

ความสามารถในการสตาร์ทของอะซิโตน-บิวทานอล-เอทานอลผสม ดีเซลเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลระบบฉีดเชื้อเพลิงแบบคอมมอนเรล

อบ นิลผาย¹ ตักดีดา ธงชาย¹ มานิดา ทองรุ่ง¹ นาวี นันตะภาพ² รณชาติ มั่นศิลป์² สถาพร เชื้อเพ็ง^{*}

¹ หน่วยปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยียานยนต์และพลังงานทางเลือก, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

² ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

^{*} ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: schuepeng@eng.src.ku.ac.th

วันที่รับบทความ: 27 กรกฎาคม 2564; วันที่ทบทวนบทความ: 29 สิงหาคม 2564; วันที่ตอบรับบทความ: 31 สิงหาคม 2564

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 30 กันยายน 2564

บทคัดย่อ: การนำ อะซิโตน-บิวทานอล-เอทานอล หรือ ABE ผสมกับน้ำมันดีเซลในสัดส่วนร้อยละ 20 (ABE20) มีศักยภาพในการเป็นเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันดีเซล เนื่องจากสามารถนำไปใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลที่ไม่มีการดัดแปลงได้โดยมีผลต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์ การเผาไหม้ และการปลดปล่อยมลพิษที่แตกต่างจากดีเซลเพียงเล็กน้อย ตลอดจนมีเสถียรภาพในการทำงานไม่แตกต่างจากน้ำมันดีเซล อย่างไรก็ตาม การมีส่วนร่วมของแอลกอฮอล์ใน ABE20 ส่งผลต่อความสามารถในการจุดระเบิดที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล อีกทั้งมีค่าความร้อนแฝงในการกลายเป็นไอที่สูงกว่าน้ำมันดีเซล จึงส่งผลต่อความสามารถในการสตาร์ทเครื่องยนต์ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความสามารถในการสตาร์ทเครื่องยนต์เมื่อใช้ ABE20 เป็นเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิห้องทดสอบต่างกัน เครื่องยนต์ดีเซลที่มีระบบฉีดเชื้อเพลิงแบบคอมมอนเรล และตรวจสอบความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงขณะทำการสตาร์ทและเดินเบาต่อเนื่อง 60 วินาที จากผลการทดสอบพบว่า ABE20 ใช้ระยะเวลาในการสตาร์ทที่ยาวนานกว่าดีเซลในทุกสภาวะการทดสอบและมีการบริโภคเชื้อเพลิงที่มากกว่าดีเซล อย่างไรก็ตาม เมื่อลดอุณหภูมิห้องทดสอบลง 10 องศาเซลเซียส ABE20 ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการสตาร์ทเครื่องยนต์เล็กน้อยแต่ไม่ส่งผลกระทบต่อความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง

คำสำคัญ: อะซิโตน-บิวทานอล-เอทานอล; ABE20; ดีเซล; เครื่องยนต์ดีเซล; ความสามารถในการสตาร์ท

The Engine Start Ability of Acetone-Butanol-Ethanol Blended Diesel Fuel for a Common Rail Diesel Engine

Ob Nilaphai¹, Sakda Thongchai¹, Manida Tongroon¹, Nawee Nuntapap²,
Ronachart Munsin² and Sathaporn Chuepeng^{1*}

¹ Automotive Technology and Alternative Energy Research Unit, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering at Sriracha, Kasetsart University, Sriracha Campus

² Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna

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

Received: 27 July 2021; Revised: 29 August 2021; Accepted: 31 August 2021

Online Published: 30 September 2021

Abstract: Acetone-Butanol-Ethanol (ABE) blended with diesel fuel in 20% by volume (ABE20) has been a promising alternative fuel for replacing diesel fuel. Consequently, it can be used in the unmodified diesel engine with slight effects on engine performance, combustion, and emissions, presenting stability during engine operation similar to diesel. However, ABE20 is composed of alcohol, presenting the low auto-ignition ability and high latent heat of vaporization compared to diesel fuel. These can affect the engine start ability. Therefore, this work aims to evaluate the engine start ability of ABE20 on a common rail diesel engine in different testing room temperatures and to investigate the fuel consumption during the period of engine start and continuously idling in 60 seconds. The experimental results show that ABE20 presented the engine start timing longer than diesel fuel for all testing conditions and its fuel consumption was higher than diesel fuel. However, the reduction of ambient temperature by 10°C insignificantly affected engine start ability but not for fuel consumption.

Keywords: Acetone-Butanol-Ethanol; ABE20; Diesel; Diesel Engines; Engine Start Ability



1. บทนำ

อะซิโตน-บิวทานอล-เอทานอล (Acetone-Butanol-Ethanol: ABE) เป็นสารผสมชั้นกลางที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิตบิวทานอลที่กำลังได้รับความสนใจให้เป็นเชื้อเพลิงทางเลือกสำหรับน้ำมันดีเซลในปัจจุบัน เนื่องจาก ABE มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับบิวทานอล [1, 2] จึงมีศักยภาพในการใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ โดยผสมกับน้ำมันดีเซล จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า เมื่อนำ ABE ผสมกับน้ำมันดีเซล (ABE-Diesel Blend) ในสัดส่วนร้อยละ 20 โดยปริมาตร และนำมาทดสอบในห้องเผาไหม้จำลอง (Combustion Chamber) ที่สภาวะความดันสูงและอุณหภูมิสูงเช่นเดียวกับในห้องเผาไหม้ในเครื่องยนต์ดีเซล พบว่ามีคุณลักษณะของสเปรย์ทั้งในสถานะของเหลวและก๊าซไม่แตกต่างจากน้ำมันดีเซล [3]

ในขณะที่ตัวแปรด้านการเผาไหม้ของ ABE ผสมดีเซลมีความสามารถในการส่งเสริมให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ทำให้อัตราการปลดปล่อยควันดำ (Smoke) และอนุภาคฝุ่น (Particulate Matter) ลงได้อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจาก ABE เป็นเชื้อเพลิงที่มีออกซิเจนผสมอยู่ในโมเลกุลจึงช่วยส่งเสริมให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ [3] และ ABE มีส่วนผสมของแอลกอฮอล์ซึ่งมีค่าซีเทนัมเบอร์ที่ต่ำทำให้มีช่วงเวลาของความล่าช้าในการจุดระเบิด (Ignition Delay) ที่ยาวกว่าดีเซล ด้วยเหตุนี้จึงทำให้มีช่วงระยะเวลาในการผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศที่ยาวนานกว่าก่อนการเผาไหม้ในช่วงการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่ผสมก่อน (Premixed Combustion) [3, 4] อีกทั้งในสภาวะที่มีการฉีดเชื้อเพลิงแบบคงตัว (Steady-state Injection) ABE ผสมดีเซลยังมีความยาวของสเปรย์ในสถานะของเหลวที่สั้นกว่า (Liquid Length: LL) และมี

