

การพัฒนาเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดชนิดห้องเผาไหม้ล่วงหน้าให้เป็นอุปกรณ์ ต้นแบบสำหรับสังเกตการณ์การเผาไหม้แบบอัดตัวของละอองฝอย

คณิต วัฒนวิเชียร*, วิรุทธิ์ เกื้อกิตติวงศ์, อัครพงษ์ สดาวรินทร์ และ วาทีต ตั้งพิสิฐโยธิน

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ถ.พญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330 โทรศัพท์ (662) 2186607 โทรสาร (662) 2522889

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

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนา ดัดแปลงเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดชนิดห้องเผาไหม้ล่วงหน้า ชนิดสูบเดี่ยว ให้เป็นอุปกรณ์ต้นแบบ สำหรับสังเกตการณ์การเผาไหม้แบบอัดตัวของละอองฝอย

โดยการดำเนินงาน ได้แบ่งเป็น 3 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนที่หนึ่ง เป็นการดัดแปลง ฝาสูบเพื่อติดตั้งอุปกรณ์วัด ข้อมูลความดัน ภายใน กระบอกสูบจากห้องเผาไหม้ล่วงหน้าและห้องเผาไหม้หลัก รวมทั้ง อุปกรณ์เพื่อส่ง บันทึกรูปภาพของการเกิดละอองฝอยและการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ล่วงหน้า ขั้นตอนที่สอง เป็นการพัฒนารูปการ วิเคราะห์ผล โดยแบ่งเป็นการวิเคราะห์การเผาไหม้จากข้อมูลความดันกระบอกสูบ เพื่อหาอัตราการปล่อยความร้อน จากการเผาไหม้ การวิเคราะห์ภาพถ่ายปรากฏการณ์ของละอองฝอยและการเผาไหม้ และแนวทางการวิเคราะห์เพื่อ เชื่อมโยงระหว่างผลจากการวิเคราะห์อัตราการปล่อยความร้อนและผลจากการวิเคราะห์ภาพถ่าย ขั้นตอนที่สาม เป็นการทดสอบ อุปกรณ์ต้นแบบเพื่อสอบทวนผลจากการวิเคราะห์การเผาไหม้ จากค่าความดันกระบอกสูบและ ภาพถ่ายของละอองฝอยและการเผาไหม้

ผลการวิจัยที่ได้พบว่าอุปกรณ์ต้นแบบที่ทำการพัฒนาขึ้นนี้ สามารถใช้เป็นเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์การ เผาไหม้ในเครื่องยนต์แบบจุดระเบิดด้วยการอัดและสามารถนำไปใช้ในงานวิจัยขั้นสูงด้านการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ สันดาปภายในต่อไปได้

1. บทนำ

ปัจจุบันเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด (Compression Ignition or CI) จัดเป็นต้นกำลังที่มีการ ใช้กันมาก ชนิดหนึ่งใน โลก เนื่องจากมีประสิทธิภาพ เชิงความร้อนสูงและสามารถใช้ กับ เชื้อเพลิงได้ หลาก หลาย รูปแบบ การวิจัยและพัฒนา ด้าน เครื่องยนต์ CI ในปัจจุบัน นอกจากจะต้อง มุ่งเน้นการ พัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ CI แล้ว ยังต้องศึกษา การลดมลพิษ เนื่องจากข้อบังคับเรื่อง การควบคุมมลพิษที่มีความเข้มงวดมากขึ้น

กลไกการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ CI ซึ่ง ครอบคลุมตั้งแต่ กระบวนการผสมกันระหว่างอากาศ กับเชื้อเพลิง ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของ spray เชื้อเพลิง และการไหลของอากาศในห้องเผาไหม้ เป็นปัจจัย สำคัญที่จะทำให้เครื่องยนต์ CI มีการเผาไหม้ที่มี ประสิทธิภาพสูงและมีมลพิษต่ำ ดังนั้นจึงต้องทำการ พัฒนาลักษณะของ spray เชื้อเพลิงและการไหลของ อากาศในห้องเผาไหม้ไปพร้อมกัน ในงานวิจัยนี้ เป็นการพัฒนาอุปกรณ์ต้นแบบ สำหรับสังเกตการณ์ ลักษณะการเกิด spray จาก

หัวฉีดและการเผาไหม้ แล้วทำการพัฒนาวิธีการวิเคราะห์ผล หลังจากนั้นจึงทำการทดสอบ บันทึกผลและวิเคราะห์ผลที่ได้จากอุปกรณ์ต้นแบบ ซึ่ง ผลจากงานวิจัยนี้ จะได้อุปกรณ์ต้นแบบ spray combustion observation system และวิธีการวิเคราะห์ผลที่ได้จากอุปกรณ์ต้นแบบ ซึ่งสามารถนำไปใช้ในงานวิจัยและพัฒนาเครื่องยนต์ CI ขั้นสูงต่อไปได้

2. ทฤษฎีบทที่เกี่ยวข้อง

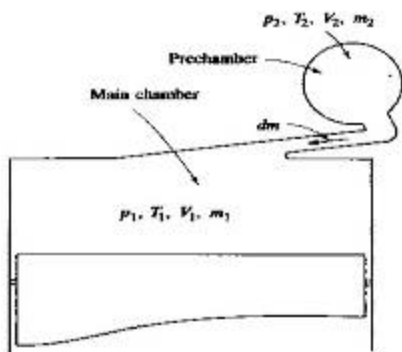
ในการพัฒนาเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดชนิดห้องเผาไหม้ล่วงหน้าให้เป็นอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับสังเกตการณ์การเผาไหม้แบบอัดตัวของละอองฝอยนี้ จะใช้แนวทาง การวิเคราะห์ ปรากฏการณ์การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงร่วมกัน 2 วิธี คือ

2.1 การวิเคราะห์ข้อมูลความดันในห้องเผาไหม้

ข้อมูลความดัน ภายใน กระบอกสูบที่มุมข้อเหวี่ยงต่างๆ ตลอดช่วงจังหวะอัดและขยายตัวสามารถนำไปใช้วิเคราะห์ในการหาอัตราการปล่อยพลังงานเคมีของเชื้อเพลิง เพื่ออธิบายลักษณะการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นในเครื่องยนต์ CI ซึ่งหาได้โดยการ ประยุกต์ใช้กฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับระบบเปิด เมื่อพิจารณาให้อยู่ในสภาวะที่ความดันและอุณหภูมิคงที่ (Quasi static)

จากกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ และ พารามิเตอร์ต่างๆ ในห้องเผาไหม้ตามรูปที่ 1 อัตราการปล่อยความร้อน (Heat Release Rate) สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ 1

