

**การศึกษาลักษณะการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้เชื้อเพลิงร่วมภายใต้สภาวะ
โหลดต่ำด้วยวิธีการทดลอง**

**An Experimental Investigation into Operational Characteristics of a Diesel Dual
Fuel Engine under Low Load Conditions**

มงคล สาลาด¹ ธเนศ อรุณศรีโสภณ¹ และ กฤษฎา วรรณทอง²

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
50 ถนนพหลโยธิน จตุจักร กทม. 10900

²ฝ่ายเทคนิคพลังงานประยุกต์และเครื่องยนต์ทดสอบ สถาบันวิจัยและเทคโนโลยี ปตท.

71 หมู่ 2 ตำบลสนับทึบ อำเภอบางบาล จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

*ผู้ติดต่อ: tanet.a@ku.ac.th, +66(0)-2942-8555 ต่อ 1841, +66(0)-2579-4576

บทคัดย่อ

การใช้เชื้อเพลิงร่วมระหว่างก๊าซธรรมชาติและน้ำมันดีเซลเป็นทางเลือกหนึ่งของการทำงานเครื่องยนต์ดีเซล โดยนำก๊าซธรรมชาติผสมเข้ากับอากาศที่ท่อไอดีและฉีดน้ำมันดีเซลโดยตรงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ จากผลการศึกษาต่างๆ พบว่าเครื่องยนต์เชื้อเพลิงร่วมมักประสบปัญหาของประสิทธิภาพของเครื่องยนต์และสารมลพิษไอเสีย

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาคุณลักษณะการทำงานของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดด้วยเครื่องยนต์วิจัยสูบเดี่ยว สี่จังหวะ ซึ่งดัดแปลงให้ใช้เชื้อเพลิงร่วมระหว่างก๊าซธรรมชาติและน้ำมันดีเซล โดยทำการทดลองที่สภาวะการทำงานในช่วงโหลดต่ำที่ความเร็วรอบ 1200 และ 2400 รอบต่อนาที และปรับจังหวะและปริมาณการฉีดน้ำมันดีเซลในลักษณะต่างๆ

ผลการทดลองพบว่าจังหวะการฉีดน้ำมันดีเซลส่งผลโดยตรงต่อคุณลักษณะของกระบวนการเผาไหม้ รูปแบบการฉีดน้ำมันดีเซลที่ต่างกันส่งผลให้มีจังหวะการจุดระเบิด อัตราการปล่อยพลังงานเคมี และปริมาณสารมลพิษไอเสียที่ต่างกัน นอกจากนี้การศึกษาได้เสนอจุดการทำงานที่เหมาะสมสำหรับเครื่องยนต์ที่สภาวะต่างๆ ผลจากงานวิจัยนี้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการควบคุมการทำงานของเครื่องยนต์และเป็นแนวทางสำหรับการดัดแปลงเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงร่วมต่อไป

คำหลัก: เครื่องยนต์ ที่ใช้ เชื้อเพลิงร ม, การฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงเข สู ห ่งเผาไหม , เครื่องยนต์ จุดระเบิด ยการอัด, ก ธรรมชาติ, HCCI

Abstract

The use of dual fuels is an alternative operation for a diesel engine. In such an engine, a natural gas is injected into the intake system and mixed with the air. The diesel fuel is directly injected into the combustion chamber. The experimental results show that the engine performance and emissions are affected by the injection timing and quantity of diesel fuel. The study also proposes the operating conditions suitable for the dual-fuel engine. The results of this study are the basic information for the engine control and the modification of the engine.

combustion chamber. As reported in previous literatures, one of the challenges in diesel dual fuel (DDF) engines was poor low-load operation characteristics, i.e. low engine efficiency and high emissions.

The current research investigated the operating characteristics of a DDF engine in a single-cylinder, four-stroke, engine under low load operations at 1200 and 2400 rpm. The timings and the amounts of diesel injections were varied to examine changes in the combustion and the engine-out emissions.

Data indicated that the timing of diesel injection had significant effects on the combustion processes. Different injection strategies resulted in different timings of combustion, rates of energy release, and emissions. Moreover, the optimum operating points based on best efficiency and emissions were summarized under selected engine conditions. The findings from this study helped providing fundamental understanding for combustion control strategies and perspectives for further DDF engine conversion applications.

