

# การวิเคราะห์การปล่อยพลังงานของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดที่ใช้เชื้อเพลิง DME

## Analysis of Energy Release of CI Engine Operating on DME

คณิต วัฒนวิเชียร\*, เกริกไกร ยวมิตร

ห้องปฏิบัติการวิจัยเครื่องยนต์สันดาปภายใน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถ.พญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330 โทร 0-2-218-6607 โทรสาร 0-2-252-2889

\*E-mail : wkanit@chula.ac.th

### บทคัดย่อ

DME (DI-Methyl Ether) เป็นเชื้อเพลิงทางเลือกที่สะอาด, มีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด และสามารถนำมาใช้ทดแทนการใช้น้ำมันดีเซลได้โดยปราศจากควันดำ แต่เนื่องจาก DME มีค่าความร้อนน้อยกว่าน้ำมันดีเซล ทำให้แรงบิดที่สภาวะภาระสูงสุดที่ได้ต่ำกว่า การวิเคราะห์การปล่อยพลังงานจากการเผาไหม้จากข้อมูลความดันที่วัดได้จากการใช้ DME เป็นเชื้อเพลิงหลักในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดชนิดฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงขนาดเล็ก พบว่าช่วงล่าช้าการจุดระเบิดมีค่าสั้นและมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของความดันในห้องเผาไหม้และอัตราการปล่อยพลังงานสูง ซึ่งแสดงผลในงานวิจัยจะเป็นข้อมูลสำคัญที่จะช่วยให้การประยุกต์ใช้ DME เป็นเชื้อเพลิงทดแทนเป็นไปได้โดยมีประสิทธิภาพสูงสุดต่อไป

### Abstract

DME (DI-Methyl Ether) is a clean alternative fuel, suitable for compression ignition engine, which can replace diesel fuel without black exhaust smoke. However, since DME contains lower heating value than diesel fuel, its torque at full load becomes lower as well. A study on combustion energy concluded the following information: Energy Release derived from pressure data in small direct injection engine (DME used as primary fuel), shows the ignition delay is short and rates of change in pressure and energy release are high. The data in this study is potentially significant development towards the higher efficient application of DME as a substitute fuel.

### 1. คำนำ

เนื่องจากปัญหาด้านมลพิษและปริมาณน้ำมันปิโตรเลียมเริ่มลดน้อยลงอันเกิดจากการใช้น้ำมันเป็นจำนวนมาก ซึ่งน้ำมันดีเซลก็เป็นหนึ่งในเชื้อเพลิงที่มีปริมาณการใช้ในแต่ละวันเป็นปริมาณมากและเป็นต้นกำเนิดของมลพิษทางอากาศ จึงได้มีการมองหาทางเลือกต่าง ๆ ดังกล่าว ซึ่งพบว่า DME (Di-Methyl Ether) เป็นอีกทางเลือกที่จะแก้ปัญหาด้านมลพิษและสามารถนำมาใช้ทดแทนการใช้น้ำมันดีเซลได้

จากโครงสร้างของเชื้อเพลิง พบว่า DME มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบอยู่ระหว่างคาร์บอน ทำให้ในกระบวนการเผาไหม้ที่ไม่มีพันธะระหว่างคาร์บอนจึงไม่เกิดเขม่าจากการเผาไหม้ รวมทั้งไม่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบ ทำให้ไม่เกิด  $SO_x$  จากกระบวนการเผาไหม้ แต่การที่จะนำ DME มาใช้ในเครื่องยนต์ CI นั้นจำเป็นต้องมีการศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ในหลายด้าน เพราะคุณสมบัติของเชื้อเพลิงมีความแตกต่างกับเชื้อเพลิงดีเซล ซึ่งจะมีผลต่อเครื่องยนต์ในหลายด้าน เช่น ลักษณะการเผาไหม้ และมลภาวะที่เกิดขึ้น ฯลฯ

