

## ผลกระทบของจังหวะการฉีดเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ก๊าซธรรมชาติ

### Effects of Injection Timings in an MPI Natural Gas Engine

เชียวชาญ ห้าวหาญ<sup>1</sup> และ เชษฐวุฒิ ภูมิพัฒน์พงศ์<sup>1,2</sup>

#### บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาเกี่ยวกับพลังงานทางเลือกซึ่งมีความจำเป็นอย่างสูงในปัจจุบัน โดยมีเป้าหมายเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพและลดปริมาณมลพิษในไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลขนาด 2,197 cc สีสูบ สี จังหวะ ที่ถูกดัดแปลงมาเพื่อใช้เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติระบบหัวฉีดแบบแยกสูบ การศึกษาได้มุ่งเข้าสู่ประเด็นของการทดสอบที่สภาวะความเร็วคงที่ 1500 rpm แต่ได้ทำการเปลี่ยนแปลงภาระและจังหวะการจุดระเบิดของเครื่องยนต์ จังหวะการฉีดเชื้อเพลิงในงานวิจัยมีความสัมพันธ์กับจังหวะการทำงานของลิ้นไอดีที่ 40°BTDC, 8°BTDC, 103.5°ATDC และ 77°ABDC ผลการทดสอบพบว่า การฉีดเชื้อเพลิงในจังหวะที่ลิ้นไอดีปิด (77°ABDC) ทำให้เครื่องยนต์เกิดการน็อกอย่างรุนแรง แต่การฉีดเชื้อเพลิงที่ 103.5°ATDC สามารถเพิ่มกำลังเครื่องยนต์ได้ประมาณ 1.0% การฉีดเชื้อเพลิงเร็วขึ้น (Advancing) ทำให้ปริมาณมลพิษไฮโดรคาร์บอนและออกไซด์ของไนโตรเจนลดลงประมาณ 4.8% - 8.5%

**คำสำคัญ :** เครื่องยนต์ดีเซล, ก๊าซธรรมชาติ, ระบบหัวฉีดก๊าซ, จังหวะการฉีดเชื้อเพลิง

#### Abstract

This paper research is a part of alternative fuel field which is presently very significant. The purpose of this investigation was to improve the engine efficiencies and to reduce the exhaust gas emissions. The test engine was a 2,197 cc, four-stroke and four-cylinder natural gas dedicated diesel engine. The engine was modified and installed an MPI natural gas system. The study focused only on the engine speed of 1500 rpm. The engine load, ignition timing and gas injection timing were changed. The injection timing for the research was selected at 40°BTDC, 8°BTDC, 103.5°ATDC and 77°ABDC which relate to the intake valve timing. The result showed that the injection timing of 77°ABDC caused a severe knocking while the injection timing of 103.5°ATDC increased 1.0% of the engine power. Advancing the injection timing could decrease THC and NO<sub>x</sub> around 4.8% - 8.5%.

**Keywords :** Diesel engine, Natural gas, Injection system, Injection timing

<sup>1</sup> อาจารย์, ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องต้นกำลัง, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

<sup>2</sup> นักวิจัย, ศูนย์วิจัยพลังงานยานยนต์เพื่อสิ่งแวดล้อม, สำนักวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

## 1. บทนำ

ระบบต่างๆ ของเครื่องยนต์ถูกพัฒนาโดยตลอดเพื่อให้ใช้เชื้อเพลิงได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด ในอดีตการจ่ายเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ทำโดยใช้คาร์บูเรเตอร์ (สำหรับน้ำมัน) หรือมิกเซอร์ (สำหรับก๊าซ) อุปกรณ์เหล่านี้ทำหน้าที่ผสมเชื้อเพลิงกับอากาศให้เป็นเนื้อเดียวกันก่อนจะถูกดูดเข้าสู่ห้องเผาไหม้ หลังจากนั้นได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ที่สามารถทำให้การทำงานของเครื่องยนต์มีประสิทธิภาพมากขึ้นโดยการเปลี่ยนเอาอุปกรณ์ผสมเชื้อเพลิงกับอากาศออก และใช้ระบบหัวฉีดเชื้อเพลิงอิเล็กทรอนิกส์เข้ามาแทนที่

ลักษณะการฉีดเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์แก๊สโซลีนแบ่งออกเป็น (1) การฉีดแบบตำแหน่งเดียวหรือการฉีดบริเวณเรือนลิ้นเร่ง (Throttle Body Fuel Injection หรือ Single Point Port Fuel Injection; SPI) (2) การฉีดแบบแยกตามลูกสูบ (Multipoint Port Fuel Injection; MPI) และ (3) การฉีดตรงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ (Direct Injection) [1-2] ระบบเหล่านี้ทำงานภายใต้การควบคุมด้วยหน่วยควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Control Unit; ECU) จึงทำให้การควบคุมปริมาณเชื้อเพลิงเป็นไปอย่างรวดเร็วและแม่นยำมาก

ข้อดีของการใช้อิเล็กทรอนิกส์มาควบคุมการฉีดเชื้อเพลิงไม่ใช่เพียงความสามารถในการกำหนดปริมาณการฉีดเพียงเท่านั้น แต่การกำหนดจังหวะในการฉีดเชื้อเพลิง (Injection Timing) ก็สามารถทำได้เช่นเดียวกัน

ในการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซล จังหวะการฉีดเชื้อเพลิงเป็นปัจจัยที่สำคัญมากเป็นอันดับต้นๆ เพราะการปรับเปลี่ยนจังหวะการฉีดเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลให้เร็วขึ้นหรือช้าลงเป็นตัวกำหนดจุดเริ่มต้นการสันดาปในวัฏจักร หรือกล่าวคือจังหวะการฉีดเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลมีความสำคัญเทียบเท่าจังหวะการจุดระเบิดในเครื่องยนต์แก๊สโซลีน แต่เมื่อกลับมาพิจารณาการทำงานของเครื่องยนต์แก๊สโซลีนจะพบว่ามีความแปรปรวนมากยที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องยนต์ เช่น ความเร็วรอบ (Engine Speed) ภาระ (Load) จังหวะการจุดระเบิด (Ignition Timing) จังหวะการฉีดเชื้อเพลิง (Injection Timing) และอัตราส่วนผสม (Air-Fuel Ratio) ฯลฯ ตำราทางวิชาการต่างๆ แทบจะไม่มีมีการระบุถึงผลกระทบและ

ความสำคัญของจังหวะการฉีดเชื้อเพลิงเลย อย่างไรก็ตาม ได้มีงานวิจัยยืนยันว่าจังหวะการฉีดเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์แก๊สโซลีนมีผลกระทบต่ออุณหภูมิไอดี การกระจายตัวของส่วนผสม และสมรรถนะของเครื่องยนต์ [3]

## 2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การเตรียมไอดีหรือสารผสมระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟที่ใช้กันในปัจจุบันมีอยู่สองระบบหลักๆ ได้แก่ ระบบดูด และระบบหัวฉีด

### 2.1 ระบบดูดก๊าซ

ระบบดูดก๊าซ (Fumigation System) ลักษณะเด่นของระบบดูดคือ การใช้อุปกรณ์ผสมอากาศเข้ากับเชื้อเพลิงในบริเวณท่อร่วมไอดีที่เรียกว่า “ก๊าซมิกเซอร์ (Gas Mixer)” อากาศที่ไหลผ่านก๊าซมิกเซอร์จะถูกเร่งความเร็วผ่านคอคออดเพื่อผสมอากาศให้เข้ากับเชื้อเพลิง

### 2.2 ระบบหัวฉีดก๊าซ

ระบบหัวฉีดก๊าซ (Injection System) จะไม่มีก๊าซมิกเซอร์อยู่ในระบบ แต่จะใช้หัวฉีดในการป้อนเชื้อเพลิง การทำงานของหัวฉีด (Injector) จะเป็นไปตามจังหวะการสั่งการของหน่วยควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Control Module; ECM)

ระบบหัวฉีดรุ่นแรกๆ เป็นการฉีดแบบรวม หรือหัวฉีดแบบตำแหน่งเดียว (Single Point Port Fuel Injection; SPI) โดยจะมีหัวฉีดเพียงอันเดียวหรือหลายอันก็ได้อยู่บริเวณลิ้นปีกผีเสื้อ หัวฉีดนี้จะจ่ายเชื้อเพลิงให้แก่ทุกสูบไปตามท่อไอดี ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ซับซ้อนน้อยกว่าแบบหัวฉีดเฉพาะสูบ การควบคุมง่ายเพราะหลายสถานะเป็นการฉีดแบบต่อเนื่อง [1]

ระบบหัวฉีดอีกแบบหนึ่งเป็นการแยกหัวฉีดออกไปตามสูบ (Multi Point Port Injection; MPI) เชื้อเพลิงจะถูกฉีดไปที่ตำแหน่งใกล้เคียงไอดีซึ่งเป็นช่วงที่เปรียบเสมือนว่าเป็นบริเวณที่อากาศอยู่นิ่ง จึงเกิดการคลุกเคล้าได้ไม่มากนัก แต่เนื่องจากเชื้อเพลิงอยู่ในสถานะก๊าซจึงไม่เกิดปัญหาในด้านนี้ การใช้หัวฉีดแบบแยกสูบทำให้ควบคุมปริมาณเชื้อเพลิงเหมาะสมกับแต่ละสูบและเหมาะสมกับแต่ละวัฏจักร ระบบนี้จึงได้เปรียบระบบดูดและระบบหัวฉีดก๊าซแบบรวม [4]

Yonggyu และคณะ [3] ได้ทำการทดสอบเครื่องยนต์หนึ่งสูบที่จุดระเบิดด้วยการอัด เพื่อศึกษาผลกระทบของจังหวะการฉีดเชื้อเพลิงต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์ เชื้อเพลิงในการทดสอบเป็นเชื้อเพลิงดีเซลที่ทำหน้าที่ให้เกิดการจุดระเบิด และเชื้อเพลิงก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) เป็นเชื้อเพลิงหลักในการเผาไหม้ ระบบการจ่ายเชื้อเพลิงก๊าซเป็นระบบดูด (Fumigation System) การทดสอบพบว่าประสิทธิภาพเชิงปริมาตรสามารถเพิ่มขึ้นได้จากการฉีดเชื้อเพลิงดีเซลให้เร็วขึ้น (Advancing) อันเนื่องมาจากความดันและอุณหภูมิที่สูงขึ้น ในขณะที่ระยะเวลาการเผาไหม้ (Burning Duration) ยังคงเท่าเดิม ปริมาณ  $\text{NO}_x$  ในไอเสียได้เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิการเผาไหม้ และคาดว่าค่าการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ขึ้นนี้เป็นสาเหตุที่ทำให้ปริมาณ CO ลดลง