Key words: Diesel Dual Fuel Engines, Direct Fuel Injection, Compression Ignition Engines, Natural Gas, HCCI

1. บทนำ

การดัดแปลงเครื่องยนต์ดีเซลเป็นเครื่องยนต์ที่สามารถใช้เชื้อเพลิงร่วมระหว่างก๊าซธรรมชาติกับน้ำมันดีเซลหรือเครื่องยนต์ DDF ในประเทศไทยเริ่มมีมากขึ้น โดยเฉพาะในสถานการณ์ปัจจุบันที่มีการตื่นตัวด้านผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสถานการณ์ที่ราคาน้ำมันมีความผันผวน

แม้ว่าจะมีการศึกษาถึงเทคโนโลยีและการทำงานของเครื่องยนต์เชื้อเพลิงรอกุม จนเป็นที่ทราบว่เครื่องยนต์เชื้อเพลิงรอกุมนั้นมีลักษณะเด่นคือช่วยลดปริมาณสารมลพิษพวกออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) และเขม่า (PM) [1-6] ซึ่งเป็นปัญหาหลักของเครื่องยนต์ดีเซลปกติ แต่ก็มีขีดจำกัดหลายด้าน ที่จำเป็นต้องพัฒนาปรับปรุง เช่นการปล่อยมลพิษสารไฮโดรคาร์บอน (HC) กับคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ออกมาสูงมากที่เครื่องยนต์ทำงานภาระต่ำ ความเสี่ยงต่อการเกิดการน็อคและความเสียหายต่อเครื่องยนต์ที่ภาระสูง จากการควบคุมการจ่ายก๊าซในสัดส่วนที่ไม่เหมาะสม ประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่ำ [1-6]

ที่สภาวะภาระต่ำ (low load) เครื่องยนต์เดินไม่เรียบ มีความแปรปรวนของการเผาไหม้วัฏจักรต่อวัฏจักร (cyclic variations) ระยะเวลาหน่วงการจุดระเบิด (ignition delay) ยาวนานกว่าเครื่องยนต์ดีเซล

ปกติ เชื้อเพลิงก๊าซที่ไม่ผ่านการเผาไหม้ถูกปล่อยออกมากับไอเสียจำนวนมาก ปริมาณ HC และ CO สูงกว่าเครื่องยนต์ดีเซลปกติ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่ำ ค่าอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานรวมจำเพาะเบรคสูง และสิ้นเปลืองมากยิ่งขึ้นเมื่อเครื่องยนต์ทำงานที่รอบสูง

ทั้งนี้เนื่องจากที่ภาระต่ำเครื่องยนต์ต้องการปริมาณน้ำมันดีเซลและเชื้อเพลิงก๊าซไม่มาก ขณะที่เครื่องยนต์ไม่มีลิ้นเร่งทำให้เปิดรับอากาศเต็มที (WOT) สัดส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศที่ไหลเข้าห้องเผาไหม้จึงค่อนข้างบางและกระจัดกระจาย การจุดระเบิดไม่แน่นอน การลามของเปลวไฟเป็นไปได้ยาก และดับก่อนที่จะเผาไหม้ส่วนผสมได้หมดก่อนเข้าสู่จังหวะขยายตัว เป็นที่มาของความสิ้นเปลืองพลังงานรวมจำเพาะเบรคข้างต้น HC กับ CO สูง และเมื่อเครื่องยนต์ทำงานที่รอบสูงปริมาณอากาศที่สูงขึ้นด้วย ทำให้ปัญหาความบางของส่วนผสมส่งผลเด่นชัดมากขึ้น [2-3]

เพื่อที่จะศึกษาจากผลกระทบของรูปแบบการฉีดน้ำมันดีเซล เพื่อปรับปรุง คุณลักษณะการทำงานของเครื่องยนต์เชื้อเพลิงรอกุม ที่สภาวะเครื่องยนต์ภาระต่ำ ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบการฉีดน้ำมันดีเซลโดยตรงเข้าห้องเผาไหม้ ด้วยการฉีดครั้งเดียวและฉีด

สองครั้งต่อวัฏจักร โดยปรับจังหวะการฉีดล่วงหน้าและระยะเวลาการฉีดแต่ละครั้ง ตั้งความดันของรางหัวฉีดไว้ที่ 250 บาร์ ตลอดสภาวะการทดสอบทั้งหมด ทำการวัดปริมาณสารมลพิษจากไอเสียและบันทึกข้อมูลความดันในกระบอกสูบสำหรับวิเคราะห์การเผาไหม้ ซึ่งในที่นี้ได้นำเสนอเฉพาะผลการทดสอบแบบฉีดสองครั้ง โดยปรับ จังหวะการฉีดล่วงหน้าครั้งแรกและคงการฉีดครั้งที่สอง ไว้ใกล้ศูนย์ตายบน ที่ 1200 และ 2400 rpm ใช้สัญลักษณ์ “1st DI” สำหรับการฉีดน้ำมันดีเซลครั้งแรกและ “2nd DI” แทนการฉีดครั้งที่สอง

2. เครื่องมือและอุปกรณ์วัด

ในงานศึกษาที่ใช้ เครื่องยนต์วิจัยสูบเดี่ยว สี จังหวะ RICARDO HYDRA แบบ Direct Injection ซึ่งมีรายละเอียดทางเทคนิคตาม ตารางที่ 1 เป็นเครื่องยนต์ทดสอบ ติดตั้งบนแท่นทดสอบสมรรถนะแบบ DC Dynamometer

