

คุณลักษณะการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ดีเซลเล็กซึ่งใช้เชื้อเพลิงเอทานอลผสมโพลิเอทิลีนไกลคอลเป็นสารช่วยจุดระเบิดขณะสตาร์ทเครื่องยนต์

กิตติ เอี่ยมเปรมจิต*

วิทยาลัยเทคโนโลยีและสหวิทยาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

98 หมู่ 8 ตำบลป่าป้อ อำเภอดอยสะเก็ด จังหวัดเชียงใหม่ 50220

รับบทความ 28 มีนาคม 2568 แก้ไขบทความ 4 พฤษภาคม 2569 ตอรับบทความ 11 มิถุนายน 2569

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์สมรรถนะและลักษณะการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก เมื่อใช้เชื้อเพลิงเอทานอลผสมโพลิเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene Glycol: PEG) เป็นสารปรับปรุงค่าซีเทน (Ignition Improver) การทดสอบดำเนินการในเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดียวแบบฉีดตรง ภายใต้สภาวะการสตาร์ทเครื่องยนต์ขณะไม่มีภาระ ที่ตำแหน่งคันเร่งสูงสุด โดยแปรผันความเข้มข้นของ PEG ในสัดส่วนร้อยละ 18 ถึง 35 โดยน้ำหนัก ผลการทดลองพบว่าสัดส่วนของ PEG เป็นปัจจัยที่มีผลต่อขีดความสามารถในการติดเครื่องยนต์ โดยเครื่องยนต์ไม่สามารถสตาร์ทติดได้เมื่อสัดส่วนของ PEG ต่ำกว่าร้อยละ 18 จากการวิเคราะห์การเผาไหม้พบว่า การเพิ่มความเข้มข้นของ PEG ส่งผลให้ตำแหน่งเริ่มต้นการเผาไหม้ (Start of Combustion: SOC) เกิดการเผาไหม้ให้เร็วขึ้น (Advanced Combustion) และส่งผลให้ช่วงเวลาหน่วงการจุดระเบิด (Ignition Delay) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสัมพันธ์โดยตรงกับการลดลงของจำนวนวัฏจักรที่ไม่เกิดการเผาไหม้ (Misfire Cycles) ข้อมูลจากการศึกษานี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการกำหนดสัดส่วนสารเติมแต่งที่เหมาะสมสำหรับการใช้เอทานอลในเครื่องยนต์ดีเซลภาคเกษตรกรรมต่อไป

คำสำคัญ : การเผาไหม้; เอทานอล; โพลิเอทิลีนไกลคอล; เครื่องยนต์ดีเซล

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 6802 5022, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: kitti@rmutl.ac.th

Combustion Characteristics of a Small Diesel Engine Fueled with Ethanol and Polyethylene Glycol as Ignition Improver during Start of Engine

Kitti Iempremjit*

College of Integrated Science and Technology, Rajamangala University of Technology Lanna
98 Moo 8, Papong, Doisaket District, Chiangmai Province, 50220

Received 28 March 2025; Revised 4 May 2026; Accepted 11 June 2026

Abstract

This research aims to analyze the performance and combustion characteristics of a small diesel engine fueled by ethanol blended with Polyethylene Glycol (PEG) as an ignition improver. The experiments were conducted on a single-cylinder, Direct Injection (DI) diesel engine under no load and at maximum fuel position. The concentration of PEG was varied from 18% to 35% by weight. The experimental results revealed that the PEG proportion is a factor influencing engine startability; the engine failed to start when the PEG concentration was below 18%. Combustion analysis indicated that increasing the PEG concentration led to an advanced start of combustion (SOC) and a significant reduction in ignition delay. These improvements were directly correlated with a decrease in the number of misfire cycles. The findings of this study can serve as a guideline for determining the optimal additive proportions for utilizing ethanol in agricultural diesel engines.

Keywords : Combustion; Ethanol; Polyethylene Glycol; CI engine

* Corresponding Author. Tel.: +668 6802 5022, E-mail Address: kitti@rmutl.ac.th

1. บทนำ

ในสภาวะวิกฤตการณ์ด้านภูมิอากาศโลก การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gases: GHGs) จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลในภาคขนส่ง ถือเป็นปัจจัยหลักที่ก่อให้เกิดปรากฏการณ์ก๊าซเรือนกระจก และการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเฉลี่ยของโลก การเปลี่ยนผ่านสู่พลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy) จึงเป็นยุทธศาสตร์สำคัญในการลดการพึ่งพาพลังงานที่ก่อให้เกิดคาร์บอนสูง เชื้อเพลิงเอทานอล (Ethanol) หรือเอทิลแอลกอฮอล์ จึงก้าวเข้ามามีบทบาทสำคัญในฐานะเชื้อเพลิงชีวภาพที่มีศักยภาพสูง ทั้งในด้านความยั่งยืนทางสิ่งแวดล้อมและความมั่นคงทางพลังงาน [1] ปัจจุบันในหลายประเทศรวมถึงประเทศไทยมีการใช้เอทานอลอย่างกว้างขวาง จึงเป็นโอกาสอันดีในการประยุกต์ใช้เอทานอลเป็นเชื้อเพลิงทดแทนในเครื่องยนต์ดีเซล

การใช้เอทานอลในเครื่องยนต์ดีเซลสามารถดำเนินการได้หลายวิธี เช่น การผสมเอทานอลกับดีเซล (Diesel-ethanol fuel blends) การฉีดเชื้อเพลิงคู่ (Dual-fuel injection) การจ่ายเอทานอลผ่านท่อร่วมไอดี การใช้หัวเทียนหรือหัวเผาช่วยจุดระเบิด และการใช้สารช่วยจุดระเบิด (Ignition improvers) [2] ซึ่งวิธีหลังสุดนี้นับว่ามีความสะดวกเนื่องจากไม่จำเป็นต้องดัดแปลงโครงสร้างเครื่องยนต์อย่างมีนัยสำคัญ การเติมสารช่วยจุดระเบิดจะช่วยเพิ่มค่าซีเทนให้แก่เอทานอล ทำให้สามารถเกิดการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ดีเซลได้