ความยาวของระยะยกของเปลวไฟ (Lift-off Flame: LOL) ที่สูงกว่าดีเซล ซึ่งช่วงระยะห่างระหว่าง LL และ LOL ที่ยาวกว่าดีเซลนี้เองทำให้มีการส่งเสริมการผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศที่ดีกว่า ก่อนที่ส่วนผสมเหล่านี้จะเคลื่อนตัวเข้าสู่โซนของการทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ (Reaction Zone of Combustion) ดังนั้น จึงทำให้การเผาไหม้ของ ABE ผสมดีเซลมีความสมบูรณ์มากกว่าและปลดปล่อยอนุภาคฝุ่นที่น้อยกว่า ซึ่งเห็นได้จากความสว่างของแสงธรรมชาติ (Natural Light Luminosity) ของ ABE ผสมดีเซลที่ต่ำกว่าดีเซลในงานวิจัยของ Wu และคณะ [4]

สำหรับการทดสอบใช้ ABE ผสมดีเซลในเครื่องยนต์ดีเซล จากงานวิจัยที่ผ่านมา [5] พบว่า อัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของ ABE ผสมดีเซลในสัดส่วนร้อยละ 20 โดยปริมาตร (ABE20) มีความสิ้นเปลืองที่สูงกว่าดีเซลในทุกสภาวะการทดสอบที่ภาระงานเครื่องยนต์ (Engine Load) ที่เท่ากัน เนื่องจากมีค่าความร้อนที่ต่ำกว่าดีเซล อย่างไรก็ตาม กลับพบว่าค่าความสามารถเปลี่ยนแปลงพลังงานจากเชื้อเพลิงเป็นพลังงานความร้อนหรือค่าประสิทธิภาพทางความร้อน (Thermal Efficiency) ของ ABE20 สูงกว่าดีเซลเนื่องจาก ABE20 มีค่าความร้อนแฝงในการระเหยตัว (Latent Heat of Vaporization) ที่สูงกว่าดีเซลส่งเสริมให้เกิดผลจากความเย็น (Cooling Effect) ในห้องเผาไหม้ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพในการประจุอากาศ (Volumetric Efficiency) ขณะเครื่องยนต์ทำงาน [6] อีกทั้งการมีออกซิเจนในโมเลกุลของ ABE20 ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์และประสิทธิภาพที่สูงกว่า [3, 4]



สำหรับคุณลักษณะการเผาไหม้ของ ABE20 ในเครื่องยนต์กลับพบว่ามีความล่าช้าในการจุดระเบิดที่สูงกว่าดีเซล ซึ่งทำให้เกิดการเผาไหม้ที่รุนแรงกว่าดีเซลในช่วง Premixed Combustion และส่งเสริมให้เกิดการปลดปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ที่สูงกว่าดีเซล [5] อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้ ABE20 ในเครื่องยนต์ดีเซลกลับพบว่าสามารถลดการปลดปล่อยควันดำลงได้มากกว่าดีเซลอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่สภาวะโหลดต่ำที่ลดได้มากถึง 25%-47% นอกจากนี้ยังพบว่า เสถียรภาพของเครื่องยนต์ (Engine Stability) เมื่อใช้ ABE20 ไม่มีความแตกต่างกันกับดีเซลอย่างมีนัยสำคัญ [7] ซึ่งแสดงให้เห็นด้วยค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันของวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ (Coefficient of Variation: COV) ที่มีค่าไม่แตกต่างกับดีเซล (น้อยกว่า 1%) และมีค่าต่ำกว่าค่าความแปรผันสูงสุดที่ยอมรับได้สำหรับเครื่องยนต์เผาไหม้ภายในที่กำหนดไว้ไม่เกิน 5% [8]

จากงานวิจัยที่ผ่านมาแม้ว่าจะมีการศึกษาใช้ ABE ผสมดีเซลในเครื่องยนต์ดีเซลในด้านต่าง ๆ เช่น สมรรถนะของเครื่องยนต์ คุณลักษณะการเผาไหม้ การปลดปล่อยมลพิษ และเสถียรภาพในการใช้งานของเครื่องยนต์ อย่างไรก็ตาม เนื่องจาก ABE มีความสามารถในการจุดระเบิดด้วยตัวเอง (Auto-Ignition Ability) ที่ต่ำกว่าดีเซล อีกทั้งมีค่าความร้อนแฝงในการกลายเป็นไอที่สูง จึงส่งผลต่อความสามารถในการจุดระเบิดด้วยตัวเองของเชื้อเพลิง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงสตาร์ทเครื่องยนต์ที่มีอุณหภูมิบรรยากาศต่ำ และไม่พบงานวิจัยที่ประเมินความสามารถในการสตาร์ทของเครื่องยนต์สำหรับเชื้อเพลิงชนิดนี้ ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์

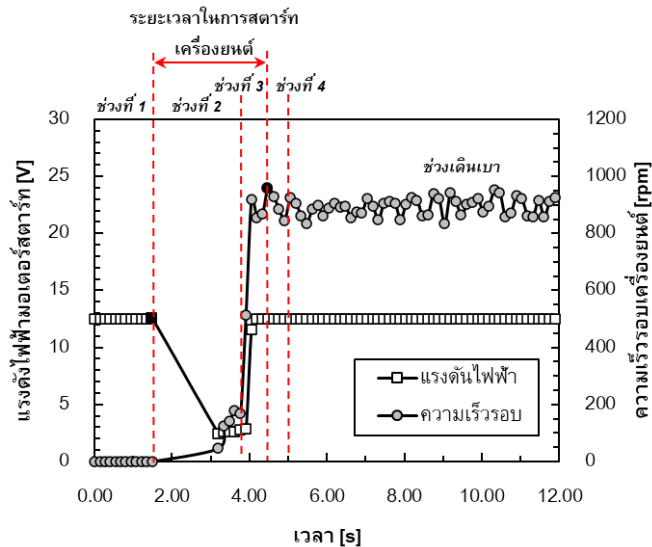
เพื่อประเมินความสามารถในการสตาร์ทเครื่องยนต์เมื่อใช้ ABE20 ผสมดีเซลเป็นเชื้อเพลิง โดยทำการทดสอบกับเครื่องยนต์ดีเซล 4 สูบ ที่มีระบบฉีดเชื้อเพลิงแบบคอมมอนเรล ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลในปัจจุบัน และเพื่อให้ทราบถึงผลกระทบของการใช้เชื้อเพลิงที่มีผลต่อความสามารถในการสตาร์ทเพียงอย่างเดียว จึงมีการตัดระบบการทำงานของหัวเผาออกระหว่างการทดสอบ และทำการทดสอบ ที่อุณหภูมิห้อง 20 และ 30°C และเปรียบเทียบผลการทดสอบกับน้ำมันเชื้อเพลิงอ้างอิงคือ น้ำมันดีเซลล้วน

