



# พลขององศาการฉีดต่อสมรรถนะและการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ ดีเซลชนิดห้องเผาไหม้ล่วงหน้าเมื่อใช้ ไดเมทิลอีเทอร์เป็นเชื้อเพลิงหลัก

## INFLUENCE OF INJECTION TIMING ON PERFORMANCE AND COMBUSTION OF AN IDI ENGINE FUELLED WITH DME

กนิต วัฒนวิเชียร, อภิษพงษ์ สภาวรินทร์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### บทคัดย่อ

ไดเมทิลอีเทอร์ (Di-Methyl Ether, DME) เป็นเชื้อเพลิงทางเลือกที่สะอาด มีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด และสามารถนำมาใช้ทดแทนการใช้ น้ำมันดีเซลได้โดยปราศจากควันดำ แต่เนื่องจาก DME มีค่าความร้อนน้อยกว่าน้ำมันดีเซล ทำให้แรงบิดที่สภาวะภาระสูงสุดที่ได้ต่ำกว่า การวิเคราะห์ผลของการปรับองศาการฉีดที่มีต่อการปล่อยพลังงานจากการเผาไหม้จากข้อมูลความดันที่วัดได้จากการใช้ DME เป็นเชื้อเพลิงหลักในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดชนิดห้องเผาไหม้ล่วงหน้าขนาดเล็ก พบว่าการใช้เพลาลูกเบี้ยวที่ปรับแต่งเพื่อเพิ่มองศาการฉีดเชื้อเพลิงล่วงหน้า 4 องศา จะได้ค่าประสิทธิภาพ การเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงสูงสุด และเมื่อวิเคราะห์จากความดันในห้องจ่ายเชื้อเพลิง และการเผาไหม้ พบว่าการฉีดของเชื้อเพลิง DME มีช่วงล่าช้าของการฉีดเนื่องจากคุณสมบัติการอัดตัวได้ที่สูงกว่าดีเซล เมื่อ เชื้อเพลิงถูกฉีดเข้าไปในห้องเผาไหม้จะจุดระเบิดทันที ซึ่งแสดงผลในงานวิจัยนี้จะเป็นข้อมูลสำคัญที่จะช่วยให้การประยุกต์ใช้ DME เป็นเชื้อเพลิงทดแทนเป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดต่อไป

**คำสำคัญ:** การเผาไหม้, ไดเมทิลอีเทอร์, องศาการฉีด

### Abstract

DME (Di-Methyl Ether) is a clean alternative fuel. Its physical and chemical properties are suitable for using in a compression ignition engine with less black smoke emissions. Therefore, it is very attractive to be used for diesel substitution. However, the lower in DME's heating value may results in the lower of maximum engine brake torque performance. The analysis results of influence of injection timing on performance and combustion of a small IDI engine fuelled with DME in this study was revealed that the maximum engine fuel conversion efficiency were improved when employed a modified cam for advance injection timing of 4 degree. Results from the fuel line pressure and combustion analysis were also shown that there were some injection delay due to the compressibility effect of DME and DME will be suddenly burnt after injected into the engine combustion chamber. The outcomes from this work are very useful information for the efficient use of DME as alternative fuel.

**Keywords:** Combustion, Di-Methyl Ether, Injection timing

## บทนำ

เนื่องจากปัญหาด้านมลพิษและปริมาณน้ำมันปิโตรเลียมเริ่มลดน้อยลงอันเกิดจากการใช้น้ำมันเป็นจำนวนมาก ซึ่งน้ำมันดีเซลก็เป็นหนึ่งในเชื้อเพลิงที่มีปริมาณการใช้ในแต่ละวันเป็นปริมาณมากและเป็นต้นกำเนิดของมลพิษทางอากาศ จึงได้มีการมองหาทางแก้ปัญหาดังกล่าว ซึ่งพบว่า DME (Di-Methyl Ether) เป็นอีกทางเลือกที่จะแก้ปัญหาด้านมลพิษและสามารถนำมาใช้ทดแทนการใช้ น้ำมันดีเซลได้จากโครงสร้างของเชื้อเพลิง พบว่า DME มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบอยู่ระหว่างคาร์บอน ทำให้ในกระบวนการเผาไหม้ที่ไม่มีพันธะระหว่างคาร์บอนจึงไม่เกิดเขม่าจากการเผาไหม้ รวมทั้งไม่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบ ทำให้ไม่เกิด  $SO_x$  จากกระบวนการเผาไหม้ แต่การที่จะนำ DME มาใช้ในเครื่องยนต์ CI นั้นจำเป็นต้องมีการศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ในหลายด้าน เพราะคุณสมบัติของเชื้อเพลิงมีความแตกต่างกับเชื้อเพลิงดีเซล ซึ่งจะส่งผลต่อเครื่องยนต์ในหลายด้าน เช่น ลักษณะการเผาไหม้และมลภาวะที่เกิดขึ้น ฯลฯ

เนื่องจากการสืบค้นงานวิจัยในปัจจุบันยังไม่พบการนำ DME มาใช้เป็นเชื้อเพลิงหลักในเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก ชนิดห้องเผาไหม้ล่วงหน้า ดังนั้นในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการนำ DME มาใช้ในเครื่องยนต์ CI โดยจะใช้เป็นเชื้อเพลิงหลัก โดยจะศึกษาผลของการปรับองศาการฉีดเชื้อเพลิงต่อสมรรถนะและการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซล ชนิดห้องเผาไหม้ล่วงหน้า เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการพิจารณานำ DME มาใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กชนิดห้องเผาไหม้ล่วงหน้าและเป็นแนวทางในการนำ DME มาใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลขนาดกลางและขนาดใหญ่ต่อไป

## วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาผลของการปรับองศาการฉีดเชื้อเพลิงของเชื้อเพลิง DME ที่มีต่อสมรรถนะสูงสุดและศึกษาการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง DME ในเครื่องยนต์ดีเซล

## ไดเมทิลอีเทอร์ (Di-Methyl Ether; DME) [1]

DME เป็นแหล่งพลังงานใหม่ ซึ่งเชื่อว่าจะนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ได้และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เพราะ DME เป็นเชื้อเพลิงที่สะอาดจากการที่ DME เป็นเชื้อเพลิงที่มีจุดเดือดต่ำ จึงอยู่ในสถานะแก๊สที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศในการนำ DME ไปใช้งานจะต้องบรรจุไว้ในรูปของของเหลวภายในถังบรรจุ โดยสามารถทำให้เป็นของเหลวได้ที่อุณหภูมิ  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  หรืออัดที่ความดันประมาณ 6 bar DME มีสูตรทางเคมี (chemical formula) คือ  $CH_3OCH_3$  หรือ  $C_2H_6O$  ซึ่งมีออกซิเจน (oxygen) เป็นองค์ประกอบ องค์ประกอบคาร์บอน 52.2wt% ความหนาแน่น  $688\text{ kg/m}^3$  โดย DME มีคุณสมบัติทางกายภาพคล้ายกับก๊าซหุงต้ม (Liquefied Petroleum Gas หรือ LPG) ในกระบวนการการเผาไหม้ของ DME จะมีเปลวไฟในการเผาไหม้เป็นสีฟ้าอย่างเห็นได้ชัด

