส่งผลให้จุดที่เกิดอุณหภูมิ และ P_{max} มี $^{\circ}CA$ ที่เลื่อนออกไป มีผลต่อทั้ง P_{max} และ Hrr_{max} มีผลโดยตรงต่อความสมบูรณ์ของการเผาไหม้ในจังหวะระเบิด ส่งผลให้แต่ค่าภาวะ mep สามารถฉีดเอทานอลได้ในปริมาณที่จำกัด โดยการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นต้องอยู่ในช่วงที่ทำให้เกิด Hrr_{max} และ P_{max} จึงจะเกิดการเผาไหม้

AEC-87

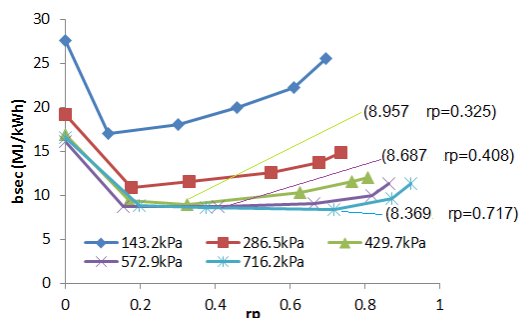
เชื้อเพลิงได้ทั้งหมด ค่าสูงสุดของ $H_{rr_{max}}$ และ P_{max} ที่เกิดมีการเปลี่ยนค่า และตำแหน่ง $^{\circ}CA$ $H_{rr_{max}}$ และ $^{\circ}CA$ P_{max} สูงขึ้น เมื่อค่า rp และค่าภาระ mep มีค่าสูงขึ้นสอดคล้องกัน

3.2 อัตราความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเบรก

รูปที่ 6 แสดงค่าอัตราความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเบรก ($bsec$) เปรียบเทียบกับค่า rp ที่ภาระ mep คงที่ ผลของการเผาไหม้เชื้อเพลิงร่วมส่วนผสมบางที่ภาระต่ำ 143.2 และ 286.5 kPa พบว่าเมื่อ rp มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0-0.2 $bsec$ มีค่าลดลงจนถึงค่าต่ำสุด เนื่องจากในเชื้อเพลิงร่วมมีปริมาณปาล์มไบโอดีเซลมากกว่าเอทานอล แต่ที่ rp สูงกว่า 0.2 พบว่า $bsec$ มีค่าเพิ่มขึ้นตาม rp ที่เพิ่มขึ้น

สำหรับเชื้อเพลิงร่วมส่วนผสมบาง ที่ค่าภาระ mep 429.7, 572.9 และ 716.2 kPa ค่า rp 0.2-0.85 พบว่าที่ค่าภาระ mep 716.2 kPa rp 0.717 $bsec$ มีค่าลดลงและมีค่าต่ำที่สุด 8.369 MJ/kWh และมีค่าสูงขึ้นที่ rp สูงขึ้นที่ภาระ mep คงที่

เมื่อพิจารณาที่ rp เดียวกันพบว่า ค่า $bsec$ มีค่าลดลงตามภาระ mep ที่เพิ่มสูงขึ้น



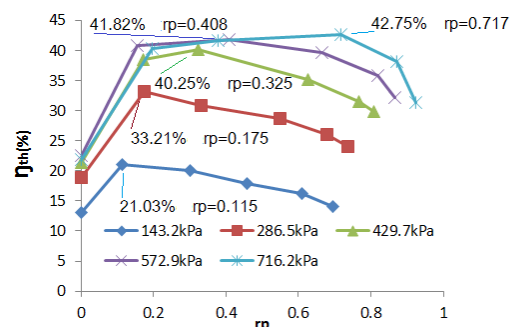
รูปที่ 6 ค่าอัตราความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเบรก $bsec$ เปรียบเทียบกับค่า rp ที่ภาระความดันยังผลเฉลี่ยคงที่