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาการนำ DME มาใช้ในเครื่องยนต์ CI โดยจะใช้เป็นเชื้อเพลิงหลัก โดยจะศึกษาเกี่ยวกับการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลชนิดฉีดเชื้อเพลิงโดยตรง เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการพิจารณานำ DME มาใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก ชนิดฉีดเชื้อเพลิงโดยตรง และเป็นแนวทางในการนำ DME มาใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลขนาดกลางและขนาดใหญ่ต่อไป

### 2. ทฤษฎีและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 การเผาไหม้ในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด

ลักษณะที่สำคัญของกระบวนการเผาไหม้ในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดหรือเครื่องยนต์ดีเซลนั้นพอสรุปได้ คือ เชื้อเพลิงจะถูกฉีดเข้าไปในกระบอกสูบโดยระบบฉีดเชื้อเพลิงที่ปลายของจังหวะอัดก่อนการเริ่มต้นการเผาไหม้ที่ต้องการเล็กน้อย ตามปกติเชื้อเพลิงจะถูกฉีดเข้าไปด้วยความเร็วสูงโดยผ่านรูหัวฉีด เมื่อเชื้อเพลิงผ่านพ้นปลายของหัวฉีดก็จะแตกเป็นละอองฝอยและพุ่งเข้าไปในห้องเผาไหม้แล้วระเหยผสมกับอากาศที่มีอุณหภูมิและความดันสูงที่อยู่ในกระบอกสูบเนื่องจากอุณหภูมิและความดันของอากาศสูงกว่าจุดการจุดระเบิดเองของเชื้อเพลิง การจุดระเบิดเองของส่วนที่เป็นสารผสมเชื้อเพลิงกับอากาศก็จะเกิดขึ้นหลังช่วงล่าช้าไม่ท้องคามุมข้อเหวี่ยง เมื่อเกิดการเผาไหม้ของสารผสมเชื้อเพลิงกับอากาศขึ้น ความดันกระบอกสูบก็จะเพิ่มขึ้น เป็นผลให้เกิดการอัดส่วนที่ยังไม่เผาไหม้ ซึ่งทำให้ช่วงล่าช้าก่อนการจุดระเบิดของสารผสมเชื้อเพลิงกับอากาศที่ได้ผสมกันโดยมีสัดส่วนอยู่ในขีดจำกัดที่สามารถเผาไหม้ได้นั้นสั้นลง การเผาไหม้ก็จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว

### 2.1.1 ชนิดของระบบการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ CI

ระบบการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ CI แบ่งตามการออกแบบห้องเผาไหม้เป็น 2 ชนิด คือ ระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรง (direct-injection system, DI system) ซึ่งมีห้องเผาไหม้เปิดห้องเดียวและเชื้อเพลิงจะถูกฉีดเข้าไปโดยตรงในห้องเผาไหม้นั้น อีกระบบหนึ่งคือ ระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยอ้อม (indirect-injection, IDI system) ซึ่งมีห้องเผาไหม้ที่ถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน และเชื้อเพลิงถูกฉีดเข้าไปในห้องเผาไหม้ก่อน (prechamber) ซึ่งต่อกับห้องเผาไหม้หลัก (main chamber)

### 2.2 การวิเคราะห์ข้อมูลความดันกระบอกสูบสำหรับเครื่องยนต์ CI ระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรง

ข้อมูลความดันกระบอกสูบที่มุมข้อเหวี่ยงต่างๆ ตลอดช่วงจังหวะอัดและขยายตัวสามารถนำไปใช้วิเคราะห์ในการหาอัตราการปล่อยพลังงานเคมีของเชื้อเพลิง โดยวิธีการหานั้นกระทำได้โดยใช้กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ สำหรับระบบเปิด ดังแสดงในรูปที่ 1 เมื่อพิจารณาให้อยู่ในสภาวะที่ความดันและอุณหภูมิคงที่ ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ คือ

$$\frac{dQ}{dt} - P \frac{dV}{dt} + \sum_i m_i h_i = \frac{dU}{dt} \quad (1)$$

โดยที่

$\frac{dQ}{dt}$  เป็นอัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านขอบเขตของระบบเข้าไปในระบบ