Alla และคณะ [5] ได้ศึกษาผลกระทบของจังหวะการฉีดเชื้อเพลิงต่อสมรรถนะเครื่องยนต์พลังงานร่วม โดยทำการทดสอบบนเครื่องยนต์ดีเซลระบบฉีดตรง (Direct Injection) หนึ่งสูบ โดยเชื้อเพลิงดีเซลมีหน้าที่เป็นเชื้อเพลิงฉีดนำ (Pilot Injection) ส่วนเชื้อเพลิงมีเทนและโพรเพนจะเป็นพลังงานหลัก จังหวะการฉีดเชื้อเพลิงในการทดสอบคือ  $25^\circ$  BTDC  $27.5^\circ$  BTDC และ  $30^\circ$  BTDC ผลการทดสอบแสดงว่าการฉีดเชื้อเพลิงล่าช้าทำให้เกิดค่าลง อุณหภูมิการเผาไหม้ไม่เพียงพอต่อการแผ่กระจายของเปลวเพลิง ปริมาณไฮโดรคาร์บอนและคาร์บอนมอนนอกไซด์เพิ่มขึ้น ในทางกลับกัน การฉีดเชื้อเพลิงก่อน (Early) ทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนและปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจนสูงขึ้น

เชษฐวุฒิ ภูมิพัฒน์พงศ์ และดิเรก ชูวีเชียร [4] ได้ทดสอบเปรียบเทียบระบบดูดก๊าซและระบบหัวฉีดก๊าซในเครื่องยนต์ก๊าซธรรมชาติ ที่ความเร็วรอบคงที่ 1,800 rpm ที่ภาระ 25% และ 100% ผลการทดสอบยืนยันว่าระบบหัวฉีดก๊าซแบบแยกสูบ (MPI) มีประสิทธิภาพเชิงปริมาตรสูงกว่าระบบดูดก๊าซประมาณ 5% ถึง 7% เป็นผลให้แรงบิดและกำลังสูงกว่าระบบดูดก๊าซประมาณ 5% ถึง 10% และลดปริมาณมลพิษคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) ได้ถึง 50% ข้อเสียเพียงสิ่งเดียวที่พบในระบบหัวฉีดแบบแยกสูบคือปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจนที่สูงมากหากเครื่องยนต์ทำงานที่ภาระ 100%

งานวิจัยของ Fleming และ Neal [6] ได้ศึกษาวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องยนต์เชื้อเพลิงแก๊สธรรมชาติที่จุดระเบิดด้วยประกายไฟ พบว่าระบบการจ่ายเชื้อเพลิงด้วยอิเล็กทรอนิกส์จะมีความยืดหยุ่นในการใช้งานสูงมาก กล่าวคือระบบการจ่ายเชื้อเพลิงด้วยหัวฉีดอิเล็กทรอนิกส์สามารถใช้กับท่อร่วมไอดีหลากหลายรูปแบบ และสามารถเพิ่มอัตราการไหลของอากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้ได้ อีกประการหนึ่งก็คือเครื่องยนต์จะสามารถเลือกใช้อัตราส่วนกำลังอัดที่สูงขึ้นได้ เพราะระบบอิเล็กทรอนิกส์มีการประมวลผลและควบคุมปริมาณการฉีดน้ำมันได้อย่างละเอียด กำลังของเครื่องยนต์ย่อมสูงขึ้นอย่างแน่นอน

การศึกษาเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างระบบ Direct Injection กับระบบหัวฉีดธรรมดาในเครื่องยนต์แก๊สโซลีนโดย Antoni และคณะ [7] ได้ข้อสรุปว่าระบบ Gasoline Direct Injection สามารถลดอัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะได้ประมาณ 30% และระบบนี้สามารถใช้อัตราส่วนการอัดได้สูงกว่าระบบอื่นๆ ประกอบกับยังสามารถใช้เชื้อเพลิงที่มีออกเทนต่ำลงได้ด้วย สมรรถนะในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลง (Transient Response) รวมไปถึงมลภาวะจากไอเสียอยู่ในระดับที่ดีกว่าระบบหัวฉีดแบบธรรมดา

### 3. ขั้นตอนการทดสอบเครื่องยนต์

เครื่องยนต์ทดสอบเป็นเครื่องยนต์ Daedong 4A220A-S1 สี่สูบ สี่จังหวะ ขนาดความจุ 2,197 cc อัตราส่วนการอัด 10:1 ที่ติดตั้งบนเครื่องทดสอบกำลังเครื่องยนต์ Hwanwoong Eddy Current Engine Dynamometer ขนาด 130 kW เพื่อศึกษาผลกระทบของจังหวะการฉีดเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติต่อสมรรถนะในด้านต่างๆ รวมถึงมลพิษของเครื่องยนต์ ระบบการฉีดก๊าซธรรมชาติในการทดสอบนี้เป็นระบบการฉีดแบบแยกตามลูกสูบ (MPI) ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยปริมาณการฉีดเชื้อเพลิง จังหวะการฉีดเชื้อเพลิง และจังหวะการจุดระเบิด (Ignition Timing) ถูกควบคุมโดยผู้ทดสอบผ่านทางหน่วยควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ MOTEC M800 และไอเสียจากเครื่องยนต์ถูกเก็บบันทึกโดยเครื่องวิเคราะห์ไอเสีย MEXA 9100 DEGR HORIBA Exhaust Gas Analyzer

