การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 18
18 – 20 ตุลาคม 2547 จังหวัด-ขอนแก่น

การศึกษาตัวบ่งชี้ที่กำหนดขอบเขตการทำงานของเครื่องยนต์ HCCI

A Study of the Identical Parameters for Operating Engine on HCCI Mode

พีรวัฒน์ สายสิริรัตน์[1] อาทิตย์ คำทา[2] สมชาย จันทร์ชาวนา[2]

[1]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยสยาม กรุงเทพฯ 10163
[2]ห้องปฏิบัติการวิจัยเครื่องยนต์และการเผาไหม้ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ 10140
Email: Peerawat28@YAHOO.com[1], Somchai.cha@kmutt.ac.th[2]

P. Saisirirat[1], A. Khamta[2], S. Chanchaona[2]
Department of Mechanical Engineering, Siam University, Bangkok 10163
Combustion and Engines Research Laboratory, Department of Mechanical Engineering,
King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10140

บทคัดย่อ

เครื่องยนต์ HCCI ทำงานโดยการอัดส่วนผสมของเชื้อเพลิงและอากาศซึ่งผสมกันภายนอกเครื่องยนต์ ให้เกิดการจุดระเบิดด้วยตนเองจากหลายๆ ตำแหน่งในห้องเผาไหม้ ซึ่งทำให้การเผาไหม้ราบเรียบและช่วงเวลาการเผาไหม้สั้นมาก สามารถเผาไหม้ได้ที่อัตราส่วนผสมเจือจางมากๆ และสามารถใช้กับเชื้อเพลิงได้หลายชนิด สารมลพิษมีปริมาณต่ำมาก และให้ประสิทธิภาพทางความร้อนสูงมาก แต่สภาวะที่เครื่องยนต์สามารถทำงานได้ยังอยู่ในขอบเขตจำกัด ขึ้นอยู่กับปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการเผาไหม้ เช่น อุณหภูมิไอดี อัตราส่วนผสมของอากาศต่อเชื้อเพลิง และคุณสมบัติของเชื้อเพลิง เป็นต้น ในบทความนี้ได้นำเสนอผลการทดสอบเพื่อหาตัวแปรบ่งชี้ (Identical parameters) ที่แสดงคุณลักษณะการเผาไหม้ และขอบเขตของตัวแปรบ่งชี้ที่เหมาะสม โดยใช้ผลการทดสอบจากเครื่องยนต์ดีเซลแบบฉีดตรง เป็นเครื่องยนต์พื้นฐาน ทดสอบที่ความเร็วรอบ 1500 รอบต่อนาที และใช้ LPG เป็นเชื้อเพลิง พบว่าตัวแปรบ่งชี้ที่สำคัญได้แก่ ตำแหน่งเริ่มต้นเผาไหม้ของส่วนผสมของเชื้อเพลิงและอากาศ อัตราการเปลี่ยนแปลงความดันในกระบอกสูบ และความดันยังผลเฉลี่ยบ่งชี้

Abstract

The HCCI engine (Homogeneous charge compression ignition engine) involves the compression of a premixed charge to combustion by auto – ignition of the cylinder contents. This type of combustion is smooth and provides short burn duration. The engine cans operated in the low equivalence ratio region, supports many fuels type, gives high thermal efficiency and has low emission. However the operating region is narrow, depended on the combustion – effect variable such as intake temperature, equivalence ratio, fuel properties etc. This paper will offer the experimental result of some identical parameters, which are explained the combustion characteristic of the HCCI engine and the appropriate region of the identical parameters. The based engine and fuel used in the whole study program were ISUZU model 4JA1 diesel engine and liquefied petroleum gas. The result showed the ignition initiated of mixture, rate of pressure change and indicated mean effective pressure are identified the combustion characteristic of the engine.

1. บทนำ

เครื่องยนต์ HCCI หรือเครื่องยนต์ที่ใช้ส่วนผสมเป็นเนื้อเดียวกันและจุดระเบิดด้วยการอัด เป็นทางเลือกใหม่สำหรับการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ลูกสูบ มีลักษณะการทำงานที่รวมจุดเด่นของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟและเครื่องยนต์จุดระเบิดโดยการอัด และรวมข้อดีซึ่งเป็นคุณลักษณะเฉพาะของเครื่องยนต์ทั้งสองชนิด คือมีสารมลพิษจำพวกไนโตรเจนออกไซด์, เขม่าและสารละอองในปริมาณต่ำมาก ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูง ทั้งยังสามารถใช้กับเชื้อเพลิงได้หลากหลายชนิดรวมทั้งเชื้อเพลิงทดแทนที่เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ลูกสูบในอนาคตเช่น ก๊าซธรรมชาติ แอลกอฮอล์ น้ำมันพืช เป็นต้น อย่างไรก็ตามยังมีข้อจำกัดที่สำคัญอยู่ที่การควบคุมจุดเริ่มต้นการเผาไหม้ ให้เป็นไปตามสภาวะที่ต้องการ ทางห้องปฏิบัติการวิจัยเครื่องยนต์และการเผาไหม้ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยสยาม มีความพยายามในการศึกษา

และทำความเข้าใจเครื่องยนต์ HCCI เพื่อให้สามารถพัฒนาให้เกิดประโยชน์ในทางปฏิบัติได้ในอนาคตอันใกล้