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 หลักในการวิเคราะห์และสภาวะการทดสอบ

หลักเกณฑ์ในการประเมินความสามารถในการสตาร์ทเครื่องยนต์พิจารณาจากพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงระหว่างการสตาร์ทเครื่องยนต์ จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ามีการใช้ข้อมูลความเร็วรอบของเครื่องยนต์ในการประเมินความสามารถในการสตาร์ท เพื่ออธิบายคุณลักษณะของเครื่องยนต์ในระหว่างการสตาร์ท [9-11] ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้สัญญาณความเร็วรอบของเครื่องยนต์เพื่อใช้ในวิเคราะห์ความสามารถในการสตาร์ทของเชื้อเพลิงแต่ละชนิด และใช้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์สตาร์ทในการระบุตำแหน่งการเริ่มต้นการหมุนของเครื่องยนต์ ซึ่งมีรายละเอียดต่อไปนี้

รูปที่ 1 แสดงข้อมูลสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์สตาร์ทและความเร็วรอบของเครื่องยนต์ในระหว่างการทดสอบสตาร์ทเครื่องยนต์ของน้ำมันดีเซลที่อุณหภูมิห้องทดสอบ 30°C ซึ่งสามารถอธิบายคุณลักษณะการสตาร์ทของเครื่องยนต์ได้ดังนี้



รูปที่ 1 การอธิบายลำดับการสตาร์ทเครื่องยนต์ด้วยสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์สตาร์ทและความเร็วรอบของเครื่องยนต์

ช่วงที่ 1: ก่อนการสตาร์ท (Before Starting) ในช่วงเริ่มต้นเมื่อเปิดสวิตช์กุญแจ กระแสไฟฟ้าจากแบตเตอรี่จะถูกจ่ายผ่านมอเตอร์สตาร์ทด้วยแรงดันไฟฟ้าที่มีขนาดเท่ากับแรงดันไฟฟ้าในแบตเตอรี่ 12.1 V และความเร็วรอบของเครื่องยนต์เป็นศูนย์เนื่องจากยังไม่มีภาระของเครื่องยนต์

ช่วงที่ 2: การหมุนฟรีของเครื่องยนต์ (Cranking Period) [9] เมื่อกดสวิตช์สตาร์ทเครื่องยนต์ (Engine Start) กำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่จะถูกจ่ายไปยังมอเตอร์สตาร์ทเพื่อออกแรงขับเครื่องยนต์ให้หมุนจึงทำให้แรงดันไฟฟ้าในช่วงนี้ตกลงอย่างทันทีทันใด ดังรูปที่ 1 และในขณะเดียวกันความเร็วรอบของเครื่องยนต์ก็จะเพิ่มขึ้นตามจากแรงขับของมอเตอร์สตาร์ทโดยมีความเร็วรอบราว 200 rpm

ช่วงที่ 3: การสตาร์ท (Starting Period) หรือบางครั้งเรียกช่วงเร่ง (Acceleration Period) [11] เมื่อ

เชื้อเพลิงที่ถูกฉีดเข้าไปในช่วงที่ 2 เกิดการเผาไหม้ขึ้นภายในกระบอกสูบความเร็วรอบของเครื่องยนต์จะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและมีความเร็วมากกว่ามอเตอร์สตาร์ท ขณะนี้เองผู้ทดสอบจะปล่อยมือจากสวิตช์สตาร์ททำให้หยุดการจ่ายไฟฟ้าไปยังมอเตอร์สตาร์ท ซึ่งแรงดันไฟฟ้าจะกลับมาเท่ากับแรงดันของแบตเตอรี่อีกครั้ง จากนั้นความเร็วรอบของเครื่องยนต์ยังคงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งถึงความเร็วสูงสุด (1,000 rpm)

ช่วงที่ 4: ช่วงหลังการสตาร์ท (After-starting Period) หลังจากความเร็วรอบเครื่องยนต์เพิ่มขึ้นสูงสุดแล้ว จากนั้นรอบเครื่องยนต์จะตกลงและรักษาระดับของความเร็วให้อยู่ในระดับที่คงที่ต่อเนื่องกันไป จากการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นในทุกวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์



จากพฤติกรรมการสตาร์ทเครื่องยนต์ที่กล่าวมาข้างต้นสามารถประเมินความสามารถในการสตาร์ทของเครื่องยนต์ได้จาก “ระยะเวลาในการสตาร์ทเครื่องยนต์ (Engine Start Timing)” ซึ่งพิจารณาจากรยะเวลาจากจุดที่เครื่องยนต์เริ่มหมุน (Engine Start Moving) ซึ่งเป็นเวลาที่สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์สตาร์ทเริ่มตกลง (แสดงด้วยจุดสีเหลี่ยม สีดำ) จนกระทั่งถึงเวลาที่เครื่องยนต์สตาร์ทติด (Engine Start) ซึ่งในที่นี้คือเวลา ณ ความเร็วรอบเครื่องยนต์เพิ่มขึ้นสูงสุด (แสดงด้วยจุดวงกลมสีดำ)

2.2 อุปกรณ์ที่ใช้การทดสอบ

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา [11-13] พบว่าตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อความสามารถในการสตาร์ทของเครื่องยนต์ดีเซล ได้แก่ อุณหภูมิบรรยากาศ (Ambient Temperature), การออกแบบเครื่องยนต์ (Engine Design), เชื้อเพลิง (Fuel), การระบายความร้อน (Coolant), น้ำมันหล่อลื่น (Lubricant Oil), สภาวะแบตเตอรี่ (Battery Condition), มอเตอร์สตาร์ท (Starter Motor) และอุปกรณ์ช่วยการสตาร์ท (Starting Aided Device) ดังนั้น เพื่อให้สามารถประเมินผลกระทบของคุณสมบัติเชื้อเพลิงต่อความสามารถในการสตาร์ทเครื่องยนต์ที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมต่างกันได้ งานวิจัยนี้จึงใช้เครื่องยนต์ดีเซล 4 สูบ ที่มีระบบฉีดเชื้อเพลิงแบบคอมมอนเรล (Common Rail Injection System) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีเครื่องยนต์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายปัจจุบัน โดยเป็นเครื่องยนต์ยี่ห้อ Toyota รุ่น 2KD-FTV ปริมาตรกระบอกสูบ 2,494 cc อัตราส่วนการอัด 18.5:1 ให้กำลังสูงสุด 73 kW (102 HP) ที่รอบเครื่องยนต์ 3,600 rpm รายละเอียดอื่นๆ แสดงดังตารางที่ 1 และ

