



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)
ปริญญา

วิศวกรรมเครื่องกล	วิศวกรรมเครื่องกล
สาขา	ภาควิชา

เรื่อง ผลกระทบของจังหวะการจุดระเบิดต่อสมรรถนะ อุณหภูมิ และการปล่อยมลพิษไอเสีย
ของเครื่องยนต์ดีเซลดัดแปลงให้ใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง

Impact of Ignition Timing on Performance, Exhaust Gas Temperature and Emissions
of Diesel Engine Converted to Natural Gas

นามผู้วิจัย เรือเอก ไกรสุเนตร เข้มสุข

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก _____
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิพล บุญจันต๊ะ, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม _____
(รองศาสตราจารย์สมพงษ์ พิเชฐภิญโญ, M.Eng.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม _____
(อาจารย์ธเนศ อรุณศรี โสภณ, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา _____
(รองศาสตราจารย์ชวลิต กิตติชัยการ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

_____)
(รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr.)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ _____ เดือน _____ พ.ศ. _____

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

ผลกระทบของจังหวะการจุดระเบิดต่อสมรรถนะ อุณหภูมิ และการปล่อยมลพิษไอเสีย
ของเครื่องยนต์ดีเซลดัดแปลงให้ใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง

Impact of Ignition Timing on Performance, Exhaust Gas Temperature and Emissions
of Diesel Engine Converted to Natural Gas

โดย

เรือเอก ไกรสุเนตร เข้มสุข

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

พ.ศ. 2552

ไกรสุนทร เข้มสุข, เรือเอก 2552: ผลกระทบของจังหวะการจุดระเบิดต่อสมรรถนะ
อุณหภูมิ และการปล่อยมลพิษไอเสีย ของเครื่องยนต์ดีเซลดัดแปลงให้ใช้ก๊าซธรรมชาติ
เป็นเชื้อเพลิง ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)
สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิพล บุญจันตะ, Ph.D. 100 หน้า

งานวิจัยนี้กล่าวถึงการวิเคราะห์ผลกระทบของจังหวะการจุดระเบิดต่อสมรรถนะ อุณหภูมิ
และการปล่อยมลพิษไอเสีย ของเครื่องยนต์ดีเซลรุ่น Mitsubishi 6D16-0A ที่ดัดแปลงเป็นเครื่องยนต์
ก๊าซธรรมชาติ โดยใช้ก๊าซธรรมชาติสำหรับยานยนต์ในประเทศไทย ในสภาวะเดินเร่งเปิดเต็มที่
และที่อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงสัมพันธ์ 1.00 ที่อัตราเร็วรอบ 1,800 2,000 2,200 และ 2,400
รอบต่อนาที ผลการทดสอบ สามารถบ่งชี้ถึงจังหวะการจุดระเบิดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับสมรรถนะ
ของเครื่องยนต์ อุณหภูมิและมลพิษในไอเสีย งานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการปรับแต่ง
จังหวะการจุดระเบิด ไม่เฉพาะแต่กับเครื่องยนต์ Mitsubishi 6D16-0A ที่ดัดแปลงเป็นเครื่องยนต์
ก๊าซธรรมชาติเท่านั้น ให้มีสมรรถนะสูงสุด โดยอุณหภูมิไอเสียไม่สูงเกินไปได้เป็นอย่างดี แต่ยัง
สามารถใช้เป็นแนวทางสำหรับเครื่องยนต์รุ่นอื่นที่มีคุณลักษณะคล้ายกันได้อีกด้วย นอกจากนี้
ยังสามารถแสดงแนวโน้มการเกิดมลพิษในไอเสียเพื่อใช้เป็นแนวทางในการควบคุมสำหรับการ
การดัดแปลงเครื่องยนต์ในลักษณะนี้

Kraisunate Hemsuk, Lieutenant 2009: Impact of Ignition Timing on Performance, Exhaust Gas Temperature and Emissions of Diesel Engine Converted to Natural Gas. Master of Engineering (Mechanical Engineering), Major Field: Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Pipon Boonchanta, Ph.D. 100 pages.

This paper presents the Impact of ignition timing on performance, exhaust gas temperature and emissions of the Mitsubishi 6D16-0A diesel engine converted to a natural gas fueled engine. The engine was dyno-tested using typical Thai-quality natural gas with fully-open throttle and stoichiometric mixture at engine speeds of 1,800, 2,000, 2,200 and 2,400 rpm. The test results indicated optimum ignition timings with respect to engine performance, exhaust gas temperature and emission levels. The outcomes of this work offered a guideline to optimize the ignition timings of the converted Mitsubishi 6D16-0A diesel engine and other engines of similar specifications, with respect to performance and exhaust gas temperature. Moreover, the findings of this study provides information for optimizing a natural gas engine conversion for exhaust emissions reduction.

_____ / _____ / _____
Student's signature Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิพล บุญจันทร์ ประธานกรรมการ ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาช่วยเหลือในการให้คำปรึกษาและวางแผนในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ ตลอดจนให้การสนับสนุนอุปกรณ์การทดลองทั้งหมดโดยไม่คิดค่าใช้จ่ายใดๆ และตรวจแก้ไข วิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ และขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์สมพงษ์ พิเชฐภิญโญ และ อาจารย์ ดร.ชนส อรุณศรีโสภณ กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาและ คำแนะนำในการทำงานวิจัยนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.เจตวิทย์ ภัคร์ขพันธ์ ประธานการสอบ และ รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาย จันทร์ชานา ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่ได้กรุณาให้ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม ในการเขียนรูปเล่มวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่าน ที่ได้ให้คำแนะนำ ที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้ ขอบคุณ ครูรุ่ง เรืองผล ครูช่าง ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่ให้คำปรึกษาและช่วยเหลืองานด้านเทคนิคการตัดแปลง และติดตั้งเครื่องยนต์ดีเซลตัดแปลงเป็น เครื่องยนต์ก๊าซธรรมชาติ

ขอกราบขอบพระคุณ นายโอภาส เข้มสุข และ นางสุพิศ เข้มสุข ที่ได้ให้กำลังใจ และ ช่วยเหลือค่าใช้จ่ายในการเรียนและการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ ขอขอบคุณ อาจารย์รัตติกาล นิยมเอี่ยม และญาติพี่น้องทุกคน ที่ได้แนะนำและให้กำลังใจในการเรียนและการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ได้ดี เสมอมา

ไกรสุนทร เข้มสุข

พฤษภาคม 2552

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(10)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	7
อุปกรณ์	7
วิธีการ	21
ผลและวิจารณ์	39
สรุปและข้อเสนอแนะ	69
สรุป	69
ข้อเสนอแนะ	70
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	72
ภาคผนวก	74
ภาคผนวก ก การคำนวณ	75
ภาคผนวก ข การสอบเทียบเครื่องมือวัดปริมาณไอเสีย	88
ภาคผนวก ค การทดสอบเครื่องยนต์ดีเซลดัดแปลงให้ใช้ก๊าซธรรมชาติ เป็นเชื้อเพลิงเพื่อหาจังหวะการจุดระเบิดที่เหมาะสมอย่างง่าย	91
ภาคผนวก ง แบบหลุมลูกสูบ ปลอกหัวเทียน และตำแหน่งติดตั้งหัวเทียน เครื่องยนต์ Mitsubishi 6D16-0A	94
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	100

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	รายละเอียดของเครื่องยนต์ดีเซลก่อนดัดแปลง	7

สารบัญญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ลื้อไทมิ่ง	8
2	แคมเซนเซอร์	9
3	คอยล์จุกระเบิดพร้อมสายหัวเทียน	9
4	จุดหลอมละลายของโลหะชนิดต่างๆ	10
5	หัวเทียนอิริเดียม	10
6	กล่องอีซียู	11
7	ถังก๊าซธรรมชาติอัด	12
8	ท่อก๊าซความดันสูง	12
9	อุปกรณ์ปรับลดความดัน	13
10	มิกเซอร์	13
11	วาล์วปรับปริมาณก๊าซ	14
12	ท่อก๊าซความดันต่ำ	14
13	ลิ้นเร่ง	14
14	ระบบการทำงานของเครื่องมือวัดไอเสียชนิดอินฟราเรดแบบไม่กระจาย	15
15	เครื่องมือวัดปริมาณไอเสียชนิดรังสีอินฟราเรดแบบไม่กระจาย	17
16	การติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิไอเสียบริเวณท่อไอเสีย	18
17	เครื่องมือวัดจังหวะการจุกระเบิด	18
18	ไดนาโมมิเตอร์	19
19	หน้าต่างของซอฟต์แวร์ที่ติดตั้งในคอมพิวเตอร์	20
20	ขั้นตอนการทดสอบเครื่องยนต์	21
21	แสดงการวัดปริมาตรหลุมลูกสูบก่อนการตัดแปลง	25
22	การกลึงหลุมลูกสูบเพื่อขยายปริมาตร	26
23	ลูกสูบก่อนการตัดแปลง (ก) และลูกสูบหลังการตัดแปลง (ข)	26
24	หัวฉีดน้ำมันดีเซลสวมอยู่กับปลอกหัวฉีดของเครื่องยนต์ดีเซลก่อนการตัดแปลง	27
25	ปลอกหัวฉีดของเครื่องยนต์ดีเซลก่อนการตัดแปลง	27
26	บริเวณรูที่ถอดปลอกหัวฉีดน้ำมันดีเซลออก	28

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
27	บริเวณรูที่สวมอยู่กับปลอกหัวฉีดด้านล่าง	28
28	การติดตั้งล้อไทมิ่ง และแคมเซนเซอร์	29
29	การติดตั้งลิ้นเร่งเข้ากับท่อไอเสีย	30
30	ยางกันน้ำมันปลอกวาล์วไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลก่อนการตัดแปลง	31
31	เครื่องยนต์ดีเซลตัดแปลงเป็นเครื่องยนต์ก๊าซธรรมชาติติดตั้งบนแท่นไดนาโมมิเตอร์ และติดตั้งชุดอุปกรณ์สำหรับการทดสอบ	33
32	แผนผังแสดงการติดตั้งชุดอุปกรณ์ก๊าซ ชุดจุดระเบิด และเครื่องมือวัด สำหรับการทดสอบเครื่องยนต์ดีเซลตัดแปลงเป็นเครื่องยนต์ก๊าซธรรมชาติ	34
33	การวัดจังหวะการจุดระเบิดที่รอบเดินเบาด้วยเครื่องมือวัดจังหวะการจุดระเบิด	33
34	การเปิดลิ้นเร่งเพื่อรักษาอัตราเร็วรอบเครื่องยนต์ตามต้องการ (ก) และการปรับปริมาณน้ำเข้าและออกไดนาโมมิเตอร์ (ข)	36
35	เข็มบนหน้าปัดแสดงค่าแรงบิดเบรก	36
36	จอมอนิเตอร์แสดงอุณหภูมิไอเสีย (ซ้าย) และอัตราเร็วรอบเครื่องยนต์ (ขวา)	37
37	จอมอนิเตอร์แสดงผลพิษของไอเสียแต่ละชนิด และค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงสัมพัทธ์	37
38	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดเบรกกับจังหวะการจุดระเบิดที่อัตราเร็ว 1,800 รอบต่อนาที	39
39	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดเบรกกับจังหวะการจุดระเบิดที่อัตราเร็ว 2,000 รอบต่อนาที	39
40	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดเบรกกับจังหวะการจุดระเบิดที่อัตราเร็ว 2,200 รอบต่อนาที	40
41	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดเบรกกับจังหวะการจุดระเบิดที่อัตราเร็ว 2,400 รอบต่อนาที	40
42	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดเบรกกับจังหวะการจุดระเบิดที่อัตราเร็ว 1,800 ถึง 2,400 รอบต่อนาที	41

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
43	จังหวัดการจตุระเบิดที่ให้แรงบิดเบรกสูงสุดที่อัตราเร็ว 1,800 ถึง 2,400 รอบต่อนาที	42
44	ค่าแรงบิดเบรกเมื่อตั้งจังหวัดการจตุระเบิดที่ให้แรงบิดเบรกสูงสุด จังหวัดการจตุระเบิดที่ล่าช้ากว่าจังหวัดแรงบิดเบรกสูงสุด 3 และ 5 องศา ที่อัตราเร็ว 1,800 ถึง 2,400 รอบต่อนาที	43
45	ค่าแรงบิดเบรกเมื่อตั้งจังหวัดการจตุระเบิดที่ให้แรงบิดเบรกสูงสุด จังหวัดการจตุระเบิดที่ล้วงหน้ามากกว่าจังหวัดแรงบิดเบรกสูงสุด 3 และ 5 องศา ที่อัตราเร็ว 1,800 ถึง 2,400 รอบต่อนาที	44
46	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิไอเสียกับจังหวัดการจตุระเบิดที่อัตราเร็ว 1,800 รอบต่อนาที	45
47	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิไอเสียกับจังหวัดการจตุระเบิดที่อัตราเร็ว 2,000 รอบต่อนาที	45
48	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิไอเสียกับจังหวัดการจตุระเบิดที่อัตราเร็ว 2,200 รอบต่อนาที	46
49	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิไอเสียกับจังหวัดการจตุระเบิดที่อัตราเร็ว 2,400 รอบต่อนาที	46
50	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิไอเสียกับจังหวัดการจตุระเบิดที่อัตราเร็ว 1,800 ถึง 2,400 รอบต่อนาที	47
51	อุณหภูมิไอเสียที่จังหวัดแรงบิดเบรกสูงสุด ที่อัตราเร็ว 1,800 ถึง 2,400 รอบต่อนาที	47
52	อุณหภูมิไอเสียเมื่อตั้งจังหวัดการจตุระเบิดที่ให้แรงบิดเบรกสูงสุด จังหวัดการจตุระเบิดที่ล่าช้ากว่าจังหวัดแรงบิดเบรกสูงสุด 3 และ 5 องศา ที่อัตราเร็ว 1,800 ถึง 2,400 รอบต่อนาที	48
53	อุณหภูมิไอเสียเมื่อตั้งจังหวัดการจตุระเบิดที่ให้แรงบิดเบรกสูงสุด จังหวัดการจตุระเบิดที่ล้วงหน้ามากกว่าจังหวัดแรงบิดเบรกสูงสุด 3 และ 5 องศา ที่อัตราเร็ว 1,800 ถึง 2,400 รอบต่อนาที	49

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
54	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไนตริกออกไซด์กับจังหวะการจุดระเบิดที่อัตราเร็ว 1,800 รอบต่อนาที	50
55	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไนตริกออกไซด์กับจังหวะการจุดระเบิดที่อัตราเร็ว 2,000 รอบต่อนาที	51
56	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไนตริกออกไซด์กับจังหวะการจุดระเบิดที่อัตราเร็ว 2,200 รอบต่อนาที	51
57	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไนตริกออกไซด์กับจังหวะการจุดระเบิดที่อัตราเร็ว 2,400 รอบต่อนาที	52
58	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไนตริกออกไซด์กับจังหวะการจุดระเบิดที่อัตราเร็ว 1,800 ถึง 2,400 รอบต่อนาที	52
59	ความเข้มข้นของไนตริกออกไซด์ที่จังหวะแรงบิดเบรกสูงสุดที่อัตราเร็ว 1,800 ถึง 2,400 รอบต่อนาที	53
60	ความเข้มข้นของไนตริกออกไซด์เมื่อตั้งจังหวะการจุดระเบิดที่ให้แรงบิดเบรกสูงสุด จังหวะการจุดระเบิดที่ล่าช้ากว่าจังหวะแรงบิดเบรกสูงสุด 3 และ 5 องศาที่อัตราเร็ว 1,800 ถึง 2,400 รอบต่อนาที	54
61	ความเข้มข้นของไนตริกออกไซด์เมื่อตั้งจังหวะการจุดระเบิดที่ให้แรงบิดเบรกสูงสุด จังหวะการจุดระเบิดที่ล่วงหน้ามากกว่าจังหวะแรงบิดเบรกสูงสุด 3 และ 5 องศา ที่อัตราเร็ว 1,800 ถึง 2,400 รอบต่อนาที	55
62	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไฮโดรคาร์บอนกับจังหวะการจุดระเบิดที่อัตราเร็ว 1,800รอบต่อนาที	56
63	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไฮโดรคาร์บอนกับจังหวะการจุดระเบิดที่อัตราเร็ว 2,000รอบต่อนาที	56
64	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไฮโดรคาร์บอนกับจังหวะการจุดระเบิดที่อัตราเร็ว 2,200รอบต่อนาที	57
65	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไฮโดรคาร์บอนกับจังหวะการจุดระเบิดที่อัตราเร็ว 2,400รอบต่อนาที	57

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
66	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไฮโดรคาร์บอนกับจังหวะการจุดระเบิดที่อัตราเร็ว 1,800 ถึง 2,400 รอบต่อนาที	58
67	ความเข้มข้นของไฮโดรคาร์บอนที่จังหวะแรงบิดเบรกสูงสุดที่อัตราเร็ว 1,800 ถึง 2,400 รอบต่อนาที	58
68	ความเข้มข้นของไฮโดรคาร์บอน เมื่อตั้งจังหวะการจุดระเบิดที่ให้แรงบิดเบรกสูงสุด จังหวะการจุดระเบิดที่ล่าช้ากว่าจังหวะแรงบิดเบรกสูงสุด 3 และ 5 องศาที่อัตราเร็ว 1,800 ถึง 2,400 รอบต่อนาที	59
69	ความเข้มข้นของไฮโดรคาร์บอน เมื่อตั้งจังหวะการจุดระเบิดที่ให้แรงบิดเบรกสูงสุด จังหวะการจุดระเบิดที่ล่วงหน้ามากกว่าจังหวะแรงบิดเบรกสูงสุด 3 และ 5 องศา ที่อัตราเร็ว 1,800 ถึง 2,400 รอบต่อนาที	60
70	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์กับจังหวะการจุดระเบิดที่อัตราเร็ว 1,800 รอบต่อนาที	61
71	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์กับจังหวะการจุดระเบิดที่อัตราเร็ว 2,000 รอบต่อนาที	61
72	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์กับจังหวะการจุดระเบิดที่อัตราเร็ว 2,200 รอบต่อนาที	62
73	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์กับจังหวะการจุดระเบิดที่อัตราเร็ว 2,400 รอบต่อนาที	62
74	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์กับจังหวะการจุดระเบิดที่อัตราเร็ว 1,800 รอบต่อนาที	63
75	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์กับจังหวะการจุดระเบิดที่อัตราเร็ว 2,000 รอบต่อนาที	64
76	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์กับจังหวะการจุดระเบิดที่อัตราเร็ว 2,200 รอบต่อนาที	64
77	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์กับจังหวะการจุดระเบิดที่อัตราเร็ว 2,400 รอบต่อนาที	65

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
78	ความเข้มข้นของออกซิเจนกับจังหวะการจุดระเบิดที่อัตราเร็ว 1,800 รอบต่อนาที	66
79	ความเข้มข้นของออกซิเจนกับจังหวะการจุดระเบิดที่อัตราเร็ว 2,000 รอบต่อนาที	67
80	ความเข้มข้นของออกซิเจนกับจังหวะการจุดระเบิดที่อัตราเร็ว 2,200 รอบต่อนาที	67
81	ความเข้มข้นของออกซิเจนกับจังหวะการจุดระเบิดที่อัตราเร็ว 2,400 รอบต่อนาที	68
ภาพผนวกที่		
ก1	การกระจายความดันสำหรับการไหลของก๊าซผ่านช่องจำกัด	76
ก2	อัตราส่วนของอัตราการไหลของมวล \dot{m} / \dot{m}^* และฟังก์ชันการไหลแบบยูปตัว Φ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของอัตราส่วนความดันที่ช่องทางจำกัดของก๊าซอุดมคติที่มี $\gamma = 1.4$	79
ข1	หน้าต่างสำหรับการสอบเทียบ	89
ข2	ขั้นตอนการนำก๊าซมาตรฐานบรรจุเข้าไปยังช่องบรรจุก๊าซมาตรฐาน	90
ง1	ลักษณะของลูกสูบหลังการตัดแปลง	95
ง2	ลักษณะของลูกสูบหลังการตัดแปลง (ผ่าครึ่งซีก)	95
ง3	รายละเอียดขนาดหลุมลูกสูบหลังการตัดแปลง (ผ่าครึ่งซีก)	96
ง4	ลักษณะของปลอกหัวเทียน	97
ง5	ลักษณะของปลอกหัวเทียน (ผ่าครึ่งซีก)	97
ง6	รายละเอียดขนาดปลอกหัวเทียน (ผ่าครึ่งซีก)	98
ง7	ตำแหน่งติดตั้งหัวเทียน	99

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A/F	อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง
(A/F) _s	อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงพอดี
BTC	ก่อนศูนย์ตายบน
CH ₄	มีเทน
C ₂ H ₆	อีเทน
C ₃ H ₈	โพรเพน
C ₄ H ₁₀	บิวเทน
C ₅ H ₁₂	เพนเทน
C ₆ H ₁₄	เฮกเซน
CO	คาร์บอนมอนอกไซด์
CO ₂	คาร์บอนไดออกไซด์
F/A	อัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศ
(F/A) _s	อัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศพอดี
HC	ไฮโดรคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้
K _p	ค่าคงตัวสมดุลของปฏิกิริยาการเผาไหม้
LPG	ก๊าซปิโตรเลียมเหลว (Liquefied Petroleum Gas)
MBT	จังหวะแรงบิดเบรกสูงสุด
m _f	มวลของเชื้อเพลิง
N	อัตราเร็วรอบเครื่องยนต์
N ₂	ไนโตรเจน
NO	ไนตริกออกไซด์
NO _x	ออกไซด์ของไนโตรเจน
n _R	จำนวนรอบการหมุนของเพลาค้อเหวี่ยง
O ₂	ออกซิเจน
P _b	กำลังเบรก
p	ความดัน
r _c	อัตราส่วนการอัด
T	อุณหภูมิ

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

T_b	แรงบิดเบรก
V_c	ปริมาตรช่องว่าง
V_d	เป็นปริมาตรกระจัด
V_h	ปริมาตรหลุมลูกสูบ
x_b	เศษส่วนมวลที่เผาไหม้แล้ว
\tilde{x}_i	เศษส่วน โมลของสาร i
y	อัตราส่วนอะตอมไฮโดรเจนต่อคาร์บอน
c_p	ค่าความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่
c_v	ค่าความจุความร้อนจำเพาะที่ปริมาตรคงที่
ϕ	อัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงต่ออากาศ
λ	อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงสัมพันธ์
γ	อัตราส่วนของความร้อนจำเพาะ

ผลกระทบของจังหวะการจุดระเบิดต่อสมรรถนะ อุณหภูมิ และการปล่อยมลพิษไอเสีย ของเครื่องยนต์ดีเซลดัดแปลงให้ใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง

Impact of Ignition Timing on Performance, Exhaust Gas Temperature and Emissions of Diesel Engine Converted to Natural Gas

คำนำ

ปัจจุบันภาคคมนาคมขนส่งในประเทศไทยกำลังประสบปัญหาค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงเป็นอย่างมาก สาเหตุเนื่องมาจากราคาน้ำมันเชื้อเพลิงในตลาดโลกปรับตัวสูงขึ้น และมีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อยๆ ดังนั้น รัฐบาลจึงพยายามหาแนวทางแก้ไขปัญหาดังกล่าว หนทางหนึ่งที่จะช่วยแก้ไขปัญหานี้ได้คือ ลดการนำเข้าน้ำมันดิบจากต่างประเทศ และเลือกใช้พลังงานทดแทนที่มีอยู่ในประเทศไทยได้แก่ ก๊าซธรรมชาติ ก๊าซปิโตรเลียมเหลวหรือแอลพีจี (LPG) เอทานอล และน้ำมันไบโอดีเซล ก๊าซธรรมชาติเป็นพลังงานทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยแก้ปัญหาดังกล่าวได้ ข้อดีของการใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงคือ ลดการพึ่งพาการนำเข้าน้ำมันดิบจากต่างประเทศ ลดมลพิษทางอากาศให้กับสังคม มีราคาถูกกว่าเชื้อเพลิงชนิดอื่น เป็นเชื้อเพลิงที่ปลอดภัย และลดค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงให้กับภาคคมนาคมขนส่งในประเทศ

โดยปกติการขนส่งสินค้าทางบกจะใช้รถบรรทุกขนาดใหญ่ขนส่งสินค้าจำนวนมาก ซึ่งรถบรรทุกส่วนใหญ่จะใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง วิธีที่จะเปลี่ยนมาใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงโดยเสียค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด คือ การดัดแปลงเครื่องยนต์เดิมที่เป็นเครื่องยนต์ดีเซลให้เป็นเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟ และใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงซึ่งเป็นวิธีที่กำลังนิยมกันเป็นอย่างมาก แต่ผู้ที่ดัดแปลงเครื่องยนต์โดยส่วนใหญ่ยังขาดความรู้เรื่องวิธีการปรับแต่งค่าต่างๆ ของเครื่องยนต์ที่ถูกต้อง จึงทำให้เกิดปัญหาขึ้นตามมาหลายประการ ปัญหาโดยส่วนใหญ่ที่พบคือ เครื่องยนต์มีสมรรถนะลดลงไปจากเดิมมากเกินไป และอุณหภูมิไอเสียสูงเกินไปจนทำให้ลูกสูบได้รับความเสียหาย ทั้งสองปัญหานี้มีสาเหตุมาจากการปรับแต่งจังหวะการจุดระเบิดที่ไม่เหมาะสม ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาผลกระทบของจังหวะการจุดระเบิด ต่อสมรรถนะ และอุณหภูมิไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลดัดแปลงเป็นเครื่องยนต์ก๊าซธรรมชาติ โดยใช้ก๊าซธรรมชาติสำหรับยานยนต์ในประเทศไทยเป็นเชื้อเพลิง เพื่อหาสภาวะที่เครื่องยนต์มีสมรรถนะสูงสุด และ

อุณหภูมิไอเสียไม่สูงเกินไป นอกจากนี้ยังมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาผลของจังหวัดการจุดระเบิดที่มีต่อมลพิษไอเสียของเครื่องยนต์ดังกล่าวอีกด้วย

ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้จะใช้เป็นแนวทางในการปรับแต่งจังหวัดการจุดระเบิดที่เหมาะสมกับเครื่องยนต์ดีเซลดัดแปลงเป็นเครื่องยนต์ก๊าซธรรมชาติ เพื่อให้เครื่องยนต์มีสมรรถนะสูงสุด ไม่เกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากอุณหภูมิไอเสียสูงเกินไป และปล่อยมลพิษไอเสียสู่บรรยากาศน้อยที่สุด อีกทั้งยังสามารถนำผลที่ได้นี้ไปใช้ในการออกแบบ และพัฒนาระบบควบคุมการจุดระเบิดเครื่องยนต์ดีเซลดัดแปลงเป็นเครื่องยนต์ก๊าซธรรมชาติได้อีกต่อไป

วัตถุประสงค์

1. เพื่อหาผลกระทบของจังหวัดการจดทะเบียนต่อสมรรถนะ ของเครื่องยนต์ดีเซล รุ่น Mitsubishi 6D16-0A ที่ดัดแปลงเป็นเครื่องยนต์ก๊าซธรรมชาติ โดยใช้ก๊าซธรรมชาติสำหรับยานยนต์ในประเทศไทยเป็นเชื้อเพลิง
2. เพื่อหาผลกระทบของจังหวัดการจดทะเบียนต่ออุณหภูมิไอเสีย ของเครื่องยนต์ดีเซล รุ่น Mitsubishi 6D16-0A ที่ดัดแปลงเป็นเครื่องยนต์ก๊าซธรรมชาติ โดยใช้ก๊าซธรรมชาติสำหรับยานยนต์ในประเทศไทยเป็นเชื้อเพลิง
3. เพื่อหาผลกระทบของจังหวัดการจดทะเบียน ต่อมลพิษไอเสีย ของเครื่องยนต์ดีเซล รุ่น Mitsubishi 6D16 – 0A ที่ดัดแปลงเป็นเครื่องยนต์ก๊าซธรรมชาติ โดยใช้ก๊าซธรรมชาติสำหรับยานยนต์ในประเทศไทยเป็นเชื้อเพลิง
4. เพื่อใช้เป็นแนวทางในการปรับแต่งจังหวัดการจดทะเบียนที่เหมาะสมที่สุดกับเครื่องยนต์ดีเซล รุ่น Mitsubishi 6D16-0A ที่ดัดแปลงเป็นเครื่องยนต์ก๊าซธรรมชาติ และเครื่องยนต์รุ่นอื่นที่มีคุณลักษณะที่คล้ายกัน สำหรับสมรรถนะของเครื่องยนต์ อุณหภูมิและมลพิษในไอเสีย

ขอบเขตของงานวิจัย

1. ดัดแปลงเครื่องยนต์ดีเซลสี่จังหวะ รุ่น Mitsubishi 6D16-0A นำไอดีเข้าโดยธรรมชาติ ขนาด 7,545 ซีซี อัตราส่วนการอัด 17.5 ต่อ 1 กำลังสูงสุด 132 กิโลวัตต์ ที่ 2,900 รอบต่อนาที ให้เป็นเครื่องยนต์ก๊าซธรรมชาติ อัตราส่วนการอัด 11.5 ต่อ 1 ไม่มีการนำไอเสียกลับมาใช้อีก (EGR) โดยใช้ก๊าซธรรมชาติสำหรับยานยนต์ในประเทศไทยเป็นเชื้อเพลิงสำหรับทดสอบ
2. ทดสอบเพื่อหาผลกระทบของจังหวัดการจดทะเบียน ต่อสมรรถนะ อุณหภูมิและมลพิษไอเสีย ของเครื่องยนต์ดีเซล รุ่น Mitsubishi 6D16-0A ที่ดัดแปลงเป็นเครื่องยนต์ก๊าซธรรมชาติ ไม่มีการนำไอเสียกลับมาใช้อีก (EGR) โดยใช้ก๊าซธรรมชาติสำหรับยานยนต์ในประเทศไทยเป็นเชื้อเพลิงสำหรับทดสอบ เงื่อนไขการทดสอบ คือ ทดสอบขณะเดินเร่งเปิดเต็มที่ อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง สัมพัทธ์เท่ากับ 1 และที่อัตราเร็ว 1,800 2,000 2,200 และ 2,400 รอบต่อนาที ตามลำดับ
3. วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบ

การตรวจเอกสาร

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Fanhua *et al.* (2008) ได้ทำการศึกษาลักษณะการเผาไหม้และมลพิษของเครื่องยนต์เทอร์โบชาร์จ จูกระเบิดด้วยประกายไฟ ใช้วิธีการฉีดเชื้อเพลิงเข้าทางท่อไอดีด้วยไฮโดรเจนในอัตราส่วนร้อยละ 0-50 โดยปริมาตร ผสมกับก๊าซธรรมชาติอัด โดยทดลองเปลี่ยนจังหวะการจูกระเบิดที่แตกต่างกัน ผลการทดลองพบว่า เมื่อส่วนผสมของไฮโดรเจนมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นจะทำให้จังหวะการจูกระเบิดที่ให้ค่าแรงบิดเบรกสูงสุดช้าลงและประสิทธิภาพเชิงความร้อนบ่งชี้เพิ่มขึ้น ช่วงเวลาที่เกิดแรงบิดเบรกสูงสุดมีแนวโน้มเข้าใกล้ตำแหน่งศูนย์ตายบนมากขึ้น และช่วงเวลากการเผาไหม้ลดน้อยลง นอกจากนี้แล้วค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนบ่งชี้มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อโหลดมากขึ้น ส่วนปริมาณมลพิษของไฮโดรคาร์บอน (HC) คาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) และออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) มีแนวโน้มลดลงเมื่อปรับจังหวะการจูกระเบิดล่วงหน้ามากขึ้น และมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อโหลดเพิ่มมากขึ้น ในกรณีที่จังหวะการจูกระเบิดคงที่ ปริมาณมลพิษของคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) และออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) มีแนวโน้มสูงขึ้น และไฮโดรคาร์บอน (HC) มีแนวโน้มลดลง เมื่อส่วนผสมของไฮโดรเจนเพิ่มมากขึ้น