การทำงานของเครื่องยนต์ HCCI เริ่มจากการผสมอากาศและเชื้อเพลิงก่อนประจุเข้าสู่ห้องเผาไหม้ เช่นเดียวกับเครื่องยนต์ SI และอาจต้องมีการเพิ่มอุณหภูมิไอดีด้วย จากนั้นส่วนผสมจะถูกอัดในจังหวะอัดจนกระทั่งเกิดการจุดระเบิดด้วยตนเองเหมือนกับเครื่องยนต์ดีเซล การเผาไหม้จะเริ่มจากหลายๆ ตำแหน่งพร้อมๆ กัน (เสมือนมีการจุดระเบิดจากหัวเทียนจำนวนมาก) และเกิดการลุกลามของเปลวไฟในระยะสั้นๆ ไปสู่ส่วนผสมที่ยังไม่เผาไหม้โดยรอบคล้ายกับการลามของเปลวไฟในเครื่องยนต์ SI ช่วงเวลาการเผาไหม้สั้นมาก จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการเผาไหม้ในลักษณะนี้ ใช้ส่วนผสมที่เจือจางทำให้เกิดไนโตรเจนออกไซด์ในปริมาณต่ำ ขณะที่ประสิทธิภาพทางความร้อนสูงหากแต่ยังไม่สามารถควบคุมตำแหน่งเริ่มต้นการเผาไหม้ได้ และการปรับเปลี่ยนสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์ยังทำได้ลำบาก

งานวิจัยเกี่ยวกับเครื่องยนต์ HCCI ในประเทศไทยได้เริ่มต้นขึ้นครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ. 2544 [1] เพื่อพัฒนาเครื่องยนต์ให้สามารถทำงานในแบบ HCCI และได้ศึกษาข้อมูลความดันในกระบอกสูบ โดยการดัดแปลงเครื่องยนต์ดีเซล ให้เป็นเครื่องยนต์ HCCI ในการทดสอบและใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิง ผลการศึกษาพบว่าสภาวะที่เครื่องยนต์ทำงานแบบ HCCI ได้สมบูรณ์ ขึ้นอยู่กับตัวแปรที่ศึกษา 2 ตัวแปร คือ อุณหภูมิไอดี และอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงสมมูล นอกจากนั้นเครื่องยนต์ทำงานอย่างราบเรียบได้ในช่วงอุณหภูมิไอดีและอัตราส่วนผสมในช่วงแคบๆ เท่านั้น ต่อมาได้มีการศึกษาถึงผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิไอดีและอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงสมมูล ต่อตำแหน่งเริ่มต้นการเผาไหม้ [2] โดยค้นหาขอบเขตของตัวแปรทั้งสองที่ทำให้เครื่องยนต์สามารถทำงานได้อย่างราบเรียบ ในการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนบ่งชี้ของเครื่องยนต์ HCCI ตลอดช่วงการทำงาน มีค่าสูงกว่า 45 เปอร์เซ็นต์ และมลพิษจำพวกไนโตรเจนออกไซด์อยู่ในระดับต่ำกว่า 15 ppm บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาตัวแปรบ่งชี้ที่เกี่ยวข้องกับคุณลักษณะการเผาไหม้ เพื่อใช้กำหนดขอบเขตสภาวะการทำงานอย่างราบเรียบของเครื่องยนต์ HCCI

2. การสำรวจเอกสาร

เครื่องยนต์ HCCI ได้ถูกค้นพบครั้งแรกโดยบังเอิญ ระหว่างการทดสอบเครื่องยนต์ SI สองจังหวะ ของ Onishi และคณะ [3] ซึ่งเป็นการทดสอบเกี่ยวกับการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ SI ในขณะที่อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงเจือจางในช่วงภาระต่ำถึงปานกลาง และมีการตัดการทำงานของหัวเทียน พบว่าเครื่องยนต์ยังสามารถจุดระเบิดด้วยตนเองต่อไปได้ Onishi ได้อธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นและให้ชื่อว่า Active thermo-atmosphere combustion (ATAC)

ต่อมา Najt และ Foster [4] ได้ศึกษาการทำงานของเครื่องยนต์ในแบบดังกล่าว แต่ให้ชื่อการเผาไหม้แบบนี้เป็น Homogeneous charge compression ignition engine (HCCI) และได้ทำการศึกษาการเผาไหม้โดยใช้เครื่องยนต์ 4 จังหวะเป็นเครื่องยนต์พื้นฐานและพบว่าตัวแปรที่มีผลกระทบกับการเผาไหม้ ได้แก่ อัตราส่วนอัด อัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงและอากาศ ความเร็วรอบ ปริมาณการนำไอเสียย้อนกลับมาใช้ อุณหภูมิเริ่มต้นของส่วนผสม ชนิดของเชื้อเพลิง

Thring [5] ได้ทำการทดสอบและสร้างแผนภูมิแสดงช่วงสภาวะการทำงานที่เครื่องยนต์ HCCI สามารถทำงานได้ สภาวะที่ใช้ในการศึกษาคือ อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงสมมูล และปริมาณการนำไอเสียกลับมาใช้ ทำการทดสอบโดยใช้เครื่องยนต์ SI เป็นเครื่องยนต์พื้นฐาน มีอัตราส่วนอัด 14 ต่อ 1 และได้แบ่งแผนภูมิออกเป็น 4 ส่วนได้แก่ ช่วงการทำงานที่เหมาะสม (Satisfactory operating region), ช่วงที่ไม่เกิดการเผาไหม้ (Misfire region), ช่วงอัตราการเผาไหม้สูงทำให้เกิดการน็อค (Knock region) และช่วงที่กำลังของเครื่องยนต์ไม่เพียงพอในการเดินเครื่อง (Power limit region) ผลการทดสอบพบว่าการทำงานได้อย่างราบเรียบของเครื่องยนต์มีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนอัด, อุณหภูมิไอดี, ความเร็วรอบ และชนิดของเชื้อเพลิง