เพื่อจัดผลกระทบของอุปกรณ์ช่วยสตาร์ทในระหว่างการทดสอบ จึงตัดการจ่ายไฟฟ้าไปยังหัวเผา (Glow Plug) เพื่อตัดการทำงาน

ตารางที่ 1 ข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์ทดสอบ

ข้อมูลจำเพาะ	ข้อมูล
ยี่ห้อ/รุ่น	Toyota 2KD-FTV
แบบเครื่องยนต์	เครื่องยนต์ดีเซล 4 สูบ DOHC 16 วาล์ว ติดตั้งเทอร์โบชาร์จเจอร์
ระบบฉีดเชื้อเพลิง	แบบคอมมอนเรล
ขนาดกระบอกสูบ × ช่วงชัก	92.0 mm × 93.8 mm
ความจุกระบอกสูบ	2,494 cc
แรงบิดสูงสุด	200 Nm ที่ 1,400-3,200 rpm
กำลังสูงสุด	73 kW ที่ 3,600 rpm
อัตราส่วนการอัด	18.5:1

เพื่อความคุมให้สภาวะของการสตาร์ทอยู่ภายใต้เงื่อนไขเดียวกันในทุกการทดสอบ แบตเตอรี่ที่ใช้ในการทดสอบมีขนาดแรงดันไฟฟ้า 12 V กระแสไฟฟ้า 100 A ยี่ห้อ FB รุ่น PREMIUM M-2000R-MF (130D31R) ซึ่งกำหนดแรงดันไฟฟ้าก่อนการทดสอบทุกครั้ง 12.1 ± 0.1 V และใช้มอเตอร์สตาร์ทยี่ห้อ Denso รุ่น TA428000-2321 โดยมีการเชื่อมต่อไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ผ่านสวิตช์กุญแจเพื่อเปิดการทำงานของมอเตอร์สตาร์ทของเครื่องยนต์ดังรูปที่ 2

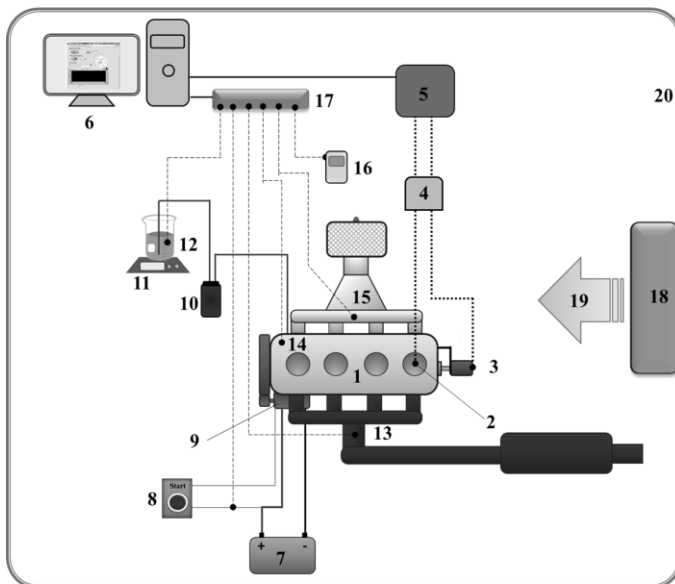
สำหรับความเร็วรอบของเครื่องยนต์ในขณะทำการทดสอบสามารถวัดและคำนวณได้จากเซ็นเซอร์วัดมุมเพลลาข้อเหวี่ยงชนิด Incremental Shaft Encoder



ยี่ห้อ Baumer Electric รุ่น BDK 16.05A360-5-4 ที่มีความละเอียดในการวัด 360 ppr โดยรับข้อมูลผ่านอุปกรณ์เก็บข้อมูลของ National Instruments รุ่น USB-6251 ผ่านช่องรับสัญญาณเคาท์เตอร์ที่รองรับความเร็วสูงสุด 80 MHz (32 bit) ส่วนแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์สแตร์ทรับข้อมูลผ่านช่องรับสัญญาณแอนะล็อกที่อัตราการสุ่มเก็บตัวอย่าง (Sampling Rate) 1.25 MS/s (16 bit) และบันทึกข้อมูลทั้งสองโดยใช้โปรแกรม LabVIEW ซึ่งได้พัฒนาขึ้นเองภายในหน่วยปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยียานยนต์และพลังงานทางเลือก คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา

สำหรับข้อมูลเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมภายในห้องทดสอบและอุณหภูมิต่างๆ ของเครื่องยนต์ถูกวัดด้วย Thermocouple ชนิด K และเก็บข้อมูลทั้งหมดด้วยอุปกรณ์เก็บข้อมูลของ National Instruments รุ่น

USB-6218 ด้วยช่องรับสัญญาณแอนะล็อกที่มีอัตราการสุ่มเก็บตัวอย่างที่ 250 kS/s (16 bit) โดยใช้โปรแกรม LabVIEW เช่นเดียวกัน โดยมีตำแหน่งการวัดของอุณหภูมิต่างๆ ดังนี้ เพื่อวัดอุณหภูมิห้องทดสอบ Thermocouple ติดตั้งภายในห้องทดสอบซึ่งอยู่ห่างจากเครื่องยนต์ประมาณ 50 cm ส่วนอุณหภูมิน้ำมันเชื้อเพลิงจุดวัดถูกติดตั้งไว้ภายในบีกเกอร์ที่บรรจุน้ำมันทดสอบโดยไม่มีส่วนใดสัมผัสกับบีกเกอร์เพื่อไม่ให้มีผลกระทบต่อหน้าหนักในการวัดอัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง สำหรับอุณหภูมิภายในท่อร่วมไอดีและไอเสียติดตั้งไว้ที่บริเวณท่อร่วมไอดีและไอเสียดังรูปที่ 2 ส่วนอุณหภูมิน้ำมันเครื่องได้ติดตั้ง Thermocouple ไว้บริเวณ อ่างน้ำมันเครื่องใต้เครื่องยนต์ และสำหรับอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นถูกติดตั้งไว้บริเวณท่อทางออกเครื่องยนต์ก่อนเข้าของหม้อน้ำ