3.3 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก

รูปที่ 7 แสดงประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก (η_{th}) พบว่าที่ rp เท่ากับ 0 η_{th} มีค่าต่ำสุด และมีค่า

สูงขึ้นเมื่อ rp มีค่าสูงขึ้น η_{th} มีค่าสูงสุดที่ rp คงที่ค่าหนึ่ง และมีค่าลดลงทันทีที่ rp มีค่าสูงขึ้น พบว่าที่ภาระ mep 143.2 และ 286.5 kPa ค่า η_{th} มีค่าลดลงเมื่อ rp สูงกว่า 0.2

ที่ค่าภาระ mep 429.7, 572.9 และ 716.2 kPa ค่า rp 0.2-0.85 η_{th} มีค่าสูงสุดที่ภาระ mep 716.2 kPa ที่ rp 0.717 η_{th} มีค่าสูงที่สุด 42.75% และมีค่าลดลงเมื่อ rp สูงขึ้น จากผลการทดลองพบว่า ที่ rp คงที่เมื่อภาระ mep มีค่าสูงขึ้น กำลังม้าเบรกมีค่าสูงขึ้นด้วยส่งผลให้ η_{th} มีค่าเพิ่มขึ้น และที่ภาระ mep คงที่เมื่อ rp สูงกว่าจุด η_{th} สูงสุด ค่า $bsec$ ของเชื้อเพลิงที่ใช้จริงสูงขึ้น ที่ค่าภาระ mep คงที่ ส่งผลให้ η_{th} ลดลงตามค่า rp ที่สูงขึ้น



รูปที่ 7 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก η_{th} เปรียบเทียบกับค่า rp ที่ภาระความดันยังผลเฉลี่ยคงที่

3.4 มลภาวะ

รูปที่ 8 แสดงถึงผลกระทบของ rp ต่อค่ามลภาวะในเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้เอทานอลและปาล์มไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงร่วม ผลกระทบของ rp ที่ค่าภาระ mep คงที่ เมื่อ rp มีค่าเพิ่มขึ้น พบว่า HC และ CO มีค่าเพิ่มขึ้น CO_2 มีค่าลดลงเล็กน้อย O_2 ค่อนข้างคงที่มีสาเหตุมาจาก ที่ rp สูงขึ้น มีปริมาณเอทานอลมากเกิดความล่าช้าของการเผาไหม้ไปที่ $^{\circ}CA$ ที่สูงขึ้นเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้น้อยลง HC เหลือเพิ่มขึ้นเกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ CO มีค่าสูงขึ้น

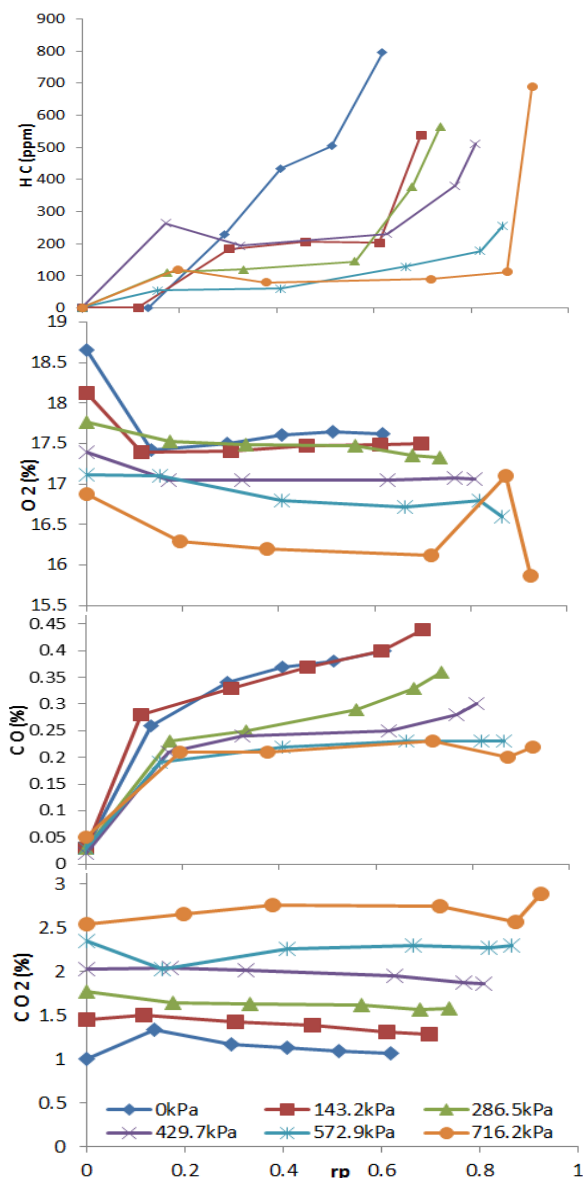
เมื่อพิจารณาผลที่ค่าที่ค่าภาระ mep 143.2-716.2 kPa ใน rp 3 ช่วงคือ