Christensen และคณะ [6, 7, 8] ได้ทำการศึกษาโดยละเอียดเกี่ยวกับเชื้อเพลิงที่ใช้ได้กับเครื่องยนต์ HCCI โดยทดสอบกับเชื้อเพลิง 6 ชนิด คือ Iso–octane n–heptane น้ำมันเบนซิน น้ำมันดีเซล Ethanol และก๊าซธรรมชาติ โดยใช้เครื่องยนต์ที่มีพื้นฐานจากทั้งเครื่องยนต์ SI และเครื่องยนต์ CI พบว่าคุณสมบัติของเชื้อเพลิงที่มีผลโดยตรงกับการเผาไหม้คือ ค่าออคเทนของเชื้อเพลิง ขณะที่ความสามารถในการระเหยของเชื้อเพลิงมีผลกับอุณหภูมิไอดี ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจน เมื่อใช้น้ำมันดีเซลในการทดสอบ และสามารถสรุปได้ว่าเครื่องยนต์ HCCI สามารถใช้ได้กับเชื้อเพลิงหลายชนิด โดยการปรับอุณหภูมิไอดี อัตราส่วนอัด และอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงสมมูล เพื่อให้ได้ตำแหน่งการจุดระเบิดที่เหมาะสม โดยที่ปริมาณการนำไอเสียกลับมาใช้สามารถควบคุมอัตราการเผาไหม้ได้

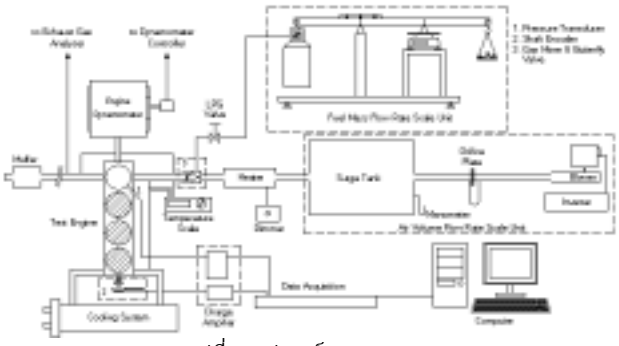
Chen และคณะ [9] ได้พัฒนาการใช้เชื้อเพลิงเป็นการใช้เชื้อเพลิงที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน 2 ชนิดคือใช้ DME เป็นเชื้อเพลิงเพื่อการจุดระเบิด และก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงหลักในการให้พลังงาน พบว่าเครื่องยนต์สามารถทำงานได้ตลอดช่วงภาระ เมื่อกำหนดให้ความดันสูงสุดของเครื่องยนต์ไม่เกิน 9 MPa เป็นขอบเขตของการ knock ของเครื่องยนต์

3. อุปกรณ์และการทดสอบ

การทดสอบได้ใช้เครื่องยนต์ที่ดัดแปลงมาจากเครื่องยนต์ดีเซลแบบฉีดตรง สี่สูบ ขนาด 2.5 ลิตร โดยดัดแปลงให้ทำงานเพียงสูบเดียว รายละเอียดของเครื่องยนต์ดังแสดงในตารางที่ 1 นอกจากนั้นได้ติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติม เช่น อุปกรณ์จ่ายเชื้อเพลิงก๊าซ อุปกรณ์อุ่นอากาศ อุปกรณ์บันทึกความดันในกระบอกสูบ เป็นต้น ดังรายละเอียดในรูปที่ 1

ตารางที่ 1 รายละเอียดของเครื่องยนต์ทดสอบก่อนและหลังดัดแปลง

	ก่อนดัดแปลง	หลังดัดแปลง
รหัสเครื่องยนต์	ISUZU 4JA1 Direct Injection	
จำนวนสูบ	4 สูบ	1 สูบ
ปริมาตรกวาด	2500 ซีซี	625 ซีซี
Bore **x** Stroke	93 มม. **x** 92 มม.	
อัตราส่วนอัด	18.4 ต่อ 1	



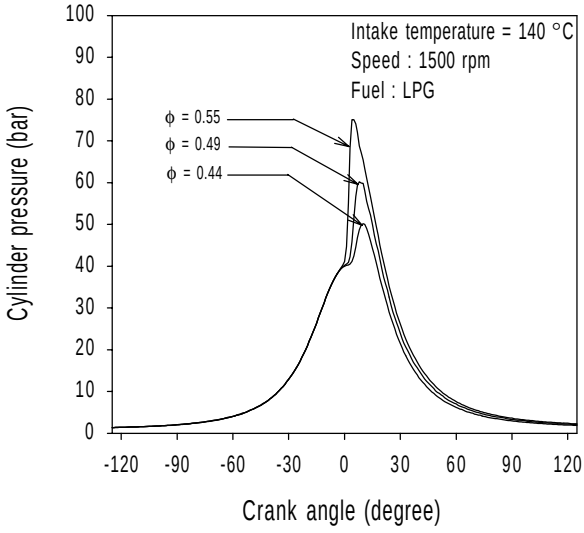
รูปที่ 1 อุปกรณ์การทดสอบ

การทดสอบเริ่มจากเดินเครื่องยนต์แบบเครื่องยนต์ดีเซลปกติ ปรับอุณหภูมิไอดีให้อยู่ในช่วงที่กำหนด จ่ายเชื้อเพลิงก๊าซเข้าผสมกับอากาศในท่อไอดี พร้อมทั้งลดปริมาณการจ่ายน้ำมันดีเซล จนกระทั่งตัดการจ่ายน้ำมันดีเซล เป็นการปรับเปลี่ยนการทำงานจากเครื่องยนต์ดีเซลเป็นเครื่องยนต์ HCCI จากนั้นบันทึกผลการทดสอบและวิเคราะห์คุณลักษณะการเผาไหม้ โดยใช้กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิคส์วิเคราะห์ในแบบหนึ่งโซน [10, 11]