แม้ DME จะมีข้อดีคือ มีค่าซีเทนสูง (55-60) มีอุณหภูมิการติดไฟ (Auto Ignition) ราว  $235\text{ }^{\circ}\text{C}$  เขม่า (soot) จากการเผาไหม้มีปริมาณต่ำ แต่ก็มีข้อเสียคือ มีคุณสมบัติในการหล่อลื่นต่ำ รวมทั้งมี energy content ต่ำ (LHV=  $28.43\text{ MJ/kg}$ ) ซึ่งการนำมาใช้กับเครื่องยนต์จึงต้องทำการปรับแต่งเครื่องยนต์ให้เหมาะสมกับคุณสมบัติของเชื้อเพลิงชนิดนี้

## เทคนิคการปรับค่าองศาการฉีดเชื้อเพลิง

ในงานวิจัยนี้จะทำการเปลี่ยนองศาการฉีดเชื้อเพลิงโดยการปรับแต่งที่เพลาลูกเบี้ยว ซึ่งกระทำโดยการที่นำเพลาลูกเบี้ยวสองตัวมาจัดการตัดแต่งแล้วประกอบกลับเข้าไปใหม่ ซึ่งเริ่มจากเพลาลูกเบี้ยวตัวแรกจะนำขึ้นเครื่องกลิ้งแล้วทำการกลิ้งเอาส่วนของลูกเบี้ยวที่มีหน้าที่กดลูกกลิ้งที่ปั๊มเชื้อเพลิงออกไป (กลิ้งจากส่วน 1 ไปถึงส่วน 2) โดยกลิ้งให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับส่วน A เพื่อให้เหลือแต่เพียงแกนกลาง หลังจากนั้นเพลาลูกเบี้ยวตัวที่สองจะทำการตัดเอาเฉพาะส่วนลูกเบี้ยวที่ทำหน้าที่กดลูกกลิ้งที่ปั๊มเชื้อเพลิง และทำการเจาะรูให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับส่วน A แล้วจึงนำสองส่วนนี้มาประกอบกลับกัน โดยทำการบิดให้ต้องศา

การฉีดเชื้อเพลิงตามต้องการและทำการเชื่อมอาร์กอนให้ทั้งสองชิ้นงานยึดติดกัน ดังแสดงในภาพที่ 1 ดังนั้นจะทำให้มีการเปลี่ยนองศาการฉีดเชื้อเพลิงโดยที่สโตรคการปั๊มเชื้อเพลิงยังมีค่า

เท่าเดิมซึ่งเป็นการเปลี่ยนองศาการฉีดเชื้อเพลิงที่ตรงกับความเป็นจริงมากกว่า โดยการเปลี่ยนองศาการฉีดเชื้อเพลิงนั้นจะกระทำโดยเปลี่ยนที่ละ 2 องศาเพลลาข้อเหวี่ยง



ภาพที่ 1 แสดงการปรับแต่งเพลาลูกเบี้ยวเพื่อเปลี่ยนองศาการฉีดเชื้อเพลิง

**การวิเคราะห์การเผาไหม้จากข้อมูลความดันในห้องเผาไหม้**

ข้อมูลความดันกระบอกสูบที่มุมข้อเหวี่ยงต่างๆ ตลอดช่วงจังหวะอัดและขยายตัวสามารถนำไปใช้วิเคราะห์ในการหาอัตราการปล่อยพลังงานเคมีของเชื้อเพลิง โดยวิธีการหานั้นกระทำได้โดยการใช้กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับระบบเปิด ดังแสดงในภาพที่ 2 เมื่อพิจารณาให้อยู่ในสถานะที่ความดันและอุณหภูมิคงที่ ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ คือ

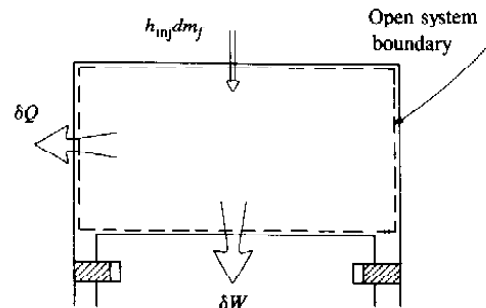
$$\frac{dQ}{dt} - P \frac{dV}{dt} + \sum_i m_i h_i = \frac{dU}{dt} \quad (1)$$

โดยที่

- $\frac{dQ}{dt}$  เป็นอัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านขอบเขตของระบบเข้าไปในระบบ
- $P \frac{dV}{dt}$  เป็นอัตราการถ่ายเทงานเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของลูกสูบ
- $m_i$  เป็นอัตราการไหลของมวลเข้าไปในระบบ
- $h_i$  เป็นเอนทัลปีของมวล  $i$  ที่เข้าหรือออกจากระบบ
- $U$  เป็นพลังงานของสารที่อยู่ภายในขอบเขตของระบบ

โดยปริมาณการปล่อยความร้อนสุทธิตำหนดได้จากสมการที่ 2

$$Q = \int_{\theta_{start}}^{\theta_{end}} \frac{dQ}{dt} d\theta \quad (2)$$



ภาพที่ 2 แสดงระบบเปิดสำหรับการวิเคราะห์อัตราการปล่อยความร้อนของกระบวนการเผาไหม้ [2]

ซึ่งการวิเคราะห์การเผาไหม้และตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเผาไหม้ อาทิ ความดันในห้องเผาไหม้ล่วงหน้าและองศาเพลลาข้อเหวี่ยง จะประเมินผลด้วยโปรแกรม Combust 3 ที่พัฒนาขึ้นโดยห้องปฏิบัติการวิจัยเครื่องยนต์สันดาปภายใน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## อุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย

### 1. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

#### 1.1 เครื่องยนต์ที่ใช้ในการทดสอบ

เครื่องยนต์ที่ใช้ในการทดสอบเป็นเครื่องยนต์ดีเซล 4 จังหวะ ชนิดห้องเผาไหม้ล่วงหน้าของ KUBOTA รุ่น RT 120 โดยรายละเอียดแสดงไว้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงข้อมูลทางเทคนิคของเครื่องยนต์ทดสอบ [3]

ผู้ผลิตเครื่องยนต์/รุ่น	Kubota/RT120
ขนาดกระบอกสูบ x ช่วงชัก	94 mm. x 90 mm.
ปริมาตรกระบอกสูบ	624 CC.
กำลังสูงสุด	8.8 kW / 2400 rpm
แรงบิดสูงสุด	42.2 Nm /1600 rpm
อัตราส่วนกำลังอัด มาตรฐาน	21:1
อัตราส่วนกำลังอัด หลังทำการดัดแปลง	16:1
ความดันเปิดของหัวฉีด มาตรฐาน	ความดัน 140 bar
ความดันเปิดของหัวฉีด หลังทำการดัดแปลง	ความดัน 100 bar
จังหวะการฉีดเชื้อเพลิง	20 °CA BTDC
ระบบระบายความร้อน	ระบายความร้อนด้วยน้ำชนิดรังผึ้ง

#### 1.2 ไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer)

ไดนาโมมิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบเป็นแบบไฮดรอลิก (Hydraulic Dynamometer) ใช้ในการเบรคการหมุนของเพลลา (Water Brake) ของ Redman Heenan International Company, UK รุ่น Froude Hydraulic Dynamometer (DPX2) มี Resolution 0.1 kg.