งานวิจัยในระยะแรกมักใช้สารประกอบกลุ่มไนเตรท (Nitrate-based) ซึ่งจากการทดสอบพบว่าสาร Isoamyl Nitrate, Triethylene Glycol Dinitrate (TEGDN) และ Triethyl Ammonium Nitrate มีประสิทธิภาพสูงและผ่านเกณฑ์การประเมินด้านความปลอดภัยและเศรษฐศาสตร์ [3] อย่างไรก็ตาม สารกลุ่มไนเตรทส่งผลให้เกิดมลพิษไนโตรเจนออกไซด์ (NOx) สูง มีฤทธิ์กัดกร่อน และมีความเสี่ยงต่อการระเบิด จึงนำไปสู่การศึกษาสารช่วยจุดระเบิดกลุ่มที่ไม่เป็นสารประกอบไนเตรท (Non-nitrogen species) เพื่อลดข้อจำกัดดังกล่าว

จากการศึกษาการใช้สารช่วยจุดระเบิดในเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้เชื้อเพลิงเอทานอล พบว่าการเติม Nitrate Ester (Avocet) ในสัดส่วนร้อยละ 4 โดยปริมาตร ส่งผลให้ช่วงเวลาหน่วงการจุดระเบิด (Ignition Delay) สั้นที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสารช่วยจุดระเบิดชนิดอื่น เช่น Isopropyl Nitrate และ Polyethylene Glycol (Beraid) [4]

นอกจากนี้ยังมีการใช้เครื่องยนต์จำลอง (RCEM) ศึกษา Glycerol Ethoxylate และเชื้อเพลิง ED95 ซึ่งพบว่าให้อัตราการปลดปล่อยความร้อน (Heat release rate) ใกล้เคียงกัน [5]

การศึกษาคูณลักษณะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเอทานอลผสมสารช่วยจุดระเบิด Glycerol Ethoxylate (GE) ในสัดส่วนร้อยละ 2 ถึง 35 โดยน้ำหนัก ในเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดียวที่มีการปรับเพิ่มอัตราส่วนการอัดเป็น 23:1 ภายใต้การควบคุมอุณหภูมิแวดล้อมที่ 25 องศาเซลเซียส พบว่าสัดส่วนต่ำสุดของสารช่วยจุดระเบิดที่สามารถทำให้เครื่องยนต์เกิดการจุดระเบิดได้คือร้อยละ 13 ทั้งนี้ เมื่อเพิ่มสัดส่วน GE สูงกว่าร้อยละ 24 พบว่าค่าความดันเฉลี่ยประสิทธิภาพ (IMEP) มีความแตกต่างจากเชื้อเพลิงดีเซลร้อยละ 2.5 ถึง 3.0 นอกจากนี้ ตำแหน่งเริ่มต้นการเผาไหม้มีค่าเบี่ยงเบนจากเชื้อเพลิงดีเซล 3.0 ถึง 3.8 และ 3.4 ถึง 8.8 องศาตามลำดับ โดยการเพิ่มสัดส่วนของ GE ส่งผลให้ช่วงเวลาหน่วงการจุดระเบิด (Ignition Delay) และจำนวนวัฏจักรที่ไม่เกิดการเผาไหม้ (Misfire Cycles) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ [6]

จากการศึกษาเปรียบเทียบคูณลักษณะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเอทานอลผสมไบโอดีเซลในสัดส่วนร้อยละ 2 ถึง 40 พบว่าสัดส่วนต่ำสุดของไบโอดีเซลที่สามารถทำให้เครื่องยนต์เกิดการจุดระเบิดได้คือร้อยละ 18 ในด้านการทำงานของเครื่องยนต์พบว่า ตำแหน่งเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิง (Injection Timing) ของทุกสัดส่วนผสมมีค่าอยู่ในช่วง -12 ถึง -9 องศาหลังศูนย์ตายบน ($^{\circ}$ ATDC) อย่างไรก็ตาม ตำแหน่งเริ่มต้นการเผาไหม้ (Start of Combustion) ของเชื้อเพลิงผสมแสดงให้เห็นถึงความ

ล่าช้ามากเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซล โดยอยู่ในช่วง 10 ถึง 28 องศาหลังจุดตายบน ทั้งนี้ การเพิ่มสัดส่วนของไบโอดีเซลส่งผลให้เกิดการจุดระเบิดที่รวดเร็วขึ้นและช่วยลดช่วงเวลาหน่วงการจุดระเบิด (Ignition Delay) ได้อย่างต่อเนื่อง [7]

การใช้เครื่องยนต์จำลอง (Rapid Compression Machine) ศึกษาการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเอทานอลผสม PEG400 (Ethanol 87% w/w และ PEG 400 13% w/w) โดยอากาศจะถูกบรรจุเข้าสู่ห้องเผาไหม้ก่อนช่วงจังหวะการอัด ทั้งนี้ได้มีการทดสอบที่สัดส่วน 7% และ 10% ด้วยเช่นกัน แต่พบว่าไม่เกิดการเผาไหม้ที่สัดส่วน 7% และ 10% ผลการทดสอบที่อัตราส่วนการอัด 20:1 จังหวะการฉีด (SOI) ที่ 33° BTDC เชื้อเพลิงจะเผาไหม้ได้เร็วกว่าและมีการปลดปล่อยความร้อนที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับจังหวะการฉีดที่ 29 และ 25° BTDC ซึ่งการปลดปล่อยความร้อนจะมีค่าใกล้เคียงกัน ผลการทดสอบที่อัตราส่วนการอัด 25:1 ยิ่งจังหวะการเริ่มฉีดเชื้อเพลิงสูงขึ้น (ฉีดล่วงหน้ามากขึ้น) ค่าแรงดันสูงสุด (Pressure Peak) ก็จะมีสูงขึ้นตามไปด้วย และแรงดันสูงสุดนี้จะเกิดขึ้นในจังหวะที่ใกล้กับศูนย์ตายบน (TDC) มากยิ่งขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนจังหวะการฉีดสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพการเผาไหม้ได้ [8], [9]

สารปรับปรุงการจุดระเบิดประเภทพอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) ได้รับการนำมาประยุกต์ใช้ในเครื่องยนต์ Scania และ Volvo อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามยังมีความจำเป็นในการศึกษาสารเติมแต่งทางเลือกอื่นที่น่าสนใจ โดยเฉพาะการใช้เครื่องปฏิกรณ์ติดตั้งบนยานพาหนะ (On-board Reactor) เพื่อสังเคราะห์อีเทอร์จากเชื้อเพลิงแอลกอฮอล์ ซึ่งสามารถผลิตไดเอทิลอีเทอร์ (DEE) จากเอทานอล (EtOH) และไดเมทิลอีเทอร์ (DME) จากเมทานอล (MeOH) ได้ สารประกอบอีเทอร์ทั้งสองชนิดนี้มีค่าซีเทนสูงที่ 90 และ 60 ตามลำดับ จึงมีศักยภาพในการใช้เป็นสารปรับปรุงการจุดระเบิด นอกจากนี้ เครื่องยนต์ดีเซลของ Volvo สองรุ่น ได้แก่ รุ่น TD73 สำหรับรถบรรทุกทุกหนัก และรุ่น AH10A245