Karim *et al.* (1996) ได้ทำการศึกษาผลของการผสมเชื้อเพลิงไฮโดรเจนเข้ากับเชื้อเพลิงมีเทนต่อลักษณะการเผาไหม้ของเครื่องยนต์สูบเดี่ยว จูกระเบิดด้วยประกายไฟ พบว่าเมื่อปริมาณไฮโดรเจนเพิ่มมากขึ้นสมรรถนะของเครื่องยนต์จะสูงขึ้น เนื่องจากการแพร่กระจายของเปลวไฟเร็วขึ้น ทำให้พลังงานที่ปล่อยออกมาลดน้อยลง นอกจากนี้ปริมาณไฮโดรเจนที่เพิ่มมากขึ้นยังมีผลต่อจังหวะการจูกระเบิดที่เหมาะสม กล่าวคือจะต้องปรับจังหวะการจูกระเบิดที่เหมาะสมให้ล่าช้าลง

Ratna *et al.* (2008) ได้ทำการทดลองนำเอาก๊าซธรรมชาติที่มีส่วนประกอบต่างกัน เผาไหม้ในอากาศที่ความดันบรรยากาศเพื่อหาค่าความเร็วของการเผาไหม้อะเดียแบติก โดยการศึกษาผลของปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ไนโตรเจน (N₂) และอีเทน (C₂H₆) ในก๊าซธรรมชาติต่อความเร็วของการเผาไหม้ของมีเทนกับอากาศ พบว่า ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีในก๊าซธรรมชาติมีผลทำให้ความเร็วของการเผาไหม้ของมีเทนกับอากาศลดลงมากกว่าปริมาณไนโตรเจนที่มีในก๊าซธรรมชาติ โดยความเร็วของการเผาไหม้ของส่วนผสมระหว่างมีเทน คาร์บอน ไดออกไซด์ และอากาศจะมีค่าสูงสุดเมื่ออัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงสัมพัทธ์เท่ากับ 1 (เมื่อคาร์บอนไดออกไซด์มีปริมาณ

ร้อยละ 20 40 และ 60 โดยปริมาตร) นอกจากนี้ปริมาณเอเทนที่มีในก๊าซธรรมชาติร้อยละ 25 โดยปริมาตร มีผลทำให้ความเร็วของการเผาไหม้เปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่ออัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงสัมพัทธ์มากกว่า 1 แต่จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงสัมพัทธ์น้อยกว่าหรือเท่ากับ 1

Predo *et al.* (2006) ได้ทำการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังม้าสูงสุดของรถยนต์ที่มีขายตามท้องตลาดนำมาดัดแปลงใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง เปรียบเทียบกับรถยนต์ที่ใช้น้ำมันเบนซินเป็นเชื้อเพลิง พบว่า กำลังม้าสูงสุดของรถยนต์ที่ใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงน้อยกว่ารถยนต์ที่ใช้น้ำมันเบนซินเป็นเชื้อเพลิงร้อยละ 20 เนื่องจากก๊าซธรรมชาติถูกฉีดเข้าห้องเผาไหม้ในสถานะก๊าซต่างกับน้ำมันเบนซิน ซึ่งถูกฉีดเข้าห้องเผาไหม้ในสถานะของเหลว จึงทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่อวัฏจักร และประสิทธิภาพเชิงปริมาตรของก๊าซธรรมชาติต่ำกว่าน้ำมันเบนซิน นอกจากนี้ ก๊าซธรรมชาติเมื่อเผาไหม้ยังมีความเข้มข้นของไฮโดรคาร์บอน และคาร์บอนมอนอกไซด์ในระดับที่ต่ำ แม้ว่าสมรรถนะของเครื่องยนต์ก๊าซธรรมชาติจะด้อยกว่าเครื่องยนต์เบนซิน แต่ก็ยังมีการใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากเป็นเชื้อเพลิงที่มีราคาถูก

สมศักดิ์ (2548) ได้นำเสนอเรื่องอิทธิพลของจังหวะเปิดวาล์วไอเสียต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์ก๊าซธรรมชาติแบบหัวฉีด โดยการนำเอาเครื่องยนต์เบนซินขนาด 1,500 ซีซี ดัดแปลงให้สามารถใช้เชื้อเพลิงสลับระหว่างก๊าซธรรมชาติกับน้ำมันเบนซิน ทดสอบการทำงานเมื่อเปิดลิ้นเร่งเต็มที่ และเปลี่ยนจังหวะการเปิดวาล์วไอเสียที่แตกต่างกัน ผลการศึกษาพบว่า การปรับจังหวะการเปิด-ปิดวาล์วไอเสียให้ช้าลง 9 องศา ทำให้แรงบิด กำลัง อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง และประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกของเครื่องยนต์โดยรวมนั้นสูงขึ้นประมาณร้อยละ 5 ส่วนความเข้มข้นของ ไฮโดรคาร์บอน คาร์บอนมอนอกไซด์ และออกไซด์ของไนโตรเจน โดยรวมนั้นมีค่าลดลงประมาณ 8 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับการเปิด-ปิดวาล์วไอเสียที่ตำแหน่งมาตรฐาน นอกจากนี้ การปรับจังหวะการเปิด-ปิดวาล์วไอเสียให้เร็วขึ้น 9 องศา ทำให้แรงบิด กำลัง และประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกของเครื่องยนต์ต่ำที่สุด แต่อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์สูงที่สุด ส่วนปริมาณมลพิษของ ไฮโดรคาร์บอน และคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าสูงที่สุด

รักมิต (2550) ได้ทำการทดลองปรับปรุงสมรรถนะของรถยนต์ที่ใช้ก๊าซธรรมชาติอัดเป็นเชื้อเพลิง ด้วยการนำเอาเครื่องยนต์ที่ใช้เครื่องยนต์เบนซินมาติดตั้งอุปกรณ์ก๊าซธรรมชาติระบบฉีดใช้สมองกลควบคุมการจ่ายก๊าซ จากนั้นจึงนำรถทดสอบยึดเข้ากับแท่นทดสอบกำลังที่ล้อ โดยทำการทดสอบเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างเครื่องยนต์ใช้น้ำมันเบนซินเป็นเชื้อเพลิง กับเครื่องยนต์

ใช้ก๊าซธรรมชาติอัดเป็นเชื้อเพลิง มีการติดตั้งระบบอิเล็กทรอนิกส์ควบคุมจังหวะการจุดระเบิด และไม่ได้ติดตั้งระบบอิเล็กทรอนิกส์ควบคุมจังหวะการจุดระเบิด ทำงานแบบโหลดสูงสุด ผลการทดสอบพบว่า เครื่องยนต์ที่ใช้ก๊าซธรรมชาติอัดเป็นเชื้อเพลิง ไม่ได้มีการติดตั้งระบบอิเล็กทรอนิกส์ควบคุมจังหวะการจุดระเบิดสูญเสียกำลังร้อยละ 20 เมื่อเปรียบเทียบกับรถยนต์ที่ใช้น้ำมันเบนซินเป็นเชื้อเพลิง ในขณะที่เครื่องยนต์ที่ใช้ก๊าซธรรมชาติอัดเป็นเชื้อเพลิงและมีการติดตั้งระบบอิเล็กทรอนิกส์ควบคุมจังหวะการจุดระเบิดสูญเสียกำลังเพียงร้อยละ 15

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องยนต์ดีเซล
2. ชุดอุปกรณ์และระบบควบคุมการจุดระเบิดของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟ
3. ชุดอุปกรณ์และระบบควบคุมการจ่ายก๊าซธรรมชาติระบบดูด
4. เครื่องมือวัดปริมาณไอเสีย
5. เครื่องมือวัดอุณหภูมิไอเสีย
6. เครื่องมือวัดจังหวะการจุดระเบิด
7. เครื่องมือวัดอัตราเร็วรอบของเครื่องยนต์
8. ไดนาโมมิเตอร์
9. คอมพิวเตอร์

รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยมีดังนี้

1. เครื่องยนต์ดีเซล

เป็นเครื่องยนต์ดีเซลสี่จังหวะขนาด 7,545 ซีซี ใช้สำหรับนำมาดัดแปลงให้เป็นเครื่องยนต์ก๊าซธรรมชาติ รายละเอียดของเครื่องยนต์แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 รายละเอียดของเครื่องยนต์ดีเซลก่อนดัดแปลง

รายการ	รายละเอียด
เครื่องยนต์ยี่ห้อ	Mitsubishi
รุ่น	6D16-0A
อัตราส่วนการอัด	17.5:1
ปริมาตรกระบอกสูบ	7,545 CC.
ขนาดกระบอกสูบ×ระยะชัก	118×115 mm.
กำลังม้าสูงสุด	132 kW /2,900 rpm

ตารางที่ 1 (ต่อ)

รายการ	รายละเอียด
แรงบิดสูงสุด	49 kg.m/1,400 rpm
การระบายความร้อน	ใช้น้ำระบายความร้อน
จำนวนลูกสูบ	6 สูบวางเรียงแถวเดียว
การนำไอดีเข้าห้องเผาไหม้	โดยธรรมชาติ
ลำดับการจุดระเบิด	1-5-3-6-2-4

2. ชุดอุปกรณ์ และระบบควบคุมการจุดระเบิดของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟ

เป็นชุดอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับจุดระเบิด และควบคุมจังหวะการจุดระเบิดให้เป็นไปตาม จังหวะการทำงานของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟ รายละเอียดอุปกรณ์แต่ละชนิดมีดังนี้

2.1 ล้อไทมิ่ง เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับกำหนดจังหวะการจุดระเบิดให้เหมาะสมกับสภาวะ การทำงานของเครื่องยนต์ ซึ่งจะต่อเข้ากับแกนเพลลาขับปั๊มหัวฉีดน้ำมันดีเซลเดิม ลักษณะเป็นจานกลม มีซี่ฟันอยู่รอบจานกลม โดยมีจำนวนซี่มากกว่าจำนวนสูบของเครื่องยนต์อยู่ 1 ซี่ ซี่ที่อยู่ติดกัน 2 ซี่ จะเป็นตัวให้สัญญาณเมื่อหมุนครบ 1 รอบ เพื่อให้กล่องอีซียูเริ่มนับจังหวะการจุดระเบิดใหม่ ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ล้อไทมิ่ง

2.2 แคมเซนเซอร์ (Cam Sensor) ทำหน้าที่สร้างสัญญาณเหนี่ยวนำไฟฟ้าแล้วส่งไปยังกล่องอีซียู โดยสัญญาณดังกล่าวเกิดขึ้นจากการที่ซี่ฟันของล้อไทมิ่งซึ่งต่อเข้ากับแกนเพลาลูกเบี้ยว หมุนตัดกับแคมเซนเซอร์ ดังภาพที่ 2



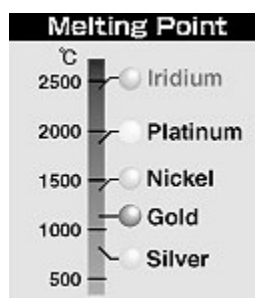
ภาพที่ 2 แคมเซนเซอร์

2.3 คอยล์จุดระเบิดพร้อมสายหัวเทียน เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับสร้างกระแสไฟฟ้าแรงสูง เพื่อส่งผ่านสายหัวเทียนให้เป็นประกายไฟกระโดดข้ามเจ็วหัวเทียน เนื่องจากก๊าศธรรมชาติมี อุณหภูมิลุกไหม้เองสูงถึง 650 องศาเซลเซียส ดังนั้น จึงใช้คอยล์จุดระเบิดที่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้า มากกว่า 25,000 โวลต์ ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 คอยล์จุดระเบิดพร้อมสายหัวเทียน

2.5 หัวเทียน เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับทำให้เกิดประกายไฟฟ้าเพื่อใช้ในการจุดระเบิด ส่วนผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงในกระบอกสูบ อย่างแม่นยำภายในเวลาที่ถูกกำหนดไว้จากการคำนวณของกล่องควบคุมหรืออีซียู เนื่องจากคอยล์จุดระเบิดมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าสูง หัวเทียนที่ใช้จึงต้องทนต่ออุณหภูมิสูงได้ดี โดยเฉพาะแกนกลางและขีวยหัวเทียน ในการทดลองครั้งนี้ เลือกใช้หัวเทียนที่มีแกนกลางและขีวยหัวเทียนที่ทำด้วยโลหะผสมระหว่างอิริเดียมกับโรเดียม ผลิตจากบริษัทเด็นโซ่ สามารถทนต่ออุณหภูมิได้สูงถึง 2,500 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 4 และ 5



ภาพที่ 4 จุดหลอมละลายของโลหะชนิดต่าง ๆ

ที่มา: บริษัทเด็นโซ่



ภาพที่ 5 หัวเทียนอิริเดียม

ที่มา: บริษัทเด็นโซ่

2.6 กล่องอีซียู เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ควบคุมประกายไฟฟ้าที่กระโดดข้ามหัวเทียน ให้เป็นเวลาที่เหมาะสมตามจังหวะการจุดระเบิด ผลิตจากบริษัท International Techforgas ใช้ไฟฟ้ากระแสตรง 12 โวลต์ ในการเลี้ยงวงจรภายใน สามารถทนอุณหภูมิได้ในย่าน -40 ถึง 125 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 6

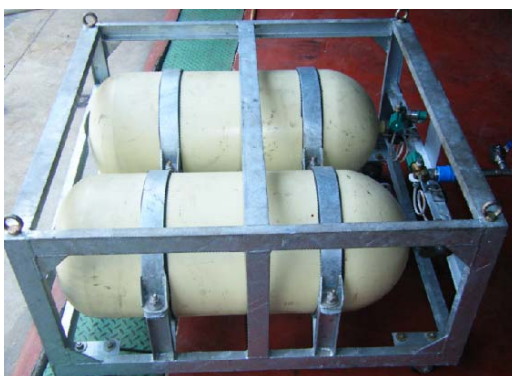


ภาพที่ 6 กล่องอีซียู

3. ชุดอุปกรณ์และระบบควบคุมการจ่ายก๊าซธรรมชาติระบบดูด

เป็นชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการลดความดันก๊าซธรรมชาติจาก 200 บาร์ ให้เหลือ 0 ถึง 0.5 บาร์ และควบคุมการจ่ายก๊าซเข้าไปผสมกับอากาศให้ได้อัตราส่วนที่เหมาะสมตามภาระงานและความเร็วของเครื่องยนต์ รายละเอียดอุปกรณ์แต่ละชนิดมีดังนี้

3.1 ถังก๊าซธรรมชาติอัด เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการบรรจุก๊าซธรรมชาติอัดความดัน 200 บาร์ และจ่ายก๊าซความดันสูงผ่านท่อก๊าซความดันสูงไปยังอุปกรณ์ปรับลดความดัน



ภาพที่ 7 ถังก๊าซธรรมชาติอัด

3.2 ท่อก๊าซความดันสูง เป็นอุปกรณ์ใช้เป็นทางผ่านของก๊าซความดัน 200 บาร์ จากถังก๊าซธรรมชาติอัด ไปยังอุปกรณ์ปรับลดความดัน



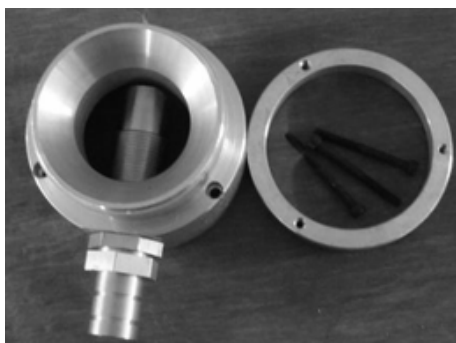
ภาพที่ 8 ท่อก๊าซความดันสูง

3.3 อุปกรณ์ปรับลดความดัน ทำหน้าลดความดันก๊าซธรรมชาติอัด 200 บาร์ที่ส่งมาจากถังก๊าซธรรมชาติอัด ให้เหลือ 0 ถึง 0.5 บาร์ ก่อนที่จะส่งผ่านท่อก๊าซความดันต่ำไปยังมิคเซอร์



ภาพที่ 9 อุปกรณ์ปรับลดความดัน

3.4 มิกเซอร์ ทำหน้าที่ผสมอากาศกับก๊าซธรรมชาติให้มีอัตราส่วนที่พอเหมาะกับการเผาไหม้ตามภาระ และอัตราเร็วรอบของเครื่องยนต์ (การคำนวณหาขนาดคอคอดของมิกเซอร์แสดงในภาคผนวก ก)



ภาพที่ 10 มิกเซอร์

3.5 วาล์วปรับปริมาณก๊าซ เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ปรับปริมาณการจ่ายก๊าซธรรมชาติ ความดันต่ำที่ออกมาจากอุปกรณ์ปรับลดความดัน ส่งเข้าไปยังมิกเซอร์ในปริมาณตามที่ต้องการ ในการปรับวาล์วชนิดนี้จะใช้มือปรับปริมาณก๊าซที่จะเข้าไปยังมิกเซอร์ตามที่ต้องการ ดังภาพที่ 11



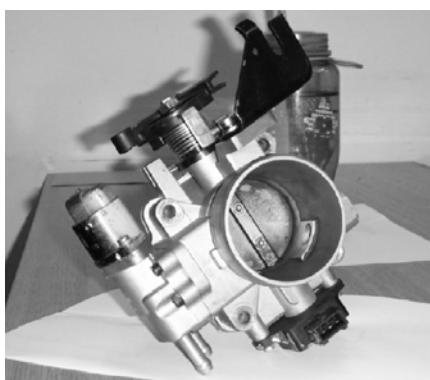
ภาพที่ 11 วาล์วปรับปริมาณก๊าซ

3.6 ท่อก๊าซความดันต่ำ เป็นทางผ่านของก๊าซความดันต่ำจากอุปกรณ์ปรับลดความดันไปยังมิกเซอร์



ภาพที่ 12 ท่อก๊าซความดันต่ำ

3.7 ลิ้นเร่ง เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการปรับปริมาณส่วนผสมของอากาศกับเชื้อเพลิงจากมิกเซอร์ผ่านท่อไอดี และเข้าไปยังกระบอกสูบในขณะที่วาล์วไอดีเปิดในจังหวะดูด ดังภาพที่ 13



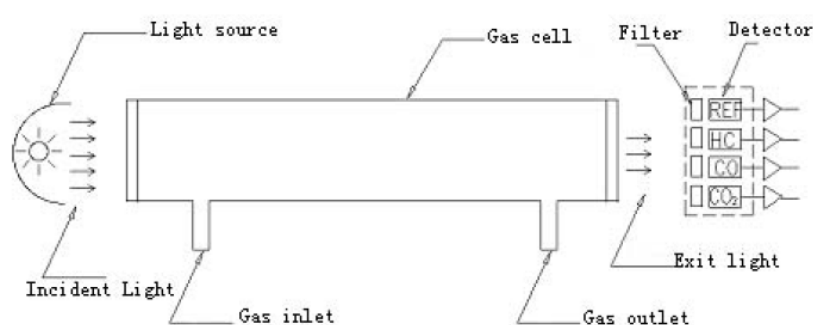
ภาพที่ 13 ลิ้นเร่ง

3.8 กล่องอ็อกซิยู ทำหน้าที่ควบคุมการเปิด-ปิดลิ้นอัตโนมัติของอุปกรณ์ปรับลดความดัน โดยเป็นกล่องชนิดเดียวกับกล่องอ็อกซิยูควบคุมระบบจุดระเบิด

4. เครื่องมือวัดปริมาณไอเสีย

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดปริมาณมลพิษที่ออกมาจากท่อไอเสียของเครื่องยนต์จุดระเบิด ด้วยประกายไฟ เครื่องมือชนิดนี้สามารถวัดก๊าซไอเสียได้ 5 ชนิด ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรคาร์บอน คาร์บอนไดออกไซด์ ไนตริกออกไซด์ และออกซิเจน โดยการวัดปริมาณ คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรคาร์บอน และคาร์บอน ไดออกไซด์จะใช้การวัดด้วยรังสีอินฟราเรด แบบไม่กระจาย ส่วนการวัดไนตริกออกไซด์ และออกซิเจนใช้หลักการแบบ electrochemistry method

ในภาพที่ 14 แสดงวงจรการทำงานของเครื่องมือวัดไอเสียชนิดรังสีอินฟราเรดแบบไม่กระจาย จากภาพรังสีอินฟราเรดจะถูกดูดกลืนด้วยสารต่างชนิดไม่เท่ากัน สารต่างชนิดกันจะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่มีความยาวคลื่นต่างกัน เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ จะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่มีความยาวคลื่น 4 ถึง 4.5 ไมครอน การตรวจวัดจะทำการดูดก๊าซที่วัดผ่านเข้าไปในหลอด ซึ่งฉายแสงอินฟราเรดตลอดเวลา ถ้าก๊าซมีคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ จะทำการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด ซึ่งรังสีอินฟราเรดสุดท้ายจะลดลงแปรตามปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์



ภาพที่ 14 ระบบการทำงานของเครื่องมือวัดไอเสียชนิดรังสีอินฟราเรดแบบไม่กระจาย

นอกจากจะวัดก๊าซไอเสียได้แล้ว ยังสามารถคำนวณหาค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงสัมพัทธ์ของก๊าซธรรมชาติได้อีกด้วย แต่เนื่องจากเครื่องมือชนิดนี้ผลิตจากสาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนจีน ซึ่งก๊าซธรรมชาติมีส่วนประกอบโดยส่วนใหญ่เป็นก๊าซมีเทน จึงสามารถอนุมานให้ เป็นเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนอย่างเดียวกันได้ การคำนวณหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงสัมพัทธ์จึงอนุมานให้ใช้สมการที่ (ก24) ในภาคผนวก ก ได้

สำหรับก๊าซธรรมชาติที่ได้จากอ่าวไทยฝั่งตะวันออกมีส่วนประกอบที่ไม่ใช่เชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอน ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ ประมาณร้อยละ 12 โดยโมลเป็นก๊าซที่ไม่ทำปฏิกิริยาการเผาไหม้กับอากาศ ดังนั้น ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาการเผาไหม้จริงๆ คือ ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่วัดได้จากเครื่องมือวัดปริมาณไอเสีย ลบด้วยความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนเกินที่มากับเชื้อเพลิง สำหรับการทดลองครั้งนี้จะให้เครื่องยนต์ทำงานที่ค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงสัมพัทธ์เท่ากับ 1 ซึ่งความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนเกินมีค่าร้อยละ 1.23 โดยโมลของส่วนผสมเชื้อเพลิงกับอากาศ ดังนั้น การคำนวณอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงสัมพัทธ์ในสมการที่ (ก24) จึงกลายเป็นสมการที่ (1) รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ก

$$\lambda = \frac{[(CO_2) - 1.23] + \frac{(CO)}{2} + (O_2) + \frac{yK_p}{4} \left(\frac{(CO) + [(CO_2) - 1.23]}{K_p + \frac{(CO)}{[(CO_2) - 1.23]}} \right)}{\left(1 + \frac{y}{4} \right) \left((CO) + [(CO_2) - 1.23] + (HC) \right)} \quad (1)$$

เมื่อ y คือ อัตราส่วนอะตอมของ H ต่อ C สำหรับก๊าซธรรมชาติที่ได้จากการทดลองครั้งนี้ ค่าอัตราส่วนอะตอมของ H ต่อ C มีค่าเท่ากับ 3.772 รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก

K_p คือ ค่าคงตัวสมดุลของปฏิกิริยาการเผาไหม้ ในการทดลองครั้งนี้กำหนดให้เท่ากับ 3.5

จากการทดลองใช้เครื่องมือวัดปริมาณไอเสียของเครื่องยนต์ทดสอบที่ใช้ก๊าซธรรมชาติดังกล่าวพบว่า ค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงสัมพัทธ์ที่คำนวณได้จากสมการที่ (ก24) และสมการที่ (1) มีค่าเท่ากัน แสดงให้เห็นว่าคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนเกินมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน

อากาศต่อเชื้อเพลิงสัมพัทธ์น้อยมาก ดังนั้น การคำนวณค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงสัมพัทธ์จาก ส่วนประกอบของไอเสียจึงอนุโลมให้ใช้สมการที่ (ก24) ได้

ก่อนที่จะใช้งานเครื่องมือชนิดนี้จะต้องนำก๊าซมาตรฐานมาสอบเทียบ เพื่อให้การวัด มีความแม่นยำมากขึ้น วิธีการสอบเทียบแสดงในภาคผนวก ข



ภาพที่ 15 เครื่องมือวัดปริมาณไอเสียชนิดรังสีอินฟราเรดแบบไม่กระจาย

5. เครื่องมือวัดอุณหภูมิไอเสีย

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิไอเสียที่ออกมาจากควาล์วไอเสียผ่านท่อไอเสีย โดยมี ข้อมูลจำเพาะดังนี้

ชนิด	เทอร์โมคัปเปิล
แบบ	K
วัสดุที่ใช้ทำ	โครเมิล (Cromel) และอลูเมล (Alumel)
อุณหภูมิใช้งาน	-270 ถึง 1,372 องศาเซลเซียส
แรงเคลื่อนไฟฟ้า	-6.458 ถึง 54.872 มิลลิโวลท์
การใช้งาน	ใช้กับบริเวณที่เกิดการออกซิไดส์ และไอของโลหะได้



ภาพที่ 16 การติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิไอเสียบริเวณท่อไอเสีย

6. เครื่องมือวัดจังหวะการจุดระเบิด

เป็นเครื่องมือสำหรับวัดจังหวะที่หัวเทียนให้ประกายไฟในระหว่างที่ลูกสูบกำลังเคลื่อนที่ในจังหวะอัดก่อนศูนย์ตายบนเล็กน้อย และสามารถวัดอัตราเร็วรอบเครื่องยนต์ได้ด้วย ดังภาพที่ 17

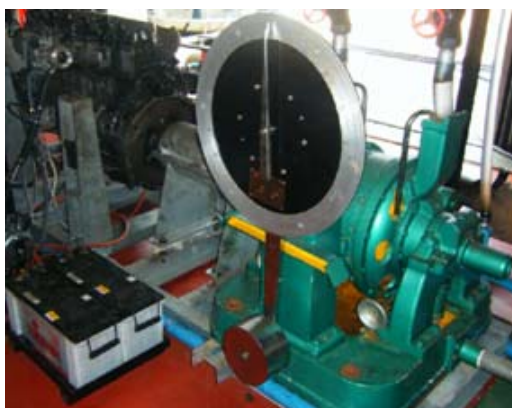


ภาพที่ 17 เครื่องมือวัดจังหวะการจุดระเบิด

7. ไดนาโมมิเตอร์

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดแรงบิดที่เพลาคือเพลาข้อเหวี่ยงของเครื่องยนต์ โดยมีข้อมูลจำเพาะดังนี้

บริษัทผู้ผลิต	QIDONG DYNAMOMETER CO.,LTD.
ประเทศ	จีน
การปรับการจ่ายโหลด	ใช้น้ำในการปรับการจ่ายโหลด
กำลังสูงสุด	260 kW
รอบสูงสุด	4500 r/min
การต่อใช้งาน	สามารถต่อใช้งานได้ 2 ด้าน และสามารถหมุนได้ 2 ทิศทาง
ย่านของสเกลที่วัดได้	0 ถึง 920 N
แรงบิดสูงสุด	870 N.m
อัตราการไหลของน้ำสูงสุด(ที่ 45°C)	5.2 m ³ /h
อุณหภูมิสูงสุดของน้ำ	70 °C



ภาพที่ 18 ไดนาโมมิเตอร์

8. คอมพิวเตอร์

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการปรับตั้งค่าต่างๆให้กับกล่องอีซียูเพื่อควบคุมการทำงานของระบบจุดระเบิดและระบบการจ่ายก๊าซ โดยการติดตั้งซอฟต์แวร์ลงในเครื่องคอมพิวเตอร์ และต่อสายจูนเข้าไประหว่างคอมพิวเตอร์กับกล่องอีซียู มีข้อมูลจำเพาะดังนี้

ระบบ Microsoft Windows XP Professional

Version 2002 Service Pack 2

CPU Intel Celeron(R) 2.00 GHz

RAM 240 MB



ภาพที่ 19 หน้าต่างของซอฟต์แวร์ที่ติดตั้งในคอมพิวเตอร์

วิธีการ

วิธีการทดสอบเครื่องยนต์ดีเซลดัดแปลงใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง เพื่อหาผลกระทบของจังหวะการจุดระเบิดต่อสมรรถนะ อุณหภูมิและมลพิษไอเสีย มีขั้นตอนดังภาพที่ 20



ภาพที่ 20 ขั้นตอนการทดสอบเครื่องยนต์

1. การดัดแปลงเครื่องยนต์

โดยทั่วไปไม่ว่าจะเป็นเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดหรือจุดระเบิดด้วยประกายไฟ ในจังหวะอัดอุณหภูมิของไอดีจะสูงขึ้นตามหลักเทอร์โมไดนามิกส์ ถ้าพิจารณากระบวนการนี้เป็นการอัดแบบอะเดียแบติก และย้อนกลับได้ (กระบวนการไอเซนทรอปิก) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ กับอัตราส่วนการอัดดังนี้

$$\frac{T_2}{T_1} = r_c^{\gamma-1} \quad (2)$$

- เมื่อ T_1 เป็น อุณหภูมิก่อนการอัด
 T_2 เป็นอุณหภูมิเมื่อสิ้นสุดการอัด
 r_c เป็นอัตราส่วนการอัด
 γ เป็นอัตราส่วนของความร้อนจำเพาะ (c_p / c_v)

อุณหภูมิเมื่อสิ้นสุดการอัดจะสูงขึ้นมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเริ่มต้นก่อนการอัด ซึ่งควบคุมได้ยาก ดังนั้นอุณหภูมิในระหว่างจังหวะอัดจึงไม่สามารถควบคุมได้อย่างแม่นยำ แต่จะมีจุดอุณหภูมิหนึ่งที่เชื้อเพลิงจะลุกไหม้ได้เอง ดังนั้น หากไอดีประกอบไปด้วยอากาศและมีเชื้อเพลิงผสมอยู่ด้วยส่วนผสมจะลุกไหม้เองได้โดยไม่สามารถควบคุมให้การเผาไหม้เกิดขึ้นในจังหวะเวลาที่ต้องการได้ ดังนั้น เครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดจึงออกแบบให้มีการอัดอากาศเพียงอย่างเดียวในจังหวะอัดโดยให้มีอัตราส่วนการอัดสูง เพื่อให้อุณหภูมิหลังการอัดสูงเกินอุณหภูมิที่เชื้อเพลิงจะลุกไหม้ได้เอง และในจังหวะเวลาที่ต้องการให้เกิดการลุกไหม้จึงฉีดเชื้อเพลิงเข้าไปในอากาศที่ถูกอัดจนร้อนเกินจุดลุกไหม้เองของเชื้อเพลิงที่ฉีด เชื้อเพลิงที่ฉีดเข้าไปในอากาศร้อนดังกล่าวก็จะลุกไหม้เองได้ ทำให้เกิดงานตามที่ต้องการ ซึ่งเครื่องยนต์ดีเซลที่นำมาทดสอบครั้งนี้มีอัตราส่วนการอัด 17.5 ต่อ 1 สมมติอุณหภูมิอากาศก่อนการอัดเท่ากับ 298 K และกำหนดค่า γ เท่ากับ 1.3 จากสมการ (2) จะได้อุณหภูมิเมื่อสิ้นสุดการอัดเท่ากับ 703 K หรือ 430 องศาเซลเซียส ดังนั้น น้ำมันดีเซลซึ่งมีอุณหภูมิลุกไหม้ได้เอง 250 องศาเซลเซียส จึงสามารถผสมกับอากาศร้อนดังกล่าวและลุกไหม้เองได้ แต่เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติโดยทั่วไป มีอุณหภูมิลุกไหม้เองได้ ประมาณ 650 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิอากาศหลังการอัด เมื่อผสมกับอากาศร้อนดังกล่าวจึงไม่สามารถลุกไหม้เองได้