ตารางที่ 1.รายละเอียดข้อมูลเทคนิคของเครื่องยนต์ทดสอบ

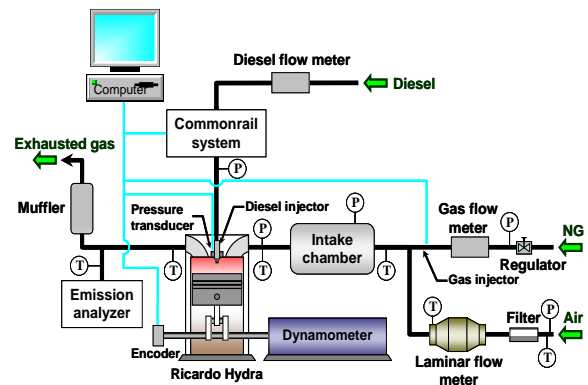
Engine Type	2-Valve DI Diesel Ricardo Hydra
Fuel system	Common rail
Aspiration	Naturally aspirated
Compression ratio	20.36:1
Displacement	449.77 cc
Bore	80.26 mm
Stroke	88.90 mm
Connecting rod	158.0 mm
Valve timings:	
Intake valve open	+352° after TDC ^a
Intake valve close	-138° after TDC ^a
Exhaust valve open	+120° after TDC ^a
Exhaust valve close	-348° after TDC ^a

^a เป็นองศาเฟลาข้อเหวี่ยงในจังหวะการจุดระเบิดที่ TDC.

ทำงานแบบ เชื้อเพลิงรวม โดย ระบบจ่ายก๊าซธรรมชาติเป็นแบบหัวฉีดที่ฉีดต่อเนื่อง สามารถควบคุมอัตราการไหล ได้ติดตั้งเข้ากับท่อร่วมไอดีที่

ระยะประมาณ 140 cm ก่อนเข้าสู่เครื่องยนต์โดยวัดอัตราการไหลด้วย Micro motion gas flow meter ระบบฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลเป็นแบบ Common rail ที่สามารถควบคุมจังหวะและปริมาณการฉีดได้ ติดตั้งเข้าไปแทนที่ระบบเดิมของเครื่องยนต์ ที่เป็นแบบปั๊มจานจ่าย ควบคุมแรงดันรางหัวฉีดที่ 250 บาร์

วัดอัตราการใช้น้ำมันดีเซลด้วย AVL733 Fuel mass balance ทำการวัดและบันทึกข้อมูลความดันในกระบอกสูบด้วย Kistler piezoelectric pressure transducers type 6125BU20 และ Dewetron combustion analyzer software ที่มีความละเอียดของข้อมูลความดัน 0.2 องศาเฟลาข้อเหวี่ยงต่อวัฏจักร โดยในแต่ละครั้งที่บันทึกข้อมูลจะเก็บค่าทั้งหมด 50 วัฏจักรต่อเนื่องกัน เพื่อวิเคราะห์กระบวนการเผาไหม้ ควบคุมอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นและน้ำมันหล่อลื่นที่ 85°C วัดปริมาณสารมลพิษที่ออกมา กับไอเสียด้วยเครื่องวิเคราะห์สารมลพิษไอเสีย AVL AMA 1800 ซึ่งการติดตั้งอุปกรณ์และแผนผังการทดสอบดังแสดงตามรูปที่ 1



รูปที่ 1. แผนผังการติดตั้งเครื่องยนต์และอุปกรณ์การทดสอบ [1]

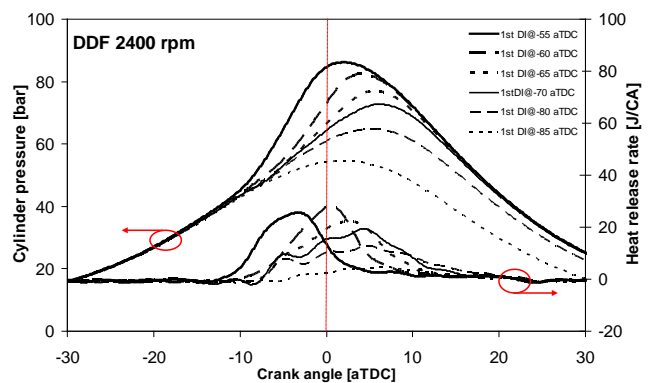
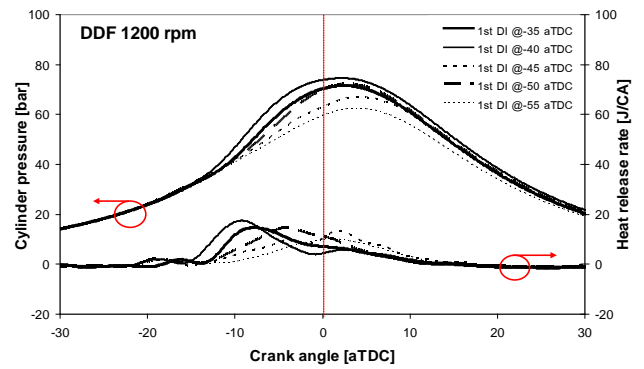
การทดสอบการทำงานของเครื่องยนต์ เชื้อเพลิงร่วม ใช้สัดส่วนก๊าซธรรมชาติต่อสัดส่วนพลังความร้อนของเชื้อเพลิงทั้งหมด (น้ำมันดีเซล + ก๊าซธรรมชาติ) ในการทดสอบที่สภาวะ 1200 rpm ประมาณ 36 % (NG 0.135 kg/hr: Diesel 0.18 kg/hr) และที่ 2400 rpm ประมาณ 70 % (NG 0.65 kg/hr: Diesel 0.20 kg/hr)