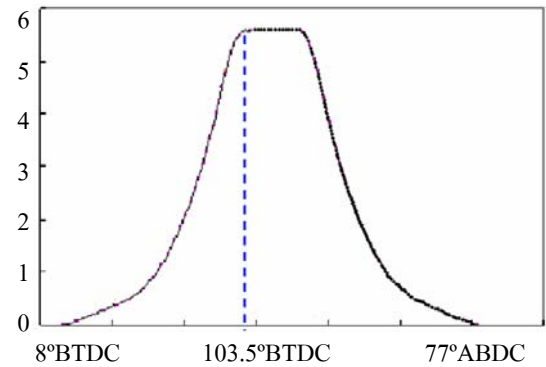


รูปที่ 1 ระบบหัวฉีดก๊าซธรรมชาติแบบแยกสูบ (MPI)

สภาวะการทดสอบเครื่องยนต์ถูกกำหนดที่ความเร็วรอบคงที่ 1,500 rpm อัตราส่วนผสมอากาศต่อเชื้อเพลิงเป็นไปตามทฤษฎี (Stoichiometric) ภาระ (Load) ที่ใช้ทดสอบประกอบไปด้วย 25%, 50% และ 100% โดยทุกภาระการทดสอบได้ทำการเปลี่ยนแปลงจังหวะการจุดระเบิด (Ignition Timing) ระหว่าง  $15^{\circ}$ - $54^{\circ}$  ก่อนศูนย์ตายบน (Before Top Dead Center; BTDC)

จังหวะการฉีดเชื้อเพลิงในงานวิจัยนี้เปลี่ยนแปลงไปโดยมีความสัมพันธ์กับจังหวะการเปิดและปิดลิ้นไอดีของเครื่องยนต์ดังนี้

Valve Lift (mm)



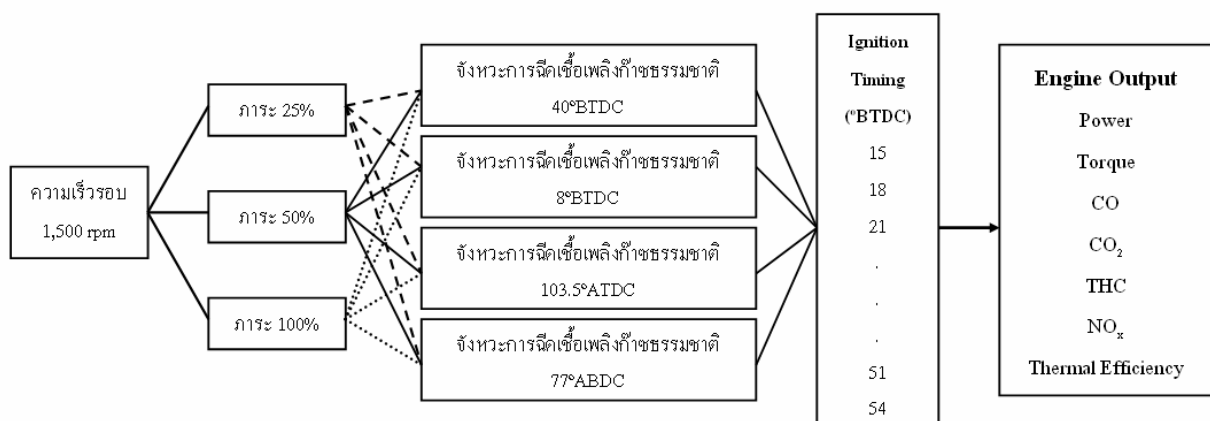
รูปที่ 2 จังหวะลิ้นไอดีของเครื่องยนต์ทดสอบ

(1) ทำการฉีดเชื้อเพลิงที่ตำแหน่ง  $40^{\circ}$  ก่อนศูนย์ตายบน (Before Top Dead Center; BTDC) ซึ่งเป็นตัวแทนของการฉีดเชื้อเพลิงก่อนลิ้นไอดีเปิด

(2) ทำการฉีดเชื้อเพลิงที่ตำแหน่ง  $8^{\circ}$  BTDC ซึ่งเป็นการฉีดเชื้อเพลิง ณ ตำแหน่งลิ้นไอดีเริ่มเปิดพอดี

(3) ทำการฉีดเชื้อเพลิงที่ตำแหน่ง  $103.5^{\circ}$  หลังศูนย์ตายบน (After Top Dead Center; ATDC) ซึ่งเป็นการฉีดเชื้อเพลิงขณะระยะยก (Valve Lift) ของลิ้นไอดีสูงที่สุด

(4) ทำการฉีดเชื้อเพลิงที่ตำแหน่ง  $77^{\circ}$  หลังศูนย์ตายล่าง (After Bottom Dead Center; ABDC) ซึ่งเป็นการฉีดเชื้อเพลิงขณะลิ้นไอดีปิด



รูปที่ 3 แสดงแผนภูมิขั้นตอนการทดสอบเครื่องยนต์

รูปที่ 3 แสดงแผนภูมิขั้นตอนการทดสอบเครื่องยนต์โดยมีตัวแปรการทดลองเป็นจังหวะการฉีดเชื้อเพลิง และตัวแปรตามคือกำลัง แรงบิด มลพิษจากท่อไอเสียและประสิทธิภาพเชิงความร้อน