#### 1.3 อุปกรณ์วัด

ประกอบด้วยอัตราการไหลของอากาศ ชนิด Orifice ซึ่งติดตั้งอยู่บริเวณทางเข้าถึงพักอากาศ และวัดค่าความดันตกคร่อม Orifice Plate โดยใช้ Inclined Manometer อุปกรณ์วัดอุณหภูมิเป็นเทอร์โมคัปเปิลชนิด Type K (Chromel-Alumel, CA) ซึ่งจะวัดอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่น, น้ำหล่อเย็น, ไอดีและไอเสีย ความเร็วรอบวัดโดยใช้ proximity ชนิด inductive และพัลส์มิเตอร์ (pulse meter) แสดงความเร็วรอบของเครื่องยนต์ ค่าความดันในห้องเผาไหม้จะใช้ Piezoelectric Pressure Transducer ยี่ห้อ AVL รุ่น GU12P ติดที่ห้องเผาไหม้ล่วงหน้า ส่วนการวัดความดัน

เชื้อเพลิงที่ทางเข้าหัวฉีดจะใช้ Pressure Transducer ยี่ห้อ KISTLER รุ่น 607C1 โดยติดตั้งบนท่อส่งน้ำมันเชื้อเพลิงช่วงระหว่างปั้มน้ำมันเชื้อเพลิงกับหัวฉีด เพื่อเป็นข้อมูลในการพิจารณาตำแหน่งองศาการฉีดเชื้อเพลิงและอัตราการฉีดเชื้อเพลิง สำหรับการวัดองศาเพลลาข้อเหวี่ยงของเครื่องยนต์จะใช้ Crank Angle Encoder ยี่ห้อ Kistler รุ่น 2613B โดยมี Dewe-book รุ่น DEWE5000[4] และโปรแกรม DeweCA เป็นส่วนบันทึกข้อมูล

### 2. วิธีดำเนินการวิจัย

#### 2.1 การศึกษาอิทธิพลขององศาการฉีดเชื้อเพลิงต่อสมรรถนะที่ภาระสูงสุดเพื่อเลือกองศาการฉีดเชื้อเพลิง

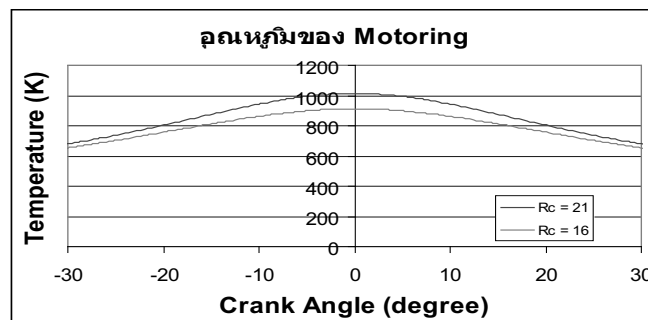
ในงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบสมรรถนะที่สภาวะภาระสูงสุดขององศาการฉีดเชื้อเพลิงที่ได้จากการปรับแต่งเพลลาทุกเบี้ยวของเครื่องยนต์ที่มีอัตราส่วนกำลังอัดมาตรฐาน (21:1) เพื่อทำการศึกษาอิทธิพลขององศาการฉีดเชื้อเพลิง DME ค่าต่างๆ โดยพิจารณาจากค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานจำเพาะ การทดสอบกระทำที่สภาวะคงตัวที่สภาวะภาระ

สูงสุด (Full Load) ที่ความเร็วรอบคงที่ค่าต่างๆ คือ 1400, 1200, 1000 rpm ที่สภาวะคงตัวโดยบันทึกข้อมูลจากการวัดค่าต่างๆ ที่ข้อมูลที่ทำให้การวัด ได้แก่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์, อุณหภูมิ น้ำหล่อเย็น, อุณหภูมิ น้ำมันหล่อลื่น, อุณหภูมิไอเสีย, อุณหภูมิไอดี, อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ, อัตราสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง

### 2.2 การวิเคราะห์อุณหภูมิในห้องเผาไหม้ในช่วงจังหวะการอัดจากการ Motoring

ในการศึกษาเพื่อลดการสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในกระบอกสูบนั้นจำเป็นต้องทำ

การวิเคราะห์หาค่าอุณหภูมิในกระบอกสูบจากการ Motoring ในช่วงจังหวะการอัดเมื่อทำการการลดอัตราส่วนกำลังอัดที่ยังคงให้ค่าอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ในช่วงจังหวะการอัดสูงกว่าค่า Auto ignition temperature ของ DME พบว่าเมื่อพิจารณาอัตราส่วนกำลังอัดจาก 21:1 เหลือ 16:1 อุณหภูมิภายในกระบอกสูบในช่วงจังหวะการอัด ณ จุดของศากการเริ่มต้นของศากการฉีดเชื้อเพลิงมาตรฐาน (20 °CA BTDC) ยังสูงกว่า Auto ignition temperature (235 °C) ของเชื้อเพลิง DME ดังแสดงในภาพที่ 3

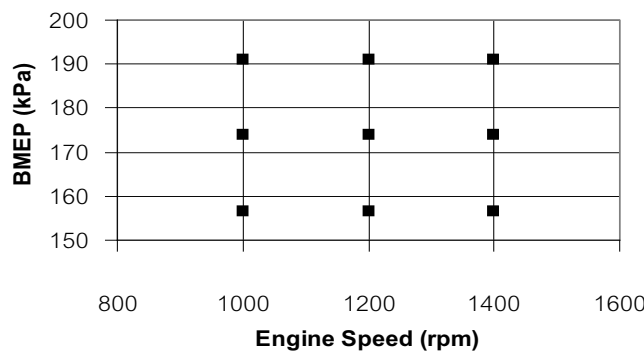


ภาพที่ 3 แสดงผลของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้จากการ Motoring ที่อัตราส่วนกำลังอัดต่างๆ