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{\gamma}{\gamma-1} p_1 \frac{dV_1}{dt} + \frac{1}{\gamma-1} \left(V_1 \frac{dp_1}{dt} + V_2 \frac{dp_2}{dt} \right) \quad (1)$$



รูปที่ 1 แสดงระบบเปิดสำหรับห้องเผาไหม้ในเครื่องยนต์ดีเซลชนิดห้องเผาไหม้ล่วงหน้า [1]

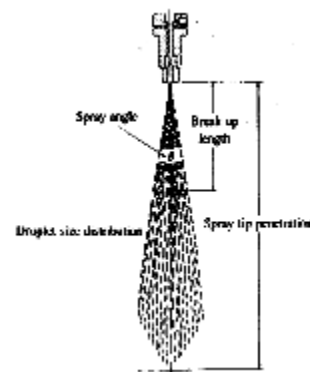
โดยปริมาณการปล่อยความร้อนสุทธิตำนวนได้จากสมการที่ 2

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

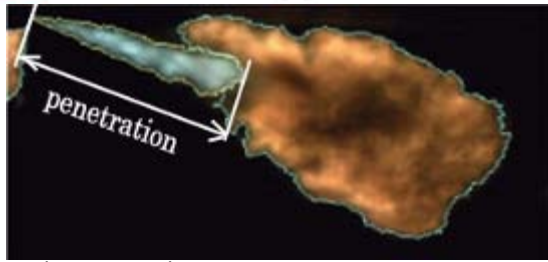
ซึ่งการวิเคราะห์การเผาไหม้และตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเผาไหม้ อาทิ ความดันในห้องเผาไหม้ล่วงหน้า ความดันในห้องเผาไหม้หลักและองศาเพลวข้อเหวี่ยง จะประเมินผลด้วยโปรแกรม Combus3 ที่พัฒนาขึ้นโดยห้องปฏิบัติการวิจัยเครื่องยนต์สันดาปภายใน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2. การวิเคราะห์ภาพถ่ายปรากฏการณ์การเผาไหม้

การศึกษาการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ดีเซล ด้วยวิธีการถ่ายภาพความเร็วสูงเป็นลำดับตามมุมข้อเหวี่ยงต่างๆ จะได้ข้อมูลที่มีประโยชน์มากในการศึกษาลักษณะของกระบวนการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ดีเซล ทั้งปรากฏการณ์การเกิดสเปรย์ และปรากฏการณ์การเผาไหม้ โดย จากรูปแบบโครงสร้างของสเปรย์เชื้อเพลิง ดีเซล ดังรูปที่ 2 นี้จะทำการวิเคราะห์ถึงระยะพุ่งสเปรย์ (Spray penetration) และมุมสเปรย์ (Spray angle) ด้วยเทคนิคการแยกส่วนของสเปรย์ที่เป็นของเหลวและส่วนที่เป็นเปลวไฟ ดังแสดงผลในรูปที่ 3 ในการบันทึกภาพด้วยกล้อง CCD และ Endoscope นี้จะใช้โปรแกรม AVL VisioScope ที่พัฒนาขึ้นโดยบริษัท AVL-List GmbH สำหรับควบคุมค่าเริ่มต้นของการถ่ายภาพ, ควบคุมการบันทึกการถ่ายภาพและการแสดงภาพ และประมวลผลภาพถ่าย



รูปที่ 2 รูปแบบของสเปรย์เชื้อเพลิงดีเซลที่ได้นิยามตัวแปรหลักๆ [1]



รูปที่ 3 สเปร์รี่ที่ผ่านเทคนิคการแยกส่วนของสเปร์รี่ที่เป็นของเหลว(สีฟ้า)และส่วนที่เป็นเปลวไฟ(สีเหลือง)

3. อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกเครื่องยนต์เพื่อเป็นอุปกรณ์ต้นแบบคือ เครื่องยนต์ดีเซล 4 จังหวะ ชนิดห้องเผาไหม้ล่วงหน้า Kubota RT120 หล่อเย็นด้วยน้ำ ซึ่งข้อมูลทางเทคนิคของเครื่องยนต์ดังกล่าวแสดงไว้ในตารางที่ 1 [2]

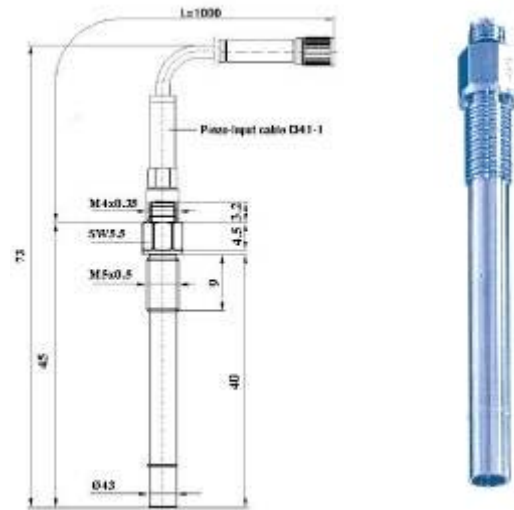
ตารางที่ 1 แสดงรายละเอียดของเครื่องยนต์ที่ทดสอบ

ผู้ผลิตเครื่องยนต์	Kubota
รุ่น	RT 120
ระบบห้องเผาไหม้	CI สูบเดี่ยว 4 จังหวะ มีห้องเผาไหม้แบบ IDI swirl chamber
ขนาดกระบอกสูบ x ช่วงชัก	94 mm. x 90 mm.
ปริมาตรกระบอกสูบ	624 CC.
กำลังสูงสุด	8.8 kW / 2400 rpm
แรงบิดสูงสุด	42.2 Nm /1600 rpm
อัตราส่วนกำลังอัด	21:1
หัวฉีด	ความดัน 140 bar
จังหวะการฉีดเชื้อเพลิง:	20 °CA BTDC
ระบบระบายความร้อน	ระบายความร้อนด้วยน้ำชนิดรังผึ้ง

เครื่องยนต์ ได้ถูกดัดแปลงติดตั้งปั้มน้ำหล่อเย็นเพื่อควบคุมอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นด้วยระบบคูลลิ่งทาวเวอร์และ ถูกต่อเข้ากับไดนาโมมิเตอร์ ชนิดกระแสนูนาน ยี่ห้อ AVL รุ่น Alpha 40

ข้อมูลความดันในกระบอกสูบวัดได้โดยใช้ AVL GU12P piezoelectric pressure transducer (ดังรูปที่ 4) จำนวน 2 ตัว ซึ่งติดตั้งที่ห้องเผาไหม้ล่วงหน้าและห้องเผาไหม้หลัก ตำแหน่งองศาเพลลาข้อเหวี่ยงทำการวัดด้วย crank angle encoder ผลิตภัณฑ์ Kistler