ดังนั้น จึงต้องมีการดัดแปลงเครื่องยนต์ดังกล่าวเพื่อให้สามารถใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงได้ วิธีที่สามารถทำได้ คือ การเปลี่ยนวิธีการจุดระเบิดด้วยการอัดเป็นการจุดระเบิดด้วยประกายไฟแทน โดยมีรายละเอียดดังนี้

1.1 ลดอัตราส่วนอัดลงมาจากเดิม 17.5 ต่อ 1 เป็น 11.5 ต่อ 1

เนื่องจากในจังหวะอัดของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟ ไอดีในกระบอกสูบเป็นส่วนผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง ซึ่งพร้อมที่จะลุกไหม้ได้เองหากอุณหภูมิสูงถึงอุณหภูมิลุกไหม้ได้เองของเชื้อเพลิงชนิดนั้น แต่สำหรับเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟนั้นไม่ต้องการให้มีการลุกไหม้ได้เองในจังหวะอัดก่อนที่หัวเทียนจะให้ประกายไฟ เพราะจะเกิดการชิงจุดระเบิด

ดังนั้นเครื่องยนต์ดีเซลที่นำมาตัดแปลงนี้มีอัตราส่วนการอัด 17.5 ต่อ 1 ซึ่งมีค่าสูง หากอุณหภูมิเริ่มต้นก่อนการอัดมีค่าสูงส่วนผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงก็มีโอกาสซึ่งจุดระเบิดก่อนที่หัวเทียนจะให้ประกายไฟได้ ดังนั้น จึงต้องมีการลดอัตราส่วนการอัดลงมาเพื่อป้องกันการซึ่งจุดระเบิด สำหรับก๊าซธรรมชาติในประเทศไทยมีอุณหภูมิลุกไหม้ได้เอง 537 ถึง 540 องศาเซลเซียส กำหนดค่า γ เท่ากับ 1.3 และอัตราส่วนการอัดเท่ากับ 11.5 ต่อ 1 จากสมการ (2) หากจะต้องให้ อุณหภูมิหลังการอัดมีค่าเท่ากับ 537 องศาเซลเซียส จะต้องใช้อุณหภูมิก่อนการอัดเท่ากับ 116 องศาเซลเซียส ซึ่งในสภาวะบรรยากาศทั่วไปอุณหภูมิไม่สามารถสูงได้ถึงสภาวะอุณหภูมิดังกล่าว ดังนั้น โอกาสที่เครื่องยนต์จะซึ่งจุดระเบิดเมื่อใช้อัตราส่วนการอัดเท่ากับ 11.5 ต่อ 1 จึงมีน้อยมาก

การลดอัตราส่วนการอัดสามารถทำได้หลายวิธี วิธีที่ดีที่สุด คือ การตัดหัวลูกสูบหรือกลิ้งคว้านหลุมกลางหัวลูกสูบให้ขยายปริมาตรขึ้น ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและประหยัดค่าใช้จ่าย ขั้นตอนการลดอัตราส่วนการอัดเริ่มจากนำข้อมูลอัตราส่วนการอัดของเครื่องยนต์ดีเซล ความจุกระบอกสูบ (หากไม่ทราบความจุกระบอกสูบให้หาข้อมูลความโตกระบอกสูบและระยะชัก) และจำนวนสูบมาหาปริมาตรช่องว่างของเครื่องยนต์ดีเซลก่อนการตัดแปลง จากนั้นของอัตราส่วนการอัด คือ

$$r_c = \frac{V_d + V_c}{V_c} \quad (3)$$

เมื่อ r_c คือ อัตราส่วนการอัด

V_d คือ ปริมาตรกระจัดต่อ 1 สูบ (ความจุกระบอกสูบหารด้วยจำนวนสูบ)

V_c คือ ปริมาตรช่องว่าง

เครื่องยนต์ดีเซลก่อนการตัดแปลงมี อัตราส่วนการอัด 17.5 ต่อ 1 และความจุกระบอกสูบ 7,545 ซีซี กำหนดให้ r_{c1} คือ อัตราส่วนการอัดก่อนการตัดแปลง V_{d1} คือ ปริมาตรกระจัดต่อ 1 สูบก่อนการตัดแปลง และ V_{c1} คือ ปริมาตรช่องว่างก่อนการตัดแปลง ดังนั้นจะได้

$$r_{c1} = 17.5$$

$$V_{d1} = \frac{7,545}{6} = 1,257.5 \text{ ซีซี}$$

แทนค่า r_{c1} และ V_{d1} ลงในสมการ (3) จะได้

$$17.5 = \frac{1,257.5 + V_{c1}}{V_{c1}}$$

$$V_{c1} = 76.21 \text{ ซีซี}$$

ขั้นตอนที่ 2 เป็นการคำนวณหาปริมาตรช่องว่างหลังการตัดแปลง โดยอัตราส่วนการอัดใหม่ที่ใช้ในการทดลอง คือ 11.5 ต่อ 1 กำหนดให้ r_{c2} คือ อัตราส่วนการอัดหลังการตัดแปลง V_{d2} คือ ปริมาตรกระจัดต่อ 1 สูบหลังการตัดแปลง และ V_{c2} คือ ปริมาตรช่องว่างหลังการตัดแปลง ดังนั้น จะได้

$$r_{c2} = 11.5$$

$$V_{d2} = V_{d1} = 1,257.5 \text{ ซีซี}$$

แทนค่า r_{c2} และ V_{d2} ลงในสมการ (3) จะได้

$$11.5 = \frac{1,257.5 + V_{c2}}{V_{c2}}$$

$$V_{c2} = 119.76 \text{ ซีซี}$$

ขั้นตอนที่ 3 หาปริมาตรหลุมใหม่ที่จะต้องขยาย โดยปริมาตรที่เพิ่มขึ้นจากหลุมเดิม คือ

$$V_{c2} - V_{c1} = 43.55 \text{ ซีซี}$$

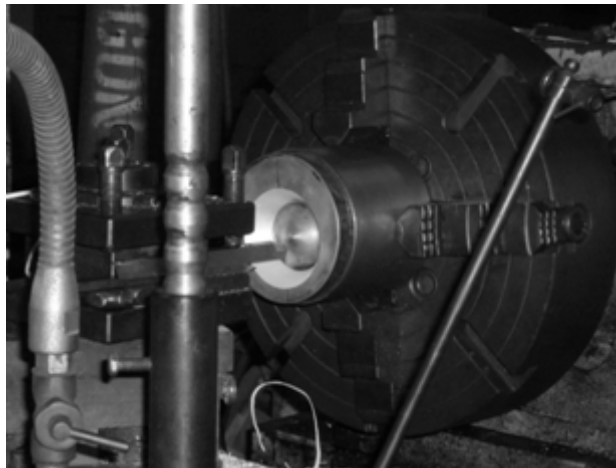
จากนั้นทำการวัดปริมาตรหลุมลูกสูบก่อนการตัดแปลงโดยใช้หลอดจีดียา (หรืออุปกรณ์ที่วัดปริมาตรของเหลวได้) หยอดน้ำผสมน้ำยาล้างจานเพื่อลดแรงตึงผิวลงไปในหลุมลูกสูบจนเต็มซึ่งวัดได้ 48.5 ซีซี กำหนดให้ V_{h1} คือ ปริมาตรหลุมลูกสูบก่อนการตัดแปลง และ V_{h2} คือ ปริมาตรหลุมลูกสูบหลังการตัดแปลง ดังนั้น ปริมาตรหลังการตัดแปลง คือ

$$\begin{aligned} V_{h2} &= V_{h1} + 43.55 \\ &= 48.5 + 43.55 \\ &= 92.05 \text{ ซีซี} \end{aligned}$$



ภาพที่ 21 แสดงการวัดปริมาตรหลุมลูกสูบก่อนการตัดแปลง

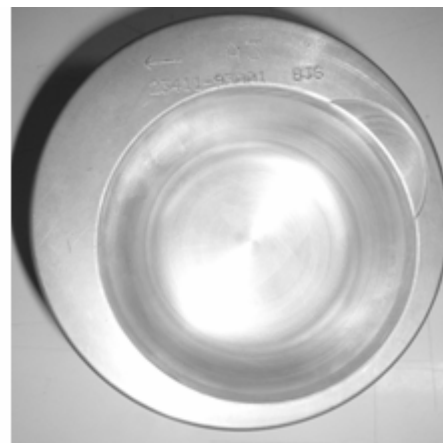
ขั้นตอนสุดท้ายพิจารณารูปทรงลูกสูบและหลุมลูกสูบก่อนการตัดแปลง เพื่อออกแบบรูปทรงหลุมลูกสูบใหม่ที่ต้องการจะขยาย ถ้าเป็นไปได้ควรรักษาตำแหน่งศูนย์กลางของหลุมลูกสูบให้เหมือนเดิมหลังจากที่ขยายขนาดหลุมลูกสูบแล้ว เพื่อให้การกระจายของเปลวไฟขยายตัวอย่างสมมาตร ในการทดลองครั้งนี้เลือกใช้รูปทรงกรวยเพื่อป้องกันการสะสมความร้อนบริเวณมุมของหลุมลูกสูบซึ่งเกิดจากการสะสมตัวของเขม่า เมื่อได้รูปทรงที่ต้องการแล้วนำลูกสูบไปกลึงเพื่อขยายปริมาตรหลุมลูกสูบตามรูปทรงที่ได้ออกแบบไว้ รายละเอียดแบบลูกสูบแสดงในภาคผนวก ง



ภาพที่ 22 การกลึงหลุมลูกสูบเพื่อขยายปริมาตร



(ก)



(ข)

ภาพที่ 23 ลูกสูบก่อนการตัดแปลง (ก) และลูกสูบหลังการตัดแปลง (ข)

1.2 เปลี่ยนวิธีการจุดระเบิดจากการจุดระเบิดด้วยการอัดเป็นการจุดระเบิดด้วยประกายไฟ

ตามปกติเครื่องยนต์ดีเซลจะใช้วิธีการจุดระเบิดด้วยการอัดอากาศในจังหวะอัดให้มีความดันสูง และอุณหภูมิสูง และฉีดน้ำมันดีเซลในจังหวะก่อนที่ลูกสูบจะเคลื่อนที่ถึงศูนย์ตายบน ผสมกับอากาศร้อนจนลุกไหม้ได้เอง แต่เครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟจะใช้วิธีการอัด ส่วนผสมของเชื้อเพลิงกับอากาศในจังหวะอัด แล้วใช้หัวเทียนให้ประกายไฟออกมาในจังหวะก่อนที่ลูกสูบจะเคลื่อนที่ถึงศูนย์ตายบนให้ส่วนผสมลุกไหม้ ดังนั้น ระบบฉีดเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ดีเซลจึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องใช้ สามารถที่จะถอดออกทั้งระบบได้ได้แก่ หัวฉีด

น้ำมันดีเซล ป้อนหัวฉีดน้ำมันดีเซล ท่อน้ำมันดีเซล กรองน้ำมันดีเซล และถึงน้ำมันดีเซลออกจากเครื่องยนต์ได้ แล้วทำการติดตั้งระบบจุกระเบิดเข้าไปแทน โดยมีขั้นตอนการติดตั้ง 2 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 คือ การติดตั้งหัวเทียนเข้าไปในฝาสูบ ซึ่งตำแหน่งหัวฉีดเดิมเป็นตำแหน่งที่เหมาะสมของหัวเทียน เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่อยู่บริเวณจุดศูนย์กลางของหลุมลูกสูบ ทำให้การกระจายตัวของเปลวไฟเป็นไปในลักษณะสมมาตรกับหลุมของลูกสูบ รายละเอียดตำแหน่งของหัวเทียนแสดงในภาพภาคผนวก ง จากนั้นให้ศึกษารูปแบบของปลอกหัวฉีดเดิมว่าจะสามารถดัดแปลงให้รับกับหัวเทียนได้อย่างไร ในกรณีของฝาสูบทดสอบนี้ปลอกหัวฉีด (ภาพที่ 24 และ 25) เป็นปลอกทองแดงสวมอัดอยู่กับตัวฝาสูบและสัมผัสอยู่กับน้ำหล่อเย็น ตัวปลอกทองแดงดังกล่าวมีรูสำหรับสวมพอดีกับหัวฉีด แต่มีขนาดเล็กกว่าตัวหัวเทียน จึงไม่สามารถติดตั้งหัวเทียนผ่านรูดังกล่าวได้



ภาพที่ 24 หัวฉีดน้ำมันดีเซลสวมอยู่กับปลอกหัวฉีดของเครื่องยนต์ดีเซลก่อนการดัดแปลง



ภาพที่ 25 ปลอกหัวฉีดของเครื่องยนต์ดีเซลก่อนการดัดแปลง



ภาพที่ 26 บริเวณรูที่ถอดปลอกหัวฉีดน้ำมันดีเซลออก

เมื่อพิจารณารูที่ถอดหัวฉีดออก (ภาพที่ 26) ก็จะพบว่ารูผ่านจากด้านบนฝาสูบทะลุถึงช่องน้ำหล่อเย็นมีขนาดความโตประมาณ 30.5 มิลลิเมตร ส่วนรูด้านล่างทะลุถึงห้องเผาไหม้มีขนาดความโตประมาณ 13 มิลลิเมตร จึงสามารถสร้างเกลียวหัวเทียนขนาด 14 มิลลิเมตรได้ แต่มีความยาวเกลียวสั้นกว่าความยาวเกลียวของหัวเทียน นอกจากนี้การถอดปลอกหัวฉีดออกทำให้ไม่มีส่วนที่จะกั้นน้ำหล่อเย็นไม่ให้ทะลุถึงด้านบนออกได้

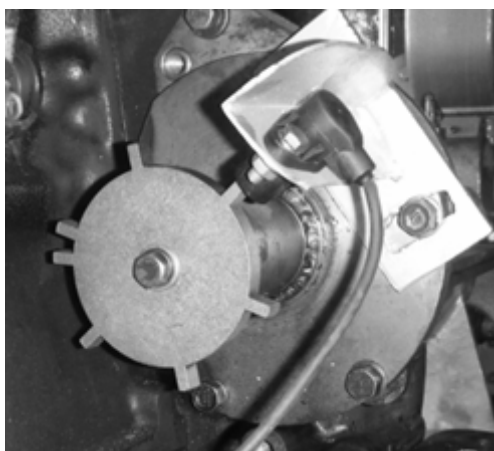


ภาพที่ 27 บริเวณรูที่สวมอยู่กับปลอกหัวฉีดด้านล่าง

ดังนั้น จึงต้องออกแบบและสร้างปลอกหัวเทียนใหม่ โดยต้องให้ปลอกหัวเทียนด้านบนมีขนาดความโตเท่ากับปลอกหัวฉีดและกั้นน้ำด้วยโอริง สวมลงไปแทนปลอกหัวฉีดเดิม ส่วนด้านที่อยู่ใกล้กับห้องเผาไหม้ปลายปลอกหัวเทียนต้องมีความหนาพอที่จะเสริมให้ได้ระยะเท่ากับ ความยาวเกลียวหัวเทียนพอดี และรูด้านในต้องให้เกลียวหัวเทียนสวมผ่านได้ ปลายด้านบนของปลอกหัวเทียนต้องมีหน้าแปลนกดให้ปลอกหัวเทียนนั่งกับด้านล่างอย่างสนิทเพื่อป้องกันไม่ให้

น้ำหล่อเย็นรั่วซึมเข้ามาถึงหัวเทียนได้ หน้าแปลนดังกล่าวยึดติดกับฝาสูบในลักษณะเดียวกันกับ ปลอกหัวฉีดเดิม รายละเอียดแบบของปลอกหัวเทียนแสดงในภาคผนวก ง

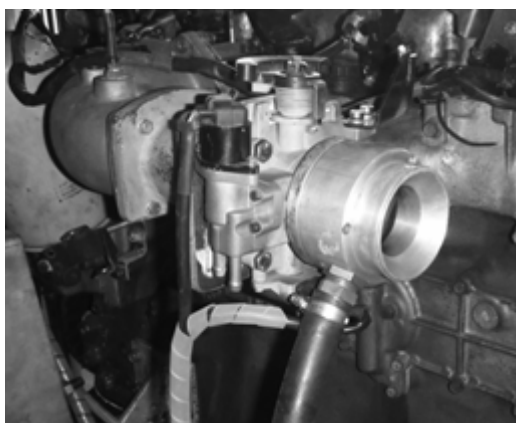
ขั้นตอนที่ 2 หาดำแหน่งที่จะติดตั้งล้อไทมิ่งและแคมเซนเซอร์ โดยล้อไทมิ่งจะติดตั้งแทน เพลาขับปั๊มหัวฉีดน้ำมันดีเซลเดิม จากนั้นจึงทำการออกแบบปลอกสำหรับยึดล้อไทมิ่งเข้ากับ แกนเพลาดังกล่าว ส่วนการติดตั้งแคมเซนเซอร์ให้บริเวณปลายห่างจากซี่ฟันของล้อไทมิ่งประมาณ 0.8 มิลลิเมตร



ภาพที่ 28 การติดตั้งล้อไทมิ่ง และแคมเซนเซอร์

1.3 ออกแบบและติดตั้งลิ้นเร่งเข้ากับท่อร่วมไอดี

เนื่องจากเครื่องยนต์ดีเซลไม่มีลิ้นเร่ง แต่เครื่องยนต์ก๊าซธรรมชาติ ซึ่งเป็นเครื่องยนต์แบบจุดระเบิดด้วยประกายไฟต้องใช้ลิ้นเร่งเพื่อปรับภาระงานของเครื่องยนต์ จึงต้องติดตั้งลิ้นเร่งเพิ่มเติม ลิ้นเร่งที่สามารถจัดหาจากตลาดได้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 50 มิลลิเมตรถึง 80 มิลลิเมตร ขนาดที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับระดับกำลังสูงสุดของเครื่องยนต์ สำหรับเครื่องยนต์ที่มีกำลังสูงสุด 100 ถึง 200 กิโลวัตต์ (150 ถึง 300 แรงม้า) สามารถใช้ลิ้นเร่งขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 65 มิลลิเมตรได้



ภาพที่ 29 การติดตั้งลิ้นเร่งเข้ากับท่อไอดี

1.4 ตรวจสอบว่าวาล์วไอเสีย ว่าอยู่ในสภาพที่ยังใช้งานได้หรือไม่ หากวาล์วมีการสึกหรอมากเกินไปควรเปลี่ยนวาล์วที่ทำด้วยวัสดุที่แข็งแรงขึ้น เนื่องจากวาล์วไอเสียที่ใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลมีความแข็งแรงเพียงพอ และทนการสึกหรอได้เมื่อใช้กับเครื่องยนต์ดีเซล เพราะมีเขม่าในไอเสียช่วยในการป้องกันการสึกหรอได้ดี รวมทั้งอุณหภูมิไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลไม่สูงเหมือนกับเครื่องยนต์ก๊าซธรรมชาติ แต่เมื่อตัดแปลงมาใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงแทนน้ำมันดีเซล วาล์วไอเสียดังกล่าวจะเกิดการสึกหรออย่างรวดเร็ว เพราะไอเสียของเครื่องยนต์ก๊าซธรรมชาติสูงกว่าของเครื่องยนต์ดีเซล และการเผาไหม้ที่สะอาดของก๊าซธรรมชาติ ทำให้ไม่มีสารตกค้างที่จะช่วยผ่อนคลายนการสึกหรอของวาล์ว จากการตรวจสอบสภาพวาล์วของเครื่องยนต์นี้ พบว่าวาล์วยังอยู่ในสภาพดีจึงยังคงใช้วาล์วเดิม

1.5 เปลี่ยนยางกันน้ำมันปลอกวาล์วไอดี ที่ปลอกวาล์วไอดีจะมียางกันน้ำมันหล่อลื่นไม่ให้รั่วซึมเข้าไปในห้องเผาไหม้ในจังหวะดูด สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลระหว่างจังหวะดูดจะมีความดันในห้องเผาไหม้ไม่ต่ำมากเหมือนเครื่องยนต์ก๊าซธรรมชาติ ยางกันน้ำมันหล่อลื่นดังกล่าวจึงไม่มีความจำเป็นต้องกันน้ำมันหล่อลื่นได้ดีมากเหมือนเครื่องยนต์ก๊าซธรรมชาติ ดังนั้น เมื่อตัดแปลงเครื่องยนต์มาใช้ก๊าซธรรมชาติต้องเปลี่ยนยางกันน้ำมันปลอกวาล์วไอดีที่กันน้ำมันหล่อลื่นได้ดีขึ้นไม่เช่นนั้น จะเกิดปัญหาที่มีน้ำมันหล่อลื่นเส็ดลอดเข้าไปเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ได้



ภาพที่ 30 ยางกันน้ำมันปลอกวาล์วไอดีของเครื่องยนต์ดีเซลก่อนการตัดแปลง

1.6 ขยายขนาดหม้อน้ำระบายความร้อนให้มีขีดความสามารถระบายความร้อนเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 30 เนื่องจากเครื่องยนต์ก๊าซธรรมชาติมีอัตราส่วนการอัดต่ำกว่าเครื่องยนต์ดีเซล ประสิทธิภาพการใช้พลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิงเป็นพลังงานกลจึงต่ำกว่า ซึ่งหมายถึงพลังงานความร้อนสูญเสียให้กับน้ำหล่อเย็นและไอเสียย่อมสูงขึ้นกว่าเครื่องยนต์ดีเซลด้วย หม้อน้ำที่ใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลจึงไม่พอเพียงที่จะระบายความร้อนจากเครื่องยนต์ก๊าซธรรมชาติ จึงต้องมีการขยายขนาดของหม้อน้ำเพื่อรองรับความร้อนสูญเสียกับน้ำหล่อเย็นที่สูงมากขึ้นกว่าเดิม

1.7 เนื่องจากอุณหภูมิส่วนต่างๆ ของเครื่องยนต์ก๊าซธรรมชาติโดยเฉลี่ยสูงขึ้นกว่าเครื่องยนต์ดีเซล น้ำมันหล่อลื่นจึงต้องรับความร้อนสูงขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิโดยเฉลี่ยของน้ำมันหล่อลื่นสูงขึ้นกว่าเครื่องยนต์ดีเซล ดังนั้น จึงต้องเปลี่ยนน้ำมันหล่อลื่นใช้สำหรับเครื่องยนต์ก๊าซธรรมชาติโดยเฉพาะ

2. การติดตั้งเครื่องยนต์บนแท่นไดนาโมมิเตอร์

เมื่อตัดแปลงเครื่องยนต์เสร็จแล้ว จึงนำเครื่องยนต์ติดตั้งบนแท่นไดนาโมมิเตอร์ เนื่องจากไดนาโมมิเตอร์ที่นำมาทดสอบเป็นชนิดใช้น้ำปรับการจ่ายโหลด ซึ่งค่าแรงบิดเบรกที่อ่านได้บนแผงหน้าปัดยังมีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง ดังนั้น จึงต้องมีการปรับแก้ค่าที่อ่านได้ให้ถูกต้องสามารถทำได้โดยการต่อแขนเหล็กเข้ากับไดนาโมมิเตอร์ และใช้ลูกน้ำหนัก 10 กิโลกรัมมาถ่วงบริเวณปลายสุดของแขนเหล็ก จากนั้นจึงอ่านค่าแรงบิดเบรกบนไดนาโมมิเตอร์ นำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณตามสมการที่ (4)

$$T = (mg)r \quad (4)$$

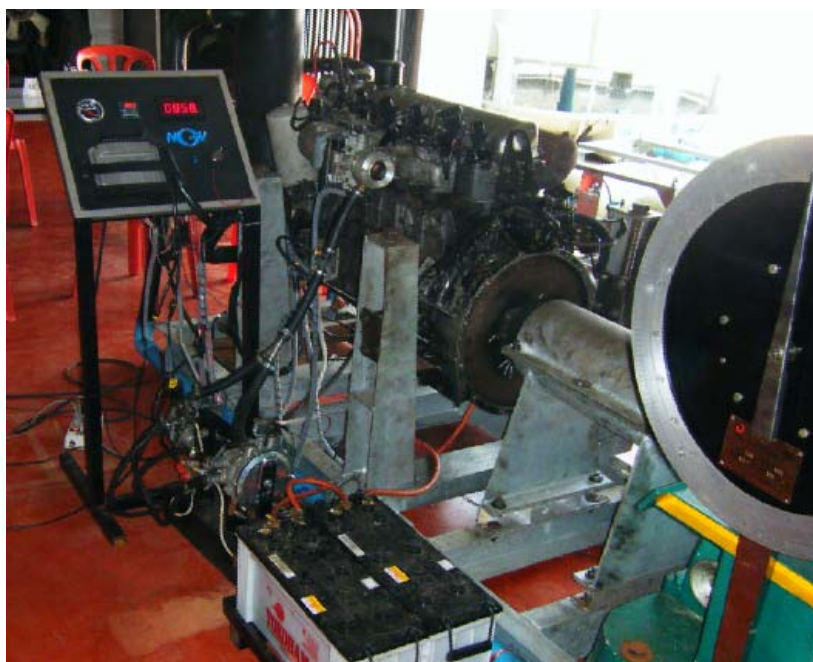
จากนั้นให้ทดลองเช่นเดิมแต่เปลี่ยนน้ำหนักให้มากขึ้นครั้งละ 10 กิโลกรัม แล้วนำค่าที่อ่านได้และคำนวณได้ทั้งหมดมาหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงบิดเบรกที่อ่านได้ กับค่าแรงบิดเบรกที่ได้จากการคำนวณ จากการทดลองครั้งนี้จะได้รับความสัมพันธ์ดังกล่าวดังแสดงในสมการ (5)

$$T_b = 0.9608y + 1.9564 \quad (5)$$

โดยที่ T_b คือ แรงบิดเบรกมีหน่วยเป็น N.m และ y คือ ค่าที่อ่านได้บนไดนาโมมิเตอร์ มีหน่วยเป็น N.m

3. การติดตั้งชุดอุปกรณ์ก๊าซ ชุดจุดระเบิด และเครื่องมือวัด

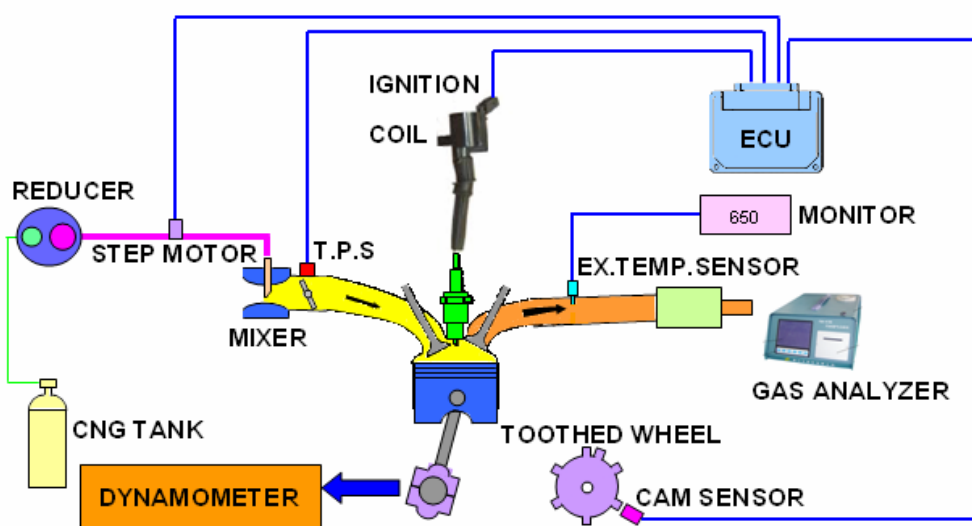
เมื่อนำเครื่องยนต์ติดตั้งบน ไดนาโมมิเตอร์เสร็จแล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการติดตั้งชุดอุปกรณ์ก๊าซธรรมชาติ ชุดจุดระเบิด และเครื่องมือวัด ชุดอุปกรณ์ก๊าซธรรมชาติที่ติดตั้งประกอบไปด้วย ถังก๊าซธรรมชาติอัด ท่อก๊าซความดันสูง อุปกรณ์ปรับลดความดัน มิกเซอร์ ท่อก๊าซความดันต่ำ และวาล์วปรับปริมาณก๊าซ ชุดจุดระเบิดที่ติดตั้งประกอบไปด้วย ล้อไทมิ่ง แคมเซนเซอร์ คอยล์จุดระเบิด สายหัวเทียน หัวเทียน และกล่องอิซียู เครื่องมือวัดที่ติดตั้งประกอบไปด้วย เครื่องมือวัดปริมาณไอเสีย เครื่องมือวัดอุณหภูมิไอเสีย เครื่องมือวัดจังหวะการจุดระเบิด และเครื่องมือวัดอัตราเร็วรอบของเครื่องยนต์



ภาพที่ 31 เครื่องยนต์ดีเซลตัดแปลงเป็นเครื่องยนต์ก๊าซธรรมชาติติดตั้งบนแท่นไดนาโมมิเตอร์ และติดตั้งชุดอุปกรณ์สำหรับการทดสอบ

อุปกรณ์ และเครื่องมือวัดทั้งหมดแสดงในภาพที่ 32 จากภาพเมื่อเครื่องยนต์ทำงานก๊าซธรรมชาติจะไหลออกจากถังก๊าซธรรมชาติอัดซึ่งมีความดัน 200 บาร์ ผ่านไปยังท่อก๊าซความดันสูง จากนั้นจะไหลเข้าอุปกรณ์ปรับลดความดันเพื่อลดความดันจาก 200 บาร์ให้เหลือ 0 ถึง 0.5 บาร์ ก๊าซที่ถูกลดความดันนี้จะไหลผ่านท่อก๊าซความดันต่ำ ในระหว่างท่อก๊าซความดันต่ำจะมีวาล์วปรับปริมาณก๊าซเพื่อใช้ในการปรับปริมาณก๊าซที่จะเข้าไปผสมกับอากาศในมิกเซอร์ จากนั้นก๊าซความดันต่ำนี้จะไหลเข้าไปยังมิกเซอร์ผสมกับอากาศให้มีอัตราส่วนที่เหมาะสมก่อนที่จะถูกเครื่องยนต์ดูดผ่านลิ้นเร่ง ท่อ ไอดี และเข้าไปยังห้องเผาไหม้ในจังหวะดูด เมื่อเครื่องยนต์ทำงานในจังหวะอัด ก่อนที่ลูกสูบจะเคลื่อนที่ถึงศูนย์ตายบนเล็กน้อย ซีพินของล้อไทมิ่งซึ่งต่อเข้ากับแกนเพลาลูกเบี้ยว จะหมุนติดกับแคมเซนเซอร์ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำไฟฟ้า สัญญาณการเหนี่ยวนำไฟฟ้านี้จะถูกส่งไปยังกล่องอีซียูเพื่อควบคุมจังหวะการจุดระเบิด จากนั้นกล่องอีซียูจะตัดกระแสไฟฟ้าขดลวดปฐมภูมิของคอยล์จุดระเบิดอย่างทันทีทันใด ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำไฟฟ้าแรงสูงที่คอยล์จุดระเบิดแล้วส่งไปยังหัวเทียนเกิดเป็นประกายไฟกระโดดข้ามช่องว่างระหว่างขั้วหัวเทียน ส่วนผสมจึงเกิดการเผาไหม้ การเผาไหม้จะเกิดขึ้นต่อเนื่องไปจนลูกสูบเคลื่อนที่ไปในช่วงประมาณ 16 ถึง 20 องศาหลังศูนย์ตายบน มวลของส่วนผสมจะถูกเผาไหม้ไปแล้วประมาณร้อยละ 90 ถึง 95 ซึ่งเป็นช่วงการสิ้นสุดของเปลวไฟ จากนั้นลูกสูบก็จะเคลื่อนที่ลงไปยังศูนย์ตายล่าง ในระหว่างนี้จะเกิดการขยายตัว

