



ผลกระทบของการใช้อะซิโตน-บิวทานอล-เอทานอลผสมดีเซลเป็นเชื้อเพลิงต่อเสถียรภาพการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยว

อบ นิลผาย*

หน่วยปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยียานยนต์และพลังงานทางเลือก, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล,
คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: ob@eng.src.ku.ac.th

วันที่รับบทความ: 7 กรกฎาคม 2563; วันที่ทบทวนบทความ: 15 กรกฎาคม 2563; วันที่ตอบรับบทความ: 17 กรกฎาคม 2563

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 25 สิงหาคม 2563

บทคัดย่อ: อะซิโตน-บิวทานอล-เอทานอล หรือ ABE เป็นเชื้อเพลิงทางเลือกหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจในการพิจารณาเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลเนื่องจากมีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับบิวทานอล อีกทั้งเมื่อผสม ABE กับน้ำมันดีเซลในสัดส่วนร้อยละ 20 โดยปริมาตร (ABE20) พบว่ามีคุณลักษณะของสเปรย์ทั้งในสถานะของเหลวและก๊าซที่ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล แต่เมื่อพิจารณาตัวแปรด้านการเผาไหม้พบว่าค่าความล่าช้าในการจุดระเบิดของ ABE20 มีค่าสูงกว่าดีเซลอย่างมีนัยสำคัญ โดยทั่วไปแล้วการเพิ่มขึ้นของค่าความล่าช้าในการจุดระเบิดจะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซล ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้จากความแปรผันของวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ที่เพิ่มขึ้น ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบการใช้ ABE20 เป็นเชื้อเพลิงต่อเสถียรภาพการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซล โดยนำเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยวที่ไม่มีการดัดแปลงทดสอบบนไดนาโมมิเตอร์เพื่อควบคุมภาระการทำงานของเครื่องยนต์ที่มีค่าความดันยังผลเฉลี่ยคงที่เท่ากับ 4 และ 8 บาร์ ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1,400 รอบต่อนาที โดยวัดค่าความดันในกระบอกสูบเพื่อเปรียบเทียบความแปรผันของวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์กับน้ำมันดีเซลล้วน รวมทั้งพิจารณาตัวแปรด้านสมรรถนะและการเผาไหม้เพื่อประกอบการวิเคราะห์ความเสถียรภาพของเครื่องยนต์ จากการวิเคราะห์คุณลักษณะการเผาไหม้และเสถียรภาพการทำงานของเครื่องยนต์พบว่า การมีค่าความล่าช้าในการจุดระเบิดและค่าความดันในกระบอกสูบสูงสุดของ ABE20 ที่มากกว่าดีเซลไม่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพการทำงานของเครื่องยนต์ ซึ่งเห็นจากค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันของวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ที่ไม่แตกต่างจากดีเซลอย่างมีนัยสำคัญและมีค่าที่น้อยกว่าค่าความแปรผันสูงสุดที่ยอมรับได้สำหรับเครื่องยนต์เผาไหม้ภายใน

คำสำคัญ: เครื่องยนต์ดีเซล; อะซิโตน-บิวทานอล-เอทานอล; เสถียรภาพของเครื่องยนต์; ความแปรผันของวัฏจักร



The Effect of Acetone-Butanol-Ethanol Blended Diesel Fuel on the Engine Stability of a Single Cylinder Diesel Engine

Ob Nilaphai*

Automotive Technology and Alternative Energy Research Unit, Department of Mechanical Engineering,
Faculty of Engineering at Sriracha, Kasetsart University, Sriracha Campus

* Corresponding author, E-mail: ob@eng.src.ku.ac.th

Received: 7 July 2020; Revised 15 July 2020; Accepted: 17 July 2020

Online Published: 25 August 2020

Abstract: Acetone-Butanol-Ethanol (ABE) has been interested as an alternative fuel for diesel engines due to its physical properties similar to butanol. Moreover, ABE-diesel blends in 20% by volume (ABE20) also performed the liquid and vapor spray characteristics close to diesel. However, the combustion characteristic of ABE20 was different from diesel by the longer ignition delay. Generally, the increasing of ignition delay affects on the engine stability of diesel engine operation, considered by the increasing of cyclic variation. Therefore, the objective of this work is to investigate the effect of the ABE20 on the engine stability of an unmodified single cylinder diesel engine. The engine was installed with an engine dynamometer in order to control the testing conditions at the engine loads 4 and 8 bar of IMEP and engine speed 1,400 rpm. The cylinder pressure was measured to compare the cyclic variation of engine operation with the reference diesel fuel. In addition, the engine performance and combustion parameters were also investigated to analysis the effect on engine stability. The experimental results show that the longer ignition delay and higher peak of cylinder pressure of ABE20 are unaffected to the engine stability, as presenting the value of coefficient of variation (COV) similar to diesel and lower than the acceptable limit for the internal combustion engines.

Keywords: Diesel Engines; Acetone-Butanol-Ethanol; Engine Stability; Cyclic Variation



1. บทนำ

ความแปรผันของวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ (Cyclic Variation) เป็นลักษณะเฉพาะหนึ่งที่เกิดขึ้นในเครื่องยนต์เผาไหม้ภายใน ซึ่งสังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงของค่าความดันในกระบอกสูบที่เกิดขึ้นไม่ซ้ำกันในแต่ละวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ (Cycle-by-Cycle) ความแปรผันนี้เป็นสิ่งที่ไม่พึงปรารถนาสำหรับเครื่องยนต์ เนื่องจากหากค่านี้มีมากจะส่งผลต่อการลดลงของประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องยนต์ และการปลดปล่อยมลพิษที่สูงขึ้น [1-3]

โดยทั่วไปแล้วการศึกษาเกี่ยวกับความแปรผันของวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์มักพบในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟ (Spark Ignition Engines: SI Engines) เนื่องจากทำงานภายใต้หลักการของการเตรียมส่วนผสมก่อนการจุดระเบิด (Premixed Combustion) ซึ่งในความเป็นจริงแล้วมีความแตกต่างกันในแต่ละวัฏจักร โดยสามารถสรุปสาเหตุได้ดังนี้ เช่น ความแตกต่างกันของส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศในแต่ละวัฏจักร ความแตกต่างกันของปริมาณการประจุส่วนผสมในแต่ละวัฏจักร และความแตกต่างของแก๊สไอเสียที่หลงเหลืออยู่ในกระบอกสูบในแต่ละวัฏจักร เป็นต้น ซึ่งสาเหตุเหล่านี้ส่งผลต่ออัตราการเผาไหม้ (Burning Rate) และการพัฒนาตัวของความดันกระบอกสูบที่แตกต่างกันในแต่ละวัฏจักร [1-2]