### 2.3 การศึกษาอิทธิพลของภาระและความเร็วรอบต่อการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง DME

การทดสอบนี้กระทำที่สภาวะภาระบางส่วนของการใช้เพลาลูกเบี้ยวที่ปรับแต่งเพื่อเพิ่มองศาการฉีดเชื้อเพลิงล่วงหน้า 4 องศา ที่ได้จากข้อ 2.1 ในห้องปฏิบัติการที่สภาวะคงตัวที่ภาระและความเร็วรอบคงที่ โดยการทดสอบกระทำที่ความเร็วรอบ 1000, 1200

และ 1400 rpm ที่ bmep 156.5, 174 และ 191 kPa ที่ละจุดทำงานบนเมตริกการทดสอบดังภาพที่ 4 จากนั้นทำการวัดและบันทึกค่าความดันในห้องเผาไหม้ล่วงหน้า ความดันเชื้อเพลิงที่ทางเข้าหัวฉีด ณ ค่าองศาเพลาลูกเบี้ยวต่างๆ โดยบันทึกข้อมูลทุกๆ 0.4 องศาเพลาลูกเบี้ยวจำนวน 120 วิวจักรต่อจุดทดสอบ



ภาพที่ 4 แสดงเมตริกของจุดที่ใช้ในการทดสอบ

**ผลการวิจัย**

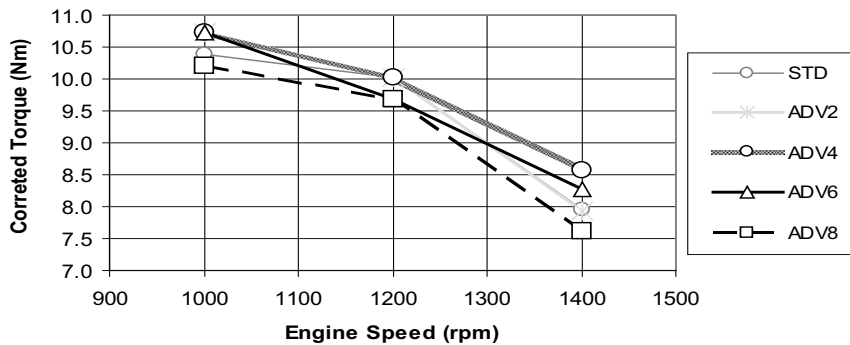
**1. ผลการศึกษาอิทธิพลขององศาการฉีดเชื้อเพลิงต่อสมรรถนะที่ภาวะสูงสุดเพื่อเลือกองศาการฉีดเชื้อเพลิง**

ผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์เมื่อใช้ DME เมื่อใช้เพลาลูกเบี้ยวมาตรฐาน STD (0 CA), และเมื่อใช้เพลาลูกเบี้ยวที่ปรับแต่งเพื่อเพิ่มองศาการฉีดเชื้อเพลิงล่วงหน้า ADV2 (2 CA), ADV4 (4 CA), ADV6 (6 CA) และ ADV8 (8 CA) โดย

ใช้เครื่องยนต์ที่มีการปรับลดค่า opening pressure ของหัวฉีดจาก 140 bar ลงมาที่ 100 bar เพื่อศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนองศาของการฉีดเชื้อเพลิง โดยจะทดสอบเก็บค่าสมรรถนะของเครื่องยนต์ที่สภาวะภาวะสูงสุด

**1.1 แรงบิดเบรก (Brake Torque)**

แรงบิดเบรกที่สภาวะภาวะสูงสุดของเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบต่างๆ เมื่อมีการเปลี่ยนองศาการฉีดเชื้อเพลิงต่างๆ



ภาพที่ 5 แสดงค่าแรงบิดเบรกที่สภาวะภาวะสูงสุดที่ความเร็วรอบต่างๆ เปรียบเทียบเมื่อใช้เพลาลูกเบี้ยวที่ปรับแต่งเพื่อเพิ่มองศาการฉีดเชื้อเพลิงล่วงหน้าค่าต่างๆ

จากภาพที่ 5 พบว่าแรงบิดเบรกที่สภาวะภาวะสูงสุดที่ความเร็วรอบ 1000 rpm เป็นตำแหน่งที่ได้แรงบิดเบรกสูงสุดและจะลดลงเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นเป็น 1200 rpm และ 1400 rpm ตามลำดับในทุกองศาการฉีดเชื้อเพลิงต่างๆ โดยเมื่อใช้เพลาลูกเบี้ยวที่ปรับแต่งเพื่อเพิ่มองศาการฉีดเชื้อเพลิงล่วงหน้าที่ ADV4 จะได้ค่าแรงบิดสูงสุดในทุกความเร็วรอบที่ 1000 rpm, 1200 rpm และ 1400 rpm คือ 10.73 Nm, 10.03 Nm และ 8.58 Nm ตามลำดับ ส่วนเมื่อใช้เพลาลูกเบี้ยวที่ปรับแต่ง

เพื่อเพิ่มองศาการฉีดเชื้อเพลิงล่วงหน้าที่ ADV8 จะมีค่าแรงบิดเบรกต่ำสุดในทุกความเร็วรอบที่ 1000 rpm, 1200 rpm และ 1400 rpm คือ 10.20 Nm, 9.68 Nm และ 7.62 Nm ตามลำดับ จากภาพที่ 5 กราฟแสดงแรงบิดเบรกที่สภาวะภาวะสูงสุดที่ความเร็วรอบต่างๆ เปรียบเทียบเมื่อใช้เพลาลูกเบี้ยวที่ปรับแต่งเพื่อเพิ่มองศาการฉีดเชื้อเพลิงล่วงหน้าค่าต่างๆ สามารถสรุปเป็นตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบแรงบิดเบรกที่สภาวะภาวะสูงสุดที่ความเร็วรอบต่างๆ เปรียบเทียบเมื่อใช้เพลาลูกเบี้ยวที่ปรับแต่งเพื่อเพิ่มองศาการฉีดเชื้อเพลิงล่วงหน้าค่าต่างๆ

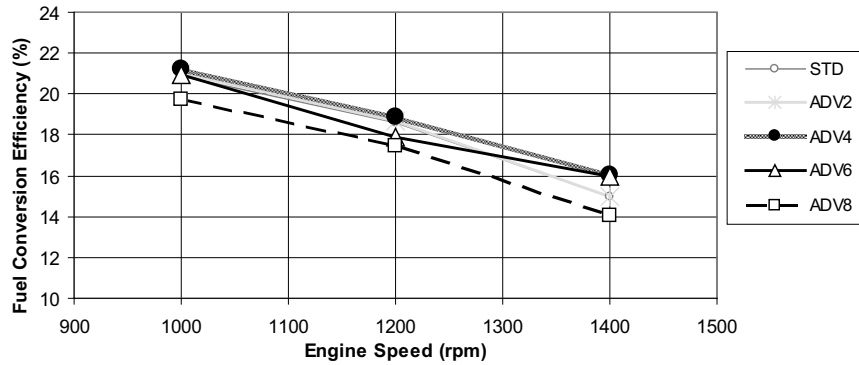
Speed (Rpm)	LOAD (Nm)	Full Load Corrected Torque (Nm)				
		STD	ADV2	ADV4	ADV6	ADV8
1000	Full Load	10.38	10.72	10.73	10.72	10.20
1200	Full Load	10.03	10.03	10.03	9.67	9.68
1400	Full Load	7.96	7.94	8.58	8.27	7.62

