



คุณลักษณะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเอทานอลกับสารช่วยจุดระเบิด ในเครื่องยนต์ดีเซลเล็กช่วงเวลาเริ่มติดเครื่องยนต์

Combustion Characteristics of Ethanol with Ignition Improver in a Small Diesel Engine during Start-up

กิตติ เอี่ยมเปรมจิต^{1*}

Kitti Iempremjit^{1*}

(Received: March 20, 2020; Revised: July 23, 2020; Accepted: October 22, 2020)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณลักษณะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเอทานอลกับสารช่วยจุดระเบิด (glycerol ethoxylate, GE) ในช่วงเวลาติดเครื่องยนต์ การทดสอบเบื้องต้น ใช้ Glycerol ethoxylate เป็นสารช่วยจุดระเบิด ในปริมาณ 2 - 35% ผสมกับเอทานอลเป็นเชื้อเพลิงทดสอบในเครื่องยนต์ดีเซลเล็ก อัตราส่วนการอัด (compression ratio) 18:1 ผลการทดสอบพบว่า เชื้อเพลิงเอทานอลผสมสารช่วยจุดระเบิดทุกอัตราส่วนไม่สามารถติดเครื่องยนต์ได้ที่อุณหภูมิห้อง สาเหตุจากอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ในจังหวะอัดตัว (compression stroke) มีค่าไม่สูงพอที่จะทำให้เชื้อเพลิงเอทานอลเกิดการจุดระเบิดด้วยตัวเองได้ (auto-ignition) เครื่องยนต์ดีเซลเล็กจึงได้ถูกดัดแปลงให้มีอัตราส่วนการอัดเพิ่มขึ้นเป็น 23:1 และทำการทดสอบในห้องควบคุมอุณหภูมิ ผลการทดลองพบว่า สัดส่วนค่าที่สุดของสารช่วยจุดระเบิดซึ่งสามารถติดเครื่องยนต์ดีเซลได้คือ 13% การวิเคราะห์คุณลักษณะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเอทานอลกับสารช่วยจุดระเบิดด้วยการวิเคราะห์ข้อมูลความดันภายในกระบอกสูบ พบว่าเมื่อปริมาณสารช่วยจุดระเบิดสูงกว่า 24% ความดันเฉลี่ยประสิทธิภาพ (indicated mean effective pressure, IMEP) มีค่าแตกต่างกับเชื้อเพลิงดีเซล 2.5 - 3% ตำแหน่งการเริ่มฉีดเชื้อเพลิง (start of injection, SOI) มีค่าแตกต่างกับเชื้อเพลิงดีเซล 3.0 - 3.8° ตำแหน่งเริ่มต้นการเผาไหม้ (start of combustion, SOC) มีค่าแตกต่างกับเชื้อเพลิงดีเซล 3.4 - 8.8° ช่วงเวลาหน่วงการเผาไหม้ (ignition delay, ID) และจำนวนวัฏจักรที่ไม่เกิดการเผาไหม้ (misfire cycles) จะลดลงเมื่อเพิ่มสัดส่วนการผสมของสารช่วยจุดระเบิด

¹วิทยาลัยเทคโนโลยีและสหวิทยาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

¹College of Integrated Science and Technology, Rajamangala University of Technology Lanna

*Corresponding: kitthi@hotmail.com



และเมื่อเพิ่มสัดส่วนของสารช่วยจุดระเบิดถึง 28% จะทำให้จำนวนวัฏจักรที่ไม่เกิดการเผาไหม้ลดลงจนเทียบเท่ากับการใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง

คำสำคัญ: คุณลักษณะการเผาไหม้ เอทานอล สารช่วยจุดระเบิด เครื่องยนต์ดีเซล

Abstract

This work aimed to study the combustion characteristics of ethanol with ignition improver, glycerol ethoxylate (GE) during start-up condition. Preliminary test performed in a diesel engine with a compression ratio of 18 and varying concentrations of GE from 2-35%. Results showed the ethanol blended with ignition improver concentration from 2-35% unable to start the engine. The modified diesel engine with a compression ratio of 23 was tested under controlled room conditions with varying concentrations of GE. The results showed the ethanol blended with minimum ignition improver concentration for starting the engine was 13%. Effects of improver concentration on combustion characteristics during start-up conditions were analyzed by measuring the in-cylinder pressure. Results showed that there were fewer variations of the start of injection (SOI) and start of combustion (SOC) when the concentration of ignition improvers more than 24%. The differences with diesel were 2.5-3%, 3.0-3.8° and 3.4-8.8° for IMEP, SOI and SOC, respectively. The increased concentrations of ignition improvers reduced ignition delay (ID) and the number of misfire cycles in the engine during start-up period. Ethanol with 28% GE was the minimal amounts of ignition improver required to meet almost zero misfire cycles as in the diesel case.

Keywords: Combustion Characteristics, Ethanol, Ignition improver, CI engine

บทนำ

ปัจจุบันเอทานอลถูกจัดเป็นเชื้อเพลิงทดแทนในเครื่องยนต์ดีเซลกำลัง เนื่องจากเอทานอลสามารถผลิตได้จากผลผลิตทางการเกษตร เช่น อ้อย มันสำปะหลัง การใช้เอทานอลเป็นเชื้อเพลิงในยานพาหนะจะช่วยลดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศลงได้ด้วยกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชซึ่งเป็นผลผลิตทางการเกษตร โดยทั่วไปเอทานอลถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงด้วยการนำไปผสมกับแก๊สโซลีนเป็นเชื้อเพลิงที่เรียกว่าแก๊สโซฮอล (Koç, Sekmen, Topgül, & Yücesu, 2009) การใช้เอทานอลเป็นเชื้อเพลิงทดแทนในเครื่องยนต์ดีเซลจะเป็นวิธีการเพิ่มอัตราการใช้เอทานอลเป็นเชื้อเพลิงในอนาคต



การใช้เอทานอลเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลมีหลายวิธี เช่น การผสมเอทานอลลงในน้ำมันดีเซล ซึ่งช่วยลดมลพิษ particulate matter (PM) และ nitrogen oxides (NO_x) จากการเผาไหม้ (Ishida, Yamamoto, Ueki, & Sakaguchi, 2010) การฉีดเชื้อเพลิงคู่ (Tutak, 2014) การจ่ายเอทานอลทางท่อร่วมไอดี (Abu-Qudais, Haddad, & Qudaisat, 2000) การใช้หัวเทียนช่วยจุดระเบิด (Enright, Borman, & Myers, 1988) การใช้หัวเผาช่วยจุดระเบิด (Mueller & Musculus, 2001) การใช้สารช่วยจุดระเบิด (Ecklund, Bechtold, Timbario, & McCallum, 1984)

เนื่องจากเอทานอลมีค่าซีเทนต่ำมาก ซึ่งสร้างปัญหาต่อการนำเอทานอลไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซล การเติมสารช่วยจุดระเบิดจะทำให้เชื้อเพลิงเอทานอลมีค่าซีเทนสูงขึ้นและสามารถเผาไหม้ได้ในเครื่องยนต์ดีเซล การวิจัยสารช่วยจุดระเบิดซึ่งเป็นสารประกอบไนเตรท (nitrates-based ignition improvers) ผสมกับเอทานอลเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดียว อัตราส่วนการอัด 17:1 พบว่าสารช่วยจุดระเบิดจำนวน 3 ชนิด คือ isoamyl nitrate, triethylene glycol dinitrate (TEGDN) และ triethyl ammonium nitrate (Kerobrisol BRA) เป็นสารช่วยจุดระเบิดที่มีประสิทธิภาพสูงและผ่านเกณฑ์ประเมินด้านความปลอดภัย การกัดกร่อน เศรษฐศาสตร์และการผลิต (Schaefer & Hardenberg, 1981) อย่างไรก็ตาม การใช้สารช่วยจุดระเบิดซึ่งเป็นสารประกอบไนเตรทจะทำให้มลพิษไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) มีค่าสูงกว่าสารช่วยจุดระเบิดซึ่งไม่เป็นสารประกอบไนเตรท (Non-nitrogen species ignition improvers) นอกจากนี้ สารช่วยจุดระเบิดซึ่งเป็นสารประกอบไนเตรทยังมีการกัดกร่อนและมีโอกาสระเบิดได้สูงกว่า (Simonsen & Chomiak, 1995)