สำหรับตัวแปรนี้กลับไม่เป็นที่นิยมในการศึกษาในเครื่องยนต์ดีเซลมากนัก เนื่องจากมีหลักการการทำงานโดยอาศัยความสามารถในการจุดระเบิดด้วยตัวเองของเชื้อเพลิงในสภาวะที่เหมาะสม ซึ่งมี

ช่วงเวลาในการเตรียมส่วนผสมที่สั้นมาก กล่าวคือช่วงเวลาเตรียมส่วนผสมจะเริ่มตั้งแต่การฉีดเชื้อเพลิงเข้าไปในกระบอกสูบจนกระทั่งเริ่มต้นจุดระเบิดด้วยตัวเองเท่านั้นซึ่งใช้เวลาไม่กี่มิลลิวินาที อีกทั้งการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ชนิดนี้โดยส่วนใหญ่ถูกควบคุมการเผาไหม้แบบแพร่ (Diffusion Combustion) ซึ่งเป็นการเผาไหม้โดยไม่มีการเตรียมส่วนผสมก่อนการเผาไหม้เหมือนในเครื่องยนต์ SI ดังนั้น จึงทำให้มีความแปรผันของวัฏจักรน้อย [3]

อย่างไรก็ตาม ความแปรผันของวัฏจักรการทำงาน of เครื่องยนต์นี้จะถูกนำมาวิเคราะห์เสถียรภาพการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซลเมื่อเชื้อเพลิงที่ใช้ นั้นมีความสามารถในการจุดระเบิดตัวเองที่ต่ำ (Low Auto-Ignition Ability) ซึ่งแสดงให้ด้วยค่าซีเทนัมเบอร์ (Cetane Number) [3] โดยเชื้อเพลิงใดที่มีค่าซีเทนต่ำจะส่งผลให้มีช่วงล่าช้าในการจุดระเบิด (Ignition delay: ID) ยาวกว่าและทำให้มีช่วงเวลาในการเตรียมส่วนผสมนั้นยาวนานขึ้น อันส่งผลทำให้มีการสะสมของพลังงานที่มากขึ้นก่อนเกิดการเผาไหม้ที่รวดเร็วและรุนแรง โดยสังเกตได้จากการเพิ่มขึ้นของความดันในกระบอกสูบที่มีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและมีค่าสูงกว่าเดิเซลปกติ [3-5]

เชื้อเพลิงแอลกอฮอล์ เช่น เอทานอล บิวทานอล และเมทานอล เป็นเชื้อเพลิงกลุ่มหนึ่งที่ถูกพิจารณาเพื่อเป็นเชื้อเพลิงทางเลือกสำหรับเครื่องยนต์ดีเซล เนื่องจากสามารถบรรเทาปัญหาด้านความมั่นคงทางพลังงานและสภาวะโลกร้อนได้ [6] อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาคุณสมบัติของทุกเชื้อเพลิงพบว่า บิวทานอล (Butanol, $C_4H_{10}O$) มีสมบัติทางกายภาพที่เหมาะสมกับเครื่องยนต์ดีเซลมากที่สุดเมื่อเทียบกับแอลกอฮอล์



อีก 2 ชนิด ดังที่ได้กล่าวในงานวิจัยที่ผ่านมา [7-11] อีกทั้งเมื่อนำบิวทานอลผสมกับดีเซลและทดสอบใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลพบว่าสามารถลดการปลดปล่อยมลพิษจากไอเสียชนิดต่างๆ ได้อย่างมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งเขม่า (Soot) และอนุภาคฝุ่น (Particulate Matter) โดยไม่มีผลกระทบต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์ [12-15] อย่างไรก็ตาม แม้ว่าบิวทานอลจะมีข้อดีหลายประการดังที่กล่าวข้างต้น แต่ปัจจุบันก็ยังไม่ถูกมาใช้เป็นเชื้อเพลิงจริงในเชิงพาณิชย์ เนื่องจากผลผลิต (Yield Productivity) ของบิวทานอลมีปริมาณที่ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับวัตถุดิบและต้นทุนในการผลิตที่สูง [16-18]

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาสารผสมที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิตบิวทานอล ซึ่งเรียกว่า อะซิโตน-บิวทานอล-เอทานอล (Acetone-Butanol-Ethanol) หรือ ABE Mixture เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่กำลังได้รับการพิจารณาเป็นเชื้อเพลิงทางเลือกสำหรับเครื่องยนต์ดีเซล ด้วยคุณสมบัติของ ABE ที่ใกล้เคียงกันกับบิวทานอล [19-20] และเมื่อนำ ABE ผสมกับน้ำมันดีเซล (ABE-Diesel Blend) ในสัดส่วนร้อยละ 20 (ABE20) และทดสอบในห้องเผาไหม้จำลอง (Combustion Chamber) พบว่ามีคุณลักษณะของสเปรย์ทั้งในสถานะของเหลวและก๊าซไม่แตกต่างจากน้ำมันดีเซล [20-21] อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาตัวแปรด้านการเผาไหม้กลับพบว่าในช่วงล่าช้าในการจุดระเบิดที่ยาวกว่าดีเซลในทุกสภาวะการทดสอบอย่างมีนัยสำคัญ

สำหรับการนำ ABE Mixture ไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลมีผลการวิจัยรายงานว่า การนำ ABE (อัตราส่วนระหว่าง A:B:E เท่ากับ 3:6:1) ผสม

กับน้ำมันดีเซลในสัดส่วนระหว่าง 10% ถึง 20% โดยปริมาตร จะมีผลทำให้ค่าสมรรถนะของเครื่องยนต์ที่ลดลงและอัตราความสิ้นเปลืองที่เพิ่มขึ้น [22-24] อย่างไรก็ตามกลับพบว่าประสิทธิภาพทางความร้อน (Thermal Efficiency) ของ ABE ผสมดีเซลมีค่าสูงกว่าดีเซลล้วนประมาณ 4-6% [23] และเมื่อพิจารณาถึงคุณลักษณะการเผาไหม้ [22-25] พบว่ามีผลการทดลองที่สอดคล้องกันกับการศึกษาในห้องเผาไหม้จำลอง คือ เชื้อเพลิง ABE ผสมดีเซลมีค่าความล่าช้าในการจุดระเบิดที่ยาวนานกว่าดีเซล จึงส่งผลให้มีค่าความดันในกระบอกสูบสูงสุด (Maximum Cylinder Pressure) ที่สูงกว่าดีเซลอย่างมีนัยสำคัญ