จากตารางที่ 2 สรุปได้ว่าแรงบิดเบรกที่สภาวะภาระสูงสุดขององศาการฉีดเชื้อเพลิงต่างๆ ที่ได้จะลดลงตามความเร็วรอบที่สูงขึ้น

### 1.2 ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิง (Energy Conversion Efficiency)

ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยน

พลังงานเชื้อเพลิงเป็นค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนรูปพลังงานจากพลังงานที่อยู่ภายในตัวเชื้อเพลิงไปเป็นพลังงานที่ได้ออกมา ซึ่งการเปรียบเทียบค่าดังกล่าวที่ภาระสูงสุดของเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบต่างๆ เมื่อมีการเปลี่ยนองศาการฉีดเชื้อเพลิงต่างๆ



ภาพที่ 6 แสดงค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงที่สภาวะภาระสูงสุดที่ความเร็วรอบต่างๆ เปรียบเทียบระหว่างการใช้เพลาลูกเบี้ยวที่ปรับแต่งเพื่อเพิ่มองศาการฉีดเชื้อเพลิงล่วงหน้าค่าต่างๆ

จากภาพที่ 6 พบว่าค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงจะมีค่าลดลงเมื่อความเร็วรอบสูงขึ้น โดยการใช้เพลาลูกเบี้ยวที่ปรับแต่งเพื่อเพิ่มองศาการฉีดเชื้อเพลิงล่วงหน้า ADV4 จะมีค่าสูงที่สุดในทุกความเร็วรอบ ส่วนการใช้เพลาลูกเบี้ยวที่ปรับแต่งเพื่อเพิ่มองศาการฉีดเชื้อเพลิงล่วงหน้า ADV8 จะมีค่าต่ำที่สุดในทุกความเร็วรอบ

จากภาพที่ 6 กราฟแสดงผลของค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงที่สภาวะภาระสูงสุดที่ความเร็วรอบคงที่ต่างๆ เปรียบเทียบระหว่างการใช้เพลาลูกเบี้ยวที่ปรับแต่งเพื่อเพิ่มองศาการฉีดเชื้อเพลิงล่วงหน้าที่ยังคงค่าต่างๆ สามารถสรุปเป็นตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงที่สภาวะภาระสูงสุดที่ความเร็วรอบต่างๆ เปรียบเทียบเมื่อใช้เพลาลูกเบี้ยวที่ปรับแต่งเพื่อเพิ่มองศาการฉีดเชื้อเพลิงล่วงหน้าค่าต่างๆ

Speed (Rpm)	LOAD (Nm)	Full Load Energy Conversion Efficiency (%)				
		STD	ADV2	ADV4	ADV6	ADV8
1000	Full Load	20.90	21.04	21.23	20.93	19.74
1200	Full Load	18.60	18.70	18.86	17.86	17.45
1400	Full Load	14.98	15.01	16.07	15.97	14.07

จากตารางที่ 3 พบว่าค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงที่สภาวะภาระสูงสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดเมื่อใช้เพลาลูกเบี้ยวที่ปรับแต่งเพื่อเพิ่มองศาการฉีดเชื้อเพลิงล่วงหน้า ADV4 และจะมีค่าลดลงต่ำสุดเมื่อใช้เพลาลูกเบี้ยวที่ปรับแต่งเพื่อเพิ่มองศาการฉีดเชื้อเพลิงล่วงหน้า ADV8 ในทุกความเร็วรอบ

พบว่าค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงมีความสัมพันธ์กับความเร็วยรอบ กล่าวคือค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงจะต่ำลงเมื่อความเร็วรอบสูงขึ้นเหมือนกันทุกองศาการฉีดเชื้อเพลิง เนื่องมาจากความเร็วรอบที่สูงขึ้นจะมีแรงเสียดทานมากขึ้น ดังนั้นจึงต้องมีการฉีดเชื้อเพลิงในอัตราส่วนที่มากขึ้นเพื่อเอาชนะแรงเสียดทานนั้น

จากการทดสอบพบว่าค่าแรงบิดเบรกและค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงจาก

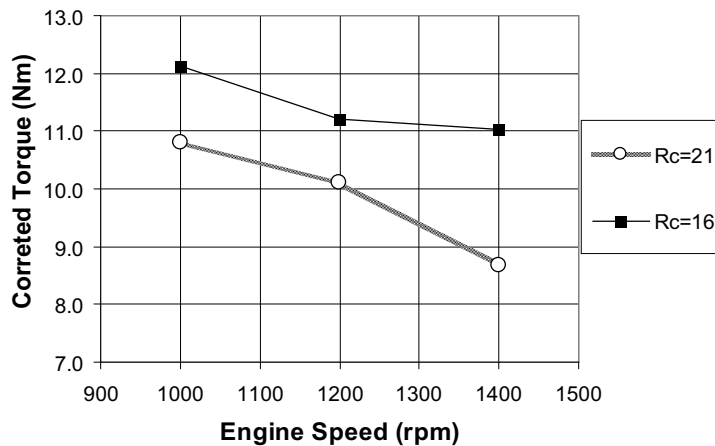
การใช้เพลาลูกเบี้ยวที่ปรับแต่งเพื่อเพิ่มองศาการฉีดเชื้อเพลิงล่วงหน้า 4 องศา จะมีค่าสูงที่สุดในทุกความเร็วรอบ

## 2. ผลการวิเคราะห์ห่อหุ้มในห้องเผาไหม้ในช่วงจังหวะการอัดจากการ motoring

ผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์เมื่อใช้ DME เมื่อทำการลดอัตราส่วนกำลังอัด จาก 21:1 เหลือ 16:1 จากการใช้เพลาลูกเบี้ยวที่ปรับแต่งเพื่อเพิ่มองศาการฉีดเชื้อเพลิงล่วงหน้า 4 องศา โดยทำการทดสอบเก็บค่าสมรรถนะของเครื่องยนต์ที่สภาวะภาระสูงสุด

### 2.1 แรงบิดเบรก (Brake Torque)

แรงบิดเบรกที่สภาวะภาระสูงสุดของเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบ ต่างๆ เมื่ออัตราส่วนกำลังอัดต่างกัน