#### 4. ผลการทดสอบ

การนำเสนอผลการทดสอบเครื่องยนต์ในแต่ละค่าเกิดจากการหาค่าเฉลี่ยจากการเก็บข้อมูลจำนวน 30 ครั้ง และคณะผู้วิจัยได้ทำการเลือกค่า ณ ตำแหน่งการจุดระเบิดที่ทำให้แรงบิดสูงสุด (Maximum Brake Torque Ignition Timing; MBT) กราฟแต่ละรูปดังแสดงในรูปที่ 4 ถึงรูปที่ 9 จึงควรประกอบด้วยตัวแปรต้นทั้งหมด 4 ตัว ดังนี้ (1) 40° BTDC (2) 8° BTDC (3) 103.5° ATDC และ (4) 77° ABDC แต่เนื่องจากจังหวะการฉีดเชื้อเพลิงขณะลิ้นไอดีปิด (77° ABDC) นั้น ทำให้เครื่องยนต์ทำงานไม่เป็นปกติกล่าวคือ มีเสียงน็อกดังอยู่ตลอดเวลาประกอบกับปริมาณมลพิษไฮโดรคาร์บอน (Total Hydrocarbon; THC) ที่ออกจากไอดีนั้นสูงขึ้นกว่าปกติมาก ซึ่งสภาวะแบบนี้จะทำให้เครื่องยนต์เกิดความเสียหายอย่างแน่นอน การเก็บข้อมูลของการทดสอบเครื่องยนต์ที่จังหวะการฉีดเชื้อเพลิง 77° ABDC จึงไม่สามารถทำได้ ทั้งนี้ สาเหตุของการทำงานที่ผิดปกติของเครื่องยนต์อาจจะเกิดมาจากเหตุสามประการดังนี้

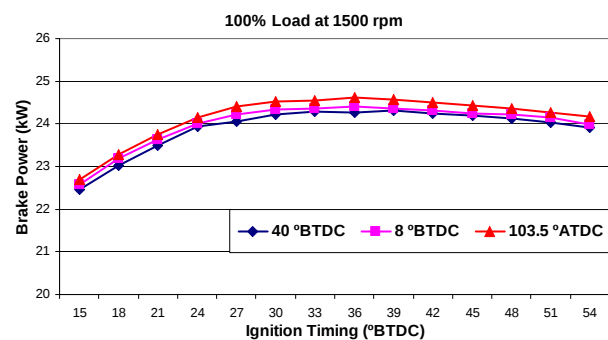
(1) ระยะเวลาสำหรับการผสมให้เชื้อเพลิงเข้ากับอากาศเป็นเนื้อเดียวกันนั้นสั้นมาก เพราะการฉีดเชื้อเพลิงเกิดที่ 77° ABDC หรือเท่ากับ 103° BTDC แต่การจุดระเบิดในการทดสอบเริ่มที่ 18° - 54° BTDC

(2) โมเมนตัมของอากาศที่ถูกดูดเข้าสู่ห้องเผาไหม้ขณะลิ้นไอดีปิดนั้นต่ำมาก เชื้อเพลิงจึงไหลเข้าด้วยพลังงานที่ต่ำ

(3) อุณหภูมิของเชื้อเพลิงที่ต่ำกว่าอากาศภายในห้องเผาไหม้ ทำให้ต้องใช้เวลาช่วงหนึ่งในการถ่ายเทความร้อน สาเหตุเหล่านี้ส่งผลให้บริเวณลิ้นไอดีมีความเข้มข้นของเชื้อเพลิงสูงกว่าส่วนอื่นๆ ในห้องเผาไหม้ ส่วนผสมของอากาศกับเชื้อเพลิง (Mixture) ในห้องเผาไหม้จะเกิดการจุดระเบิดจึงไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous) ลักษณะการเคลื่อนที่ของหน้าเปลวไฟ (Frame Front) จึงไม่เป็นปกติ [1] การนำเสนอ

ผลการทดสอบจึงทำได้เพียงการฉีดเชื้อเพลิงที่สามจังหวะแรกเท่านั้น

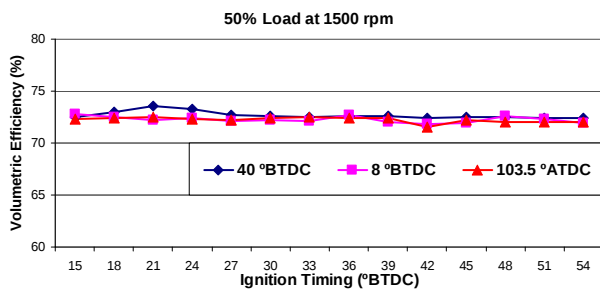
ผลการทดสอบที่ภาระเครื่องยนต์ต่ำ (Low Load) พบว่าตำแหน่งการฉีดเชื้อเพลิงทั้งสามตำแหน่ง (40° BTDC, 8° BTDC และ 103.5° ATDC) แทบจะไม่ทำให้เกิดความแตกต่างของแรงบิดและกำลัง แต่เมื่อภาระของเครื่องยนต์สูงขึ้น (100% Load) ดังแสดงในรูปที่ 4 ตำแหน่งการฉีดเชื้อเพลิงทำให้เกิดความแตกต่างได้ในทุกจังหวะการจุดระเบิด กล่าวคือ การฉีดเชื้อเพลิงที่ 8° BTDC สามารถเพิ่มแรงบิดและกำลังของเครื่องยนต์จากการฉีดเชื้อเพลิงที่ 40° BTDC ได้ประมาณ 0.20% ถึง 0.64% ในขณะที่การฉีดเชื้อเพลิงที่ 103.5° ATDC ได้ทำให้กำลังและแรงบิดเพิ่มขึ้นประมาณ 0.9% ถึง 1.1%



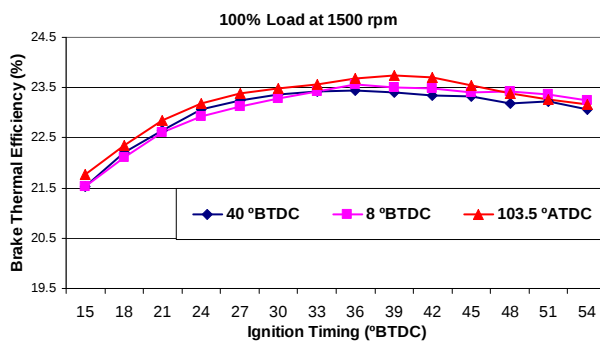
รูปที่ 4 ผลกระทบของจังหวะการฉีดเชื้อเพลิงต่อกำลังของเครื่องยนต์ที่ภาระ 100%