จากงานวิจัยที่ผ่านมา แม้ว่าได้มีการศึกษาผลกระทบการใช้ ABE ผสมดีเซลในเครื่องยนต์ต่อสมรรถนะ การเผาไหม้ และมลพิษมาแล้ว แต่อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีงานวิจัยใดที่พิจารณาถึงผลกระทบต่อเสถียรภาพการทำงานของเครื่องยนต์ อีกทั้งเนื่องจากการนำ ABE ผสมกับดีเซลส่งผลต่อค่าความล่าช้าในการจุดระเบิดที่เพิ่มขึ้น จึงอาจส่งผลต่อความแปรผันของวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ที่เพิ่มสูงขึ้นได้ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบการใช้ ABE ผสมดีเซลเพื่อเป็นเชื้อเพลิงต่อเสถียรภาพการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซล โดยนำ ABE (อัตราส่วนระหว่าง A:B:E เท่ากับ 3:6:1) ผสมกับน้ำมันดีเซลในสัดส่วนร้อยละ 20 โดยปริมาตร (ABE20) ทดสอบกับเครื่องยนต์สูบล้อที่ไม่มีมีการปรับแต่งที่ภาระงานและรอบเครื่องยนต์ที่แตกต่างกัน โดยเก็บข้อมูลความดันในกระบอกสูบและองศาของเพลาช้อเหวี่ยงเพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพการทำงานของเครื่องยนต์ด้วยค่าความแปรผันของวัฏจักรการ



ทำงานของเครื่องยนต์เปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลล้วน (Diesel) นอกจากนี้ยังมีการพิจารณาตัวแปรด้านสมรรถนะและการเผาไหม้เพื่อประกอบการวิเคราะห์ผลกระทบต่อการมีเสถียรภาพของเครื่องยนต์ด้วย

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 การคำนวณตัวแปรที่เกี่ยวข้อง

เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบจากความแตกต่างของเชื้อเพลิงต่อเสถียรภาพของเครื่องยนต์ ในการศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ถูกควบคุมด้วยค่าความดันยังผลเฉลี่ยบ่งชี้ (Indicated Mean Effective Pressure: IMEP) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากการเปลี่ยนแปลงความดัน (p) และปริมาตร (V) ภายในกระบอกสูบในหนึ่งวัฏจักร ดังสมการที่ 1

$$IMEP_i = \frac{1}{V_d} \int_0^{720} pdV \quad (1)$$

โดยที่ V_d คือ ปริมาตรกระจัด i คือ จำนวนวัฏจักร

เพื่อเปรียบเทียบอัตราการบริโภคน้ำมันเชื้อเพลิงของเชื้อเพลิงแต่ละชนิด อัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของเครื่องยนต์ (Specific Fuel Consumption: SFC) ถูกพิจารณาเป็นตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2

$$SFC = \frac{\dot{m}_f}{P_b} \quad (2)$$

โดยที่ \dot{m}_f คือ อัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเชิงมวล และ P_b คือ กำลังงานเพลลาขาออก ซึ่งหาได้จาก

สมการที่ 3 โดยที่ N คือ ความเร็วรอบเครื่องยนต์ และ τ คือ แรงบิดที่วัดได้ในแต่ละการทดสอบ

$$P_b = 2\pi N\tau \quad (3)$$

นอกจากนี้ค่า SFC ยังสามารถใช้ในการคำนวณหาค่าประสิทธิภาพทางความร้อน (Thermal Efficiency) ได้ด้วยสมการที่ 4 คือ

$$\eta_{th} = \frac{1}{SFC \times LHV} \quad (4)$$

โดยที่ LHV คือ ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง

สำหรับการวิเคราะห์คุณลักษณะการเผาไหม้ของแต่ละเชื้อเพลิง ค่าอัตราการปลดปล่อยความร้อน (Heat Release Rate: HRR) สามารถคำนวณได้จากข้อมูลความดันในกระบอกสูบและองศาของเพลลาข้อเหวี่ยง ซึ่งในงานวิจัยนี้กำหนดให้อากาศ (Air) เป็นสารทำงานอุดมคติและอาศัยกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์สำหรับระบบเปิดที่ไม่คิดมวลที่ไหลเข้าชอก [1] เพื่อคำนวณหา HRR ตามสมการที่ 5

$$HRR = \frac{\gamma}{\gamma-1} p \frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{\gamma-1} V \frac{dp}{d\theta} \quad (5)$$

เมื่อ γ คือ อัตราส่วนความร้อนจำเพาะของอากาศในอุดมคติ โดยที่ช่วงล่าช้าของการจุดระเบิด (Ignition Delay) คือช่วงเวลาระหว่างเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิง (Start of Injection) และจุดเริ่มต้นการเผาไหม้ (Start of Combustion)



การวิเคราะห์เสถียรภาพการทำงานของเครื่องยนต์โดยทั่วไปสามารถพิจารณาได้จากค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันของวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ (Coefficient of Variation) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากการเปลี่ยนแปลงความดันสูงสุดในแต่ละวัฏจักรดังสมการที่ 6-8

$$COV_{P_{max}} = \frac{\sigma_{P_{max}}}{P_{max}} \times 100\% \quad (6)$$

โดยที่ $\sigma_{P_{max}}$ คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ P_{max} ใน N วัฏจักร และ $\overline{P_{max}}$ คือ ค่าเฉลี่ยของ P_{max} ใน N วัฏจักร

$$\sigma_{P_{max}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_{max,i} - \overline{P_{max}})^2} \quad (7)$$

$$\overline{P_{max}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_{max,i} \quad (8)$$

นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณได้จากการเปลี่ยนแปลงของคุณลักษณะการเผาไหม้ในแต่ละวัฏจักร ซึ่งหาได้จากค่า $IMEP$ ดังสมการที่ 9-11

$$COV_{IMEP} = \frac{\sigma_{IMEP}}{IMEP} \times 100\% \quad (9)$$

โดยที่ σ_{IMEP} คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ $IMEP$ ใน N วัฏจักร และ \overline{IMEP} ค่าเฉลี่ยของ $IMEP$ ใน N วัฏจักร

$$\sigma_{IMEP} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (IMEP_i - \overline{IMEP})^2} \quad (10)$$

$$\overline{IMEP} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N IMEP_i \quad (11)$$

2.2 เชื้อเพลิงทดสอบ

เพื่อหลีกเลี่ยงความแปรผันของสมบัติเชื้อเพลิงที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตจริงที่อาจส่งผลกระทบต่อ การวิเคราะห์ผลการทดสอบ งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้สารบริสุทธิ์ ได้แก่ อะซิโตน บิวทานอล และเอทานอล ที่มีความบริสุทธิ์ 99.5% 99.8% และ 99.5% ตามลำดับ เพื่อเตรียมส่วนผสมของ ABE โดยผสมกันในอัตราส่วนระหว่างอะซิโตน บิวทานอล และเอทานอล เท่ากับ 3:6:1 ซึ่งเป็นสัดส่วนทั่วไปที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิตบิวทานอล [24] โดยสารผสม ABE จะนำไปผสมกับดีเซลในสัดส่วนร้อยละ 20 ซึ่งถูกเรียกว่า "ABE20" และน้ำมันที่ใช้เชื้อเพลิงอ้างอิงในการเปรียบเทียบผลคือเป็นดีเซลล้วน ซึ่งเรียกว่า "Diesel"

ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติของเชื้อเพลิงทดสอบ (ดีเซล และ ABE20) ซึ่งค่าความหนาแน่น ความหนืด ค่าความร้อนต่ำ และซีเทนัมเบอร์ของเชื้อเพลิงได้จากการวัดในห้องปฏิบัติการ ส่วนค่าความร้อนแฝงของการระเหยเป็นไออ้างอิงจากงานวิจัยที่ [20, 24] นอกจากนี้ค่าคุณสมบัติของแอลกอฮอล์บริสุทธิ์ทั้งหมด (Acetone Butanol และ Ethanol) อ้างอิงจากงานวิจัยที่ผ่าน [20, 24] เพื่อประกอบการวิเคราะห์ข้อมูลการทดสอบ จากตารางพบว่าค่าความหนาแน่น ABE20 แตกต่างจากดีเซลเพียงเล็กน้อย หรือน้อยกว่า 1% เท่านั้น แต่สำหรับค่าความหนืดพบว่า ABE20 มีค่าต่ำกว่าดีเซลมากถึง 34% นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความร้อนของ ABE20 มีค่าน้อยกว่าดีเซลราว 8% และแม้ว่าค่าซีเทนัมเบอร์ ABE20 จะไม่

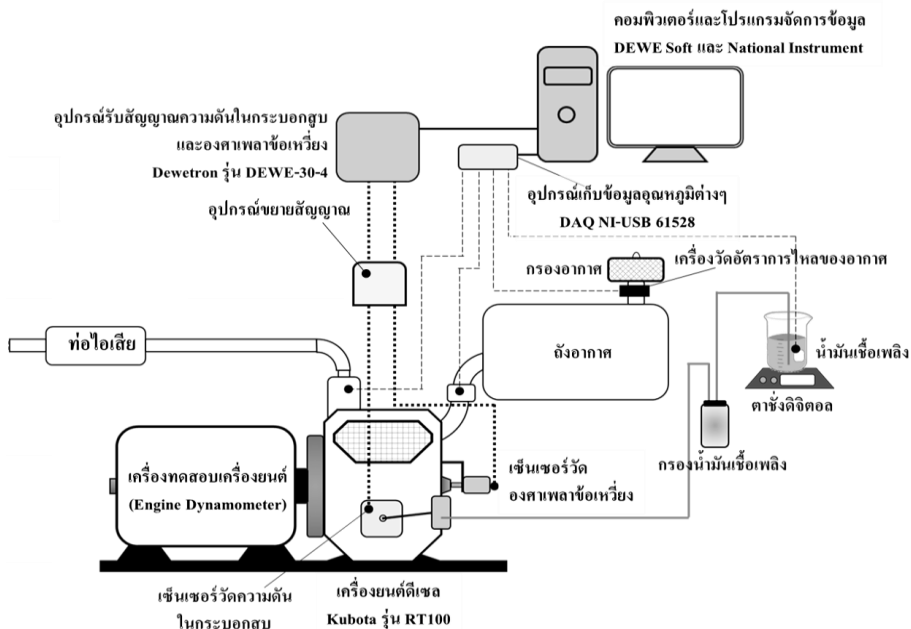


ปรากฏข้อมูลในงานวิจัยก่อนหน้านี้อย่างไรก็ตาม สามารถคาดการณ์ได้ว่าควรมีค่าต่ำกว่าดีเซล เนื่องจากตัวแอลกอฮอล์ที่ผสมอยู่ใน ABE20 มีค่าซีเทนที่ต่ำกว่าดีเซลอย่างมาก สำหรับคุณสมบัติสุดท้ายที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของเครื่องยนต์คือ ความร้อนแฝงของ

การระเหยเป็นไอ (Latent Heat of Vaporization) ซึ่งพบว่า ABE20 มีค่าสูงกว่าดีเซล อันจะส่งผลต่อกระบวนการระเหย (Vaporization Process) และกระบวนการจุดระเบิดด้วยตัวเอง (Auto-Ignition Process) ของเครื่องยนต์ดีเซล

ตารางที่ 1 คุณสมบัติเชื้อเพลิงที่ใช้ทดสอบ [20, 24]

สมบัติ	Diesel	Acetone	Butanol	Ethanol	ABE20
สูตรโมเลกุล	C ₁₂ -C ₂₅	C ₃ H ₆ O	C ₄ H ₁₀ O	C ₂ H ₆ O	C _{8.5} H _{18.6} O _{0.4}
ความหนาแน่น 15°C [kg/m ³]	826	790	810	790	819
ความหนืด 40°C [mm ² /s]	3.5	0.35	2.63	1.1	2.3
ค่าความร้อนต่ำ [MJ/kg]	45.6	29.6	33.1	26.8	41.95
ซีเทนัมเบอร์ [-]	58	-	25	8	-
ความร้อนแฝงของการระเหยเป็นไอที่ 298 K [kJ/kg]	270	518	582	904	332.8



รูปที่ 1 แผนผังการทดสอบเครื่องยนต์



2.3 อุปกรณ์ที่ใช้การทดสอบ

เพื่อหลีกเลี่ยงความแปรผันของกระบอกสูบต่อกระบอกสูบ (Cylinder-by-Cylinder Variation) ที่มีผลต่อวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ [1] งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้เครื่องยนต์ดีเซลการเกษตรสูบเดี่ยวที่ไม่มีมีการปรับแต่ง ยี่ห้อ Kubota รุ่น RT100 มีระบบฉีดเชื้อเพลิงแบบกลไกเพื่อใช้ในการทดสอบ โดยมีข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์แสดงดังตารางที่ 2 ในการทดสอบเครื่องยนต์จะถูกเชื่อมต่อกับไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer) แสดงดังรูปที่ 1 เพื่อควบคุมภาระเครื่องยนต์ให้มีค่าความดันยังผลเฉลี่ยบังคับที่เท่ากับ 4 และ 8 bar ที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ 1,400 รอบต่อนาที

เพื่อวิเคราะห์คุณลักษณะด้านการเผาไหม้ค่าความดันในกระบอกสูบสามารถวัดได้จากเซ็นเซอร์วัดความดัน (Pressure Transducer) ยี่ห้อ Kistler รุ่น 6052C ที่มีความไวในการวัดที่ 19.90 pC/bar ณ 200 °C โดยสัญญาณที่วัดได้จะถูกส่งไปขยายสัญญาณและคัดกรองสัญญาณด้วย Dewetron รุ่น DEWE-30-4 สำหรับบ่งค่าของเพลลาข้อเหวี่ยงจะถูกวัดด้วย Incremental shaft encoder ยี่ห้อ Baumer Electric รุ่น BDK 16.05A360-5-4 ที่มีความสามารถในการวัด 360 องศาต่อรอบ โดยที่สัญญาณทั้งคู่จะถูกเก็บไว้ใน Dewetron รุ่น DEWE-ORION-0816-100x ที่มีอัตราการเก็บข้อมูล 1 MS/s และข้อมูลจะถูกจัดการและแสดงผลด้วยซอฟต์แวร์ DEWEsoft V.6.6.8 สำหรับการทดสอบนี้จะทำการเก็บข้อมูลความดัน 100 วัฏจักรในทุกสภาวะทดสอบเพื่อใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของการทำงานของเครื่องยนต์