การทดสอบสารช่วยจุดระเบิดในเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดียว อัตราส่วนการอัด 16.9:1 โดยใช้ nitrate ester (Avocet), isopropyl nitrate และ polyethylene glycol (Beraid) เป็นสารช่วยจุดระเบิด เพื่อศึกษาคุณสมบัติการจุดระเบิดของสารแต่ละตัว สารช่วยจุดระเบิดถูกผสมกับเอทานอลในสัดส่วน 2 - 7% ผลการวิเคราะห์ช่วงเวลาหน่วงการจุดระเบิด (ignition delay) พบว่า nitrate ester 4% มีช่วงเวลาหน่วงการจุดระเบิดสั้นที่สุด (Simonsen & Chomlak, 1995)

การศึกษาคูณลักษณะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเอทานอลกับสารช่วยจุดระเบิดด้วยเครื่องยนต์จำลอง rapid compression and expansion machine (RCEM) โดยใช้ glycerol ethoxylate และ ED95 เป็นสารช่วยจุดระเบิด ทั้งนี้ ED95 ประกอบด้วยสารช่วยจุดระเบิด 5% สารป้องกันการกัดกร่อนและสารหล่อลื่น ผลิตโดยบริษัท Sekab ซึ่งใช้ผสมกับเอทานอลเพื่อเป็นเชื้อเพลิงให้กับรถบรรทุกคันส่ง Scania ในประเทศสวีเดน ผลการทดลองพบว่า ED95 และเอทานอลผสม Glycerol ethoxylate 5% มีอัตราการเพิ่มความดัน (pressure rise rate) และอัตราการปลดปล่อยความร้อน (heat release rate) ที่ใกล้เคียงกัน (Munsin, Laoonual, Jugjai, Matsuki, & Kosaka, 2012)



งานวิจัยที่ผ่านมา สารช่วยจุดระเบิด Glycerol ethoxylate มีประสิทธิภาพในการช่วยจุดระเบิดสูง และเป็นสารช่วยจุดระเบิดซึ่งไม่เป็นสารประกอบไนโตรเจน แต่งานวิจัยของสารช่วยจุดระเบิดชนิดนี้ในเครื่องยนต์ดีเซลยังมีจำนวนน้อยมาก งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาคุณลักษณะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเอทานอลกับสารช่วยจุดระเบิด Glycerol ethoxylate ในเครื่องยนต์ดีเซลเล็กช่วงเวลาเริ่มติดเครื่องยนต์

การทดสอบการติดเครื่องยนต์เบื้องต้น ใช้ Glycerol ethoxylate เป็นสารช่วยจุดระเบิด ในปริมาณ 2 - 35% ผสมกับเอทานอลเป็นเชื้อเพลิงทดสอบในเครื่องยนต์ดีเซลเล็ก อัตราส่วนการอัด 18:1 ผลการทดสอบ เชื้อเพลิงเอทานอลผสมสารช่วยจุดระเบิดทุกอัตราส่วนไม่สามารถติดเครื่องยนต์ได้ที่อุณหภูมิห้อง ในเบื้องต้นคาดว่าสาเหตุเกิดจากอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ในจังหวะอัดตัว (compression stroke) มีค่าไม่สูงพอที่จะทำให้เชื้อเพลิงเอทานอลเกิดการจุดระเบิดด้วยตัวเองได้ (auto-ignition) จึงได้เลือกวิธีแก้ปัญหาด้วยการเพิ่มอัตราส่วนการอัดเพื่อเพิ่มอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ให้สูงกว่าอุณหภูมิจุดระเบิดด้วยตัวเอง (auto-ignition temperature) ของเอทานอลที่อุณหภูมิ 638K (Labeckas, Slavinskis, & Mažeika, 2014) การคำนวณอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ตามกระบวนการอัดอากาศแบบไอเซนโทรปิก

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^\gamma$$

เมื่อให้ $\gamma = 1.25$ (Heywood, 1988) พบว่าต้องเพิ่มอัตราส่วนการอัดของเครื่องยนต์เป็น 23:1 จึงจะแก้ปัญหาข้างต้นได้

อย่างไรก็ตาม การเผาไหม้ของเอทานอลในเครื่องยนต์ดีเซลที่ได้เพิ่มอัตราส่วนการอัดแล้วนั้น การเผาไหม้อาจมีช่วงเวลาหน่วงการจุดระเบิด (ignition delay) ที่ยาวนาน ส่งผลให้เครื่องยนต์ไม่มีกำลังการใช้ Glycerol ethoxylate เป็นสารช่วยจุดระเบิดจึงยังมีความจำเป็นเพื่อลดช่วงเวลาหน่วงการจุดระเบิดลง

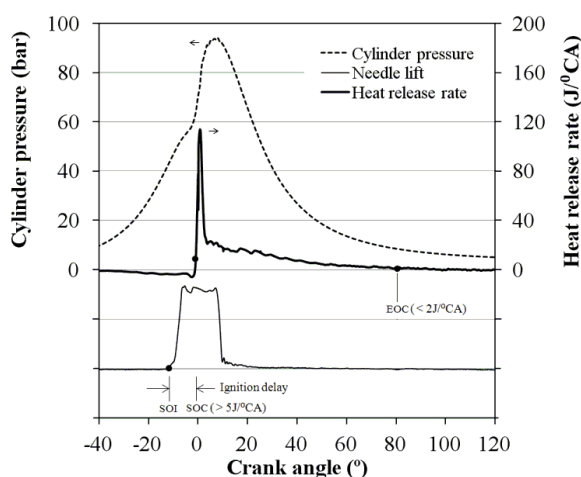
วัตถุประสงค์

1. ศึกษาประสิทธิภาพ (IMEP, indicated power) ของ glycerol ethoxylate เมื่อใช้เป็นสารช่วยจุดระเบิดเชื้อเพลิงเอทานอลในเครื่องยนต์ดีเซลเล็ก เปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซล
2. ศึกษาคุณลักษณะการเผาไหม้ (COV_{IMEP} , SOI, SOC, ID) ของเชื้อเพลิงเอทานอลกับสารช่วยจุดระเบิดด้วยการวิเคราะห์ข้อมูลความดันภายในกระบอกสูบ



วิธีการวิจัย

ภาพที่ 1 แสดงกราฟความดันภายในกระบอกสูบ (cylinder pressure) อัตราการปลดปล่อยความร้อน (heat release rate) และสัญญาณการยกตัวของเข็มหัวฉีด (needle lift signal) ตำแหน่งเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิง (Start of injection, SOI) ถูกระบุด้วยจุดบนกราฟสัญญาณการยกตัวของเข็มหัวฉีด จุดเริ่มต้นการยกตัวของเข็มหัวฉีดกำหนดด้วยวิธีอนุพันธ์อันดับสอง (second derivative of the needle lift signal) ตำแหน่งการฉีดเชื้อเพลิง (injection timing) ซึ่งปรับตั้งจากโรงงานผู้ผลิตมีค่า 18° BTDC แต่ตำแหน่งการฉีดเชื้อเพลิงในภาพที่ 1 มีค่าประมาณ 10° BTDC เนื่องจากกระบวนการสร้างความดันเชื้อเพลิงภายในระบบจ่ายเชื้อเพลิงแรงดันสูง (pressure built-up in the injection system) ส่งผลให้เกิดความล่าช้าในการฉีดเชื้อเพลิงเข้าไปในห้องเผาไหม้ (Caresana, 2011) ตำแหน่งเริ่มต้นการเผาไหม้ (start of combustion, SOC) ถูกระบุด้วยจุดบนกราฟอัตราการปลดปล่อยความร้อน จุดเริ่มต้นการเผาไหม้กำหนดด้วยจุดที่มีอัตราการปลดปล่อยความร้อนมากกว่า $5 \text{ J}/^\circ\text{CA}$ ตำแหน่งสิ้นสุดการเผาไหม้ (end of combustion, EOC) ถูกระบุด้วยจุดบนกราฟอัตราการปลดปล่อยความร้อน จุดสิ้นสุดการเผาไหม้กำหนดด้วยจุดที่มีอัตราการปลดปล่อยความร้อนน้อยกว่า $2 \text{ J}/^\circ\text{CA}$ ช่วงเวลาหน่วงการจุดระเบิด (ignition delay, ID) กำหนดด้วยความแตกต่างของตำแหน่งเริ่มต้นการเผาไหม้กับตำแหน่งเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิง (SOC-SOI) ช่วงเวลาหน่วงการจุดระเบิดส่งผลต่อการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง (phasing of combustion) หากช่วงเวลาหน่วงการจุดระเบิดมีค่ามากจะส่งผลให้ระดับพรีมิกซ์ (degree of premixing of fuel and air) มีค่าสูง เมื่อเกิดการเผาไหม้จะมีอัตราเพิ่มความดันในห้องเผาไหม้สูง (high pressure rise rates) ส่งผลให้เครื่องยนต์เกิดการสั่นและมีเสียงดัง (Heywood, 1988)