AEC-87

rp ในช่วงที่ต่ำกว่า 0.2 ที่ค่าภาระ mep สูงขึ้นพบว่า HC , CO , O_2 มีค่าลดลง CO_2 มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากในเชื้อเพลิงร่วมมีปริมาณ เอทานอลที่ต่ำเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์

เมื่อพิจารณาผล rp คงที่ในช่วง rp สูงกว่า 0.2 ต่ำกว่า 0.75 ที่ค่าภาระ mep สูงขึ้นพบว่า HC , CO , O_2 มีค่าลดลงเร็วกว่า ที่ rp ต่ำกว่า 0.2 CO_2 มีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ภาระ mep 716.2 kPa ที่ rp เท่ากับ 0.717 เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ที่ภาระ mep สูง

เมื่อพิจารณาผลที่ rp สูงกว่า 0.75 ที่ค่าภาระ mep ทุกค่า พบว่า HC , CO , O_2 มีค่าเพิ่มขึ้น CO_2 มีค่าลดลง แต่ค่า HC , CO มีแนวโน้มมีปริมาณ



รูปที่ 8 ผลกระทบของค่า rp ต่อค่ามลภาวะที่ภาระความดันยังผลเฉลี่ยคงที่

มากขึ้นที่ rp สูง เนื่องจากในเชื้อเพลิงร่วมมีปริมาณเอทานอลที่สูงขึ้นการเผาไหม้ เกิดความล่าช้าในการจุดระเบิด

4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาถึงผลกระทบโดยการทดลองจากปริมาณการฉีดเอทานอลตรงท่อไอดี ในเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงร่วมกับปาล์มไบโอดีเซลต่อค่าสมรรถนะ พิจารณาร่วมกับค่าคุณสมบัติต่างๆในการเผาไหม้และค่ามลพิษไอเสียตามวัตถุประสงค์ข้างต้นสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

4.1 ค่าความดันสูงสุดในกระบอกสูบ

ที่ภาระ mep คงที่ P_{max} มีค่าเพิ่มขึ้นตามค่า rp ที่เพิ่มขึ้น และมีค่าสูงสุดที่ rp คงที่ค่าหนึ่ง เมื่อ rp มีค่าสูงขึ้นอีก ค่า P_{max} จะมีค่าลดลง เมื่อพิจารณาที่ rp คงที่ค่าเดียวกัน ที่ค่าภาระ mep มีค่าเพิ่มขึ้น ความดันสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น พบว่าที่ภาระ mep 716.2 kPa ที่ rp 0.717 ความดันเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดที่ 7.66 MPa ที่ตำแหน่ง 10.4 °CA ATDC

4.2 ผลต่ออัตราการปลดปล่อยความร้อนสูงสุด

ที่ค่าภาระ mep คงที่ rp ต่ำ Hrr_{max} มีค่าลดลง เมื่อค่าภาระ mep สูงขึ้น และที่ค่าภาระ mep คงที่เมื่อค่า rp เพิ่มขึ้นทำให้ Hrr_{max} มีค่าเพิ่มขึ้น Hrr_{max} มีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ rp คงที่ค่าหนึ่ง หลังจากนั้นจะมีค่าลดลงที่ rp สูงขึ้น ผลที่ได้จากการทดลองพบว่าที่ค่าภาระ mep 716.2 kPa ที่ rp เท่ากับ 0.717