สำหรับรถโดยสาร ได้รับการพัฒนาเพื่อรองรับเชื้อเพลิงแอลกอฮอล์ โดยมีการปรับปรุงหลักคือการเพิ่มอัตราส่วนการอัด พร้อมทั้งขยายขนาดปั๊มเชื้อเพลิงและหัวฉีด ซึ่งเครื่องยนต์ทั้งสองรุ่นถูกออกแบบให้ใช้เอทานอลผสม PEG ในสัดส่วนร้อยละ 7 เป็นตัวเร่งการจุดระเบิด และต่อมาเครื่องยนต์โดยสารได้รับการพัฒนาเพิ่มเติมให้สามารถใช้เชื้อเพลิงอีเทอร์ร่วมด้วย [10]

เนื่องจากสารช่วยจุดระเบิด Glycerol Ethoxylate มีข้อจำกัดด้านต้นทุนที่สูง โพลีเอทิลีนไกลคอล จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในเชิงเศรษฐศาสตร์และเทคนิค เนื่องจากมีราคาประหยัดและมีคุณสมบัติในการลดช่วงเวลาหน่วงการจุดระเบิด ได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยเหตุนี้ งานวิจัยฉบับนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาคุณลักษณะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเอทานอลผสม PEG400 ในเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก โดยเฉพาะในช่วงสภาวะการเริ่มเดินเครื่องยนต์ ข้อมูลจากการศึกษานี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการกำหนดสัดส่วนสารเติมแต่งที่เหมาะสมสำหรับการใช้เอทานอลในเครื่องยนต์ดีเซลภาคเกษตรกรรมต่อไป

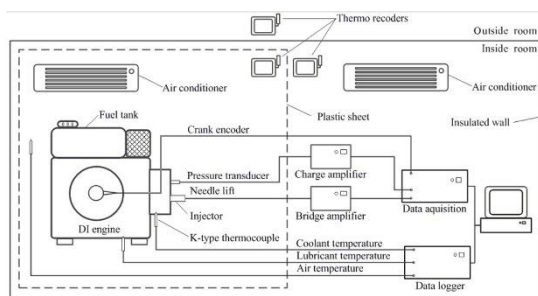
2. ระเบียบวิธีวิจัย

การศึกษานี้ใช้ PEG400 เป็นสารช่วยจุดระเบิดผสมกับเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 95 ในสัดส่วนร้อยละ 2 ถึง 35 โดยน้ำหนัก คุณสมบัติของเชื้อเพลิงทดสอบแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของเชื้อเพลิง [6], [7], [11]

Properties	Ethanol	PEG400	Diesel
*Viscosity (cP)	1.19 @20 °C	45.65 @40 °C	4.35 @20 °C
Density (kg/m ³)	0.785	1.130	0.832
LHV (MJ/kg)	26.8	23.5	42.6
Cetane number	5	N/A	55
Flash point (°C)	13.5	N/A	60

* ค่า Viscosity มีค่าแตกต่างกันขึ้นกับอุณหภูมิ



รูปที่ 1 แผนภาพการทดลอง

รูปที่ 1 แสดงอุปกรณ์ทดสอบ เครื่องยนต์ที่ใช้ทดสอบเป็นเครื่องยนต์ดีเซล Kubota รุ่น RT140 ซึ่งเป็นเครื่องยนต์ประเภทฉีดตรง (Direct Injection) ระบายความร้อนด้วยน้ำ มีขนาดกระบอกสูบและระยะชักเท่ากับ 97 x 96 มิลลิเมตร ตามลำดับ ระบบจ่ายเชื้อเพลิงประกอบด้วยปั๊มเชื้อเพลิงแรงดันสูงแบบ Port and Helix และหัวฉีดเชื้อเพลิงชนิด 4 รู (4-hole injector nozzle) ทั้งนี้ เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้เชื้อเพลิงเอทานอล เครื่องยนต์จึงได้รับการดัดแปลงเพื่อเพิ่มอัตราส่วนการอัด (Compression Ratio) จากมาตรฐานเป็น 23:1 ข้อมูลทางเทคนิคของเครื่องยนต์ทดสอบแสดงในตารางที่ 2

เครื่องยนต์ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลชนิด K (Type K Thermocouple) จำนวน 3 ชุด เชื่อมต่อเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูล (Data Logger) ยี่ห้อ Keyence รุ่น NR-TH08 เพื่อจัดเก็บข้อมูลอุณหภูมิของอากาศแวดล้อมเครื่องยนต์ น้ำหล่อเย็น และน้ำมันหล่อลื่น ใช้เครื่องบันทึกอุณหภูมิและสภาวะบรรยากาศ (Thermo Recorder) รุ่น TR-73U ในการตรวจวัดและบันทึกค่าอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความดันบรรยากาศ โดยทำการวัดรวมทั้งสิ้น 3 จุด ได้แก่ ภายในห้องควบคุมอุณหภูมิทั้งสองส่วน และภายนอกห้องควบคุมอุณหภูมิ การวัดตำแหน่งการยกตัวของเข็มหัวฉีดดำเนินการโดยใช้เซนเซอร์ตรวจจับการเคลื่อนที่ (Inductive Needle Lift Transducer) ร่วมกับอุปกรณ์ขยายสัญญาณ (Bridge Amplifier) ยี่ห้อ AVL รุ่น 3010A01 ติดตั้ง

เซนเซอร์วัดความดันชนิดเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Pressure Sensor) ยี่ห้อ Kistler รุ่น PiezoStar® Type 6052C เพื่อวัดค่าความดันภายในกระบอกสูบ ข้อมูลจากการยกตัวของเข็มหัวฉีดและความดันในกระบอกสูบ จะถูกรวบรวมและจัดเก็บผ่านระบบจัดเก็บข้อมูลสมรรถนะสูง (Data Acquisition System) ยี่ห้อ KiBox รุ่น Type 2893AK8

ตารางที่ 2 ข้อมูลทางเทคนิคของเครื่องยนต์ [12]

Engine model	Kubota RT140
Bore x Stroke (mm)	97 x 96
Displacement volume (cm ³)	709
Compression ratio (modified)	23:1
Injection pressure (bar)	210
Max. power (kW)/rpm	10.3 / 2,400
Max. torque (kg-m)/rpm	5.0 / 1,600