ตารางที่ 2 ข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์ทดสอบ [27]

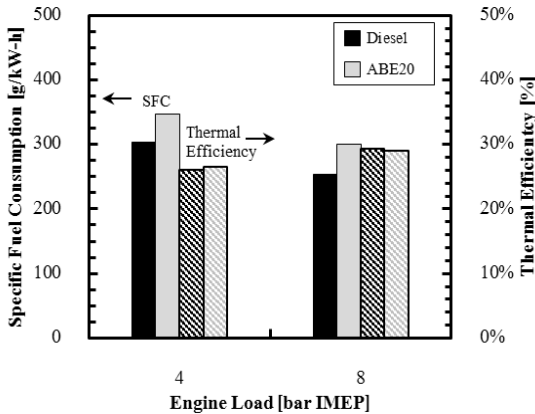
ข้อมูลจำเพาะ	ข้อมูล
ยี่ห้อ/รุ่น	Kubota RT100
ความกว้างกระบอกสูบ × ช่วงชัก	88 × 90 มม.
ความจุกระบอกสูบ	547 ลบ.ซม.
แรงบิดสูงสุด	33.4 นิวตันเมตร ที่ 1,400 รอบต่อนาที
กำลังสูงสุด	7.4 กิโลวัตต์ ที่ 2,400 รอบต่อนาที
อัตราส่วนการอัด	22:1

สำหรับการวัดอัตราความสิ้นเปลืองของเชื้อเพลิงเชิงมวล (Mass Fuel Consumption: \dot{m}_f) ใช้เครื่องชั่งน้ำหนักยี่ห้อ CST รุ่น CDR-3 ที่สามารถวัดมวลน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีความถูกต้องอยู่ในช่วง ± 0.05 g และวัดอัตราการไหลของอากาศด้วย Benetech รุ่น GM8910 ที่มีความถูกต้องอยู่ในช่วง $\pm 3\%$ ของการอ่านค่า สำหรับข้อมูลเกี่ยวกับอุณหภูมิบรรยากาศ อุณหภูมิน้ำมันเชื้อเพลิง อุณหภูมิท่อร่วมไอดี และอุณหภูมิท่อร่วมไอเสีย ถูกวัดด้วย Thermocouple ชนิด K และเก็บข้อมูลทั้งหมดด้วยอุปกรณ์เก็บข้อมูลของ National Instruments รุ่น USB-6218 ซึ่งโปรแกรมถูกพัฒนาขึ้นเองภายในหน่วยปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยียานยนต์และพลังงานทางเลือก คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



3. ผลการทดสอบ

3.1 อัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ

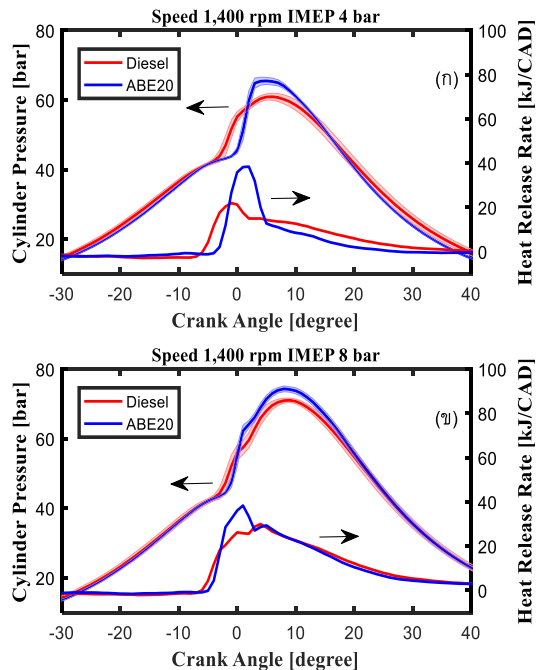


รูปที่ 2 อัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (สีทึบ) และประสิทธิภาพทางความร้อน (แถบลาย) ที่ IMEP 4 และ 8 บาร์ ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1,400 รอบต่อนาที

เนื่องจาก ABE20 มีค่าความร้อนต่ำ (Lower Heating Value) ที่น้อยกว่าดีเซลประมาณ 8% แสดงดังตารางที่ 1 ส่งผลให้อัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเชิงมวล (m_f) มากกว่า Diesel ในทุกสภาวะการทดสอบ และจากรูปที่ 2 เป็นการพิจารณาอัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงต่อกำลังงานขาออกของเครื่องยนต์ พบว่า ABE20 ยังคงมีค่า SFC ที่สูงกว่า Diesel ในทุกสภาวะการทดสอบหรือราว 14.7% และ 15.8% สำหรับภาระงาน 4 และ 8 bar IMEP อีกทั้งยังมีค่าเพิ่มขึ้นตามภาระของเครื่องยนต์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้นเพื่อชนะภาระนั้น อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาค่าประสิทธิภาพทางความร้อน

(Thermal Efficiency) ระหว่าง 2 เชื้อเพลิง (แก๊สทุติยภูมิ) พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญหรือแตกต่างกันน้อยกว่า 1% ทุกสภาวะการทดสอบ ทั้งนี้เนื่องจาก ABE20 เป็นเชื้อเพลิงที่มีออกซิเจนผสมในโมเลกุลจึงทำให้สามารถเผาไหม้ได้อย่างสมบูรณ์ซึ่งส่งเสริมประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงานของเชื้อเพลิงเป็นพลังงานความร้อนได้ดีกว่า

3.2 ลักษณะการเผาไหม้



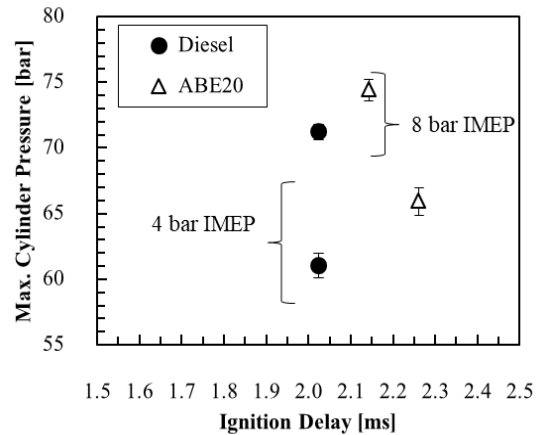
รูปที่ 3 ค่าเฉลี่ยความดันในกระบอกสูบและอัตราการปลดปล่อยความร้อนใน 100 วัฏจักรของแต่ละเชื้อเพลิงที่สภาวะการทดสอบที่แตกต่างกัน แถบสีจางแสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความดันในกระบอกสูบ 100 วัฏจักร