1. เครื่องยนต์ดีเซล
2. เซ็นเซอร์วัดความดันในกระบอกสูบ
3. เซ็นเซอร์วัดองศาของเพลาข้อเหวี่ยง
4. อุปกรณ์ขยายสัญญาณ
5. อุปกรณ์รวบรวมสัญญาณ
6. คอมพิวเตอร์และโปรแกรมจัดการข้อมูล
7. แบตเตอรี่
8. ปุ่มสตาร์ทเครื่องยนต์
9. มอเตอร์สแตร์ท
10. บิมน้ำมันเชื้อเพลิง
11. ตาชั่งดิจิทัล
12. เทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิน้ำมันเชื้อเพลิง
13. เทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิไอเสีย
14. เทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิน้ำมันเครื่อง
15. เทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิไอดี
16. อุปกรณ์วัดอุณหภูมิห้องทดสอบ
17. อุปกรณ์เก็บข้อมูลอุณหภูมิต่างๆ
18. เครื่องทำความเย็น
19. อากาศ
20. ห้องควบคุมอุณหภูมิ

รูปที่ 2 แผนผังการทดสอบและอุปกรณ์การทดสอบ



2.3 การเตรียมเชื้อเพลิงทดสอบ

งานวิจัยนี้เลือกใช้สารบริสุทธิ์ ได้แก่ อะซิโตน บิวทานอล และเอทานอล ที่มีความบริสุทธิ์ 99.5% 99.8% และ 99.5% ตามลำดับ ในการเตรียมส่วนผสมของ ABE เพื่อหลีกเลี่ยงความแปรผันของคุณสมบัติเชื้อเพลิงที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตจริงที่อาจส่งผลกระทบต่อการวิเคราะห์ผลการทดสอบ โดยผสมกันในอัตราส่วนระหว่างอะซิโตน บิวทานอล และเอทานอลเท่ากับ 3:6:1 โดยปริมาตร ซึ่งเป็นสัดส่วนทั่วไปที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิตบิวทานอล [1, 2] โดยสารผสม ABE จะนำไปผสมกับดีเซลในสัดส่วนร้อยละ 20 โดยปริมาตร ซึ่งถูกเรียกว่า “ABE20” และผลการทดสอบทั้งหมดจะนำมาเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลล้วน ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงอ้างอิง (Reference Fuel)

ตารางที่ 2 แสดงคุณสมบัติของเชื้อเพลิงทดสอบ โดยค่าความหนาแน่นของเชื้อเพลิงวัดด้วยเครื่อง Anton Paar DMA 4500 ที่ 15°C โดยที่มีความละเอียดในการวัด 0.05 kg/m³ ส่วนค่าความหนืดวัดได้

จาก Single-bath Kinematic Viscometer of CANNON Mini AV ที่ 40°C และสำหรับค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิงหาได้จากเครื่องบอมม์แคลอรีมิเตอร์ ยี่ห้อ LECO รุ่น AC-350 ส่วนข้อมูลค่าอื่นอ้างอิงจากงานวิจัยที่ผ่านมา [7]

จากตารางที่ 2 พบว่าค่าความหนาแน่นของ ABE20 แตกต่างจากดีเซลน้อยกว่า 1% แต่กลับมีค่าความหนืดต่ำกว่าดีเซลมากถึง 34% และพบว่าค่าความร้อนน้อยกว่าดีเซลประมาณ 8% แม้ว่าค่าซีเทนัมเบอร์ ABE20 จะไม่ปรากฏข้อมูลในงานวิจัยที่ผ่านมา อย่างไรก็ตามสามารถคาดการณ์ได้ว่าควรมีค่าต่ำกว่าดีเซล เนื่องจากอัลที่ผสมอยู่ใน ABE20 มีค่าซีเทนที่ต่ำกว่าดีเซลอย่างมาก เช่น บิวทานอล 25 และเอทานอล 8 เป็นต้น นอกจากนี้ ABE20 ยังมีค่าความร้อนแฝงของการระเหยเป็นไอสูงกว่าดีเซล อันจะส่งผลกระทบต่อกระบวนการระเหย (Vaporization Process) ของสเปรย์รวมถึงส่งผลกระทบต่อความสามารถในสตาร์ทเครื่องยนต์ที่อุณหภูมิต่ำอีกด้วย

ตารางที่ 2 คุณสมบัติเชื้อเพลิงที่ใช้ทดสอบ

คุณสมบัติ	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 (-) [4-5]	51	-	25	8	-
ความร้อนแฝงของการระเหยเป็นไอที่ 298 K (kJ/kg) [4]	270	518	582	904	332.8



2.4 ระเบียบวิธีและสภาวะในการทดสอบ

เนื่องจากอุณหภูมิบรรยากาศรอบเครื่องยนต์มีผลกระทบโดยตรงต่อความสามารถในการสตาร์ทของเครื่องยนต์ [10] และจากข้อมูลของศูนย์ภูมิอากาศ กรมอุตุนิยมวิทยาได้รายงานไว้ว่า ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิของประเทศไทยในคาบ 30 ปี ระหว่าง พ.ศ. 2524-2553 มีค่าเท่ากับ 27.2°C ส่วนอุณหภูมิเฉลี่ยในปี 2562 และ 2563 อยู่ที่ 28.1 และ 28.0°C ตามลำดับ [12] ดังนั้น เพื่อให้การทดสอบครอบคลุมอุณหภูมิเฉลี่ยของประเทศ ไทยจึงกำหนดอุณหภูมิห้องทดสอบที่ 20 และ 30°C โดยใช้เครื่องปรับอากาศขนาด 20,000 BTU จำนวน 2 เครื่อง เพื่อควบคุมอุณหภูมิห้องทดสอบที่มีขนาด 125 m² และสำหรับค่าความชื้นในห้องทดสอบแม้ว่าจะไม่มีการควบคุม แต่ได้มีการบันทึกค่าไว้ซึ่งมีค่าความชื้นสัมพัทธ์ไม่แตกต่างกันหรืออยู่ระหว่าง 42%-45% ในทุกการทดสอบ ตารางที่ 3 แสดงภาพรวมสภาวะการทดสอบต่างๆ โดยที่มีขั้นตอนการทดสอบดังต่อไปนี้