จังหวะการฉีดเชื้อเพลิงไม่น่าจะส่งผลกระทบหรืออาจส่งผลกระทบที่น้อยมากต่อประสิทธิภาพเชิงปริมาตรเนื่องจากผลการทดสอบในทุกๆ ภาระ พบว่าประสิทธิภาพเชิงปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลงไปตามการเปลี่ยนจังหวะการฉีดเชื้อเพลิงดังแสดงในรูปที่ 5 ทั้งนี้ประสิทธิภาพเชิงปริมาตรนั้นได้มาจากการคำนวณมวลของอากาศที่ถูกดูดเข้าสู่ห้องเผาไหม้เครื่องยนต์ที่ดูดอากาศและเชื้อเพลิงเข้าไปพร้อมกัน (เช่น เครื่องยนต์ระบบดูด ระบบหัวฉีด SPI และ ระบบหัวฉีด MPI เป็นต้น) จึงมีประสิทธิภาพต่ำกว่าเครื่องยนต์ที่ดูดเฉพาะอากาศอย่างเดียว (ระบบ Direct Injection) เพราะเชื้อเพลิงส่วนหนึ่งได้เข้าไปแย่งที่ของอากาศ โดยงานวิจัยของ Yusoff [8] ที่ได้

ศึกษาเกี่ยวกับจังหวะการทำงานของลิ้นและจังหวะการจุดระเบิดในเครื่องยนต์ก๊าซธรรมชาติที่ใช้ระบบฉีดตรง ยืนยันว่าการดูดอากาศเพียงอย่างเดียว (Pure Air) จะมีประสิทธิภาพเชิงปริมาตรสูงกว่าการดูดส่วนผสมอากาศและเชื้อเพลิง (Air-Fuel Mixture) และต้องทำการฉีดเชื้อเพลิงให้มีความสัมพันธ์กับจังหวะการทำงานของทั้งลิ้นไอดีและลิ้นไอเสียด้วย (Intake Valve and Exhaust Valve Timing)



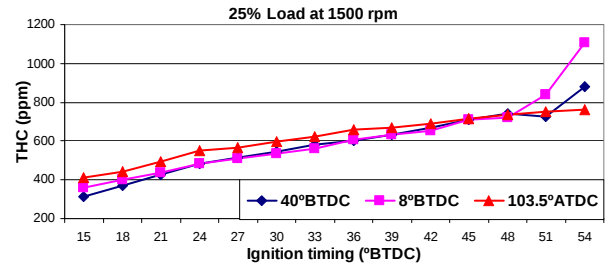
รูปที่ 5 ผลกระทบของจังหวะการฉีดเชื้อเพลิงต่อประสิทธิภาพเชิงปริมาตรของเครื่องยนต์



รูปที่ 6 ผลกระทบของจังหวะการฉีดเชื้อเพลิงต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องยนต์

ขั้นตอนการทดสอบได้กำหนดให้อัตราส่วนผสมอากาศและเชื้อเพลิงมีค่าเท่ากับ 16.83 (ส่วนผสมเป็นไปตามทฤษฎี) ประกอบกับมวลของอากาศที่เข้าสู่กระบอกสูบนั้นไม่ขึ้นกับจังหวะการฉีดเชื้อเพลิง (ดังแสดงในรูปที่ 5) ดังนั้น มวลของเชื้อเพลิงที่เข้าสู่กระบอกสูบในแต่ละจังหวะการฉีดเชื้อเพลิงนั้นย่อมเท่ากันด้วย เมื่ออัตราการไหลของเชื้อเพลิงเท่ากัน ประสิทธิภาพเชิงความร้อนก็แปรผันไปตามกำลังเพียงอย่าง

เดียว การฉีดเชื้อเพลิงที่ 103.5°ATDC จึงทำให้มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงที่สุดดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 7 ผลกระทบของจังหวะการฉีดเชื้อเพลิงต่อปริมาณมลพิษไฮโดรคาร์บอน

การฉีดเชื้อเพลิงที่ 40°BTDC และ 8°BTDC แทบจะไม่เกิดความแตกต่างกันในปริมาณไฮโดรคาร์บอน แต่รูปที่ 7 ได้แสดงว่าการฉีดเชื้อเพลิงที่ 103.5°ATDC ทำให้ปริมาณมลพิษสูงขึ้นเฉลี่ยประมาณ 4.8% ถึง 8.5% ทั้งนี้เนื่องจากสาเหตุคือที่ตำแหน่ง 40°BTDC เป็นตำแหน่งที่ลิ้นไอดียังไม่เปิด อากาศบริเวณใกล้ลิ้นไอดีไม่มีการเคลื่อนที่ การฉีดเชื้อเพลิงที่ตำแหน่งนี้ทำให้การผสมเชื้อเพลิงเข้ากับอากาศเกิดขึ้นได้ไม่ดี แต่เมื่อลิ้นไอดีเปิด ความดันภายในห้องเผาไหม้ที่ต่ำจะดูดอากาศและเชื้อเพลิงไหลเข้าสู่ห้องเผาไหม้อย่างรวดเร็วอันทำให้เกิดการผสมกันได้เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous Mixture) ส่วนการฉีดที่ตำแหน่ง 8°BTDC อากาศและเชื้อเพลิงก็จะถูกดูดเข้าห้องเผาไหม้อย่างรวดเร็วเช่นเดียวกัน ส่วนผสมภายในห้องเผาไหม้จึงไม่น่าจะแตกต่างจากการฉีดที่ตำแหน่ง 40°BTDC มากนัก