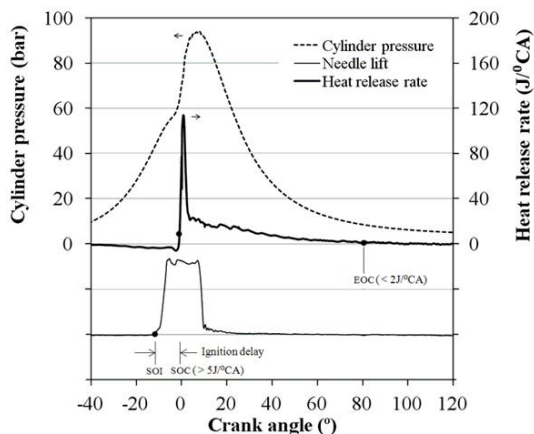
การทดลองดำเนินการในห้องควบคุมอุณหภูมิถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนด้วยม่านพลาสติก ภายในห้องควบคุมอุณหภูมิทั้งสองส่วนติดตั้งเครื่องปรับอากาศและควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิควบคุมขณะติดเครื่องยนต์

เนื่องจากเอทานอลมีความสามารถในการหล่อลื่นต่ำ ซึ่งส่งผลกระทบต่อความทนทานของปั๊มเชื้อเพลิงแรงดันสูง จึงมีการเติมกรดลอริก (Lauric Acid) ในสัดส่วนร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เพื่อทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มประสิทธิภาพการหล่อลื่น (Lubricity Additive) ให้แก่ชุดอุปกรณ์ฉีดจ่ายเชื้อเพลิง [13] หลังจากนั้นนำเอทานอลผสมกับโพลีเอทิลีนไกลคอลในอัตราส่วนที่ต้องการ เช่น เอทานอลผสมกับโพลีเอทิลีนไกลคอล 2% จะเรียกว่า PEG02

เครื่องยนต์และถังบรรจุเชื้อเพลิงจะถูกติดตั้งภายในห้องควบคุมสภาวะแวดล้อม (Environmental Chamber) เพื่อปรับอุณหภูมิให้อยู่ในสภาวะสมดุลที่ 25 ± 1 องศาเซลเซียส โดยกำหนดระยะเวลาในการ

รักษาอุณหภูมิ (Soaking period) อย่างน้อย 1 ชั่วโมง ก่อนเริ่มดำเนินการทดสอบการติดเครื่องยนต์ ในทุกชุด การทดลอง คั่นบังคับควบคุมความเร็วรอบเครื่องยนต์ จะถูกกำหนดไว้ที่ตำแหน่งภาระสูงสุด (Maximum Fuel Position) เพื่อควบคุมตัวแปรด้านการจ่าย เชื้อเพลิงให้คงที่ การเริ่มเดินเครื่องยนต์จะดำเนินการ ผ่านมอเตอร์สตาร์ท (Starter Motor) โดยกำหนด ระยะเวลาในการลากจูงเครื่องยนต์ (Cranking) เป็น เวลา 5 วินาทีต่อการทดสอบหนึ่งครั้ง กรณีที่เครื่องยนต์ สามารถจุดระเบิดและเริ่มทำงานได้ ระบบจะดำเนินการ บันทึกข้อมูลพารามิเตอร์ต่าง ๆ อย่างต่อเนื่อง ตั้งแต่วัฏ จักรการทำงานแรก (Cycle No. 1) จนกระทั่งครบวัฏ จักรที่ 200 (Cycle No. 200)

การทดสอบการแยกชั้นของเชื้อเพลิง ตัวอย่าง เชื้อเพลิงผสมถูกเก็บรักษาไว้ในสภาวะควบคุม ณ อุณหภูมิห้อง ในบริเวณที่ปราศจากแรงสั่นสะเทือนเป็น ระยะเวลา 3 เดือน จากการตรวจสอบลักษณะทาง กายภาพด้วยสายตา (Visual Inspection) ไม่พบการ แยกชั้นของเชื้อเพลิง (Phase Separation) หรือการ เปลี่ยนแปลงสีของตัวอย่างตลอดช่วงเวลาดังกล่าว



รูปที่ 2 ลักษณะความดันภายในกระบอกสูบ อัตราการ ปลดปล่อยความร้อนและสัญญาณการยกตัวของเข็ม หัวฉีดเชื้อเพลิง

รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดัน ภายในกระบอกสูบ (Cylinder Pressure) อัตราการ ปลดปล่อยความร้อน (Heat Release Rate: HRR) และ สัญญาณการยกตัวของเข็มหัวฉีด (Needle Lift Signal) ตำแหน่งเริ่มต้นการฉีดถูกระบุจากจุดบนกราฟสัญญาณ การยกตัวของเข็มหัวฉีด โดยใช้วิธีอนุพันธ์อันดับสอง (Second Derivative) เพื่อระบุจุดเริ่มต้นการยกตัวของ เข็มหัวฉีด

จุดเริ่มต้นการเผาไหม้ (SOC) กำหนดจาก ตำแหน่งที่มีอัตราการปลดปล่อยความร้อนสูงกว่า $5\text{ J}/^{\circ}\text{CA}$ จุดสิ้นสุดการเผาไหม้ (EOC) กำหนดจากตำแหน่ง ที่อัตราการปลดปล่อยความร้อนลดลงต่ำกว่า $2\text{ J}/^{\circ}\text{CA}$ ช่วงเวลาหน่วงการจุดระเบิด (ID) คำนวณจากผลต่าง ระหว่างตำแหน่งเริ่มต้นการเผาไหม้และตำแหน่งเริ่มต้น การฉีดเชื้อเพลิง (SOC - SOI) ระยะเวลาหน่วงการจุด ระเบิดเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการจัดลำดับเฟสของ การเผาไหม้ (Phasing of Combustion) โดยหาก ช่วงเวลาหน่วงมีค่ามาก จะส่งผลให้ระดับการผสม ล่วงหน้าของเชื้อเพลิงและอากาศ (Degree of Premixing) เพิ่มสูงขึ้น เมื่อเกิดการจุดระเบิดจะทำให้ อัตราการเพิ่มขึ้นของความดันในห้องเผาไหม้สูง (High Pressure Rise Rate) ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ เครื่องยนต์เกิดการสั่นสะเทือนและมีเสียงดัง [14]