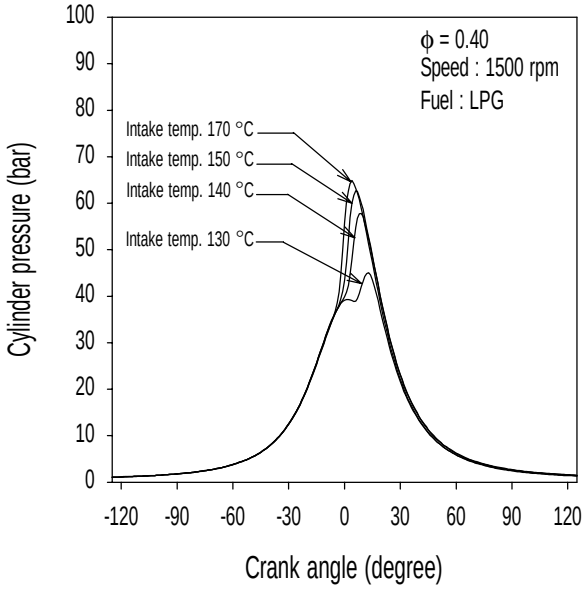
4. ผลการทดสอบเครื่องยนต์ HCCI

เครื่องยนต์ HCCI ทำงานโดยการอัดส่วนผสมของอากาศและเชื้อเพลิง ที่ผสมกันก่อนถูกประจุเข้าสู่ห้องเผาไหม้ให้เกิดการจุดระเบิดด้วยตนเองจากหลายๆ ตำแหน่งภายในห้องเผาไหม้ การควบคุมตำแหน่งเริ่มการเผาไหม้ ทำได้โดยการปรับตัวแปรควบคุม (Control variables) ได้แก่ อุณหภูมิไอดี อัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงและอากาศ อัตราส่วนการอัด และชนิดของเชื้อเพลิง ในการทดสอบใช้เครื่องยนต์ที่มีอัตราส่วนอัด 18.4 ต่อ 1 และใช้ LPG เป็นเชื้อเพลิง ดังนั้นตัวแปรควบคุมที่เหลือในการทดสอบจึงประกอบด้วย อุณหภูมิไอดี และอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงและอากาศ ได้ทำการทดสอบที่ความเร็วรอบ 1500 รอบต่อนาที รูปที่ 2ก แสดงความดันในกระบอกสูบที่อุณหภูมิไอดีคงที่คือ 140 ^{o}C แต่อัตราส่วนสมมูลมีค่า 0.44 / 0.49 / 0.55 ผลการศึกษาพบว่าเมื่ออัตราส่วนสมมูลเพิ่มขึ้น ตำแหน่งการจุดระเบิด (ตำแหน่งการเริ่มต้นการเผาไหม้) จะเร็วขึ้นเล็กน้อย ขณะที่อัตราการเปลี่ยนแปลงความดันในกระบอกสูบเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งหากอัตราส่วนสมมูลสูงมากเกินไปอัตราการเปลี่ยนแปลงความดันในกระบอกสูบจะรุนแรงอาจทำให้เกิดความเสียหายกับชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ และผลการวิเคราะห์ความดันในกระบอกสูบแสดงให้เห็นว่า ความดันยังผลเฉลี่ยบ่งชี้ (IMEP) มีค่าขึ้นอยู่กับอัตราส่วนสมมูลดังนั้นหากอัตราส่วนสมมูลต่ำมากเกินไป IMEP ซึ่งแสดงถึงงานที่เครื่องยนต์สร้างในการเดินเครื่องจะต่ำจนกระทั่งไม่สามารถเดินเครื่องยนต์ได้

รูปที่ 2ข แสดงความดันในกระบอกสูบที่อัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงและอากาศคงที่คือ 0.40 และอุณหภูมิไอดีมีค่า 130, 140, 150 และ 170 ^{o}C สามารถสังเกตได้ว่าตำแหน่งเริ่มต้นการเผาไหม้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิไอดีของส่วนผสม คือถ้าอุณหภูมิไอดีสูงขึ้นตำแหน่งการเริ่มต้นการเผาไหม้จะเกิดก่อนจุดศูนย์ตายบนมากขึ้น และหากอุณหภูมิไอดีต่ำตำแหน่งการเริ่มต้นการเผาไหม้จะช้า จนกระทั่งเกิดหลังจุดศูนย์ตายบน