2613B ดังรูปที่ 5 โดยมีเครื่อง DEWE-Book [4] เป็นส่วนบันทึกข้อมูล ดังรูปที่ 6



รูปที่ 4 แสดงรูปของ Pressure Transducer สำหรับวัดความดันในห้องเผาไหม้



รูปที่ 5 แสดงรูปของ Crank Angle Encoder สำหรับวัดมุมเพลลาข้อเหวี่ยง



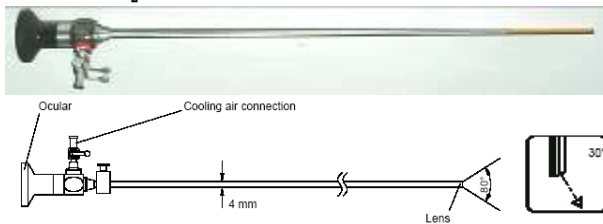
รูปที่ 6 แสดงเครื่อง DEWETRON รุ่น 5000-CA-SE การบันทึกภาพถ่ายปรากฏการณ์การเผาไหม้ใช้อุปกรณ์ AVL Engine Visioscope [3] ซึ่งประกอบด้วย Endoscope และ กล้อง VGA color CCD camera ยี่ห้อ PixelFly ความละเอียด 640×480 pixel ดังรูปที่ 7 ควบคุมโดย AVL control unit กล้องจะต่อกับ endoscope เสียบบาน sleeve เข้าไปในห้องเผาไหม้ล่วงหน้า โดย endoscope ที่ใช้มีมุมมอง

30° ดังรูปที่ 8 ซึ่งมี combustion chamber window สำหรับป้องกัน endoscope จากสภาวะอุณหภูมิสูงและความดันสูงในห้องเผาไหม้ ดังแสดงในรูปที่ 9

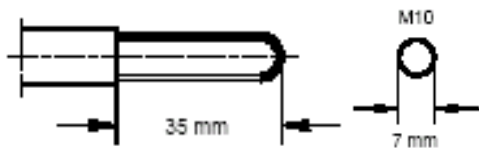
ในการบันทึกภาพถ่ายสเปร์ย์ต้องมีการใช้แหล่งกำเนิดแสงจากภายนอก (light unit) ผ่านสายใยแก้วนำแสงและ light guide ที่ทำจาก quartz glass ดังแสดงในรูปที่ 10 ขณะที่ภาพถ่ายปรากฏการณ์การเผาไหม้จะไม่มีการใช้แหล่งกำเนิดแสงจากภายนอก โดยแผนภูมิการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการบันทึกความดันในห้องเผาไหม้และภาพถ่ายปรากฏการณ์การเผาไหม้แสดงไว้ในรูปที่ 11



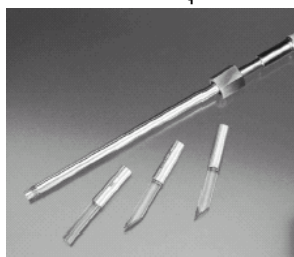
รูปที่ 7 CCD camera และเลนส์



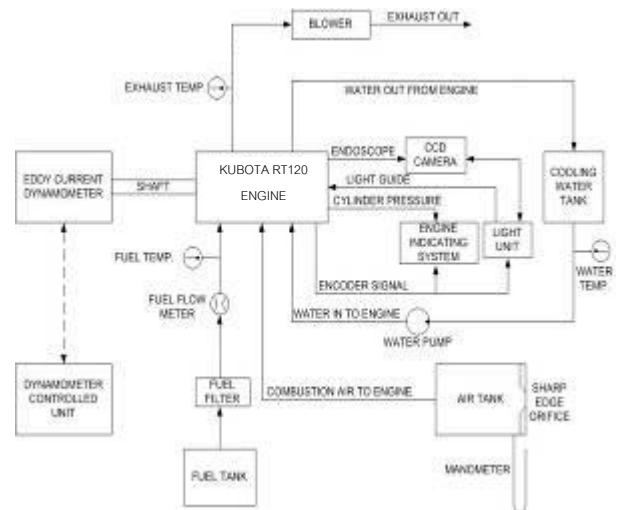
รูปที่ 8 แสดง endoscope แบบมุมมอง 30°



รูปที่ 9 แสดง combustion chamber window ที่ใช้กับ endoscope ที่มีมุมมอง 30



รูปที่ 10 แสดง light guide พร้อม lighting head ทั้ง 3 มุมมอง



รูปที่ 11 แผนภูมิการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ

4. วิธีดำเนินการวิจัย

4.1. การดัดแปลงเครื่องยนต์ [5]

การดัดแปลงเครื่องยนต์เพื่อใช้วัดความดันกระบอกสูบและเพื่อถ่ายภาพการเผาไหม้ มีขั้นตอนในการดัดแปลงดังนี้

4.1.1 การดัดแปลงเครื่องยนต์เพื่อวัดข้อมูลความดันกระบอกสูบ

ในการวัดข้อมูลความดันกระบอกสูบ จะติดตั้ง crank angle encoder ที่ปลายเพลลาของไดนาโมมิเตอร์ด้านตรงข้ามเครื่องยนต์ และติดตั้ง pressure transducer จำนวน 2 ตัว ที่ฝาสูบทั้งที่ prechamber และ main chamber เพื่อให้ได้ข้อมูลความดันพร้อมกันทั้ง 2 ห้องเผาไหม้ ซึ่งจะได้ผลการวิเคราะห์อัตราการผลิตความร้อนได้ถูกต้องมากกว่าการใช้ข้อมูลความดันจากห้องเผาไหม้เดียว

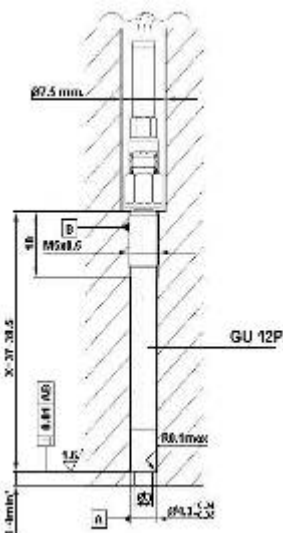
4.1.1.1 Pressure transducer ที่ prechamber

ติดตั้ง pressure transducer โดยตรงกับฝาสูบ โดยเจาะรูและทำเกลียวดังรูปที่ 12 แต่เนื่องจากที่บริเวณรอบ prechamber มีเนื้อโลหะสำหรับการเจาะรูน้อยเกินไป ดังนั้นจึงต้องนำชิ้นเหล็กกล้ามาเชื่อมกับฝาสูบตรงบริเวณที่เจาะรูเพื่อเพิ่มความยาวของรูจนสามารถทำได้ตามแบบที่ต้องการ