ภาพที่ 7 แสดงค่าแรงบิดเบรกที่สภาวะภาระสูงสุดที่ความเร็วรอบต่างๆ เปรียบเทียบที่อัตราส่วนการอัดต่างๆ

จากภาพที่ 7 พบว่าแรงบิดเบรกที่สภาวะภาระสูงสุดเมื่อมีการลดอัตราส่วนกำลังอัดทำให้ค่าแรงบิดเบรกมีค่าสูงขึ้นในทุกความเร็วรอบ โดยที่ความเร็วรอบ 1000 rpm เป็นตำแหน่งที่ได้แรงบิดเบรกสูงสุดคือ 12.04 Nm และจะมีค่าแรงบิดเบรกลดลงเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นเป็น 1200 rpm

และ 1400 rpm คือ 11.12 Nm และ 10.95 Nm ตามลำดับ

จากภาพที่ 7 กราฟแสดงแรงบิดเบรกที่สภาวะภาระสูงสุดที่ความเร็วรอบต่างๆ เปรียบเทียบที่อัตราส่วนกำลังอัดต่างๆ สามารถสรุปเป็นตารางที่ 4



**ตารางที่ 4** แสดงการเปรียบเทียบแรงบิดเบรกที่สภาวะภาระสูงสุดที่ความเร็วรอบต่างๆ เปรียบเทียบที่อัตราส่วนกำลังอัดต่างๆ

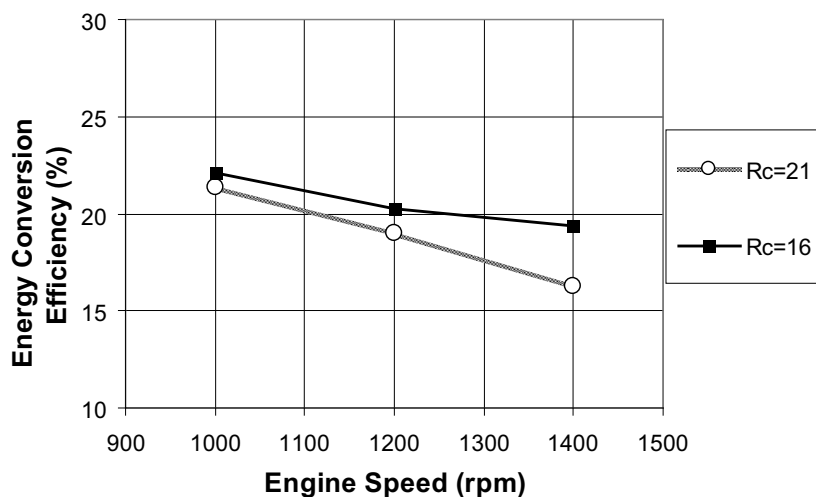
Speed (Rpm)	LOAD (Nm)	Full Load Torque (Nm)	
		Rc = 21	Rc = 16
1000	Full Load	10.73	12.04
1200	Full Load	10.03	11.12
1400	Full Load	8.58	10.95

จากตารางที่ 4 สรุปได้ว่าแรงบิดเบรกที่สภาวะภาระสูงสุดเมื่ออัตราส่วนกำลังอัดลดลงจะมีค่าสูงในทุกความเร็วรอบ

## 2.2 ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงาน เชื้อเพลิง (Energy Conversion Efficiency)

ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยน

พลังงานเชื้อเพลิงเป็นค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนรูปพลังงานจากพลังงานที่อยู่ภายในตัวเชื้อเพลิงไปเป็นพลังงานที่ได้ออกมา ซึ่งการเปรียบเทียบค่าดังกล่าวที่ภาระสูงสุดของเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบต่างๆ เมื่อมีการเปลี่ยนของสภาวะการฉีดเชื้อเพลิงต่างๆ



**ภาพที่ 8** แสดงค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงที่สภาวะภาระสูงสุดที่ความเร็วรอบต่างๆ เปรียบเทียบระหว่างอัตราส่วนการอัดต่างๆ

จากภาพที่ 8 พบว่าค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงเมื่อทำการลดอัตราส่วนกำลังอัดมีค่าสูงขึ้นในทุกความเร็วรอบ และเมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนกำลังที่ 16:1 ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงจะมีค่าลดลงเมื่อความเร็วรอบสูงขึ้นเช่นเดียวกับอัตราส่วนกำลังอัด 21: 1

จากภาพที่ 8 กราฟแสดงผลของค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงที่สภาวะภาระสูงสุดที่ความเร็วรอบคงที่ต่างๆ เปรียบเทียบระหว่างการฉีดเชื้อเพลิงที่องศาต่างๆ สามารถสรุปเป็นตารางที่ 5

**ตารางที่ 5** แสดงการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงที่สภาวะภาระสูงสุดที่ความเร็วรอบต่างๆ เปรียบเทียบที่อัตราส่วนการอัดต่างๆ

Speed (Rpm)	LOAD (Nm)	Full Load Fuel Conversion Efficiency (%)	
		Rc = 21	Rc = 16
1000	Full Load	21.23	21.96
1200	Full Load	18.86	20.05
1400	Full Load	16.07	19.26

จากตารางที่ 5 พบว่าค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงที่สภาวะภาระสูงสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อทำการลดอัตราส่วนกำลังอัดในทุกความเร็วรอบ

### 3. ผลการศึกษาอิทธิพลของภาระและความเร็วรอบต่อการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง DME

ในการทดสอบเพื่อวิเคราะห์การเผาไหม้ที่ได้จากการเก็บข้อมูลความดันในกระบอกสูบและความดันในท่อส่งเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ที่ทำการลดอัตราส่วนการอัดจาก 21:1 ลงมาที่ 16:1 เมื่อใช้เพลาลูกเบี้ยวที่ปรับแต่งเพื่อเพิ่มองศาการฉีดเชื้อเพลิงล่วงหน้าที 4 องศา เนื่องจากผลที่ได้จากการทดสอบสมรรถนะที่สภาวะภาระสูงสุดมีค่าสูงที่สุดจากหัวข้อผลการวิจัยในข้อ 1 และ 2