ภาพที่ 1 ลักษณะความดันภายในกระบอกสูบ อัตราการปลดปล่อยความร้อนและสัญญาณการยกตัวของเข็มหัวฉีดเชื้อเพลิง กรณีใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง



ความดันเฉลี่ยประสิทธิผล (indicated mean effective pressure, IMEP) คืออัตราส่วนระหว่างงาน (indicated work, W_i) กับปริมาตรคูดของเครื่องยนต์ (V) ในหนึ่งวัฏจักรตามสมการ

$$IMEP = \frac{W_i}{V}$$

สัมประสิทธิ์ของการแปรผัน (coefficient of variation, COV) คืออัตราส่วนระหว่างส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) กับค่าเฉลี่ยเลขคณิตของข้อมูล สัมประสิทธิ์ของการแปรผันของความดันเฉลี่ยประสิทธิผล (COV_{IMEP}) มักใช้เพื่ออธิบายระดับความแปรปรวนของการเผาไหม้ในแต่ละวัฏจักร (cycle-to-cycle variations) ตามสมการ

$$COV_{IMEP} = \frac{SD_{IMEP}}{IMEP} \cdot 100\%$$

หากสัมประสิทธิ์ของการแปรผันดังกล่าวมีค่าสูง จะส่งผลให้กำลังเครื่องยนต์ต่ำลงและเกิดมลพิษสูง (Yasin, Mamat, Abdullah, Abdullah, & Wyszynski, 2013; Yassine, Tagomori, Henein, & Bryzik, 1996)

การศึกษาคุณลักษณะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเอทานอลกับสารช่วยจุดระเบิดในเครื่องยนต์ดีเซลเล็ก ใช้ glycerol ethoxylate (GE) เป็นสารช่วยจุดระเบิดผสมกับเอทานอลในอัตราส่วน 1-35% การทดลองนี้จะวิเคราะห์การเผาไหม้ของเอทานอลที่ผสมกับสารช่วยจุดระเบิดในแต่ละอัตราส่วน และนำไปเปรียบเทียบกับ การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงดีเซล คุณสมบัติของเชื้อเพลิงแสดงในตารางที่ 1

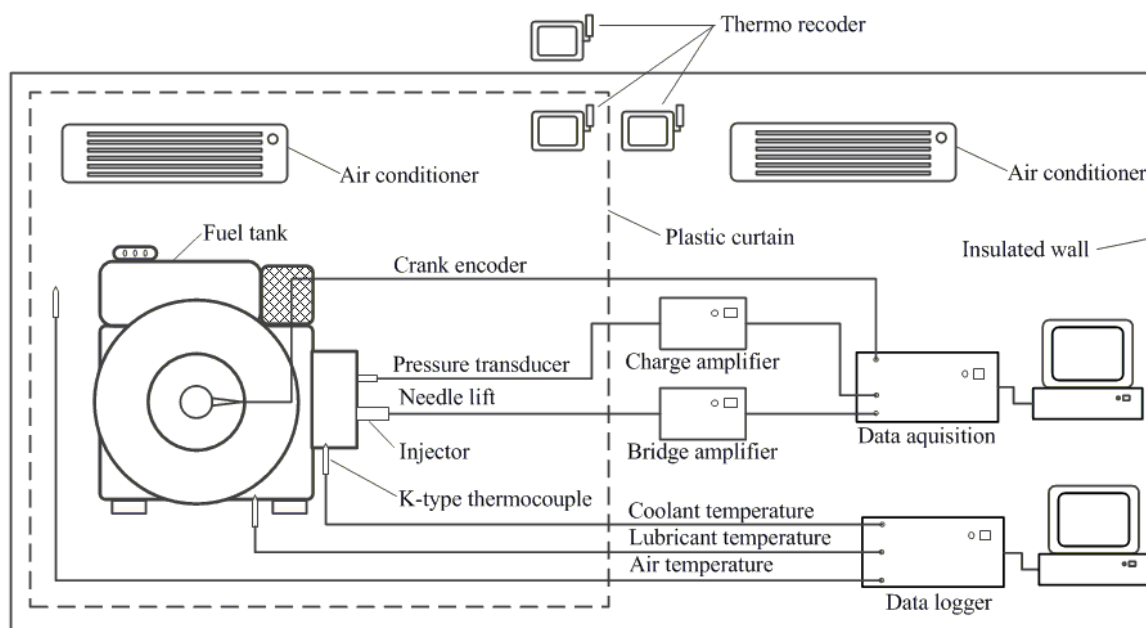
ตารางที่ 1 คุณสมบัติของเชื้อเพลิง

Properties	Ethanol	Glycerol	Diesel
Viscosity (cP)	1.19 @20°C	364.20 @20°C	4.35 @20°C
Density (g/cc)	0.785	1.138	0.832
LHV (MJ/kg)	26.80	45.26	42.8
Cetane number	< 5	n.a.	55
Flash point (°C)	13.5	n.a.	60
Boiling temperature(°C)	78	200	163



เอทานอลที่ใช้ในการทดลองเป็นเอทานอลความเข้มข้น 95% และมีน้ำเจือปนประมาณ 5% ก่อนนำมาผสมกับสารช่วยจุดระเบิดจะเดิม lauric acid ลงในเอทานอล 1% เพื่อเป็นสารหล่อลื่น (Bika, Franklin, & Kittelson, 2009) หลังจากนั้นนำเอทานอลผสมกับ glycerol ethoxylate (GE) ในอัตราส่วนที่ต้องการ เช่น เอทานอลผสมกับ glycerol ethoxylate 1% จะเรียกว่า GE01 ภาพที่ 2 แสดงอุปกรณ์ทดลอง เครื่องยนต์ทดลองเป็นเครื่องยนต์ดีเซลเล็กสูบเดียว ป้อนเชื้อเพลิงแรงดันสูงแบบ in-line หัวฉีด 4 รู เครื่องยนต์ทดสอบถูกติดตั้งภายในห้องควบคุมอุณหภูมิซึ่งได้ถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนด้วยม่านพลาสติก ห้องควบคุมอุณหภูมิทั้งสองส่วนติดตั้งเครื่องปรับอากาศและควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิควบคุมขณะติดเครื่องยนต์ อากาศภายในห้องจะถูกเครื่องยนต์ดูดเข้าทางท่อไอเสียขณะติดเครื่องยนต์ ข้อมูลทางเทคนิคของเครื่องยนต์ทดสอบแสดงในตารางที่ 2

อุณหภูมิเครื่องยนต์และอุณหภูมิอากาศส่งผลต่อการเผาไหม้ภายในเครื่องยนต์ จึงจำเป็นต้องมีการควบคุมอุณหภูมิดังกล่าวให้เท่ากันทุกครั้งก่อนการทดสอบ กำหนดไว้ที่ 25 องศาเซลเซียส (standard room temperature)



ภาพที่ 2 แผนภาพการทดลอง

อุปกรณ์ตรวจจับการเคลื่อนที่เข็มหัวฉีด (inductive needle lift transducer) และอุปกรณ์แปลงสัญญาณ (bridge amplifier, AVL 3010A01) ใช้สำหรับวัดตำแหน่งการยกของเข็มหัวฉีด อุปกรณ์วัดความดันในกระบอกสูบ (Kistler, PiezoStar® type 6052C) ใช้สำหรับวัดความดันภายในกระบอกสูบ ทั้งสองข้อมูลนี้จะถูกเก็บในเครื่องบันทึกข้อมูล (data acquisition, KiBox type 2893AK8) เทอร์โมคัปเปิล