เพื่อให้ทราบถึงคุณลักษณะของการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแต่ละชนิดค่าความดันในกระบอกสูบถูกพลอตดังรูปที่ 3 โดยเส้นเติมหนาแสดงค่าเฉลี่ยความดันในกระบอกสูบจาก 100 วัฏจักร ซึ่งจะเห็นว่า Diesel มีการเริ่มต้นการเปลี่ยนแปลงความดันเกิดขึ้นก่อน ABE20 ในทุกสภาวะการทดสอบ และพบว่าค่าความดันสูงสุด (P_{max}) ของ ABE20 มีค่าสูงกว่า Diesel ในทุกสภาวะการทดสอบ สำหรับแถบสีจางในแต่ละเส้นแสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) ของความดันในกระบอกสูบ 100 วัฏจักร โดยพบว่าค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของทั้งสองเชื้อเพลิงไม่มีความแตกต่างกันมากนักและนอกจากนี้พบว่าค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานภาระงาน 4 bar IMEP มีค่าสูงกว่าที่ภาระงาน 8 bar IMEP

จากค่าความดันในกระบอกสูบเฉลี่ย 100 วัฏจักรสามารถนำมาคำนวณหาค่า HRR ด้วยสมการที่ 5 ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 3 ซึ่งพบว่า HRR มีแนวโน้มที่สอดคล้องกับข้อมูลความดันในกระบอกสูบ โดยที่ ABE20 การเริ่มต้นการเผาไหม้ล่าช้ากว่า Diesel ในทุกสภาวะการทดสอบ เนื่องจากสารผสมภายใน ABE20 มีค่าซีเทนที่ต่ำกว่า Diesel (ค่าซีเทนหมัดเบอร์ของเอทานอล บิวทานอล และดีเซลเท่ากับ 8 25 และ 55 ตามลำดับ [8]) นอกจากนี้ด้วยค่าความร้อนแฝงของการระเหยเป็นไอที่สูงกว่าของ ABE20 ยังเหนี่ยวนำให้อุณหภูมิบรรยากาศรอบๆ สเปรย์และภายในห้องเผาไหม้เย็นตัวลง (Cooling Effect) ในระหว่างกระบวนการระเหยและผสมเชื้อเพลิงกับอากาศ (Vaporization and Mixing Process) [28] ซึ่งส่งผลกระทบต่อการลดลงของอัตราการทำปฏิกิริยาเคมีเผาไหม้ (Chemical Reaction Rate of Combustion)

ในช่วงเริ่มต้นการจุดระเบิด (Auto-Ignition Process) ซึ่งข้อสรุปนี้สามารถแสดงให้เห็นได้ด้วยค่าความล่าช้าในการจุดระเบิด (Ignition Delay: ID) ที่ยาวนานกว่าของ ABE20

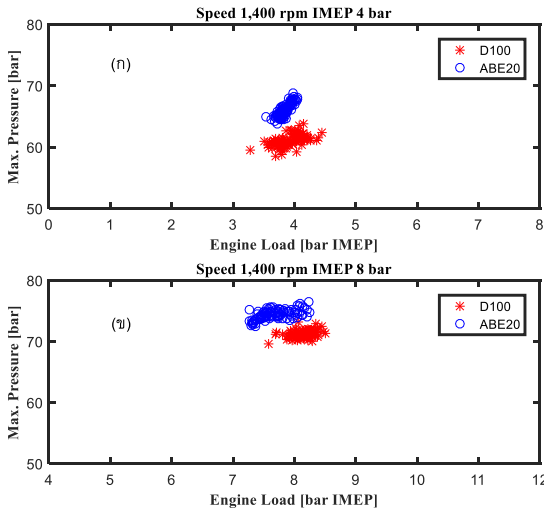


รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความล่าช้าในการจุดระเบิด (Ignition Delay) และค่าความดันในกระบอกสูบสูงสุดที่ความเร็วรอบ 1,400 รอบต่อนาที

จากการเพิ่มขึ้นของ ID นี้เองทำให้มีการสะสมของพลังงานในช่วงเวลาก่อนการเผาไหม้ (Premixed Combustion Phase) ที่สูงขึ้น และเมื่อถึงเวลาที่เกิดการเริ่มต้นการเผาไหม้ด้วยตัวเอง (Auto-Ignition) พลังงานนี้จึงถูกปลดปล่อยออกมาอย่างรุนแรงและรวดเร็วกว่า อันส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มขึ้นของความดันในกระบอกสูบสูงสุด (P_{max}) และอัตราการปลดปล่อยความร้อนสูงสุด (HRR_{max}) ที่เพิ่มสูงขึ้นของ ABE20 โดยรูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ID และ P_{max} ซึ่งพบว่าเมื่อเชื้อเพลิงมีค่า ID ที่สูงจะมีผลของ P_{max} ที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ



3.3 ความแปรผันของวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์

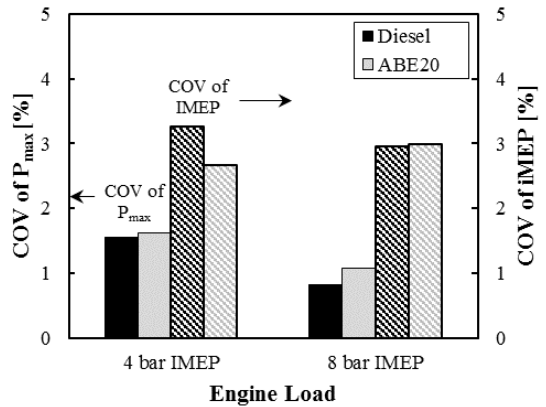


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันยังผลเฉลี่ยบ่งชี้และความดันในกระบอกสูบสูงสุด 100 วัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ที่ภาระงาน (ก) 4 bar IMEP และ (ข) 8 bar IMEP

รูปที่ 5 แสดงค่าความดันในกระบอกสูบสูงสุด (P_{max}) ที่เกิดขึ้นใน 100 วัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ที่ภาระงาน 4 และ 8 bar IMEP จากรูปแสดงให้เห็นว่า Engine Dynamometer สามารถควบคุมภาระได้อยู่ในย่านภาระงานที่กำหนดคือ 4 และ 8 bar IMEP นอกจากนี้พบว่าค่า P_{max} ของ ABE20 มีค่าสูงกว่า Diesel ในทุกวัฏจักรการทำงานหรือเฉลี่ยราว 4.8 และ 3.2 bar สำหรับภาระเครื่องยนต์ 4 และ 8 bar IMEP ตามลำดับ