3. ผลการทดลอง

การนำเทคนิคการฉีดน้ำมันดีเซล 2 ครั้งต่อวัฏจักรการทำงาน ปรับตำแหน่งการฉีดล่วงหน้า “1st DI” และคง “2nd DI” ใกล้เคียงกับตำแหน่งศูนย์ตายบน มาช่วยควบคุมการเผาไหม้ เพื่อให้เครื่องยนต์เชื้อเพลิงร่วม ทำงานได้ดียิ่งขึ้นได้ลักษณะการฉีดน้ำมันดีเซลเหมาะสมที่สุด โดยผลจากการทดสอบมีรายละเอียดดังนี้

3.1. เครื่องยนต์ทำงานที่ภาระต่ำ (Low load)

การเผาไหม้ของเครื่องยนต์เชื้อเพลิงรวมที่ใช้วิธีการฉีดน้ำมันดีเซล 2 ครั้ง ทดสอบด้วย ภาระเครื่องยนต์ที่ค่าความดันยังผลเฉลี่ยบ่งชี้ประมาณ 2 บาร์ พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยยะสำคัญ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะการเผาไหม้นี้จะส่งผลให้ภาระเครื่องยนต์เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย รวมทั้งเสถียรภาพของการทำงาน จากข้อมูลความดันยังผลเฉลี่ยบ่งชี้ (IMEP) อัตราการเพิ่มขึ้นของความดัน (Pressure rise rate) และค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของความดันยังผลเฉลี่ยบ่งชี้ (COV of IMEP) การปรับตำแหน่งการฉีดล่วงหน้าของ “1st DI” เกินกว่า -55° aTDC สำหรับสภาวะ 1200 rpm และ -85° aTDC ที่สภาวะ 2400 rpm พบว่ามีบางวัฏจักรที่ไม่เกิดการเผาไหม้ขึ้น ทำให้เครื่องยนต์ที่ทำงานแบบ DDF เดินไม่เรียบ จากรูปที่ 2 แสดงผลความดันในกระบอกสูบและอัตราการปลดปล่อยพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ในขณะนี้ การฉีดล่วงหน้ามากขึ้นมีแนวโน้มให้ความดันในกระบอกสูบสูงขึ้น ค่าสูงสุดของอัตราการปล่อยความร้อนสูงขึ้นและเกิดที่ตำแหน่งล่วงหน้ามากขึ้นสำหรับการทดสอบที่ 1200 rpm ขณะที่สภาวะ 2400 rpm มีแนวโน้มในลักษณะตรงกันข้าม



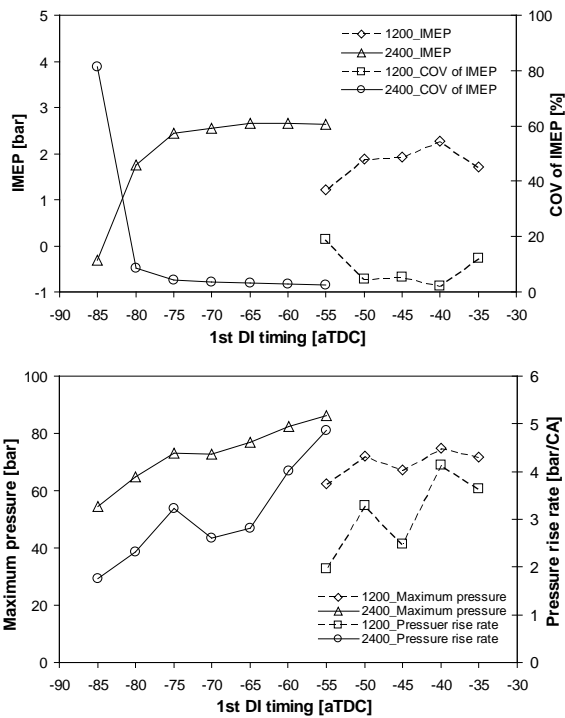
รูปที่ 2 แผนภูมิความดันในกระบอกสูบและอัตราการปล่อยพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์เชื้อเพลิงร่วม จากการปรับจังหวะการฉีดน้ำมันดีเซลล่วงหน้า ที่ความเร็วรอบ 1200 และ 2400 rpm ภาระเครื่องยนต์ IMEP 2 bar