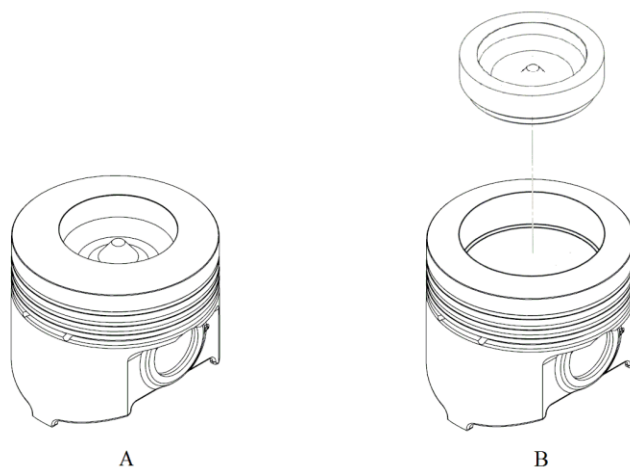
ชนิด K จำนวน 3 ตัว ใช้วัดอุณหภูมิอากาศรอบเครื่องยนต์ น้ำหล่อเย็นและน้ำมันหล่อลื่น เครื่องมือบันทึกอุณหภูมิอากาศ (thermo recorder TR-73U) ใช้สำหรับบันทึกอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์และความดันบรรยากาศจำนวน 3 จุด คือ ภายในห้องควบคุมอุณหภูมิทั้งสองส่วน และภายนอกห้องควบคุมอุณหภูมิ

ตารางที่ 2 ข้อมูลทางเทคนิคของเครื่องยนต์ทดสอบ

Engine maker and model	Kubota RT140
Engine type	DI diesel engine with in-line pump
Cooling system	Water cooling
Bore x Stroke (mm)	97 x 96
Displacement volume (cm ³)	709
Injection pressure (bar)	210
Injection timing (°ATDC)	-18
Max. power (kW)/rpm	10.3 / 2,400
Max. torque (kg-m)/rpm	5.0 / 1,600
Compression ratio	23:1 (Modified)

เครื่องยนต์และถังเชื้อเพลิงถูกแช่ในห้องควบคุมอุณหภูมิจนกระทั่งอุณหภูมิห้อง น้ำหล่อเย็นและน้ำมันหล่อลื่นอยู่ในช่วง $25 \pm 1^{\circ}\text{C}$ อย่างน้อย 1 ชั่วโมง ก่อนทำการทดลองติดเครื่องยนต์ คั่นควบคุมความเร็วรอบของเครื่องยนต์ตั้งไว้ที่ตำแหน่งสูงสุดทุกการทดลอง เครื่องยนต์ถูกติดเครื่องยนต์ด้วยมอเตอร์สตาร์ทเป็นเวลา 5 วินาทีเพียงครั้งเดียว บันทึกข้อมูลทั้งหมดตั้งแต่วัฏจักรแรกจนถึงวัฏจักรที่ 200 (0-200 cycles)

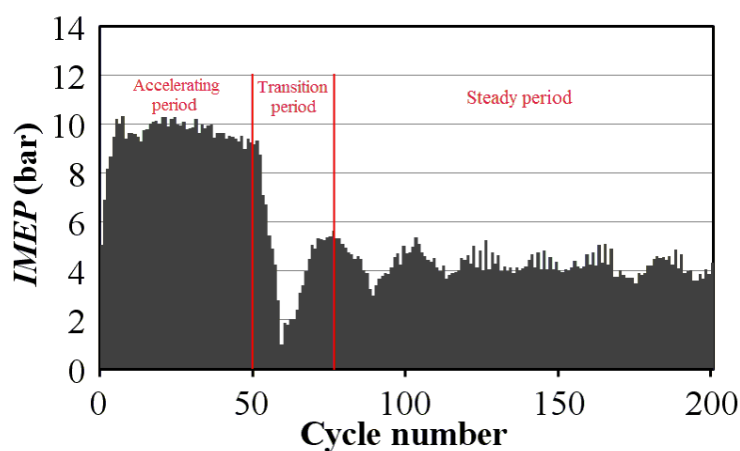
ภาพที่ 3 แสดงการเพิ่มอัตราส่วนการอัดของเครื่องยนต์ด้วยการลดปริมาตรห้องเผาไหม้บนหัวลูกสูบ ภาพที่ 3(A) แสดงรูปร่างของลูกสูบปกติ อัตราส่วนการอัดของเครื่องยนต์ 18:1 การลดปริมาตรห้องเผาไหม้บนหัวลูกสูบทำโดยการกลึงขึ้นส่วนห้องเผาไหม้ขึ้นมาใหม่ให้มีปริมาตรลดลงและคว้านห้องเผาไหม้เดิมออกดังในภาพที่ 3(B) ด้านข้างของห้องเผาไหม้ใหม่กับรูคว้านบนหัวลูกสูบกลึงเป็นเกลียวเพื่อสวมเข้าด้วยกัน ล็อกเกลียวด้วยกาวทนความร้อน เมื่อนำลูกสูบไปใช้งานจนถึงสิ้นสุดการทดลองทั้งหมดแล้ว ทำการตรวจสอบสภาพลูกสูบด้วยสายตา ไม่พบการคลายตัวของเกลียวยึดห้องเผาไหม้และไม่พบรอยแตกร้าวใด ๆ บนลูกสูบ



ภาพที่ 3 วิธีลดปริมาตรห้องเผาไหม้เพื่อเพิ่มอัตราส่วนการอัดของเครื่องยนต์

ภาพที่ 4 แสดงความดันเฉลี่ยประสิทธิผล (IMEP) ของเครื่องยนต์ 200 วัฏจักรแรก กรณีใช้ดีเซลเป็นเชื้อเพลิง ช่วง 50 วัฏจักรแรก IMEP มีค่าสูงเนื่องจากความเร็วรอบเครื่องยนต์ต่ำมาก อุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบ (governor) จะเพิ่มปริมาณการจ่ายเชื้อเพลิงเพื่อเร่งความเร็วรอบของเครื่องยนต์ ส่งผลให้ IMEP มีค่าสูง หลังวัฏจักรที่ 50 อุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบจะปรับลดปริมาณเชื้อเพลิงลงเพื่อป้องกันไม่ให้ความเร็วรอบของเครื่องยนต์สูงเกินไป ส่งผลให้ IMEP มีค่าลดลง

จากภาพที่ 4 สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง ช่วงแรกตั้งแต่วัฏจักรแรกถึงวัฏจักรที่ 50 (โดยประมาณ) เป็นการเร่งความเร็วรอบของเครื่องยนต์ ช่วงที่สองตั้งแต่วัฏจักรที่ 50 ถึงวัฏจักรที่ 75 (โดยประมาณ) เป็นการลดความเร็วรอบของเครื่องยนต์ไม่ให้สูงเกินไป ช่วงที่สามตั้งแต่วัฏจักรที่ 75 เป็นต้นไป เป็นการควบคุมความเร็วรอบของเครื่องยนต์ให้คงที่ตลอดไป ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า ช่วงเวลา 75 วัฏจักรแรกเป็นช่วงเวลาเริ่มติดเครื่องยนต์ และหลังจากวัฏจักรที่ 75 เป็นช่วงเวลาเดินเครื่องยนต์ปกติ



ภาพที่ 4 ความดันเฉลี่ยประสิทธิผลของเครื่องยนต์ 200 วัฏจักรแรก กรณีใช้ดีเซลเป็นเชื้อเพลิง