ของส่วนผสมที่ถูกเผาไหม้แล้วทำให้อุณหภูมิในห้องเผาไหม้ลดลง เมื่อลูกสูบเคลื่อนที่เกือบถึงศูนย์ตายล่างวาล์วไอเสียจะเปิดทำให้ไอเสียไหลออกไปยังท่อไอเสีย จากนั้นลูกสูบจะเคลื่อนที่ต่อเนื่องไปจนถึงศูนย์ตายบน ซึ่งเป็นจังหวะที่ไอเสียถูกคายออกไปยังท่อไอเสียเช่นกัน โดยไอเสียที่ไหลผ่านท่อไอเสียจะถูกวัดอุณหภูมิจากเซนเซอร์วัดอุณหภูมิไอเสีย และเมื่อไหลออกไปยังปลายท่อไอเสีย ก็จะถูกวัดปริมาณมลพิษจากเครื่องมือวัดปริมาณไอเสีย ในขณะเดียวกันเมื่อเพลลาของเครื่องยนต์หมุนก็จะทำให้เพลลาของไดนาโมมิเตอร์ซึ่งต่อเข้ากับเพลลาของเครื่องยนต์หมุน ใบพัดด้านมวลของน้ำที่อยู่ในไดนาโมมิเตอร์เกิดเป็นแรงบิดเบรกแสดงขึ้นที่เข็มบนหน้าปัดของไดนาโมมิเตอร์ และที่เพลลาของไดนาโมมิเตอร์จะมีเซนเซอร์วัดอัตราเร็วรอบเพื่อวัดอัตราเร็วรอบเพลลาของเครื่องยนต์



ภาพที่ 32 แผนผังแสดงการติดตั้งชุดอุปกรณ์ก๊าซ ชุดจุกะเบิด และเครื่องมือวัด
สำหรับการทดสอบเครื่องยนต์ดีเซลดัดแปลงเป็นเครื่องยนต์ก๊าซธรรมชาติ

4. การทดสอบเครื่องยนต์

ขั้นตอนสุดท้ายเป็นการทดสอบเครื่องยนต์เพื่อหาผลกระทบของจังหวะการจุกะเบิดต่อสมรรถนะ อุณหภูมิและมลพิษไอเสีย ของเครื่องยนต์ดีเซล รุ่น 6D16-0A นำไอดีเข้าโดยธรรมชาติที่ดัดแปลงเป็นเครื่องยนต์ก๊าซธรรมชาติ ไม่มีการนำไอเสียกลับมาใช้อีก (EGR) โดยใช้ก๊าซธรรมชาติสำหรับยานยนต์ในประเทศไทยเป็นเชื้อเพลิงสำหรับทดสอบ เงื่อนไขการทดสอบ คือ ทดสอบขณะ

เปิดลิ้นเร่งเต็มที่ อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงสัมพัทธ์ 1.00 และที่อัตราเร็วรอบ 1,800 2,000 2,200 และ 2,400 รอบต่อนาที โดยมีวิธีการทดสอบดังนี้

4.1 ตั้งจังหวะการจุดระเบิดล่วงหน้าในรอบเดินเบาให้ได้ 9 องศา ก่อนศูนย์ตายบน โดยการขยับล้อไทมิ่ง และใช้เครื่องมือวัดจังหวะการจุดระเบิด (Timing Light) วัดจังหวะการจุดระเบิดล่วงหน้าขณะที่เครื่องยนต์ทำงานในรอบเดินเบา



ภาพที่ 33 การวัดจังหวะการจุดระเบิดที่รอบเดินเบาคด้วยเครื่องมือวัดจังหวะการจุดระเบิด

4.2 ค่อยๆ เปิดลิ้นเร่งให้กว้างมากขึ้น และเปิดค้ำงไว้เมื่อเครื่องยนต์มีอัตราเร็ว 1,800 รอบต่อนาที จากนั้นให้ปรับปริมาณน้ำไหลเข้าไดนาโมมิเตอร์ให้มากขึ้น ในช่วงนี้รอบเครื่องยนต์จะต่ำลง เนื่องจากมีโหลดเพิ่มขึ้น ดังนั้น ต้องเปิดลิ้นเร่งเพิ่มขึ้นอีกเพื่อรักษาอัตราเร็วรอบไว้ที่ 1,800 รอบต่อนาที ทำเช่นนี้ไปเรื่อยๆ จนเครื่องยนต์เปิดลิ้นเร่งเต็มที่ และมีอัตราเร็วรอบ 1,800 รอบต่อนาที ถ้าอัตราเร็วรอบเครื่องยนต์เพิ่มขึ้นหรือลดลงไปจากค่านี้ให้ค่อยๆ ปรับปริมาณน้ำเพื่อรักษาอัตราเร็วรอบเครื่องยนต์ให้ได้ 1,800 รอบต่อนาที



ภาพที่ 34 การเปิดเครื่องเพื่อรักษาอัตราเร็วรอบเครื่องยนต์ตามต้องการ (ก) และการปรับปริมาณน้ำเข้าและออกไดนาโมมิเตอร์ (ข)

4.3 ใช้ไทม์มิงไลท์วัดจังหวะการจุดระเบิดล่วงหน้า พร้อมกับนำปลายสายเครื่องมือวัดไอเสียเสียบเข้าที่ปลายท่อไอเสีย รอบประมาณ 1 นาที แล้วอ่านค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงสัมพัทธ์ที่หน้าจอของเครื่องมือวัดไอเสีย ถ้าค่าที่อ่านได้น้อยกว่าหรือมากกว่า 1.00 ให้ทำการหมุนวาล์วปรับปริมาณก๊าซจนกว่าค่าดังกล่าวจะเท่ากับ 1.00 รอจนกว่าค่าต่างไม่เปลี่ยนแปลงหรือเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยจึงจดบันทึกค่าจังหวะการจุดระเบิดล่วงหน้า แรงบิดเบรกที่ไดนาโมมิเตอร์ อุณหภูมิไอเสียที่จอมอนิเตอร์ รอบเครื่องยนต์ที่จอมอนิเตอร์ มลพิษของไอเสียแต่ละชนิดและค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงสัมพัทธ์ที่หน้าจอของเครื่องมือวัดไอเสีย



ภาพที่ 35 เข็มบนหน้าปัดแสดงค่าแรงบิดเบรก



ภาพที่ 36 จอมอนิเตอร์แสดงอุณหภูมิไอเสีย (ซ้าย) และอัตราเร็วรอบเครื่องยนต์ (ขวา)



ภาพที่ 37 จอมอนิเตอร์แสดงผลพิษของไอเสียแต่ละชนิด และค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงสัมพัทธ์

4.4 ตั้งจังหวะการจุดระเบิดล่วงหน้าในรอบเดินเบาใหม่จากเดิมเพิ่มขึ้นเป็น 12 องศา แล้วทำการทดสอบเช่นเดียวกับข้อ 2 และข้อ 3 จากนั้นนำข้อมูลของค่าแรงบิดเบรกที่วัดได้จากครั้งแรก และครั้งที่สองมาเปรียบเทียบดูว่าค่าที่ได้จากครั้งที่สองเพิ่มขึ้นหรือลดลง

4.5 ถ้าค่าแรงบิดเบรกที่วัดได้จากครั้งที่สองมีค่าเพิ่มขึ้นให้ทำการทดลองตั้งจังหวะการจุดระเบิดล่วงหน้าเพิ่มมากขึ้นพร้อมกับทดสอบเช่นเดียวกับข้อ 2 และ 3 แล้วนำค่าแรงบิดเบรกที่วัดได้มาเปรียบเทียบกับครั้งก่อนหน้าให้ทำการทดสอบเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนกว่าค่าแรงบิดเบรกที่วัดได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นถึงค่าสูงสุด และลดลง

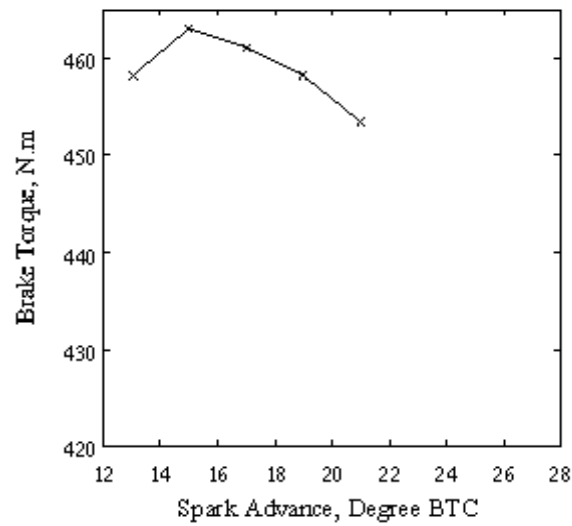
4.6 ถ้าค่าแรงบิดเบรกที่วัดได้จากครั้งที่สองมีค่าลดลง ก็ให้ทำการทดสอบเช่นเดียวกับข้อที่ 5 แต่เปลี่ยนการตั้งจังหวะการจุดระเบิดล่วงหน้าจากเพิ่มมากขึ้นเป็นลดน้อยลง

4.7 ทำการทดสอบในลักษณะเช่นเดียวกับข้อ 1 ถึง 6 โดยทดสอบที่อัตราเร็ว 2,000 2,200 และ 2,400 รอบต่อนาที ตามลำดับ

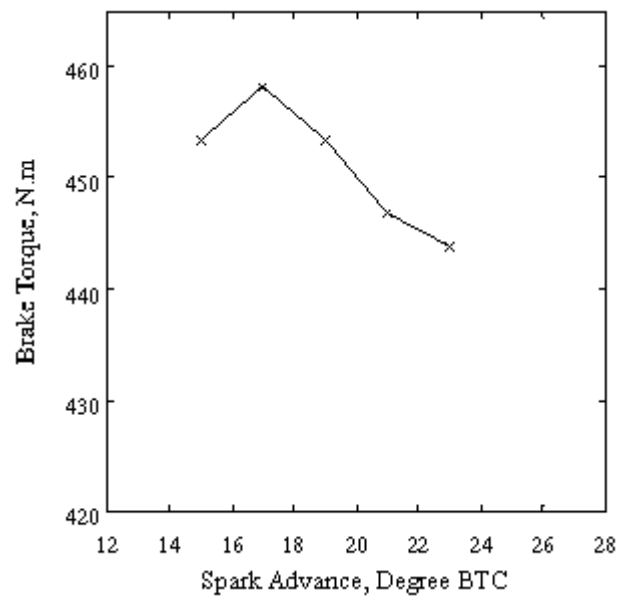
4.8 นำผลที่ได้มาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจังหวะการจุดระเบิดกับแรงบิดเบรกที่อัตราเร็วรอบต่างๆ จังหวะการจุดระเบิดกับอุณหภูมิไอเสียที่อัตราเร็วรอบต่างๆ และจังหวะการจุดระเบิดกับมลพิษไอเสียแต่ละชนิดที่อัตราเร็วรอบต่างๆ

ผลและวิจารณ์

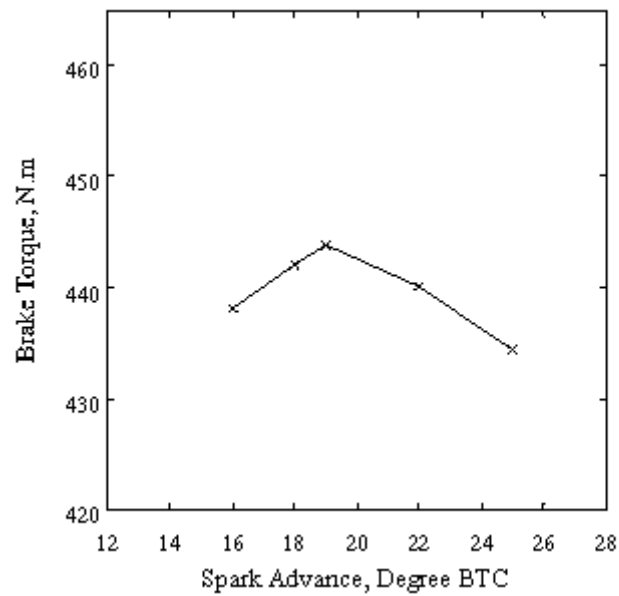
1. ผลของจังหวะการจุดระเบิด ต่อสมรรถนะ



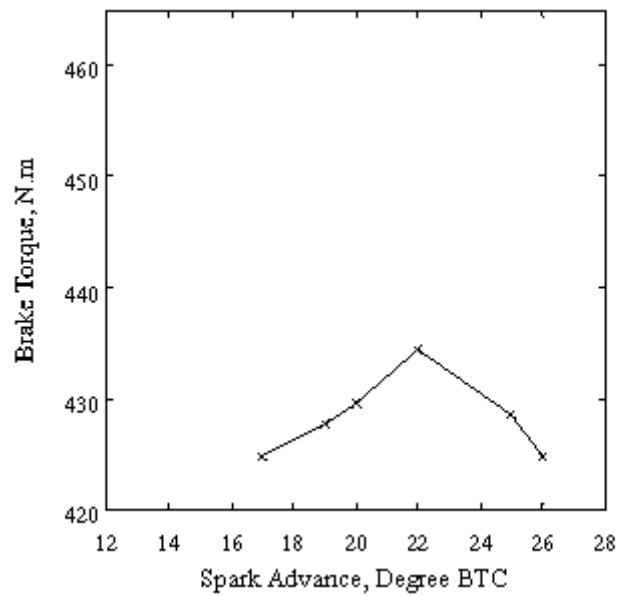
ภาพที่ 38 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดเบรกกับจังหวะการจุดระเบิดที่อัตราเร็ว 1,800 รอบต่อนาที



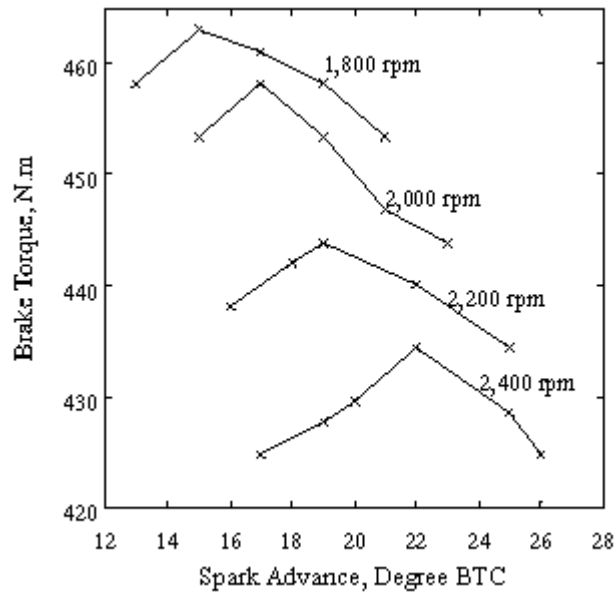
ภาพที่ 39 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดเบรกกับจังหวะการจุดระเบิดที่อัตราเร็ว 2,000 รอบต่อนาที



ภาพที่ 40 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดเบรกกับจังหวะการจุดระเบิดที่อัตราเร็ว 2,200 รอบต่อนาที

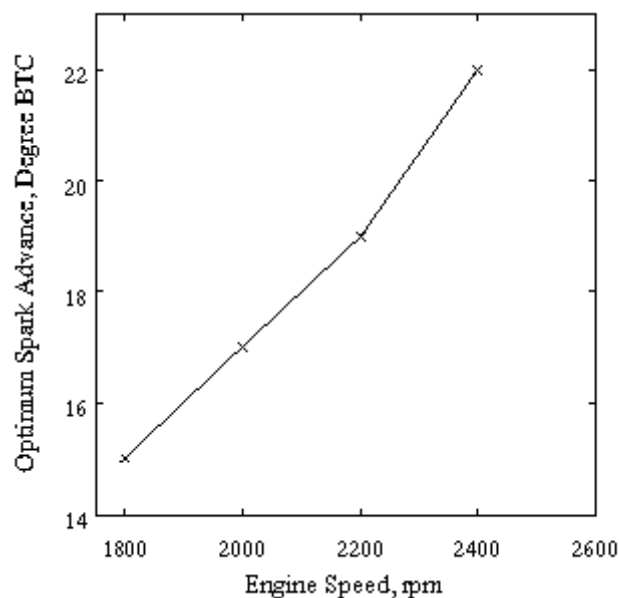


ภาพที่ 41 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดเบรกกับจังหวะการจุดระเบิดที่อัตราเร็ว 2,400 รอบต่อนาที



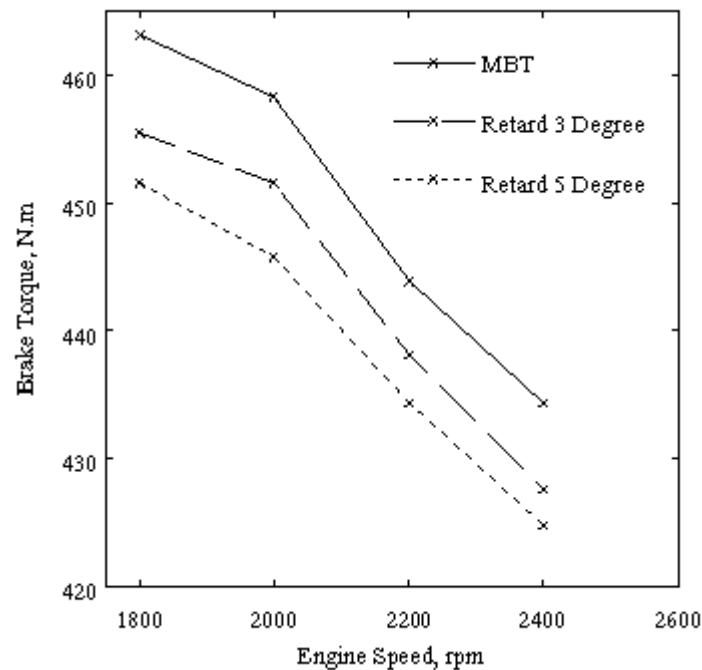
ภาพที่ 42 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดเบรกกับจังหวะการจุดระเบิดที่อัตราเร็ว 1,800 ถึง 2,400 รอบต่อนาที

ภาพที่ 38 ถึง 41 แสดงเส้นกราฟผลของการเปลี่ยนแปลงจังหวะการจุดระเบิดกับแรงบิดเบรกที่อัตราเร็ว 1,800 2,000 2,200 และ 2,400 รอบต่อนาทีตามลำดับ และภาพที่ 42 เป็นการนำภาพที่ 38 ถึง 41 มารวมกัน จะเห็นได้ว่า เส้นกราฟของทุกอัตราเร็วมีลักษณะคล้ายกับรูปประฆังคว่ำ ซึ่งจะมีจังหวะการจุดระเบิดหนึ่งที่ทำให้ค่าแรงบิดเบรกสูงสุด เนื่องจากเป็นจังหวะที่ความดันสูงสุดในกระบอกสูบเกิดขึ้นในจังหวะที่เหมาะสม (หลังศูนย์ตายบนเล็กน้อย) งานของจังหวะอัดที่เพิ่มขึ้นและงานของจังหวะขยายตัวที่ลดลงจึงหักล้างกันพอดี (Heywood, 1988) โดยที่อัตราเร็ว 1,800 2,000 2,200 และ 2,400 รอบต่อนาที จะให้ค่าแรงบิดเบรกสูงสุดเท่ากับ 463.14 458.34 443.92 และ 434.32 N.m ตามลำดับ และเมื่อตั้งจังหวะการจุดระเบิดที่ล่าช้ากว่าหรือล่วงหน้ามากกว่าจังหวะแรงบิดเบรกสูงสุดจะทำให้แรงบิดเบรกมีค่าลดลง เนื่องจากการตั้งจังหวะการจุดระเบิดที่ล่าช้ากว่าจังหวะแรงบิดเบรกสูงสุด ช่วงที่เกิดความดันสูงสุดเกิดล่าช้าออกไป ทำให้ความดันสูงสุด และงานในจังหวะขยายตัวลดลง ส่วนการตั้งจังหวะการจุดระเบิดล่วงหน้ามากกว่าจังหวะแรงบิดเบรกสูงสุด จะทำให้จังหวะเริ่มต้นของกระบวนการเผาไหม้เกิดขึ้นก่อนศูนย์ตายบนมากเกินไป จึงเกิดความดันสูงเกินต้องการตั้งแต่ลูกสูบยังไม่ถึงศูนย์ตายบน และสูญเสียงานส่วนหนึ่งในจังหวะอัด (Heywood, 1988)



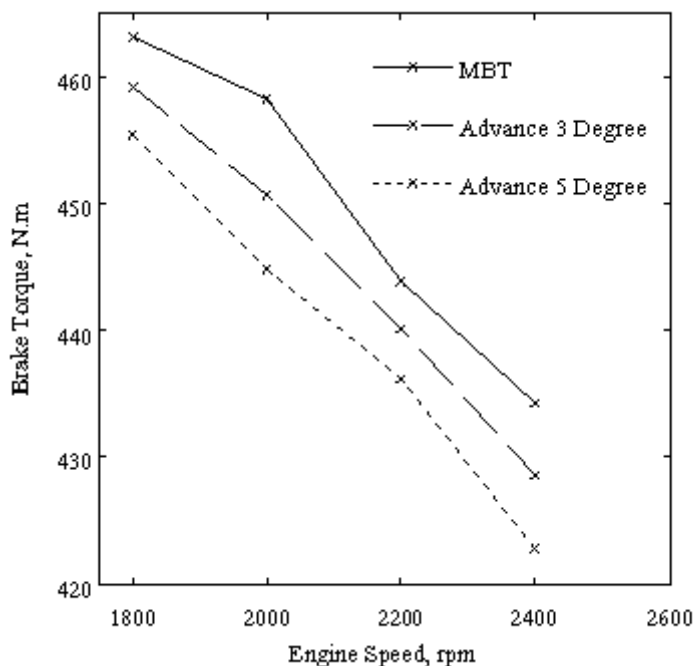
ภาพที่ 43 จังหวะการจุดระเบิดที่ให้แรงบิดเบรกสูงสุดที่อัตราเร็ว 1,800 ถึง 2,400 รอบต่อนาที

ภาพที่ 43 แสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราเร็วสูงขึ้น ค่าจังหวะการจุดระเบิดที่ให้แรงบิดเบรกสูงสุดจะมากขึ้นตาม เนื่องจากเมื่ออัตราเร็วเพิ่มขึ้นความเร็วของการสันดาปจะเพิ่มขึ้นตาม เวลาจริงของการสันดาปก็จะสั้นลง และเวลาที่ลูกสูบเคลื่อนที่ครบหนึ่งวัฏจักรการทำงานก็สั้นลงด้วย ดังนั้นช่วงของมุมที่เพลาช้อเหวี่ยงหมุน ไปตั้งแต่เริ่มการสันดาปจนถึงสิ้นสุดการสันดาป จึงเปลี่ยนแปลงน้อยมาก แต่ช่วงเวลาตั้งแต่เริ่มเกิดประกายไฟที่เขี้ยวหัวเทียนจนถึงช่วงเริ่มการสันดาปไม่ได้ลดลงในสัดส่วนเดียวกัน ดังนั้น มุมการเผาไหม้ทั้งหมดจึงมีระยะเวลาที่ยาวนานขึ้น (Willard, 2003) หากไม่มีการตั้งจังหวะการจุดระเบิดให้ล่วงหน้ามากขึ้นจะทำให้ช่วงที่มีความดันสูงในกระบอกสูบเกิดล่าช้าออกไปจากจังหวะที่เหมาะสม (16 องศาหลังศูนย์ตายบน) จึงต้องชดเชยโดยการตั้งจังหวะการจุดระเบิดล่วงหน้ามากขึ้นเมื่ออัตราเร็วรอบเพิ่มขึ้นเพื่อรักษาจังหวะแรงบิดเบรกสูงสุดไว้ โดยที่อัตราเร็ว 1,800 2,000 2,200 และ 2,400 รอบต่อนาที มีค่าเท่ากับ 15 17 19 และ 22 องศาก่อนศูนย์ตายบนตามลำดับ



ภาพที่ 44 ค่าแรงบิดเบรกเมื่อตั้งจังหวะการจุดระเบิดที่ให้แรงบิดเบรกสูงสุด จังหวะการจุดระเบิดที่ล่าช้ากว่าจังหวะแรงบิดเบรกสูงสุด 3 และ 5 องศา ที่อัตราเร็ว 1,800 ถึง 2,400 รอบต่อนาที

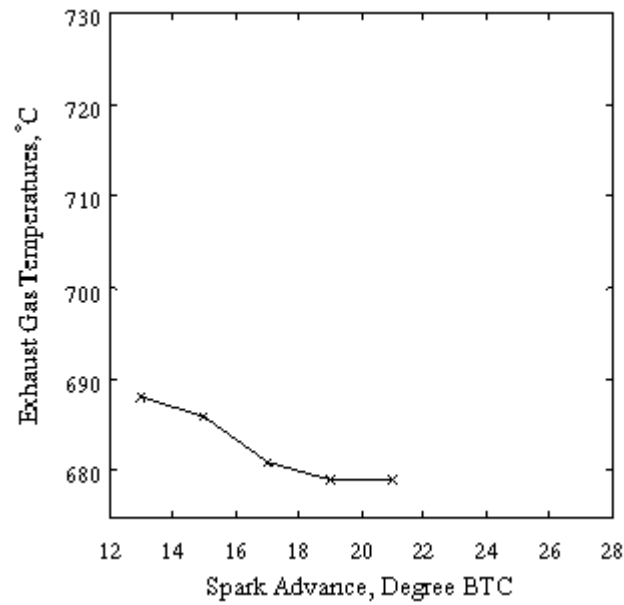
ภาพที่ 44 แสดงให้เห็นว่าเมื่อตั้งจังหวะการจุดระเบิดให้ล่าช้าลงจากจังหวะแรงบิดเบรกสูงสุดมากขึ้น จะทำให้ค่าแรงบิดเบรกรมีอัตราการลดลงมากขึ้น โดยการตั้งจังหวะการจุดระเบิดที่ล่าช้ากว่าจังหวะแรงบิดเบรกสูงสุด 3 องศา จะทำให้แรงบิดเบรกที่อัตราเร็ว 1,800 2,000 2,200 และ 2,400 รอบต่อนาทีลดลงร้อยละ 1.7 1.5 1.3 และ 1.5 ตามลำดับ (ลดลงเฉลี่ยร้อยละ 1.5) และถ้าตั้งจังหวะการจุดระเบิดล่าช้ากว่า 5 องศา แรงบิดเบรกที่อัตราเร็ว 1,800 2,000 2,200 และ 2,400 รอบต่อนาที จะลดลงร้อยละ 2.5 2.7 2.2 และ 2.2 ตามลำดับ (ลดลงเฉลี่ยร้อยละ 2.4)



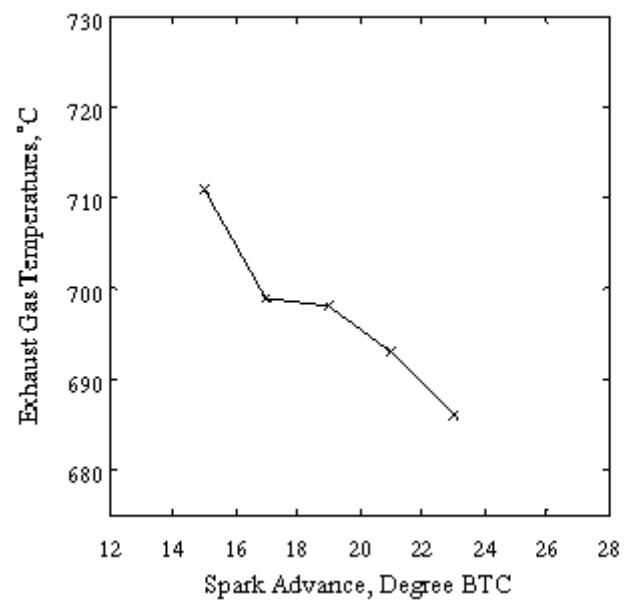
ภาพที่ 45 ค่าแรงบิดเบรกเมื่อตั้งจังหวะการจุดระเบิดที่ให้แรงบิดเบรกสูงสุด จังหวะการจุดระเบิดที่ล่วงหน้ามากกว่าจังหวะแรงบิดเบรกสูงสุด 3 และ 5 องศา ที่อัตราเร็ว 1,800 ถึง 2,400 รอบต่อนาที

ภาพที่ 45 เปรียบเทียบให้เห็นการตั้งจังหวะการจุดระเบิดให้ล่วงหน้ามากขึ้นจากจังหวะแรงบิดเบรกสูงสุด จะทำให้ค่าแรงบิดเบรที่มีอัตราการลดลงมากขึ้นเช่นกัน โดยการตั้งจังหวะการจุดระเบิดที่ล่วงหน้ามากกว่าจังหวะแรงบิดเบรกสูงสุด 3 องศา จะทำให้แรงบิดเบรกที่อัตราเร็ว 1,800 2,000 2,200 และ 2,400 รอบต่อนาทีลดลงร้อยละ 0.8 1.7 0.9 และ 1.3 ตามลำดับ (ลดลงเฉลี่ยร้อยละ 1.2) และถ้าตั้งจังหวะการจุดระเบิดล่วงหน้ามากกว่า 5 องศา แรงบิดเบรกที่อัตราเร็ว 1,800 2,000 2,200 และ 2,400 รอบต่อนาทีจะลดลงร้อยละ 1.7 2.9 1.7 และ 2.6 ตามลำดับ (ลดลงเฉลี่ยร้อยละ 2.2) นอกจากนี้แล้วถ้าตั้งจังหวะการจุดระเบิดล่วงหน้ามากเกินไปอาจทำให้ส่วนผสมที่ยังไม่เผาไหม้ที่อยู่ไกลที่สุดจากหัวเทียนเกิดการจุดระเบิดขึ้นเองพร้อมกันทันที (Autoignition) เกิดการปล่อยพลังงานเคมีอย่างรุนแรง เป็นผลให้ความดันแกว่งตัวขึ้นลงอย่างรุนแรง ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การเกิดน็อก ซึ่งจะมีเสียงดังเหมือนเสียงขึ้นส่วนของเครื่องยนต์กระทบกัน ความรุนแรงของการเกิดน็อกจะมากขึ้นเมื่อตั้งจังหวะการจุดระเบิดล่วงหน้ามากขึ้น ถ้ารุนแรงมากอาจทำให้เครื่องยนต์ได้รับความเสียหายได้