ในระบบ

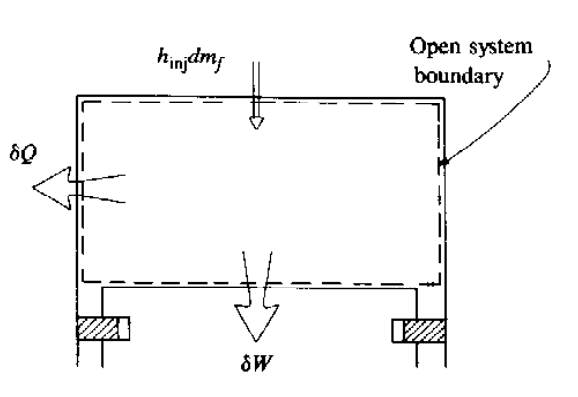
$P \frac{dV}{dt}$  เป็นอัตราการถ่ายเทงานเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของลูกสูบ

ลูกสูบ

$m_i$  เป็นอัตราการไหลของมวลเข้าไปในระบบ

$h_i$  เป็นเอนทัลปีของมวล  $i$  ที่เข้าหรือออกจากระบบ

$U$  เป็นพลังงานของสารที่อยู่ภายในขอบเขตของระบบ



รูปที่ 1 แสดงระบบเปิดสำหรับการวิเคราะห์อัตราการปล่อยความร้อนของกระบวนการเผาไหม้

### 3. ไดเมทิลอีเทอร์ (Di-Methyl Ether หรือ DME)

DME เป็นแหล่งพลังงานใหม่ ซึ่งเชื่อว่าจะนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ได้และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เพราะ DME เป็นเชื้อเพลิงที่สะอาด จาก

การที่ DME เป็นเชื้อเพลิงที่มีจุดเดือดต่ำ จึงอยู่ในสถานะแก๊สที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ ในการนำ DME ไปใช้งานจะต้องบรรจุไว้ในรูปของของเหลวภายในถังบรรจุ โดยสามารถทำให้เป็นของเหลวได้ที่อุณหภูมิ  $-25^{\circ}\text{C}$  หรือ หรืออัดที่ความดันประมาณ 6 bar

กระบวนการเกิด DME มีอยู่ 2 ขั้นตอน คือ กระบวนการแรกเริ่มจากการเปลี่ยนรูปของ syngas ไปเป็นเมทานอล (methanol synthesis) จากนั้นกระบวนการที่สองคือการเปลี่ยนรูปจากเมทานอลเป็น DME โดยกระบวนการ methanol dehydration หรือ กระบวนการนำน้ำออกจากเมทานอลนั่นเอง

DME มีสูตรทางเคมี (chemical formula) คือ  $\text{CH}_3\text{OCH}_3$  หรือ  $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$  ซึ่งมีออกซิเจน (oxygen) เป็นองค์ประกอบ โดย DME มีคุณสมบัติทางกายภาพคล้ายกับก๊าซหุงต้ม (Liquefied Petroleum Gas หรือ LPG) ในกระบวนการการเผาไหม้ของ DME จะมีเปลวไฟในการเผาไหม้เป็นสีฟ้าอย่างเห็นได้ชัด

DME มีข้อดีคือ ไม่เกิดเขม่า (soot) จากกระบวนการการเผาไหม้ และมีข้อเสียคือ มีคุณสมบัติในการหล่อลื่นต่ำ รวมทั้งมี energy content ต่ำ

| Property                                                          | Di-Methyl Ether                |
|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| Chemical formula                                                  | $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ |
| Mole weight [g/mol]                                               | 46.07                          |
| C ratio [Wt%]                                                     | 52.2                           |
| H ratio [Wt%]                                                     | 13                             |
| O ratio [Wt%]                                                     | 34.8                           |
| S ratio [Wt%]                                                     | 0                              |
| Stoich. A/F ratio                                                 | 9                              |
| Boiling Point [ $^{\circ}\text{C}$ ]                              | -23.5                          |
| Explosion limit in air [vol.%]                                    | 3.4-17                         |
| Auto Ignition temperature [ $^{\circ}\text{C}$ ]                  | 235                            |
| Kinematic Viscosity (liquid) [cSt]                                | <1                             |
| Liquid density at $20^{\circ}\text{C}$ [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] | 668                            |
| Specific density [gas] air                                        | 1.59                           |
| Lower Heating Value [kJ/kg]                                       | 28430                          |
| Specific heat [kJ/kgK]                                            | 2.99                           |
| Vapor pressure @293K [Mpa]                                        | 0.53                           |
| Cetane Number                                                     | 55-60                          |

ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของ DME

### 4. อุปกรณ์และวิธีการทดสอบ

#### 4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบมีดังนี้

#### 4.1.1 เครื่องยนต์ที่ใช้ในการทดสอบ

เครื่องยนต์ที่ใช้ในการทดสอบเป็นเครื่องยนต์ดีเซลแบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงของ KUBOTA รุ่น RT 140 โดยรายละเอียดแสดงไว้ดังตารางที่ 2

|                    |                    |
|--------------------|--------------------|
| ผู้ผลิตเครื่องยนต์ | Kubota             |
| รุ่น               | RT 140             |
| จำนวนลูกสูบ        | Single Cylinder    |
| ระบบห้องเผาไหม้    | Direct Injection   |
| ขนาดกระบอกสูบ      | 97 mm.(Bore)       |
| ช่วงชัก            | 96 mm. (Stroke)    |
| ปริมาตรกระบอกสูบ   | 709 CC.            |
| กำลังสูงสุด        | 10.3 kW / 2400 rpm |
| แรงบิดสูงสุด       | 49.0 Nm /1600 rpm  |
| อัตราส่วนกำลังอัด  | 18:1               |
| หัวฉีด             | ความดัน 21.57 MPa  |

ตารางที่ 2 แสดงรายละเอียดของเครื่องยนต์ที่ใช้ทดสอบ

#### 4.1.2 ไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer)

ไดนาโมมิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบเป็นแบบไฮดรอลิก (Hydraulic Dynamometer) ใช้ในการเบรกการหมุนของเพลลา (Water Brake) ข้อมูลเกี่ยวกับไดนาโมมิเตอร์แสดงดังตารางที่ 3

|                            |                                              |
|----------------------------|----------------------------------------------|
| ประเภทของไดนาโมมิเตอร์     | Hydraulic Dynamometer                        |
| ผู้ผลิต                    | Redman Heenan International Company, England |
| รุ่น                       | Froude Hydraulic Dynamometer (DPX2)          |
| Resolution                 | 0.1 kg.                                      |
| ความยาวแขนสมดุล            | 0.03525 m.                                   |
| กำลังสูงสุดที่สามารถรับได้ | 150/7500 CV/rpm, (1 CV = 0.986 hp)           |

ตารางที่ 3 แสดงรายละเอียดของ Dynamometer

#### 4.1.3 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศ เป็นอุปกรณ์วัดแบบ

Orifice

4.1.4 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ เป็นเทอร์โมคัปเปิลชนิด Type K (Chromel-Alumel, CA) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.65 มม. ซึ่งจะวัดอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่น, น้ำหล่อเย็น, ไอดีและไอเสีย

4.1.5 อุปกรณ์วัดความเร็วรอบ ในการทดสอบนี้ใช้ proximity ชนิด inductive วัดความเร็วรอบของเครื่องยนต์ และใช้พัลส์มิเตอร์ (pulse meter) แสดงความเร็วรอบของเครื่องยนต์ โดยยึดตัว proximity ไว้ที่

ฐานของไดนาโมมิเตอร์ และวัดความเร็วรอบจากการหมุนของหน้าแปลน (flange) เพลลาไดนาโมมิเตอร์ฝั่งตรงข้ามกับเครื่องยนต์

4.1.6 ระบบท่อส่งเชื้อเพลิง เปลี่ยนมาใช้ท่อทนความดันสูงทั้งระบบเนื่องจาก DME ต้องมีการอัดตัวที่ความดันประมาณ 3MPa เพื่อป้องกันการเกิด Vapor Lock