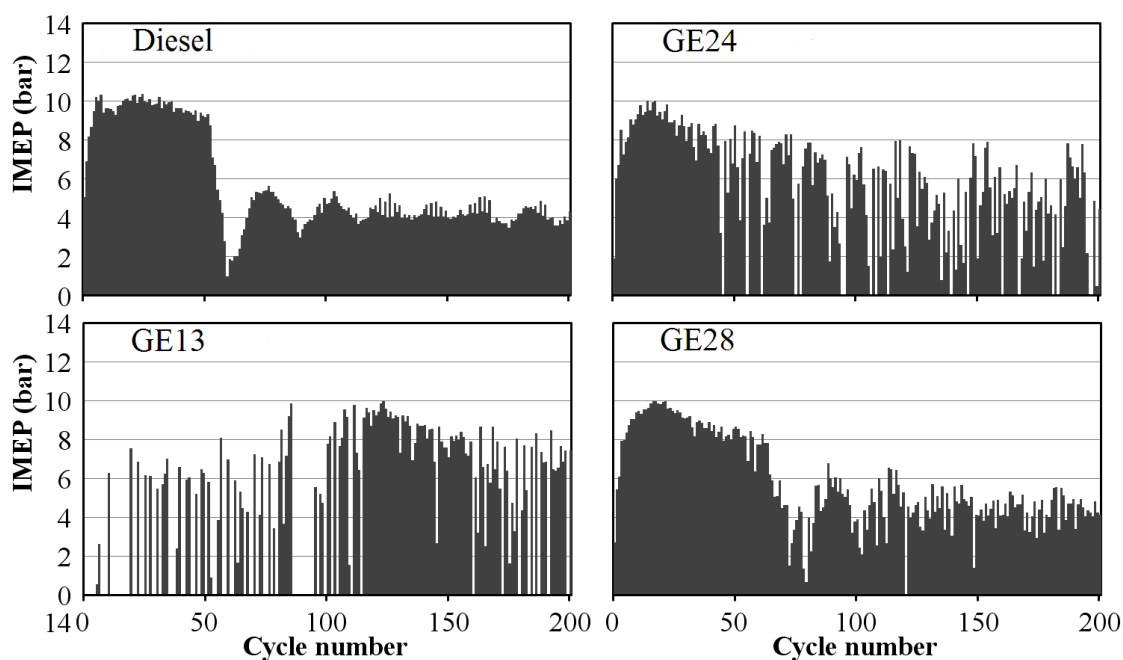
การศึกษาคุณลักษณะการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ควรมีข้อมูลทั้งช่วงเวลาเริ่มติดเครื่องยนต์และช่วงเวลาเดินเครื่องยนต์ปกติ ดังนั้นการทดลองนี้จึงต้องทำการบันทึกข้อมูลอย่างน้อยจำนวน 150 วัฏจักร แต่กรณีเชื้อเพลิงเอทานอลผสมสารช่วยจุดระเบิดมีความยากลำบากในการติดเครื่องยนต์มากกว่าการติดเครื่องยนต์จึงใช้จำนวนวัฏจักรมากกว่า การทดลองนี้จึงกำหนดการบันทึกข้อมูลจำนวน 200 วัฏจักร เนื่องจากการทดลองแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 เงื่อนไขการทดลอง

Test No.	Fuel	Test conditions	CR	Percentage of improver concentrations (%)	LHV (MJ/kg)
1.	Diesel	No load, Max. fuel rack	18	-	42.80
2.	Diesel	No load, Max. fuel rack	23	-	42.80
3.	GE	No load, Max. fuel rack	18	2 to 35	27.03 to 30.75
4.	GE	No load, Max. fuel rack	23	2 to 35	27.03 to 30.75

ผลการวิจัย

เชื้อเพลิงเอทานอลผสม glycerol ethoxylate 1-12% ไม่สามารถติดเครื่องยนต์ได้ การทดลองพบว่าเชื้อเพลิงเอทานอลผสม glycerol ethoxylate 13% (GE13) ขึ้นไปจึงสามารถติดเครื่องยนต์ได้ ภาพที่ 5 แสดงความดันเฉลี่ยประสิทธิผล (indicated mean effective pressure, IMEP) ของเครื่องยนต์ 200 วัฏจักรแรก กรณีเชื้อเพลิงดีเซล ไม่พบ misfire cycle ตลอดทั้ง 200 วัฏจักร กรณี GE13 เชื้อเพลิงเอทานอลมีสารช่วยจุดระเบิดปริมาณน้อย จำนวนวัฏจักรที่เกิด misfire cycle (IMEP มีค่าเป็นศูนย์) มีเป็นจำนวนมาก เมื่อมีสารช่วยจุดระเบิดปริมาณมากขึ้น จำนวนวัฏจักรที่เกิด misfire cycle จะลดลงอย่างมาก กรณี GE28 จำนวนวัฏจักรที่เกิด misfire cycle มีเพียงวัฏจักรเดียว

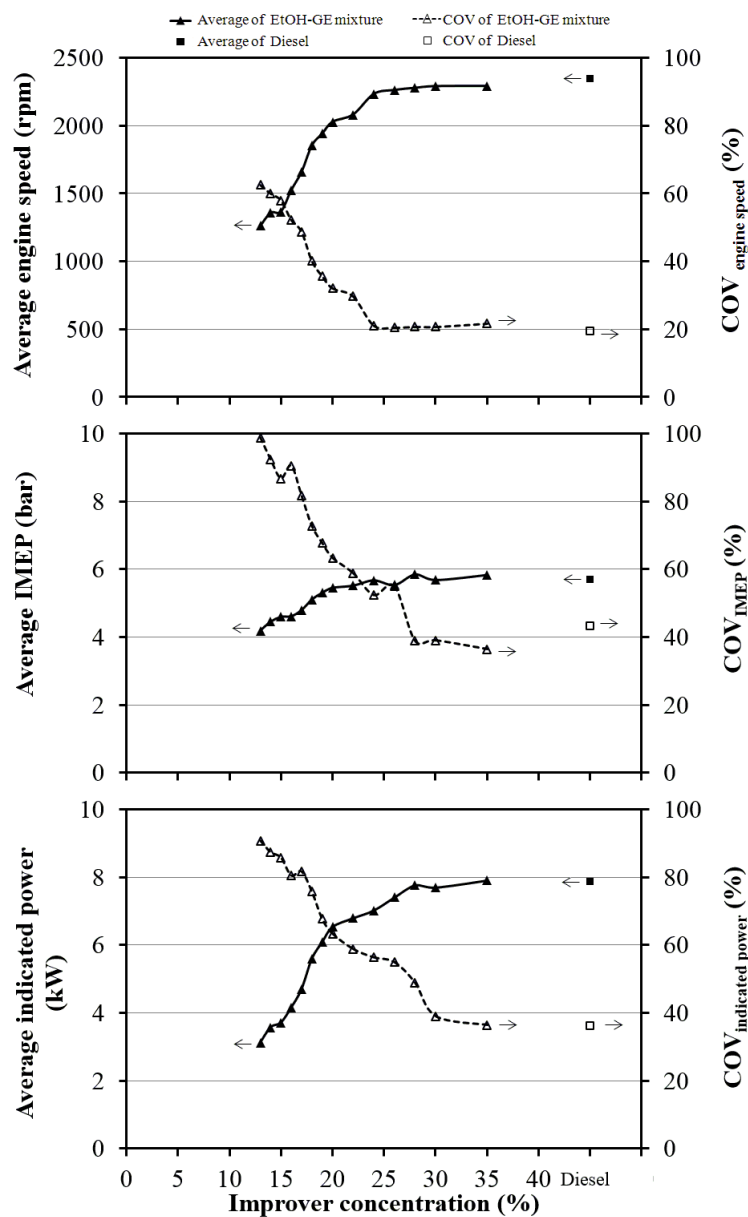


ภาพที่ 5 ความดันเฉลี่ยประสิทธิผล (IMEP) ของเครื่องยนต์ 200 วัฏจักรแรก

ภาพที่ 6 แสดงความเร็วรอบเฉลี่ยและความดันเฉลี่ยประสิทธิผลในช่วง 200 วัฏจักรแรก เมื่อเพิ่มปริมาณสารช่วยจุดระเบิด ส่งผลให้ความเร็วรอบเฉลี่ยและ IMEP เฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณสารช่วยจุดระเบิดสูงกว่า 24% (GE24) ความเร็วรอบเฉลี่ยและ IMEP เฉลี่ยจะมีค่าใกล้เคียงกับเชื้อเพลิงดีเซล ส่วนความแปรปรวน (COV) ทั้งของความเร็วรอบเฉลี่ยและ IMEP เฉลี่ยมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณสารช่วยจุดระเบิด