จากข้อมูลในรูปที่ 5 สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพการทำงานของเครื่องยนต์ได้จากการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันของ

ค่าความดันในกระบอกสูบ (COV of P_{max}) แสดงดังรูปที่ 6 จากรูปพบว่าค่า COV of P_{max} ของเชื้อเพลิงทั้งสองชนิดมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดย ABE20 มีค่ามากกว่า Diesel ไม่ถึง 1% ในทุกสภาวะการทดสอบแม้ว่า ABE20 จะมีค่า P_{max} ที่สูงกว่า Diesel ก็ตาม และนอกจากนี้ยังพบว่า COV of P_{max} ที่ภาระต่ำมีค่าสูงกว่าเล็กน้อยเนื่องจากมีอัตราการปลดปล่อยความร้อนที่รุนแรงและรวดเร็วกว่าสังเกตได้จากความชันของกราฟ HRR ที่เกิดขึ้นในรูปที่ 3



รูปที่ 6 ค่าสัมประสิทธิ์ความความแปรผันของวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ (Coefficient of variation: COV) ซึ่งคำนวณได้จากความดันภายในกระบอกสูบสูงสุด หรือ COV of P_{max} (สีทึบ) และความดันยังผลเฉลี่ยบ่งชี้ หรือ COV of IMEP (แถบลาย)

นอกจากนี้รูปที่ 6 (แกนทุติยภูมิ) ยังแสดงค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันของค่าความดันยังผลเฉลี่ยบ่งชี้ (COV of IMEP) ซึ่งพบว่ามีค่าสูงกว่าค่า COV of P_{max} ในทุกสภาวะการทดสอบ อย่างไรก็ตาม ไม่สามารถสรุปผลกระทบของเชื้อเพลิงที่มีต่อตัวแปรนี้ได้เนื่องจากผลของตัวแปรนี้ไม่ได้ขึ้นอยู่กับลักษณะ



การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเพียงอย่างเดียว หากแต่ยังมีผลจากการควบคุมภาระงานของ Engine dynamometer ด้วย ดังนั้น COV of IMEP จึงอาจจะไม่สะท้อนให้เห็นถึงผลกระทบของเชื้อเพลิงต่อเสถียรภาพการทำงานของเครื่องยนต์ได้อย่างแท้จริง

จากผลการวิเคราะห์เสถียรภาพการทำงานของเครื่องยนต์ทั้งสองตัวแปรคือ COV of P_{max} และ COV of IMEP พบว่ามีค่าต่ำกว่าค่าความแปรผันสูงสุดที่ยอมรับได้สำหรับเครื่องยนต์เผาไหม้ภายใน ซึ่งกำหนดค่า COV ไว้ไม่เกิน 5% [29] ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า ABE20 สามารถใช้งานกับเครื่องยนต์ดีเซลได้โดยไม่มีผลกระทบต่อเสถียรภาพการทำงานของเครื่องยนต์

4. สรุปผลการทดสอบ

จากการทดสอบเพื่อศึกษาผลกระทบของการใช้ ABE20 เป็นเชื้อเพลิงต่อสมรรถนะ คุณลักษณะการเผาไหม้ และเสถียรภาพการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซล สามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

1. ABE20 มีประสิทธิภาพทางความร้อนไม่แตกต่างจาก Diesel ในทุกสภาวะการทดสอบ แต่เนื่องจาก ABE20 มีค่าความร้อนที่ต่ำกว่าดีเซลจึงส่งผลทำให้มีอัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะสูงกว่าดีเซล
2. เนื่องจาก ABE20 มีส่วนผสมของเชื้อเพลิงแอลกอฮอล์ที่ค่าซีเทนต่ำและค่าความร้อนแฝงของการระเหยตัวสูง จึงส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงความดันในกระบอกสูบและการปลดปล่อยความร้อนที่ล่าช้ากว่าดีเซล ซึ่งแสดงให้เห็นได้จากค่าความล่าช้าในการจุดระเบิดที่ยาวนานกว่าดีเซล

3. แม้ว่าผลจากความล่าช้าในการจุดระเบิดของ ABE20 จะส่งผลต่อค่าความดันในกระบอกสูบสูงสุดที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ แต่กลับพบว่าไม่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพการทำงานของเครื่องยนต์แต่อย่างใด อันจะเห็นได้จากค่า COV ที่ไม่แตกต่างจากดีเซลและมีค่าที่ต่ำกว่าค่าความแปรผันสูงสุดที่ยอมรับได้สำหรับเครื่องยนต์เผาไหม้ภายในซึ่งกำหนดค่า COV ไว้ไม่เกิน 5%

จากข้อสรุปที่กล่าวมาข้างต้นแม้ว่าการใช้ ABE20 เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลที่ไม่มีการดัดแปลงจะให้ผลการทดสอบที่น่าพอใจทั้งในด้านสมรรถนะ การเผาไหม้ และเสถียรภาพการทำงาน อย่างไรก็ตาม ยังสามารถปรับปรุงสมรรถนะ และการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ให้ดียิ่งขึ้นได้อีก โดยการปรับปรุงระบบการฉีดเชื้อเพลิงให้เหมาะสม เช่น องค์การฉีด ความดันในการฉีดเชื้อเพลิง เป็นต้น ตลอดจนจำเป็นต้องศึกษาวิจัยในแง่มุมอื่นๆ ให้ครอบคลุมก่อนนำไปใช้ในเครื่องยนต์จริง

5. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ประเภทโครงการสนับสนุนทุนวิจัยเพื่อพัฒนานักวิจัยรุ่นใหม่ มก. ประจำปี 2562 รหัสโครงการวิจัย ร-ม 29.62 ขอขอบคุณบริษัท ไทยออยล์ จำกัด (มหาชน) สำหรับการสนับสนุนน้ำมันดีเซลพร้อมค่าคุณสมบัติของเชื้อเพลิงที่ใช้ในวิจัย