4.1.1.2 Pressure transducer ที่ main chamber

เนื่องจาก pressure transducer ตัวนี้จะต้องทะลุผ่านโพรงของน้ำหล่อเย็นโดยหลีกเลี่ยงไม่ได้ ดังนั้นจึงแก้ปัญหาโดยใช้ sleeve ที่ทำด้วยวัสดุ

เป็น stainless steel 304 ขนาด $\varnothing 12$ mm ซึ่งยึดกับ ฝาสูบด้วยเกลียวขนาด M10x0.5 (ดังรูปที่ 13) พร้อมทั้งซีลเกลียวด้วยกาวยี่ห้อ Loctite รุ่น 648 ฝาสูบที่ถูกดัดแปลงแล้วแสดงไว้ในรูปที่ 14



รูปที่ 12 แสดงมิติของรูและเกลียวในสำหรับติดตั้ง pressure transducer ยี่ห้อ AVL รุ่น GU12P



รูปที่ 13 แสดง installation sleeve สำหรับ main chamber pressure transducer



รูปที่ 14 แสดงฝาสูบที่ได้รับการดัดแปลงเพื่อติดตั้ง pressure transducer ที่ prechamber และ main chamber เรียบร้อยแล้ว

4.1.2 การดัดแปลงเครื่องยนต์เพื่อทำ

Visualization

เมื่อติดตั้งเครื่องยนต์บนแท่นทดสอบ จะพบว่า บริเวณที่สามารถทำการติดตั้งอุปกรณ์

endoscope ได้นั้น มีเพียงบริเวณฝาสูบที่อยู่เหนือ หัวฉีดขึ้นไปเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 15

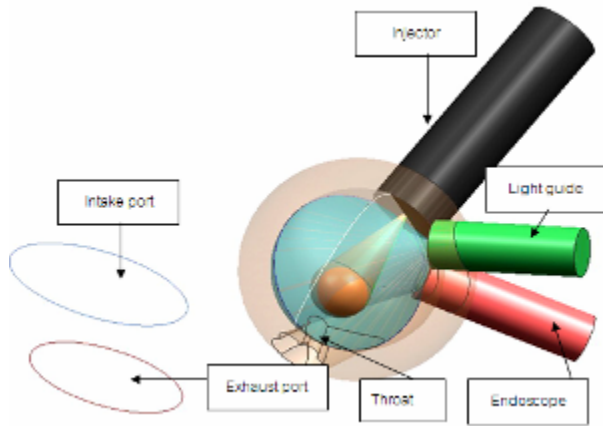


รูปที่ 15 แสดงฝาสูบของเครื่องยนต์วิจัยขณะติดตั้งอยู่บนแท่นทดสอบ

4.1.2.1 การออกแบบติดตั้งด้วยการจำลองภาพจากมุมมองของ endoscope

การออกแบบติดตั้งเริ่มจากการจำลองภาพการมองด้วย endoscope โดยใช้โปรแกรม AUTOCAD ช่วยในการออกแบบ เพื่อให้ได้ center line ที่เหมาะสมสำหรับการเจาะรูที่ฝาสูบทะลุไปที่ห้องเผาไหม้ เพื่อติดตั้ง sleeve สำหรับ endoscope และ light guide โดยในการจำลองภาพการมองเห็นนี้ จะจำลองการใช้ endoscope ที่มีมุมการมอง (view angle) 30° และใช้ light guide ที่มี lighting head มุมมอง 0° โดยทั้ง endoscope และ light guide จะมีขอบเขตการมอง (field of view) ที่ 80° ทั้งคู่

จากการจำลองภาพการมองของ endoscope และลักษณะของแสงที่ออกมาจาก light guide บนโปรแกรมช่วยออกแบบแล้ว พบว่ามุมที่เหมาะสมระหว่างแกน endoscope และ light guide จะเป็น 34.3° รูปที่ 16 แสดง field of view ที่จำลองภาพผลลัพธ์ที่จะเห็นจาก endoscope โดยสีส้มที่อยู่ตรงกลางคือ spray เชื้อเพลิงจากหัวฉีด กรวยสีฟ้าคือมุมการมองจาก endoscope ส่วนกรวยสีเทาแทนแสงจาก light guide ซึ่งจากภาพจำลองพบว่า ตำแหน่งของสเปรย์เชื้อเพลิงจะอยู่ตรงกลางของภาพ มีปลายหัวฉีดและ light guide อยู่ที่ขอบของภาพพอดี รวมทั้งเห็นขอบของ throat ที่ขอบของภาพด้านตรงข้ามกับปลายหัวฉีดพอดี



รูปที่ 16 แสดง field of view ของ endoscope และ light guide เมื่อมองในแนวที่คาดว่าจะเห็นจาก endoscope

4.1.2.2 การตรวจสอบก่อนการติดตั้ง sleeve

จากตำแหน่งของแกน endoscope และ light guide ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมช่วยออกแบบ จะนำมาใช้เพื่อพิจารณาการติดตั้ง sleeve สำหรับ endoscope และ light guide เข้ากับฝาสูบ ดังผลลัพธ์ที่แสดงในรูปที่ 17 และรูปที่ 18 ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินการดังนี้

ก. กำหนดแนวอ้างอิงโดยยึดขอบด้านวาล์วไอเสีย และแนวร่องกันวาล์ว เป็นแกนอ้างอิง X และ Y ตามลำดับ

ข. กำหนดตำแหน่งเพื่อเจาะเป็นรูสำหรับ Light guide sleeve และ Endoscope sleeve ที่ผิวฝาสูบ ด้าน prechamber โดยมีตำแหน่งดังนี้

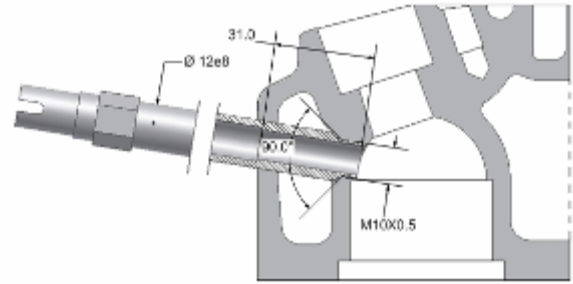
ข.1 ตำแหน่งจุดศูนย์กลาง Endo-scope sleeve อยู่ที่ $X=85\text{ mm}$ $Y=44.6\text{ mm}$ $Z=-32\text{ mm}$

ข.2 ตำแหน่งจุดศูนย์กลาง Light guide sleeve อยู่ที่ $X=85\text{ mm}$ $Y=81.22\text{ mm}$ $Z=-35.11\text{ mm}$