#### 4.1.7 อุปกรณ์วัดความดันภายในกระบอกสูบ

อุปกรณ์สำหรับวัดและเก็บค่าความดันในห้องเผาไหม้และความดันเชื้อเพลิงที่ทางเข้าหัวฉีดใช้ Piezoelectric Pressure Transducer ซึ่งโดยทั่วไปแล้วโครงสร้างจะประกอบด้วยผลึกควอตซ์ ซึ่งจะจ่ายประจุไฟฟ้าออกมาเมื่อมีแรงมากระทำบนผลึก โดยประจุที่จ่ายออกมาจะมีค่าแปรตามแรงที่กระทำ ในการวัดความดันในห้องเผาไหม้จะใช้ Pressure Transducer ยี่ห้อ AVL รุ่น GU12P และในการวัดความดันที่ท่อจ่ายเชื้อเพลิงจะใช้ Pressure Transducer ยี่ห้อ KISTLER รุ่น 607C1

ส่วนการเก็บข้อมูลความดันในห้องเผาไหม้และความดันเชื้อเพลิงที่ทางเข้าหัวฉีดนั้นใช้เครื่อง DEWE-Book เป็นอุปกรณ์เก็บข้อมูลต่างๆ โดยวิเคราะห์ข้อมูลโดยโปรแกรม Combustion Analyzer Version 6 ทำให้สามารถเก็บข้อมูลความดันแบบ real-time ได้

#### 4.1.8 อุปกรณ์วัดสภาวะบรรยากาศ ใช้เทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิ

บรรยากาศ และใช้บาร์โอมิเตอร์วัดความดันบรรยากาศ หน่วย มม.น้ำ

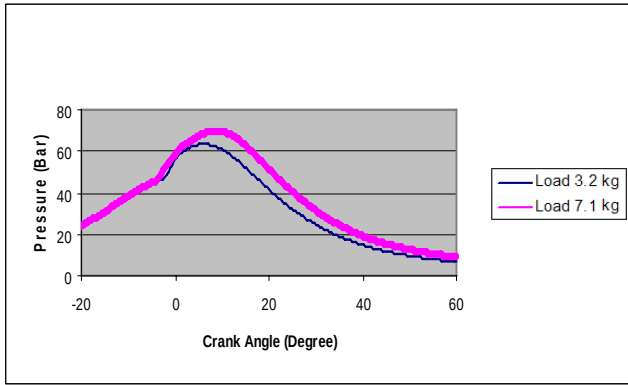
4.1.9 การวัดอัตราสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง การวัดอัตราสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง จะนำถังบรรจุเชื้อเพลิงวางไว้บนตาชั่ง ซึ่งตาชั่งสามารถรับน้ำหนักได้ 60 กิโลกรัม มีความละเอียด 2 กรัมและใช้นาฬิกาจับเวลาจับเวลาของน้ำหนักเชื้อเพลิงที่เปลี่ยนแปลง

#### 4.2 วิธีการทดสอบ

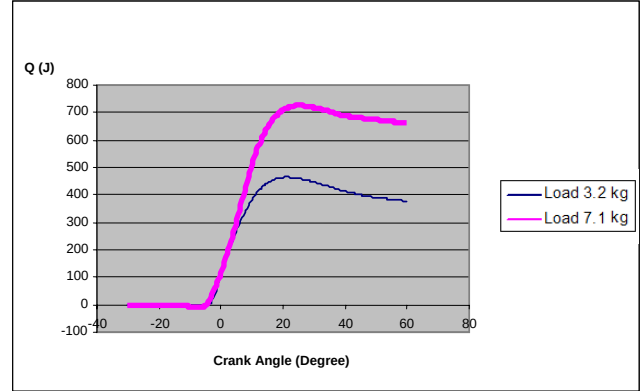
การทดสอบเครื่องยนต์กระทำที่ความเร็วรอบ 1300 รอบต่อนาที และที่แรงบิด 3.2kg และ 7.1kg (ภาระสูงสุด) โดยขั้นแรกจะอุ่นเครื่องที่รอบเดินเบาจนอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นมีค่าประมาณ 70 °C แล้วจึงทำการทดสอบที่ภาระ 3.2kg ทำการเก็บข้อมูลแล้วจึงไปทำการทดสอบที่ภาระ 7.1kg ต่อไป