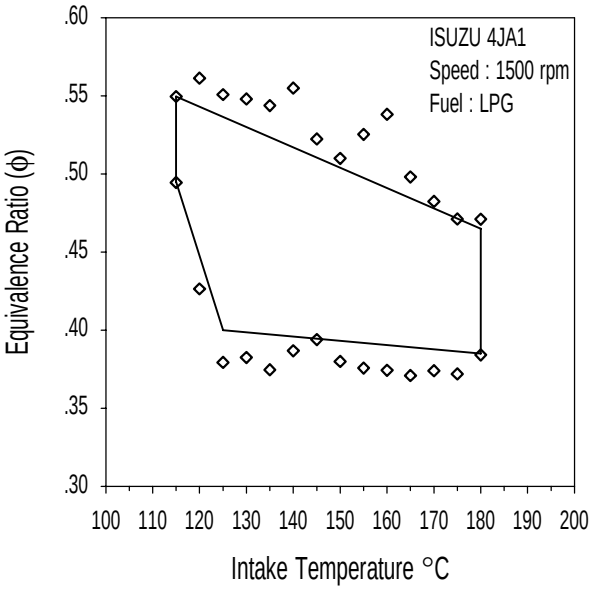
รูปที่ 2ก ความดันในกระบอกสูบและมุมเพลาข้อเหวี่ยง



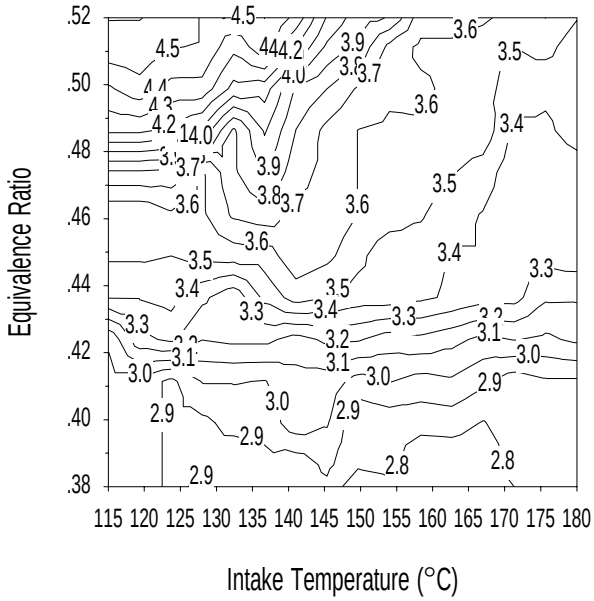
รูปที่ 2ข ความดันในกระบอกสูบและมุมเพลาข้อเหวี่ยง

ตำแหน่งการเริ่มต้นการเผาไหม้เป็นตัวแปรสำคัญที่กำหนดการทำงานของเครื่องยนต์ จากผลการศึกษาหากตำแหน่งการเริ่มต้นการเผาไหม้เกิดหลังจุดศูนย์ตายบน ความดันในกระบอกสูบจะมีความแปรปรวนสูง เครื่องยนต์ไม่สามารถทำงานได้อย่างราบเรียบ และหากตำแหน่งการเริ่มต้นการเผาไหม้เกิดก่อนจุดศูนย์ตายบนมากเกินไป เครื่องยนต์จะต้องสูญเสียงานในการอัดส่วนผสมในจังหวะที่ลูกสูบเคลื่อนที่ขึ้นมากเกินไป ซึ่งผลการวิเคราะห์ความดันในกระบอกสูบแสดงให้เห็นว่า IMEP มีแนวโน้มที่จะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิไอดีสูงขึ้น

จากผลความดันในกระบอกสูบแสดงให้เห็นว่าเราสามารถกำหนดขอบเขตการทำงานของเครื่องยนต์ HCCI จากตัวแปรบ่งชี้ (Identical parameters) ที่เกี่ยวข้องกับคุณลักษณะการเผาไหม้ ซึ่งเป็นขอบเขตการทำงานที่เครื่องยนต์สามารถทำงานได้อย่างราบเรียบ รูปที่ 3 แสดงขอบเขตสภาวะที่เครื่องยนต์สามารถทำงานได้อย่างราบเรียบ



รูปที่ 3 สภาวะการทดสอบที่เครื่องยนต์สามารถทำงานอย่างราบเรียบ



รูปที่ 4 ความดันยังผลเฉลี่ยบ่งชี้ (bar)

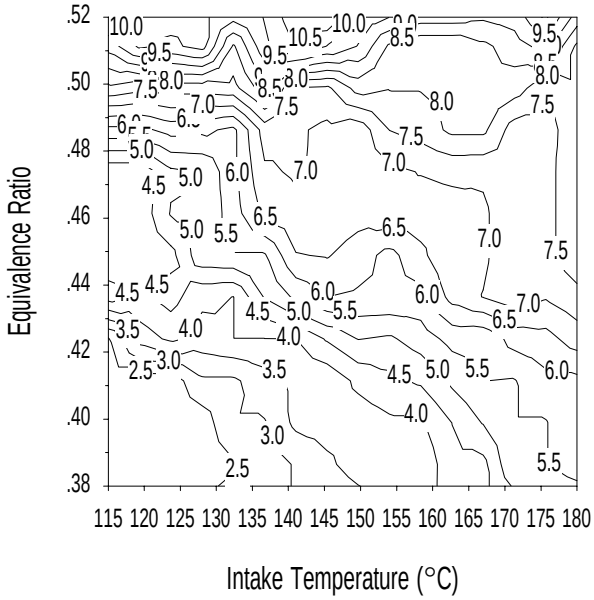
จากรูปเป็นสภาวะที่เครื่องยนต์ทำงานได้อย่างราบเรียบ จากการทดสอบเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบคงที่ 1500 รอบต่อนาที ในช่วงของตัวแปรควบคุม (Control variables) ที่สามารถควบคุมได้ได้แก่ อุณหภูมิไอดี และอัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงต่ออากาศ ซึ่งอุณหภูมิไอดีอยู่ในช่วง 115 – 180 °C และอัตราส่วนสมมูลในช่วง 0.38 – 0.55