3.1.1 ที่สภาวะ 1200 รอบต่อนาที

ที่สภาวะเครื่องยนต์ทำงาน 1200 rpm ใช้สัดส่วนพลังงานของก๊าซธรรมชาติต่อเชื้อเพลิงทั้งหมดประมาณ 35% ดังนั้นพลังงานส่วนใหญ่จากการเผาไหม้จึงมาจากน้ำมันดีเซล จากรูปที่ 3 ค่า IMEP และ COV of IMEP ค่อนข้างคงที่ในช่วง -40 ถึง -50° aTDC หากทำการฉีด “1st DI” ล่วงหน้าออกนอกช่วงนี้ไป ค่า COV of IMEP สูงขึ้นเครื่องยนต์มีความแปรปรวนสูงขึ้น สำหรับความดันสูงสุดในกระบอกสูบและ Pressure rise rate ตลอดช่วงการทดสอบมีแนวโน้มลดลง

การฉีดน้ำมันดีเซล “1st DI” ล่วงหน้ามากขึ้นระหว่าง -35° aTDC ถึง -55° aTDC และฉีด “2nd DI” ที่ตำแหน่ง -5° aTDC ซึ่งการเผาไหม้ได้เริ่มต้นไปก่อนแล้ว จึงเป็นไปได้ว่าการฉีด “2nd DI” นี้ไปช่วยการเผา

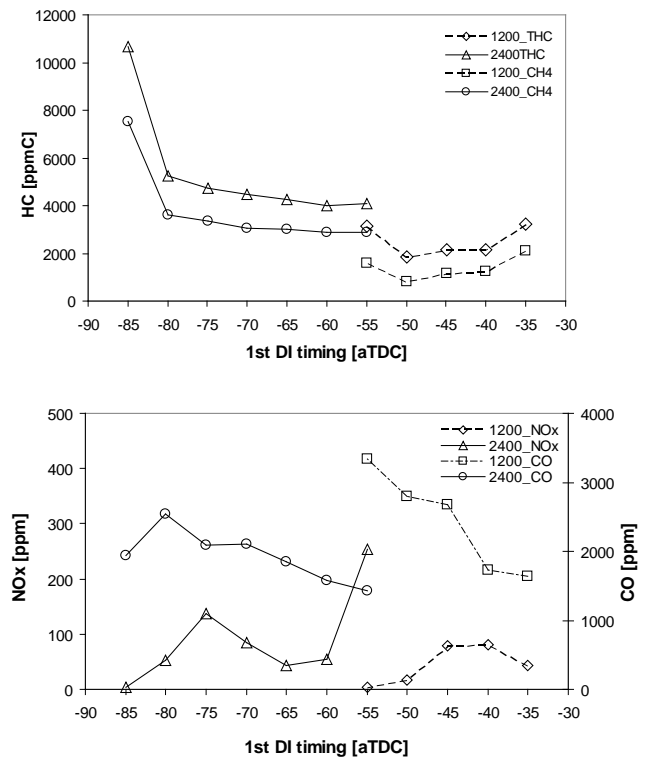
ใหม่ในช่วง Mixing control combustion อย่างไรก็ดี ตามผลของการฉีด "1st DI" ล่วงหน้ามากขึ้นทำให้ จังหวะการเผาไหม้เกิดขึ้นล่วงหน้ามากขึ้น ซึ่งถ้าการเผาไหม้เกิดขึ้นในช่วงปลายจังหวะอัดก็จะทำให้ Negative Work สูงขึ้น จากรูปที่ 4 จังหวะการฉีดน้ำมันดีเซล "1st DI" ส่งผลต่อปริมาณสารมลพิษไอเสียด้วยเช่นกัน ปริมาณไฮโดรคาร์บอนมีแนวโน้มลดต่ำลงเมื่อฉีด "1st DI" ล่วงหน้ามากขึ้น ซึ่งพบค่าต่ำสุดคือ 820 ppmC ที่ -50 °aTDC หลังจากนั้นจะพบแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้น ขณะที่ค่า CO มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อทำการฉีด "1st DI" ล่วงหน้ามากขึ้น



รูปที่ 3 แผนภูมิแสดง IMEP, COV of IMEP, ความดันสูงสุดในกระบอกสูบ และ Pressure rise rate ของเครื่องยนต์เชื้อเพลิงร่วม จากการปรับจังหวะการฉีดน้ำมันดีเซลล่วงหน้า ที่สภาวะ 1200 และ 2400 rpm

แต่ปริมาณ HC และ CO ก็ยังถือว่าสูงมากเมื่อเทียบกับเครื่องยนต์ดีเซล ทั้งนี้เนื่องจากที่ภาระต่ำเครื่องยนต์ใช้ปริมาณน้ำมันดีเซลน้อยมาก ทำให้การลามของเปลวไฟไปสู่ส่วนผสมของก๊าซกับอากาศ โดยรอบที่บางมาก เป็นไปได้ยาก [4-6] Ignition delay ยาวกว่าในเครื่องยนต์ดีเซลปกติ ดังนั้นเมื่อลูกลูกสูบ