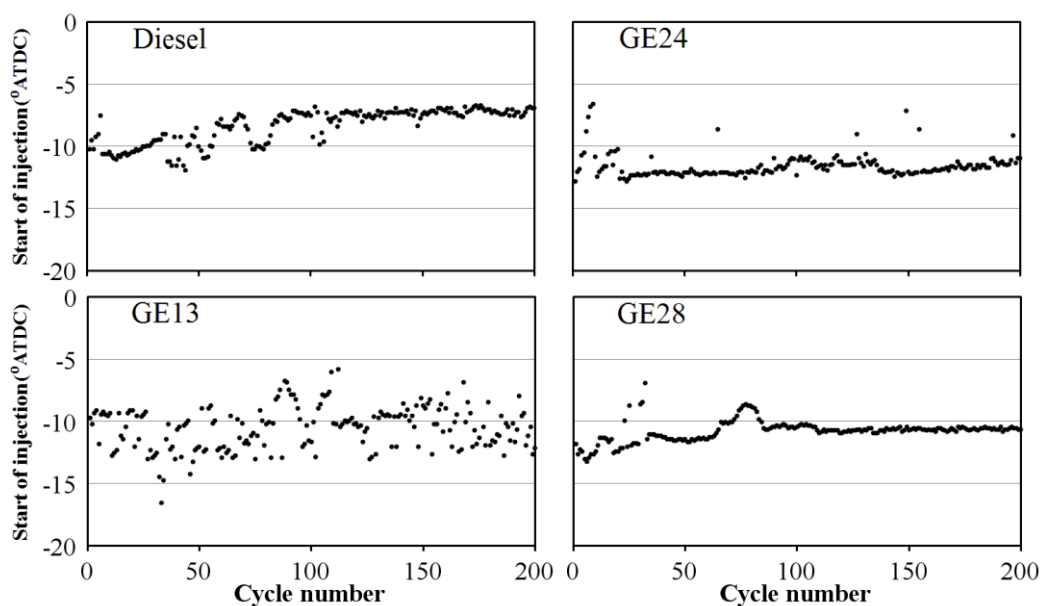
แผนภูมิของกำลังเครื่องยนต์ (indicated power) มีลักษณะเช่นเดียวกับ IMEP อย่างไรก็ตาม การทดลองครั้งนี้ไม่ได้ให้ภาระ (load) แก่เครื่องยนต์ กำลังที่เครื่องยนต์ผลิตขึ้นจึงถูกนำไปใช้เพื่อการเร่งความเร็วรอบของเครื่องยนต์ขณะเริ่มติดเครื่องและเพื่อเอาชนะแรงเสียดทานภายในเครื่องยนต์

การทดลองครั้งนี้ไม่ได้ติดตั้งเครื่องมือวัดอัตราการใช้เชื้อเพลิง จึงไม่สามารถคำนวณประสิทธิภาพเชิงความร้อน (indicated thermal efficiency) ได้



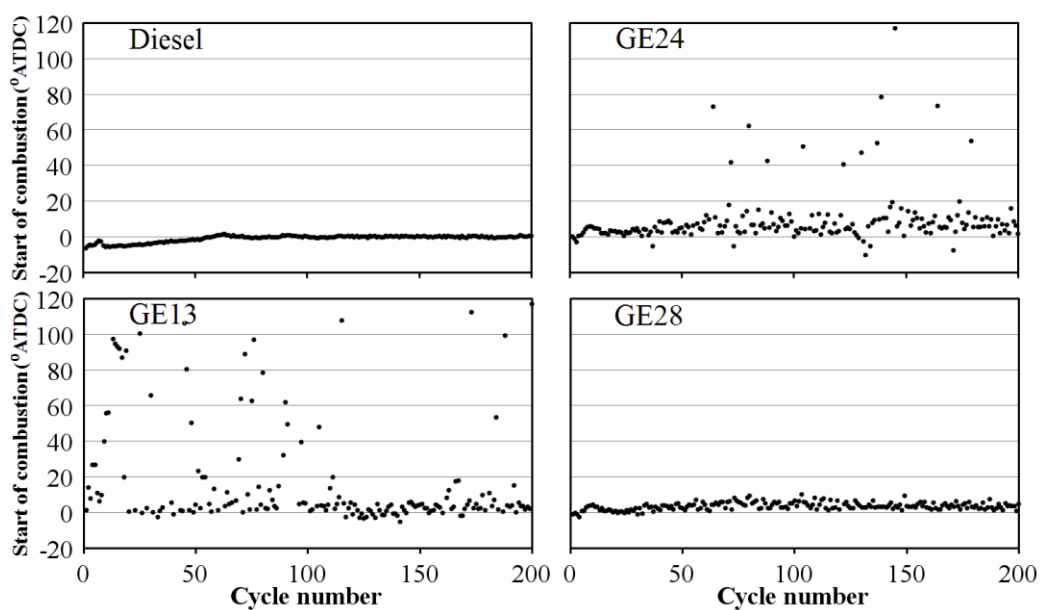
ภาพที่ 6 ความเร็วรอบและ IMEP เฉลี่ยในช่วง 200 วัฏจักรแรก

ภาพที่ 7 แสดงตำแหน่งเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิงช่วง 200 วัฏจักรแรก ตำแหน่งเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิงมีความแปรปรวนไม่มากนัก กรณี GE13 ตำแหน่งเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิงอยู่ในช่วง -15 ถึง -5° ATDC มีความแปรปรวนมากกว่ากรณีเชื้อเพลิงดีเซล ซึ่งส่งผลให้ตำแหน่งเริ่มต้นการเผาไหม้มีความแปรปรวนสูงขึ้นตามไปด้วย เมื่อเพิ่มปริมาณสารช่วยจุดระเบิด ส่งผลให้ความแปรปรวนของตำแหน่งเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิงลดลง



ภาพที่ 7 ตำแหน่งเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิง (SOI)

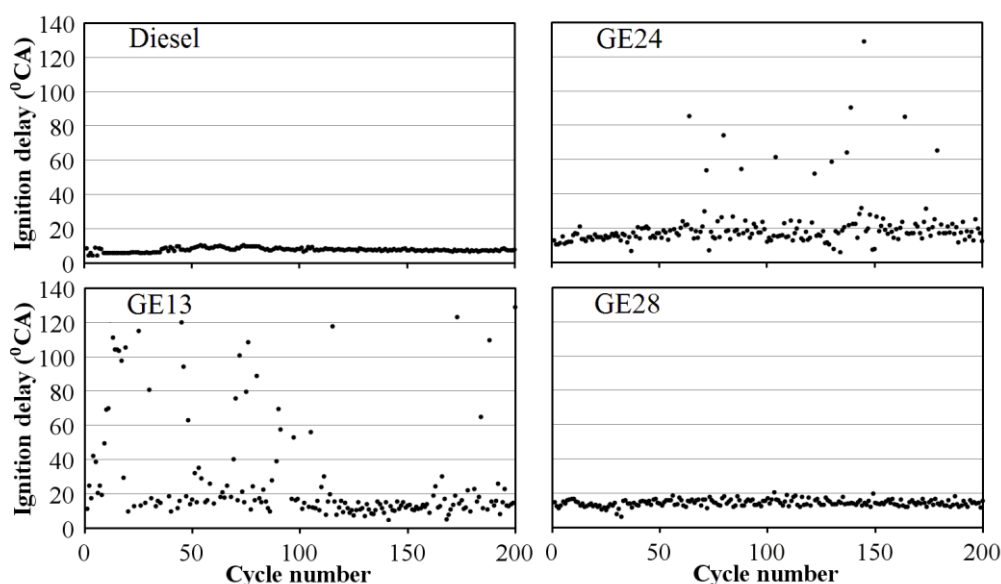
ภาพที่ 8 แสดงตำแหน่งเริ่มต้นการเผาไหม้ช่วง 200 วัฏจักรแรก กรณีเชื้อเพลิงดีเซล ตำแหน่งเริ่มต้นการเผาไหม้เกิดขึ้นใกล้ตำแหน่งศูนย์ตายบน (TDC) และมีความแปรปรวนต่ำมาก กรณี GE13 มีความแปรปรวนสูงมาก แต่เมื่อเพิ่มปริมาณสารช่วยจุดระเบิด ส่งผลให้ความแปรปรวนของตำแหน่งเริ่มต้นการเผาไหม้ลดลง