ในขณะที่การฉีดเชื้อเพลิงที่ตำแหน่ง 103.5°ATDC เป็นตำแหน่งที่ลิ้นไอดีเปิดสูงสุด อากาศที่ไหลเข้าสู่ห้องเผาไหม้มีพลังงานและโมเมนตัมการไหลที่ลดต่ำลงมากแล้ว การผสมอากาศเข้ากับเชื้อเพลิงนั้นอาจจะไม่สมบูรณ์เท่ากับการฉีดที่ตำแหน่ง 40°BTDC หรือ 8°BTDC ซึ่งสอดคล้องกับข้อสรุปที่กล่าวถึงวิธีการลดปริมาณไฮโดรคาร์บอนในไอเสีย [9] คือการฉีดเชื้อเพลิงให้ผสมก่อน (Premixing) เพื่อให้ส่วนผสมเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น (More-Homogeneous Mixture)

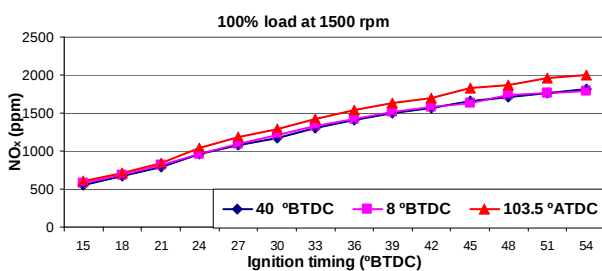
ข้อสังเกตอีกจุดหนึ่งในรูปที่ 7 คือ แนวโน้มการเกิดอาการน็อกของเครื่องยนต์การทดสอบได้พบว่า

(1) การทดสอบที่ภาระ 25% ได้เกิดการน็อกอย่างรุนแรงมาก (Knocking) ของการฉีดที่ตำแหน่ง 40°BTDC และ 8°BTDC แต่ไม่แสดงอาการน็อกเลยเมื่อทำการฉีดที่ตำแหน่ง 103.5°ATDC (อาการน็อกเป็นการเผาไหม้แบบผิดปกติหรือไม่สมบูรณ์จึงทำให้ปริมาณไฮโดรคาร์บอนในไอเสียเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเกิดเสียงน็อกรุนแรง) [1,10-11]

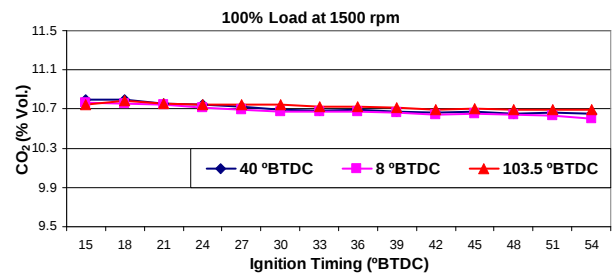
(2) การทดสอบที่ภาระ 50% ได้มีแนวโน้มที่จะเกิดการน็อกเมื่อทำการฉีดเชื้อเพลิงที่ 40°BTDC และ 8°BTDC แต่ไม่แสดงอาการน็อกเมื่อทำการฉีดที่ตำแหน่ง 103.5°ATDC

(3) การทดสอบที่ภาระ 100% ได้เกิดการน็อกของการฉีดที่ตำแหน่ง 40°BTDC และ 8°BTDC ที่รุนแรงน้อยกว่าที่ภาระ 25% แต่มากกว่าที่ภาระ 50% โดยไม่แสดงอาการน็อกเลยเมื่อทำการฉีดที่ตำแหน่ง 103.5°ATDC

จังหวะการฉีดเชื้อเพลิงที่ตำแหน่ง 103.5°ATDC ทำให้ได้กำลังเครื่องยนต์สูงกว่าการฉีดเชื้อเพลิงที่ตำแหน่งอื่นๆ (จากรูปที่ 4) แสดงว่าเครื่องยนต์ได้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์มากกว่าซึ่งภายในห้องเผาไหม้จะมีความดันและอุณหภูมิที่สูงจึงทำให้เกิดมลพิษประเภทออกไซด์ของไนโตรเจนสูงตามไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 8 แต่การศึกษานี้ไม่สามารถสรุปถึงผลกระทบของจังหวะการฉีดเชื้อเพลิงต่อปริมาณมลพิษคาร์บอนไดออกไซด์ได้ ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 8 ผลกระทบของจังหวะการฉีดเชื้อเพลิงต่อมลพิษออกไซด์ของไนโตรเจน



รูปที่ 9 ผลกระทบของจังหวะการฉีดเชื้อเพลิงต่อมลพิษคาร์บอนไดออกไซด์

## 5. สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการทดสอบ

การศึกษาได้มุ่งเข้าสู่ประเด็นของผลกระทบของจังหวะการฉีดเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติต่อสมรรถนะและมลพิษของเครื่องยนต์ โดยทำการทดสอบที่สภาวะความเร็วคงที่ แต่ได้ทำการเปลี่ยนแปลงภาระและจังหวะการจุดระเบิดของเครื่องยนต์ การทดสอบสามารถสรุปได้ว่า