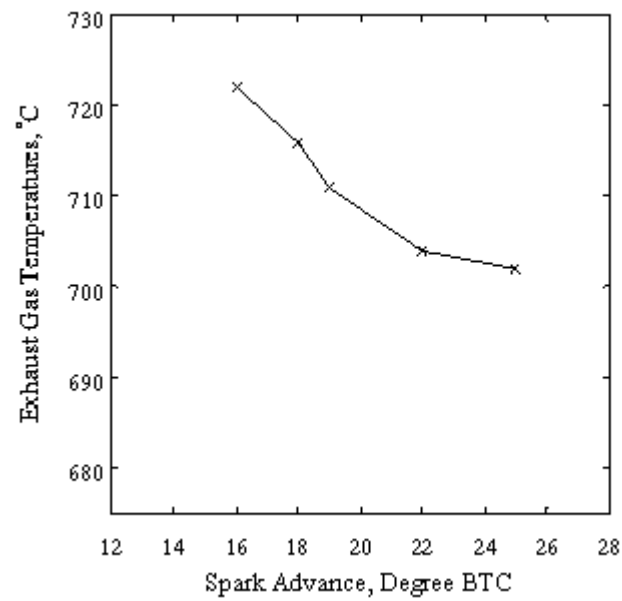
2. ผลของจังหวะการจุดระเบิด ต่ออุณหภูมิไอเสีย



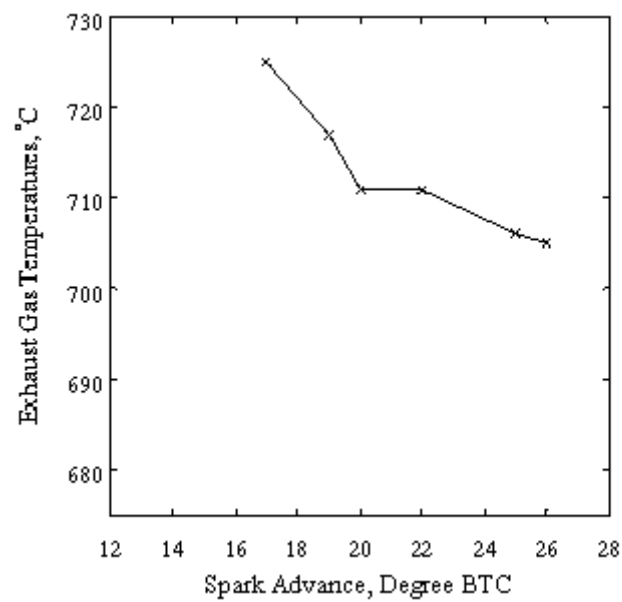
ภาพที่ 46 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิไอเสียกับจังหวะการจุดระเบิดที่อัตราเร็ว 1,800 รอบต่อนาที



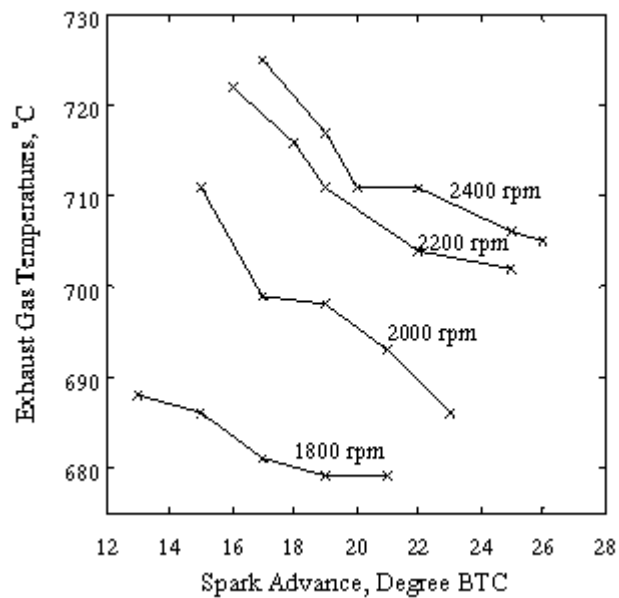
ภาพที่ 47 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิไอเสียกับจังหวะการจุดระเบิดที่อัตราเร็ว 2,000 รอบต่อนาที



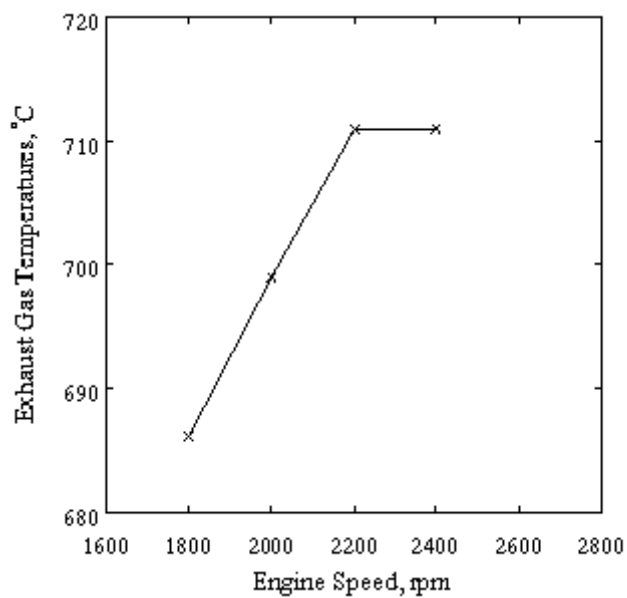
ภาพที่ 48 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิไอเสียกับจังหวะการจุดระเบิดที่อัตราเร็ว 2,200 รอบต่อนาที



ภาพที่ 49 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิไอเสียกับจังหวะการจุดระเบิดที่อัตราเร็ว 2,400 รอบต่อนาที

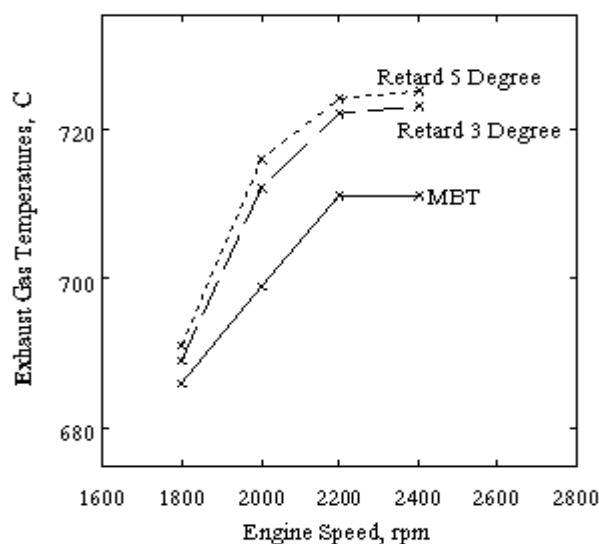


ภาพที่ 50 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิไอเสียกับจังหวะการจุดระเบิดที่อัตราเร็ว 1,800 ถึง 2,400 รอบต่อนาที



ภาพที่ 51 อุณหภูมิไอเสียที่จังหวะแรงบิดเบรกสูงสุดที่อัตราเร็ว 1,800 ถึง 2,400 รอบต่อนาที

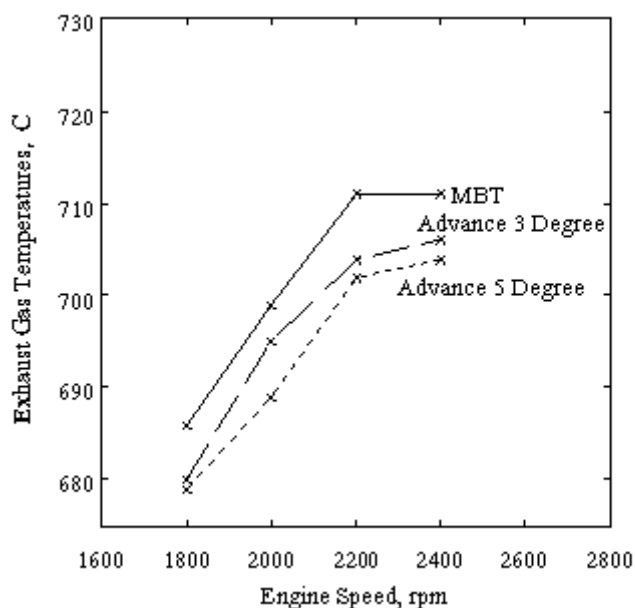
ภาพที่ 46 ถึง 50 แสดงให้เห็นว่าการตั้งจังหวะการจุดระเบิดล่าช้าลง จะทำให้อุณหภูมิไอเสียจะมีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากช่วงเวลาที่การเผาไหม้เกิดล่าช้าออกไป จึงทำให้เวลาการขยายตัวของก๊าซน้อยลง ในขณะที่การตั้งจังหวะการจุดระเบิดล่วงหน้ามากขึ้นจะทำให้อุณหภูมิไอเสียมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากช่วงเวลาที่การขยายตัวมีมากขึ้น (Willard, 2003) ส่วนภาพที่ 51 แสดงค่าอุณหภูมิไอเสียของแต่ละอัตราเร็วเมื่อตั้งจังหวะการจุดระเบิดที่ให้แรงบิดเบรกสูงสุด โดยที่อัตราเร็ว 1,800 2,000 2,200 และ 2,400 รอบต่อนาที อุณหภูมิไอเสียที่จังหวะแรงบิดเบรกสูงสุดมีค่าเท่ากับ 686 699 711 และ 711 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อรอบเครื่องยนต์สูงขึ้นอุณหภูมิไอเสียมีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากช่วงเวลาที่การเผาไหม้ในแต่ละวัฏจักรลดลง การถ่ายเทความร้อนต่อวัฏจักรจึงลดลง (Willard, 2003)



ภาพที่ 52 อุณหภูมิไอเสียเมื่อตั้งจังหวะการจุดระเบิดที่ให้แรงบิดเบรกสูงสุด จังหวะการจุดระเบิดที่ล่าช้ากว่าจังหวะแรงบิดเบรกสูงสุด 3 และ 5 องศา ที่อัตราเร็ว 1,800 ถึง 2,400 รอบต่อนาที

ภาพที่ 52 เปรียบเทียบให้เห็นการตั้งจังหวะการจุดระเบิดให้ล่าช้าลงจากจังหวะแรงบิดเบรกสูงสุด จะทำให้อุณหภูมิไอเสียสูงขึ้น โดยการตั้งจังหวะการจุดระเบิดที่ล่าช้ากว่าจังหวะแรงบิดเบรกสูงสุด 3 องศา จะทำให้อุณหภูมิไอเสียที่อัตราเร็ว 1,800 2,000 2,200 และ 2,400 รอบต่อนาทีสูงขึ้นร้อยละ 0.4 1.86 1.55 และ 1.69 ตามลำดับ (สูงขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 1.4) และถ้าตั้งจังหวะการจุดระเบิดล่าช้ากว่า 5 องศา อุณหภูมิไอเสียที่อัตราเร็ว 1,800 2,000 2,200 และ 2,400 รอบต่อนาทีจะสูงขึ้นร้อยละ 0.7 2.4 1.8 และ 2.0 ตามลำดับ (สูงขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 1.7)

เนื่องจากเครื่องยนต์ทดสอบครั้งนี้ดัดแปลงมาจากเครื่องยนต์ดีเซล ถูกออกแบบชิ้นส่วนให้ทนทานต่อภาระทางความร้อนของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด ซึ่งมีอุณหภูมิไอเสียต่ำกว่าเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟ เนื่องจากมีอัตราส่วนการอัดที่สูงกว่าและใช้ส่วนผสมในการเผาไหม้บางกว่า ชิ้นส่วนภายในห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซล เช่น ลูกสูบ และวาล์วไอเสีย เป็นต้น จึงทนต่ออุณหภูมิไม่สูงเท่ากับเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟ ดังนั้น การดัดแปลงเครื่องยนต์ดีเซลให้ใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง จึงมีข้อควรระวังในเรื่องอุณหภูมิไอเสียอย่าให้สูงเกินไป สำหรับการทดลองครั้งนี้ไม่ได้มีการทดสอบหาช่วงอุณหภูมิไอเสียที่ทำให้ชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ได้รับความเสียหาย จึงไม่สามารถบอกได้ว่าชิ้นส่วนของเครื่องยนต์จะได้รับความเสียหายเมื่ออุณหภูมิไอเสียสูงขึ้นเท่าไร แต่จะเลิกทำการทดสอบเมื่อเห็นว่าอุณหภูมิไอเสียสูงเกิน 725 องศาเซลเซียส



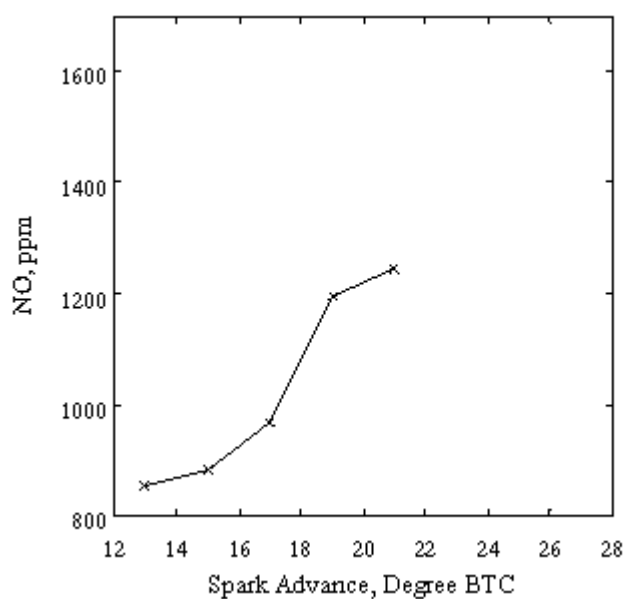
ภาพที่ 53 อุณหภูมิไอเสียเมื่อตั้งจังหวะการจุดระเบิดที่ให้แรงบิดเบรกสูงสุด จังหวะการจุดระเบิดที่ล่วงหน้ามากกว่าจังหวะแรงบิดเบรกสูงสุด 3 และ 5 องศา ที่อัตราเร็ว 1,800 ถึง 2,400 รอบต่อนาที

ภาพที่ 53 เปรียบเทียบให้เห็นการตั้งจังหวะการจุดระเบิดล่วงหน้ามากขึ้นจากจังหวะแรงบิดเบรกสูงสุด จะทำให้ค่าอุณหภูมิไอเสียลดลง โดยการตั้งจังหวะการจุดระเบิดที่ล่วงหน้ามากกว่าจังหวะแรงบิดเบรกสูงสุด 3 องศา จะทำให้อุณหภูมิไอเสียที่อัตราเร็ว 1,800 2,000 2,200 และ 2,400 รอบต่อนาทีลดลงร้อยละ 0.9 0.6 1.0 และ 0.7 ตามลำดับ (ลดลงเฉลี่ยร้อยละ 0.8) และถ้าตั้งจังหวะ

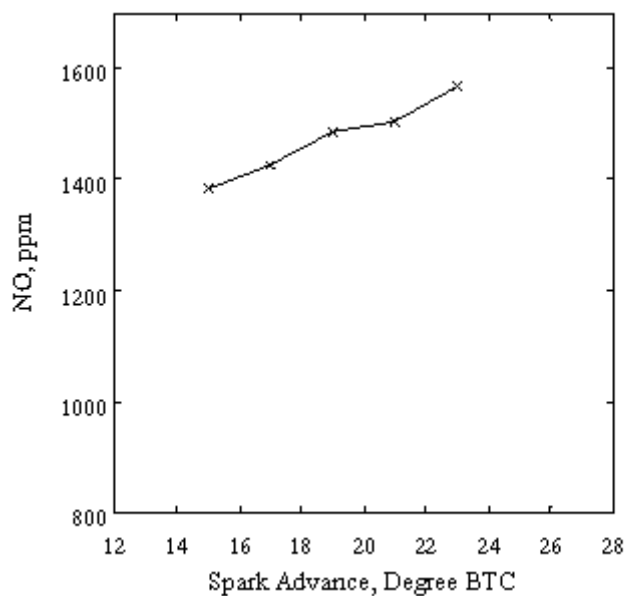
การจุดระเบิดล่วงหน้ามากกว่า 5 องศา อุณหภูมิไอเสียที่อัตราเร็ว 1,800 2,000 2,200 และ 2,400 รอบต่อนาทีจะลดลงร้อยละ 1.0 1.4 1.3 และ 1.0 ตามลำดับ (ลดลงเฉลี่ยร้อยละ 1.2)

3. ผลของจังหวะการจุดระเบิด ต่อมลพิษไอเสีย

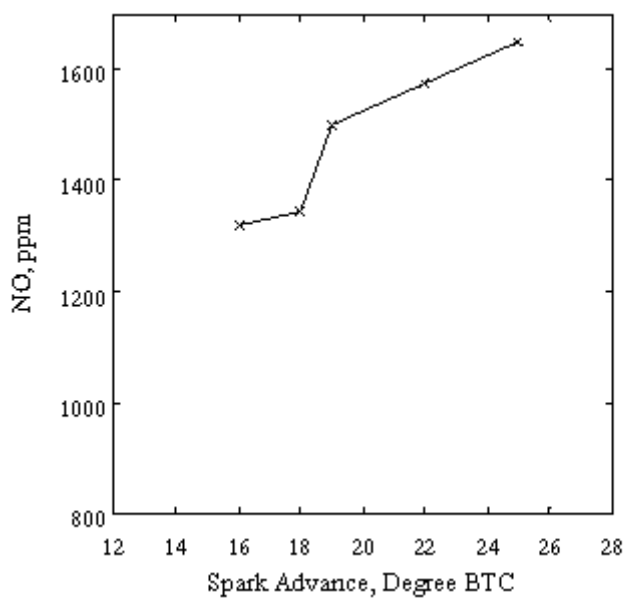
3.1 ผลของจังหวะการจุดระเบิด ต่อการเกิดไนตริกออกไซด์ (NO)



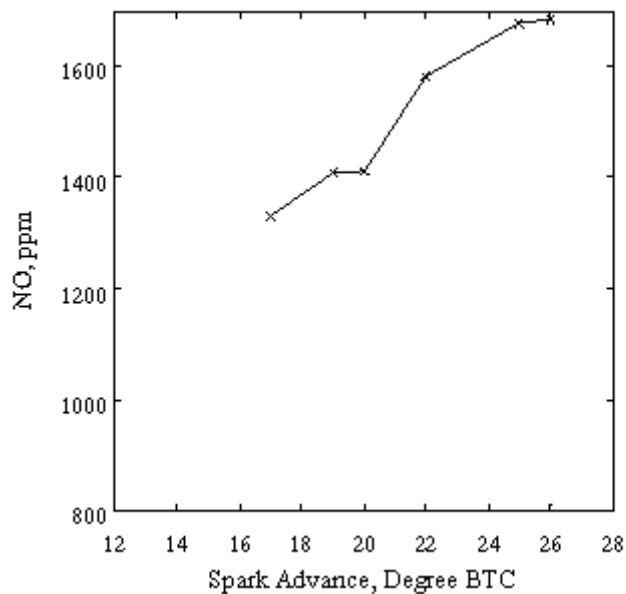
ภาพที่ 54 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไนตริกออกไซด์กับจังหวะการจุดระเบิดที่อัตราเร็ว 1,800 รอบต่อนาที



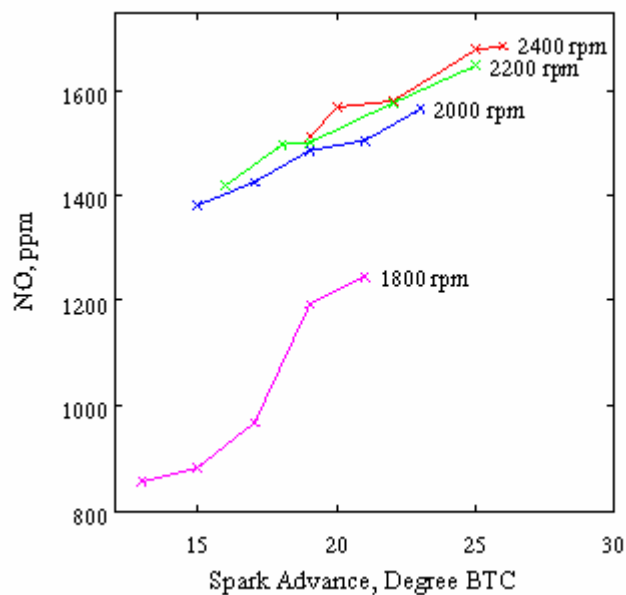
ภาพที่ 55 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไนตริกออกไซด์กับจังหวะการจุดระเบิดที่อัตราเร็ว 2,000 รอบต่อนาที



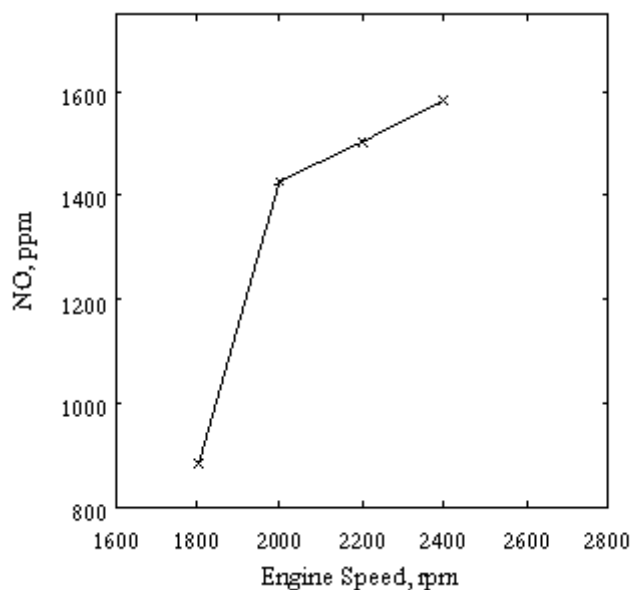
ภาพที่ 56 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไนตริกออกไซด์กับจังหวะการจุดระเบิดที่อัตราเร็ว 2,200 รอบต่อนาที



ภาพที่ 57 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไนตริกออกไซด์กับจังหวะการจุดระเบิดที่อัตราเร็ว 2,400 รอบต่อนาที

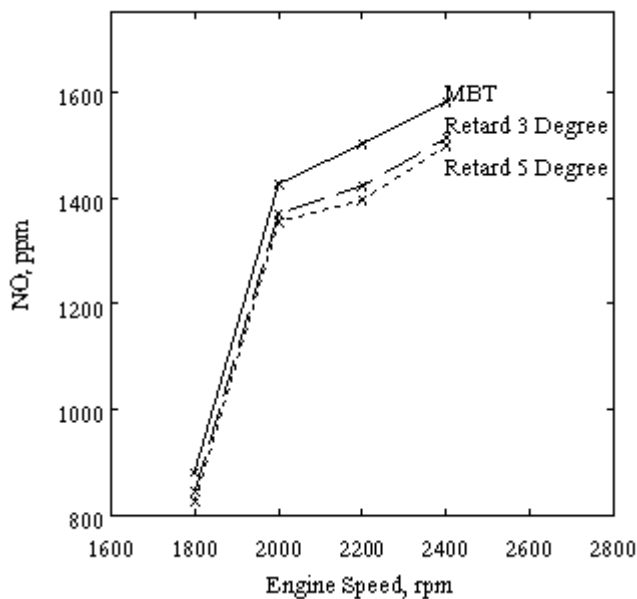


ภาพที่ 58 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไนตริกออกไซด์กับจังหวะการจุดระเบิดที่อัตราเร็ว 1,800 ถึง 2,400 รอบต่อนาที



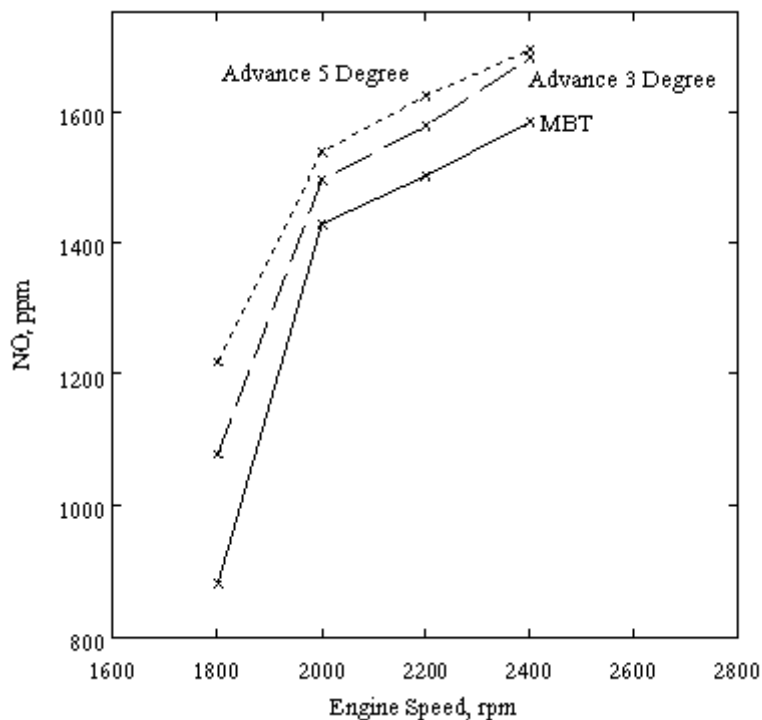
ภาพที่ 59 ความเข้มข้นของไนตริกออกไซด์ที่จังหวะแรงบิดเบรกสูงสุดที่อัตราเร็ว 1,800 ถึง 2,400 รอบต่อนาที

จากภาพที่ 54 ถึง 58 แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของไนตริกออกไซด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อตั้งจังหวะการจุดระเบิดล่วงหน้าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากความดันสูงสุดในกระบอกสูบเพิ่มมากขึ้น ทำให้อุณหภูมิของก๊าซที่เผาไหม้แล้วสูงขึ้น ดังนั้น N_2 (มีเสถียรภาพมากที่อุณหภูมิต่ำ) จึงแตกตัวเป็น N และมีอัตราการเกิดออกไซด์เป็นไนตริกออกไซด์ได้มากขึ้น นอกจากนี้แล้วช่วงที่เกิดความดันสูงสุดในกระบอกสูบเข้าใกล้ศูนย์ตายบนมากขึ้น ทำให้ช่วงเวลาที่การเผาไหม้ยาวนานขึ้น เวลาในการเกิดปฏิกิริยาจึงเพิ่มมากขึ้น และเมื่อตั้งจังหวะการจุดระเบิดล่าช้าลงความเข้มข้นของไนตริกออกไซด์มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากความดันสูงสุดในกระบอกสูบลดลง ทำให้อุณหภูมิของก๊าซที่เผาไหม้แล้วลดลง และช่วงที่เกิดความดันสูงสุดในกระบอกสูบอยู่ห่างจากศูนย์ตายบนมากขึ้น ทำให้ช่วงเวลาที่การเผาไหม้น้อยลง (Heywood, 1988) ส่วนภาพที่ 59 แสดงความเข้มข้นของไนตริกออกไซด์ ที่จังหวะแรงบิดเบรกสูงสุด ที่อัตราเร็ว 1,800 2,000 2,200 และ 2,400 รอบต่อนาทีตามลำดับ มีค่าเท่ากับ 882 1,428 1,503 และ 1,583 ppm ตามลำดับ จะสังเกตเห็นได้ว่าความเข้มข้นของไนตริกออกไซด์จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราเร็วเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเศษส่วนของก๊าซที่ค้างอยู่ในกระบอกสูบลดลง และความสำคัญของการถ่ายเทความร้อนต่อวัฏจักรน้อยลง ทำให้อุณหภูมิในห้องเผาไหม้สูงขึ้น



ภาพที่ 60 ความเข้มข้นของไนตริกออกไซด์เมื่อตั้งจังหวะการจุดระเบิดที่ให้แรงบิดเบรกสูงสุด จังหวะการจุดระเบิดที่ล่าช้ากว่าจังหวะแรงบิดเบรกสูงสุด 3 และ 5 องศา ที่อัตราเร็ว 1,800 ถึง 2,400 รอบต่อนาที

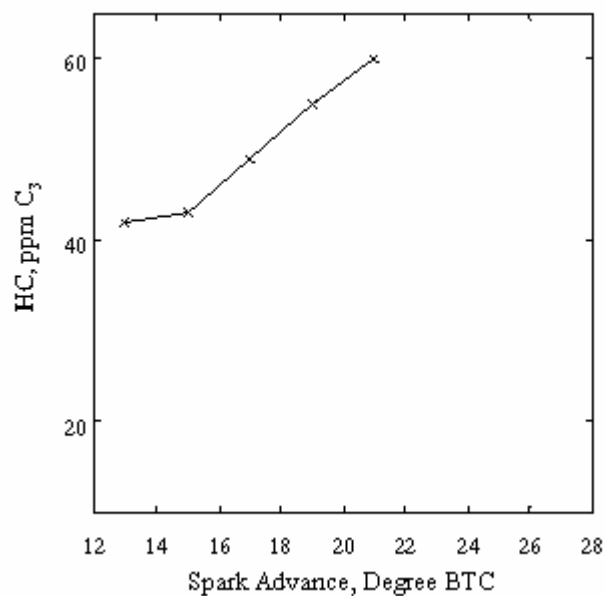
ภาพที่ 60 เปรียบเทียบให้เห็น เมื่อตั้งจังหวะการจุดระเบิดให้ล่าช้าลงจากจังหวะแรงบิดเบรกสูงสุด จะทำให้ความเข้มข้นของไนตริกออกไซด์มีแนวโน้มลดลง โดยการตั้งจังหวะการจุดระเบิดที่ล่าช้ากว่าจังหวะแรงบิดเบรกสูงสุด 3 องศา จะทำให้ความเข้มข้นของไนตริกออกไซด์ที่อัตราเร็ว 1,800 2,000 2,200 และ 2,400 รอบต่อนาที ลดลงร้อยละ 4.4 4.0 5.4 และ 4.4 ตามลำดับ (ลดลงเฉลี่ยร้อยละ 4.5) และถ้าตั้งจังหวะการจุดระเบิดล่าช้ากว่า 5 องศา ความเข้มข้นของไนตริกออกไซด์ ที่อัตราเร็ว 1,800 2,000 2,200 และ 2,400 รอบต่อนาที จะลดลงร้อยละ 6.7 5.0 7.2 และ 5.4 ตามลำดับ (ลดลงเฉลี่ยร้อยละ 6.1)



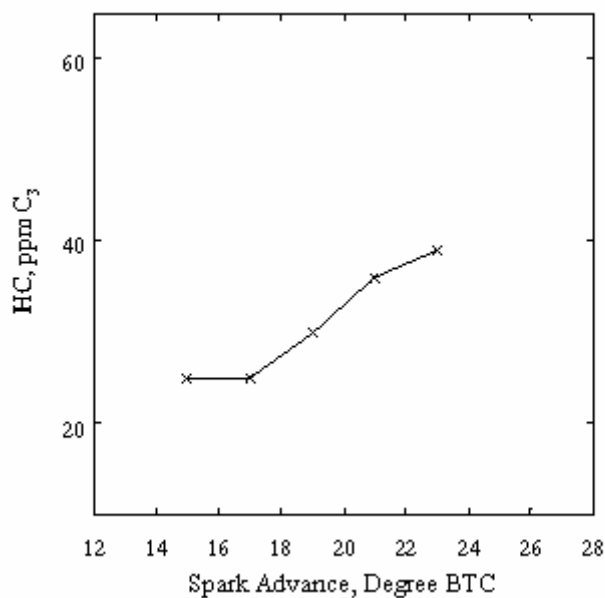
ภาพที่ 61 ความเข้มข้นของไนตริกออกไซด์เมื่อตั้งจังหวะการจุดระเบิดที่ให้แรงบิดเบรกสูงสุด จังหวะการจุดระเบิดที่ล่วงหน้ามากกว่าจังหวะแรงบิดเบรกสูงสุด 3 และ 5 องศา ที่อัตราเร็ว 1,800 ถึง 2,400 รอบต่อนาที