Hrr_{max} มีค่าสูงสุด 48.791 kJ/°CA

ผลต่อความล่าช้าในการจุดระเบิดที่ rp ต่ำ ค่าภาระ mep ต่ำ มีปริมาณปาล์มไบโอดีเซลมาก Hrr_{max} มีค่าสูงสุดที่ °CA ที่เร็วขึ้น 2-3 °CA เมื่อเทียบผลกับน้ำมันดีเซล แต่ที่ภาระ mep สูง 716.2 kPa rp สูง Hrr_{max} มีค่าสูงสุดที่ °CA ที่สูงขึ้น เมื่อ rp มีค่าสูงถึง

AEC-87

0.7 เกิดความล่าช้าของการเผาไหม้ มีผลให้ Hrr_{max} เลื่อนออกไป 6-8 °CA ที่ rp 0.717 Hrr_{max} เลื่อนตำแหน่งมาอยู่ที่ 10.4 °CA ATDC และเลื่อนออกไปมากกว่า 10 °CA ที่ rp สูงกว่า 0.75

4.3 ผลต่ออัตราความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเบรค

ที่ค่าภาระ mep คงที่ bsec มีค่าลดลงตาม rp ที่เพิ่มขึ้นและมีค่าต่ำสุดที่ rp คงที่ค่าหนึ่ง เมื่อ rp มีค่าเพิ่มขึ้นต่อเนื่อง bsec มีค่าสูงขึ้น พบว่าในระบบเชื้อเพลิงร่วม เอทานอล ปาล์มไบโอดีเซล ที่ภาระ mep 716.2 kPa ที่ rp เท่ากับ 0.717 bsec มีค่าต่ำสุด 8.369 MJ/kWh เมื่อพิจารณาที่ rp คงที่ค่า bsec มีค่าลดลงเมื่อภาระ mep มีค่าสูงขึ้น

4.4 ผลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรค

ที่ค่าภาระ mep คงที่ η_{th} มีค่าเพิ่มขึ้นตาม rp ที่เพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุดที่ rp คงที่ค่าหนึ่ง เมื่อ rp มีค่าเพิ่มขึ้นต่อเนื่อง η_{th} มีค่าต่ำลง พบว่าในระบบเชื้อเพลิงร่วม เอทานอล ปาล์มไบโอดีเซล ที่ค่าภาระ mep 716.2 kPa ที่ rp เท่ากับ 0.717 η_{th} มีค่าสูงสุด 42.75% และที่ rp คงที่ ค่า η_{th} มีค่าสูงขึ้นเมื่อค่าภาระ mep มีค่าสูงขึ้น

4.5 ผลต่อมลพิษไอเสีย

ค่าที่อ่านได้จากเครื่องวัดคุณภาพไอเสียมี 4 ค่าคือ HC , O_2 , CO และ CO_2 พิจารณาผลกระทบของค่า rp ต่อปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นพบว่า

ที่ค่าภาระ mep คงที่ rp มีค่าเพิ่มขึ้น HC และ CO มีค่าเพิ่มขึ้น CO_2 มีค่าลดลงเล็กน้อย O_2 คงที่ มีสาเหตุมาจากที่ rp สูงขึ้น มีเอทานอลมากขึ้น เกิดความล่าช้าของการเผาไหม้ เลื่อนไปที่ °CA ที่สูงขึ้น เวลาที่ใช้ในการเผาไหม้น้อยลง HC เหลือเพิ่มขึ้นเกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ CO มีค่าสูงขึ้น