#### 5. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

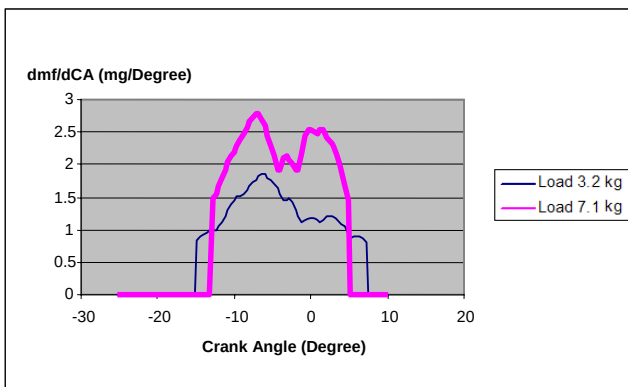
ในการทดสอบนั้นจะทำการทดสอบที่ความเร็วรอบคงที่สำหรับภาระที่แตกต่างกันอันได้แก่ภาระสูงสุดซึ่งมีค่า 7.1kg และภาระบางส่วนคือ 3.2 kg ซึ่งผลจากการทดสอบที่ความเร็วรอบคงที่พบว่าความดันสูงสุดภายในห้องเผาไหม้หลักที่ภาระสูงสุดนั้นจะมีค่ามากกว่าภาระบางส่วนเนื่องจากปริมาณเชื้อเพลิงที่ฉีดเข้าไปในห้องเผาไหม้หลักมีค่ามากกว่าดังแสดงในรูปที่ 2 และ 3



รูปที่ 2 แสดงความดันสูงสุดในห้องเผาไหม้หลักพิจารณาที่  
ความเร็วรอบ 1300 rpm

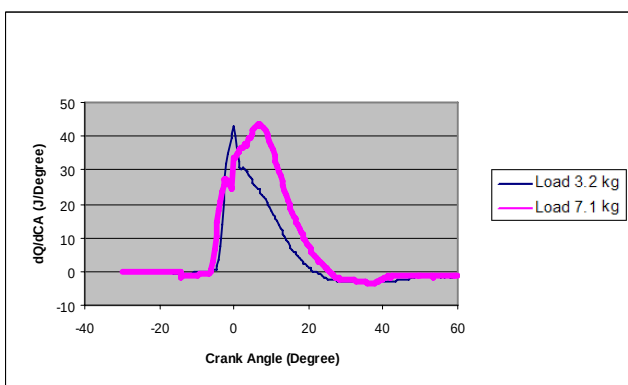


รูปที่ 5 แสดงการปล่อยพลังงานสุทธิพิจารณา  
ที่ความเร็วรอบ 1300 rpm



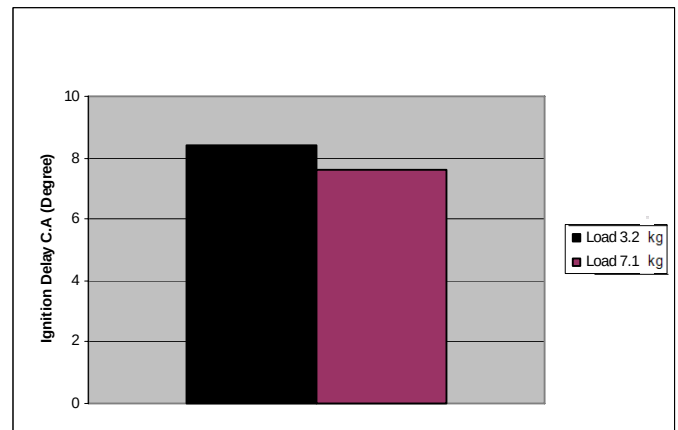
รูปที่ 3 แสดงอัตราการฉีดเชื้อเพลิงพิจารณาที่ความเร็วรอบ 1300 rpm