(1) การเปลี่ยนแปลงจังหวะการฉีดเชื้อเพลิงไม่มีผลต่อประสิทธิภาพเชิงปริมาตร แต่การฉีดเชื้อเพลิงที่ 103.5°ATDC สามารถเพิ่มกำลังเครื่องยนต์ได้ประมาณ 1.0%

(2) การฉีดเชื้อเพลิงเร็วขึ้น (Premixing) ทำให้ปริมาณมลพิษไฮโดรคาร์บอนและออกไซด์ของไนโตรเจนลดลง โดยการฉีดเชื้อเพลิงที่ 40°BTDC และ 8°BTDC มีไฮโดรคาร์บอนต่ำกว่าที่ 103.5°ATDC ประมาณ 4.8% ถึง 8.5%

(3) จังหวะการฉีดเชื้อเพลิงมีผลต่อแนวโน้มการเกิดอาการน็อกของเครื่องยนต์ โดยงานวิจัยนี้ไม่มีข้อมูลเพียงพอที่จะสรุปได้ แต่พบว่าการฉีดเชื้อเพลิงที่ 103.5°ATDC น่าจะลดโอกาสการเกิดอาการน็อกได้ดีที่สุด

(4) การฉีดเชื้อเพลิงในจังหวะที่ใกล้ไอดีปัด (77°ABDC) ทำให้เครื่องยนต์เกิดการน็อกอย่างรุนแรง เนื่องจากเวลาสำหรับการถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศและก๊าซน้อยเกินไป รวมไปถึงการผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันเป็นไปได้ไม่สมบูรณ์ การเผาไหม้จึงผิดปกติและก่อให้เกิดมลพิษไฮโดรคาร์บอนจำนวนมาก

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จึงหวังการฉีดเชื้อเพลิงในงานวิจัยนี้ยังไม่ละเอียดเพียงพอที่จะสรุปได้ว่าจังหวะการฉีดจะส่งผลอย่างไรต่อแนวโน้มการเกิดอาการน็อก และเมื่อสภาวะการทำงานเปลี่ยนแปลงไป (เช่น ภาระและความเร็วรอบ) จะมีแนวโน้มที่มีลักษณะอย่างไร ดังนั้นการศึกษาในอนาคตควรทำการทดสอบที่หลากหลายภาระและหลายช่วงความเร็วรอบ (ต่ำ ปานกลาง และสูง) เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องและน่าเชื่อถือยิ่งขึ้น

การเปลี่ยนชนิดเชื้อเพลิงจากก๊าซธรรมชาติเป็นก๊าซปิโตรเลียมเหลวน่าจะเป็นประโยชน์เช่นเดียวกัน เนื่องจากเทคโนโลยีทั้งสองมีลักษณะคล้ายคลึงกันและให้กันอย่างแพร่หลายในประเทศไทย โดยเฉพาะงานวิจัยที่มุ่งเน้นในเครื่องยนต์ขนาดใหญ่เป็นสิ่งสำคัญเพื่อพัฒนาคุณภาพการติดตั้งระบบก๊าซในประเทศไทยให้ดียิ่งขึ้นและดึงดูดให้ประชาชนสนใจระบบเชื้อเพลิงทางเลือกชนิดนี้มากขึ้น อันจะส่งผลดีในด้านเศรษฐกิจและมลภาวะทางอากาศของประเทศ

## 6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือสำหรับการสนับสนุนทุนการวิจัยในครั้งนี้

## เอกสารอ้างอิง

- 1 W. W. Pulkrabek, Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine, Prentice Hall, 2004.
- 2 EROOM Public Company Limited. [Online] 2008. [Cited 2008 July 7]. Available from [www.eroomkorea.com](http://www.eroomkorea.com)
- 3 L. Yonggyu, K. Changup, O. Seungmook and K.Kernyong, "Effects of Injection Timing on Mixture Distribution in a Liquid-Phase LPG Injection Engine for a Heavy-Duty Vehicle", JSME International Journal, 2004, Vol. 47, No.2, pp. 410-415.
- 4 เชษฐวุฒิ ภูมิพัฒน์พงศ์ และดิเรก ชูวิเชียร, "การทดสอบเปรียบเทียบระบบดูดก๊าซและระบบหัวฉีดก๊าซในเครื่องยนต์ดีเซลที่ดัดแปลงเพื่อใช้ก๊าซธรรมชาติ", วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, 2552, ปีที่ 5, ฉบับที่ 1, หน้า 1-8.
- 5 G.H. A. Alla, H.A. Soliman, O.A. Badr and M.F.A. Rabbo, "Effect of Injection Timing on the Performance of a Dual Fuel Engine" Energy Conversion & Management, 2002, Vol. 43, pp.269-277.
- 6 R. D. Fleming and G. B. O'Neal, "Potential for Improving the Efficiency of Spark Ignition Engine for Natural Gas Fuel", SAE 852073, 1985, Vol.94, pp. 461-471.
- 7 J. Antoni, A. Sandel, J. Seczyk and S. J. Barbara, "Some Problems of Improvement of Fuel Efficiency and Emissions in Internal Combustion Engines", Journal of KONES Internal Combustion Engines, 2002, No. 1-2, pp. 333-356.
- 8 A. Yusoff, M. Zailani and I. K. Muthana, "Valve Timing and Ignition Issues in fuel system for Compressed Natural Gas Direct Injection (CNGDI). Faculty of Engineering, Universiti Kebangsaan Malaysia.
- 9 E. F. Obert, Internal Combustion Engines and Air Pollution, HarperCollins Publishers, 1973.
- 10 J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill, 1988.
- 11 R. Stone, Introduction to Internal Combustion Engine, SAE International, 1995.