เคลื่อนที่ลงในจังหวะขยายตัว ปริมาตรห้องเผาไหม้ขยาย อุณหภูมิของ สารผสมในบริเวณ burn zone ลดลง ทำให้อัตราการเกิด ปฏิกิริยาเคมีของสารผสมที่ช้าอยู่แล้วกลับช้ายิ่งขึ้นไปอีก เป็นสาเหตุให้เกิด HC และ CO [3] ในขณะที่ NO_x ซึ่งเป็นจุดเด่นของเครื่องยนต์เชื้อเพลิงร่วม พบว่ามีแนวโน้มลดต่ำลงและค่าที่วัดได้ถือว่าต่ำมากเมื่อเทียบกับเครื่องยนต์ดีเซลทั่วไป ดังนั้นการทดสอบที่ 1200 rpm การฉีด "1st DI" ล่วงหน้าที่ -40 °aTDC เป็นตำแหน่งที่ดีที่สุด



รูปที่ 4 แผนภูมิแสดงปริมาณสารมลพิษไอเสียของเครื่องยนต์เชื้อเพลิงร่วม จากการปรับตำแหน่งการฉีดน้ำมันดีเซลล่วงหน้า ที่สภาวะ 1200 และ 2400 rpm

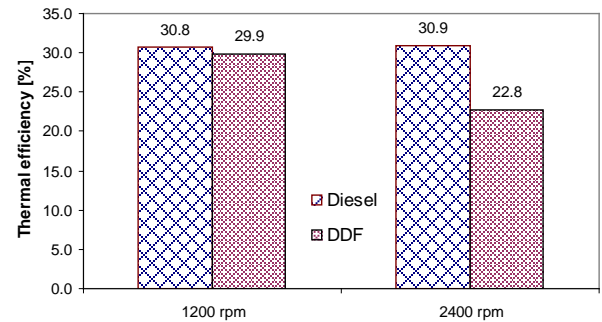
3.1.2 ที่สภาวะ 2400 รอบต่อนาที

ที่สภาวะเครื่องยนต์ทำงาน 2400 rpm ใช้สัดส่วนพลังงานของก๊าซธรรมชาติต่อเชื้อเพลิงทั้งหมดประมาณ 70% ปรับการฉีด "1st DI" ระหว่าง -55 °aTDC ถึง -85 °aTDC และคงการฉีด "2nd DI" ไว้ที่ -26 °aTDC จากรูปที่ 2 การฉีด "1st DI" ล่วงหน้ามากขึ้น ทำให้ความดันในกระบอกสูบและอัตราการเผาไหม้ลดลง จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลความดันใน

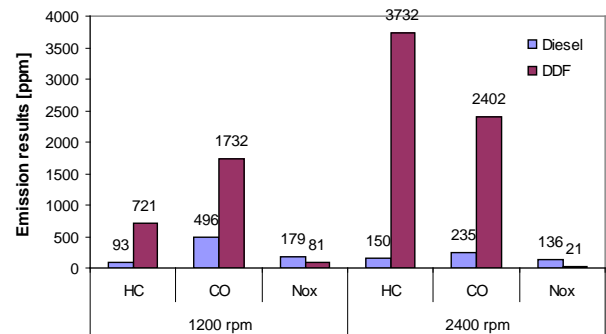
กระบอกสูบ พบว่าการเผาไหม้เกิดขึ้นล่าช้าลงและใช้เวลานานขึ้น การเผาไหม้เริ่มต้นขึ้นโดยที่การฉีดน้ำมันดีเซล “1st DI” และ “2nd DI” ถูกฉีดไปหมดแล้ว ทำให้การเผาไหม้มีลักษณะเป็น PCCI combustion พลังงานจากการเผาไหม้ส่วนใหญ่มาจากก๊าซธรรมชาติ น้ำมันดีเซลที่ฉีดเข้าไปเป็น Pilot diesel ที่ช่วยให้ส่วนผสมจุดระเบิดได้ง่ายขึ้น [3] และการฉีดน้ำมันดีเซลสองครั้งนั้นช่วยให้การเผาไหม้มีความนุ่มนวลขึ้น [1] รูปที่ 3 แสดง IMEP และ COV of IMEP จะเห็นว่า การฉีด “1st DI” ล่วงหน้ามากขึ้นจาก -55 °aTDC ถึง -75 °aTDC ค่า IMEP มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย จนเมื่อปรับจังหวะการฉีด “1st DI” มากกว่า -75 °aTDC จึงพบการลดลงที่เด่นชัดขึ้น เครื่องยนต์เริ่มเดินไม่เรียบ ซึ่ง COV of IMEP ก็จะมีเพิ่มสูงขึ้น ขณะที่ความดันสูงสุดในกระบอกสูบ และ Pressure rise rate มีค่าลดลง ซึ่งเป็นผลของการฉีด “1st DI” ล่วงหน้ามากขึ้น ทำให้การเผาไหม้แยลงและมีผลต่ออุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ สารผสมจึงจุดระเบิดได้ยากขึ้น จากรูปที่ 4 ปริมาณสารมลพิษไอเสียของเครื่องยนต์ที่สภาวะ 2400 rpm THC และ CH₄ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อฉีด “1st DI” ล่วงหน้ามากขึ้นจากการเผาไหม้ที่มีลักษณะเป็น Premixed มากขึ้น โดยที่ตำแหน่ง -85 °aTDC นั้นมีค่าที่สูงมากถึง 7540 ppmC เนื่องจากสารผสมบางส่วนไม่เกิดการเผาไหม้ CO มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นคล้ายกับการทดสอบที่สภาวะ 1200 rpm ในช่วง -55 ถึง -85 °aTDC แต่ที่ตำแหน่งการฉีด “1st DI” -85 °aTDC พบว่ามีค่าลดลงเนื่องจาก Incomplete oxidation สำหรับปริมาณความเข้มข้นของ NO_x ในภาพรวมค่อนข้างต่ำ แนวโน้มของค่า NO_x เมื่อปรับการตำแหน่งฉีด “1st DI” ที่พบค่อนข้างซับซ้อน ช่วงที่มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นของ NO_x เป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของบริเวณในห้องเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิสูงทำให้เกิดสภาวะที่บริเวณอุณหภูมิสูงในช่วงเวลานานขึ้น ผู้วิจัยตั้งสมมติฐานว่าการเปลี่ยนแปลงของ NO_x ที่พบนี้เป็นผลจากความสม่ำเสมอของส่วนผสมในห้องเผาไหม้ที่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นการทดสอบที่สภาวะภาระต่ำ 2400 rpm นี้การฉีด “1st DI” ล่วงหน้า