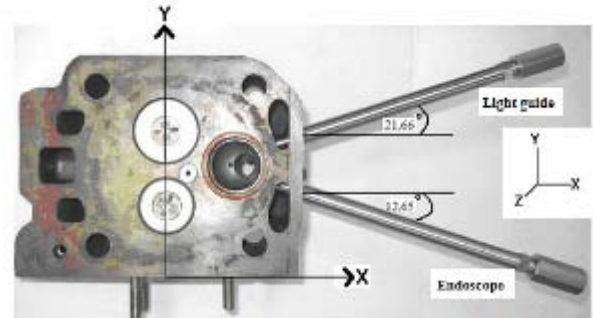
ค. กำหนดพิกัดแกน center line ของรู

ค.1 การเจาะรูของ Endoscope sleeve จากตำแหน่งในข้อ ข.1 จะเจาะขนานกับระนาบ XY พร้อมกับทำมุม 21.66 องศา กับระนาบ XZ

ค.2 การเจาะรูของ Light guide sleeve จากตำแหน่งในข้อ ข.2 จะเจาะทำมุม 6.35 องศา กับระนาบ XY พร้อมกับทำมุม -12.65 องศา กับระนาบ XZ



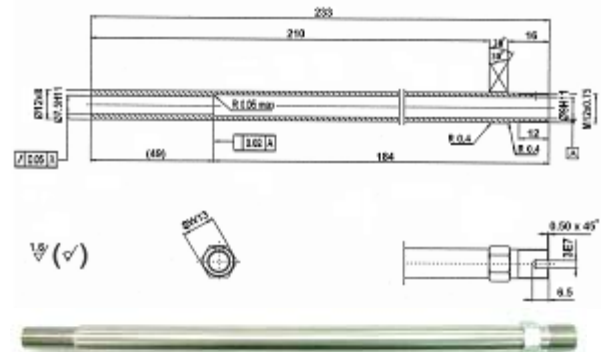
รูปที่ 17 แสดงตัวอย่างของลักษณะรูบนฝาสูบที่ต้องเจาะเตรียมไว้สำหรับใส่ sleeve



รูปที่ 18 แสดงตำแหน่งของการเจาะรู sleeve

4.1.2.3 การติดตั้งอุปกรณ์

การติดตั้งตัว endoscope, light guide รวมทั้ง window กับห้องเผาไหม้ที่ฝาสูบนั้นต้องมีการติดตั้ง sleeve (ดังแสดงในรูปที่ 19) ก่อน ซึ่งเป็นตัวยึดอุปกรณ์เหล่านี้กับฝาสูบ รวมทั้งป้องกันไม่ให้น้ำหล่อเย็นในฝาสูบรั่วเข้าสู่ห้องเผาไหม้หรือรั่วออกไปภายนอกได้



รูปที่ 19 แสดง sleeve ที่ใช้กับชุดอุปกรณ์ endoscope โดยต้องทำการติดตั้ง endoscope sleeve และ light guide sleeve ให้อยู่ในตำแหน่งที่ทำให้มองเห็นภาพที่ดีก่อน ซึ่งต้องมีการดัดแปลงฝาสูบ เมื่อมี sleeve ติดตั้งที่ฝาสูบแล้ว จึงติดตั้ง combustion chamber window โดยสอดเข้าไปใน sleeve เพื่อป้องกัน endoscope และ light guide จากความดันและอุณหภูมิของห้องเผาไหม้ หลังจากนั้นจึงสอดตัว

endoscope เข้าไปในตัว window แล้วจึงยึดด้วย clamping nut และยึดกล้องถ่ายรูปกับตัว endoscope ส่วน light guide จะต้องประกอบกับ lighting head ก่อน แล้วจึงสอดเข้าไปใน sleeve และยึดด้วย lock nut ที่มากับ light guide [2]

4.2. การพัฒนาแนวทางการวิเคราะห์ผล

แนวทางการวิเคราะห์ผล ได้แบ่งเป็น (ก) การวิเคราะห์ การเผาไหม้จาก ข้อมูลความดันกระบอกสูบ เพื่อหาอัตราการปล่อยความร้อน จากการเผาไหม้ (ข) การวิเคราะห์ภาพถ่าย ปรากฏการณ์ ของละอองฝอย และการเผาไหม้ และ (ค) การวิเคราะห์เพื่อเชื่อมโยง ระหว่างผลจากการวิเคราะห์อัตราการปล่อยความร้อน และผลจากการวิเคราะห์ภาพถ่าย ดังนี้

4.2.1 การวิเคราะห์ความดันกระบอกสูบเพื่อหาอัตราการปล่อยความร้อน

จากการเก็บข้อมูลความดันในห้องเผาไหม้ ล่วงหน้าและห้องเผาไหม้หลัก จะถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อ คำนวณหาอัตราการปล่อยความร้อน ด้วยสมการที่ 1 โดยการวิเคราะห์สภาวะการเผาไหม้จากอัตราการ ปล่อยความร้อนและการพิจารณาเลือกจุดฉีดเชื้อเพลิง และจุดเริ่มต้นการเผาไหม้มีขั้นตอนดังนี้

4.2.1.1 นิยามที่ใช้ในการวิเคราะห์สภาวะการเผาไหม้จากอัตราการปล่อยความร้อน

การบ่งชี้สภาวะการเผาไหม้กระทำโดย พิจารณา อัตราการปล่อยความร้อน ที่คำนวณได้จาก สมการ 1 นั้นได้กำหนดเงื่อนไขดังนิยามต่อไปนี้

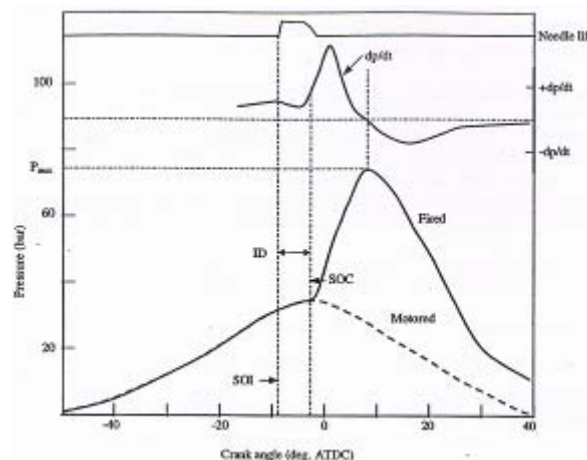
- 1) มุมข้อเหวี่ยงที่เริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิง พิจารณา จากมุมข้อเหวี่ยงที่ความดันในท่อจ่ายเชื้อเพลิงเข้า หัวฉีดมีค่าสูงกว่า Injector opening pressure
- 2) การบ่งชี้มุมข้อเหวี่ยงที่เริ่มต้นการเผาไหม้ พิจารณาจากมุมข้อเหวี่ยงที่ค่าอัตราการปล่อยความร้อนเพิ่มขึ้นมากกว่าศูนย์ครั้งแรก
- 3) การบ่งชี้มุมข้อเหวี่ยงที่สิ้นสุดการเผาไหม้ พิจารณาจากมุมข้อเหวี่ยงที่อัตราการปล่อยความร้อน ลดลงจนมีค่าเป็นศูนย์ครั้งแรก