จากภาพที่ 9 (ก) ถึง (จ) ผลจากการทดสอบที่ BMEP 156.5 kPa คงที่พบว่าความดันสูงสุดภายในห้องเผาไหม้ก่อนที่ความเร็วรอบสูงขึ้นจะมีค่ามากกว่าความเร็วรอบต่ำดังแสดงในภาพที่ 9 (ก) เนื่องจากมีปริมาณเชื้อเพลิงที่ฉีดเข้าห้องเผาไหม้สูงสุด เมื่อพิจารณาองศาการฉีดเชื้อเพลิงจากภาพที่ 9 (ข) และพบว่าที่ทุกความเร็วรอบมีแนวโน้มการฉีดเชื้อเพลิงที่องศาเดียวกัน และจากภาพที่ 9 (ค) ถึง 9 (จ) พบว่าเมื่อเชื้อเพลิงถูกฉีดเข้าไปในห้องเผาไหม้แล้วจะเกิดการเผาไหม้ทันที โดยจะไม่มีช่วง Ignition Delay และยังพบว่าอัตราการปล่อยความร้อนที่ความเร็วรอบ 1400 rpm จะมีค่าสูงสุด และที่ความเร็วรอบ 1000 rpm จะมีค่าต่ำสุด ซึ่งสอดคล้องกับกราฟของอัตราการฉีดเชื้อเพลิงดังภาพที่ 9 (ข) สำหรับปริมาณการปล่อยความร้อนสุทธิที่ความเร็วรอบ 1400 rpm จะมีค่า สูงที่สุดและที่ความเร็วรอบ 1000 rpm จะมีค่าต่ำที่สุด โดยที่สัดส่วนมวลเชื้อเพลิง

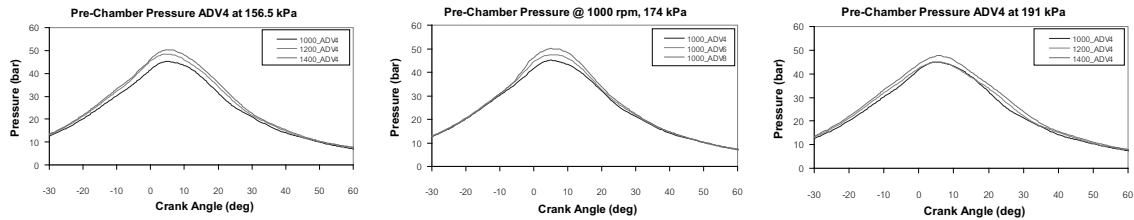
ที่เผาไหม้ของทุกความเร็วรอบมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อพิจารณาจากจุดสิ้นสุดการเผาไหม้

จากภาพที่ 9 (ก) ถึง (จ) ผลจากการทดสอบที่ BMEP 174 kPa คงที่พบว่าความดันสูงสุดภายในห้องเผาไหม้ก่อนที่ความเร็วรอบสูงขึ้นจะมีค่ามากกว่าความเร็วรอบต่ำดังแสดงในภาพที่ 9 (ก) เนื่องจากมีปริมาณเชื้อเพลิงที่ฉีดเข้าห้องเผาไหม้สูงสุด เมื่อพิจารณาองศาการฉีดเชื้อเพลิงจากภาพที่ 9 (ข) และพบว่าที่ทุกความเร็วรอบมีแนวโน้มการฉีดเชื้อเพลิงที่องศาเดียวกัน และจากภาพที่ 9 (ค) ถึง 9 (จ) พบว่า เมื่อเชื้อเพลิงถูกฉีดเข้าไปในห้องเผาไหม้แล้วจะเกิดการเผาไหม้ทันที โดยจะไม่มีช่วง Ignition Delay และยังพบว่าอัตราการปล่อยความร้อนที่ความเร็วรอบ 1400 rpm จะมีค่าสูงสุด และที่ความเร็วรอบ 1000 rpm จะมีค่าสูงกว่า 1200 rpm ซึ่งสอดคล้องกับกราฟของอัตราการฉีดเชื้อเพลิงดังภาพที่ 9 (ข) สำหรับปริมาณการปล่อยความร้อนสุทธิที่ความเร็วรอบ 1400 rpm จะมีค่าสูงที่สุดและที่ความเร็วรอบ 1000 rpm จะมีค่าต่ำที่สุด โดยที่สัดส่วนมวลเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ของทุกความเร็วรอบมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อพิจารณาจากจุดสิ้นสุดการเผาไหม้

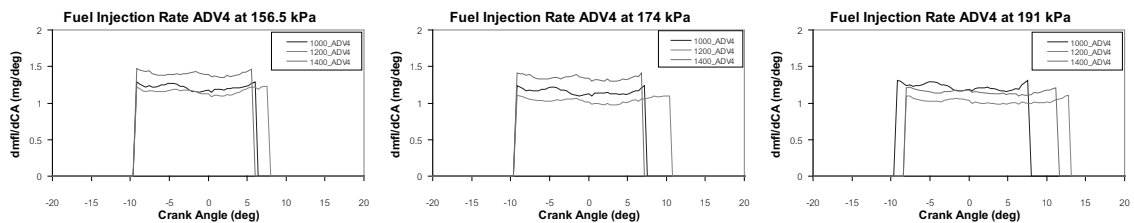
จากภาพที่ 9 (ก) ถึง (จ) ผลจากการทดสอบที่ BMEP 191 kPa คงที่พบว่าความดันสูงสุดภายในห้องเผาไหม้ก่อนที่ความเร็วรอบสูงขึ้นจะมีค่ามากกว่าความเร็วรอบต่ำดังแสดงในภาพที่ 9 (ก) เนื่องจากมีปริมาณเชื้อเพลิงที่ฉีดเข้าห้องเผาไหม้สูงสุด เมื่อพิจารณาองศาการฉีดเชื้อเพลิงจากภาพที่ 9 (ข) และพบว่าที่ความเร็วรอบ 1000 rpm มีแนวโน้มการฉีดเชื้อเพลิงก่อนความเร็วรอบ 1200 rpm และ

1400 rpm โดยที่ความเร็วรอบ 1200 rpm และ 1400 rpm จะมีค่าเท่ากัน และจากภาพที่ 9 (ค) ถึง 9 (จ) พบว่าอัตราการปล่อยความร้อนที่ความเร็วรอบ 1000 rpm จะมีค่าสูงสุด และที่ความเร็วรอบ 1400 rpm จะมีค่าสูงกว่า 1200 rpm ซึ่งสอดคล้องกับกราฟของอัตราการฉีดเชื้อเพลิงดังภาพที่ 9 (ข)

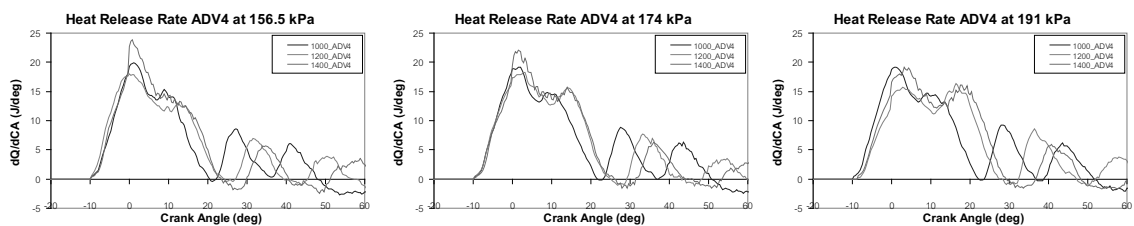
สำหรับปริมาณการปล่อยความร้อนสุทธิที่ความเร็วรอบ 1400 rpm จะมีค่า สูงที่สุดและที่ความเร็วรอบ 1000 rpm จะมีค่าต่ำที่สุด โดยที่สัดส่วนมวลเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ของความเร็วรอบ 1400 rpm มีค่าสูงที่สุดโดยที่ความเร็วรอบ 1000 rpm และ 1200 rpm มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน



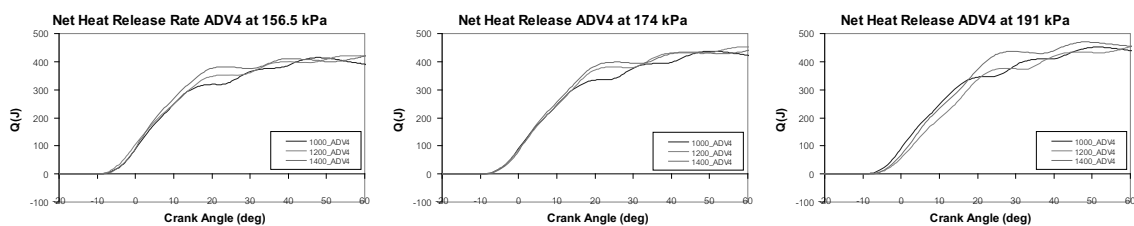
(ก)



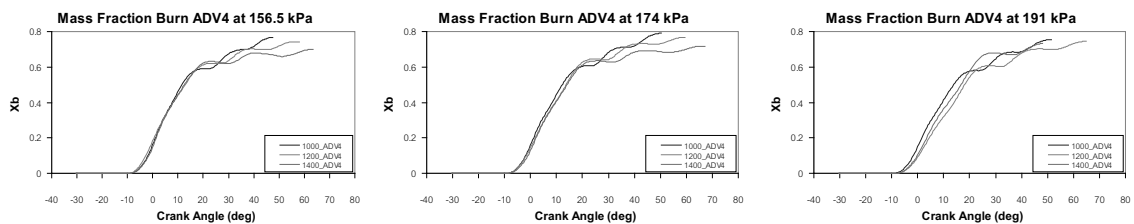
(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

ภาพที่ 9 (ก)-(จ) แสดงกราฟเปรียบเทียบผลของค่า BMEP = 158.5, 174 และ 191 kPa ที่ความเร็วรอบต่างๆ โดยที่ (ก) ความดันในห้องเผาไหม้หลัก (ข) อัตราการฉีดเชื้อเพลิง (ค) อัตราการปล่อยความร้อน (ง) การปล่อยความร้อนสุทธิ (จ) สัดส่วนมวลเชื้อเพลิงที่เผาไหม้

## สรุปและอภิปรายผล

จากการทดสอบสมรรถนะที่สภาวะภาระสูงสุดของจากการใช้เพลาลูกเบี้ยวที่ปรับแต่งเพื่อเพิ่มองศาการฉีดเชื้อเพลิงล่วงหน้า 4 องศา จะได้ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงสูงสุดในทุกความเร็วรอบ ดังนั้นจึงได้เลือกใช้เพลาลูกเบี้ยวที่ปรับแต่งเพื่อเพิ่มองศาการฉีดเชื้อเพลิงล่วงหน้า 4 องศา และเมื่อทำการทดสอบเพื่อวิเคราะห์ห่อคุณภูมิในห้องเผาไหม้ของจังหวะอัดในช่วง motoring โดยการลดอัตราส่วนกำลังอัดพบว่า ค่าแรงบิดเบรกและค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงที่ได้มีค่าสูงขึ้นในทุกความเร็วรอบ ดังนั้นเราจึงเลือกใช้เพลาลูกเบี้ยวที่ปรับแต่งเพื่อเพิ่มองศาการฉีดเชื้อเพลิงล่วงหน้า 4 องศา และอัตราส่วนการอัด 16:1 มาทำการเก็บข้อมูลเพื่อวิเคราะห์การเผาไหม้และพบว่าความดันสูงสุดภายในห้องเผาไหม้ก่อนจะอยู่มีค่าสูงขึ้นเมื่อความเร็วรอบมีสูงขึ้นเนื่องจากปริมาณการฉีดเชื้อเพลิงต่อวัฏจักรเข้าไปในห้องเผาไหม้สูงสุด และจากกราฟอัตราการฉีดเชื้อเพลิงสามารถบ่งชี้อัตราการปล่อยความร้อนที่เกิดขึ้นสูงสุด โดยพิจารณาจากปริมาณการฉีดเชื้อเพลิงต่อองศาเพลาช้อเหวียง ถ้าหาก

มีค่าปริมาณการฉีดต่อองศาเพลาช้อเหวียงในช่วงเริ่มต้นการฉีดที่สูงก็จะได้อัตราการปล่อยความร้อนที่สูงแม้ว่าปริมาณการฉีดเชื้อเพลิงต่อวัฏจักรจะต่ำก็ตาม และจากอัตราการปล่อยความร้อนของทุกความเร็วรอบจะไม่มีการดูดความร้อนจากภายในห้องเผาไหม้ในช่วงเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิง นั่นคือเมื่อเชื้อเพลิงถูกฉีดเข้าห้องเผาไหม้ จะเกิดการเผาไหม้ทันที โดยที่ไม่มีช่วงล่าช้าของการจุดระเบิด อันเนื่องมาจากคุณสมบัติของเชื้อเพลิง DME ที่มีคุณสมบัติการจุดระเบิดเองที่ต่ำและมีค่าซีเทนสูง และพบว่าจุดสิ้นสุดการเผาไหม้จะยาวกว่าเมื่อความเร็วรอบสูงขึ้น เนื่องมาจากอัตราการฉีดเชื้อเพลิงต่อวัฏจักรที่เพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วรอบสูงขึ้น ในส่วนของการปล่อยความร้อนสุทธิจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อความเร็วรอบสูงขึ้น โดยที่ความเร็วรอบ 1400 rpm จะมีค่าสูงสุด

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัท สยามคูโบต้าอุตสาหกรรม จำกัด ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์และเครื่องยนต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Longbao, Z., Hewu, W., Deming J. and Zhouhua, H. (1999). Study of Performance and Combustion Characteristics of a DME-Fuelled Light-Duty Direct-Injection Diesel Engine, *SAE Paper* 1999-01-3669.
- [2] Heywood, J. B. (1988). *Internal Combustion Engine Fundamentals*. Singapore, McGraw-Hill.
- [3] “คู่มือช่างเครื่องยนต์ดีเซลคูโบต้า รุ่น RT”, หน่วยงานอบรมเทคนิค, ส่วนบริการเทคนิค, บริษัท สยามคูโบต้าอุตสาหกรรม จำกัด.
- [4] DEWETRON Ges.m.b.H. (2005). *DEWE-5000 Technical Reference Manual*, DEWETRON Elektronische Messgeraete Ges.m.b.H., Austria.