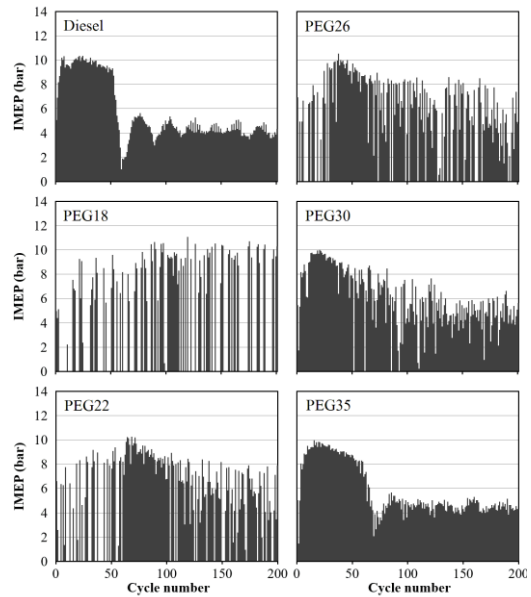
3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

ผลการทดสอบพบว่าการใช้เชื้อเพลิงเอทานอลที่มี ส่วนผสมของสารช่วยจุดระเบิด (PEG) ในสัดส่วนที่ต่ำกว่าร้อยละ 18 ส่งผลให้เครื่องยนต์ไม่สามารถ ดำเนินการจุดระเบิดได้ ด้วยเหตุนี้ PEG18 จึงถูก กำหนดให้เป็นค่าขีดจำกัดต่ำสุดของสัดส่วนสารช่วยจุด ระเบิดที่เพียงพอต่อการเริ่มเดินเครื่องยนต์ภายใต้สภาวะ การทดสอบดังกล่าว

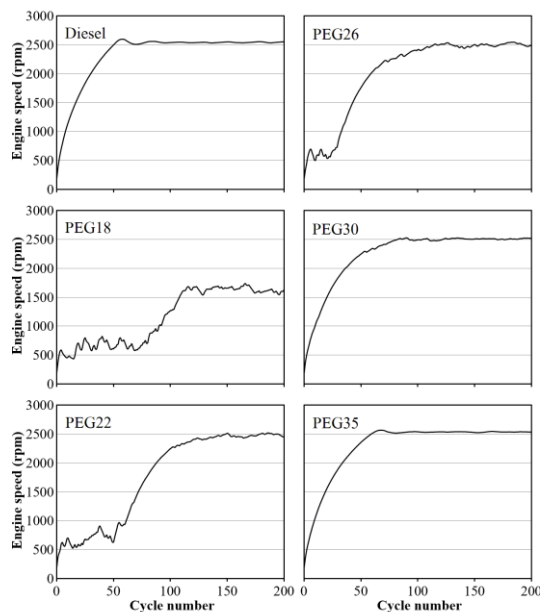
รูปที่ 3 จากการวิเคราะห์ค่าความดันเฉลี่ย ประสิทธิภาพในช่วง 200 วัฏจักรแรกของการใช้เชื้อเพลิง

ดีเซล พบพฤติกรรมการทำงานของเครื่องยนต์ที่สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ระยะหลักตามลักษณะการควบคุมความเร็วรอบ คือ วัฏจักรที่ 1 – 50 (Cycle No. 1 - Cycle No. 50) ช่วงเริ่มต้น ค่า IMEP มีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากเครื่องยนต์ยังมีความเร็วรอบต่ำ ส่งผลให้อุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบของเครื่องยนต์ (Governor) สั่งการเพิ่มปริมาณการฉีดจ่ายเชื้อเพลิงเพื่อเร่งความเร็วรอบให้เข้าสู่สภาวะการทำงาน วัฏจักรที่ 51 – 75 (Cycle No. 51 - Cycle No. 75) ระยะชะลอความเร็วรอบ เมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นจนใกล้ถึงค่าที่กำหนด อุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบจะปรับลดปริมาณการจ่ายเชื้อเพลิงลง เพื่อป้องกันไม่ให้ความเร็วรอบสูงเกินกำหนด (Overshoot) ส่งผลให้ค่า IMEP เริ่มมีแนวโน้มลดลง วัฏจักรที่ 76 – 200 (Cycle No. 76 - Cycle No. 200) ระยะความเร็วรอบคงที่ (Steady-state Operation) เป็นระยะที่อุปกรณ์ควบคุมสามารถรักษาระดับความเร็วรอบให้คงที่ตามสภาวะที่ตั้งไว้ตลอดการทำงาน

จากการพิจารณาค่าความดันเฉลี่ยประสิทธิผล (IMEP) ในช่วง 200 วัฏจักรแรก เชื้อเพลิงดีเซลแสดงค่า IMEP สูงกว่าเชื้อเพลิงกลุ่ม PEG อย่างมีนัยสำคัญ และไม่ปรากฏวัฏจักรที่ไม่เกิดการเผาไหม้ (Misfire Cycle) ตลอดช่วงการทดสอบทั้ง 200 วัฏจักร ซึ่งสะท้อนถึงเสถียรภาพในการจุดระเบิดที่สูงกว่า เมื่อมีการเพิ่มสัดส่วนความเข้มข้นของ PEG ส่งผลให้ค่า IMEP และความเร็วรอบเครื่องยนต์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามลำดับดังที่ปรากฏใน รูปที่ 4 เมื่อสัดส่วนสารช่วยจุดระเบิดเพิ่มขึ้นเกินกว่าร้อยละ 30 (PEG30) พบว่าค่า IMEP และความเร็วรอบเครื่องยนต์จะเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่และมีค่าใกล้เคียงกับสมรรถนะของเชื้อเพลิงดีเซล

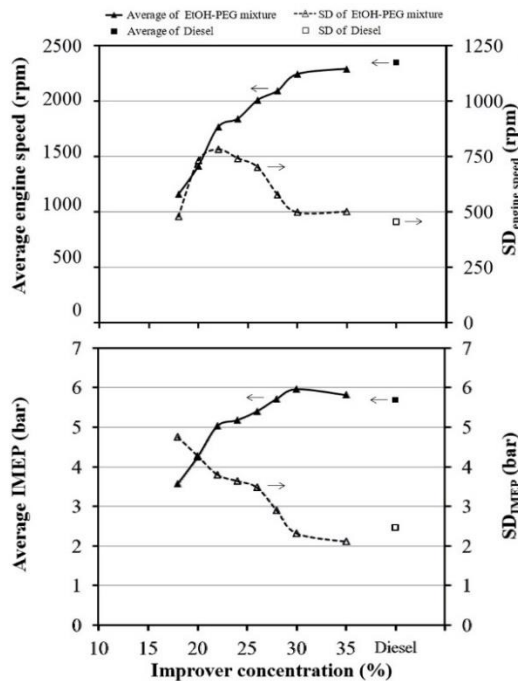


รูปที่ 3 ความดันเฉลี่ยประสิทธิผล (Indicated Mean Effective Pressure, IMEP) ช่วง 200 วัฏจักรแรก