6. เอกสารอ้างอิง

- [1] J.B. Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamentals*. NY, USA: McGraw-Hill Inc, 1988.
- [2] J. Shi, T. Wang, Z. Zhao, Z. Wu, and Z. Zhang, Cycle-to-cycle Variation of a Diesel Engine Fueled with Fischer-Tropsch Fuel Synthesized from Coal, *Applied Sciences*, 2019, 9(10), 2032.
- [3] P. Kyrtatos, C. Brückner, and K. Boulouchos, Cycle-to-cycle variations in diesel engines, *Applied Energy*, 2016, 171, 120–132.
- [4] C.D. Rakopoulos, E.G. Giakoumis, and D.C. Rakopoulos, Study of the Short-Term Cylinder Wall Temperature Oscillations During Transient Operation of a Turbocharged Diesel Engine with Various Insulation Schemes, *The International Journal of Engine Research*, 2008, 9(3), 177–193.
- [5] D. P. Sczomak and N. A. Henein Cycle-to-cycle Variation with Low Ignition Quality Fuels in a CFR Diesel Engine, *SAE Technical Paper*, 1979, No. 790924.
- [6] https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2014/IRENA_REmap_summary_findings_2014.pdf (Accessed on 21 August 2020)
- [7] S. Kumar, J.H. Cho, J. Park, and I. Moon, *Advances in Diesel-Alcohol Blends and Their Effects on the Performance and Emissions of Diesel Engines*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 22, 46-72.
- [8] C. Jin, M. Yao, H. Liu, C.F.F. Lee, and J. Ji, Progress in the Production and Application of n-Butanol as a Biofuel, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(8), 4080–4106.
- [9] B.R. Kumar, S. Saravanan, D. Rana, and A. Nagendran A Comparative Analysis on Combustion and Emissions of Some Next Generation Higher-Alcohol / Diesel Blends in a Direct-Injection Diesel Engine, *Energy Conversion and Management*, 2016, 119, 246-256.
- [10] H. Wu, K. Nithyanandan, T.H. Lee, C.F. Lee, and C. Zhang Spray and Combustion Characteristics of Neat Acetone-Butanol-Ethanol, n -Butanol, and Diesel in a Constant Volume Chamber, *Energy & Fuels*, 2014, 28(10), 6380–6391.
- [11] M. Lapuerta, R. García-Contreras, J. Campos-Fernández, and M.P. Dorado, Stability, Lubricity, Viscosity, and Cold-Flow Properties of Alcohol-Diesel Blends, *Energy and Fuels*, 2010, 24(8), 4497–4502.



- [12] Z. Chen, Z. Wu, J. Liu, and C. Lee, Combustion and Emissions Characteristics of High n-Butanol/Diesel Ratio Blend in a Heavy-Duty Diesel Engine and EGR Impact, *Energy Conversion and Management*, 2014, 78, 787-795.
- [13] H. Liu, X. Bi, M. Huo, C.F.F. Lee, and M. Yao, Soot Emissions of Various Oxygenated Biofuels in Conventional Diesel Combustion and Low-Temperature Combustion Conditions, *Energy and Fuels*, 2012, 6(3), 1900–1911.
- [14] A. Irimescu, L. Marchitto, S.S. Merola, C. Tornatore, and G. Valentino Combustion Process Investigations in an Optically Accessible DISI Engine Fuelled with n-Butanol During Part Load Operation, *Renewable Energy*, 2015, 77, 363–376.
- [15] G. Valentino, S. Merola, L. Marchitto, and C. Tornatore, Butanol-Diesel Blend Spray Combustion Investigation by UV-Visible Flame Emission in a Prototype Single Cylinder Compression Ignition Engine, *SAE International Journal of Engines*, 2015, 8(5), 2015-24–2435.
- [16] K. Karimi, M. Tabatabaei, I. S. Horváth, and R. Kumar, Recent Trends in Acetone, Butanol, and Ethanol (ABE) Production, *Biofuel Research Journal*, 2015, 8, 301–308.
- [17] C. Xue, X.Q. Zhao, C.G. Liu, L.J. Chen, and F.W. Bai, Prospective and Development of Butanol as an Advanced Biofuel, *Biotechnology Advances*, 2013, 31(8), 1575-1584.
- [18] T. Sarchami, G. Munch, E. Johnson, S. Kießlich, and L. Rehmman, A Review of Process-Design Challenges for Industrial Fermentation of Butanol from Crude Glycerol by Non-Biphasic *Clostridium pasteurianum*, *Fermentation*, 2016, 2(4), 13.
- [19] H. Wu, K. Nithyanandan, N. Zhou, T.H. Lee, C.F.F. Lee, and C. Zhang, Impacts of Acetone on the Spray Combustion of Acetone-Butanol-Ethanol (ABE)-Diesel Blends Under Low Ambient Temperature, *Fuel*, 2015, 142, 109–116.
- [20] H. Wu, K. Nithyanandan, J. Zhang, Y. Lin, T.H. Lee, C.F. Lee and C. Zhang, Impacts of Acetone-Butanol-Ethanol (ABE) Ratio on Spray and Combustion Characteristics of ABE-Diesel Blends, *Applied Energy*, 2015, 149, 367–378.
- [21] O. Nilaphai, C. Hespel, S. Chanchaona, and C. Mounaïm-Rousselle, Spray and Combustion Characterizations of ABE/Dodecane Blend in Comparison to Alcohol/Dodecane Blends at High-Pressure and High-Temperature Conditions, *Fuel*, 2018, 225, 542–553.



- [22] Y.C. Chang, W.J. Lee, S.L. Lin, and L.C. Wang, Green energy: Water-Containing Acetone-Butanol-Ethanol Diesel Blends Fueled in Diesel Engines, *Applied Energy*, 2013, 109, 182–191.
- [23] T.H. Lee, Y. Lin, X. Meng, Y. Li, and K. Nithyanandan, Combustion Characteristics of Acetone, Butanol, and Ethanol (ABE) Blended with Diesel in a Compression-Ignition Engine, *SAE Technical Papers*, 2016, No. 2016-01-0884.
- [24] I. Veza, M.F.M. Said, and Z.A. Latiff, Progress of Acetone-Butanol-Ethanol (ABE) as Biofuel in Gasoline and Diesel Engine: A Review, *Fuel Processing Technology*, 2019, 196, 106179.
- [25] Y. Lin, T. Lee, K. Nithyanandan, J. Zhang, Y. Li, and C.F. Lee, Experimental Investigation and Analysis of Combustion Process in a Diesel Engine Fueled with Acetone-Butanol-Ethanol/ Diesel Blends, in *SAE Technical Papers*, 2016, No. 2016-01-0737.
- [26] T. Lee, Y. Lin, H. Wu, L. Meng, A. Hansen, and C.F. Lee, Characterization Spray and Combustion Processes of Acetone-Butanol-Ethanol (ABE) in a Constant Volume Chamber, *SAE Technical Papers*, 2015, No. 2015-04-14.
- [27] KUBOTA Technical Education Center, Maintenance Manual for KUBOTA RTseries. Thailand: Siam Kubota Industry Co., LTD., 2009.
- [28] A.K. Agarwal, D.K. Srivastava, A. Dhar, R.K. Maurya, P.C. Shukla, and A.P. Singh, Effect of Fuel Injection Timing and Pressure on Combustion, Emissions and Performance Characteristics of a Single Cylinder Diesel Engine, *Fuel*, 2013, 111, 374–383.
- [29] A. Jamrozik, W. Tutak, R. Gnatowska, and Ł. Nowak, Comparative Analysis of the Combustion Stability of Diesel-Methanol and Diesel-Ethanol in a Dual Fuel Engine, *Energies*, 2019, 12(6), 971.