5. การวิเคราะห์ผลความดันในกระบอกสูบ

จากผลความดันในกระบอกสูบในสภาวะการทดสอบที่เครื่องยนต์ HCCI สามารถทำงานได้ การวิเคราะห์ผลทำให้ทราบถึงตัวแปรบ่งชี้ (Identical parameters) บางประการที่เกี่ยวข้องกับคุณลักษณะการเผาไหม้ ซึ่งสามารถแสดงถึงทำงานของเครื่องยนต์ได้อย่างชัดเจน ดังนั้นจึงสามารถกำหนดขอบเขตการทำงานของเครื่องยนต์ได้ โดยการกำหนดขอบเขตของตัวแปรบ่งชี้ดังกล่าว

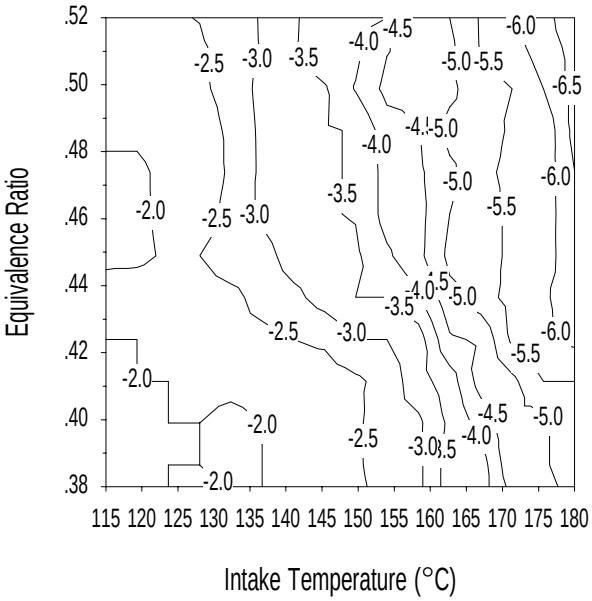
จากผลความดันในกระบอกสูบในแต่ละสภาวะซึ่งเครื่องยนต์ทำงานได้ คำนวณค่าตัวแปรบ่งชี้ที่เกี่ยวข้องจากการศึกษาแนวโน้มของความสัมพันธ์ทั้งนี้ได้แก่ ความดันยังผลเฉลี่ยบ่งชี้ (IMEP) อัตราการเปลี่ยนแปลงความดันในกระบอกสูบ ตำแหน่งการจุดระเบิด (ตำแหน่งการเริ่มต้นการเผาไหม้) และความดันสูงสุดในทุกสภาวะ พบว่าตัวแปรบ่งชี้ดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับตัวแปรควบคุมคือ อุณหภูมิไอดีและอัตราส่วนสมมูล ดังแสดงในรูปที่ 4 ถึงรูปที่ 7 โดยเป็นค่าที่คำนวณได้จากผลการทดสอบกว่า 60 สภาวะ และแสดงเป็นแผนภูมิเส้นแบ่งเขตแดนของค่าตัวแปรบ่งชี้

รูปที่ 4 แสดงค่า IMEP ในทุกสภาวะการทดสอบ แสดงถึงพลังงานทั้งหมดที่ส่วนผสมของเชื้อเพลิงและอากาศผลิตได้ ซึ่งประกอบด้วยพลังงานในการเอาชนะภาระที่เครื่องยนต์ได้รับ และพลังงานที่สูญเสียไปทั้งหมด ซึ่งหากเครื่องยนต์สามารถทำงานได้ หมายความว่าส่วนผสมสามารถ ผลิตพลังงานเพื่อเอาชนะพลังงานที่สูญเสียไปทั้งหมดได้ หากพิจารณาความสัมพันธ์ของ IMEP พบว่าช่วงอัตราส่วนสมมูลต่ำกว่า 0.43, IMEP จะมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนสมมูลเท่านั้น ดังนั้นหากกำหนดให้พลังงานที่สูญเสียไปทั้งหมดคิดเป็น IMEP 2.8 bar อัตราส่วนสมมูลต้องมีค่ามากกว่า 0.38

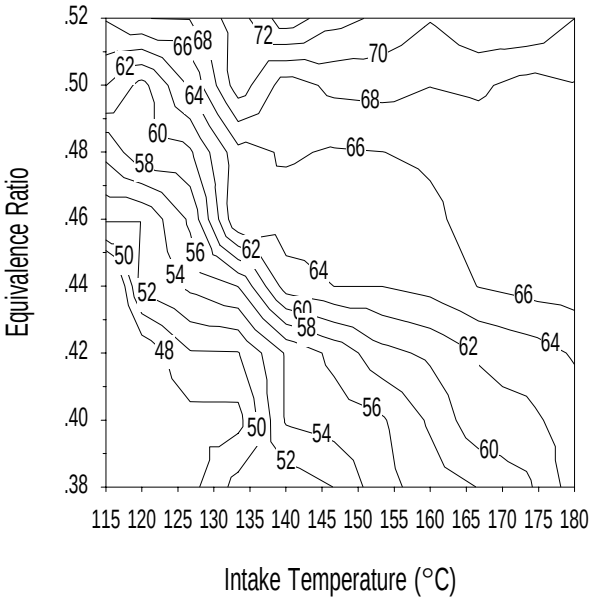


รูปที่ 5 อัตราการเปลี่ยนแปลงความดันในกระบอกสูบ (bar / degree crank angle)