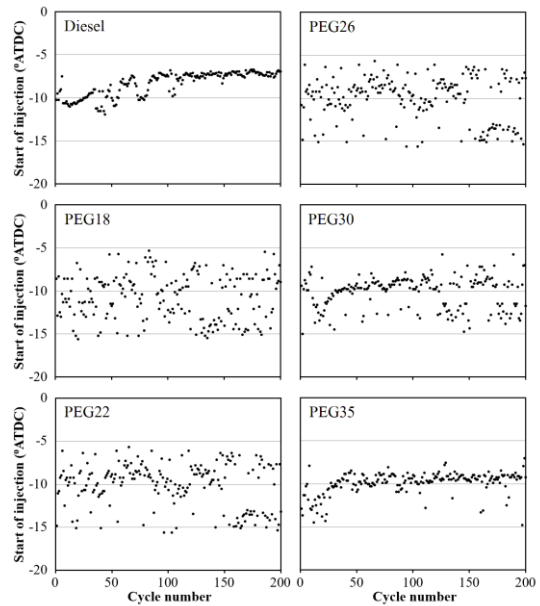
รูปที่ 4 ความเร็วรอบเครื่องยนต์ช่วง 200 วัฏจักรแรก

ผลการทดสอบความเร็วรอบเครื่องยนต์ในช่วง 200 วิวัจกรแรก เชื้อเพลิงดีเซลแสดงสมรรถนะการตอบสนองที่เสถียร โดยมีค่าความเร็วรอบเครื่องยนต์สูงสุดคงที่ที่ประมาณ 2,500 rpm ตลอดช่วงการทดสอบ



รูปที่ 5 ความเร็วรอบเครื่องยนต์และ IMEP เฉลี่ยในช่วง 200 วิวัจกรแรก

รูปที่ 5 แสดงการเพิ่มความเข้มข้นของสารช่วยจุดระเบิด ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยของความเร็วรอบและ IMEP มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยเมื่อสัดส่วนของสารช่วยจุดระเบิดสูงกว่าร้อยละ 30 สมรรถนะของเครื่องยนต์จะอยู่ในระดับที่เทียบเคียงได้กับการใช้เชื้อเพลิงดีเซล การเพิ่มสัดส่วน PEG ยังส่งผลโดยตรงต่อการลดค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: SD) ของทั้งความเร็วรอบและ IMEP ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสารช่วยจุดระเบิดไม่เพียงแต่ช่วยเพิ่มสมรรถนะในเชิงปริมาณเท่านั้น แต่ยังช่วยลดส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานและเพิ่มเสถียรภาพในการจุดระเบิดให้มากขึ้น



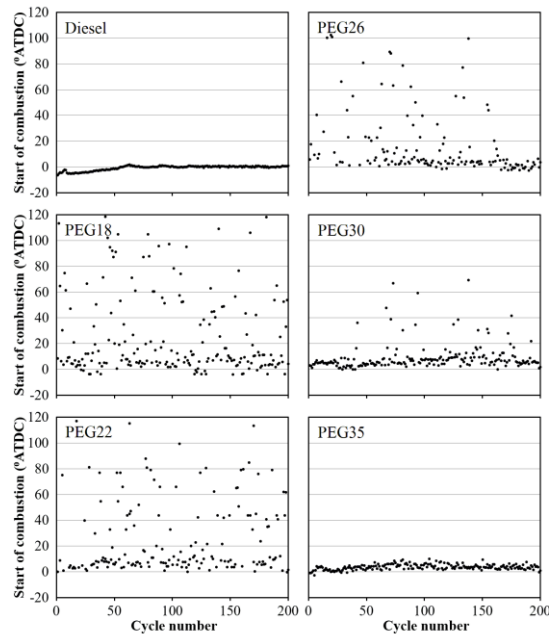
รูปที่ 6 ตำแหน่งเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิง (SOI)

รูปที่ 6 แสดงตำแหน่งเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิง (Start of Injection: SOI) ในช่วง 200 วิวัจกรแรก พบว่าตำแหน่งเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิงมีค่าอยู่ในช่วง -16 ถึง -5 ° ATDC ซึ่งแสดงถึงความแปรปรวนที่สูงกว่าเชื้อเพลิงดีเซลอย่างชัดเจน ความไม่คงที่ของจังหวะการฉีดดังกล่าวส่งผลกระทบต่อตำแหน่งเริ่มต้นการเผาไหม้ (Start of Combustion: SOC) ให้มีความแปรปรวนสูงขึ้นตามไปด้วย เมื่อสัดส่วนความเข้มข้นของสารช่วยจุดระเบิดเพิ่มขึ้น พบว่าความแปรปรวนของตำแหน่งเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิงมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งช่วยส่งเสริมให้กระบวนการฉีดจ่ายเชื้อเพลิงมีความคงที่มากยิ่งขึ้น

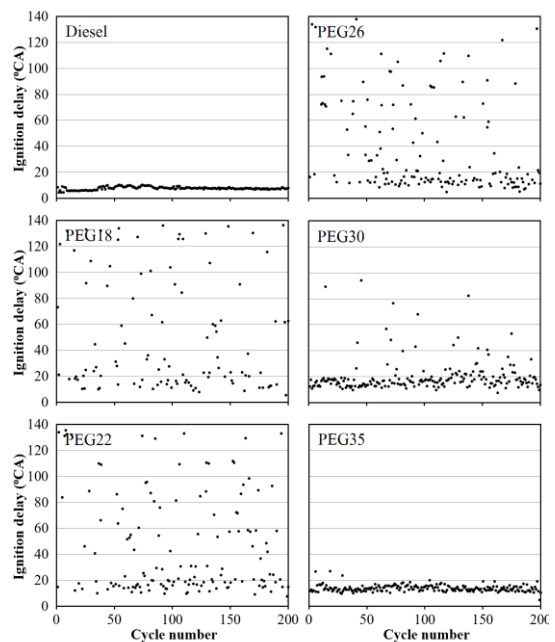
รูปที่ 7 แสดงตำแหน่งเริ่มต้นการเผาไหม้ (Start of Combustion: SOC) ในช่วง 200 วิวัจกรแรก ตำแหน่งเริ่มต้นการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงดีเซลปรากฏบริเวณใกล้ตำแหน่งศูนย์ตายบน (Top Dead Center: TDC) โดยมีส่วนค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในระดับที่ต่ำมาก ซึ่งบ่งชี้ถึงเสถียรภาพในการจุดระเบิดที่สมบูรณ์ เชื้อเพลิง PEG18 พบความแปรปรวนของตำแหน่ง