4) ช่วงล่าช้าของการเผาไหม้ (Ignition delay) บ่งชี้ จากช่วงมุมข้อเหวี่ยงระหว่างจุดเริ่มฉีดเชื้อเพลิงถึง จุดเริ่มต้นการเผาไหม้

5) อัตราการเผาไหม้ บ่งชี้จากอัตราการปล่อยความร้อน

4.2.1.2 การ สอบทวน จุดฉีดเชื้อเพลิงและจุดเริ่มต้นการเผาไหม้

อัตราการเปลี่ยนแปลงความดันในห้องเผาไหม้หรือ dp/dCA และค่าความดันในห้องเผาไหม้นั้น สามารถนำมาพิจารณาหาจุดฉีดเชื้อเพลิงและจุดเริ่มต้นการเผาไหม้ได้ดังแสดงใน รูปที่ 20 ในการ สอบทวนจุดเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิงนั้นจะพิจารณาจากความดันในห้องเผาไหม้ล่วงหน้า ซึ่งพิจารณาจากอัตราการเปลี่ยนแปลงความดันในห้องเผาไหม้ ล่วงหน้า โดยพิจารณาจากจุดสูงสุดแรกของอัตราการ เปลี่ยนแปลงความดันในห้องเผาไหม้ล่วงหน้า เนื่องจากในจังหวะการอัดตัวของลูกสูบนั้นอัตราการ เปลี่ยนแปลงความดันในห้องเผาไหม้จะสูงขึ้นเรื่อยๆ แต่เมื่อมีการฉีดเชื้อเพลิงเข้าไปในห้องเผาไหม้นั้น เชื้อเพลิงจะต้องการพลังงานส่วนหนึ่งในการแตกตัว เป็นละอองเพื่อผสมกับอากาศ ดังนั้นทำให้ห้องเผา ไหม้ล่วงหน้าสูญเสียความร้อนไปส่วนหนึ่งทำให้ความดันในห้องเผาไหม้ล่วงหน้าตกลงเล็กน้อยและเมื่อมีการเผาไหม้เริ่มต้นขึ้นก็จะทำให้มีอัตราการเปลี่ยนแปลง ความดันในห้องเผาไหม้ล่วงหน้าเพิ่มขึ้นอีกครั้ง



รูปที่ 20 แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงความดัน, จุดเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิง, จุดเริ่มต้นการเผาไหม้และ ความดันในห้องเผาไหม้ [6]

สำหรับการ สอบทวน จุดเริ่มต้นการเผาไหม้ นั้นจะพิจารณาจากค่าการเปลี่ยนแปลงความดันในห้องไหม้หลัก ซึ่งเมื่อมีการเผาไหม้เกิดขึ้นจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความดันในห้องไหม้ หลักเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นจุดแรกที่มีการเพิ่มขึ้นของค่าความดันในห้องเผาไหม้ หลักเหนือค่า motoring pressure จะถูกพิจารณาเป็นจุดเริ่มต้นการเผาไหม้

4.2.2 การวิเคราะห์ภาพถ่ายของสเปรย์เชื้อเพลิง และการเผาไหม้

การวิเคราะห์ภาพถ่ายของสเปรย์เชื้อเพลิง และการเผาไหม้ที่ได้จากการถ่ายภาพโดยใช้ CCD camera ในการบันทึกภาพมี 2 แบบ คือ แบบใช้ flash เพื่อบันทึกภาพของสเปรย์เชื้อเพลิง และแบบไม่ใช้ flash เพื่อบันทึกภาพของการเผาไหม้ โดยในการวิเคราะห์ภาพถ่ายกระทำโดยใช้ AVL Visioscope software ช่วยในการวิเคราะห์ ซึ่งแบ่งเป็น การวิเคราะห์ภาพถ่ายของสเปรย์เชื้อเพลิง และการวิเคราะห์ภาพถ่ายของการเผาไหม้

4.2.2.1 แนวทางการวิเคราะห์ภาพถ่ายของสเปรย์เชื้อเพลิง

จากการสังเกตการเกิดสเปรย์จากภาพถ่าย โดยตรง สามารถพิจารณา มุมข้อเหวี่ยงที่เริ่มเกิดสเปรย์ (start of injection), ลักษณะการเคลื่อนที่ของสเปรย์, มุมของสเปรย์ (spray angle), ระยะพุ่งของสเปรย์ (spray penetration)

นิยามของระยะพุ่งในที่นี้ หมายถึงความยาวของลำสเปรย์เชื้อเพลิงนับจากปลายหัวฉีดจนถึงปลายสเปรย์ โดยรวมถึงส่วนของเชื้อเพลิงที่มีการระเหยที่ปลายของสเปรย์ แต่ไม่รวมถึงส่วนของปลายสเปรย์ที่ลุกไหม้เป็นเปลวไฟแล้ว ดังแสดงในรูปที่ 3

4.2.2.2 แนวทางการวิเคราะห์ภาพถ่ายการเผาไหม้

การวิเคราะห์สภาวะของการเผาไหม้จากภาพถ่ายกระทำดังต่อไปนี้

- 1) มุมข้อเหวี่ยงที่เริ่มเกิดการเผาไหม้ พิจารณาจากภาพแรกที่เห็นเปลวไฟในห้องเผาไหม้
- 2) มุมข้อเหวี่ยงที่สิ้นสุดการเผาไหม้ พิจารณาจากภาพสุดท้ายที่เห็นเปลวไฟในห้องเผาไหม้

3) ช่วงมุมข้อเหวี่ยงที่เกิดการเผาไหม้ พิจารณาจากจุดที่เริ่มเกิดการเผาไหม้ถึงเวลาสิ้นสุดการเผาไหม้

4) มุมข้อเหวี่ยงที่มีอัตราการเผาไหม้สูงสุด พิจารณาจากภาพการแจกแจจออกของอุณหภูมิ ที่มีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุด

5) ช่วงล่าช้า พิจารณาจากภาพแรกที่มองเห็นสเปรย์จากปลายหัวฉีด (จากภาพถ่ายแบบมี flash) และภาพแรกที่เห็นเปลวไฟในห้องเผาไหม้

4.3 การวิเคราะห์เพื่อเชื่อมโยงระหว่างผลจากการวิเคราะห์อัตราการปล่อยความร้อนและผลจากการวิเคราะห์ภาพปรากฏการณ์การเผาไหม้