ภาพที่ 8 ตำแหน่งเริ่มต้นการเผาไหม้ (SOC)



ภาพที่ 9 แสดงช่วงเวลาหน่วงการจุดระเบิดช่วง 200 วัฏจักรแรก กรณีเชื้อเพลิงดีเซล ช่วงเวลาหน่วงการจุดระเบิดมีความแปรปรวนต่ำมาก กรณี GE13 มีความแปรปรวนสูงมาก แต่เมื่อเพิ่มปริมาณสารช่วยจุดระเบิด ส่งผลให้ความแปรปรวนของตำแหน่งเริ่มต้นการเผาไหม้ลดลง ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานช่วงเวลาหน่วงการจุดระเบิด (SD_{ID}) มีค่า 0.54° , 16.83° , 9.73° , และ 3.69° สำหรับดีเซล GE13 GE24 และ GE28 ตามลำดับ ผลการทดลองจากภาพที่ 7 - 9 แสดงให้เห็นว่า เชื้อเพลิงเอทานอลซึ่งมีสารช่วยจุดระเบิดน้อย จะมีความแปรปรวนของตำแหน่งเริ่มต้นการติดเชื้อเพลิง ตำแหน่งเริ่มต้นการเผาไหม้และช่วงเวลาหน่วงการจุดระเบิดในระดับสูง แต่การผสมสารช่วยจุดระเบิดตั้งแต่ 28% ขึ้นไป ความแปรปรวนดังกล่าวจะลดลงจนใกล้เคียงกับเชื้อเพลิงดีเซล



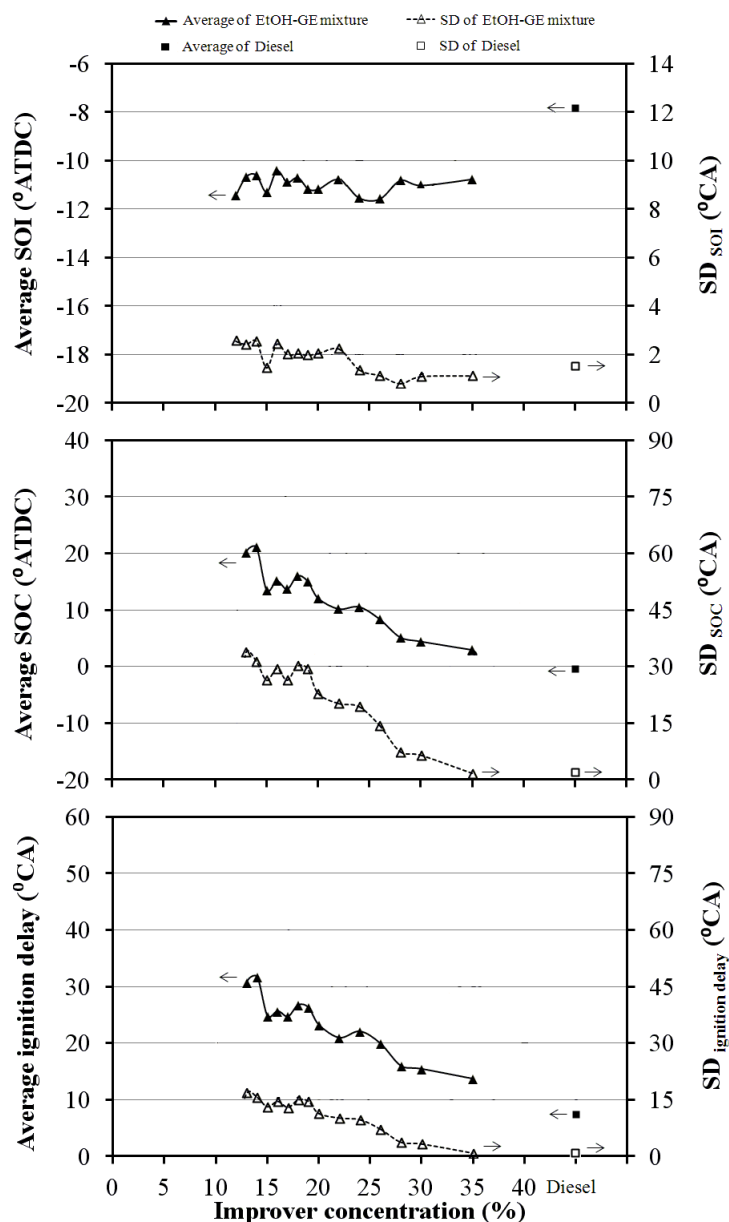
ภาพที่ 9 ช่วงเวลาหน่วงการจุดระเบิด (ID)

ภาพที่ 10 แสดงค่าเฉลี่ยของตำแหน่งเริ่มต้นการติดเชื้อเพลิง ตำแหน่งเริ่มต้นการเผาไหม้และช่วงเวลาหน่วงการจุดระเบิดตลอดช่วง 200 วัฏจักรแรก ตำแหน่งเริ่มต้นการติดเชื้อเพลิงของเอทานอลผสมสารช่วยจุดระเบิดทุกกรณีอยู่ในช่วง -12 ถึง -10° ATDC และไม่ขึ้นต่อความเข้มข้นของสารช่วยจุดระเบิดในเอทานอล ความแปรปรวนของตำแหน่งเริ่มต้นการติดเชื้อเพลิงมีความแตกต่างกันเล็กน้อย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานตำแหน่งเริ่มต้นการติดเชื้อเพลิง (SD_{SOF}) มีค่าอยู่ในช่วง 1.13° ถึง 2.43°

ตำแหน่งเริ่มต้นการเผาไหม้ของเอทานอลผสมสารจุดระเบิดอยู่ในช่วง $3-22^{\circ}$ ATDC ซึ่งเป็นการเผาไหม้ที่ล่าช้ามากเมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซลที่เริ่มต้นการเผาไหม้ใกล้ศูนย์ตายบน (TDC) เมื่อเพิ่มสารช่วยจุดระเบิด การเผาไหม้เกิดเร็วขึ้น ส่งผลให้ช่วงเวลาหน่วงการจุดระเบิดน้อยลงตามไปด้วย



ช่วงเวลาหน่วงการจุดระเบิดและความแปรปรวนลดลงจนมีค่าเข้าใกล้กับเชื้อเพลิงดีเซล อย่างไรก็ตาม ช่วงเวลาหน่วงการจุดระเบิดของเชื้อเพลิงดีเซลและ GE35 มีค่า 7° และ 14° ตามลำดับ ซึ่งยังมีค่าต่างกันมาก การศึกษาเพื่อลดช่วงเวลาหน่วงการจุดระเบิดของเชื้อเพลิงเอทานอลผสมสารจุดระเบิด เช่น การอุ่นห้องเผาไหม้ การเพิ่มอัตราส่วนการอัดจึงมีความจำเป็นเพื่อการพัฒนาในอนาคต



ภาพที่ 10 ค่าเฉลี่ยของตำแหน่งเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิง ตำแหน่งเริ่มต้นการเผาไหม้ และช่วงเวลาหน่วงการจุดระเบิด



อภิปรายผล

จากภาพที่ 5 เมื่อเพิ่มสารช่วยจุดระเบิด รูปแบบ (pattern) ของแผนภูมิ IMEP มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจนคล้ายกับกรณีดีเซล แต่ก็ต้องใช้สารช่วยจุดระเบิดถึง 28% ซึ่งเป็นปริมาณที่สูงมาก แสดงให้เห็นว่าวิธีการเพิ่มอุณหภูมิอากาศในจังหวะการอัด ด้วยการเพิ่มอัตราส่วนการอัด (compression ratio) เป็น 23:1 ยังไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอ การปรับปรุงในอนาคตอาจต้องเพิ่มอัตราส่วนการอัดให้สูงขึ้นหรือใช้อุปกรณ์ให้ความร้อนเพิ่มเติม เช่น การใช้หัวเผา (glow plug)