ภาพที่ 61 เปรียบเทียบให้เห็นการตั้งจังหวะการจุดระเบิดให้ล่วงหน้ามากขึ้นจากจังหวะแรงบิดเบรกสูงสุด จะทำให้ความเข้มข้นของไนตริกออกไซด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยการตั้งจังหวะการจุดระเบิดที่ล่วงหน้ามากกว่าจังหวะแรงบิดเบรกสูงสุด 3 องศา จะทำให้ความเข้มข้นของไนตริกออกไซด์ ที่อัตราเร็ว 1,800 2,000 2,200 และ 2,400 รอบต่อนาที เพิ่มขึ้นร้อยละ 22.2 4.8 4.9 และ 6.2 ตามลำดับ (เพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 9.5) และถ้าตั้งจังหวะการจุดระเบิดล่วงหน้ามากกว่า 5 องศา ความเข้มข้นของไนตริกออกไซด์ที่อัตราเร็ว 1,800 2,000 2,200 และ 2,400 รอบต่อนาที จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 38.2 7.6 8.1 และ 7.1 ตามลำดับ (เพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 15.2)

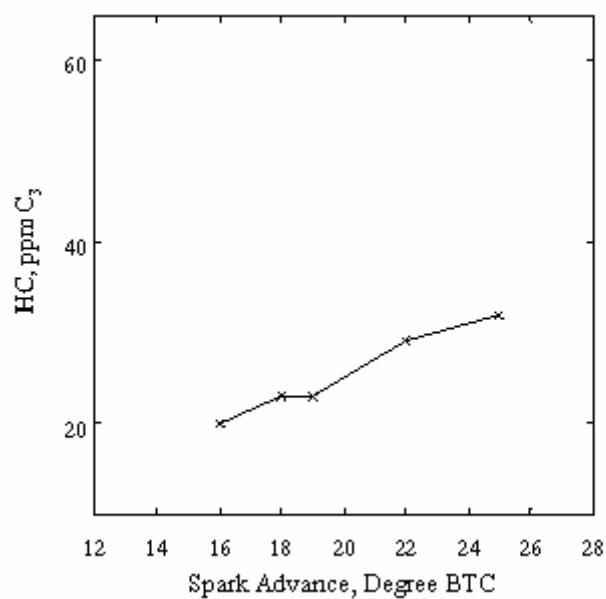
3.2 ผลของจังหวะการจุดระเบิด ต่อการเกิดไฮโดรคาร์บอน (HC)



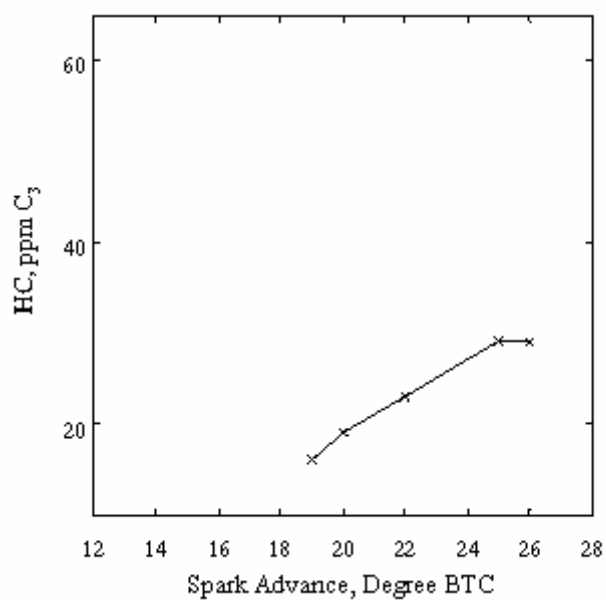
ภาพที่ 62 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไฮโดรคาร์บอนกับจังหวะการจุดระเบิด ที่อัตราเร็ว 1,800 รอบต่อนาที



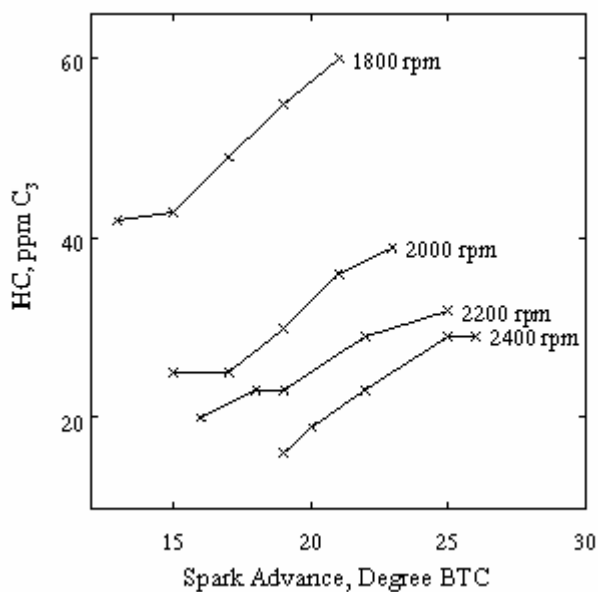
ภาพที่ 63 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไฮโดรคาร์บอนกับจังหวะการจุดระเบิด ที่อัตราเร็ว 2,000 รอบต่อนาที



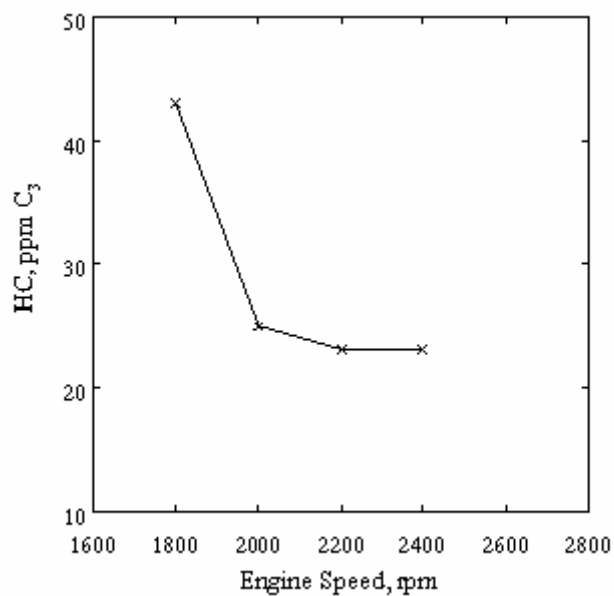
ภาพที่ 64 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไฮโดรคาร์บอนกับจังหวะการจุดระเบิดที่อัตราเร็ว 2,200รอบต่อนาที



ภาพที่ 65 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไฮโดรคาร์บอนกับจังหวะการจุดระเบิดที่อัตราเร็ว 2,400รอบต่อนาที

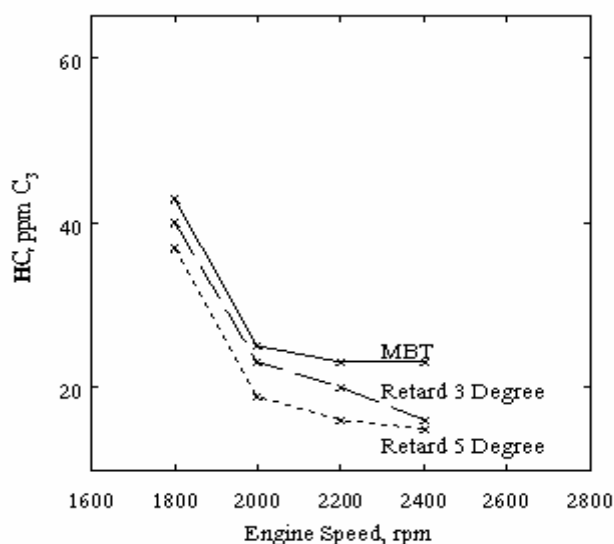


ภาพที่ 66 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไฮโดรคาร์บอนกับจังหวะการจุดระเบิดที่อัตราเร็ว 1,800 ถึง 2,400 รอบต่อนาที



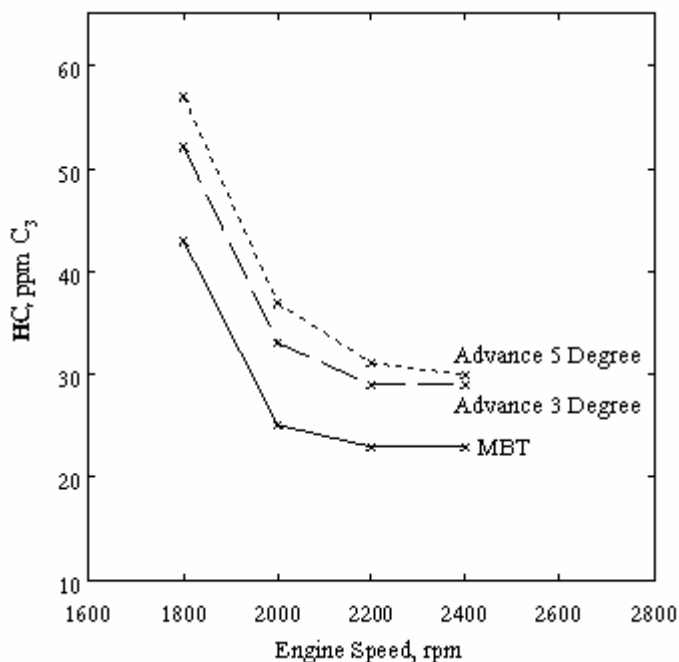
ภาพที่ 67 ความเข้มข้นของไฮโดรคาร์บอนที่จังหวะเร่งบิดเบรกสูงสุดที่อัตราเร็ว 1,800 ถึง 2,400 รอบต่อนาที

จากภาพที่ 62 ถึง 66 แสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นของไฮโดรคาร์บอนมีแนวโน้มลดลงเมื่อตั้งจังหวะการจุดระเบิดต่ำซ้าลง เนื่องจากอุณหภูมิไอเสียเพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการออกซิไดส์ในระหว่างกระบวนการคายไอเสียเพิ่มขึ้น (Heywood, 1988) ส่วนภาพที่ 67 แสดงความเข้มข้นของไฮโดรคาร์บอนที่จังหวะแรงบิดเบรกสูงสุดที่อัตราเร็ว 1,800 2,000 2,200 และ 2,400 รอบต่อนาทีตามลำดับ ซึ่งมีค่า 43 25 23 และ 23 ppm_{C₃} ตามลำดับ จะสังเกตเห็นได้ว่าความเข้มข้นของไฮโดรคาร์บอนมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราเร็วเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเศษส่วนของก๊าซที่ค้างอยู่ในกระบอกสูบลดลง และความสำคัญของการถ่ายเทความร้อนต่อวัฏจักรก็น้อยลง จึงทำให้อุณหภูมิในช่วงจังหวะขยายตัวและจังหวะคายเพิ่มขึ้น อัตราการออกซิไดส์จึงเพิ่มขึ้น (Heywood, 1988)



ภาพที่ 68 ความเข้มข้นของไฮโดรคาร์บอน เมื่อตั้งจังหวะการจุดระเบิดที่ให้แรงบิดเบรกสูงสุด จังหวะการจุดระเบิดที่ต่ำซ้ากว่าจังหวะแรงบิดเบรกสูงสุด 3 และ 5 องศา ที่อัตราเร็ว 1,800 ถึง 2,400 รอบต่อนาที

ภาพที่ 68 เปรียบเทียบให้เห็นการตั้งจังหวะการจุดระเบิดให้ต่ำซ้าลงจากจังหวะแรงบิดเบรกสูงสุด จะทำให้ความเข้มข้นของไฮโดรคาร์บอนมีแนวโน้มลดลง โดยการตั้งจังหวะการจุดระเบิดที่ต่ำซ้ากว่าจังหวะแรงบิดเบรกสูงสุด 3 องศา จะทำให้ความเข้มข้นของไฮโดรคาร์บอน ที่อัตราเร็ว 1,800 2,000 2,200 และ 2,400 รอบต่อนาทีลดลงร้อยละ 7.0 13.9 13.0 และ 30.4 ตามลำดับ (ลดลงเฉลี่ยร้อยละ 16.1) และถ้าตั้งจังหวะการจุดระเบิดต่ำซ้ากว่า 5 องศา ความเข้มข้นของไฮโดรคาร์บอน ที่อัตราเร็ว 1,800 2,000 2,200 และ 2,400 รอบต่อนาที จะลดลงร้อยละ 13.9 24.0 30.4 และ 34.8 ตามลำดับ (ลดลงเฉลี่ยร้อยละ 25.8)

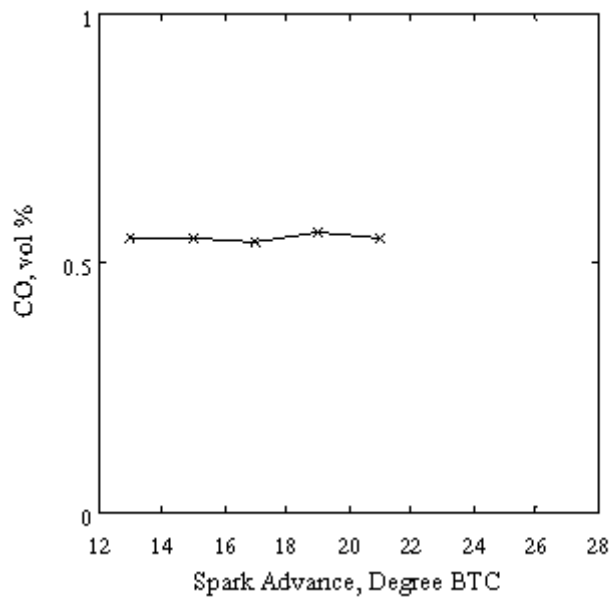


ภาพที่ 69 ความเข้มข้นของไฮโดรคาร์บอน เมื่อตั้งจังหวะการจุดระเบิดที่ให้แรงบิดเบรกสูงสุด จังหวะการจุดระเบิดที่ล่วงหน้ามากกว่าจังหวะแรงบิดเบรกสูงสุด 3 และ 5 องศา ที่อัตราเร็ว 1,800 ถึง 2,400 รอบต่อนาที

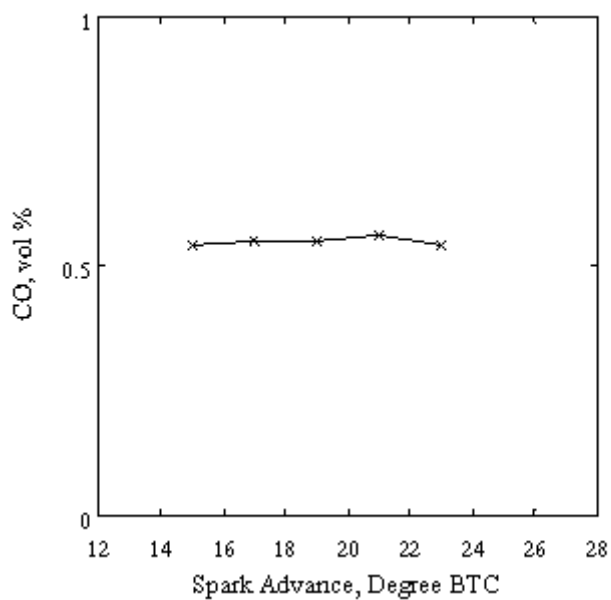
ภาพที่ 69 เปรียบเทียบให้เห็นการตั้งจังหวะการจุดระเบิดให้ล่วงหน้ามากขึ้นจากจังหวะแรงบิดเบรกสูงสุด จะทำให้ความเข้มข้นของไฮโดรคาร์บอนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยการตั้งจังหวะการจุดระเบิดที่ล่วงหน้ามากกว่าจังหวะแรงบิดเบรกสูงสุด 3 องศา จะทำให้ความเข้มข้นของไฮโดรคาร์บอนที่อัตราเร็ว 1,800 2,000 2,200 และ 2,400 รอบต่อนาที เพิ่มขึ้นร้อยละ 20.9 32.0 26.1 และ 26.1 ตามลำดับ (เพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 26.3) และถ้าตั้งจังหวะการจุดระเบิดล่วงหน้ามากกว่า 5 องศา ความเข้มข้นของไฮโดรคาร์บอนที่อัตราเร็ว 1,800 2,000 2,200 และ 2,400 รอบต่อนาทีจะเพิ่มขึ้นร้อยละ 32.6 48.0 34.8 และ 30.4 ตามลำดับ (เพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 36.5)

หมายเหตุ: เป็นที่น่าสังเกตว่าระดับความเข้มข้นของไฮโดรคาร์บอนมีปริมาณที่ต่ำกว่า 100 ppmC₃ จึงอาจเป็นไปได้ว่าการใช้เครื่องมือวัดความเข้มข้นของไฮโดรคาร์บอนชนิดรังสีอินฟราเรดแบบไม่กระจาย (NDIR) อาจจะไม่เหมาะสม เนื่องจากไฮโดรคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้อาจมีหลายชนิด แต่ละชนิดก็มีความยาวคลื่นไม่เท่ากัน ไฮโดรคาร์บอนบางชนิดจึงไม่สามารถวัดได้

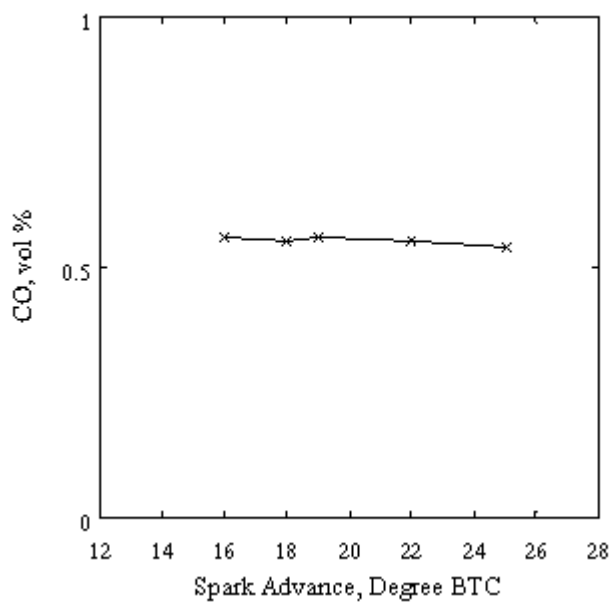
3.3 ผลของจังหวะการจุดระเบิด ต่อการเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)



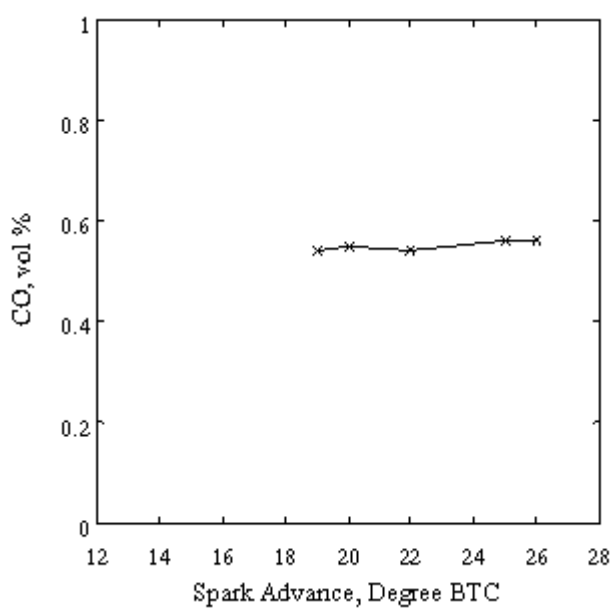
ภาพที่ 70 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์กับจังหวะการจุดระเบิด ที่อัตราเร็ว 1,800 รอบต่อนาที



ภาพที่ 71 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์กับจังหวะการจุดระเบิด ที่อัตราเร็ว 2,000 รอบต่อนาที



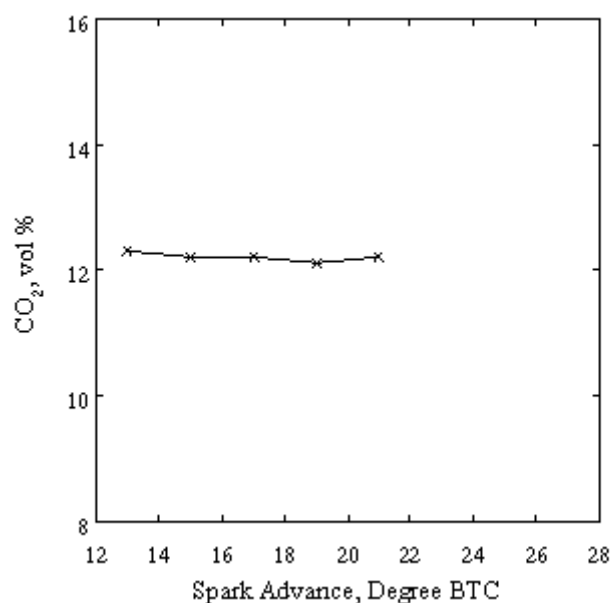
ภาพที่ 72 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์กับจังหวะการจุดระเบิดที่อัตราเร็ว 2,200 รอบต่อนาที



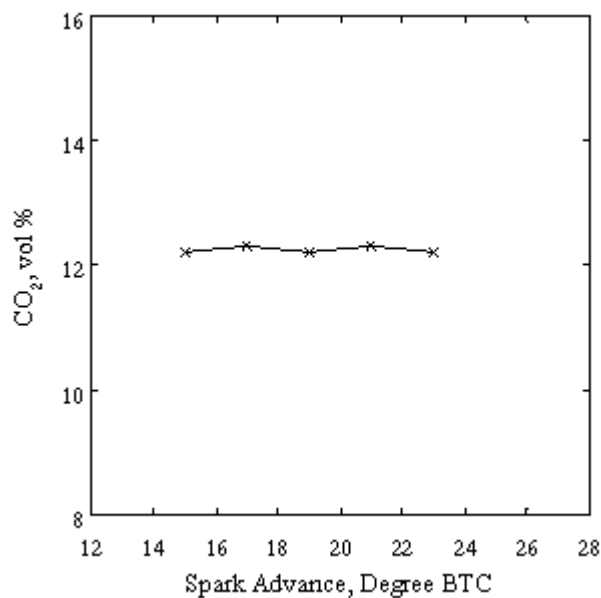
ภาพที่ 73 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์กับจังหวะการจุดระเบิดที่อัตราเร็ว 2,400 รอบต่อนาที

จากภาพที่ 70 ถึง 73 แสดงให้เห็นว่า การเปลี่ยนแปลงจังหวะการจุดระเบิดมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์น้อยมาก เนื่องจากการที่ส่วนผสมพอดี จะทำให้ออกซิเจนมีปริมาณเพียงพอที่จะออกซิไดส์คาร์บอนให้เห็นคาร์บอนไดออกไซด์ และออกซิไดส์ไฮโดรเจนให้เป็นน้ำ ทำให้คาร์บอนมอนอกไซด์มีความเข้มข้นต่ำ และมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก โดยทั่วไปความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์จะมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อส่วนผสมหนาขึ้น ทำให้มีออกซิเจนไม่เพียงพอที่จะเผาไหม้คาร์บอนทั้งหมดในเชื้อเพลิงให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และเกิดขึ้นในก๊าซที่เผาไหม้แล้ว ซึ่งมีอุณหภูมิสูงแม้ว่าจะเป็นการเผาไหม้ส่วนผสมบางก็ตาม โดยเกิดขึ้นจากการแตกตัวของคาร์บอนไดออกไซด์เป็นหลัก หลังจากนั้นในจังหวะขยายตัว กระบวนการออกซิเดชันของคาร์บอนมอนอกไซด์ก็จะหยุดเมื่ออุณหภูมิของก๊าซที่เผาไหม้แล้วลดลง (Heywood, 1988) สำหรับค่าความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ที่วัดได้ทุกอัตราเร็วรอบของการทดลอง ครั้งนี้อยู่ในระดับประมาณร้อยละ 0.55 โดยโมล

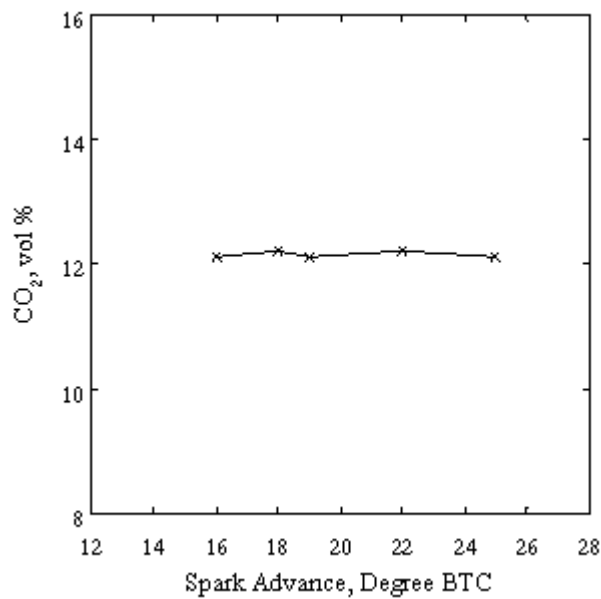
3.4 ผลของจังหวะการจุดระเบิด ต่อการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂)



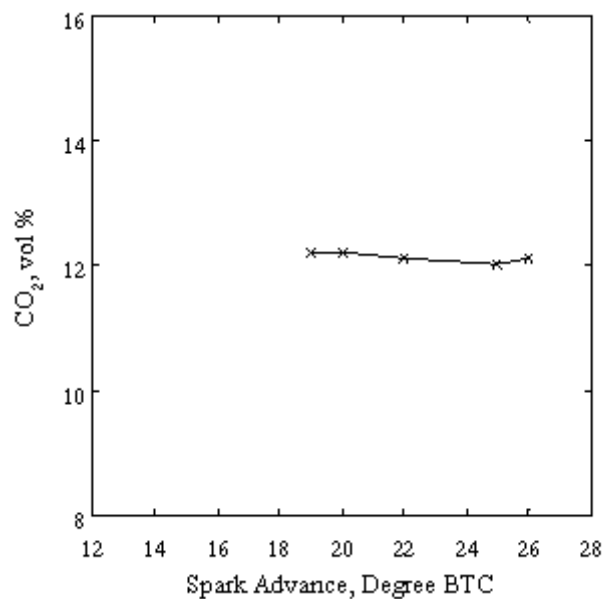
ภาพที่ 74 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์กับจังหวะการจุดระเบิดที่อัตราเร็ว 1,800 รอบต่อนาที



ภาพที่ 75 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์กับจังหวะการจุดระเบิดที่อัตราเร็ว 2,000 รอบต่อนาที



ภาพที่ 76 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์กับจังหวะการจุดระเบิดที่อัตราเร็ว 2,200 รอบต่อนาที

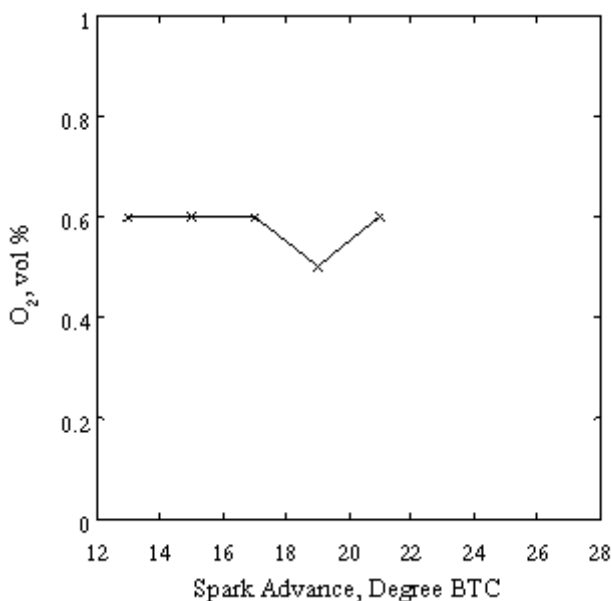


ภาพที่ 77 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์กับจังหวะการจุดระเบิดที่อัตราเร็ว 2,400 รอบต่อนาที

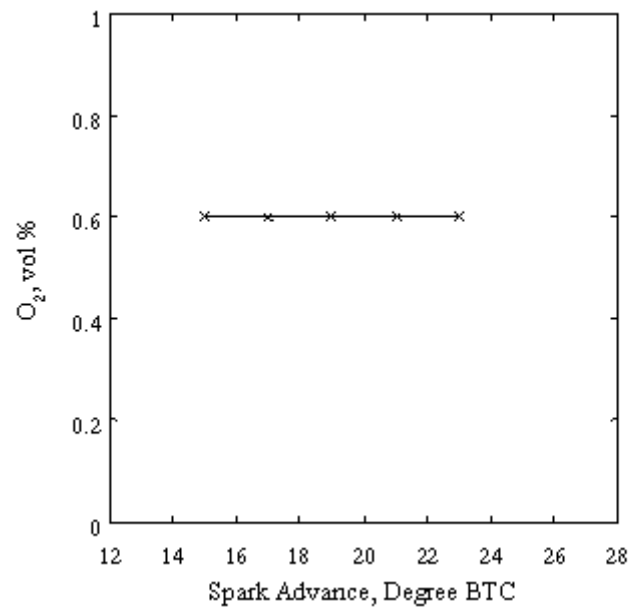
จากภาพที่ 74 ถึง 77 แสดงให้เห็นว่า การเปลี่ยนแปลงจังหวะการจุดระเบิดมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์น้อยมาก โดยทุกอัตราเร็ว คาร์บอนไดออกไซด์ที่วัดได้อยู่ในระดับประมาณร้อยละ 12.2 โดยโมล เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงสัมพันธ์ โดยคาร์บอนไดออกไซด์จะมีปริมาณสูงสุดเมื่ออัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงสัมพันธ์เท่ากับ 1 เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ทำให้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนและออกซิเจนทำปฏิกิริยากันหมดกลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำได้อย่างสมบูรณ์ เมื่อส่วนผสมหนาขึ้นความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์จะลดลง เนื่องจากปริมาณของออกซิเจนในอากาศน้อยลง ทำให้ออกซิเจนไม่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาออกซิไดส์กับคาร์บอนให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ได้อย่างสมบูรณ์ และเมื่อส่วนผสมบางลงความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ก็จะลดลงเช่นกัน เนื่องจากปริมาณเชื้อเพลิงลดลงทำให้คาร์บอนที่จะทำปฏิกิริยาออกซิไดส์กับออกซิเจนในอากาศน้อยลง ส่งผลให้ออกซิเจนเหลือจากการเผาไหม้เพิ่มมากขึ้น (Heywood, 1988)

3.5 ผลของจังหวะการจุดระเบิดต่อการเกิดออกซิเจน (O_2)

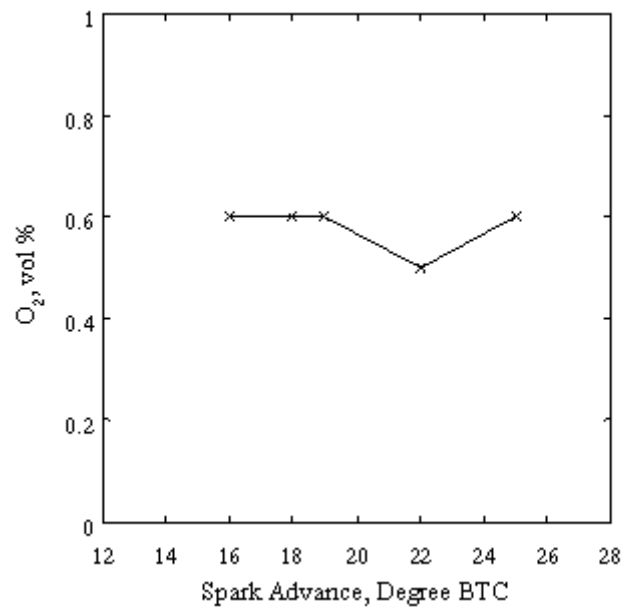
จากภาพที่ 78 ถึง 81 แสดงให้เห็นว่า การเปลี่ยนแปลงจังหวะการจุดระเบิดมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของออกซิเจนน้อยมาก โดยทุกอัตราเร็ว ออกซิเจนที่วัดได้อยู่ในระดับประมาณร้อยละ 0.6 โดยโมล เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณของออกซิเจนจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง โดยออกซิเจนจะมีปริมาณลดลงเมื่อส่วนผสมหนาขึ้น เนื่องจากปริมาณของออกซิเจนในอากาศน้อยลง ทำให้ออกซิเจนไม่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาออกซิไดส์กับคาร์บอนให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ได้อย่างสมบูรณ์ และเมื่อส่วนผสมบางลงความเข้มข้นของออกซิเจนจะเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากปริมาณเชื้อเพลิงลดลงทำให้คาร์บอนที่จะทำปฏิกิริยาออกซิไดส์กับออกซิเจนในอากาศน้อยลง ส่งผลให้ออกซิเจนเหลือจากการเผาไหม้เพิ่มมากขึ้น (Heywood, 1988)