สำหรับอัตราการปล่อยพลังงานของเชื้อเพลิงพบว่าที่ภาระสูงสุดนั้นจะมีอัตราการปล่อยพลังงานของเชื้อเพลิงและปริมาณการปล่อยพลังงานสุทธิสูงกว่าที่ภาระบางส่วนดังแสดงในรูปที่ 4 และ 5 ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณเชื้อเพลิงที่ฉีดเข้าไปในห้องเผาไหม้หลักดังแสดงไว้ข้างต้นและยังพบว่าช่วงต้นของกราฟอัตราการปล่อยพลังงานของเชื้อเพลิงจะต่ำลงเล็กน้อยเนื่องจากเชื้อเพลิงดูดความร้อนจากภายในห้องเผาไหม้เพื่อระเหยกลายเป็นไอ

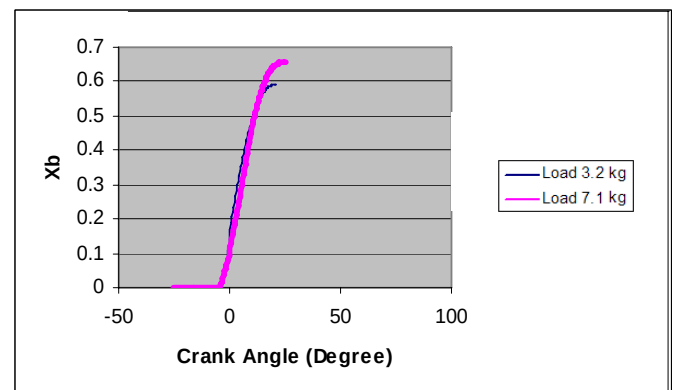


รูปที่ 4 แสดงอัตราการปล่อยพลังงานพิจารณาที่  
ความเร็วรอบ 1300 rpm

ช่วงล่างการจุดระเบิดนั้นพบว่าที่ภาระสูงสุดจะมีช่วงล่างการจุดระเบิดที่สั้นกว่าภาระบางส่วน ซึ่งเป็นไปได้ว่าเกิดจากอุณหภูมิและความดันภายในห้องเผาไหม้หลักมีค่าสูงดังแสดงในรูปที่ 6 สัดส่วนมวลเชื้อเพลิงที่ถูกเผาไหม้เมื่อภาระสูงขึ้นจะมีแนวโน้มสูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 6 แสดงช่วงล่างการจุดระเบิดพิจารณาที่ความเร็วรอบ 1300 rpm



รูปที่ 7 แสดงสัดส่วนมวลเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ พิจารณา  
ที่ความเร็วรอบ 1300 rpm

## 6.สรุปผล

ความดันสูงสุดภายในห้องเผาไหม้หลัก, อัตราการปล่อยพลังงานของเชื้อเพลิง, ปริมาณการปล่อยพลังงานสุทธิที่ภาระสูงสุดจะมีค่ามากกว่าที่ภาระบางส่วนอันเป็นผลมาจากปริมาณเชื้อเพลิงที่ฉีดเข้าไปในห้องเผาไหม้หลักมีปริมาณมากกว่า

ช่วงล่างการจุดระเบิดที่ภาระสูงสุดนั้นจะมีค่าสั้นกว่าที่ภาระบางส่วนซึ่งเป็นผลมาจากความดันภายในห้องเผาไหม้หลักและอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้หลักมีค่าสูงกว่าและสามารถพิจารณาจากอัตราการปล่อยความร้อนของเชื้อเพลิงได้เนื่องจากช่วง Premix Burn ของภาระสูงสุดนั้นมีค่าต่ำกว่าที่ภาระบางส่วน

## 7.กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณบริษัทสยามคูโบต้าอุตสาหกรรมจำกัดที่ให้การดูแล, สนับสนุนอุปกรณ์สำหรับงานวิจัยนี้รวมทั้งให้คำปรึกษาต่างๆ งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

## 8.เอกสารอ้างอิง

- 1 Gary L. Borman and Kenneth W. Ragland, Combustion Engineering, McGraw Hill, Singapore, 1988
- 2 Heywood, J. B., Internal Combustion Engine Fundamentals. Singapore, McGraw Hill, 1988.
- 3 คู่มือช่างเครื่องยนต์ดีเซลคูโบต้า RT140, หน่วยงานอบรมเทคนิค, ส่วนบริการเทคนิค, บริษัท สยามคูโบต้าอุตสาหกรรม จำกัด.