ที่ -60 °aTDC น่าจะเป็นตำแหน่งที่ดีที่สุดหากพิจารณาถึงการกำจัด CH₄ ที่ทำได้ยากกว่าการกำจัด CO

3.2 เปรียบเทียบสภาวะการทำงานที่ดีของเครื่องยนต์ DDF กับเครื่องยนต์ดีเซล



รูปที่ 5 แผนภูมิ แสดงการเปรียบเทียบผลของประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องยนต์ดีเซลกับเครื่องยนต์เชื้อเพลิงร่วม จากการปรับตำแหน่งการฉีดน้ำมันดีเซลล่วงหน้า ที่สภาวะที่ดีที่สุดของการทดสอบที่ 1200 และ 2400 rpm



รูปที่ 6 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบผลปริมาณมลพิษไอเสียในเครื่องยนต์ดีเซลกับเครื่องยนต์เชื้อเพลิงร่วม จากการปรับตำแหน่งการฉีดน้ำมันดีเซลล่วงหน้า ที่สภาวะที่ดีที่สุดของการทดสอบที่ 1200 และ 2400 rpm

จากผลการทดสอบหาตำแหน่งการฉีดน้ำมันดีเซลล่วงหน้า ที่ตำแหน่งต่างๆ ทั้งที่สภาวะ 1200 และ 2400 rpm นำผลการทดสอบของตำแหน่งการฉีดที่ให้ผลการทำงานของเครื่องยนต์ DDF ที่ดีที่สุดมาเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์ดีเซลซึ่งแสดงในรูปที่ 5

เปรียบเทียบผลของประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องยนต์และรูปที่ 6 แสดงผลการวัดปริมาณสารมลพิษไอเสีย จะเห็นว่าที่สภาวะ 1200 rpm สามารถทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องยนต์ DDF ได้ใกล้เคียงกับการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซลมาก ในขณะที่ปริมาณความเข้มข้นสารมลพิษ HC และ CO สูงขึ้นมาก มีเพียงปริมาณ NO_x เท่านั้นที่ลดลงเกินกว่า 50%

ที่สภาวะการทดสอบ 2400 rpm ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องยนต์ DDF มีค่า 22.8% ซึ่งต่ำกว่าเครื่องยนต์ดีเซล (มีค่า 30.9 %) มาก ปริมาณความเข้มข้นของสารมลพิษทั้ง HC CO และ NO_x แตกต่างจากเครื่องยนต์ดีเซลในทำนองเดียวกันกับที่สังเกตได้จากสภาวะ 1200 rpm เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องยนต์ DDF และเครื่องยนต์ดีเซล พบว่ามีความแตกต่างที่ชัดเจนกว่าที่สภาวะ 1200 rpm เนื่องจากสัดส่วนการใช้ก๊าซธรรมชาติต่อเชื้อเพลิงทั้งหมดที่ต่างกัน อย่างไรก็ตาม สัดส่วนก๊าซธรรมชาติเป็นเพียงพารามิเตอร์ตัวหนึ่งที่มีผลกระทบเท่านั้น