1. จัดเตรียมเครื่องยนต์ เชื้อเพลิงทดสอบ อุปกรณ์ในการวัด และห้องทดสอบให้พร้อม
2. วัดอุณหภูมิตำแหน่งต่างๆ ทั้งในห้องทดสอบ และเครื่องยนต์ต้องมีค่าเท่าหรือต่างกันไม่เกิน 0.5°C
3. เริ่มบันทึกข้อมูลการทดสอบต่างๆ ในโปรแกรม LabVIEW และค่าน้ำหนักเริ่มต้นของน้ำมันเชื้อเพลิง
4. สตาร์ทเครื่องยนต์ จนเครื่องยนต์สตาร์ทติดและเดินเบา (Idle) เป็นระยะเวลา 60 s จึงหยุดบันทึกผลการทดสอบทั้งหมด
5. ทำการทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง ในแต่ละสภาวะการทดสอบ โดยเริ่มขั้นตอนการทดสอบจากข้อที่ 1-4
6. เปลี่ยนสภาวะการทดสอบ และน้ำมันเชื้อเพลิงจนครบ

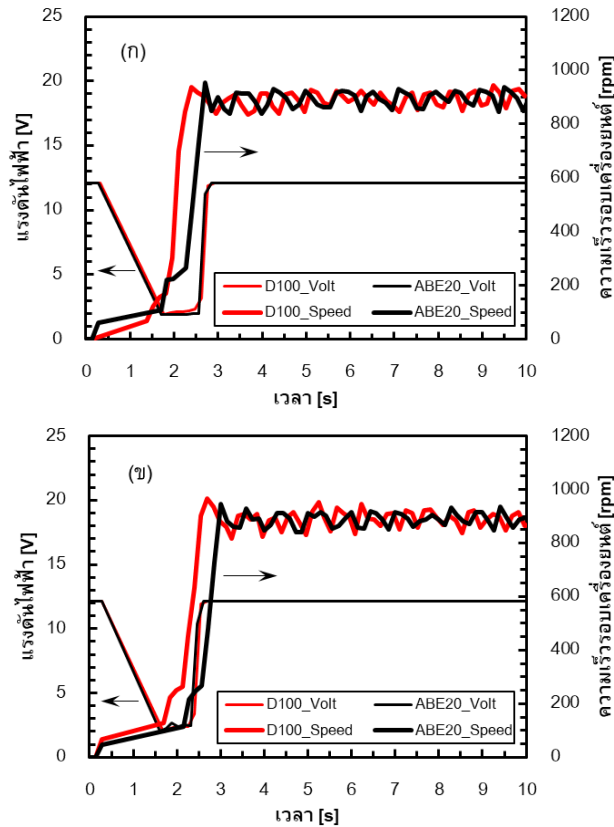
ตารางที่ 3 สรุปสภาวะการทดสอบ

ตัวแปร	ข้อมูลทดสอบ
เชื้อเพลิง	Diesel และ ABE20
อุณหภูมิห้องทดสอบ	20 และ 30°C
ตัวแปรที่วัด	- แรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์สตาร์ท - ความเร็วรอบเครื่องยนต์ - อัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง

3. ผลการทดสอบ

3.1 การสตาร์ทเครื่องยนต์

รูปที่ 3 แสดงข้อมูลแรงดันไฟฟ้าที่มอเตอร์สตาร์ทและความเร็วรอบของเครื่องยนต์ขณะทำการสตาร์ทสังเกตได้ว่าในช่วงที่ 1 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าของทุกสภาวะการทดสอบเริ่มต้นตกลงจาก 12.1 V ในช่วงเวลาใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงถึงตำแหน่งการเริ่มต้นการสตาร์ทเครื่องยนต์ (ดังที่ได้นิยามไว้ในหัวข้อ 2.1) ในขณะเดียวกันความเร็วรอบของเครื่องยนต์เริ่มเพิ่มขึ้น และเข้าสู่ช่วงที่ 2 (เครื่องยนต์หมุนฟรี) ความเร็วรอบเครื่องยนต์ในทุกสภาวะการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกันประมาณ 200 rpm จากการหมุนฟรีหลายรอบในช่วงนี้ เชื้อเพลิงได้ถูกฉีดเข้าไปภายในห้องเผาไหม้จนมีปริมาณมากเพียงพอต่อการเริ่มต้นการจุดระเบิด เมื่ออุณหภูมิและความดันในกระบอกเพิ่มถึงจุดที่เชื้อเพลิงสามารถจุดระเบิดด้วยตนเองได้ การเผาไหม้ในวัฏจักรแรกจึงเริ่มเกิดขึ้น และจากนั้นความเร็วรอบของเครื่องยนต์ก็จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเข้าสู่ช่วงที่ 3 (การสตาร์ท)



รูปที่ 3 ข้อมูลแรงดันไฟฟ้าที่มอเตอร์สตาร์ทและความเร็วรอบของเครื่องยนต์ขณะทำการสตาร์ทของน้ำมันดีเซล และ ABE20 ที่อุณหภูมิห้องทดสอบ (ก) 20°C และ (ข) 30°C

ในช่วงนี้พบว่าดีเซลมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบที่เกิดขึ้นก่อน ABE20 ในทุกสภาวะการทดสอบ และสังเกตได้ว่าความเร็วรอบสูงสุดของดีเซลเกิดขึ้นก่อน ABE20 ในทุกสภาวะการทดสอบเช่นกัน จากนั้นความเร็วรอบของเครื่องยนต์จะตกลงและเข้าสู่การเดินเบา ซึ่งความเร็วรอบเฉลี่ยของแต่ละการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกัน ได้แก่ 895 และ 892 rpm สำหรับน้ำมันดีเซลที่อุณหภูมิห้อง 20°C และ 30°C ตามลำดับ และ 896 และ 893 rpm สำหรับ ABE20 ที่อุณหภูมิห้อง 20°C และ 30°C ตามลำดับ

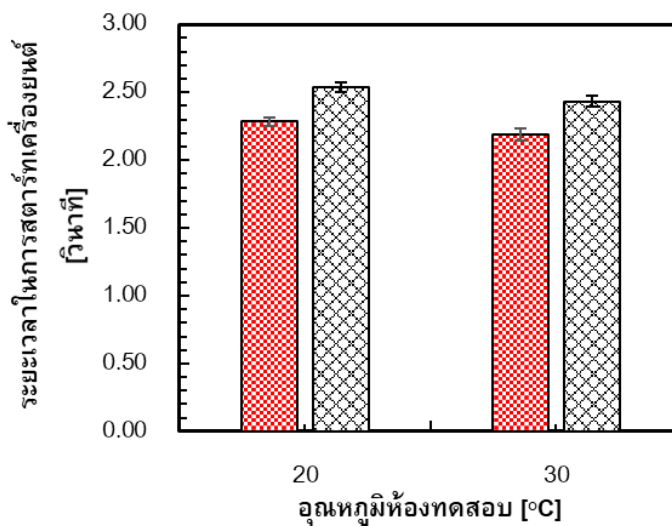
เมื่อนำข้อมูลจากรูปที่ 3 มาวิเคราะห์เพื่อประเมินความสามารถในการสตาร์ทเครื่องยนต์โดยพิจารณาจากระยะเวลาในการสตาร์ทเครื่องยนต์ ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4 พบว่า การลดลงของอุณหภูมิห้องทดสอบจาก 30°C เป็น 20°C ส่งผลทำให้ใช้เวลาในการสตาร์ทยาวนานขึ้นเพียงเล็กน้อยหรือนานขึ้นประมาณ 0.096 และ 0.104 s (4.39% และ 4.28%) สำหรับดีเซลและ ABE20 ตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Ramadhas และคณะ [13] ที่พบว่า เมื่ออุณหภูมิห้องทดสอบต่ำลง 10°C ทำให้ใช้เวลาในการสตาร์ท



ยาวนานขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งมีช่วงเวลาในการหมุนฟรีของเครื่องยนต์ที่ยาวนานขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิของเครื่องยนต์ต่ำจะส่งผลทำให้ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นเพิ่มขึ้น จึงเพิ่มความเสียดทานในชิ้นส่วนต่างๆที่กำลังเคลื่อนที่ในขณะที่ทำการสตาร์ท [14] อีกทั้งการลดลงของอุณหภูมิห้องทดสอบทำให้อุณหภูมิกายในกระบอกสูบลดลงตามไปด้วย ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อกระบวนการฉีดเชื้อเพลิง (Fuel Injection) การแตกตัวเป็นฝอยละออง (Atomization) ระเหยตัวของเชื้อเพลิง (Vaporization) และการผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ (Air-fuel Mixture) และส่งผลต่อเนื่องไปจนถึงความสามารถในการจุดระเบิดด้วยตัวเอง (Auto-ignition) ของเชื้อเพลิงในช่วงเริ่มต้นการเผาไหม้ [15]

สำหรับผลกระทบของเชื้อเพลิง ณ อุณหภูมิห้องทดสอบเดียวกัน พบว่า ABE20 ใช้เวลาในการสตาร์ท

ยาวนานกว่าดีเซลอย่างมีนัยสำคัญ หรือนานกว่า 0.253 และ 0.246 s สำหรับอุณหภูมิ 20°C และ 30°C ตามลำดับ ทั้งนี้มีสาเหตุจากการมีค่าซีเทนัมเบอร์ (Cetane Number) ของแอลกอฮอล์ที่ผสมอยู่ใน ABE20 ที่ต่ำกว่าดีเซลดังตารางที่ 2 ซึ่งเป็นตัวแปรที่บ่งชี้ความสามารถในการจุดระเบิดของ ABE20 ที่ต่ำกว่าดีเซล ประกอบกับการมีค่าความร้อนแฝงในการระเหยตัวของแอลกอฮอล์ที่ผสมอยู่ใน ABE20 ที่สูงกว่าดีเซล ซึ่งเหนี่ยวนำให้เกิด Cooling Effect ของอุณหภูมิกายในกระบอกสูบ ซึ่งส่งผลต่อการลดลงของอัตราการระเหยตัวของเชื้อเพลิงและการผสมเชื้อเพลิงกับอากาศ (Vaporization and Mixing Process) [6] ตลอดจนลดอัตราการทำปฏิกิริยาเคมีเผาไหม้ (Chemical Reaction Rate of Combustion) ในช่วงเริ่มต้นการจุดระเบิด (Auto-ignition Process) [7]

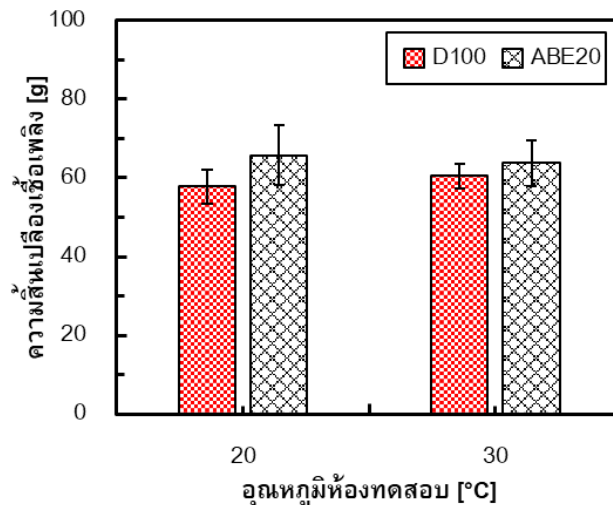


รูปที่ 4 ระยะเวลาในการสตาร์ทเครื่องยนต์ของน้ำมันดีเซล และ ABE20 ที่อุณหภูมิห้องทดสอบ 20°C และ 30°C

รูปที่ 5 แสดงผลความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงระหว่างการทดสอบสตาร์ทเครื่องยนต์และเดินเบาต่อเนื่องเป็นเวลา 60 s พบว่าอุณหภูมิห้องไม่มีผลต่อความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงมากนักเมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงชนิดเดียวกัน เนื่องจากความแตกต่างของความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงทั้ง 2 สภาวะ มีความแตกต่างกันน้อยกว่า 5% อีกทั้งค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) ซึ่งแสดงด้วย Error Bar ของทั้งสองสภาวะอยู่ในช่วงเดียวกัน

ทั้งนี้เนื่องจากความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงส่วนใหญ่มีผลจากการเดินเบาของเครื่องยนต์เป็นหลัก ซึ่งสังเกตได้จากช่วงสตาร์ทการใช้เวลาเพียงแค่ 2.0-2.5 s เท่านั้น ในขณะที่ช่วงการเดินเบาใช้เวลามากถึง 60 s และเป็นที่ยอมรับกันว่าอุณหภูมิบรรยากาศรอบเครื่องยนต์นั้นเป็นตัวแปรสำคัญในการสตาร์ทเครื่องยนต์ดังที่ได้อภิปรายไว้ก่อนหน้านี้ อย่างไรก็ตาม