การวิเคราะห์เพื่อเชื่อมโยงผลดังกล่าวนี้ เป็นการยืนยันถึงผลการวิเคราะห์ภาพถ่ายว่ามีความถูกต้องเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลการเผาไหม้เชิงปริมาณ โดยใช้การวิเคราะห์ช่วงเวลาการเผาไหม้จากภาพถ่ายดังที่ได้อธิบายในหัวข้อ 4.2.2.2 เทียบกับการวิเคราะห์สภาวะการเผาไหม้จากอัตราการปล่อยความร้อนใน prechamber ดังแสดงในหัวข้อ 4.2.1.1

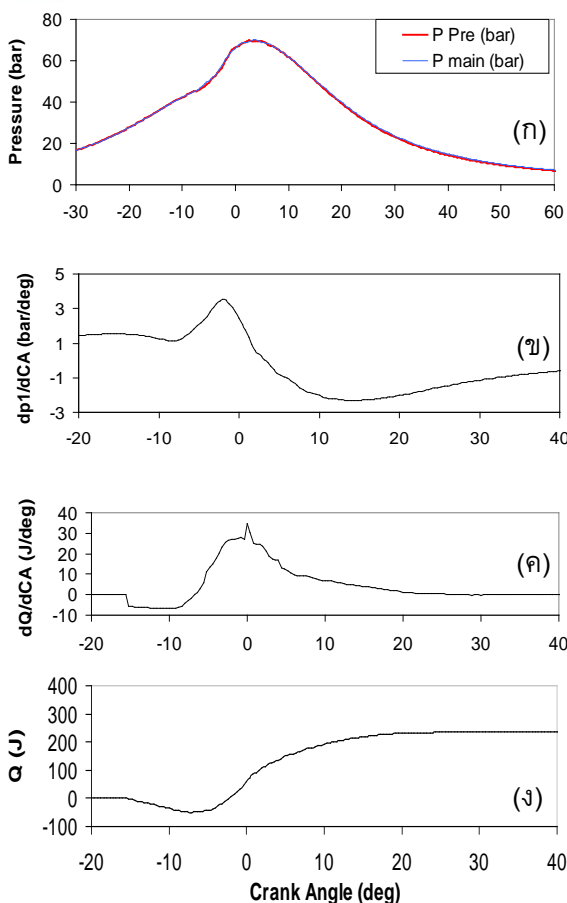
5. การทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบและวิเคราะห์ผล[7]

การทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบได้กระทำโดยการบันทึกภาพของสเปรย์และการเผาไหม้จากอุปกรณ์ต้นแบบ พร้อมบันทึกค่าความดันภายในกระบอกสูบขณะที่เครื่องยนต์ทำงานในสภาวะคงตัว ที่ความเร็วรอบ 1200 rpm แรงบิด 10 Nm ซึ่งภาพของสเปรย์และการเผาไหม้ที่บันทึกได้ที่แสดงในตารางที่ 2

5.1 ผลการวิเคราะห์การเผาไหม้จากข้อมูลความดันในกระบอกสูบ

การวิเคราะห์การเผาไหม้จากข้อมูลความดันในกระบอกสูบ แสดงในรูปที่ 21 (ก) ถึง (ง)

ผลจากการวิเคราะห์พบว่า ความดันในห้องเผาไหม้ล่วงหน้าสูงสุดคือ 69.18 bar ความดันในห้องเผาไหม้หลักสูงสุดคือ 68.88 bar เริ่มฉีดเชื้อเพลิงที่ -15.2°CA เริ่มเกิดการเผาไหม้ที่ -7.2°CA สิ้นสุดการเผาไหม้ที่ 27.2°CA มีช่วงการเผาไหม้ 34.4°CA ช่วงล่าช้าในการจุดระเบิดที่ 8°CA และมีอัตราการเผาไหม้สูงสุดที่ 34.7 J/degree ที่ 0°CA มีการปล่อยความร้อนรวม 234.98 J



รูปที่ 21 (ก) ความดันในกระบอกสูบ, (ข) อัตราการเปลี่ยนแปลงความดัน, (ค) อัตราการปล่อยความร้อน,

(ง) การปล่อยความร้อนสุทธิ ที่ 1200 rpm, 10Nm

5.2 ผลทดสอบจากการบันทึกภาพของสเปรย์และการเผาไหม้

ในภาพปรากฏการณ์ของการเกิดสเปรย์สามารถบ่งชี้ถึงมุมข้อเหวี่ยงที่เริ่มฉีดเชื้อเพลิงได้คือ -15°CA ส่วนภาพสุดท้ายที่เห็นการฉีดเชื้อเพลิงอยู่ที่ -4.0°CA ดังนั้นจึงมีช่วงการฉีดเชื้อเพลิง (Injection duration) ที่ 11.0°CA

ปรากฏการณ์การเผาไหม้สามารถพิจารณาได้จากภาพถ่ายเปลวไฟในห้องเผาไหม้สว่างหน้าซึ่งไม่ใช่แสง flash โดยที่มุมข้อเหวี่ยง ที่ -8.5°CA จะเห็นเปลวไฟเป็นครั้งแรกที่มุมขวาล่างของภาพ จากนั้นเปลวไฟจะขยายตัวตามทิศทางในแนวแกนสเปรย์ หลังจากนั้นที่ $-0.5, 3.5^{\circ}\text{CA}$ เปลวไฟเคลื่อนที่ตามการหมุนวนของอากาศในห้องเผาไหม้ นอกจากนี้จะสังเกตเห็นได้ว่าเปลวไฟมีความสว่างมากที่สุดในช่วง 7.5

ถึง 11.0°CA โดยบริเวณที่สว่างที่สุดจะอยู่ที่มุมซ้ายล่างของภาพ ซึ่งเป็นบริเวณที่มีสเปรย์เชื้อเพลิงออกมาจากปลายหัวฉีด ส่วนที่ 15.5°CA เป็นต้นไปจะเห็นว่าเปลวไฟเริ่มลดขนาดและดับตัวลง โดยเห็นเปลวไฟครั้งสุดท้ายที่ 28°CA

ตารางที่ 2 แสดงภาพปรากฏการณ์ของการเกิดสเปรย์และการเผาไหม้เชื้อเพลิงดีเซลที่มีมุมข้อเหวี่ยงต่างๆ