รูปที่ 5 แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงความดันในกระบอกสูบซึ่งแสดงถึงความรวดเร็วและความรุนแรงในการเผาไหม้ จากรูปอัตราการเปลี่ยนแปลงความดันมีความสัมพันธ์กับทั้งอัตราส่วนสมมูลและอุณหภูมิไอดี จากการทดสอบอัตราการเปลี่ยนแปลงความดันที่ไม่ทำให้เครื่องยนต์เกิดความเสียหายต้องมีค่าน้อยกว่า 9.5 bar/crank angle degree ซึ่งจากค่า IMEP และอัตราการเปลี่ยนแปลงความดันในกระบอกสูบ ทำให้สามารถกำหนดช่วงอัตราส่วนสมมูลได้ โดยอัตราส่วนสมมูลที่เหมาะสมต้องมีค่าระหว่าง 0.38 ถึง 0.52



รูปที่ 6 ตำแหน่งจุดระเบิด (degree atdc)

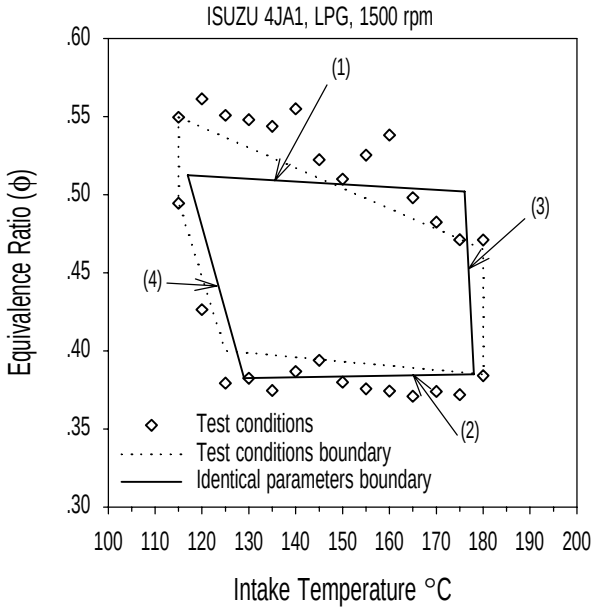


รูปที่ 7 ความดันสูงสุดในกระบอกสูบ (bar)

รูปที่ 6 แสดงตำแหน่งการจุดระเบิด (ตำแหน่งการเริ่มต้นการเผาไหม้) จากผลการศึกษาตำแหน่งการจุดระเบิดซึ่งอยู่ในช่วงใกล้เคียงกับจุดศูนย์ตายบนในปลายจังหวะอัดเป็นตัวแปรบ่งชี้สำคัญที่กำหนดการทำงานของเครื่องยนต์โดยหากตำแหน่งการเริ่มต้นการเผาไหม้ช้าความดันในกระบอกสูบจะมีความแปรปรวนสูง เครื่องยนต์ไม่สามารถทำงานได้อย่างราบเรียบ ขณะที่หากตำแหน่งการเริ่มต้นการเผาไหม้เร็วมากเกินไป เครื่องยนต์จะต้องสูญเสียงานในการอัดส่วนผสมในจังหวะที่ลูกสูบเคลื่อนที่ขึ้น ทำให้งานรวมของเครื่องยนต์ต่ำลง ทั้งความดันในกระบอกสูบยังเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะทำให้ชิ้นส่วนของเครื่องยนต์เกิดความเสียหายได้ จากรูปตำแหน่งการเริ่มต้นการเผาไหม้จะมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิไอดีเป็นส่วนใหญ่ ขณะที่อัตราส่วนสมมูลจะส่งผลกระทบเมื่อตำแหน่งการเริ่มต้นการเผาไหม้เกิดช้ากว่า 4 องศาก่อนจุดศูนย์ตายบนเท่านั้น ซึ่งจากการทดสอบตำแหน่งการเริ่มต้นการเผาไหม้ที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วงระหว่าง 6 ถึง 2 องศาก่อนจุดศูนย์ตายบน ซึ่งตำแหน่งการเริ่มต้นการเผาไหม้ทำให้สามารถกำหนดอุณหภูมิไอดีในช่วงที่เครื่องยนต์สามารถทำงานได้อย่างราบเรียบได้โดยอุณหภูมิไอดีควรอยู่ในช่วง 115 – 180 ^{o}C

รูปที่ 7 แสดงความดันในกระบอกสูบสูงสุดในแต่ละสภาวะ จะเห็นได้ว่าความดันสูงสุดของเครื่องยนต์ จะมีความสัมพันธ์กับตัวแปรควบคุมในแนวโน้มเดียวกันกับอัตราการเปลี่ยนแปลงความดันในกระบอกสูบ ทั้งนี้เนื่องจากความดันสูงสุดของเครื่องยนต์ HCCI เกิดจากการเพิ่มขึ้นของความดันจากการเผาไหม้ในตำแหน่งการเริ่มต้นการเผาไหม้ที่ใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นจึงสามารถกำหนดความดันสูงสุดเป็นตัวแปรบ่งชี้อีกตัวที่แทนอัตราการเปลี่ยนแปลงความดันในกระบอกสูบได้ ซึ่งค่าความดันสูงสุดที่เหมาะสมควรมีค่าน้อยกว่า 70 bar