เมื่อค่าภาระ mep มีค่าเพิ่มขึ้น rp อยู่ในช่วงที่ต่ำกว่า 0.2 พบว่า HC , CO , O_2 มีค่าลดลง CO_2 มีค่าเพิ่มขึ้น มีสาเหตุจากในเชื้อเพลิงร่วม มีปริมาณ

เอทานอลที่ต่ำเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ของปาล์มไบโอดีเซล

เมื่อค่าภาระ mep มีค่าเพิ่มขึ้น rp สูงกว่า 0.2 ต่ำกว่า 0.75 พบว่า HC , CO , O_2 มีค่าลดลงเร็วกว่าในช่วง rp ต่ำกว่า 0.2 CO_2 มีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ภาระ mep สูงสุด ที่ rp เท่ากับ 0.717 เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ที่ค่าภาระ mep ที่สูง

เมื่อค่าภาระ mep มีค่าเพิ่มขึ้นที่ rp สูงกว่า 0.75 พบว่า HC , CO , O_2 มีค่าเพิ่มขึ้น CO_2 มีค่าลดลงเนื่องจากในเชื้อเพลิงร่วมมีปริมาณเอทานอลที่สูงขึ้น เกิดความล่าช้าในการจุดระเบิดเกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ กองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน และหลักสูตรบัณฑิตศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ในการสนับสนุนงบประมาณและสถานที่ในการวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Padala S et al. Ethanol utilisation in a diesel engine using dual-fuelling technology, Fuel (2013), URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2013.03.049>, access on 24/04/2013.
- [2] Makame Mbarawa, Brain Edward Milton and Robert Thomas Casey (2001). Experiments and modeling of natural gas combustion ignited by pilot diesel fuel spray, Int. J. Therm. Science, vol. 40, 2001, pp. 927 – 936.
- [3] R.G. Papagiannakis and D.T. Hountalas (2003). Experimental investigation concerning the effect of natural gas percentage on performance and emissions of a DI dual fuel diesel engine, Applied Thermal Engineering, vol. 23, 2003, pp. 353 – 365.

AEC-87

- [4] A. Henham and M.K. Makkar (1998). Combustion of simulated biogas in a dual fuel diesel engine, *Energy Convers Mgmt*, vol. 39(16-18), 1998, pp. 2001 – 2009.
- [5] Chang Sik Lee, Ki Hyung Lee and Dae Sik Kim (2003). Experimental and numerical study on the combustion characteristics of partially premixed charge compression ignition engine with dual fuel, *Fuel*, vol. 82, 2003, pp. 553 – 560.
- [6] Alberto Boretti (2012). Advantages of converting diesel engines to run as dual fuel ethanol-diesel, *Applied Thermal Engineering*, vol. 47, April 2012, pp. 1 – 9.
- [7] Bhupendra Singh Chauhan, Naveen Kumar, Shyam Sunder pal and Yong Du Jun (2011). Experimental studies on fumigation of ethanol in a small capacity diesel engine, *Energy*, vol. 36, January 2011, pp. 1030 – 1038.
- [8] Zhang Bo, Fu Weibiao and Gong Jingsong (2009). Study of fuel consumption when introducing DME or ethanol into diesel engine, *Fuel*, vol. 85, 2006, pp. 778 – 782.
- [9] Noboru Noguchi, Hideo Terao and Chikanori Sakata (1996). Performance improvement by control of flow rates and diesel injection timing on dual-fuel engine with ethanol, *Bioresource Technology*, vol. 56, 1996, pp. 35 – 39.
- [10] อธิธิพล วรพันธ์, กุลเชษฐ์ เพียรทอง, สงบทิพย์ พงสถาปดี และ เต๋นพงศ์ สุดภักดี (2549). สมรรถนะและการปล่อยมลพิษของเครื่องยนต์ดีเซลเมื่อใช้น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วผสมเอทานอลเป็นเชื้อเพลิง, *วิศวกรรมสาร มข.* 33(6), หน้า 691–705.
- [11] Heywood, JB. (1988). *Internal Combustion Engine Fundamentals* International Education, McGraw-hill, Massachusetts.