เริ่มต้นการเผาไหม้ในระดับสูง ซึ่งสะท้อนถึงความไม่แน่นอนของช่วงเวลาหน่วงการจุดระเบิด (Ignition Delay) และสภาวะการเผาไหม้ที่ไม่คงที่ในช่วงเริ่มเดินเครื่องยนต์ การเพิ่มความเข้มข้นของสารช่วยจุดระเบิดส่งผลโดยตรงต่อการลดค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตำแหน่งเริ่มต้นการเผาไหม้ โดยช่วยปรับปรุงคุณสมบัติการจุดระเบิดให้เข้าใกล้ตำแหน่งศูนย์ตายบนมากขึ้น ส่งผลให้กระบวนการเผาไหม้มีเสถียรภาพเทียบเคียงได้กับเชื้อเพลิงดีเซล

รูปที่ 8 แสดงช่วงเวลาหน่วงการจุดระเบิด (Ignition Delay) ในช่วง 200 วิวัจจักรแรก เชื้อเพลิงดีเซลแสดงค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของช่วงเวลาหน่วงการจุดระเบิดในระดับต่ำมาก ในขณะที่เชื้อเพลิง PEG18 พบความแปรปรวนในระดับสูงอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม เมื่อสัดส่วนความเข้มข้นของสารช่วยจุดระเบิดเพิ่มขึ้น ความแปรปรวนดังกล่าวมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อพิจารณาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของช่วงเวลาหน่วงการจุดระเบิด (Standard Deviation of Ignition Delay: SD_{ID}) พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.54° , 28.14° , 17.94° , 13.20° และ 5.36° สำหรับเชื้อเพลิงดีเซล, PEG18, PEG22, PEG26 และ PEG30 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการปรับปรุงเสถียรภาพการจุดระเบิดที่ชัดเจนตามปริมาณสารเติมแต่งที่เพิ่มขึ้น ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า เชื้อเพลิงเอทานอลที่มีสัดส่วนสารช่วยจุดระเบิดต่ำ จะส่งผลให้เกิดความไม่คงที่ (Instability) ในระดับสูง ทั้งในด้านตำแหน่งเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิง (SOI) ตำแหน่งเริ่มต้นการเผาไหม้ (SOC) และช่วงเวลาหน่วงการจุดระเบิด (Ignition Delay) อย่างไรก็ตาม การผสมสารช่วยจุดระเบิดในสัดส่วนตั้งแต่ร้อยละ 30 ขึ้นไปสามารถลดความเบี่ยงเบนทางวัจจักรดังกล่าวให้ลงมาอยู่ในระดับที่เทียบเคียงได้กับเชื้อเพลิงดีเซล



รูปที่ 7 ตำแหน่งเริ่มต้นการเผาไหม้ (SOC)

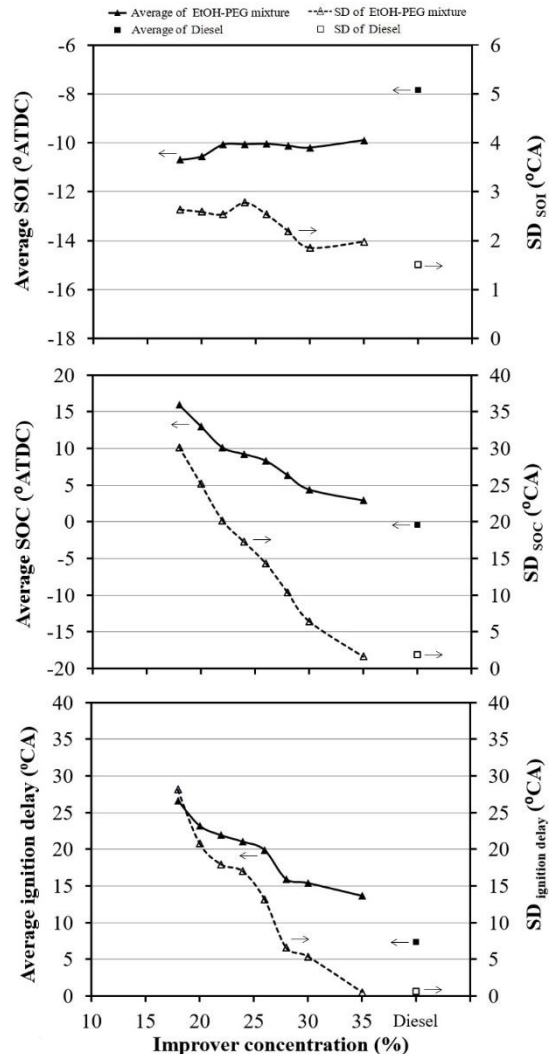


รูปที่ 8 ช่วงเวลาหน่วงการจุดระเบิด (ID)

รูปที่ 9 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยของตำแหน่งเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิง (SOI) ตำแหน่งเริ่มต้นการเผาไหม้ (SOC) และช่วงเวลาหน่วงการจุดระเบิด (Ignition Delay) ตลอด 200 วิวัจจักรแรก ตำแหน่งเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิงเฉลี่ยของเอทานอลผสมสารช่วยจุดระเบิดในทุกสัดส่วนความเข้มข้น ปรากฏอยู่ในช่วง -11 ถึง -10 °ATDC ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตำแหน่งเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิง (SD_{SOI}) มีค่าอยู่ในช่วง 1.85° ถึง 2.78°

ตำแหน่งเริ่มต้นการเผาไหม้ (SOC) ของเชื้อเพลิงเอทานอลผสมสารช่วยจุดระเบิดปรากฏอยู่ในช่วง 3 ถึง 16° ATDC ซึ่งแสดงถึงสภาวะการเผาไหม้ที่ล่าช้า (Delayed Combustion) อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซล ซึ่งมีตำแหน่งเริ่มต้นการเผาไหม้ใกล้จุดศูนย์ตายบน (TDC) การเพิ่มสัดส่วนความเข้มข้นของสารช่วยจุดระเบิดส่งผลให้จังหวะการเผาไหม้เกิดขึ้นเร็วขึ้น (Advanced Combustion) และส่งผลโดยตรงต่อการลดระยะเวลาหน่วงการจุดระเบิด (Ignition Delay) แม้จะมีการเพิ่มส่วนผสมของสารช่วยจุดระเบิดจนถึงระดับ PEG35 แต่ระยะเวลาหน่วงการจุดระเบิดยังคงอยู่ที่ 13° ซึ่งสูงกว่าเชื้อเพลิงดีเซลที่มีค่าเพียง 7° ความแตกต่างที่มีนัยสำคัญนี้ชี้ให้เห็นว่าลำพังการใช้สารเติมแต่งอาจยังไม่เพียงพอต่อการบรรลุสมรรถนะการเผาไหม้ที่เหมาะสมที่สุด

เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้เชื้อเพลิงเอทานอลในเครื่องยนต์ดีเซล การศึกษาในระยะต่อไปควรประยุกต์ใช้กลยุทธ์อื่นร่วมด้วย อาทิ การอุ่นไอดีหรือห้องเผาไหม้ (Combustion Chamber Pre-heating) และการปรับเพิ่มอัตราส่วนการอัด (Increasing Compression Ratio) เพื่อลดระยะเวลาหน่วงการจุดระเบิดและยกระดับสมรรถนะการเริ่มเดินเครื่องยนต์ให้ทัดเทียมกับเชื้อเพลิงดีเซล



รูปที่ 9 ค่าเฉลี่ยของตำแหน่งเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิง ตำแหน่งเริ่มต้นการเผาไหม้และช่วงเวลาหน่วงการจุดระเบิด

4. สรุป

สัดส่วนของสารช่วยจุดระเบิด (Ignition Improver) ขั้นต่ำที่สามารถติดเครื่องยนต์ได้ คือร้อยละ 18 ทั้งนี้ เมื่อเพิ่มสัดส่วนความเข้มข้นจนสูงกว่าร้อยละ 30 พบว่าค่าเฉลี่ยของความเร็วรอบและค่าความดันเฉลี่ยประสิทธิภาพ (IMEP) จะมีระดับสมรรถนะที่เทียบเคียงได้กับเชื้อเพลิงดีเซล

ตำแหน่งเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิง (SOI) ของทุกสภาวะการทดสอบปรากฏอยู่ในช่วง -11 ถึง -10 °ATDC ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตำแหน่งการฉีดมีความคงที่และเป็นอิสระต่อความเข้มข้นของสารช่วยจุดระเบิด

ตำแหน่งเริ่มต้นการเผาไหม้ (SOC) ของเชื้อเพลิงเอทานอลผสมสารช่วยจุดระเบิดอยู่ในช่วง 3 ถึง 16 °ATDC ซึ่งบ่งชี้ถึงสภาวะการเผาไหม้ที่ล่าช้า (Delayed Combustion) เมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซล อย่างไรก็ตาม การเพิ่มสัดส่วนสารช่วยจุดระเบิดส่งผลโดยตรงต่อการเร่งจังหวะการเผาไหม้ให้เร็วขึ้น (Advanced Combustion) ซึ่งช่วยลดระยะเวลาหน่วงการจุดระเบิด (Ignition Delay) ได้อย่างมีนัยสำคัญ

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] R. A. Stein, J. E. Anderson, and T. J. Wallington, "An overview of the effects of ethanol-gasoline blends on SI engine performance, fuel efficiency, and emissions," *SAE International Journal of Engines*, vol. 6, no. 1, pp. 470-487, Apr. 2013.
- [2] E. E. Eugene, R. L. Bechtold, T. J. Timbario, and P. W. McCallum, "State-of-the-art report on the use of alcohols in diesel engines," *SAE Technical Paper*, pp. 684-702, 1984.
- [3] A. J. Schaefer and H. O. Hardenberg, "Ignition improvers for ethanol fuels," *SAE Technical Paper*, pp. 1107-1118, 1981.
- [4] H. Simonsen and J. Chomiak, "Testing and evaluation of ignition improvers for ethanol in a DI diesel engine," *SAE transactions, Journal of Fuels & Lubricants*, pp. 1861-1872, 1995.
- [5] R. Munsin, Y. Laonual, S. Jugjai, M. Matsuki, and H. Kosaka, "Investigation of effects of ignition improvers on ignition delay time of ethanol combustion with rapid compression and expansion machine," *SAE Technical Paper*, no. 2012-01-0854, 2012.
- [6] K. Iempremjit, "Combustion Characteristics of Ethanol with Ignition Improver in a Small Diesel Engine during Start-up," *Princess of Naradhiwas University Journal*, vol. 13 no. 1, pp. 226-243, 2021.
- [7] K. Iempremjit, "Effect of Biodiesel-ethanol Fuel Blends on Performance and Combustion Characteristics in a Small Diesel Engine during Start of Engine", *Engineering and Technology Horizons*, vol. 38, no. 3, pp. 24-32, 2021.
- [8] F. Z. Sánchez, C. V. Braga, S. L. Braga, F. G. Dias, F. Y. Turkovics, M. L. Airolidi, and R. N. De Souza, "Experimental study of combustion for mixtures of ethanol and ignition improvers in a rapid compression machine," *SAE Technical Paper*, no. 2015-36-0090, 2015.
- [9] F. Z. Sánchez, A. R. de Aguiar Martins, C. V. Braga, S. L. Braga, F. Y. Turkovics, and R. N. Pradelle, "Study of effects of ignition improvers on ethanol compression ignition in the rapid compression machine," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 42 no. 9, pp. 494, 2020.

- [10] E. Olsson, S. Hiljemark, and S. Gjirja, "Use of alternative fuels in heavy duty engines," in *Proceedings of the Twenty sixth Joint Meeting of The Scandinavian-Nordic and Italian Sections of The Combustion Institute*, Göteborg, Sweden, 2003. pp. 18-21.
- [11] S. Lee, T. Y. Kim, and K. Y. Kang, "A feasibility study of using pyrolysis oil/butanol blended fuel in a DI diesel engine," *SAE Technical Paper* no. 2015-24-2437, 2015.
- [12] Siam Kubota Corporation Co., Ltd., "Specification: KUBOTA Diesel Engine," [Online]. Available: https://www.siamkubota.co.th/diesel-engine/distribution/public/frontend/assets/file/AWCatalogueNC-DE_eng_c-min.pdf. [Accessed: Aug. 7, 2024].
- [13] A. S. Bika, L. M. Franklin, and D. B. Kittelson, "Hydrogen as a combustion modifier of ethanol in compression ignition engines," *SAE Technical Paper* no. 2009-01-2814, 2009.
- [14] J. B. Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamentals*, 2nd ed. New York: McGraw Hill, 2018.