จากความสัมพันธ์ของตัวแปรบ่งชี้ที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องยนต์ HCCI สามารถนำมาเขียนขอบเขตการทำงานได้ดังแสดงในรูปที่ 8 โดยกำหนดให้เส้นประคือเส้นแสดงขอบเขตการทำงานที่ได้จากสภาวะการทดสอบที่เครื่องยนต์ทำงานได้อย่างราบเรียบ และเส้นเต็มคือเส้นแสดงขอบเขตตัวแปรบ่งชี้ซึ่งประกอบไปด้วย เส้นที่อัตราการเปลี่ยนแปลงความดัน 9.5 bar/crank angle degree (เส้นที่ 1) เส้นความดันยังผลเฉลี่ยบ่งชี้ 2.8 bar (เส้นที่ 2) เส้นแสดงตำแหน่งการจุดระเบิด 6 องศาและ 2 องศาก่อนจุดศูนย์ตายบน (เส้นที่ 3 และ 4 ตามลำดับ) ซึ่งจะเห็นได้ว่าเส้นขอบเขตทั้งสองที่กำหนดขึ้นมีความใกล้เคียงกันมาก



รูปที่ 8 ขอบเขตสภาวะที่เครื่องยนต์ทำงานได้ราบเรียบ

6. บทสรุป

จากการศึกษาเครื่องยนต์ HCCI ได้ค้นพบว่าเครื่องยนต์ HCCI มีข้อดีที่น่าสนใจอยู่หลายประการจากคุณลักษณะเฉพาะของการเผาไหม้ที่เกิดจากการอัดส่วนผสมของเชื้อเพลิงและอากาศให้เกิดการจุดระเบิด

ด้วยตนเอง ซึ่งเป็นการเผาไหม้ที่เริ่มต้นจากหลายๆ ตำแหน่งในห้องเผาไหม้ เสมือนกับการจุดระเบิดจากหัวเทียนจำนวนมากซึ่งด้วยคุณลักษณะการเผาไหม้นี้ทำให้เครื่องยนต์สามารถทำงานได้อย่างราบเรียบ มีประสิทธิภาพทางความร้อนสูง สามารถใช้เชื้อเพลิงได้หลายชนิด อีกทั้งยังมีการปล่อยสารมลพิษในปริมาณต่ำ ซึ่งผลการศึกษาพบว่าการควบคุมให้เครื่องยนต์ทำงานอย่างราบเรียบ สามารถทำได้โดยควบคุมให้เครื่องยนต์ทำงานในช่วงตัวแปรบ่งชี้ อันได้แก่

- อัตราการเปลี่ยนแปลงความดันในกระบอกสูบซึ่งผลการทดสอบพบว่าจะต้องมีค่าน้อยกว่า 9.5 bar/crank angle degree
- ความดันยังผลเฉลี่ยบ่งชี้ต้องมีค่ามากกว่า 2.8 bar
- ตำแหน่งการจุดระเบิด (ตำแหน่งการเริ่มต้นการเผาไหม้) ซึ่งผลการทดสอบพบว่าจะต้องมีค่าอยู่ระหว่าง 6 ถึง 2 องศาก่อนจุดศูนย์ตายบน

ความสัมพันธ์ของตัวแปรบ่งชี้ที่มีผลต่อการทำงานของเครื่องยนต์ในบทความนี้ ทำให้สามารถกำหนดขอบเขตสภาวะที่เครื่องยนต์ HCCI สามารถทำงานได้อย่างราบเรียบ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในงานวิจัยเกี่ยวกับเครื่องยนต์ HCCI ต่อไปในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

[1] พีรวัฒน์ สายสิริรัตน์ “การทดลองและศึกษาการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ที่มีส่วนผสมเป็นเนื้อเดียวกันและจุดระเบิดโดยการอัด”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 2544

[2] สมชาย จันทร์ชาวนา, พีรวัฒน์ สายสิริรัตน์ และ อาทิตย์ คำทา, “การศึกษาเทคโนโลยีการเผาไหม้ HCCI : ทางเลือกใหม่สำหรับการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ลูกสูบ”, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 16 จังหวัดภูเก็ต 2545

[3] Onishi, S., Hong, S., Shoda, K., Do, J.P., and Kato, S., 1979, “Active Thermo - Atmosphere Combustion (ATAC) - A New Combustion Process for Internal Combustion Engines”, SAE Paper No. 790501.

[4] Najt, P.M. and Foster, D.E., 1983, “Compression - Ignited Homogeneous Charge Combustion”, SAE Paper No. 830264.

[5] Thring, R.H., 1989, “Homogeneous-Charge Compression Ignition (HCCI) Engines”, SAE Paper No. 892068.

[6] Christensen, M. and Johansson, B., 1997, “Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) Using Isooctane, Ethanol and Natural Gas - A Comparison with Spark Ignition Operation”, SAE Paper No. 972874.

[7] Christensen, M. and Johansson, B., 1998, “Influence of Mixture Quality on Homogeneous Charge Compression Ignition”, SAE paper No. 982454.

[8] Christensen, M., Hultqvist, A. and Johansson, B., 1999, “Demonstrating the Multi Fuel Capability of a Homogeneous Charge Compression Ignition Engine with Variable Compression Ratio”, SAE Paper No. 1999 - 01 - 3679.

[9] Chen, Z., Konno, M., Oguma, M. and Yanai, T., 2000, “Experimental Study of CI Natural-Gas / DME Homogeneous Charge Engine”, SAE Paper No. 2000-01-0329.

[10] Heywood, J.B., 1988, Internal Combustion Engine Fundamentals, New York, McGraw Hill, pp. 386 - 388.

[11] Gatowski, J.A., Balles, E.N., Chun, K.M., Nelson, F.E., Ekchian, J.A. and Heywood, J.B., 1984, “Heat Release Analysis of Engine Pressure ”, SAE Paper No. 841359.