เมื่อเครื่องยนต์สตาร์ทติดและเริ่มเดินเบาแล้วอุณหภูมิบรรยากาศรอบเครื่องยนต์จะลดความสำคัญต่อสเปรย์และการเผาไหม้ลง เนื่องจากอุณหภูมิต่างๆ ภายในเครื่องยนต์ เช่น อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น อุณหภูมิน้ำมันเครื่องจะลดลงจนอุณหภูมิห้องเผาไหม้จะเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งจะสนับสนุนกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงได้ดีขึ้น ดังนั้น อุณหภูมิบรรยากาศของห้องทดสอบจึงอาจส่งผลกระทบต่อความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของการทดสอบนี้ ในขณะที่ชนิดของเชื้อเพลิงจะเป็น ตัวแปรหลักที่ผลต่อความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง เนื่องจากเชื้อเพลิงแต่ละชนิดมีคุณสมบัติที่ต่างกัน และเมื่อพิจารณาผลกระทบของเชื้อเพลิงพบว่า ABE20 มีการบริโภคเชื้อเพลิงเฉลี่ยที่มากกว่าดีเซลในทุกสภาวะการทดสอบราว 16.6% และ 5.5% สำหรับอุณหภูมิห้องทดสอบ 20 และ 30°C ตามลำดับ ทั้งนี้มีผลสอดคล้องกับค่าความร้อนของ ABE20 ที่ค่าน้อยกว่าดีเซลอยู่ราว 8% [3]



รูปที่ 5 อัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงระหว่างการทดสอบสตาร์ทเครื่องยนต์ของน้ำมันดีเซลและ ABE20 ที่อุณหภูมิห้องทดสอบ 20°C และ 30°C



4. สรุปผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบเพื่อประเมินความสามารถในการสตาร์ทของเครื่องยนต์เมื่อใช้ ABE20 เป็นเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิห้องทดสอบ 20°C และ 30°C สามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

1. ABE20 ใช้ระยะเวลาในการสตาร์ทยาวนานกว่าดีเซลในทุกสภาวะการทดสอบ เนื่องจากแอลกอฮอล์ที่ผสมใน ABE มีค่าซีเทนต่ำและค่าความร้อนแฝงของการระเหยตัวสูง ซึ่งส่งผลต่อการลดความสามารถในการระเหยตัวของเชื้อเพลิงและการผสมเชื้อเพลิงกับอากาศ ตลอดจนลดการทำปฏิกิริยาเคมีเผาไหม้ในช่วงเริ่มต้นการจุดระเบิด

2. การลดอุณหภูมิห้องทดสอบลงจาก 30°C เป็น 20°C มีผลกระทบเล็กน้อยต่อความสามารถในการสตาร์ทเครื่องยนต์ โดยต่างกันไม่เกิน 5%

3. แม้ว่าความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงระหว่างทดสอบสตาร์ทเครื่องยนต์และเดินเบาต่อเนื่องเป็นเวลา 60 s ของ ABE20 จะมากกว่าดีเซลเนื่องจากมีค่าความร้อนที่น้อยกว่าดีเซล แต่กลับพบว่าไม่มีผลกระทบของความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเมื่ออุณหภูมิห้องทดสอบต่างกัน 10°C

จากงานวิจัยที่ผ่านมาแม้ว่าการใช้ ABE20 เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลที่ไม่มีการดัดแปลงจะให้ผลการทดสอบที่น่าพอใจทั้งในด้านสมรรถนะ การเผาไหม้ มลพิษ และเสถียรภาพการทำงาน อย่างไรก็ตาม จากผลการทดสอบนี้แสดงให้เห็นว่า การใช้ ABE20 เป็นเชื้อเพลิงมีผลต่อความสามารถในการสตาร์ทของเครื่องยนต์ดีเซล โดยใช้เวลาในการสตาร์ทที่ยาวนานกว่าน้ำมันดีเซลอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม ปัญหานี้สามารถปรับปรุงได้โดยการใช้อุปกรณ์ช่วย

ในการสตาร์ท เช่น การใช้หัวเผา และการออกแบบระบบสตาร์ทเครื่องยนต์ที่เหมาะสมกับเชื้อเพลิงนี้เป็นต้น จึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในอนาคตต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ประเภทโครงการสนับสนุนทุนวิจัยเพื่อพัฒนานักวิจัยรุ่นใหม่ มก. ประจำปี 2562 รหัสโครงการวิจัย ร-ม 29.62 และ ทุนสนับสนุนงานวิจัยพื้นฐาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา รหัสโครงการวิจัย KUSRC 5010/64

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] H. Wu, K. Nithyanandan, N. Zhou, T.H. Lee, C.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.
- [2] 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.
- [3] 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.



- [4] 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.
- [5] K. Komaneer, S. Chuepeng, and O. Nilaphai, An experimental investigation of ABE-diesel blend on performance, combustion, and emissions in a compression ignition engine, *The 11th International Conference on Mechanical Engineering (ICoME 2020)*, Proceeding, 2020, Art. No. AEC0002.
- [6] A.K. Agarwal, A. Dhar, J.G. Gupta, W.I. Kim, K. Choi, C.S. Lee and S. Park, Effect of fuel injection pressure and injection timing of Karanja biodiesel blends on fuel spray, engine performance, emissions and combustion characteristics, *Energy Conversion and Management*, 2015, 91, 302–314.
- [7] O. Nilaphai, The effect of acetone-butanol-ethanol blended diesel fuel on the engine stability of a single cylinder diesel engine, *The Journal of Industrial Technology*, 2020, 16(2), 89–103. (in Thai)
- [8] 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, 971.
- [9] G. Hernandez, Combustion studies for high speed direct injection diesel engines under low temperature cold start conditions, Ph.D. Thesis, Departamento de Maquinas y Motores Termicos, Universidad Politecnica de Valencia, Spain, 2012.
- [10] M. Palanisamy, Characteristics of cold start of a diesel engine using Jp8 and ULSD fuels, Master Thesis, The Graduate School of Wayne State University, Wayne State University, USA, 2013.
- [11] A. Celik, M. Yilmaz, and O.F. Yildiz, Improvement of diesel engine startability under low temperatures by vortex tubes, *Energy Reports*, 2020, 6, 17–27.
- [12] R.B. Gupta, Cold starting of IC engines, *Defence Science Journal*, 1988, 38(1), 77–85.
- [13] A.S. Ramadhas and H. Xu, Intake air heating strategy to reduce cold-start emissions from diesel engines, *Biofuels*, 2014, 9(3), 405–414.



- [14] <http://climate.tmd.go.th>. (Accessed on 23 July 2021)
- [15] A.S. Ramadhas, H. Xu, D. Liu, and J. Tian, Reducing cold start emissions from automotive diesel engine at cold ambient temperatures, *Aerosol and Air Quality Research*, 2016, 16(12), 3330–3337.
- [16] G.F. Xiao, X Q. Qiao, Z. Huang, and Z.P. Chen, Improvement of startability of direct-injection diesel engines by oxygen-enriched intake air, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2007, 221(11), 1453–1465.