ผลจากงานวิจัยของ Wannatong et al. [8] ได้แสดงประสิทธิภาพของเครื่องยนต์เชื้อเพลิงร่วมที่เทียบเท่าหรือสูงกว่าของเครื่องยนต์ดีเซลทั่วไปเมื่อทำการควบคุมเทคนิคการฉีดดีเซลร่วมกับการใช้ไอเสียย้อนกลับ (EGR) และการใช้เทอร์โบชาร์จเจอร์ โดยเครื่องยนต์วิจัยดังกล่าว มีอัตราส่วนการอัดที่ 18.5:1 นอกจากนี้ การทำงานแบบ PCCI ค่าอัตราส่วนการอัดที่ลดลงมีผลให้ปริมาณ HC มีแนวโน้มลดลง ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ [9]

4.สรุป

จากผลการศึกษาทดสอบการปรับตำแหน่งการฉีดน้ำมันดีเซลในเครื่องยนต์เชื้อเพลิงร่วม ที่ทำงานในช่วงภาระต่ำ สามารถสรุปผลว่า

- จังหวะและปริมาณการฉีดน้ำมันดีเซลในลักษณะต่างๆ ส่งผลโดยตรงต่อคุณลักษณะของกระบวนการเผาไหม้

- รูปแบบการฉีดน้ำมันดีเซลที่ต่างกันส่งผลให้จังหวะการจุดระเบิด อัตราการปล่อยพลังงานเคมี และปริมาณสารมลพิษไอเสียที่ต่างกัน
- การปรับตำแหน่งการฉีดน้ำมันดีเซลในตำแหน่งที่เหมาะสมทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องยนต์ DDF รวมถึงลดปริมาณสารมลพิษไอเสีย แม้ว่าปริมาณ HC และ CO ยังสูงเมื่อเทียบกับเครื่องยนต์ดีเซล

ผลจากงานวิจัยนี้สามารถเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการควบคุมการทำงานของเครื่องยนต์และเป็นแนวทางสำหรับการดัดแปลงเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงร่วมต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ คุณ นิโรจน์ อัครปัญญาวิทย์ และคุณสมชาย เสียงเสนาะ จากสถาบันวิจัยและเทคโนโลยี ปตท. ในการสนับสนุนห้องปฏิบัติการ อุปกรณ์เครื่องมือทดสอบ และคำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ในการศึกษาวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

1. Aroonsrisopon, T., Salad, M., Wirojsakunchai, E., Wannatong, K., Siangsanorh, S., and Akarapanjavit, N., "Injection Strategies for Operational Improvement of Diesel Dual Fuel Engine under Low Load Conditions," *SAE Technical Paper* No. 2009-01-1797, 2009.
2. Karim, G.A., Liu, Z., and Jones, W., "Exhaust Emissions from Dual Fuel Engines at Light Load," *SAE Technical Paper* No. 932822, 1993.
3. Karim, G.A., "Combustion in Gas Fuelled Compression-Ignition Engines," *ASME ICE Fall Technical Conference*, 351, 2000.
4. Papagiannakis, R.G., and Hountalas, D.T., "Experimental Investigation Concerning the Effect of Natural Gas Percentage on Performance and

Emissions of a DI Dual Fuel Diesel Engine,” *Applied Thermal Engineering*, Vol. 23, pp. 353-365, 2003.

5. Papagiannakis, R.G., Hountalas, D.T., Rakopoulos, C.D., and Rakopoulos, D.C., “Combustion and Performance Characteristics of a DI Diesel Engine Operating from Low to High Natural Gas Supplement Ratios at Various Operating Conditions,” *SAE Technical Paper No. 2008-01-1392*, 2008.

6. Singh, S., Krishnan, S.R., Srinivasan, K.K., and Midkiff, K.C., “Effect of Pilot Injection Timing, Pilot Quantity and Intake Charge Conditions on Performance and Emissions for an Advanced Low- Pilot-Ignited Natural Gas Engine,” *International Journal of Engine Research*, Vol. 5, No. 4, JER 00404, 2004.

7. Wannatong, K., Akarapanjavit, N., Siangsanorh, S., and Chanchaona, S., “Combustion and Knock Characteristics of Natural Gas Diesel Dual Fuel Engine,” *SAE Technical Paper No. 2007-01-2047*, 2007.

8. Wannatong, K., Akarapanjavit, N., Siangsanorh, S., Aroonsrisopon, T., and Chanchaona, S., “New Diesel Dual Fuel Concepts: Part Load Improvement,” *SAE Technical Paper No. 2009-01-1797*, 2009.

9. Haraldsson, G., Tunestål, P., Johansson, B., and Hyvonen, J., “HCCI Combustion Phasing in a Multi-Cylinder Engine Using Variable Compression Ratio,” *SAE Technical Paper No. 2002-01-2858*, 2002.