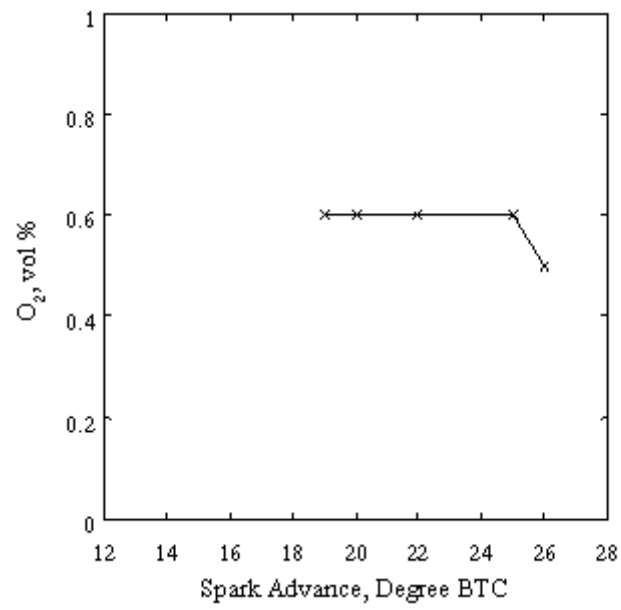
ภาพที่ 78 ความเข้มข้นของออกซิเจนกับจังหวะการจุดระเบิดที่อัตราเร็ว 1,800 รอบต่อนาที



ภาพที่ 79 ความเข้มข้นของออกซิเจนกับจังหวะการจุดระเบิดที่อัตราเร็ว 2,000 รอบต่อนาที



ภาพที่ 80 ความเข้มข้นของออกซิเจนกับจังหวะการจุดระเบิดที่อัตราเร็ว 2,200 รอบต่อนาที



ภาพที่ 81 ความเข้มข้นของออกซิเจนกับจังหวะการจุดระเบิดที่อัตราเร็ว 2,400 รอบต่อนาที

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของจังหวัดการจุดระเบิดต่อสมรรถนะ อุณหภูมิและมลพิษไอเสีย ของเครื่องยนต์ดีเซล รุ่น Mitsubishi 6D16-0A นำไอดีเข้าโดยธรรมชาติ ที่ดัดแปลงเป็นเครื่องยนต์ก๊าซธรรมชาติ โดยใช้ก๊าซธรรมชาติสำหรับยานยนต์ในประเทศไทย ทดสอบเมื่อเปิดลิ้นเร่งเต็มที่ อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงสัมพัทธ์ 1.00 และอัตราเร็ว 1,800 ถึง 2,400 รอบต่อนาที สรุปได้ดังนี้

1. จังหวัดการจุดระเบิดที่ให้แรงบิดเบรกสูงสุดที่อัตราเร็ว 1,800 2,000 2,200 และ 2,400 รอบต่อนาที คือ 15 17 19 และ 22 องศาอนศูนย์ตายนบน ตามลำดับ โดยให้ค่าแรงบิดเบรกสูงสุดเท่ากับ 463.14 458.34 443.92 และ 434.32 N.m ตามลำดับ ค่าอุณหภูมิไอเสียเท่ากับ 686 699 711 และ 711 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์เท่ากับ 882 1,428 1,503 และ 1,583 ppm ตามลำดับ และความเข้มข้นของไฮโดรคาร์บอนเท่ากับ 43 25 23 และ 23 ppmC₃ ตามลำดับ
2. การตั้งจังหวัดการจุดระเบิดที่ต่ำกว่าจังหวัดแรงบิดเบรกสูงสุด 3 และ 5 องศา ทำให้แรงบิดเบรกลดลงเฉลี่ยร้อยละ 1.5 และ 2.4 อุณหภูมิไอเสียสูงขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 1.4 และ 1.7 ความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์ลดลงเฉลี่ยร้อยละ 4.5 และ 6.1 และความเข้มข้นของไฮโดรคาร์บอนลดลงเฉลี่ยร้อยละ 16.1 และ 25.8 ตามลำดับ
3. การตั้งจังหวัดการจุดระเบิดที่ล่วงหน้ามากกว่าจังหวัดแรงบิดเบรกสูงสุด 3 และ 5 องศา ทำให้แรงบิดเบรกลดลงเฉลี่ยร้อยละ 1.2 และ 2.2 อุณหภูมิไอเสียลดลงเฉลี่ยร้อยละ 0.8 และ 1.2 ความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์เพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 9.5 และ 15.2 และความเข้มข้นของไฮโดรคาร์บอนเพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 26.3 และ 36.5 ตามลำดับ
4. การเปลี่ยนแปลงจังหวัดการจุดระเบิดมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และออกซิเจนน้อยมาก โดยทุกอัตราเร็วมีค่าประมาณร้อยละ 0.55 12.2 และ 0.6 โดยโมล ตามลำดับ

5. งานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการปรับแต่งจังหวะการจุดระเบิดไม่เฉพาะแต่กับเครื่องยนต์ Mitsubishi 6D16-0A ที่ดัดแปลงเป็นเครื่องยนต์ก๊าซธรรมชาติเท่านั้น ใ้มีสมรรถนะสูงสุด โดยอุณหภูมิไอเสียไม่สูงเกินไปได้เป็นอย่างดี แต่ยังสามารถใช้เป็นแนวทางสำหรับเครื่องยนต์รุ่นอื่นที่มีคุณลักษณะคล้ายกันได้อีกด้วย นอกจากนี้ยังสามารถแสดงแนวโน้มการเกิดมลพิษในไอเสีย เพื่อใช้เป็นแนวทางในการควบคุมสำหรับการดัดแปลงเครื่องยนต์ในลักษณะนี้

ข้อเสนอแนะ

1. งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะหาจังหวะการจุดระเบิดที่เหมาะสมที่ทำให้เครื่องยนต์ทดสอบมีแรงบิดเบรกสูงสุด อุณหภูมิไอเสียไม่สูงเกินไป และมีความเข้มข้นของมลพิษไอเสียน้อยที่สุด แต่ในบางครั้งการตั้งจังหวะการจุดระเบิดในจังหวะแรงบิดเบรกสูงสุด อาจทำให้มลพิษไอเสีย โดยเฉพาะไนตริกออกไซด์ และไฮโดรคาร์บอนมีระดับความเข้มข้นที่สูง การตั้งจังหวะการจุดระเบิดให้ล่าช้ากว่าจังหวะแรงบิดเบรกสูงสุดจะทำให้อุณหภูมิสูงสุดของก๊าซที่เผาไหม้แล้วลดลง เป็นผลให้ความเข้มข้นของไนตริกออกไซด์ลดลง นอกจากนี้แล้วการตั้งจังหวะการจุดระเบิดให้ล่าช้ากว่าจังหวะแรงบิดเบรกสูงสุดยังทำให้อุณหภูมิไอเสียเพิ่มขึ้น เป็นผลให้ความเข้มข้นของไฮโดรคาร์บอนลดลง แต่จะทำให้แรงบิดเบรกลดลง ดังนั้นการตั้งจังหวะการจุดระเบิดที่เหมาะสมที่สุด ควรที่จะตั้งให้ล่าช้ากว่าจังหวะแรงบิดเบรกสูงสุด เพื่อลดความเข้มข้นของไนตริกออกไซด์ และไฮโดรคาร์บอน โดยช่วงที่เหมาะสมคือช่วงที่อัตราการลดลงของแรงบิดเบรกจะต้องไม่มากกว่าอัตราการลดลงของไนตริกออกไซด์ หรือไฮโดรคาร์บอนอย่างใดอย่างหนึ่ง และช่วงดังกล่าวจะต้องไม่ทำให้อุณหภูมิไอเสียสูงเกินไปจนเครื่องยนต์ได้รับความเสียหาย

จากผลการทดสอบพบว่าจังหวะการจุดระเบิดที่เหมาะสมที่สุดที่อัตราเร็ว 1,800 และ 2,000 รอบต่อนาที คือ ต้องตั้งจังหวะการจุดระเบิดล่าช้ากว่าจังหวะแรงบิดเบรกสูงสุดจาก 15 และ 17 องศา ก่อนศูนย์ตายบนเป็น 10 และ 12 องศา ก่อนศูนย์ตายบน ซึ่งทำให้แรงบิดเบรกลดลงจากจังหวะแรงบิดเบรกสูงสุด ร้อยละ 2.5 และ 2.7 ความเข้มข้นของไนตริกออกไซด์ลดลง ร้อยละ 6.7 และ 5.0 ความเข้มข้นของไฮโดรคาร์บอนลดลง ร้อยละ 13.9 และ 24.0 และอุณหภูมิไอเสียเท่ากับ 691 และ 716 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

ส่วนที่อัตราเร็ว 2,200 และ 2,400 รอบต่อนาที เมื่อตั้งจังหวะการจุดระเบิดล่าช้ากว่าจังหวะแรงบิดเบรกสูงสุด 1 องศา จะทำให้แรงบิดเบรกลดลงจากจังหวะแรงบิดเบรกสูงสุด ร้อยละ 0.4 และ 1.1 ความเข้มข้นของไนตริกออกไซด์ลดลง ร้อยละ 0.3 และ 0.8 ความเข้มข้นของ

ไฮโดรคาร์บอนลดลง ร้อยละ 0 และ 17.4 และอุณหภูมิไอเสียเท่ากับ 716 และ 711 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่าอัตราการลดลงของแรงบิดเบรกมากกว่าอัตราการลดลงของความเข้มข้นของไนตริก ออกไซด์ ดังนั้น จังหวะการจุดระเบิดที่เหมาะสมที่สุด คือ จังหวะแรงบิดเบรกสูงสุด (19 และ 22 องศา ก่อนศูนย์ตายบน ตามลำดับ)

2. สำหรับการหาค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงสัมพัทธ์ของการทดสอบครั้งนี้ ได้มาจากการคำนวณค่าความเข้มข้นของมลพิษไอเสียที่วัดได้ ซึ่งอาจมีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงได้ หากเครื่องมือวัดปริมาณไอเสียวัดค่าไม่ถูกต้อง ดังนั้น เพื่อให้มั่นใจว่าค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงสัมพัทธ์ที่วัดได้จากเครื่องมือวัดดังกล่าวมีความถูกต้อง ควรที่จะวัดอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ บริเวณท่อไอดี และอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงบริเวณท่อก๊าซความดันต่ำด้วย เพื่อเปรียบเทียบความถูกต้องของเครื่องมือวัด แต่เนื่องจากการทดสอบครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงจังหวะการจุดระเบิดที่มีต่อสมรรถนะ อุณหภูมิ และการปล่อยมลพิษไอเสียเท่านั้น ไม่ได้ทดสอบเพื่อหาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงสัมพัทธ์ต่อค่าดังกล่าว จึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องมีความแม่นยำสำหรับการวัดค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงสัมพัทธ์ แต่ในขณะที่ทดสอบต้องพยายามรักษาค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงสัมพัทธ์ที่วัดได้ให้คงที่ตลอดเวลา ซึ่งในการทดสอบครั้งนี้ใช้จะใช้ค่าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดเท่ากับ 1

3. เนื่องจากผู้ประกอบการบางรายอาจมีข้อจำกัดในเรื่องค่าใช้จ่ายในการดัดแปลงเครื่องยนต์ และติดตั้งชุดอุปกรณ์ก๊าซธรรมชาติ ทำให้การทดสอบเครื่องยนต์เพื่อหาจังหวะการจุดระเบิดที่เหมาะสมตามวิธีการของงานวิจัยนี้ไม่สามารถทำได้ ดังนั้น จึงมีข้อเสนอแนะสำหรับการทดสอบเครื่องยนต์ดีเซลดัดแปลงให้ใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงเพื่อหาจังหวะการจุดระเบิดที่เหมาะสมอย่างง่ายไว้ในภาคผนวก ก

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

สมศักดิ์ เพ็ชรกุล, พงศ์ศักดิ์ คำมูล และ จินดา เจริญพรพาณิชย์. 2546. อิทธิพลของจังหวะเปิดวาล์ว
ไอเสียต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์ก๊าซธรรมชาติแบบหัวฉีด, น. 1-6. ใน รายงานการประชุม
วิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 19. ภูเก็ต.

รัศมีต ฐิติพัฒน์พงศ์, สุรเดช ดวงภูมิเมศ, ปณิธิ ศิริอักษร และ มนต์รี ชาติพจน์. 2550.
การปรับปรุงสมรรถนะของรถยนต์ที่ใช้ก๊าซธรรมชาติอัดเป็นเชื้อเพลิงทางเลือก
โดยการปรับปรุงจังหวะการจุดระเบิด, น. 1-5. ใน รายงานการประชุมวิชาการเครือข่าย
พลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ.

ส่วนบริการลูกค้าก๊าซ ฝ่ายระบบท่อจัดจำหน่ายก๊าซธรรมชาติ บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน). 2552.
Onshore Pipeline Gas Qualities.

Denso International (Thailand) CO., LTD. 2009. **Iridium Power.** Denso Spark Plugs.
Available Source: http://www.densoplugs.co.th/denso_spark_iridium.htm, January
10, 2009.

Fanhua Ma, Haiquan Liu, Yu Wang, Yong Li, Junjun Wang and Shuli Zhao. 2008. Combustion
and emission characteristics of a port-injection HCNG engine under various ignition
timings. **Hydrogen Energy** 33: 816-822.

John, B.H. 1998. **Internal Combustion Engine Fundamentals.** McGraw-Hill, Inc.,
Singapore.

Karim, G.A., I. Wierzba and Y. Al-Alousi. 1996. Methane-hydrogen mixture as fuel.
Hydrogen Energy 7: 625-631.

Pulkrabek, W.W. 2003. **Engineering Fundamentals of The Internal Combustions Engine.**
Pearson Education Indochina Ltd., New Jersey.

Kishore, V.R., D. Nipun, M.R. Ravi and R. Anjan. 2008. Measurement of adiabatic burning velocity in natural gas-like mixtures. **Experimental Thermal and Fluid Science** 33: 10-16.

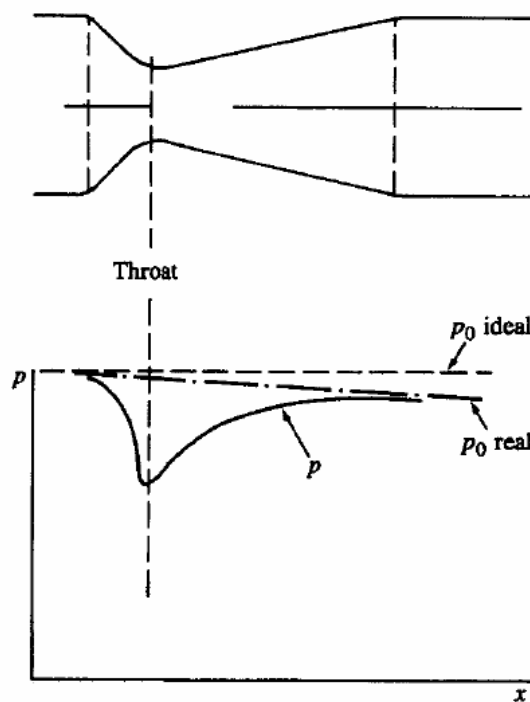
Predo Mello, Giovani Pelliza, Renato Cataluna and Rosangela Da Silva. 2006. Evaluation of the maximum horsepower of vehicles converted for use with natural gas fuel. **Fuel** 85: 2180-2186.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
การคำนวณ

การคำนวณ

1. การคำนวณหาขนาดคอคออดมิกเซอร์ของเครื่องยนต์ก๊าซธรรมชาติ



ภาพผนวกที่ ก1 การกระจายความดันสำหรับการไหลของก๊าซผ่านช่องจำกัด

ที่มา: Heywood (1988)

เมื่อพิจารณาการไหลของก๊าซอุดมคติที่มีค่าความร้อนจำเพาะคงตัวผ่านช่องทางในภาพผนวกที่ ก1 อุณหภูมิและความดันที่สภาวะนิ่ง T_0 และ p_0 จะมีความสัมพันธ์กับสภาวะที่ตำแหน่งอื่นภายในช่องทางการไหลในรูปสมการพลังงานของการไหลคงตัว คือ

$$T_0 = T + \frac{V^2}{2c_p} \quad (ก1)$$

และความสัมพันธ์แบบไอเซนทรอปิก คือ

$$\frac{T}{T_0} = \left(\frac{p}{p_0} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \quad (ก2)$$

เนื่องจากความเร็วเสียง (กำหนดให้เป็น a) มีความสัมพันธ์กับค่า T และ γ ($a = \sqrt{\gamma RT}$) และเลขมัค (Mach Number, M) มีความสัมพันธ์กับความเร็วเสียง ($M = V/a$) ดังนั้นอุณหภูมิและความดันที่สถานะนิ่ง T_0 และ p_0 สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์กับสถานะที่ตำแหน่งอื่นให้อยู่ในรูปเลขมัค ได้ดังนี้

$$\frac{T}{T_0} = 1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \quad (ก3)$$

$$\frac{p}{p_0} = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \right)^{\gamma/(\gamma-1)} \quad (ก4)$$

จากอัตราการไหลของมวล (\dot{m}) คือ

$$\dot{m} = \rho AV$$

กับกฎของก๊าซอุดมคติ และความสัมพันธ์ของ p และ T ข้างต้น สามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{\dot{m}_{\text{ideal}} \sqrt{\gamma RT_0}}{Ap_0} = \gamma M \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \right)^{-(\gamma+1)/[2(\gamma-1)]} \quad (ก5)$$

หรือ

$$\frac{\dot{m}_{\text{ideal}} \sqrt{\gamma RT_0}}{Ap_0} = \gamma \left(\frac{p}{p_0} \right)^{1/\gamma} \left\{ \frac{2}{\gamma-1} \left[1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right] \right\}^{1/2} \quad (ก6)$$

สำหรับค่า T_0 และ p_0 ที่กำหนดให้ค่าหนึ่งๆ การไหลของมวลสูงสุดเกิดขึ้นเมื่อความเร็วที่พื้นที่น้อยที่สุด (คือ คอคอด) เท่ากับความเร็วของเสียง สถานะนี้เรียกว่าการไหลโซ้ก (Choked Flow) หรือการไหลวิกฤติ (Critical Flow) เมื่อเกิดการไหลโซ้ก ความดันที่คอคอด (p_T) จะสัมพันธ์กับความดันในสถานะนิ่ง (p_0) ดังต่อไปนี้

$$\frac{p_T}{p_0} = \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\gamma/(\gamma-1)} \quad (ก7)$$

อัตราส่วนนี้เรียกว่าอัตราส่วนความดันวิกฤติ โดยจะมีค่าเท่ากับ 0.528 เมื่อ $\gamma=1.4$ และเท่ากับ 0.546 เมื่อ $\gamma=1.3$

สำหรับการไหลของก๊าซจริงก็จะหาโดยใช้สัมประสิทธิ์ที่อัตราการไหลก็จะหาโดยใช้สัมประสิทธิ์อัตราการไหล ดังนั้น สำหรับการไหลที่ต่ำกว่าการไหลวิกฤต อัตราการไหลของมวลจริงก็สามารถเขียนในพจน์ของสภาวะที่พื้นที่น้อยสุดหรือคอขวดได้เป็น

$$\dot{m}_{\text{real}} = \frac{C_D A_T p_0}{\sqrt{RT_0}} \left(\frac{p_T}{p_0} \right)^{1/\gamma} \left\{ \frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[1 - \left(\frac{p_T}{p_0} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right] \right\}^{1/2} \quad (ก8)$$

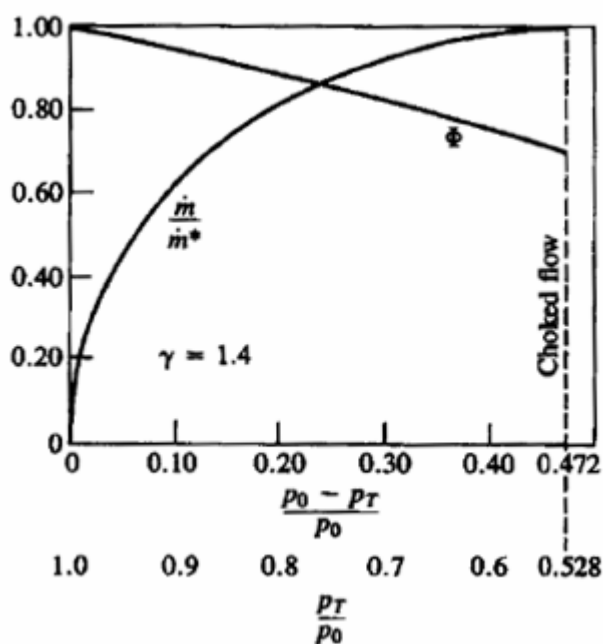
สำหรับการไหลวิกฤต สมการ (ก8) จะได้เป็น

$$\dot{m}_{\text{real}} = C_D A_R [2\rho_0(p_0 - p_T)]^{1/2} \Phi \quad (ก9)$$

เมื่อ A_R คือ พื้นที่หน้าตัดของคอขวดที่น้อยที่สุด

Φ คือ ฟังก์ชันการยุบตัว ถูกกำหนดโดย

$$\Phi = \left[\frac{\left(\frac{\gamma}{\gamma-1} \right) \left\{ \left(\frac{p_T}{p_0} \right)^{2/\gamma} - \left(\frac{p_T}{p_0} \right)^{(\gamma+1)/\gamma} \right\}}{1 - \frac{p_T}{p_0}} \right]^{1/2} \quad (ก10)$$



ภาพผนวกที่ ก2 อัตราส่วนของอัตราการไหลของมวล \dot{m} / \dot{m}^* และฟังก์ชันการไหลแบบยุบตัว Φ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของอัตราส่วนความดันที่ช่องทางจำกัดของก๊าซอุดมคติที่มี $\gamma = 1.4$

ที่มา: Heywood (1988)

ภาพผนวกที่ ก2 แสดงการเปลี่ยนแปลงของ Φ และ $(\dot{m} / \dot{m}^*)_{\text{ideal}}$ กับ $(p_0 - p_T) / p_0$ โดย \dot{m}^* เป็นอัตราการไหลของมวลผ่านช่องจำกัดภายใต้สภาวะการไหลวิกฤต (เมื่อเลขมัคที่คอคอดเท่ากับ 1) จากภาพจะเห็นได้ว่าในช่วงการไหลวิกฤตค่า Φ จะมีค่าประมาณ 0.7

สำหรับเครื่องยนต์ที่ใช้ในการทดสอบ มีขนาดความจุกระบอกสูบ $7,545 \text{ cm}^3$ ความเร็วสูงสุด 2,900 รอบต่อนาที จะมีอัตราการไหลของอากาศเป็น

$$(\dot{m}_a)_{\text{max}} = \eta_v \rho_a V_d N / n \quad (ก11)$$

กำหนดให้ $\eta_v = 0.8$ ดังนั้นจะได้

$$\begin{aligned}
 (\dot{m}_a)_{\max} &= 0.8 \left(1.184 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \left(\frac{7,545 \text{ m}^3}{10^6 \text{ cycle}} \right) \left(\frac{2,900 \text{ rev}}{60 \text{ sec}} \right) \left(\frac{1 \text{ cycle}}{2 \text{ rev}} \right) \\
 &= 0.1727 \frac{\text{kg}}{\text{s}}
 \end{aligned}$$

กำหนดให้ $C_D = 0.9$ และ $p_0 = 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$ ดังนั้น p_T ที่ความดันวิกฤต คือ

$$p_T = 0.528(1.01325 \times 10^5) = 5.34996 \times 10^4 \text{ Pa}$$

แทนค่า $(\dot{m}_a)_{\max}$, C_D , p_0 , p_T , ρ_0 และ Φ ลงในสมการที่ (ก9)

$$0.1727 = 0.9 A_R \left(2 \times 1.184 (1.01325 - 0.534996) \times 10^5 \right)^{1/2} \quad (0.7)$$

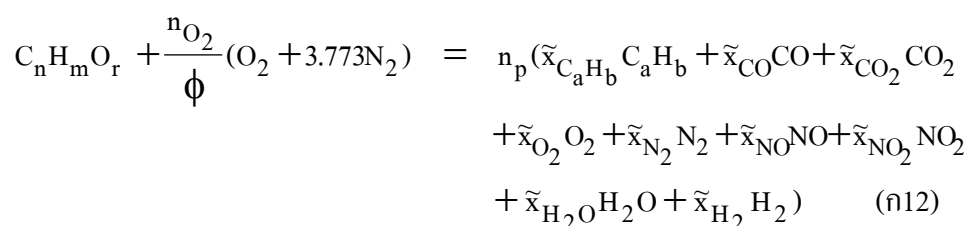
$$A_R = 0.000814576 \text{ m}^2 = 8.14576 \text{ cm}^2$$

ดังนั้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กสุดของคอคอด คือ

$$d_R = \sqrt{\frac{4A_R}{\pi}} = \sqrt{\frac{4(8.14576)}{\pi}} = 3.22 \text{ cm}$$

2. การคำนวณหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงสัมพัทธ์จากส่วนประกอบไอเสียของก๊าซธรรมชาติ

ปฏิกิริยาการเผาไหม้จริงของเชื้อเพลิงที่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ได้แก่



โดย ϕ เป็นอัตราส่วนสมมูลที่วัดได้หรือที่เป็นจริง
 n_{O_2} เป็นจำนวน โมเลกุลของออกซิเจนที่จำเป็นสำหรับการเผาไหม้สมบูรณ์
 เท่ากับ $n + \frac{m}{4} - \frac{r}{2}$
 n_p เป็นจำนวน โมลทั้งหมดของผลที่เกิดจากการเผาไหม้
 \tilde{x}_i เป็นเศษส่วน โมลของสาร i

ตามปกติแล้วจะมีการวัดความเข้มข้นของ CO_2 CO O_2 เป็นเศษส่วน โมล และไฮโดรคาร์บอนที่ยังไม่เผาไหม้วัดเป็นเศษส่วน โมล หรือความเข้มข้นของคาร์บอน (ppm C_3) ส่วน NO_x ส่วนใหญ่จะเป็นไนตริกออกไซด์ (NO) (อนุโลมให้ใช้ NO ได้) และความเข้มข้นโดยทั่วไปจะน้อย (น้อยกว่าร้อยละ 0.5) จนมีผลต่อการหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงสัมพัทธ์น้อยมาก จากสมการ (ก12) จะได้สมดุลอะตอมของคาร์บอน และไฮโดรเจน คือ

$$n = n_p (a\tilde{x}_{C_aH_b} + \tilde{x}_{CO} + \tilde{x}_{CO_2}) \quad (ก13)$$

$$m = n_p (b\tilde{x}_{C_aH_b} + 2\tilde{x}_{H_2O} + 2\tilde{x}_{H_2}) \quad (ก14)$$

ในปฏิกิริยาการเผาไหม้จะมีปฏิกิริยาก้ำขึ้นเกิดขึ้นในสารที่ได้จากการเผาไหม้ โดยเฉพาะส่วนผสมหนา คือ



โดยค่าคงตัวสมดุลที่หาจากความดันย่อยก็จะเขียนได้เป็น

$$K_p = \frac{\tilde{x}_{CO}\tilde{x}_{H_2O}}{\tilde{x}_{CO_2}\tilde{x}_{H_2}} \quad (ก16)$$

นำสมการ (ก14) ÷ (ก13) จะได้

$$\frac{m}{n} = \frac{b\tilde{x}_{C_aH_b} + 2\tilde{x}_{H_2O} + 2\tilde{x}_{H_2}}{a\tilde{x}_{C_aH_b} + \tilde{x}_{CO} + \tilde{x}_{CO_2}} \quad (ก17)$$

เนื่องจาก $\frac{m}{n} = \frac{b}{a} = y$ ดังนั้นจะได้ $a = \frac{b}{y}$

แทนค่า $\frac{m}{n} = y$ และ $a = \frac{b}{y}$ ลงในสมการ (ก17) จะได้

$$b\tilde{x}_{C_aH_b} + y\tilde{x}_{CO} + y\tilde{x}_{CO_2} = b\tilde{x}_{C_aH_b} + 2\tilde{x}_{H_2O} + 2\tilde{x}_{H_2}$$

$$y\tilde{x}_{CO} + y\tilde{x}_{CO_2} = 2\tilde{x}_{H_2O} + 2\tilde{x}_{H_2} \quad (ก18)$$

แทนค่า \tilde{x}_{H_2} จากสมการ (ก16) ลงในสมการ (ก18) จะได้

$$y\tilde{x}_{CO} + y\tilde{x}_{CO_2} = 2\tilde{x}_{H_2O} + 2\frac{\tilde{x}_{CO}\tilde{x}_{H_2O}}{K_p\tilde{x}_{CO_2}}$$

แก้สมการหาค่า \tilde{x}_{H_2O} จะได้

$$\tilde{x}_{H_2O} = \frac{y}{2}K_p \frac{(\tilde{x}_{CO} + \tilde{x}_{CO_2})}{(K_p + \frac{\tilde{x}_{CO}}{\tilde{x}_{CO_2}})}$$

ถ้าคิดเป็นความเข้มข้นโดยโมลจะได้

$$H_2O = \frac{y}{2}K_p \frac{(CO) + (CO_2)}{K_p + \frac{(CO)}{(CO_2)}} \quad (ก19)$$

โดย () เป็นความเข้มข้นโดยโมล และ K_p เป็นค่าคงตัวสมดุลของปฏิกิริยาก๊าซน้ำ จากสมการ (ก12) ถ้าส่วนประกอบไอเสียทั้งหมดถูกวัดบนฐานความชื้นเดียวกัน (เปียกแห้ง หรือแห้งบางส่วน) และสมมติให้ไฮโดรคาร์บอนที่ยังไม่เผาไหม้มีอัตราส่วน C/H เหมือนกับเชื้อเพลิง จะได้อัตราส่วนอากาศ/เชื้อเพลิงจากอัตราส่วนของสารที่มีออกซิเจน (ที่วัดและคำนวณได้) ต่อสารที่มีคาร์บอน (ที่วัดได้) เป็น

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{\text{actual}} = 4.773 \left(\frac{M_{\text{air}}}{M_f}\right) \frac{(\text{CO}_2) + \frac{(\text{CO})}{2} + \frac{(\text{H}_2\text{O})}{2} + \frac{(\text{NO})}{2} + (\text{NO}_2) + (\text{O}_2)}{(\text{HC}) + (\text{CO}) + (\text{CO}_2)} \quad (\text{ก20})$$

เนื่องจากออกไซด์ของไนโตรเจนมีค่าน้อยมาก (น้อยกว่าร้อยละ 0.5) จึงสามารถตัดทิ้งได้ ดังนั้น สมการที่ (ก20) จะได้