ของอุปกรณ์ต้นแบบ

ภาพปรากฏการณ์การเกิดสเปรย์เชื้อเพลิง (บันทึกภาพแบบมี flash)				ภาพปรากฏการณ์การเผาไหม้ (บันทึกภาพแบบไม่มี flash ช่วง)			
CA	ภาพที่บันทึกได้	CA	ภาพที่บันทึกได้	CA	ภาพที่บันทึกได้	CA	ภาพที่บันทึกได้
-16.0°CA		-7.5°CA		-12.5°CA		11.5°CA	
-15.0°CA		-6.0°CA		-8.5°CA		15.5°CA	
-13.5°CA		-4.0°CA		-4.5°CA		19.5°CA	
-12.0°CA		-3.0°CA		-0.5°CA		23.5°CA	
-10.5°CA		-1.5°CA		3.5°CA		28.0°CA	
-9.0°CA		0°CA		7.5°CA		31.5°CA	

5.3 เปรียบเทียบผลของความดันห้องเผาไหม้กับการถ่ายภาพปรากฏการณ์การเผาไหม้

ผลการวิเคราะห์จากการวัดข้อมูลความดันและจากภาพปรากฏการณ์การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงดีเซล ดังแสดงในตารางที่ 3 และ 4

เมื่อพิจารณาจุดเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิง จุดสิ้นสุดการฉีดเชื้อเพลิง จุดเริ่มต้นการเผาไหม้ และจุดสิ้นสุดการเผาไหม้ จากตารางที่ 3 และ 4 จะพบว่าค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลความดันและค่าที่ได้จากภาพถ่ายมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลความดันเป็นค่าที่ได้จากทางทฤษฎี ส่วนค่าที่ได้จากการถ่ายภาพเป็นปรากฏการณ์จริงที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ จึงสรุปได้ว่าค่าความดันในห้องเผาไหม้มีความคล่องกับภาพถ่ายปรากฏการณ์การเผาไหม้

ตารางที่ 3 แสดงผลของจุดเริ่มต้นการฉีดเชื้อเพลิง(SOI), จุดสิ้นสุดการฉีดเชื้อเพลิง(EOI) และจุดเริ่มต้นการเผาไหม้(SOC)

Speed (rpm)	T (Nm)	SOI			EOI			SOC		
		ภาพถ่าย (CA)	ความดัน (CA)	Different (CA)	ภาพถ่าย (CA)	ความดัน (CA)	Different (CA)	ภาพถ่าย (CA)	ความดัน (CA)	Different (CA)
1200	10	-15.0	-15.2	0.2	-4.0	-5.6	1.6	-8.5	-7.2	1.3

ตารางที่ 4 แสดงผลของช่วงล่าช้าการจุดระเบิด(Ignition Delay), จุดสิ้นสุดการเผาไหม้(EOC) และช่วงการเผาไหม้(Burn Duration)

Speed (rpm)	T (Nm)	Ignition delay			EOC			Burn duration		
		ภาพถ่าย (CA)	ความดัน (CA)	Different (CA)	ภาพถ่าย (CA)	ความดัน (CA)	Different (CA)	ภาพถ่าย (CA)	ความดัน (CA)	Different (CA)
1200	10	6.5	8.0	1.5	28.0	27.2	0.8	36.5	34.4	2.1

6. สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิเคราะห์การเผาไหม้ในเครื่องยนต์ CI ทั้งการวิเคราะห์ข้อมูลจากความดันในกระบอกสูบ การวิเคราะห์จากภาพถ่ายในเรื่องของสเปรย์เชื้อเพลิงและการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้สามารถบอกถึงประโยชน์ที่ได้รับจากเครื่องยนต์ต้นแบบที่ได้ดัดแปลงเพื่อใช้สำหรับงานวิจัย โดยจะสรุปรายละเอียดในส่วนความสามารถในการใช้ประโยชน์จากเครื่องยนต์ต้นแบบได้ ดังนี้

1) สามารถวิเคราะห์ผลอัตราการปล่อยความร้อนจากข้อมูลที่ได้จากการวัดความดันในกระบอกสูบ โดยเครื่องยนต์ต้นแบบ ซึ่งสามารถบอกได้ถึง ลักษณะการเกิดการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ อัตราการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง จุดที่เริ่มเกิดการเผาไหม้ (Start of combustion) จุดที่สิ้นสุดการเผาไหม้ (End of combustion) และช่วงระยะเวลาในการเผาไหม้ (Combustion duration)

2) สามารถบอกถึงลักษณะของสเปรย์เชื้อเพลิง จากภาพถ่ายปรากฏการณ์เกิดสเปรย์ (Spray information) ซึ่งบอกได้ถึงจุดเริ่มต้นในการฉีดเชื้อเพลิง (Start of injection) มุมของสเปรย์ (Spray angle) และระยะพุ่งของสเปรย์ (Spray penetration)

3) สามารถบอกถึงลักษณะของการเกิดการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ จากภาพถ่ายปรากฏการณ์การ

เผาไหม้ ซึ่งบอกได้ถึงจุดเริ่มต้นในการเกิดการเผาไหม้ (Start of combustion) จุดที่สิ้นสุดการเผาไหม้ (End of combustion) ช่วงระยะเวลาในการเกิดการเผาไหม้ (Combustion duration) ทิศทางในการเคลื่อนที่ของเปลวไฟในห้องเผาไหม้ และความน่าจะเป็นที่จะเกิดเปลวไฟของบริเวณต่างๆในห้องเผาไหม้

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่สนับสนุนทุนในการพัฒนาอุปกรณ์ต้นแบบ บริษัท สยามคูโบต้าอุตสาหกรรม จำกัด ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์เครื่องยนต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Heywood, J. B.(1988). *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGraw-Hill, Singapore.
- [2] “คู่มือช่างเครื่องยนต์ดีเซลคูโบต้า รุ่น RT”, หน่วยงานอบรมเทคนิค, ส่วนบริการเทคนิค, บริษัท สยามคูโบต้าอุตสาหกรรม จำกัด
- [3] AVL List GmbH (2001). *AVL VisioScope Operating Manual*, AVL LIST GMBH Graz, Austria
- [4] DEWETRON Ges.m.b.H. (2005). *DEWE-5000 Technical Reference Manual*, DEWETRON Elektronische Messgeraete Ges.m.b.H., Austria

- [5] วิรุทธิ์ เกื้อกิตติวงศ์ (2547). การพัฒนาเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดชนิดห้องเผาไหม้ล่วงหน้าให้เป็นอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับสังเกตการณ์การเผาไหม้แบบอัดตัวของละอองฝอย, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [6] Zhao, H. and Ladommatos, N. (2001). *Engine Combustion Instrument and Diagnostics*, Society of Automotive Engineers, United States of America.
- [7] จักรกฤษ ตั้งรัตนโสภณ (2550). การวิเคราะห์การเผาไหม้และภาพปรากฏการณ์การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงดีเซลทางเลือกในเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก ชนิดห้องเผาไหม้ล่วงหน้า, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.