ภาพที่ 10 ตำแหน่งเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิง (SOI) ของเชื้อเพลิงเอทานอลผสมสารช่วยจุดระเบิดอยู่ที่ประมาณ -11°ATDC เชื้อเพลิงดีเซลอยู่ที่ประมาณ -8°ATDC เนื่องจากค่าความหนืดของเชื้อเพลิงที่มีค่าต่างกัน (Munsin et al., 2012)

สรุป

การใช้สารช่วยจุดระเบิดในเชื้อเพลิงเอทานอลรวมกับการเพิ่มอัตราส่วนการอัดของเครื่องยนต์ดีเซล เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพต่อคุณลักษณะการเผาไหม้ภายในกระบอกสูบ สัดส่วนของสารช่วยจุดระเบิดน้อยที่สุดซึ่งสามารถติดเครื่องยนต์ได้ คือ 13% เมื่อปริมาณสารช่วยจุดระเบิดสูงกว่า 24% ความเร็วรอบเฉลี่ยและ IMEP เฉลี่ยจะมีค่าใกล้เคียงกับเชื้อเพลิงดีเซล ตำแหน่งเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิงของเอทานอลผสมสารช่วยจุดระเบิดทุกกรณีอยู่ในช่วง -12 ถึง -10°ATDC และไม่ขึ้นต่อความเข้มข้นของสารช่วยจุดระเบิด ตำแหน่งเริ่มต้นการเผาไหม้ของเอทานอลผสมสารจุดระเบิดอยู่ในช่วง 3 – 22°ATDC ซึ่งเป็นการเผาไหม้ที่ล่าช้ามากเมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซล เมื่อเพิ่มสารช่วยจุดระเบิดการเผาไหม้เกิดเร็วขึ้น ส่งผลให้ช่วงเวลาดำเนินการจุดระเบิดน้อยลงตามไปด้วย

ข้อเสนอแนะ

ปัญหาเรื่องเชื้อเพลิงเอทานอลผสมสารช่วยจุดระเบิดและเชื้อเพลิงดีเซลถูกฉีดออกมาในช่วงเวลาที่ต่างกันเนื่องจากปัญหาด้านคุณสมบัติของเชื้อเพลิง ทำให้การควบคุมตำแหน่งเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิงมีความยุ่งยากสำหรับปั๊มเชื้อเพลิงแรงดันสูงแบบ in-line การใช้หัวฉีดหรือปั๊มเชื้อเพลิงแรงดันสูงแบบควบคุมด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เช่น คอมมอนเรล (common rail) หรือยูนิตอินเจกเตอร์ (unit injector) จะช่วยแก้ปัญหาดังกล่าว

plunger และ barrel เป็นชิ้นส่วนสำคัญในปั๊มเชื้อเพลิงแรงดันสูงแบบ in-line การหล่อลื่นชิ้นส่วนดังกล่าวไม่สามารถใช้น้ำมันหล่อลื่นทั่วไปได้เนื่องจากช่องว่าง (clearance) ระหว่าง plunger และ barrel มีค่าน้อยมาก น้ำมันหล่อลื่นไม่สามารถแทรกตัวเข้าไปเพื่อหล่อลื่นได้ ผู้ผลิตจึงออกแบบให้



มีการหล่อลื่นด้วยเชื้อเพลิงดีเซล หากใช้เอทานอลซึ่งมีความหนืดต่ำกว่าดีเซลเป็นเชื้อเพลิง ฟิล์มหล่อลื่น (oil film) จะบางกว่า ส่งผลให้ plunger และ barrel สัมผัสเสียดสีกันโดยตรง เกิดการสึกหรออย่างรุนแรง การแก้ไขปัญหาทำได้ด้วยการเติมสารเคมีหรือเชื้อเพลิงอื่นที่มีความหนืดสูงและสามารถละลายในเอทานอลได้ดี จะทำให้เชื้อเพลิงเอทานอลมีความหนืดสูงพอสร้างฟิล์มหล่อลื่นให้แก่ plunger และ barrel การทดลองนี้ใช้ lauric acid ซึ่งมีลักษณะเป็นผงสีขาว เติมลงในเอทานอลเพื่อเป็นสารช่วยหล่อลื่น อย่างไรก็ตาม สารช่วยหล่อลื่นอื่นที่น่าสนใจคือ ไบโอดีเซล เนื่องจากมีความหนืดสูงและสามารถละลายในเอทานอลได้ดี แต่การนำมาใช้งานยังต้องมีการศึกษาเพิ่มเติม

สารช่วยจุดระเบิดสำหรับการทดลองครั้งนี้ คือ (glycerol ethoxylate, GE) เป็นสารเคมีที่มีราคาสูง และยังไม่สามารถผลิตเองได้ภายในประเทศ จึงยังไม่สามารถนำมาใช้ในเครื่องยนต์ทดแทนเชื้อเพลิงดีเซลได้ การศึกษาประสิทธิภาพของสารช่วยจุดระเบิดที่มีราคาถูกและไม่ก่อมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมยังมีความสำคัญในอนาคต

รายการอ้างอิง (References)

- Abu-Qudais, M., Haddad, O., & Qudaisat, M. (2000). The effect of alcohol fumigation on diesel engine performance and emissions. *Energy Conversion and Management*, 41(4), 389-399.
- Bika, A.S., Franklin, L.M., & Kittelson, D.B. (2009). *Hydrogen as a combustion modifier of ethanol in compression ignition engines* (No. 2009-01-2814). SAE Technical Paper.
- Caresana, F. (2011). Impact of biodiesel bulk modulus on injection pressure and injection timing. The effect of residual pressure. *Fuel*, 90(2), 477-485.
- Ecklund, E.E., Bechtold, R.L., Timbario, T.J., & McCallum, P.W. (1984). State-of-the-art report on the use of alcohols in diesel engines. *SAE Transactions*, 684-702.
- Enright, B., Borman, G.L., & Myers, P.S. (1988). A critical review of spark ignited diesel combustion. *SAE Transactions*, 1645-1662.
- Eugene, E.E., Bechtold, R.L., Timbario, T.J., & McCallum, P.W. (1984). State-of-the-art report on the use of alcohols in diesel engines. *SAE Paper*, 840118.
- Heywood, J.B. (1988). *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGraw-Hill, New York.
- Ishida, M., Yamamoto, S., Ueki, H., & Sakaguchi, D. (2010). Remarkable improvement of NO_x-PM trade-off in a diesel engine by means of bioethanol and EGR. *Energy*, 35(12), 4572-4581.



- Koç, M., Sekmen, Y., Topgül, T., & Yücesu, H. S. (2009). The effects of ethanol–unleaded gasoline blends on engine performance and exhaust emissions in a spark-ignition engine. *Renewable Energy*, 34(10), 2101-2106.
- Labeckas, G., Slavinskas, S., & Mažeika, M. (2014). The effect of ethanol–diesel–biodiesel blends on combustion, performance and emissions of a direct injection diesel engine. *Energy Conversion and Management*, 79, 698-720.
- Mueller, C.J., & Musculus, M.P. (2001). *Glow plug assisted ignition and combustion of methanol in an optical DI diesel engine* (No. 2001-01-2004). SAE Technical Paper.
- Munsin, R., Laoonual, Y., Jugjai, S., Matsuki, M., & Kosaka, H. (2012). *Investigation of effects of ignition improvers on ignition delay time of ethanol combustion with rapid compression and expansion machine* (No. 2012-01-0854). SAE Technical Paper.
- Schaefer, A.J., & Hardenberg, H.O. (1981). Ignition improvers for ethanol fuels. *SAE Transactions*, 1107-1118.
- Simonsen, H., & Chomiak, J. (1995). Testing and evaluation of ignition improvers for ethanol in a DI diesel engine. *SAE Transactions*, 1861-1872.
- Tutak, W. (2014). Bioethanol E85 as a fuel for dual fuel diesel engine. *Energy Conversion and Management*, 86, 39-48.
- Yasin, M.H., Mamat, R., Abdullah, A.A., Abdullah, N.R., & Wyszynski, M.L. (2013). Cycle-to-cycle variations of a diesel engine operating with palm biodiesel. *Journal of KONES*, 20(3), 443-450.
- Yassine, M.K., Tagomori, M.K., Henein, N.A., & Bryzik, W. (1996). White smoke emissions under cold starting of diesel engines. *SAE Transactions*, 68-88.