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{\text{actual}} = 4.773 \left(\frac{M_{\text{air}}}{M_f}\right) \frac{(\text{CO}_2) + \frac{(\text{CO})}{2} + \frac{(\text{H}_2\text{O})}{2} + (\text{O}_2)}{(\text{HC}) + (\text{CO}) + (\text{CO}_2)} \quad (\text{ก21})$$

โดย $M_{\text{air}} = 28.96$ $M_f = 12.01 + 1.008y$ และ (HC) เป็นร้อยละโดยโมลของไฮโดรคาร์บอนที่ยังไม่เผาไหม้ โดยพิจารณาเฉพาะคาร์บอนอะตอม (C_3)

แทนค่า (H_2O) ลงในสมการ (ก21) จะได้

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{\text{actual}} = 4.773 \left(\frac{M_{\text{air}}}{M_f}\right) \frac{(\text{CO}_2) + \frac{(\text{CO})}{2} + \frac{yK_p}{4} \frac{((\text{CO}) + (\text{CO}_2))}{\left(K_p + \frac{(\text{CO})}{(\text{CO}_2)}\right)} + (\text{O}_2)}{(\text{HC}) + (\text{CO}) + (\text{CO}_2)} \quad (\text{ก22})$$

ค่าอัตราส่วนอากาศ/เชื้อเพลิง ทางทฤษฎีคำนวณได้จาก

$$\left(\frac{A}{F}\right)_s = 4.773 \left(\frac{M_{\text{air}}}{M_f}\right) \left(1 + \frac{y}{4}\right) \quad (\text{ก23})$$

ดังนั้น อัตราส่วนอากาศ/เชื้อเพลิงสัมพัทธ์ คือ สมการ (ก22) ÷ (ก23)

$$\lambda = \frac{(\text{CO}_2) + \frac{(\text{CO})}{2} + (\text{O}_2) + \frac{yK_p}{4} \left(\frac{(\text{CO}) + (\text{CO}_2)}{K_p + \frac{(\text{CO})}{(\text{CO}_2)}}\right)}{\left(1 + \frac{y}{4}\right) \left((\text{CO}) + (\text{CO}_2) + (\text{HC})\right)} \quad (\text{ก24})$$

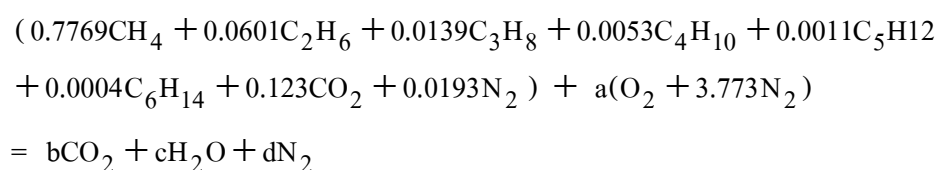
ก๊าซธรรมชาติที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ได้มาจากอ่าวไทยฝั่งตะวันออก มีส่วนประกอบ ร้อยละโดยโมลโดยประมาณดังนี้ มีเทน 77.69-73.45 อีเทน 6.01-5.95 โพรเพน 1.39-2.21 ไอโซบิวเทน 0.28-0.44 นอร์มัลบิวเทน 0.25-0.36 ไอโซเพนเทน 0.07-0.08 นอร์มัลเพนเทน 0.04 เฮกเซน 0.04-0.06 คาร์บอนไดออกไซด์ 12.30-15.44 และไนโตรเจน 1.93-2.02 (ส่วนบริการลูกค้า ก๊าซ ฝ่ายระบบท่อจัดจำหน่ายก๊าซธรรมชาติ บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน), 2552)

ในที่นี้จะใช้ส่วนประกอบของก๊าซธรรมชาติร้อยละโดยโมลโดยประมาณดังนี้ มีเทน 77.69 อีเทน 6.01 โพรเพน 1.39 ไอโซบิวเทน 0.28 นอร์มัลบิวเทน 0.25 ไอโซเพนเทน 0.07 นอร์มัลเพนเทน 0.04 เฮกเซน 0.04 คาร์บอนไดออกไซด์ 12.30 และไนโตรเจน 1.93

จะเห็นได้ว่า ก๊าซธรรมชาติดังกล่าวมีสารประกอบที่ไม่ใช่ไฮโดรคาร์บอนรวมอยู่ด้วยได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ และไนโตรเจน ซึ่งไม่ทำปฏิกิริยาการเผาไหม้กับอากาศ ดังนั้นเมื่อเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ คาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นหลังการเผาไหม้จึงได้มาจาก ส่วนที่เชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอน ทำปฏิกิริยากับออกซิเจน กับส่วนที่ปนมากับก๊าซธรรมชาติ ส่วนไนโตรเจนประกอบไปด้วยส่วนที่อยู่ในอากาศ กับส่วนที่ปนมากับก๊าซธรรมชาติ

จากสมการที่ (ก24) ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์จะคิดเฉพาะส่วนที่เป็นเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเท่านั้น ดังนั้น เมื่อนำสมการนี้มาใช้กับก๊าซธรรมชาติจากอ่าวไทยฝั่งตะวันออก จะต้องนำคาร์บอนไดออกไซด์ที่วัดได้จากเครื่องมือวัดไอเสียลบด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปนมากับก๊าซธรรมชาติ

การทดลองครั้งนี้จะให้เครื่องยนต์ทำงานที่ค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงสัมพันธ์เท่ากับ 1 ดังนั้น ปฏิกิริยาการเผาไหม้ของก๊าซธรรมชาติกับอากาศจึงเป็นการเผาไหม้แบบสมบูรณ์ ดังนี้



สมดุล C

$$\begin{aligned} 0.7769 + 0.0601(2) + 0.0139(3) + 0.0053(4) + 0.0011(5) + 0.0004(6) + 0.123 &= b \\ b &= 1.0909 \end{aligned}$$

สมดุล H

$$\begin{aligned} 0.7769(2) + 0.0601(3) + 0.0139(4) + 0.0053(5) + 0.0011(6) + 0.0004(7) &= c \\ c &= 1.8256 \end{aligned}$$

สมดุล O₂

$$\begin{aligned} a + 0.123 &= 1.0909 + \frac{1.8256}{2} \\ a &= 1.8807 \end{aligned}$$

สมดุล N_2

$$0.0193 + 3.773(1.8807) = d$$

$$d = 7.11518$$

ดังนั้น สมการการเผาไหม้แบบสมบูรณ์ คือ

$$\begin{aligned} & (0.7769CH_4 + 0.0601C_2H_6 + 0.0139C_3H_8 + 0.0053C_4H_{10} + 0.0011C_5H_{12} \\ & + 0.0004C_6H_{14} + 0.123CO_2 + 0.0193N_2) + 1.8807(O_2 + 3.773N_2) \\ & = 1.0909CO_2 + 1.8256H_2O + 7.11518N_2 \end{aligned}$$

จำนวน โมลทั้งหมดของส่วนผสมก่อนเผาไหม้ คือ

$$\begin{aligned} & 0.7769 + 0.0601 + 0.0139 + 0.0053 + 0.0011 + 0.0004 + 0.123 + 0.0193 \\ & + 1.8807(1 + 3.773) = 9.97658 \text{ โมล} \end{aligned}$$

คาร์บอนไดออกไซด์ส่วนเกินคิดเป็นร้อยละ $\frac{0.123(100)}{9.97658} = 1.23$ โดยโมลของส่วนผสม

อากาศต่อเชื้อเพลิง ดังนั้นสมการสำหรับคำนวณหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงสัมพัทธ์ของก๊าซธรรมชาติจากอ่าวไทยฝั่งตะวันออกคือ

$$\lambda = \frac{[(CO_2) - 1.23] + \frac{(CO)}{2} + (O_2) + \frac{yK_p}{4} \left(\frac{(CO) + [(CO_2) - 1.23]}{K_p + \frac{(CO)}{[(CO_2) - 1.23]}} \right)}{\left(1 + \frac{y}{4} \right) \left((CO) + [(CO_2) - 1.23] + (HC) \right)} \quad (ก25)$$

เมื่อ K_p คือ ค่าคงตัวสมดุลของปฏิกิริยาการเผาไหม้ สำหรับการทดลองครั้งนี้กำหนดให้เท่ากับ 3.5

y คือ อัตราส่วนอะตอมของ H ต่อ C

การคำนวณหาอัตราส่วนอะตอมของ H ต่อ C มีวิธีการดังนี้

จำนวนโมลของคาร์บอนทั้งหมด คือ

$$0.7769 + 0.0601(2) + 0.0139(3) + 0.0053(4) + 0.0011(5) + 0.0004(6) = 0.9679$$

จำนวนโมลของไฮโดรเจนทั้งหมดคือ

$$0.7769(4) + 0.0601(6) + 0.0139(8) + 0.0053(10) + 0.0011(12) + 0.0004(14) = 3.6512$$

ดังนั้น อัตราส่วนระหว่างอะตอมของคาร์บอนต่อไฮโดรเจน คือ $\frac{3.6512}{0.9679} = 3.772$

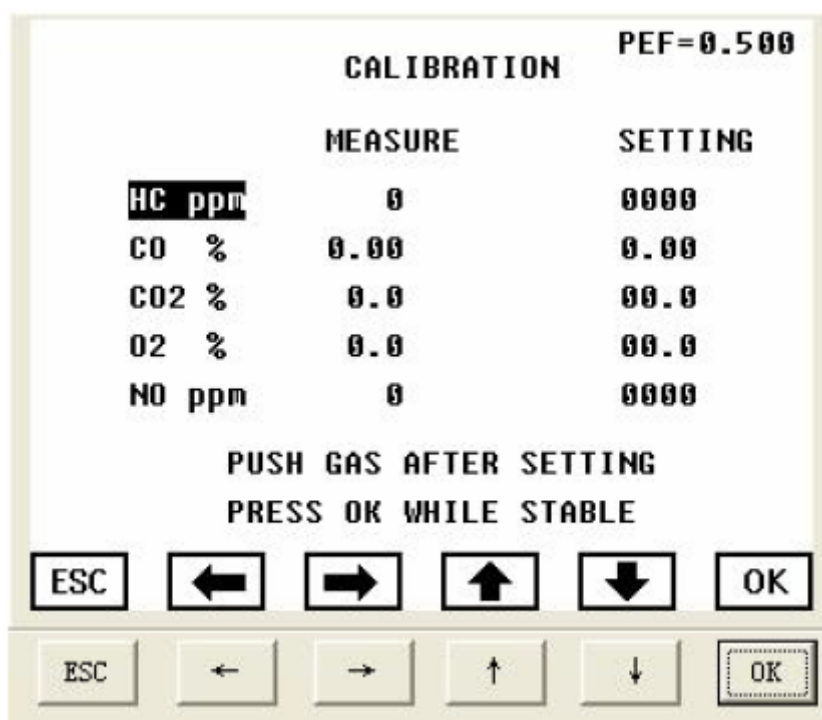
ภาคผนวก ข

การสอบเทียบเครื่องมือวัดปริมาณไอเสีย

การสอบเทียบเครื่องมือวัดปริมาณไอเสีย

เพื่อให้การวัดค่าปริมาณไอเสียแต่ละชนิดมีความแม่นยำมากขึ้น จำเป็นที่จะต้องมีการสอบเทียบ โดยจะปฏิบัติตามคำแนะนำในคู่มือการใช้งานของเครื่องมือชนิดนี้ ขั้นตอนการสอบเทียบมีดังนี้

1. ที่เมนูหลัก เมื่อกดปุ่ม Function Selection Screen และปุ่ม Calibration ตามลำดับ จะปรากฏหน้าต่างขึ้นตามภาพผนวกที่ ข1



ภาพผนวกที่ ข1 หน้าต่างสำหรับการสอบเทียบ

2. ใส่ค่าก๊าซมาตรฐานแต่ละชนิดที่ระบุไว้ข้างขวดลงไปในห้อง SETTING (ค่าที่ใช้สำหรับการวัดครั้งนี้ได้แก่ C₃H₈ 3,200 ppm CO₂ 11.0 vol % CO 3.5 vol % และ NO 3,000 ppm)
3. นำก๊าซมาตรฐานที่อยู่ในขวดบรรจุเข้าไปยังช่องบรรจุก๊าซมาตรฐานของเครื่องมือวัด ดังแสดงในภาพผนวกที่ ข2

4. รอจนกว่าค่าที่วัดได้ในช่อง MEASURE จะคงที่ แล้วกดปุ่ม OK พร้อมกับถอดขวดก๊าซมาตรฐานออก



ภาพผนวกที่ ข2 ขั้นตอนการนำก๊าซมาตรฐานบรรจุเข้าไปยังช่องบรรจุก๊าซมาตรฐาน

ภาคผนวก ค

การทดสอบเครื่องยนต์ดีเซลดัดแปลงให้ใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง
เพื่อหาจังหวะการจุดระเบิดที่เหมาะสมอย่างง่าย

การทดสอบเครื่องยนต์ดีเซลดัดแปลงให้ใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง เพื่อหาจังหวะการจุดระเบิดที่เหมาะสมอย่างง่าย

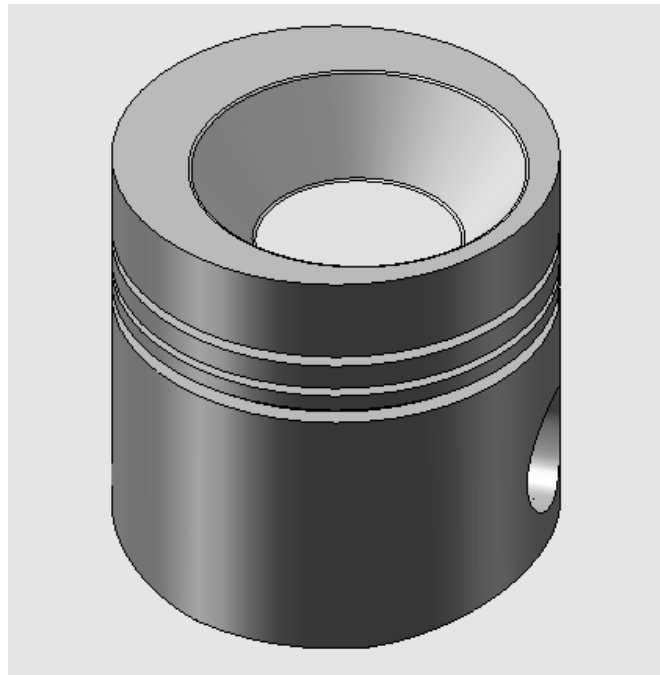
เนื่องจากผู้ประกอบการบางรายอาจมีข้อจำกัดในเรื่องค่าใช้จ่ายในการทดสอบตามวิธีการของงานวิจัยนี้ ดังนั้น จึงมีข้อเสนอแนะสำหรับการทดสอบเครื่องยนต์ดีเซลดัดแปลงให้ใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงอย่างง่าย โดยไม่ต้องถอดเครื่องยนต์ออกจากรถยนต์เพื่อมาทดสอบกับแท่นไดนาโมมิเตอร์ มีรายละเอียดดังนี้

1. เครื่องมือวัดพื้นฐานที่ควรมีได้แก่ ไทมิ่งไลท์ ใช้สำหรับวัดจังหวะการจุดระเบิด และตั้งค่าจังหวะการจุดระเบิดให้ได้ตามต้องการ
2. ควรติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิไอเสียพร้อมจอมอนิเตอร์ เนื่องจากอุณหภูมิไอเสียมีส่วนสำคัญต่อความเสียหายของเครื่องยนต์ กล่าวคือ ถ้าอุณหภูมิไอเสียสูงเกินไปอันมีสาเหตุมาจากการตั้งจังหวะการจุดระเบิดที่ล่าช้าเกินไป จะทำให้เครื่องยนต์ได้รับความเสียหาย
3. ถ้ามีงบประมาณเพียงพอควรติดตั้งน็อกเซนเซอร์ เพื่อป้องกันการน็อกของเครื่องยนต์ในกรณีตั้งจังหวะการจุดระเบิดล่วงหน้ามากเกินไป
4. ชุดจุดระเบิดที่ใช้จะต้องเป็นรุ่นที่สามารถปรับจังหวะการจุดระเบิดให้ล่วงหน้ามากขึ้นเมื่อรอบเครื่องยนต์สูงขึ้น
5. เมื่อมีอุปกรณ์ติดตั้งครบตามข้อ 1 ถึง 4 แล้ว ขั้นตอนต่อไปให้หมุนเครื่องในขณะที่เครื่องยนต์ยังไม่ทำงานให้สับ 1 อยู่ในจังหวะอัดสุด โดยสังเกตจากมาร์คที่ Flywheel ซึ่งเครื่องยนต์ทุกรอบจะมีมาร์คสำหรับบอกว่างสับ 1 อยู่ในจังหวะอัดสุด หรืออาจจะใช้วิธีการขยับกระเดื่องกดวาล์วโดยกระเดื่องกดวาล์วของทั้งไอดี และไอเสียจะต้องขยับได้
6. ขยับสไลด์ไทมิ่ง หรือ จานจ่าย (ขึ้นอยู่กับผู้ติดตั้งจะติดตั้งระบบจุดระเบิดแบบใดก็ได้ แต่ต้องเป็นไปตามข้อ 4.) ให้จุดระเบิดล่วงหน้าก่อนศูนย์ตายบนเล็กน้อย แล้วล็อกให้แน่น

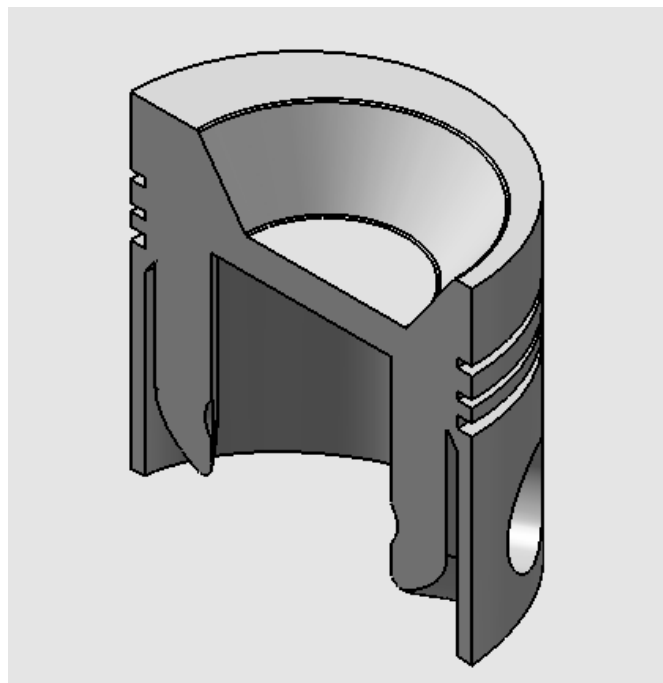
7. สตาร์ทเครื่องยนต์ให้ทำงานที่รอบเดินเบา ใช้ไทมิ่งไลท์วัดและจดบันทึกค่าจังหวะการจุดระเบิดที่รอบเดินเบาไว้ จากนั้นให้ทดลองเหยียบคันเร่งให้สุดแล้วถอนคันเร่งทันที สังเกตอาการเครื่องยนต์ไว้ แล้วดับเครื่องยนต์
8. ขยับสไลด์ไทมิ่ง หรือ จานจ่าย ให้ล่วงหน้าเพิ่มมากขึ้นอีก แล้วล็อกให้แน่นและให้ปฏิบัติเช่นเดียวกับข้อ 7.
9. ปฏิบัติเช่นเดียวกับข้อ 7. และข้อ 8. เช่นนี้ไปเรื่อยๆ จนกว่าเครื่องยนต์เริ่มมีอาการน็อก สังเกตได้จากน็อกเซนเซอร์ หรือในกรณีที่ไม่มีน็อกเซนเซอร์สังเกตได้จากเสียงของเครื่องยนต์ มีลักษณะคล้ายกับเสียงโลหะกระทบกัน
10. ขยับสไลด์ไทมิ่ง หรือ จานจ่าย ให้จุดระเบิดล่าช้าลง แล้วล็อกให้แน่น จากนั้นให้ทดลองสตาร์ทเครื่องยนต์อีกครั้งและปฏิบัติเช่นเดียวกับข้อ 7.
11. ปฏิบัติเช่นเดียวกับข้อ 10. จนกว่าจะรู้สึกได้ว่าเครื่องยนต์มีการตอบสนองต่อการเร่งได้ดีที่สุด แล้วนำเครื่องยนต์ไปทดลองวิ่งใช้งานในขณะที่ไม่ได้บรรทุกของ และขณะบรรทุกของ เช่นเดียวกับที่เคยใช้เครื่องยนต์ดีเซล
12. ในขณะที่ใช้งานถ้าสังเกตได้ว่าเครื่องยนต์มีอาการน็อกก็ให้รีบจอดรถแล้วดับเครื่องยนต์ จากนั้นให้ปรับขยับสไลด์ไทมิ่ง หรือจานจ่าย ให้ล่าช้าลง อาการน็อกจะหายไป และถ้าอุณหภูมิไอเสียสูงเกินไป ก็ให้ขยับสไลด์ไทมิ่ง หรือจานจ่ายให้ล่วงหน้าเพิ่มมากขึ้นจนกว่าอุณหภูมิไอเสียจะลดลง (เนื่องจากยังไม่ได้มีการทดสอบหาอุณหภูมิไอเสียสูงสุดที่ไม่ทำให้เครื่องยนต์ได้รับความเสียหาย จึงไม่สามารถบอกตัวเลขที่แน่นอนได้ จากการทดสอบครั้งนี้ค่าอุณหภูมิไอเสียสูงสุดสำหรับการทดสอบที่สภาวะเดินเร่งเปิดเต็มที่เท่ากับ 725 องศาเซลเซียส โดยเครื่องยนต์ไม่ได้รับความเสียหาย)

ภาคผนวก ง

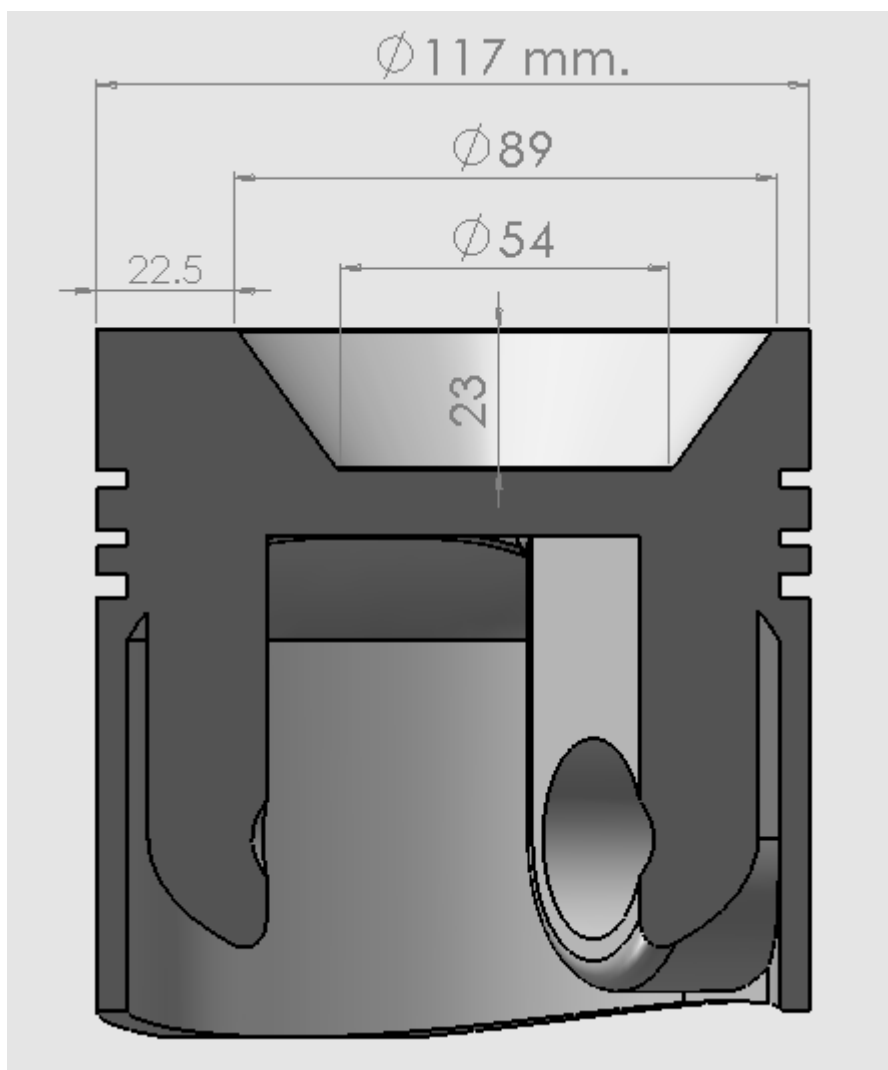
แบบหลุมลูกสูบ ปลอกหัวเทียน และตำแหน่งติดตั้งหัวเทียน เครื่องยนต์ Mitsubishi 6D16-0A
ดัดแปลงให้ใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง



ภาพผนวกที่ ๑1 ลักษณะของลูกสูบหลังการดัดแปลง



ภาพผนวกที่ ๑2 ลักษณะของลูกสูบหลังการดัดแปลง (ผ่าครึ่งซีก)



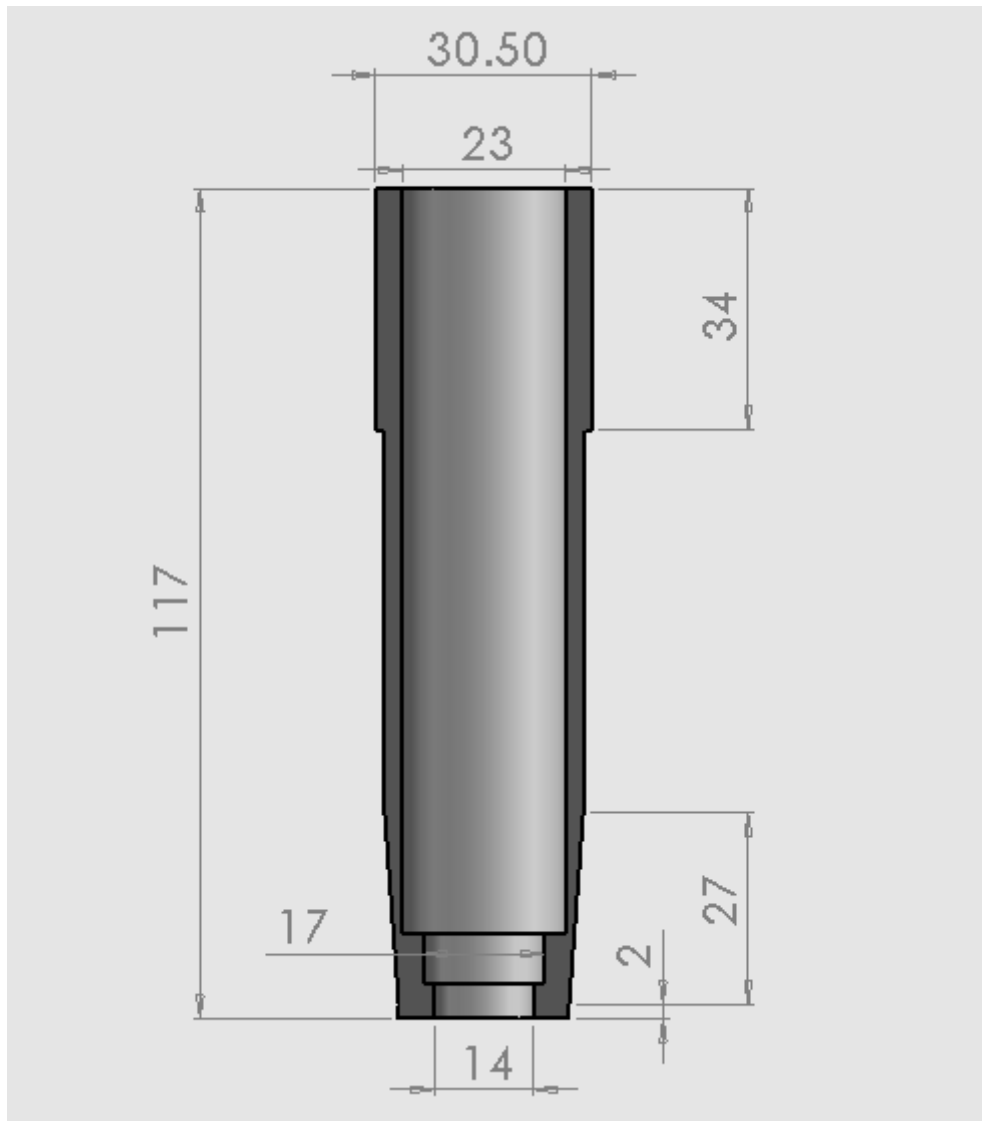
ภาพภาคผนวกที่ 3 รายละเอียดขนาดหลุมลูกสูบหลังการตัดแปลง (ผ่าครึ่งซีก)



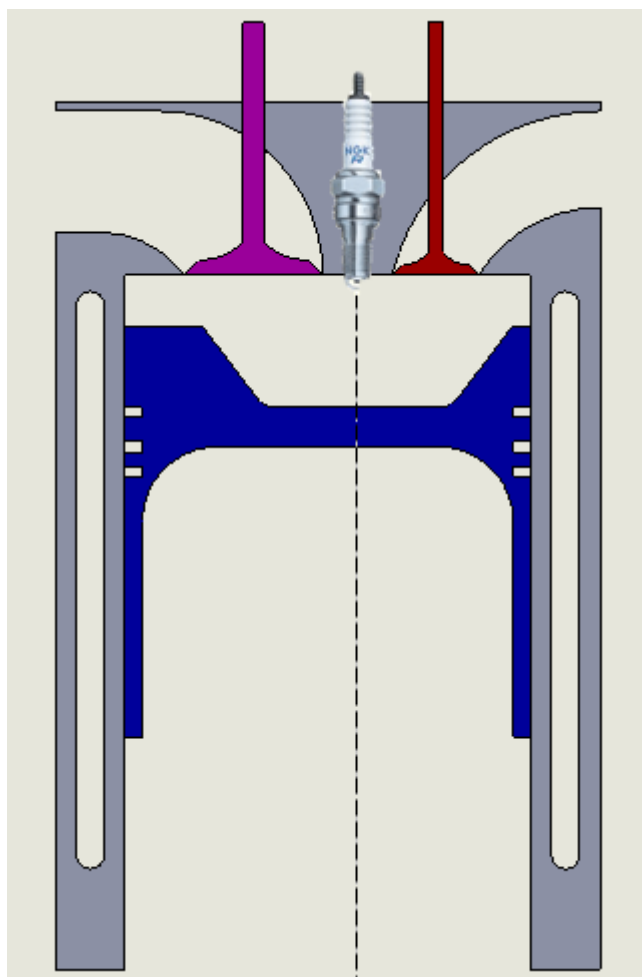
ภาพผนวกที่ ๓4 ลักษณะของปลอกหัวเทียน



ภาพภาคผนวกที่ ๓5 ลักษณะของปลอกหัวเทียน (ผ่าครึ่งซีก)



ภาพผนวกที่ ๖ รายละเอียดขนาดปลอกหัวเทียน (ผ่าครึ่งซีก)



ภาพผนวกที่ ๗ ตำแหน่งติดตั้งหัวเทียน

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล	เรือเอก ไกรสุนทร เข้มสุข
วัน เดือน ปี ที่เกิด	6 เมษายน 2519
สถานที่เกิด	จังหวัดอำนาจเจริญ
ประวัติการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) โรงเรียนนายเรือ จังหวัดสมุทรปราการ
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	ประจำกรมจเรทหารเรือ กองทัพเรือ
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	กรมจเรทหารเรือ
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-